

第 147 研究部会
船体用高張力鋼板大入熱溶接継手の
脆性破壊強度評価に関する研究
報 告 書

昭和 50 年 3 月

社 団 法 人
日 本 造 船 研 究 協 会

は し が き

本報告書は、日本船舶振興会の昭和49年度補助事業「船舶の構造・性能に関する基礎的研究」の一部として、日本造船研究協会が第147研究部会においてとりまとめたものである。

本研究部会の委員は次のとおりである。

第147研究部会委員名簿（敬称略五十音順）

部 会 長	金沢 武（東京大学）	
幹 事	池田一夫（神戸製鋼）	岩永 寛（住友金属工業）
	印藤弘郷（三井造船）	蒲地一義（山口大学）
	黒川常夫（長崎大学）	越賀房夫（日本鋼管）
	酒井啓一（石川島播磨重工業）	永井 明（日立造船）
	永井欣一（広島大学）	藤井英輔（船舶技術研究所）
	船越督己（川崎製鉄）	町田 進（東京大学）
	松村裕之（川崎重工業）	三波建一（新日本製鉄）
	矢島 浩（三菱重工業）	
委 員	青木 満（神戸製鋼）	池田 稔（川崎製鉄）
	奥田直樹（神戸製鋼）	岡野伊史（佐世保重工業）
	尾上久浩（三菱重工業）	賀来信一（日本海事協会）
	河合弘昌（三菱重工業）	木山 稔（新日本製鉄）
	佐藤邦彦（大阪大学）	栖原二郎（九州大学）
	寺井 清（川崎重工業）	中尾信彦（日本鋼管）
	中島正樹（三菱重工業）	中牟田 浩（石川島播磨重工業）
	中村春雄（住友重工業）	新村 豊（東京大学）
	西岡正美（日本造船工業会）	前中 浩（船舶技術研究所）
	松村正夫（函館ドック）	矢川勝則（佐世保重工業）
	吉永昭男（船舶技術研究所）	渡辺昌建（三菱重工業）
討議参加者	青木真一（川崎製鉄）	荒井敏夫（神戸製鋼）
	安藤 清（三菱重工業）	飯田国広（東京大学）
	井手幹雄（住友重工業）	糸賀興典（川崎重工業）
	岩田光正（広島大学）	仰木盛綱（佐世保重工業）

太田幹二(日本鋼管)
尾花皓(運輸省)
加藤豊(住友金属工業)
黄瀬利弘(三菱重工業)
工藤栄介(運輸省)
高允宝(東京大学)
阪野賢治(石川島播磨重工業)
佐藤誠(新日本製鉄)
白石圭一(日本海事協会)
末岡英利(三菱重工業)
武富孝作(神戸製鋼)
田中康浩(川崎製鉄)
豊田政男(大阪大学)
中野善文(川崎製鉄)
難波勝(神戸製鋼)
長谷部茂雄(住友金属工業)
浜中順一(石川島播磨重工業)
松下久雄(三井造船)
松本宏之(石川島播磨重工業)
三村宏(新日本製鉄)
渡辺俊彦(神戸製鋼)
渡部政幸(佐世保重工業)

岡吉則(日本海事協会)
片岡繁夫(長崎大学)
金子康弘(日本鋼管)
北田博重(日本海事協会)
黒沢千利(石川島播磨重工業)
小崎文雄(運輸省)
笹路真三(日本海事協会)
島口茂雄(三菱重工業)
白木良典(日立造船)
竹内直記(神戸製鋼)
多田益男(三菱重工業)
恒成利康(川崎重工業)
内藤良二郎(三菱重工業)
鍋谷昭生(神戸製鋼)
萩原行人(新日本製鉄)
服部堅一(住友重工業)
日野隆博(三菱重工業)
松本建男(住友重工業)
峰久節治(日立造船)
山戸一成(新日本製鉄)
渡辺信孝(神戸製鋼)

目 次

1. まえがき	1
2. 研究の目的・内容	1
3. 供試材	5
4. 供試材の靱性に関する基礎データの把握	6
4.1 丸棒引張試験	6
4.1.1 目的	6
4.1.2 試験内容	6
4.1.3 試験結果および考察	6
4.1.4 まとめ	7
4.2 硬度分布・組織調査	7
4.2.1 目的	7
4.2.2 試験内容	7
4.2.3 試験結果および考察	7
4.2.4 まとめ	8
4.3 V-ノッチシャルピー試験	8
4.3.1 目的	8
4.3.2 試験内容	9
4.3.3 試験結果および考察	9
4.3.4 まとめ	10
4.4 再現熱サイクル試験	11
4.4.1 目的	11
4.4.2 試験内容	11
4.4.3 試験結果および考察	11
4.4.4 まとめ	13
4.5 小形COD曲げ試験	13
4.5.1 目的	13
4.5.2 試験内容	13
4.5.3 試験結果および考察	14
4.5.4 まとめ	17

5. 脆性破壊発生に関する研究	18
5.1 中央切欠(板厚貫通)大形引張試験	18
5.1.1 目的	18
5.1.2 試験内容	18
5.1.3 試験結果および考察	19
5.1.4 まとめ	21
6. 脆性破壊伝播に関する研究	21
6.1 中形伝播試験(その1) — 斜め継手伝播試験	21
6.1.1 目的	21
6.1.2 試験内容	21
6.1.3 試験結果および考察	22
6.1.4 まとめ	24
6.2 中形伝播試験(その2) — 伝播特性試験	24
6.2.1 目的	24
6.2.2 試験内容	24
6.2.3 試験結果および考察	25
6.2.4 まとめ	26
6.3 大形伝播試験	26
6.3.1 目的	26
6.3.2 試験内容	27
6.3.3 試験結果および考察	27
6.3.4 まとめ	33
6.4 伝播現象に関する基礎研究	33
6.4.1 目的	33
6.4.2 試験内容	33
6.4.3 試験結果および考察	36
6.4.4 まとめ	46
7. 船体残留応力分布	48
7.1 基礎試験	48
7.1.1 目的	48
7.1.2 試験内容	48
7.1.3 試験結果および考察	50
7.1.4 まとめ	52

7.2	実船殻ブロック試験	52
7.2.1	目的	52
7.2.2	試験内容	53
7.2.3	試験結果および考察	53
7.2.4	まとめ	55
7.3	X線応力測定装置の検討	55
8.	大入熱溶接使用実績調査	57
9.	むすび	60
	参考文献	61

1. まえがき

日本造船研究協会第147研究部会は、「船体用高張力鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度評価に関する研究」をテーマとして、昭和48年4月に発足したものである。

この研究の目的は、巨大船に実用されている船殻材（特に50キロ級高張力鋼板）についてのエレクトロガス溶接継手、エレクトロスラグ溶接継手およびその他の高能率大入熱溶接継手を対象に、継手の破壊靱性を把握し、船殻の致命的損傷である脆性破壊による重大損傷防止の基礎検討資料を得ることである。

なお、本研究は、委員会において審議決定した研究計画の基本方針にもとづき、実験担当委員を中心とした委員会・幹事会をたびたび開催し、詳細な技術的検討を行なって実施したものである。研究の全体計画は、後述のように3ヶ年にわたるものであるが、本報告書は、その第2年度分の経過報告書としてとりまとめたものである。

2. 研究の目的・内容

近年、船体の巨大化・短期建造体制確立と相俟って、船殻溶接工作技術の進歩は目覚ましいものであり、エレクトロガス溶接、エレクトロスラグ溶接、多電極ワソサイドサブマージドアーク溶接等、種々の高能率自動溶接法が開発され、今後ますます高能率化を旨とした大入熱溶接法が研究されつつある。

大入熱によるボンド部脆化の傾向は、現状船殻材においては、引張り強さの高い材料ほど敏感であると考えられ、最近の50キロ級高張力鋼使用量増大の傾向から、本問題は早急に解決する必要がある。

以上の観点から、巨大船に実用されている船殻材（一般船体用軟鋼板、船体用50キロ級高張力鋼板）についてのエレクトロガス溶接継手、エレクトロスラグ溶接継手およびその他の高能率大入熱溶接継手等を対象に継手の破壊靱性を把握し、船殻の致命的損傷である脆性破壊による重大損傷防止の基礎検討資料を得るため、昭和48年4月より3ヶ年計画で下記内容の研究に着手した。

1) 供試材の靱性に関する基礎データの把握

従来から実施されているVノッチシャルピー試験、小形COD試験等により把握する。

2) 脆性破壊発生に関する研究

中央切欠（板厚貫通）大形引張試験（中央切欠型ディープノッチ試験）、十字型拘束引張試験等により脆性破壊発生特性を把握する。

3) 脆性破壊伝播に関する研究

脆性亀裂伝播現象に関する基礎研究により、従来から実施されている二重引張試験、ESSO試験等実験室的試験結果から、実船殻での亀裂伝播現象推定の上での問題点の解明を行なう。さらに、前記供試鋼母材および溶接継手ボンド部についての亀裂伝播特性を中形伝播試験、大形伝播試験等により把握、実船殻大入熱溶接部の脆性亀裂伝播現象を総合的に検討、把握する。

4) 船体残留応力分布の把握

前記大入熱溶接継手部についての大形伝播試験結果解析に供すべく、供試試験片での残留応力分布を基礎試験により計測する。さらに、実船殻構造でのこれら大入熱溶接部の脆性破壊強度を判断するための基礎資料に供すべく、実船殻大入熱溶接部の残留応力分布を実船殻ブロック試験にて把握する。

5) 大入熱溶接使用実績調査

船殻溶接工作に大入熱溶接が実用され始めて既に約10年経過している。したがって、大入熱溶接された船の就航実績が安全実績ともみなされることから、国内の代表的な造船所について、大入熱溶接の使用実績ならびに実状を調査、把握する。

なお、昭和49年度はその第2年次として、以下の4点を中心に実施した。

1) 溶接継手の脆性破壊強度把握

昭和48年度の研究で、KAS鋼板(板厚25.4mm)・K5D鋼板(板厚25.4mm)の電ロガス溶接継手、KAS鋼板(板厚25.4mm)の電ロスラグ溶接継手およびK5D鋼板(板厚25.4mm)のCES溶接継手等についての脆性破壊強度を把握した。¹⁾

引き続き昭和49年度研究においては、KAS鋼板(板厚25.4mm)・K5D鋼板(板厚25.4mm)のVASCON-II法溶接継手ならびにデルタオッシレート法溶接継手、KDK鋼板(板厚25.4mm)・K5D鋼板(板厚25.4mm)の3電極片面1層溶接継手(3電極ワソサイドワソパスサブマージドアーク溶接継手)およびK5D鋼板(板厚25.4mm)の電ロガス溶接継手等についての脆性破壊強度を把握した。

2) 継手にそっての脆性破壊伝播現象に関する基礎研究

脆性亀裂伝播現象に関する基礎研究として、動光弾性試験を実施した。すなわち、突き合せ溶接継手にそって、しかも音速に比べかなり低速(1/10程度)で伝播する脆性亀裂についての破壊力学による解析に、溶接残留応力の再配分を把握する必要がある。したがって、残留応力をもったエポキシモデルでの亀裂伝播にともなう応力状態の測定を実施した。

3) 実船殻での残留応力分布の測定

実船殻構造での大入熱溶接部の脆性破壊強度を推定するための基礎資料に供すべく、実船殻溶接部の残留応力分布を実測した。

4) 大入熱溶接使用実績調査

国内の代表的な造船所に対し、大入熱溶接の使用実績ならびに実状をアンケートにより調査した。

さらに、昭和49年度研究実施内容を以下に記す。

供試鋼板(板厚は全て25.4mm, 各1Charge, ただしK5D鋼板のみは2Charge)

一般船体用軟鋼板 : KAS鋼板(As Rolled), KDK鋼板(As Rolled)

船体用50キロ級高張力鋼板 : K5D鋼板(As Rolled)

対象溶接法

VASCON-II法溶接 : KAS鋼板, K5D鋼板

デルタオッシレート法溶接 : KAS鋼板, K5D鋼板

3電極片面1層溶接 : KDK鋼板, K5D鋼板

(3電極ワソサイドワソパスサブマージドアーク溶接)

エレクトロガス溶接 : K5D鋼板

1) 供試材の靱性に関する基礎データの把握

1.1) 丸棒引張試験

(1) 供試3鋼種の母材について、室温 \sim -196 $^{\circ}$ Cの温度範囲で丸棒引張試験を実施した。

(2) 供試3鋼種について、エレクトロガス溶接継手を除く6条件の溶接継手から溶接金属の丸棒引張試験片を採取し、室温 \sim -196 $^{\circ}$ Cの温度範囲で引張試験を実施した。

1.2) 硬度分布・組織調査

供試3鋼種について、エレクトロガス溶接継手を除く6条件の溶接継手の1/2も部と表面から2mmの位置の硬度分布(Hv)を測定した。また、顕微鏡組織を調査した。

1.3) V-ノッチシャルピー試験

(1) 供試3鋼種の母材について、1/2も部から採取した試験片により、遷移曲線を求めた。

(2) 供試3鋼種について、エレクトロガス溶接継手を除く6条件の溶接継手に対して、1/2も部から採取し、溶接金属中央, ボンド, HAZ 2mm, HAZ 4mm, HAZ 8mmの各位置にノッチ加工した試験片により遷移曲線を求めた。

1.4) 再現熱サイクル試験

再現熱サイクルにより、溶接入熱(冷却速度)とHAZの靱性劣化程度との関係を求めた。供試2鋼種(KAS鋼板, K5D鋼板)について、各9条件の再現熱サイクルを与えた後、Vノッチシャルピー試験を実施し、遷移曲線を求めた。

1.5) 小形COD曲げ試験

(1) 供試3鋼種の母材について、小形試験片による3点曲げ試験を実施し、脆性破壊発生に関する特性値の一つである限界CODを求めた。

(2) 供試3鋼種のエレクトロガス溶接継手を除く6条件の溶接継手について、溶接金属中央、ボンドの各位置にノッチ加工した試験片により、3点曲げ試験を実施し、限界CODを求めた。

2) 脆性破壊発生に関する研究

2.1) 中央切欠(板厚貫通)大形引張試験

(1) 供試3鋼種の母材について、標準中央切欠き型試験片(2B=400mm, 2C=160mm)によるディープノッチ試験を実施し、脆性亀裂発生特性を把握した。

(2) 供試3鋼種のエレクトロガス溶接継手を除く6条件の溶接継手について、溶接金属中央、ボンドの各位置にノッチ加工した標準中央切欠き型試験片(2B=400mm, 2C=160mm)によるディープノッチ試験を実施し、脆性亀裂発生特性を把握した。

3) 脆性破壊伝播に関する研究

3.1) 中形伝播試験(その1) - 斜め継手伝播試験

供試K5D鋼板のエレクトロガス溶接継手について、ボンド部の非常にせまい領域の切欠き靱性の劣化が、脆性亀裂伝播を容易にするか否かを、幅1,000mm程度の斜め継手試験片を供試して調査した。

3.2) 中形伝播試験(その2) - 伝播特性試験

供試K5D鋼板の母材およびエレクトロガス溶接継手ボンド部について、同一条件における脆性亀裂伝播特性を、幅1,400mm以上の試験片を供試して把握した。

3.3) 大形伝播試験

幅1,500mm以上の大形伝播試験片を供試し、供試3鋼種の母材および、エレクトロガス溶接継手を除く6条件の溶接継手ボンド部について、脆性亀裂伝播停止特性を把握した。

3.4) 伝播現象に関する基礎研究

残留応力をもったエポキシモデルでの亀裂伝播にともなう応力状態の測定、ならびに継手の大形伝播試験片を用いての光弾性皮膜法による亀裂伝

播にともなう応力状態の測定を実施した。

なお、供試エポキシモデルの寸法を400mm幅×800mm長程度とし、

- ① σ_{AP} / σ_R
- ② ノッチ位置
- ③ 荷重条件(定荷重, 定変位)

等の影響を把握した。

4) 船体残留応力分布

4.1) 基礎試験

先に記した大形伝播試験片のうち、KAS鋼板 VASCON-II 法溶接継手、KDK鋼板3電極片面1層溶接継手およびK5D鋼板デルタオッシレート法溶接継手試験片について、残留応力分布を測定した。

4.2) 実船殻ブロック試験

実船殻ブロックを使用し、溶接部の残留応力分布を実測した。

4.3) X線による残留応力測定

前記基礎試験に供したKAS鋼板 VASCON-II 法溶接継手、K5D鋼板デルタオッシレート法溶接継手試験片、ならびに実船殻ブロックの溶接部について、X線による残留応力測定を試み、種々検討した。

5) 大入熱溶接使用実績調査

大入熱溶接の使用実績ならびに実状について、国内の代表的な造船所35工場に対し、アンケートによる調査を実施した。

なお、以上の試験は表2.1に示す分担で実施された。

3. 供試材

今日、巨大船の船殻に多量に使用されている船体用鋼板の代表として、一般船体用軟鋼板のKAS鋼板・KDK鋼板(板厚25.4mm, As Rolled材)各1 Chargeと、船体用50キロ級高張力鋼板のK5D鋼板(板厚25.4mm, As Rolled材)2 Chargeを供試した。

供試材の化学成分ならびに機械的性質を表3.1に示す。

また、昭和49年度に実施された各種試験の試験片に当てられた供試材板取りを図3.1～図3.4に示す。

先にも記したが、昭和49年度はKAS鋼板・K5D鋼板のVASCON-II法溶接継手、デルタオッシレート法溶接継手およびKDK鋼板・K5D鋼板の3電極片面1層溶接継手、ならびにK5D鋼板のエレクトロガス溶接継手を研究の対象にした。各継手の溶接条件は、委員会で十分検討された後表3.2に示すごとく決定され、

昭和49年度供試試験片の継手は、全て表3.2の溶接条件で溶接された。

4. 供試材の靱性に関する基礎データの把握

4.1 丸棒引張試験

4.1.1 目的

KAS鋼板、K5D鋼板およびKDK鋼板の母材、ならびにそれらにVASCONE-II法溶接、デルタオッシレート法溶接あるいは3電極片面1層溶接をした場合の溶接金属の機械的性質を調べるために、低温において丸棒引張試験を実施した。

4.1.2 試験内容

図4.1.1に示す丸棒引張試験片を、母材についてはその長さ方向を鋼板の圧延方向とし、板厚中心から、また溶接金属については、その長さ方向を溶接線方向とし、溶接金属の中心から採取した。

試験は室温から -196°C の範囲で行ない、冷媒には液体窒素、フロン、ドライアイス、アルコール等を用い、所定の温度に約15分間保持した後、引張荷重をかけ静的に破断させ、降伏応力（あるいは0.2%耐力）、引張強さ、伸びおよび絞りを測定した。

4.1.3 試験結果および考察

試験結果をまとめて表4.1.1～表4.1.3に示す。また機械的性質と温度の関係を、母材、VASCONE-II法溶接金属、デルタオッシレート法溶接金属、3電極片面1層溶接金属に対して図4.1.2～図4.1.6に示す。

図より降伏応力、引張強さ、伸びおよび絞りの温度依存性はいずれの鋼種、溶接法の場合にもほぼ同様な傾向を示している。

機械的性質のうち降伏応力の温度依存性について、降伏応力の対数と絶対温度の逆数の関係で整理し直したものを、各鋼種毎に図4.1.7～図4.1.9に示す。

図からもわかるように、試験を行なった全ての温度範囲にわたって降伏応力の対数と絶対温度の逆数の関係を一つの直線で表示するにはやや無理があるため、ここでは比較的良い相関があると考えられる室温から -110°C （または -150°C ）の温度範囲についてのみ、実験式を最小二乗法で求め図中の表に示した。

K5D鋼板のVASCONE-II法溶接金属の降伏応力はわずかに母材の降伏応力より小さいが、他のいずれの溶接法においても溶接金属の方が高い強度を示している。同一溶接法でも当然のことながらK5D鋼板の溶接金属の方がKAS鋼板あるいはKDK鋼板の溶接金属より降伏応力は大きい。

また一般に、降伏応力の温度依存性をみると、強度（例えば室温降伏応力）

が低い程温度依存性は大きく、低温になるにしたがっての降伏応力の増加は大きい。

4.1.4 まとめ

KAS鋼板、K5D鋼板、KDK鋼板の母材、およびそれらのVASCON-II法溶接、デルタオッシレート法溶接あるいは3電極片面1層溶接による溶接金属の機械的性質の温度特性を調べるために、低温において丸棒引張試験を実施し、降伏応力、引張強さ、伸びおよび絞りを測定した。その結果、いずれの鋼種、溶接法においても、機械的性質はほぼ同様な温度依存性を示した。また降伏応力の温度依存性は、強度が低い程大きいことがわかった。

4.2 硬度分布・組織調査

4.2.1 目的

供試鋼板について各種溶接法による材質変化を把握するために、溶接継手部のビッカース硬度分布ならびに顕微鏡組織調査を行ない、溶接継手部の靱性評価に関する参考データを得ることを目的とした。

4.2.2 試験内容

調査は、KAS鋼板(板厚25.4mm)・K5D鋼板(板厚25.4mm)のVASCON-II法溶接継手部ならびにデルタオッシレート法溶接継手部について、およびKDK鋼板(板厚25.4mm)・K5D鋼板(板厚25.4mm)の3電極片面1層溶接継手部について行なった。

試験片は、各溶接継手とも溶接始端部より約1,000mmの位置から採取した。

ビッカース硬度調査は荷重10kgにて、各溶接継手部の板厚中央と表裏より2mmの位置の硬度分布を測定した。組織調査は、光学顕微鏡により倍率100倍にて行ない、4.3項に記すV-ノッチシャルピー試験片のノッチ先端部に相当する位置の組織を重点的に撮影した。ビッカース硬度測定および顕微鏡組織撮影位置を図4.2.1に示す。

4.2.3 試験結果および考察

各溶接継手部のビッカース硬度分布の測定結果を図4.2.2～図4.2.7に、これらの結果を取りまとめたものを表4.2.1に示す。写真4.2.1～写真4.2.6に各溶接継手部断面のマクロおよびミクロ組織を示す。

以上の結果より次のことが明らかになった。

1) 各溶接継手板厚中央部において、ボンド部および熱影響部の最高硬さは、KAS鋼板VASCON-II法溶接、デルタオッシレート法溶接の場合それぞれ162 Hv、158 Hvで母材より約30 Hv程度高く、KDK鋼板3電極片面1層溶接の場合、151 Hvで母材より約15 Hv程度高くなっている。また、K5D鋼板VASCON-II法溶接、デルタオッシレート法溶接および3電極片面1層溶接の場合それぞれ

185 Hv, 196 Hv, 185 Hvで母材よりも約35 Hv程度高くなっている。さらに、溶接金属の硬さは、KAS鋼板 VASCON-II法溶接、デルタオッシレート法溶接、およびKDK鋼板3電極片面1層溶接の場合、平均値で母材よりもそれぞれ約25 Hv, 40 Hv, 25 Hv, K5D鋼板の場合それぞれ10 Hv, 0 Hv, 55 Hv程度高くなっている。

2) 各溶接継手ともに、通常の溶接法に比べてマクロ組織における熱影響部の幅は広く、板厚中央部において約10~14 mm程度である。ミクロ組織は、各溶接継手部ともに溶接による入熱のためにボンド部およびその外側の熱影響部には過熱組織であるウイドマソ組織が認められ、かつ結晶粒が異常に粗大化した領域がある。すなわちこの領域は、塊状あるいは棒状に大きく成長した初析フェライトとそれに囲まれた中間段階組織が現われており、フェライトの析出成長形態と中間段階組織は鋼種と溶接法により夫々異なっている。たとえば、KAS鋼板、KDK鋼板に比べK5D鋼板の方がフェライトが少なくなり、より緻密な組織になっている。この結晶粒が粗大化した領域は母材に比べかなり脆化しているものと予想される。

3) 組織的に認められる脆化領域は、板厚中央部において、VASCON-II法溶接継手の場合ボンドから約4~5 mmまでの範囲であり、デルタオッシレート法溶接継手の場合約3~4 mmまでの範囲で、3電極片面1層溶接継手の場合約5 mmまでの範囲となっている。いずれも通常の溶接に比べてかなり広範囲にわたって脆化していることが推定される。

4) 各溶接継手ともに、結晶粒粗粒化領域の外側には再結晶による細粒化域が認められ、粗粒化域に比べて靱性の回復が予想される。この細粒化域は、VASCON-II法溶接継手の場合ボンドから6~9 mmの間に、デルタオッシレート法溶接継手の場合6~10 mmの間および3電極片面1層溶接の場合7~12 mmの間に存在している。

4.2.4 まとめ

各溶接継手とも通常の溶接に比べてボンド部および熱影響部の硬さ上昇の程度は少なく、熱影響部の幅は広くかつミクロ組織は結晶粒の粗粒化域が広く、ボンドおよびその近傍の結晶粒は異常に粗大化し組織的にも脆化していることが予想される。

昭和48年度に実施した試験結果と比較すると、ミクロ組織において本質的な差違は認められないが、ボンド部の結晶粒は幾分小さくなっている。

4.3 V-ノッチシャルピー試験

4.3.1 目的

供試鋼板について、溶接入熱量108~161 KJ/cm程度の各種溶接継手部のV-

ノッチシャルピー衝撃試験を実施し、吸収エネルギー～温度、脆性破面率～温度遷移曲線を求め、溶接継手部の靱性に関する基礎データを得ることを目的とした。

4.3.2 試験内容

試験は、KAS鋼板(板厚25.4mm)・K5D鋼板(板厚25.4mm)のVASCON-II法溶接継手部ならびにデルタオツシレート法溶接継手部、KDK鋼板(板厚25.4mm)・K5D鋼板(板厚25.4mm)の3電極片面1層溶接継手部について行なった。

V-ノッチシャルピー試験片は、母材および各溶接継手部の板厚中央より採取し、溶接金属中央部、ボンド部およびボンドから2mm, 4mm, 8mmの熱影響部各位置の板厚断面にノッチを加工した。なお各試験片を採取後、マクロエッチしボンドの位置を確認後所定の位置にノッチ加工した。試験片採取要領およびノッチ加工要領を図4.3.1に示す。

4.3.3 試験結果および考察

母材および各溶接継手部より採取した試験片によるV-ノッチシャルピー衝撃試験結果を表4.3.1～表4.3.6に示す。これらの試験結果より得られた吸収エネルギー～温度ならびに脆性破面率～温度遷移曲線を図4.3.2～図4.3.34に示す。また、これらの遷移曲線を各溶接継手毎にまとめたものを図4.3.35～図4.3.40に示す。各溶接継手部の溶接金属中央部、ボンド部および熱影響部に対するV-ノッチシャルピー衝撃試験結果の各種遷移温度(vTr_{15} , vTr_{35} , vTr_E , vTr_s)およびシエルフエネルギー値を表4.3.7に示す。さらに溶接継手における50%脆性破面率遷移温度 vTr_s とノッチ位置との関係を図4.3.41および図4.3.42に示す。

以上のV-ノッチシャルピー試験により概略次のことが明らかになった。

1) 各溶接継手とも、ボンドおよびその近傍の熱影響部は靱性劣化が著しい。その理由は4.2項で述べたミクロ組織に見られるごとく、溶接入熱が比較的大きく冷却速度が遅くなったため、この部分の結晶粒が粗大化し、中間段階組織が現われるとともに大きく成長したフェライトの析出等により靱性劣化したものと考えられる。

一方細粒化域では靱性の劣化は認められず、むしろ母材よりも良くなっている。この部分では加熱温度がボンドおよび粗粒化域に比べて低いため、一度オーステナイトに変態したのち微細化した再結晶粒が粗大化しないうちに冷却されたため、細粒化により靱性が向上したものと思われる。

2) V-ノッチシャルピー衝撃試験結果の吸収エネルギーについて、自動溶接継手の溶接金属に対するNK規格要求値 $vE_{20} \geq 3.5 \text{ kg-m}$ (KAS鋼), $vE_0 \geq 3.5 \text{ kg-m}$ (KDK鋼), $vE_{-7} \geq 3.5 \text{ kg-m}$ (K5D鋼)を適用すると以下のようになる。

すなわち、KAS鋼板 VASCON-Ⅱ法溶接継手・デルタオッシレート法溶接継手、およびKDK鋼板3電極片面1層溶接継手の場合、継手部のいずれの位置でも溶接金属に対するNK規格要求値を満足している。同様に、K5D鋼板 VASCON-Ⅱ法溶接継手の場合も、いずれの位置でも溶接金属に対するNK規格要求値を満足している。一方K5D鋼板デルタオッシレート法溶接継手の場合、ボンドから2mm、4mmの熱影響部、またK5D鋼板3電極片面1層溶接継手の場合、ボンド部、ボンドから2mm、4mmの熱影響部等では、溶接金属に対するNK規格要求値を満足していない。

3) 各溶接継手のボンド部およびその近傍の結晶粒粗粒化域の50%脆性破面率遷移温度 $vTrs$ は、いずれも母材より高温側へ移動している。ボンド部およびボンドから2mmの熱影響部の $vTrs$ は、母材に比べ、KAS鋼板 VASCON-Ⅱ法溶接継手では $25^{\circ}\text{C}\sim 32^{\circ}\text{C}$ 、デルタオッシレート法溶接継手では $10^{\circ}\text{C}\sim 22^{\circ}\text{C}$ 、KDK鋼板3電極片面1層溶接継手では $27^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 、さらにK5D鋼板 VASCON-Ⅱ法溶接継手では $37^{\circ}\text{C}\sim 39^{\circ}\text{C}$ 、デルタオッシレート法溶接継手では $59^{\circ}\text{C}\sim 84^{\circ}\text{C}$ 、3電極片面1層溶接継手では $75^{\circ}\text{C}\sim 79^{\circ}\text{C}$ それぞれ上昇している。

4) ボンド部の $vTrs$ 上昇の程度が熱影響部より少ない傾向を示すものもあるが、溶接金属形状がV形となったためノッチ部に溶接金属が含まれ、その影響が現われたものと考えられる。

5) ボンド部およびその近傍の粗粒化領域の靱性劣化の程度は、鋼種および溶接法により異なる。すなわち、KAS鋼板、KDK鋼板溶接継手に比して、K5D鋼板溶接継手の方が靱性劣化が著しい。これは主として鋼板の含有成分の差に起因すると考えられる。また、K5D鋼板デルタオッシレート法溶接継手および3電極片面1層溶接継手に比べて、入熱量の少ないVASCON-Ⅱ法溶接継手の方が靱性劣化の程度は少ない。デルタオッシレート法溶接については、その後の検討の結果、入熱量を低めることも可能であり、それにより継手靱性の劣化程度も改善できることが確かめられている。

6) 溶接金属の $vTrs$ は、KAS鋼板の溶接継手を除き全般的に母材よりも高温側にある。これはノッチを溶接金属中央部に入れたためと考えられ、その程度は鋼種、溶接材および溶接法により異なる。

7) VASCON-Ⅱ法溶接およびデルタオッシレート法溶接などは、従来の高能率立向き自動溶接法に比べて入熱量の小さい溶接が可能である。したがって、適当な開先と入熱を選択すれば、ボンド部およびその近傍の熱影響部の靱性劣化の程度は改善できると推定される。

4.3.4 まとめ

V-ノッチシャルピー試験結果から、供試したVASCON-Ⅱ法溶接継手、デルタオッシレート法溶接継手および3電極片面1層溶接継手では、ボンド部

およびその近傍の熱影響部の結晶粒粗粒化領域では、靱性が劣化していることが認められた。また、靱性が劣化している範囲は、通常の溶接に比べて広いことが明らかになった。

昭和48年度に実施されたエレクトロガス溶接継手の結果と比較すれば、靱性劣化の程度は、KAS鋼板溶接継手の場合大差なく、K5D鋼板溶接継手の場合若干改善されているといえる。

4.4 再現熱サイクル試験

4.4.1 目的

熱サイクル再現装置を用いて、各種溶接法による溶接継手熱影響部に相当する熱サイクルを付与した供試鋼のV-ノッチシャルピー衝撃試験により、吸収エネルギーおよび脆性破面率の遷移温度曲線を求め、溶接継手部の靱性に関する基礎データを得ることを目的とした。

4.4.2 試験内容

試験は、KAS鋼板およびK5D鋼板について、母材板厚中央より採取した再現熱サイクル試験片に所定の熱サイクルを与えた後、V-ノッチシャルピー衝撃試験を実施した。再現熱サイクル試験片ならびにV-ノッチシャルピー試験片の採取要領を図4.4.1に示す。

サブマージドアーク溶接、狭開先エレクトロガス溶接、エレクトロガス溶接、CES溶接の各種溶接継手熱影響部の熱サイクルをもとに、9種類の熱サイクル曲線を設定し、溶接熱サイクル再現装置により所定の熱サイクルを与えた。

溶接継手ボンド近傍に相当する再現熱サイクルとしては、最高到達温度を1,350℃一定とし、800℃～500℃の冷却時間を12秒～300秒の間で5条件設定した。また、エレクトロガス溶接継手熱影響部に相当する熱サイクルについては、最高到達温度が約800℃以上となる範囲において、800℃～500℃の冷却時間がほぼ一定となることから、これを168秒一定として最高到達温度を1,300℃～800℃の間で4条件設定した。表4.4.1に再現熱サイクル試験条件を示す。

図4.4.2～図4.4.3は、各種溶接継手のボンドおよび熱影響部で実測した熱サイクル曲線であり、これをもとに設定した熱サイクル曲線を図4.4.4～図4.4.5に示す。

4.4.3 試験結果および考察

KAS鋼およびK5D鋼の各種溶接継手のボンド近傍および熱影響部の、再現熱サイクル試験により得られた顕微鏡組織を、写真4.4.1～写真4.4.2に示す。

KAS鋼の最高到達温度を1,350℃一定として、冷却速度を種々変化させたA～Eにおいて、冷却速度の最も速いA（サブマージドアーク溶接，H.I.，22.5 kJ/cm）

では、粒界の初析フェライト+中間組織を呈して結晶粒は小さく、硬度は198 Hv と高くなっている。また、その他のB(サブマージドアーク溶接, H.I., 65.7 kJ/cm), C(狭開先エレクトロガス溶接, H.I., 86.4 kJ/cm), D(エレクトロガス溶接, H.I., 148 kJ/cm), およびE(CES溶接, H.I., 266 kJ/cm)では、粒界の初析フェライトと中間組織にウィッドマン組織の混在した組織で、いづれも本質的な差違はない。しかし、冷却速度が遅くなるほど結晶粒は粗大化している。硬度は151 Hv~164 Hv 程度である。

エレクトロガス溶接継手熱影響部に相当する冷却速度で、最高到達温度を変化させたものでは、最高到達温度が高くなるほど結晶粒は粗大化しているが、F(最高到達温度1,300°C), およびG(最高到達温度1,200°C)では、前述のB~Eと同様の組織である。しかし、最高到達温度が低いH(最高到達温度1,000°C)およびI(最高到達温度800°C)では、フェライト+パーライトの微細な組織を呈していて、硬度は140 Hv である。

K5D鋼の最高到達温度を1,350°C一定として、冷却速度を種々変化させたA~Eにおいて、冷却速度の最も速いA(サブマージドアーク溶接, H.I., 22.5 kJ/cm)では、下部ベーナイト組織を呈して硬度も266 Hv と高くなっている。つぎに、比較的冷却速度の速いB(サブマージドアーク溶接, H.I., 65.7 kJ/cm)およびC(狭開先エレクトロガス溶接, H.I., 86.4 kJ/cm)では、上部ベーナイト組織を呈して硬度も約200 Hv と低下している。大入熱溶接の冷却速度に相当するD(エレクトロガス溶接, H.I., 148 kJ/cm)およびE(CES溶接, H.I., 266 kJ/cm)では、粒界に初析フェライトがあらわれウィッドマン組織を呈して、硬度も約180 Hv と最も低くなっている。

エレクトロガス溶接継手熱影響部に相当するF~Iにおいて、F(最高到達温度1,300°C)では、ボンド近傍Dと差違のない組織であり、これより若干結晶粒が小さくなっているものがG(最高到達温度1,200°C)である。H(最高到達温度1,000°C)およびI(最高到達温度800°C)では、フェライト+パーライトの細粒化された組織を呈している。これらは最高到達温度が低下するに従って、179 Hv~148 Hv と硬度は順次低下している。

再現熱サイクル試験片のV-ノッチシャルピー試験結果を、表4.4.2~表4.4.3に示す。また、図4.4.6~図4.4.23は吸収エネルギーおよび脆性破面率の遷移温度曲線を示したもので、これらをまとめて図4.4.24~図4.4.27に示す。表4.4.4は、各種熱サイクルについての各種遷移温度(v_{Trs} , v_{TrE} , v_{Tr35} , v_{Tr15})およびシエルフエネルギー値を示す。さらに、800°C~500°Cの間の冷却時間ならびに最高到達温度と各種遷移温度の関係を図4.4.28~図4.4.31に示す。

以上の再現熱サイクルV-ノッチシャルピー試験結果よりつぎのことが明らか

かとなった。

1) 最高到達温度を $1,350^{\circ}\text{C}$ 一定として、 800°C ～ 500°C の冷却時間を12秒～300秒の間で変化させたものは、KAS鋼およびK5D鋼ともに全て母材に較べて著しく靱性が劣化しており、冷却速度の差違による影響はほとんど認められない。また、KAS鋼よりもK5D鋼の方が熱サイクルによる靱性劣化が大きい。たとえばボンドの熱サイクルを与えた場合の母材からの破面遷移温度の上昇は、KAS鋼では 41°C ～ 64°C であるのに対して、K5D鋼では 74°C ～ 82°C である。

2) KAS鋼、K5D鋼ともに、最高到達温度が $1,200^{\circ}\text{C}$ 以上では靱性の劣化は著しいが、 $1,000^{\circ}\text{C}$ 以下では母材と同等以上の靱性を示した。

本実験に供したKAS鋼ならびにK5D鋼では、溶接継手ボンド近傍は溶接入熱の大小に関係なく靱性の劣化は避け難く、本質的には脆化領域を含むことになる。しかしながら、実際の継手で溶接入熱の小さい場合は、靱性は本試験結果より良いものと考えられる。その理由は、小入熱では必然的に多層溶接となるため、次層の再熱効果により靱性が回復向上するからである。また、単層溶接の場合でも溶接入熱を小さくするほど脆化領域も狭くなるため、シャルピー試験による靱性としては、均質な再現熱サイクル試験片の結果より幾分高い値となることもある。

4.4.4 まとめ

KAS鋼およびK5D鋼の各種溶接熱サイクル再現試験片のシャルピー試験を実施した結果、溶接入熱 22.5 kJ/cm ～ 266 kJ/cm の溶接ボンド近傍に相当する熱サイクルを加えると、冷却速度に関係なく、一様に靱性は母材より大幅に劣化する。また、KAS鋼に比較してK5D鋼の方が靱性劣化の程度は大きい。しかし、溶接入熱が 86.4 kJ/cm 以下に相当するものでは、組織的には多層溶接における次層の溶接熱で靱性が回復するものと考えられる。また、溶接入熱 148 kJ/cm の溶接熱影響部に相当する熱サイクルでは、最高到達温度が $1,200^{\circ}\text{C}$ 以上の範囲は靱性の劣化が著しいが、 $1,000^{\circ}\text{C}$ 以下では母材と同等以上の靱性が維持されることが明らかになった。

4.5 小形COD曲げ試験

4.5.1 目的

本研究委員会共通供試鋼板の母材および溶接継手部の靱性に関する基礎データを得るため、小形試験片による3点曲げ試験を実施し、脆性破壊発生に関する特性値の一つである限界COD(δ_c)を求めることを目的とした。

4.5.2 試験内容

(1) 供試鋼板、溶接継手および試験片

供試鋼板は、板厚 25.4 mm の一般船体用軟鋼板：KAS鋼、KDK鋼および船体

用50キロ級高張力鋼板：K5D鋼である。

試験対象とした溶接継手は、KAS鋼のVASCON-II法溶接、デルタオッシレート法溶接、KDK鋼の3電極片面1層溶接およびK5D鋼のVASCON-II法溶接、デルタオッシレート法溶接、3電極片面1層溶接によるものである。

試験片は上記3鋼種の母材および各溶接継手部の溶接金属とボンド部に対する15種類で、いずれも供試鋼板から母材の圧延方向に直角にノッチが位置するように採取し、機械切削によって製作した。試験片板厚は原厚のままとし、溶接継手部試験片では表裏面の溶接余盛りを削除した。ノッチは板厚面に垂直に入れた機械加工ノッチで、長さ25mm、先端から2mmは幅0.2mmのソウカットノッチである。なお、溶接継手部試験片は両端面をマクロエッチし、溶接部形状を確認したのち、溶接金属試験片については溶接金属中心に、ボンド部試験片については板厚中心部のボンドを通るようにノッチを入れた。試験片の形状と寸法を図4.5.1に示す。

(2) 試験内容

図4.5.1の試験片の3点曲げ破壊試験を室温～-196℃の温度で実施した。試験に際しては、ノッチ先端より25mm位置のノッチ開口変位(COD)と荷重の関係を計測した(ただし、KDK鋼の3電極片面1層溶接継手部の試験片では、ノッチ先端より26.7mm位置の変位を計測した)。

破壊試験は、エチルアルコール、ドライアイスおよび液体窒素を適宜用いて、試験片を所定温度に冷却したのち行なった。温度の測定はノッチ下部にとりつけた熱電対によった。

開口変位の計測にはクリップゲージを用い、クリップゲージ変位(V_g)と荷重の関係をX-Yレコーダーで連続的に記録し、破壊時の変位(V_c)などを求めた。

4.5.3 試験結果および考察

小形COD曲げ試験結果を表4.5.1(1)～表4.5.1(8)に示す。表中で V_c の限界COD(δ_c)への変換は次に示す関係を用いて行なった。

1) $\sigma_w/\sigma_y \leq 1.5$

FEMによる計算結果を最小二乗法で近似した次式によった。

$$E\delta/\sigma_y d = 0.003916 + 0.01392(\sigma_w/\sigma_y) + 0.1224(\sigma_w/\sigma_y)^2 - 0.05658(\sigma_w/\sigma_y)^3 + 0.04321(\sigma_w/\sigma_y)^4 \text{ ----- (4.5.1)}$$

2) $\sigma_w/\sigma_y \geq 2.0$

$$\delta = \frac{V_g}{1 + (z+c)/r(d-c)} \text{ ----- (4.5.2)}$$

($r = \frac{1}{3}$ とする)

3) $1.5 < \sigma_N / \sigma_Y < 2.0$

1), 2)で得られる値の平均値をとる。

ここで δ : ノッチ先端のCOD

V_g : クリップゲージ変位

σ_N : 試験片実断面の Nominal Skin Stress

σ_Y : 降伏応力

C : ノッチ長さ

d : 試験片高さ(深さ)

x : 試験片上端面よりクリップゲージまでの距離

r : Rotational Factor

計算には、4.1項の丸棒引張試験で求められた降伏応力を用いた。ただしボンド部に関しては母材の降伏応力を用いて計算した。

図4.5.2(1)~図4.5.2(15)に各母材および各溶接継手部の δ_c と温度の関係をそれぞれ示す(○印)。図中の曲線は実験値を適宜考慮して δ_c の温度依存性を示したものである。なお、ボンド部に関しては、実験値がかなりばらついたものがあり、それらについては下限値を示す曲線を破線で記入した。同図には比較のため5.1項の中央切欠大形引張試験の δ_c と温度の関係も併記した(●印)。中央切欠大形引張試験の δ_c は次の(4.5.3)式および(4.5.4)式を用いて、大形引張試験の V_c から求めたものである。

$$\delta_c = V_c \cdot \frac{V(C)}{V(x)} \quad \text{----- (4.5.3)}$$

$$V(y) = \frac{8B\sigma_Y}{\pi^2 E} \sin \alpha \int_Y^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \chi}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha \cdot \sin^2 \chi}} \cdot \ln \left| \frac{\sin(\chi + \psi)}{\sin(\chi + \psi)} \right| d\chi \quad \text{----- (4.5.4)}$$

ここで $\sin \psi = \sin\left(\frac{\pi y}{2B}\right) / \sin \alpha$

$$\sin \psi = \sin\left(\frac{\pi C}{2B}\right) / \sin \alpha$$

$$\sin \alpha = \sin\left(\frac{\pi C}{2B}\right) / \cos\left(\frac{\pi \sigma_g}{2\sigma_Y}\right)$$

χ : 開口変位の計測位置の座標点(切欠き中心を原点とする)

C : 切欠き先端位置の座標点(切欠き中心を原点とする)

B : 試験片の半幅

σ_g : グロス応力

σ_Y : 降伏応力

なお、破壊応力（ネット）が試験片の全面降伏応力をこえた場合は、全面降伏応力に達したときの $V(c)/V(x)$ の値を用いて計算した。

これまでのいくつかの研究によって、小形COD曲げ試験と大形引張試験の δ_c と温度の関係はほぼ一致することが示されている。本試験では、供試3鋼種の母材、KAS鋼・VASCON-II法溶接継手の溶接金属およびK5D鋼・デルタオッシレート法溶接継手の溶接金属についてはほぼ満足すべき程度に一致しているとみられるが、その他のものについては両者の間には、ばらつき以上の差があるようにみられる。すなわち、相対的に低応力破壊温度域では、大形引張試験の δ_c は小形COD曲げ試験の δ_c に比べ小さくなる傾向がみられる。この傾向は両者の一致が比較的良好とみなすことのできるものにもみられるが、特に溶接継手部に関して顕著のようである。この要因の一つとして溶接残留応力が考えられる。すなわち、小形COD曲げ試験では無視できる溶接残留応力が、中央切欠大形引張試験においてはその効果が大きいことによるものであろう。大形試験片の引張軸方向には、約 10 kg/mm^2 程度の溶接残留応力が存在しており、しかも中央切欠きを試験片幅の4割も入れる場合、切欠き先端には残留応力により塑性域が形成されていると考えられる。したがって、(4.5.3)式における $V(c)/V(x)$ の値は、溶接残留応力を考慮した場合は、考慮しない場合に比べ大きく、その度合は低温域の試験に対してより大きく影響すると考えられる。しかし前述のように、溶接継手部の試験でも、小形COD曲げ試験と中央切欠大形引張試験の δ_c と温度の関係が比較的良好に一致しているものもあり、昭和50年度の第3年次研究の結果をも含め今後検討すべき問題であろう。

ボンド部の試験結果にかなりのばらつきがみられるものがあるが、これは図4.5.1に示すように、ボンド部試験片のノッチが母材、熱影響部、ボンドおよび溶接金属の各部分にまたがってはいっていることが、その一因と考えられる。実験値のばらついたものについては、小形COD曲げ試験によって実験的に得られたボンド部近傍の脆化度の評価という意味合いで、実験点の下限線として破線を引いた。ボンド部の試験結果に対する評価法を今後検討する必要がある。

図4.5.3(1)～図4.5.3(3)に図4.5.2(1)～図4.5.2(15)をもとに、母材と各溶接継手部の δ_c と温度の関係をまとめて示す。

KAS鋼については(図4.5.3(1))、約 -100°C 以下では母材と溶接部(VASCON-II法溶接およびデルタオッシレート法溶接)の δ_c の温度依存性曲線はほぼ一致し、それ以上の温度では溶接部に関するものが高温側にあり、母材に比べ溶接部の靱性の低下が認められる。

KDK鋼については(図4.5.3(2))、約 -140°C 以下では母材と溶接部(3電極片面1層溶接)の δ_c はほぼ一致し、それ以上の温度では溶接部に関するものが高温側にあり、母材に比べ溶接部の靱性の低下が認められる。

K5D 鋼については (図 4.5.3 (3))、試験した全温度域にわたって溶接部 (VASCON-II 法溶接, デルタオシレート法溶接および 3 電極片面 1 層溶接) の δ_c の温度依存性曲線は母材のそれより高温側にあり、母材に比べ溶接部の靱性の低下が認められる。

4.5.4 まとめ

KAS 鋼の母材および VASCON-II 法溶接継手, デルタオシレート法溶接継手, KDK 鋼の母材および 3 電極片面 1 層溶接継手, K5D 鋼の母材および VASCON-II 法溶接継手, デルタオシレート法溶接継手, 3 電極片面 1 層溶接継手等の小形 COD 曲げ試験を行ない、つぎのことが明らかになった。

母材に対する溶接継手部の脆化の傾向は、KAS 鋼, KDK 鋼, K5D 鋼の順に大きく、特に K5D 鋼では試験した全温度域で母材に比べ靱性の低下が認められた。

参考までに、ある特定の δ_c 値に対する温度をそれぞれの場合について求めると、概ね次表のようになる。

鋼種	溶接法	試験片	$\delta_c=0.16\text{mm}$ に対する温度 ($^{\circ}\text{C}$)	$\delta_c=0.05\text{mm}$ に対する温度 ($^{\circ}\text{C}$)
KAS	VASCON-II 法	母材	-95	-120
		溶接金属	-85	-120
		ボンド部	-65	-120
	デルタオシレート法	溶接金属	-85	-120
		ボンド部	-95	-120
KDK	3 電極片面 1 層	母材	-105	-125
		溶接金属	-60	-100
		ボンド部	-90	-115
K5D	VASCON-II 法	母材	-140	-160
		溶接金属	-105	-150
	ボンド部	-110	-145	
	デルタオシレート法	溶接金属	-50	-85
		ボンド部	-35	-75
	3 電極片面 1 層	溶接金属	-75	-110
		ボンド部	-15	-75

(注) 1) $\delta_c=0.16\text{mm}$: COD 曲げ試験における延性クラック発生点の COD (δ_i) に近い値

2) $\delta_c=0.05\text{mm}$: $\sigma = 15 \text{ kg/mm}^2$, $C = 40 \text{ mm}$ の条件設定で、Dugdale モデルから求めた値

また、前年度のKAS鋼とK5D鋼の母材およびそれらのエレクトロスラグ溶接継手、エレクトロガス溶接継手の試験結果と、本年度のKAS鋼とK5D鋼に関する試験結果とを、 δ_c の温度依存性曲線で比較すると、つぎのようなことがいえる。

KAS鋼に関しては、母材はほぼ一致し、溶接部については、約 -80°C 以上では大きな差はなく、それ以下の温度では本年度のものが高温側にきている。

K5D鋼に関しては、母材は約 -140°C 以上ではほぼ一致し、それ以下の温度では本年度のものがやや高温側にきている。溶接部では、デルタオッシレート法溶接の溶接金属とボンドおよび3電極片面1層溶接のボンドが前年度のものに比べ高温側にきている。

5. 脆性破壊発生に関する研究

5.1 中央切欠(板厚貫通)大形引張試験

5.1.1 目的

本研究部会の昭和49年度研究共通供試材および溶接継手について、中央切欠きつきの大形引張試験片を用いて引張破壊試験を行ない、母材、溶接ボンド部および溶接金属の脆性破壊発生特性を把握することを目的とした。

5.1.2 試験内容

(1) 試験片

中央切欠大形引張試験片の形状と寸法を図5.1.1に示す。

試験片は供試3鋼種の母材にノッチを加工したもの、ならびに供試3鋼種のエレクトロガス溶接継手を除く6条件の溶接継手の溶接金属中央、ボンドの各位置にノッチを加工したものである。試験片は母材、溶接継手ともに母材の圧延方向と引張方向が一致するように採取した。

試験片の板幅(2B)は400mm、板厚は母材については原厚のまま、溶接継手部については余盛りを削除し、母材と同じく25.4mmとした。切欠きは、板厚貫通の機械加工切欠きである。長さ(2C)は160mmで、切欠きの先端より2~3mmは0.2mm幅のソウカットノッチを加工した。ボンド部に切欠きを入れた試験片については、切欠き先端位置の正確を期するため、先端より15mmの位置を長軸端とする幅10mmの長円孔を設け、内部をエッチングし板厚の中央部におけるボンドの位置を確かめて、この位置に切欠きを加工した。

(2) 試験方法

試験片の両端を引張治具に溶接取付けして引張試験機に装着し、引張破壊試験を行なった。試験に際しては、試験片の両面に装着した冷却槽により試験片

を所定の温度に冷却した後引張荷重を加え、試験中の荷重変化および切欠きの開口変位量 (Crack Opening Displacement) の計測を行なった。

開口変位量の計測にはクリップゲージを用い、切欠き先端から7~8mmの位置の変位 (V_q) と荷重との対応を計測し、破壊時の変位 (V_c) などを求めた。また試験温度は試験片につけた熱電対により測定した。

5.1.3 試験結果および考察

表5.1.1にKAS鋼板, KDK鋼板およびK5D鋼板母材に関する試験結果を示す。

表5.1.2~表5.1.7に供試3鋼種の各種溶接継手部に関する試験結果を示す。

ここで破壊靱性値 K_c は次の (5.1.1) 式で計算した値である。

$$K_c = \sigma_g \sqrt{\pi C} \cdot f\left(\frac{C}{B}\right) \quad \text{----- (5.1.1)}$$

ただし $f\left(\frac{C}{B}\right) = \sqrt{\frac{2B}{\pi C} \cdot \tan \frac{\pi C}{2B}}$

2B: 試験片幅

2C: 切欠き長さ

σ_g : 破壊時の断面平均応力 (Gross 応力)

(5.1.1) 式は破壊応力が全面降伏応力に近い場合、あるいはそれ以上になる場合には適用が困難であるが、これらの場合にも形式的に (5.1.1) 式を適用して表5.1.2~表5.1.7中に示した。

また、切欠き先端位置での限界COD値 (ノッチテップCOD, δ_c) については、以下に示す (5.1.2) 式および (5.1.3) 式を用い、CODの計測値 V_c 値を換算したものを示している。

$$\delta_c = V_c \cdot \frac{V(C)}{V(x)} \quad \text{----- (5.1.2)}$$

$$V(y) = \frac{8B\sigma_y}{\pi^2 E} \sin \alpha \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \chi}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha \cdot \sin^2 \chi}} \cdot \ln \left| \frac{\sin(\chi + \psi)}{\sin(\chi - \psi)} \right| dx \quad \text{----- (5.1.3)}$$

ただし $\sin \psi = \sin\left(\frac{\pi y}{2B}\right) / \sin \alpha$

$$\sin \psi = \sin\left(\frac{\pi C}{2B}\right) / \sin \alpha$$

$$\sin \alpha = \sin\left(\frac{\pi C}{2B}\right) / \cos\left(\frac{\pi \sigma_g}{2\sigma_y}\right)$$

χ : 限界CODの計測位置の座標点 (切欠き中心を原点とする)

C: 切欠き先端位置の座標点 (切欠き中心を原点とする)

B: 試験片の半幅

σ_g : Gross 応力

σ_Y : 降伏応力

E: ヤング率

δ_c の計算には、4.1項の丸棒引張試験において求められた降伏点の値を用いた。ボンド部切欠き試験については、母材の降伏点の値を用いて計算した。また、全面降伏応力をこえた応力に対応する場合については、全面降伏応力に達したときの $V(c)/V(x)$ の値を用いて計算した。

図5.1.2(1)～図5.1.2(6)には、供試3鋼種とそれらの各種溶接継手について、ネット断面破壊応力と温度との関係を示した。図中の実線は実験点を適宜結んで破壊応力の温度依存性を示したものである。また、4.5項の小形COD曲げ試験で得られた δ_c 値を用い、(5.1.2)式の $V(c) = \delta_c$ とおくことにより推定した破壊応力をも一部の図に示した。継手試験片では多段の破壊を生じたものがある。図中には1次破壊 (POP-IN) に対応する応力値と最終破壊に対応する応力値を矢印で結んで示した。ただし、1次亀裂が停止したときの亀裂長さが明瞭に判定できないものについては、最終破壊応力は初期ネット断面積について求めた値を()をつけて表示した。

図5.1.3(1)～図5.1.3(6)には、供試3鋼種とそれらの各種溶接継手について、脆性破壊の発生に関する破壊靱性値 K_c と温度の関係を図示した。

図5.1.4(1)～図5.1.4(3)には、それぞれ母材、溶接金属およびボンドの破壊靱性値 K_c と温度の関係をまとめて図示した。

図5.1.2(1)～図5.1.2(6)および図5.1.3(1)～図5.1.3(6)にみられるように、低温域での破壊発生応力あるいは破壊靱性値は、母材、溶接金属、ボンドの順に低くなる傾向にある。ただし、K5D鋼板の3電極片面1層溶接継手では溶接金属とボンドの破壊靱性値に差がみられず、KDK鋼板の3電極片面1層溶接継手では、溶接金属よりもボンドの破壊靱性値が高くなっている。高温域では切欠き位置の違いによる破壊応力の差は小さく、0℃付近では母材の降伏応力よりも高い破壊応力を示している。また、母材に比べ溶接金属の降伏応力がかなり高い場合でも、溶接金属あるいはボンドの破壊応力と母材の破壊応力には降伏応力ほどの差はみられない。これは母材の方が継手部よりも限界COD値 δ_c が大きいこと、溶接金属部あるいはボンド部に切欠きがあっても、切欠き先端から離れた所では降伏応力の低い母材が降伏することが関係していると考えられる。

小形COD曲げ試験結果より推定した破壊応力と実験より得られた破壊応力を比較すれば、母材についてはかなり良い一致を示しているが、溶接金属およびボンドについては推定値の方が実験値よりも高い傾向にあり、その差は低温側で大きい。このような差が現われる一因としては、継手部に存在する荷重軸方

向の残留応力が考えられる。

図5.1.4(1)～図5.1.4(3)にみられるように、破壊靱性値は母材ではKAS鋼、KDK鋼、K5D鋼の順に、溶接金属ではデルタオキシレート法溶接、3電極片面1層溶接、VASCON-II法溶接の順に、ボンドではデルタオキシレート法溶接、VASCON-II法溶接、3電極片面1層溶接の順に高くなっている。

5.1.4 まとめ

供試鋼板の脆性破壊発生特性は、KAS鋼、KDK鋼、K5D鋼の順に良くなっている。

供試鋼板をデルタオキシレート法溶接、VASCON-II法溶接あるいは3電極片面1層溶接した場合、溶接金属およびボンドの脆性破壊発生特性は母材に比べ低下している。

溶接金属の脆性破壊発生特性は、デルタオキシレート法溶接、3電極片面1層溶接、VASCON-II法溶接の順に良くなり、ボンドについては、デルタオキシレート法溶接、VASCON-II法溶接、3電極片面1層溶接の順に高くなっている。

脆性破壊発生特性を溶接金属とボンドで比較すれば、デルタオキシレート法溶接およびVASCON-II法溶接では溶接金属が、3電極片面1層溶接ではわずかにボンド部がそれぞれ良くなっている。

小形COD曲げ試験結果より推定した中央切欠大形引張試験片の破壊応力は、母材については実験結果にほぼ一致するが、溶接金属およびボンドについては推定値の方が高くなり、その差は低温側で大きくなる傾向にある。

6. 脆性破壊伝播に関する研究

6.1 中形伝播試験(その1)－斜め継手伝播試験

6.1.1 目的

大入熱溶接継手に対して脆性亀裂がある角度をもって伝播してきた場合、その径路が溶接残留応力と脆化域の関係でどのようになるかを検討するために、引張荷重の方向に斜交する継手を有する試験片を用いて中形伝播試験を実施した。

6.1.2 試験内容

供試K5D鋼板(表3.1参照、板厚25.4mm)の Elektログラス溶接(表3.2参照、入熱183～195 kJ/cm)継手について、図6.1.1および図6.1.2に示す試験片を製作した。

当初計画としては、図6.1.1の試験片は伝播部の引張荷重によるグロス応力を母材の保証降伏点 $\sigma_Y (= 32 \text{ kg/mm}^2)$ の $\frac{1}{4}$ に、また、図6.1.2の試験片につい

ては σ_Y の $\frac{1}{2}$ に等しく、試験温度としては継手角度 θ の等しい2個のうち最初の1個は -30°C 、その試験結果を見たうえで残り1個の試験温度を決定するはずであったが、次に述べる経緯により若干の変更を余儀なくされた。

まず、図6.1.1に示した二重引張型その1の系列であるが、試験温度 $T = -30^\circ\text{C}$ 、 $\theta = 5^\circ$ 、 $\sigma = 8 \text{ kg/mm}^2$ の条件で試験したところ、図6.1.3(a)に示すとおり亀裂は試験片の伝播部に入るやいなや継手から遠のく方向へ曲って停止した。次に $T = -50^\circ\text{C}$ 、 $\theta = 10^\circ$ 、 $\sigma = 8 \text{ kg/mm}^2$ の条件で試験しても全く同様な結果となった。そこで $T = -50^\circ\text{C}$ 、 $\theta = 15^\circ$ 、 $\sigma = 8 \text{ kg/mm}^2$ の試験では図6.1.3(b)に示すとおり、あらかじめ伝播部入口に溶接残留応力調節用の付加ビードとサイドグループを設けておいたが、亀裂は試験継手に到達しなかった。いずれも亀裂発生部の温度は伝播部の一様分布温度より十分低く保っていたにも拘わらず試験は失敗に終わった。やむをえず、この系列は試験片の形状寸法を図6.1.4に示す内部切欠型に変更し、試験温度は切欠き部も含め試験片全幅にわたり -30°C に保つことにした。

図6.1.2に示した二重引張型その2の系列についても、 $T = -30^\circ\text{C}$ 、 $\sigma = \frac{1}{2} \sigma_Y$ の条件下で $\theta = 5^\circ$ および $\theta = 15^\circ$ の試験を行なったところ、いずれも亀裂は試験継手に到達しなかった。 T と σ を変えずに行なった $\theta = 30^\circ$ の試験では、あらかじめサイドグループを設けておいたところ、どうやら亀裂は試験継手を横断して試験片の伝播部全幅を伝播した。そこで、残る3個の試験片 ($\theta = 5^\circ, 15^\circ, 30^\circ$) は、いずれも $T = -30^\circ\text{C}$ 、 $\sigma = \frac{3}{4} \sigma_Y$ の条件下で図6.1.2に示した形状のままの試験片を用いて試験することとした。

なお、図6.1.4に示した内部切欠型の試験片では、荷重軸方向の寸法 L が 600 mm の場合と $1,000 \text{ mm}$ の場合に分れている。これは使用した試験機とタグ板の関係からきているのであるが、供試材と類似の厚さ 25 mm の鋼板を用い、タグ溶接によって生ずる荷重軸方向の引張残留応力を測定してみたところ、試験にさいして亀裂が伝播する試験片中央部におけるその値は、 $L = 600 \text{ mm}$ と $L = 1,000 \text{ mm}$ とで変りなく、ともに試験片幅の中央部約 $\frac{1}{3}$ にわたり一様で約 5 kg/mm^2 であった。

6.1.3 試験結果および考察

図6.1.4に示した内部切欠型の試験片による試験結果を、図6.1.5、図6.1.6および図6.1.7に、また、図6.1.2に示した二重引張型その2の試験片による試験結果を、図6.1.8、図6.1.9および図6.1.10に、それぞれ示す。前者の内部切欠型グループは、切欠き部を含み試験片全幅にわたって -30°C の一様温度分布としたが、後者の二重引張型グループでは、いずれも $T = -30^\circ\text{C}$ とはいえ、亀裂発生部をとくに低温に保った関係で、試験結果の図に温度分布測定結果も併記した。なお、内部切欠型グループでは、切欠き先端が試験継手位置に一致

している関係もあり、図 6.1.1 に示した二重引張型その 1 の試験片による失敗例の破損部を溶接補修して、図 6.1.4 の形状寸法に再加工した。

内部切欠型グループにおいては、まず $T = -30^{\circ}\text{C}$, $\sigma = \frac{1}{4}\sigma_Y$ (8 kg/mm^2) の条件下で試験したが、 θ いかんにかかわらず、いずれも切欠き部から脆性破壊が発生しなかった。打撃エネルギーは予備調査の結果一応 220 kg-m に設定したが、 σ を $\frac{1}{2}\sigma_Y$ あるいはそれ以上に高めても脆性破壊が発生しない場合には、 280 kg-m の打撃エネルギーを用いた。このグループの 6 個の試験に共通しているのは、切欠き先端から出た脆性亀裂は継手を横切るまで荷重軸にほぼ直交して進んでいることである。試験片 No.2 では、亀裂は、継手を横切り終った位置から溶接ボンド部沿いに試験片幅の端まで伝播したが、他の 5 個の試験片では、溶接残留応力の影響で母材部に急激に曲り込んでいる。試験片 No.5 では、母材部に曲り込む \times 否 \times 亀裂は停止しているが、残り 4 個の試験片では、試験片幅のほぼ中央で伝播中の亀裂が再び方向変換を行なって以降、亀裂は荷重軸にほぼ直交して伝播している。

二重引張型グループにおいて特徴的なのは、伝播部入口付近の荷重軸方向の圧縮残留応力の影響で、脆性亀裂が $\sigma = \frac{1}{2}\sigma_Y$ の条件下でなかなか伝播しにくいことである。試験片 No.7 と No.9 では、伝播部入口から僅か入った位置で亀裂は停止しており、継手角度がきわめて大きな No.11 でようやく継手を横切るような破壊が生じた。応力を十分高くすれば No.10 と No.12 のように試験片幅のほぼ中央で継手を横切る破壊となるが、それでも No.11 と同様、継手横断の前にかんりの躊躇がみられる。その躊躇が嵩じれば No.8 のように継手横断にいたらず停止してしまふ。継手横断は残留応力の影響により継手角度よりもかなり大きな角度で行なわれるので、ボンド部沿いの破壊への方向変換はきわめて困難である。継手横断以降の伝播経路はさきの内部切欠型グループと同様の結果となっている。

溶接残留応力が脆性破壊の伝播経路に及ぼす影響については、過去に多くの研究^{2),3),4)}がなされているが、当時の溶接継手に較べ今回の K5D 鋼板エレクトロガス溶接継手では、ボンド部沿いに形成される靱性の谷間の程度がとくに顕著となっているので、試験片 No.2 にみられるように靱性谷間の影響が残留応力の影響を凌駕する可能性は無視するわけにはいかない。しかし、試験片 No.2 の継手角度はいかにも小さく ($\theta = 5^{\circ}$)、これでは昭和 48 年度に実施した大型伝播試験と同様な結果になりがちである。したがって、内部切欠型における破壊発生方法の作為性という共通の問題点をかかえ込んでいる。なお、No.2 と同じ継手角度を有する No.1 の試験片において、脆性破壊の伝播がボンド沿いとならなかったのは、打撃エネルギーおよび引張荷重が No.2 に較べて大きかったことが原因している。

6.1.4 まとめ

脆性破壊の伝播経路が、外力および溶接残留応力という力学的要因のほか、高張力鋼の大入熱溶接継手沿いに形成される脆化域という材質的要因によってどのように支配されるかを、斜め継手伝播試験によって調べた結果、次の知見を得た。

1) 脆性破壊の伝播開始が何らかの原因で十分に継手沿いとなるような方向をとった場合には、その後の伝播経路として靱性の谷間が選ばれる可能性はある。その可能性は谷間の程度とともに高まる。

2) 継手に対して斜めに交叉しようとする脆性破壊は、その交叉角がたとえ小さくても、継手を横切る角度は溶接残留応力の影響でかなり大きくなり、伝播経路として靱性の谷間が選ばれる可能性はきわめて低い。

6.2 中形伝播試験(その2)－伝播特性試験

6.2.1 目的

一般船殻材において、脆性亀裂がその母材中を伝播する場合と、大入熱溶接継手ボンド部に沿って伝播する場合とで、伝播特性にどの程度の差があるかを実験事実として把握することを目的に、船体用50キロ級高張力鋼板(K5D鋼板)母材ならびにそのエレクトロガス溶接継手を供試して、中形伝播試験を実施した。

すなわち、K5D鋼板母材ならびにそのエレクトロガス溶接継手について、同一試験条件で中形伝播試験を実施し、脆性破壊伝播特性の比較を行なうことを目的とした。

6.2.2 試験内容

対象試験材は、K5D鋼板(板厚25.4mm)の母材およびそのエレクトロガス溶接継手である。

供試鋼母材の化学成分ならびに機械的性質は、先に表3.1に、またエレクトロガス溶接継手の溶接条件は表3.2に示した。

図6.2.1のような内部ノッチを有する幅1,400mm～2,000mmの、大形伝播試験片とほぼ同形状の伝播特性試験片を供試した。

上述の目的に従って、この試験片を1,000トン・テストリグに取付け、適当な冷剤を用いた間接冷却によって亀裂伝播部を所定温度に保持し、一様引張応力を負荷した後、落錘によってあらかじめ切欠き部に挿入しておいた楔を打撃することにより亀裂を発生伝播させた。

当初、温度条件は温度勾配型とし、しかも母材とエレクトロガス溶接継手を同一試験条件で試験する予定であった。しかし、母材の試験に適した温度条件を選ぶとノッチ先端ではかなり低温になるため、エレクトロガス溶接継手ボンド

部にノッチ加工した試験片では、所定応力まで負荷する間にPOP-INを起こし、所期の目的に合った試験が不可能である。また逆に、エレクトロガス溶接継手ボンド部に適した試験条件を選ぶと、母材では脆性亀裂が発生しない。すなわち、このことは脆性亀裂発生特性から見れば、エレクトロガス溶接継手ボンド部は、母材に比べて著しく靱性が劣化していることを示している。

そこで今回は、実船の遭遇しうる温度として 0°C 近傍の温度を選び、温度平坦型で試験した。

なお、試験機の容量不足から、高応力での試験では試験片幅を若干小さくした。

6.2.3 試験結果および考察

試験結果を表6.2.1に示す。また、試験時の温度分布を、K5D鋼板母材については図6.2.2に、K5D鋼板のエレクトロガス溶接継手については図6.2.3に示す。また、エレクトロガス溶接継手についての試験結果の脆性亀裂伝播径路を図6.2.4に示す。

図6.2.3および図6.2.4からわかるように、負荷応力 20 kg/mm^2 、ノッチ先端部温度 -3°C 、伝播部温度 -1°C において発生した亀裂が、エレクトロガス溶接継手ボンド部に沿ってかなり長く(593 mm)伝播した試験例(K5D-EG-1)が得られた。このときの亀裂停止状況は、停止直前 20 mm 位のところで母材にそれている。また、その他の試験結果は、上述の試験例に近い試験条件で実施したが、溶接継手ボンド部に沿ってあまり長く伝播せず、母材にそれて停止した。そのうち、ただ1例(K5D-EG-5)だけ、ボンド部に沿って伝播しボンド部で停止した。

以上のことから、供試K5D鋼板エレクトロガス溶接継手ボンド部についての脆性亀裂伝播の限界条件が、応力 20 kg/mm^2 、温度 0°C 近傍にあることが推定できる。

そこで、これに近い条件(応力 20 kg/mm^2 、 0°C 温度平坦型)で、供試K5D鋼板母材について試験したところ、全く脆性亀裂を発生しなかった(試験片符号K5D-M-1)。やむなく、ノッチ先端温度を -66°C まで下げ、温度勾配型にして再試験した。亀裂は 660 mm 伝播し、 -3°C のところで停止した。次に、試験片符号K5D-M-2について、ノッチ先端の温度を -32°C 、亀裂伝播部温度を $+2^{\circ}\text{C}$ にして試験したが、脆性亀裂は発生しなかった。そこでノッチ先端温度のみ -57°C にして再試験したところ、亀裂は 437 mm 伝播し、 -2°C のところで停止した。

以上のように、K5D鋼板エレクトロガス溶接継手ボンド部の試験条件に合わせた温度、応力では、K5D鋼板母材は全く脆性亀裂を発生せず、ノッチ先端温度を約 -60°C 位にして初めて脆性亀裂が発生した。

実船殻において、母材と大入熱溶接継手ボンド部とに同一程度の欠陥が存在していたと仮定すると、ボンド部の方が脆性亀裂を発生しやすいことは当然である。

また、溶接継手に沿っての脆性亀裂伝播停止試験結果に及ぼす溶接残留応力の影響に対する評価法が確立されていないので、溶接残留応力を無視し、脆性亀裂伝播停止特性 K_{IC} 値を求めた。図6.2.5に母材およびエレクトロガス溶接継手についての K_{IC} 値と絶対温度の逆数 $1/T_K$ との関係を示した。

図6.2.5より明らかであるが、K5D鋼板の母材およびそのエレクトロガス溶接継手ボンド部の脆性亀裂伝播停止特性 K_{IC} 値を比較すると、後者が若干悪いが、あまり変わらない実験値も得られていることがわかる。また、今回亀裂がボンド部で停止した試験例は、試験片符号 K5D-EG-5のみであったが、この場合の K_{IC} 値は母材に比べてかなり悪いようである。

さらに、昭和49年度の中形伝播試験以外の試験に供試した、別ChargeのK5D鋼板母材についての大形伝播試験結果も、図6.2.5に示したが、中形伝播試験に供試したK5D鋼板とほぼ同一の脆性亀裂伝播停止特性を有していることが明らかになった。

6.2.4 まとめ

船体用50キロ級高張力鋼板K5D鋼の母材およびそのエレクトロガス溶接継手ボンド部について、同一試験条件（負荷応力 20 kg/mm^2 程度、温度 0°C 程度の平坦型）で、脆性亀裂の伝播特性試験を行ない、脆性破壊伝播特性を比較した。

結論として、供試K5D鋼板エレクトロガス溶接継手ボンド部についての脆性亀裂伝播の限界条件が、応力 20 kg/mm^2 、温度 0°C 近傍にあることが把握できた。また、これと同一条件では供試K5D鋼板の母材は全く破壊せず、少なくともノッチ先端温度を -60°C 程度に下げなければ破壊しないことが確認された。

さらに、実船において、K5D鋼板母材とその大入熱溶接継手ボンド部とに同一程度の欠陥が存在していたと仮定すれば、脆性破壊の発生に関しては、ボンド部の方が危険である。しかし、脆性破壊伝播停止特性は、溶接残留応力を無視する限りにおいて、ボンド部の靱性劣化の影響はきほど明瞭でなく、母材と大入熱溶接継手ボンド部とでは、大きな差が認められなかった。

6.3 大形伝播試験

6.3.1 目的

高能率自動溶接法である、VASCON-II法溶接、デルタオッシレート法溶接および3電極片面1層溶接を、一般船体用軟鋼板または船体用50キロ級高張力鋼板に適用した場合、もし、その突合わせ継手の脆化部（ボンド部あるいは熱影響部に相当する）に、溶接欠陥あるいは疲労クラック等から発生した脆性クラックが

高速で伝播してきた場合、その後いかなる伝播径路をとるか、またその伝播特性がどのようなものであるかを大形伝播試験片をもちいて調べた。

また、比較のため母材についても大形伝播停止試験をおこない、脆性破壊伝播停止特性を調べた。

6.3.2 試験内容

試験は表6.3.1に示す鋼種および溶接法の組合せについて実施した。

もちいた大形伝播試験片の形状および寸法を図6.3.1に示す。しかしながら、表6.3.1中にも示したように、KAS鋼板のデルタオッシレート法溶接継手ならびにK5D鋼板の母材およびVASCON-II法溶接継手試験片など、試験の都合により一部試験片寸法を変更して試験したものもある。しかしながら、それらの寸法の差違が脆性破壊伝播または伝播停止特性におよぼす影響はほとんどないと考えられる。

試験片両端をタブ板に溶接したのち、1,000トン・テストリグ、または3,000トン・テストリグをもちいて試験をおこなった。すなわち、液体窒素等適当な冷剤を用いた間接冷却により試験片を所定の温度分布に冷却し、所定の荷重を負荷した後、落錘により切欠き部に楔を打ち込み脆性クラックを発生・伝播させた。なお、母材の脆性破壊伝播停止試験のときの温度分布は勾配型であり、溶接継手部の脆性破壊伝播試験のときのそれは平坦型である。

また、KDK鋼板の母材試験片について、消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接法をもちいての試験片とタブ板の溶接による残留応力もひずみゲージにより測定した。

6.3.3 試験結果および考察

(1) タブ板溶接による残留応力

前年度において、試験片とタブ板の溶接に炭酸ガス半自動溶接および消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接をもちいた場合、試験片中央部付近での溶接残留応力は、前者の場合 $+1\text{ kg/mm}^2$ 程度であったが後者の場合は -7 kg/mm^2 とその絶対値は $\times\times$ 大きく、また、分布の傾向も逆であった。その原因を調べるため、今年度においても、消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接により試験片とタブ板を溶接した場合の試験片中央部付近での残留応力を、3枚の試験片について測定した。測定結果の1例を図6.3.2に示す。

使用したひずみゲージは、切欠き線上より0, 200 および400 mm離れた位置のものは通常のひずみゲージ（共和電業製KFC-5-D16-11）であり、600 および800 mm離れた位置のものは高温ゲージである。

残留応力の計算には次の(6.3.1)式をもちいた。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) \\ \sigma_y &= \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x) \end{aligned} \right\} \text{----- (6.3.1)}$$

ただし σ_x, σ_y : x方向およびy方向の残留応力 (kg/mm²)
 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$: x方向およびy方向のひずみ
 E : ヤング率 (= 2.1×10^4 kg/mm²)
 ν : ポアソン比 (= 0.3)

図6.3.2に示した結果は、前年度の同様な消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接によりタブ溶接をおこなった場合と比較して、残留応力の値および分布の傾向がほぼ同じである。

前年度においても述べたとおり、この結果は同様なタブ溶接を炭酸ガス半自動溶接によりおこなった場合の結果とは傾向が逆である。

この原因を調べるために、消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接継手部における残留応力を測定した。測定にもちいた鋼板は大形伝播試験にもちいたのと同じKDK鋼板であり、測定位置はボンド部より20mm離れた溶接線に平行な位置である。

測定結果を図6.3.3に示すが、溶接治具などの影響のためか残留応力が乱れた部分もある。図より、溶接線方向の残留応力 σ_x は従来のものと同様正の値を示しているが、それと直角方向の残留応力 σ_y は、板幅の中央付近において負となっており、図6.3.2の σ_y と傾向はほぼ一致している。

したがって、消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接継手の場合、その溶接線中央部における溶接線と直角方向の残留応力 σ_y は負となり、ある程度離れた位置における同様な残留応力も負となるものと考えられる。

(2) 母材の脆性破壊伝播停止特性

KAS鋼板、KDK鋼板およびK5D鋼板母材について、大形伝播試験片を用いての脆性破壊伝播停止試験条件ならびにその結果を図6.3.4～図6.3.6および表6.3.2に示す。表中の脆性破壊伝播抵抗値 K_c 値は、停止した位置における K 値としてつぎの石田の厳密解⁵⁾より求められる。

$$K = \sigma_g \sqrt{\frac{1}{2} \pi C} \cdot F_A(\lambda, \varepsilon) \text{----- (6.3.2)}$$

ただし σ_g : 伝播部のグロス応力 (kg/mm²)
 C : 切欠きを含めたクラック長さ (mm)
 $\lambda = \frac{C}{2W_1}$ (図6.3.7参照)
 $\varepsilon = \frac{e}{E}$ (図6.3.7参照)
 $F_A(\lambda, \varepsilon)$: 偏心クラックに対する補正係数

ただし、消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接によりタブ板溶接をしたKDK鋼板の場合の K_c 値は、前項の6.3.3(1)において述べたタブ溶接による残留応力を考慮して計算したものであるが、炭酸ガス半自動溶接によりタブ板溶接をしたKAS鋼板およびK5D鋼板の場合は、残留応力の値は比較的小さく考慮していない。

一方、後述する溶接継手部に沿う脆性破壊伝播の場合、試験片中央の伝播線上には突合わせ溶接による残留応力が存在する。消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接によりタブ溶接をおこなった場合は、試験片の突合わせ溶接継手の残留応力とタブ溶接による残留応力がほぼ相殺し合うと考えられるため考慮していないが、炭酸ガス半自動溶接によりタブ溶接をおこなった場合は、試験片の突合わせ溶接継手による残留応力を考慮して計算している。

K_c 値の対数と絶対温度の逆数との関係を図6.3.8に示す。比較のため図中には前年度(昭和48年度)供試鋼のKAS鋼板およびK5D鋼板の結果も併せて示してある。

図からわかるように、試験結果は比較的良好な直線関係を示している。また、その脆性破壊伝播停止特性は、軟鋼であるKAS鋼板とKDK鋼板はほぼ同等な値を示しており、K5D鋼板ではさらに低温側に位置し非常に優れた停止特性を有している。

また、前年度の供試鋼と今年度の供試鋼と比較すると、今年度の供試鋼の方が良好な脆性破壊伝播特性を有している。

(3) VASCON-II法溶接継手部に沿う脆性破壊伝播

KAS鋼板およびK5D鋼板のVASCON-II法溶接継手部に沿う、脆性破壊伝播試験をおこなった。試験は、それぞれ図6.3.9および図6.3.10に示す温度分布および応力を条件として実施した。同図には、脆性クラックがボンド部より母材へ離れた点、ボンド部より溶接金属へ入った点、および停止した点など特徴的な位置もそれぞれ記号で示してある。

得られたKAS鋼板およびK5D鋼板のVASCON-II法溶接継手部についての試験結果を、表6.3.3に示す。また、そのときの脆性亀裂伝播径路を、それぞれ図6.3.11, 図6.3.12および写真6.3.1, 写真6.3.2に示す。なお、表に示してあるようにクラックがわずかしこ伝播しなかったものについては、切欠きを再加工して試験した。その場合、試験片寸法(主に切欠き長さ)は若干変わっているが、切欠き長さの変化により脆性亀裂伝播径路、および伝播特性はほとんど影響を受けないと考えられる。

表6.3.3に示した K_c 値は、脆性クラックが溶接継手部近傍あるいは母材にそれて停止した場合は、母材の場合と同様にして(6.3.2)式より求めたが、溶接継手部に沿ってある程度伝播し、温度分布の平坦部分まで到達した場合の

K_c 値は、温度分布の平坦部入口での K 値以下であったと考えて示した。また、試験片とタブ板の溶接には炭酸ガス半自動溶接をもちいているため、これによる伝播線上における残留応力は小さく、試験片の突合せ溶接のみによる残留応力を考慮して K_c 値の計算をおこなった。

なお、試験片符号 KAS-VII-5 および K5D-VII-1 は、溶接継手部に沿って伝播した脆性クラック長さが非常に短いものであり、楔打撃による衝撃エネルギーの影響がおよぶ範囲のものであるため、式(6.3.2)による K_c 値は算出していない。

KAS鋼板の VASCON-II 法溶接継手の場合、伝播部応力 15 kg/mm²、平坦部温度 4°C の試験条件で脆性クラックは溶接金属を直進し破断しているが、その他のものは全てボンド部をある程度伝播した後、母材へそれ破断している。

また、K5D鋼板の VASCON-II 法溶接継手の場合、脆性クラックはボンド部をある程度伝播した後、溶接部近傍で停止するか、または、母材へそれ破断するかのいずれかであり、溶接部を直進して破断したものはなかった。

ボンド部に沿って脆性クラックがある程度伝播した後停止する現象は、母材の場合と同様、温度分布の高温側へ伝播してきたことが主因と考えられる。

また、ボンド部に沿って脆性クラックがある程度伝播した後、母材側へそれる現象は、脆性クラックの特性上主応力と直角に進展するためであり、その溶接継手部が脆性破壊伝播に対して著しい靱性劣化を来たしていないことを示していると思われるが、溶接部という冶金的不均一さなども微妙に影響していると考えられ、今後検討を要する。

図 6.3.11 と図 6.3.12 とを比較すると、いくぶん KAS鋼板の VASCON-II 法溶接継手の方が K5D鋼板の VASCON-II 法溶接継手よりも、脆性クラックは溶接部に沿って伝播し易いようであるが、応力レベルが異なるため断定はできない。

表 6.3.3 に示した K_c 値の対数と絶対温度の逆数との関係を、それぞれ 図 6.3.13 および 図 6.3.14 に示す。図中には比較のため母材の結果も示してある。

図 6.3.13 に示した KAS鋼板の VASCON-II 法溶接継手の場合、みかけの K_c 値は母材の脆性破壊伝播抵抗値よりも良好な値を示しているようであるが、図 6.3.14 に示した K5D鋼板の VASCON-II 法溶接継手の場合のみかけの K_c 値は、母材の脆性破壊伝播抵抗値と同等かそれよりもいくらか低い値となっている。

しかしながら、母材の違いすなわち KAS鋼および K5D鋼による実験結果の差違はあまり認められない。

(4) デルタオッシレート法溶接継手部に沿う脆性破壊伝播

前項で述べた VASCON-II 法溶接継手部の場合と同様に、KAS鋼板および K5D鋼板のデルタオッシレート法溶接継手部に沿う脆性破壊伝播試験をおこなった。

試験はそれぞれ、**図6.3.15**および**図6.3.16**に示す温度分布および応力を条件として実施した。

得られたKAS鋼板およびK5D鋼板のデルタオッシレート法溶接継手部についての試験結果を**表6.3.4**に示す。また、そのときの脆性亀裂伝播径路をそれぞれ**図6.3.17**、**図6.3.18**および**写真6.3.3**に示す。

KAS鋼板のデルタオッシレート法溶接継手の場合、脆性クラックはある程度ボンド部を伝播して停止するか、母材側へそれ母材中にて停止するか、母材中を破断するかのいずれかであり、溶接継手部に沿って直進したものはなかった。一方、K5D鋼板のデルタオッシレート法溶接継手の場合、脆性クラックは、伝播部応力 20 kg/mm^2 以上、平坦部温度 -10°C 以下の条件では溶接金属内を直進している。

図6.3.17と**図6.3.18**を比較すると、K5D鋼板のデルタオッシレート法溶接継手の方が、KAS鋼板のデルタオッシレート法溶接継手よりも脆性クラックは溶接部にそって伝播し易いようである。

表6.3.4に示した K_c 値の対数と絶対温度の逆数との関係を、それぞれ**図6.3.19**および**図6.3.20**に示す。図中には比較のために母材の結果も示してある。KAS鋼板およびK5D鋼板のデルタオッシレート法溶接継手部のみかけの K_c 値は、いずれも母材の脆性破壊伝播抵抗値よりも良好な値を示している。また、母材がKAS鋼あるいはK5D鋼による試験結果の差違はあまり認められない。なお、脆性クラックが母材にそって停止したものの脆性破壊伝播抵抗値は、母材のそれとほぼ等しくなっている。

(5) 3電極片面1層溶接継手部に沿う脆性破壊伝播

前2項の場合と同様に、KDK鋼板およびK5D鋼板の3電極片面1層溶接部に沿う脆性破壊伝播試験をおこなった。

試験はそれぞれ、**図6.3.21**および**図6.3.22**に示す温度分布および応力の条件にて実施した。

得られたKDK鋼板およびK5D鋼板の3電極片面1層溶接継手部についての試験結果を**表6.3.5**に、また、そのときの脆性亀裂伝播径路をそれぞれ**図6.3.23**および**図6.3.24**に示す。

KDK鋼板の3電極片面1層溶接継手の場合、脆性クラックは伝播部応力を 18 kg/mm^2 以上に上昇させても切欠きより直ちに母材へそれるか、ある程度ボンド部を伝播した後停止するか、または、ボンド部より母材へそれるかのいずれかであり、溶接継手部を完全に直進したものはなかった。しかしながら、試験片符号KDK-RF-5は、溶接金属およびボンド部を約 $1,060\text{ mm}$ 伝播した後母材へそれたため、溶接金属を直進したものとみなすことにする。

K5D鋼板の3電極片面1層溶接継手の場合、脆性クラックが切欠きより直ち

に母材へそれるのを防ぐため、切欠き先端の伝播線上に長さ約100mm、深さ約4mmのガイド溝を試験片の表裏両面に設けたにもかかわらず、試験片符号K5D-RF-5を除いて、伝播部応力が 22 kg/mm^2 以上でも脆性クラックは切欠き先端から直ちに母材へそれるのみであり、溶接継手の脆化部、すなわちボンド部や熱影響部に沿って破壊したものはなかった。なお、試験片符号K5D-RF-5は約100mmガイド溝中を伝播した後、枝分かれしたものである。

表6.3.5に示した K_c 値の対数と絶対温度の逆数の関係を、KDK鋼板の3電極片面1層溶接継手の場合図6.3.25に、また、K5D鋼板の3電極片面1層溶接継手の場合図6.3.26に示す。なお、図中には比較のため母材の結果も示してある。

図6.3.25からわかるように、KDK鋼板の3電極片面1層溶接継手部の脆性破壊伝播特性は、母材のそれよりもみかけ上良好な結果となっている。また、図6.3.26においては、脆性クラックがK5D鋼板の3電極片面1層溶接継手部より母材へそれ、母材にて停止した場合から得られる K_c 値は、母材試験片について求められた脆性破壊伝播抵抗値とほぼ等しい。

従来、破壊靱性の異なる2種類の鋼材それぞれに、同一の溶接法(例えば昭和48年度のエレクトロガスおよびエレクトロスラグ溶接法など)で継手をつくった場合、継手部に沿う脆性破壊伝播は、靱性の高い鋼材の場合ほど起こり易いという傾向があった。しかしながら、先に項目6.3.3(3)および(4)において述べたKAS鋼板およびK5D鋼板のVASCON-II法溶接継手ならびにデルタオッシレート法溶接継手の場合もそうであったように、図6.3.23と図6.3.24とを比較すると、必ずしもそのような傾向は認められないようである。

すなわち、母材についてはあるが、脆性破壊伝播停止特性と比較的良好な相関があるといわれている、先に項目4.3で述べたV-ノッチシャルピー試験のエネルギー(または破面)遷移温度においては、昭和48年度の傾向と同様に、同一溶接法では50キロ級高張力鋼の場合の方が軟鋼の場合より溶接部の脆化が大きいと考えられるにもかかわらず、今年度の溶接継手部に沿う脆性破壊伝播は予想されるほど両鋼種間での差は認められなかった。

このようなことが起こった原因が何であるかはっきりしたことはわからないが、脆性破壊伝播試験において、脆性クラックはその特性上板面に対し垂直となる傾向が強いため、ボンド部に沿って伝播したと言っても、ボンド部が板面に対し垂直面になっていない場合には本来のボンド部のみでなく、溶接金属や熱影響部等を含んだ冶金的に不均一な部分を伝播することになる。したがって、微視的に見た場合、複雑なクラック面が形成されることになることも一因と考えられる。

また、シャルピー衝撃特性と脆性破壊伝播停止特性が、冶金的な観点からは

異なった挙動を示すことがあるという結果⁶⁾も報告されている。すなわち、熱処理による組織の変化はシャルピー衝撃特性には大きく反映されるが、脆性破壊伝播停止特性にはわずかしが反映されないということから推察すれば、KDK鋼板およびK5D鋼板の3電極片面1層溶接継手のボンド部および熱影響部は、シャルピー試験から推定されるほどにはその脆性破壊伝播特性は劣化しないものと思われる。

6.3.4 まとめ

本研究においては、大形伝播試験片をもちいて、KAS鋼板、KDK鋼板およびK5D鋼板に、VASCON-II法溶接、デルタオッシレート法溶接または3電極片面1層溶接を適用した場合の継手部に沿う脆性破壊伝播特性を調べた。その結果、次のようなことが明らかになった。

1) V-ノッチシャルピー試験結果で、ボンド部の靱性劣化が顕著に現われるような溶接継手でも、継手ボンド部に沿って伝播する脆性破壊伝播特性の劣化は、それほど顕著ではないようである。

2) 今年度供試した溶接継手に関しては、昭和48年度に供試したエレクトロガス溶接継手あるいはエレクトロスラグ溶接継手の場合と異なり、継手に沿った脆性破壊伝播が、50キロ級高張力鋼の継手の方が軟鋼の継手よりも比較的起り易いという傾向は認められなかった。

しかし、靱性劣化を来しているボンド部あるいは熱影響部に沿って直進する脆性クラックの挙動を定量的に評価し、試験結果から船殻等の実構造物中での溶接部の脆性破壊強度を定量的に推定出来るようになるまでには、引き継ぎ、今後の積極的な研究努力が必要であろう。

6.4 伝播現象に関する基礎研究

6.4.1 目的

溶接継手部に沿って伝播する脆性亀裂伝播現象把握のため、溶接残留応力の動きならびに靱性劣化部の影響を考慮することが必要である。このために、亀裂進展に伴う溶接残留応力の変化、ならびに溶接残留応力が溶接継手ボンド部の狭い靱性劣化部とのかねあいで、亀裂伝播経路にどのような影響を及ぼすかを把握することを目的とした。

6.4.2 試験内容

上述の目的のために、下記のごとく動的光弾性試験ならびに光弾性皮膜法試験を実施した。

I. 動的光弾性試験

(1) 試験項目

動的光弾性試験にて実施した試験項目を表6.4.1に示す。大入熱溶接継手部

を光弾性材料(エポキシ樹脂材)でモデル化するにあたり、大入熱溶接ボンド部近傍の狭い靱性劣化部の存在ならびに、その近傍の溶接残留応力の2つの要素を考慮する必要がある。そこで、第1ステップとして、靱性劣化部のみを考慮した接着型モデル(接着部分をつくり、組織上靱性劣化させた)ならびに溝付き型モデル(溝を入れて、断面積減少部分だけ見かけ上破壊応力を減少させた)の2つのモデルを考えた。また、第2ステップとして、近似的ではあるが残留応力ならびに靱性劣化部を考慮した、残留応力型モデルを考えた。

以上3種類のモデルとエポキシ母材に対して、下記の試験を実施した。

(a) 動的破壊靱性試験: 動的K値に対する物理的解釈の一助とするために、破壊靱性値の歪速度依存性を調査した。

(b) 静的解放試験: 後述の動的伝播試験の比較データを得るために、静的K値を求めた。この際、エポキシ母材の場合には、光弾性縞解析によるK値解析法の確認も行ない、また残留応力型モデルでは、残留応力のみによって生じる静的K値を調べた。

(c) 動的伝播試験: 一様荷重下での伝播試験(D)、伝播停止試験(A)および枝分れ試験(B)の3つの項目に分けて実施した。

一様荷重下での伝播試験では、動的K値と静的K値との比較ならびに負荷応力の影響を調べた。

伝播停止試験では、靱性劣化部の K_{ca} に及ぼす影響を検討した。

また枝分れ試験では、靱性劣化部がある場合枝分れすることなく直進しやすいかどうか調べた。

(2) 試験片

光弾性感度の歪速度依存性が比較的少ない材料が望ましく、エポキシ樹脂材(Araldite B, 板厚5~6mm)を供試した⁷⁾。光弾性感度ならびに機械的性質を表6.4.2に示す。試験片形状寸法は表6.4.3に示す。

動的破壊靱性試験片には中央切欠き型試験片を、動的伝播試験片等には、鋼材の大形伝播試験片とほぼ相似(縮尺1/5)の偏心した内部切欠き型試験片を用いた(図6.4.1参照)。

(3) 溶接継手部のモデル化

溶接残留応力および大入熱溶接ボンド部近傍の狭い靱性劣化部を再現する必要がある。

鋼板の突き合せ溶接継手部の残留応力分布¹⁾に相当する内部応力を生じさせるために、2枚のエポキシ板の間にエポキシ棒を入れ、その棒を引張ったまま接着させた。接着後除荷すると図6.4.2のような内部応力分布を生じた。内部応力の分布パターンは、鋼材の溶接残留応力分布にほぼ等しい。しかし、溶接中の変態を経ていないので、溶接ビードに直角な方向の残留応力 σ_{RT} 分布が

溶接ビード方向の残留応力 σ_{RL} に比して著しく小さい。この点、完全なモデル化とは言えないが、内部応力の動きを見るには、十分と考えられる。

以上のように製作した残留応力型モデルは、ほぼ溶接継手部を再現していると考えることができる。なお、単に2枚のエポキシ材を接着した接着型モデルおよび両面から溝を入れて見かけ上靱性劣化させた溝付き型モデルは、靱性劣化部のみを再現したモデルと考えられる。

(4) 試験方法

試験は全て室温で下記のように実施した。

(a) 動的破壊靱性試験：試験装置概要を写真6.4.1に示す。中央切欠き型試験片(表6.4.3)をインストロン引張試験機に取り付け、引張速度を0.05～500 mm/minの範囲で変化させて引張った。歪速度は、切欠き断面上の残部中央部に貼付した動歪ゲージにより求めた。

(b) 静的解放試験：亀裂を静的に拡大した後、荷重装置に取り付け、後述の動的弾性試験装置を用いて静的な弾性縞写真を撮った。

(c) 動的伝播試験

(ア) 動的弾性試験装置：写真6.4.2に動的弾性試験装置を示す。

本装置は東大岡村研究室で開発された装置⁸⁾をベースとして開発したものである。閃光光源としてクセノン放電管を用いた。また、透過光の波長は、金属薄膜干渉フィルター IF-W (日本真空光学) を用いて 5461 Å (緑色) 中心に幅 250 Å におさえた。12個の駒写真が所定時間に得られる。光学系の配置は Cranz-Schardin 系であり、多くは暗視野法(縞次数 $N=0, 1, 2, \dots$) で弾性縞を撮った。なお、フィルムは Kodax 社の 35 ミリ Tri-X (ASA 400) を用いた。

(イ) 打撃装置：振り子式の装置であり、打撃エネルギーも計測した。

(ウ) 荷重装置：試験片端部を剛性の高い鋼製のタブ板に固着させ、そのタブ板に偏心荷重を与えることにより、試験片に任意の荷重分布を与えられるようにした。

(エ) 試験法：先に図6.4.1に示したような、偏心した内部切欠き型試験片の両端を所定の荷重分布になるように引張り、そのままの状態を保ちながら内部切欠きに挟んだ楔に打撃を与えて亀裂を発生伝播させた。

II. 弾性皮膜法試験

(1) 試験項目

鋼材の溶接ボンド部に沿って伝播する脆性亀裂の挙動を把握するために、一般船体用軟鋼板 (KAS 鋼, 板厚 25.4 mm) 母材およびそのエレクトロガス溶接継手の表面に弾性皮膜を貼付し、脆性亀裂伝播時の溶接残留応力の変化ならびにその影響等を調査した。

(2) 試験片

供試材は一般船体用軟鋼板 (KAS 鋼, 板厚 25.4mm) 母材およびそのエレクトロガス溶接継手である。表 6.4.4 に供試材の化学成分ならびに機械的性質を、また表 6.4.5 に溶接条件を示す。なお、母材、溶接継手ボンド部および溶接金属の V-ノッチシャルピー試験結果の破面遷移温度 $vTrs$ は、それぞれ 12°C, 51°C および -8°C である。また図 6.4.3 に試験片形状を示す。

(3) 光弾性皮膜材料

エポキシ樹脂材 (Araldite B) である。ただし板厚は、鋼材表面の歪を忠実に表わすためには薄い方が望ましく、2mm とした。また、接着材には Araldite GY 250 を用いた。

(4) 試験方法

供試材表面の亀裂伝播径路と思われるところに、光弾性皮膜材料 (板厚 2mm, 幅 200mm, 長さ 800mm) を接着させた。

光源部, PQ 板, カメラを 1 セットとした反射型光弾性装置 8 組を試験片から約 600mm 離して、試験片の溶接ビードに沿って縦に並べた。また、クラック伝播速度および荷重低下率については、脆性クラック伝播線上 (光弾性皮膜貼付面の裏側) に貼付した CD ゲージおよびタブ板に貼付した歪ゲージにより計測するようにした。

写真 6.4.3 に本装置の全体を、また写真 6.4.4 に光弾性皮膜の貼付状況を示す。

以上のように装置を組み立てておき、以下鋼材の大形伝播試験と同様に、一様荷重で引張った状態で内部切欠きに挟みこんだ楔を打撃し、亀裂を発生伝播させた。

6.4.3 試験結果および考察

I. 動的な光弾性試験

(1) 動的破壊靱性試験

図 6.4.4 にエポキシ樹脂材の母材、接着型モデルおよび溝付き型モデル (両面に入れた溝の深さ 1mm および 1.5mm の 2 種) の動的破壊靱性値 K_{cd} を示す。脆性亀裂発生に対する破壊靱性値 K_{ci} の歪速度 (切欠き断面上の残部中央の値) 依存性が明らかに認められる。(6.4.1) 式なる関係が得られた。

$$K_{cd} = \beta - \alpha \log_{10} \dot{\epsilon} \quad \text{----- (6.4.1)}$$

ただし K_{cd} : 動的破壊靱性値 ($\text{kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$)

$\dot{\epsilon}$: 歪速度 (1/sec)

α : 靱性減衰率

β : 歪速度 $\dot{\epsilon} = 1/\text{sec}$ のときの脆性亀裂発生に対する破壊靱性値

靱性減衰率 α はいずれもほぼ等しく、0.31程度になった。

脆性亀裂発生に対する破壊靱性値は、エポキシ母材、溝付き型モデル(溝の深さ1.0mm)、溝付き型モデル(溝の深さ1.5mm)、接着型モデルの順に低下する。静的な場合($\dot{\epsilon}=10^{-5}\frac{1}{\text{sec}}$)には、母材の破壊靱性値を1とすると、以下0.687, 0.537, 0.388の比率で靱性劣化している。また動的な場合、例えば歪速度 $\dot{\epsilon}$ が $1\frac{1}{\text{sec}}$ では、0.588, 0.392, 0.177の比率で靱性劣化している。

鋼材の溶接ボンド部と母材の静的破壊靱性値 K_{ci} の比率を調べると、0.2~0.6の範囲にあるので、エポキシモデルで再現されていると考えてよさそうである。

(2) 光弾性縞解析法

今回の試験で撮影した光弾性縞は、主応力差($\sigma_1 - \sigma_2$)-一定の縞(Isochromatic Fringe Patterns)である。

光弾性法則は(6.4.2)式で与えられる。

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N}{\alpha t} \text{----- (6.4.2)}$$

ただし N: 縞次数
 α : 光弾性感度 (mm/kg)
 t : 試験片板厚 (mm)

また、亀裂近傍の最大剪断応力とK値の関係は(6.4.3)式で与えられる^{9),10)}

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \\ &= \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \left[a_1 K_1^2 + 2a_2 K_1 K_2 + a_3 K_2^2 \right]^{\frac{1}{2}} \text{----- (6.4.3)} \end{aligned}$$

ただし $a_1 = \sin^2 \theta + 2\delta \sqrt{\frac{2r}{c}} \sin \theta \sin \frac{3\theta}{2} + \frac{2r}{c} \delta^2$

$$a_2 = \sin 2\theta + 2\delta \sqrt{\frac{2r}{c}} \sin \frac{\theta}{2} (1 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2})$$

$$a_3 = 1 + 3 \cos^2 \theta$$

$$\delta = \frac{\sigma_{ox}}{[\sigma F(\gamma)]}$$

σ : 亀裂に直交する方向の負荷応力

σ_{ox} : 亀裂に平行方向の仮想的遠方での応力

$F(\gamma)$: 有限幅の修正係数

(6.4.2)式および(6.4.3)式を組み合わせて、光弾性縞を解析した。

(3) 静的解放試験

(a) エポキシ母材: 写真6.4.5にエポキシ母材中の静的亀裂光弾性縞写真を

示す。図6.4.5に光弾性縞解析K値と石田の解析解との比較を示す。図中の実験値はすべて負荷応力を 0.266 kg/mm^2 の場合に換算しなおした値である。両者は良く一致し、解析法の妥当性が確認出来た。

(b) 残留応力型モデル：写真6.4.6に残留応力型モデル中の静的亀裂光弾性縞写真を示す。無負荷状態 ($\sigma=0 \text{ kg/mm}^2$) の光弾性縞は、かなり傾斜しており、Sliding Modeが大きいことがわかる。このことは、残留応力の影響を示すものと言える。

図6.4.6に残留応力のみによって生ずる静的K値を示す。

亀裂が短かく、かつ自由端に近い場合には、 K_2 値は K_1 値よりも大きいことが認められ、亀裂が長くなるにつれ K_1 値は増加し K_2 値は減少する。中央部では K_2 値はほとんどゼロとなる。また、さらに亀裂が伸びると逆に K_2 値は負になる傾向が予想されるが、この図からは確認できない。

以上のことは、鋼板の溶接継手部に沿っての脆性破壊伝播停止試験結果の亀裂の首振り現象の説明として有効であると考えられる。また、溶接継手部に沿っての脆性破壊は、有限幅の場合にそれやすく、閉断面船殻のButt継手の場合には無限板と考えられるのでそれに近いことが予想される。ただし、残留応力のみによって生ずるK値の絶対値はかなり小さいようである。

(4) 動的伝播試験

表6.4.6に動的伝播試験結果を示す。

(a) 伝播試験

(ア) エポキシ母材：写真6.4.7は一樣負荷応力が 0.352 kg/mm^2 の状態では打撃を与えて亀裂を発生伝播させた場合の動的亀裂光弾性縞写真を示したものである。図6.4.7に動的K値 K_d および亀裂伝播速度 V を示す。図6.4.7から明らかのごとく、打撃直後瞬間的に、動的K値 K_d は静的破壊靱性値 K_{ci} を越えたが、その後は K_{ci} の0.75~0.85倍の値となった。一方、太い実線で示した静的K値(石田の解)は増加していることから、動的K値と静的K値の両者の差は明らかに存在することがわかる。なお、図6.4.8に荷重低下率と亀裂伝播時間との関係を示す。破断時には7割から8割に下がることから、試験片中央部での拳動にはあまり荷重低下の影響はないと考えられる。亀裂伝播速度は、ほぼ 340 m/sec と定常状態であった。無限板に対するL. B. Freund⁽¹⁾の理論によれば、今回のように亀裂伝播速度がRayleigh波速度の約0.35倍の場合、動的K値は静的K値の約0.75倍になる。これは今回の実験とよく一致している。しかし、亀裂発生直後は打撃のために高くなるし、亀裂伝播貫通直前も、自由端の影響が若干あるようである。高速伝播亀裂の伝播径路を考える場合には、動的K値で考える必要があると思われる。

図6.4.9は、さらに一樣負荷応力を 0.534 kg/mm^2 に高めた場合の動的K値

K_d と亀裂伝播速度 V を示したものである。動的 K 値は、亀裂が動き出した後も静的破壊靱性値よりも高目になった。また静的 K 値と比較すると、動的 K 値は打撃直後に静的 K 値より高目になり、その後しばらくそれより若干小さな値となる。また、亀裂が試験片中央を過ぎるころから動的 K 値はほぼ一定となり、破断直前にかなり高くなる。亀裂伝播速度も若干大きくなっている。また、負荷応力が高くなると、破面はある傾向がある。なお破面には鋼材と類似のシェブロンパターンが認められる。

(f) 接着型モデル：エポキシ母材と同様の縞パターンが得られた。亀裂はほぼ接着層を伝播したと考えられる。図 6.4.10 に一様負荷応力 0.245 kg/mm^2 の場合の動的 K 値 K_d と亀裂伝播速度 V を示す。亀裂伝播速度はかなり大きくなり、Rayleigh 波速度の約 0.67 倍になったが、亀裂の枝分れは生じなかった。また、動的 K 値は静的 K 値よりも低く、ほぼ一定となった。

(g) 溝付き型モデル：この場合も、エポキシ母材と同様の縞パターンが得られた。図 6.4.11 に、一様負荷応力が 0.1994 kg/mm^2 の場合の動的 K 値 K_d と亀裂伝播速度 V を示す。動的 K 値は打撃直後に静的破壊靱性値 K_{ci} ($4.6 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$) を越えた以外は、静的 K 値より低く、ほぼ一定となった。一方、亀裂伝播速度はかなり小さく $260 \sim 340 \text{ m/sec}$ 程度であった。

(h) 残留応力型モデル：写真 6.4.8 に一様負荷応力が 0.109 kg/mm^2 の状態で打撃を与えて亀裂を発生伝播させた場合の動的亀裂光弾性縞写真を示す。

残留応力の影響で光弾性縞は若干傾き、亀裂に対して非対称な縞パターンとなった。図 6.4.12 はそのときの動的 K 値 K_d と亀裂伝播速度 V を示したものである。残留応力の影響のため、Opening Mode の他に Edge Sliding Mode も現われている。

動的 K 値 K_{d1} (Opening Mode) は、残留応力の影響も入っているが静的破壊靱性値にほぼ等しく、一定となった。一方、太い実線は、残留応力を無視した石田の解であるが、動的 K 値と静的 K 値は全く異なる傾向を示している。また動的 K 値 K_{d2} (Edge Sliding Mode) は動的 K 値 K_{d1} に比べてかなり小さいことがわかる。初め光弾性縞は右へ傾いているが、これは K_{d2} が正であることを示しており、亀裂が右端部に近づくにつれ逆に光弾性縞は左へ傾く。

図 6.4.13 には、さらに一様負荷応力 0.23 kg/mm^2 に高めた場合の動的 K 値 K_d と亀裂伝播速度 V を示す。残留応力のみが働いている場合には K_2 値の方が K_1 値より大きいことがわかる。打撃によって亀裂発生後、動的 K 値 K_{d1} (Opening Mode) は静的 K 値 (残留応力を無視した石田の解 K_1 値) より若干低い、増加の傾向にある。一方、動的 K 値 K_{d2} (Edge Sliding Mode) は K_{d1} 値よりもかなり小さく、一旦減少したのち増加し、その後ほぼ一定となっている。また、亀裂伝播速度は、一様負荷応力を約 2 倍にしたことから、かなり

大きい。

写真6.4.9は、さらに一様負荷応力を 0.276 kg/mm^2 に高めた場合の動的亀裂光弾性縞写真を示したものである。このときは、切欠き部に接した溶接部が破断していたため、打撃直前の K_2 値はかなり高く、破断前の約1.4倍になった。このために、亀裂発生直後亀裂は接着層からはずれ、母材に入ってから、接着層にほぼ平行に走った。打撃直前の負荷状態での光弾性縞でもかなり右に傾いており、亀裂は光弾性縞に対して直角方向に伝播する傾向があると考えられる。

図6.4.14にこのときの動的 K 値 K_d と亀裂伝播速度 V を示す。亀裂は初めから母材を伝播したので若干異なる傾向が見られる。亀裂伝播速度は、あまり速くならなかった。エポキシ母材の試験結果に近い値である。

以上総合すると、一様荷重下での伝播試験では、動的 K 値と静的 K 値の間にかかなりの差が認められる。動的 K 値は、打撃直後に静的 K 値よりも高く、かつ脆性亀裂発生に対する静的破壊靱性値よりも高くなる。しかしその後、動的 K 値は概ね静的 K 値よりも低く、亀裂が定常速度で伝播するときにはほぼ一定になる傾向をもっている。

上述の傾向は、エポキシ母材の他に接着型モデル、溝付き型モデルでも認められる。

また負荷応力が高くなると、若干、亀裂伝播速度が大きくなるようである。しかも負荷応力が大きいと、破面がある傾向にある。すなわち、亀裂伝播速度と破面とが良い相関をもっていることもわかった。

また、残留応力の影響は試験片のように有限板の場合、亀裂が自由端に近い程大きいことがわかる。 K_2 値がある程度以上に大きくなると、亀裂の伝播経路を接着層から母材にそれさせることもわかった。また、亀裂は光弾性縞に対して直角方向に伝播する傾向をもっている。

また、亀裂伝播中、残留応力の再配分は比較的早く行なわれ、動的 K 値 K_{d2} は、残留応力のみによって生じる静的 K_2 値～亀裂先端位置曲線に近い値を示しているようである。

(b) 伝播停止試験

(ア) エポキシ母材：写真6.4.10にDecreasingな荷重分布(平均応力 0.1251 kg/mm^2 , 応力比 $\sigma_2/\sigma_1 = -0.5$)での動的亀裂光弾性縞写真を示す。試験片中央部あたりから縞数が少なくなり、亀裂発生後 $1,000 \mu\text{sec}$ 付近で一時亀裂は伝播停止し、その後若干亀裂が伸びて止まったことがわかる。図6.4.15にこのときの動的 K 値 K_d と亀裂伝播速度 V を示す。動的 K 値は打撃直後かなり高くなり、その後太い実線で示した静的 K 値～亀裂先端位置曲線のまわりを振動しながら停止したことがわかる。亀裂先端位置 $(d_0 + 2C)/W$ が0.65付近で、一旦、亀裂

は停止している。亀裂伝播速度(×印)から判断して、このときの動的K値をエポキシ母材の脆性亀裂伝播停止特性 K_{ca} と考えると、 K_{ca} は $1.75 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ となる。脆性亀裂発生に対する静的破壊靱性値 K_{ci} ($\dot{\epsilon}=10^{-4}/\text{sec}$) は $6.4 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ であるから、 K_{ca} は K_{ci} の約0.27倍となっている。

図6.4.16に、定変位条件に変えた以外は全く同じ条件で試験した場合の動的K値 K_d と亀裂伝播速度 V を示す。2本の太い実線で定変位条件ならびに定荷重条件の場合の静的K値を示した。動的K値は、どちらかと言えば定荷重条件に近い値となった。これは、試験機(荷重装置)の剛性が小さかったために定変位条件のつもりが定荷重条件に近い結果になったものと考えられる。亀裂伝播速度は、定変位条件の静的K値がゼロになるあたりでかなり減速しているが、最終的には、亀裂先端位置 $(d_0+2C)/W$ が0.724で停止している。総合的に判断すると、 K_{ca} は $1.60 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ 程度と考えられる。また、亀裂停止長さが短いのはいくらか定変位条件の影響があったとも言えよう。

(イ) 接着型モデル：図6.4.17は、Decreasingな荷重分布(平均応力 $0.0761 \text{ kg}/\text{mm}^2$ 、応力比 $\sigma_2/\sigma_1 = -0.5$)での動的K値 K_d と亀裂伝播速度 V を示したものである。亀裂発生後 $(d_0+2C)/W$ が0.6あたりで亀裂は一時停止し、その後、かなりゆっくりと進展し、 $(d_0+2C)/W$ が0.82で停止した。 $(d_0+2C)/W$ が0.61で亀裂伝播速度が急激に減少したことから、このときの動的K値を K_{ca} と考えると、 K_{ca} は $1.55 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ となる。

(ウ) 溝付き型モデル：図6.4.18はDecreasingな荷重分布(平均応力 $0.0740 \text{ kg}/\text{mm}^2$ 、応力比 $\sigma_2/\sigma_1 = -0.5$)での溝付き型モデル(溝の深さ 1.19 mm)中の動的K値 K_d と亀裂伝播速度 V を示したものである。動的K値は打撃直後のみ静的破壊靱性値 K_{ci} を越え、その後は静的K値に近い値となった。亀裂先端位置 $(d_0+2C)/W$ が0.65付近で、亀裂伝播速度が急激に減少したことから、このときの動的K値を K_{ca} とすると、 K_{ca} は約 $1.45 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ となる。その後また亀裂はゆっくりと進展し、 $(d_0+2C)/W$ が0.969で停止した。

図6.4.19に、溝の深さをさらに深めて 1.63 mm にした場合の動的K値 K_d と亀裂伝播速度 V を示す。亀裂伝播速度は $(d_0+2C)/W$ が0.61付近で急激に減少しており、このときの動的K値を K_{ca} と考えると、 K_{ca} は $1.25 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ となる。この後亀裂は極めて低速ながら伝播し、 $(d_0+2C)/W$ が0.892で停止している。

以上の伝播停止試験を総合して考えると、伝播停止直前近傍では、動的K値は比較的静的K値～亀裂先端位置曲線に近く、あるいはそのまわりを振動していることがわかる。しかも、亀裂伝播停止特性 K_{ca} は、靱性劣化部の影響をさほど受けず、ほぼ $1.5 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ 前後の値となった。定荷重条件の場合、亀裂は一時停止したあとも、極めてゆっくりではあるが、かなり長くさらに進展する

ことがわかった。定変位条件の場合には、あまり長くは進展しないことがわかった。

(C) 枝分れ試験

(ア) エポキシ母材：写真6.4.11に、Increasingな荷重分布（平均応力 0.510 kg/mm^2 、応力比 $\sigma_2/\sigma_1 = -11$ ）でのエポキシ母材中の動的亀裂光弾性縞写真を示す。光弾性縞は急速に大きくなり、動的K値も急激に大きくなっていることがわかる。特に、Increasingな荷重分布の中の光弾性縞は、一様荷重下での静的亀裂先端縞とは全く異なった縞パターンになっている。

片側亀裂が高速伝播する場合の縞パターンは、A. A. Wells および Post⁽¹²⁾によって得られている。また、B. R. Baker⁽¹³⁾は理論的に動的伝播亀裂の光弾性縞を解析しており、低速伝播の場合は静的な光弾性縞に近いが、高速伝播の場合には亀裂先端直前に新たな縞を生じると述べている。一方、今回得られた亀裂先端の新しい縞は、縞次数から考えて、高速亀裂伝播特有の縞というより、応力勾配のある荷重場の影響のために生じたものと考えられる。従って亀裂先端に生じた新たな縞を無視し、残りの縞が静的亀裂の場合の光弾性縞パターンに近いと考え解析した。図6.4.20にこのときの動的K値 K_d と亀裂伝播速度 V を示す。動的K値は、打撃直後に脆性亀裂発生に対する静的破壊靱性値 K_{ci} を越え、また静的K値を越えるが、その後は静的K値よりも若干低く、かつ急激に大きくなっている。一方、亀裂伝播速度はさほど大きくなりず 350 m/sec 程度で、Rayleigh波速度の約0.36倍である。B. R. Bakerの解析によれば、亀裂先端に新しい縞が出るいわゆる動的な特徴をもった光弾性縞は、亀裂伝播速度がRayleigh波の速度に近くなってからであるということからも、今回の光弾性縞は高速亀裂伝播特有の縞ではないであろう。また伝播部中央あたりからかなり破面があられていることは、亀裂伝播速度が比較的小さいことと関連があるかもしれない。また、E. H. Yoffe⁽¹⁴⁾は、無限板で一様荷重下では、亀裂伝播速度がRayleigh波速度の約0.6倍で亀裂が枝分れすると述べている。しかし、本試験片は有限板であること、およびIncreasingな荷重分布であることなど、必ずしも理論の対象とは一致しないが、亀裂伝播速度がRayleigh波速度の約0.36倍程度で、枝分れ現象を起した。この事実はIncreasingな荷重分布特有のものかまだはっきりしていない。

(イ) 溝付き型モデル：写真6.4.12にIncreasingな荷重分布（平均応力 0.300 kg/mm^2 、応力比 $\sigma_2/\sigma_1 = -11$ ）での溝付き型モデル（溝の深さ 1.24 mm ）中の動的亀裂光弾性縞写真を示す。エポキシ母材と同様の光弾性縞パターンが得られた。しかし重大な相違点は、枝分れ現象が起きなかったことである。すなわち、靱性劣化部に沿って伝播するときは、枝分れせずに直進しやすい傾向をもつことを示唆している。図6.4.21にこのときの動的K値 K_d と亀裂伝播速度 V を

示す。動的K値はエポキシ母材の場合と同様な傾向をもち、静的K値の0.47～0.74倍となった。また亀裂伝播速度は比較的定速でありRayleigh波速度の約0.33倍である。亀裂伝播速度と動的K値の関係だけをみれば、エポキシ母材の場合の試験結果と同様、L.B. Freundの理論に比較的一致している。

以上総合すると、負荷応力、打撃エネルギー共に完全に一致した試験ではないが、靱性劣化部があると亀裂は枝分れ現象を起しにくく、靱性劣化部に沿って直進しやすい傾向があることがわかった。また、Increasingな荷重分布では、エポキシ母材の試験結果に見られるように、比較的低速でも枝分れ現象が起こることがわかった。これは亀裂先端へのエネルギー供給のバランスの問題でもあるように思われる。

II. 光弾性皮膜法試験

鋼材の溶接ボンド部に沿って伝播する亀裂先端近傍の応力分布等を把握するために、基礎試験を実施し、種々の問題点を明らかにした。

(1) 試験結果

表6.4.7に光弾性皮膜法を利用した大形伝播試験結果を示す。

(a) KAS鋼母材：母材の破壊靱性が良いので、脆性亀裂発生のために切欠き先端温度をかなり低くする必要があった。試験片KAS-BM-1は、切欠き先端温度 -18°C の温度勾配型である。亀裂伝播部の光弾性皮膜は、冷却中、 $-5\sim-8^{\circ}\text{C}$ 付近で一部剝離した。したがって、光弾性皮膜は鋼材とは無関係に破壊した。そこで、試験片KAS-BM-2の場合には、切欠き先端部を含めて、 6°C の温度平坦型とした。この状態で応力 16 kg/mm^2 まで負荷したところ、切欠き先端近傍 100 mm にわたり剝離し、亀裂が光弾性皮膜のみに入った。また亀裂伝播部もかなり剝離したので試験を中止した。

(b) KAS鋼エレクトログラス溶接継手：母材の試験結果から予想以上に接着材の低温強度が悪いことが明らかになったので、亀裂伝播部の温度は室温のままとし、切欠き先端のみ 0°C 位まで下げた。試験片KAS-BE-1の場合には、冷却前に負荷し、静的光弾性縞を撮影した。これを写真6.4.13に示す。鋼材に切欠き加工した後皮膜を貼付したため、光弾性縞上には残留応力の影響は現われていない。光弾性縞解析は後述する。その後、切欠き先端を 0°C まで冷却し、負荷応力 16 kg/mm^2 で試験したが、動的光弾性縞は得られなかった。

試験片KAS-BE-2の場合には、光弾性皮膜の剝離防止のため、光弾性皮膜を溶接ビード方向に 100 mm 間隔で切断しておいた。試験片KAS-BE-1と同一試験条件で試験したところ亀裂は溶接ボンド部に沿って 460 mm 伝播し停止した。この場合には、動光弾性縞($2C\approx 245\text{ mm}$ の位置)が1例得られた。これを写真6.4.14に示す。打撃後まもないこともあって、楔力の影響が強く、縞次数 $N=1$ および2の縞は亀裂前方で閉じている。また、亀裂先端近傍は剝離ない

しはそれに近い状態であるため、鋼材の亀裂先端位置が明瞭でない。図6.4.22によれば、光弾性皮膜と鋼材はほぼ同時に破壊しているようである。

(2) 光弾性縞解析法

動的な光弾性試験の場合と同様に、主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_2$) 一定の光弾性縞を解析する。皮膜法では、下地の鋼材と同一の歪を皮膜に生じさせ、その中を光が入射・反射して干渉することを利用している。したがって、下地の弾性域内での光弾性法則は (6.4.4) 式で与えられる。

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N}{\alpha^* t} \quad \text{----- (6.4.4)}$$

ただし N : 縞次数

t : 光弾性皮膜の厚さ (mm)

$$\alpha^* = 2\alpha \cdot \frac{E_e}{E_s} \cdot \frac{1+\nu_s}{1+\nu_e} \quad (\text{mm/kg})$$

α : 光弾性感度

E : ヤング率

ν : ポアソン比

s : 鋼板 (steel) を表わす

e : 光弾性皮膜 (epoxy) を表わす。

これは、(6.4.2) 式の α の代りに α^* を用いたことになる。以下先に述べた 6.4.3.I.(2) 項と同様である。すなわち (6.4.3) 式および (6.4.4) 式を組み合わせ、光弾性縞解析すればよい。しかしながら、下地の塑性域内では、(6.4.4) 式は成立しない。

下地の塑性域内での光弾性法則は、(6.4.5) 式で与えられる。

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{1+\nu_e}{2\alpha t E_e} \cdot N \quad \text{----- (6.4.5)}$$

これより亀裂先端近傍の塑性歪分布が求まる。応力分布を求めるには、前もって下地の応力～歪曲線を求めておけばよい。このことからわかるように、塑性域内の光弾性縞から K 値を決定することはかなり難しくなる。したがって、K 値を求めるには、光弾性皮膜材料ならびに板厚の選定をうまく行ない、弾性光弾性縞を得ることが賢明であろう。

(3) 光弾性縞解析

(a) 静的な光弾性縞 : 写真 6.4.13 の 2) に示した静的な光弾性縞 (Test No. KAS-BE-1, $\sigma = 7.88 \text{ kg/mm}^2$, $2C = 150 \text{ mm}$) を解析してみた。切欠き先端温度は 11°C であったが、この程度ならば常温の光弾性皮膜材料定数を用いても良いようである。そこで弾塑性境界の縞次数を計算で求めたところ、1.77 となった。すなわち、縞次数 $N = 1$ の光弾性縞は鋼材の弾性域内にあるが、 $N = 2$ 以上の

光弾性縞はもはや塑性域内に入っている。N=1の光弾性縞は完全な形になっていないので、N=2の塑性光弾性縞を近似的に弾性光弾性縞として計算し、 K_1 値として $157 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ を得た。一方、石田の解を用いて計算すれば、 K_1 値は $128 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ となる。光弾性縞解析 K 値は、石田の解を用いた計算値よりも約23%高目になった。これは、近似的に弾性光弾性縞として計算したことが、主な原因であろう。

(b) 動的弾性縞：写真6.4.14に示した動的弾性縞 (Test No. KAS-BE-2, $\sigma=16 \text{ kg}/\text{mm}^2$, $2C \approx 245 \text{ mm}$) を解析してみた。亀裂先端近傍の温度は $7 \sim 8^\circ\text{C}$ であり、常温の弾性皮膜材料定数とあまり変わらない。しかし静的な場合に比べ、歪速度が非常に大きいため、弾性皮膜のヤング率は約10%程度上昇する。また軟鋼母材の降伏応力も歪速度依存性が強く、歪速度 $10 \sim 100 \frac{1}{\text{sec}}$ では静的降伏応力の2~25倍になる。したがって、これらの影響のために、弾塑性境界の縞次数は計算上3.9~4.9位になる。すなわち縞次数N=4の弾性縞が弾塑性境界に近いことがわかる。写真6.4.14によれば、縞次数N=5以上の弾性縞は流れてしまっている。この領域は弾性皮膜が若干剝離しているためだろう。そこで、弾性光弾性縞 (N=3) を用いて動的 K 値を求めた。 K_{d1} 値および K_{d2} 値は、それぞれ $345 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ および $-52 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ となる。鋼材の亀裂先端位置が弾性皮膜の剝離のために明瞭でないことから、これらは参考値であることを付記する。一方、溶接残留応力を無視した石田の解を用いて静的 K 値を計算すれば、 $360 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ となる。すなわち、 K_1 値に関しては、動的 K 値と静的 K 値は同程度の大きさになった。したがって、動的 K 値は打撃直後に K_{c1} 値を越え、その後静的 K 値程度に下がったと推定される。その後の動的 K 値の変化は動的弾性縞写真が得られていないので定かでない。

図6.4.22中に動的 K 値をプロットした (●印および○印)。なお参考のために、試験温度分布に対応する K_{c1} 値および K_{c2} 値を合せて図示した。また石田の解を用いて求めた静的 K 値も太い実線で示した。

(4) 問題点

鋼材の溶接残留応力の動き、ならびに動的 K 値を完全に把握するに到らなかったが、種々の問題点が明らかとなった。列記すると次のようになる。

(a) 試験上の問題点

(ア) 弾性皮膜が低温で剝離しやすい。接着材の強度不足のためと思われる。

(イ) 弾性皮膜と鋼材とが同一位置で同時に割れにくい。

(ウ) 低温 (例えば室温 12°C で試験片温度 -12°C 以下) では、弾性皮膜に霜が付着するため、弾性縞写真がとれない。このために、靱性のよい母材の大形伝播試験は難しい。

(b) 解析上の問題

(ア) 今回のように、弾性光弾性縞を得るために比較的硬い光弾性皮膜を選定すると、剝離が生じやすい。したがって、鋼材の亀裂先端位置が明瞭でなくなるため解析が難しい。

(イ) また、光弾性皮膜の剝離防止のために軟かい材料を用いると、弾性光弾性縞が得られなくなり、解析が難しい。

(ウ) 下地の鋼材歪を忠実に表わすためにも、あるいは光弾性皮膜の剝離をおこしにくくするためにも、光弾性皮膜の厚さは薄い方が望ましいが、弾性光弾性縞が得られにくくなるため、解析が難しくなる。

(エ) 動的亀裂先端近傍の降伏応力(歪速度依存性大)が正確につかめないので、厳密には、弾塑性境界の位置が確認しにくい。

6.4.4 まとめ

鋼材の大入熱溶接ボンド部に沿って伝播する脆性亀裂の伝播現象把握の手がかりを得るために、溶接継手部を光弾性材料エポキシ樹脂(Araldite B)でモデル化し、動的弾性試験を行なった。また鋼材の表面に光弾性皮膜を貼付し、脆性亀裂伝播時の溶接残留応力の動き等を調べた。

以上の結果をまとめると次のようになる。

I. 動的弾性試験

1) エポキシ樹脂材の母材、また溶接ボンド部の靱性劣化部のみをモデル化した接着型モデル、ならびに溝付き型モデルの動的破壊靱性値を把握した。いずれも歪速度 $\dot{\epsilon}$ の影響は $K_{cd} = \beta - \alpha \log \dot{\epsilon}$ の形で表わされることがわかった。 α はいずれも0.31程度である。靱性劣化部モデルの静的破壊靱性値($\dot{\epsilon} = 10^{-5} \sim 10^{-4} \frac{1}{\text{sec}}$)は、エポキシ母材の0.39~0.69程度である。

2) 今回用いた弾性縞解析法は、エポキシ母材中の静的亀裂弾性縞解析K値と石田の解との比較から妥当性が確認できた。

3) 鋼材の溶接継手ボンド部に内部切欠きが存在するときの残留応力のみによって生ずる静的K値を、残留応力型エポキシモデルから推定した。K₁値は亀裂長さと共に大きくなる。一方、K₂値は亀裂先端が試験片端に近いときに大きくなり、中央部ではほとんどゼロである。したがって、有限幅試験片では亀裂がそれやすく、閉断面船殻のButt継手の場合は無限板と考えられるのでそれにくいが予想される。ただし、実船殻では補強材等の影響でどのようになるか明確でない。

4) 一様荷重下での伝播試験では、動的K値と静的K値の間にはかなりの差が認められた。動的K値は打撃直後に静的K値よりも高く、かつ脆性亀裂発生に対する静的破壊靱性値よりも高くなる。しかし、その後の動的K値は概ね静的K値よりも低く、亀裂が定速伝播するときにはほぼ一定になる傾向をもっている。

上述の傾向はエポキシ母材の他、接着型モデルおよび溝付き型モデルでも認められた。

5) 負荷応力が高くなると、亀裂伝播速度は大きくなる傾向にある。それに伴って破面があるが、それ自体は余分のエネルギーを消費するため亀裂伝播速度を上げるにはマイナスの要因になるようである。

6) 残留応力の再配分は比較的早く行なわれ、動的 K 値 K_{d2} は残留応力のみによって生じる静的 K_2 値 \sim 亀裂先端位置曲線に近い値を示しているようである。

7) 亀裂伝播停止直前近傍では、動的 K 値は比較的静的 K 値 \sim 亀裂先端位置曲線に近い。しかも亀裂伝播停止特性 K_{ca} は狭い靱性劣化部の影響をさほど受けず、ほぼ $1.5 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ 前後の値となった。また定荷重条件の場合、亀裂は一時停止したあとも極めてゆっくりではあるがかなり長く更に進展することがわかった。一方定変位条件の場合には、あまり長くは進展しないこともわかった。

8) 狭い靱性劣化部があると、亀裂は枝分れ現象を起こしにくく、狭い靱性劣化部に沿って直進しやすい傾向があることがわかった。またIncreasingな荷重分布では、エポキシ母材の試験結果のように、比較的低速でも枝分れ現象が起きることがわかった。これは亀裂先端へのエネルギー供給のバランスの問題でもあるように思われる。

II. 光弾性皮膜法試験

1) 動的亀裂近傍応力把握のための光弾性皮膜法試験に対する、試験上ならびに解析上の問題点が明らかになった。すなわち、光弾性皮膜が低温あるいは高応力で剝離しやすく、また、剝離防止のために軟かい材料を用いれば、弾性光弾性縞が得られにくくなり解析が難しくなる。

2) 静的な場合の弾塑性境界の縞次数は、今回の場合、計算上1.77となった。縞次数 $N=2$ の塑性光弾性縞を近似的に弾性縞と考えて K 値を求めたところ、石田の解を用いた計算値よりも約23%高目となった。

3) 動的な場合の弾塑性境界の縞次数は、降伏応力の歪速度依存性等を考慮すれば、今回の場合、計算上3.9 \sim 4.9と推定される。これに対応する動的弾性縞が得られた。したがって、動的亀裂先端の塑性域は静的な場合の $\frac{1}{4}\sim\frac{1}{6}$ 倍程度と考えられる。

4) 打撃後まもない動的弾性縞では、縞次数 $N=1$ および2の縞が亀裂前方で閉じている。これは、打撃時の楔力の影響が残っているためと考えられる。

5) 打撃後まもない長さ245mm程度の亀裂先端の動的弾性縞に対して動的 K 値を概略計算すると、静的 K 値に近い値が得られた。動的 K 値は打撃直後大きく変動していると思われるが、亀裂が95mm程度進展したとき、過渡的に静的 K 値に近くなったと考えられる。

7. 船体残留応力分布

7.1 基礎試験

7.1.1 目的

船殻の大型化に伴って、使用される鋼板の板厚が増大し、高能率の各種大入熱自動溶接法が盛んに用いられるようになった。大入熱溶接継手におけるボンド部、熱影響部の靱性の低下は、溶接構造物の安全を確保する上で、きわめて重要な問題である。このため、前年度のエレクトロガス、CES、エレクトロスラグ溶接継手に引続き、本年度はその他の各種大入熱溶接継手について脆性破壊試験が実施された。

しかしながら、溶接継手には当然溶接残留応力が分布しており、溶接部の脆性破壊発生特性あるいは亀裂伝播特性に影響を及ぼすことは周知のとおりである。そこで、本研究項目では、主として6.3項で用いられた大形伝播試験片の脆性亀裂伝播挙動を考察するために、大入熱溶接継手の溶接残留応力分布を明らかにすることとした。

なお、上述の残留応力の影響を定量的に把握するためには、脆性破壊試験を行なう前に、継手試験片の溶接残留応力を非破壊的に測定することが望ましいことはいうまでもない。したがって、本年度は、ひずみゲージを用いた応力弛緩法による残留応力測定に先立って、X線屈折による残留応力測定を行ない、両測定値を比較することによって、X線応力測定法の溶接継手への適用を検討した。

7.1.2 試験内容

(1) 試験片および測定位置

残留応力分布の測定を行なった大入熱突合せ溶接継手は、に示すKAS鋼VASCONE-II法溶接継手、K5D鋼デルタオッシレート法溶接継手およびKDK鋼3電極片面1層溶接継手の3種類である。なお、KAS鋼VASCONE-II法溶接継手は、に示したごとくその始末端部に未溶着部を残しているが、その他の2継手では、溶接後ビード長が2mとなるようにガス切断でビードの両端部を除去している。

ひずみゲージを用いた応力弛緩法による残留応力の測定は、に示す破線上の各点で行なった。すなわち、測定位置はビード中央($L=0\text{ mm}$ 、 L はビード中央からの距離)、ビード中央からビードの終端側へ400mm($L=400\text{ mm}$)、ビード終端から200mm($L=900$ または 800 mm)、およびビード始端から200mm($L=-800\text{ mm}$)の各点を通るビード直角方向(T方向)線上とボンド線上(L方向)

である。なお、ひずみゲージによる残留応力測定はすべての溶接継手について行なっているが、X線による測定はKAS鋼VASCON-II法溶接継手およびK5D鋼デルタオキシレート法溶接継手についてのみ行なっており、測定位置を図中の二点鎖線で示す。両測定法の測定位置は同一の場所であるが、図の都合上二点鎖線を若干ずらして表示してある。

(2) 測定方法

残留応力の測定は、X線によって行なったのち、同じ位置にひずみゲージを貼付し応力弛緩法で行なった。

i) X線応力測定法

測定位置表面の黒皮をグラインダーで除き、化学研磨あるいは電解研磨により、表面層を250~300 μ 程度除去して表面仕上げを行なった。X線応力測定は計数管法によって行ない、その測定条件を一括して表7.1.1に示す。KAS鋼母材の結晶粒径は、4.2項の組織写真にみられるようにK5D鋼母材に比べて大きいので、KAS鋼継手の測定に際してはX線照射面積をK5D鋼継手におけるより広くし、回折にあずかる結晶の数を多くするようにした。応力の算出は、 $\sin^2\psi$ 法によった。測定原理を簡単に説明すると次のようになる。¹⁵⁾

図7.1.2(a)において $\sigma_1(\epsilon_1) - \sigma_2(\epsilon_2)$ 平面を試験片表面とすれば表面では平面応力状態であり、OP方向のひずみ $\epsilon_{\psi x}$ は次式で与えられる。

$$\epsilon_{\psi x} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_x \sin^2\psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad \text{----- (7.1.1)}$$

また、Braggの回折条件式 $2d \sin\theta = n\lambda$ より近似的に、

$$\epsilon_{\psi x} = \left(\frac{\Delta d}{d}\right)_{\psi x} = -\cot\theta_0 \cdot (\theta_{\psi x} - \theta_0) \quad \text{----- (7.1.2)}$$

が得られる。ここで θ_0 は無負荷時の回折角、その他の記号は同図(b)に示すとおりである。両式を等置し、 $\sin^2\psi$ で偏微分すると、

$$\sigma_x = -\frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \cot\theta_0 \cdot \left(\frac{\partial 2\theta_{\psi x}}{\partial \sin^2\psi}\right) \quad \text{----- (7.1.3)}$$

となる。同図(b)に示す入射角 ψ_0 を種々変えて $2\theta_{\psi x}$ を測定し、 $2\theta_{\psi x} \sim \sin^2\psi$ 線図の傾き $(\partial 2\theta_{\psi x} / \partial \sin^2\psi)$ を求めれば、(7.1.3)式より σ_x を算出できる。測定状況の一例を写真7.1.1に示す。

ii) ひずみゲージによる応力弛緩法

ひずみゲージを貼付し、その周囲を図7.1.3に示すごとく深さ $d = 4.5 \sim 5 \text{ mm}$ だけ切込んで、試験片表面近傍の残留応力を解放した。このときのひずみの変化量から、前年度¹⁾と同様にして残留応力を算出した。なお、測定に使用したひずみゲージはG.L.=1または2mmのロゼットゲージである。図7.1.3は、応力解放の過程において切込み深さ d の増加に伴うひずみの変化を示したもので

ある。ゲージ長 2mm のひずみゲージで 11×11mm の周囲を解放した場合、表面から 4.5～5mm 切込めば、表面層の残留応力は 97% 以上解放されることが同図からうかがえる。

7.1.3 試験結果および考察

(1) ひずみゲージを用いた応力弛緩法による測定値

KAS鋼 VASCON-Ⅱ法溶接継手、K5D鋼デルタオッシレート法溶接継手およびKDK鋼3電極片面1層溶接継手の残留応力分布を図7.1.4、図7.1.5および図7.1.6にそれぞれ示す。各図の(a)はビード方向の残留応力 σ_{RL} 、(b)はビードに直角方向の残留応力 σ_{RT} の分布である。3種類の継手について、図7.1.1に示した各測定線上の σ_{RL} および σ_{RT} の分布を示すと、図7.1.7～図7.1.9のようになる。大略いづれの継手においても、 σ_{RL} はビード上で最大となり、ビードから100～150mmの範囲に分布する引張残留応力は端面に向って圧縮残留応力に変化する。また、 σ_{RT} は継手の始末端部を除いて引張残留応力が分布している。

KAS鋼 VASCON-Ⅱ法溶接継手のボンド上の残留応力分布は、図7.1.7(4)に示すようになり、ビードの始末端部を除いたボンド上の σ_{RL} は約 30 kg/mm²、 σ_{RT} は6～7 kg/mm²程度である。また、図7.1.8(4)に示すK5D鋼デルタオッシレート法溶接継手のボンド上では、 σ_{RL} が 35 kg/mm²程度、 σ_{RT} が約 5 kg/mm²であり、図7.1.9(4)に示すKDK鋼3電極片面1層溶接継手のボンド上の σ_{RL} は、約 32～36 kg/mm²、 σ_{RT} は約 8～9 kg/mm²とみることができるといえる。

(2) X線による測定値

KAS鋼 VASCON-Ⅱ法溶接継手およびK5D鋼デルタオッシレート法溶接継手について、X線応力測定法により求めた各測定線上の溶接残留応力分布を、図7.1.10および図7.1.11にそれぞれ示す。なお、これらの図には、ひずみゲージより求めた分布を比較のため破線で示した。

ビード直角方向の分布を示した図7.1.10(1)～(2)および図7.1.11(1)～(2)によると、X線により求めたビード方向の応力 σ_{RL} 、ビード直角方向の応力 σ_{RT} ともに分布の傾向はひずみゲージによる分布と類似し、とくに、母材部ではいづれの継手においても両測定法による残留応力値の差は数 kg/mm²程度で、測定誤差範囲内でほぼ一致していると思なしてよい。しかしながら、両継手とも溶接金属、熱影響部を含む溶接部では、両測定値は明らかに相違している。すなわち、ボンド線上の分布を示した図7.1.10(2)にもみられるごとく、ビード方向の残留応力 σ_{RL} はX線による測定値がひずみゲージのそれに比べて低く、ビードに直角方向の残留応力 σ_{RT} は逆に高い。

X線応力測定法では、表面から10 μ の深さの平均値を測定していると考えられている。これに対して、本項のひずみゲージを用いた応力弛緩法では、表面

から4.5～5mmの深さに切込みを入れており、溶接部のように板厚方向に一様でない応力分布が存在する場合には、表面に貼付したひずみゲージによって切込み部の深さ方向における見掛けの応力を測定したことになる。このように、X線とひずみゲージを用いた応力弛緩法とでは、測定される応力の特性が異なるため、両測定法による測定値が必ずしも一致しないことが考えられる。

(3) X線応力測定値に関する考察

図7.1.12にK5D鋼 25.4mm厚, 2000×2000mm², デルタオキシレート法溶接継手のX線応力測定結果を集録する。図7.1.12(1)は溶接線平行方向応力, 図7.1.12(2)は直角方向応力の測定結果である。溶接金属上12～15kg/mm²程度の引張り応力が測定され、ボンド部近傍に応力の低い谷間が見られる。これら得られた応力値は、得られた凹凸線の状況から考えて充分の信頼性をもつ測定値であり、再現性が充分である。図7.1.12(3)に示された半価幅のプロットを見ても、凹凸線の鮮鋭度は判明する。因みにこれら測定値に対する $\sin^2\psi$ 線図の1例を図7.1.13に示す。(最小自乗法による相関係数0.9984, 95%信頼限界での値をプロットしてある)この傾向を確かめるため、KAS鋼 25.4mm厚エレクトロガス溶接継手について行なった測定においても同様の傾向が再現された。

図7.1.14は溶接継手各部より撮影した背面反射写真である。溶接金属に塑性変形が起っており、この塑性変形程度は溶接金属中央部より10mm前後の所でやや大きく、ボンド部近傍すなわち溶接金属中心部より16～18mm付近で最大となって、約5%変形に相当する程度の塑性変形である。母材部ではこの溶接熱応力による塑性変形は認められない。定量的にディフラクトメーターの凹凸図形から考えれば、凹凸強度、凹凸線半価幅および凹凸線ピーク位置をプロットして図7.1.15を得る。溶接金属部は成分的相違のため $\Delta 2\theta \div 8'$ だけ母材より小さく、これは格子常数の0.05%であって、浸入固溶原子による差と考えられる。凹凸線強度はボンド部でもっとも低く、半価幅はもっとも大きい。

厚板では冷却の条件が、板表面と内部で当然異なっていると考えられるので、表面層を除去しつつ応力を測定した。その結果を図7.1.16に示す。図に示す曲線において、(1)は1.32mm表面層を除去した面の応力測定値であって、(2)はそれより更に研磨して表面除去層が2.03mmになったときの応力分布を示す。(3)は、この段階でその裏面を2.67mm深さに切削除去して(2)の測定と同じ面を再度測定した場合の応力分布である。

この結果から応力の状況は板厚方向にも複雑に変化し、とりわけ溶接金属およびボンド部は板表面より凝固すると考えられるので、板表面と内部では残留応力が相違することが判明した。したがって、X線的に応力測定を行なう場合、表面処理の方法と処理深さを一定にすることが大切である。

7.1.4 まとめ

KAS鋼VASCON-Ⅱ法溶接継手、K5D鋼デルタオキシレート法溶接継手およびKDK鋼3電極片面1層溶接継手の、3種類の大入熱自動溶接法を用いた板厚25.4mm、溶接長2m、幅2mの突合せ溶接継手について、X線応力測定法およびひずみゲージを用いた応力弛緩法により、溶接残留応力分布を測定した結果、次の事項を明らかにすることができた。

1) ひずみゲージを用いた応力弛緩法によれば、溶接ボンド部におけるビード方向の残留応力は30~35 kg/mm²程度で、昨年度のエレクトロガスおよびCES溶接継手の結果とほぼ等しい。

2) 溶接ビードに直角方向の残留応力は、ビードの始末端部を除いたボンド上では5~9 kg/mm²の引張残留応力がほぼ一様に分布している。また、ビード方向およびビードに直角方向の残留応力は、継手の種類によって、大きな差違は認められない。

3) X線応力測定法による残留応力分布の傾向は、ひずみゲージによる傾向とほぼ一致する。

4) 母材部における残留応力は、X線応力測定とひずみゲージによる値が測定誤差の範囲内にあり、かなり両者はよい一致を示すが、溶接部ではかなり相違する。すなわち、溶接部における溶接ビード方向の残留応力は、ひずみゲージに比べてX線による測定値が低く、直角方向の残留応力は逆に高い。この点については、今後さらに検討する必要がある。

5) 多くの測定点について溶接継手の残留応力分布をX線的に測定した例は少ないが、本試験によってX線的に溶接継手部の応力の捕え方を明らかにすることができた。

7.2 実船殻ブロック試験

7.2.1 目的

前項でも述べたように溶接残留応力は継手の脆性破壊発生特性および亀裂伝播特性に著しく影響するので、本研究で行なわれた種々の試験結果を実船の設計に適用し、その安全性を保証しようとする場合、実船殻の残留応力分布を精度よく求める必要がある。しかるに実船殻には、溶接残留応力のほかに部材相互間に生じる拘束応力が作用しており、単純な継手試験片の溶接残留応力から実船殻の残留応力を推定することは困難である。したがって、船殻の残留応力は実測される必要があり、さらに実船殻であるがゆえにその方法は非破壊であることが要求される。

以上の観点から、本研究項目では実船殻ブロックにおける各種溶接継手近傍の残留応力分布を、ひずみゲージを用いた応力弛緩法により計測するとともに、

非破壊の×線応力測定も行なって、その実船殻への適用について検討した。

7.2.2 試験内容

(1) 実船殻ブロックの形状および測定位置

本項で用いた実船殻ブロックは、三菱重工業株式会社長崎造船所にあったタンカービルジ部のモデルブロックで、その形状および寸法を図7.2.1に示す。測定箇所は同図の(a)～(e)に示す位置で、その詳細を図7.2.2(a)～(e)にそれぞれ示す。すなわち(a)はBottom Plateのシーム溶接継手(両面1層サブマージドアーク溶接)、(b)はBottom LONG_Lのバット溶接継手(CES溶接)、(c)はSide Shell Plateのバット溶接継手(エレクトロガス溶接)、(d)はTrans. RingとSTIFF.のすみ肉溶接継手(被覆アーク溶接)、(e)はBottom LONG_L FaceとSTIFF.のすみ肉溶接継手(被覆アーク溶接)であり、各継手に直角方向の残留応力分布を測定した。

(2) ×線応力測定法

各測定位置の黒皮、錆などをグラインダーで除去し、前項と同様にして化学研磨または電解研磨により表面仕上げを行なった。実船殻ブロックの×線応力測定には、前項と同様な計数管法のほかにフィルム法も用いた。すなわち計数管法では写真7.2.1に示す装置により測定線(a)、(b)および(c)の3箇所を、フィルム法では写真7.2.2に示す携帯用×線カメラを用いて測定線(d)および(e)の2箇所を計測した。

(3) ひずみゲージによる応力弛緩法

×線による残留応力測定を終了したのち、図7.2.2の各測定線上にひずみゲージを貼付し、前項で述べたと同様にして応力開放を行ない、残留応力分布を求めた。溶接ビード近傍ではG.L.=1mmの、そのほかの位置ではG.L.=2mmのロゼットゲージを使用した。

7.2.3 試験結果および考察

(1) ひずみゲージによる応力弛緩法の測定結果

図7.2.2(a)～(e)に示した各測定線上のひずみゲージによる残留応力分布を図7.2.3(1)～(3)にそれぞれ示す。まず図7.2.3(1)および(2)に示す突合せ溶接部の残留応力分布をみると、ビード方向の残留応力 σ_{RL} は、ビード上あるいはその近傍で30～40 kg/mm²の高い値を示し、ビード中心から約100mmまでは引張応力となっている。この分布の傾向は前項の継手試験片の場合とほぼ一致する。図7.2.3(1)に示すBottom LONG_Lおよび図7.2.3(2)に示すSide Shell Plateのバット溶接継手におけるビードに直角方向の残留応力 σ_{RT} は、ビード上で前項の継手試験片の2～3倍に達しており、それぞれBottom PlateおよびSide LONG_Lによる拘束の影響がうかがえる。

図7.2.3(2)および(3)に示すTrans. RingとSTIFF.およびBottom LONG_L

FaceとSTIFF.のすみ肉溶接継手のビード上には、それぞれ、 52.1 kg/mm^2 および 43.9 kg/mm^2 に達するビード方向の引張残留応力 σ_{RL} が生じている。Trans. RingとSTIFF.のすみ肉ビードには、STIFF. 上下端部からの拘束が、Bottom LONG \perp FaceとSTIFF.のすみ肉ビードにはTrans. Ringからの拘束がそれぞれ効き、上記のような高い残留応力が生じたものと考えられる。

以上述べたごとく、実船殻ブロックには溶接残留応力のほかに、他部材による拘束が影響を及ぼし、拘束応力が重畳する。拘束応力は複雑な分布を示すものと考えられ、実船殻ブロックの残留応力の分布は単純な溶接継手試験片に比べるるとかなり不規則なものとなっている。したがって実船殻の残留応力分布については部材間の拘束の効果を明らかにする必要がある。

(2) X線応力測定結果

図7.2.4に、実船殻ブロックのBottom Seam部について測定した応力測定値を示す。図(a)はビード直角方向、図(b)は平行方向の応力値である。Aの実線で示すX線の測定値は基礎試験で得た応力分布に類似している。Bの破線は比較のためひずみゲージで解放測定した値を示したものである。C、C' およびd点が図(a)にない点線Cの分布となるが、C、C'は良好な圓折図形で疑う余地はない。d点はプロフィールが悪く、あまり信頼がおけない。同様図(b)において、b、b'点がなければ点線で示す曲線Cとなる。この場合、b、b'、a共にプロフィールが悪く、あまり信頼がおける値でなかった。

X線によって応力を測定するとき、構造物の測定ではこのような不明の点が測定されることがある。この原因は、測定部に殴打、衝撃、過擦など局所的な外力、外圧などの履歴がある場合、表面の状況が悪い場合、凹凸などがある場合などであって、かかる異常点は測定後直ちにデータ解析を行なって発見し、その近傍で他の健全な場所を選んで測定をやり直すこと、および多くの点を迅速に測定してその近傍の傾向から適否を推定することなどが普通行なわれる。現場測定ということ、今回はデータ解析が切離されて後日行なわれ、反復測定ができなかったこと、また少々悪い圓折図形を得た場合においても、装置の適応性の不全、表面処理法の欠陥と測定日程の関係などから意を尽せなかった。この点については次節で詳述する。

図7.2.5(1)および(2)はBottom LONG \perp 材の応力測定値である。(1)、(2)は夫々ビード直角方向および平行方向の応力であって、大よそ基礎試験で得たと同様の分布である。この場合、 σ_y は歪みゲージによる測定値と差がありすぎるが σ_x は同程度の応力であり、この理由は明確でない。いずれにせよ測定点の数が少なすぎて、これではただ測定値を得たということに止まっており多くの結論をもたらすものではない。

図7.2.6に示すのは、Trans. RingとSTIFF.の応力値である。実測点数が

不足していて応力分布状態を把握することは困難である。とくにSTIFF.の測定値は2点しかなく、しかも正負逆の応力を示すので、この解釈は困難である。普通なら前述のように近傍の諸点を反復測定して判断すべきである。

7.2.4 まとめ

船体の残留応力を把握する目的で、実船殻ブロックについて、ひずみゲージを用いた応力弛緩法により残留応力を測定するとともに、X線応力測定法の実船への適用を検討した。その結果を要約すると次のようになる。

1) CES, エレクトログラスおよび両面1層サブマージドアーク溶接による実船殻ブロック内の突合せ継手の残留応力分布は、前項の溶接継手試験片の分布と同様な傾向を示すが、隣接する部材による拘束の影響をうける箇所では、溶接継手試験片に比べて高い引張残留応力値を示す。

2) Trans. RingのSTIFF.のすみ肉溶接部では、部材相互間の拘束によってビード上に40~50 kg/mm²に達するビード方向の残留応力が生じる。

3) 未経験であった巨大構造物の応力測定を実施し、多くの技術的問題点を摘出することができた。

謝辞

7.1および7.2項の試験を行なうに際し、株式会社島津製作所ならびに理学電機株式会社から多大の御協力をいただいた。ここに謝意を表します。

7.3 X線応力測定装置の検討

基礎試験としての溶接継手の測定に用いた装置は、島津MDX-50型と理学電機MSF型応力測定機であり、使い勝手、精度共充分であった。

実船殻ブロックに使用した装置は、理学電機株式会社より借用した装置(R装置と呼ぶ)と島津製写真式応力測定装置(S装置と呼ぶ)であった。このR装置は、鉄道車輪、車軸、ローラー等、中型構造物、機械要素用に作製された装置である。したがって、実船殻ブロックの測定には不相当であった。狭隘なる場所でゴニオヘッドを支持する腕は巨大であり、この装置の性能は発揮されなかった。このため、ゴニオヘッドを取付ける治具を急造して測定にあたった。この治具は急造であって、測定位置の微小変動や縦位置の測定に不便であり、機動性に乏しく、多点の測定は労力的、時間的に困難を伴った。これが測定点数が少ない理由となった。S装置は、永久磁石で被測定体に取り付けることができ小型軽量であったが、写真法であるが故、事後のフィルム処理とデータ解析に困難を伴った。すなわち圓折環は斑点状であって、斑点状圓折環測定のための専用フォトメーターを使用せねば、そのフィルムの解析は労力と熟練が要求される。この装置がないと解析に万全を期することができない。データ処理は計数管法の場合は容易である。

装置構成は、計数管法の場合、測定機本体(計数管とその送り装置およびX線管球と管球ケース)、レートメーター回路、記録計などが必要であり、電源安定回路を含む電源制御器も必要となる。写真法では、管球ケースとX線管球にカメラだけで電源があればその安定度は必要であるが前者ほど厳密を要しない。したがって故障のないことと携帯性は写真法が優る。しかし前述のごとくデータ処理に関しては計数管方式が優る。以上双方を比較すれば夫々の利点と欠点が相半ばし、優劣はつけ難い。むしろ使用する場合に依じて使い分けるのがもっとも望ましい。しかし今後の方向としては、ミニコンピュータの併用によるデータの自動解析が主流となるであろうことから、計数管法に重みがあり、この方法の小型軽量化が急がねばならない。写真法に近い軽量小型の計数管法装置が出現するであろう。

測定の内容は両者において大差なく、構造用鋼の屈折線半価幅が $3\sim 4^\circ$ 位までと考えれば、 $2^\circ/\text{min}$ の走査速度で1ポイント4~5分、 $\sin^2\psi$ の4点測定で16~20分で測定点が終る。 $4^\circ/\text{min}$ の走査では、この半分でもよい。実際に使用する時には抛物線法を利用して多点測定を短時間で行ない、応力分布の概略を把握してから重要点の精密測定を行なうなどの方法によって、比較的短時間に構造物としての応力を把握することが可能であろう。写真法では今回の測定は、28~30 kVp 8mAで2~3分の露出で充分であったから、 $\sin^2\psi$ 4点測定で10~12分で測定できるし、 $0-45^\circ$ 法またはジャール法では、4~5分で1点測定ができるものである。

表面処理に関しては、今回市販の3台の装置を動員して現場測定にあたったが、尚研磨時間が長く、研磨操作も困難が伴い、充分の成果は挙げられなかった。しかし現場用のこの装置の作成は貴重な経験を得たものと云える。

さて、もっとも基本的で重要なことは、X線応力測定値の考え方である。この点の理解がないと、ひずみゲージ測定値と一致しない場合の解釈に困惑するからである。X線は、その測定位置における結晶の応力と変形の状況をもっとも忠実に示す観察手段である。したがって、その材料の変化を鋭敏に感知するものであって、材料の状態、性質の変化過程のパラメーターとなり得るものである。たとえば、材料のある点の応力、変形が、溶接したことによってどのように変化し、船殻として構成されたときどう変化したかと言うことを忠実に具現しているはずである。

以上の観点からの考察を総合すれば、小型軽量の専用装置の作製によって船殻構造物の応力状態の変化の測定には充分実用し得る基礎を得たと考えることができる。

8. 大入熱溶接使用実績調査

大入熱溶接の使用実績について、日本の代表的な造船所 35 工場に対しアンケートによる調査を行なった。

本調査で取り上げた大入熱溶接には、1. エレクトロスラグ溶接、2. エレクトロガス溶接、3. 消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接、4. 片面自動溶接（3 電極以上）の 4 溶接法で、各造船所におけるそれらの溶接法が適用されたすべての船について、適用範囲、鋼種、板厚範囲、入熱量、継手長さなどについての資料を集めた。アンケートに対する回答は対象 35 工場中 33 工場から集った。

(1) 造船所の分類

調査対象とした造船所を、造船界の慣行に従い、東部 (E)、関西 (C)、西部 (W) の 3 つの地域別に分け、さらに建造規模別に 5 万 D.W.T. 以下の建造規模 (I)、準巨大船建造規模 (II)、巨大船規模 (III) に分類し、記号および番号をつけた。

(2) 使用実績

1) 大入熱溶接を適用した船舶の隻数

各溶接法別にそれが適用された船舶の隻数を調べた。図 8.1 に群別に調べた結果を示し、図 8.2 に全群の合計を示す。

a) I 群ではエレクトロスラグ溶接の実績がなく、片面自動溶接の実績も少ない。

b) II 群ではエレクトロスラグ溶接がエレクトロガス溶接より多く、III 群ではエレクトロガス溶接の方がエレクトロスラグ溶接より多い。II 群のエレクトロスラグ溶接の実績の多いのは、使用開始の時期が古いためと思われる。

c) 図 8.2 の全群の合計、すなわち消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接 585 隻、エレクトロガス溶接 535 隻、エレクトロスラグ溶接 315 隻、片面自動溶接 211 隻に見られるように、非常に多数の船舶に大入熱溶接が適用されたことが明らかとなった。

2) 大入熱溶接の適用箇所および鋼種

大入熱溶接の適用状況を造船所別に使用開始時期、適用箇所および適用鋼種について調査したところ、表 8.1 へ表 8.3 のようになった。ここに記号内訳は次のとおりである。

・箇所別記号（〔 〕内に適用箇所を示した）

SS：船側外板

BS：船底外板

LB：縦通隔壁

TB：横置隔壁

DL：デッキロンヂ

BL：ボトムロンヂ

UD：上甲板

• 鋼種別記号

A, B, D：A, B, D級軟鋼

5A, 5D：50キロA, D級高張力鋼

注：外国船級協会規格を含む統一記号として表わした。

50キロ級高張力鋼は降伏点、36キロ級鋼を含まない。

これらの表から次のことが云えよう

a) エレクトロスラグ溶接

エレクトロスラグ溶接はⅡ群およびⅢ群に属する造船所で使用されており、適用箇所は船側外板に限られ、適用鋼種はⅠ工場を除きA級鋼のみである。

b) エレクトロガス溶接

一般に船側外板および隔壁に適用されている。船側外板では、高張力鋼への適用は認められず、軟鋼(A, B, C, D)への適用が認められる。

隔壁では、縦通隔壁で、高張力鋼(5A)への適用が認められる。

c) 消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接

一般にデッキロンジおよびボトムロンジに適用されている。一部では縦通隔壁、クロスタイ、エンジンガード、セクターガードにも適用されている。

鋼種は軟鋼(A)の外、高張力鋼(5A, 5D)にも適用されている。

d) 片面自動溶接(3電極以上)

ⅠおよびⅡ群に属する造船所では主として上甲板、船側外板および船底外板の平板ブロックに適用されており、Ⅲ群ではこの外縦通隔壁、横置隔壁にも適用されている。なお、一部では二重底頂板にも適用している。

鋼種は軟鋼(A, B, D)の外、高張力鋼(5A, 5D)にも適用されている。

3) 溶接長

溶接長については、アンケートでは、回答のなかったもの、突き合せ溶接長とすみ肉溶接長との合計長を記載してあるもの等があり、全体的にまとめることが出来なかったため、Ⅲ群に属する造船所の数例を表8.4に示す。これで見ると突き合せ溶接の全長に対する各溶接長の割合は概ね次のようである。

a) エレクトロスラグ溶接 ----- 0.8%以下 (船側外板のバットに使用)

1.2% (船側外板のシームに使用)

b) エレクトロガス溶接 ----- 1%以下 (船側外板にのみ使用)

3%以下 (船側外板と隔壁に使用)

c) 消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接 --- 1%以下

d) 片面自動溶接 ----- 6%~21%

4) 入熱量

溶接法別の入熱量を図8.3および図8.4に示す。またそれぞれの入熱量の分布を領域として表わし、同一図上に示すと図8.5のようになった。

片面自動溶接を除き、エレクトロスラグ溶接、エレクトロガス溶接、消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接ではばらつきが大きいことがわかった。主な原因は造船所によって開先形状が異なるためである。

(3) まとめ

今回の調査により数百隻の多数の大型船に大入熱溶接が適用されていることが分った。

適用箇所は船体平行部の上甲板、船側外板、船底外板、縦横隔壁、ロンヂ材等の各継手にわたっており、これらのほとんどが船体の主要継手と云いうる。

適用された鋼種は軟鋼(A, B, D), 高張力鋼(5A, 5D)にわたっているが、上甲板、船側外板では高張力鋼部の現場継手については、一部の例外を除いてはエレクトロスラグ溶接またはエレクトロガス溶接による大入熱溶接は行なわれていない。

船底外板では高張力鋼(5A, 5D)のシーム溶接に対し、片面自動溶接(3電極以上)による大入熱溶接がかなり行なわれている。

また、デッキおよびボトムロンヂ材あるいは縦通隔壁では、高張力鋼(5A)の現場継手に対し、消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接による大入熱溶接がかなり行なわれている。

これらの船舶に生じる引張応力は、上甲板およびデッキロンヂのバット継手で、高張力鋼部では $9\sim 19\text{ kg/mm}^2$, 軟鋼部では $7\sim 15\text{ kg/mm}^2$, また船底外板のシーム継手では $7\sim 10\text{ kg/mm}^2$ 位とされている。したがって、これらの船舶は、現時点では、これらの応力下で異常なく就航していると言う実績を示していることになる。

9. むすび

本研究委員会の共同研究は、50キロ級高張力鋼板を中心とした船殻材の高能率大入熱溶接継手についての破壊靱性を把握し、脆性破壊による重大損傷防止の基礎資料を得ることを目的として、昭和48年4月より3ヶ年計画で実施されることになったものである。

昭和49年度には、第2年度の研究として、上述のごとく、一般船体用軟鋼板KAS鋼のVASCON-II法溶接継手、デルタオッシレート法溶接継手、KDK鋼の3電極片面1層溶接継手、ならびに船体用50キロ級高張力鋼板K5D鋼のVASCON-II法溶接継手、デルタオッシレート法溶接継手、3電極片面1層溶接継手、エレクトロガス溶接継手などについて、種々の観点から破壊試験を実施し、脆性破壊強度を把握した。

また、大入熱溶接継手部の大形伝播試験結果などから実船殻の脆性破壊強度を定量的に推定するための基礎研究として、動的光弾性試験および光弾性皮膜法試験などの伝播現象に関する基礎研究を実施し、有用な知見が得られた。

さらに、大入熱溶接継手部の残留応力分布把握に、従来のひずみゲージを用いた応力弛緩法のほかに、非破壊のX線応力測定法の適用を試み、その実用化についての多くの技術的問題点を摘出することができたことは、非常に有意義であったと評価されよう。

しかしながら、溶接継手部に沿って直進伝播する脆性破壊の挙動を定量的に評価し、試験結果から船殻等の実構造物中での溶接部の脆性破壊強度を精度良く推定出来るようになるまでには、今後の積極的な研究努力が必要である。

なお、本研究委員会発足当初から検討、計画されていた、大入熱溶接部についての大形構造要素(実船局部構造モデル)破壊試験実施に関しては、本研究部会での実施は困難であるとの見地から、昭和49年9月より、第153研究部会に“構造モデル検討小委員会”を設け、具体的な検討を継続して行なうことにした。

参 考 文 献

- 1) 日本造船研究協会第147研究部会, “船体用高張力鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度評価に関する研究,” 日本造船研究協会研究資料No.208, 昭49.3.
- 2) K. Iida, T. Kusuda, T. Matsuoka, T. Maeda, and H. Kihara, “Effect of Residual Stresses on the Behavior of Brittle Fracture Propagation,” IIW Doc. X-263-61.
- 3) H. Kihara, T. Yoshida, and H. Oba, “Initiation and Propagation of Brittle Fracture in Welded Steel Plate,” IIW Doc. X-217-59.
- 4) H. Kihara, T. Kanazawa, and K. Iida, “Studies of Strain Energy Release Rate in Wide Parallel-Joint Specimens,” IIW Doc. X-293-62.
- 5) M. Ishida, “Stress-Intensity Factors for the Tension of an Eccentrically Cracked Strip,” Transactions of the ASME, Ser. E, 33-3, Sep. 1966, p674~675.
- 6) 長谷部, 川口, “脆性破壊伝播停止特性からみた鋼板の材質評価について (テ-パ-形DCB試験),” 日本造船学会溶接研究委員会第1分科会資料, 昭49.12.
- 7) A.B.J. Clark and R.J. Sanford, “Comparison of Static and Dynamic Properties of Photoelastic Materials,” Experimental Mechanics, June 1963, p148~151.
- 8) 岡村弘之, 高野太刀雄, “小形クセリソ放電管を用いた動的な光弾性実験について,” 応力と歪, 第2巻第2号, 1973, p23~29.
- 9) W.B. Bradley, “A Photoelastic Investigation of Dynamic Brittle Fracture,” Ph. D. Dissertation, University of Washington, 1969.
- 10) B.G. Wade, “A Photoelastic and Numerical Study on Fracture Dynamics of Stressed Panels,” Ph. D. Dissertation, University of Washington, 1974.
- 11) L.B. Freund, “Crack Propagation in an Elastic Solid Subjected to General Loading - I, Constant Rate of Extension,” J. Mech. Phys. Solids, Vol. 20, 1972, p129~140.
- 12) A.A. Wells and D. Post, “The Dynamic Stress Distribution Surrounding a Running Crack - A Photoelastic Analysis,” Proc. S.E.S.A. Vol. 16, 1958, p69~92.
- 13) B.R. Baker, “Dynamic Stresses Created by a Moving Crack,” J. Applied Mech., Sep. 1962, p449~458.
- 14) E.H. Yoffe, “The Moving Griffith Crack,” Phil. Mag., Ser. 7, Vol. 42, 1951, p739~750.
- 15) 日本材料学会材料強度部門委員会, “X線応力測定法標準,” 日本材料学会, 1973.

表 2.1 SRI47 研究部会 “船体用高張力鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度評価に関する研究”
第 2 年次(昭和 49 年度) 研究分担一覽

研究項目	試験内容	KAS 25.4			KDK 25.4			K5D 25.4 (As Rolled)			ILV ガス溶接試験 試験片数	光弾性試験	実験計画	
		VASCON 正法溶接 試験片数	アルタールト法溶接 試験片数	3電極片面溶接 試験片数	VASCON 正法溶接 試験片数	アルタールト法溶接 試験片数	3電極片面溶接 試験片数	VASCON 正法溶接 試験片数	アルタールト法溶接 試験片数	3電極片面溶接 試験片数				
1. 鋼材の基礎データの把握	1.1 丸棒引張試験	母材	7	7	7	7	7	7	7	7				
		Depo	7	7	7	7	7	7	7	7	7			
	2.1 (V) の比較試験	母材	20			20			20					
		Depo	20			20			20					
		Bond	20	長崎大		20	長崎大		20	日立				
		HAZ	20	長崎大		20	長崎大		20	日立				
		HAZ	20	長崎大		20	長崎大		20	日立				
		HAZ	20	長崎大		20	長崎大		20	日立				
	1.3 耐腐蝕試験	再熱材	135	長崎大										
		耐腐蝕調査	1	長崎大	長崎大	1	長崎大	長崎大	1	長崎大	長崎大			
2. 脆性破壊に関する研究	1.4 小形 COD 曲げ試験	母材	10		10			10						
		Depo	10	東大	東大	10	三井	三井	10	川重	川重			
		Bond	10	東大	東大	10	三井	三井	10	川重	川重			
	2.1 中央切欠(縦貫通)大形引張試験	母材	6			6			6					
		Depo	6	東大	東大	6	三井	三井	6	川重	川重			
		Bond	6	東大	東大	6	三井	三井	6	川重	川重			
3. 脆性破壊に関する研究	3.1 中形伝播試験	軸線伝播伝播特性												
		母材	4	三菱	三菱	4	三菱	三菱	4	三菱	三菱			
	3.2 大形伝播試験	Bond	6			6			6					
4. 船体鋼材の分布の把握	4.1 基礎試験		1	日立				1	日立					
	4.2 実船試験													
備考		新日鉄	神鋼	神鋼	新日鉄	神鋼	神鋼	神鋼	神鋼	神鋼	三菱			
(溶接継手製作担当のアルタールト法溶接条件その他)		HT50 用溶接材使用	HT50 用溶接材使用											
注) 大入熱溶接使用実績アンケート調査とリまとめは、日本海事協会および川重で行なった。														

表 3.1 供試材の化学成分ならびに機械的性質

鋼種	熱処理	板厚 (mm)	化学成分 (%)					機械的性質		
			C	Si	Mn	P	S	降伏点 σ_y (kg/mm ²)	引張り強さ σ_B (kg/mm ²)	伸び El. (%)
KAS	As Rolled	25.4	0.17	0.04	1.00	0.014	0.015	25~26	44	27~31
KDK	As Rolled	25.4	0.14	0.23	0.71	0.014	0.012	30~33	43	32~35
K5D	As Rolled	25.4	0.15	0.32	1.39	0.019	0.007	35~39	53	23~26
*K5D	As Rolled	25.4	0.15	0.32	1.41	0.021	0.006	38~39	53	28~29

* : 中形伝播試験用

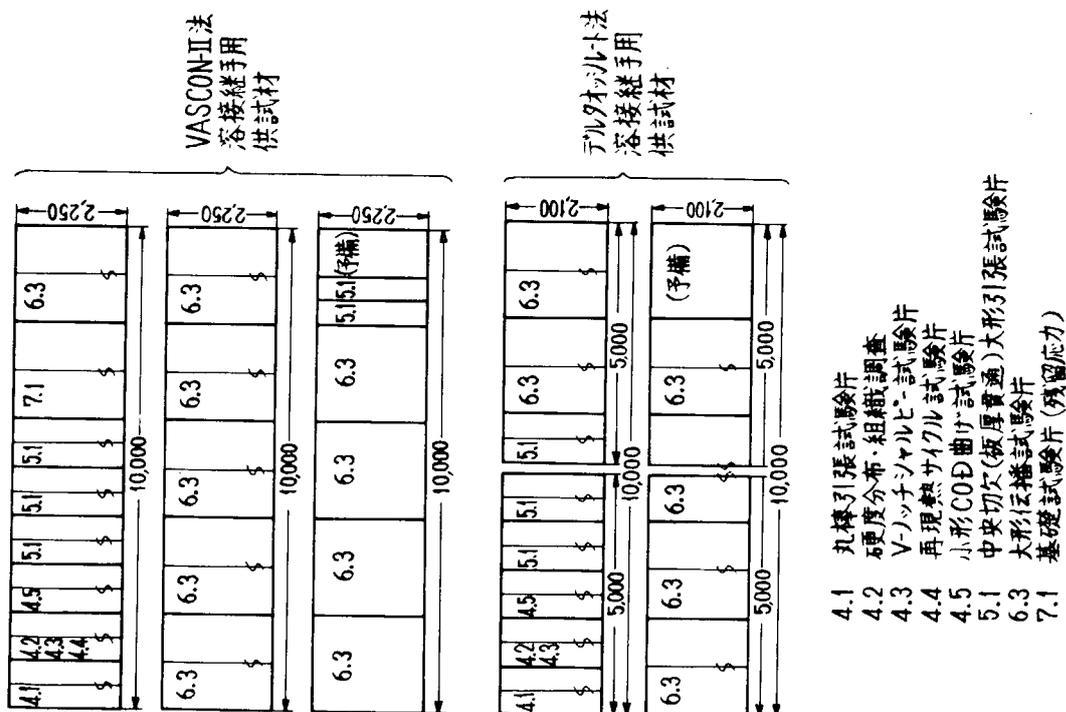
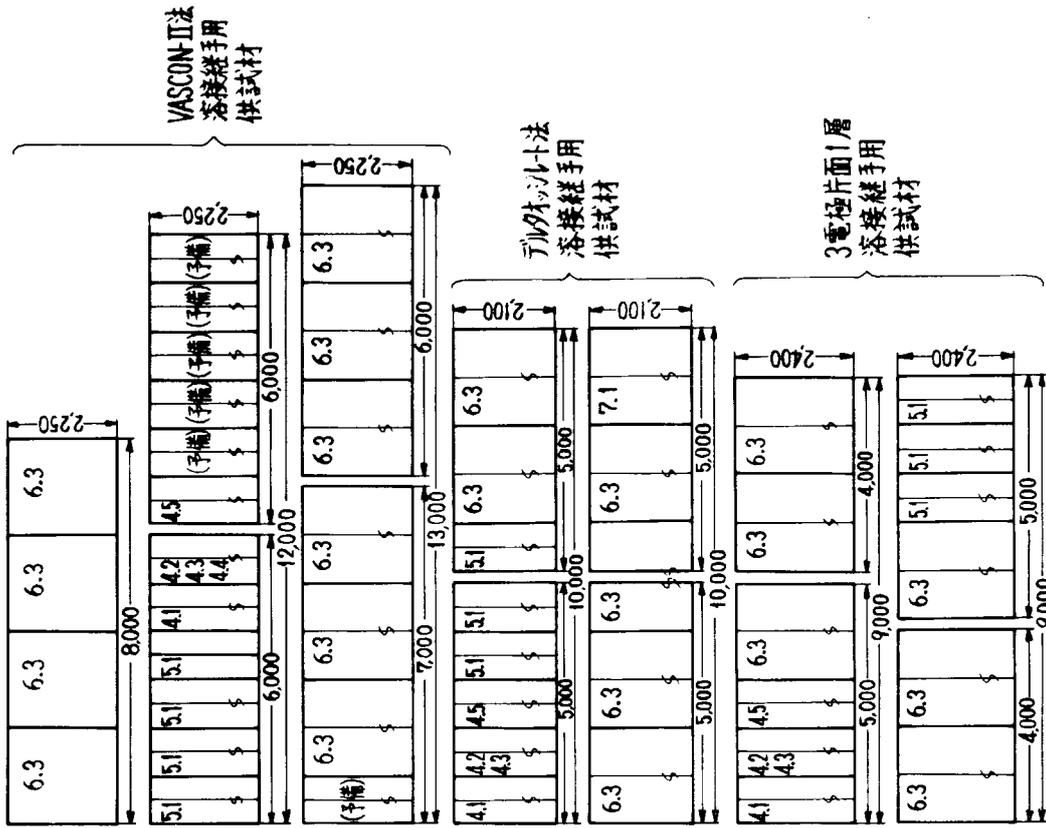
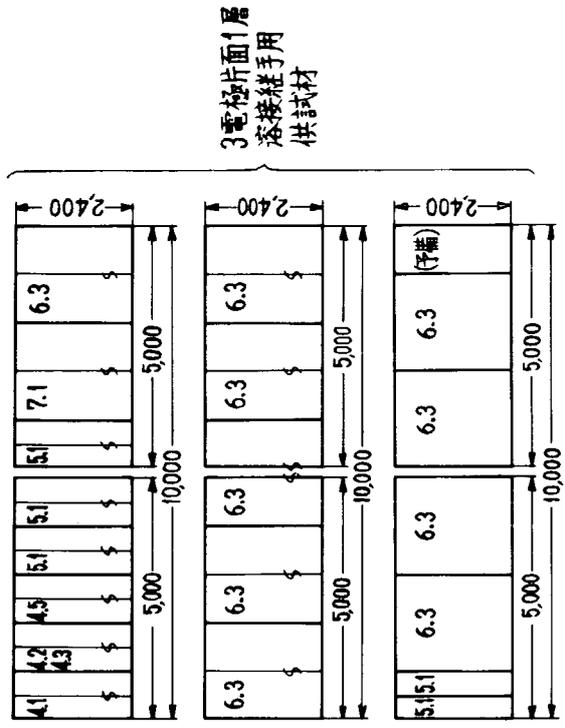


図 3.1 供試材の板取り要領
(KAS, 25.4 mm)



- 4.1 丸棒引張試験片
- 4.2 硬度分布・組織調査
- 4.3 V-ノッチシャルピ-試験片
- 4.4 再現熱サイクル試験片
- 4.5 小形COD曲げ試験片
- 5.1 中央切欠(板厚貫通)大形引張試験片
- 6.3 大形伝播試験片
- 7.1 基礎試験片(残留応力)

図 3.3 供試材の板取り要領
(K5D, 25.4 mm)

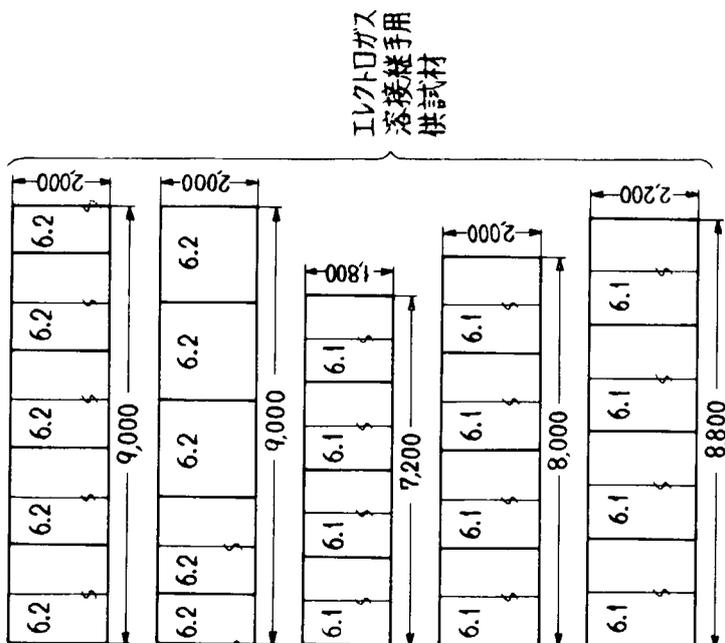


- 4.1 丸棒引張試験片
- 4.2 硬度分布・組織調査
- 4.3 V-ノッチシャルピ-試験片
- 4.5 小形COD曲げ試験片
- 5.1 中央切欠(板厚貫通)大形引張試験片
- 6.3 大形伝播試験片
- 7.1 基礎試験片(残留応力)

図 3.2 供試材の板取り要領
(KDK, 25.4 mm)

表 3.2 溶接条件

鋼種	溶接法	溶接ワイヤ	フラックス	極間距離 (mm)	雰囲気	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (KJ/cm)	開先形状および継手断面
KAS (25.4)	VASCON-II	YM-28 1.6 ϕ	—	—	Ar+O ₂ (10%) 総流量25ℓ/min	340 ~460	26 ~36	7.2	108	
	デルタオシルト	DEL-50 1.2 ϕ	—	—	内側: Ar (20ℓ/min) +CO ₂ (5ℓ/min) 外側: CO ₂ (35ℓ/min)	200 ~220	20 ~22	1.8 ~2.0	120 ~161	
KDK (25.4)	3電極片面 1層 RF	L:US43.48 ϕ T ₁ :US43.64 ϕ T ₂ :US43.64 ϕ	PFR-47 RF-1	L~T ₁ =80 T ₁ ~T ₂ =100	—	1,250 1,150 1,250	30 40 48	60	134.5	
K5D (25.4)	VASCON-II	YM-28 1.6 ϕ	—	—	Ar+O ₂ (10%) 総流量25ℓ/min	340 ~460	27 ~36	6.7	117	
	デルタオシルト	DEL-50 1.2 ϕ	—	—	内側: Ar (20ℓ/min) +CO ₂ (5ℓ/min) 外側: CO ₂ (35ℓ/min)	200 ~220	20 ~22	1.8 ~2.0	120 ~161	
	3電極片面 1層 RF	L:US43.48 ϕ T ₁ :US43.64 ϕ T ₂ :US43.64 ϕ	PFI-53 RF-1	L~T ₁ =80 T ₁ ~T ₂ =100	—	1,250 1,050 1,150	30 42 50	70	139.5	
K5D (25.4)	エレクトロガス	HS-42G 3.2 ϕ	—	—	CO ₂ 40ℓ/min	640 ~650	39	7.8 ~8.2	183 ~195	

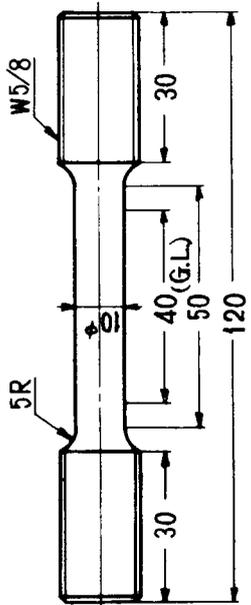


6.1 中形伝播試験片(その1) - 斜め継手伝播試験片
6.2 中形伝播試験片(その2) - 伝播特性試験片

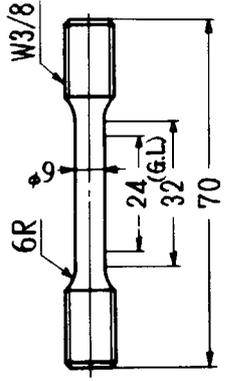
図 3.4 供試材の板取り要領
(K5D, 25.4 mm)

表 4.1.1 丸棒引張試験結果 (KAS鋼)

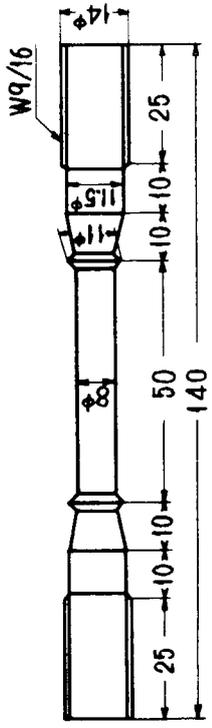
KAS	試験温度 (°C)	降伏応力 σ_y (kg/mm ²)	引張強さ σ_B (kg/mm ²)	伸び ϵ (%)	絞り γ (%)
母材	15	23.6	43.0	41.9	72.4
	15	25.9	42.9	41.4	69.2
	-40	29.4	46.7	39.4	67.9
	-80	35.2	50.8	40.5	67.0
	-80	39.1	50.7	40.0	66.5
	-110	44.7	55.3	36.2	66.5
VASCON -II法 溶接金属	-196	88.9	86.6	7.3	7.8
	15	32.3	47.5	30.8	69.5
	15	33.5	48.4	35.6	68.7
	-40	37.8	51.2	36.3	68.8
	-80	44.0	55.1	36.3	67.7
	-80	43.8	55.2	32.1	66.9
Filler 形状 溶接金属	-110	52.1	59.3	32.9	63.6
	-196	38.1	88.1	6.3	6.0
	15	37.7	51.5	24.6	78.9
	-36	40.7	55.7	23.3	77.1
	-76	45.3	60.5	27.6	76.8
	-120	53.7	64.8	26.4	72.4
-150	61.8	69.9	23.9	71.8	
-196	87.3	72.6	19.6	46.1	



KAS鋼 母材
K5D鋼 母材



KAS鋼 VASCON-II法 溶接金属
K5D鋼 VASCON-II法 溶接金属



KDK鋼 母材
KAS鋼 デルタオットリト法 溶接金属
KDK鋼 3電極片面1層 溶接金属
K5D鋼 デルタオットリト法 溶接金属
K5D鋼 3電極片面1層 溶接金属

図 4.1.1 丸棒引張試験片形状

表4.1.2 丸棒引張試験結果 (K5D鋼)

K5D	試験温度 (°C)	降伏応力 O_Y (kg/mm ²)	引張強さ O_B (kg/mm ²)	伸び E (%)	絞り g (%)
母材	15	34.8	52.7	36.5	77.8
	15	35.6	53.1	34.8	77.7
	-40	39.5	57.7	36.0	71.0
	-80	41.1	61.6	38.0	70.8
	-80	43.0	62.0	36.8	70.7
	-110	50.3	64.0	36.4	68.6
	-196	88.3	92.2	22.1	22.5
	15	33.6	50.5	35.8	70.6
	15	33.9	50.5	35.6	70.7
	-40	38.4	53.6	34.8	71.5
VASCON -II法 溶接金属	-80	42.8	55.9	32.1	67.3
	-80	44.3	57.8	38.3	68.7
	-110	48.4	59.4	35.2	67.8
	-196	86.9	86.9	1.5	3.2
	16	43.4	57.1	22.6	78.6
	-36	44.1	62.2	27.1	77.7
Tilg 加減法 溶接金属	-76	50.3	66.5	26.5	74.7
	-120	57.3	72.6	27.7	71.4
	-150	67.1	77.4	25.8	70.8
	-196	88.3	95.7	21.3	93.8
	16	52.7	65.6	21.1	69.1
3電極 片面溶接金属	-36	54.1	70.7	27.1	66.9
	-76	57.7	77.5	21.1	66.2
	-120	61.7	83.6	22.6	62.9
	-148	71.9	89.0	24.4	60.9
3電極 片面溶接金属	-196	87.9	87.9	0.4	4.9
	-196	90.2	103.7	8.3	13.9

表4.1.3 丸棒引張試験結果 (KDK鋼)

KDK	試験温度 (°C)	降伏応力 O_Y (kg/mm ²)	引張強さ O_B (kg/mm ²)	伸び E (%)	絞り g (%)
母材	15	27.1	42.8	35.0	76.2
	-36	30.1	47.6	36.8	75.0
	-76	34.6	52.0	37.3	74.1
	-119	46.5	56.9	34.3	72.8
	-150	55.5	63.1	28.1	67.7
	-151	56.8	64.1	26.6	68.0
	-196	78.1	84.7	11.4	21.2
3電極 片面溶接金属	15	38.3	52.5	26.2	75.3
	-36	41.2	56.9	27.4	76.8
	-76	48.0	62.3	30.1	73.7
	-120	55.2	67.3	30.6	70.1
	-151	63.9	72.0	25.5	69.4
-196	84.5	91.8	8.2	21.2	

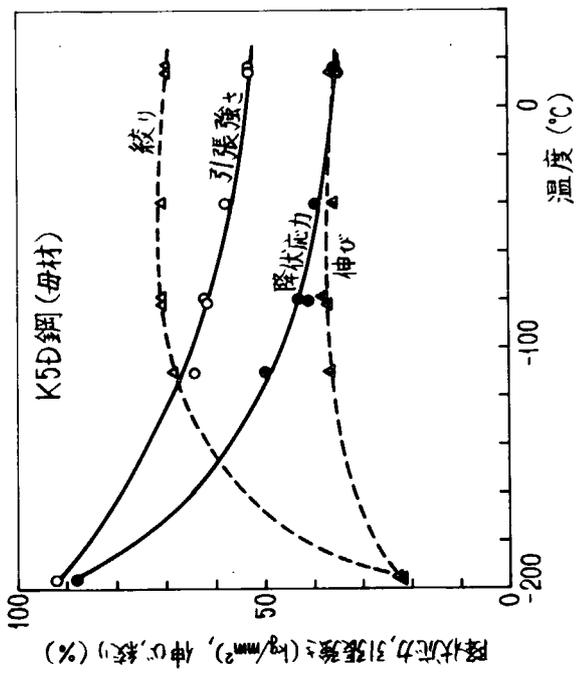
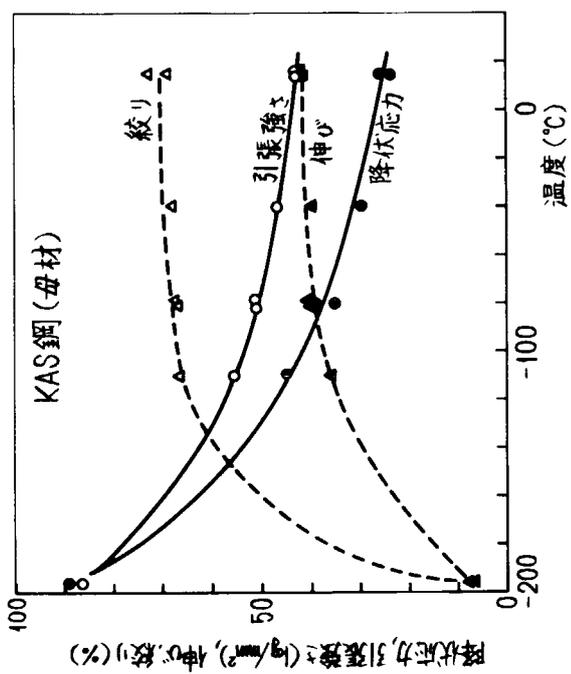


図4.1.2 丸棒引張試験結果(母材)

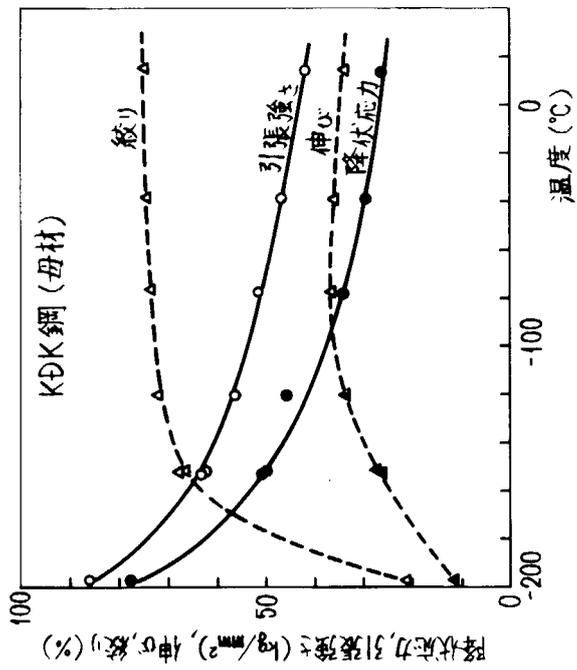


図4.1.3 丸棒引張試験結果(母材)

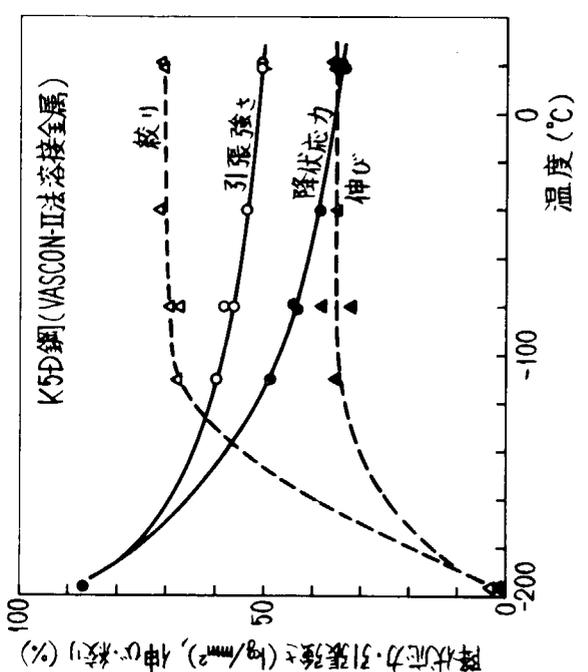
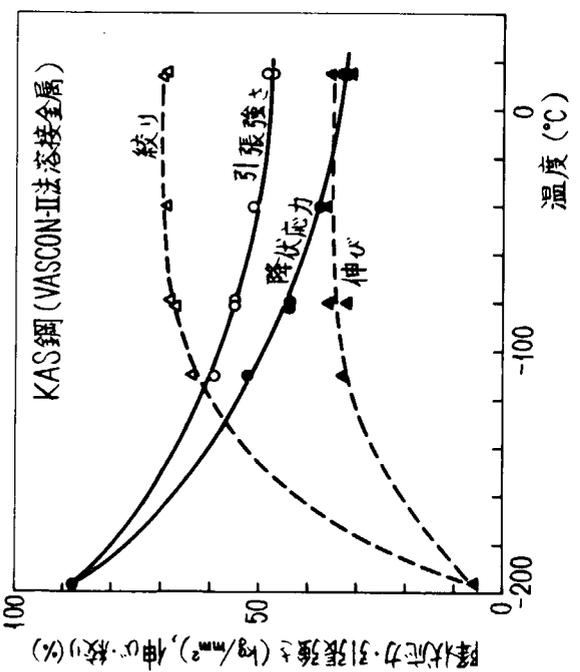
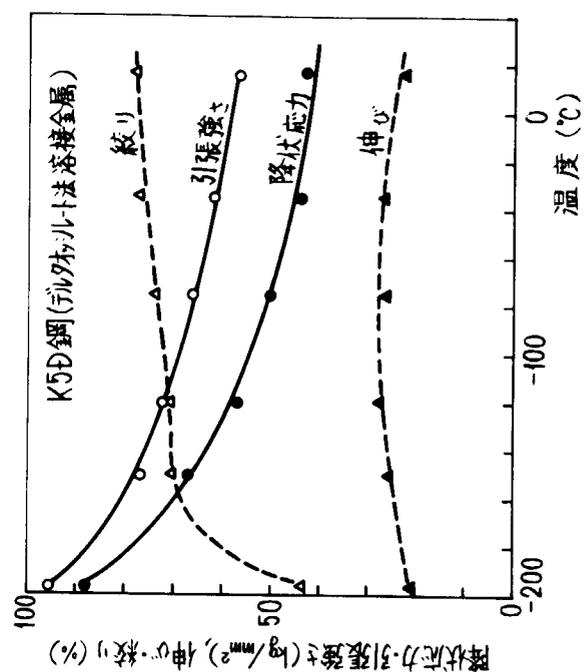
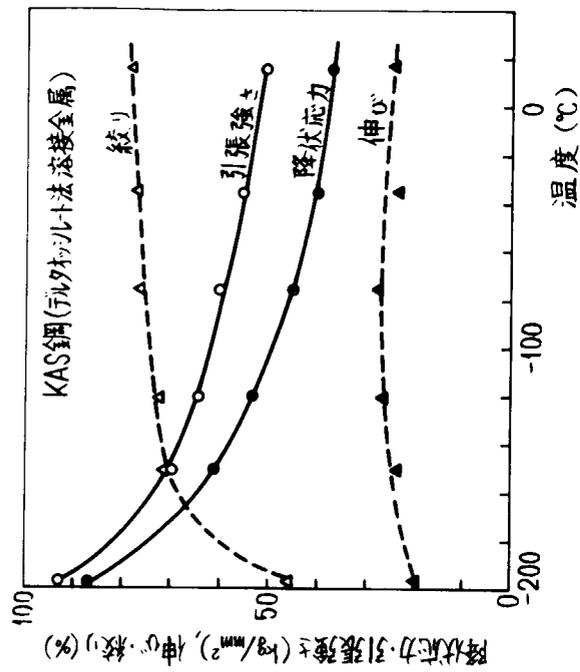


図4.1.5 丸棒引張試験結果(フィルレット法溶接金属)

図4.1.4 丸棒引張試験結果(VASCON-II法溶接金属)

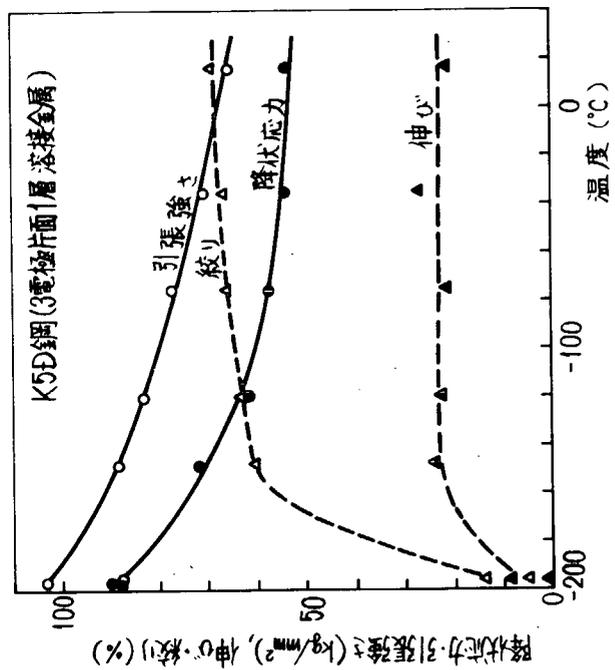
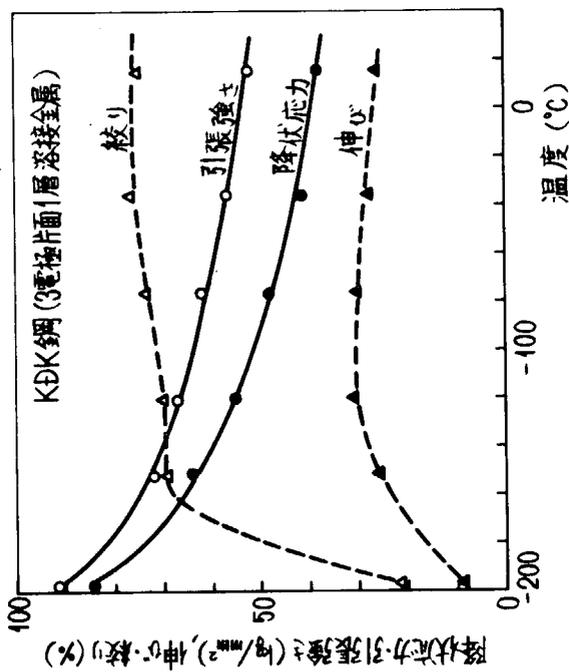


図4.1.6 丸棒引張試験結果(3電極片面1層溶接金属)

記号	R.T. ~ -110°C
① 母材	$\sigma_T = 11.2e^{2280/Tk}$
② VASCON II法溶接金属	$\sigma_T = 18.0e^{1716/Tk}$
③ アルシノリ法溶接金属	$\sigma_T = 26.0e^{1073/Tk}$

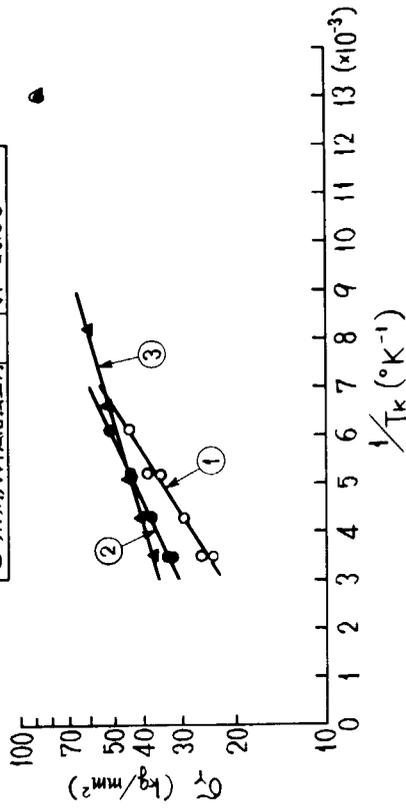


図4.1.7 降伏応力と温度との関係 (KAS鋼)

記号	R.T. ~ -110°C
① 母材	$\sigma_Y = 22.8e^{12.6/T_k}$
② VASQNH 溶接金属	$\sigma_Y = 21.2e^{13.90/T_k}$
③ 予成列/予付溶接金属	$\sigma_Y = 31.9e^{8.77/T_k}$
④ 3電極片面1層溶接金属	$\sigma_Y = 42.8e^{65.0/T_k}$

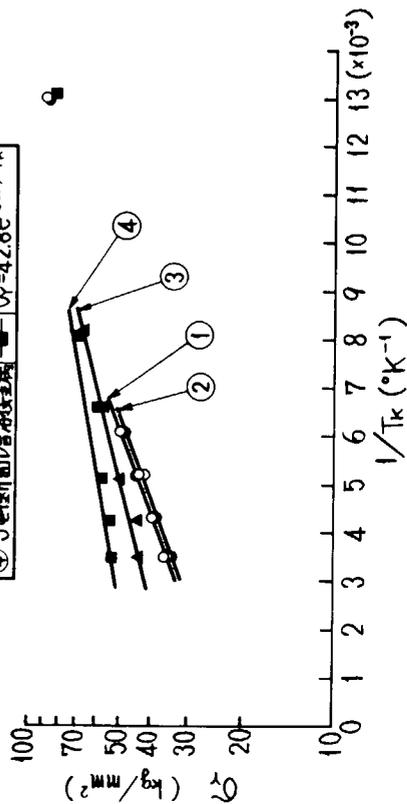


図4.1.8 降伏応力と温度との関係 (K5D鋼)

記号	R.T. ~ -150°C
① 母材	$\sigma_Y = 15.7e^{155.0/T_k}$
② 3電極片面1層溶接金属	$\sigma_Y = 27.0e^{105.8/T_k}$

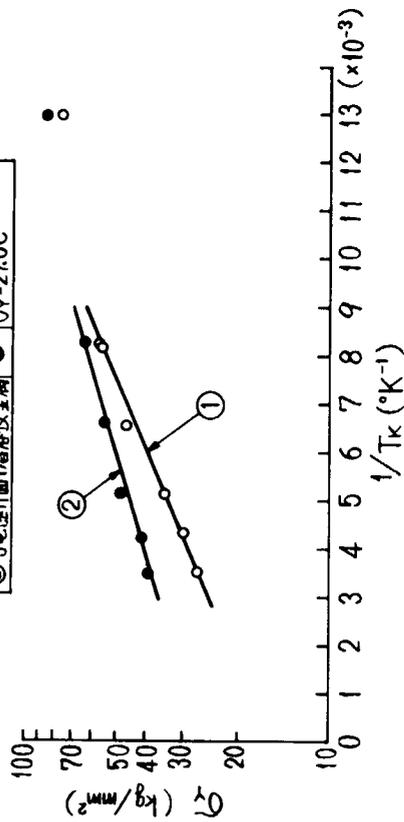
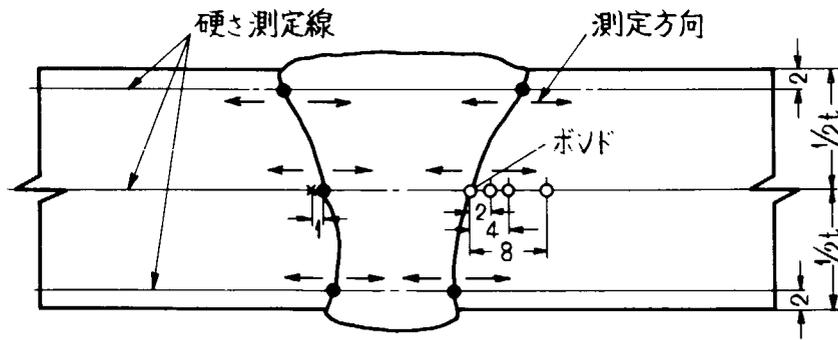


図4.1.9 降伏応力と温度との関係 (KDK鋼)



1. ●印は硬さ測定の基点を示す。
2. 測定間隔は1mm(ただし溶接金属部は両側ボンドより測定したのである個所では1mm間隔になっていない。その個所はグラフに測定間隔を付記している)
3. 上中下はグラフの測定線順を示す。
4. ○印は顕微鏡組織撮影個所を示す(mm)。

図4.2.1 継手部ビッカース硬さ測定および顕微鏡組織撮影位置

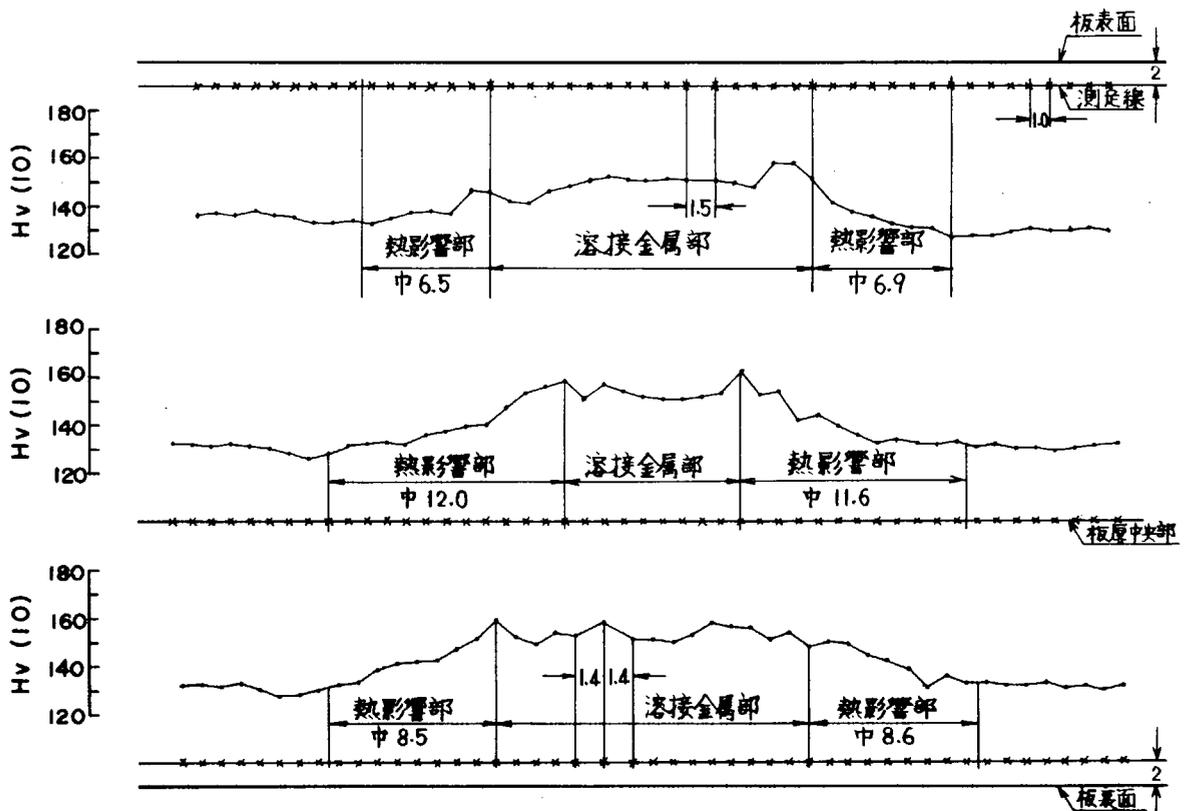
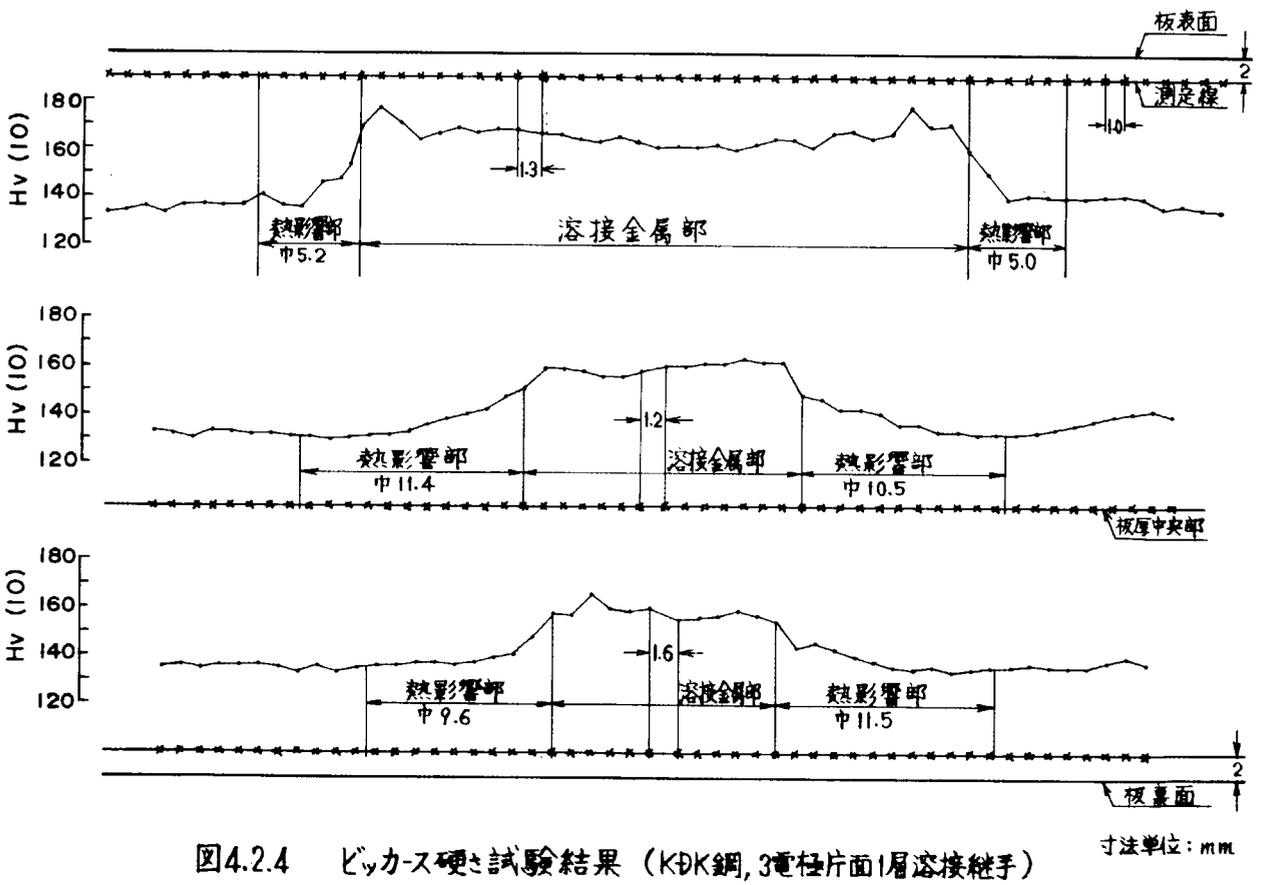
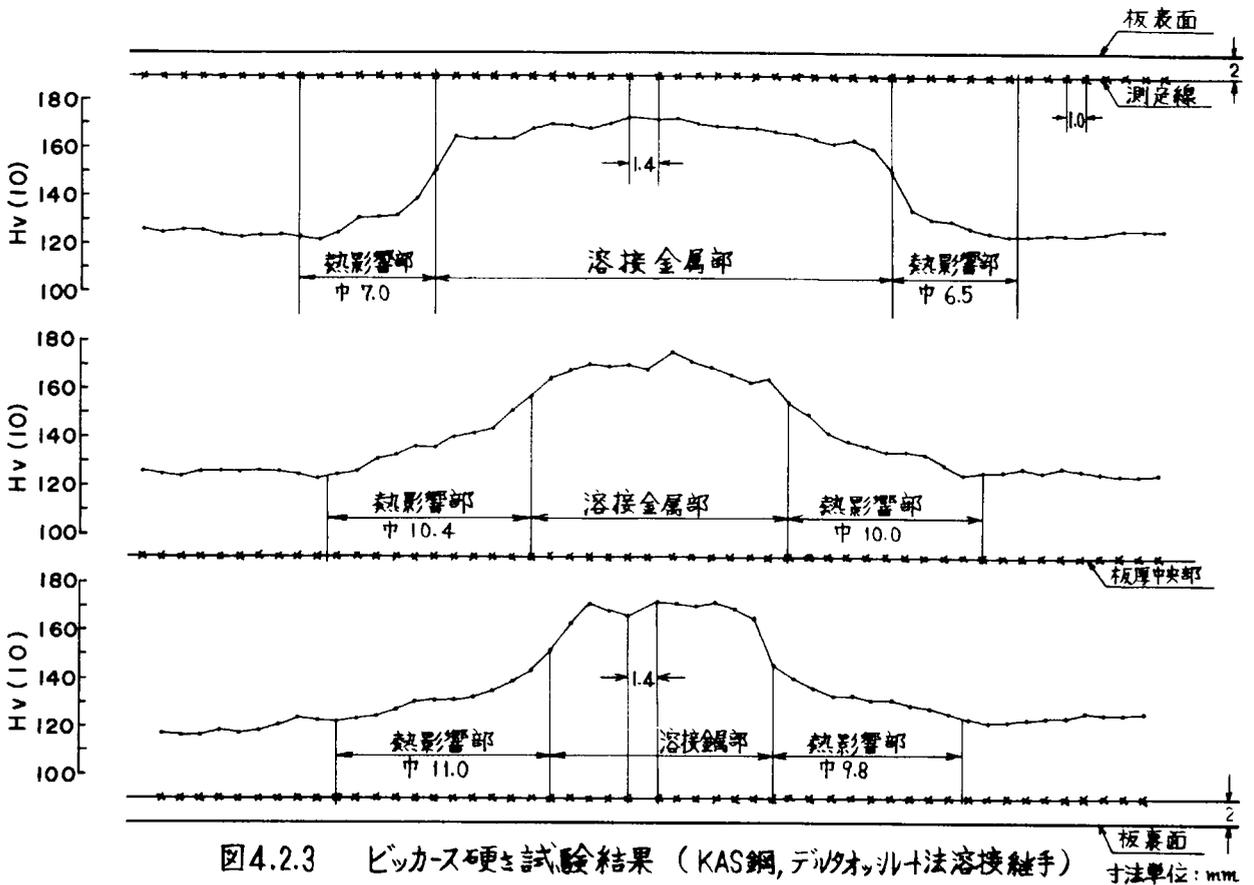


図4.2.2 ビッカース硬さ試験結果 (KAS鋼, VASCON-II法溶接継手) 寸法単位:mm



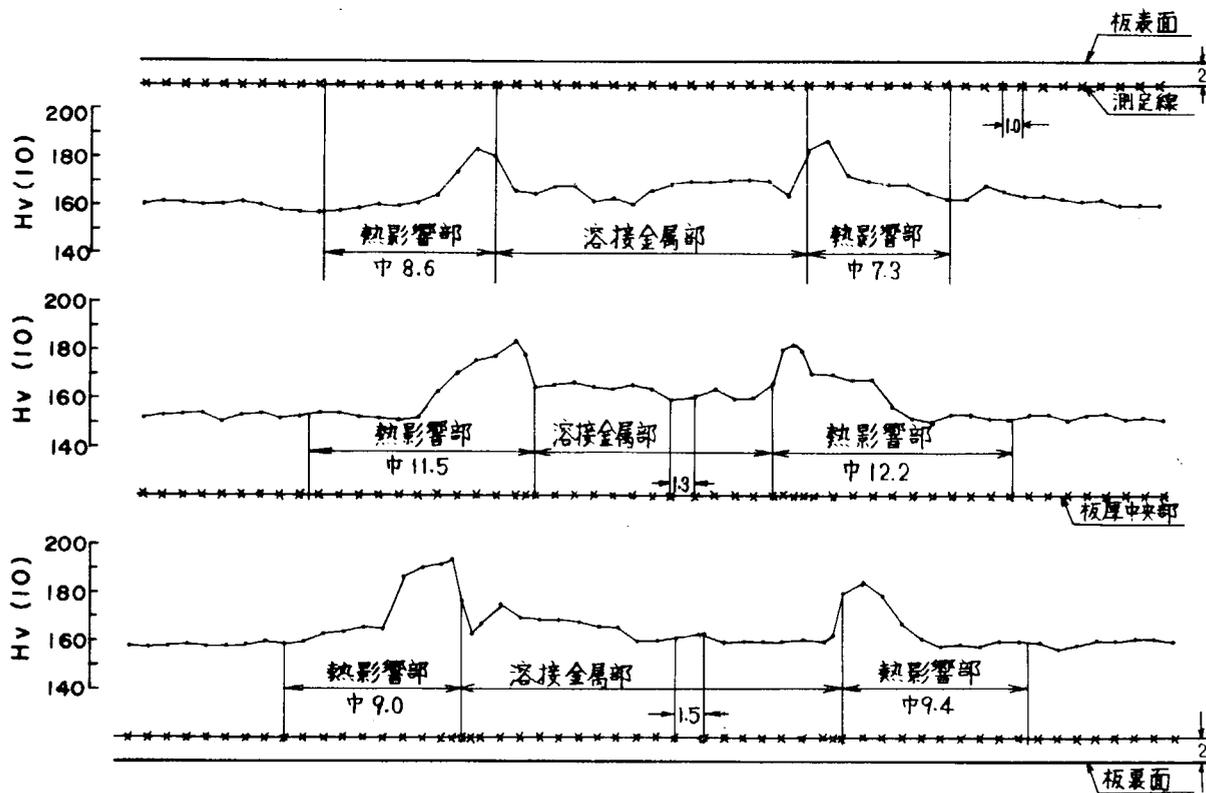


図4.2.5 ビッカース硬さ試験結果 (K5D鋼, VASCON-II法溶接継手)

寸法単位: mm

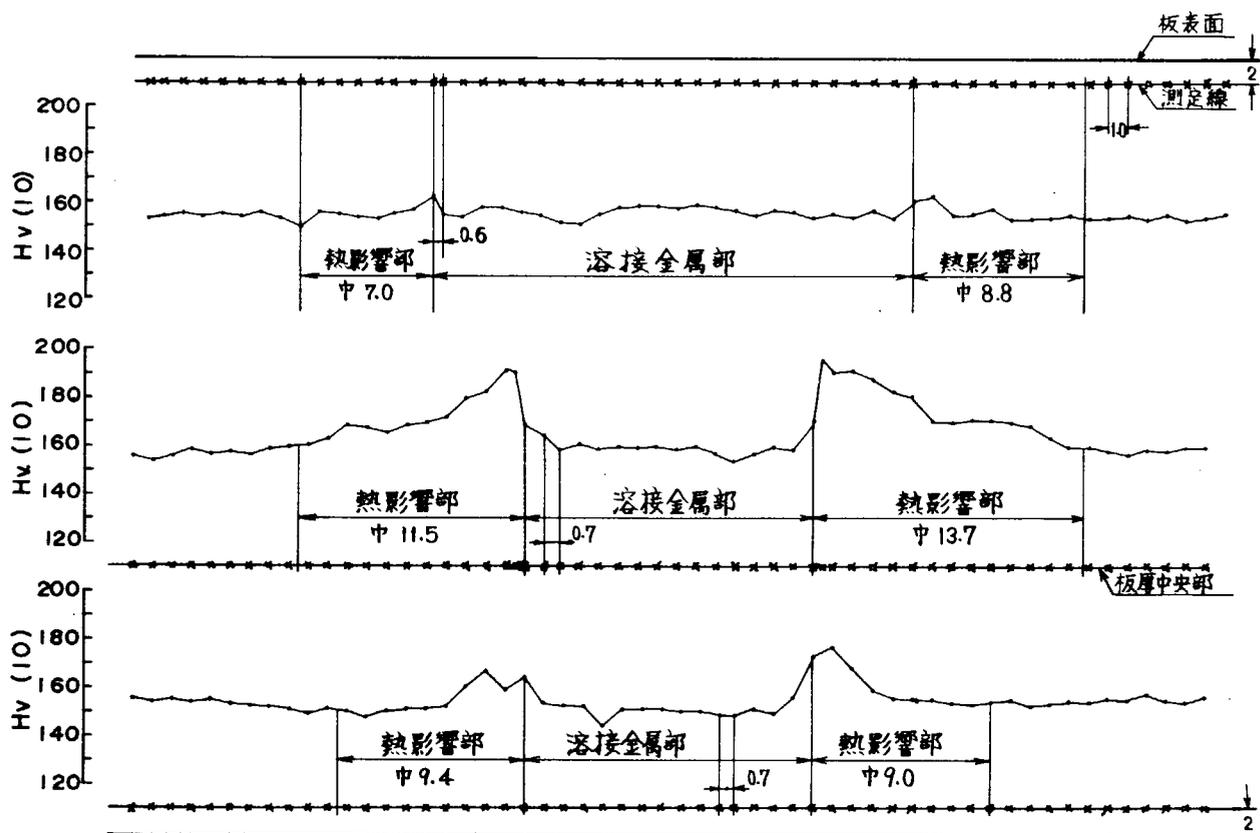


図4.2.6 ビッカース硬さ試験結果 (K5D鋼, デルタオキッド法溶接継手)

寸法単位: mm

表 4.2.1 継手部のピッカース硬さ試験結果

添 母	溶 材	溶 接 法	鋼 種	測定位置	ピッカース硬さ		Hv(10)
					溶接金属部	熱影響部	
母材	材		KAS	板両面より	116—138	ボンド部	
			KDK	2mmと板厚	130—142		
			K5D	中央部	148—168		
VABCON-II 溶	溶	法	KAS	板表面より2mm	141—158	127—146	152
				板厚中央	150—157	128—156	162
				板裏面より2mm	149—158	131—151	159
				板表面より2mm	160—173	122—139	151
				板厚中央	163—176	124—151	158
アルタオックスレイト 溶	溶	法	KDK	板裏面より2mm	163—172	122—143	152
				板表面より2mm	160—178	135—153	169
				板厚中央	156—163	130—147	151
				板裏面より2mm	155—166	134—148	158
				板表面より2mm	161—171	157—187	183
VABCON-II 溶	溶	法	K5D	板厚中央	160—166	151—185	167
				板裏面より2mm	160—175	158—194	180
				板表面より2mm	151—159	150—163	163
				板厚中央	154—165	160—196	171
				板裏面より2mm	144—156	148—177	173
アルタオックスレイト 溶	溶	法	K5D	板表面より2mm	206—222	151—183	186
				板厚中央	201—215	151—181	185
				板裏面より2mm	192—208	152—167	181

備考
 1. 測定間隔は1mm
 2. 母材KASの硬さは2希接試験片、K5Dは3希接試験片よりの最低～最高硬さ
 3. ボンド部は高い方を示す

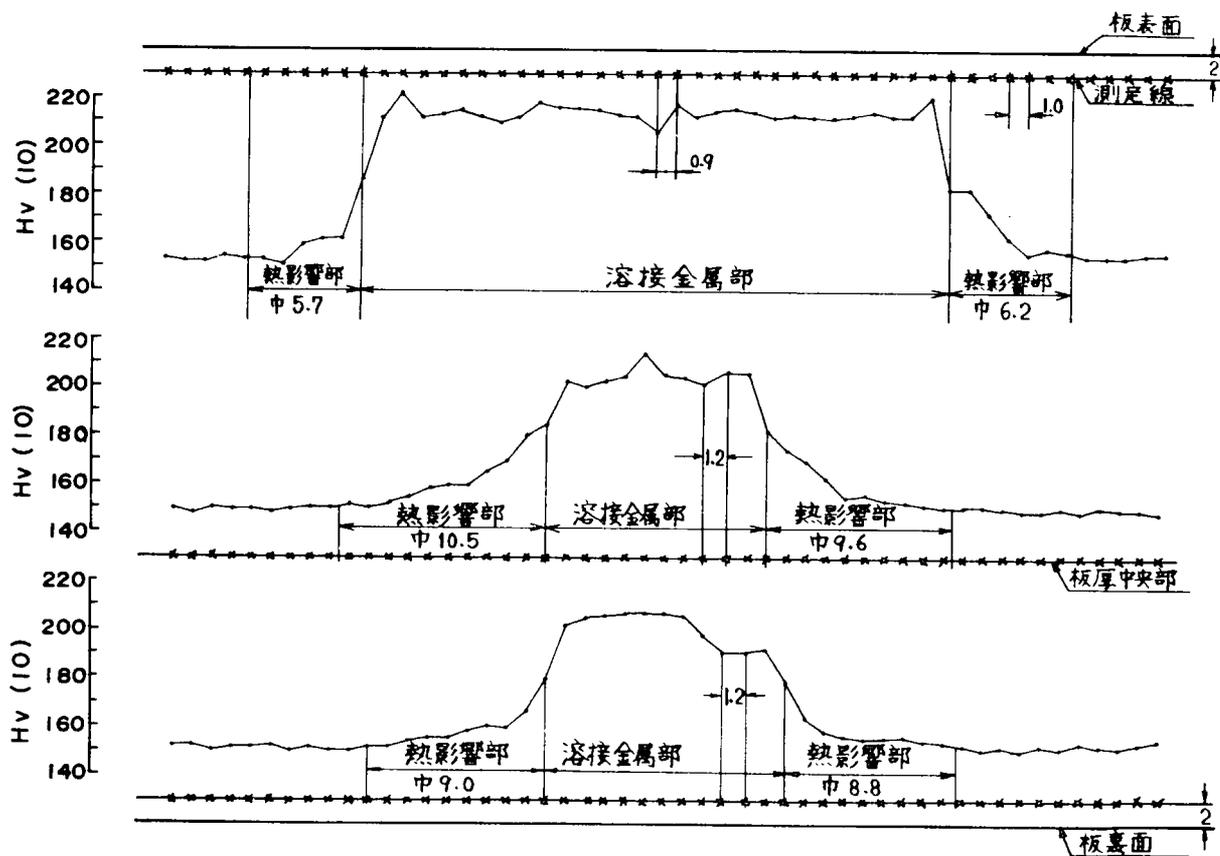
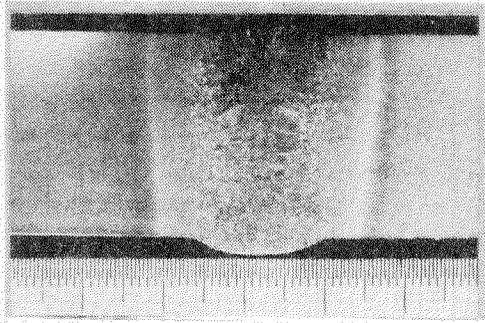


図 4.2.7 ピッカース硬さ試験結果 (K5D鋼, 3電極片面溶接継手)

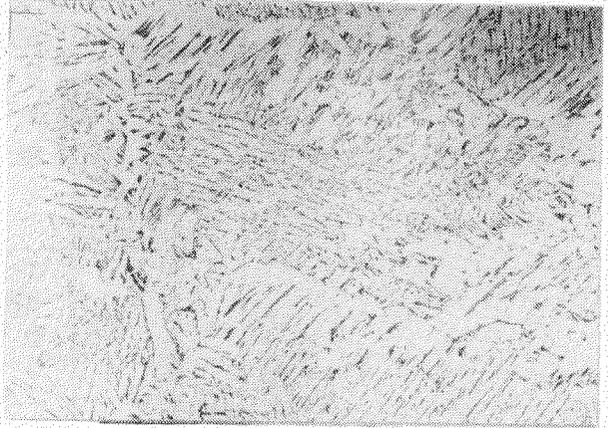
寸法単位:mm



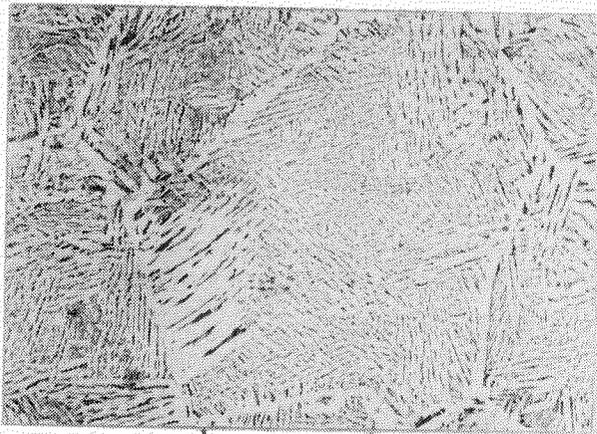
継手部 マクロ



溶接金属



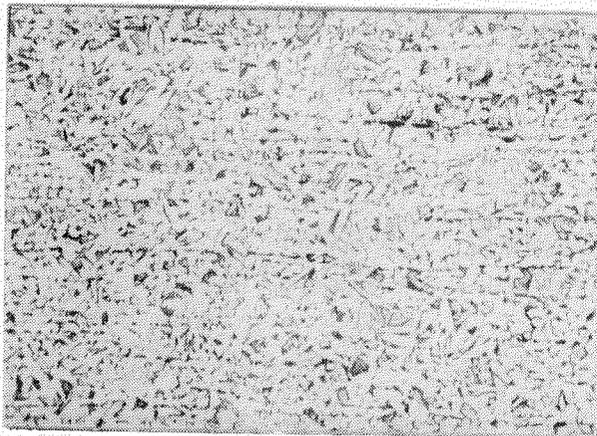
ボンド



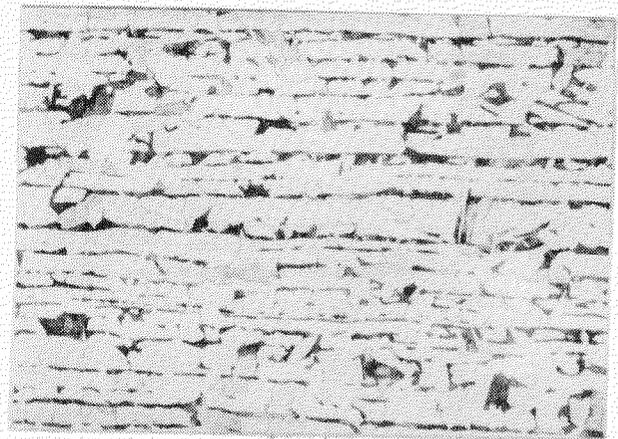
ボンドより 2mm



ボンドより 4mm

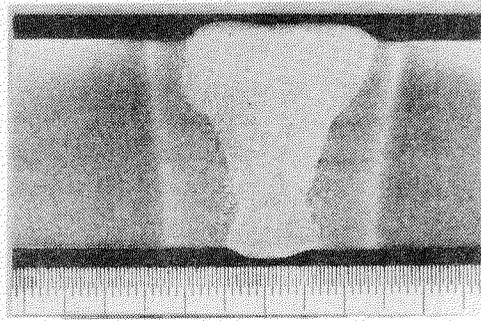


ボンドより 8mm

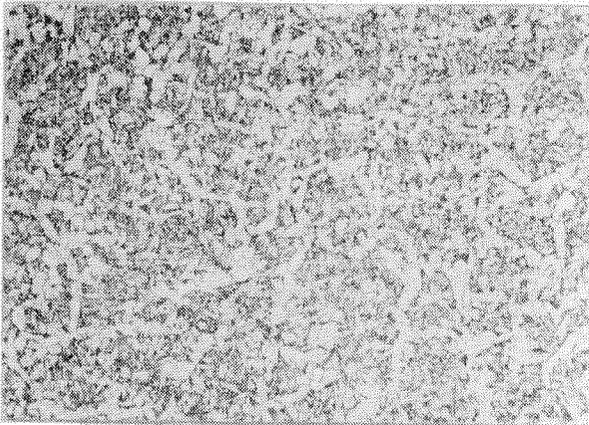


母材 ×100

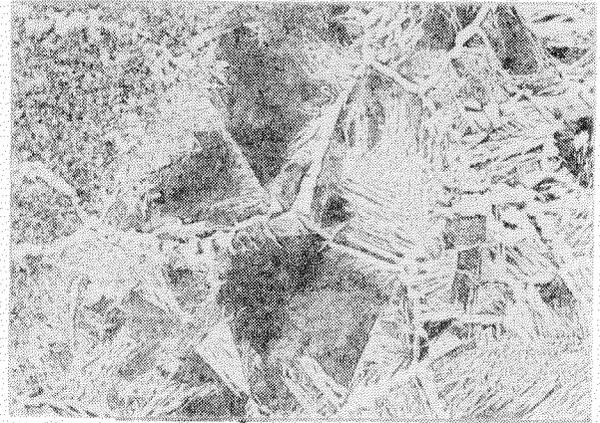
写真4.2.1 VASCON-II法溶接継手(KAS鋼) H.I.=108,000 J/cm



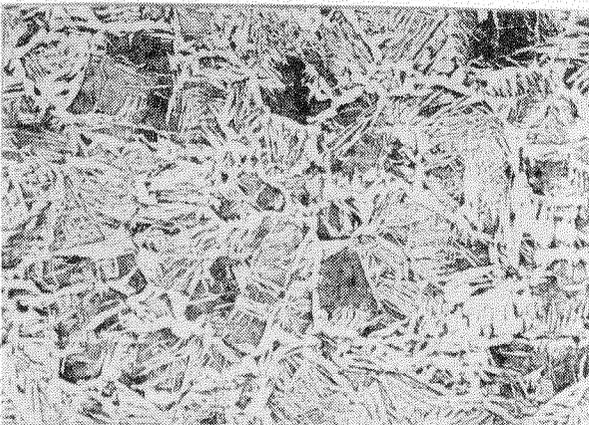
継手部マクロ



溶接金属



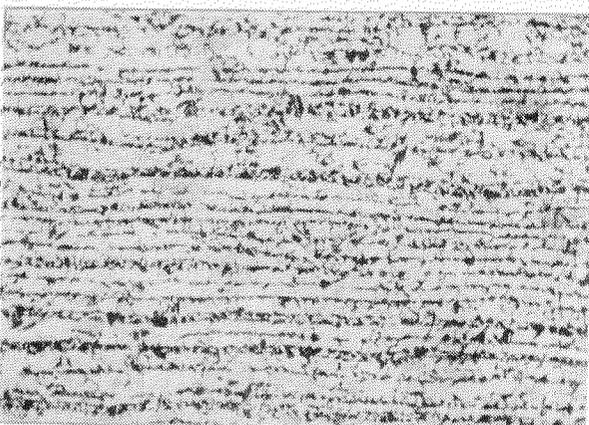
ボンド



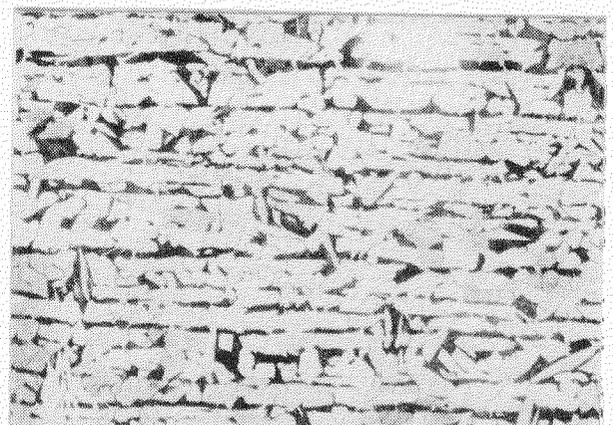
ボンドより2mm



ボンドより4mm

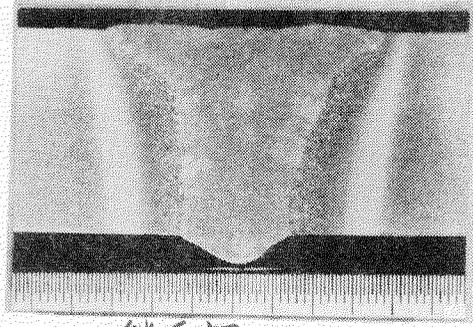


ボンドより8mm

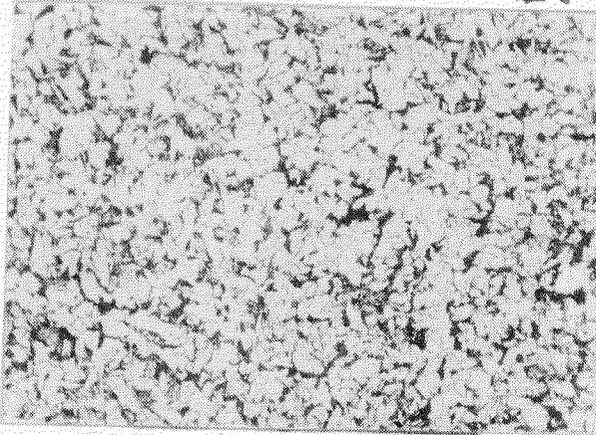


母材 ×100

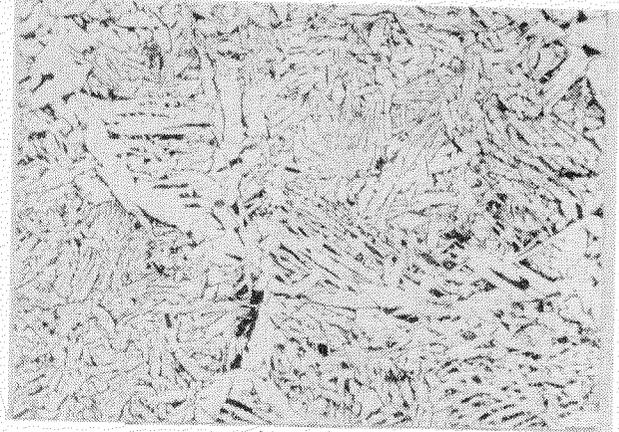
写真4.2.2 デルタオシト法溶接継手(KAS鋼) H.I.=120000~161000 $\frac{J}{cm}$



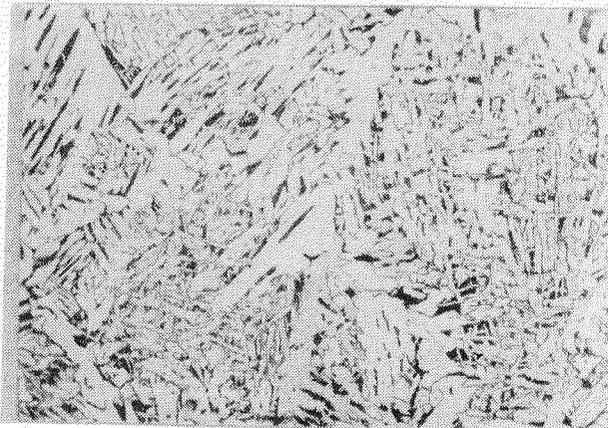
継手部 マクロ



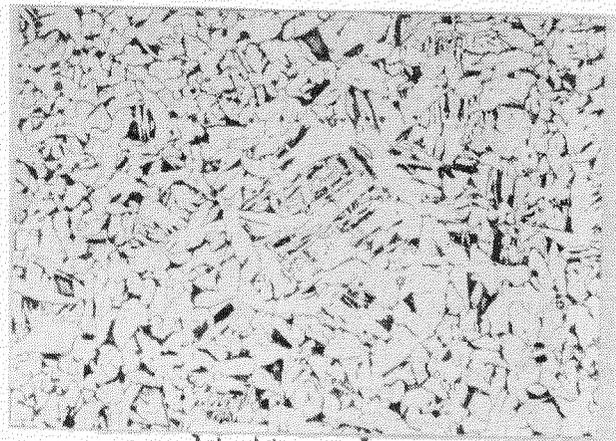
溶接金属



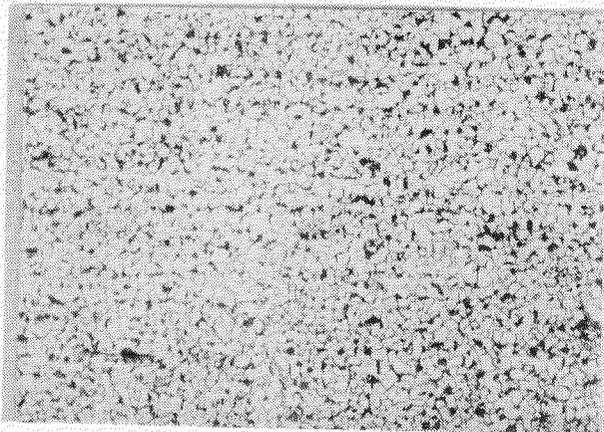
ボンド



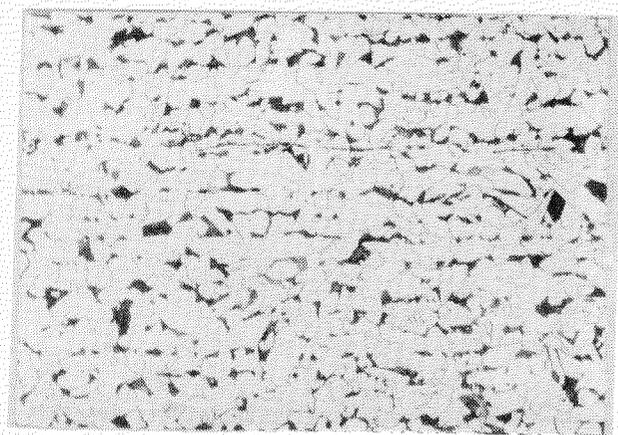
ボンドより 2mm



ボンドより 4mm

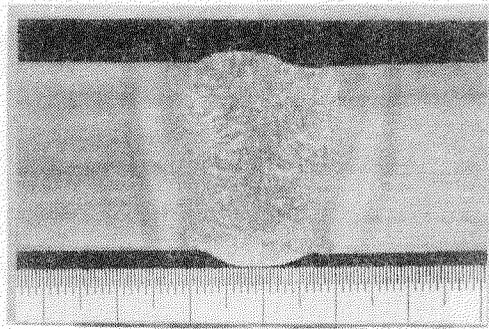


ボンドより 8mm

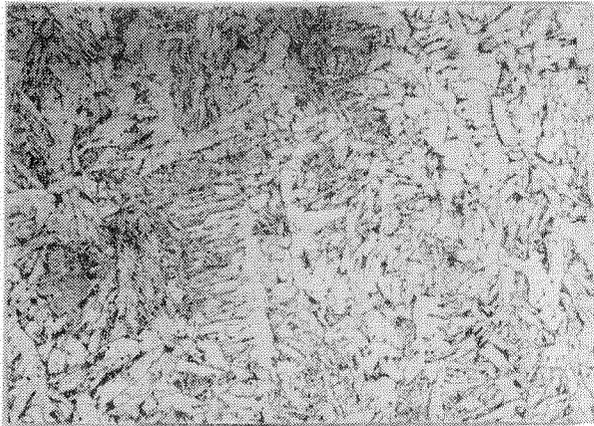


母材 ×100

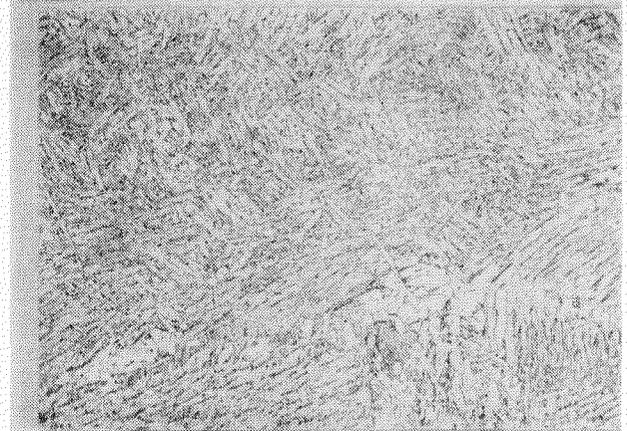
写真4.2.3 3電極片面1層溶接継手(KDK鋼) H.I.=134,500J/cm



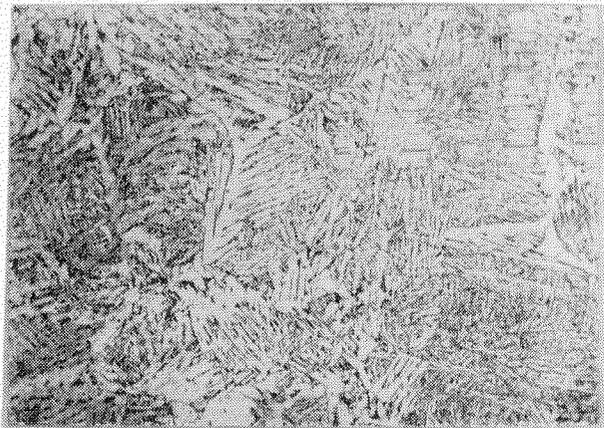
継手部 マクロ



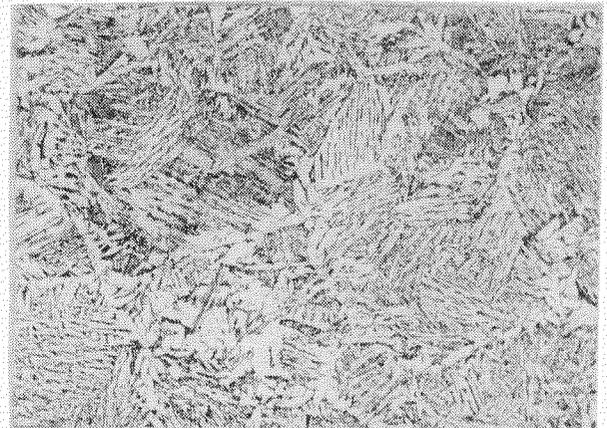
溶接金属



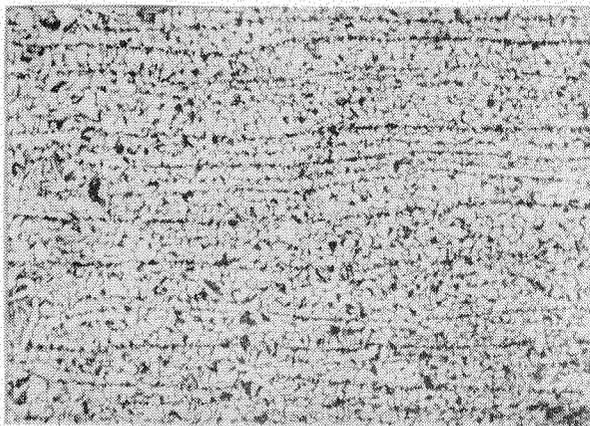
ボンド



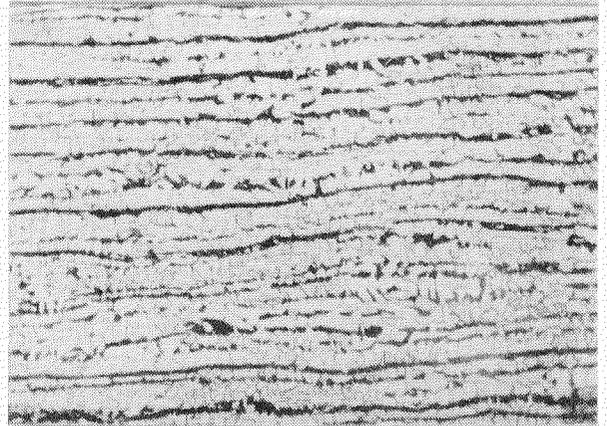
ボンドより 2mm



ボンドより 4mm

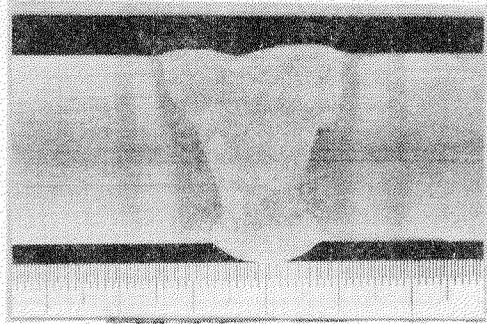


ボンドより 8mm

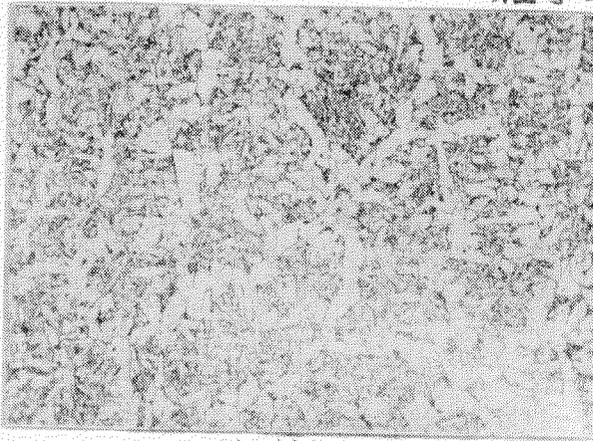


母材 ×100

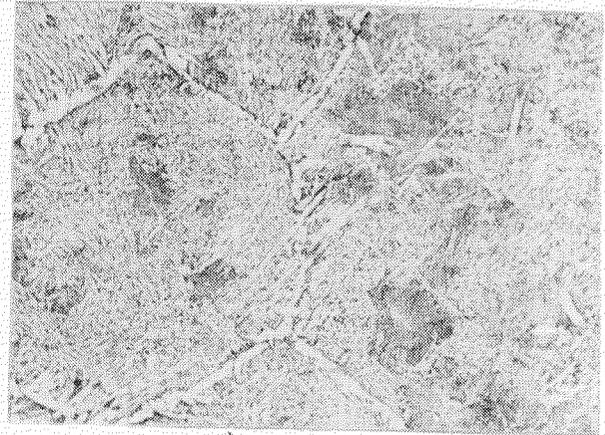
写真4.2.4 VASCON-II法溶接継手(K5D鋼) H.I.=117,000 J/cm



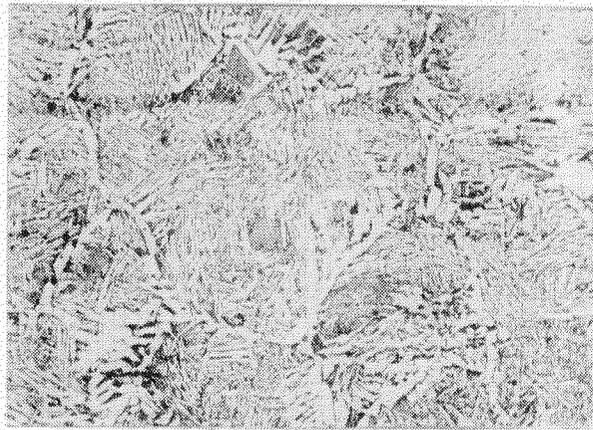
継手部 マクロ



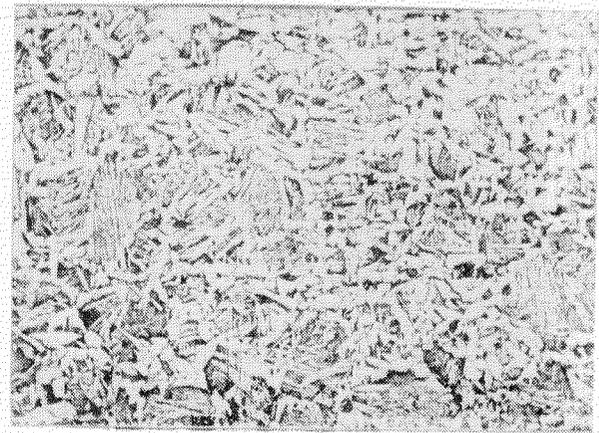
溶接金属



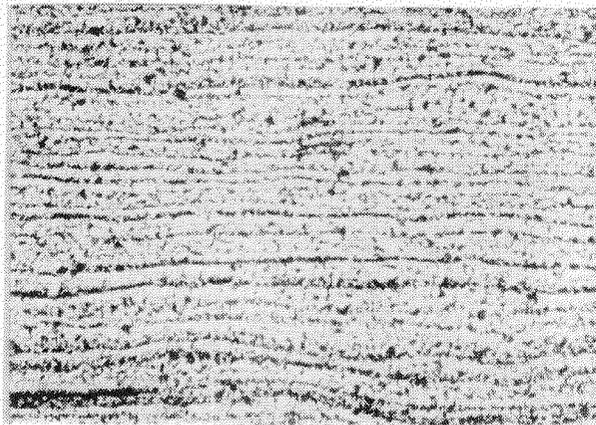
ボンド



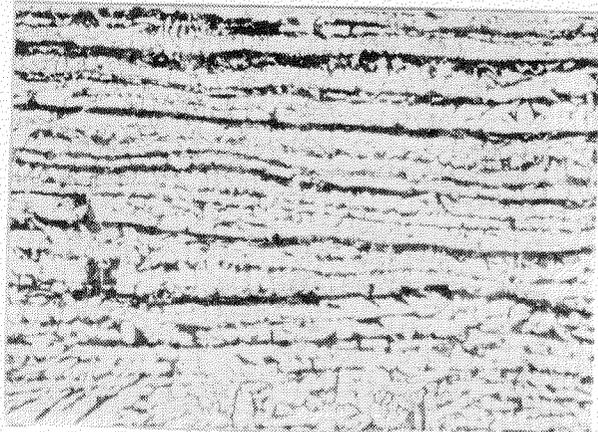
ボンドより 2mm



ボンドより 4mm

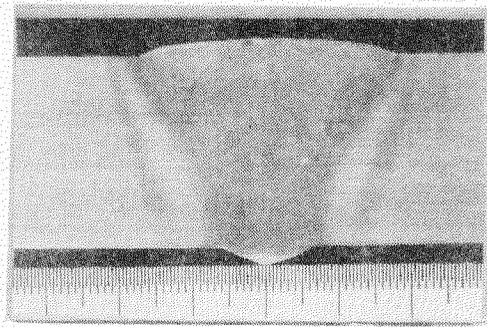


ボンドより 8mm

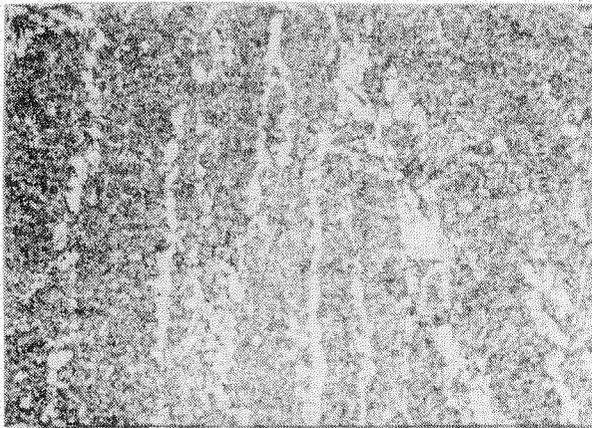


母材 ×100

写真 4.2.5 テルタオシレート法溶接継手(K5D鋼) H.I.=120000~161000 J/cm



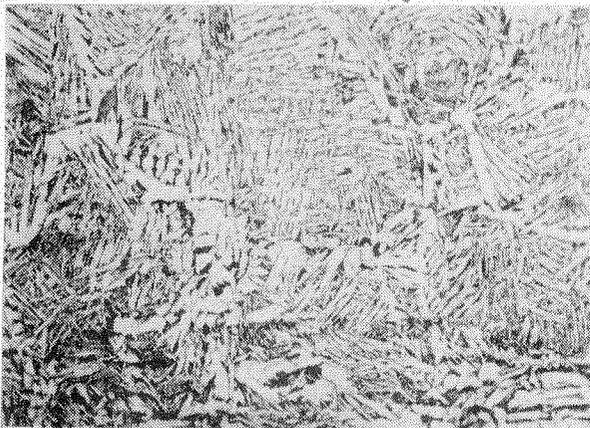
継手部 マクロ



溶接金属



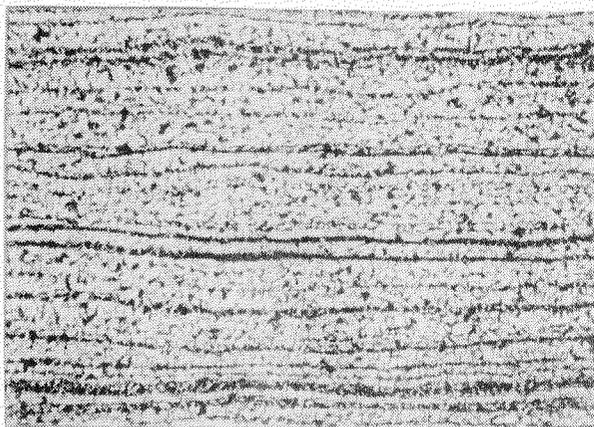
ボンド



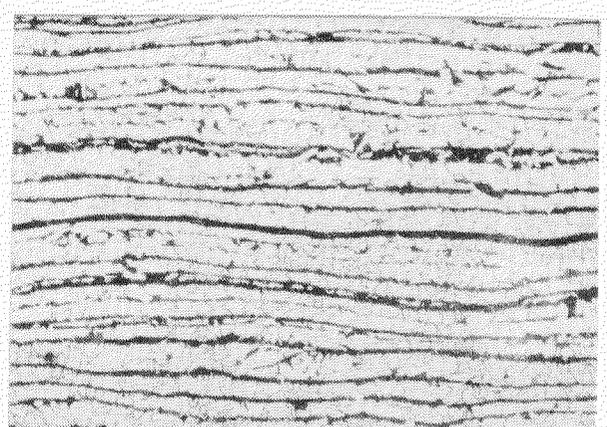
ボンドより 2mm



ボンドより 4mm



ボンドより 8mm



母材 ×100

写真4.2.6 3電極片面1層溶接継手(K5D鋼) H.I.=139,500J/cm

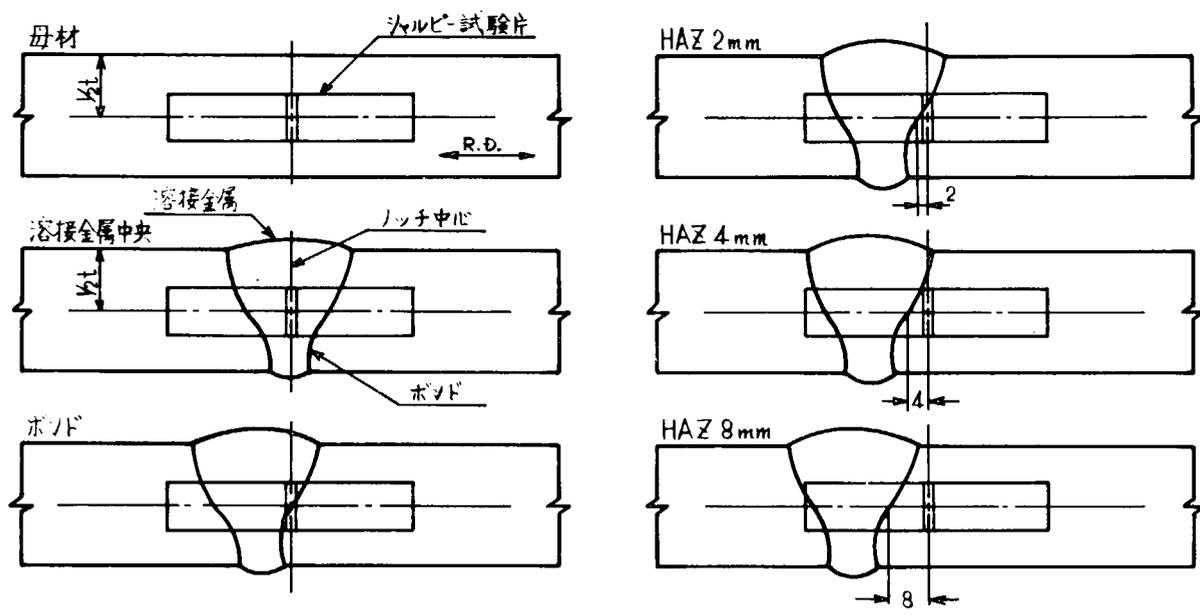


図4.3.1 V-ノッチシャルピ-試験片採取位置

表 4.3.1 V-ノッチヤルピ-試験結果 (KAS鋼母材およびKAS鋼VASCON-II法溶接継手)

母 (KAS) 材			溶 接 金 属			ボ ン ド			ボンドより2mm			ボンドより4mm			ボンドより8mm		
試験 温度 (°C)	吸収 エネルギー (kg-m)	脆性 破面率 (%)															
+60	15.64	0	+60	17.23	0	+80	15.20	0	+80	16.22	0	+60	17.23	0	+60	16.66	0
	15.64	0		17.23	0		15.20	0		16.95	0		18.23	0		17.23	0
+40	15.05	0	+40	18.09	0	+60	16.80	0	+60	16.51	0	+40	17.52	0	+40	17.52	0
	15.64	0		18.09	0		17.09	0		15.49	15		17.80	0		17.95	0
+20	14.91	10		17.09	0	+40	15.79	12	+40	17.52	0	+20	12.84	31	+20	19.62	0
	14.76	13	+20	14.91	30		14.91	18		18.09	0		10.93	39		16.66	0
+10	10.20	29		14.91	34	+20	8.05	60	+20	12.10	43	0	13.14	33	0	15.79	15
	11.96	17		14.02	28		5.98	73		5.98	66		7.91	60		18.23	0
	11.37	24	0	15.79	20	0	4.29	83		7.77	64		3.19	81	-10	18.73	0
0	11.07	34		12.84	38		4.04	77	+10	5.06	72		11.81	45		17.80	0
	5.72	59		8.90	65		2.48	91		6.39	73	-10	9.04	63	-20	17.80	0
-10	9.47	44	-20	12.55	56		18.37	15	0	4.80	85		5.45	80		5.06	67
	9.04	43		8.90	72	-10	5.85	85		5.58	79	-20	1.06	95		17.77	0
	5.19	61	-40	6.39	85		1.27	98	-10	5.06	85		6.25	80	-30	9.04	55
	6.39	49		3.55	90	-20	1.59	100		1.06	90		4.29	85		7.34	63
	4.42	64	-60	2.83	95		1.70	100	-20	1.70	93		1.38	90	-40	2.03	93
-20	1.81	90		4.55	95	-40	1.38	100		1.70	93	-40	1.17	100		1.81	95
	2.48	85	-80	1.49	100		1.38	100	-40	0.96	100		0.66	100	-60	1.49	100
-40	0.66	100		0.56	100	-60	0.66	100		0.96	100	-60	0.66	100		0.66	100
	0.76	100		1.59			0.86	100	-60	0.76	100		0.86	100	-80	0.66	100

表4.3.2 V-ノッチワルピ-試験結果 (KAS鋼デルタワルピ-法溶接継手)

溶接金属			ボ			ン			ド			ボンドより2mm			ボンドより4mm			ボンドより8mm		
試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破面率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破面率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破面率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破面率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破面率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破面率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破面率 (%)
+80	16.08	0	+80	17.38	0	+100	15.6	0	+80	16.37	0	+80	16.37	0	+40	17.66	0			
	16.37	0		17.38	0		15.7	0		16.80	0		16.80	0		16.22	0			
+60	16.08	0	+60	17.95	0	+80	17.0	0	+60	15.20	0	+60	15.20	0	+20	17.95	0			
	16.37	0		16.08	15		15.8	0		16.22	0		16.22	0		17.09	0			
+40	14.91	15	+40	14.17	28	+60	15.2	5	+40	15.20	15	+40	15.20	15	0	16.66	16			
	16.51	5		18.37	0		16.2	0		16.95	0		16.95	0		17.23	0			
+20	14.61	21	+30	12.69	31	+40	15.1	17	+20	8.76	43	+20	8.76	43	-20	12.25	34			
	12.25	23		11.96	28		14.5	21		10.78	35		10.78	35		15.05	24			
0	10.64	38	+20	8.76	45	+20	10.3	37	+20	10.3	37	+10	7.63	56	-30	8.05	60			
	8.76	42		6.93	52		10.9	36		12.40	35		12.40	35		8.76	46			
-20	5.32	59	0	4.67	60	+10	10.8	42	0	7.63	55	0	7.63	55	-40	8.61	53			
	4.93	63		3.43	67	0	7.8	51	0	3.92	70	0	3.92	70		6.12	65			
-30	4.17	74	-20	1.59	77		4.1	64	-20	4.42	78		4.42	78		6.52	66			
	1.70	79		2.26	78	-10	2.8	71	-10	2.37	92	-10	2.37	92	-50	4.04	68			
-40	1.92	83	-40	1.59	91	-20	2.1	90	-40	1.27	100	-40	1.27	100		4.29	65			
	1.17	95		1.70	86		2.5	85		1.59	100		1.59	100	-60	4.04	80			
-60	0.66	100	-60	0.86	100	-40	1.3	95	-60	0.96	100	-60	0.96	100		0.46	0			
	0.86	100		0.86	93		1.6	95		1.70	100		1.70	100		1.49	95			
-80	0.66	100	-80	0.86	100	-60	1.3	100	-80	0.56	100	-80	0.56	100	-80	1.06	100			
	0.56	100		0.66	100		0.8	100		0.96	100		0.96	100		0.46	100			

表4.3.3 V-ノッチヤルピ-試験結果 (KDK鋼母材およびKDK鋼3電極片面1層溶接継手)

母 (KDK) 材		溶接金属			ボ			ン			ド			ボン			ド			より			より			より			
試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破面率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破面率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破面率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破面率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破面率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破面率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破面率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破面率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破面率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破面率 (%)
+40	18.37	0	+100	16.56	0	+60	21.34	0	+80	18.37	0	+80	19.20	0	+20	26.20	0	+20	26.20	0	+20	19.20	0	+80	18.37	0	+80	19.20	0
	17.23	0		16.56	0		21.86	0		18.65	0		19.75	0		25.31	0		25.31	0		19.75	0		18.65	0		19.75	0
+20	18.65	0	+80	16.50	3	+40	22.36	0	+60	19.75	0	+60	19.62	0	0	26.48	0	0	26.48	0	0	19.62	0	+60	19.75	0	0	26.48	0
	19.20	0		16.80	0		22.97	0		19.34	0		20.29	0		24.35	0		24.35	0		20.29	0		19.34	0		24.35	0
0	19.75	0	+60	14.91	20	+20	21.98	0	+40	16.80	25	+40	20.02	3	-20	23.33	0	-20	23.33	0	-20	20.02	3	+40	16.80	25	-20	23.33	0
	17.66	15		16.95	15		12.99	28		17.95	20		17.95	15		25.42	0		25.42	0		17.95	15		17.95	20		25.42	0
-20	15.79	15	+40	15.79	25		19.07	13	+20	18.79	0	+20	17.38	24	-40	23.33	0	-40	23.33	0	-40	17.38	24	+20	18.79	0	-40	23.33	0
	10.49	50		13.40	39	0	13.58	46		10.93	44		17.95	20		23.44	0		23.44	0		17.95	20		10.93	44		23.44	0
	15.64	23		12.99	34		7.91	53		17.52	17		16.95	18		20.02	17		20.02	17		16.95	18	+10	17.52	17	-60	20.02	17
-30	14.17	41	+20	11.37	47		11.07	50	0	15.35	40	0	16.08	30		18.93	18		18.93	18		16.08	30		15.35	40		18.93	18
	12.99	42		10.78	49		11.37	47		10.05	53		16.51	32		9.76	50		9.76	50		16.51	32	0	10.05	53	-70	9.76	50
-40	7.77	67	+10	9.04	59	-10	2.95	80	-10	7.21	56		11.07	52		6.25	64		6.25	64		11.07	52		7.21	56		6.25	64
	1.27	93		11.37	42		16.51	45		7.35	68		17.52	17		9.47	52		9.47	52		17.52	17		7.35	68		9.47	52
	2.26	83	0	6.25	70		6.80	65	-20	7.07	71	-20	9.04	56		8.61	57		8.61	57		9.04	56		7.07	71	-80	8.61	57
	5.72	74		8.76	58	-20	5.85	65	-20	3.19	85		7.07	68		6.12	69		6.12	69		7.07	68		3.19	85	-80	6.12	69
-50	1.92	92	-20	2.48	90		2.95	84		3.43	82	-30	4.04	76		5.19	82		5.19	82		4.04	76		3.43	82	-30	5.19	82
-60	2.03	95		2.95	86	-40	1.38	90	-40	1.17	100	-40	0.86	96		2.26	95		2.26	95		0.86	96		1.17	100	-100	2.26	95
	0.86	100		1.06	100		1.49	85		0.86	100		1.59	94		2.95	95		2.95	95		1.59	94		0.86	100		2.95	95
-80	0.76	100	-40	0.66	100	-60	0.86	100	-60	0.86	100	-60	0.86	100		0.86	100		0.86	100		0.86	100		0.86	100	-120	0.86	100
	0.76	100		0.86	100		1.17	100		8.05	65		0.96	100		0.76	100		0.76	100		0.96	100		8.05	65	-120	0.76	100

表 4.3.4 V-ノッチシャルピ-試験結果 (K5D鋼母材およびK5D鋼VASCON-II法溶接継手)

母材 (K5D)		溶接金属			ボンド			ボンドより 2mm			ボンドより 4mm			ボンドより 8mm			
試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破壊率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破壊率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破壊率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破壊率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破壊率 (%)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (kg-m)	脆性破壊率 (%)
+40	22.17	0	+80	13.32	20	+60	17.52	0	+60	23.94	0	+60	21.87	0	0	29.85	0
	22.10	0		14.62	0	+40	15.21	20		24.48	0		23.77	0		29.88	0
+14	22.95	0	+60	15.07	0		14.59	20	+40	21.28	10	+40	22.27	0	-7	24.83	0
	19.73	0		13.20	30	+14	12.37	50		22.27	0		22.27	0		27.72	0
0	18.44	10	+40	8.23	70		17.38	20	+25	18.62	30	+14	20.29	20	-20	24.83	0
	15.10	20		12.61	50	+10	15.07	30		22.86	10		19.57	30		29.24	0
-7	16.00	30	+30	11.63	50	0	6.26	80	+14	20.26	20	+10	8.55	70	-40	25.47	0
	19.63	20	+25	7.46	60		7.10	80		2.74	90		14.47	60		25.39	0
-20	13.88	30		7.26	70		9.81	70		21.66	10	0	8.52	70	-50	20.96	30
	19.69	10	+14	10.09	70	-7	4.56	90	+10	20.82	20		12.37	70		20.91	30
-30	15.07	50		7.86	80		9.84	70	0	7.81	80		6.32	90	-60	19.39	40
	14.35	50	0	4.70	90	-10	2.35	95		8.10	80	-7	15.57	60		21.28	30
-40	2.64	90		2.13	95	-20	0.95	95		8.23	80		13.66	60	-70	20.11	40
	8.78	80		5.08	90		3.79	95	-7	5.91	90		9.50	70		11.58	80
-50	7.32	80	-7	6.18	80		2.57	95		7.41	80		2.37	90		20.52	40
	7.58	80		6.69	70	-30	1.07	95	-10	3.25	90		3.19	90	-75	7.83	70
-60	4.49	95	-20	3.87	95	-40	1.52	95	-20	0.79	95		1.37	95		9.70	70
	4.51	90		3.54	95		1.35	100		4.75	95		3.19	95	-90	5.63	90
-75	1.07	100	-40	1.64	100	-60	1.31	100	-40	0.65	100		1.70	95	-100	4.07	95
	0.65	100		1.27	100		1.64	100		1.27	100		0.97	100		6.72	85

表 4.3.5 V-ノッチシャルピニ試験結果 (K5D鋼デルタオット法溶接継手)

溶 接 金 属			ポ ン ド			ポ ン ド 上 り 2mm			ポ ン ド 上 り 4mm			ポ ン ド 上 り 8mm		
試験 温度 (°C)	吸収 エネルギー (kg-m)	脆性 破面率 (%)												
+100	14.17	0	+80	17.43	0	+100	17.83	0	+100	18.78	0	+14	20.14	0
	15.44	0		18.27	0		16.39	0		18.24	0		21.49	0
+60	14.65	0	+60	12.76	20	+80	18.00	10	+80	17.14	0	0	19.98	0
	13.39	0		19.14	0		14.17	30		18.84	0		20.69	0
+40	13.36	20	+50	17.27	10	+60	10.39	30	+60	14.14	20	-7	21.51	0
	10.99	30	+40	13.42	30		8.84	60		12.52	50		21.54	0
+25	12.67	40		17.83	10	+40	8.10	70	+40	9.15	70	-20	14.98	40
	10.30	30		9.13	50		9.10	60		10.27	60		19.11	0
+14	8.75	40	+25	9.33	60	+25	4.65	80	+25	6.42	80	-30	19.92	10
	10.81	30		7.95	60		3.72	70		6.45	75		12.76	60
0	7.89	50	+14	7.08	60	+14	3.14	80	+14	4.82	80	-40	8.29	70
	6.13	60		5.27	60		3.39	70		3.22	80		10.78	60
-7	4.97	70	0	4.32	80	0	3.44	85	0	2.32	90	-50	9.36	70
	4.19	60		5.33	85		2.11	90		2.32	85		14.35	60
-20	2.52	80	-7	4.32	80	-7	2.09	80	-7	1.56	90	-60	6.77	85
	3.05	70		3.89	80		2.13	80		2.20	80		1.78	95
-40	1.07	90	-20	2.97	90	-20	1.21	90	-20	1.48	90	-75	4.22	90
	1.17	90		2.64	90		1.76	90		1.21	95		1.78	95
-60	0.81	95	-40	0.83	95	-40	0.89	95	-40	0.68	100	-100	1.01	100
	0.68	95		0.93	95		1.07	95		0.65	100		2.68	90

表4.3.6 V-ノッチシャルピニ試験結果(K5D鋼3電極片面1層溶接継手)

溶 梯 金 属			ボ ン ド			ボ ン ド よ り 2mm			ボ ン ド よ り 4mm			ボ ン ド よ り 8mm		
試験 温度 (°C)	吸収 エネルギー (kg-m)	脆性 破壊率 (%)												
+80	14.80	0	+100	19.51	0	+100	18.84	0	+80	20.52	0	+14	21.69	0
	13.91	0	+80	19.71	0	+80	18.76	0	+60	20.21	0		21.03	0
+60	13.80	0		20.00	0		19.71	0		21.44	0	0	24.28	0
	13.45	0	+60	15.15	0	+60	18.27	20	+40	17.72	30		22.95	0
+40	12.22	0		19.51	0		13.57	40		12.46	60	-7	21.69	0
	12.73	0	+50	9.07	50	+40	12.08	60		20.11	10		21.30	0
+25	10.39	0	+40	8.23	70		8.61	70	+30	13.45	30	-20	20.26	20
	12.25	0		13.45	50	+30	6.67	80	+25	17.17	30		17.91	30
+14	9.07	40	+25	6.99	70	+25	11.78	60		8.93	70	-30	20.09	30
	8.67	50		7.35	70		3.62	80	+14	11.55	70	-40	18.50	40
0	6.61	60	+14	5.11	85	+14	2.94	85		8.29	70		22.84	0
	5.48	60		2.49	80		3.94	80		18.22	40	-50	19.42	30
-7	5.36	70	0	1.91	85	0	1.86	95	0	7.23	80		6.58	80
	5.91	70		3.44	70		4.42	90		7.83	70		18.27	40
-20	4.56	70	-7	7.78	75	-7	1.56	95	-7	2.37	90	-60	6.58	85
	4.22	85		3.42	85		1.59	95		3.16	80		6.11	90
-40	2.37	85	-20	2.99	70	-20	1.21	95	-20	2.13	90	-75	1.09	100
	1.15	80		1.48	90		1.07	95		3.02	85		4.67	95
-60	1.03	95	-40	1.09	95	-40	0.59	100	-40	2.09	95	-100	0.87	100
	1.17	95		1.17	90		0.55	100		1.07	95		2.60	95

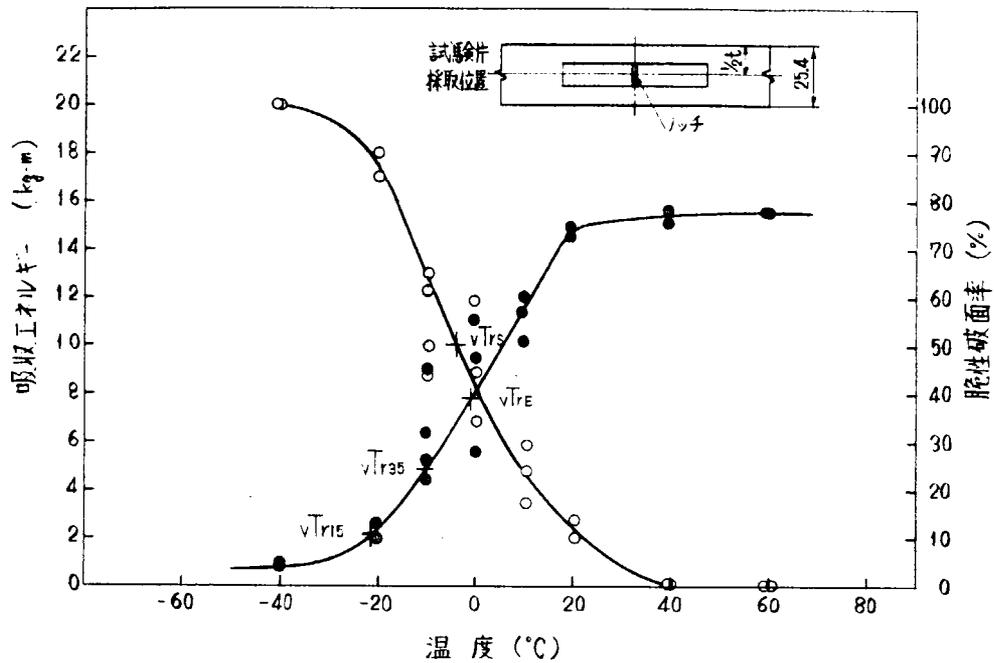


図4.3.2 V-ノッチシャルピー試験結果
(KAS鋼, 母材)

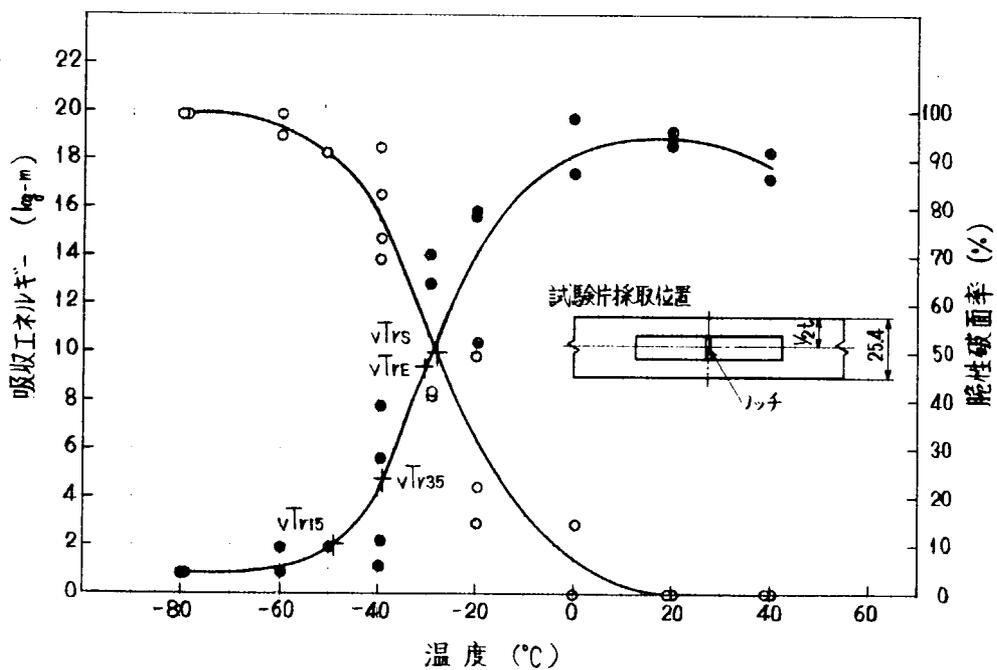


図4.3.3 V-ノッチシャルピー試験結果
(KDK鋼, 母材)

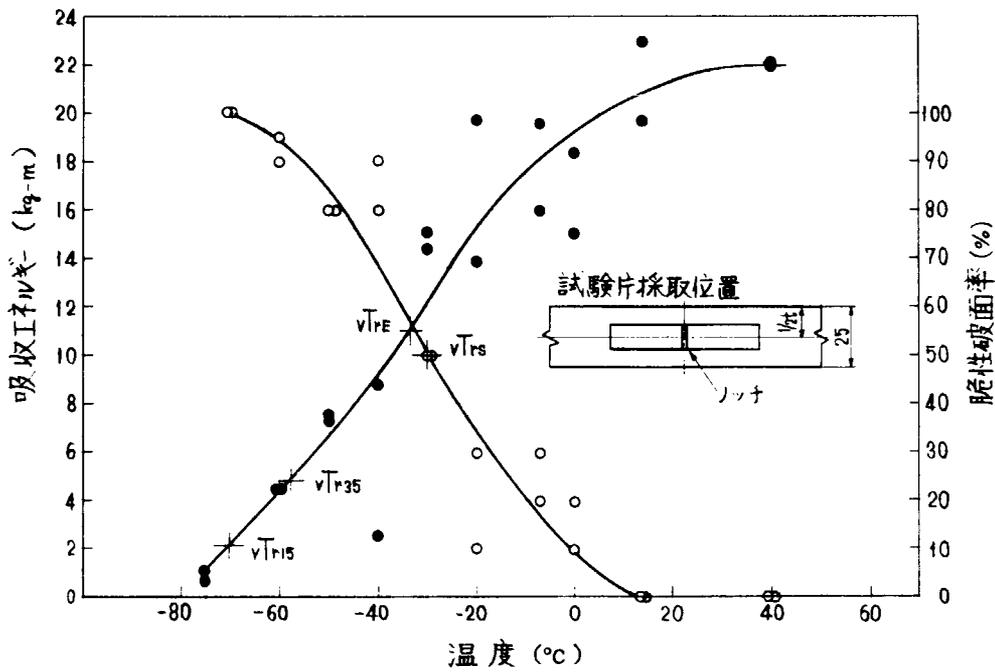


図4.3.4 V-ノッチシャルピー試験結果 (K50鋼, 母材)

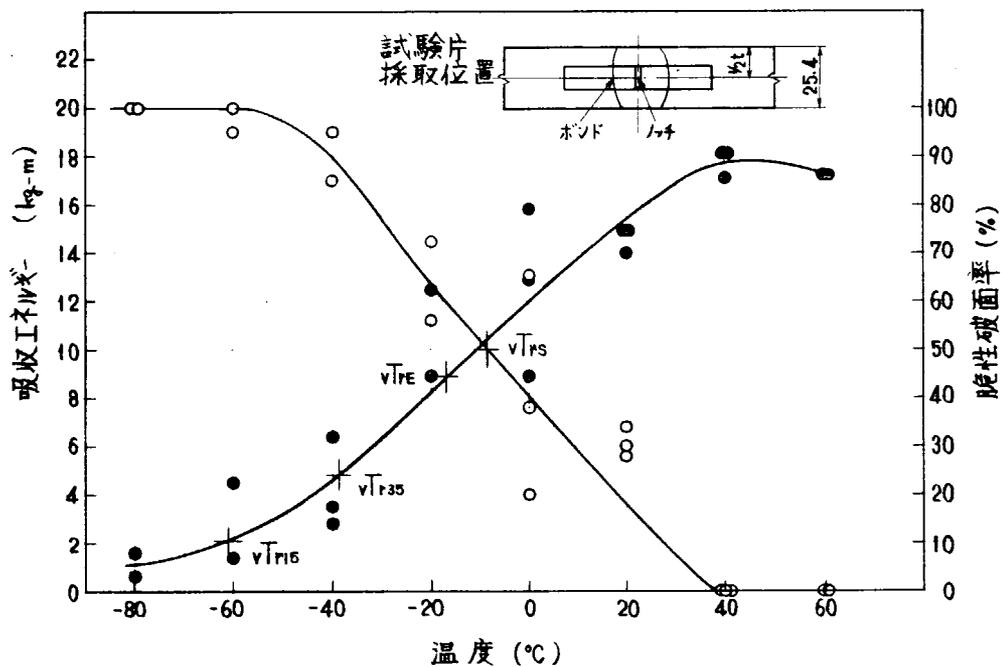


図4.3.5 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS鋼, VASCON-II法溶接継手)

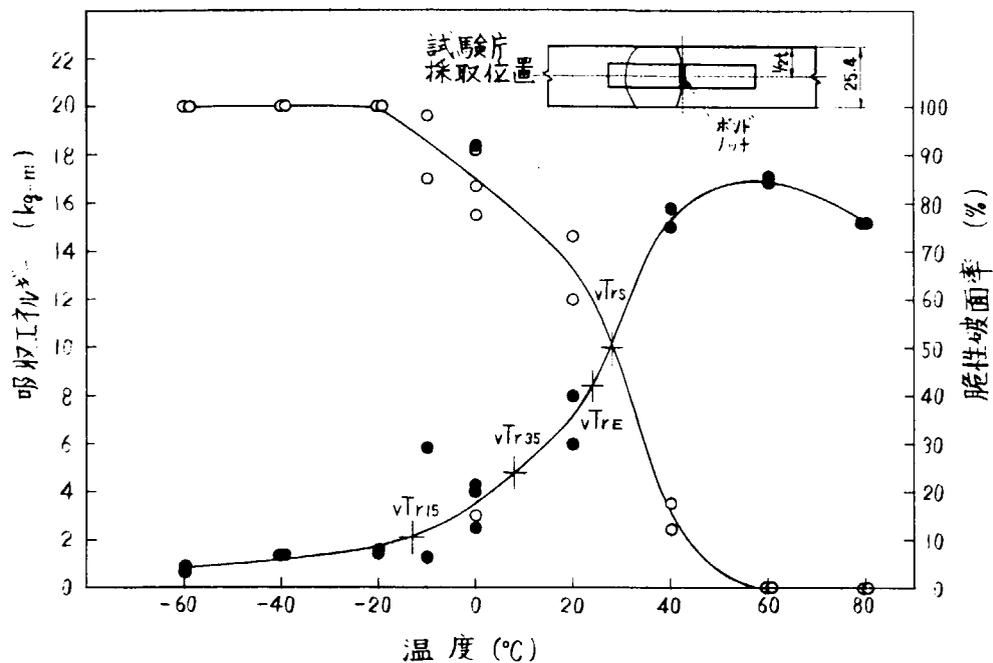


図4.3.6 V-ノッチシャルピー試験結果
(KAS鋼, VASCON-II法溶接継手)

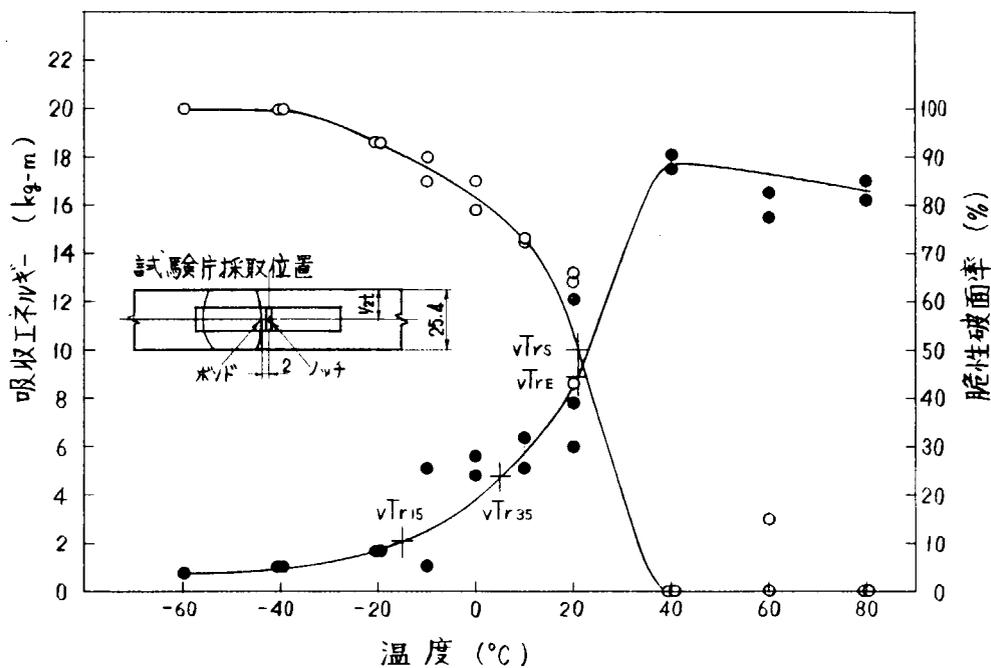


図4.3.7 V-ノッチシャルピー試験結果
(KAS鋼, VASCON-II法溶接継手)

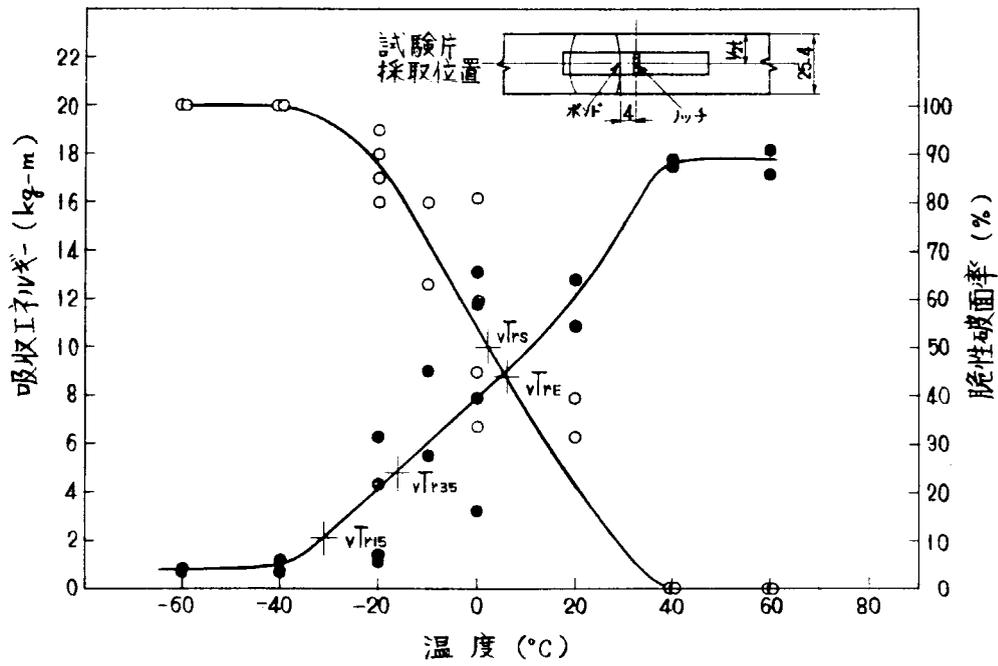


図4.3.8 V-ノッチシャルピー試験結果
(KAS鋼, VASCON-II法溶接継手)

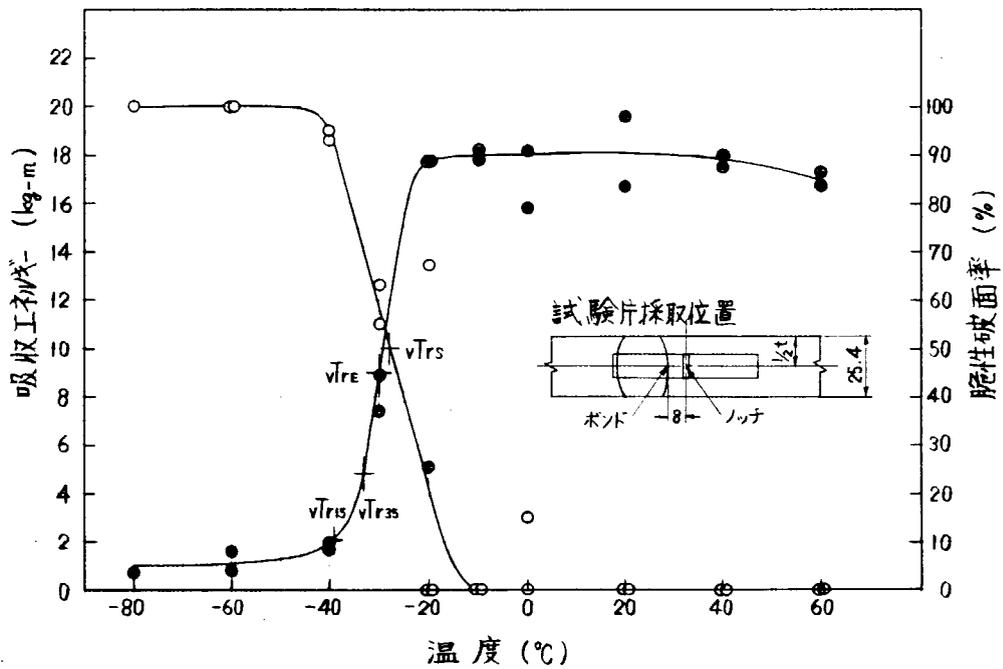


図4.3.9 V-ノッチシャルピー試験結果
(KAS鋼, VASCON-II法溶接継手)

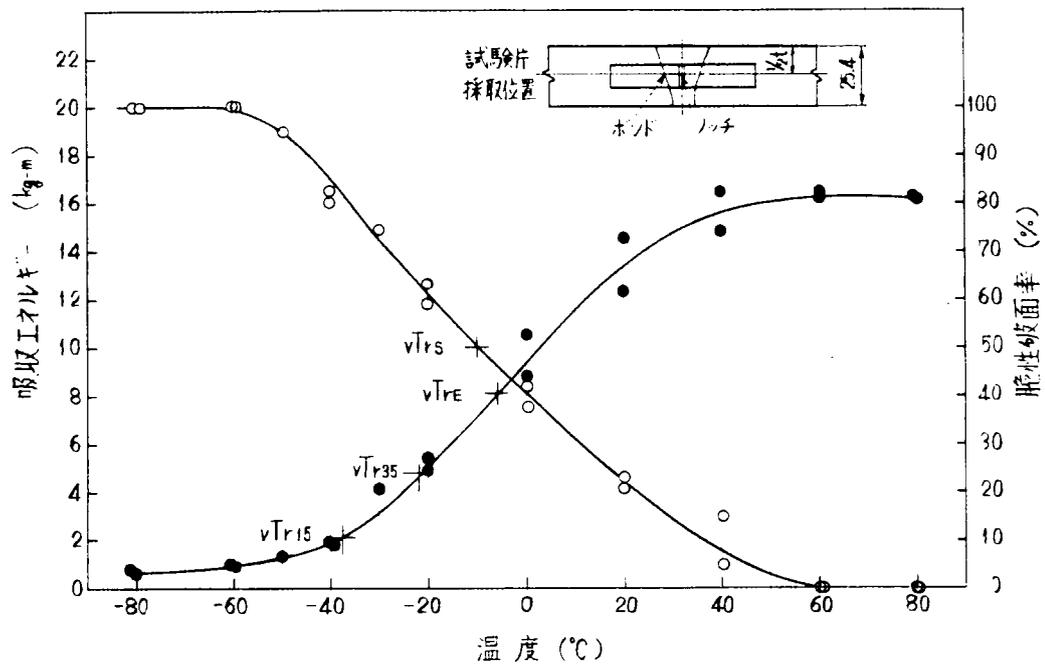


図4.3.10 V-ノッチシャルピー試験結果
(KAS鋼, デルタオソルト法溶接継手)

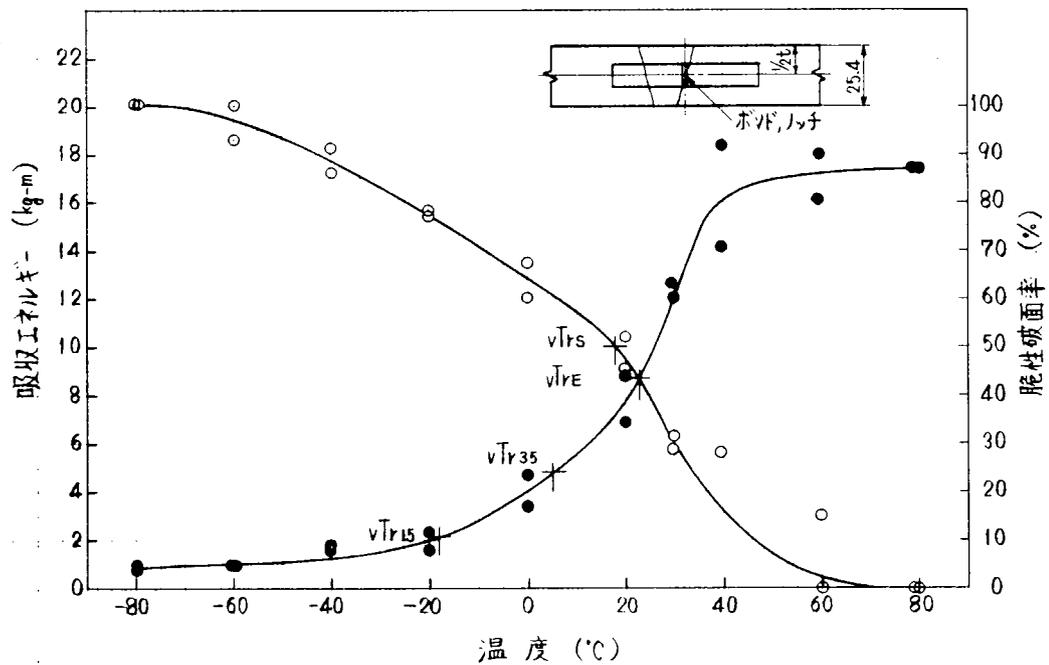


図4.3.11 V-ノッチシャルピー試験結果
(KAS鋼, デルタオソルト法溶接継手)

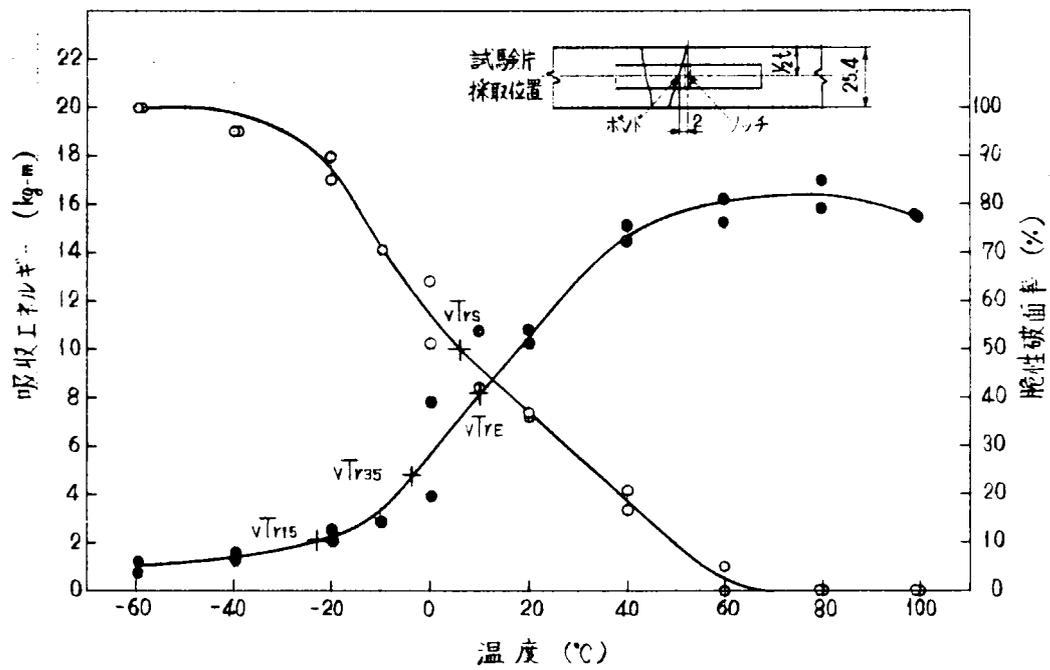


図4.3.12 V-ノッチシャルピー試験結果
(KAS鋼、デルタオパール法溶接継手)

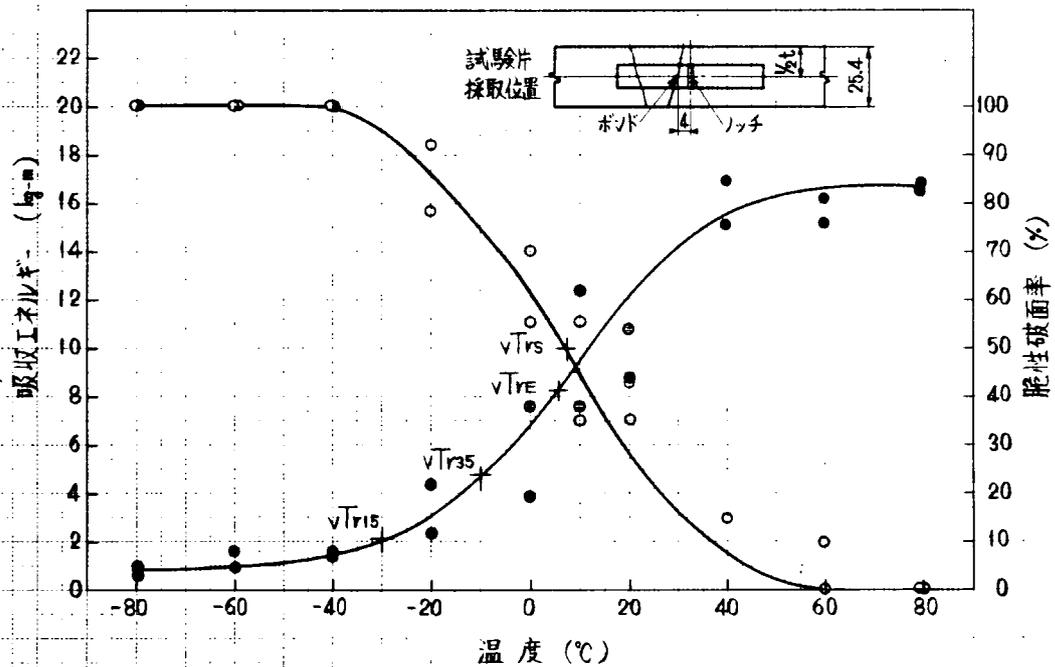


図4.3.13 V-ノッチシャルピー試験結果
(KAS鋼、デルタオパール法溶接継手)

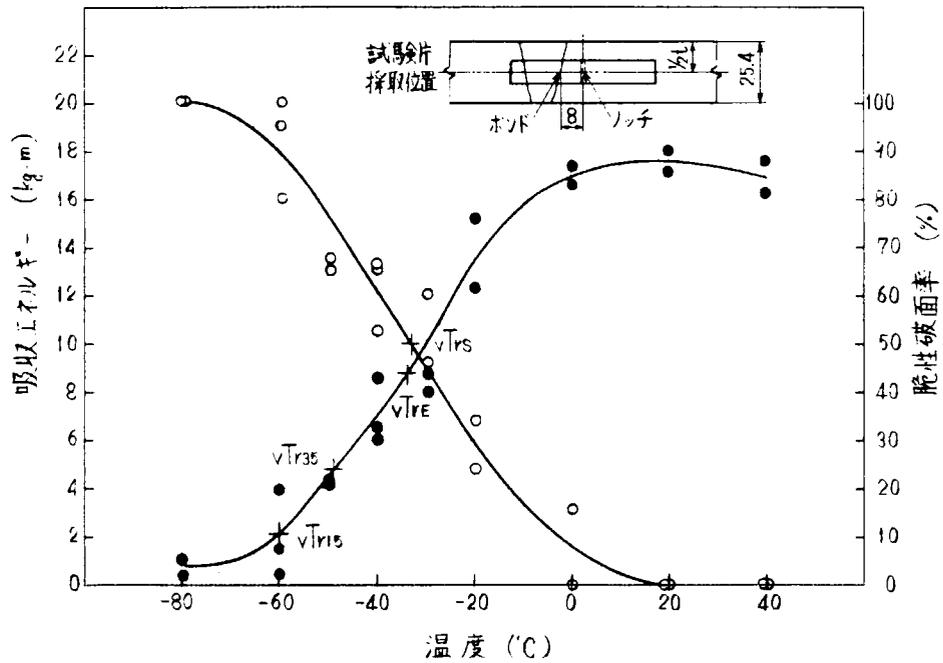


図4.3.14 V-ノッチシャルピー試験結果
(KAS鋼, デルタオシロイ法溶接継手)

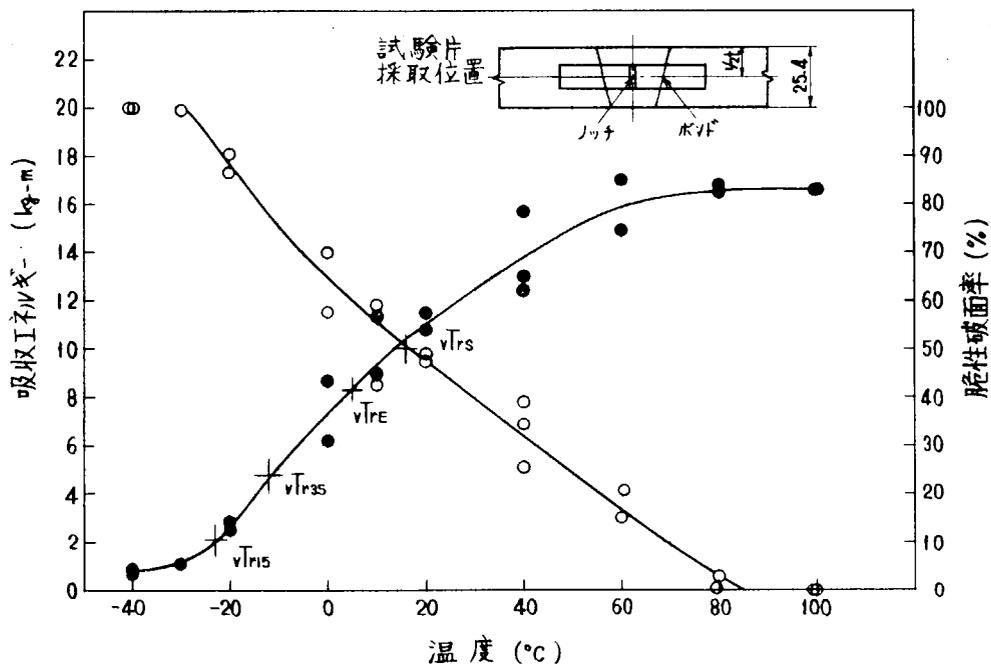


図4.3.15 V-ノッチシャルピー試験結果
(KDK鋼, 3電極片面層溶接継手)

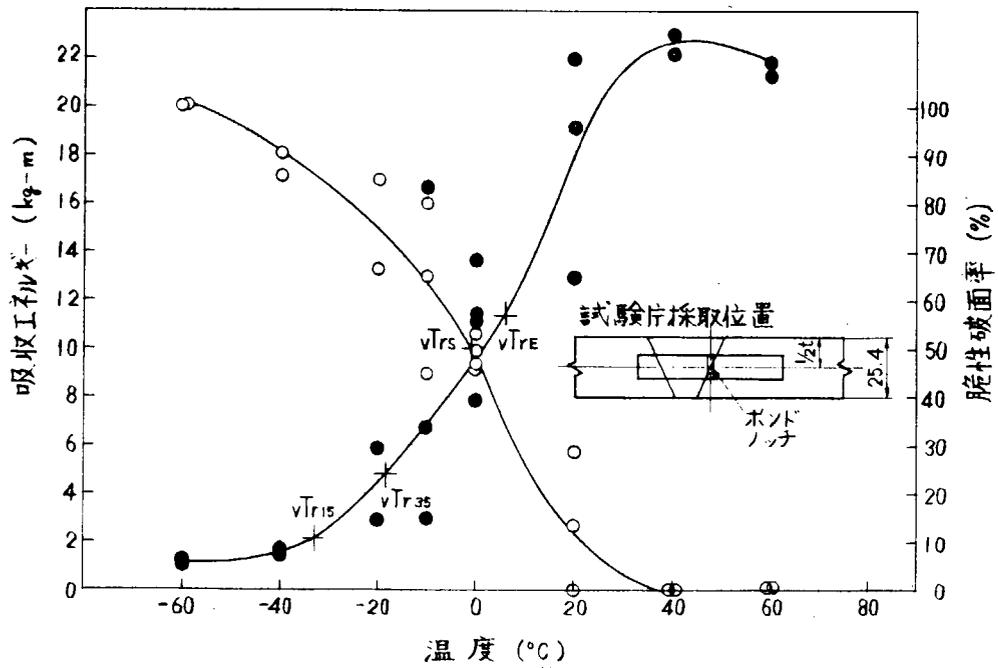


図4.3.16 V-ノッチシャルピー試験結果
(KDK鋼, 3電極片面層溶接継手)

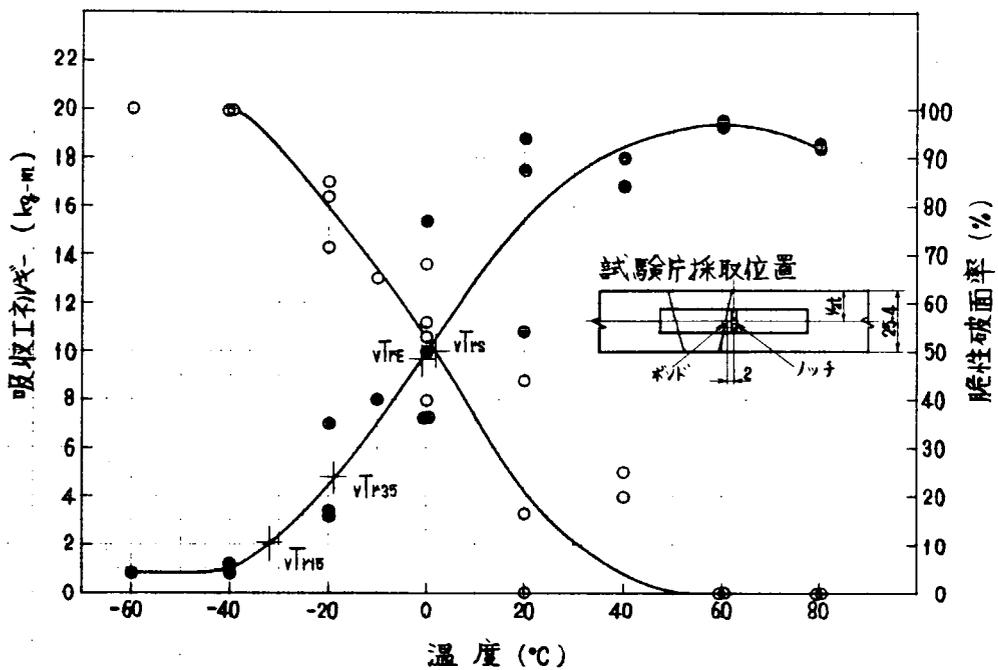


図4.3.17 V-ノッチシャルピー試験結果
(KDK鋼, 3電極片面層溶接継手)

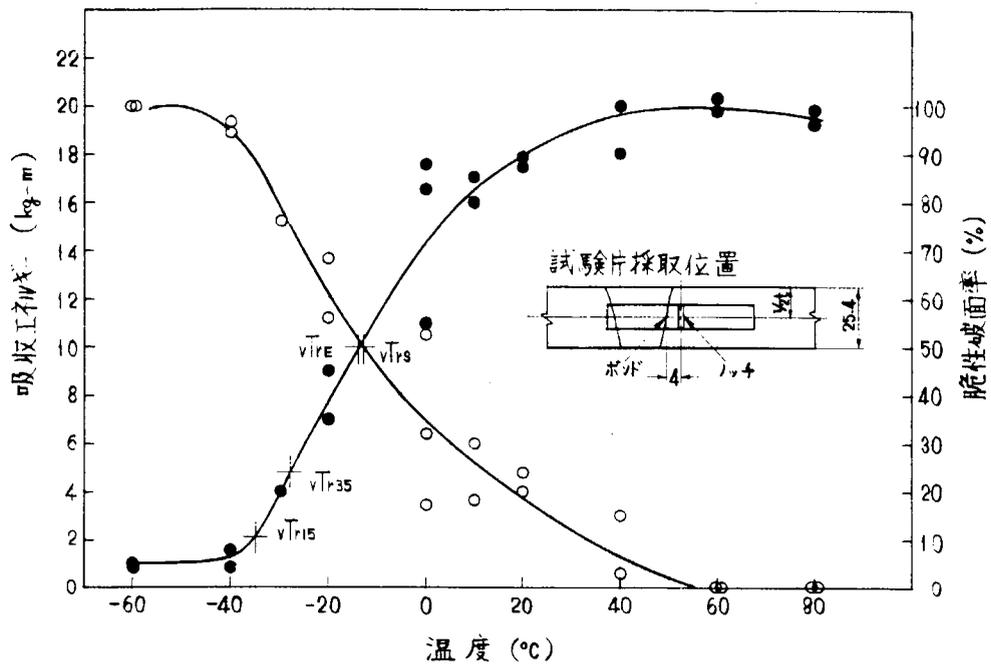


図4.3.18 V-ノッチシャルピー試験結果
(KDK鋼, 3電極片面1層溶接継手)

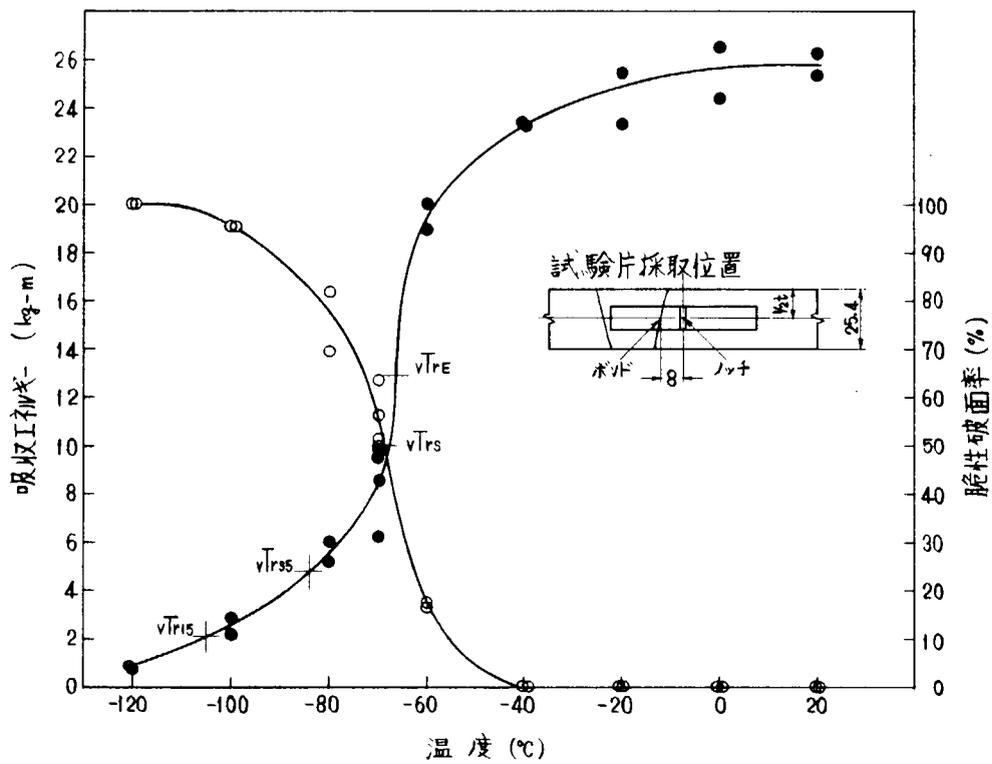


図4.3.19 V-ノッチシャルピー試験結果
(KDK鋼, 3電極片面1層溶接継手)

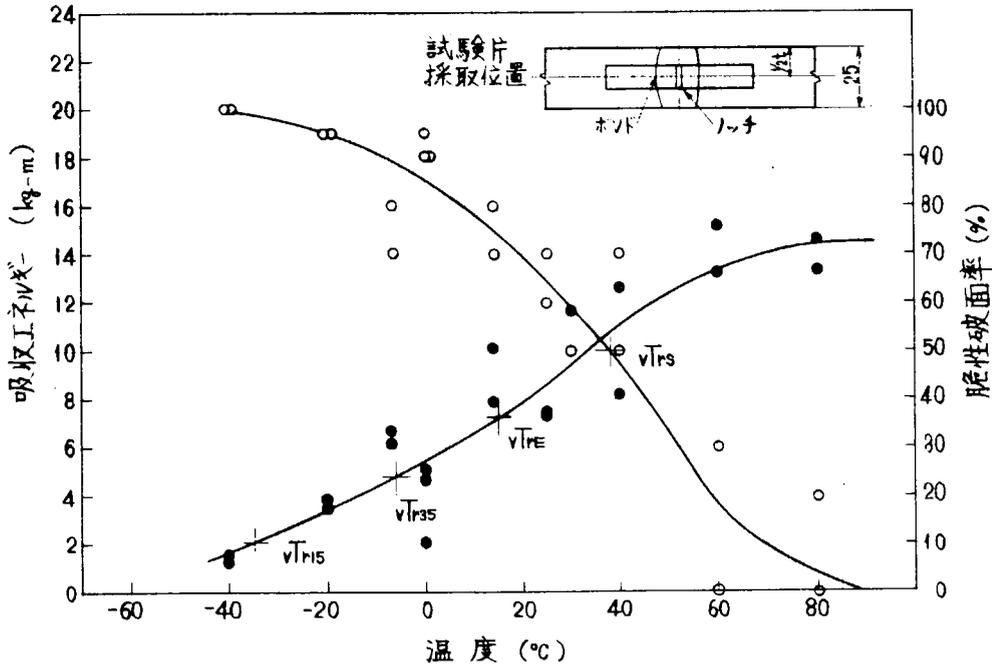


図4.3.20 V-ノッチシャルピー試験結果
(K5D鋼, VASCON-II法溶接継手)

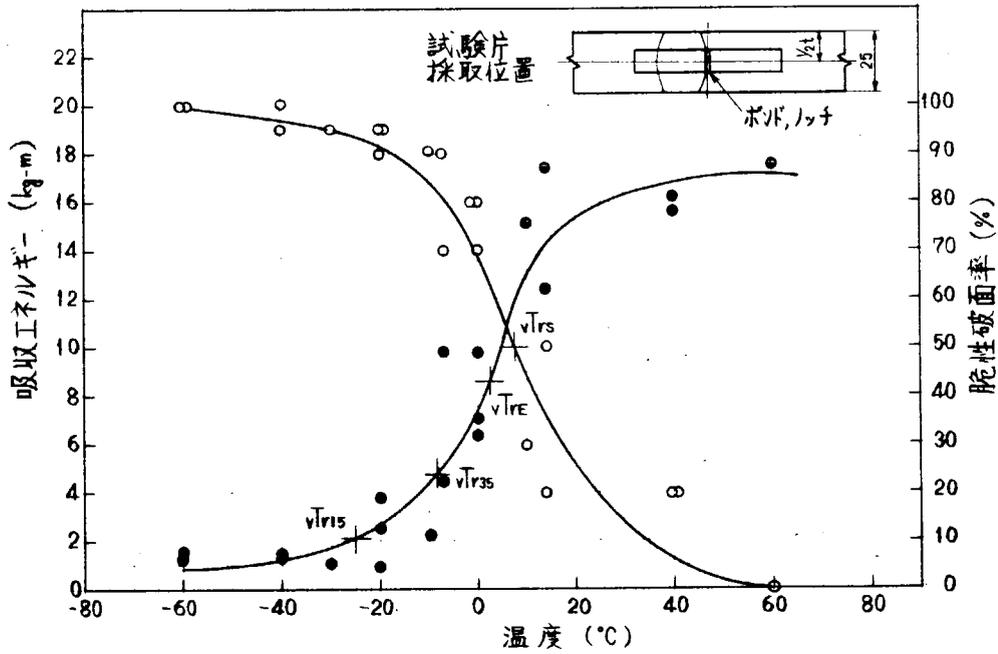


図4.3.21 V-ノッチシャルピー試験結果
(K5D鋼, VASCON-II法溶接継手)

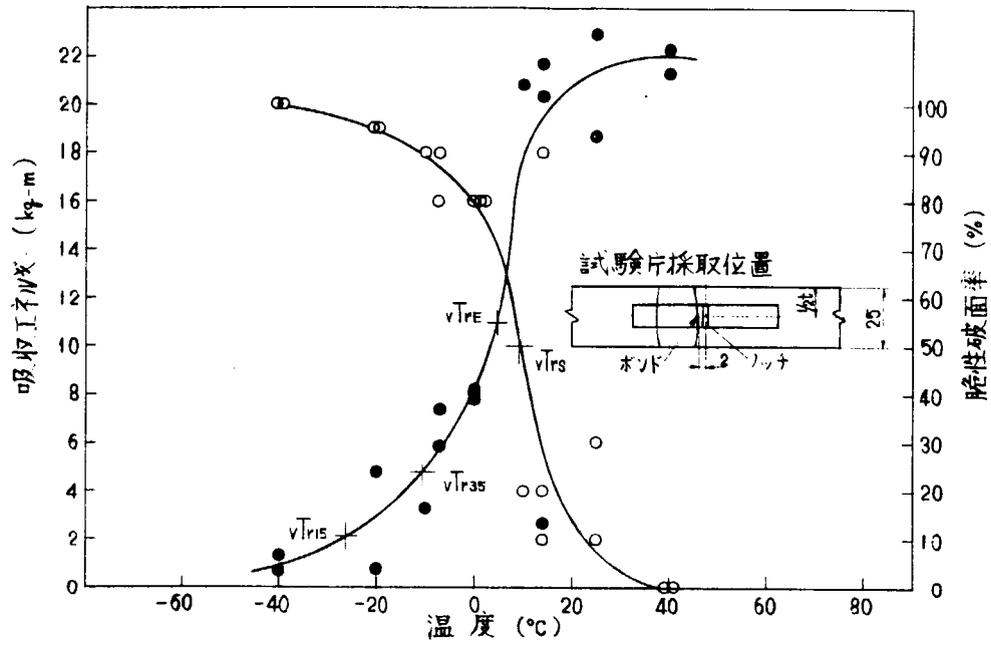


図 4.3.22 V-ノッチシャルピー試験結果
(K5D鋼, VASCON-II法溶接継手)

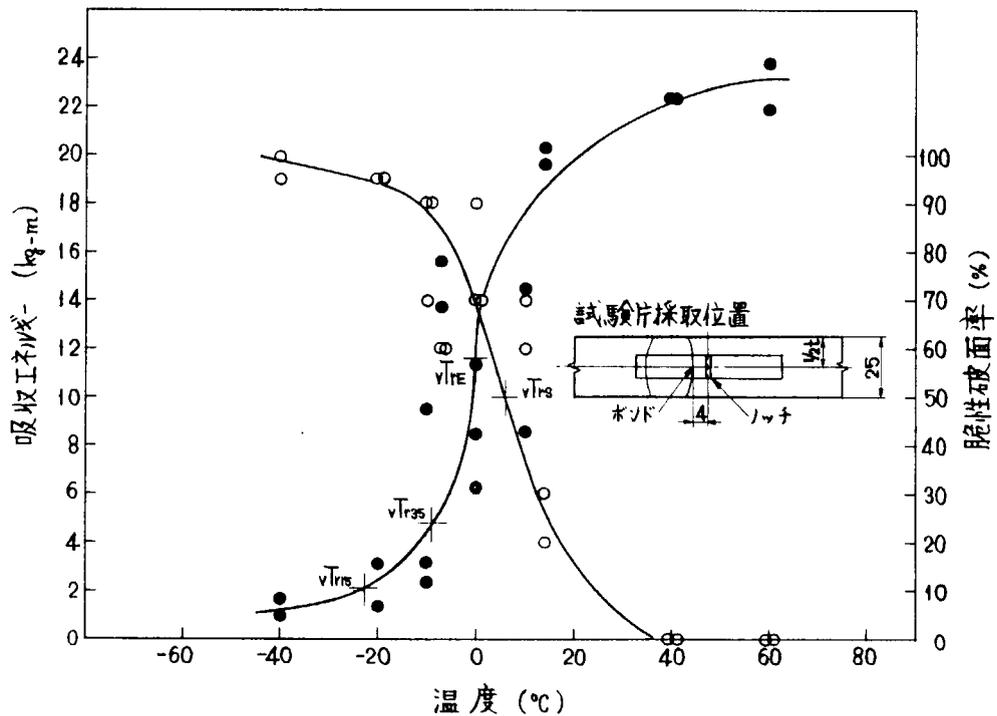


図 4.3.23 V-ノッチシャルピー試験結果
(K5D鋼, VASCON-II法溶接継手)

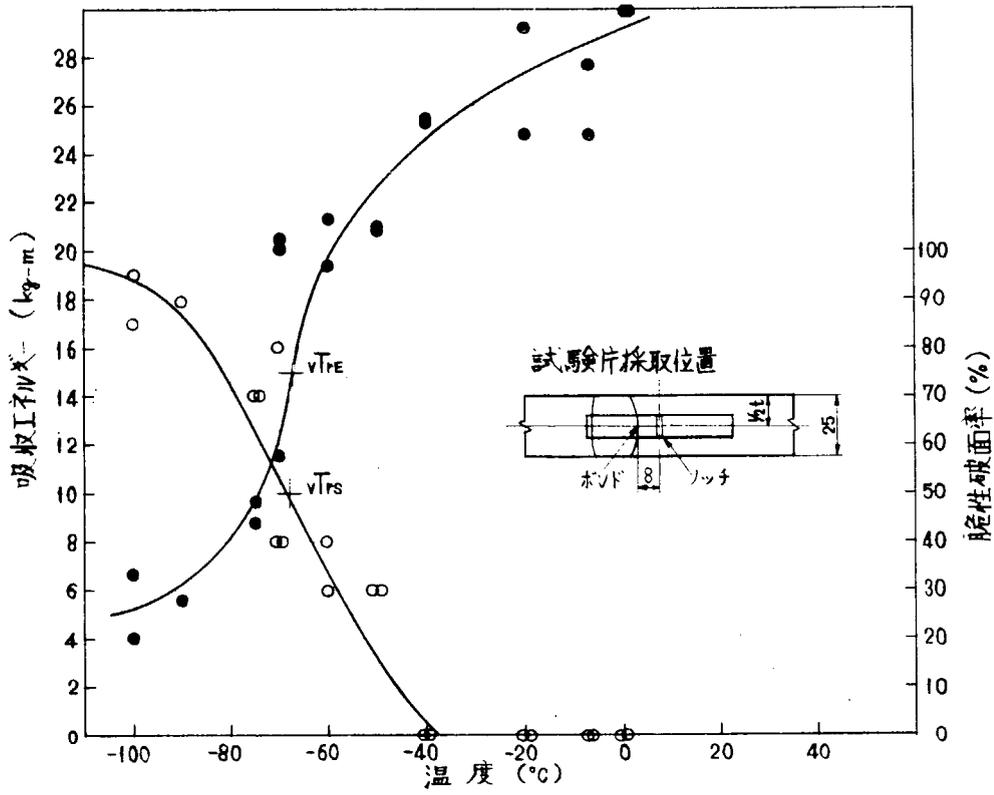


図4.3.24 V-ノッチシャルピー試験結果
(K5D鋼, VASCON-II法溶接継手)

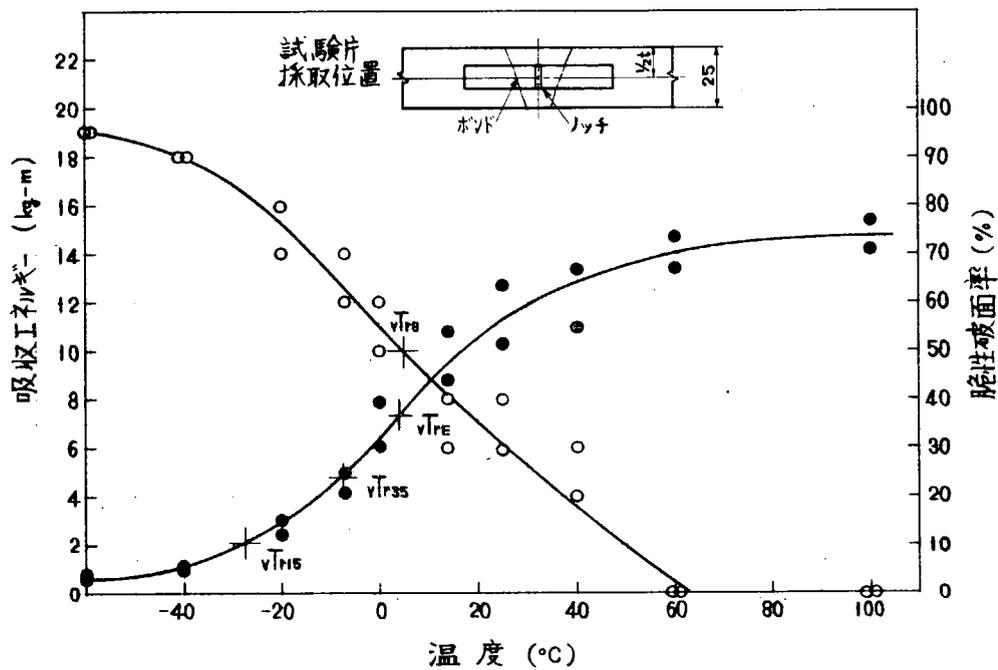


図4.3.25 V-ノッチシャルピー試験結果
(K5D鋼, デルタアウトレット法溶接継手)

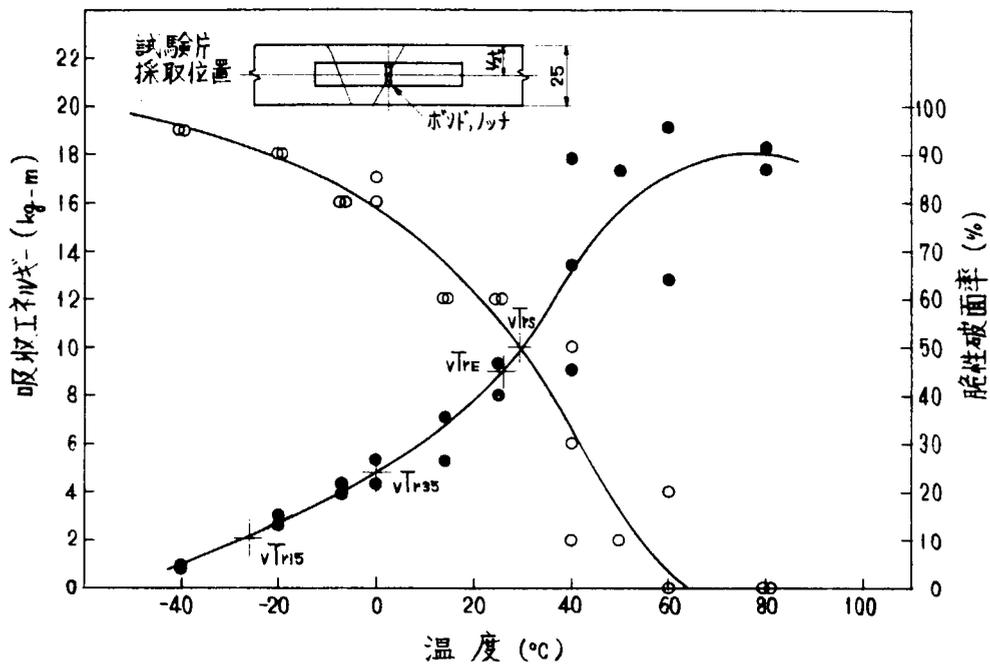


図4.3.26 V-ノッチシャルピー試験結果
(K5D鋼, デルタオシレット法溶接継手)

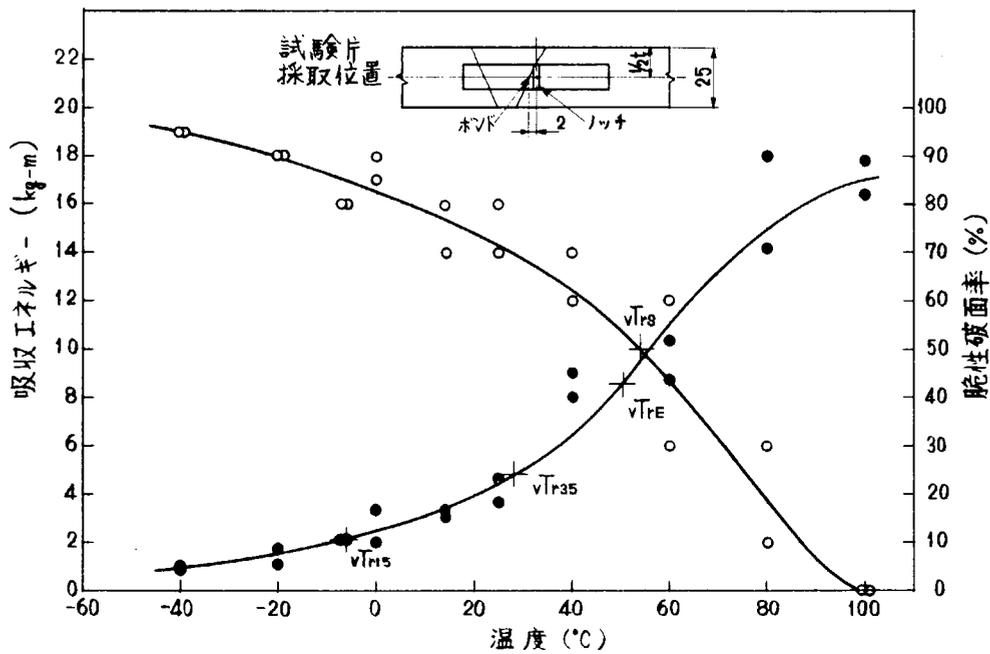


図4.3.27 V-ノッチシャルピー試験結果
(K5D鋼, デルタオシレット法溶接継手)

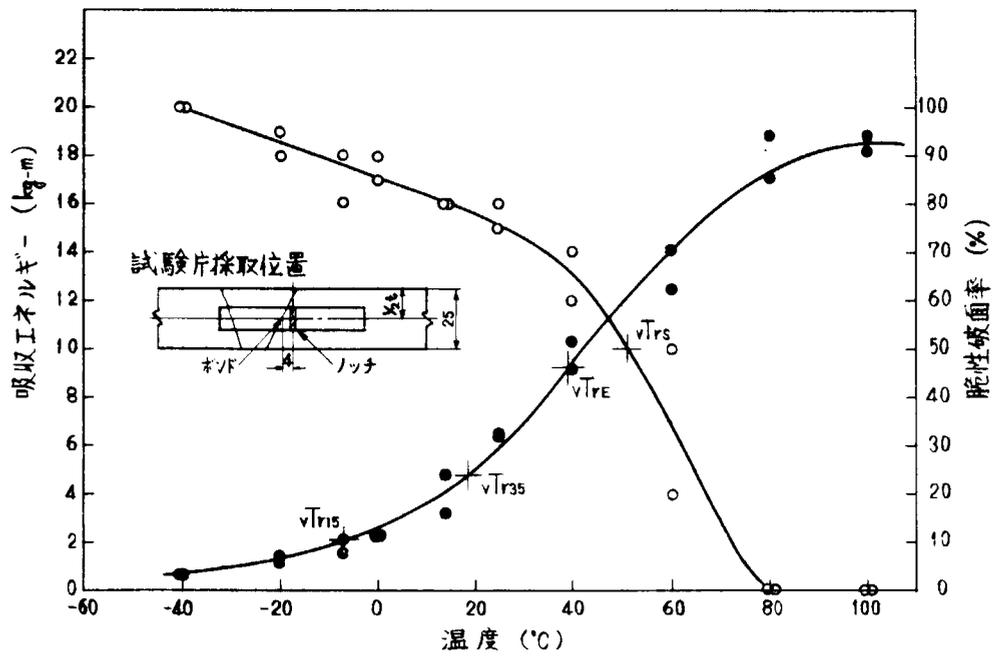


図4.3.28 V-ノッチシャルピー試験結果
(K5D鋼, デルタオシルト法溶接継手)

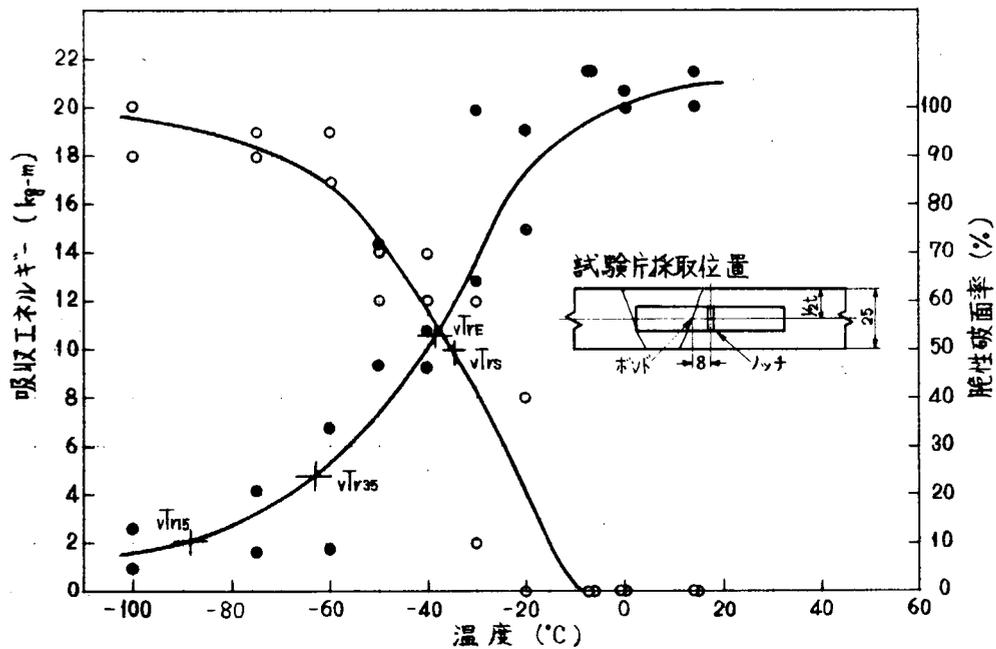


図4.3.29 V-ノッチシャルピー試験結果
(K5D鋼, デルタオシルト法溶接継手)

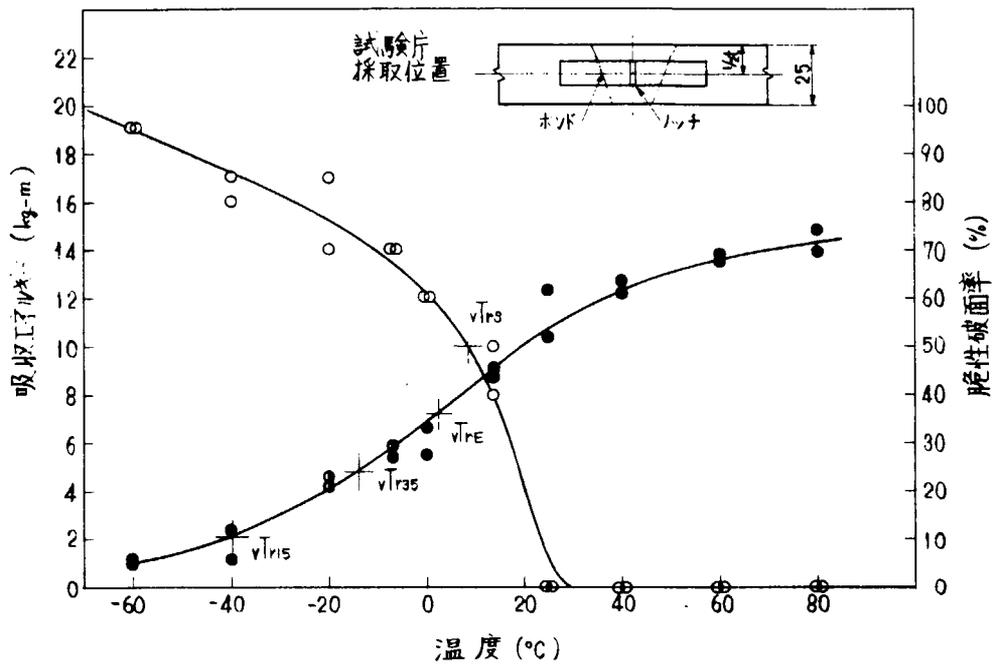


図4.3.30 V-ノッチシャルピー試験結果
(K5D鋼, 3電極片面1層溶接継手)

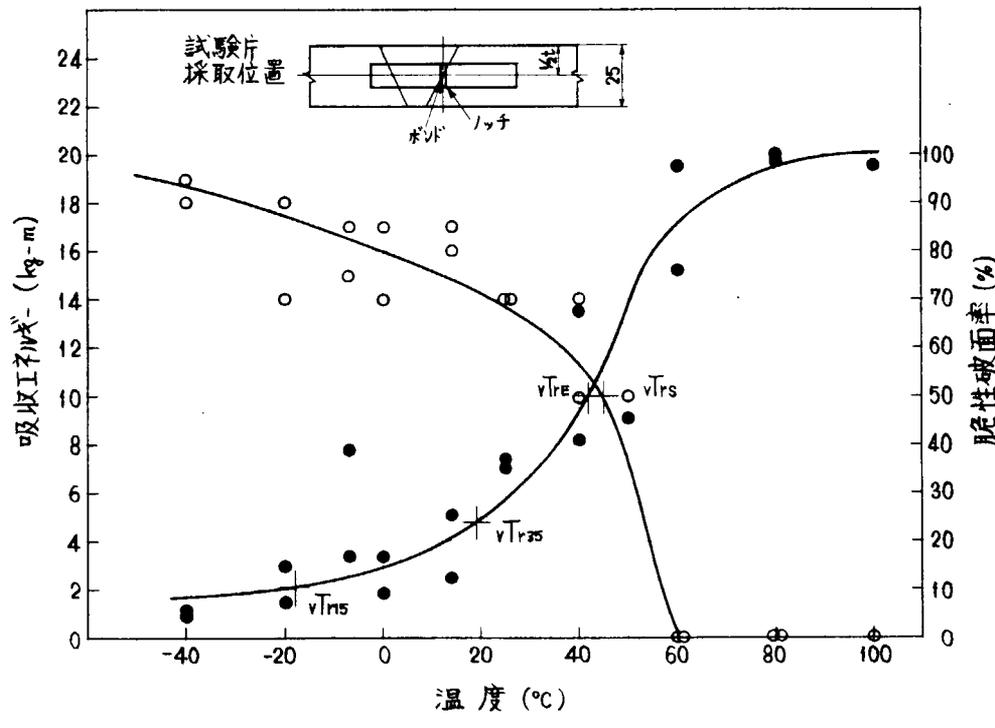


図4.3.31 V-ノッチシャルピー試験結果
(K5D鋼, 3電極片面1層溶接継手)

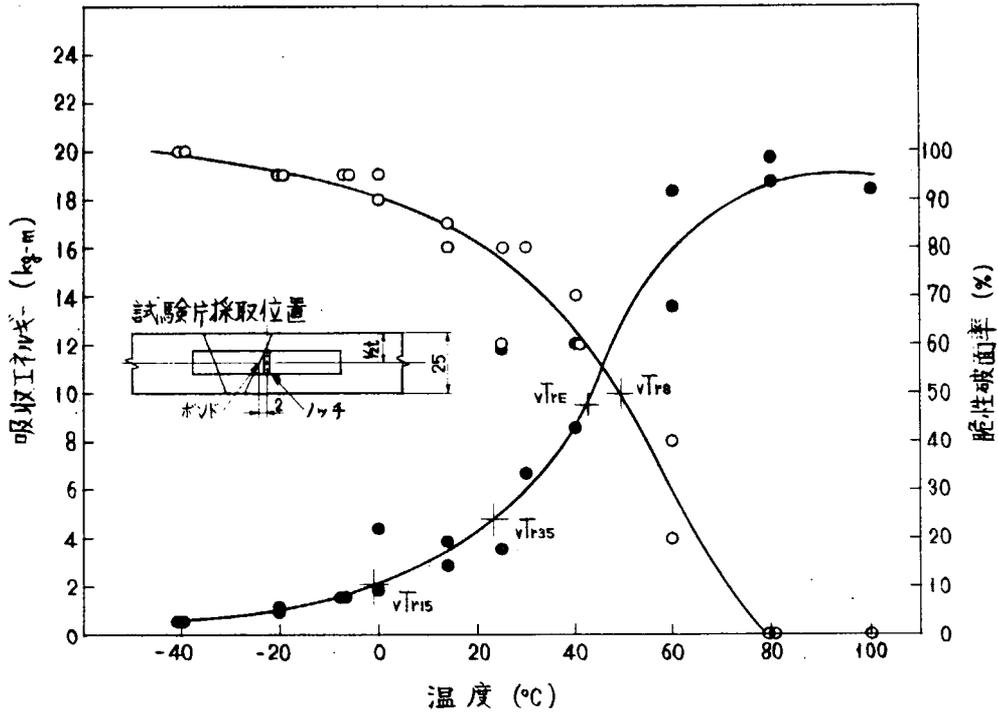


図4.3.32 V-ノッチシャルピー試験結果
(K5D鋼, 3電極片面1層溶接継手)

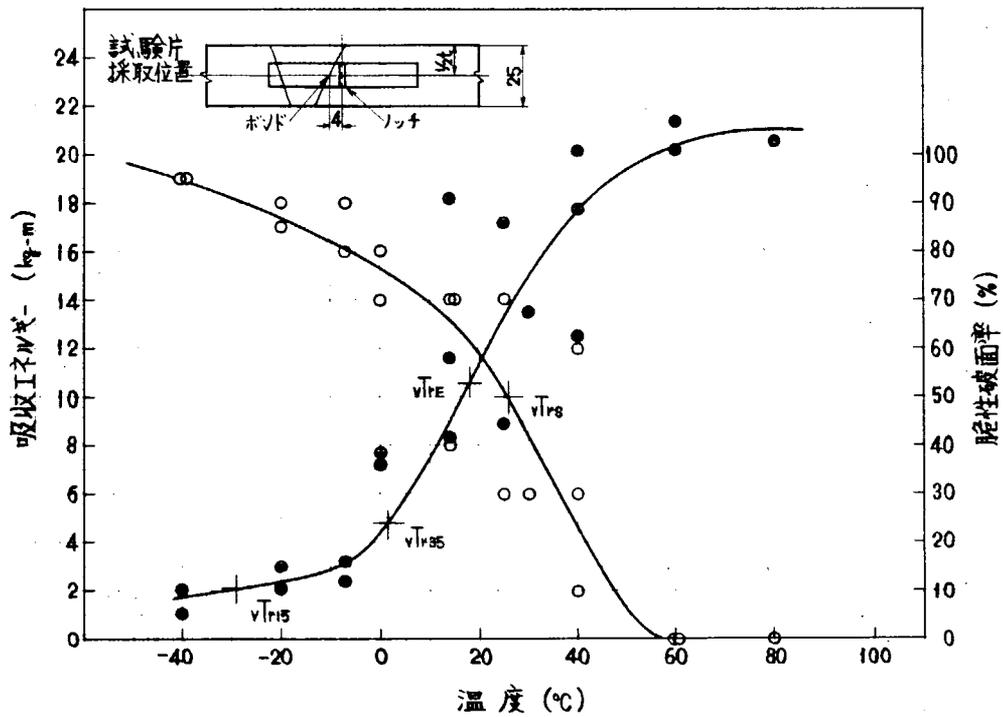


図4.3.33 V-ノッチシャルピー試験結果
(K5D鋼, 3電極片面1層溶接継手)

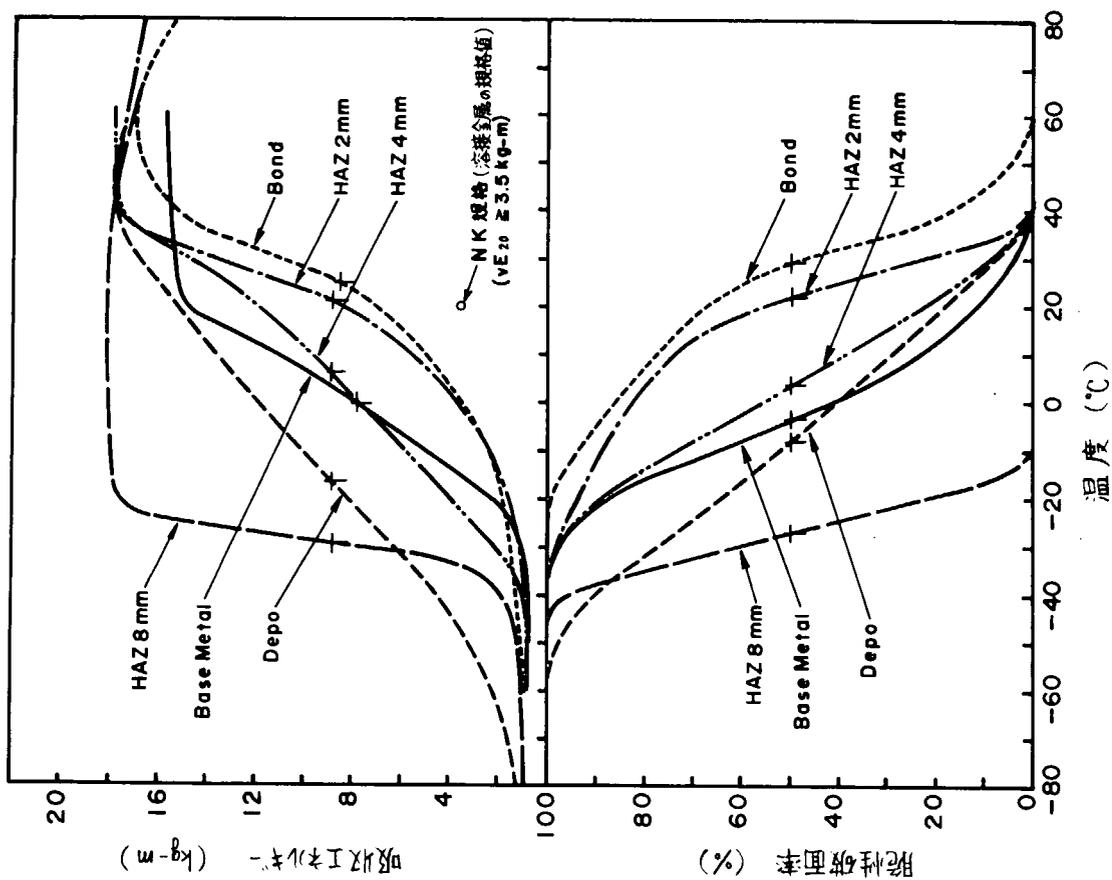


図 4.3.35 V-ノッチシャルピー試験遷移曲線
(KAS鋼, VASCON-II法溶接継手)

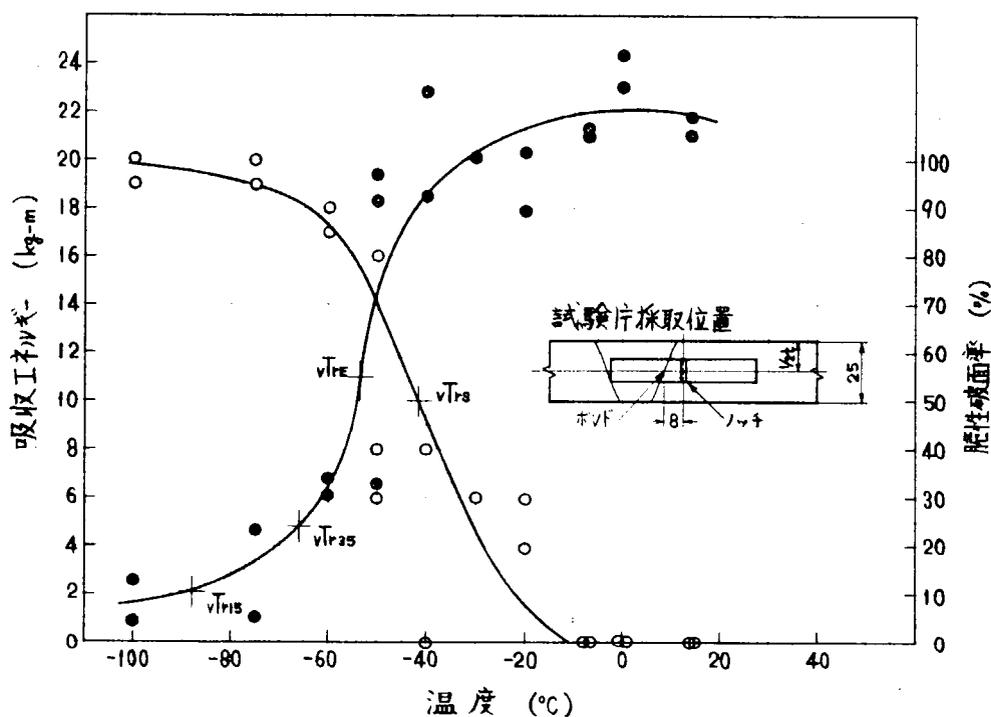


図 4.3.34 V-ノッチシャルピー試験結果
(K5D鋼, 3電極片面1層溶接継手)

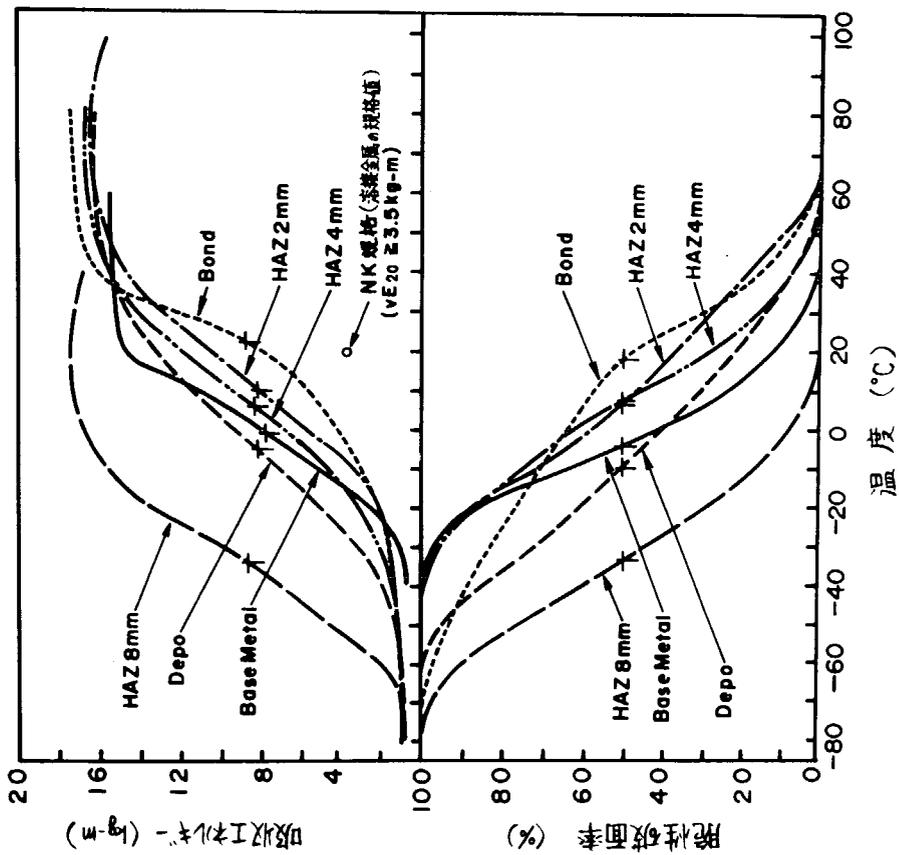


図4.3.36 V-ノッチヤルビ-試験遷移曲線
(KAS鋼, テルタオット-ト法溶接継手)

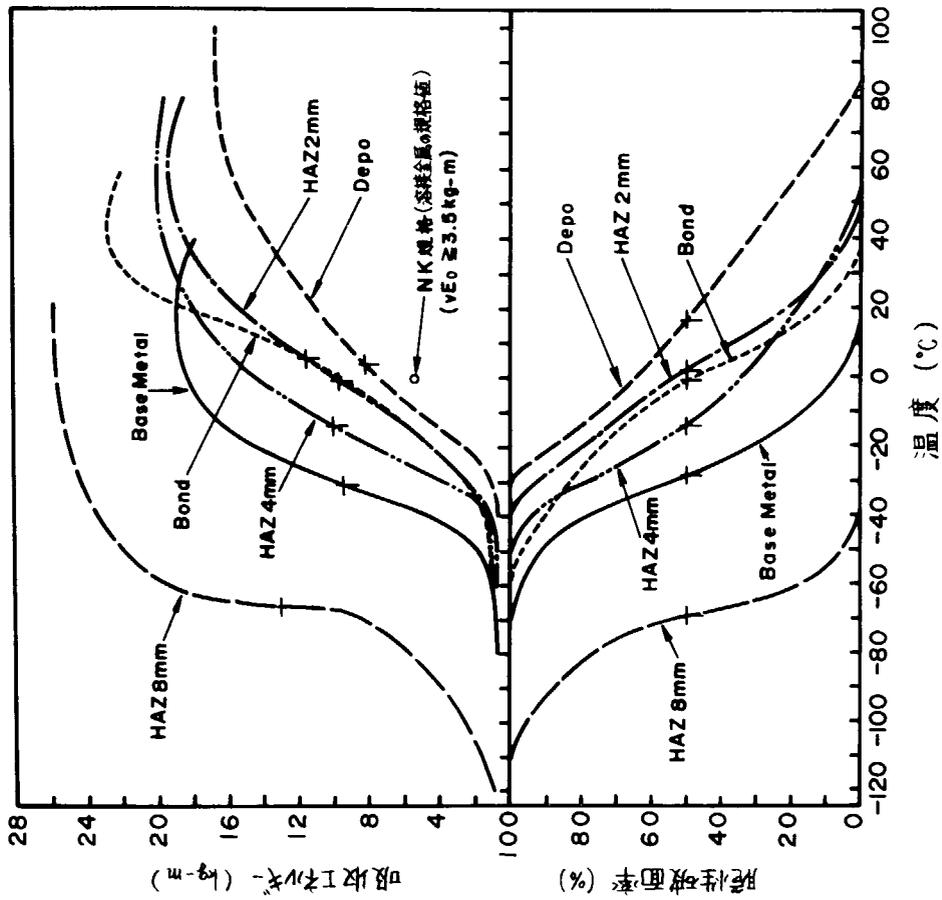


図4.3.37 V-ノッチヤルビ-試験遷移曲線
(KDK鋼, 3電極片面層溶接継手)

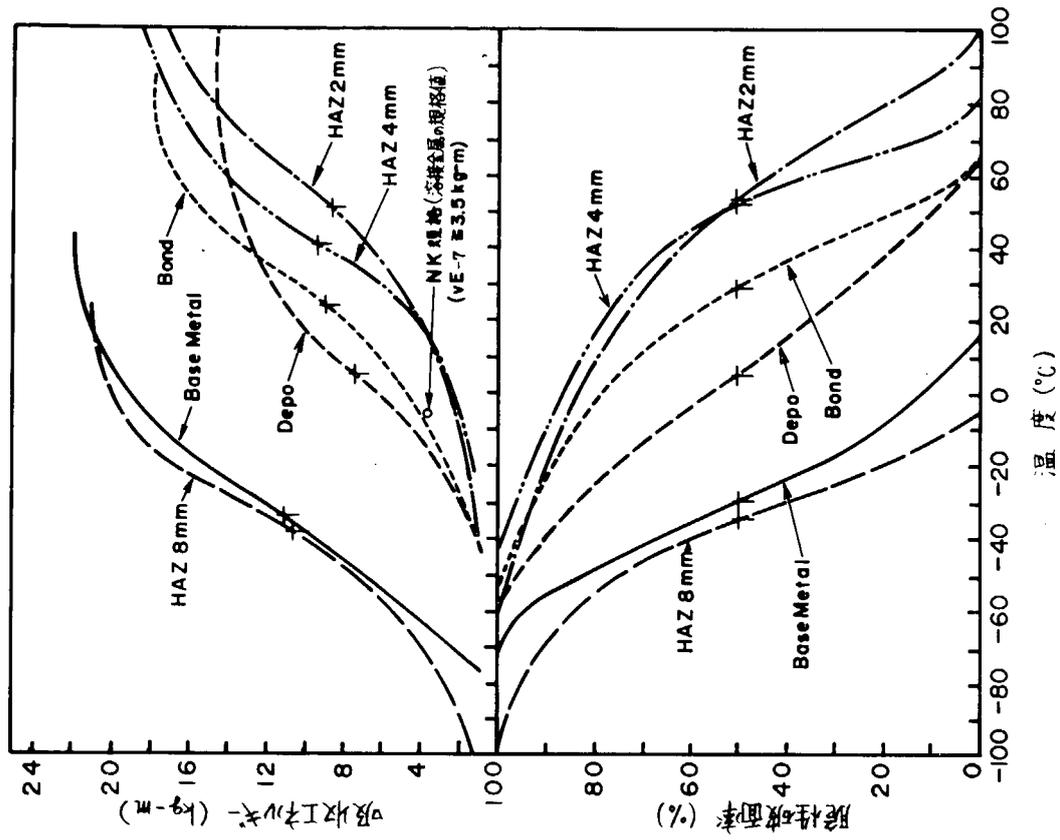


図 4.3.37 V-ノッチシャルピ試験遷移曲線
(K5D鋼, Vノッチ法溶接継手)

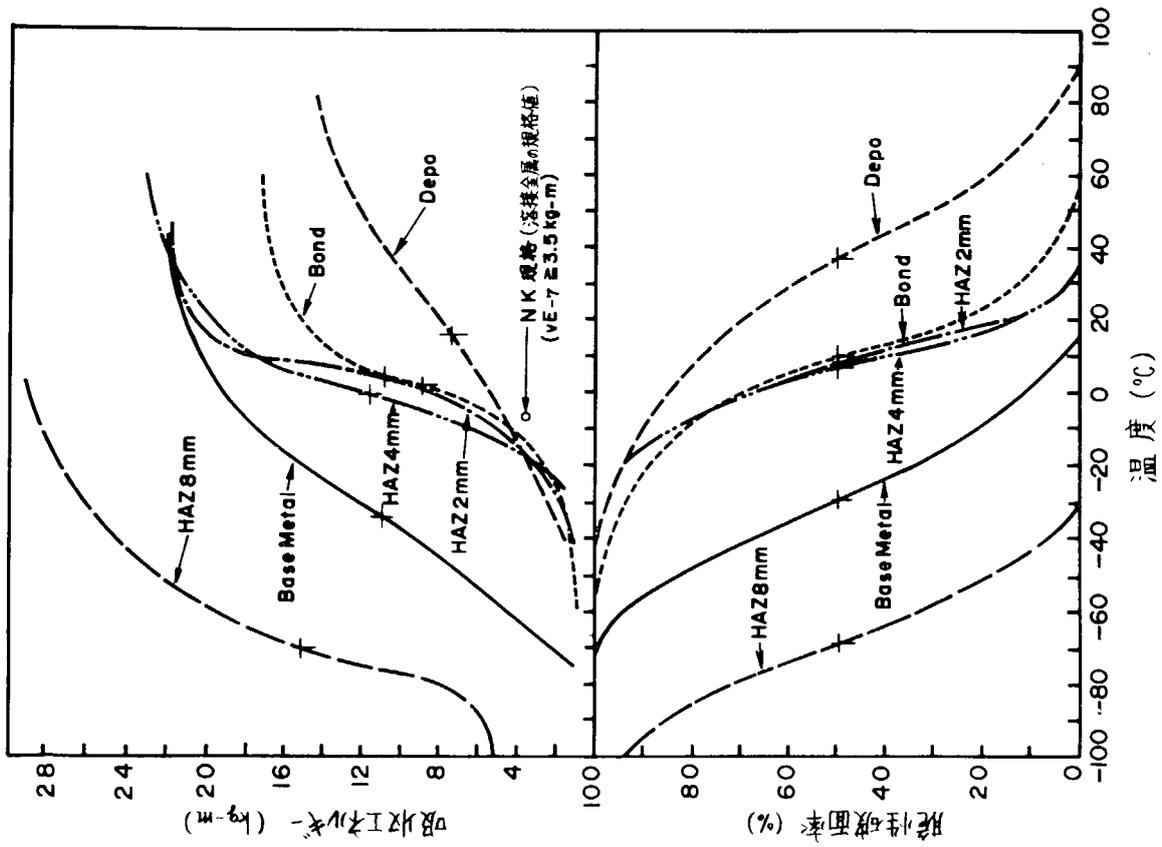


図 4.3.38 V-ノッチシャルピ試験遷移曲線
(K5D鋼, VASCON-II法溶接継手)

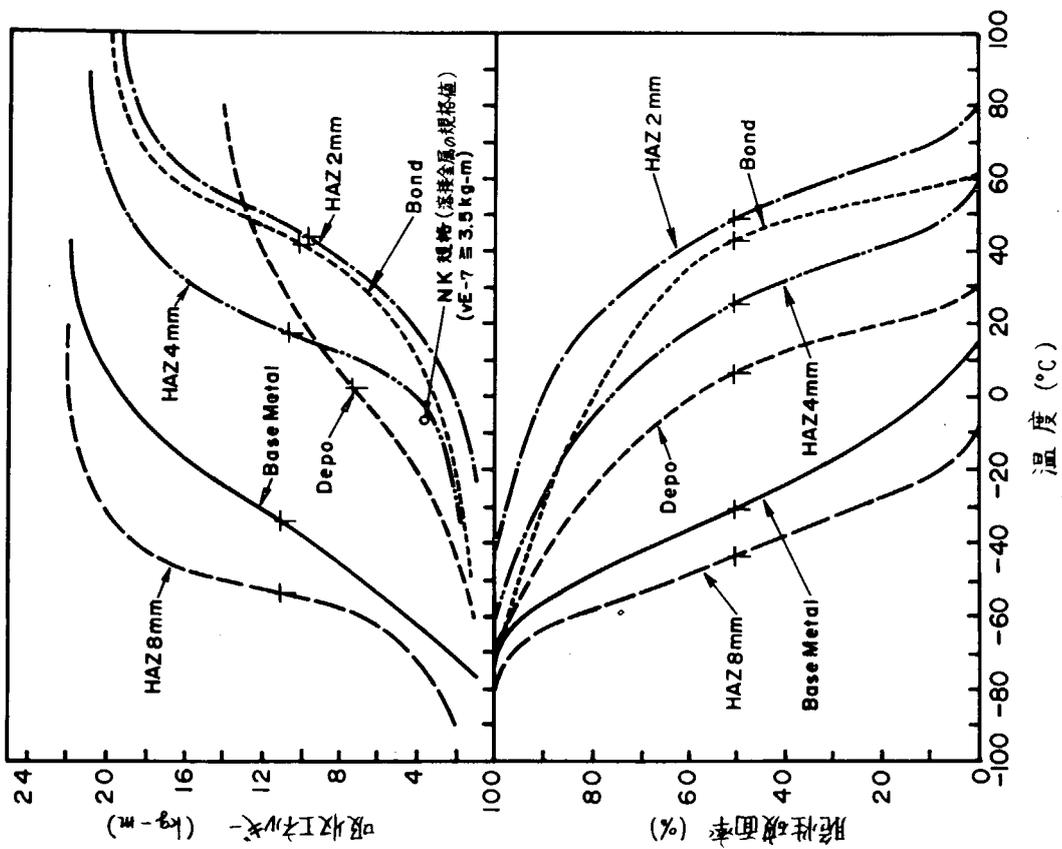


図4.3.40 Vノッチヤルビ-試験遷移曲線
(K5D鋼, 3電極片面周溶接継手)

表 4.3.7 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

溶接法	鋼種	ノッチ位置	遷移温度 (°C)				シエルフ エネルギー (kg-m)
			vTr 15	vTr 35	vTr E	vTr S	
母材	KAS	1/2 ↑	-21	-11	-1	-4	15.6
	KDK		-49	-39	-31	-28	19.0
	K5D		-70	-58	-33	-30	22.0
VASCOON-II 法 溶接	KAS	溶接金属中央	-61	-39	-17	-9	17.8
		ボンド	-13	8	24	28	16.9
		ボンドより 2mm	-15	5	21	21	17.8
		ボンドより 4mm	-31	-16	6	2	17.8
		ボンドより 8mm	-39	-33	-30	-28	18.1
デルタオヴレート 法 溶接	KAS	溶接金属中央	-38	-22	-6	-10	16.3
		ボンド	-18	5	23	18	17.4
		ボンドより 2mm	-23	-4	10	6	16.5
		ボンドより 4mm	-30	-10	6	8	16.7
		ボンドより 8mm	-60	-49	-34	-33	17.6
3電極片面1層 溶接	KDK	溶接金属中央	-23	-12	5	16	16.6
		ボンド	-33	-18	6	-1	22.8
		ボンドより 2mm	-32	-19	-1	2	19.4
		ボンドより 4mm	-35	-28	-14	-13	20.0
		ボンドより 8mm	-105	-84	-66	-69	25.8
VASCOON-II 法 溶接	K5D	溶接金属中央	-35	-6	15	38	14.5
		ボンド	-25	-8	3	7	17.2
		ボンドより 2mm	-26	-11	5	9	22.0
		ボンドより 4mm	-23	-9	0	6	23.2
		ボンドより 8mm	—	—	-67	-68	29.9
デルタオヴレート 法 溶接	K5D	溶接金属中央	-27	-8	4	5	14.7
		ボンド	-26	0	26	29	18.0
		ボンドより 2mm	-6	28	51	54	17.2
		ボンドより 4mm	-7	18	39	51	18.5
		ボンドより 8mm	-89	-63	-39	-35	21.0
3電極片面1層 溶接	K5D	溶接金属中央	-40	-14	2	9	14.4
		ボンド	-18	19	42	45	20.0
		ボンドより 2mm	-1	23	43	49	19.0
		ボンドより 4mm	-29	1	18	26	21.0
		ボンドより 8mm	-88	-66	-54	-42	22.0

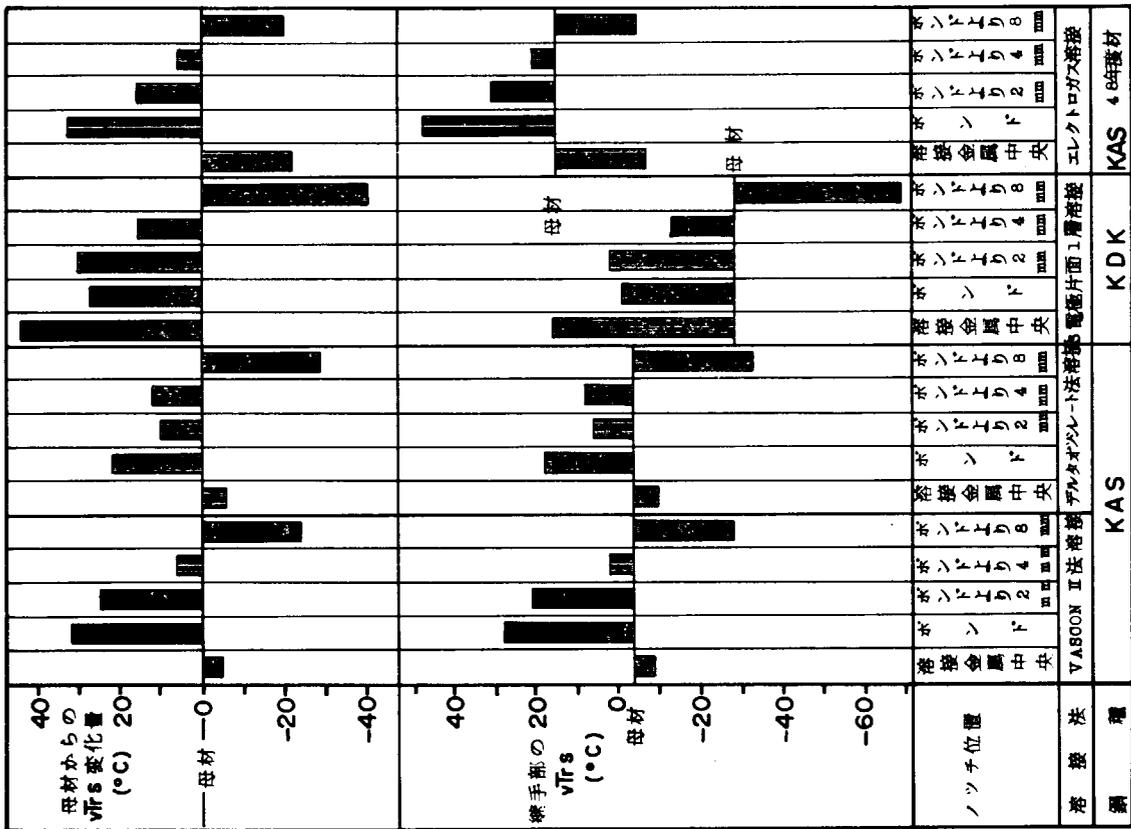


図4.3.41 遷移温度 $vTrs$ の比較

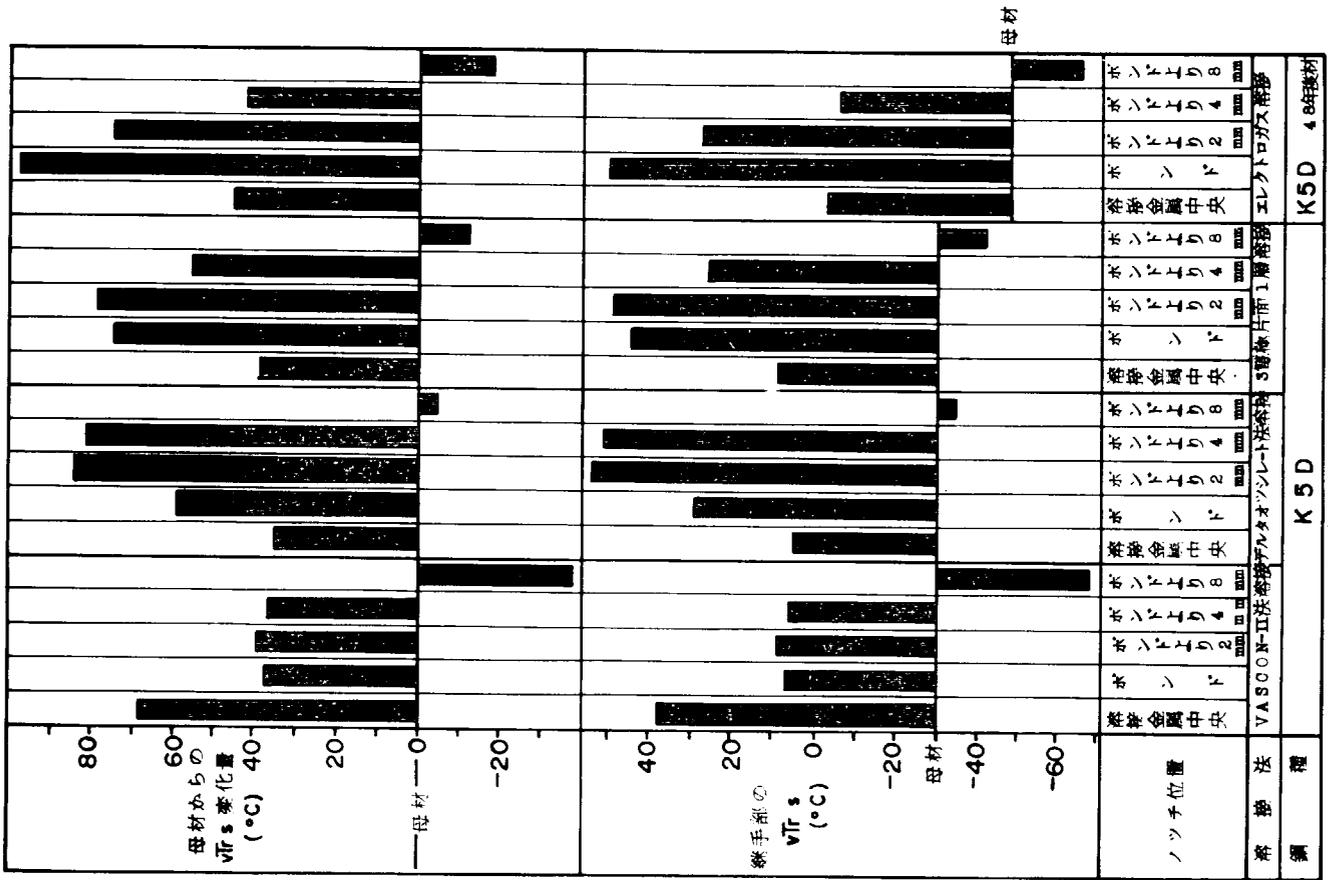


図4.3.42 遷移温度 $vTrs$ の比較

表4.4.1 再現熱サイクル試験条件

記号	最高到達温度 (°C)	800→500°C 冷却時間 (sec)	冷却用ガス	対応する溶接法、入熱および位置
A	1,350	12	He	サブマージ溶接, H.I.22.5 $\frac{KJ}{cm}$ ボード
B	1,350	51	He	サブマージ溶接, H.I.65.7 $\frac{KJ}{cm}$ ボード
C	1,350	81	N ₂	RAC 溶接 (保熱性エレクトロガス溶接) H.I.86.4 $\frac{KJ}{cm}$ ボード
D	1,350	168	N ₂	エレクトロガス溶接, H.I.148 $\frac{KJ}{cm}$ ボード
E	1,350	300	N ₂	CES 溶接, H.I.266 $\frac{KJ}{cm}$ ボード
F	1,300	168	N ₂	エレクトロガス溶接, H.I.148 $\frac{KJ}{cm}$ ボード, 0.4mm
G	1,200	168	N ₂	エレクトロガス溶接, H.I.148 $\frac{KJ}{cm}$ ボード, 1.7mm
H	1,000	168	N ₂	エレクトロガス溶接, H.I.148 $\frac{KJ}{cm}$ ボード, 4.3mm
I	800	168	N ₂	エレクトロガス溶接, H.I.148 $\frac{KJ}{cm}$ ボード, 6.1mm

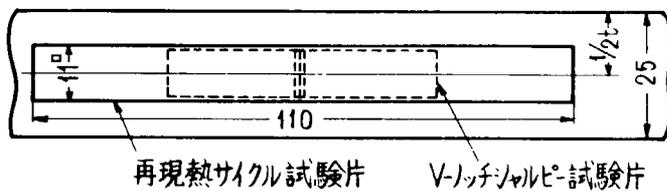


図4.4.1 試験片採取要領

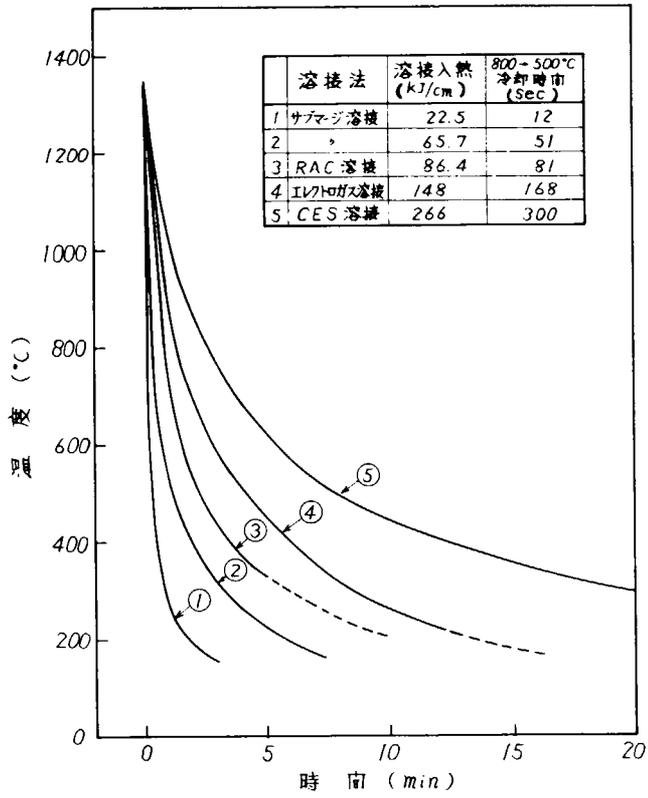


図4.4.2 各種溶接ボンドの熱サイクル

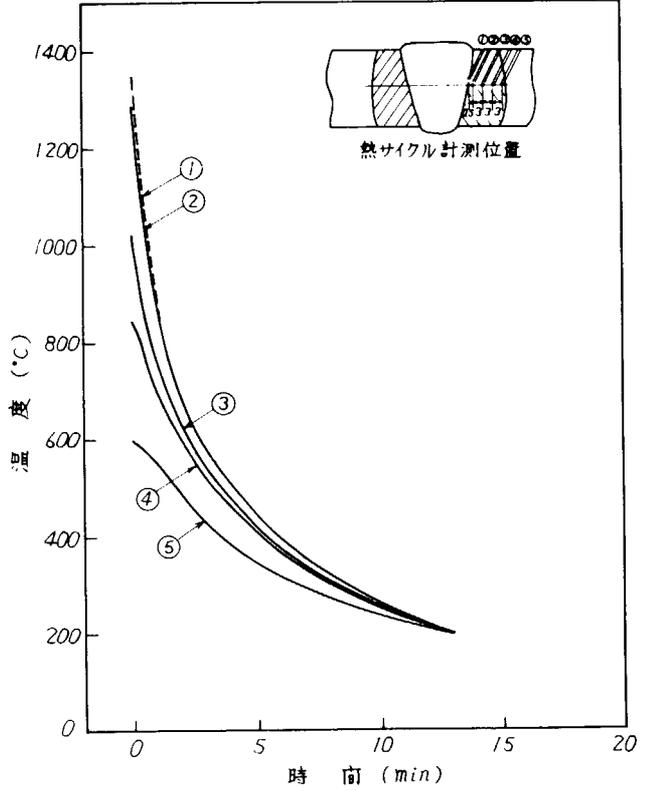


図4.4.3 エレクトロガス溶接(HI 148^{kJ/cm})HAZの熱サイクル

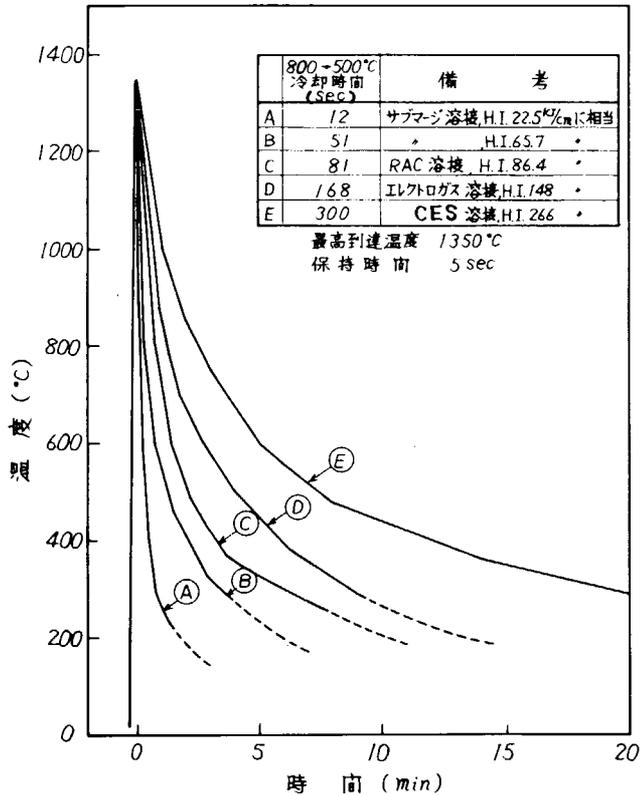


図4.4.4 再現熱サイクル (I)

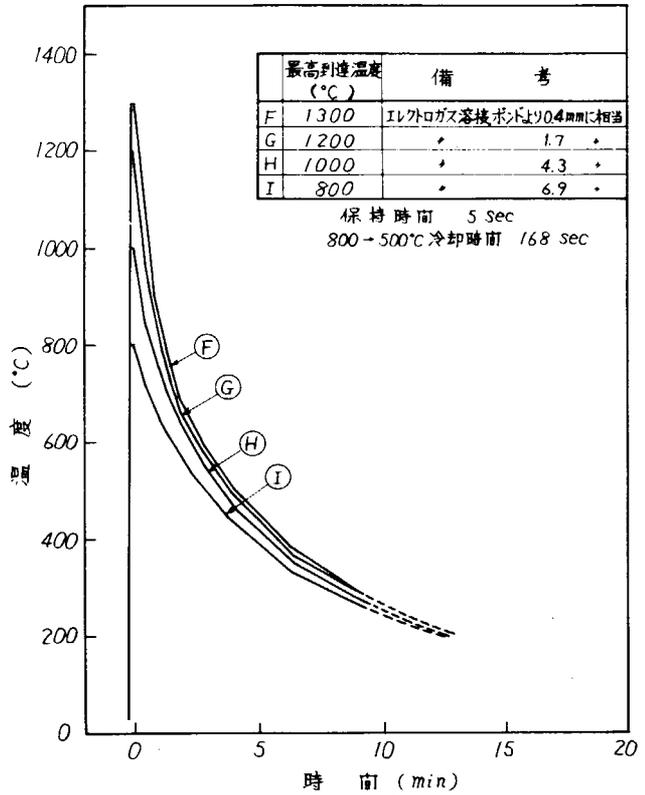
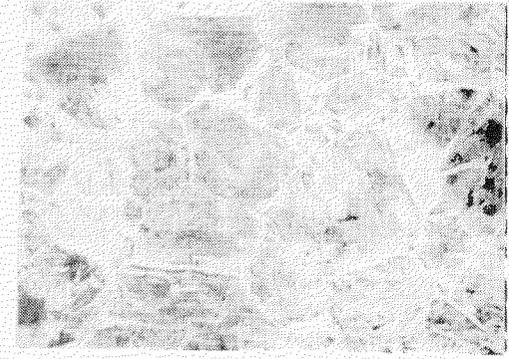


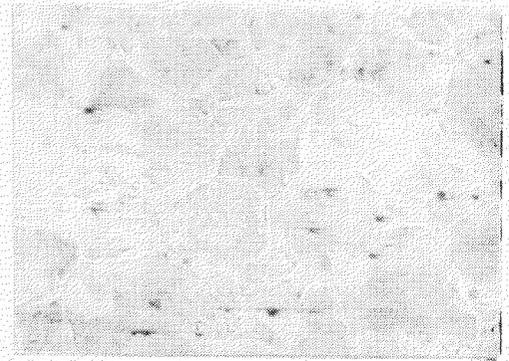
図4.4.5 再現熱サイクル (II)



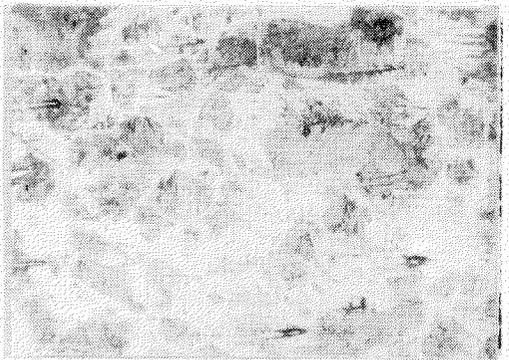
A (Hv193) x 50



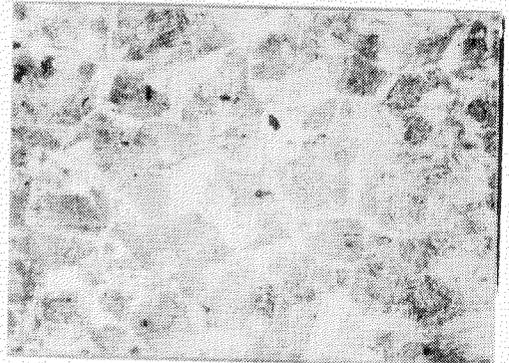
B (Hv163) x 50



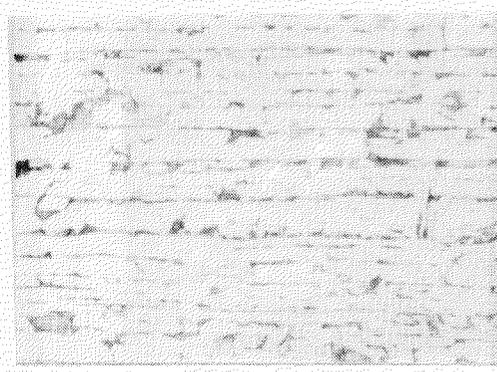
C (Hv164) x 50



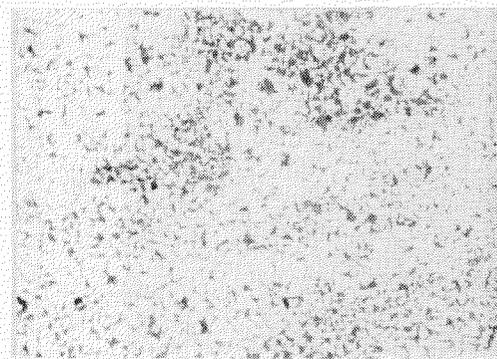
D (Hv162) x 50



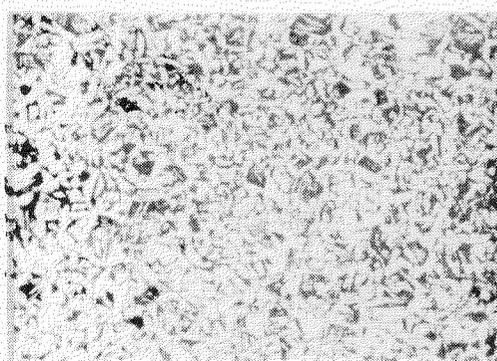
E (Hv151) x 50



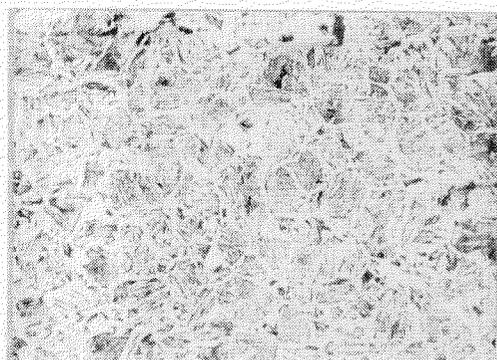
F (Hv165) x 50



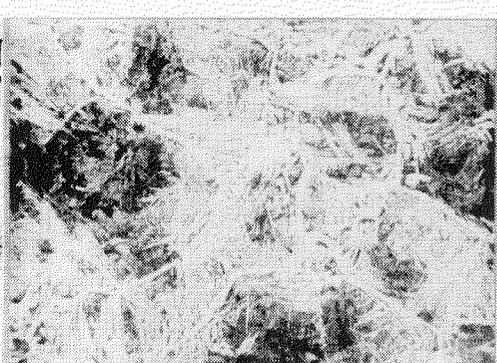
G (Hv149) x 50



H (Hv143) x 100



I (Hv140) x 100

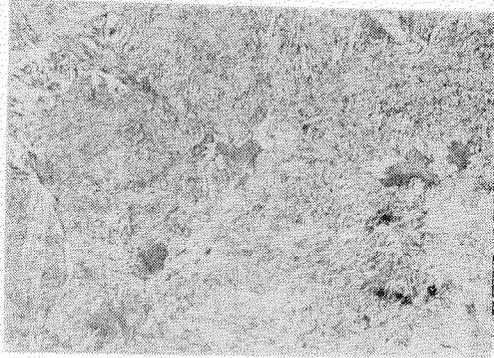


J (Hv127) x 100

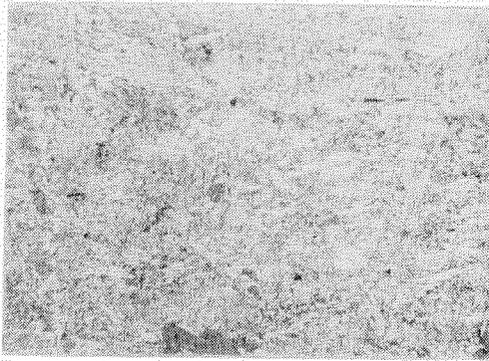
写真 4.4.1 KAS 鋼の再現熱サイクル顕微鏡組織



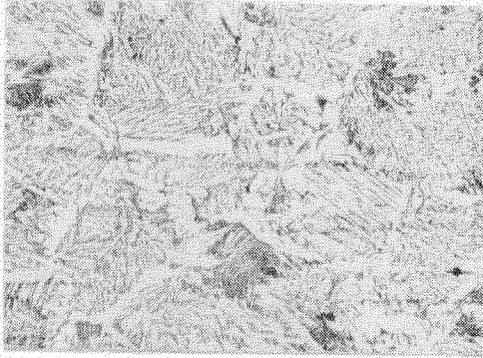
A (Hv 266)



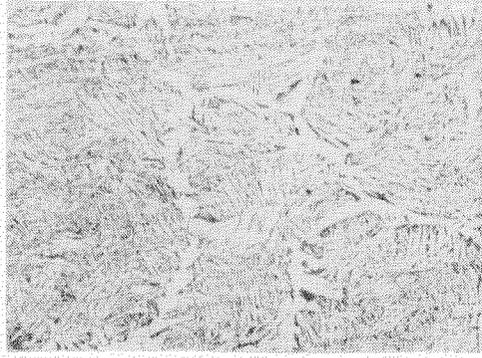
B (Hv 203)



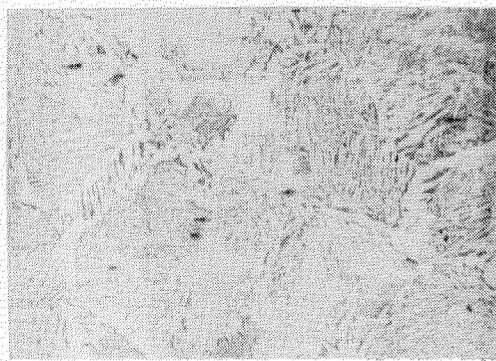
C (Hv 199)



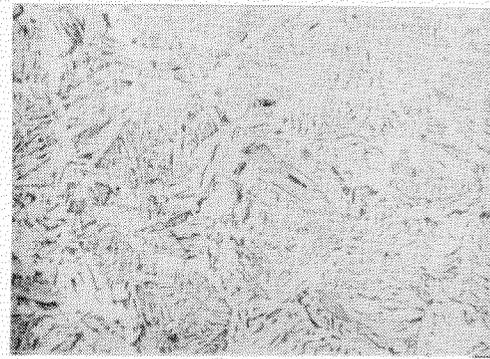
D (Hv 178)



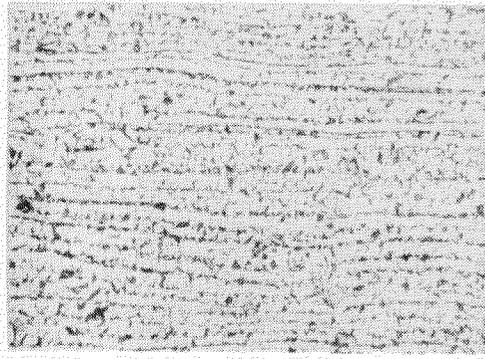
E (Hv 181)



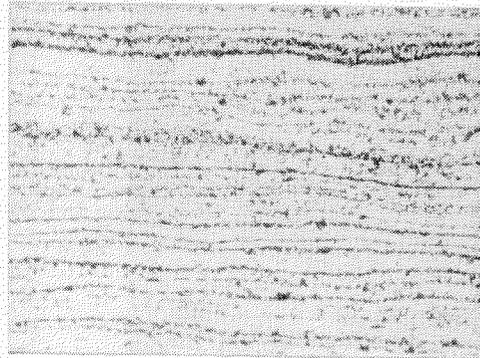
F (Hv 179)



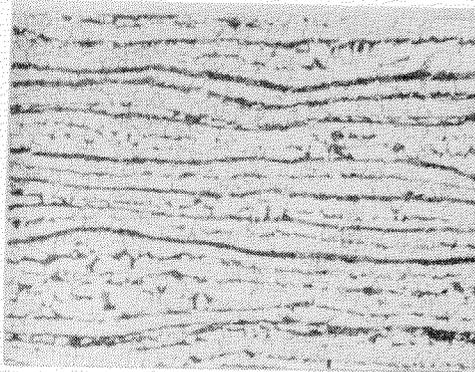
G (Hv 169)



H (Hv 160)



I (Hv 148)



J (Hv 151)

写真4.4.2 K5D鋼の再現熱サイクル顕微鏡組織 (x100)

表 4.4.2 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS鋼)

A		B		C		D		E			
試験温度 (°C)	吸収工利片-破面率 (%)										
-40	0.46	100	-40	0.56	100	-10	1.38	100	-10	1.27	100
"	0.56	100	"	0.76	100	"	0.86	100	"	0.56	100
-10	0.46	100	-10	1.06	100	-10	3.31	85	+20	2.26	90
"	2.14	100	"	1.06	100	"	0.76	100	"	6.25	62
+20	4.67	80	+20	3.43	81	+20	0.86	100	+35	6.25	57
"	2.48	90	"	5.19	78	"	5.19	75	"	5.19	80
+50	7.63	66	+50	10.64	39	"	3.19	82	+50	2.26	82
"	8.33	58	"	5.32	61	+35	6.11	63	"	6.39	58
+80	4.93	76	"	5.32	71	+50	10.64	42	"	3.67	64
"	5.85	59	+80	7.21	34	"	10.20	45	"	8.76	49
"	6.25	51	"	15.49	13	+80	14.02	0	"	8.33	53
"	14.47	0	"	12.25	22	"	13.29	28	+110	13.73	0
+110	12.84	7	+110	13.58	0	+110	13.29	0	"	16.22	0
"	14.17	0	"	13.43	0	"	12.99	5	+140	14.47	0
+140	12.55	0	+140	13.58	0	+140	13.43	0	"	15.79	0

F		G		H		I		
試験温度 (°C)	吸収工利片-破面率 (%)							
-40	0.66	100	-40	0.76	100	-40	1.17	100
"	0.56	100	"	1.18	100	"	0.76	100
-10	1.38	85	-10	4.17	85	-25	1.27	95
"	2.83	80	"	1.49	90	"	2.95	95
+20	7.07	56	+5	6.25	67	"	3.92	85
"	6.39	67	"	6.80	59	-10	8.90	52
+30	8.33	55	"	6.52	67	"	5.98	67
+40	12.10	31	+20	6.12	51	"	6.12	63
"	6.93	52	"	9.04	45	+5	10.78	32
+60	5.19	57	+30	9.19	34	"	10.05	41
"	10.34	32	"	11.51	35	+20	16.08	0
+80	16.95	0	+50	15.49	15	"	14.61	20
"	13.58	20	"	16.51	11	+50	17.52	0
+110	14.17	0	+80	16.37	0	"	17.09	0
"	15.05	0	"	12.84	0	+80	15.93	0
								14.76

表 4.4.3 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D鋼)

A		B		C		D		E			
試験温度 (°C)	吸収工利片-破面率 (%)										
-7	1.64	95	-7	1.50	95	-7	1.23	95	-30	1.48	100
"	2.27	95	"	1.37	100	"	1.37	95	"	1.86	95
RT(+15)	4.94	85	RT(+15)	2.74	90	RT(+15)	4.94	80	"	2.45	95
"	5.41	80	"	4.82	85	"	2.45	85	"	4.80	90
+30	10.33	60	+30	3.22	90	+30	6.99	85	"	5.57	80
"	7.04	80	"	6.67	90	"	6.72	80	"	5.54	80
+50	11.08	40	+40	7.98	70	+50	16.96	40	"	15.85	50
"	7.52	70	"	6.08	80	"	10.66	40	"	11.31	50
+70	8.49	20	+50	17.08	40	"	5.91	70	"	8.38	70
"	19.92	0	"	13.97	40	+70	16.75	30	"	17.43	10
"	14.47	10	+70	16.06	30	"	17.64	20	"	15.54	40
+90	17.72	0	"	19.14	10	+90	18.74	0	"	19.25	0
"	18.00	0	+90	20.52	0	"	19.98	0	"	19.27	0
+110	17.43	0	"	19.98	0	+110	20.06	0	"	19.63	0
"	19.42	0	+110	19.14	0	"	19.98	0	"	18.14	0

F		G		H		I		
試験温度 (°C)	吸収工利片-破面率 (%)							
-30	0.93	100	-30	1.07	100	-70	1.52	100
"	0.93	100	"	1.78	95	"	2.94	95
-7	3.89	95	-7	5.00	90	-60	0.95	100
"	1.72	95	"	2.04	95	"	6.85	90
RT(+15)	6.58	75	RT(+15)	8.55	60	-50	7.29	80
"	2.64	80	"	5.30	70	"	7.23	85
+30	4.56	80	+30	9.81	70	-40	18.50	40
"	6.72	80	"	7.81	60	"	13.45	60
+50	7.35	70	+40	14.23	40	-30	20.26	30
"	8.07	70	"	13.00	40	"	19.98	30
+70	18.00	30	+50	16.66	30	-7	13.48	50
"	12.46	40	"	19.71	10	"	21.78	20
+90	18.71	0	+70	20.94	0	"	22.52	20
"	20.06	0	"	17.08	0	RT(+15)	22.93	0
+110	18.56	0	+90	19.05	0	"	23.32	0

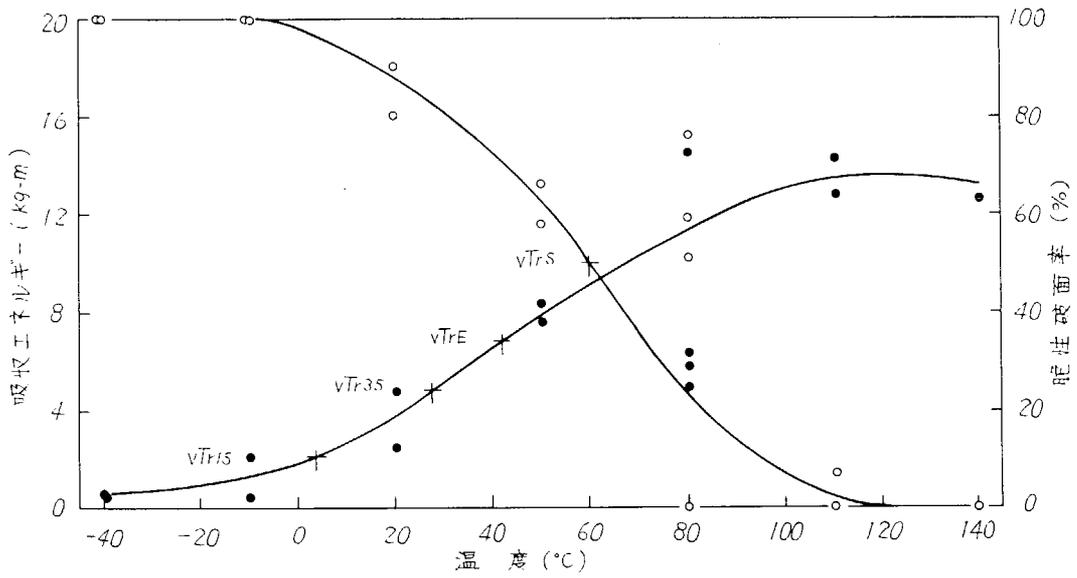


図4.4.6 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS鋼, 熱サイクル(A))

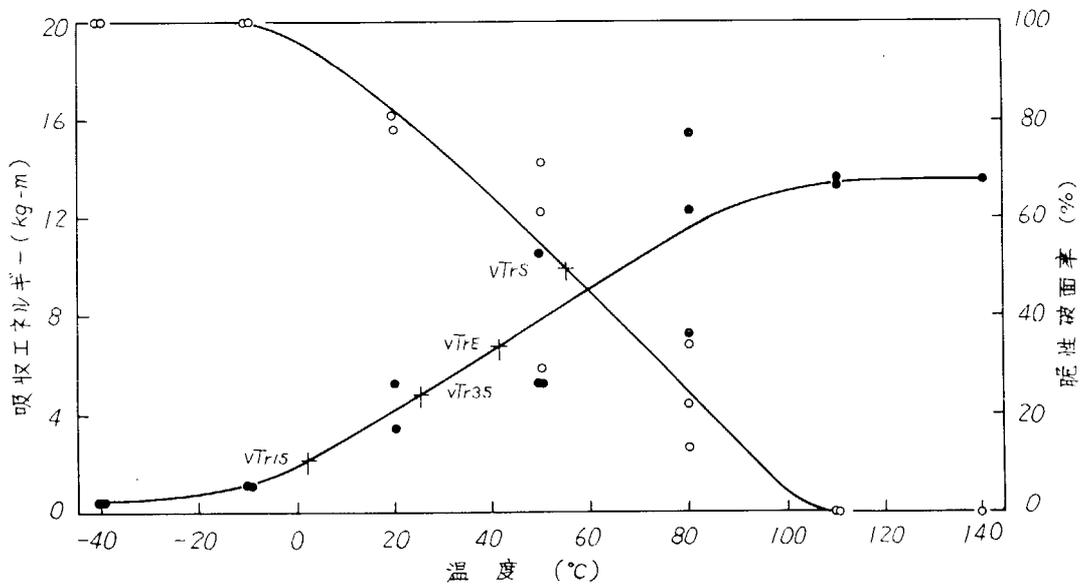


図4.4.7 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS鋼, 熱サイクル(B))

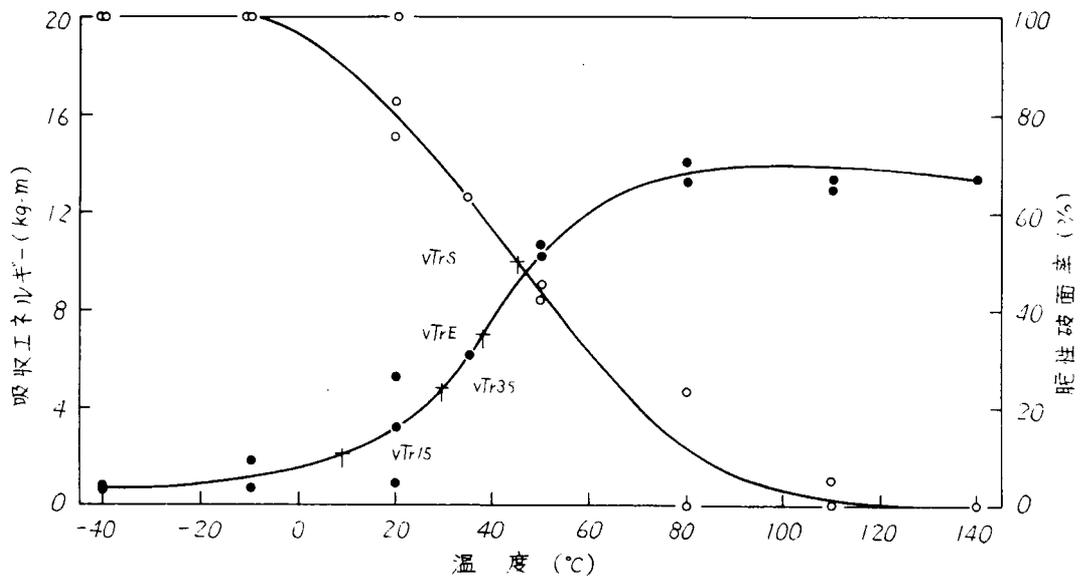


図 4.4.8 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS 鋼, 熱サイクル ©)

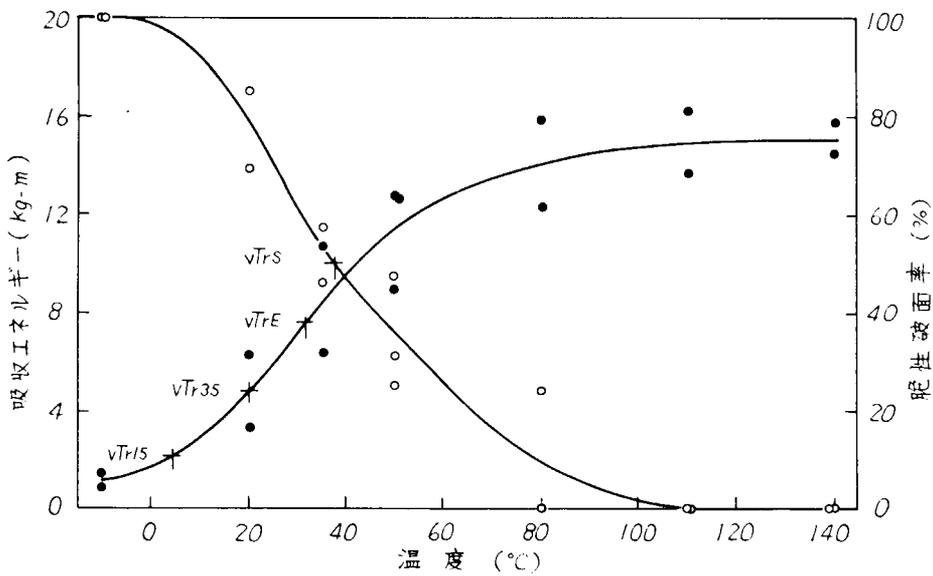


図 4.4.9 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS 鋼, 熱サイクル ④)

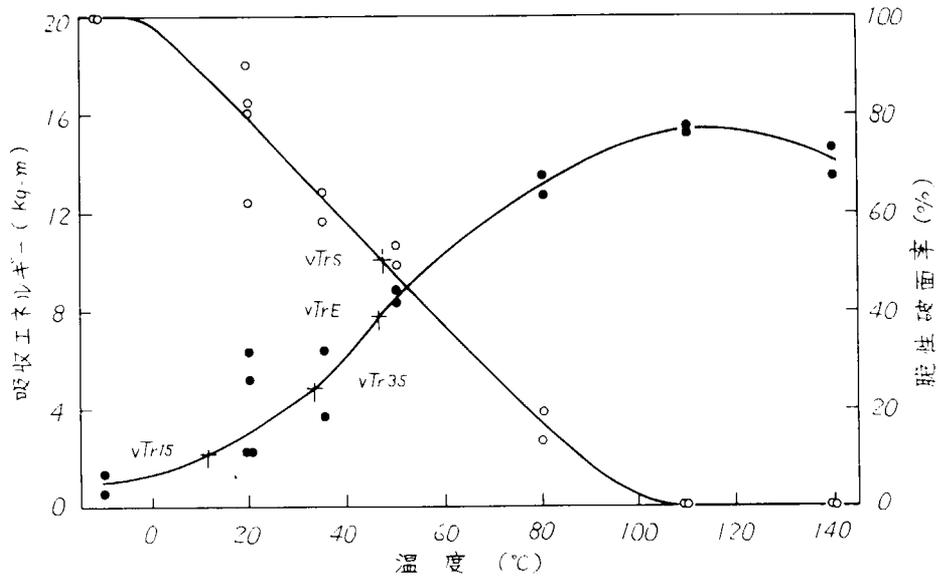


図 4.4.10 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS 鋼, 熱サイクル(E))

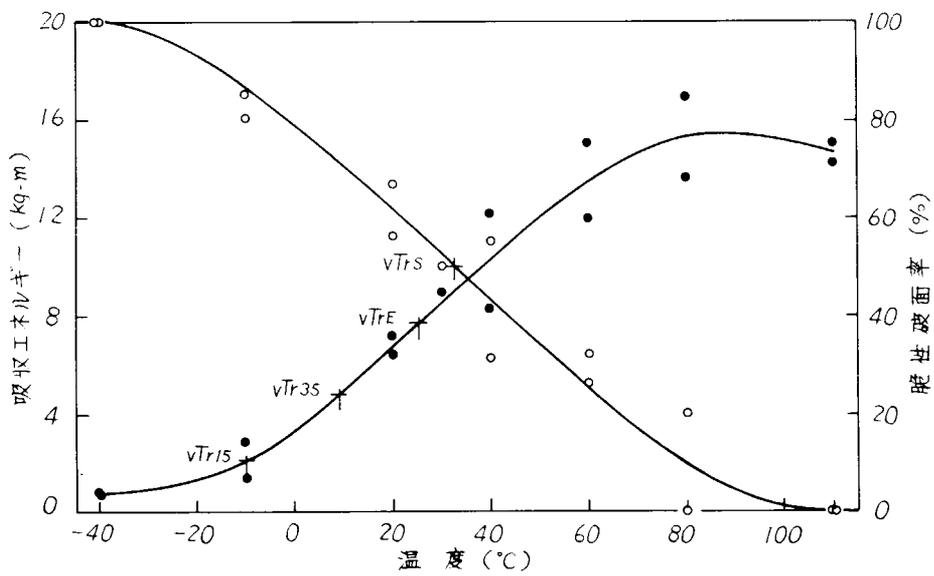


図 4.4.11 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS 鋼, 熱サイクル(E))

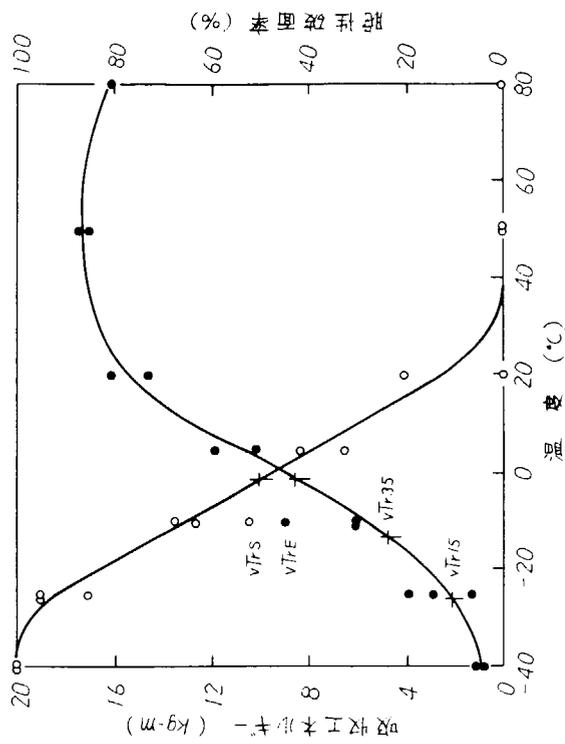


図4.4.13 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS鋼, 熱サイクル(H))

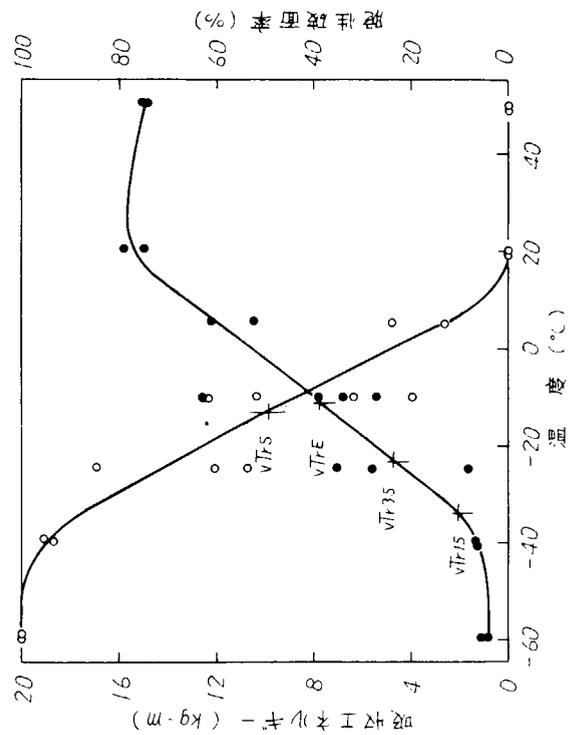


図4.4.14 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS鋼, 熱サイクル(I))

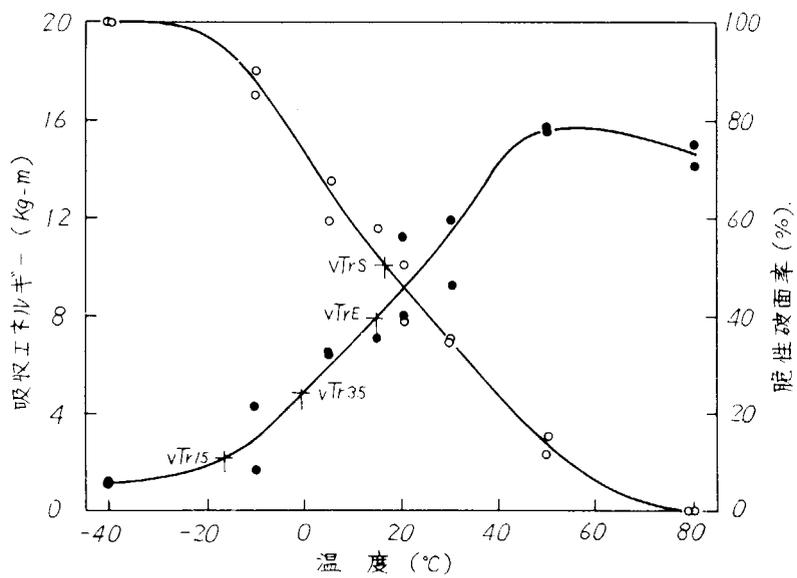


図4.4.12 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS鋼, 熱サイクル(C))

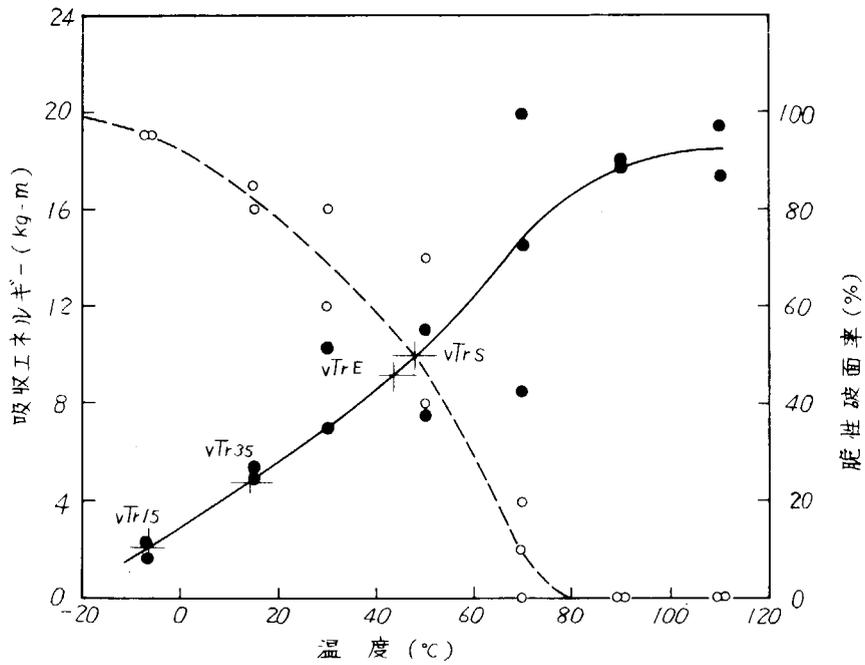


図 4.4.15 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D 鋼 熱サイクル(A))

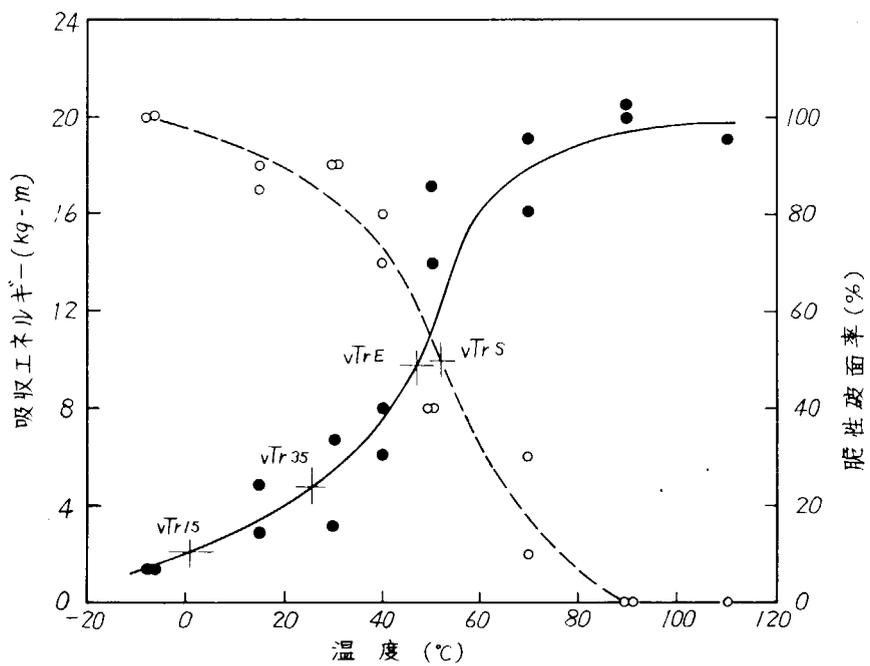


図 4.4.16 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D 鋼 熱サイクル(B))

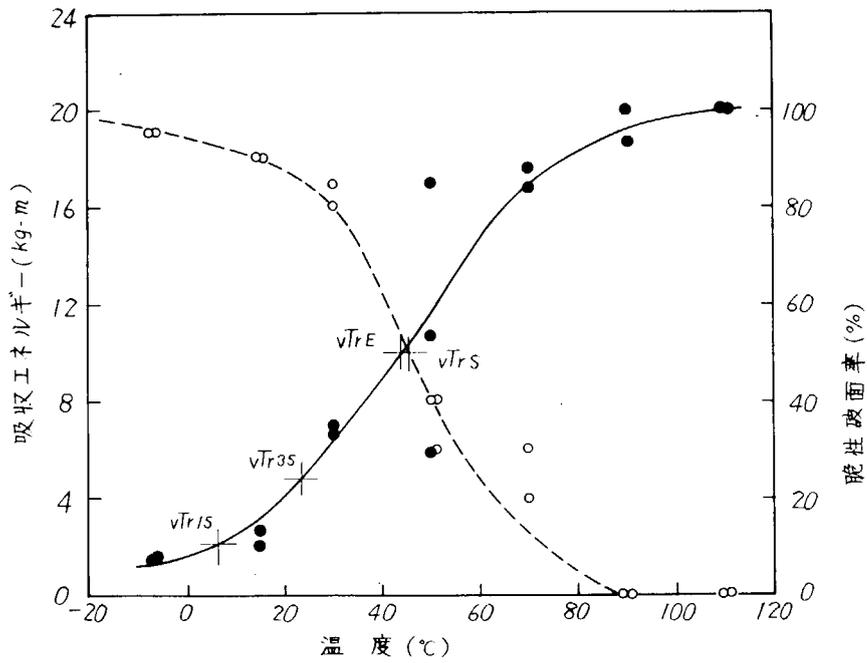


図 4.4.17 Vノッチシャルピー試験結果 (K5D鋼 熱サイクルC)

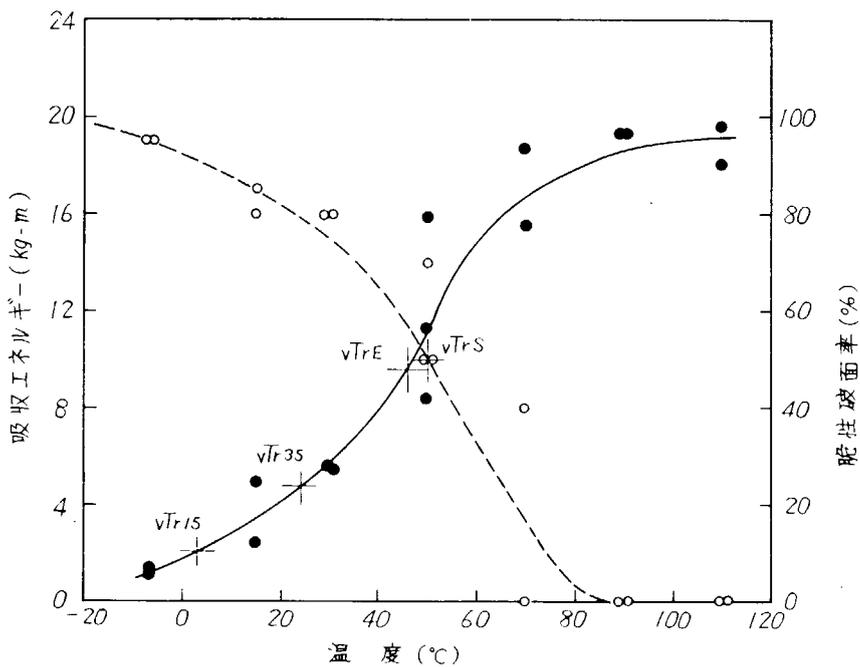


図 4.4.18 Vノッチシャルピー試験結果 (K5D鋼 熱サイクルD)

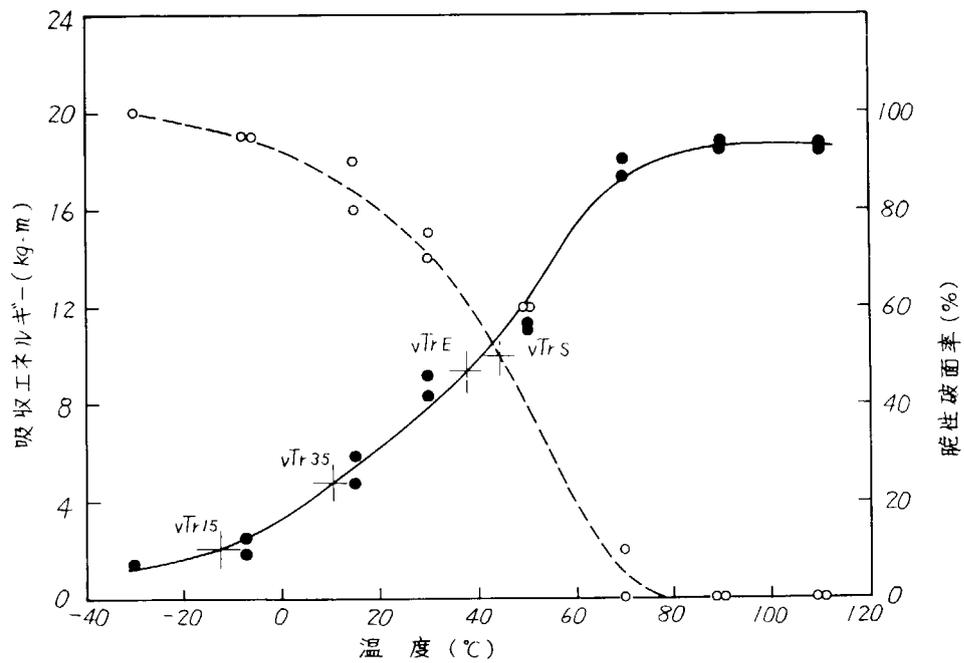


図 4.4.19 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D鋼 熱サイクル(E))

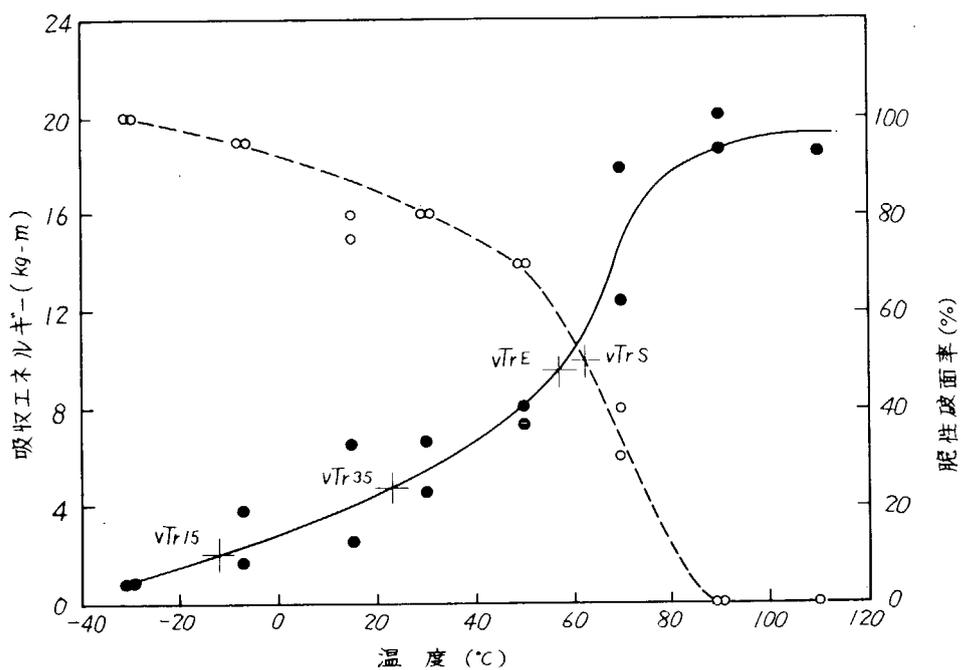


図 4.4.20 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D鋼 熱サイクル(E))

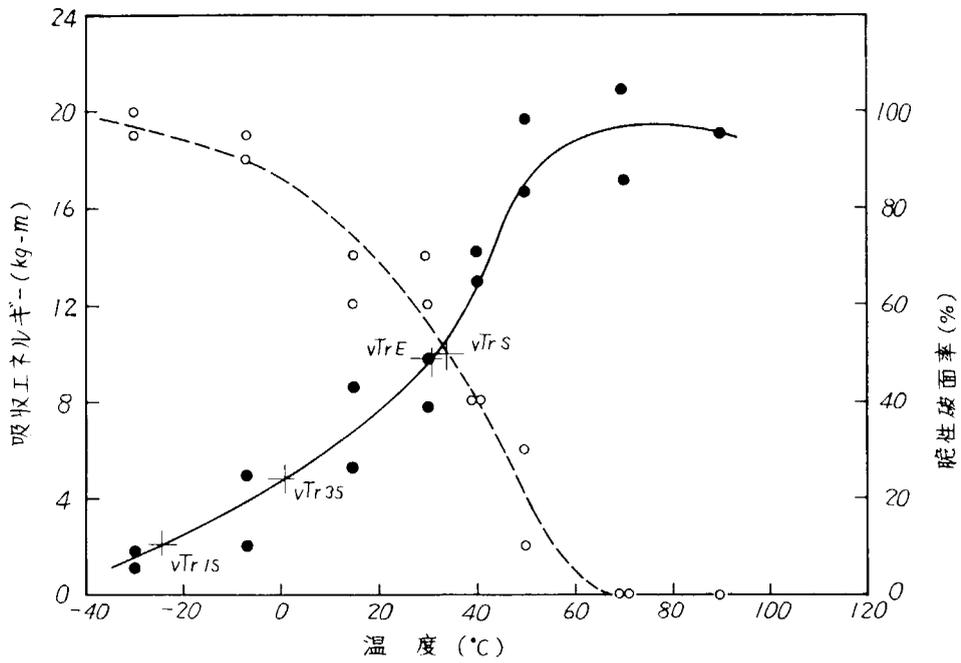


図 4.4.21 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D鋼 熱サイクルG)

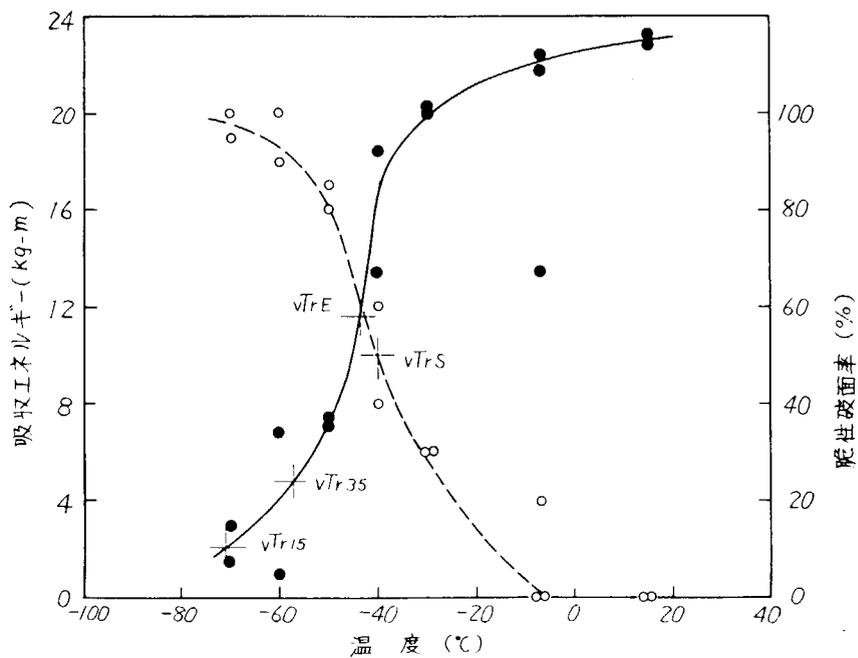


図 4.4.22 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D鋼 熱サイクルH)

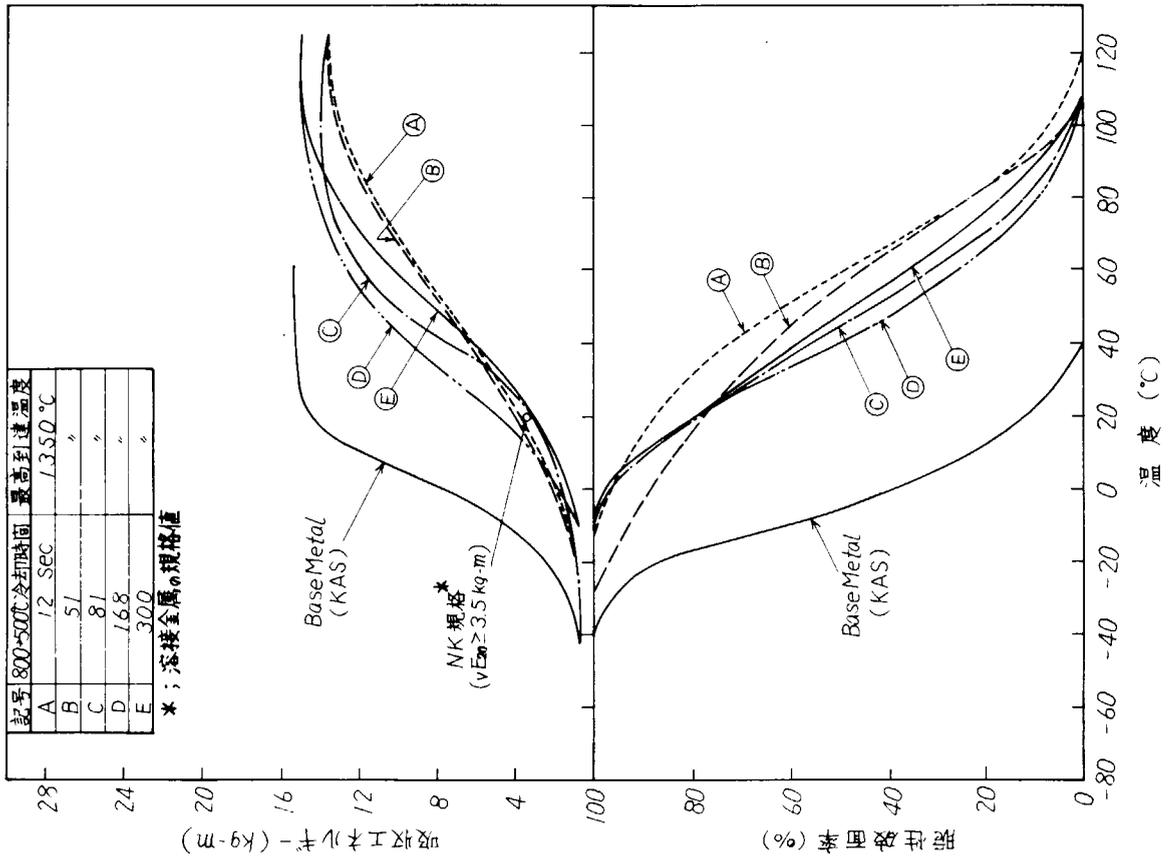


図 4.4.24 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS鋼, 冷却速度の影響)

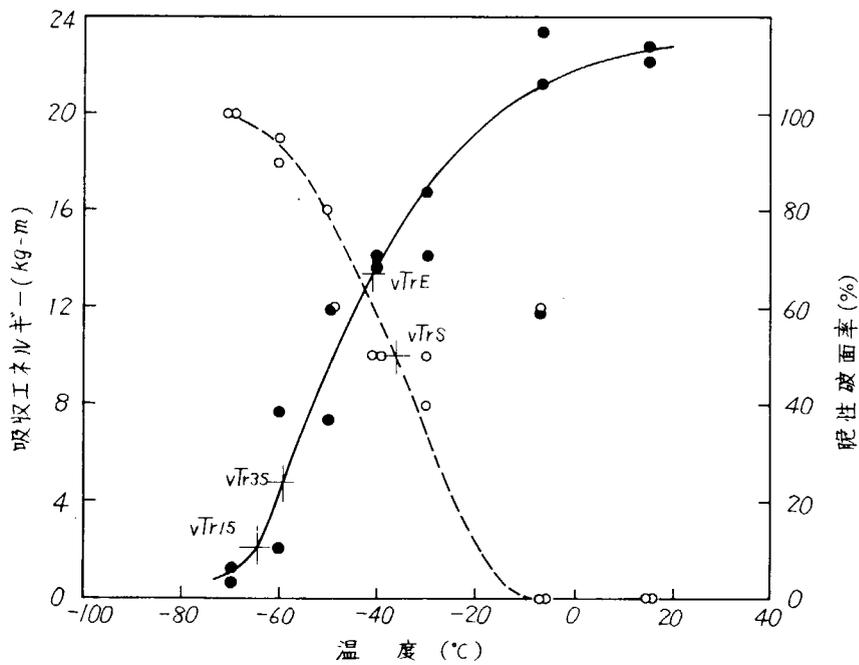


図 4.4.23 V-ノッチシャルピー試験結果 (KSD鋼 熱サイクル①)

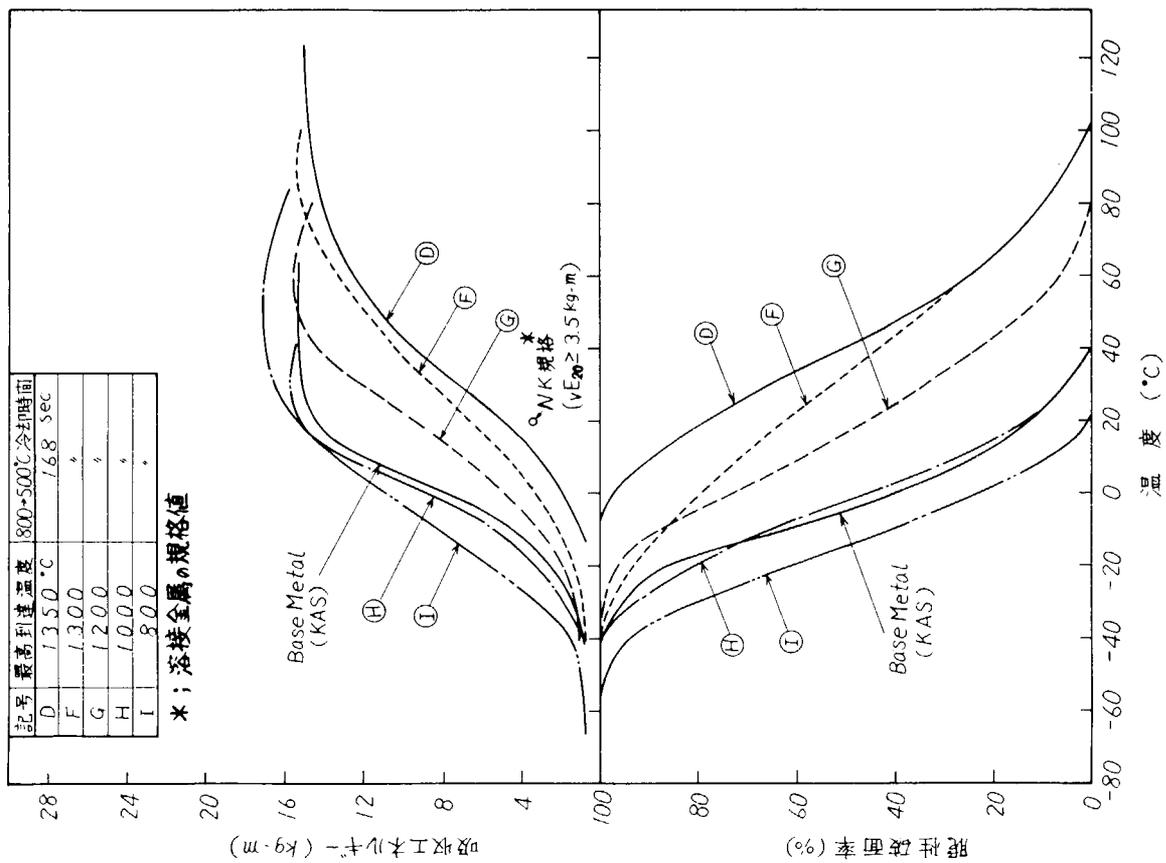


図 4.4.25 V-ノッチシャルピ試験結果 (KAS 鋼、最高到達温度の影響)

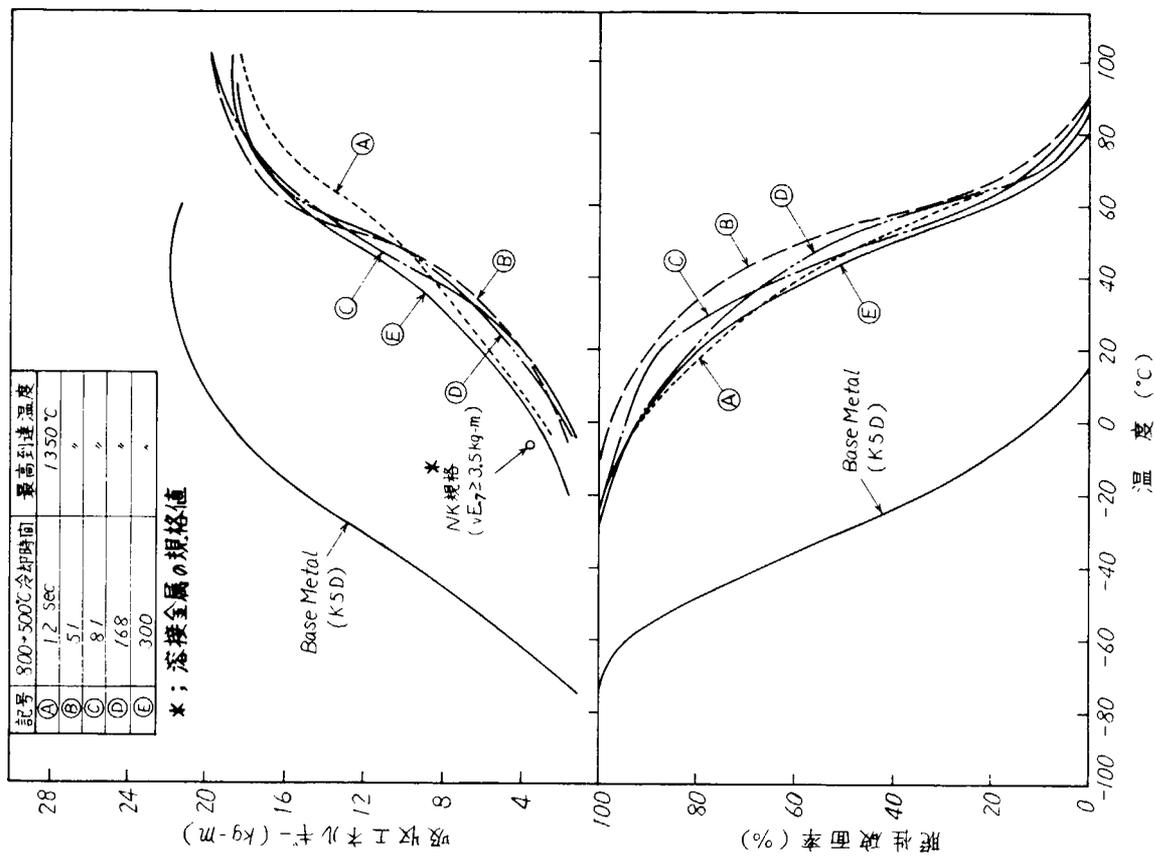


図 4.4.26 V-ノッチシャルピ試験結果 (K5D 鋼、冷却速度の影響)

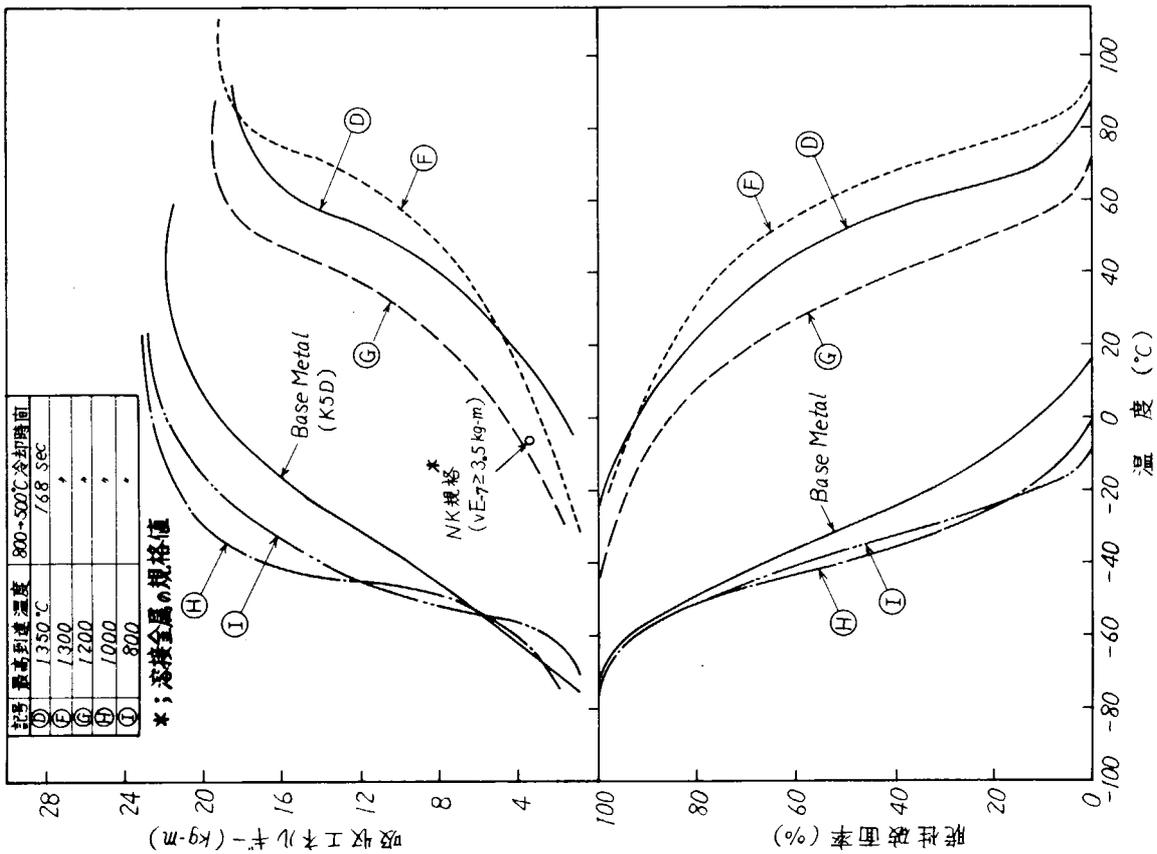


表 4.4.4 各種遷移温度およびシールドエネルギー値

鋼種	記号	最高到達温度(°C)	800→500°C冷却時間(sec)	溶媒金属入熱(kg-m)	遷移		温度		シールドエネルギー(kg-m)
					vTr15	vTr35	vTrE	vTrS	
KAS	A	1350	12	22.5	4	28	42	60	13.6
	B	"	51	65.7	2	25	41	55	13.6
	C	"	81	86.4	9	30	38	45	14.0
	D	"	168	148	5	20	31	37	15.1
	E	"	300	266	11	33	46	47	15.4
	F	1300	168	148	-10	9	25	33	15.4
	G	1200	"	"	-17	-1	15	16	15.8
	H	1000	"	"	-26	-13	-1	-3	17.3
	I	800	"	"	-34	-24	-11	-14	15.8
母材	—	—	—	—	-21	-11	-1	-4	15.6
K5D	A	1350	12	22.5	-6	14	43	48	18.5
	B	"	51	65.7	1	26	47	52	19.8
	C	"	81	86.4	6	23	44	46	20.0
	D	"	168	148	3	24	46	50	19.2
	E	"	300	266	-12	11	38	44	18.7
	F	1300	168	148	-12	23	57	62	19.3
	G	1200	"	"	-24	1	31	34	19.5
	H	1000	"	"	-71	-57	-44	-40	24.0
	I	800	"	"	-65	-59	-41	-36	22.8
母材	—	—	—	-70	-58	-33	-30	22.0	

図 4.4.27 V-ノッチシャルピ-試験結果 (K5D 鋼, 最高到達温度の影響)

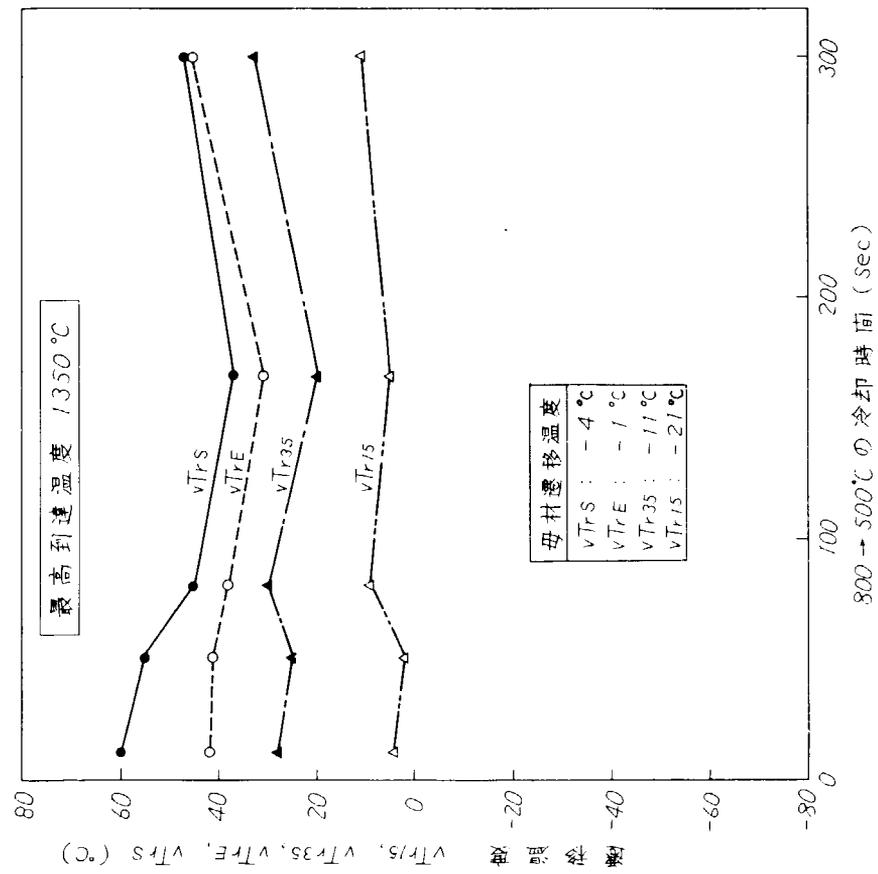


図 4.4.28 冷却速度と各種遷移温度の関係 (KAS鋼)

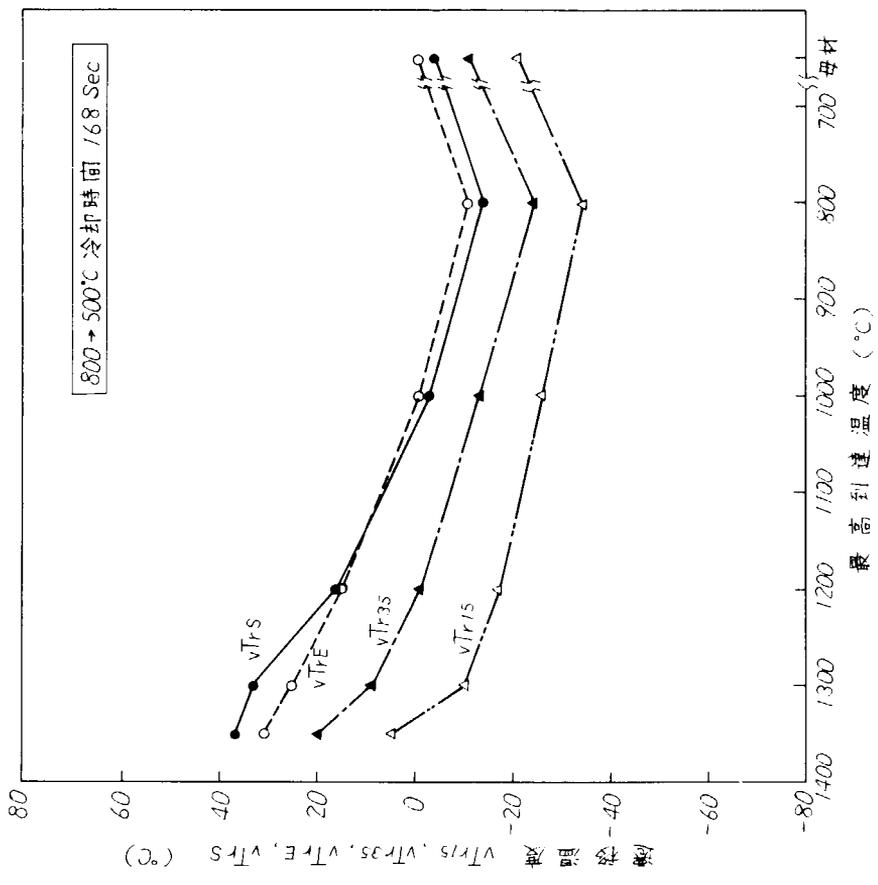


図 4.4.29 最高到達温度と各種遷移温度の関係 (KAS鋼)

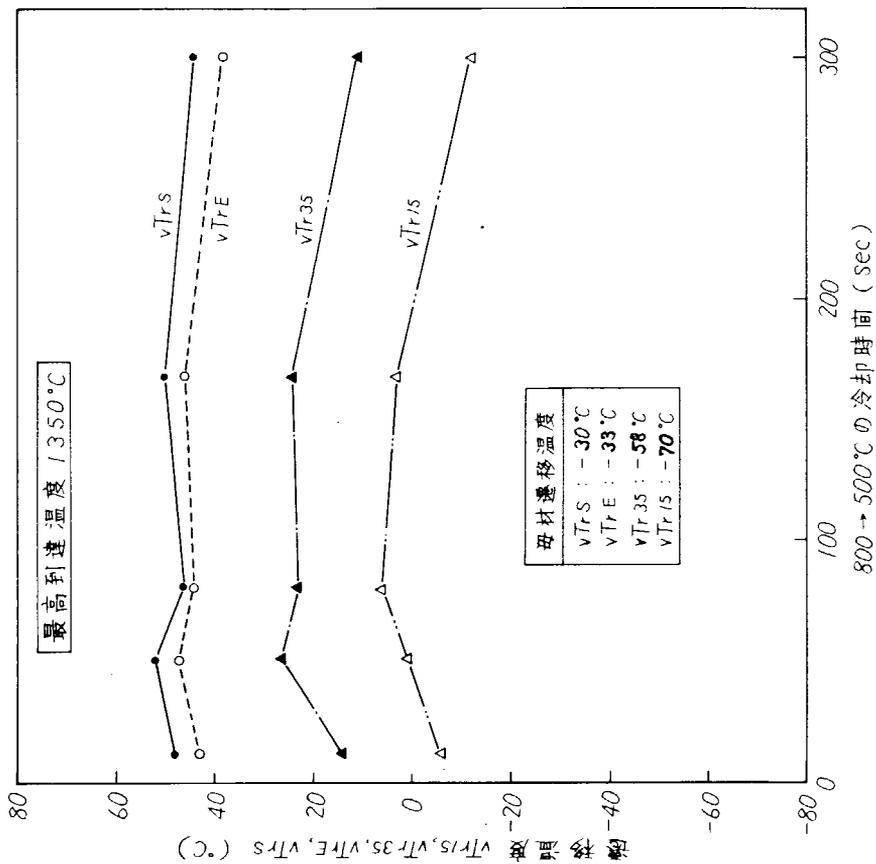


図 4.4.30 冷却速度と各種遷移温度の關係 (K5D鋼)

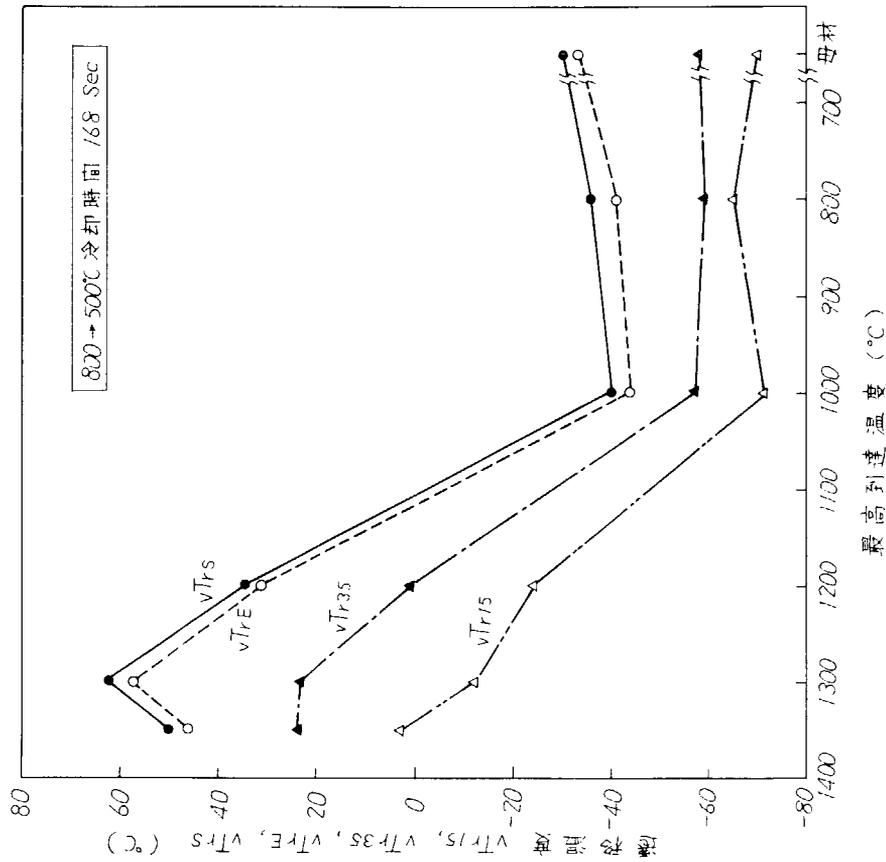
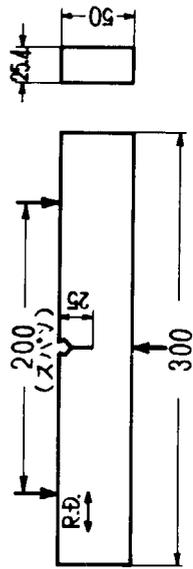
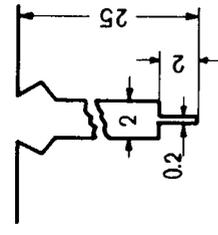


図 4.4.31 最高到達温度と各種遷移温度の關係 (K5D鋼)



寸法単位：mm

ノッチ詳細



溶接部形状とボリ部試験片ノッチ位置

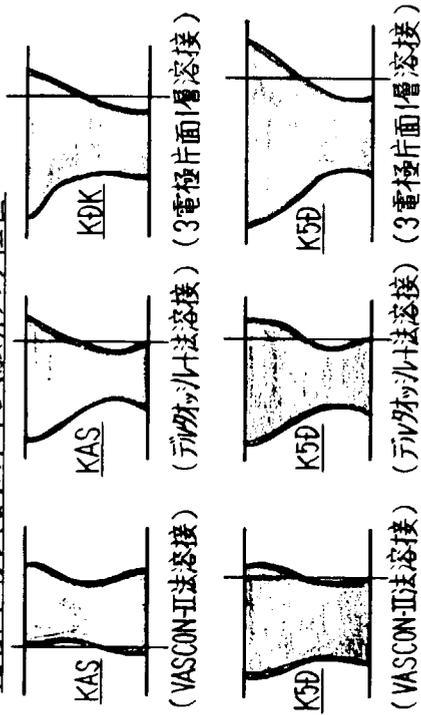


表4.5.1(1) 小形COD曲げ試験結果 (KAS・母材)

試験片	試験温度 T (°C)	試験温度 における σ_y (\log/mm^2)	破壊荷重		$\frac{\sigma_M}{\sigma_Y}$	引裂位置 V_c (mm)	δ_c (mm)
			P (ton)	σ_M (\log/mm^2)			
KAS (25.4mm) 母材	-49	30.5	4.80	90.7	2.97	4.67	1.17
	-60	32.0	4.52	85.4	2.67	1.77	0.443
	-75	35.5	4.30	81.3	2.29	1.04	0.260
	-110	45.5	5.20	98.3	2.16	0.440	0.110
	-118	48.5	3.73	70.5	1.45	0.228	0.033
	-142	57.0	2.20	41.6	0.73	0.127	0.010
-160	65.0	2.40	45.4	0.70	0.129	0.010	

図4.5.1 試験片の形状と寸法

表4.5.1(3) 小形COD曲げ試験結果 (KAS・ワットル法溶接継手)

試験片	試験温度 T (°C)		試験温度 における σ_y (kg/mm ²)		破壊荷重		$\frac{\sigma_N}{\sigma_y}$	ワットル 変位 V_c (mm)	δ_c (mm)
	T	における σ_y	P	σ_N					
KAS (25.4mm) ワットル法溶接 (溶接金属)	22	37.0	5.610	106.0	2.865	—	—	—	
	0	38.2	5.910	111.7	2.924	5.750	1.438		
	-30	40.2	5.795	109.5	2.724	3.350	0.838		
	-60	43.0	5.220	98.6	2.294	1.220	0.305		
	-90	47.1	5.145	97.2	2.064	0.590	0.148		
	-120	53.7	4.425	83.6	1.557	0.360	0.060		
	-150	61.8	2.765	52.3	0.845	0.160	0.013		
	-170	71.2	2.550	48.2	0.677	0.142	0.010		
	-196	87.3	2.460	46.5	0.533	0.142	0.009		
	22	24.0	5.250	99.2	4.134	4.720	1.180		
KAS (25.4mm) ワットル法溶接 (ボルト)	0	25.5	5.180	97.9	3.839	2.490	0.622		
	-30	28.2	4.960	93.7	3.324	1.930	0.482		
	-60	34.5	5.310	100.3	2.909	1.480	0.370		
	-90	39.0	5.240	99.0	2.539	1.080	0.270		
	-120	47.7	3.795	71.7	1.503	0.290	0.046		
	-150	60.2	2.840	53.7	0.892	0.190	0.015		
	-170	77.5	2.490	47.1	0.607	0.137	0.009		
	-196	88.9	2.175	41.1	0.462	0.155	0.007		

表4.5.1(2) 小形COD曲げ試験結果 (KAS・VASCON法溶接継手)

試験片	試験温度 T (°C)		試験温度 における σ_y (kg/mm ²)		破壊荷重		$\frac{\sigma_N}{\sigma_y}$	ワットル 変位 V_c (mm)	δ_c (mm)
	T	における σ_y	P	σ_N					
KAS (25.4mm) VASCON法溶接 (溶接金属)	10	33.0	5.75	108.7	3.29	4.43	1.11		
	0	33.5	5.75	108.7	3.24	4.18	1.05		
	-18	35.0	5.15	97.3	2.78	1.85	0.463		
	-30	36.5	5.30	100.2	2.75	1.88	0.470		
	-60	41.0	5.35	101.1	2.47	1.61	0.403		
	-93	47.0	5.50	103.9	2.21	0.606	0.152		
	-105	50.0	4.46	84.3	1.69	0.286	0.062		
	-165	70.5	2.15	40.6	0.58	0.121	0.008		
	16	24.5	5.60	105.8	4.32	9.16	2.29		
	0	25.0	5.45	103.0	4.12	3.86	0.965		
KAS (25.4mm) VASCON法溶接 (ボルト)	-29	28.0	4.90	92.6	3.31	1.62	0.405		
	-32	28.0	5.55	104.9	3.75	>3.00	>0.725		
	-60	32.0	4.70	88.8	2.78	0.708	0.177		
	-94	40.5	5.32	100.5	2.48	0.620	0.155		
	-119	48.5	5.52	104.3	2.15	0.429	0.107		

表 4.5.1(4) 小形 COD 曲げ試験結果 (KDK・3電極片面槽溶接継手)

試験片	試験温度 T (°C)		試験温度 における σ_y (kg/mm^2)		破壊荷重 P σ_N (kg/mm^2)		$\frac{\sigma_N}{\sigma_y}$	割れ 変位 V_c (mm)	δ_c (mm)
	20	-10	26.2	4.91	928	3542			
KDK (25.4mm) 母材	-10	28.0	5.12	96.7	3.455	7.45	1.862		
	-40	30.5	4.54	85.8	2.813	2.89	0.723		
	-70	33.8	4.89	92.4	2.734	3.12	0.780		
	-100	38.4	4.96	93.7	2.441	1.32	0.330		
	-120	42.5	3.90	73.7	1.734	0.440	0.078		
	-140	47.5	2.90	54.8	1.154	0.212	0.019		
	-160	54.5	2.67	50.4	0.926	0.187	0.014		
	-180	64.2	2.30	43.5	0.677	0.135	0.009		
	-196	78.1	2.00	37.8	0.404	0.111	0.007		
	-20	37.3	6.17	116.6	3.126	7.58	1.895		
KDK (25.4mm) 3電極片面槽溶接 (溶接金属)	-10	39.8	5.39	112.1	2.816	3.78	0.945		
	-40	42.9	5.07	95.8	2.233	1.19	0.297		
	-70	46.6	4.82	91.1	1.955	0.532	0.102		
	-100	51.2	4.63	87.5	1.709	0.321	0.066		
	-120	55.0	3.61	68.2	1.240	0.220	0.026		
	-140	59.6	3.31	62.5	1.049	0.172	0.020		
	-160	65.5	2.87	54.2	0.828	0.103	0.014		
	-180	74.0	2.30	43.5	0.587	0.071	0.008		
	-196	84.5	2.07	39.1	0.463	0.124	0.007		
	20	26.2	6.11	115.5	4.407	7.44	1.860		
KDK (25.4mm) 3電極片面槽溶接 (母材)	-10	28.0	6.13	115.8	4.137	5.24	1.310		
	-40	30.5	5.56	105.1	3.445	2.42	0.605		
	-70	33.8	5.23	98.8	2.924	1.15	0.287		
	-100	38.4	4.90	92.6	2.411	0.387	0.097		
	-120	42.5	3.89	73.5	1.730	0.225	0.051		
	-140	47.5	2.84	53.7	1.130	0.154	0.018		
	-160	54.5	2.75	51.9	0.953	0.240	0.014		
	-180	64.2	2.60	49.1	0.765	0.104	0.011		
	-196	78.1	2.62	49.5	0.634	0.112	0.010		

表 4.5.1(5) 小形 COD 曲げ試験結果 (K5D・母材)

試験片	試験温度 T (°C)		試験温度 における σ_y (kg/mm^2)		破壊荷重 P σ_N (kg/mm^2)		$\frac{\sigma_N}{\sigma_y}$	割れ 変位 V_c (mm)	δ_c (mm)
	-30	-50	37.8	39.8	6.78	7.25			
K5D (25.4mm) 母材	-30	37.8	6.78	128	3.39	>10.0	>2.50		
	-50	39.8	7.25	137	3.44	>7.60	>1.90		
	-68	41.9	7.18	135	3.22	6.25	1.56		
	-92	45.6	6.23	118	2.59	2.06	0.515		
	-108	49.0	6.53	123	2.51	1.95	0.488		
	-128	54.6	6.71	127	2.32	0.865	0.216		
	-146	61.0	6.73	127	2.08	0.937	0.234		
	-152	63.2	5.25	99.1	1.57	0.280	0.063		
	-164	69.0	4.92	93.0	1.35	0.240	0.040		
	-196	88.3	3.14	59.4	0.673	0.160	0.013		

表4.5.1(6) 小形COD曲げ試験結果 (K5D-VASCONⅡ法溶接継手)

試験片	試験温度 T (°C)	試験温度 における σ_y (kg/mm ²)	破壊荷重		$\frac{\sigma_N}{\sigma_y}$	クリップ 変位 V_c (mm)	δ_c (mm)
			P (ton)	σ_N (kg/mm ²)			
K5D (25.4mm) VASCONⅡ法溶接 (溶接金属)	20	33.6	6.14	116	3.45	>10.0	>2.50
	-10	35.3	6.53	123	3.48	2.58	0.645
	-29	36.8	6.39	121	3.29	3.14	0.785
	-70	41.1	5.96	113	2.75	1.39	0.348
	-84	43.2	5.37	101	2.34	0.68	0.170
	-102	46.5	5.86	111	2.39	0.87	0.218
	-126	52.3	5.86	111	2.12	0.41	0.103
	-145	59.0	4.86	92.0	1.56	0.28	0.061
	-170	70.0	3.97	75.0	1.07	0.19	0.025
	-196	87.0	1.83	34.6	0.40	0.10	0.006
K5D (25.4mm) VASCONⅡ法溶接 (ボツド)	20	34.6	6.30	119	3.44	>10.0	>2.50
	-10	36.4	6.40	121	3.32	5.68	1.42
	-48	39.6	5.41	102	2.57	1.96	0.490
	-66	41.6	6.62	125	3.00	1.44	0.360
	-85	44.3	5.73	108	2.44	1.24	0.310
	-98	46.7	5.25	99.0	2.12	0.72	0.180
	-125	53.6	5.55	105	1.96	0.36	0.090
	-146	61.0	6.09	115	1.88	0.41	0.098
	-166	70.0	3.94	74.5	1.06	0.19	0.022
	-196	88.3	2.83	53.5	0.61	0.15	0.010

表4.5.1(7) 小形COD曲げ試験結果 (K5D・ダブルボルト法溶接継手)

試験片	試験温度 T (°C)	試験温度 における σ_y (kg/mm ²)	破壊荷重		$\frac{\sigma_N}{\sigma_y}$	クリップ 変位 V_c (mm)	δ_c (mm)
			P (ton)	σ_N (kg/mm ²)			
K5D (25.4mm) ダブルボルト法溶接 (溶接金属)	-19	44	5.575	107.5	2.432	1.803	0.451
	-35	45.5	5.30	101.8	2.237	1.290	0.323
	-61	48.5	4.65	89.3	1.841	0.408	0.102
	-79	51	4.43	85.1	1.669	0.310	0.054
	-100	54.5	4.45	85.4	1.567	0.200	0.048
	-110	56.5	2.72	52.2	0.924	0.188	0.014
	-136	62	2.60	49.9	0.805	—	0.012
	-140	63.5	2.10	40.3	0.635	—	0.008
	21	35	6.05	116.1	3.318	>5.0	>1.25
	-1	36	4.80	92.1	2.560	1.251	0.313
K5D (25.4mm) ダブルボルト法溶接 (ボツド)	-19	36.5	4.50	86.4	2.367	0.857	0.214
	-39	37.5	4.99	95.8	2.554	1.040	0.260
	-60	39.5	4.42	84.8	2.148	0.315	0.079
	-77	42	5.025	96.4	2.297	0.575	0.144
	-101	47	4.00	76.8	1.634	0.175	0.045
	-147	61	1.65	31.6	0.519	0.123	0.006

表 4.5.1(8) 小形COD曲片試験結果 (K5D-3電極片面層溶接継手)

試験片	試験温度 T (°C)	試験温度 に お け る σ_N (kg/mm ²)	破壊荷重		$\frac{\sigma_N}{\sigma_T}$	割 れ 欠 け 変 化 V _c (mm)	δ_c (mm)
			P (ton)	σ_N (kg/mm ²)			
K5D (25.4mm) 3電極片面層溶接 (溶接金属)	0	53.7	6.17	118.5	2.206	3.44	0.818
	-20	54.6	6.05	116.2	2.129	2.39	0.568
	-40	55.6	5.99	115.0	2.069	2.13	0.506
	-60	56.8	5.40	103.7	1.824	0.77	0.130
	-80	58.4	5.82	111.7	1.914	2.18	0.305
	-100	60.3	5.54	106.4	1.762	1.20	0.179
	-196	89.8	2.45	47.0	0.524	0.15	0.008
	-120	62.9	4.56	87.6	1.391	0.30	0.040
	-140	66.4	3.61	69.3	1.043	0.25	0.021
	-110	61.5	4.88	93.7	1.522	0.36	0.067
K5D (25.4mm) 3電極片面層溶接 (ボンド)	-50	56.2	5.58	107.1	1.907	0.98	0.160
	-70	57.6	5.62	107.9	1.874	0.76	0.132
	0	36.7	4.87	93.5	2.545	0.90	0.214
	-20	37.8	5.95	114.2	3.024	2.06	0.490
	-40	39.0	5.41	103.9	2.662	0.96	0.228
	-60	40.6	5.44	104.4	2.575	1.28	0.304
	-80	42.5	4.98	95.6	2.249	1.21	0.287
	-100	45.0	3.36	64.5	1.433	0.66	0.031
	-196	90.0	2.39	45.9	0.510	0.15	0.008
	-120	48.4	3.70	71.0	1.467	0.23	0.035
-140	53.2	3.17	60.9	1.144	0.25	0.021	
-110	46.6	4.01	77.0	1.653	0.29	0.058	
-95	44.3	5.34	102.5	2.313	0.47	0.111	
-90	43.7	5.52	106.0	2.426	0.56	0.133	

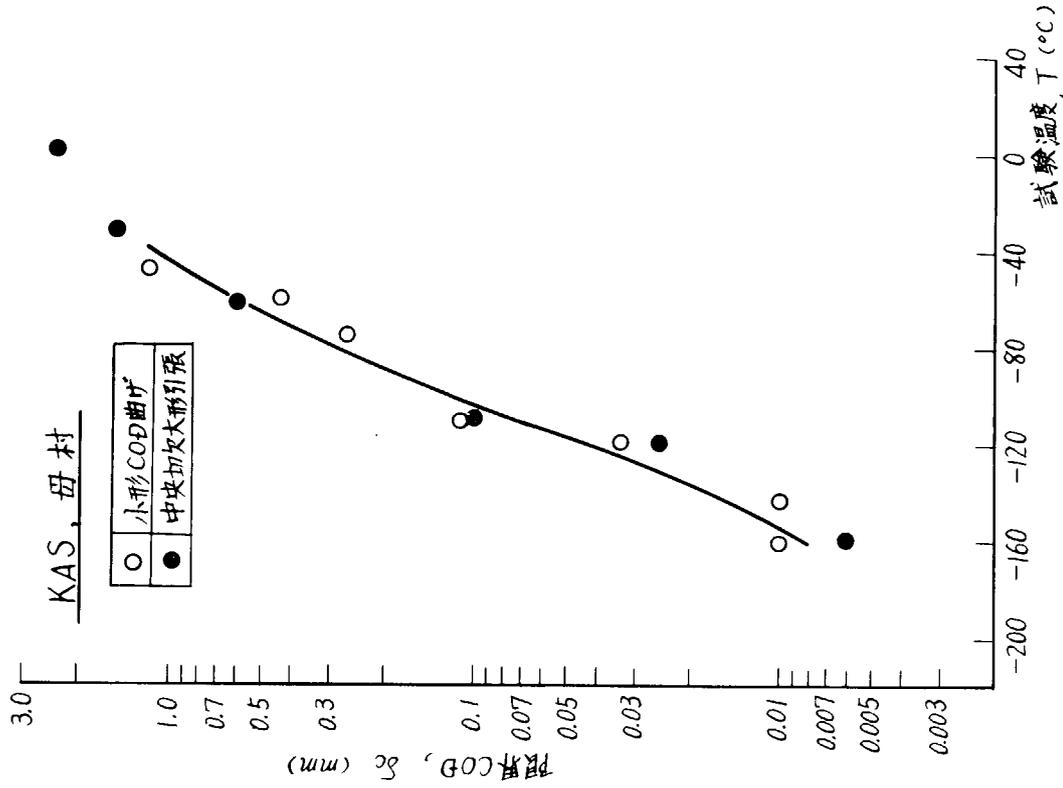


図 4.5.2(1) 限界CODと温度の関係

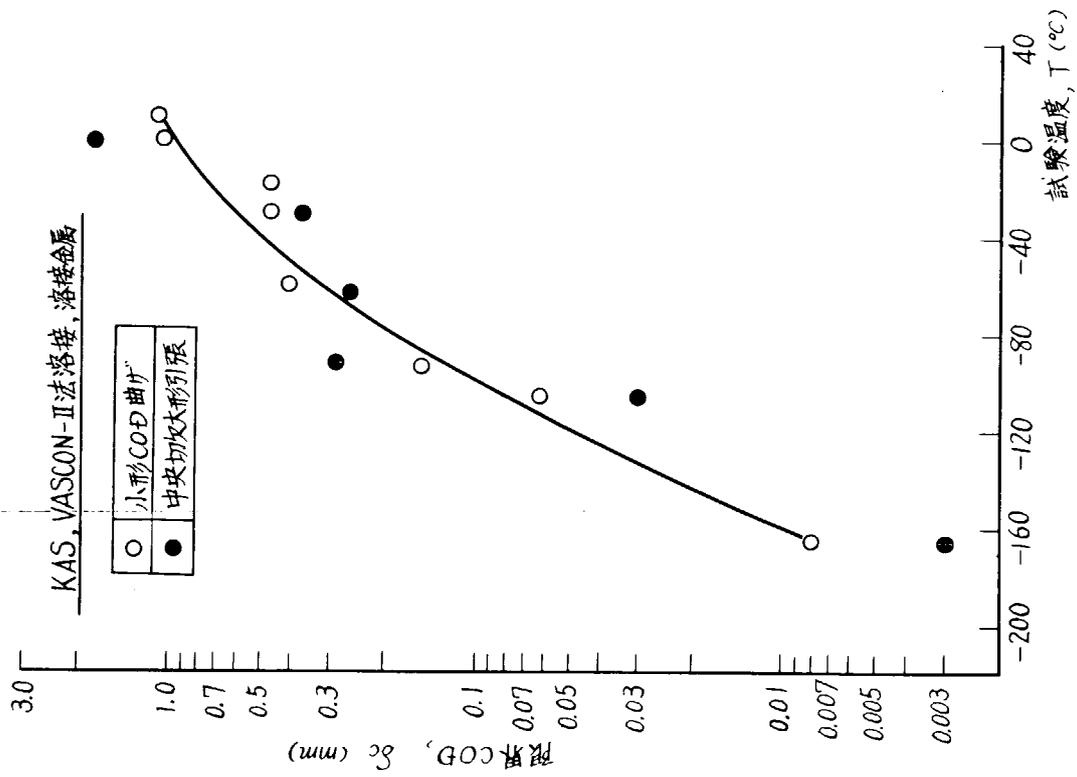


図4.5.2(2) 限界CODと温度の関係

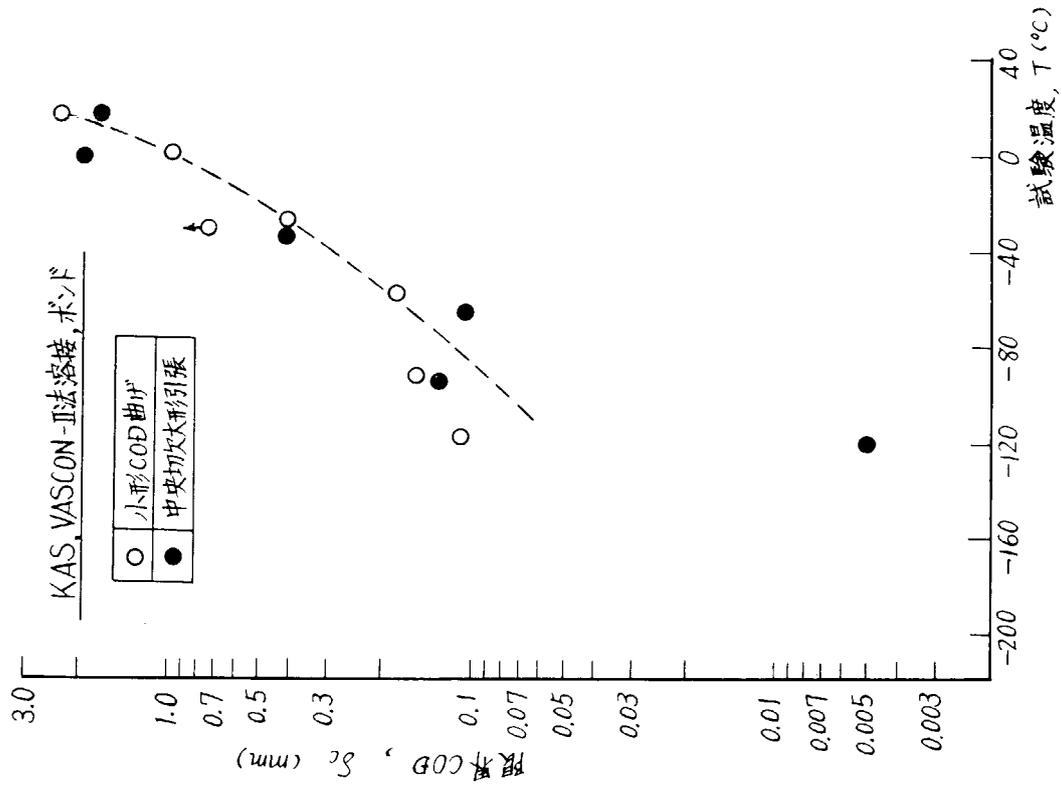


図4.5.2(3) 限界CODと温度の関係

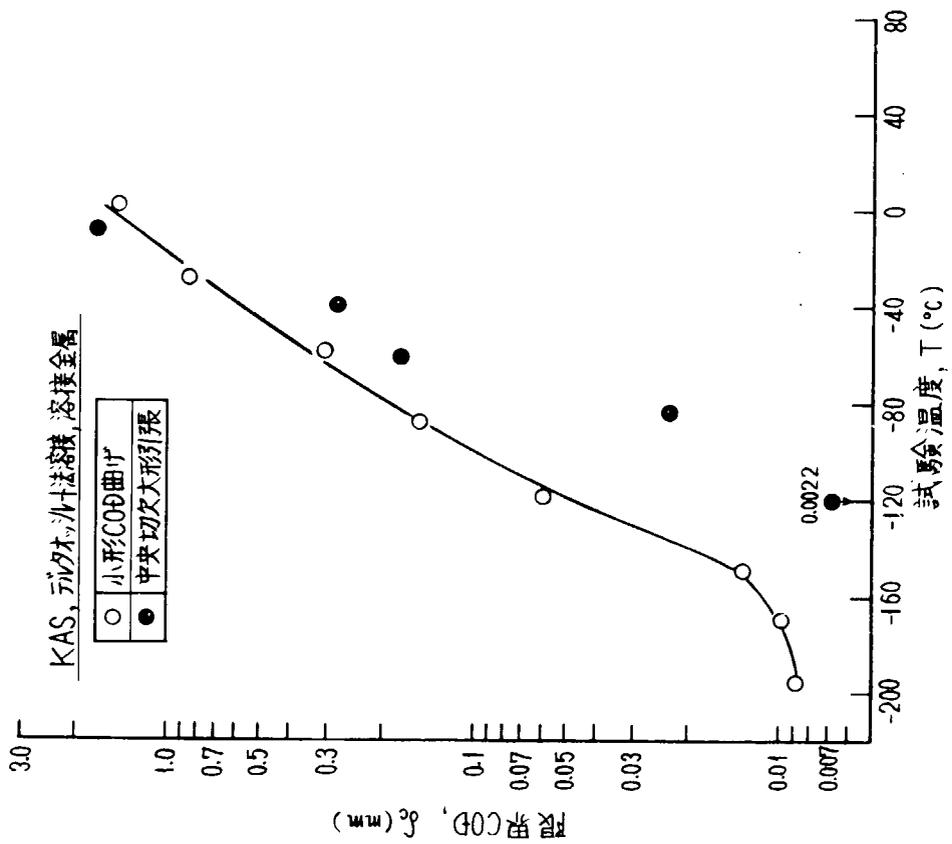


図4.5.2(4) 限界CODと温度の関係

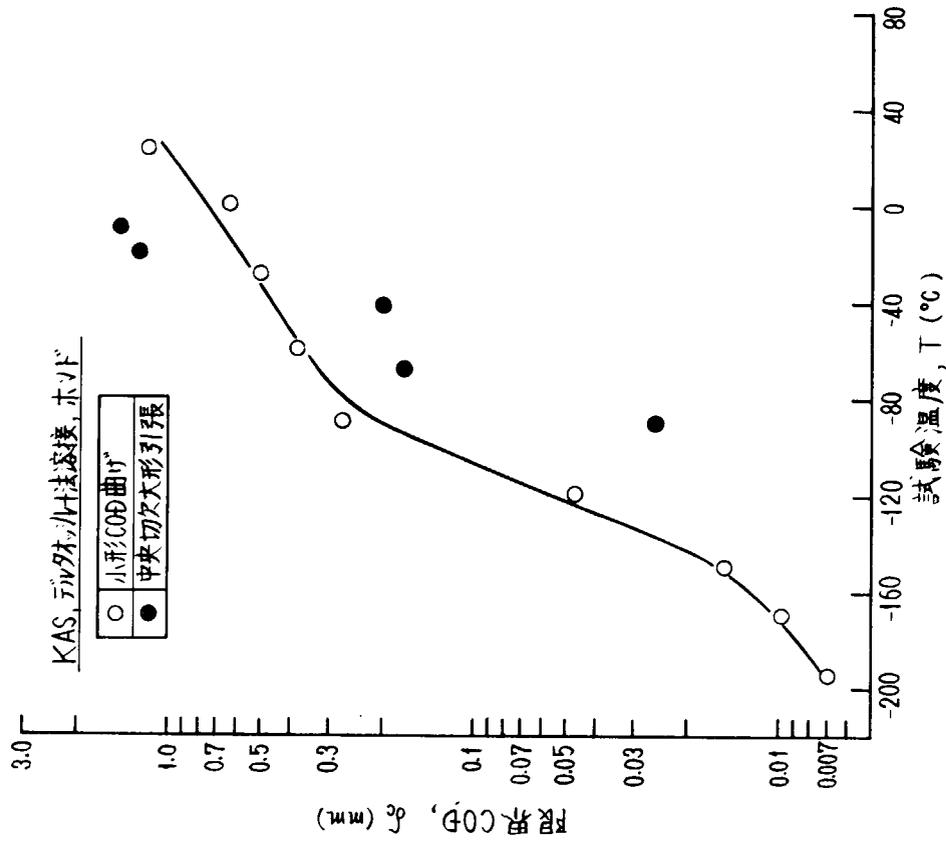


図4.5.2(5) 限界CODと温度の関係

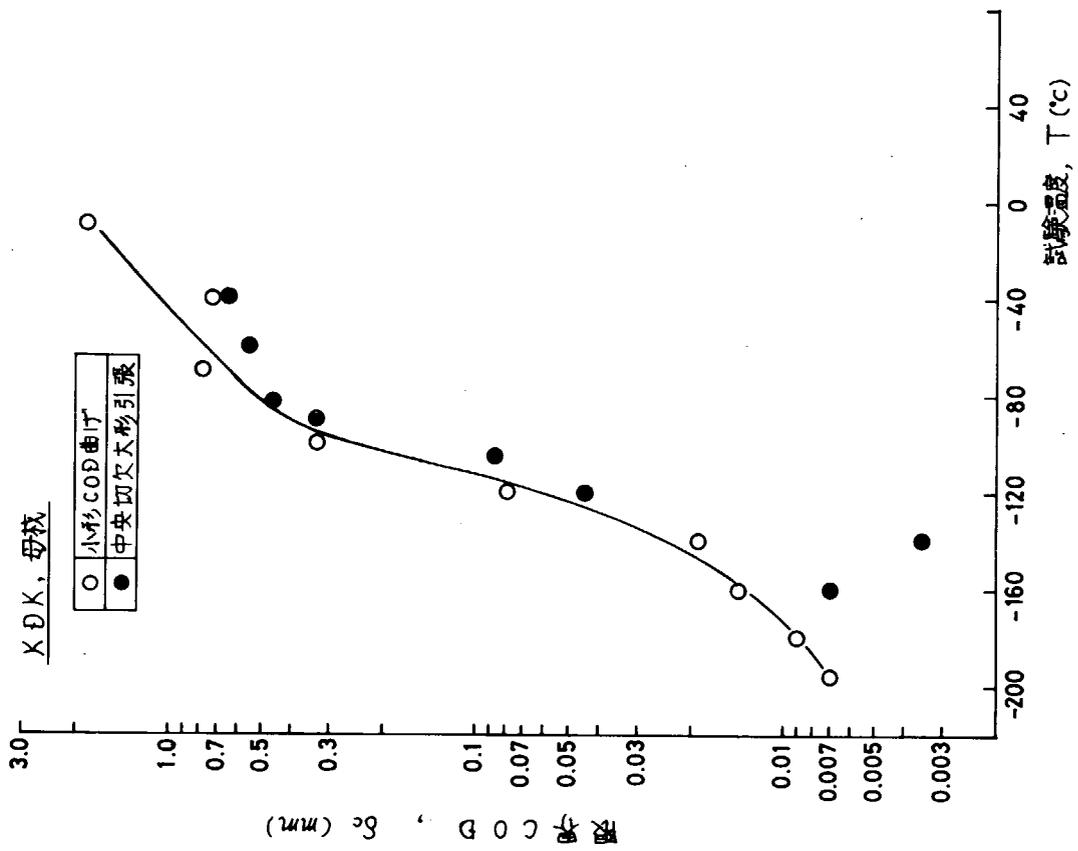


図 4.5.2(6) 限界 COD と温度の関係

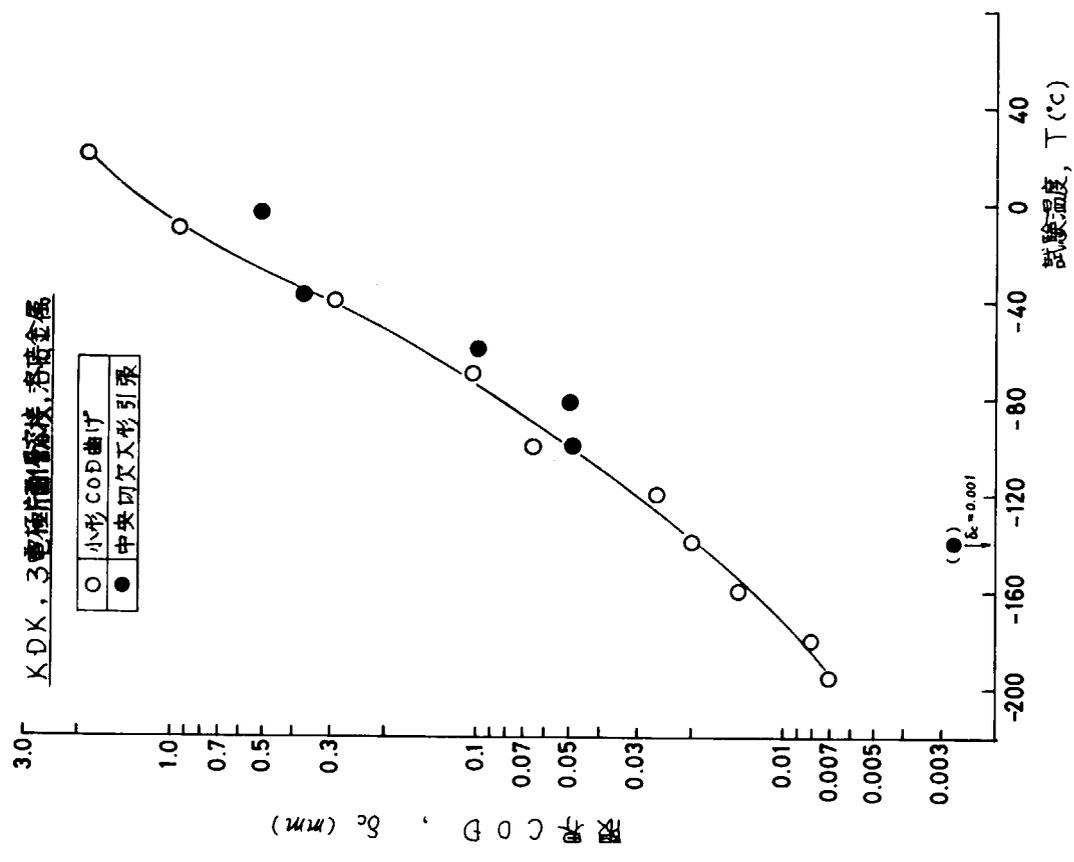


図 4.5.2(7) 限界 COD と温度の関係

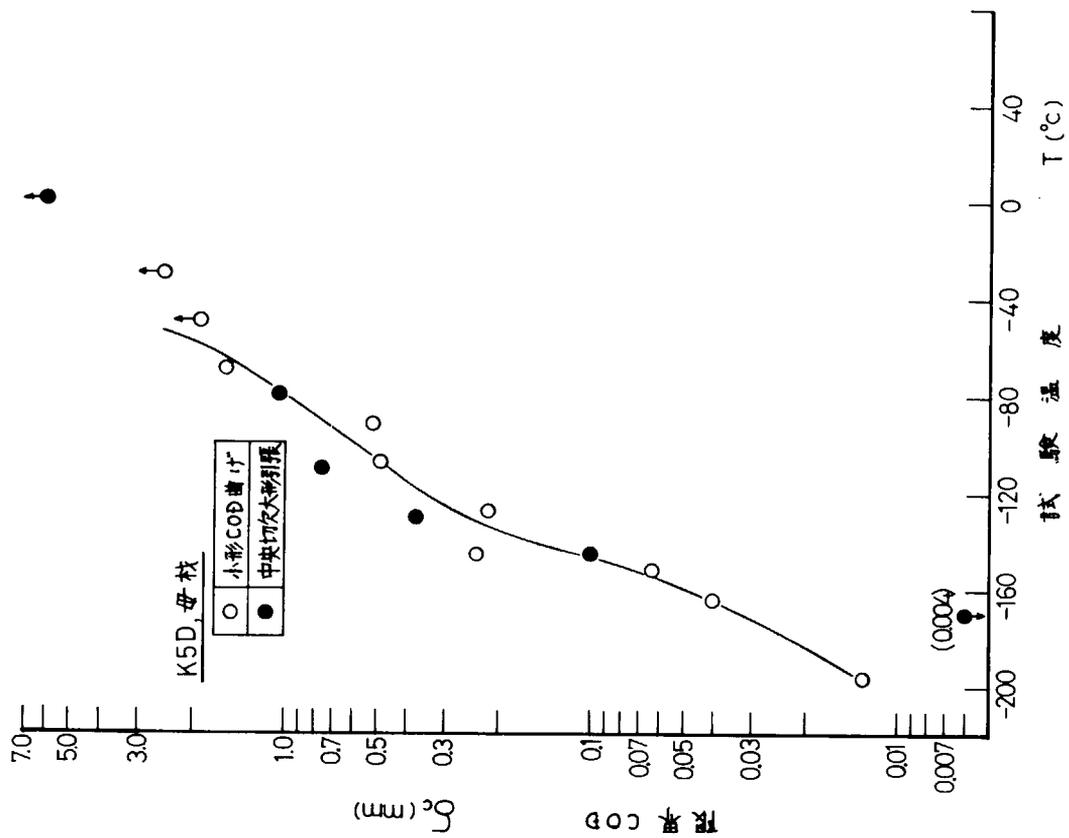


図4.5.2(9) 限界CODと温度の関係

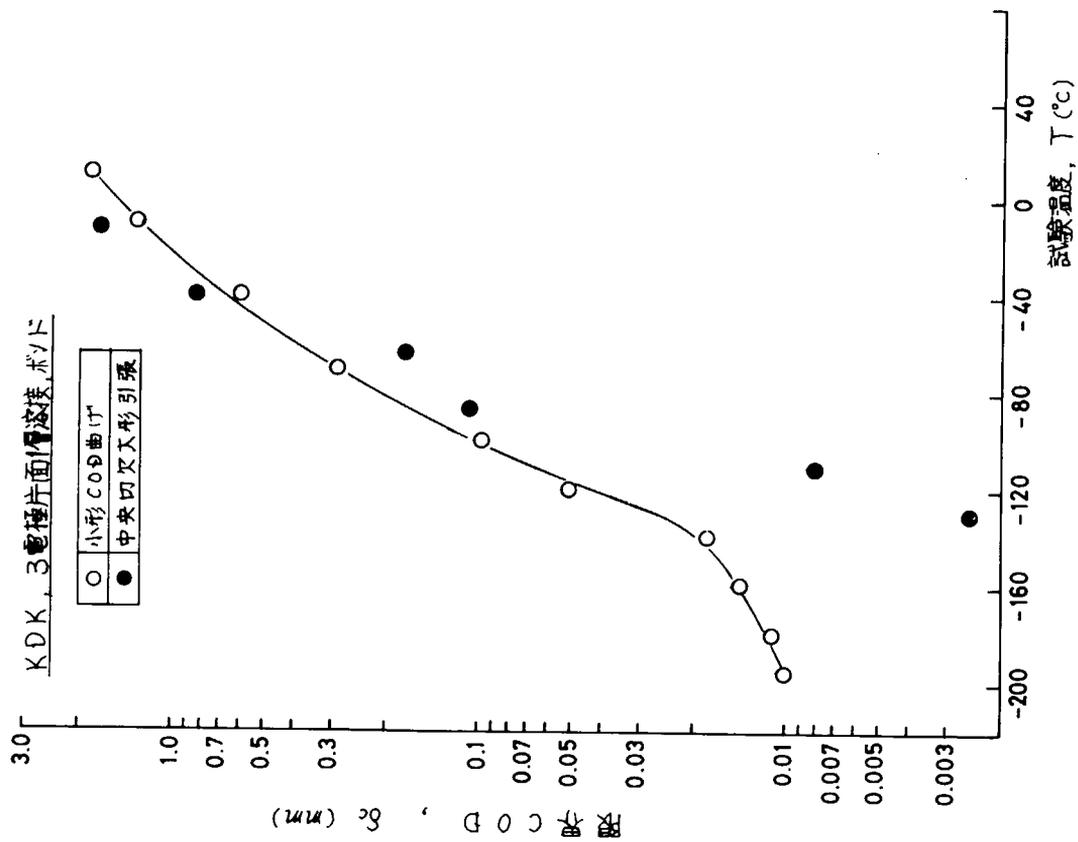


図4.5.2(8) 限界CODと温度の関係

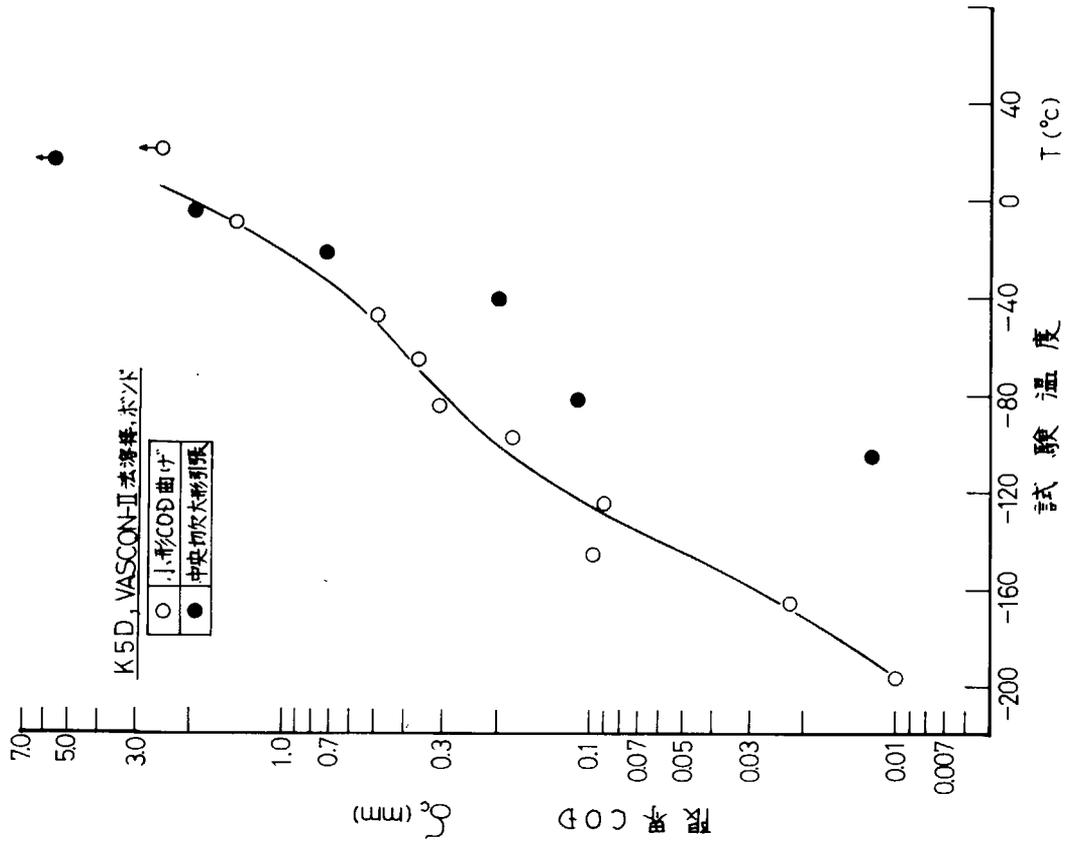


図4.5.2(11) 限界CODと温度の関係

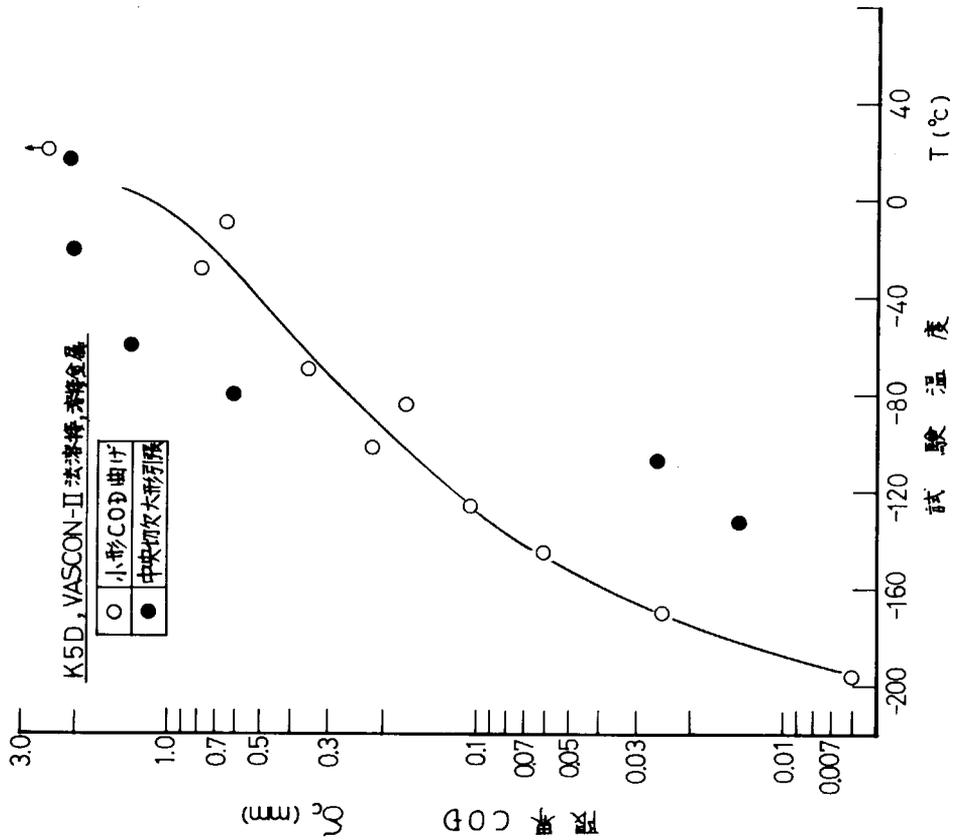


図4.5.2(10) 限界CODと温度の関係

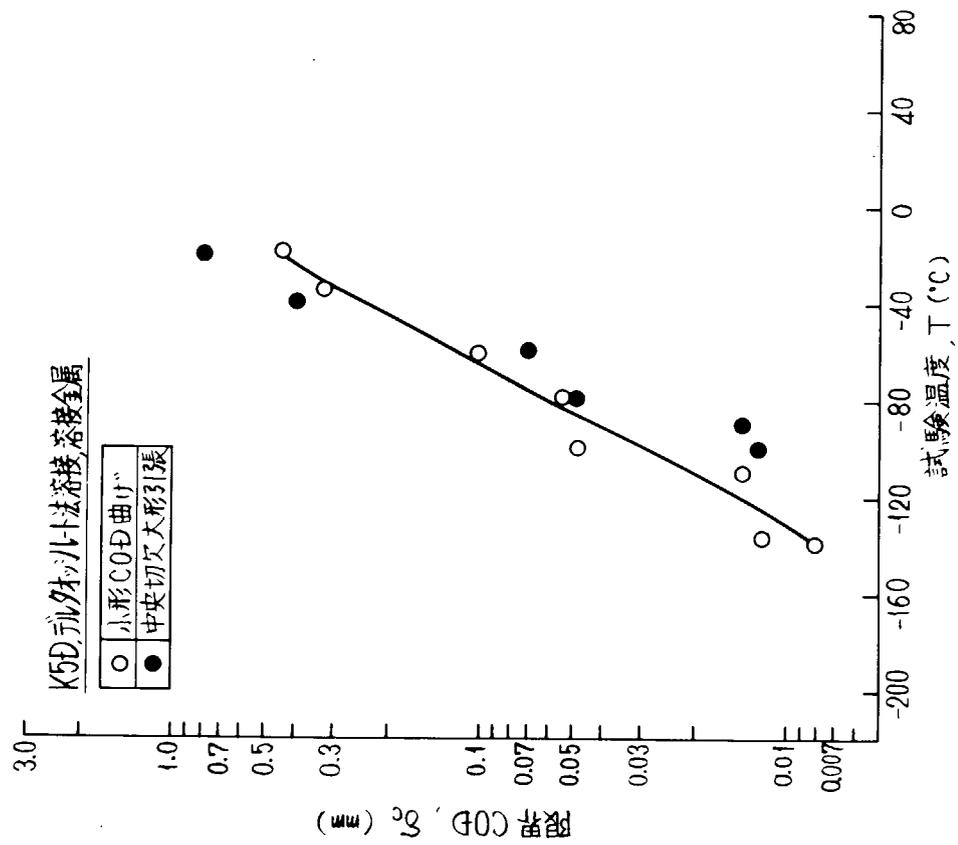


図4.5.2(12) 限界CODと温度の関係

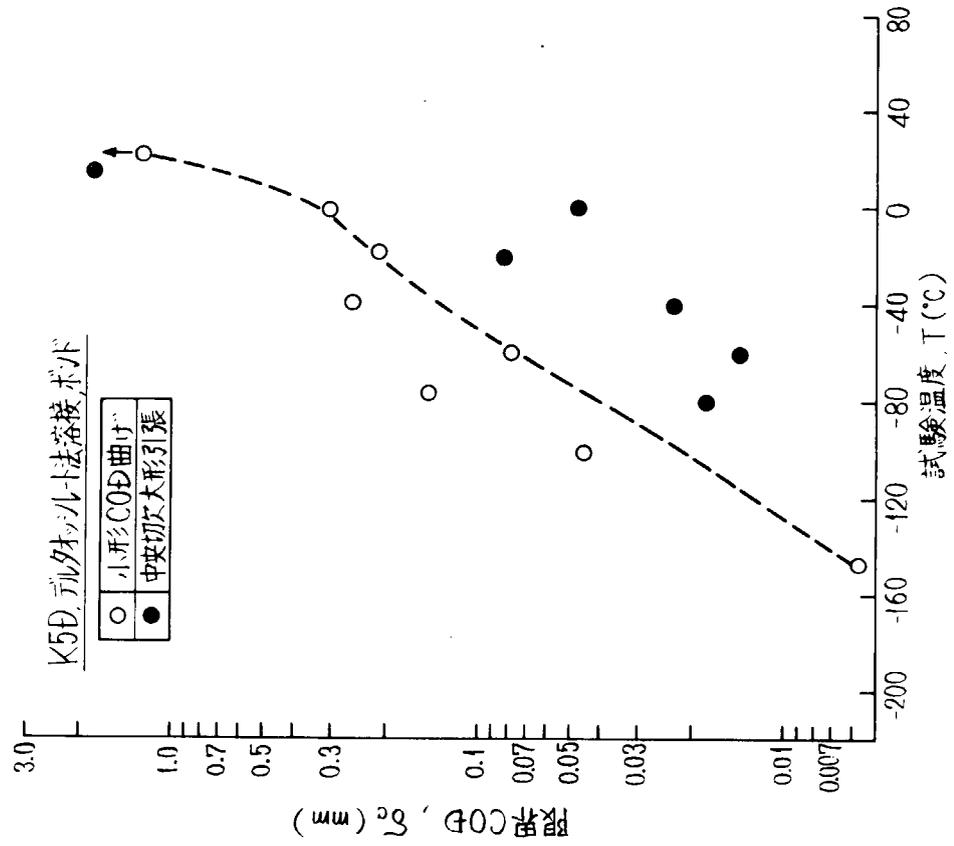


図4.5.2(13) 限界CODと温度の関係

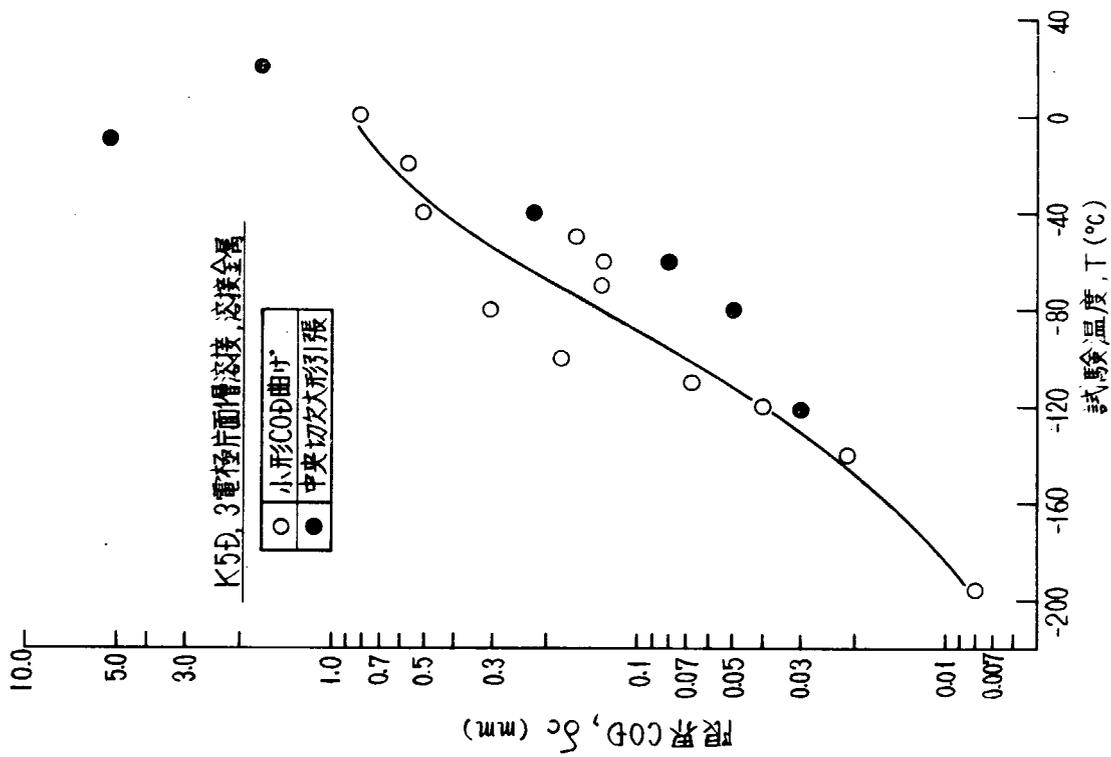


図4.5.2(14) 限界CODと温度の関係

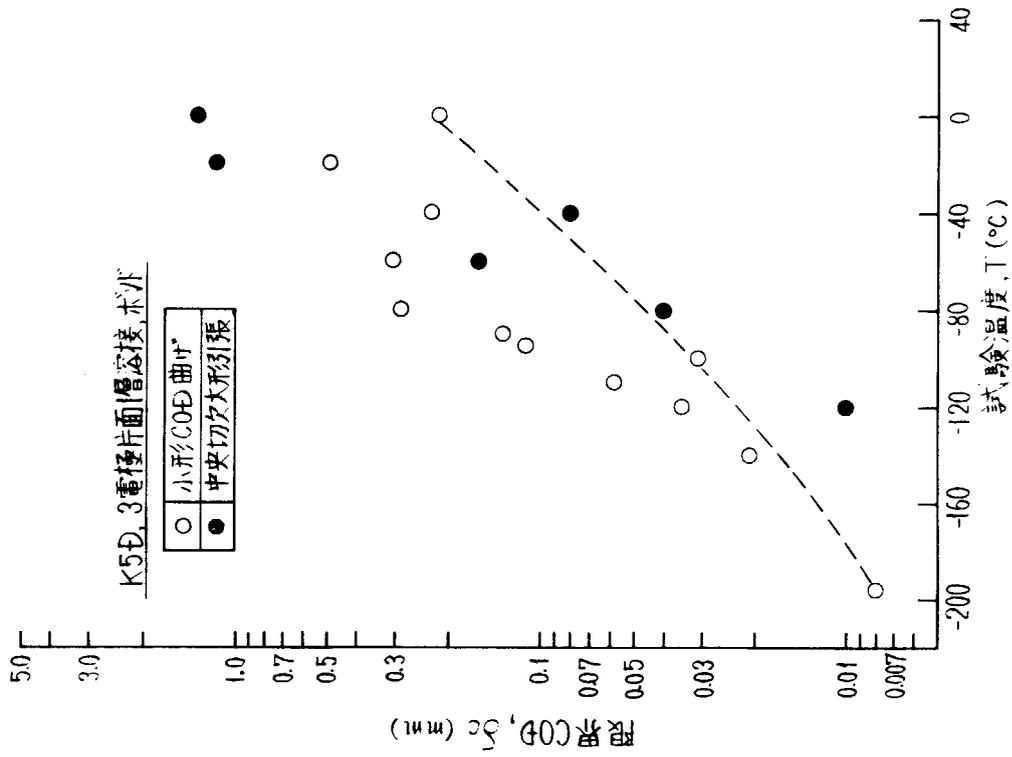


図4.5.2(15) 限界CODと温度の関係

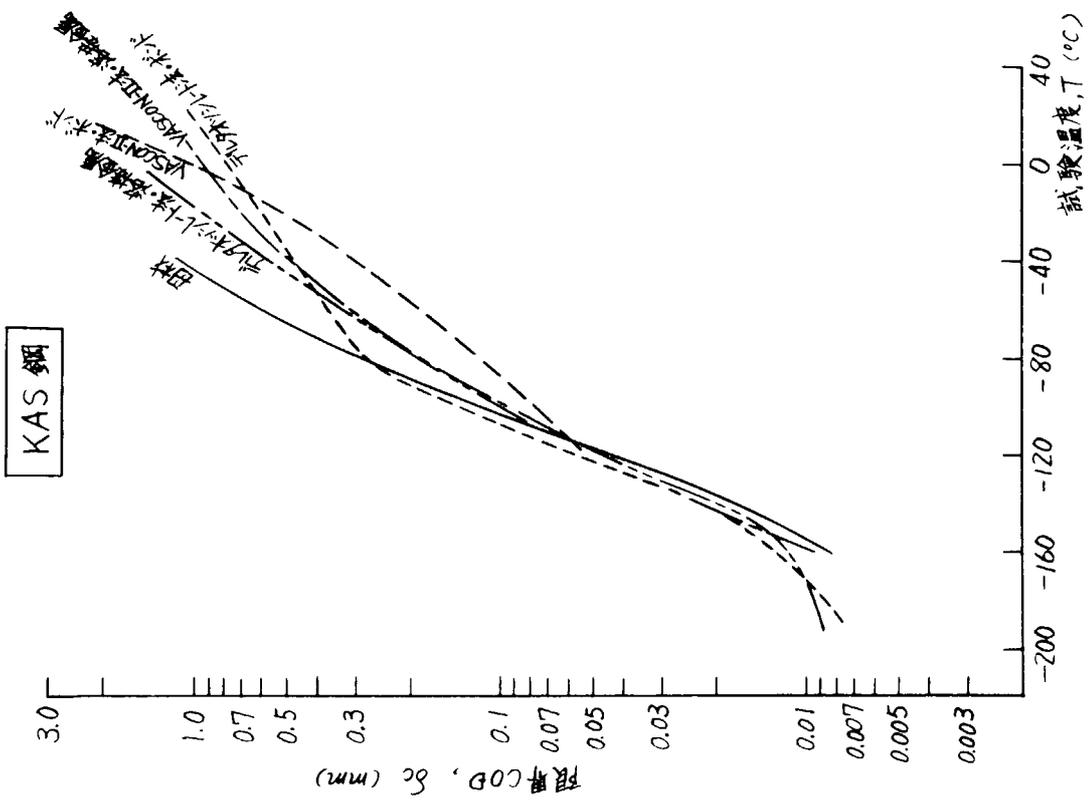


図 4.5.3 (1) 限界 COD と温度の関係

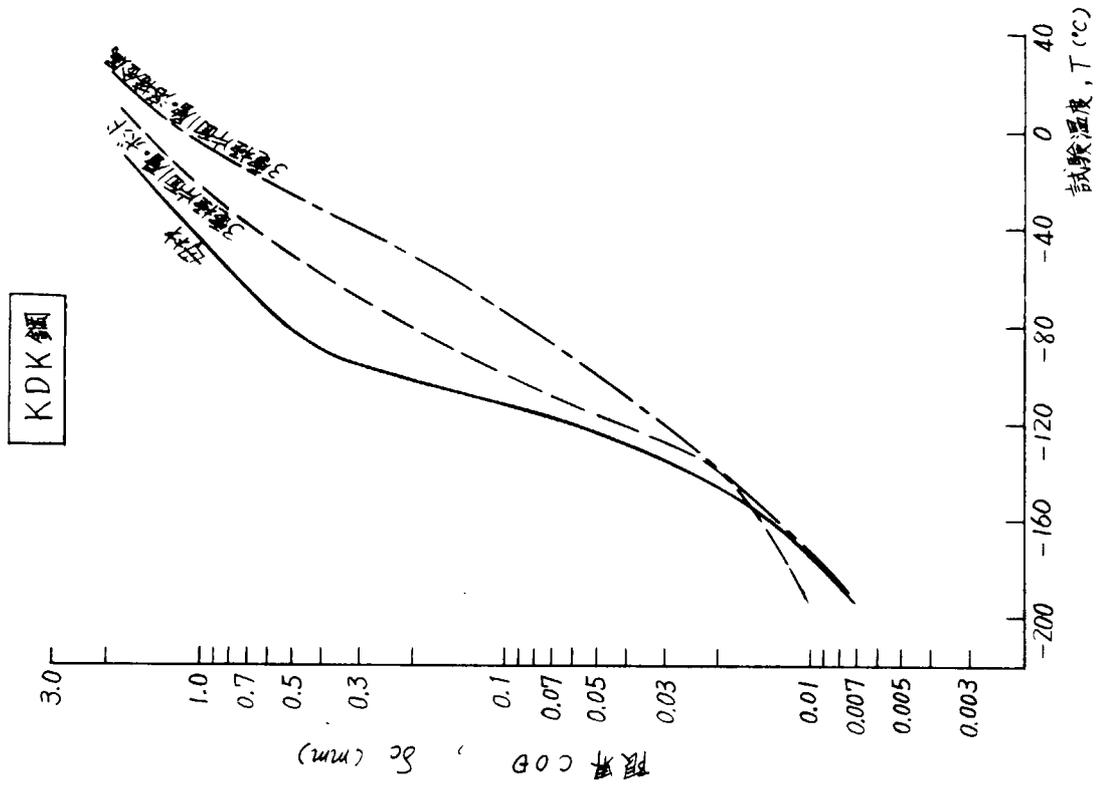


図 4.5.3 (2) 限界 COD と温度の関係

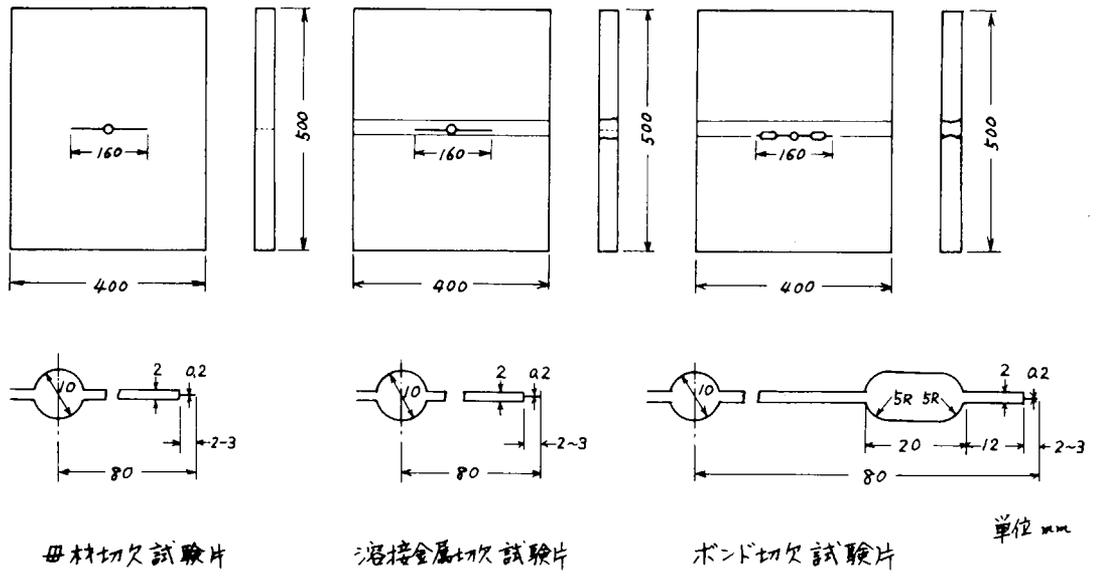


図 5.1.1 中央切欠大形引張試験片の形状寸法

表 5.1.1 中央切欠大形引張試験結果 (母材)

鋼種	材歴 (切欠位置)	試験温度 T (°C)	破壊荷重 P (ton)	破壊応力		K _c (kg/mm ²)	クリップゲージ変位 V _c		限界COD δ _c			備考
				Gross σ _g (kg/mm ²)	Net σ _n (kg/mm ²)		大 (mm)	小 (mm)	大 (mm)	小 (mm)	平均 (mm)	
				KAS	母材		-62	225	22.1	36.9	375	
		-109	169	16.6	27.7	282	0.180	0.155	0.108	0.093	0.101	
		-159	45	4.4	7.4	75	0.040	0.035	0.006	0.005	0.006	
		1	197	19.4	32.3	329	2.97	2.78	2.43	2.27	2.35	
		-32	193	19.0	31.7	322	1.83	1.81	1.50	1.48	1.49	
		-119	105	10.3	17.2	175	0.067	0.062	0.026	0.024	0.025	
V5Y	母材	-40	269	44.1	26.5	452	0.821	0.753	0.664	0.616	0.640	
		-60	292	47.9	28.7	489	0.702	0.647	0.574	0.529	0.551	
		-83	315	51.7	31.0	528	0.590	0.545	0.482	0.445	0.464	
		-90	292	47.9	28.7	489	0.468	0.343	0.383	0.281	0.332	
		-105	177	29.0	17.4	300	0.143	0.135	0.089	0.082	0.086	
		-120	158	25.9	15.5	264	0.104	0.078	0.055	0.035	0.045	
		-140	77	12.6	7.6	129	0.028	0.024	0.004	0.003	0.004	
		-160	73	12.0	7.2	123	0.042	0.035	0.009	0.005	0.007	
V5B	母材	0	293	28.8	48.1	491	>7.30	>7.30	>6.0	>6.0	>6.0	
		-80	290	28.5	47.6	486	1.30	1.23	1.07	1.02	1.05	
		-110	330	32.5	54.1	554	1.00	0.83	0.83	0.69	0.76	
		-130	307	30.2	50.4	515	0.48	0.48	0.37	0.37	0.37	
		-145	204	20.1	33.5	343	0.20	0.16	0.11	0.09	0.10	
		-169	47	4.6	7.7	78	0.035	0.025	0.005	0.003	0.004	

表 5.1.2 中央切欠大形引張試験結果 (KAS鋼, VASCON-II法溶接)

鋼種	材歴 (切欠位置)	試験温度 T (°C)	破壊荷重 P (ton)	破壊応力		K _c (kg/mm ²)	クリップゲージ変位 V _c		限界COD δ _c			備考
				Gross σ _g (kg/mm ²)	Net σ _n (kg/mm ²)		大 (mm)	小 (mm)	大 (mm)	小 (mm)	平均 (mm)	
				KAS	VASCON-II法 溶接 (溶接金属)		-106	103	10.1	16.9	171	
		-63	213	21.0	34.9	356	0.374	0.329	0.276	0.242	0.259	
		-1	213	21.0	34.9	356	2.27	2.08	1.86	1.70	1.78	
		-165	42	4.1	6.9	70	0.025	0.023	0.003	0.003	0.003	
		-92	262	25.8	43.0	438	0.426	0.336	0.323	0.254	0.289	
		-30	186	18.3	30.5	310	0.663	0.362	0.482	0.263	0.373	
	VASCON-II法 溶接 (ボンド)	-66	146	14.4	24.0	244	0.170	0.151	0.112	0.100	0.106	
		-2	210	20.7	34.4	351	2.50	2.25	2.04	1.84	1.94	
		-95	192	18.9	31.5	321	0.206	0.168	0.143	0.116	0.130	
		-120	43	4.2	7.1	71	0.033	0.025	0.006	0.004	0.005	3段破壊
			52	5.1	(8.5)	—	—	—	—	—	—	
			76	7.5	(12.5)	—	—	—	—	—	—	
		-35	190	18.7	31.2	317	0.575	0.431	0.470	0.352	0.411	
	16	204	20.1	33.5	341	2.08	2.05	1.70	1.68	1.69		

表5.1.3 中央切欠大形引張試験結果(KAS鋼,フィルタソルト法溶接)

鋼種	材歴 (切欠位置)	試験温度 T (°C)	破壊荷重 P (ton)	破壊応力		K _c ($\frac{kg/mm^2}{mm^2}$)	クリップゲージ変位 V _c		限界COD δ _c			備考
				Gross σ _g (kg/mm ²)	Net σ _n (kg/mm ²)		大 (mm)	小 (mm)	大 (mm)	小 (mm)	平均 (mm)	
KAS	フィルタソルト 法溶接 (溶接金属)	20	242	23.8	39.7	406	—	—	—	—	—	
		-10	215	21.2	35.3	361	2.350	2.225	1.780	1.686	1.733	2段破壊
			190	18.7	(31.2)	—	—	—	—	—	—	
		-40	192	18.9	31.5	322	0.438	0.425	0.294	0.285	0.290	
		-64	185	18.2	30.3	310	0.288	0.256	0.183	0.163	0.173	
		-84	80	7.9	13.1	135	0.078	0.076	0.024	0.023	0.024	
		-120	30	3.0	4.9	51	0.021	0.021	0.002	0.002	0.002	
	フィルタソルト 法溶接 (ボンド)	20	233	22.9	38.2	390	—	—	—	—	—	
		-10	198	19.5	32.5	332	1.850	1.750	1.510	1.430	1.470	
		-20	186	18.3	30.5	312	1.650	1.531	1.340	1.250	1.295	2段破壊
			170	16.7	(27.9)	—	—	—	—	—	—	
		-42	164	16.1	26.9	274	0.275	0.250	0.207	0.188	0.198	
		-68	164	16.1	26.9	274	0.263	0.238	0.180	0.163	0.172	
		-90	80	7.9	13.1	135	0.072	—	0.026	—	0.026	

表5.1.4 中央切欠大形引張試験結果(KDK鋼,3電極片面1層溶接)

鋼種	材歴 (切欠位置)	試験温度 T (°C)	破壊荷重 P (ton)	破壊応力		K _c ($\frac{kg/mm^2}{mm^2}$)	クリップゲージ変位 V _c		限界COD δ _c			備考
				Gross σ _g (kg/mm ²)	Net σ _n (kg/mm ²)		大 (mm)	小 (mm)	大 (mm)	小 (mm)	平均 (mm)	
KDK	3電極片面 1層溶接 (溶接金属)	-4	251	24.7	41.2	421	0.702	0.537	0.574	0.439	0.507	
		-38	227	22.3	37.2	380	0.567	0.348	0.464	0.279	0.372	
		-60	178	17.5	29.2	298	0.171	0.146	0.110	0.088	0.099	
		-82	76	7.5	12.5	128	0.114	0.091	0.058	0.042	0.050	
		-100	87	8.6	14.3	147	0.118	0.091	0.059	0.039	0.049	
		-140	36	3.5	5.9	60	0.010	0.010	0.001	0.001	0.001	
		3電極片面 1層溶接 (ボンド)	-13	256	25.2	42.0	429	2.163	2.277	1.769	1.698	1.734
	-40		253	24.9	41.5	424	1.061	1.018	0.868	0.832	0.850	
	-63		207	20.4	33.9	348	0.241	0.205	0.188	0.154	0.171	
	-87		160	15.7	26.2	268	0.163	0.153	0.111	0.104	0.108	
	-111		83	8.2	13.6	140	0.036	0.036	0.009	0.007	0.008	
	-130		46	4.5	7.5	77	0.018	0.016	0.003	0.002	0.003	

表5.1.5 中央切欠大形引張試験結果 (K5D鋼,VASCON-II法溶接)

鋼種	材歴 (切欠位置)	試験温度 T (°C)	破壊荷重 P (ton)	破壊応力		K _c (kg/mm ²)	クリップゲージ変位 V _c		限界COD δ _c			備考
				Gross σ _g (kg/mm ²)	Net σ _n (kg/mm ²)		大 (mm)	小 (mm)	大 (mm)	小 (mm)	平均 (mm)	
K5D	VASCON-II法 溶接 (溶接金属)	16	246	24.2	40.4	413	2.70	2.38	2.23	1.97	2.10	破面にブローホール有り
		-21	258	25.4	42.3	433	2.50	2.40	2.06	1.98	2.02	
		-60	258	25.4	42.3	433	1.70	1.50	1.40	1.23	1.32	
		-80	267	26.3	43.8	449	0.77	0.70	0.64	0.58	0.61	
		-107	81	8.0	13.3	137	0.09	0.07	0.029	0.023	0.026	
		-132	76	7.5	12.5	128	0.05	0.05	0.014	0.014	0.014	
	VASCON-II法 溶接 (ボンド)	16	286	28.1	46.9	479	>7	>7	>5.8	>5.8	>5.8	
		-5	248	24.4	40.7	416	2.40	2.35	1.98	1.94	1.96	
		-22	241	23.7	39.5	405	0.92	0.82	0.76	0.68	0.72	
		-41	196	19.3	32.2	329	0.30	0.25	0.22	0.18	0.20	
		-82	184	18.1	30.2	309	0.17	0.15	0.11	0.10	0.11	
	-105	61	6.0	10.0	102	0.048	0.045	0.012	0.011	0.012		

表5.1.6 中央切欠大形引張試験結果 (K5D鋼,デルタオット法溶接)

鋼種	材歴 (切欠位置)	試験温度 T (°C)	破壊荷重 P (ton)	破壊応力		K _c (kg/mm ²)	クリップゲージ変位 V _c		限界COD δ _c			備考
				Gross σ _g (kg/mm ²)	Net σ _n (kg/mm ²)		大 (mm)	小 (mm)	大 (mm)	小 (mm)	平均 (mm)	
K5D	デルタオット法 溶接 (溶接金属)	-100	60	5.8	9.7	99	0.083	0.040	0.016	0.008	0.012	
		-79	150	14.5	24.2	247	0.113	0.091	0.054	0.045	0.049	
		-90	68	6.7	11.2	114	0.062	0.053	0.015	0.013	0.014	
		-60	145	14.4	24.0	245	0.159	0.124	0.080	0.062	0.071	
		-20	260	25.7	42.9	438	1.106	0.880	0.879	0.699	0.789	
		-40	245	24.6	41.1	419	0.528	0.521	0.397	0.392	0.395	
	デルタオット法 溶接 (ボンド)	-60	75	7.3	12.1	124	0.045	0.042	0.015	0.014	0.014	
		-80	80	8.0	13.3	136	0.060	0.053	0.019	0.017	0.018	
		-40	90	9.1	15.1	155	0.057	0.054	0.024	0.023	0.023	2段破壊
			110	10.6	(18.4)	—	—	—	—	—	—	
		-20	148	14.8	24.7	252	0.141	0.127	0.087	0.078	0.082	
		0	120	11.6	19.4	198	0.090	—	0.048	—	0.048	2段破壊
			230	22.2	(37.2)	—	—	—	—	—	—	
		15	250	24.3	40.5	414	2.308	2.107	1.882	1.718	1.800	3段破壊
			245	23.8	(39.7)	—	—	—	—	—	—	
	220	21.4	(35.6)	—	—	—	—	—	—			

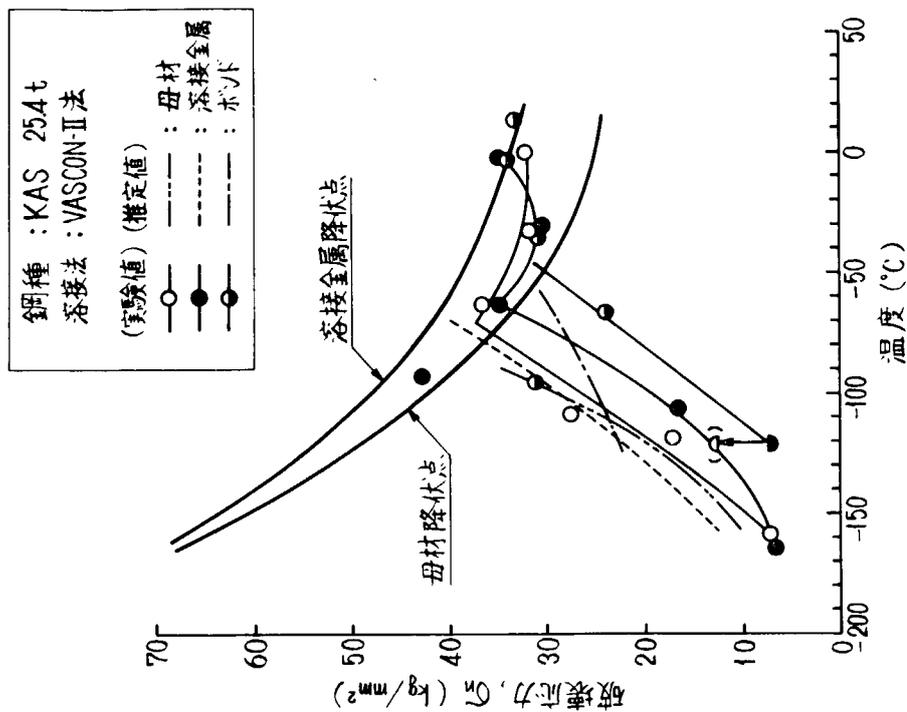


図5.1.2(1) 中央切欠大形引張試験結果(KAS鋼,VASCON-II法溶接)
(破壊応力と温度の関係)

表5.1.7 中央切欠大形引張試験結果(K5D鋼,3電極片面1層溶接)

鋼種	材歴 (切欠位置)	試験温度 T (°C)	破壊荷重 P (ton)	破壊応力		K _c ($\frac{kg\sqrt{mm}}{mm^2}$)	クリップゲージ変位 V _c		限界COD δ _c			備考
				Gross σ _g (kg/mm ²)	Net σ _n (kg/mm ²)		大 (mm)	小 (mm)	大 (mm)	小 (mm)	平均 (mm)	
K5D	3電極片面 1層溶接 (溶接金属)	20	315	30.5	50.8	520	2.45	1.99	1.91	1.56	1.73	
		-10	320	30.9	51.5	527	7.31	6.53	5.67	5.06	5.37	
		-60	180	17.4	28.9	296	0.18	0.14	0.09	0.07	0.08	
		-40	238	23.0	38.3	392	0.36	0.35	0.22	0.22	0.22	
		-121	60	5.8	9.6	98	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	
		-80	150	14.4	24.1	246	0.15	0.12	0.06	0.05	0.06	
	3電極片面 1層溶接 (ボンド)	-40	139	13.4	22.3	228	0.15	0.14	0.08	0.07	0.08	
		-20	274	26.4	43.9	449	1.44	1.43	1.16	1.15	1.16	
		-120	76	7.3	12.2	125	0.05	0.04	0.01	0.01	0.01	
		-80	128	12.3	20.6	210	0.10	0.08	0.05	0.03	0.04	
		0	275	26.6	44.4	454	1.70	1.61	1.37	1.29	1.33	
	-60	190	18.3	30.4	311	0.27	0.22	0.17	0.15	0.16		

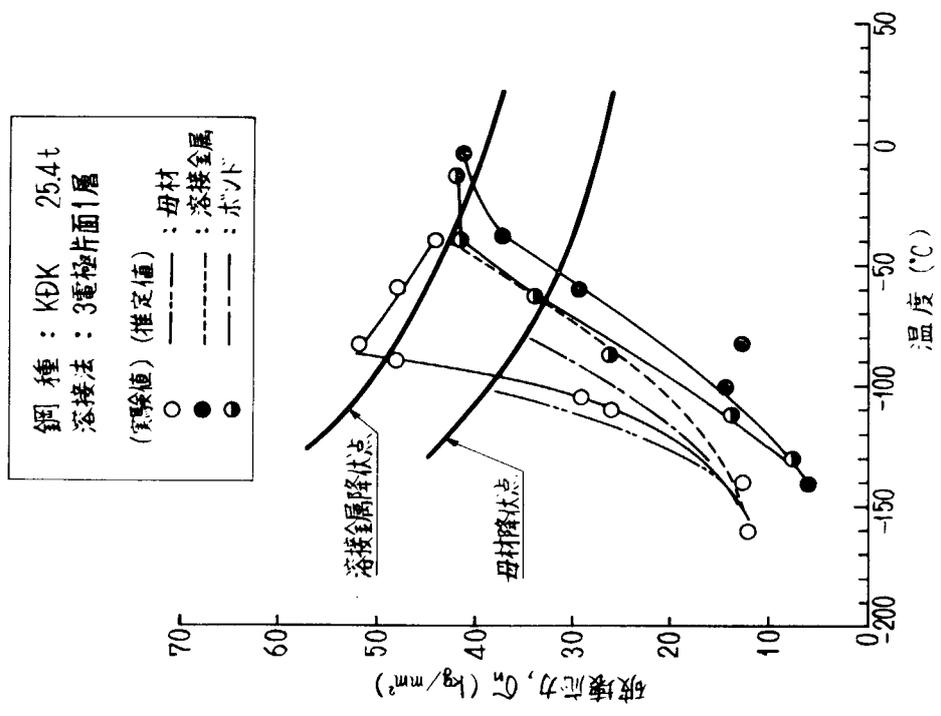


図5.1.2(3) 中央切欠大形引張試験結果(KDK鋼, 3電極片面1層溶接)
 (破壊応力と温度の関係)

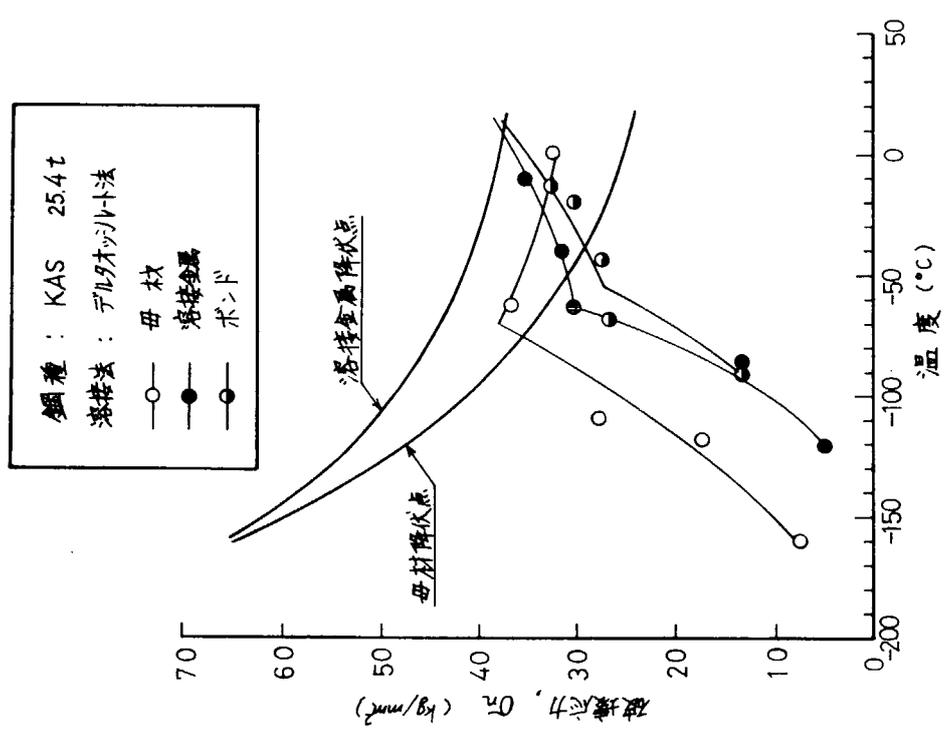


図5.1.2(2) 中央切欠大形引張試験結果(KAS鋼, デルタオットト法溶接)
 (破壊応力と温度の関係)

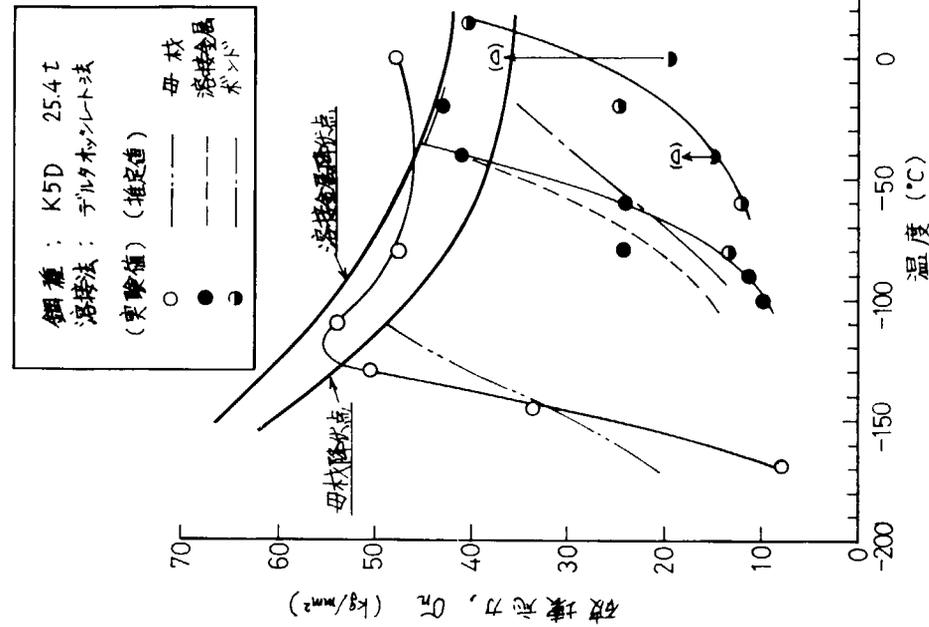


図5.1.2(5) 中央切欠大形引張試験結果(K5D鋼,テルタホッソレット法溶接)
 (破壊応力と温度の関係)

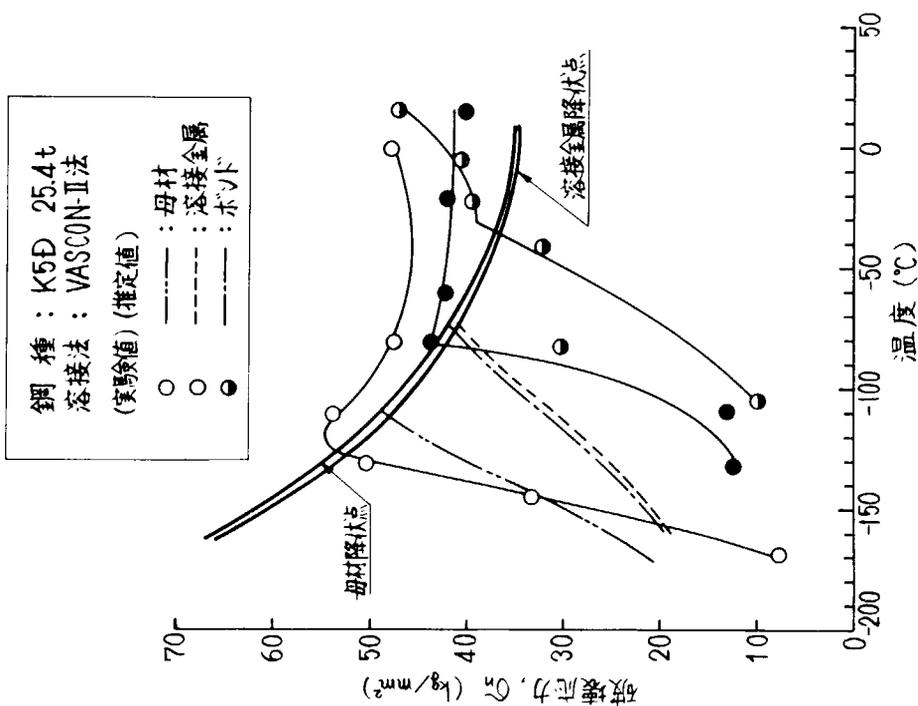


図5.1.2(4) 中央切欠大形引張試験結果(K5D鋼,VASCON-II法溶接)
 (破壊応力と温度の関係)

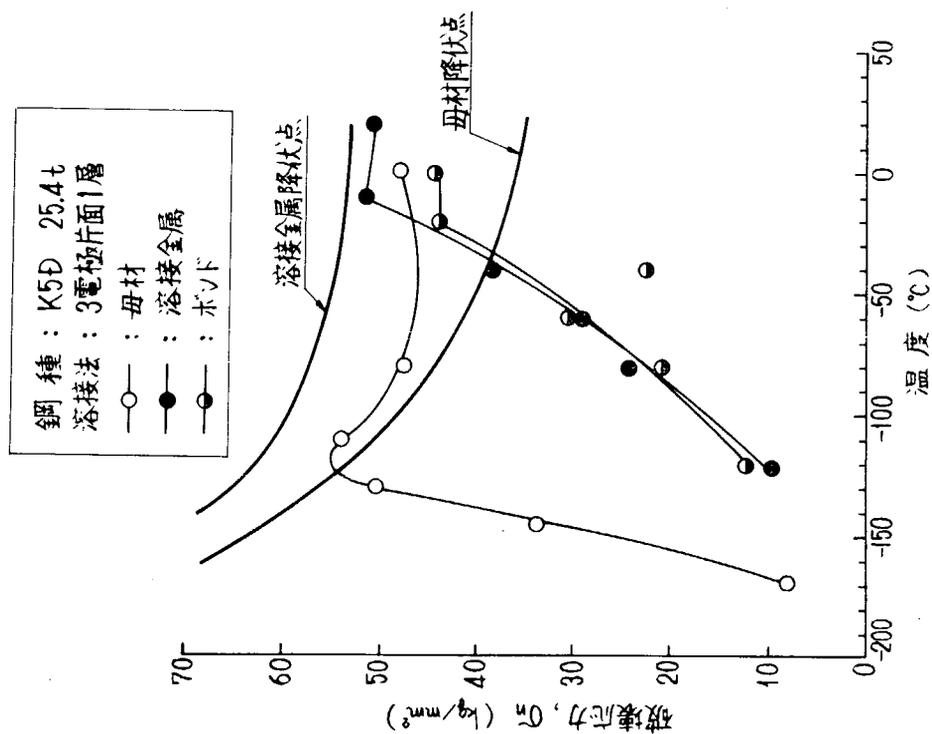


図5.1.2(6) 中央切欠大形引張試験結果 (K5D鋼, 3電極片面1層溶接)
 (破壊応力と温度の関係)

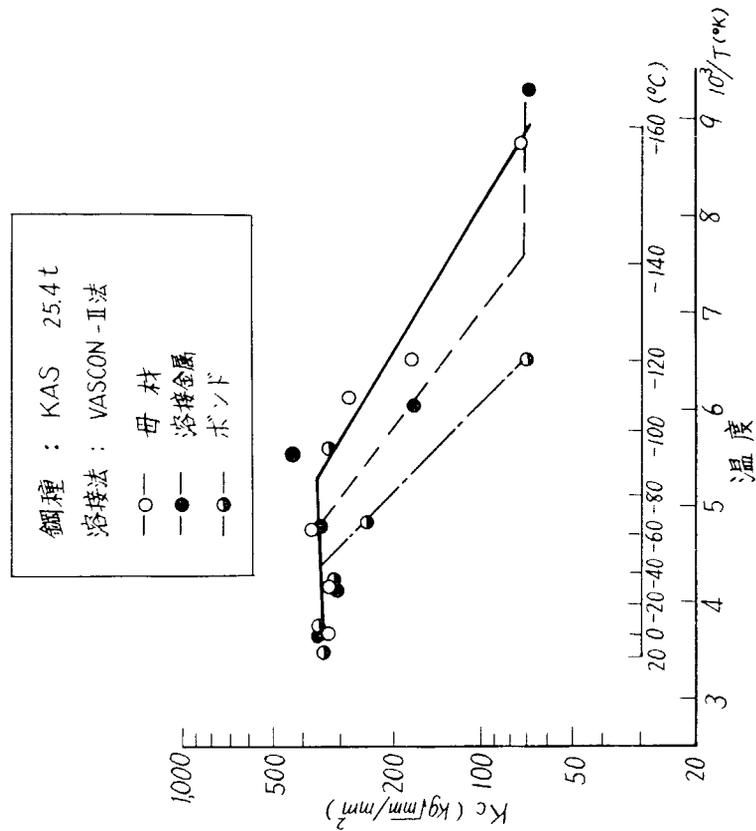


図5.1.3(1) 中央切欠大形引張試験結果 (KAS鋼, VASCONII法溶接)
 (K_c と温度の関係)

鋼種 : KAS 25.4t
 溶接法 : アルカッド法
 ○ : 母材
 ● : 溶接金属
 ● : ボンド

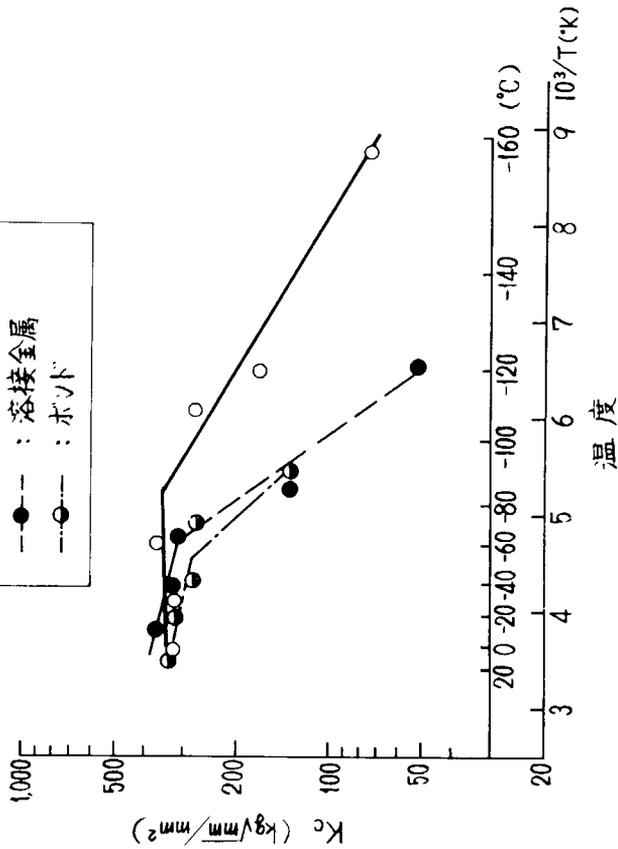


図5.1.3 (2) 中央切欠大形引張試験結果 (KAS鋼, アルカッド法溶接)
 (K_c 値と温度の関係)

鋼種 : KDK 25.4t
 溶接法 : 3電極片面1層
 ○ : 母材
 ● : 溶接金属
 ● : ボンド

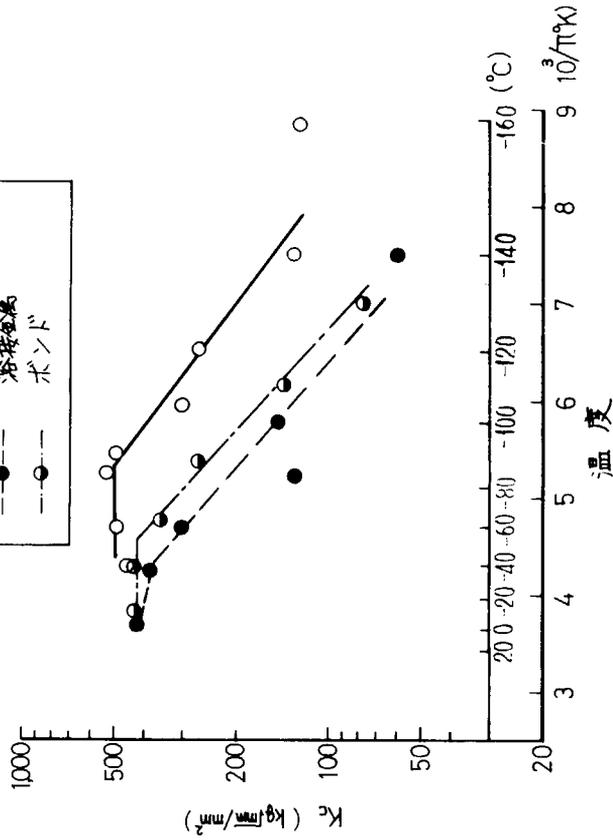


図5.1.3 (3) 中央切欠大形引張試験結果 (KDK鋼, 3電極片面1層溶接)
 (K_c 値と温度の関係)

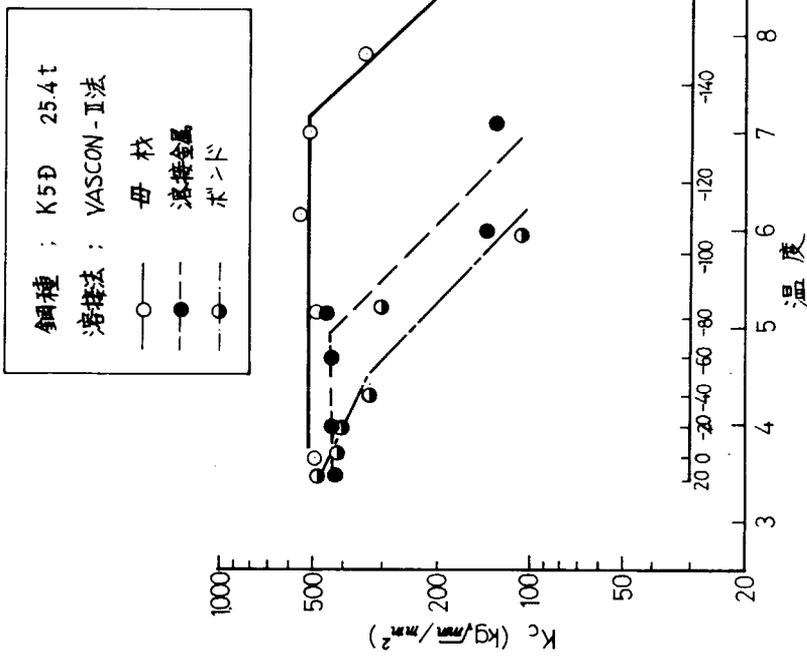


図5.1.3(4) 中央切欠大形引張試験結果(K5D鋼, VASCON-II法溶接)
 (Kc値と温度の関係)

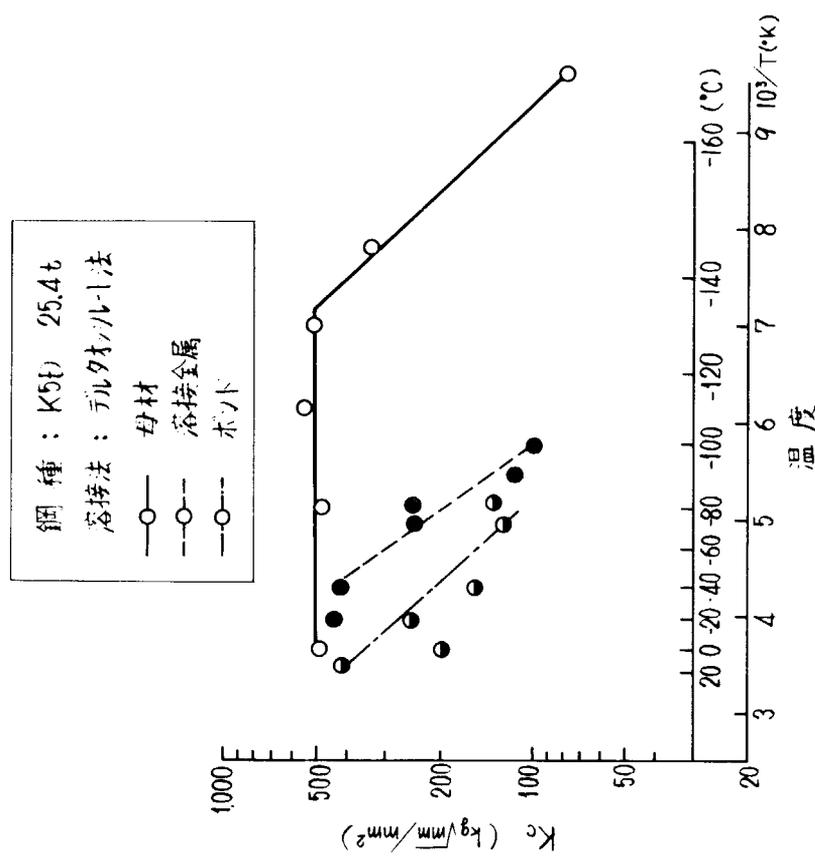


図5.1.3(5) 中央切欠大形引張試験結果(K5D鋼, テルタレット法溶接)
 (Kc値と温度の関係)

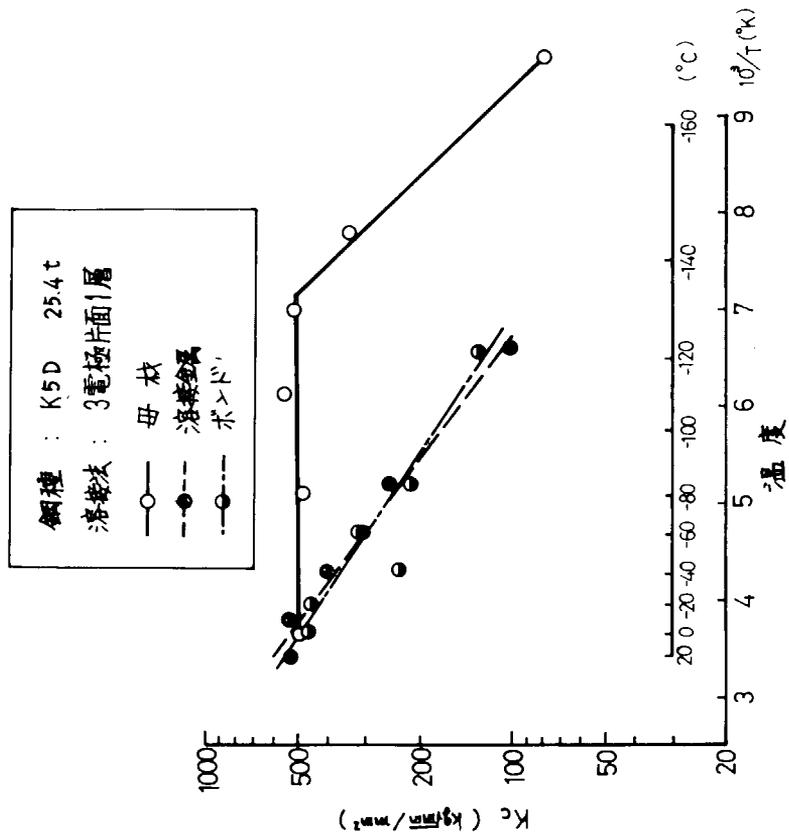


図5.1.3(6) 中央切欠大形引張試験結果(K5D鋼,3電極片面1層溶解)
 (K_c値と温度の関係)

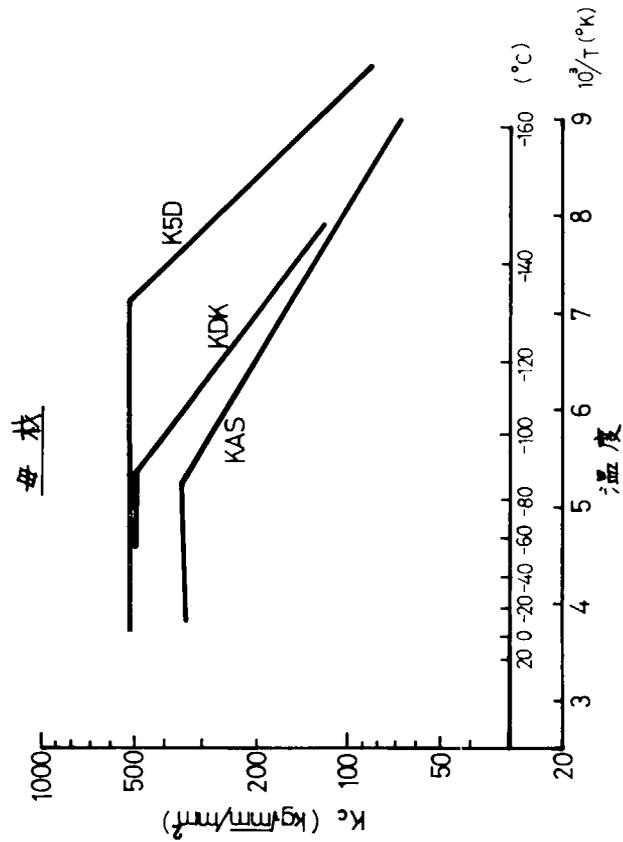


図5.1.4(1) 中央切欠大形引張試験結果(母材)
 (K_c値と温度の関係)

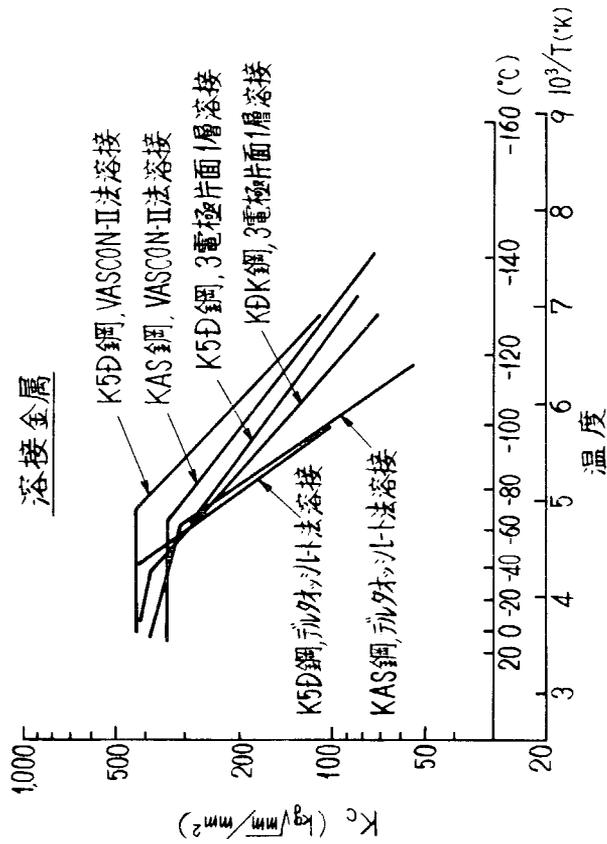


図5.1.4(2) 中央切欠大形引張試験結果(溶接金属)
(K_c 値と温度の関係)

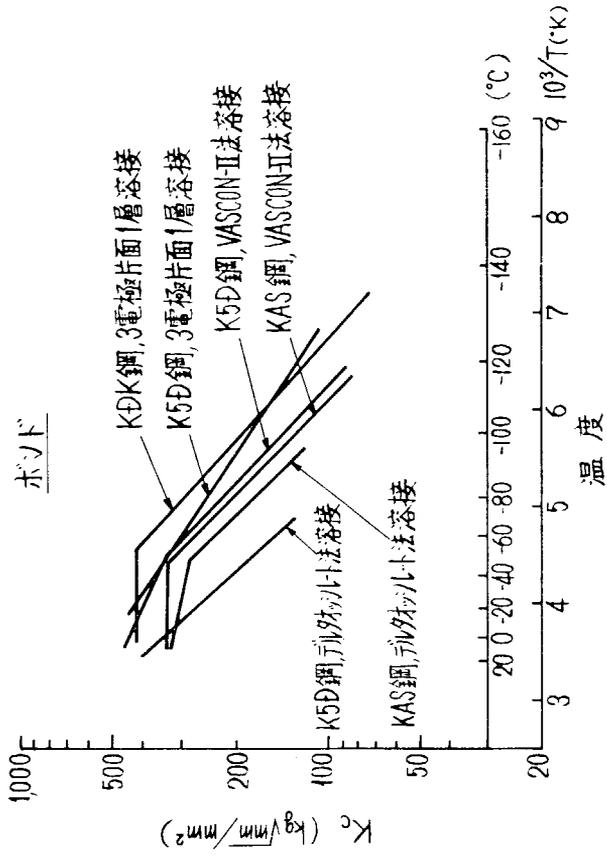


図5.1.4(3) 中央切欠大形引張試験結果(ボルト)
(K_c 値と温度の関係)

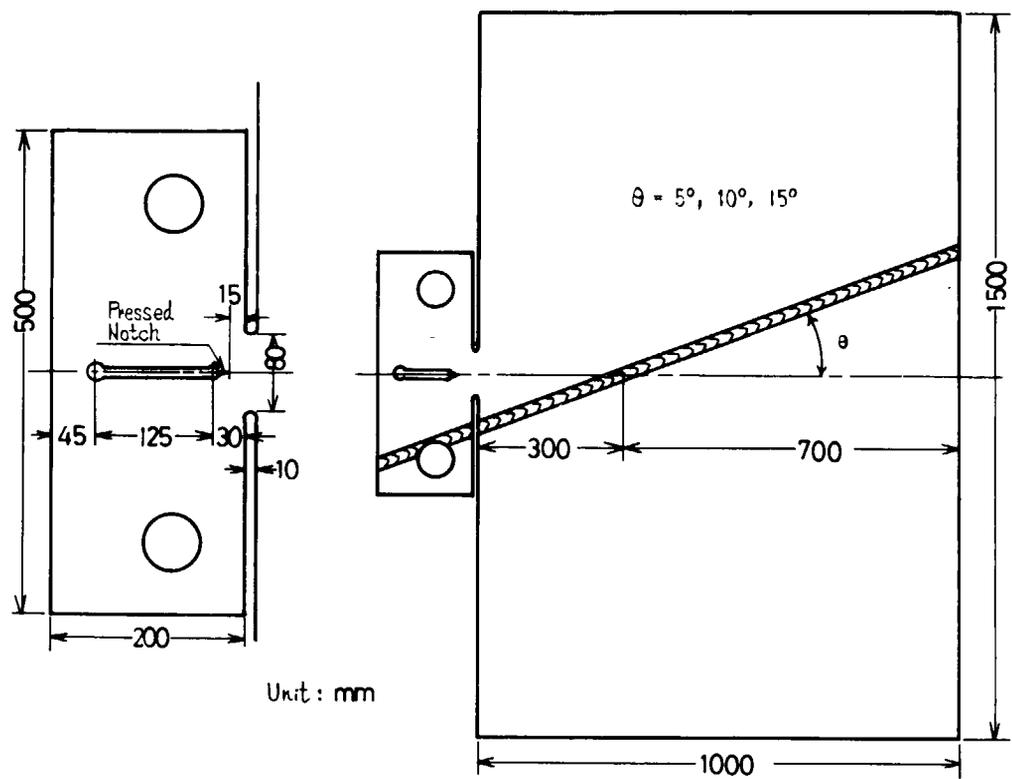


図6.1.1 斜め継手伝播試験片形状(二重引張型, その1)

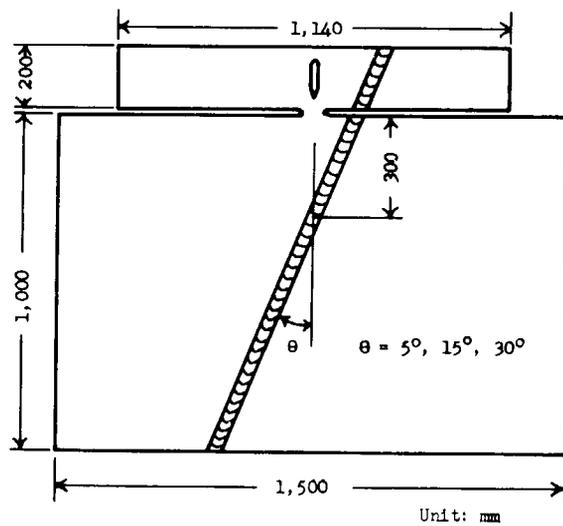


図6.1.2 斜め継手伝播試験片形状(二重引張型, その2)

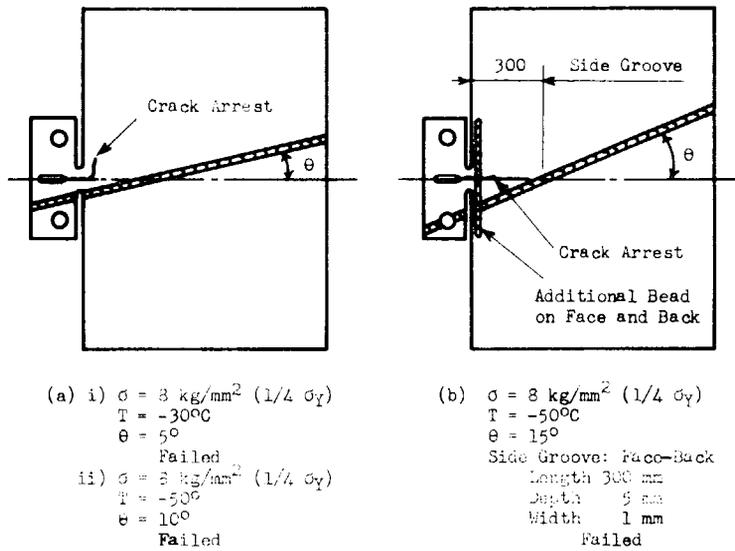


図6.1.3 斜め継手伝播試験結果(二重引張型)
 (低荷重($1/4 \sigma_y$)での試験結果)

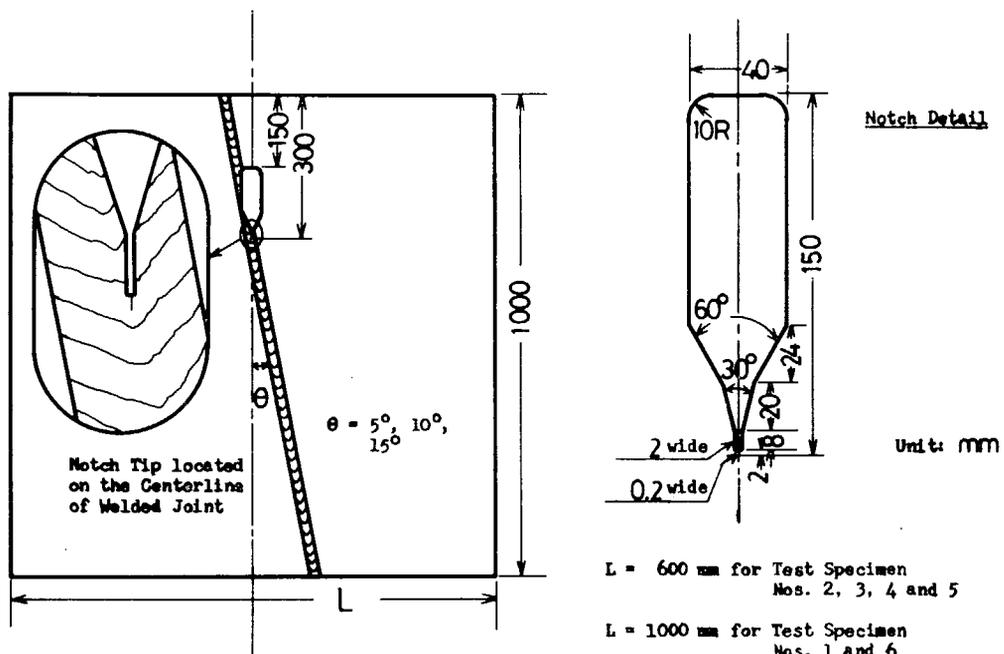
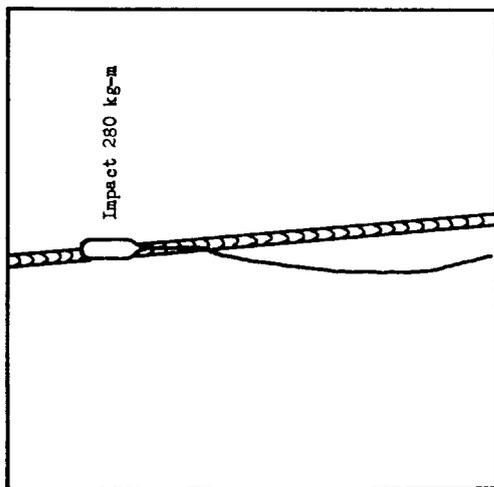
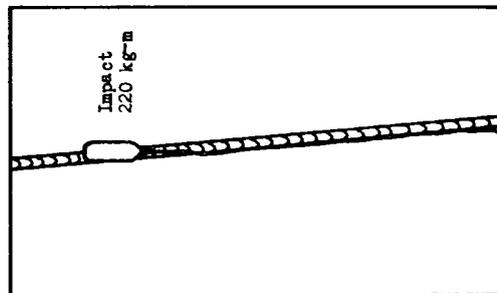


図6.1.4 斜め継手伝播試験片形状(内部切欠型)

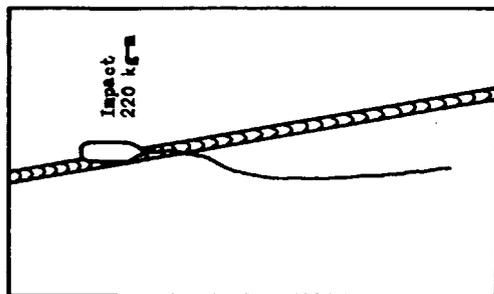


(a) Test Specimen No. 1
 $\sigma = 24 \text{ kg/mm}^2$ ($3/4 \sigma_Y$)
 $T = -30^\circ\text{C}$

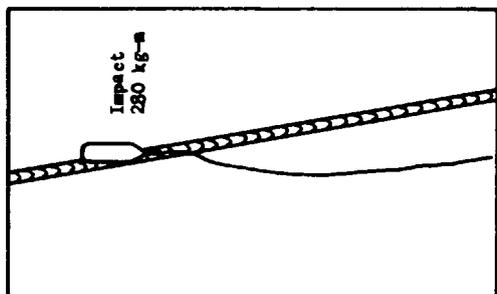


(b) Test Specimen No. 2
 $\sigma = 12 \text{ kg/mm}^2$ ($3/8 \sigma_Y$)
 $T = -30^\circ\text{C}$

図6.15 斜め継手伝播試験結果(内部欠型)
 ($\theta = 5^\circ$ の場合)

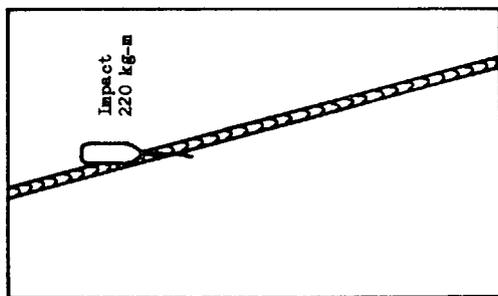


(a) Test Specimen No. 3
 $\sigma = 16 \text{ kg/mm}^2$ ($1/2 \sigma_Y$)
 $T = -30^\circ\text{C}$

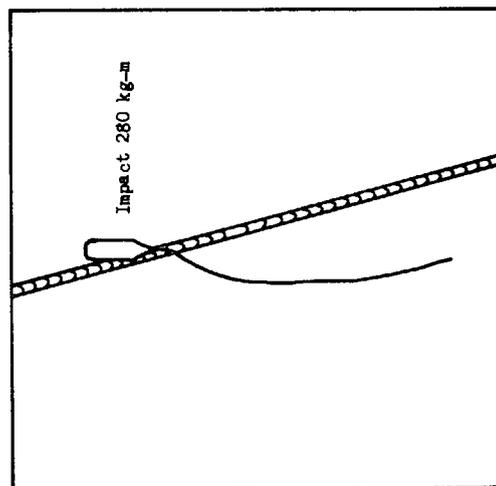


(b) Test Specimen No. 4
 $\sigma = 20 \text{ kg/mm}^2$ ($5/8 \sigma_Y$)
 $T = -30^\circ\text{C}$

図6.16 斜め継手伝播試験結果(内部欠型)
 ($\theta = 10^\circ$ の場合)

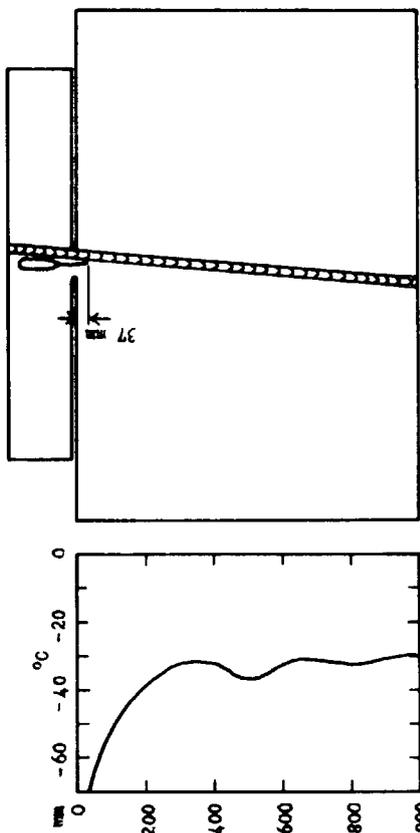


(a) Test Specimen No. 5
 $\sigma = 24 \text{ kg/mm}^2$ ($3/4 \sigma_T$)
 $T = -30^\circ\text{C}$

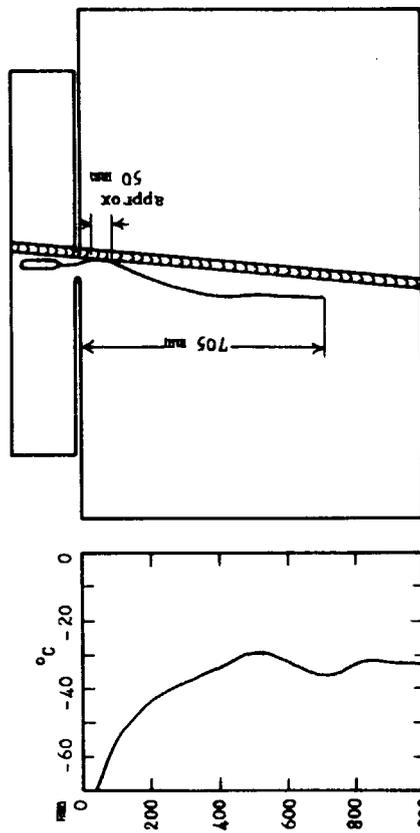


(b) Test Specimen No. 6
 $\sigma = 12 \text{ kg/mm}^2$ ($3/8 \sigma_T$)
 $T = -30^\circ\text{C}$

図6.1.7 斜め継手伝播試験結果 (内部切欠型)
 $(\theta = 15^\circ \text{ の場合})$



(a) Test Specimen No. 7
 $\sigma = 16 \text{ kg/mm}^2$ ($1/2 \sigma_T$)
 $T = -30^\circ\text{C}$



(b) Test Specimen No. 8
 $\sigma = 24 \text{ kg/mm}^2$ ($3/4 \sigma_T$)
 $T = -30^\circ\text{C}$

図6.1.8 斜め継手伝播試験結果 (二重引張型)
 $(\theta = 5^\circ \text{ の場合})$

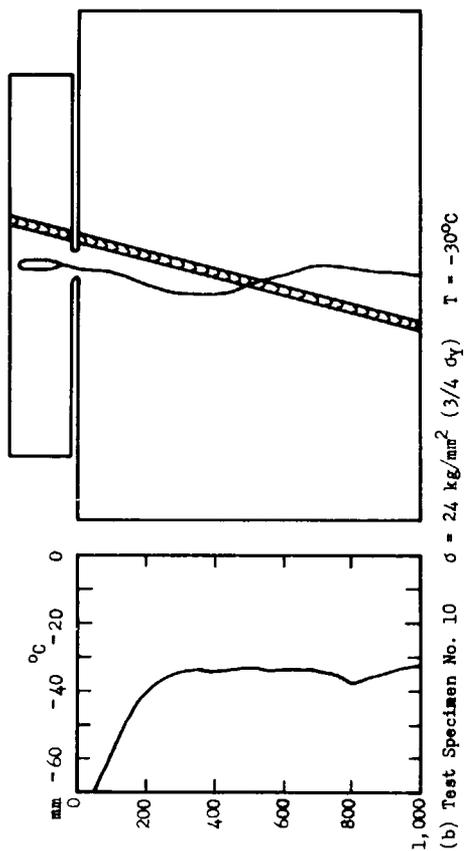
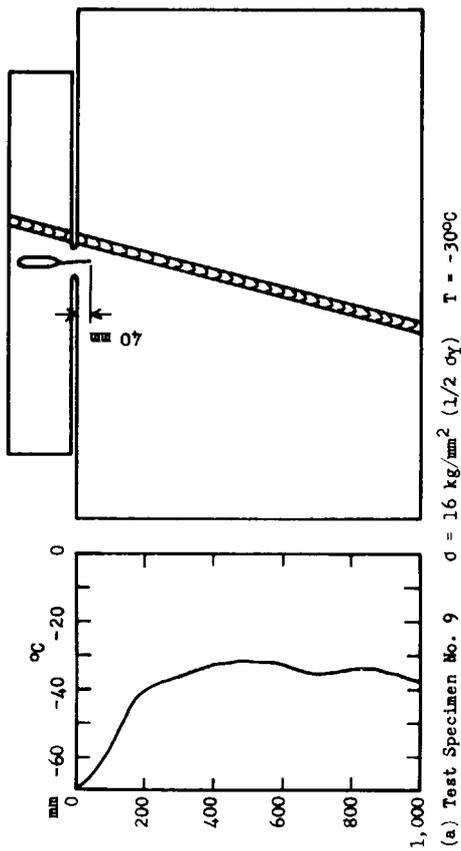


図6.1.9 斜め継手伝播試験結果(二重引張型)
($\theta = 15^\circ$ の場合)

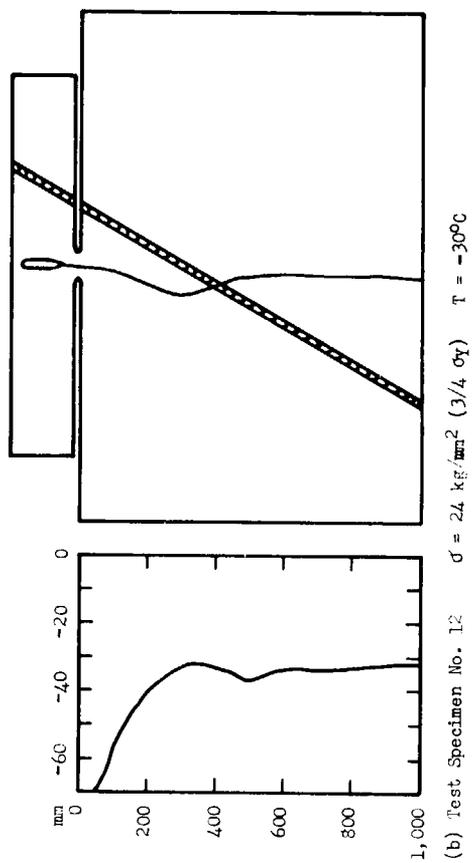
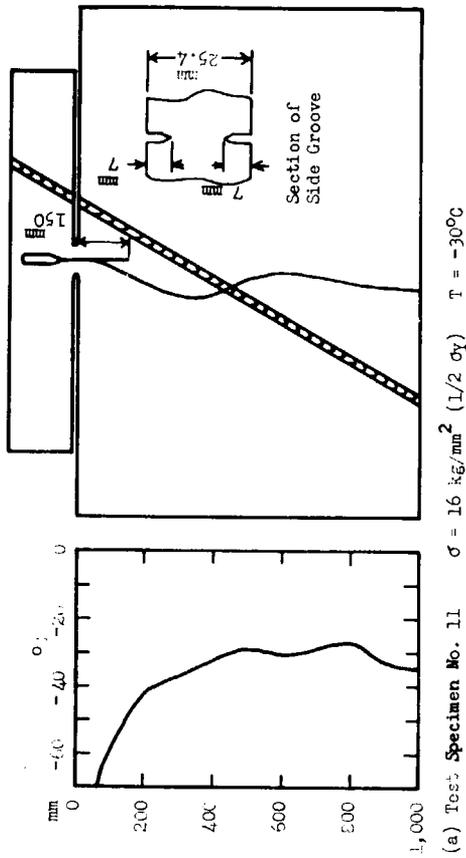


図6.1.10 斜め継手伝播試験結果(二重引張型)
($\theta = 30^\circ$ の場合)

表 6.2.1 伝播特性試験結果一覧
(K5D鋼母材およびエレクトロカス溶接継手)

鋼種	溶接法	試験片番号	試験片寸法			試験温度 分布形式	衝撃工初 E _i (kg·m)	クロス応力 σ _g (kg/mm ²)	停止位置 Ca (mm)	停止温度 Ta (°C)	脆性破壊 伝播抵抗値 K _{IC} (kg/mm ^{3/2})	備考
			2B (mm)	Co (mm)	ℓ (mm)							
K5D (23.4)	母材	K5D-M-1	1,500	200	200	平坦	300	20	—	—	—	試験温度0°C 平坦温度分布では、ノッチ部に 衝撃工初を与えても脆性亀裂は発生せず。
		K5D-M-1 Re Test	1,500	200	200	勾配	300	20	660	- 3	904	ノッチ先端温度を-66°Cにして再試験、破壊発生。
		K5D-M-2	1,500	200	200	平坦	300	20	437	- 2	728	①ノッチ先端温度-32°Cにて破壊せず。 ②ノッチ先端温度-57°Cで破壊発生。
	エレクトロカス	K5D-EG-1	1,500	200	200	平坦	300	20	613	- 1	866	クラックはボンドを593mm伝播後、母材にて停止。
		K5D-EG-2	2,000	200	300	平坦	300	15	100	-10	339	クラックはボンドを85mm伝播後、母材にて停止。
		K5D-EG-4	1,400	200	200	平坦	300	22	160	-12	571	①ノッチ先端温度0°Cで未破壊。 ②クラックはボンドを130mm伝播後、母材にて停止。
		K5D-EG-5	2,000	200	200	平坦	300	15	290	- 7	466	ボンド停止。
		K5D-EG-6	1,500	200	200	平坦	300	20	195	- 1	544	クラックはボンドを180mm伝播後、母材にて停止。

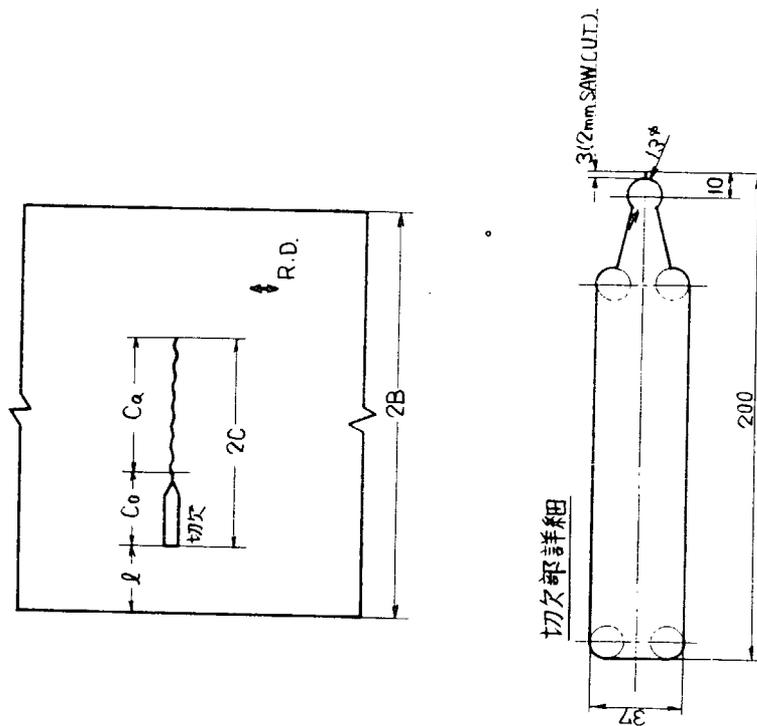


図 6.2.1 伝播特性試験片形状

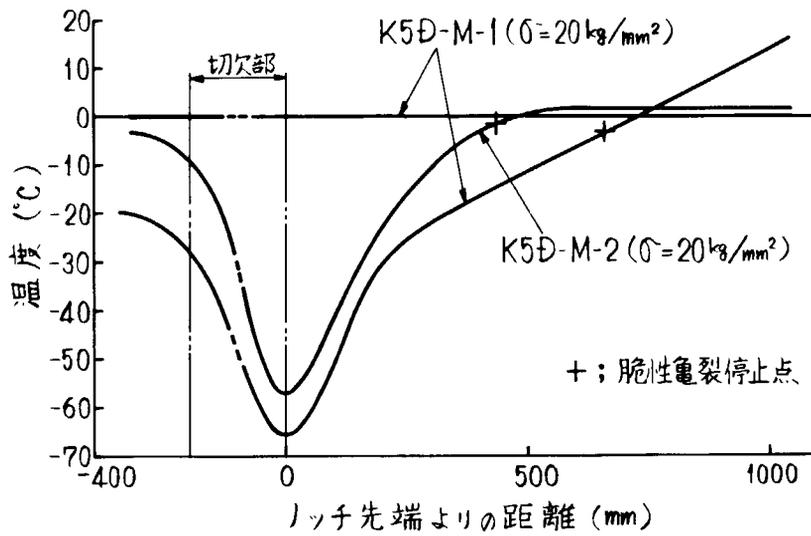


図6.2.2 伝播特性試験における温度分布
(K5D鋼,板厚25.4mm,母材)

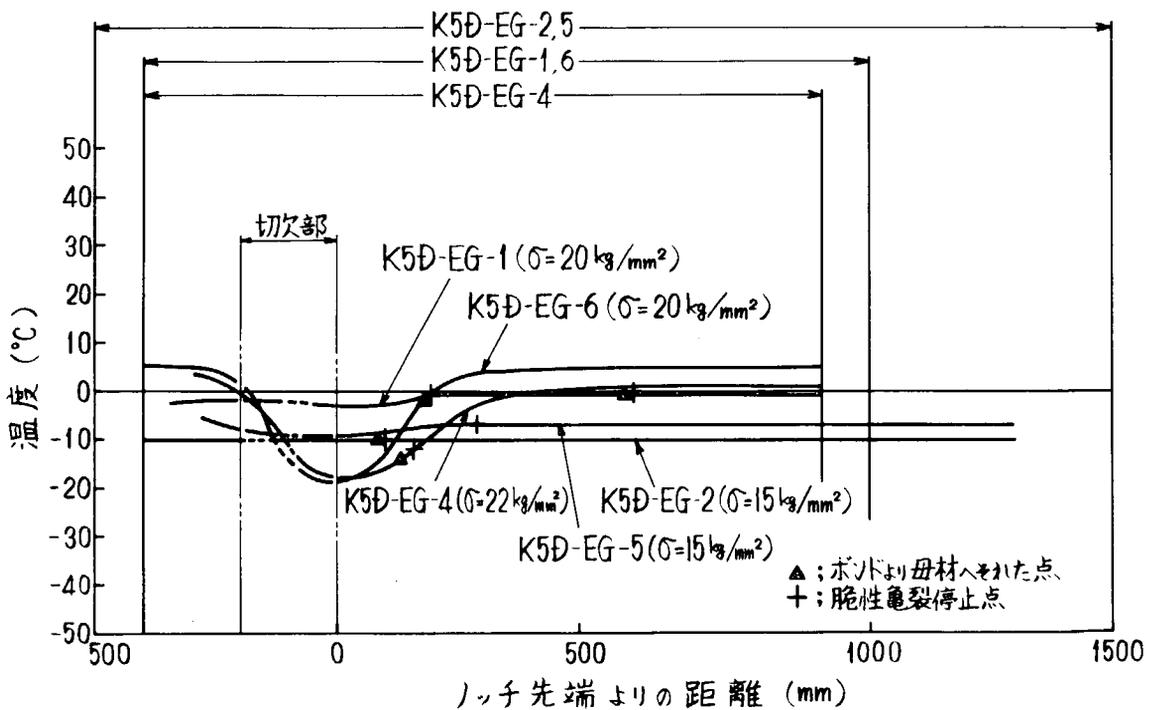


図6.2.3 伝播特性試験における温度分布
(K5D鋼,板厚25.4mm,工外ガス溶接継手)

記号	鋼種	切欠位置	備考
○	K5D鋼(25.4)	母材	中形伝播試験
●		IL外ロガス溶接継手	
△	K5D鋼(25.4)	母材	大形伝播試験(参考)

注) 表3.1参照

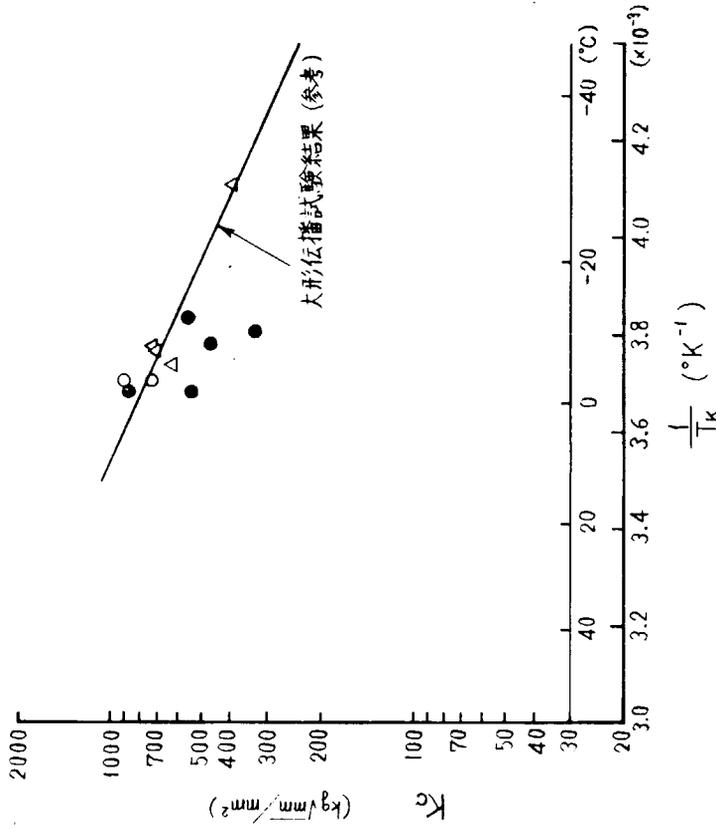


図6.2.5 伝播特性試験によるK5D鋼母材およびIL外ロガス溶接継手部の脆性破壊伝播特性

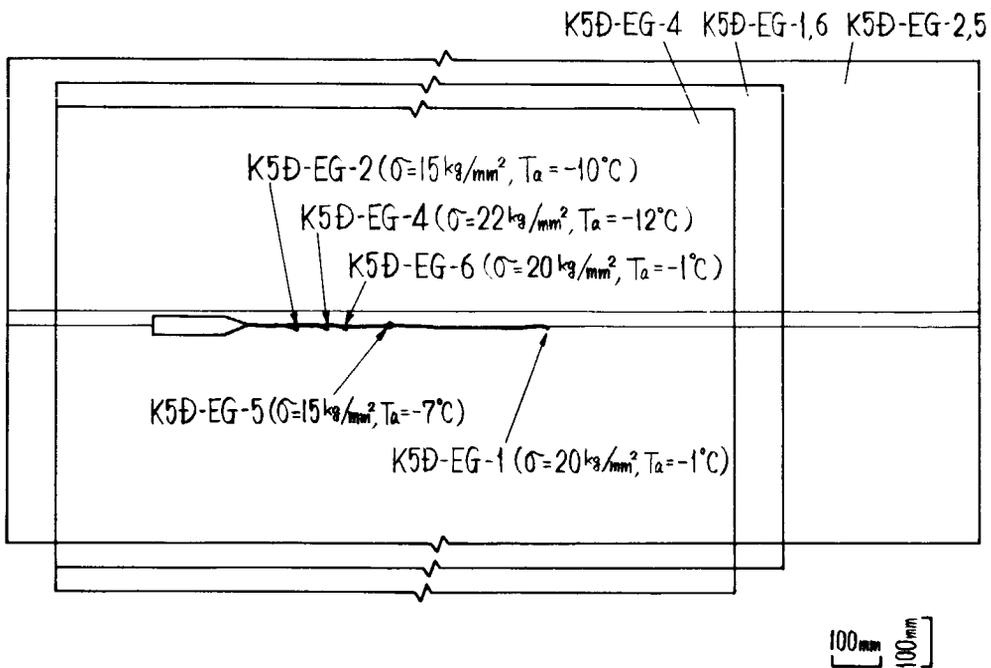


図6.2.4 伝播特性試験による脆性電裂伝播径路 (K5D鋼,板厚25.4mm,IL外ロガス溶接継手)

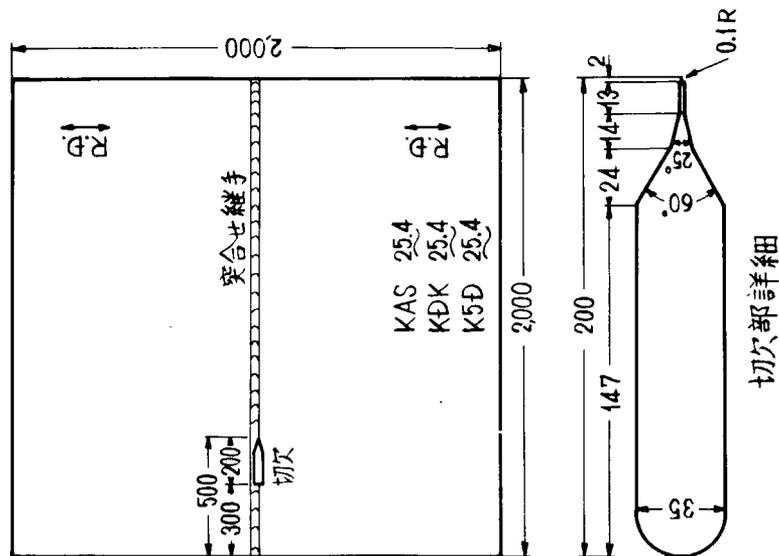
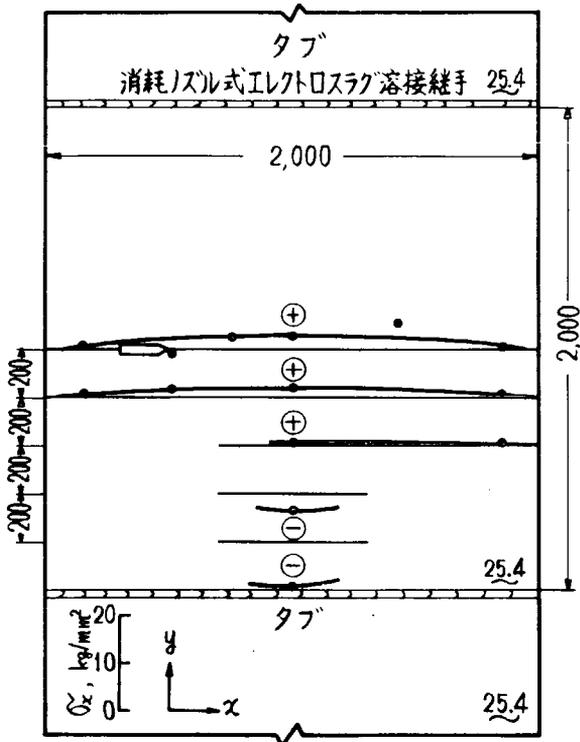


図6.3.1 大形伝播試験片形状

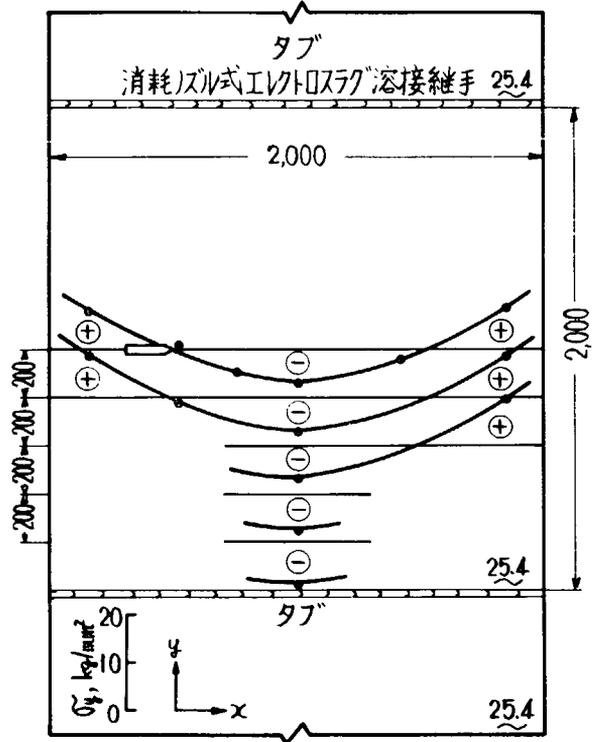
表6.3.1 大形伝播試験内容一覧

鋼種	溶接法	板幅 (mm)	使用試験機および試験片と ワフ板との溶接に用いた溶接法*
KAS (25.4)	(母材)	2,000	A
	VASCON-II法		
	フィルタソルト法	2,000 または 1,500	
KDK (25.4)	(母材)	2,000	B
	3電極片面1層		
K5D (25.4)	(母材)	2,000 または 1,700	A
	VASCON-II法	2,000 または 1,500	
	3電極片面1層	2,000	B
	フィルタソルト法		

* A; 1,000tonテストリグ(ピン間距離約6m), CO₂半自動溶接
 B; 3,000tonテストリグ(ピン間距離約5m), 消耗ノズル式ILFロズラグ溶接



a) X方向の残留応力



b) Y方向の残留応力

図6.3.2 タブ溶接による試験片中央部附近での残留応力測定結果
(KDK鋼, 板厚25.4mm, 母材試験片)

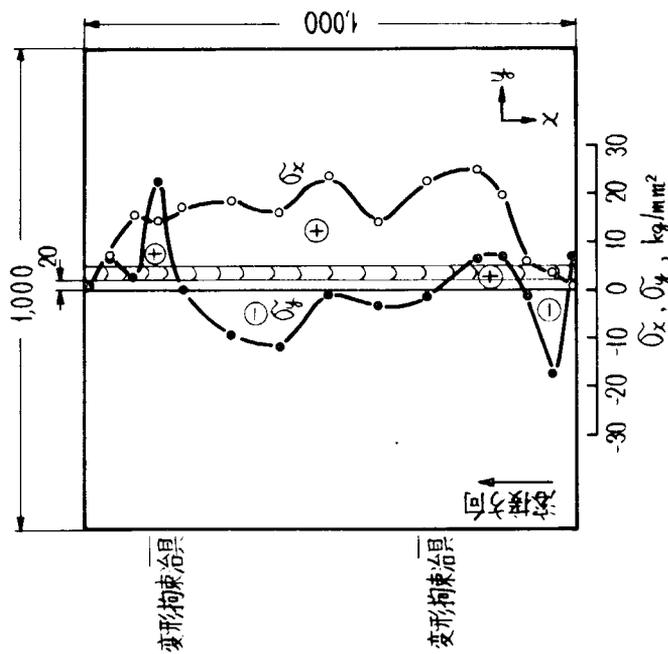


図6.3.3 消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接継手部の残留応力
(KDK鋼, 板厚25.4mm)

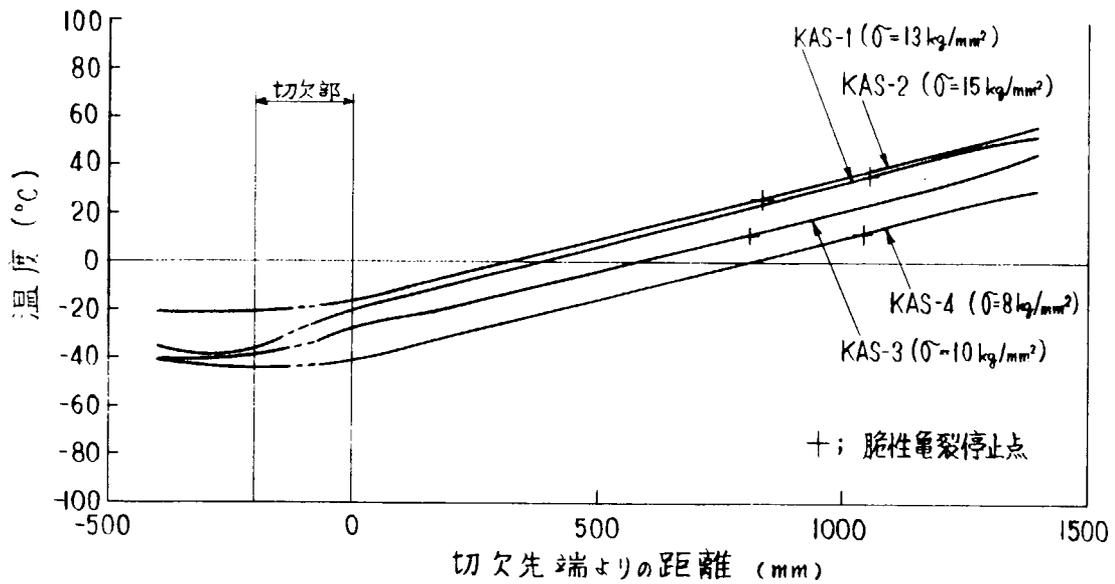


図6.3.4 大形伝播試験における温度分布
(KAS鋼, 板厚25.4mm, 母材)

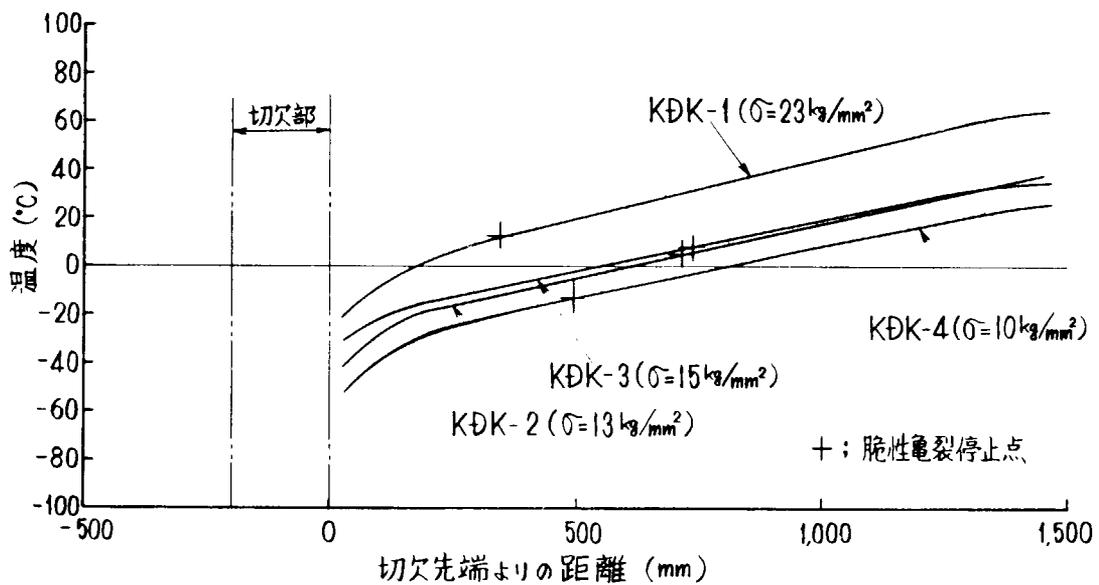


図6.3.5 大形伝播試験における温度分布
(KDK鋼, 板厚25.4mm, 母材)

表6.3.2 各種母材の大形伝播試験結果一覧

鋼種	試験片符号	試験温度分布形式	衝撃エネルギー E_T (kg·m)	クロス応力 σ_g (kg/mm ²)	停止クラック長さ C_0 (mm)	停止温度		脆性破壊伝播抵抗値 K_c (kg√mm/mm ²)					
						T_a (°C)	$10^3/T_k$ (°K ⁻¹)						
KAS (25.4)	KAS-1	勾配型	235	13.0	1055	36	3.24	754					
	KAS-2								15.0	835	26	3.34	723
	KAS-3								10.0	810	11	3.52	472
	KAS-4								8.0	1040	12	3.51	457
KDK (25.4)	KDK-1	勾配型	170	23.0	345	13	3.50	575					
	KDK-2								13.0	712	5	3.60	297
	KDK-3								15.0	736	8	3.56	394
	KDK-4								10.0	496	-13	3.85	150
K5D (25.4)	K5D-1	勾配型	235	11.5	430	-29	4.10	401					
	K5D-2								10.0	1130	-5	3.73	626
	K5D-3								14.4	860	-7	3.76	710
	K5D-4								17.0	600	-8	3.77	723

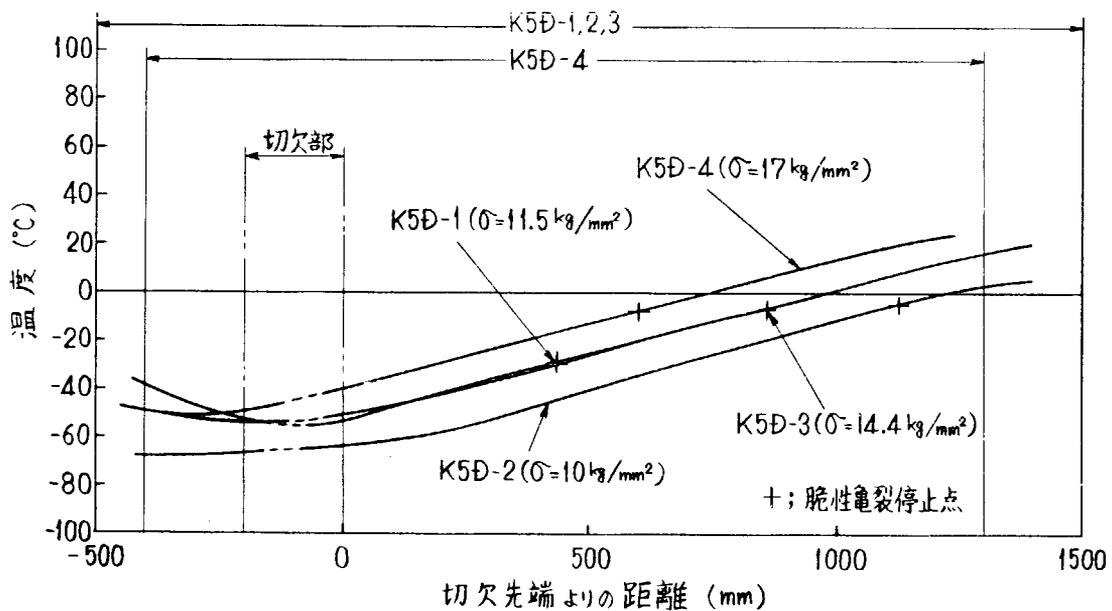


図6.3.6 大形伝播試験における温度分布
(K5D鋼, 板厚25.4 mm, 母材)

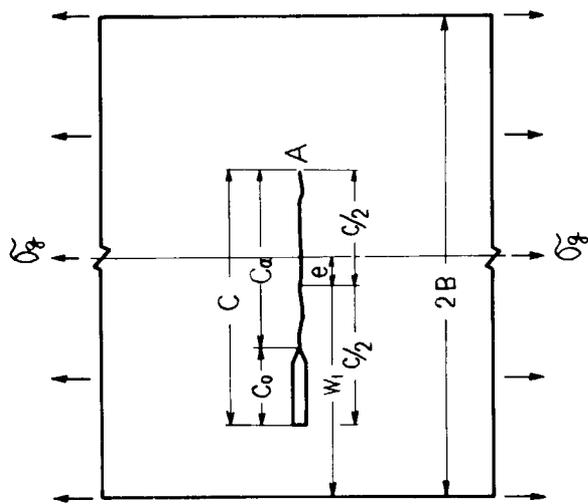


図6.3.7 偏心フラックを有する有限板

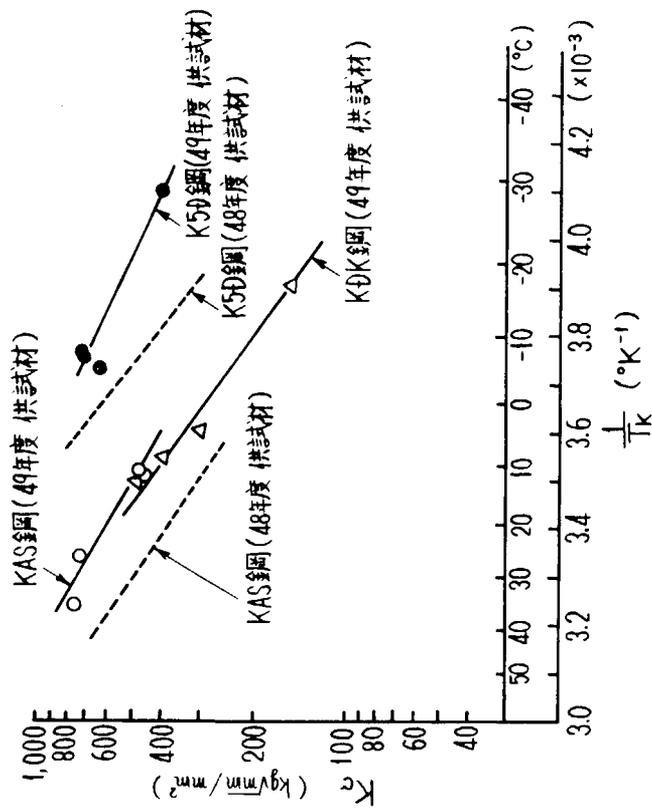


図6.3.8 大形伝播試験による各種母材の脆性破壊伝播特性

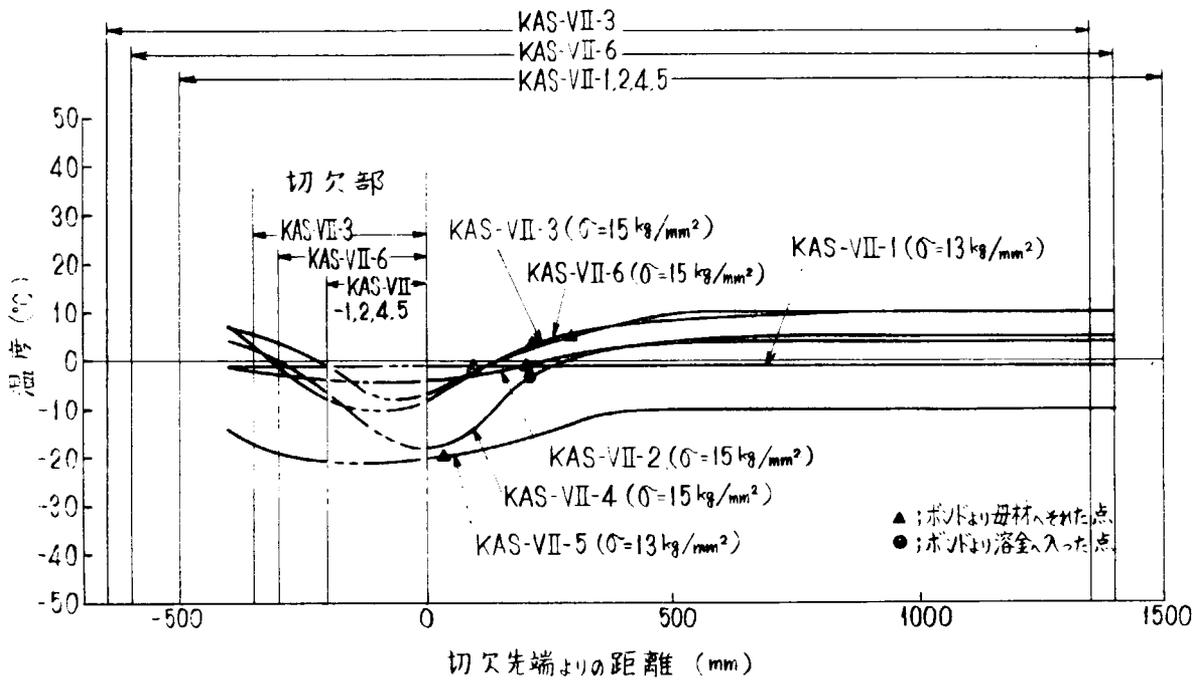


図6.3.9 大形伝播試験における温度分布
(KAS鋼, 板厚25.4mm, VASCON-II法溶接継手)

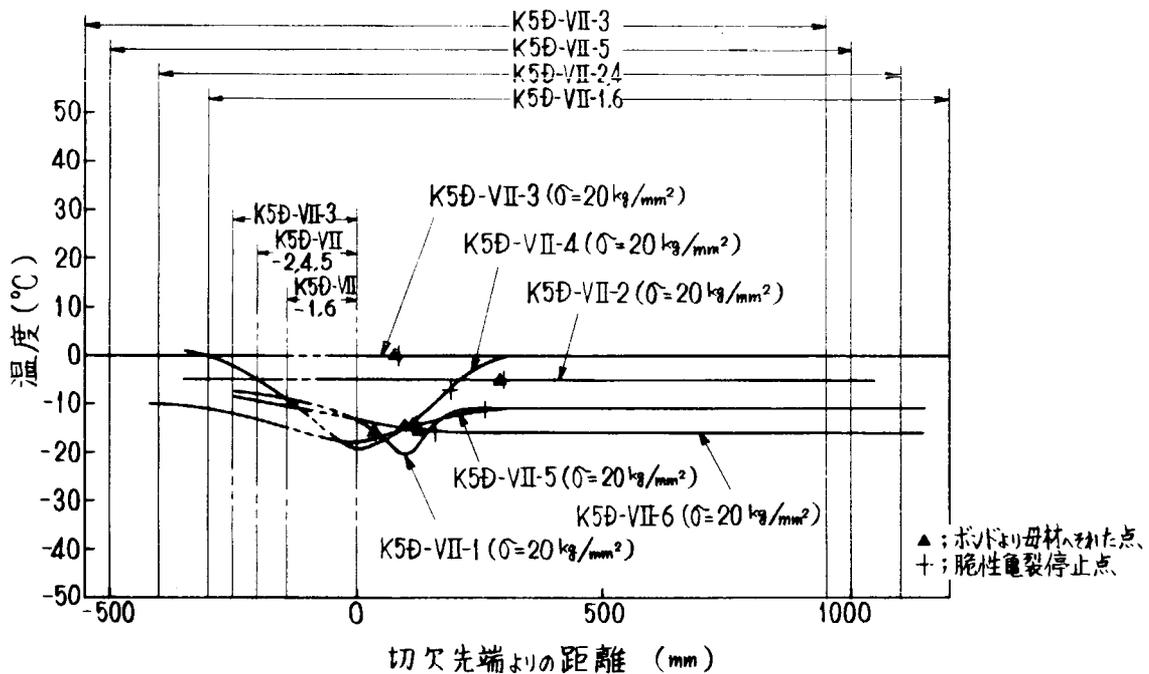
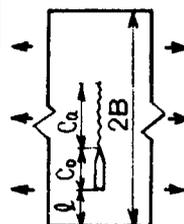


図6.3.10 大形伝播試験における温度分布
(K5D鋼, 板厚25.4mm, VASCON-II法溶接継手)

表6.3.3 VASCON-II法溶接継手についての方形伝播試験結果一覧

鋼種	溶接法	試験片符号	試験片寸法			試験温度 分布形式	衝撃工初率 E _I (kg·m)	ガス応力 σ _g (kg/mm ²)	腐蝕クラック長 Ca (mm)	停止温度 Ta (°C)	隔性破壊 伝播率 K _C (log/mm ²)	備考
			2B (mm)	Co (mm)	l (mm)							
KAS (25.4)	VASCON - II法	KAS-VII-1	2000	200	300	平坦	200	13	> 95	> -1	< 480	クラックはボルト部を95mm伝播した後母材へそれ破断。
		KAS-VII-2	2000	200	300	平坦	200	15	> 200	> -1	< 614	クラックはボルト部を200mm伝播した後母材へそれ破断。
		KAS-VII-3	2000	200 350	300	平坦	200 200	15 15	> 70 > 295	> -12 > 5	— < 805	①クラックはボルト部を70mm伝播し停止。切欠きを再加工。 ②クラックはボルト部を295mm伝播した後母材へそれ破断。
		KAS-VII-4	2000	200	300	平坦	200	15	> 500	> 4	< 846	クラックはボルト部を210mm伝播した後溶接金属へ入り、溶接金属を貫通破断。
		KAS-VII-5	2000	200	300	平坦	200	13	> 35	> -20	—	クラックはボルト部を35mm伝播した後母材へそれC=65mmにて枝分れし破断。
		KAS-VII-6	2000	300	300	平坦	200	15	> 210	> 3	< 699	①打撃3回でクラック発生せず。切欠きを再加工。 ②クラックはボルト部を210mm伝播した後母材へそれ破断。
K5D (25.4)	VASCON - II法	K5D-VII-1	1500	140	160	平坦	200	20	> 36	> -16	—	クラックはボルト部を36mm伝播した後母材へそれ枝分れし停止。
		K5D-VII-2	1500	200	200	平坦	300	20	290	-5	830	溶接金属中に切欠きを入れた試験。クラックは溶接金属とボルト寄りに伝播し、C=230mmで逆ボルト寄りに移り、Ca=290mmにて母材へそれHAZで停止。
		K5D-VII-3	1500	250	300	平坦	200	20	> 80	> 0	< 630	①C=20kg/mm ² で保持中クラック発生。切欠きを再加工。 ②クラックはボルト部を80mm伝播した後母材へそれ破断。
		K5D-VII-4	1500	200	200	平坦	300	20	> 100	> -14	< 602	溶接金属中央に切欠きを入れて試験。クラックはC=100mmにてボルトを横切り母材へそれ、母材にて停止。
		K5D-VII-5	2000 1500	200 200	300 300	平坦 平坦	200 200	15 20	> 30 120	> -24 -14	— 627	①前中(C=12kg/mm ²)クラック発生。切欠きを再加工。②クラックはボルト部を80mm伝播後溶接金属を横切り他方のボルトを伝播しHAZにて停止。
		K5D-VII-6	1500	140	160	平坦	200	20	> 120	> -15	< 552	クラックはボルト部を120mm伝播した後母材へそれ破断。



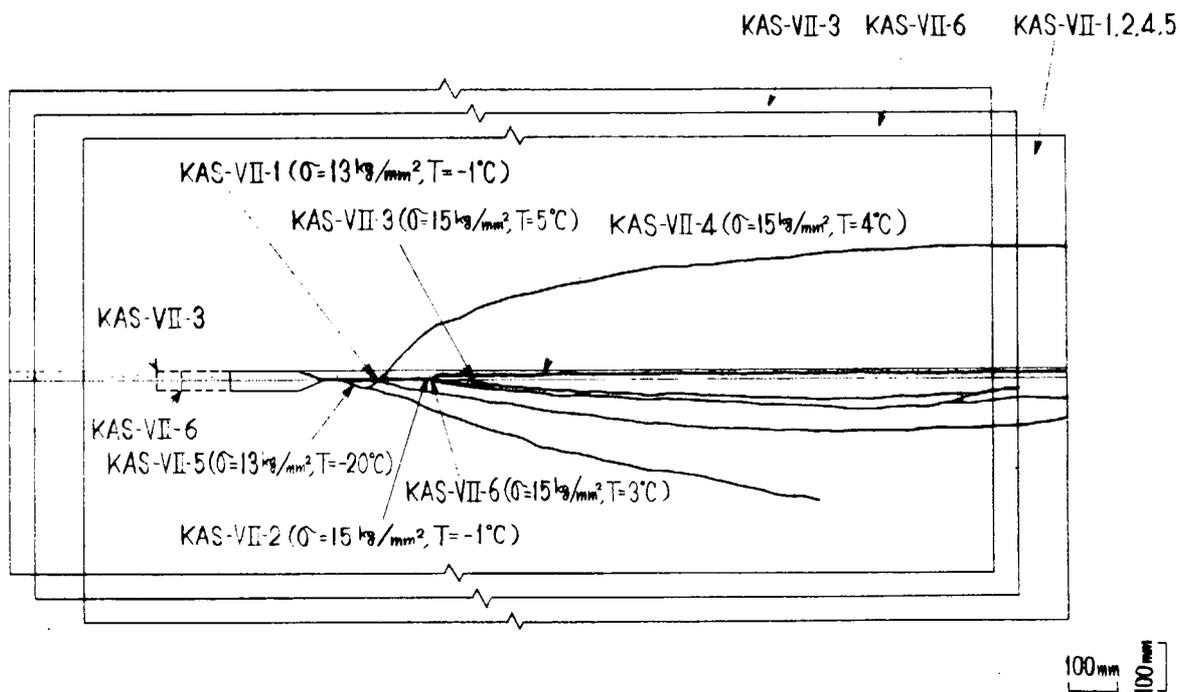


図6.3.11 大形伝播試験による脆性亀裂伝播径路
(KAS鋼, 板厚25.4mm, VASCON-II法溶接継手)

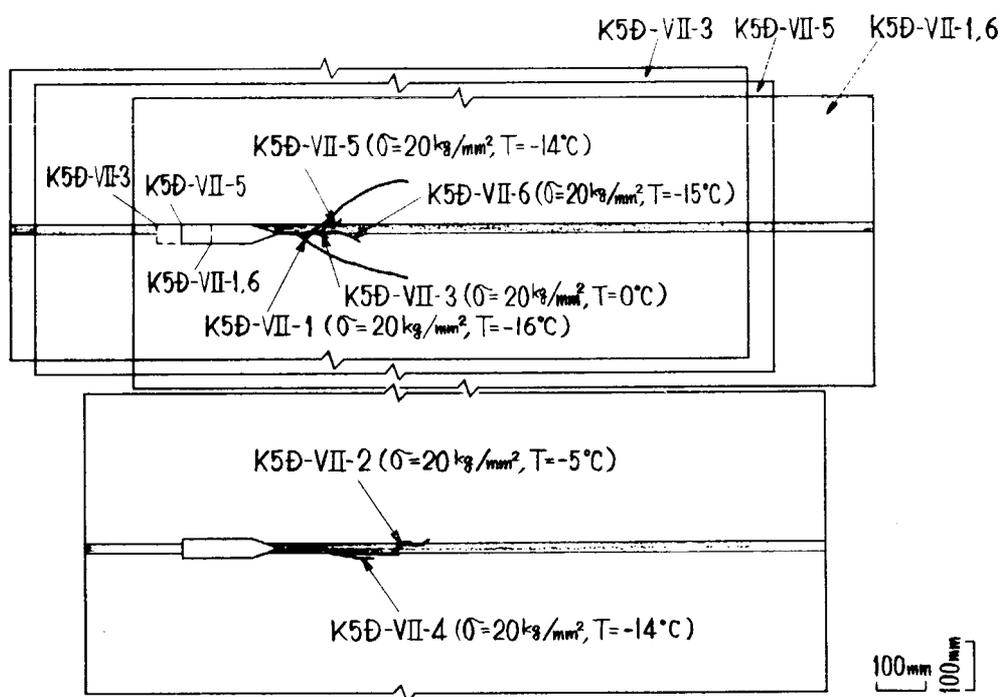
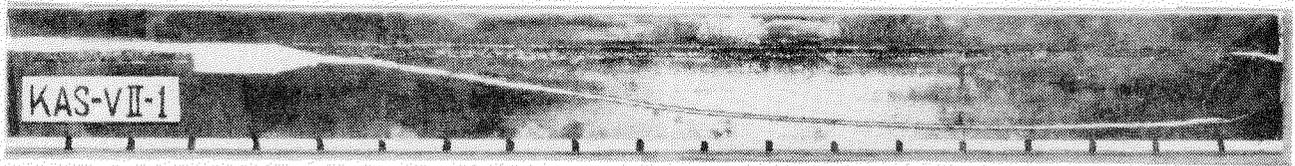
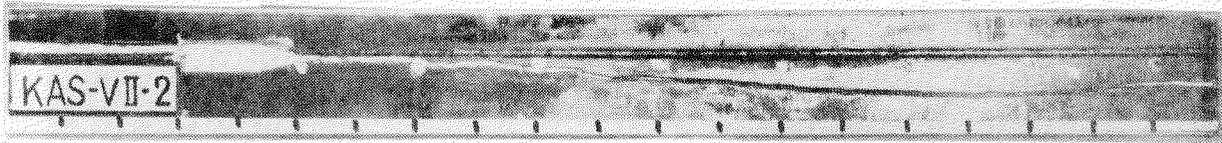


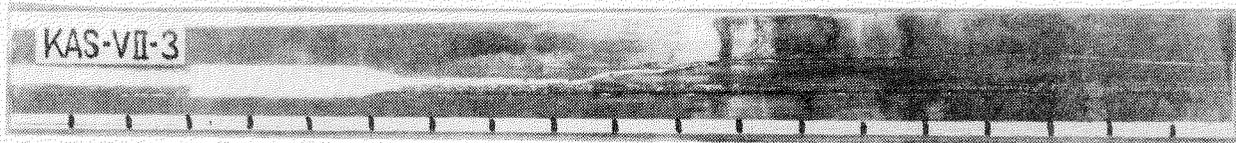
図6.3.12 大形伝播試験による脆性亀裂伝播径路
(K5D鋼, 板厚25.4mm, VASCON-II法溶接継手)



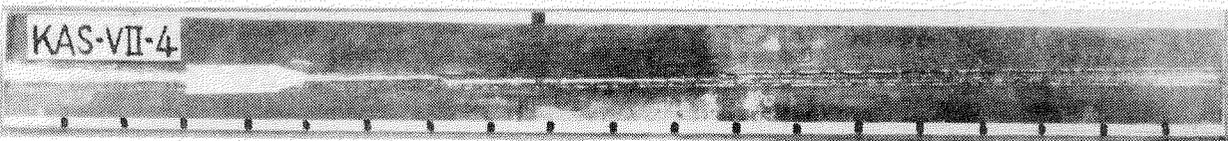
試験片幅 $2B = 2,000$ mm



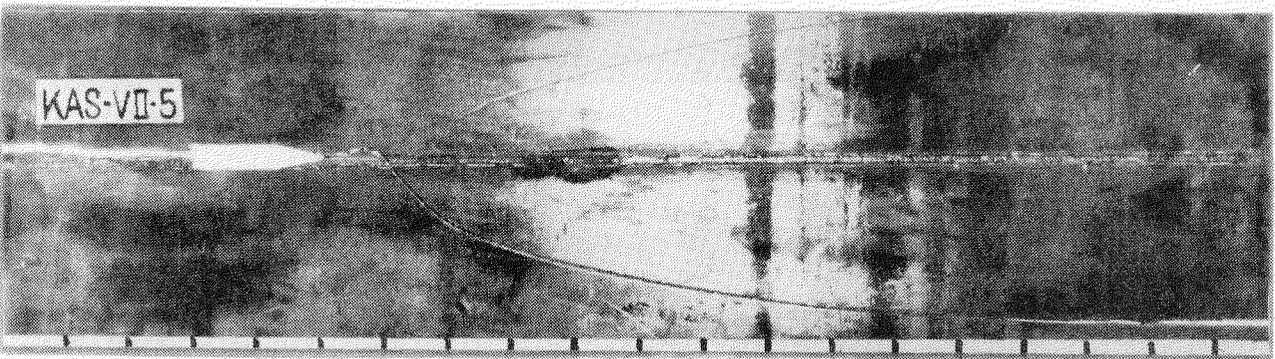
試験片幅 $2B = 2,000$ mm



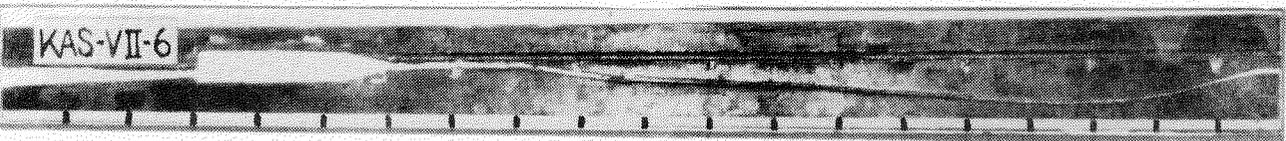
試験片幅 $2B = 2,000$ mm



試験片幅 $2B = 2,000$ mm



試験片幅 $2B = 2,000$ mm

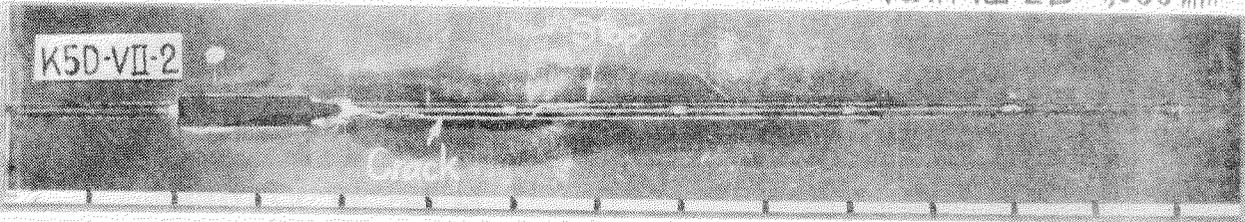


試験片幅 $2B = 2,000$ mm

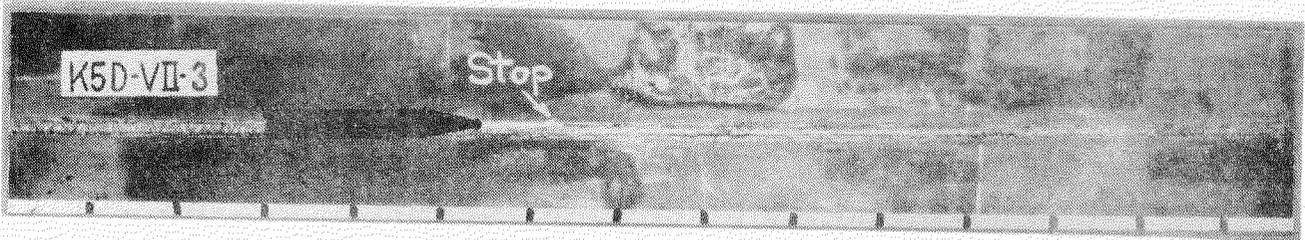
写真 6.3.1 大形伝播試験による脆性亀裂伝播経路
(KAS鋼, VASCON-II法溶接継手)



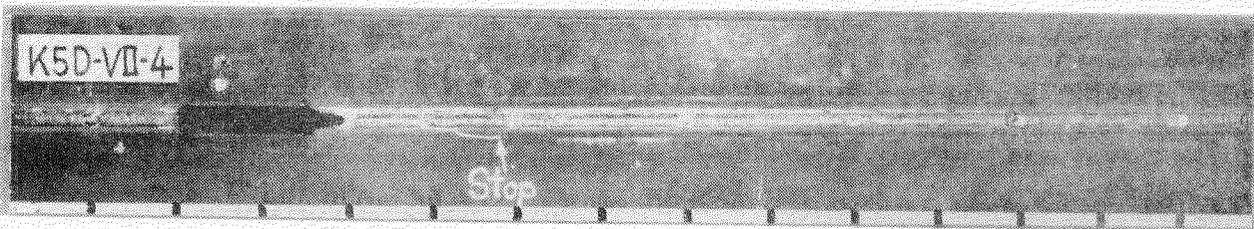
試験片幅 $2B=1,500$ mm



試験片幅 $2B=1,500$ mm



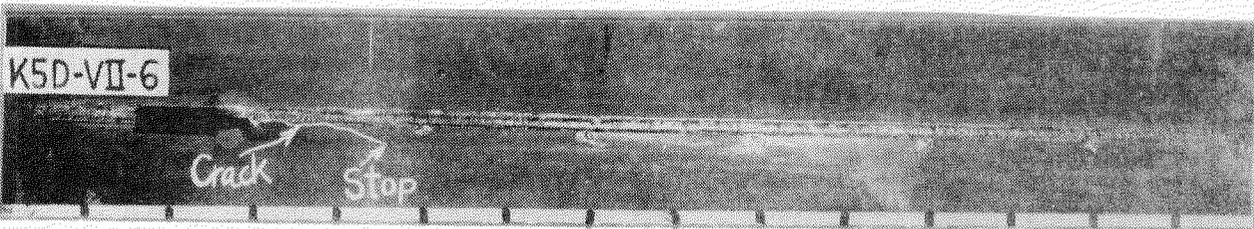
試験片幅 $2B=1,500$ mm



試験片幅 $2B=1,500$ mm



試験片幅 $2B=1,500$ mm



試験片幅 $2B=1,500$ mm

写真 6.3.2 大形伝播試験による脆性亀裂伝播経路
(K5D鋼, VASCON-II法溶接継手)

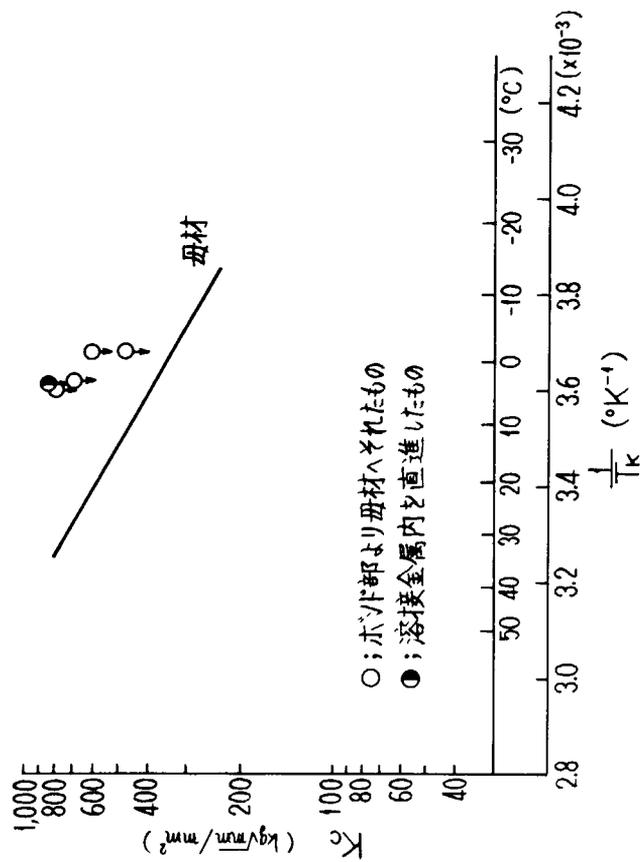


図6.3.13 大形伝播試験によるKAS鋼VASCÓN-II法
溶接継手部の脆性破壊伝播特性

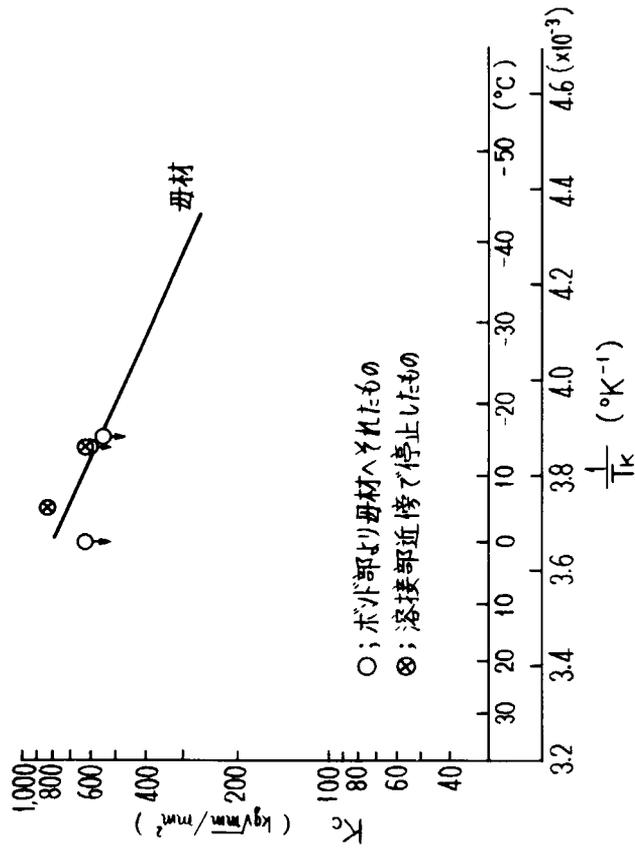


図6.3.14 大形伝播試験によるK55鋼VASCÓN-II法
溶接継手部の脆性破壊伝播特性

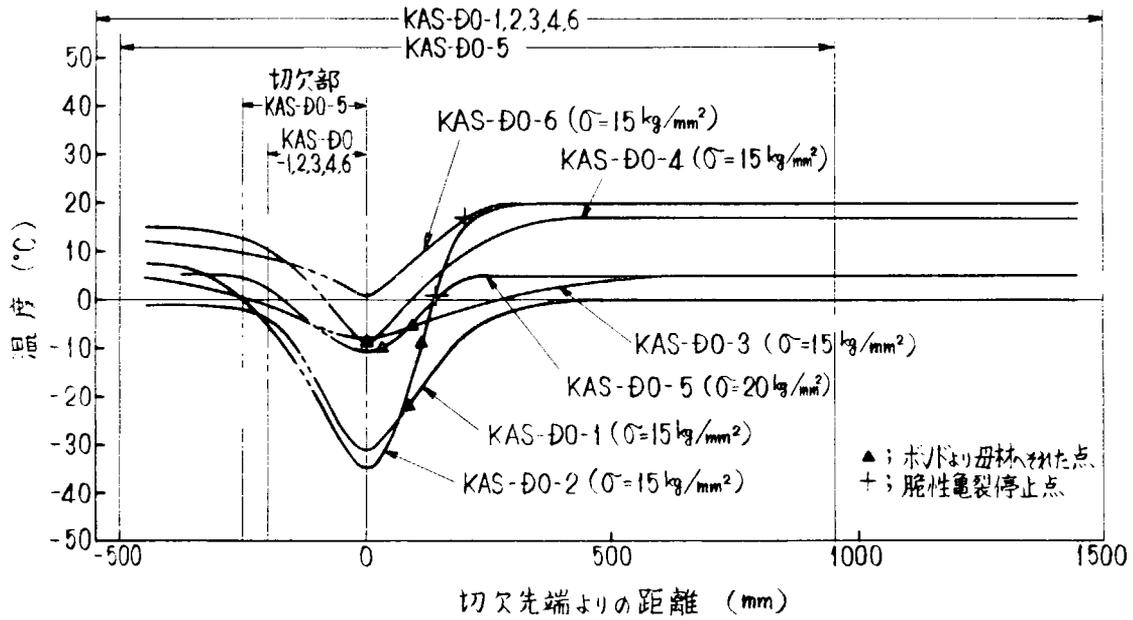


図6.3.15 大形伝播試験における温度分布
(KAS鋼, 板厚 25.4mm, デルタオシルト法溶接継手)

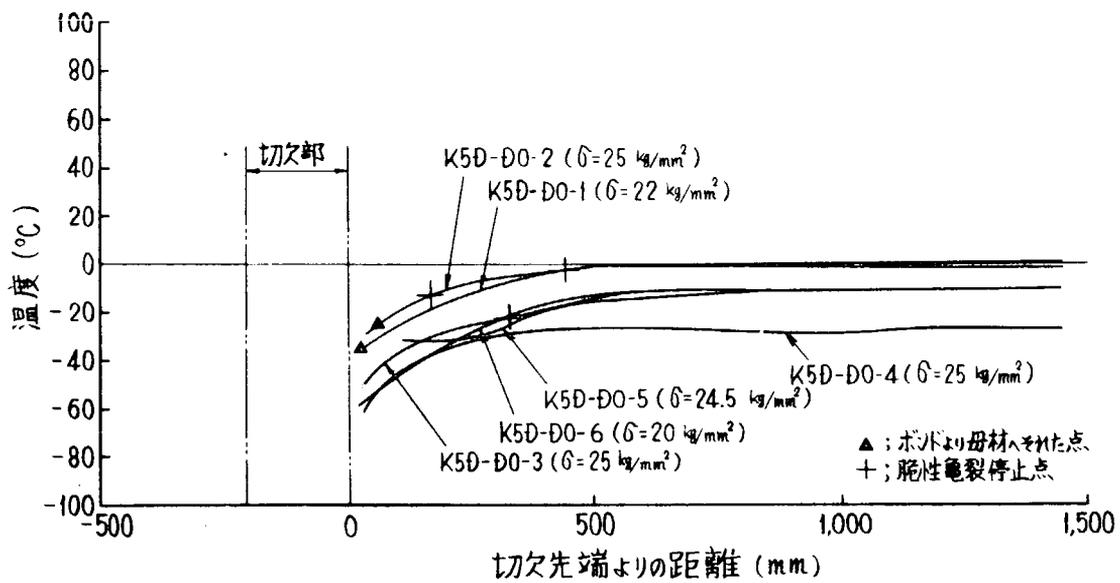
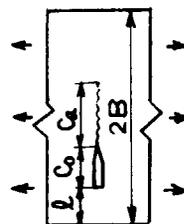


図6.3.16 大形伝播試験における温度分布
(K5D鋼, 板厚 25.4mm, デルタオシルト法溶接継手)

表6.3.4 デルタオシシレット法溶接継手についての大形伝播試験結果一覧

鋼種	溶接法	試験符号	試験片符号		試験温度 分布形式	衝撃エネルギー E_I (kg·m)	ガス圧力 O_g (kg/mm ²)	停止距離 C_0 (mm)	停止温度 T_a (°C)	脆性破壊 伝播熱処理 K_C (kg/mm ² /min)	備考	
			2B (mm)	C_0 (mm)								
KAS (25.4)		KAS-D0-1	2,000	200	300	平坦型	200	15	> 85	> -22	< 515	クランクは85mmボルト部を伝播した後、母材へそれぞれ破断。
		KAS-D0-2	2,000	200	300	平坦型	300	15	> 110	> -9	< 526	クランクは110mmボルト部を伝播した後、母材へそれぞれ停止。
		KAS-D0-3	2,000	200	300	平坦型	300	15	> 90	> -6	< 519	クランクは90mmボルト部を伝播した後、母材へそれぞれ破断。
		KAS-D0-4	2,000	200	300	平坦型	300	15	—	—	—	クランクはクランクより直ちに母材へそれぞれ破断。
		KAS-D0-5	1,500	200 250	200 200	平坦型 平坦型	200 200	20 20	— > 30	— > -10	— < 555	①クランクはクランクより母材へそれぞれ停止。クランクを再加工。 ②クランクは30mmボルト部を伝播した後、母材へそれぞれ破断。
		KAS-D0-6	2,000	200	200	平坦型	300	15	200	17	615	クランクは200mmボルト部を伝播して溶接断面箇所にて停止。
K5D (25.4)	デルタオシシレット法	K5D-D0-1	2,000	200	300	平坦型	170	22	(445)	(-2)	(775)	クランクはクランクより直ちに母材へそれぞれ、 $C_a=445$ mmにて停止。
		K5D-D0-2	2,000	200	300	平坦型	170	25	(170)	(-12)	(636)	クランクは63mmボルト部を伝播した後、母材へそれぞれ $C_a=170$ mmにて停止。
		K5D-D0-3	2,000	200	300	平坦型	170	25	330	-22	785	クランクは溶接金属を330mm伝播して停止。
		K5D-D0-4	2,000	200	300	平坦型	170	25	> 420	> -27	< 850	クランクはボルト部を貫通破断。
		K5D-D0-5	2,000	310	300	平坦型	170	24.5	> 500	> -16	< 910	①クランクは $C_a=110$ mmにて停止。クランクを再加工 ②真空中($O=24.5$ kg/mm ²)にクランク発生、溶接金属を貫通破断
		K5D-D0-6	2,000	200	300	平坦型	170	20	> 600	> -10	< 806	クランクは溶接金属を貫通破断。

()内は母材にて停止したものに對する値



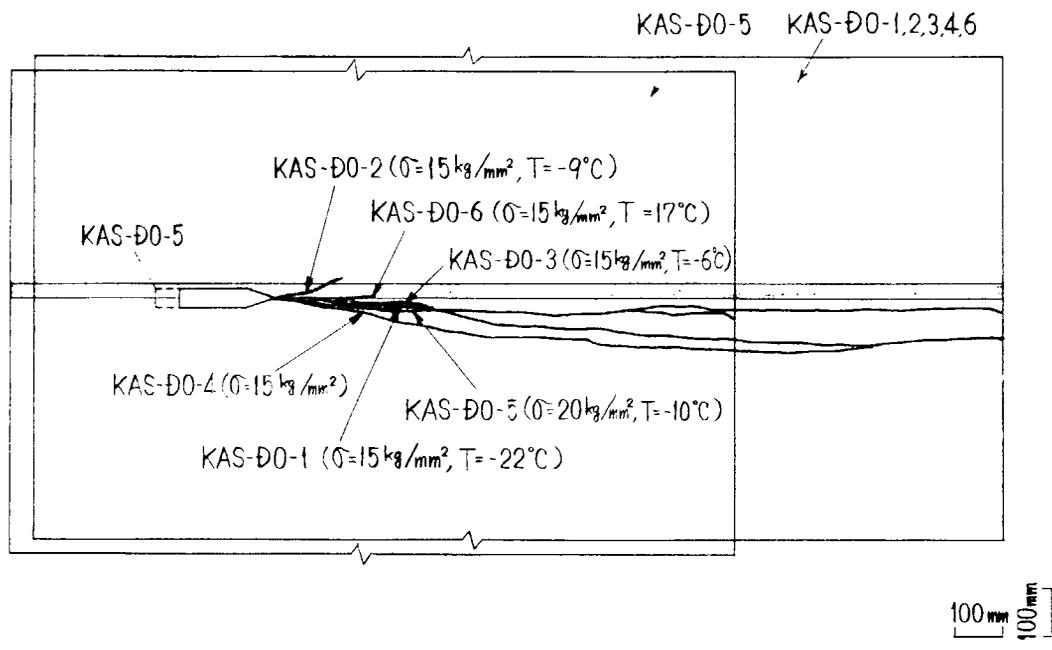


図6.3.17 大形伝播試験による脆性亀裂伝播径路
(KAS鋼,板厚25.4mm,デルタオシレット法溶接継手)

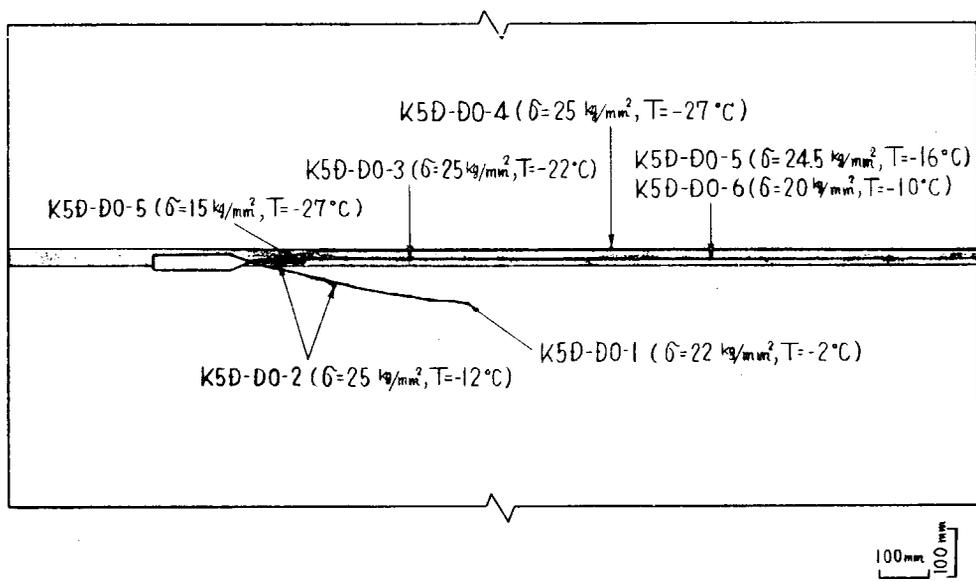
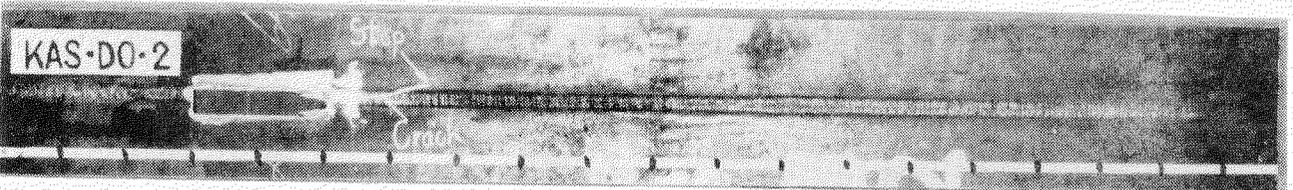


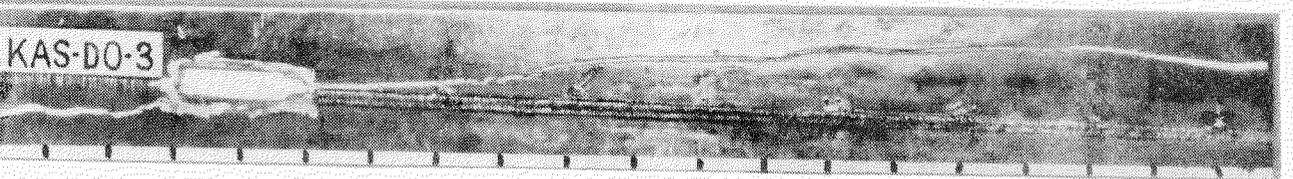
図6.3.18 大形伝播試験による脆性亀裂伝播径路
(K5D鋼,板厚25.4mm,デルタオシレット法溶接継手)



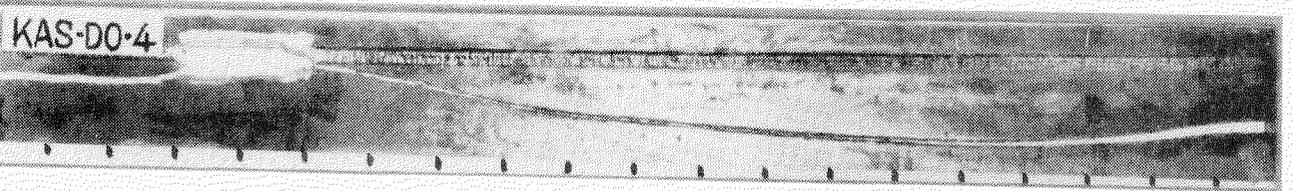
試験片幅 $2B=2,000$ mm



試験片幅 $2B=2,000$ mm



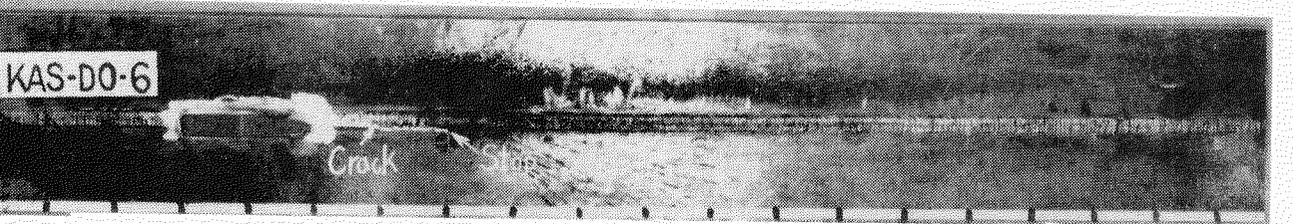
試験片幅 $2B=2,000$ mm



試験片幅 $2B=2,000$ mm



試験片幅 $2B=1,500$ mm



試験片幅 $2B=2,000$ mm

写真6.3.3 大形伝播試験による脆性亀裂伝播経路
(KAS鋼, テルタオシルト法溶接継手)

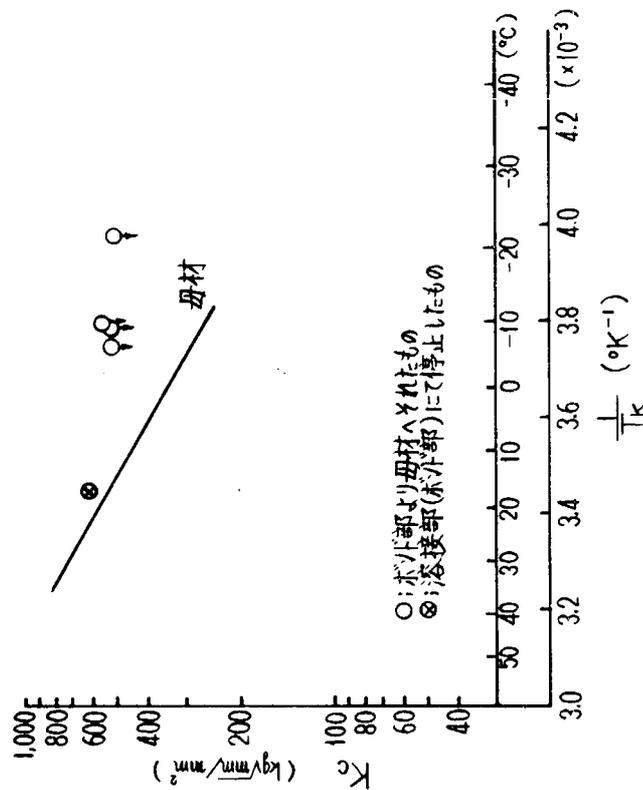


図6.3.19 大形伝播試験によるKAS鋼の脆性破壊伝播特性
 溶接継手部の脆性破壊伝播特性

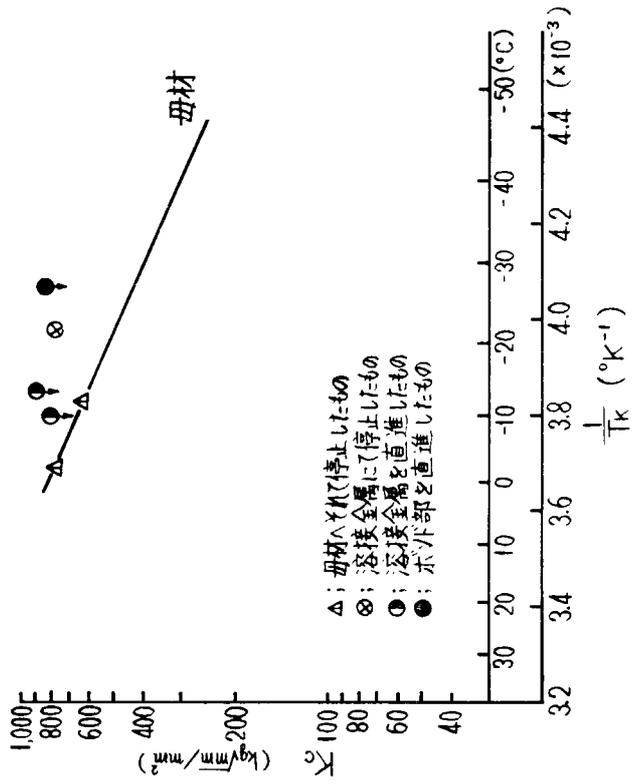


図6.3.20 大形伝播試験によるK5D鋼の脆性破壊伝播特性
 溶接継手部の脆性破壊伝播特性

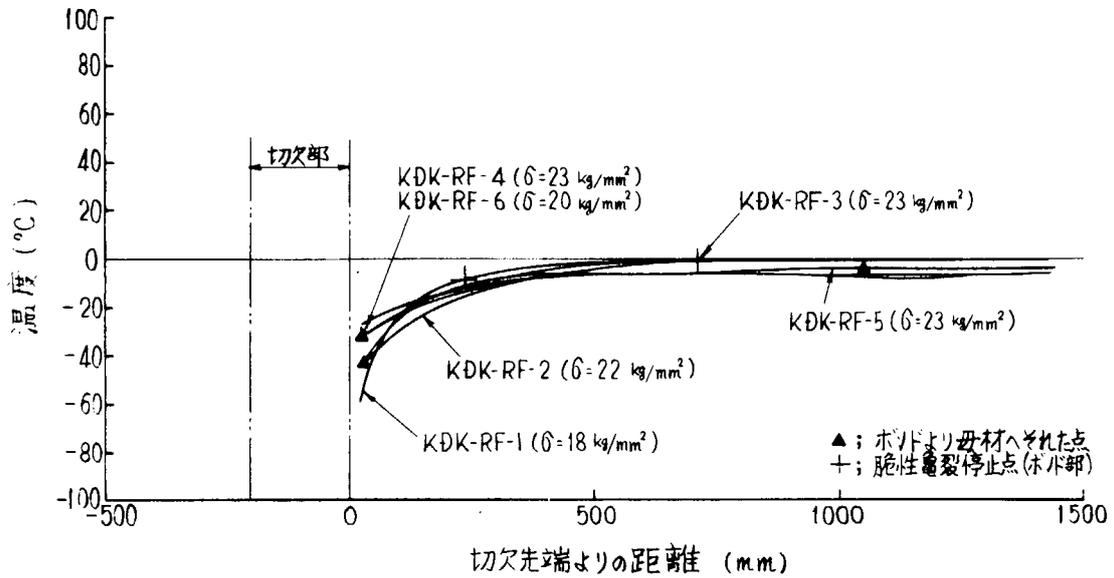


図6.3.21 大形伝播試験における温度分布
(KDK鋼, 板厚25.4mm, 3電極片面層溶接継手)

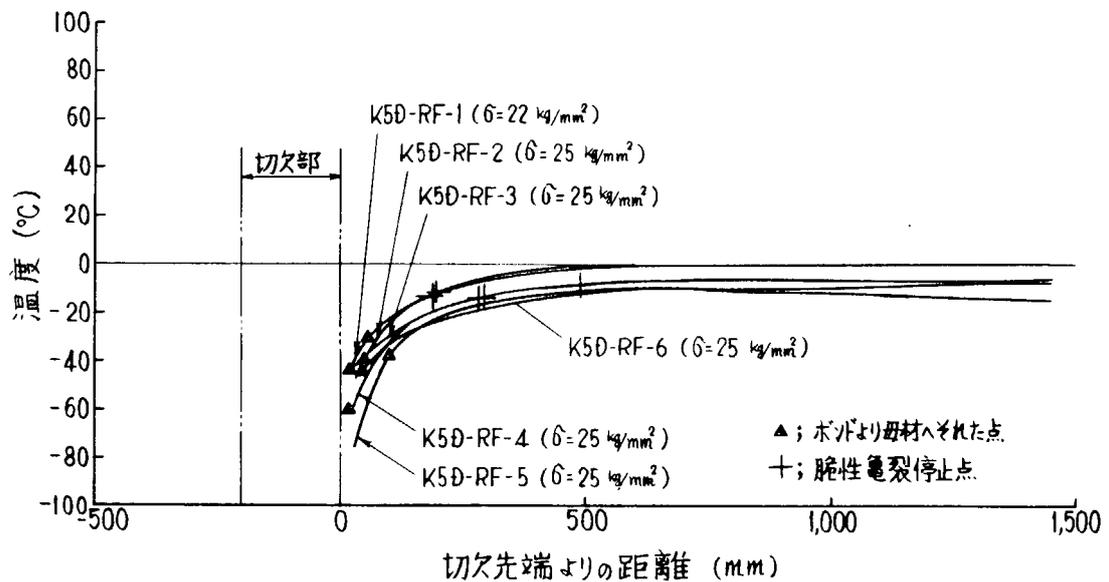
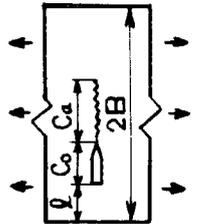


図6.3.22 大形伝播試験における温度分布
(K5D鋼, 板厚25.4mm, 3電極片面層溶接継手)

表6.3.5 3電極片面1層溶接継手2つ間の大形伝播試験結果一覽

鋼種	溶接法	試験符号	試験片符号			試験温度 分布形式	衝撃力 E _I (log. m)	ガス応力 σ _g (log. mm ²)	停止力 Ca (mm)	停止温度 T _a (°C)	脆性破壊 伝播前値 K _c (log. mm ^{3/2})	備考
			2B (mm)	Co (mm)	l (mm)							
KDK (25.4)	3電極 片面1層	KDK-RF-1					18	240	-8	506	クラックは240mmボルト部を伝播して停止。	
		KDK-RF-2					22	—	—	—	クラックは切欠より直ちに母材へそれ破断。	
		KDK-RF-3	2,000	200	300	平坦型	170	23	712	-2	1,013	クラックは溶接金属を420mm. ボルト部を312mm伝播し停止。
		KDK-RF-4						23	—	—	—	—
		KDK-RF-5						23	>550	>-5	<891	クラックは溶接金属を700mm. ボルト部を360mm伝播した後、母材へそれ破断 (溶接部を直進したのみ)
		KDK-RF-6						20	—	—	—	クラックは切欠より直ちに母材へそれ破断。
K5D (25.4)	3電極 片面1層	K5D-RF-1					22	>65 (190)	>-29 (-12)	<465 (576)	クラックは65mmボルト部を伝播した後、母材へそれCa=190mmにて停止。	
		K5D-RF-2					25	>50 (190)	>-37 (-14)	<514 (655)	クラックは50mmボルト部を伝播した後、母材へそれCa=190mmにて停止。	
		K5D-RF-3	2,000	200	300	平坦型	170	25	(290)	(-14)	(746)	クラックは切欠より直ちに母材へそれCa=290mmにて停止。
		K5D-RF-4						25	(280) (490)	(-14) (-8)	— (920)	クラックは切欠より直ちに母材へそれCa=280および490mmにて停止。
		K5D-RF-5						25	>100 240	>-39 -18	— 702	クラックは100mmガド溝(ボルト部)を伝播したのち枝分かれし、一方は母材へそれ破断。一方はボルト部を伝播しCa=240mmにて停止。
		K5D-RF-6						25	>54	>-42	<515	クラックは54mmガド溝(ボルト部)を伝播した後、母材へそれ破断。

()内は母材にて停止したものに對する値



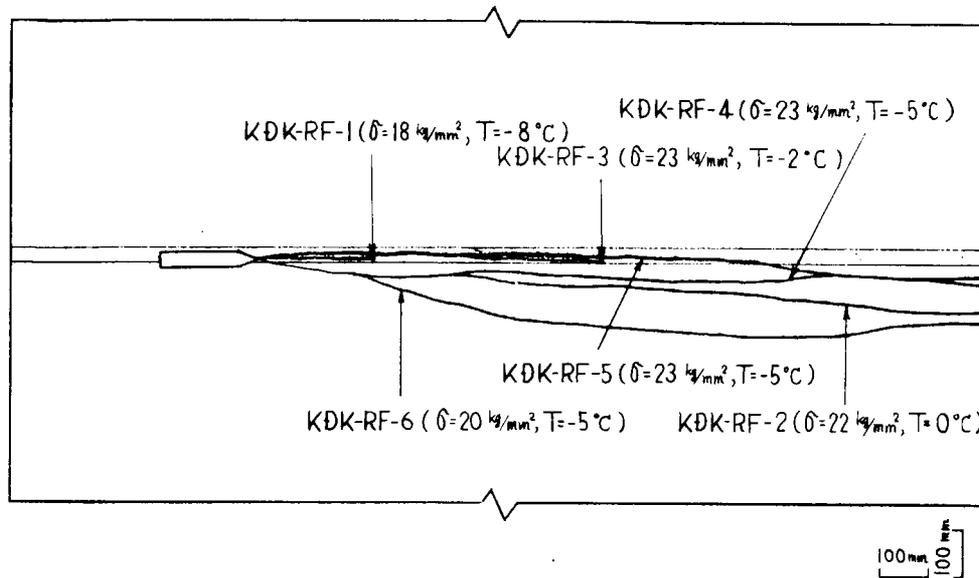


図6.3.23 大形伝播試験による脆性亀裂伝播経路
(KDK鋼, 板厚25.4mm, 3電極片面1層溶接継手)

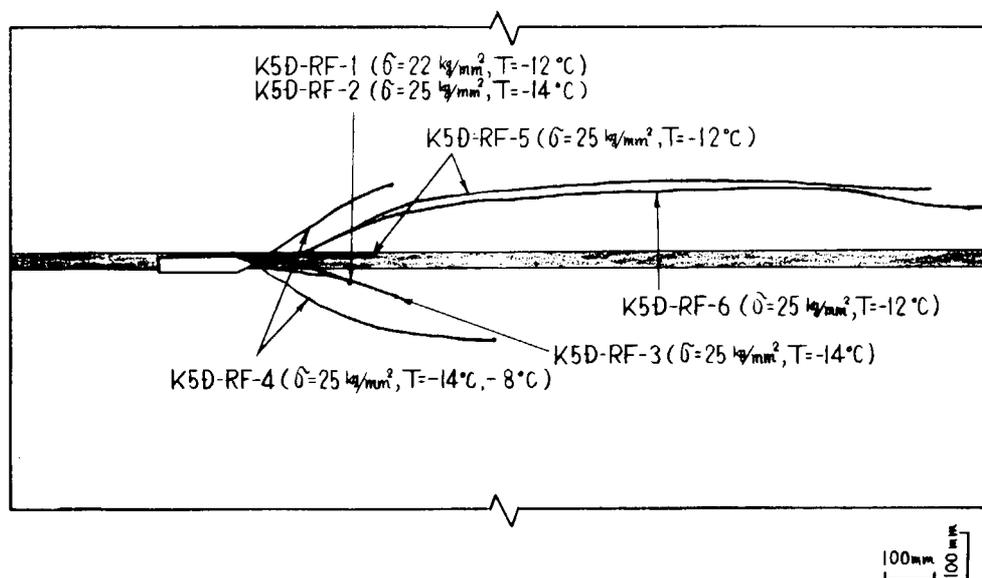


図6.3.24 大形伝播試験による脆性亀裂伝播経路
(K5D鋼, 板厚25.4mm, 3電極片面1層溶接継手)

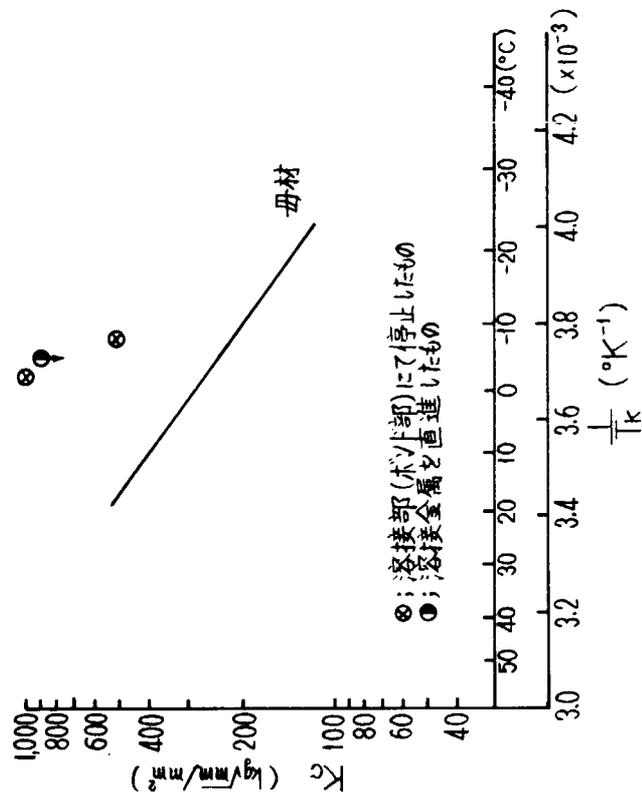


図6.3.25 大形伝播試験によるKDK鋼3電極片面1層
 溶接継手部の脆性破壊伝播特性

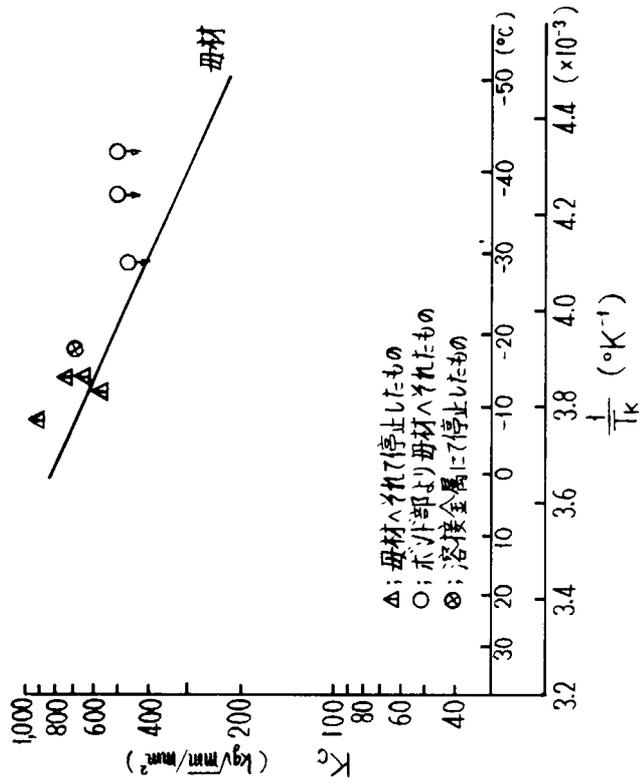


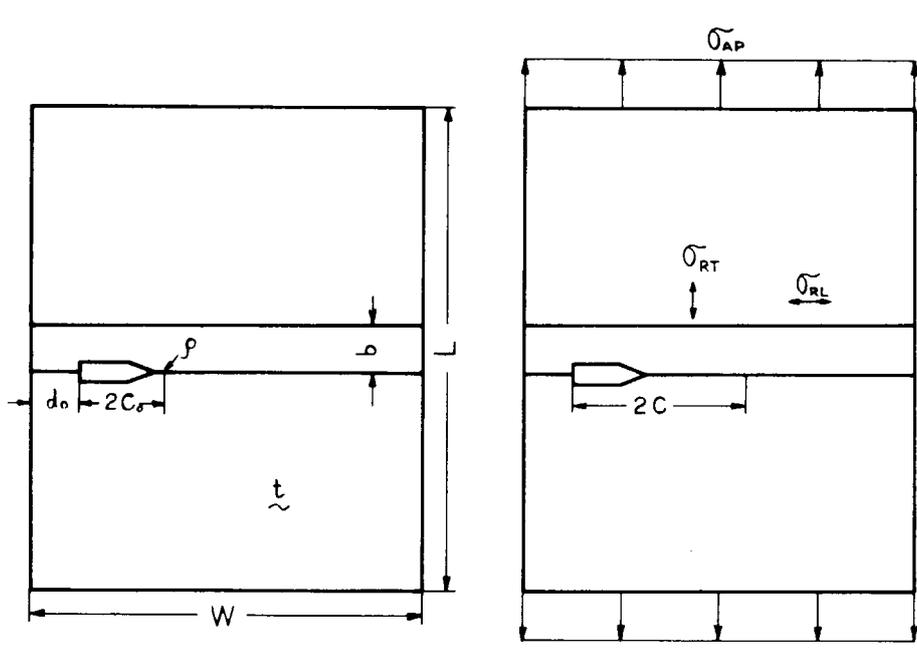
図6.3.26 大形伝播試験によるK5D鋼3電極片面1層
 溶接継手部の脆性破壊伝播特性

表6.4.1 試験項目一覧

試験項目	モデル	エポキシ母材	接着型モデル	溝付き型モデル	残留応力型モデル	備考
1	動的破壊靱性試験	○	○	○		Kcdの把握
2	静的解放試験	○			○	解析法の確認、 残留応力によるK値
3	動的伝播試験	□	≡	≡	≡	試験片略図
	a 伝播試験	○	○	○	○	動的効果、負荷応力、 残留応力
	b 伝播停止試験	○	○	○		Kcaの把握
	c 枝分れ試験	○		○		亀裂の直進性
モデル化要素	靱性劣化部		○	○	○	
	溶接残留力				○	

表6.4.2 供試材の光弾性感度および機械的性質

番号	供試材	光弾性感度 α (mm/kg)		ヤング率 E (kg/mm ²)		密度 ρ (g/cm ³)	縦波の速度 $C_L = \sqrt{E/\rho}$ (m/sec)		機械的性質			備考
		静的	動的	静的	動的		静的	動的	耐力高利は 降伏点 (kg/mm ²)	引張強度 (kg/mm ²)	伸び (%)	
1	エポキシ樹脂 (Araldite B)	1.0	—	300~330	—	1.24	1615	—	2	6	2	三菱長崎 (CASTING)
2	エポキシ樹脂 (Araldite B)	0.824	0.824	341	376	—	—	—	—	—	—	文献7)
3	Hamalite-100	0.394	0.370	382	475	1.279	1710	1907	—	—	—	文献9),10)
4	軟鋼	—	—	21000	—	7.8	5137	—	28	45	30	参考値

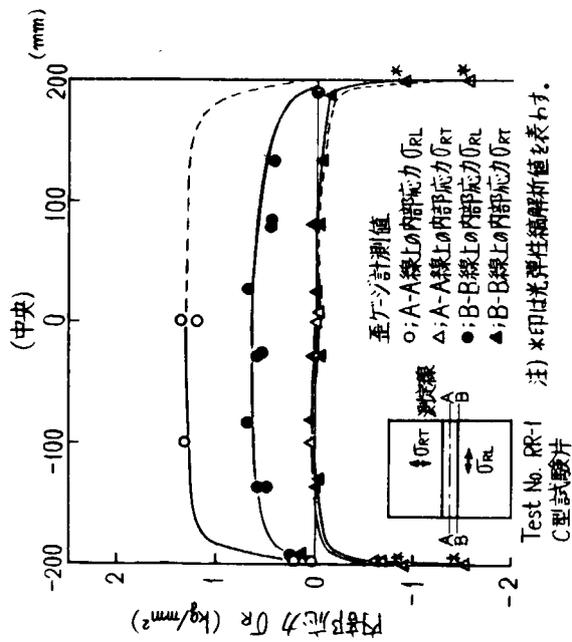


- 記号
- t : 試験片の板厚
 - W : 試験片の板幅
 - L : 試験片の長さ
 - b : 溶接ビードに相当する幅
 - d₀ : 切欠位置
 - ρ : 切欠先端半径
 - 2C₀ : 初期亀裂長さ
 - 2C : 亀裂長さ
 - σ_{AP} : 荷重応力
 - σ_{RT} : 相当する溶接ビード直交方向の残留応力
 - σ_{RL} : 相当する溶接ビード平行方向の残留応力
 - V : 亀裂伝播速度
 - C₁ = √E/P : 試験片の縦波速度
 - C₂ = √G/P : 試験片の横波速度

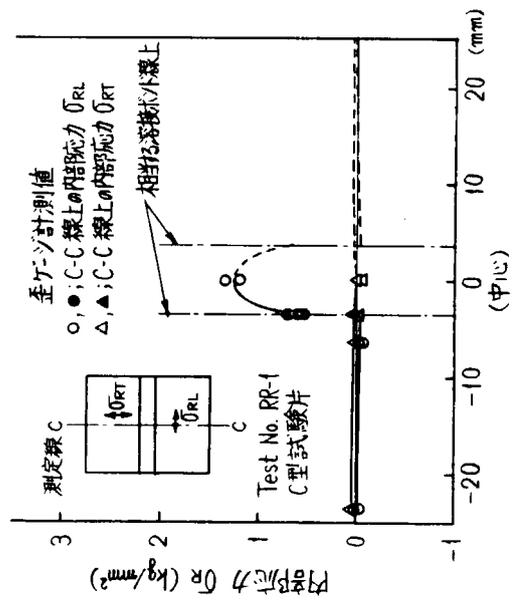
図6.4.1 溶接部モデル試験片

表6.4.3 試験片の形状寸法

番号	試験片名	型名	板厚 t (mm)	板幅 W (mm)	板の長さ L (mm)	溶接ビードに 相当する幅 b (mm)	切欠位置 d ₀ (mm)	切欠先端半径 ρ (mm)	初期亀裂長さ 2C ₀ (mm)	備考
1	動的破壊靱性 試験片	⊕5	5	400	550	0	100	0.05	200	5割中央切欠型
		⊕6	5	400	550	0	80	0.05	240	6割中央切欠型
2	静的解放試験片 および 動的伝播試験片	A	6	300	500	0	30	0.05	30	
		B	5	380	600	0 あるいは7.2	45	0.05	45	
		C	5	400	600	0 あるいは7.2	50	0.05	50	
3	鋼の伝播試験片	—	25.4	2,000	1,500	20 ~40	300	0.05	200	参考値

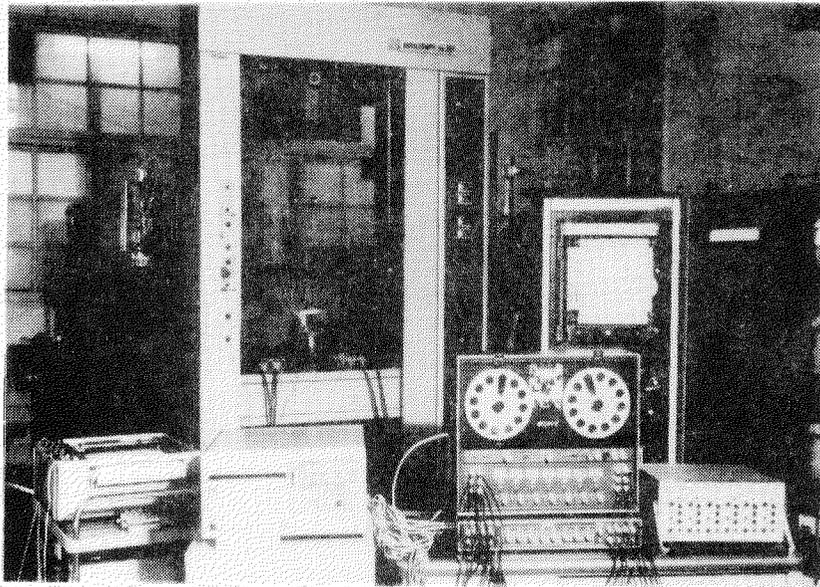


a) 残留応力型モデルの溶接部に相当部分の内部応力分布



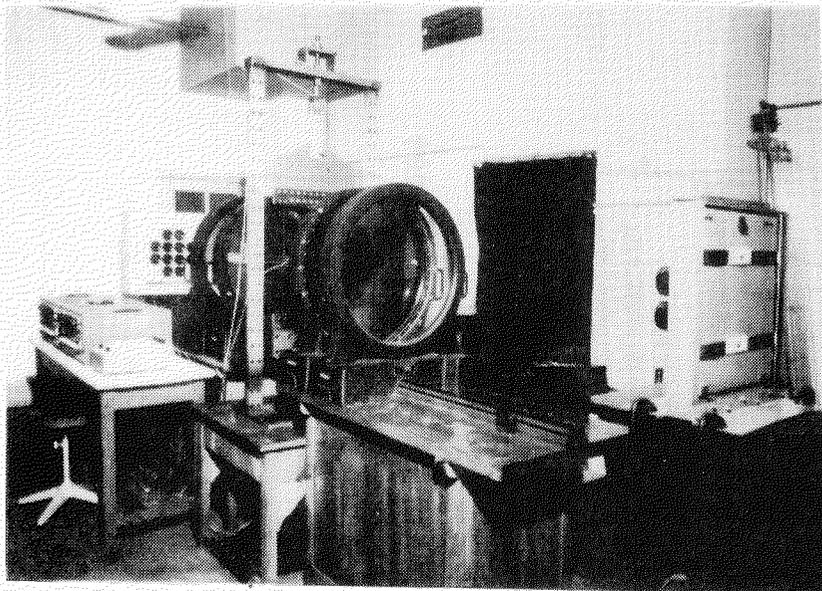
b) 残留応力型モデル試験片中央部における、相当する溶接線直交方向の内部応力分布

図6.4.2 残留応力型モデルの内部応力分布



- | | |
|--------------|--------------|
| A: 試験片 | D: 直流アンプ(動歪) |
| B: イラスト引張試験機 | E: データレコーダ |
| C: XYレコーダ | F: 電磁オシログラフ |

写真6.4.1 動的破壊靱性試験装置



- | | |
|-----------|---------|
| A: 試験片 | D: 光学系 |
| B: 光源部 | E: カメラ部 |
| C: 発光遅延装置 | |

写真6.4.2 動的弾性試験装置

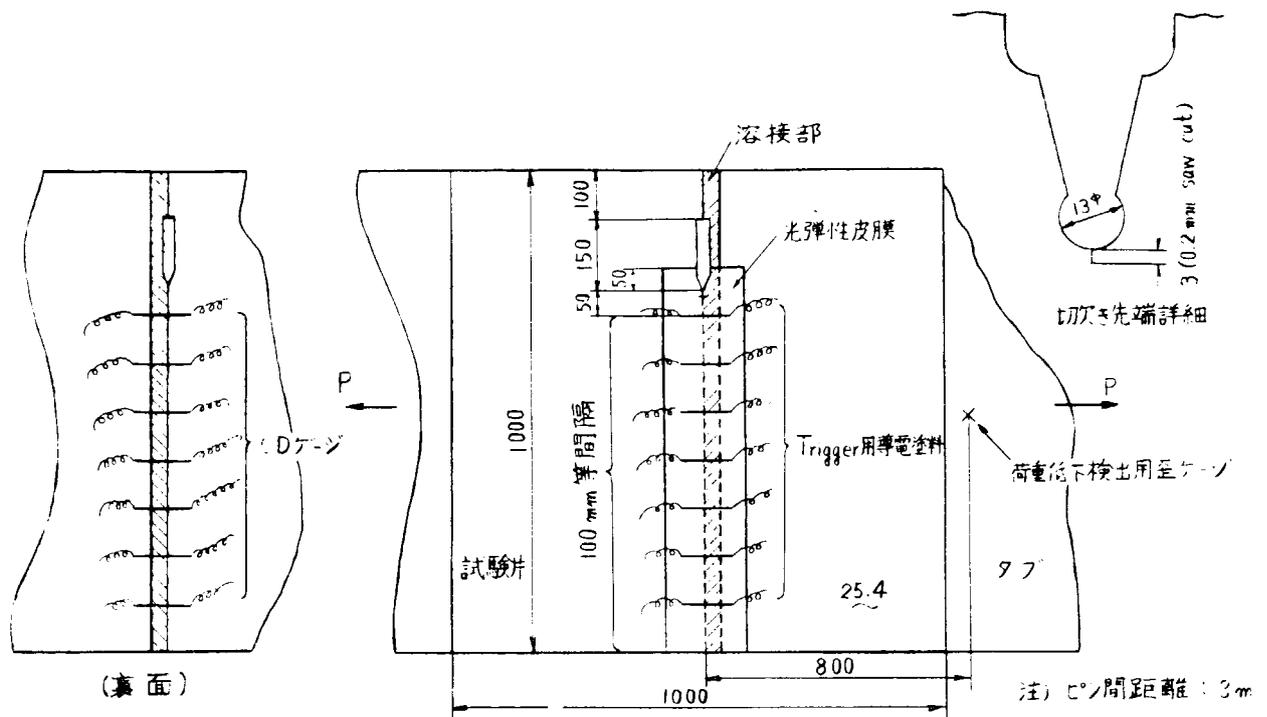


図6.4.3 光弾性皮膜法試験片形状

表6.4.4 供試材の化学成分ならびに機械的性質

鋼種	熱処理	板厚 (mm)	化学成分 (%)					機械的性質		
			C	Si	Mn	P	S	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)
KAS	As Rolled	25.4	0.19	0.04	0.88	0.015	0.023	26	45	27

表6.4.5 溶接条件

鋼種	溶接法	溶接棒	雰囲気	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	自由長 (mm)	入熱量 (kj/cm)	継手部形状
KAS (25.4)	IL7F0 ガス溶接	HS42G 3.2φ	CO ₂ ガス 25ℓ/min	560	36	6	60±10	173	
				580	37	7		214	

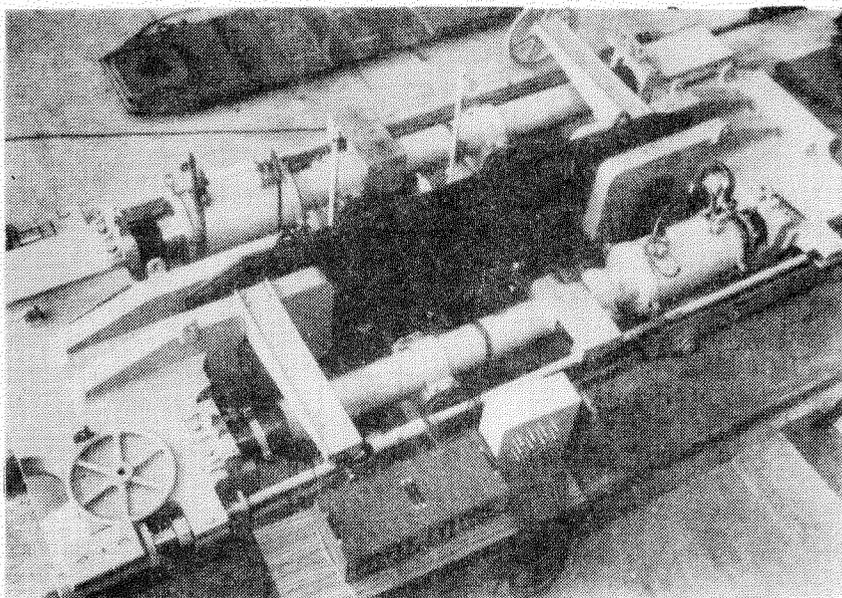


写真6.4.3 光弾性皮膜法試験装置

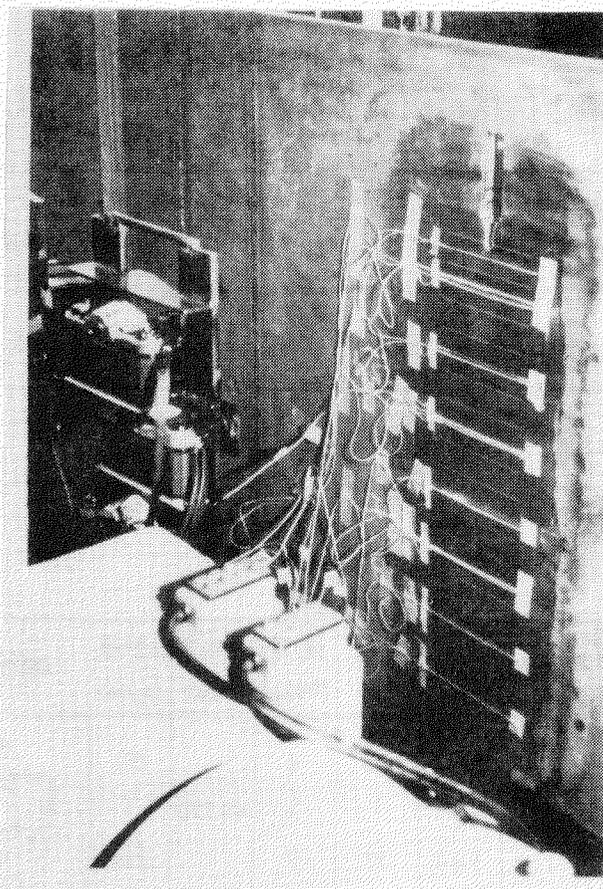


写真6.4.4 光弾性皮膜の貼付状況

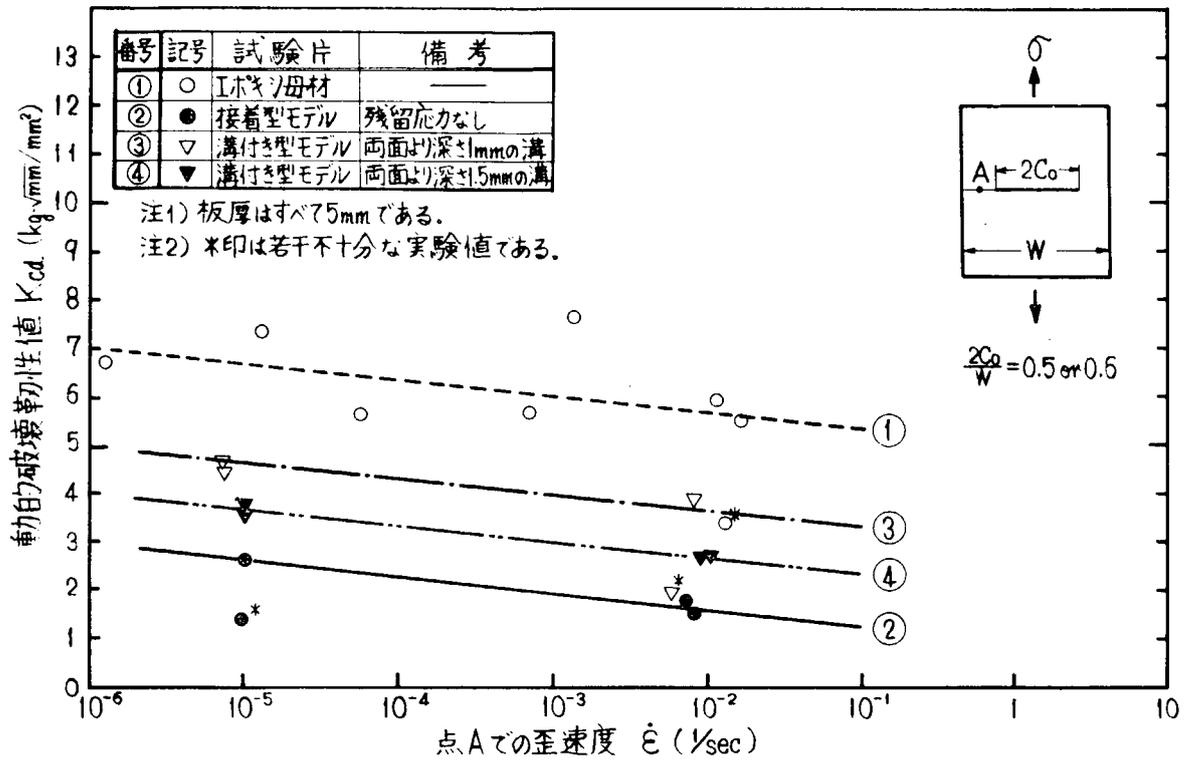
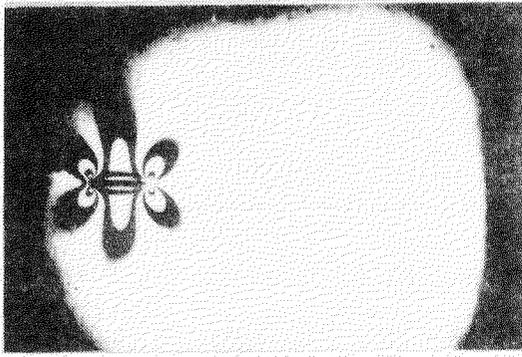
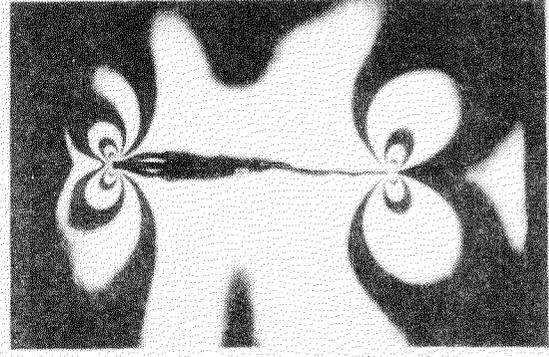


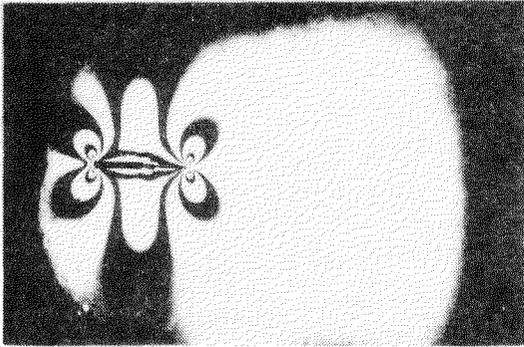
図6.4.4 エポキシ樹脂材の動的破壊靱性値 K_{cd}



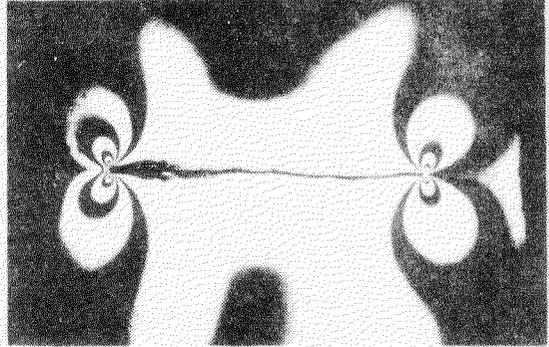
1) $\tilde{\sigma} = 0.266 \text{ kg/mm}^2, \frac{d\theta+2C}{W} = 0.246$



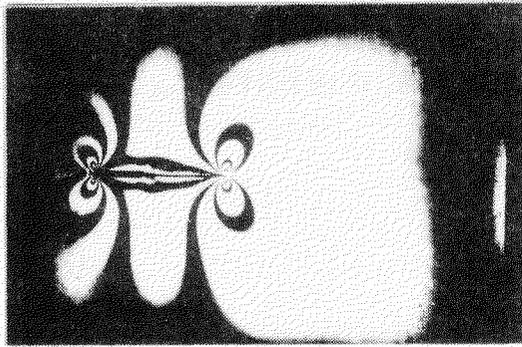
5) $\tilde{\sigma} = 0.122 \text{ kg/mm}^2, \frac{d\theta+2C}{W} = 0.708$



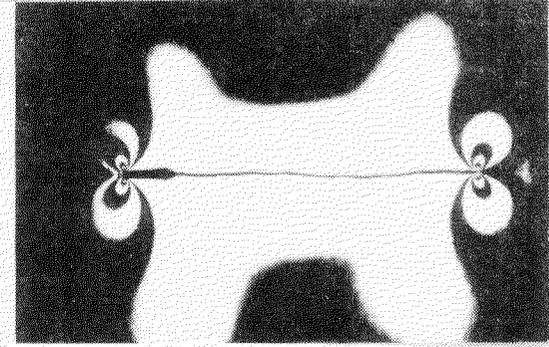
2) $\tilde{\sigma} = 0.241 \text{ kg/mm}^2, \frac{d\theta+2C}{W} = 0.324$



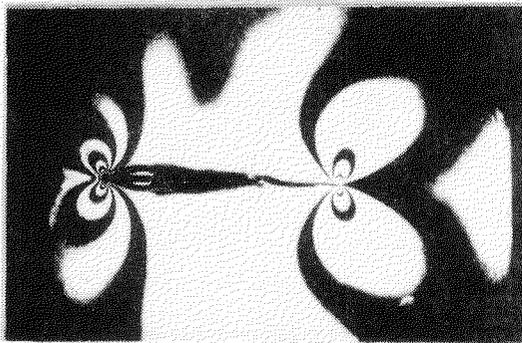
6) $\tilde{\sigma} = 0.097 \text{ kg/mm}^2, \frac{d\theta+2C}{W} = 0.785$



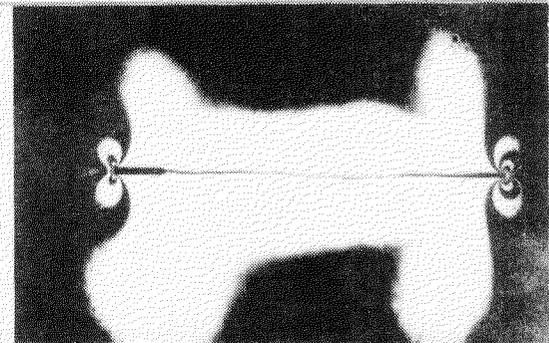
3) $\tilde{\sigma} = 0.217 \text{ kg/mm}^2, \frac{d\theta+2C}{W} = 0.402$



7) $\tilde{\sigma} = 0.075 \text{ kg/mm}^2, \frac{d\theta+2C}{W} = 0.864$



4) $\tilde{\sigma} = 0.147 \text{ kg/mm}^2, \frac{d\theta+2C}{W} = 0.626$



8) $\tilde{\sigma} = 0.051 \text{ kg/mm}^2, \frac{d\theta+2C}{W} = 0.947$

写真6.4.5 Iボキシ母材中の静的亀裂光弾性縞写真
〔Test No. MS-1, B型試験片〕

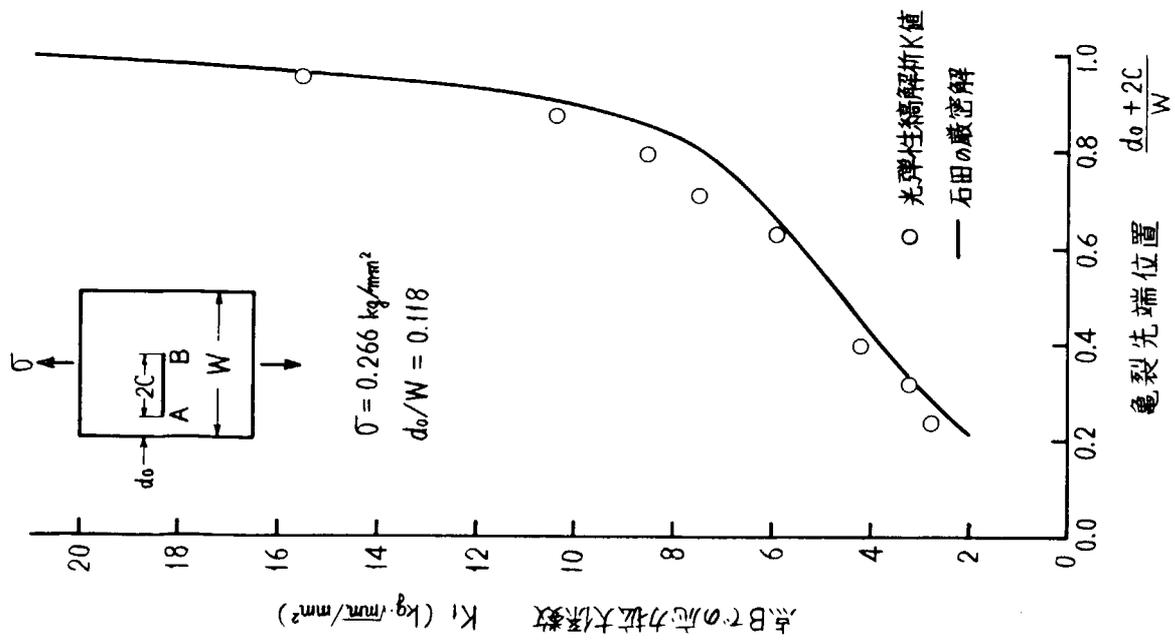
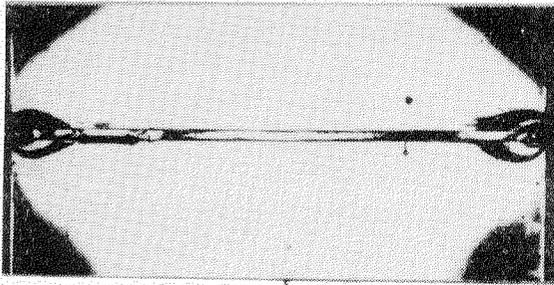
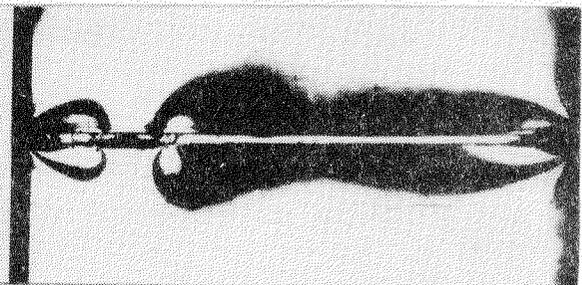


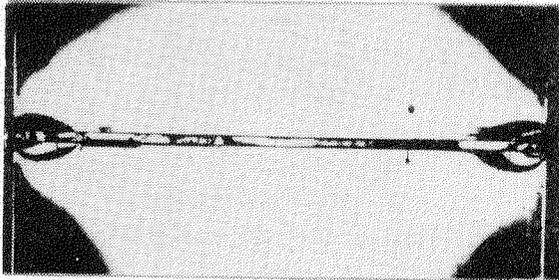
図6.4.5 静的応力拡大係数 K_I に対する光弾性高精度解析の精度検討
 (B型試験片, 定荷重条件)



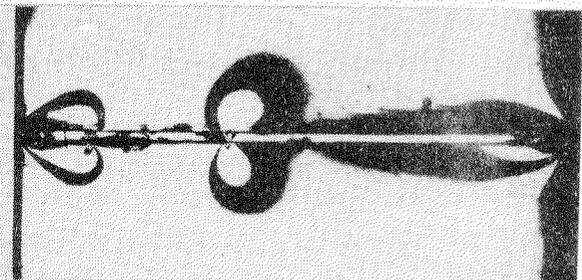
1) $\sigma = 0 \text{ kg/mm}^2, \frac{d_0+2C}{W} = 0.25$



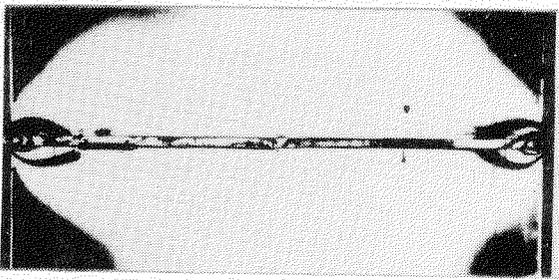
1') $\sigma = 0.0923 \text{ kg/mm}^2, \frac{d_0+2C}{W} = 0.25$



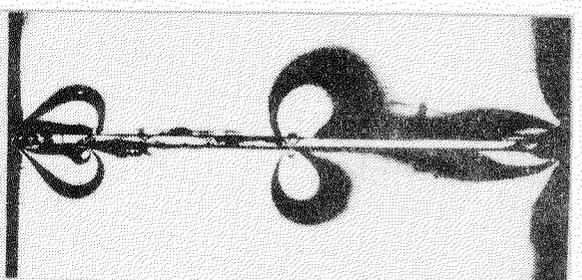
2) $\sigma = 0 \text{ kg/mm}^2, \frac{d_0+2C}{W} = 0.376$



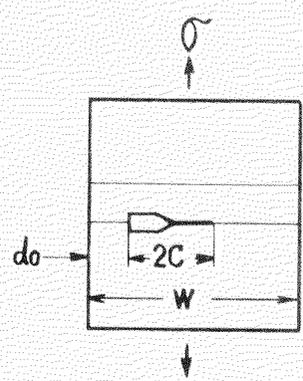
2') $\sigma = 0.0798 \text{ kg/mm}^2, \frac{d_0+2C}{W} = 0.376$



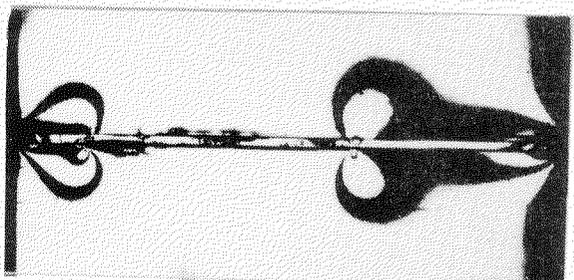
3) $\sigma = 0 \text{ kg/mm}^2, \frac{d_0+2C}{W} = 0.501$



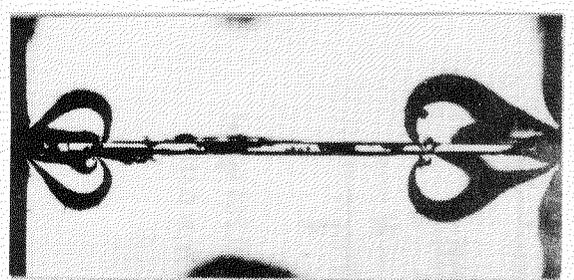
3') $\sigma = 0.0676 \text{ kg/mm}^2, \frac{d_0+2C}{W} = 0.501$



$d_0/w = 0.125$
 相当する溶接部中央の残留応力
 $\sigma_{RL} - \sigma_{RT} = 1.35 \text{ kg/mm}^2$



4') $\sigma = 0.0548 \text{ kg/mm}^2, \frac{d_0+2C}{W} = 0.627$



5') $\sigma = 0.0423 \text{ kg/mm}^2, \frac{d_0+2C}{W} = 0.752$

写真6.4.6 残留応力型モデル中の静的亀裂光弾性縞写真
 [Test No. RS-1, C型試験片]

表 6.4.6 動的伝播試験結果一覧

試験項目	Test No.	試験片	平均真荷重 (kg/mm ²)	荷重分布形状	応力比 σ_2/σ_1	衝撃エネルギー (kg·m)	Kci (kg/mm ²)	Kca (kg/mm ²)	(V/ci) _{max}	溝の深さ (mm)	備考
伝播試験	MD2	A	0.352	uniform	1	—	6.4	—	0.235	—	エポキシ母材
	MD3	B	0.534	uniform	1	—	6.4	—	0.353	—	エポキシ母材
	AD1	C	0.245	uniform	1	—	2.6	—	0.458	—	接着型モデル
	GD1	C	0.1994	uniform	1	0.0271	4.6	—	0.229	1.18	溝付き型モデル
	RD1	C	0.109	uniform	1	—	2.3	—	0.365	—	残留応力型モデル
	RD2	B	0.23	uniform	1	—	2.3	—	0.508	—	残留応力型モデル
	RD3	C	0.276	uniform	1	—	2.3	—	0.217	—	残留応力型モデル
伝播停止試験	MA1	C	0.1251	decreasing	-0.5	0.0473	6.4	1.75	0.192	—	エポキシ母材
	MA2	C	0.1259	decreasing	-0.5	0.0473	6.4	1.60	0.365	—	エポキシ母材
	AA1	C	0.0761	decreasing	-0.5	0.0122	2.6	1.55	0.217	—	接着型モデル
	GA1	C	0.0740	decreasing	-0.5	0.0271	4.6	1.45	0.186	1.19	溝付き型モデル
	GA2	C	0.0767	decreasing	-0.5	0.0122	3.6	1.25	0.189	1.63	溝付き型モデル
枝分れ試験	MB1	C	0.510	increasing	-11	0.1012	6.4	—	0.378	—	エポキシ母材
	GB1	C	0.300	increasing	-11	0.0473	4.6	—	0.248	1.24	溝付き型モデル

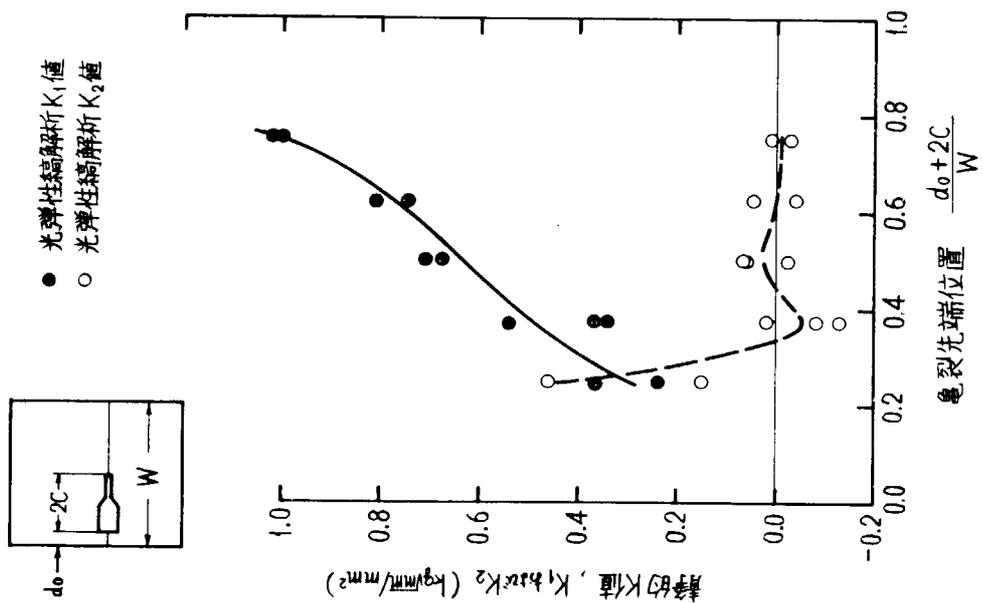
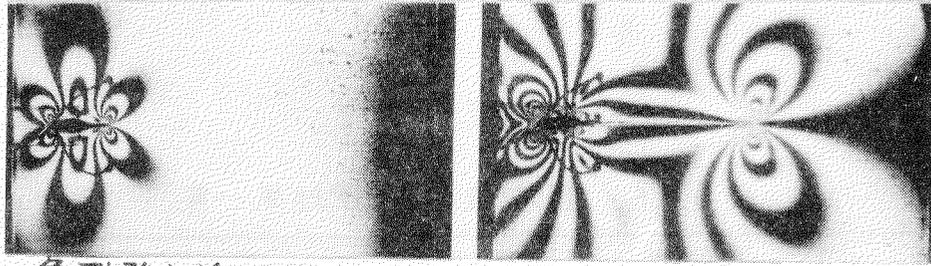
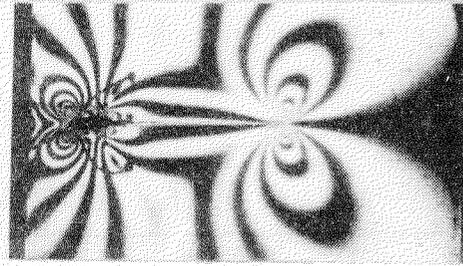


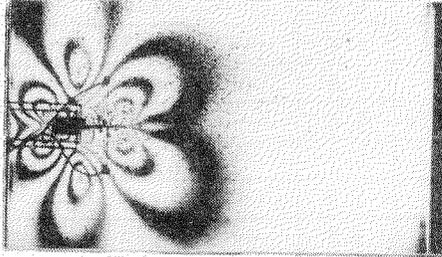
図 6.4.6 残留応力のみによって生ずる静的 K 値
[Test No. RS-1, C 型試験片]



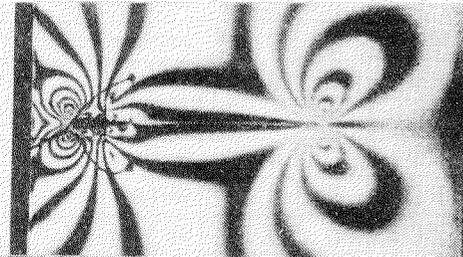
1) 亀裂発生前



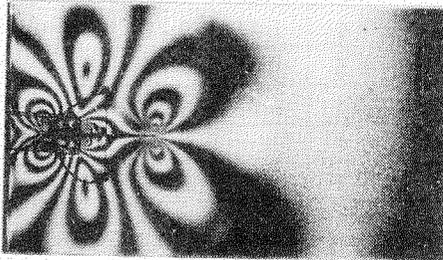
6) $t = 280 \mu\text{sec}$



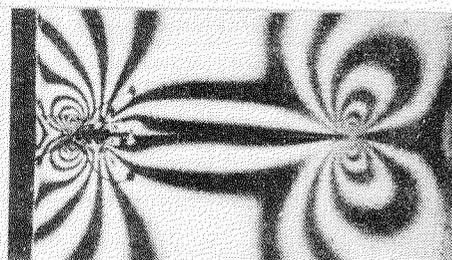
2) $t = 5 \mu\text{sec}$ (亀裂発生後)



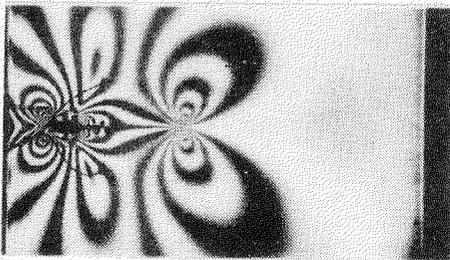
7) $t = 350 \mu\text{sec}$



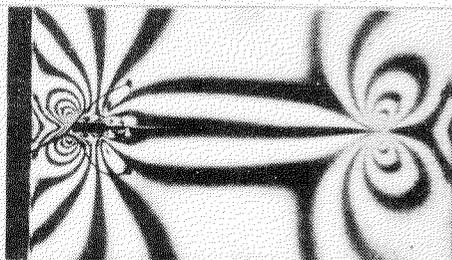
3) $t = 70 \mu\text{sec}$



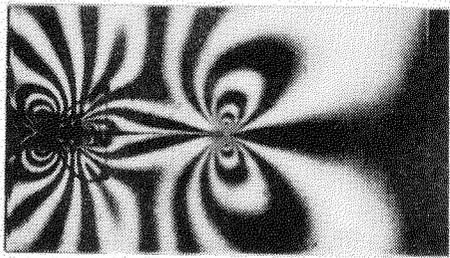
8) $t = 420 \mu\text{sec}$



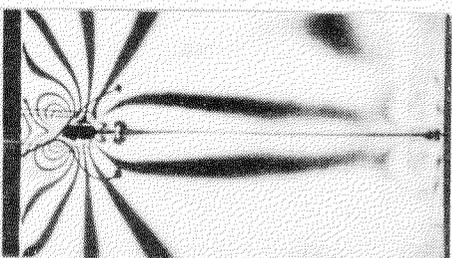
4) $t = 140 \mu\text{sec}$



9) $t = 490 \mu\text{sec}$



5) $t = 210 \mu\text{sec}$



10) $t = 630 \mu\text{sec}$

写真6.47 工ホキシ母材中の動的亀裂光弾性縮写真

伝播試験
 Test No. MD-2, A型試験片
 定荷重条件 $\sigma = 0.352 \text{ kg/mm}^2$
 打撃による亀裂発生

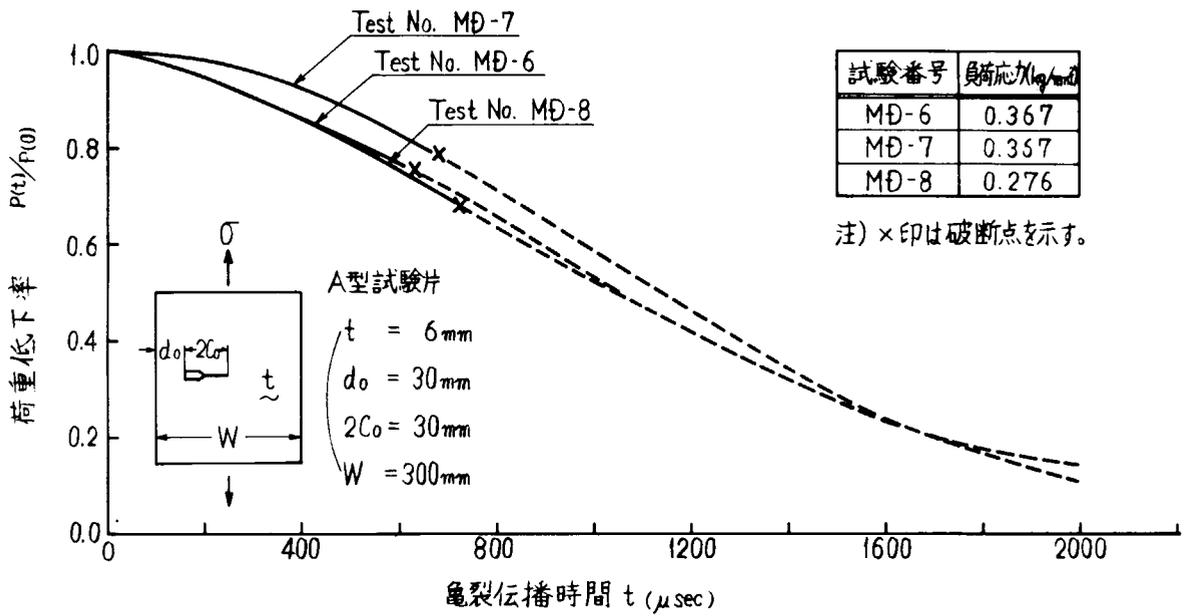


図6.4.8 荷重低下率と亀裂伝播時間の関係

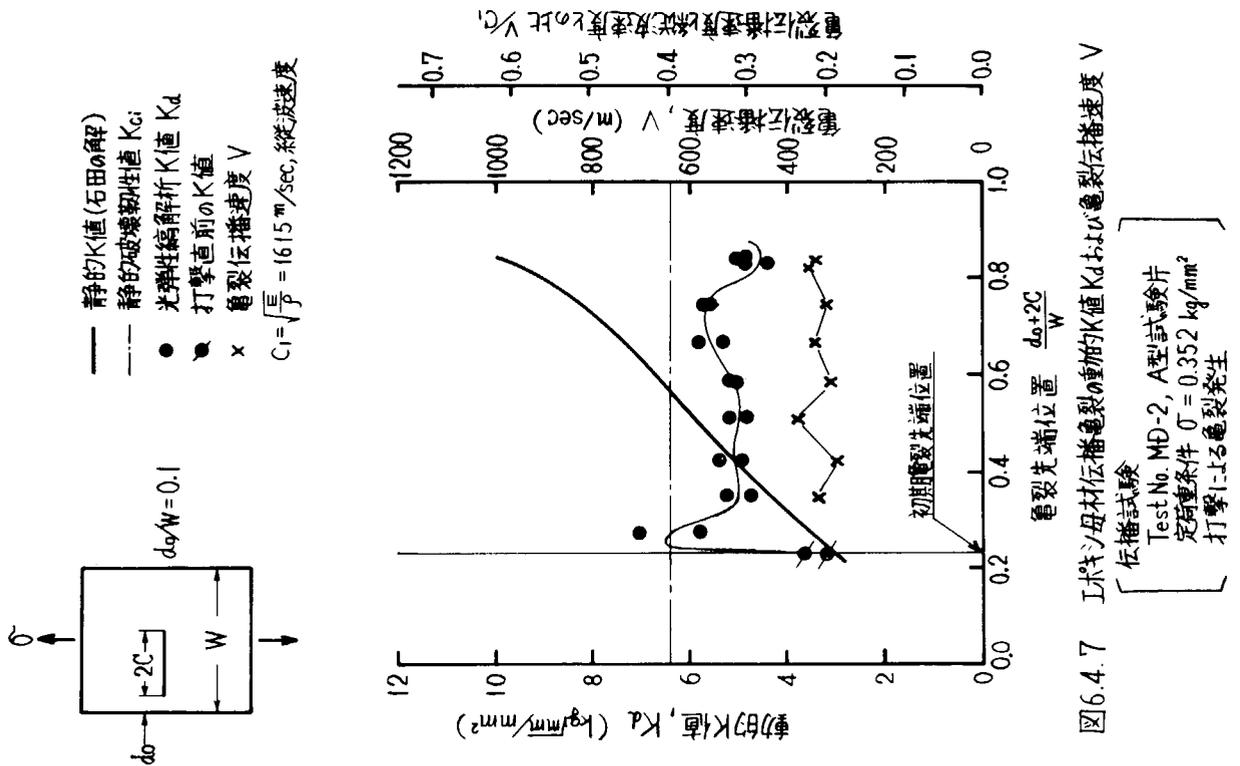


図6.4.7 Jポキシ母材伝播亀裂の動的K値 K_d および亀裂伝播速度 V

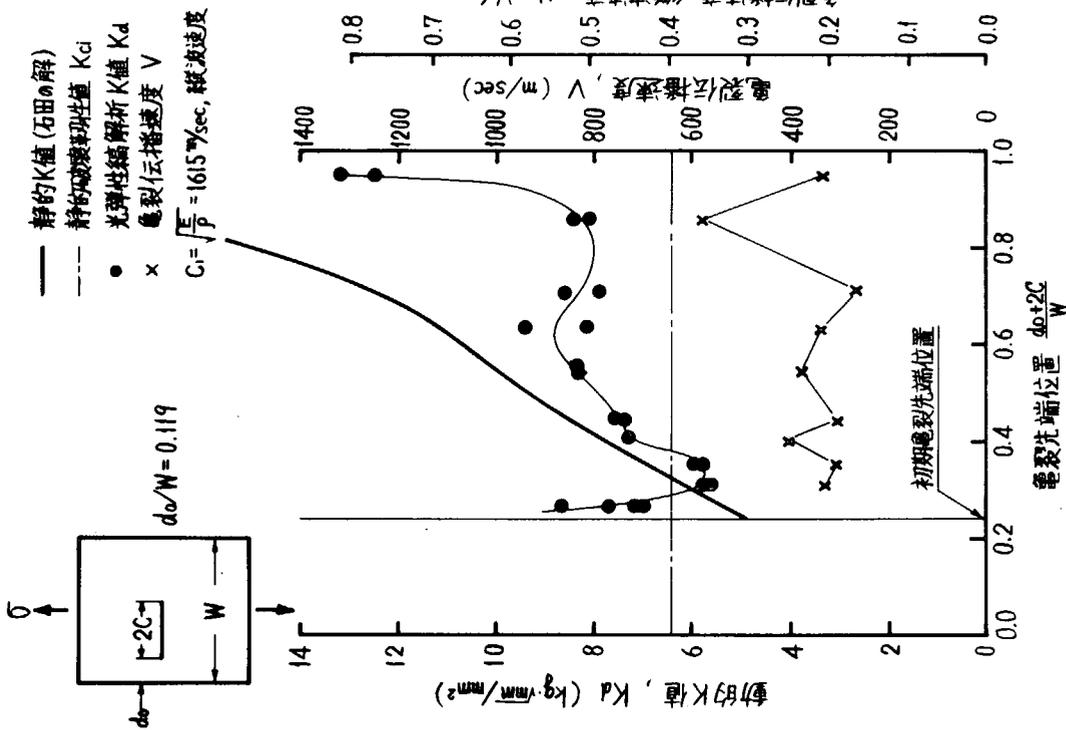


図6.4.9 Iボキジ母材伝播亀裂の動的K値 K_d および亀裂伝播速度 V

伝播試験
 Test No. MD-3, B型試験片
 定荷重条件 $\bar{\sigma} = 0.534 \text{ kg/mm}^2$
 打撃による亀裂発生

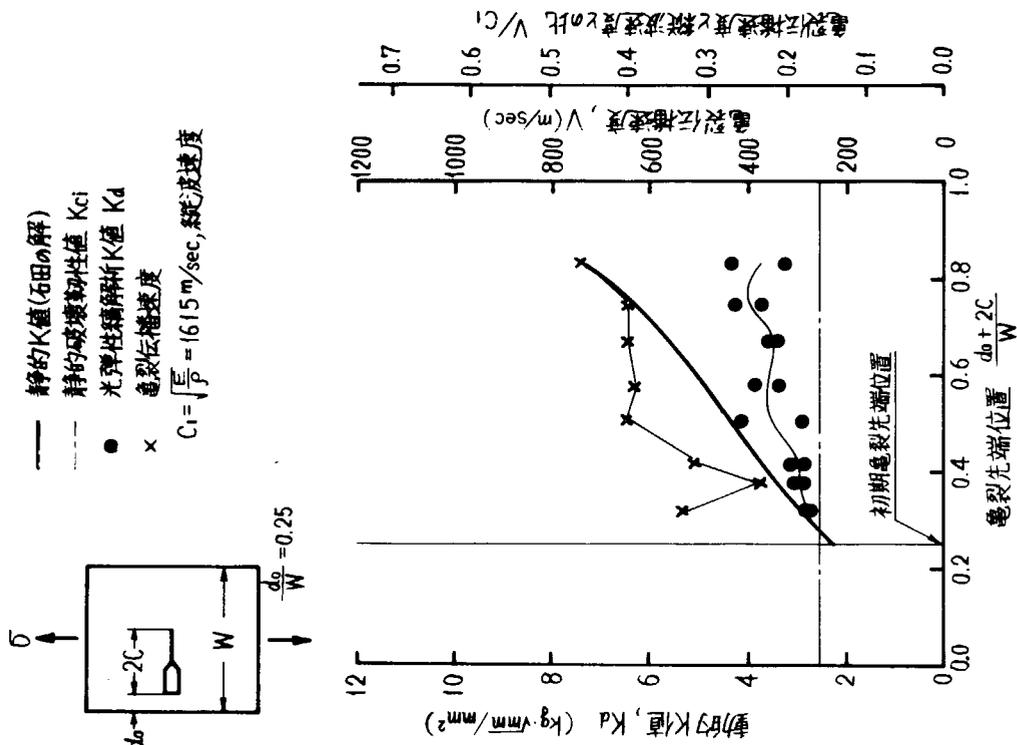


図6.4.10 接着型モジュール中伝播亀裂の動的K値 K_d および亀裂伝播速度 V

伝播試験
 Test No. AD-1, C型試験片
 定荷重条件 $\bar{\sigma} = 0.245 \text{ kg/mm}^2$
 打撃による亀裂発生

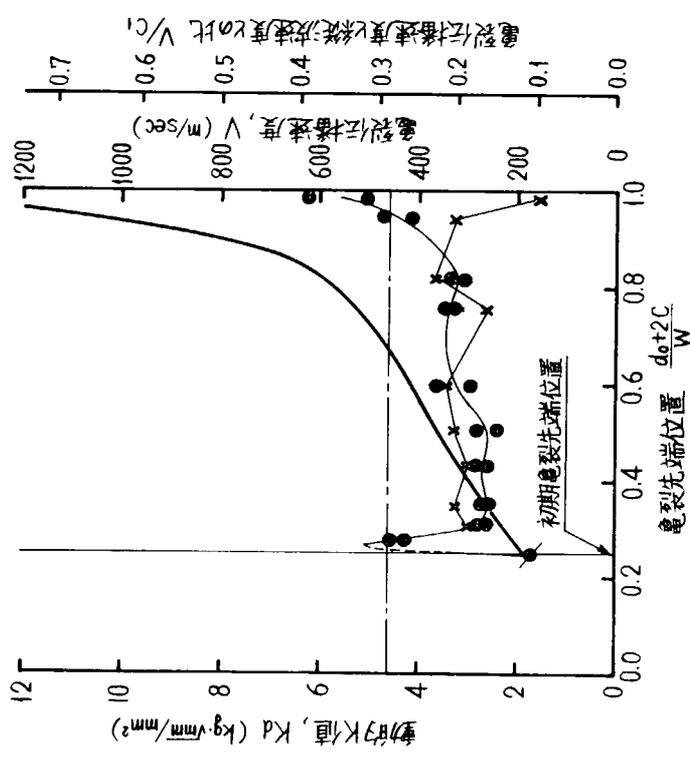
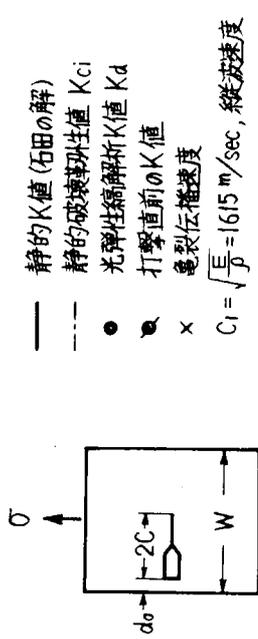
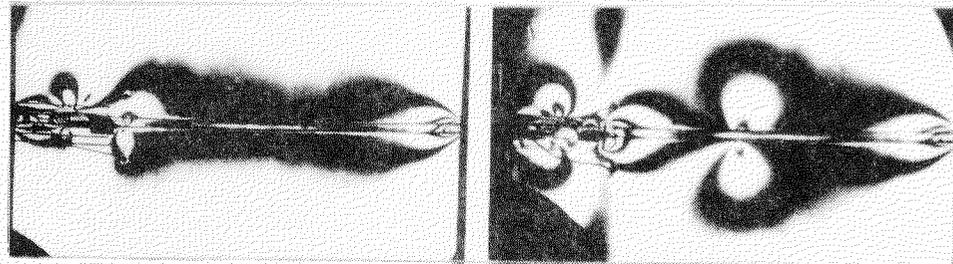
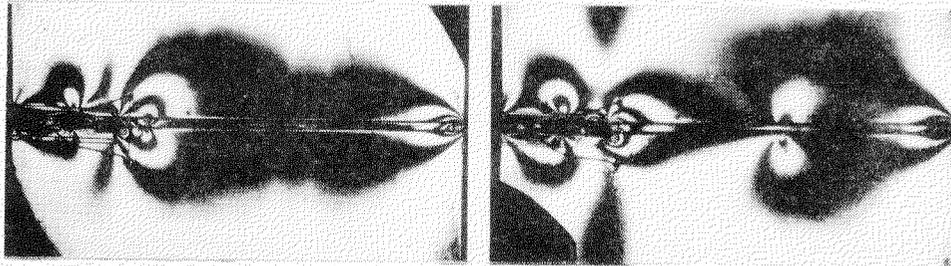


図6.4.11 溝付き型ワール中伝播亀裂の動的K値 K_d および亀裂伝播速度 V
 { 伝播試験
 Test No. GD-1, C型試験片, 溝の深さ18 mm
 定荷重条件 $\bar{\sigma} = 0.1994 \text{ kg/mm}^2$
 打撃による亀裂発生, 打撃エネルギー; 0.0271 kg m }



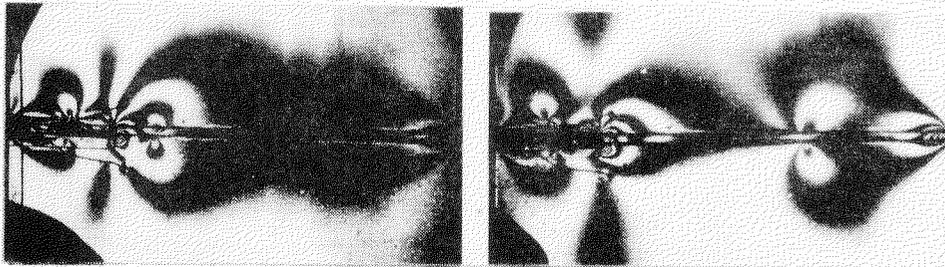
1) 亀裂発生前

6) $t = 300 \mu\text{sec}$



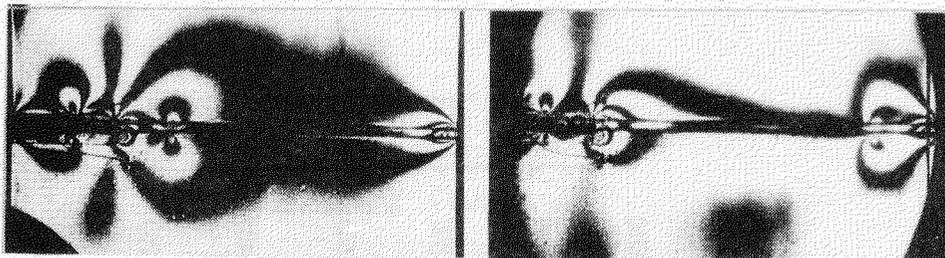
2) $t = 5 \mu\text{sec}$ (亀裂発生後)

7) $t = 400 \mu\text{sec}$



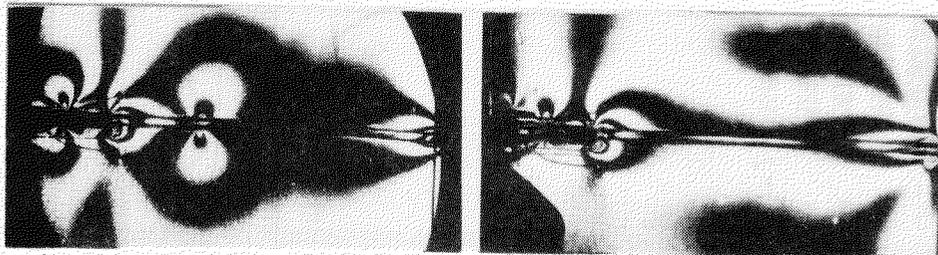
3) $t = 50 \mu\text{sec}$

8) $t = 500 \mu\text{sec}$



4) $t = 100 \mu\text{sec}$

9) $t = 600 \mu\text{sec}$



5) $t = 200 \mu\text{sec}$

10) $t = 700 \mu\text{sec}$

写真6.4.8 残留応力型T01中の動的亀裂光弾性縞写真

伝播試験
 Test No. RD-1, C型試験片
 定荷重条件 $\sigma = 0.109 \text{ kg/mm}^2$
 相当する溶接部中央の残留応力 $\sigma_{RL} - \sigma_{RT} = 1.36 \text{ kg/mm}^2$
 打撃による亀裂発生

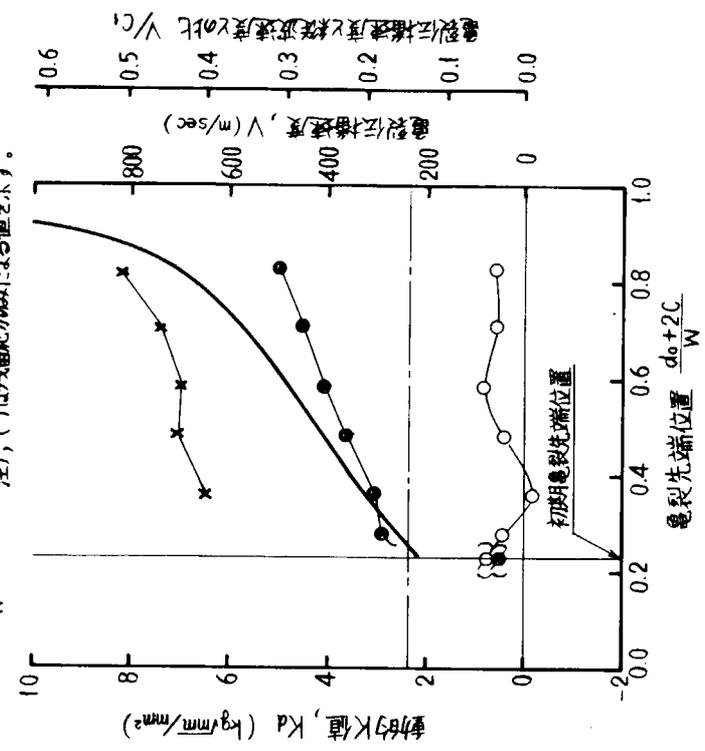
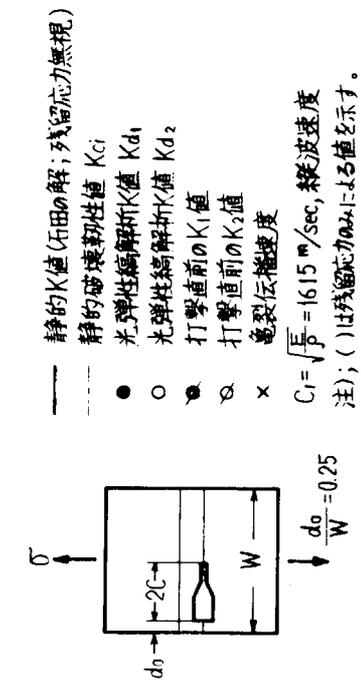


図6.4.12 残留応力型I型II中伝播亀裂の動的K値 K_d および亀裂伝播速度 V
 伝播試験
 Test No. RD-1, C型試験片
 定荷重条件 $\sigma = 0.109 \text{ kg/mm}^2$
 打撃による亀裂発生

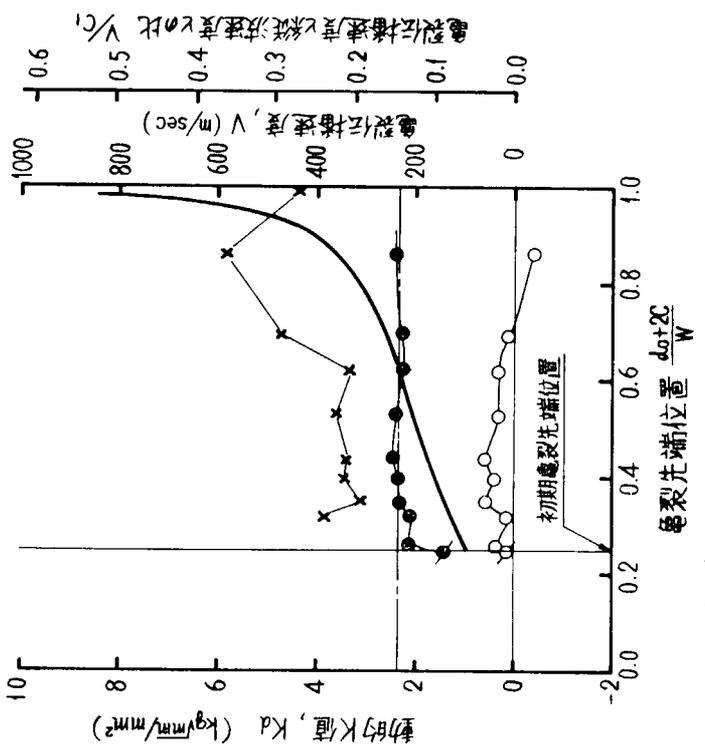
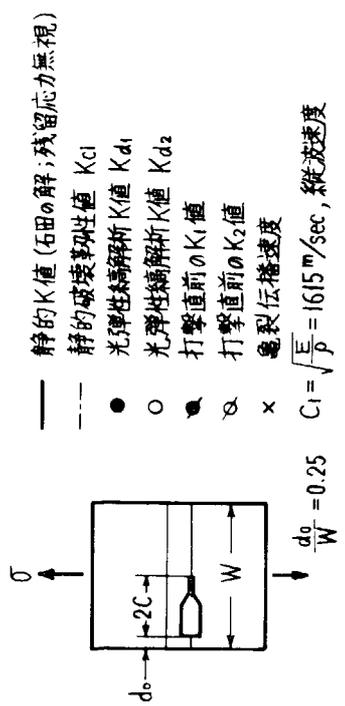
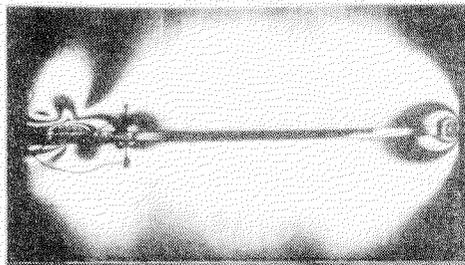
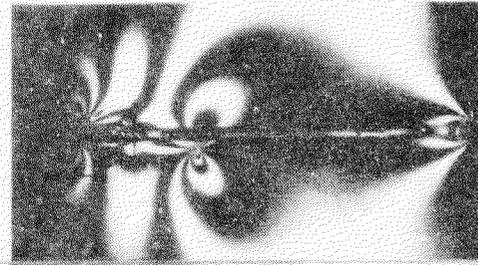


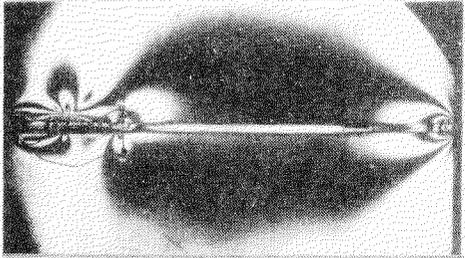
図6.4.13 残留応力型I型II中伝播亀裂の動的K値 K_d および亀裂伝播速度 V
 伝播試験
 Test No. RD-2, B型試験片
 定荷重条件 $\sigma = 0.23 \text{ kg/mm}^2$
 打撃による亀裂発生



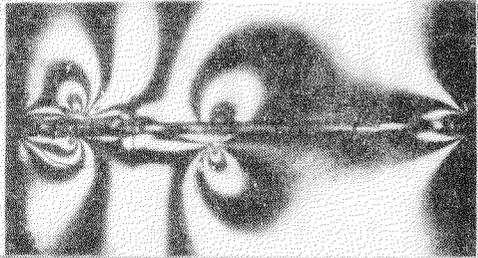
1) 亀裂発生前 (残留応力のみ)



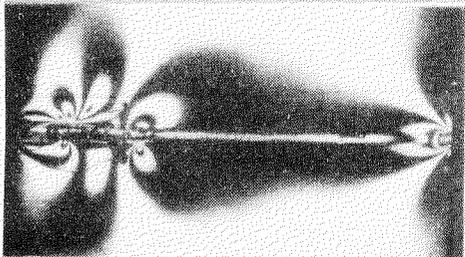
6) $t = 150 \mu\text{sec}$



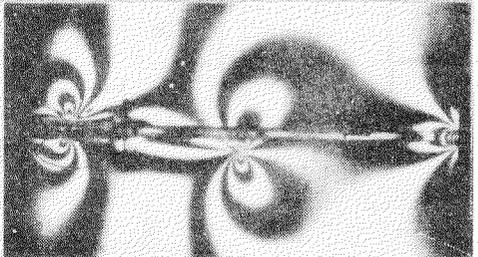
2) 亀裂発生前 ($\sigma = 0.129 \text{ kg/mm}^2$)



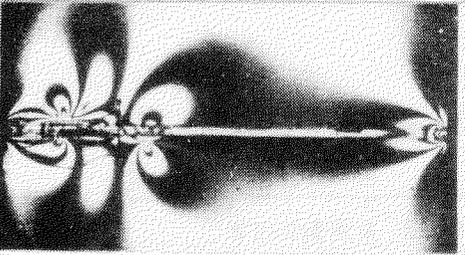
7) $t = 200 \mu\text{sec}$



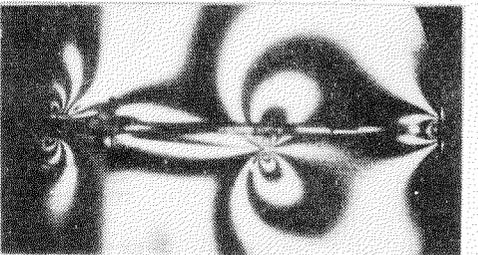
3) $t = 3 \mu\text{sec}$ ($\sigma = 0.276 \text{ kg/mm}^2$ 亀裂発生)



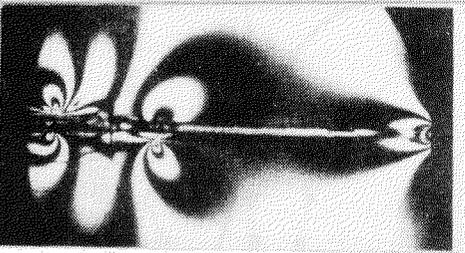
8) $t = 300 \mu\text{sec}$



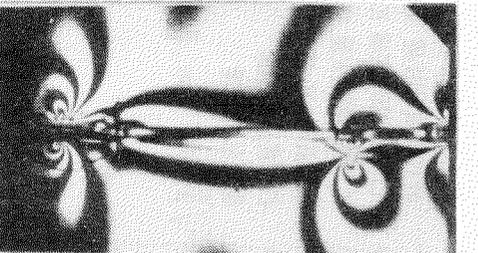
4) $t = 50 \mu\text{sec}$



9) $t = 400 \mu\text{sec}$



5) $t = 100 \mu\text{sec}$



10) $t = 600 \mu\text{sec}$

写真6.4.9 残留応力型モデル中の動的亀裂光弾性縞写真

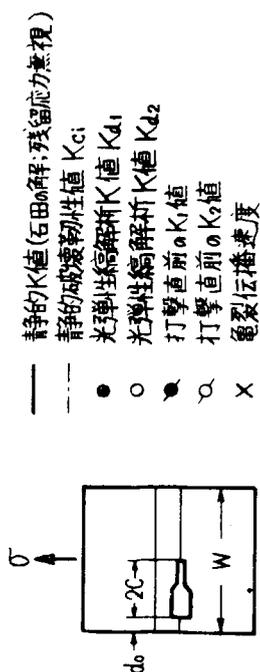
伝播試験

Test No. RD-3, C型試験片

定荷重条件 $\sigma = 0.276 \text{ kg/mm}^2$

相当する溶接部中央の残留応力 $\sigma_{\text{res}} - \sigma_{\text{RT}} = 1.87 \text{ kg/mm}^2$

高応力負荷による亀裂自然発生, 亀裂は途中の接合層の間に止った。



$G_1 = \sqrt{E} = 1615 \text{ M/sec}$, 縦波速度
 注); ()は残留応力のみによる値を示す。

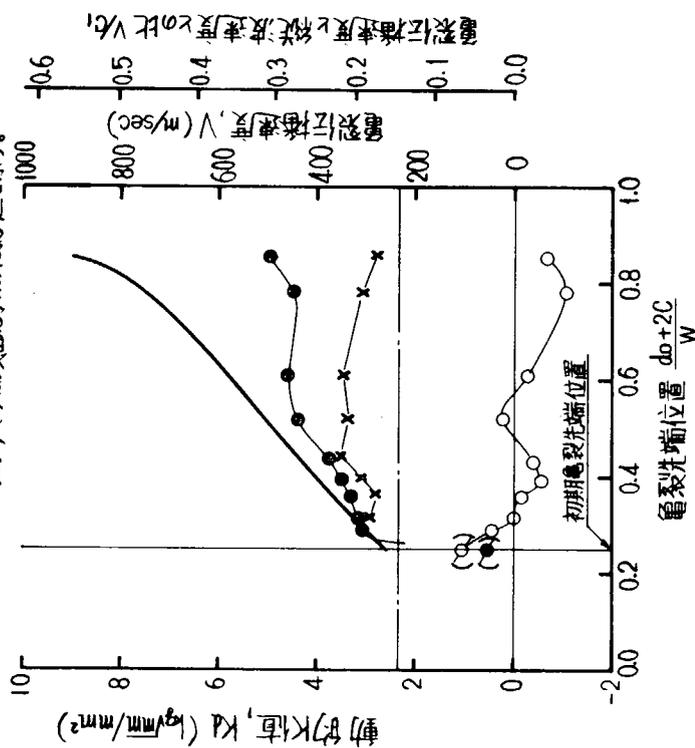
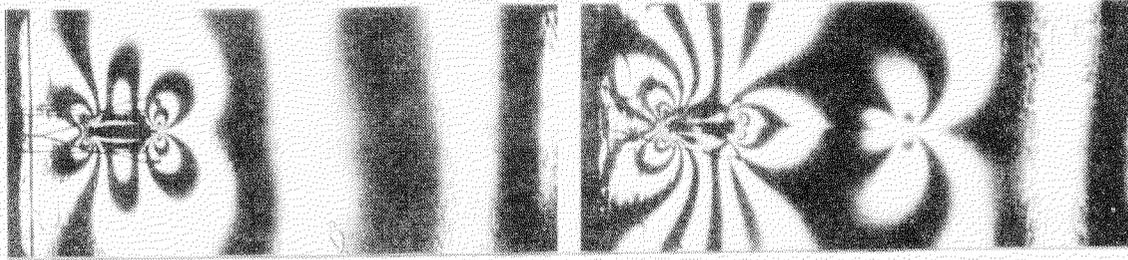
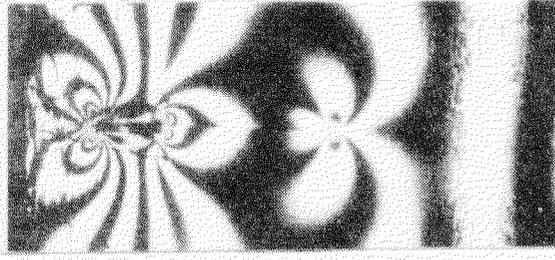


図 6.4.14 残留応力型I型II中伝播亀裂の動的K値 K_{d1} および 亀裂伝播速度 V

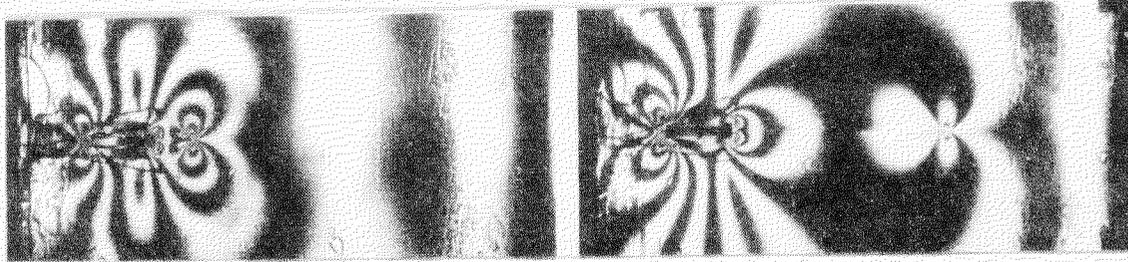
伝播試験
 Test No. RD-3
 定荷重条件 $\sigma = 0.276 \text{ kg/mm}^2$
 打撃による亀裂発生
 亀裂発生直後、亀裂は接着層をのりはずれ母材を走った



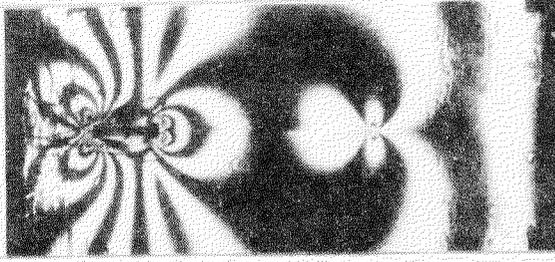
1) 亀裂発生前



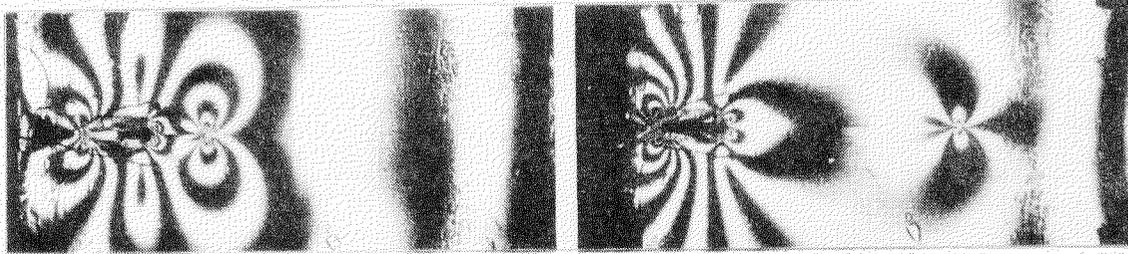
6) $t = 400 \mu\text{sec}$



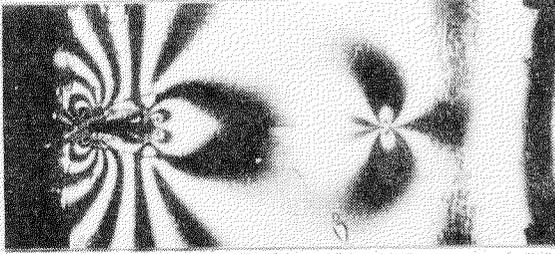
2) $t = 50 \mu\text{sec}$ (亀裂発生後)



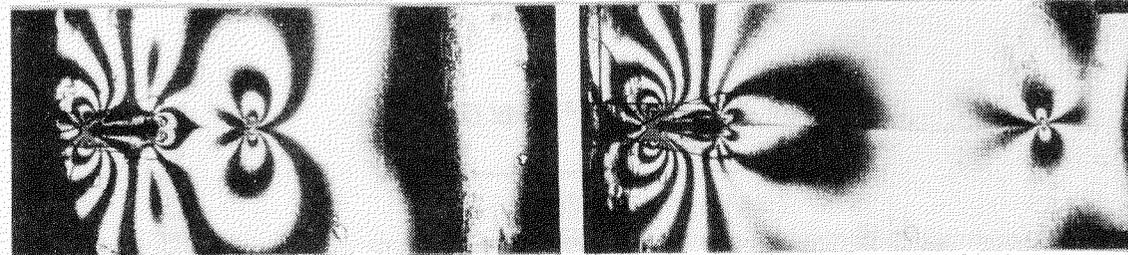
7) $t = 600 \mu\text{sec}$



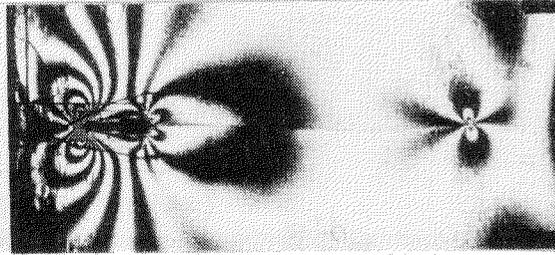
3) $t = 100 \mu\text{sec}$



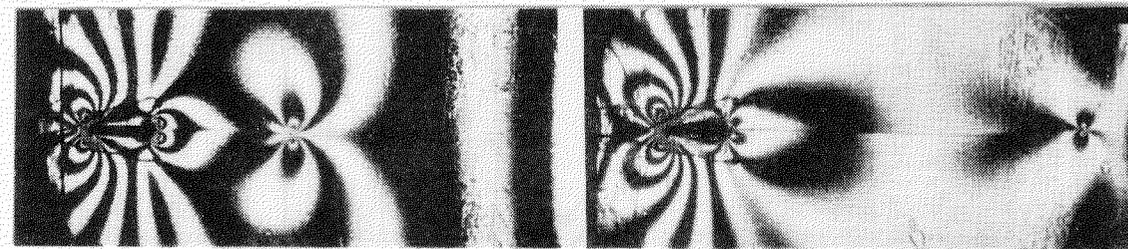
8) $t = 1000 \mu\text{sec}$



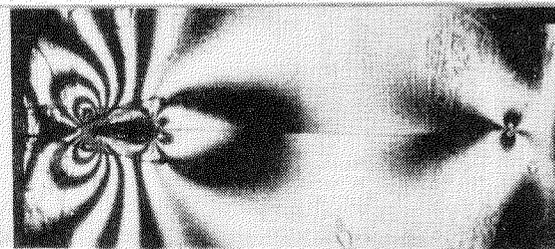
4) $t = 200 \mu\text{sec}$



9) $t = 2000 \mu\text{sec}$



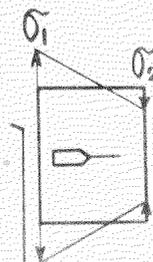
5) $t = 300 \mu\text{sec}$



10) $t = 10000 \mu\text{sec}$

写真6.4.10 Iボキシ母材中の動的亀裂光弾性縞写真

伝播停止試験
 Test No. MA-1, C型試験片
 定荷重条件 $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2)/2 = 0.1251 \text{ kg/mm}^2$
 $\sigma_2/\sigma_1 = -0.5, \sigma_1 > 0$
 打撃による亀裂発生, 打撃エネルギー: $0.0473 \text{ kg}\cdot\text{m}$



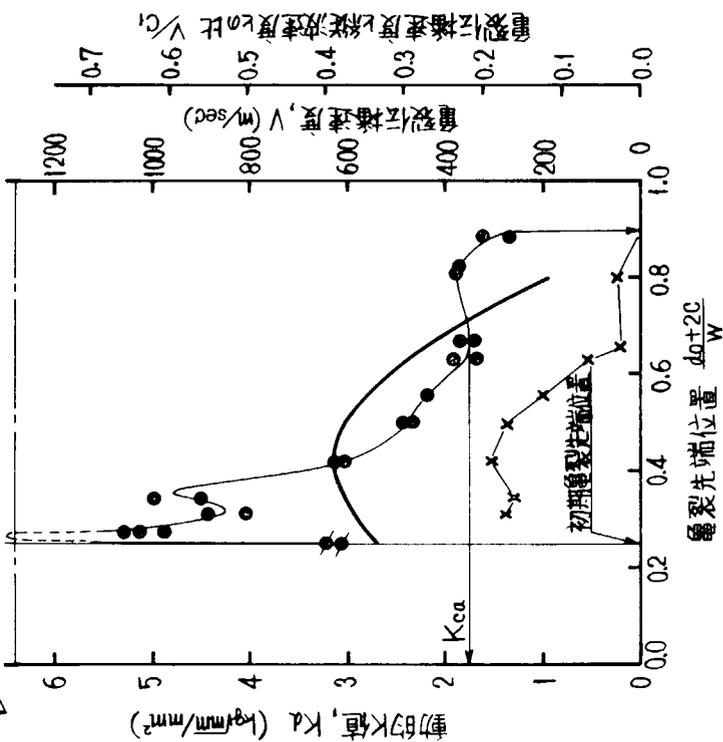
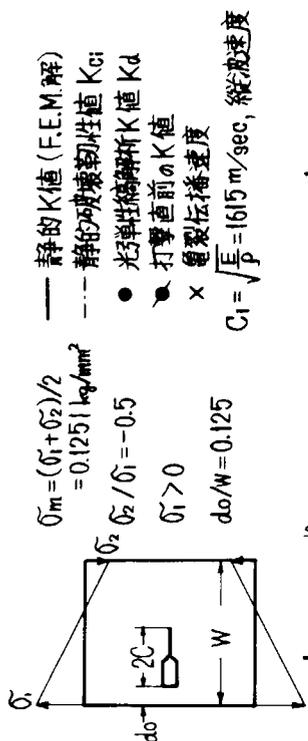


図6.4.15 Iボキ/母材伝播亀裂の動的K値 K_d および亀裂伝播速度 V
 伝播停止試験
 Test No. MA-1, C型試験片
 定荷重条件 (Decreasing)
 打撃による亀裂発生, 打撃I初値; 0.0473 kg·m

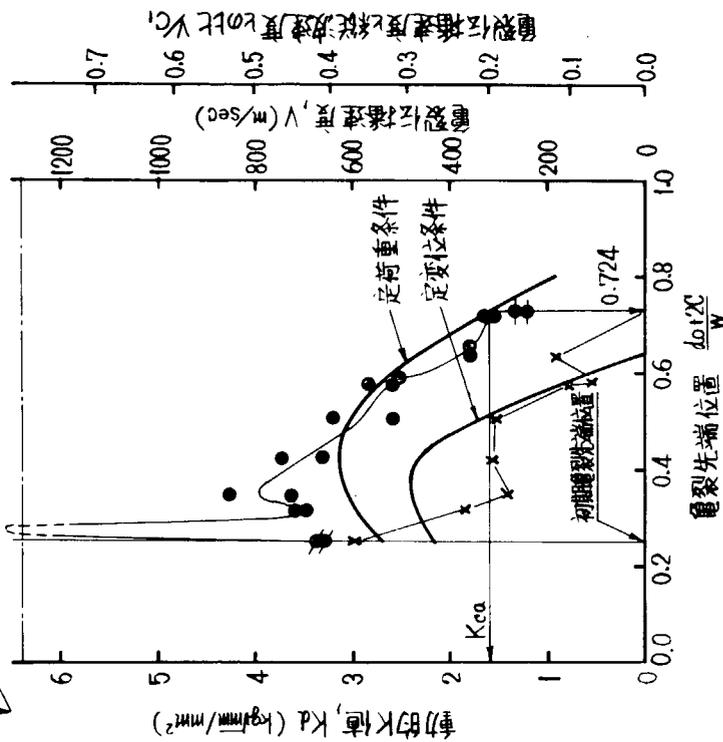
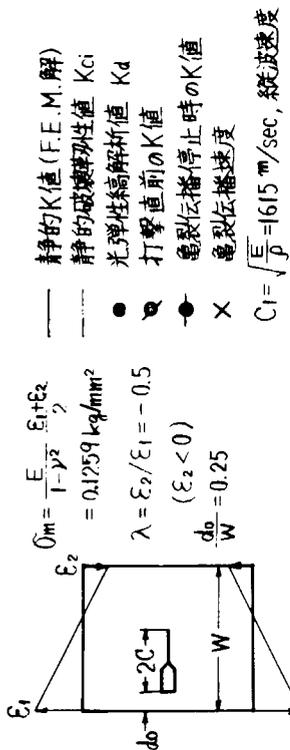


図6.4.16 Iボキ/母材伝播亀裂の動的K値 K_d および亀裂伝播速度 V
 伝播停止試験
 Test No. MA-2, C型試験片
 定荷重条件 (Increasing)
 打撃による亀裂発生, 打撃I初値; 0.0473 kg·m

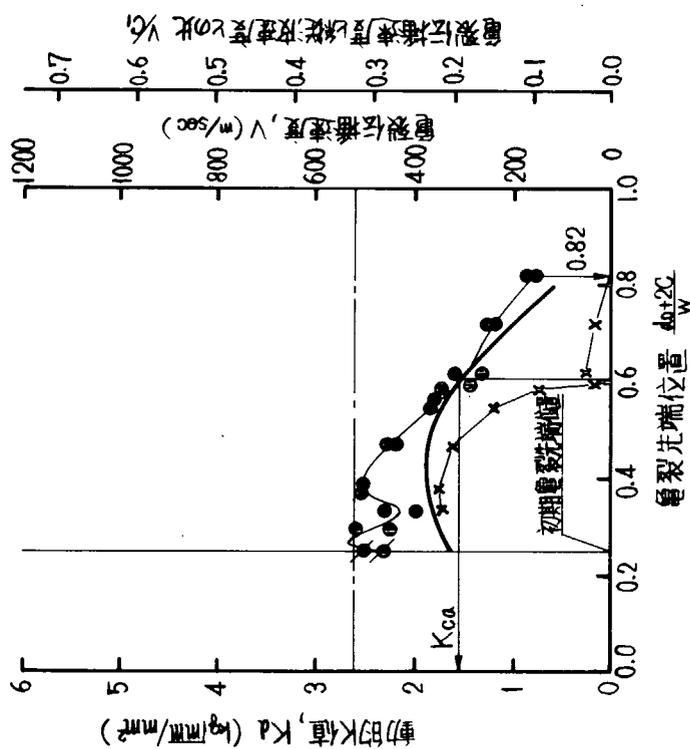
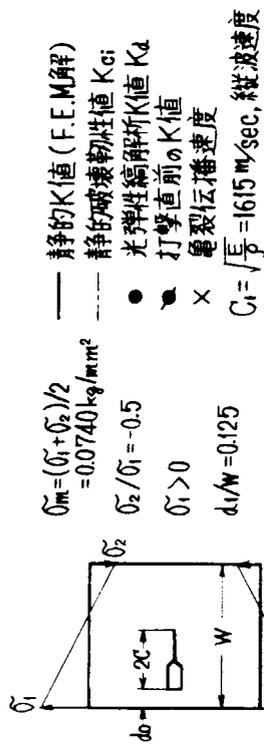
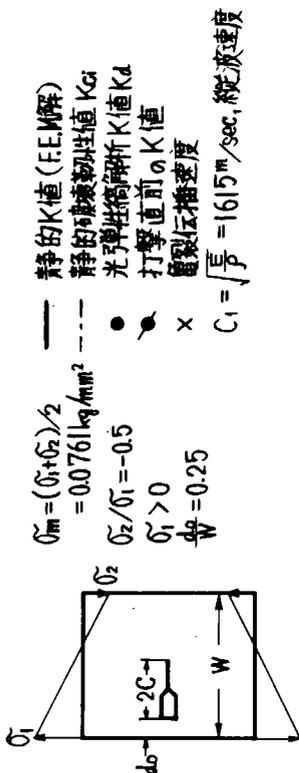


図6.4.17 接着型E/F中伝播亀裂の動的K値 K_{Ic} 及び亀裂伝播速度V

伝播停止試験
 Test No. AA-1, C型試験片
 定荷重条件 (Decreasing)
 打撃による亀裂発生, 打撃エネルギー; 0.0122 kg·m

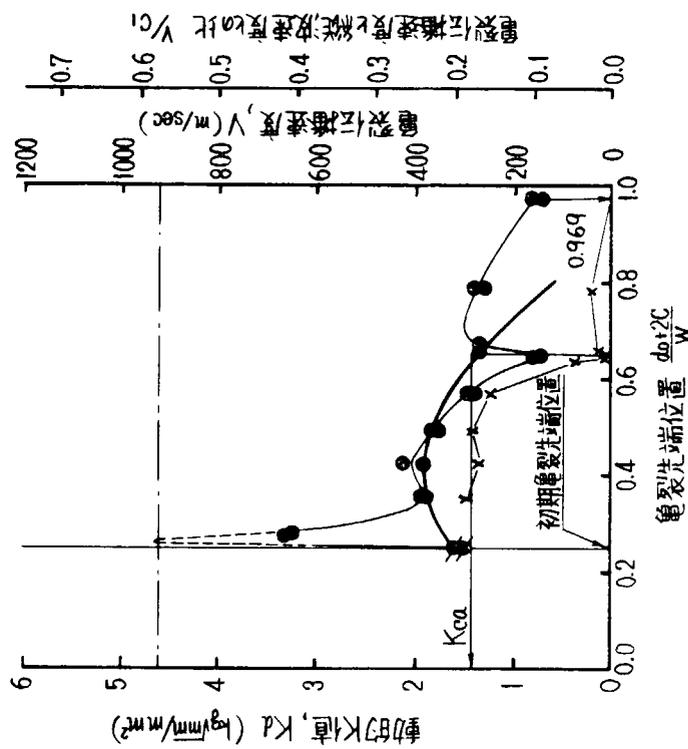


図6.4.18 溝付き型E/F中伝播亀裂の動的K値 K_{Ic} 及び亀裂伝播速度V

伝播停止試験
 Test No. GA-1, C型試験片, 溝の深さ1.19mm
 定荷重条件 (Decreasing)
 打撃による亀裂発生, 打撃エネルギー; 0.0271 kg·m

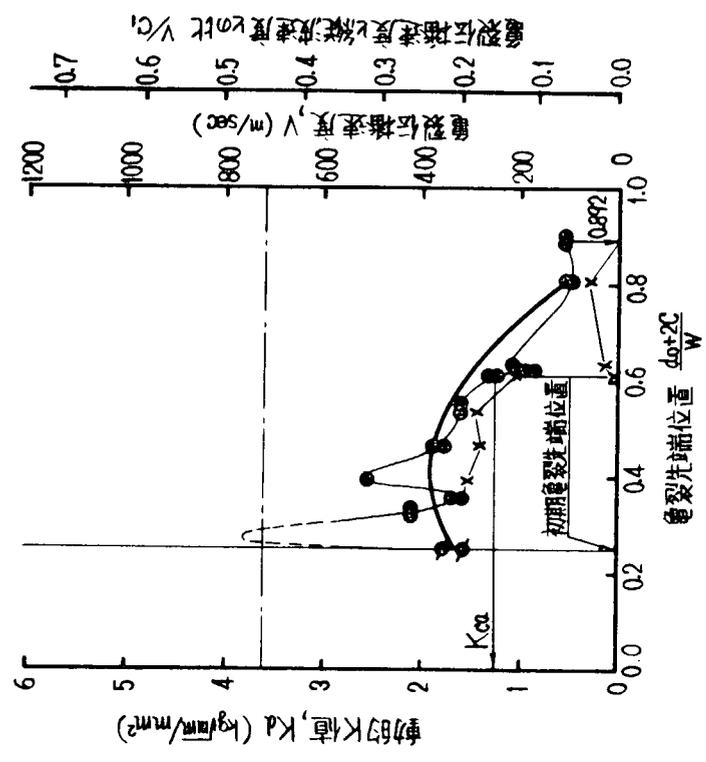
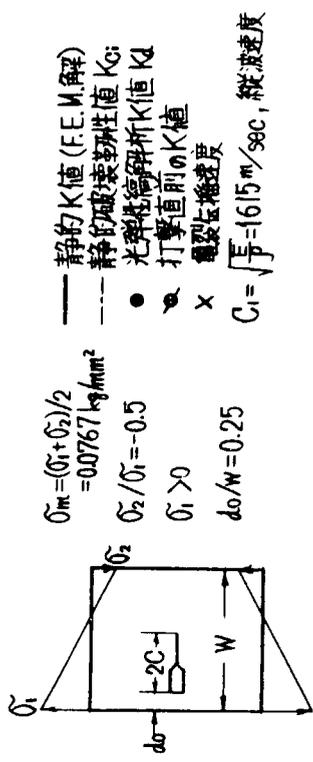
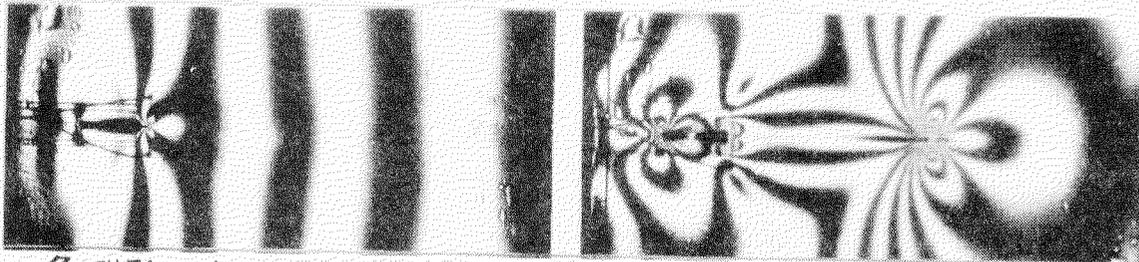
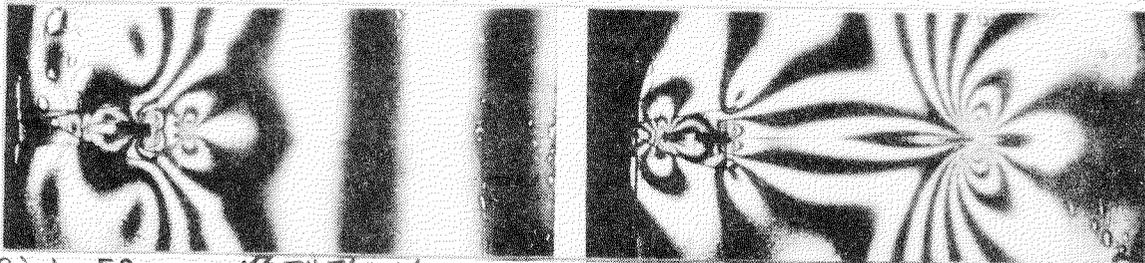


図6.4.19 溝付き型石V中伝播電裂の電裂伝播速度 V および電裂伝播速度 V の関係
 [伝播停止式致
 Test No. GA-2, C型試験片, 溝の深さ1.63mm
 定荷重条件 (Decreasing)
 打撃による電裂発生, 打撃工利バ; 0.0122 kg·m]



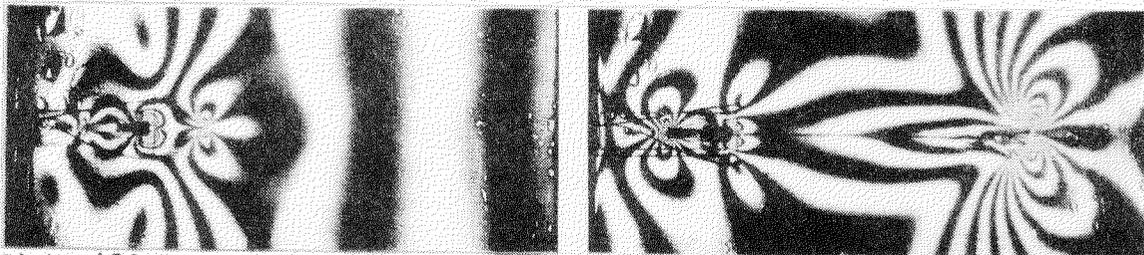
1) 亀裂発生前

6) $t = 400 \mu\text{sec}$



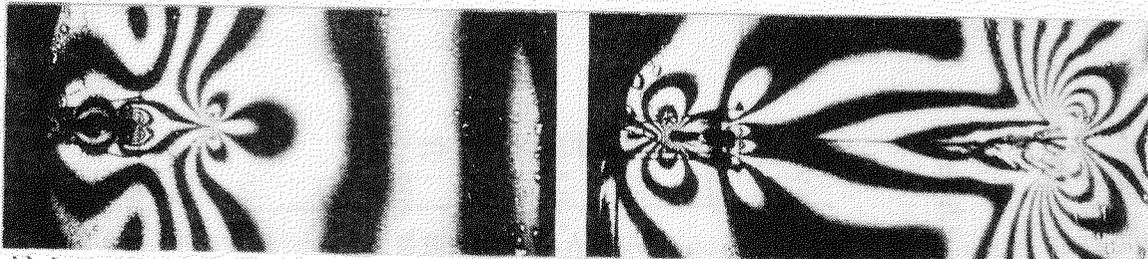
2) $t = 50 \mu\text{sec}$ (亀裂発生後)

7) $t = 500 \mu\text{sec}$



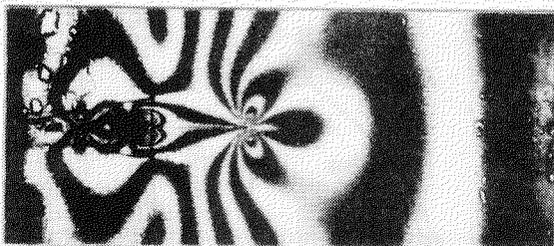
3) $t = 100 \mu\text{sec}$

8) $t = 600 \mu\text{sec}$



4) $t = 150 \mu\text{sec}$

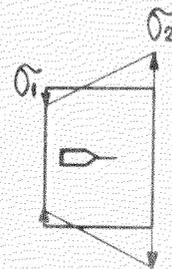
9) $t = 700 \mu\text{sec}$



5) $t = 200 \mu\text{sec}$

写真6.4.11 工ホキシ母材中の動的亀裂光弾性縞写真

枝分れ試験
 Test No. MB-1, C型試験片
 定荷重条件 $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2)/2 = 0.510 \text{ kg/mm}^2$
 $\sigma_2/\sigma_1 = -11, \sigma_2 > 0$
 打撃による亀裂発生, 打撃エネルギー; $0.1012 \text{ kg}\cdot\text{m}$



静的K値 (FEM解)
 静的破壊割断性値 K_c
 元弾性解析K値 K_d
 打撃直前のK値
 亀裂伝播速度
 $C_1 = \sqrt{E} = 1615 \text{ m/sec}$, 縦波速度

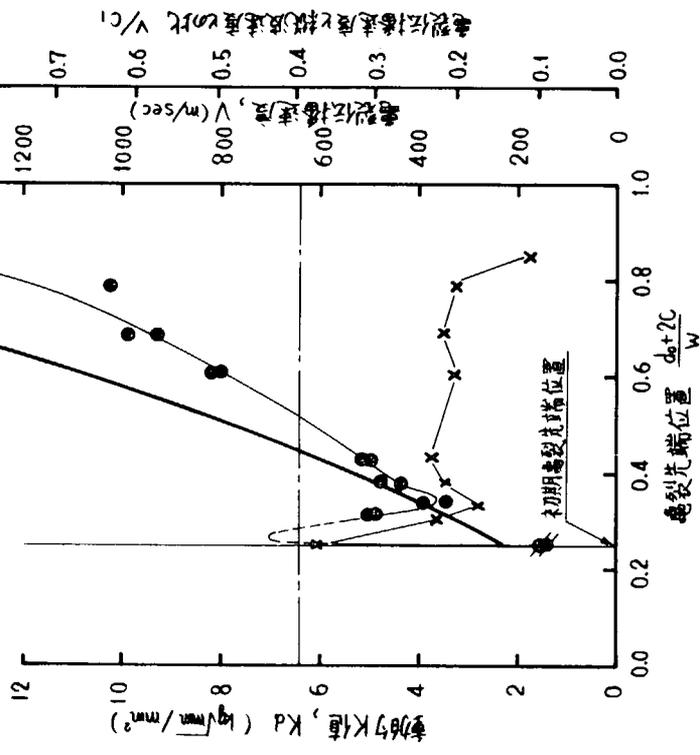
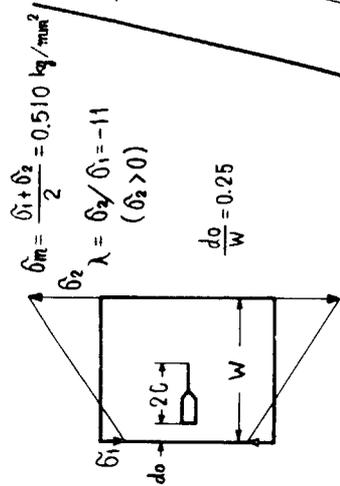
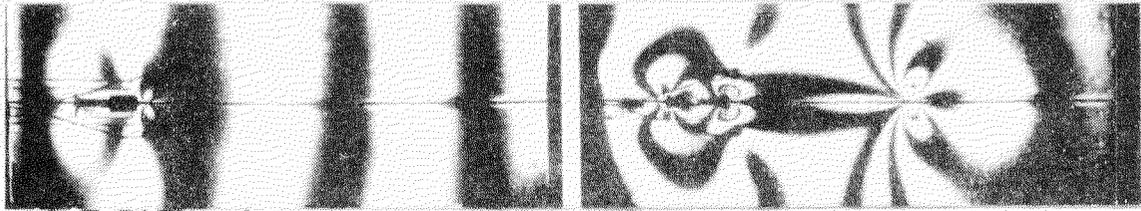
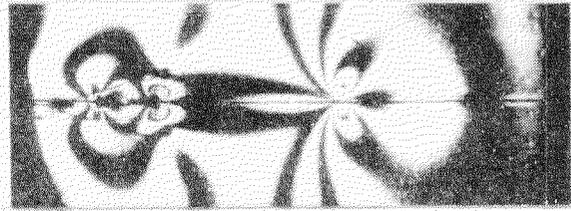


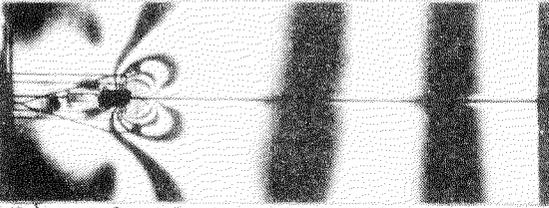
図6.4.20 工ボキノ母材中伝播亀裂の動的K値 K_d および亀裂伝播速度 V
 (枝分れ試験)
 Test No. MB-1, C型試験片
 定荷重条件 (Increasing)
 打撃による亀裂発生, 打撃工タマシ=0.1012 kg·m



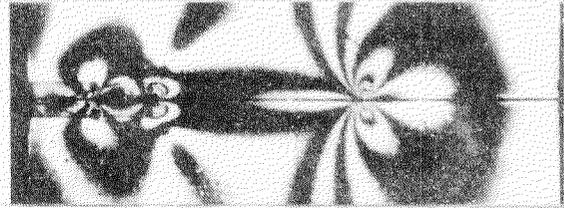
1) 亀裂発生前



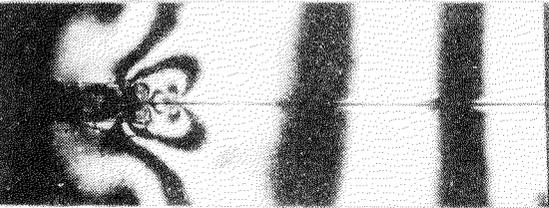
7) $t = 400 \mu\text{sec}$



2) $t = 3 \mu\text{sec}$



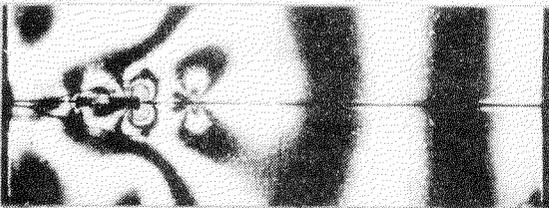
8) $t = 500 \mu\text{sec}$



3) $t = 50 \mu\text{sec}$



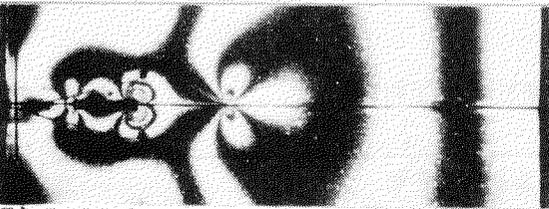
9) $t = 600 \mu\text{sec}$



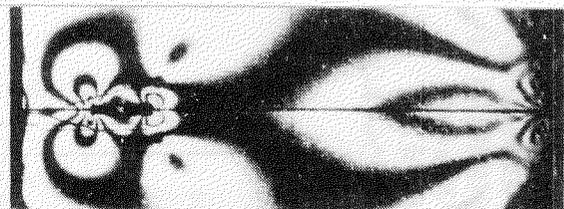
4) $t = 100 \mu\text{sec}$



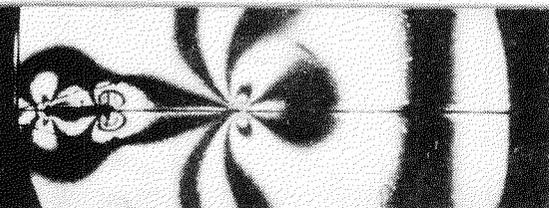
10) $t = 700 \mu\text{sec}$



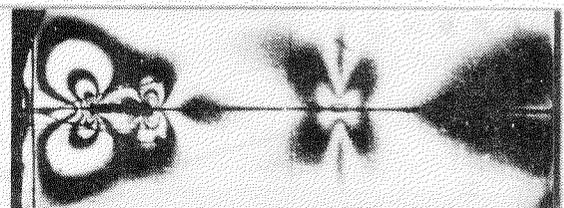
5) $t = 200 \mu\text{sec}$



11) $t = 800 \mu\text{sec}$



6) $t = 300 \mu\text{sec}$



12) $t = 1000 \mu\text{sec}$

写真6.4.12 溝付き型モデル中の動的亀裂光弾性縞写真

枝分れ試験

Test No. GB-1, C型試験片, 溝の深さ1.24 mm

定荷重条件 $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2)/2 = 0.300 \text{ kg/mm}^2$

$\sigma_2/\sigma_1 = -11, \sigma_2 > 0$

打撃による亀裂発生, 打撃エネルギー: 0.0473 kg·m

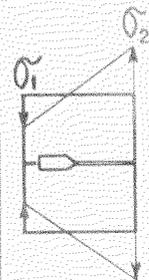


表6.4.7 光弾性皮膜法を利用した大型伝播試験結果一覧

鋼種	溶接法	試験片符号	試験温度 分布形式	衝撃I値 E _I (kg·m)	クロス応力 σ _g (kg/mm ²)	停止長さ Ca (mm)	停止温度 T _a (°C)	脆性破壊 伝播抵抗値 Kca (kg√mm/mm ²)	備考
KAS (254)	母材	KAS-BM-1	勾配型	300	13	—	> 6	< 610	T _n otch = -13°C, 伝播貫通 冷却中 -5~-8°Cとなり皮膜剥離。
		KAS-BM-2	平坦型	—	16	—	—	—	T _n otch = 6°C, 負荷中に剥離 皮膜のみ100mm進展が入る。試験中止。
	直外口 ガス溶接 (ホト)	KAS-BE-1	平坦型	300	16	—	> 11	< 550	T _n otch = 0°C, 伝播貫通 亀裂伝播中に皮膜の剥離が起る。
		KAS-BE-2	平坦型	300	16	460	11	641	T _n otch = 0°C, ホト部で停止 皮膜剥離が破壊とほぼ同時に起る。

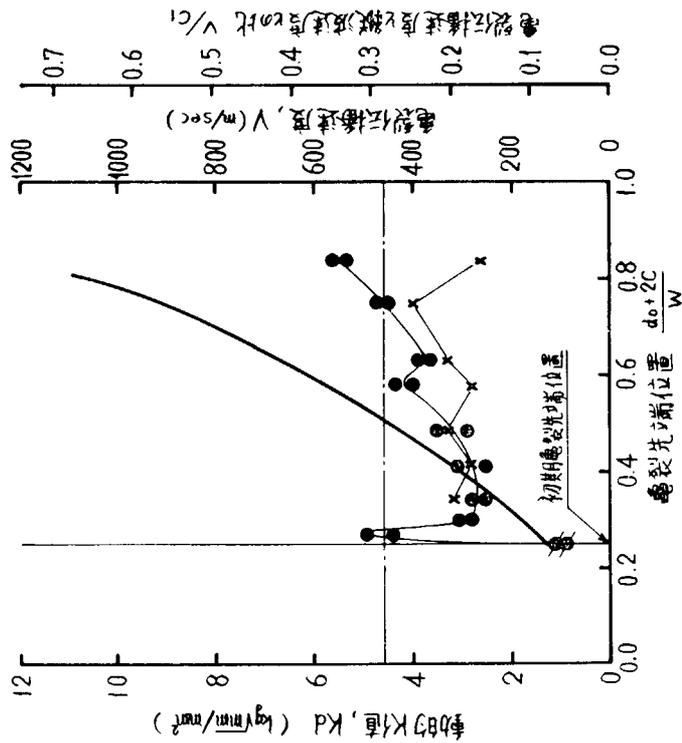
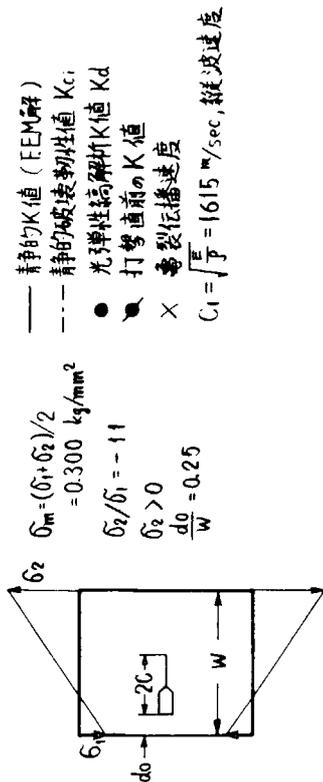
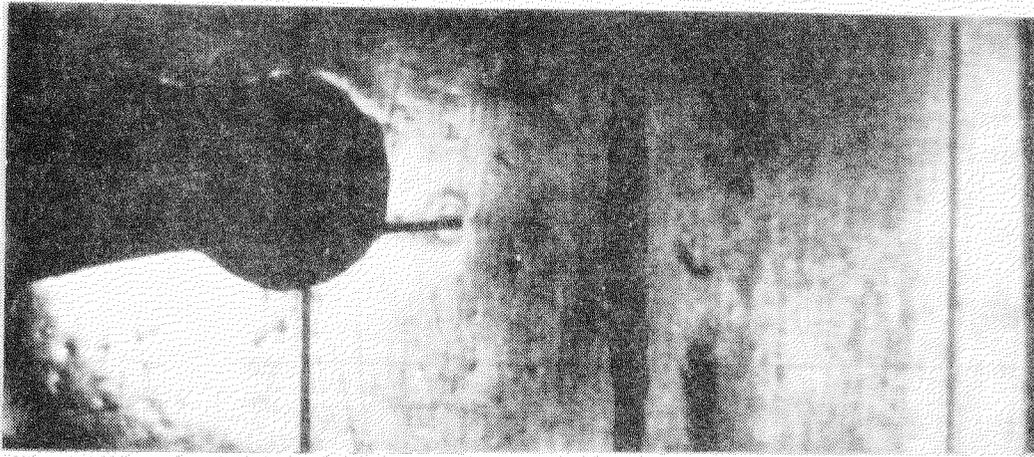
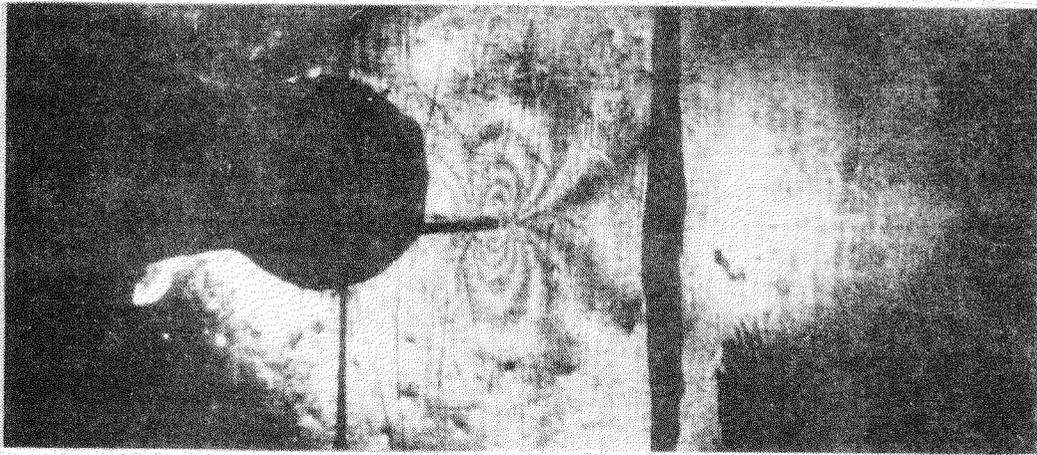


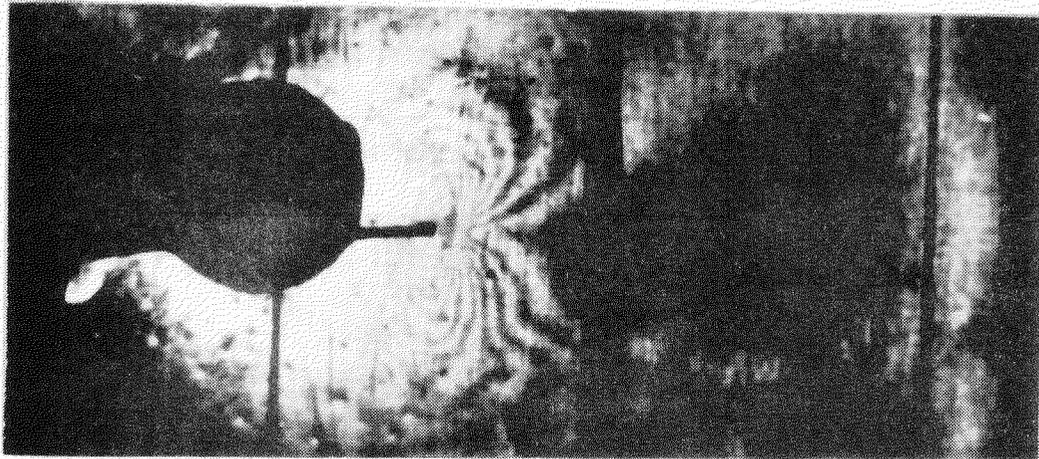
図6.4.21 溝付き型モデル中伝播亀裂の動的K値K_dおよび亀裂伝播速度V
 (柱分れ試験)
 Test No. GB-1, C型試験片, 溝の深さ1.24mm
 定荷重条件 (Increasing)
 打撃による亀裂発生, 打撃I値E_I = 0.0473kg·m



1) $\sigma = 0 \text{ kg/mm}^2$



2) $\sigma = 7.88 \text{ kg/mm}^2$



3) $\sigma = 11.8 \text{ kg/mm}^2$

10mm

写真6.4.13 KAS鋼エレクトロガス溶接継手ボルト部に入れた
切欠き先端の静的光弾性縞

[Test No. KAS-BE-1]
[2C=150mmの位置]

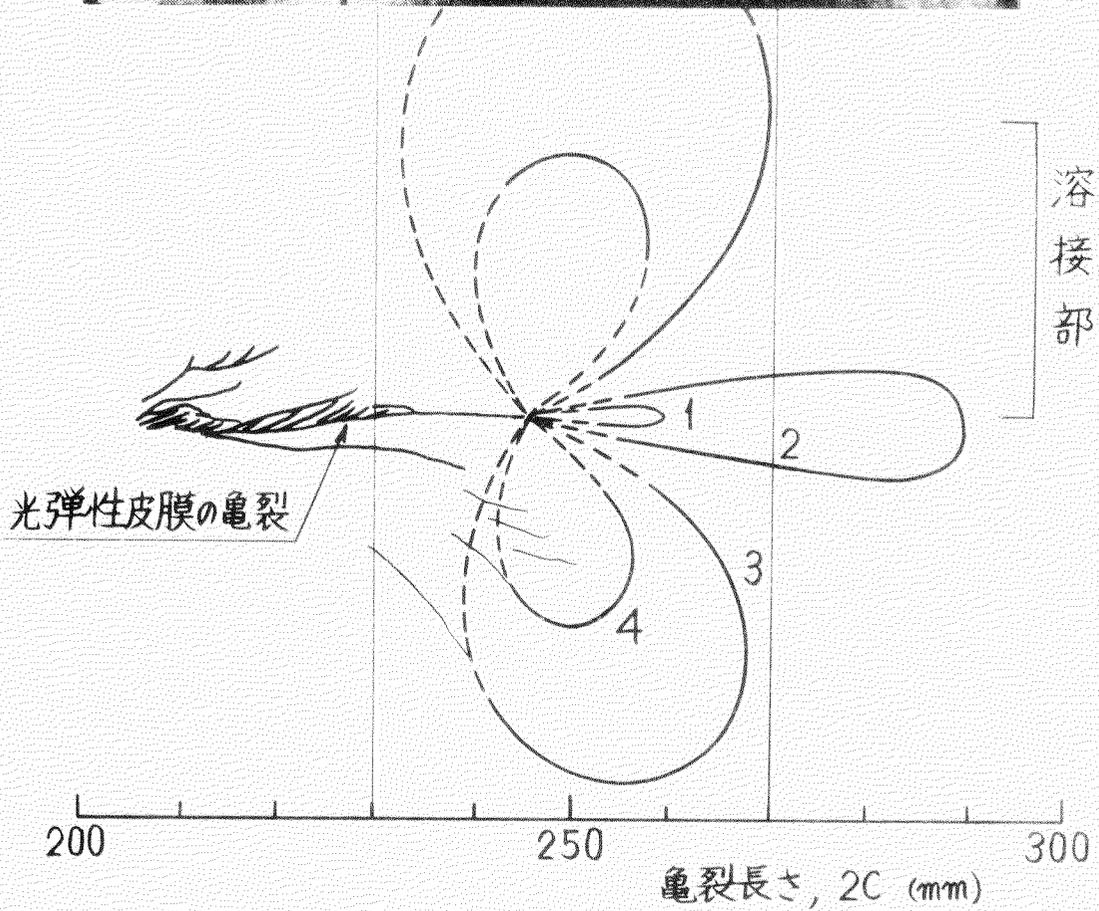


写真6.4.14 KAS鋼エレクトロガス溶接継手ボンド部
伝播亀裂先端の動的光弾性縞

[Test No. KAS-BE-2]
[2C = 約245mmの位置]

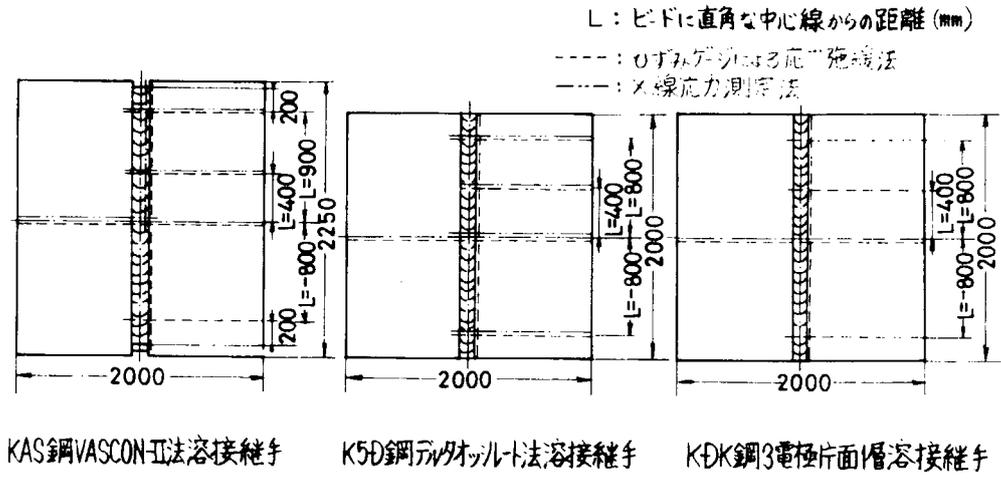


図7.1.1 残留応力測定位置

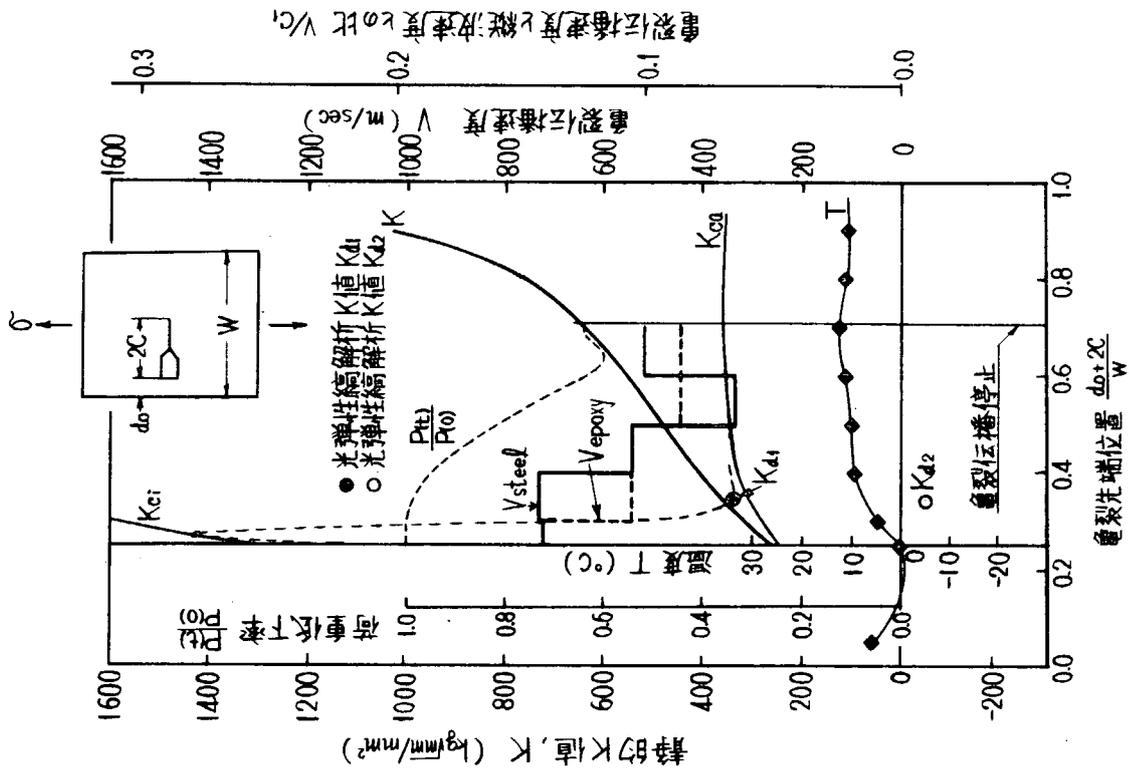
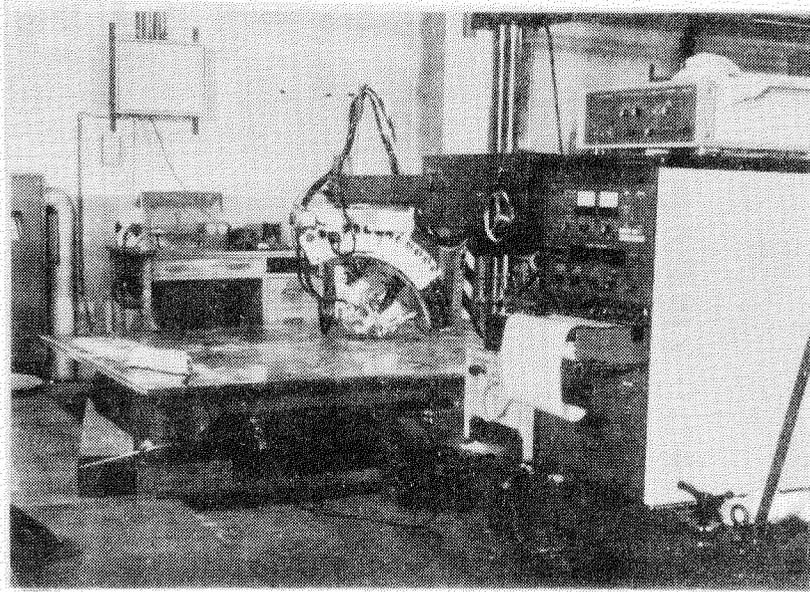
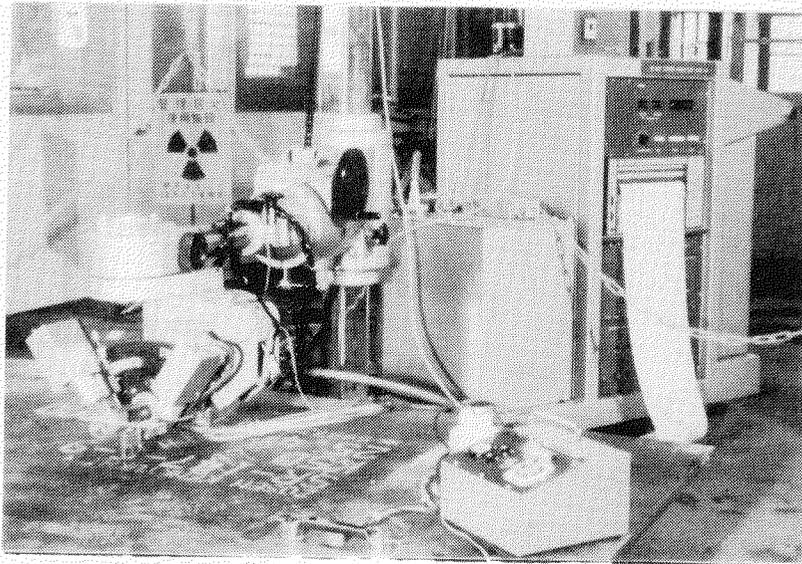


図6.4.22 光弾性皮膜法を利用した大形伝播試験結果
 [Test No. KAS-BM-2 (KAS鋼I/VII Dガス溶接継手部)]

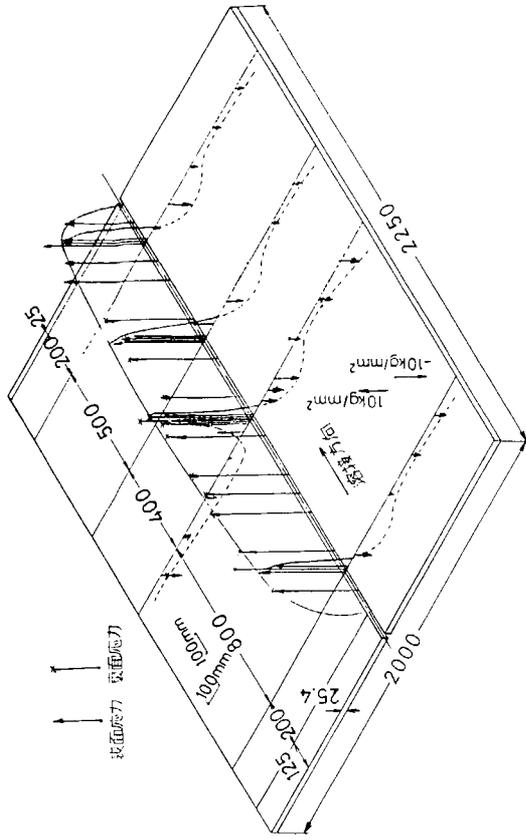


KAS鋼VASCON-II法溶接継手(理学電機 KK製 MSF)

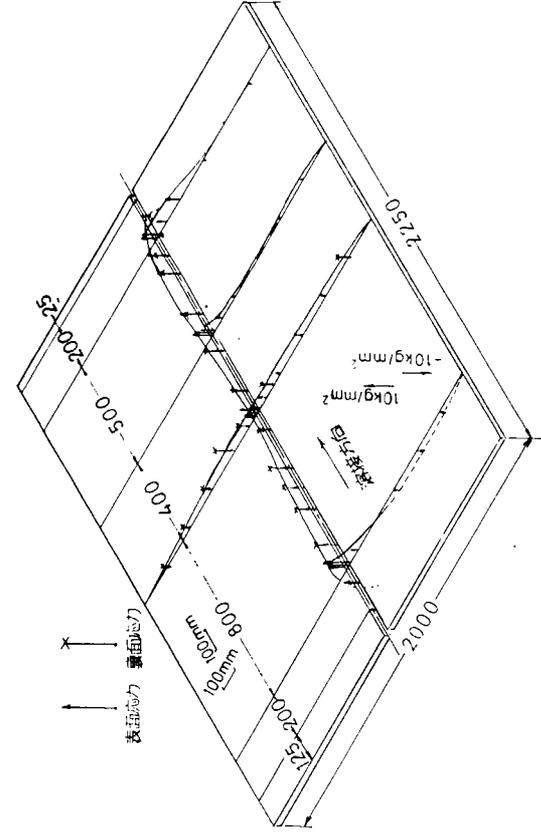


K5D鋼デルタフィルト法溶接継手(KK島津製作所製 SMX-50)

写真7.1.1 X線応力測定装置および測定状況



(a) 溶接ヒド平行方向 σ_{RL}



(b) 溶接ヒド直角方向 σ_{RT}

図7.1.4 KAS鋼VASCUN-Ⅱ法溶接継手の残留応力分布

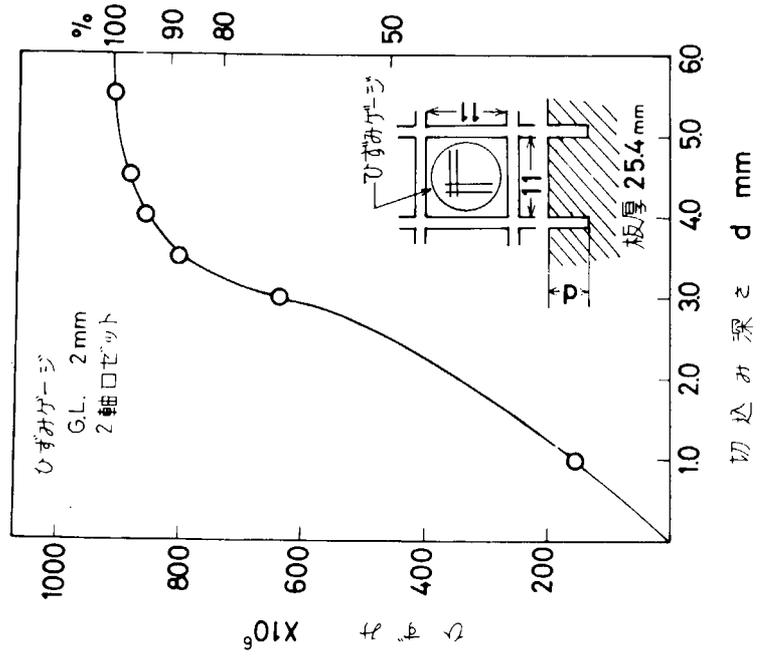
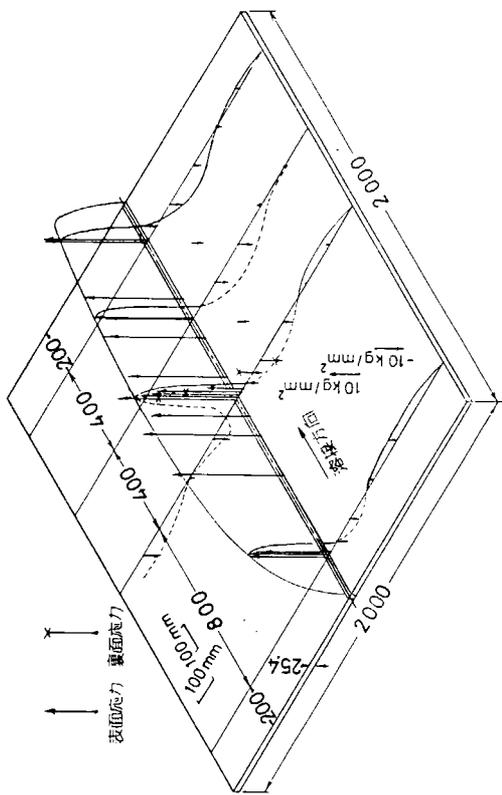
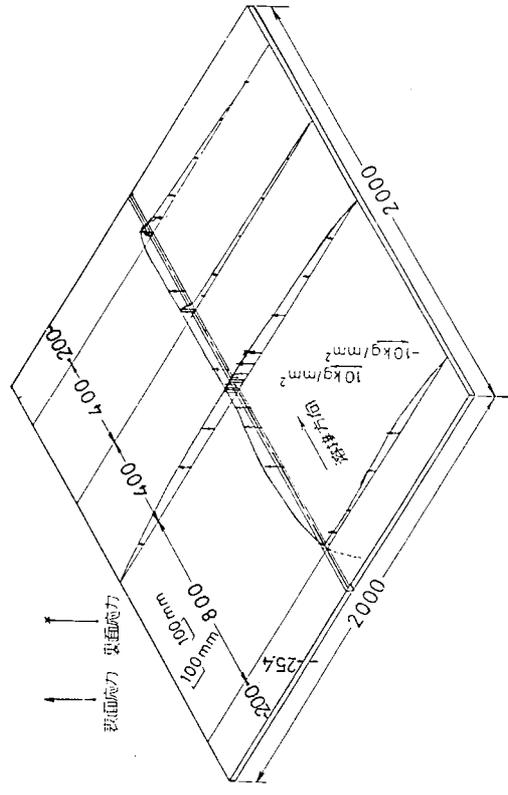


図7.1.3 表面解放によるひずみの変化

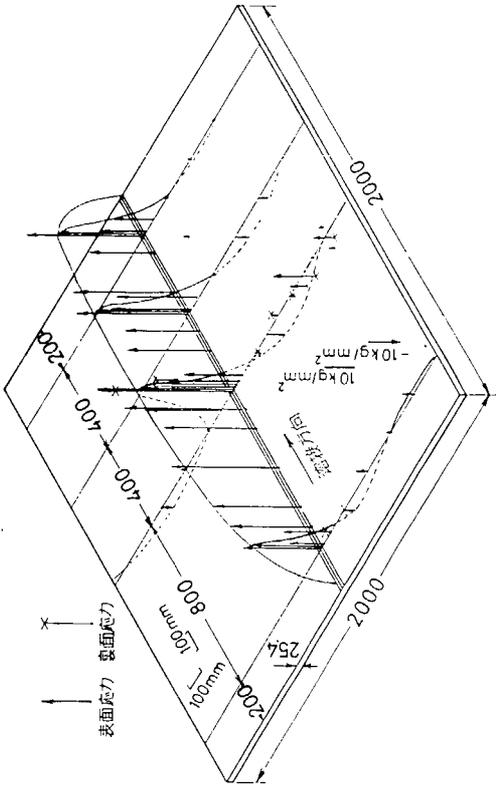


(a) 溶接ビード平行方向 σ_{RL}

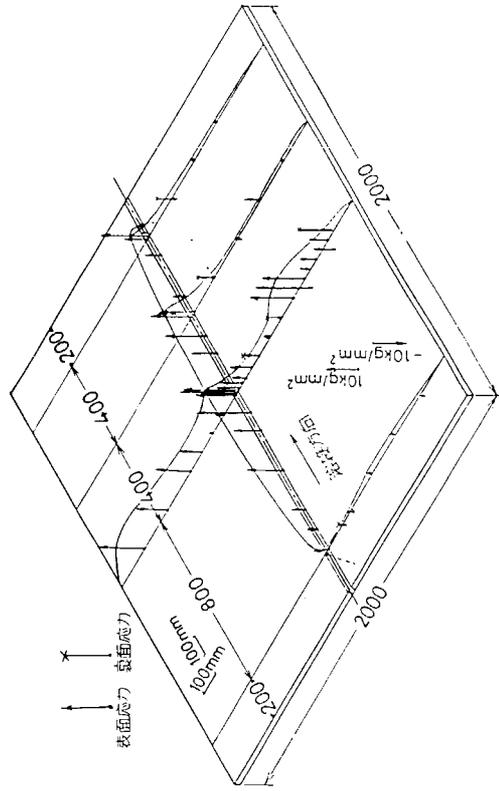


(b) 溶接ビード直角方向 σ_{RT}

図7.1.5 K5D鋼デルタ溶接継手の残留応力分布

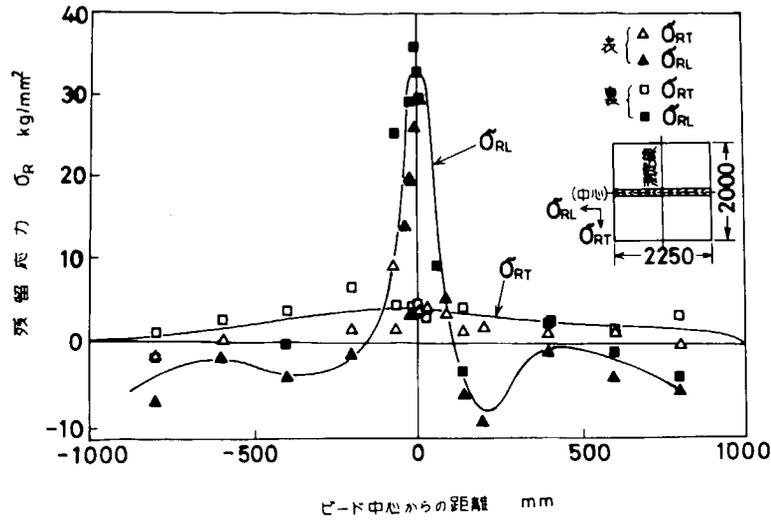


(a) 溶接ビード平行方向 σ_{RL}



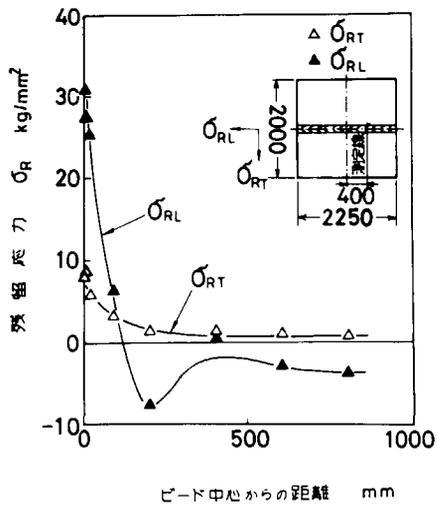
(b) 溶接ビード直角方向 σ_{RT}

図7.1.6 KDK鋼3電極片面1層溶接継手の残留応力分布

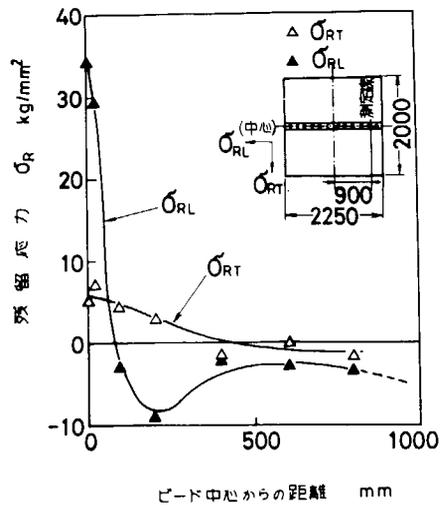


ビードに直角方向L=0線上の分布

図7.1.7(1) KAS鋼VASCON-II法溶接継手のひずみゲージによる残留応力測定結果

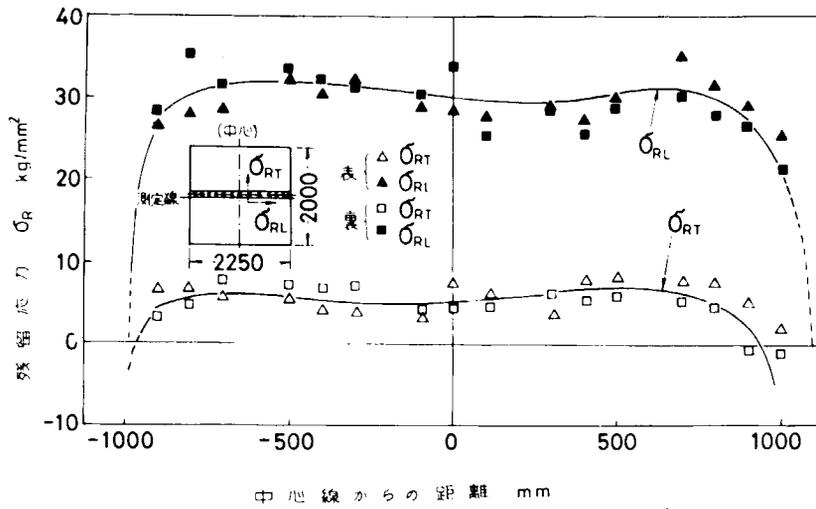


ビードに直角方向L=400線上の分布



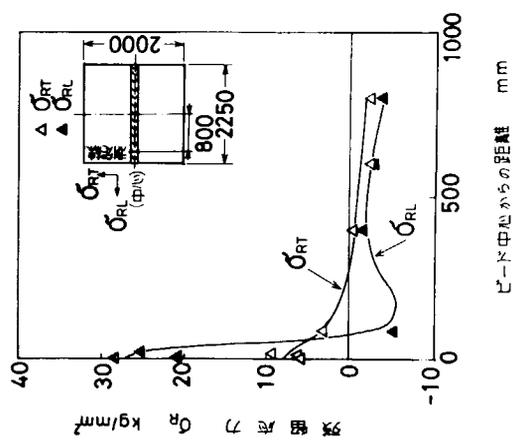
ビードに直角方向L=900線上の分布

図7.1.7(2) KAS鋼VASCON-II法溶接継手のひずみゲージによる残留応力測定結果



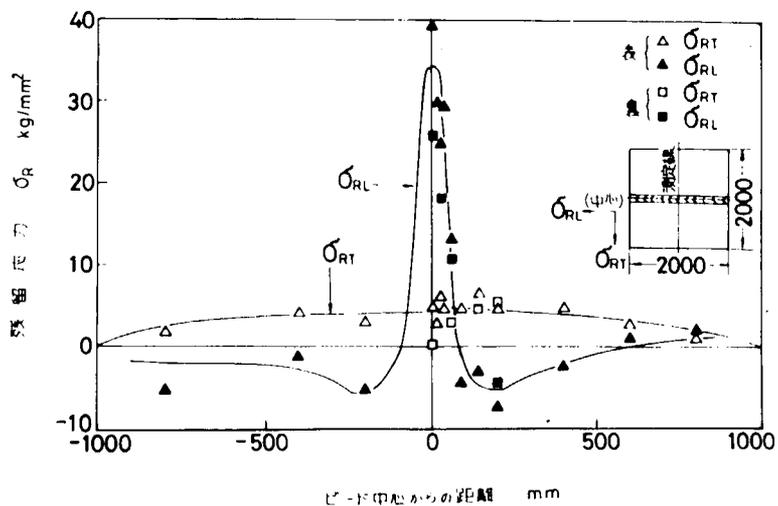
ボンド線上の分布

図7.1.7(4) KAS鋼 VASCON-II法溶接継手のひずみゲージによる残留応力測定結果



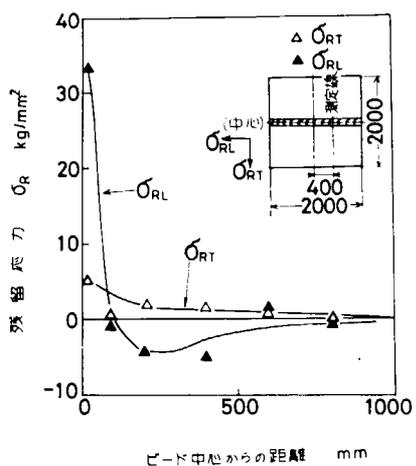
ビッドに直角方向 L=800 線上の分布

図7.1.7(3) KAS鋼 VASCON-II法溶接継手のひずみゲージによる残留応力測定結果

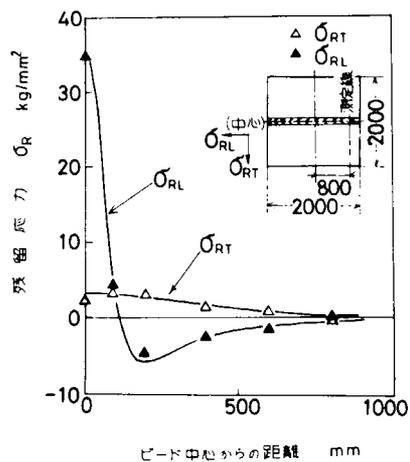


ビードに直角方向L=0線上の分布

図7.1.8(1) K5D鋼デルタオシット法溶接継手のひずみゲジによる残留応力測定結果

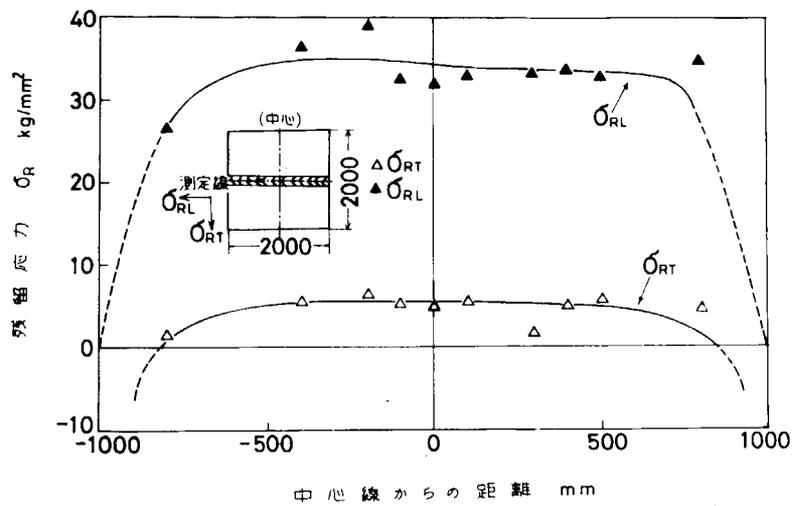


ビードに直角方向L=400線上の分布



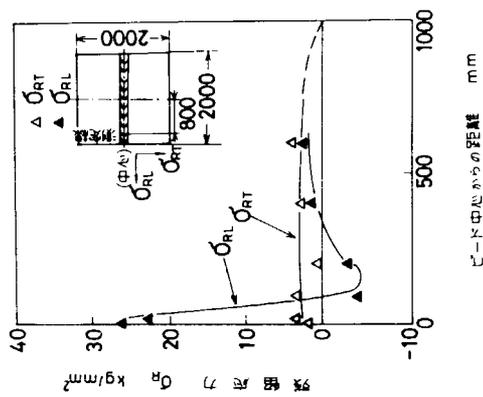
ビードに直角方向L=800線上の分布

図7.1.8(2) K5D鋼デルタオシット法溶接継手のひずみゲジによる残留応力測定結果



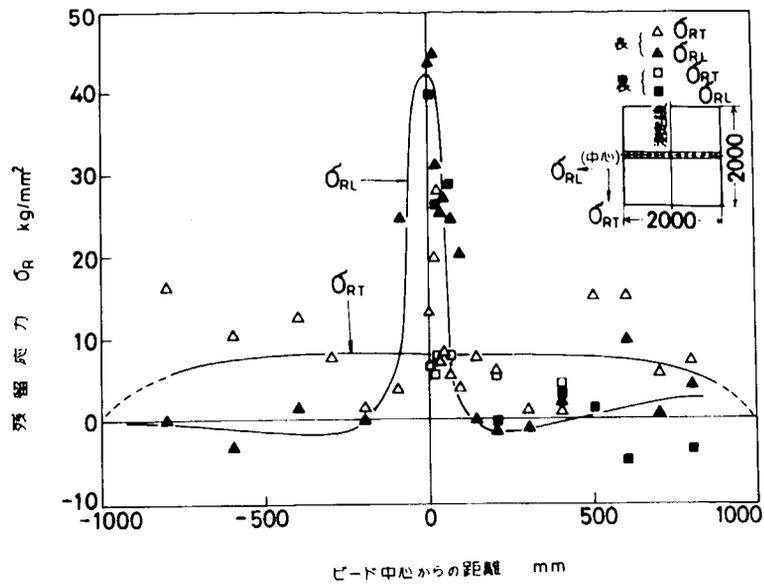
ボンド線上の分布

図7.1.8(4) K5D鋼デルタオシルト法溶接継手のひずみゲージによる残留応力測定結果



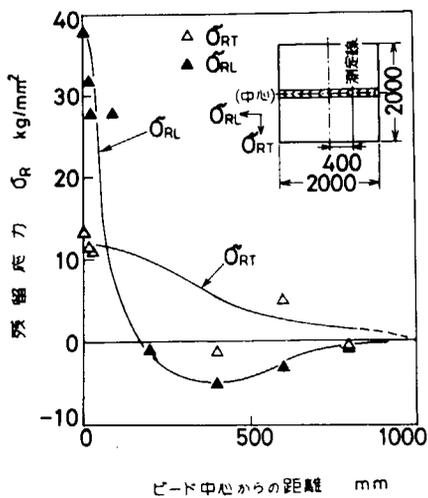
ボンドに直角方向L=-800線上の分布

図7.1.8(3) K5D鋼デルタオシルト法溶接継手のひずみゲージによる残留応力測定結果

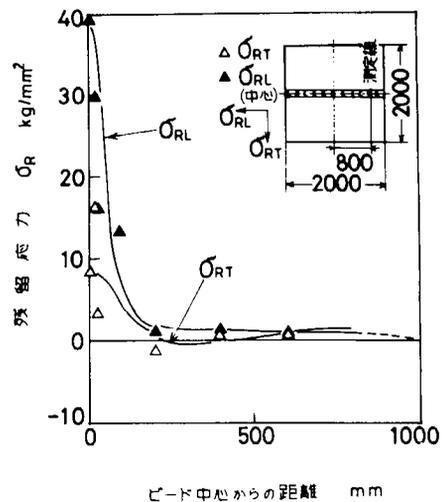


ビードに直角方向L=0線上の分布

図7.1.9(1) KDK鋼3電極片面層溶接継手のひずみゲージによる残留応力測定結果

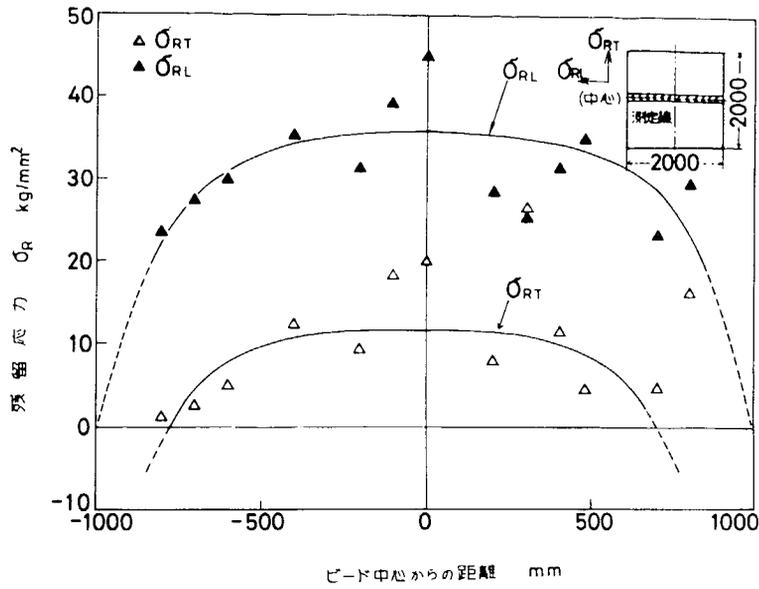


ビードに直角方向L=400線上の分布



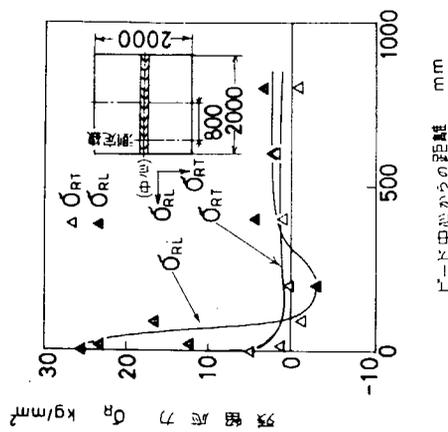
ビードに直角方向L=800線上の分布

図7.1.9(2) KDK鋼3電極片面1層溶接継手のひずみゲージによる残留応力測定結果



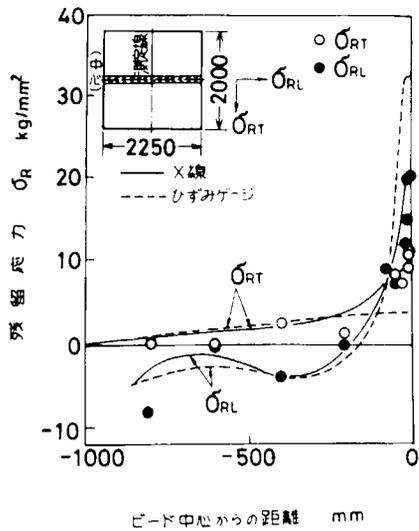
ボツド線上の分布

図7.1.9(4) KDK鋼3電極片面層溶接継手のひずみゲージによる残留応力測定結果

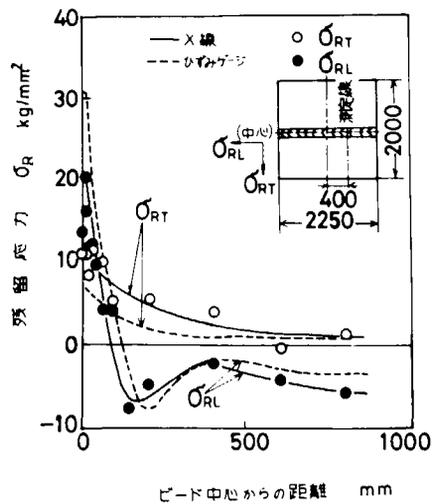


ボツドに直角方向上=800線上の分布

図7.1.9(3) KDK鋼3電極片面1層溶接継手のひずみゲージによる残留応力測定結果

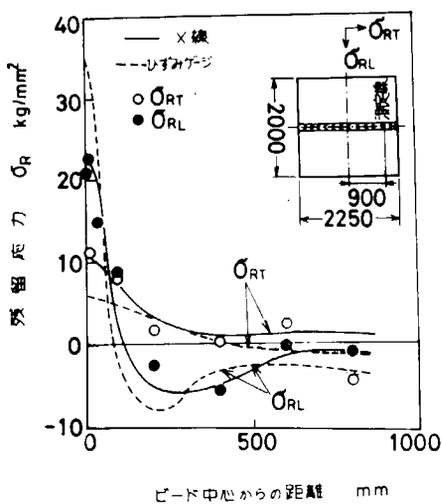


ビードに直角方向 L=0 線上の分布

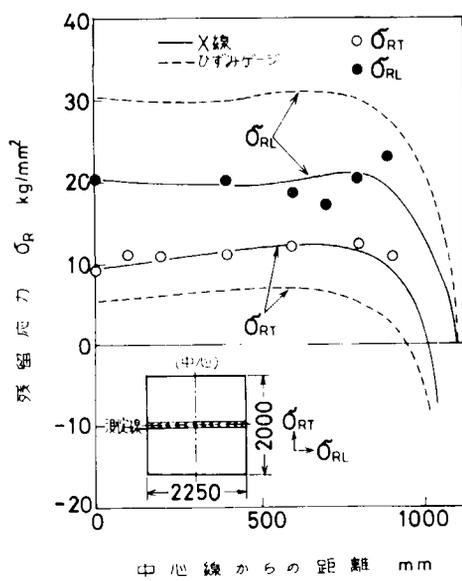


ビードに直角方向 L=400 線上の分布

図 7.1.10 (1) KAS 鋼 VASCON-II 法溶接継手の X 線による残留応力測定結果

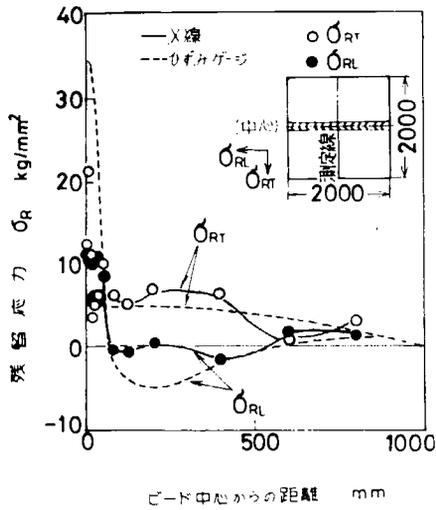


ビードに直角方向 L=900 線上の分布

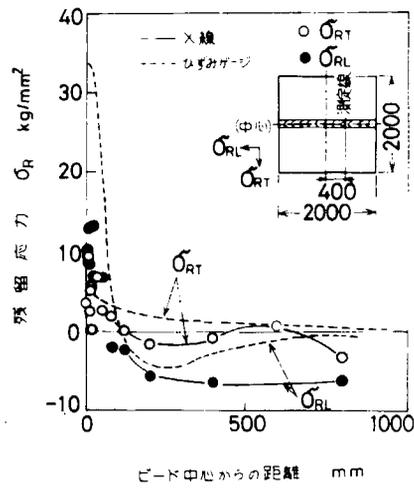


ボンド線上の分布

図 7.1.10 (2) KAS 鋼 VASCON-II 法溶接継手の X 線による残留応力測定結果

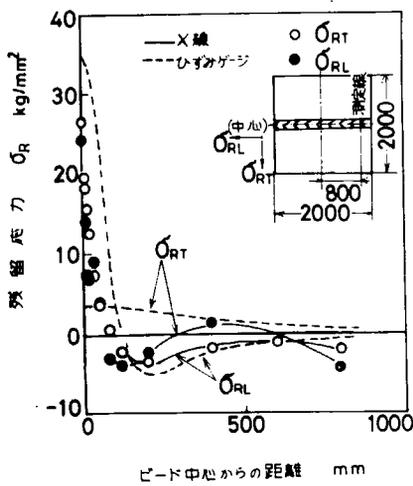


ビードに直角方向 L=0 線上の分布

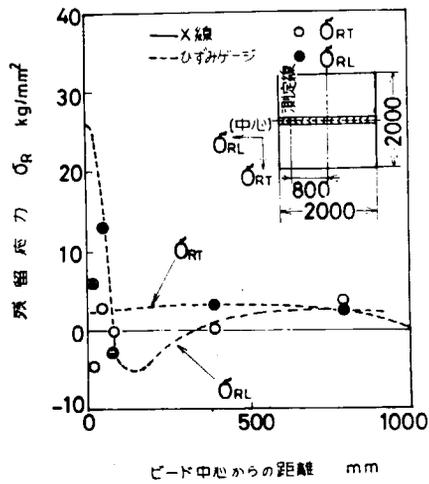


ビードに直角方向 L=400 線上の分布

図7.1.11(1) K5D鋼デルタオッリート法溶接継手のX線による残留応力測定結果



ビードに直角方向 L=800 線上の分布



ビードに直角方向 L=-800 線上の分布

図7.1.11(2) K5D鋼デルタオッリート法溶接継手のX線による残留応力測定結果

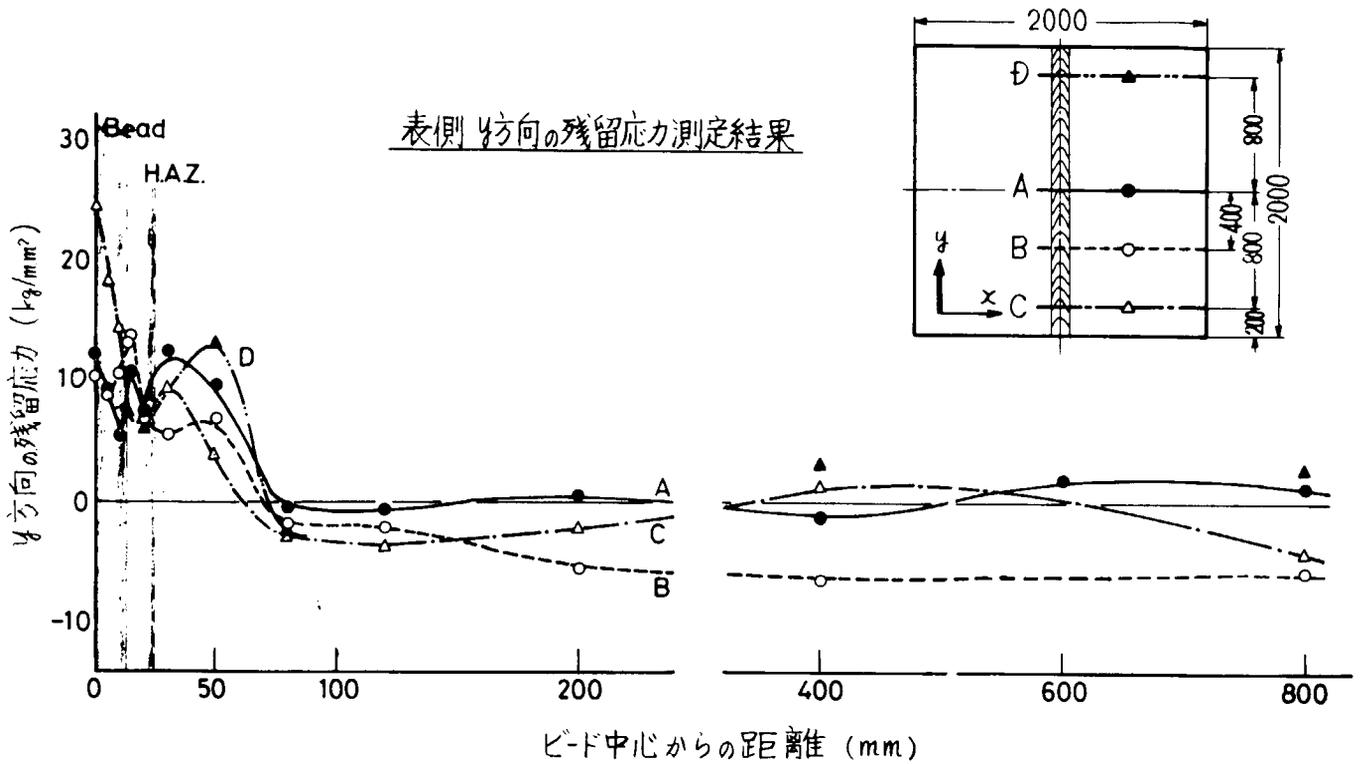


図7.1.12(1) K5D鋼, 25.4mm厚, 2000×2000mm²試験片の応力分布 (X線応力測定値)

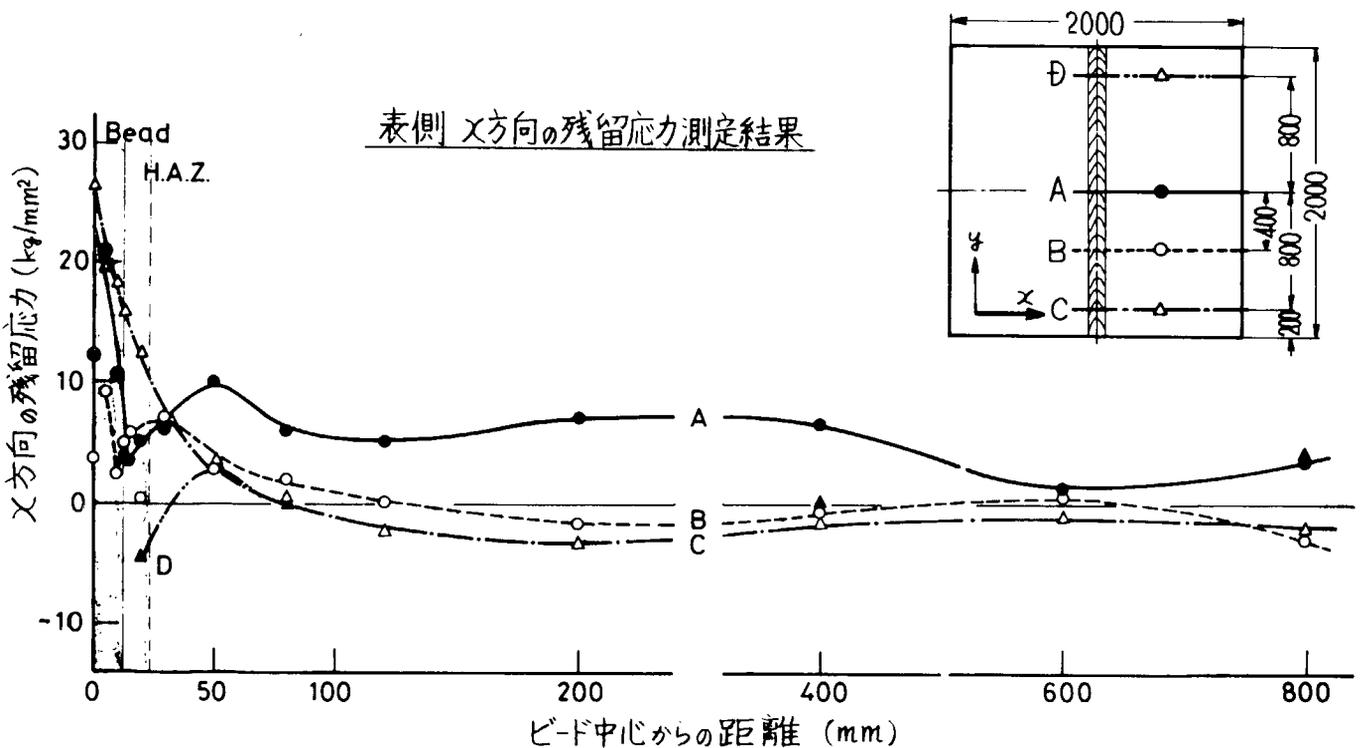


図7.1.12(2) K5D鋼, 25.4mm厚, 2000×2000mm²試験片の応力分布 (X線応力測定値)

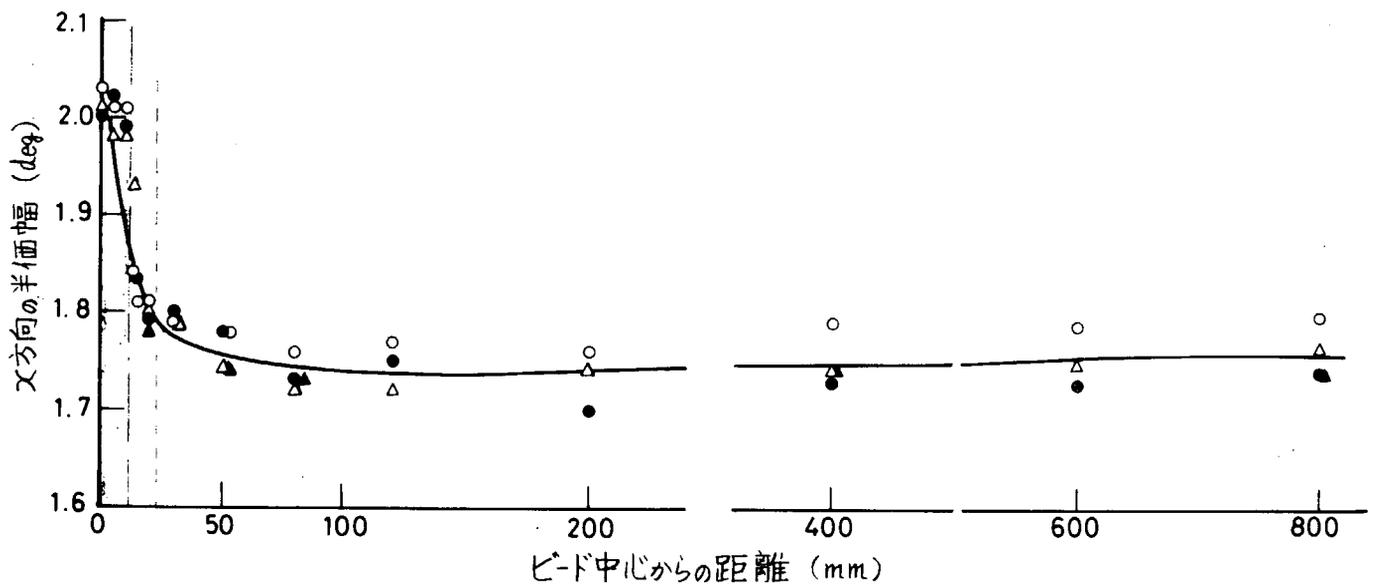


図7.1.12(3) K5D鋼, 25.4mm厚, 2000×2000mm²試験片の応力分布 (半価幅)

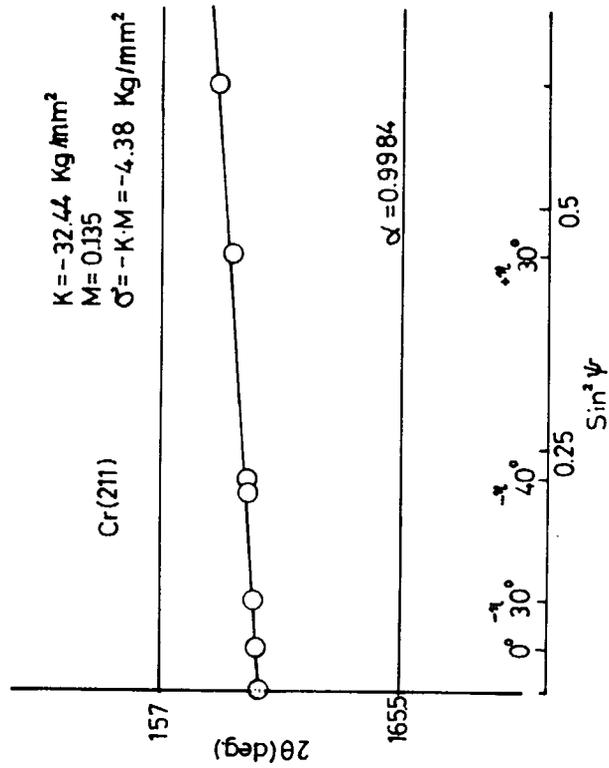


図7.1.13 $\sin^2 \psi$ 線図の一例

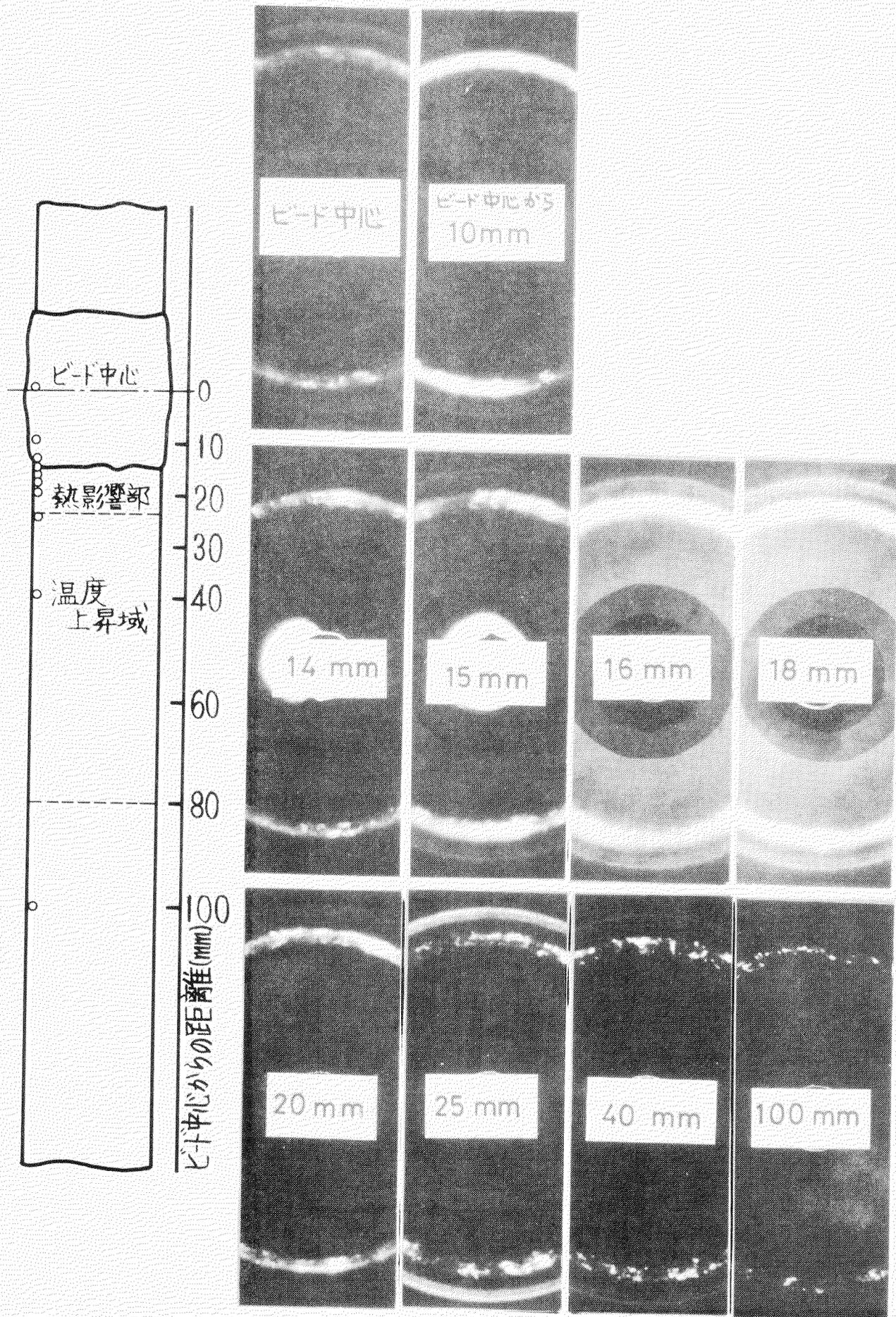


図7.1.14 背面反射写真と撮影位置

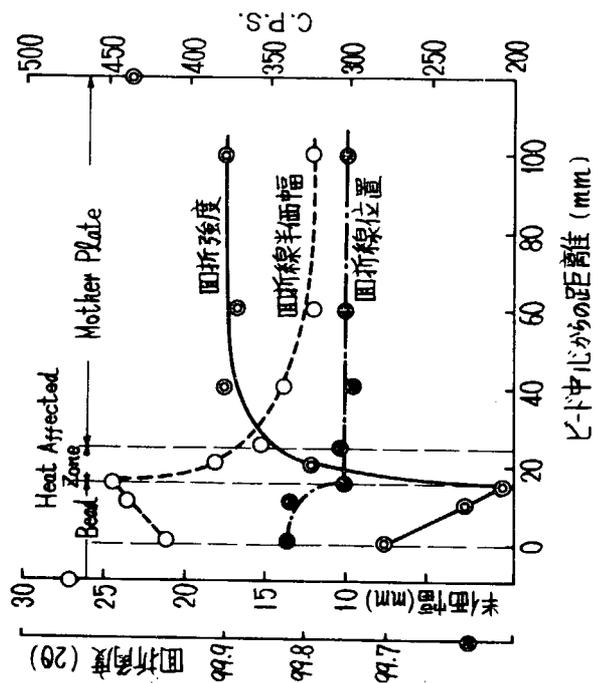


図7.1.15 溶接継手部の格子常数、圓折強度、圓折幅

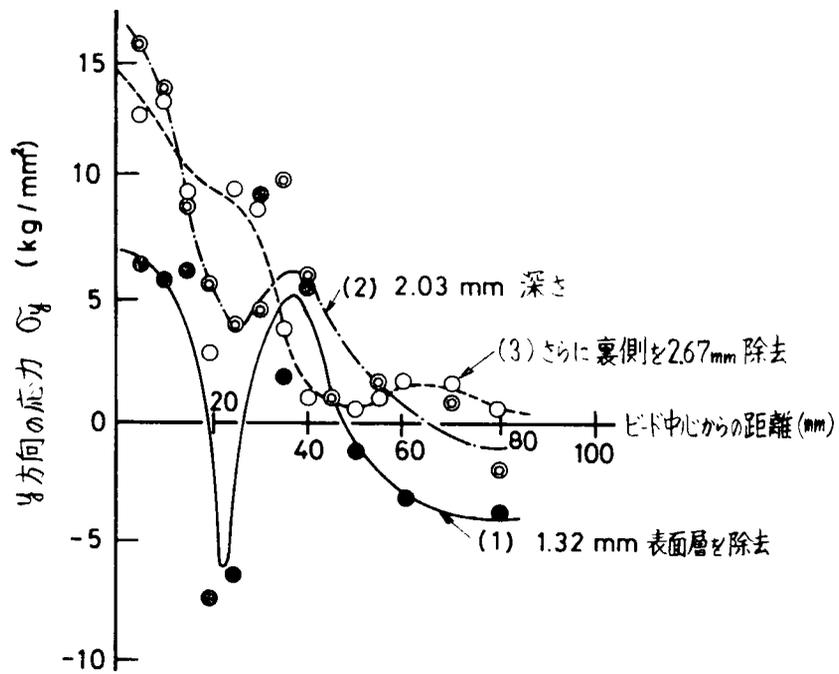


図7.1.16 板厚方向における応力状態の変化

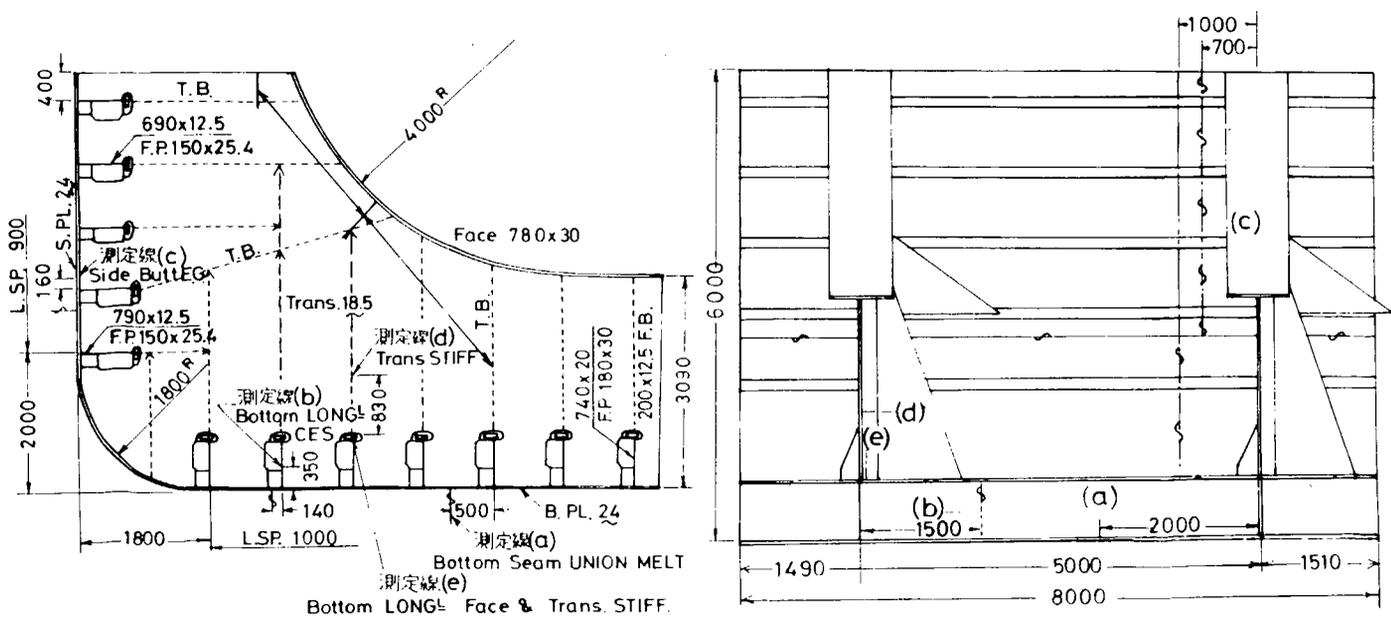


図7.2.1 残留応力計測を行なった実船殻ブロック

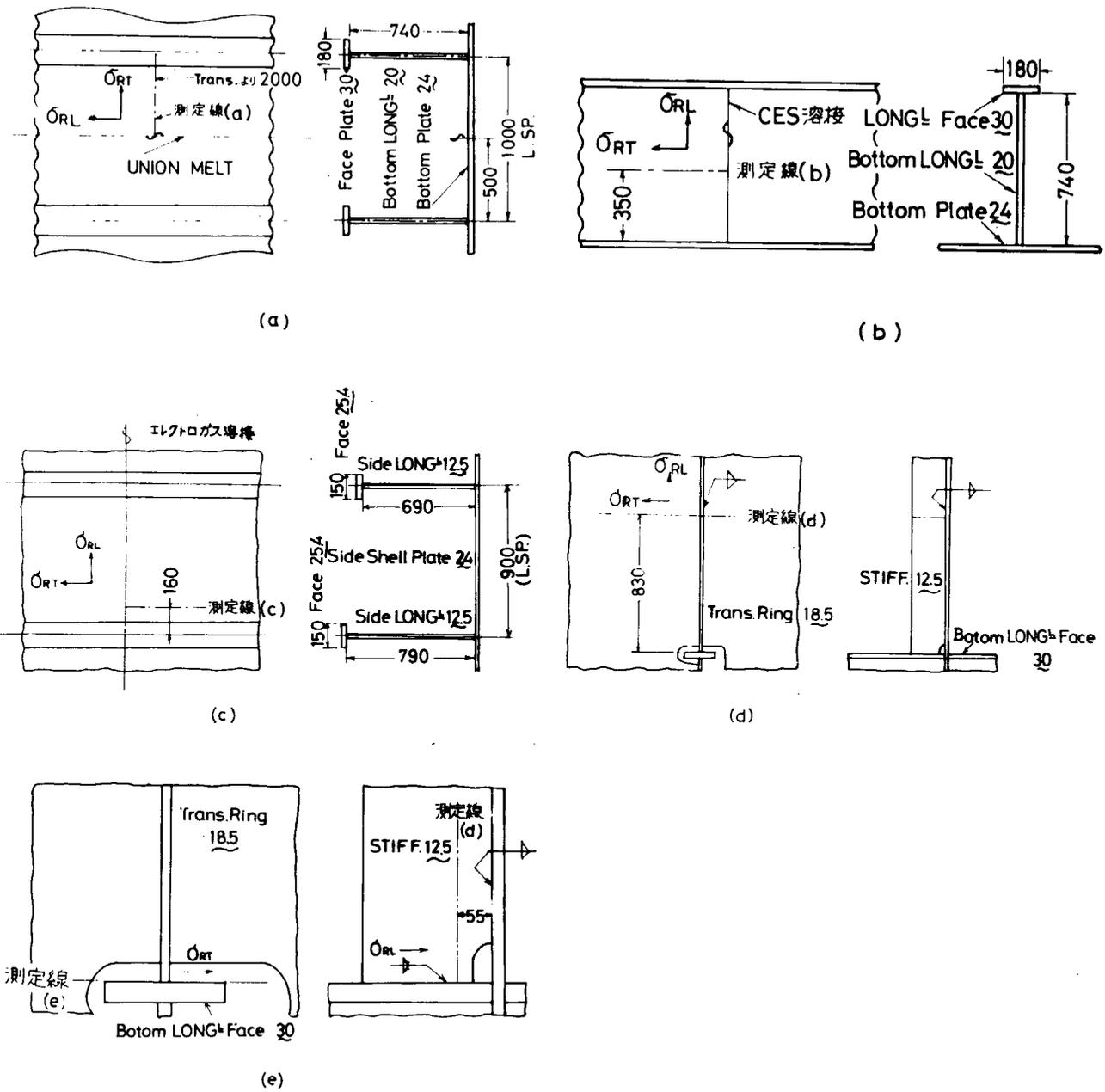


図7.2.2 測定位置の詳細

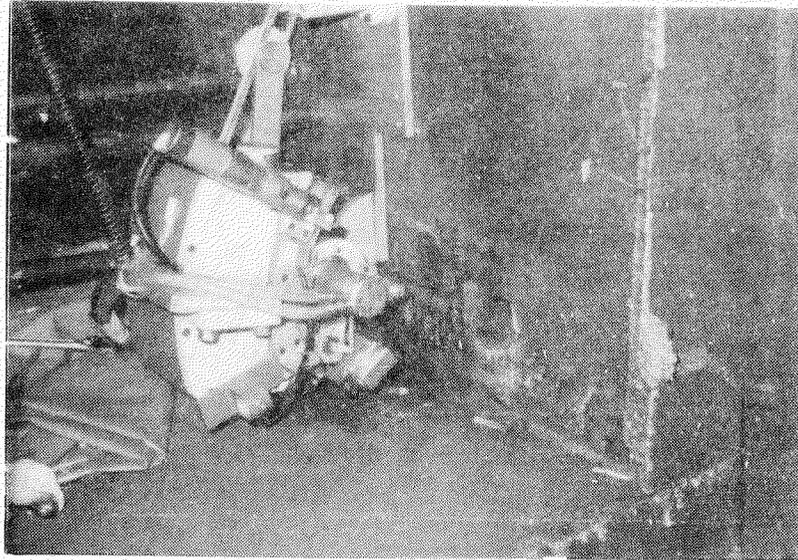


写真7.2.1 現場用に改良されたゴニオータ部
(理学電機KK製)

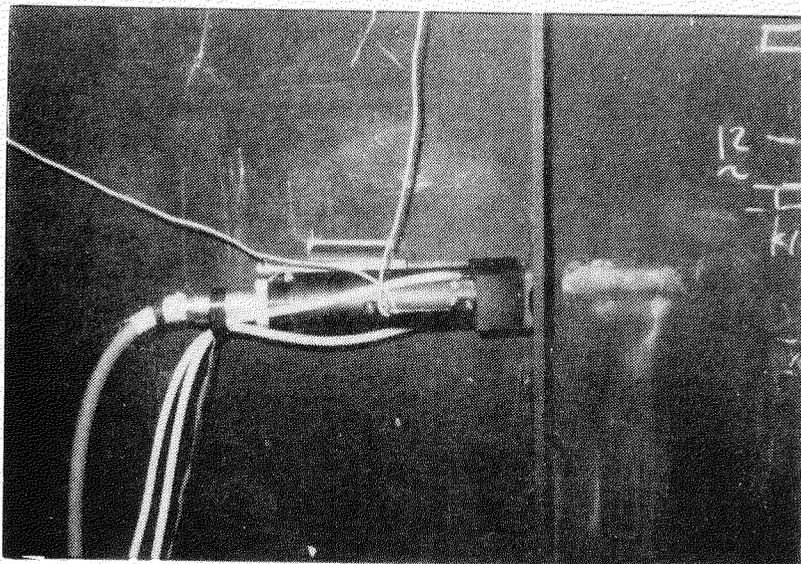
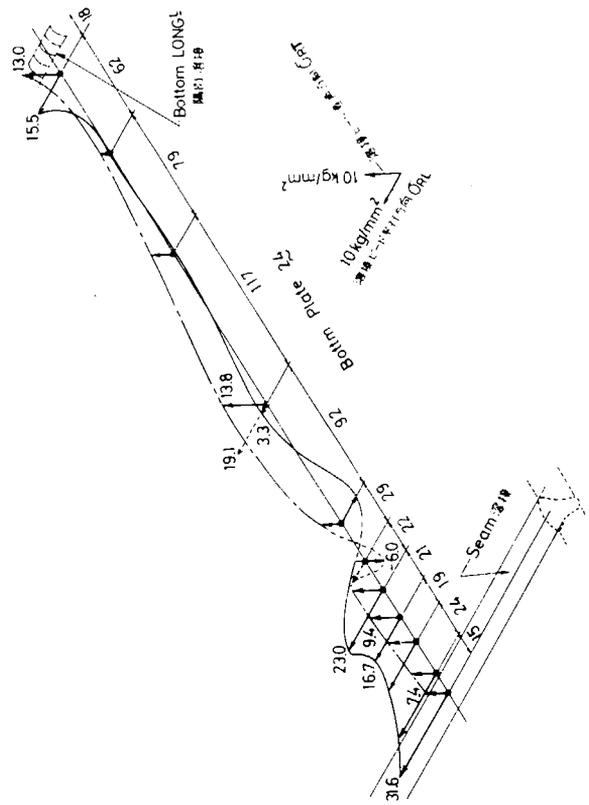
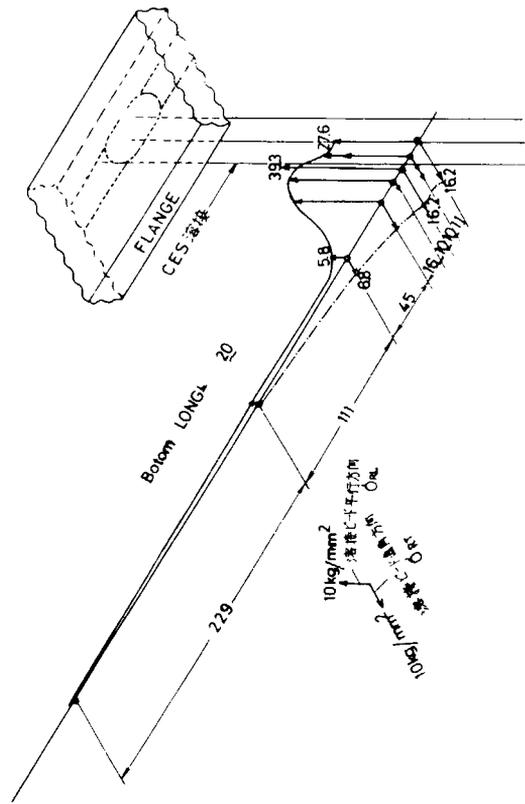


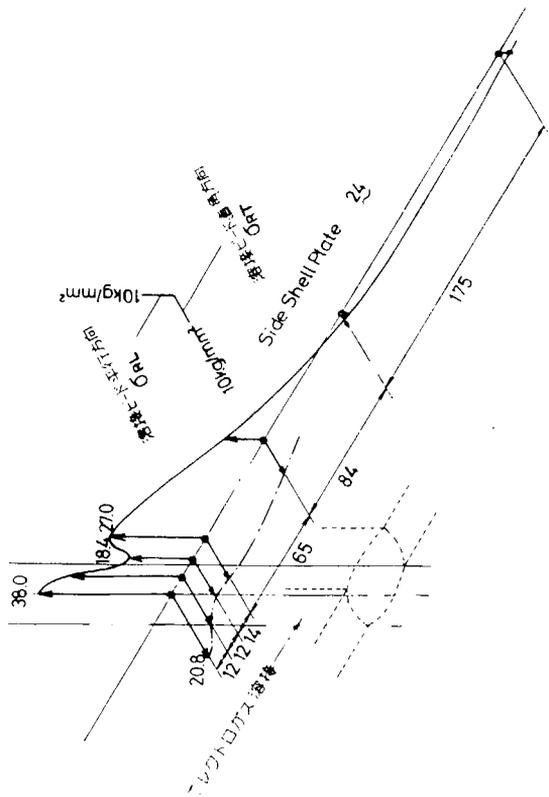
写真7.2.2 試作した携帯式X線カメラ
(KK島津製作所製)



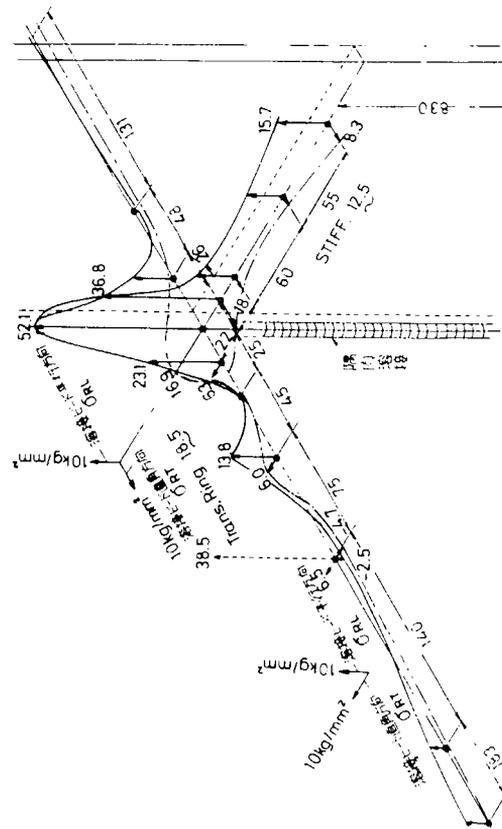
Bottom Plate の シーム 継手



Bottom LONG2 の バット 継手



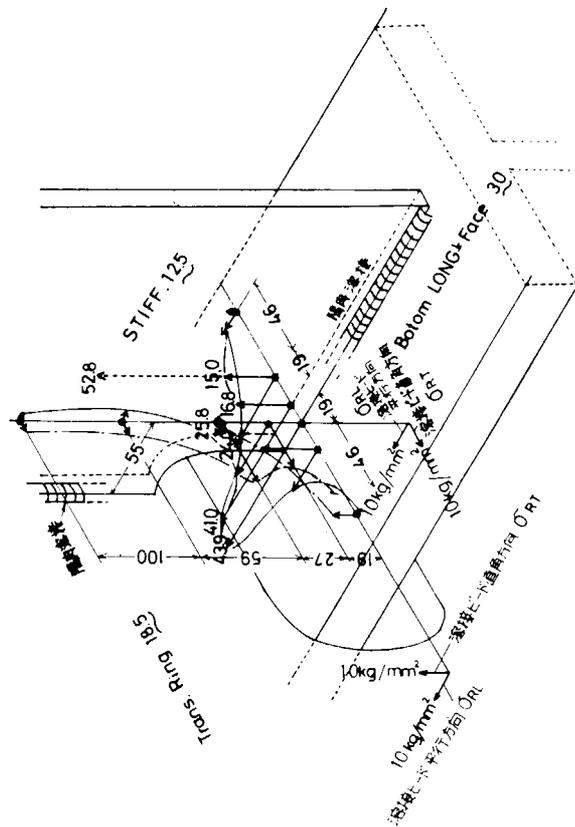
Side Shell Plate の バット 継手



Trans. Ring & STIFF. の 隅肉 溶接 継手

図 7.2.3 (2) 実船設ブロックにおける各種溶接部のひずみゲージによる残留応力測定結果

図 7.2.3 (1) 実船設ブロックにおける各種溶接部のひずみゲージによる残留応力測定結果



Bottom LONG-Face & STIFF. の隔肉溶接継手

図7.2.3(3) 実船殻ブロックにおける各種溶接部のけがみゲージによる残留応力測定結果

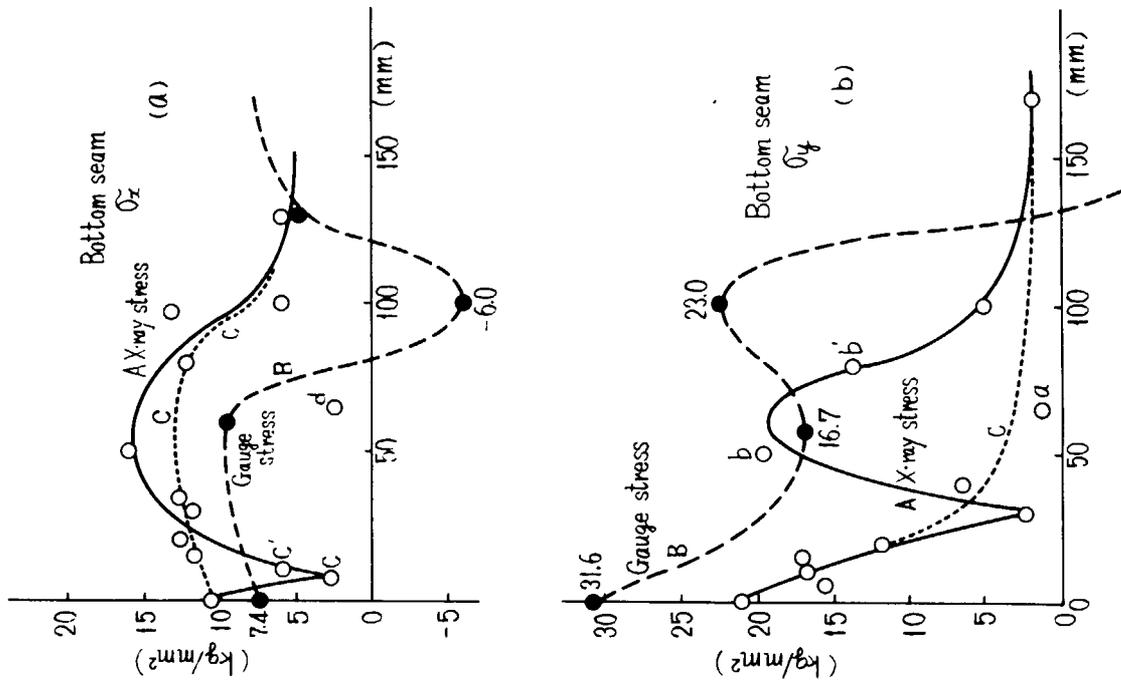


図7.2.4 Bottom Seam部の応力測定値 (σ_x, σ_y)

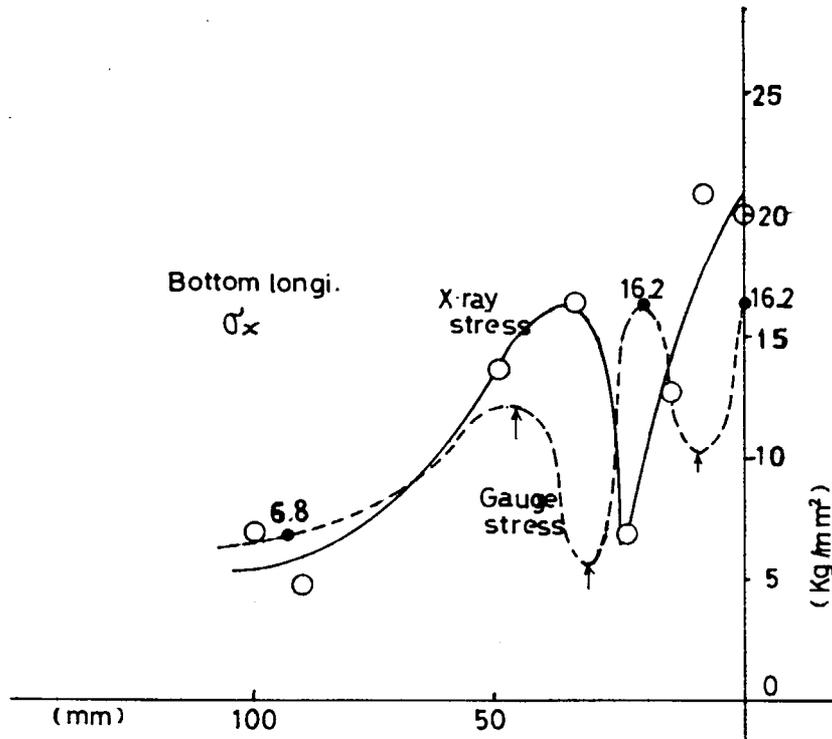


図7.2.5(1) Bottom LONG⁺部の応力測定値 (σ_x)

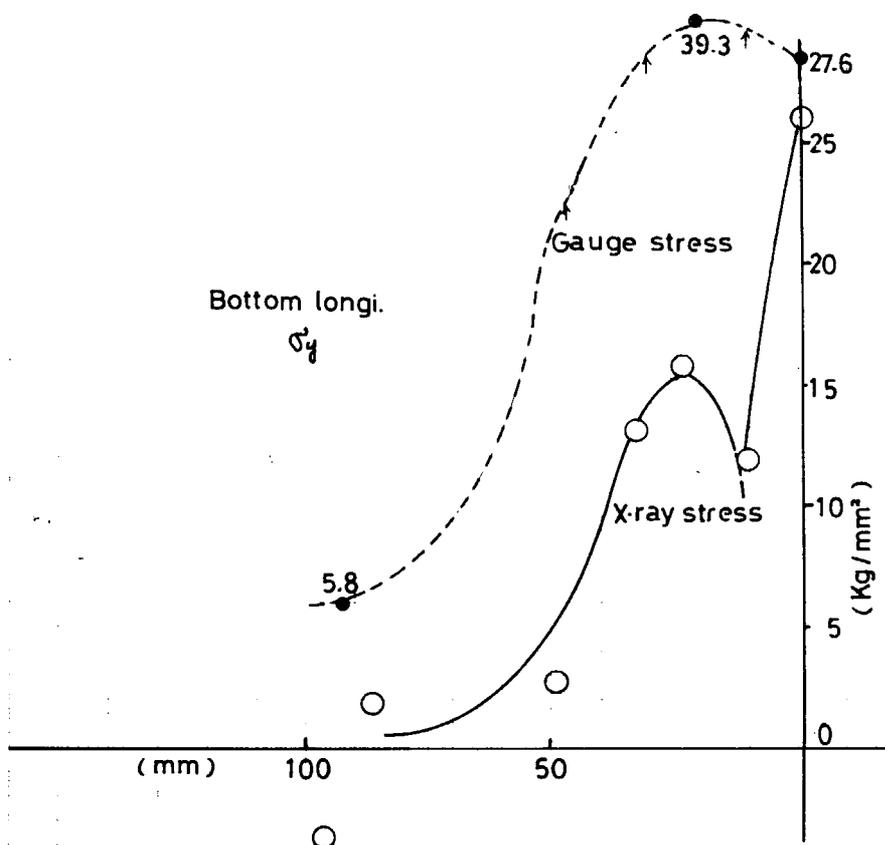


図7.2.5(2) Bottom LONG⁺部の応力測定値 (σ_y)

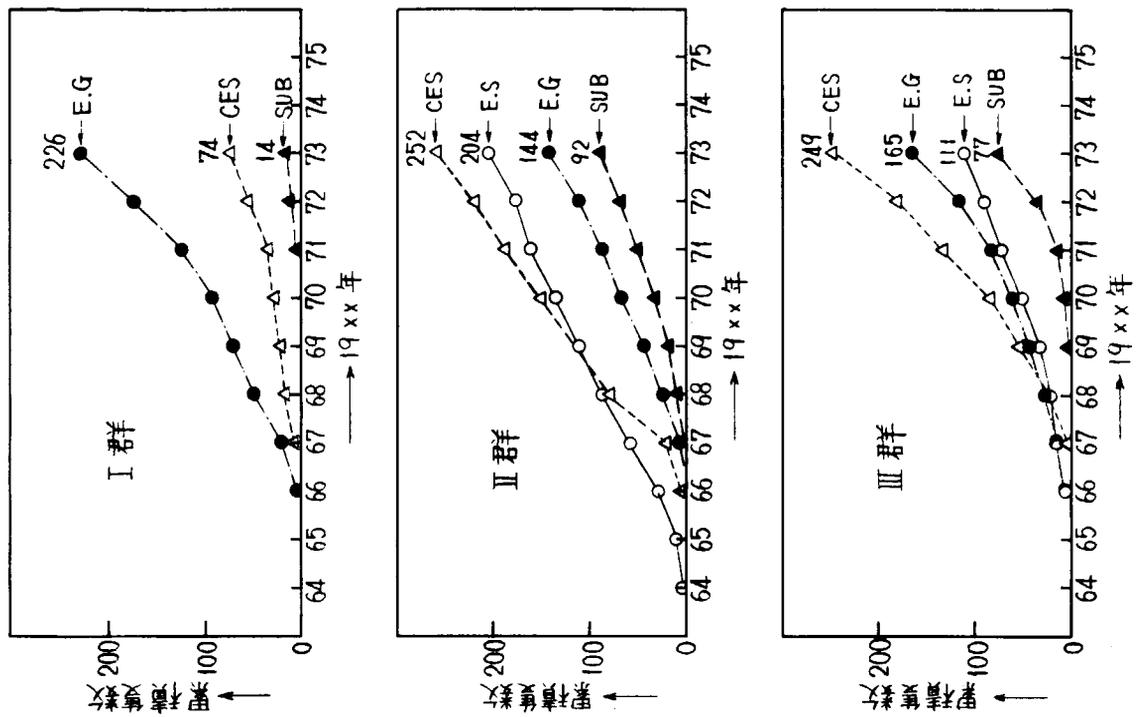


図8.1 大入熱溶接の使用実績

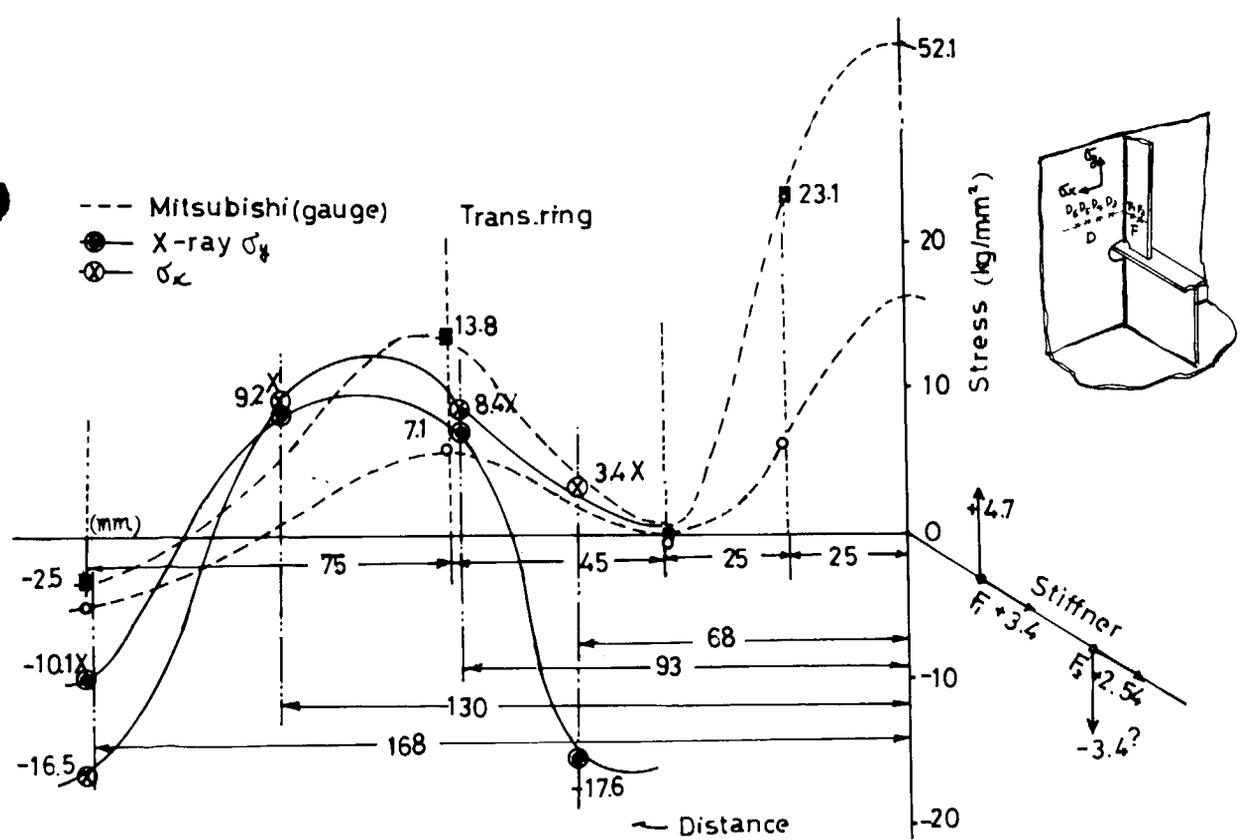


図7.2.6 Trans. ringおよび STIFFの応力測定値

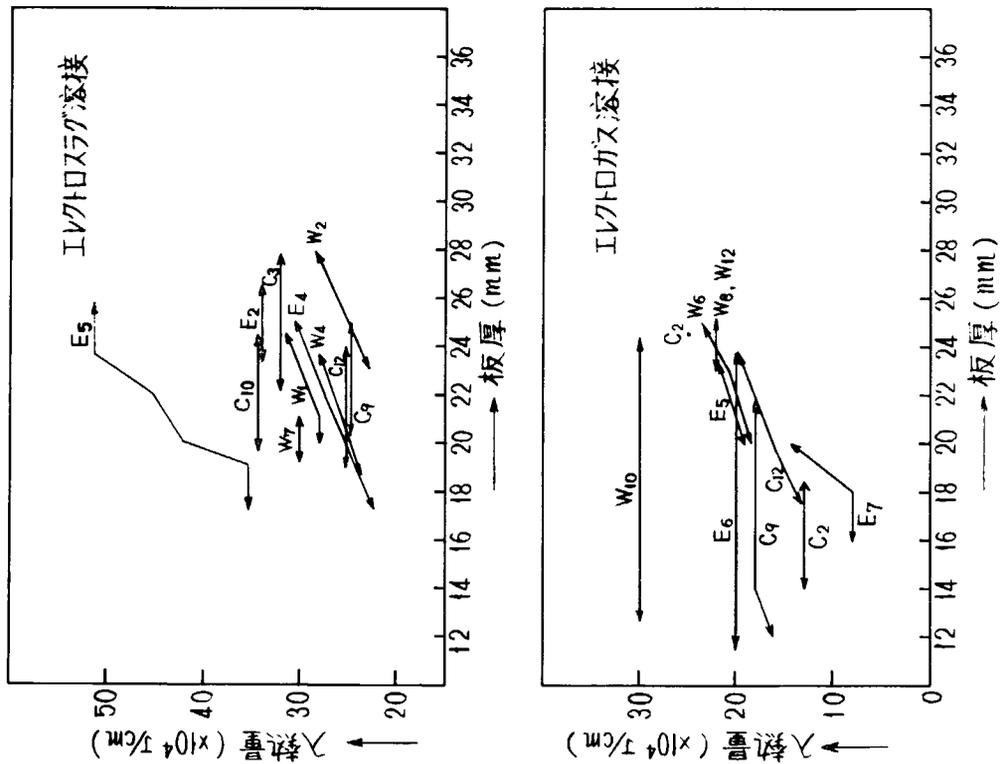


図8.3 入熱量

表8.4 大入熱溶接の溶接長の例

	D.W. 10 ³ Ton	突合せ溶接 の全長(m)	エレクトロslag溶接 溶接長(m) (%)	エレクトロガス溶接 溶接長(m) (%)	CES溶接 溶接長(m) (%)	片面自動溶接 溶接長(m) (%)	船種
E ₂	280	74,532	910 1.2	640 0.8	377 0.5	— —	T
E ₈	170	65,800	— —	280 0.4	310 0.5	4,000 6.1	O/C/O
	270	69,000	— —	330 0.5	649 0.9	4,900 7.1	T
C ₃	105	26,400	207 0.8	— —	— —	5,454 20.7	O
	210	44,800	312 0.7	— —	306 0.7	8,792 19.6	O
	150	41,100	191 0.5	— —	127 0.3	7,687 18.7	O
	256	44,400	329 0.7	— —	562 1.3	8,989 20.2	T
	270	48,400	274 0.6	— —	344 0.7	9,912 20.5	O
W ₂	244	101,852	246 0.2	— —	514 0.5	11,022 10.8	O
	232	80,896	158 0.2	— —	718 0.9	10,540 13.0	T
W ₁₀	70	18,330	— —	240 1.3	180 1.0	— —	O
	175	49,470	— —	320 0.6	180 0.4	— —	T
	212	50,102	— —	960 1.9	— —	— —	T
	205	51,585	— —	1,480 2.9	600 1.2	10,860 21.1	T
	276	60,129	— —	1,540 2.6	600 1.0	10,860 18.0	T
W ₁₂	237	81,700	— —	195 0.2	312 0.4	10,120 12.4	T
	261	86,000	— —	205 0.2	329 0.4	10,650 12.4	T

注) 1. %は突合せ溶接の全長に対する各溶接長の割合を示す。

2. 船種欄のO/C/Oはore-coal-oilを、Oはore-oilを、TはTankerを示す。

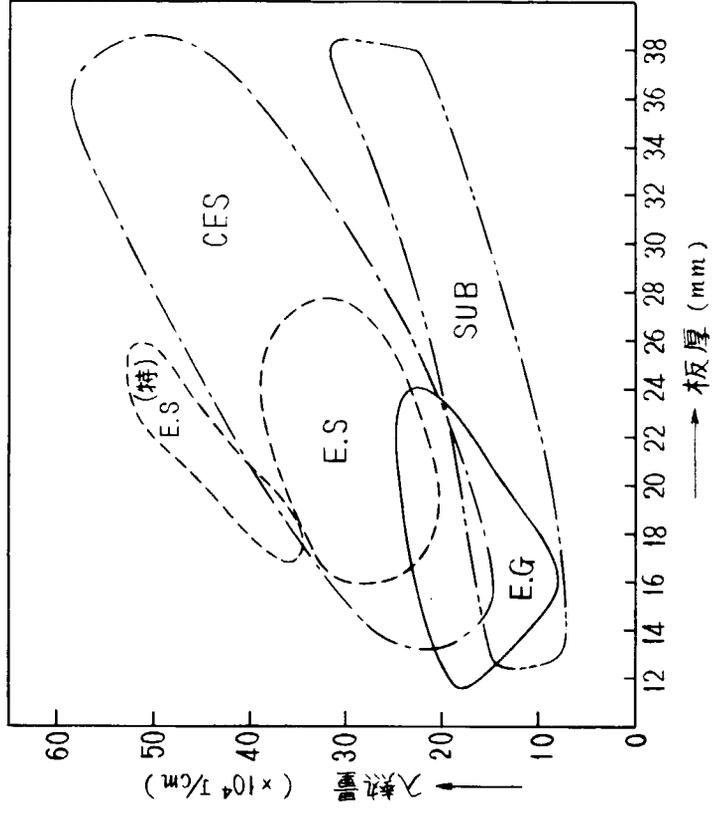
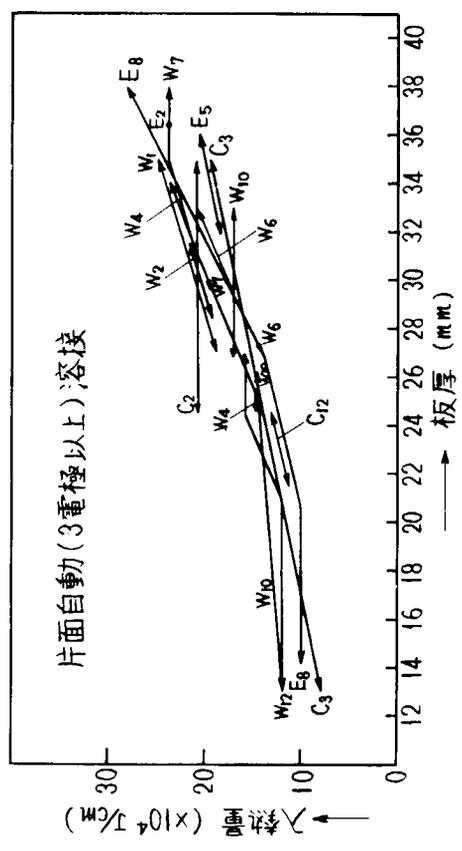
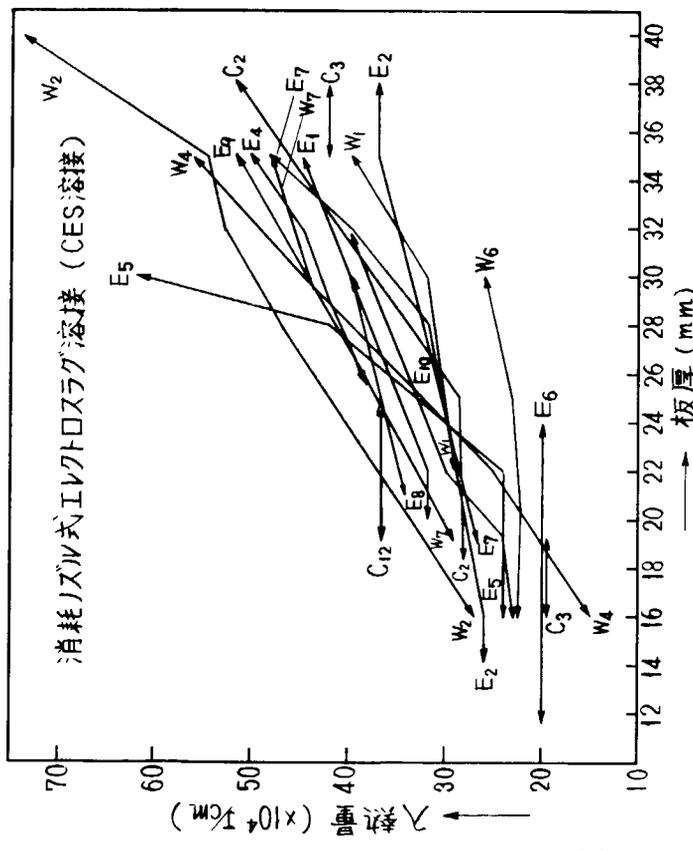


図8.5 入熱量

図8.4 入熱量