

日本船舶振興会 昭和45年度補助事業
"船舶の構造・性能に関する基礎的研究"

研究資料 No. 128

第 111 研 究 部 会

船体用鋼板の韌性におよぼす冷間加工と
溶接の重畠効果およびガス加熱加工条件
の影響に関する研究

報 告 書

昭 和 4 6 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45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111研究部会においてとりまとめたものである。

第111研究部会委員名簿（敬称略、五十音順）

部会長	木原 博	(東京大学)	
主査	栖原 二郎	(九州大学)	
幹事	安藤 見	(日立造船)	池田 一夫 (神戸製鋼所)
	香川 卓一	(佐世保重工業)	金沢 武 (東京大学)
	河合 弘昌	(三菱重工業)	栗田 剛利 (三菱重工業)
	黒川 常夫	(長崎大学)	高武 淳夫 (石川島播磨重工業)
	河野 誠治	(新日本製鉄)	越賀 房夫 (日本钢管)
	辻 勇	(九州大学)	寺井 清 (川崎重工業)
	深江 達郎	(三菱重工業)	藤田 譲 (東京大学)
	矢島 浩	(三菱重工業)	
委員	荒木 瞳郎	(日本钢管)	堀之内 克朗 (運輸省)
	印藤 弘郷	(三井造船)	大野 檍 (三菱重工業)
	菅 尚史	(佐世保重工業)	桑山 則男 (住友金属工業)
	小林 三蔵	(名村造船所)	酒井 利夫 (日立造船)
	修行 稔	(長崎大学)	鈴木 健之 (三保造船所)
	中島 正樹	(三菱重工業)	野沢 登 (函館ドック)
	久野 孝	(住友重機械工業)	深川 宗光 (石川島播磨重工業)
	宮下 毅	(石川島造船化工機)	森 堅太郎 (石原造船所)

討議参加者（敬称略 50音順）

安藤 政明	(日本钢管)	岩村 吉就	(川崎重工業)
石川 兼保	(三菱重工業)	岡本 幸雄	(日立造船)
大塚 秀明	(石川島播磨重工業)	織田 貞四郎	(三菱重工業)
金子 駿介	(日立造船)	河野 和芳	(長崎大学)
川辺 智信	(三菱重工業)	木下 勝	(三菱重工業)
栗田 義之	(日本钢管)	城間 俊光	(三菱重工業)
杉山 正弘	(三菱重工業)	高橋 厚生	(石川島播磨重工業)
永井 明	(日立造船)	仁藤 弘	(三菱重工業)
日野 隆博	(三菱重工業)	町田 哲一	(新日本製鉄)
松永	(三井造船)	松本 浩一	(住友重機械工業)
矢川 勝則	(佐世保重工業)	山内 英和	(三菱重工業)
山本 清志	(住友重機械工業)	幸村 晟二郎	(石川島造船化工機)

目 次

1. まえがき	1
2. 試験内容	2
2.1 組織および硬度分布調査	2
2.2 低温引張試験	2
2.3 シャルピー衝撃試験	3
2.4 ディープノッチ試験	3
2.4.1 標準型ディープノッチ試験結果解析法	3
2.4.2 表面ノッチ型ディープノッチ試験結果解析法	5
2.4.3 サイドスリット+表面ノッチ型ディープノッチ試験結果解析法	5
2.5 二重引張試験	6
3. 船体用鋼板の韌性におよぼす冷間加工と溶接の重畠効果に関する研究	7
3.1 試験片製作要領	7
3.2 組織および硬さ調査結果	9
3.3 低温引張試験結果	10
3.4 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果	10
3.5 ディープノッチ試験結果	11
3.6 二重引張試験結果	13
3.7 試験結果に対する考察	15
3.7.1 脆性亀裂発生・伝播停止特性におよぼす冷間加工の影響	16
3.7.2 置きビードによる残留応力が試験結果におよぼす影響	16
3.7.3 置きビード溶接時入熱による材質劣化の影響	17
3.7.4 二重引張試験結果におよぼす置きビード溶着金属の影響	17
3.8 結論	17
4. 船体用50キロ級高張力鋼の韌性におよぼすガス加熱加工条件の影響に関する研究	18
4.1 試験片製作要領	18
4.2 低温引張試験結果	20
4.3 組織および硬さ調査結果	20
4.4 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果	21
4.5 ディープノッチ試験結果	22
4.6 二重引張試験結果	26
4.7 試験結果に対する考察	28
4.7.1 材質におよぼす線状ガス加熱加工による熱履歴の影響	28
4.7.2 線状ガス加熱加工による残留応力が試験結果におよぼす影響	29
4.8 結論	30
5. むすび	40

1. まえがき

各造船所における短期建造体制にともない、現場工作の合理化が徹底されつつある現状である。

溶接技術の進歩と相まって、船殻における鉛継手は溶接継手に次第に置き換えられて来たが、第2次大戦時に米国で建造された戦時標準船において頻発した脆性破壊事故の教訓から、脆性破壊防止対策上、数条の鉛継手をクラックアレスターとして残すことが慣例になっていた。しかしながら、船殻の急速な巨大化、ブロック建造法の発展、溶接技術の進歩、材料の改良等と相まって、今日では完全溶接構造造船が常識となっている。完全溶接構造造船に対する現在の船級協会規則は、クラックアレスターとしての鉛継手を溶接継手に置き換える場合、その部分にE級鋼を用いることを規定している。

一方、船殻の巨大化にともない、50キロ級高張力鋼の使用量が急増して來たが、それにともなう現場工作基準が必ずしも確立されていない現状である。

日常各造船所において、船主および船級協会監督官との間のトラブルの原因になる問題点を解明し、実験による裏付資料により船主ならびに各船級協会の正式承認を得ることは、現場工作合理化の徹底上、効果大と評価され得るものである。さらに船体の完全溶接構造超大型化にともない船殻の脆性破壊強度に関する検討は、重大災害防止対策上ますます重要な問題となって來た。したがってE級鋼のクラックアレスターとしての効果への期待に関する現場工作上の問題、および50キロ級高張力鋼使用量増化にともなう現場工作上の問題等を早急に解決することは、わが国各造船所にとって、非常に効果の大きいものである。

この観点から、昭和44年4月発足した第111研究部会の研究として3ヶ年計画で以下の研究を実施中である。

1) 船体用鋼板の韌性におよぼす冷間加工と溶接の重畠効果に関する研究

クラックアレスターの働きをさせる目的で使用されている Rounded Gunwale 部のE級鋼に、ブロック搭載用吊金具 (Eye Plate) 等を溶接により取付けることは、脆性破壊強度の低下を招く恐れがあるという見地により、船主および船級協会から禁止される場合が多く、ブロック搭載工程にトラブルを起こし、建造工程を乱す原因になることが多い。

したがって、クラックアレスターとして使用されているE級鋼について、冷間加工と溶接との重畠効果による脆性亀裂の発生、伝播停止性能の変化を明確に把握し、この種のトラブル解決に関するバックデータを得ることを目的とする。

¹⁾ 先に第1報¹⁾にて報告した第1年次(昭和44年度)研究に引き続き、本年度は、一般船体用軟鋼および船体用50キロ級高張力鋼に冷間曲げ加工と溶接を重畠した、いわゆるB処理材を中心に脆性破壊発生および伝播停止試験を実施した。

試験内容ならびに供試試験片数を表1.1に一覧する。

2) 船体用50キロ級高張力鋼の韌性におよぼすガス加熱加工条件の影響に関する研究

船殻部材の歪取りおよび曲げ加工後の修正に線状ガス加熱加工が広く利用されている。

船体用50キロ級高張力鋼(HT50)は、すでに広く採用されているが、それに対する線状ガス加熱作業条件については未だ統一された見解がない。したがって、HT50に対する線状ガス加熱施工にあたっては加熱部の韌性劣化防止の観点から、加熱後の水冷による急速冷却を避けている実状である。しかしながら、加熱後に水冷による急速冷却を実施すれば作業能率が大きく向上するので、HT50に関して加熱後水冷した場合の加熱部の韌性変化量を明確に把握し、この種現場工作的合理化を推進するためのバックデータを得ることを目的とする。

上記目的にそって、本年度は、先に報告した第1報¹⁾の予備試験結果から、曲り効率および韌性低下率を考慮して実用可能と判断される800°C → 水冷処理を中心IC, A, D, E級鋼について脆性破壊発生および伝播停止試験

を実施した。

試験内容ならびに供試試験片数を表 1.2 に一覧する。

表 1.1 "船体用鋼板の韌性におよぼす冷間加工と溶接の重畠効果に関する研究" 供試試験片総数

研究項目	供試材 (As Received)		JIS規格 圧延方向 圧延直角 方向	B 加理材			T 加理材			合計 個数	昭和45 年度実 施個数
	圧延方向	圧延直角 方向		ルマ材	0%加工材	3%加工材	5%加工材	0%加工材	3%加工材		
I-1 シャルピー衝撃試験	40	40	40	60	60	60	60	60	60	420	360
	40	40	40	60	60	60	60	60	60	420	360
I-2 ティーフノッチ試験	4	—	4	6	6	6	6	6	6	38	26
	4	—	4	6	6	6	6	6	6	38	32
I-3 二重引張試験	4	—	4	5	5	—	5	5	5	28	18
	4	—	4	5	5	—	5	5	5	28	23
I-4 低温引張試験	6	—	6	—	6	6	6	6	6	36	24
	6	—	6	—	6	6	6	6	6	36	24
I-5 組織硬度分布調査	1	—	1	1	1	1	1	1	1	7	6
	1	—	1	1	1	1	1	1	1	7	6

但し 表中 上段は MS 材、下段は HT 50 材

■ ■ ■ : 45 年度実施

■ ■ ■ : 46 年度実施予定分を 45 年度に先行したもの

表 1.2 "船体用 50 キロ級高張力鋼の韌性におよぼすガス加熱加工条件の影響に関する研究" 供試試験片総数

研究項目	素材 (As Received)		線状ガス加熱加工材															合計 個数	昭和 45 年度 実施 個数		
			800°C 加熱 → 水冷材		800°C 加熱 → 空冷材		b°C 加熱 → 水冷材		b°C 加熱 → 空冷材		C°C 加熱 → 水冷材		C°C 加熱 → 空冷材		D°C 加熱 → 水冷材		D°C 加熱 → 空冷材				
	A 級 鋼 鋼	D 級 鋼 鋼	A 級 鋼 鋼	E 級 鋼 鋼	A 級 鋼 鋼	D 級 鋼 鋼	A 級 鋼 鋼	E 級 鋼 鋼	A 級 鋼 鋼	D 級 鋼 鋼	E 級 鋼 鋼	A 級 鋼 鋼	D 級 鋼 鋼	E 級 鋼 鋼	A 級 鋼 鋼	D 級 鋼 鋼	E 級 鋼 鋼	A 級 鋼 鋼			
30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	127	*	
2-1 加熱条件設定	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2-2 シャルピー衝撃試験	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	580	120
2-3 ティーフノッチ試験	4	4	4	4	4	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	62	24
2-4 二重引張試験	4	4	4	4	4	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5	24
2-5 低温引張試験	6	6	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	24
2-6 截留応力計測	—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—	—	—	—	2	—	8
2-7 組織硬度分布調査	—	—	—	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	25
	—	—	—	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3

* 全試験 44 年に完了

注 1) 線状加熱温度は板表面下 1mm の温度にて規定する。

2) 但し b°C, C°C および β°C, γ°C 加熱温度は 800°C および 700°C 加熱についての試験結果により決定する。

■ ■ ■ 45 年度実施分

2. 試験内容

前項の試験目的を達成するため、下記項目の試験を実施する。

2.1 組織および硬度分布調査

冷間加工と溶接を重畠した鋼板の材質変化、および線状ガス加熱による熱履歴を受けた鋼板の材質変化を把握するため、各供試材の板厚中央部および表層部の顕微鏡組織、ならびにビッカース硬度分布を調査した。

マクロ組織写真はほぼ実物大、顕微鏡組織写真は倍率 300 ~ 500 倍にて撮影した。なお、ビッカース硬さ測定における試験荷重は 10 Kg とした。

2.2 低温引張試験

各供試材の低温における引張性質を把握するため、板厚中央部より直径 6 mm、平行部長さ 30 mm, Gage Length

24mmのネジ付き引張試験片を製作し、0～-196℃の温度範囲で引張試験を実施した。

試験には長崎大学工学部の30Ton島津REH型万能試験機を使用した。試験片の冷却方法は試験装置に冷却槽を取り付け、設定温度に15分間以上保持した。なお温度計測は、試験片破断部に0.3mmφの、鉄—コンスタンタン熱電対をPercussion溶接して測定した。

一般に降伏点と温度との間には下記の実験式が成り立つことが明らかにされており、後述するディープノッチ試験結果における脆性破壊発生特性の解析に応用した。

$$\sigma_y = \sigma_{\circ}y \cdot e^{\frac{ky}{Tk}} \quad \dots \dots \dots \quad (2.1)$$

ただし、 σ_y = 降伏点

Tk = 絶対温度

$\sigma_{\circ}y$, ky = 材料定数

2.3 シャルピー衝撃試験

素材に対する加工材の韌性変化を求めるための簡便な方法として、標準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た。

なお試験には長崎大学工学部の30Kg-mシャルピー衝撃試験機を使用した。

また、上記シャルピー試験結果と後述する大型試験結果との間の相関性についても若干検討した。

2.4 ディープノッチ試験

ディープノッチ試験は、鋼板の脆性破壊発生特性を実験的に求める試験法として広く利用されているが、本研究においては、その試験目的に応じて切欠き形状を変えた試験片を用いた。

すなわち、Rounded Gunwale部のEye Plate除去跡に残っている可能性のある微小亀裂、いわゆる表面ノッチからの脆性破壊発生条件を求める試験片は、全幅表面ノッチ型試験片およびサイドスリット+表面ノッチ型試験片とした。

またガス加熱加工材においては、実用上上記のような表面亀裂の発生は想定し難いため、標準型（サイドスリット型）試験片とした。

上記各試験の試験結果解析方法を以下に示す。

2.4.1 標準型ディープノッチ試験結果解析法

脆性破壊発生に関するGriffith-Orowanのエネルギー条件式は、長さ2Cの亀裂を有する無限板に、亀裂と直角方向に無限遠において一様の引張応力 σ が作用して、亀裂が微小長さだけ伸長した際のエネルギーの平衡式、すなわち、このとき解放される弾性歪エネルギーの変化量が、新しい破面を形成するに要する仕事量より大きいか等しいと不安定破壊が生じると考えた次式により表わされる。

$$\frac{\pi\sigma^2C}{2E} \geq S \quad \dots \dots \dots \quad (\text{平面応力状態}) \quad (2.2)$$

ただし、 E = ヤング率

S = 塑性表面エネルギー

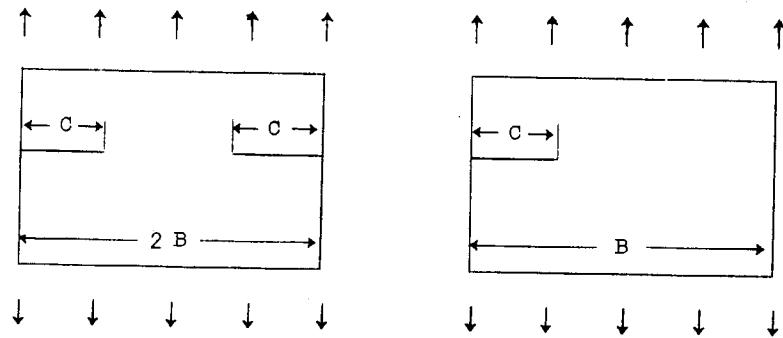
Irwinは有限幅の板に対するエネルギー条件式(Griffith-Irwinのエネルギー条件式)を求め、(2.2)式を次のように修正した。

$$\frac{\pi [f(\gamma)\sigma]^2 C}{2E} \geq S \quad \dots \dots \dots \quad (\text{平面応力状態}) \quad (2.3)$$

$$f(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi r} (\tan \frac{\pi r}{2} + 0.1 \sin \pi r)} \dots \dots \text{(両側切欠きの場合)} \quad (2.4)$$

$$f(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi r} \tan \frac{\pi r}{2}} \dots \dots \text{(片側切欠きの場合)} \quad (2.5)$$

$$r = \frac{C}{B}$$



ディープノッチ試験結果より、低応力脆性破壊発生時の塑性表面エネルギーの限界値 \$S_i\$ と温度 \$T_k\$ (絶対温度)との間に下記の実験式が成り立つことが明らかにされている。²⁾

$$S_i = S_{oi} \cdot e^{\frac{-ki}{T_k}} \dots \dots \quad (2.6)$$

ただし、\$S_{oi}\$, \$k_i\$ = 材料定数

一般に降伏点と温度との間にも(2.1)式で示されるような関係があることは先に述べたとおりである。したがって、鋼板に内蔵される亀裂長さと脆性破壊発生限界温度との関係は、上述の諸式を利用して次のようにして求めることができる。

まずある温度での使用応力 \$\sigma\$ をその温度での降伏点に対して定める。

$$\sigma = \frac{1}{n} \sigma_y \quad (n > 1) \dots \dots \quad (2.7)$$

ただし、\$n\$ = 安全率

(2.1)式を(2.7)式に代入すると

$$\sigma = \frac{1}{n} \sigma_{oy} \cdot e^{\frac{k_y}{T_k}} \dots \dots \quad (2.8)$$

よって、(2.2)式、(2.6)式および(2.8)式より次式が成り立つ。

$$\frac{\pi \left[\frac{1}{n} \sigma_{oy} \cdot e^{\frac{k_y}{T_k}} \right]^2 C}{2 E} = S_{oi} \cdot e^{\frac{-ki}{T_k}} \dots \dots \quad (2.9)$$

(2.9)式に各材料定数 \$E\$, \$S_{oi}\$, \$k_i\$, \$\sigma_{oy}\$, \$k_y\$ ならびに安全率 \$n\$ を代入すれば、使用応力を \$\frac{1}{n} \sigma_y\$ とした場合の 脆性破壊発生限界温度 \$T_k\$ と許容限界亀裂長さ \$2C\$ の関係が求まる。

同様に、(2.2)式と(2.6)式より次式が成り立つ。

$$\frac{\pi \sigma^2 C}{2 E} = S_{oi} \cdot e^{\frac{-ki}{T_k}} \dots \dots \quad (2.10)$$

(2.10)式に各材料定数 \$E\$, \$S_{oi}\$, \$k_i\$ ならびに使用応力 \$\sigma\$ を代入すれば、使用応力 \$\sigma\$ における脆性破壊発生限界温度 \$T_k\$ と許容限界亀裂長さ \$2C\$ との関係が求まる。

なお、ディープノッチ試験結果より脆性破壊発生に対する塑性表面エネルギーの限界値 \$S_i\$ は次式により求めた。

$$S_i = \frac{\pi [f(r) \cdot \sigma_g]^2 C}{2 E} \quad \dots \dots \dots \quad (2.11)$$

ただし, σ_g = Gross Stress

2.4.2 表面ノッチ型ディープノッチ試験結果解析法

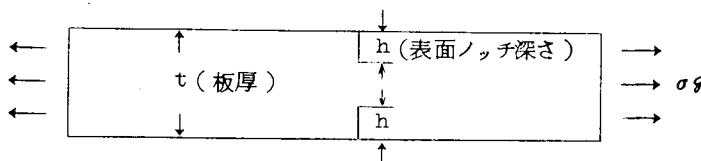
深さ h の表面ノッチが板の表裏両面に存在する場合, 脆性破壊発生特性に対する Fracture Toughness の Parameter K_{IC} は, 次式によって求まる。

$$K_{IC}^2 = \frac{\pi \sigma^2 h}{1 - 0.177 (\frac{\sigma}{\sigma_y})^2} \quad \dots \dots \dots \quad (2.12)$$

有限板厚試験片による試験結果の K_{IC} は, 破壊応力 σ を修正した次式により求まる。

$$K_{IC}^2 = \frac{\pi [f(r) \cdot \sigma_g]^2 h}{1 - 0.177 (\frac{\sigma}{\sigma_y})^2} \quad \dots \dots \dots \quad (2.13)$$

$$\text{ただし, } f(r) = \sqrt{\frac{t}{\pi h} (\tan \frac{\pi h}{t} + 0.1 \sin \frac{2\pi h}{t})} \quad \dots \dots \dots \quad (2.14)$$



K_{IC} と温度との間にも, S_i と温度との間の関係と同様な実験式が成り立つと考えられる。

$$K_{IC} = K_{OIC} \cdot e^{-\frac{K_I}{T_K}} \quad \dots \dots \dots \quad (2.15)$$

ただし, K_{OIC} , K_I = 材料定数

したがって, (2.1)式, (2.8)式, (2.12)式および(2.15)式より次式が成り立つ。

$$K_{OIC} \cdot e^{-\frac{K_I}{T_K}} = \sqrt{\frac{\pi (\frac{1}{n} \sigma_{oy} \cdot e^{\frac{ky}{T_K}})^2 h}{1 - 0.177 (\frac{1}{n^2})}} \quad \dots \dots \dots \quad (2.16)$$

すなわち, (2.16)式に各材料定数 K_{OIC} , K_I , σ_{oy} , ky および安全率 n を代入すれば, 使用応力を $\frac{1}{n} \sigma_y$ とした場合の脆性破壊発生限界温度 T_K と許容限界表面切欠き深さ h の関係が求まる。

同様に(2.12)式に(2.15)式を代入すると次式が成り立つ。

$$K_{OIC} \cdot e^{-\frac{K_I}{T_K}} = \sqrt{\frac{\pi \sigma^2 h}{1 - 0.177 (\frac{\sigma}{\sigma_y})^2}} \quad \dots \dots \dots \quad (2.17)$$

したがって, (2.17)式に各材料定数 K_{OIC} , K_I および想定使用応力 σ と降伏点 σ_y を各々代入すれば, 使用応力 σ における脆性破壊発生限界温度 T_K と許容限界表面切欠き深さ h との関係が求まる。

2.4.3 サイドスリット+表面ノッチ型ディープノッチ試験結果解析法

サイドスリット+表面ノッチ型の試験片を使用した場合, 脆性破壊発生時の塑性表面エネルギーの限界値 S_i , あるいは脆性破壊発生に対する Fracture Toughness の Parameter K_{IC} は, 各々上記 2.4.1 および 2.4.2 の考え方に基づいて求めることができると考えられる。

すなわち, 脆性破壊発生条件はノッチ形状により異なるが, サイドスリットおよび表面ノッチによる各々の影響

度を比較し、サイドスリットの影響が表面ノッチの影響より大きい場合は(2.11)式により S_i をもって整理し、その逆の場合は、(2.13)式により K_{IC} をもって整理すればよいと考えられる。

今回のサイドスリット+表面ノッチ型試験片においては、サイドスリットの影響が大きいので(2.11)式を基礎とし、表面ノッチによる応力修正係数((2.14)式)を考慮して次式により整理した。

$$S_i = \frac{\pi [F(\gamma) \cdot \sigma_g]^2 C}{2 E} \quad \dots \dots \dots \quad (2.18)$$

ただし、 $F(\gamma) = f_1(\gamma) \cdot f_2(\gamma)$

$f_1(\gamma)$ = サイドスリットによる応力修正係数 ((2.4)式による)

$f_2(\gamma)$ = 表面ノッチによる応力修正係数 ((2.14)式による)

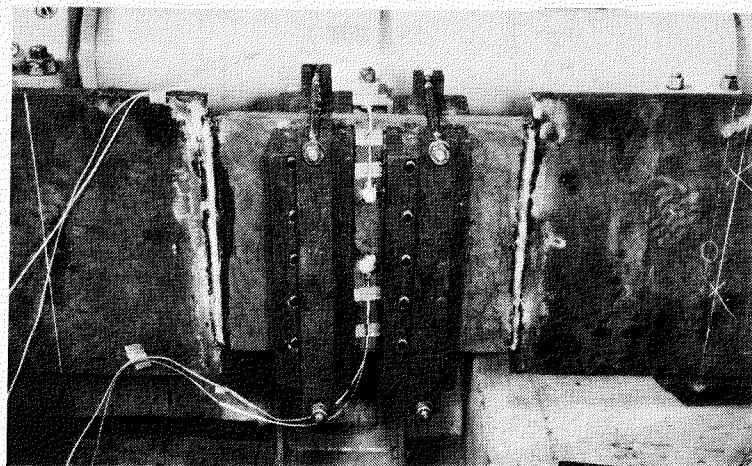
なお、使用応力を降伏点に対して定めた場合の脆性破壊発生限界温度 T_k と許容限界亀裂長さ $2C$ との関係、および使用応力を一定とした場合の脆性破壊発生限界温度 T_k と許容限界亀裂長さ $2C$ との関係は、2.4.1と全く同様にして求めた。なお試験結果より脆性破壊発生に対する塑性表面エネルギーの限界値 S_i は、(2.18)式を用いて求めた。

これらの試験には、三菱重工業KK長崎研究所に設置してある800トン横型Test Rigを使用し、ビン間距離を3mとして実施した。

試験は、-196°C~-40°Cの温度範囲で行ない、-196°C以外の試験温度では、破断面両側・両面にとりつけた冷却槽に液体窒素を注入しながら破断部近傍を間接的に冷却せしめた。

温度計測は、試験片破断面近傍の表面にPercussion溶接した鉄-コンスタンタン熱電対によって測定した。

試験実施状況を写真2.1に示す。



2.5 二重引張試験

冷間曲げ加工と溶接の重畠により

材質変化を生じた部分、およびガス

写真2.1 ディープノッチ試験実施状況

加熱加工により材質変化を生じた部分の脆性亀裂伝播停止特性を求めるため、温度勾配型標準二重引張試験を実施した。

なお、試験は試験片幅に対する停止亀裂長さの影響および残留応力の影響等を考慮して、亀裂が約300mm前後で停止するような条件で行なった。

一般に、脆性亀裂伝播停止特性は、Griffith-Orowanの不安定破壊に対するエネルギー条件式を適用し、Fracture ToughnessのParameter K_C を用いて議論されている。

$$K_C = \sigma \sqrt{\pi C} \quad \dots \dots \dots \quad (2.19)$$

また、 K_C は二重引張試験結果から次式のようにして求まる。

$$K_C = f(\gamma) \cdot \sigma_g \cdot \sqrt{\pi C} \quad \dots \dots \dots \quad (2.20)$$

$$\text{ただし, } f(\gamma) = \sqrt{\frac{2}{\pi \gamma}} \tan \frac{\pi \gamma}{2}$$

$$\gamma = \frac{c}{B}$$

c = 停止亀裂長さ (mm)

B = 試験片 (亀裂伝播部) の幅 (mm)

σ_g = グロス応力 (kg/mm²)

さらに, K_c と亀裂伝播停止限界温度 T_K との間に次の実験式が成り立つことが確認されている。

$$K_c = K_0 \cdot e^{\frac{-T_0}{T_K}} \quad \dots \dots \dots \quad (2.21)$$

ただし, K_0 , T_0 = 材料定数

最近実施された研究結果によれば^{3), 4)} 温度勾配型標準二重引張試験結果あるいは温度勾配型標準 ESSO 試験結果より求めた K_c を用いて、実際の構造物の脆性亀裂阻止能力を推定するには、次式の関係を用いて計算すればよいことが明らかになった。

$$C_{eff.} = 0.1 c + 190 \text{ (mm)} \quad \dots \dots \dots \quad (2.22)$$

ただし, $C_{eff.}$ = 二重引張試験結果あるいは ESSO 試験結果に対する有効亀裂長さ (mm)

c = 実際の構造物中を伝播した脆性亀裂の長さ (mm)

したがって、(2.19) 式は下記のようになる。

$$K_c = \sigma \sqrt{\pi C_{eff.}} \quad \dots \dots \dots \quad (2.23)$$

(2.22) 式および (2.23) 式を用いて実際の構造物における脆性亀裂伝播停止能力を求め検討した。

使用試験機は 150 Ton 補助引張装置を装備した、前述の 800 Ton 横型 Test Rig であり、試験片ピン間距離はディープノッチ試験片と同様 3m

とした。試験片温度分布は、冷却槽に液体窒素、ドライアイス、アルコールおよび水等を適当に注入することによって調節した。

温度計測は、ディープノッチ試験と同様、鉄-コンスタンタン熱電対を試験片表面に Percussion 溶接して測定した。

二重引張試験状況を写真 2.2 に示す。

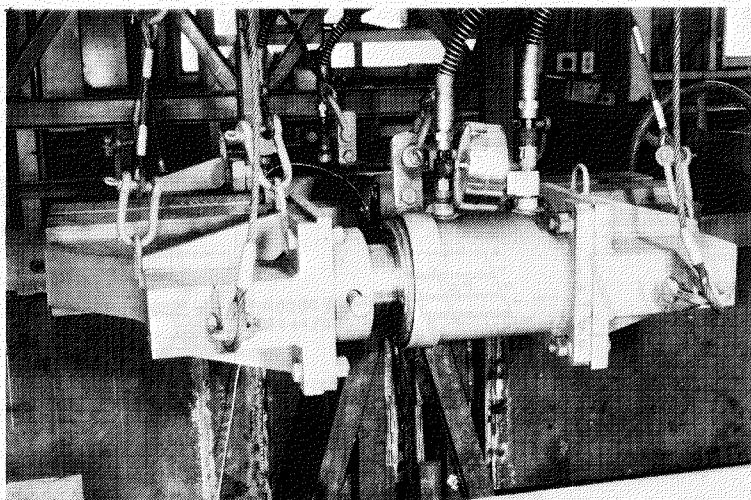


写真 2.2 二重引張試験実施状況

3. 船体用鋼板の韌性におよぼす冷間加工と溶接の重畠効果に関する研究

3.1 試験片製作要領

試験片製作にあたって、Rounded Gunwale 部に Eye Plate を溶接した場合を想定するならば、供試材に冷間曲げ加工をほどこし、溶接ビードを置いたものを試験片とすべきであろう。しかし、曲ったままの試験片で各種の試験を実施するのは困難であり試験結果の解析も非常に面倒になる。したがって、図 3.1 に示す要領で平板試験片を製作した。

すなわち、Rounded Gunwale 部と同様な冷間曲げ加工を与えたのち、930°C × 0.5 ~ 1.0 Hr A.C. フルマ処理をほどこして、先の加工の影響を取り除いた。

次にこれらを平らに伸ばすことによって、冷間曲げ加工、すなわち所定の塑性歪量を与えた後、表裏両面に溶接ビードを置いた。さらに $250^{\circ}\text{C} \times 0.5 \sim 1.0\text{ hr}$ 歪時効処理をほどこしたのち余盛を除去した(以下 B 处理材と呼ぶ)。

曲げ加工はいずれもプレスにて行なった。溶接棒の選択にあたっては現場の実状に基づいて K 5 E 鋼、K E N 鋼いずれに対しても同一棒 (JIS D 5016) を使用した。

なお、供試材の E 級鋼 (K 5 E 鋼、K E N 鋼) は、製鉄所において圧延後ノルマ処理された鋼板である。したがって、上述の冷間曲げ加工を与えた後に再ノルマ処理をほどこしたものは、ノルマ処理を 2 回ほどしたことになるわけであるが、以後、このノルマ処理を 2 回ほどしたものに対して“ノルマ材”および“B 处理材”と呼ぶことにする。これに対して製鉄所において圧延後ノルマ処理された As Received 材に対して、“素材”と呼ぶこととする。

なお、冷間曲げ加工については、加工量の差による影響を明確に把握するのが困難と予想されるので、冷間引張加工後表裏両面に溶接ビードを置き、B 处理材と同様な歪時効処理をほどこした試験片(以下 T 处理材と呼ぶ)も供試した。

二重引張試験においては、余盛除去跡を亀裂が直進・伝播するように配慮し、残留応力のバランスを考慮して、試験片表裏両面に各 3 層 3 条溶接ビードを置いた。

なお、供試材としては、いずれも板厚 30 mm の鋼板を使用した。Mill Sheet による供試材の化学成分および機械的性質を表 3.1 に、溶接条件を表 3.2 に示す。

冷間曲げ加工

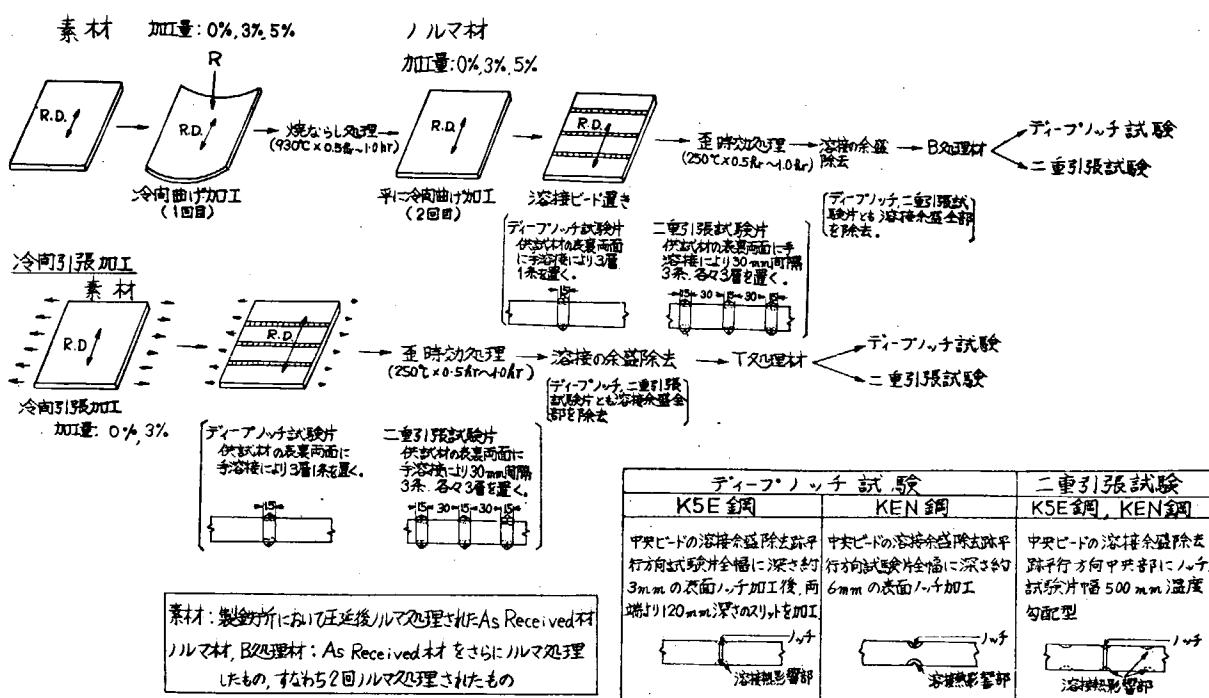


図 3.1 “船体用鋼板の韌性におよぼす冷間加工と溶接の重複効果に関する研究”試験片製作要領

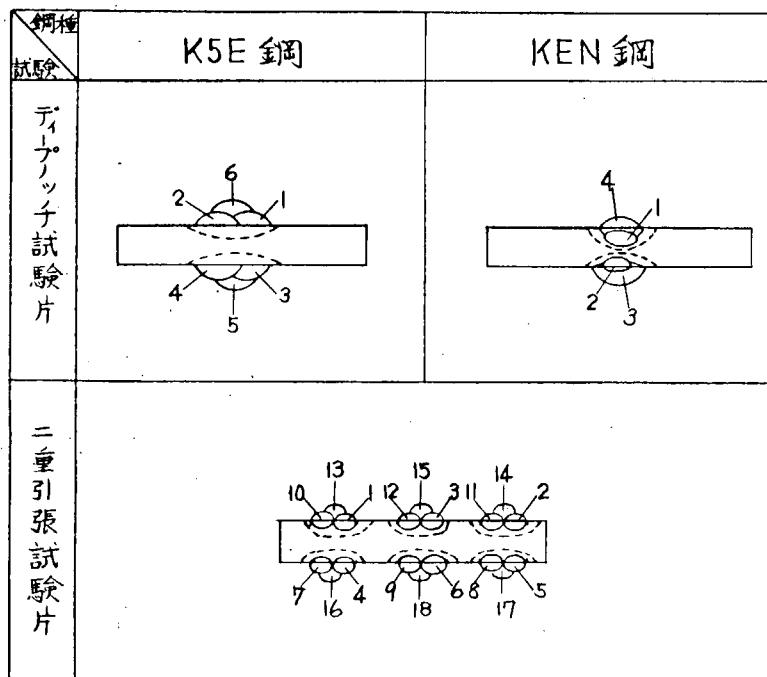
表 3.1 供試材の化学成分ならびに機械的性質

鋼種	熱処理	板厚 (mm)	化 学 成 分 (%)					引 張 試 験		
			C	Si	Mn	P	S	降伏点 (kg/mm²)	引張強さ (kg/mm²)	伸び (%)
K 5 E 鋼	Normalized	30	0.13	0.35	1.35	0.027	0.017	38.2	55.1	23.7
K E N 鋼	Normalized	30	0.13	0.28	1.01	0.010	0.016	34.0	48.0	32.0

表 3.2 溶接条件

溶接棒	溶接電流 (A)	溶接速度 (mm/min)	層間温度 (℃)
JIS D5016	200～ 210	150～ 160	<100

ビードの置き方



3.2 組織および硬さ調査結果

写真3.1～3.9にマクロ組織および顕微鏡組織を示す。写真3.1および写真3.2は素材(As Received材)とノルマ材(再ノルマ材)との比較である。写真に見られるごとく、KEN鋼は比較的良好な再ノルマ処理が行なわれたが、K5E鋼は素材と同等な組織を再現することは出来なかった。したがって、K5E鋼再ノルマ材の履歴を明らかにするため種々の調査を行なった。

写真3.3、図3.2～3.3、表3.3および図3.4～3.5にその調査結果を示す。

その結果概略次のことが判明した。

1. 加熱速度が遅すぎた。
2. 加熱温度が高すぎた。
3. 冷却速度が遅すぎた。

しかしながら、ノルマ材(再ノルマ材)も、K5E鋼に対するNK規格値($V_{E-17} \geq 6.2 \text{kg} \cdot \text{m}$)を充分満足しており、供試材として一応適合する材料であると判断できる。

写真3.4は、K5E鋼の冷間曲げ加工前後の組織である。冷間曲げ加工を5%与えても、500倍程度の倍率では組織の変化をみいだすことはできなかった。また写真3.6～3.9は溶接による熱影響部組織である。写真3.5は、溶接したものマクロ組織の1例である。

ピッカースかたさ調査結果を、図3.6～3.14および表3.4に示す。それによれば、3%および5%加工材とも

引張側、圧縮側いずれも冷間加工によって、約20 Hv程度硬くなっていることが明らかである。また、B処理材およびT処理材の2層目ピート下における板厚方向硬度分布をみれば、板表面より約2～3 mmの深さの位置が最も硬くなっている。また、冷間曲げ加工の差による硬度変化は認め難いようである。

3.3 低温引張試験結果

先に述べたごとく供試材の低温引張特性を求め、ディープノッチ試験結果の解析に使用するのが目的である。各供試材ともその板厚中央部圧延方向より採取した6 mmΦ丸棒試験片を供試した。

試験片採取要領を図3.1.5に、試験結果を図3.1.6～3.1.8に示す。

各供試材について降伏点と温度との間の実験式を求めるところとなる。

$$\text{K 5 E鋼} \quad \begin{cases} \text{素 材} & \sigma_y = 31.8 \cdot e^{\frac{-83.9}{T_K}} \\ \text{ノルマ材} & \sigma_y = 27.4 \cdot e^{\frac{-83.9}{T_K}} \\ \text{B 処理材} & \sigma_y = 25.6 \cdot e^{\frac{-83.9}{T_K}} \\ \text{3 %加工材} & \sigma_y = 24.5 \cdot e^{\frac{-83.9}{T_K}} \\ \text{5 %加工材} & \end{cases} \quad (3.1) \quad (3.2) \quad (3.3) \quad (3.4)$$

$$\text{K E N鋼} \quad \begin{cases} \text{素 材} \} & \sigma_y = 27.1 \cdot e^{\frac{-102.6}{T_K}} \\ \text{ノルマ材} & \\ \text{B 処理材} & \sigma_y = 26.0 \cdot e^{\frac{-102.6}{T_K}} \\ \text{3 %加工材} & \\ \text{B 処理材} & \sigma_y = 25.8 \cdot e^{\frac{-102.6}{T_K}} \\ \text{5 %加工材} & \end{cases} \quad (3.5) \quad (3.6) \quad (3.7)$$

3.4 V-ノッチャルピー衝撃試験結果

素材ならびに各加工材よりV-ノッチャルピー衝撃試験片を図3.1.5の要領で採取し、吸収エネルギー～温度脆性破面率～温度について、それぞれの遷移曲線を求めた。

図3.1.9～3.5.4、表3.5～3.6および図3.5.5～3.5.6に試験結果を示す。

試験結果を要約すると次のとくなる。

K 5 E鋼に関して

- (1) 素材においては、板表面付近（以下表層部と記す）と中央部との靭性の差は顕著に認められない。
- (2) B処理材製作過程におけるノルマ処理条件に若干の問題があり靭性低下をきたしたが、ノルマ処理材板厚中央部および表層部のV-ノッチャルピー衝撃値はK 5 E鋼に対するNK規格値（ $vE-17 \geq 6.2 \text{ Kg-m}$ ）を充分満足している。
- (3) 表層部の試験では、表面を1 mm削除して試験片を採取し、しかも板厚方向にノッチ加工したため溶接による影響はほとんど現われていない。
- (4) B処理材の冷間曲げ加工の影響はあまり明瞭には現われていない。
- (5) B処理材0%加工材と冷間曲げ加工をほどこしたB処理材3%加工材および5%加工材の各々中央部の遷移曲線を比較すればShelf Energyはほぼ等しいが、各遷移温度は冷間曲げ加工材の方が若干悪いようである。しかし各遷移曲線ともバラツキが大きいので実験点を増やせばいずれもほぼ等しくなるものと想像される。

K E N鋼に関して

- (1) 素材においては表層部と中央部との靭性に若干の差が認められる。
- (2) 素材は勿論のこと各加工材ともK E N鋼に対するNK規格値（ $vE-10 \geq 6.2 \text{ Kg-m}$ ）を充分に満足している。

- (3) 素材とノルマ処理材とはすべてほぼ同一の遷移曲線を示しており、切欠き靱性についても再ノルマ処理が適切であったと考えられる。
- (4) 素材とT処理材0%加工材の各表層部の比較、およびノルマ処理材とB処理材0%加工材の各表層部の比較から明らかなるごとく、溶接熱影響によりV-ノッチシャルピー試験結果は若干低下している。
- T処理材0%加工材とB処理材0%加工材の表層部もほぼ同一の遷移曲線を示しているところから、溶接熱影響による若干の悪影響を認めざるを得ない。
- (5) B処理材の冷間加工の影響は明瞭に現われていない。

3.5 ディープノッチ試験結果

素材および各加工材の脆性破壊発生特性を求めるためディープノッチ試験を実施した。試験片形状を図3.5.7および図3.5.8に示す。ノッチ形状はK5E鋼の場合はサイドスリット+表面ノッチ型とし、KEN鋼の場合は全幅表面ノッチ型とした。表面ノッチは溶接熱影響部にその先端が位置するように切削した。

サイドスリット+表面ノッチ型試験片を使用したK5E鋼では、サイドスリット長さ(120mm)に対して表面ノッチ深さ(2.8mm)が浅く、脆性亀裂が表面ノッチ底部すなわち溶接熱影響部から必ずしも発生しないことが判明した。そこでKEN鋼の場合は全幅表面ノッチとし、しかもノッチ深さを6mm程度にすることによって、低応力脆性破壊が発生し易くなるように工夫した。すなわち、図3.5.8に示すように溝を掘ってビードを置き、6mmの深さまで表面ノッチを入れた。試験結果を表3.7～3.8および図3.5.9～3.6.3に示す。また、試験片破断面状況を写真3.1.0～3.2.0に示す。

試験結果から、K5E鋼における脆性破壊発生特性は溶接の影響により若干悪くなるようである。しかし、実験点のバラツキも大きくその有意差を認め難いので一応溶接の影響はないものとみなした。したがって、素材とT処理材0%加工材は同等の脆性破壊発生特性を有するものと見なした。また、ノルマ材、B処理材0%加工材、3%加工材および5%加工材の間に有意差を認め難かったので、それらの脆性破壊発生特性は同等になるものとみなした。

試験結果から実験式を求めると次式のごとくなる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{素 材} \\ \text{T処理材0%加工材} \\ \text{ノルマ材} \\ \text{B処理材0%加工材} \\ \text{" 3%加工材} \\ \text{" 5%加工材} \end{array} \right\} \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } Si = 378.0 \cdot e^{-\frac{645.2}{T_K}} \cdots (3.8) \\ \text{最低値 } Si = 170.1 \cdot e^{-\frac{645.2}{T_K}} \cdots (3.9) \\ \text{最高値 } Si = 284.7 \cdot e^{-\frac{645.2}{T_K}} \cdots (3.10) \\ \text{最低値 } Si = 83.2 \cdot e^{-\frac{645.2}{T_K}} \cdots (3.11) \end{array} \right.$$

KEN鋼については、B処理材製作過程における再ノルマ処理は適切なものであったと考えられ、脆性破壊発生特性もノルマ処理によって影響を受けなかったものと考えられるので、素材とノルマ材は同等の脆性破壊発生特性を有するものとみなした。また、B処理材の冷間曲げ加工量の差による影響については、明瞭な結果は得られなかつた。したがってB処理材0%加工材、3%加工材および5%加工材は同等の脆性破壊発生特性を有しているものとみなした。

試験結果から実験式を求めると次式のごとくなる。

素 材	ノルマ材	最高値 $K_{IC} = 503 \cdot \theta^{\frac{160.6}{TK}}$	(3.12)
		最低値 $K_{IC} = 419 \cdot \theta^{\frac{160.6}{TK}}$	(3.13)
K E N 鋼	B処理材 0 % 加工材	最高値 $K_{IC} = 574 \cdot \theta^{\frac{160.6}{TK}}$	(3.14)
	" 3 % 加工材	最低値 $K_{IC} = 399 \cdot \theta^{\frac{160.6}{TK}}$	(3.15)
	" 5 % 加工材		

図3.64および図3.65は、K5E鋼およびKEN鋼について、降伏点に対する安全率を2とした場合の許容限界亀裂長さと脆性破壊発生限界温度との関係を示したものである。K5E鋼については、(2.9)式に(3.1)～(3.4)式および(3.8)～(3.11)式を、KEN鋼については、(2.16)式に(3.5)～(3.7)式および(3.12)～(3.15)式を各々代入して求めた。

図3.66～図3.68は温度に関係なく使用応力を一定とした場合の許容限界亀裂長さと脆性破壊発生限界温度との関係を求めたものである。K5E鋼については(2.10)式に(3.8)～(3.11)式を、KEN鋼については(2.17)式に(3.12)～(3.15)式を各々代入して求めた。なお図3.66および図3.67において使用応力 16.0 Kg/mm^2 より 8.0 Kg/mm^2 と仮定したのは、NKのHT50材に対する想定使用応力およびその $\frac{1}{2}$ の値にしたがったものであり、図3.68において使用応力 12.5 Kg/mm^2 と仮定したのは、同じくNKのMS材に対する想定使用応力にしたがったものである。

表3.9および表10は、K5E鋼について許容限界亀裂長さを 100 mm , 60 mm , 30 mm とした場合、表3.11および表3.12はKEN鋼について許容限界表面亀裂深さを 5 mm , 3 mm , 1 mm とした場合の各々の脆性破壊発生限界温度を示したものである。

以上の試験結果を要約すると次のとくとなる。

K5E鋼について

- 1) 表面ノッチ底は第1層目溶接ビードの熱影響部と一致するように加工し、サイドスリット底と表面ノッチ底との角から脆性亀裂が発生するよう取り計らったが、サイドスリットに対し表面ノッチが浅かったため、脆性亀裂は必ずしも角から発生せず、サイドスリット底の板厚中央部から発生した場合が多く、結局データバラツキ原因の一助となったようと考えられる。
- 2) B処理材製作過程におけるノルマ処理条件に若干の問題があり、靭性の低下をきたしたことは、脆性破壊発生特性からもほぼ明らかである。
- 3) 溶接の熱影響により、脆性亀裂発生特性は若干悪くなるようであるが、実験点のバラツキが大きくその有意差は認め難いので一応溶接の影響はないものとみなす。
- 4) 脆性亀裂発生特性におよぼす冷間加工の影響は、B処理材の実験結果からは認められなかった。
- 5) 表3.9に示したごとく使用応力 16.0 Kg/mm^2 における許容限界亀裂長さ 60 mm に対しての脆性破壊発生温度を求めるとき、下記のごとくなる。

素材 (As Received材)	} -174 ~ -160°C
下処理材 0 % 加工材	
ノルマ材	} -169 ~ -111°C
B処理材 0 % 加工材	
B処理材 3 % 加工材	
B処理材 5 % 加工材	

さらに、60キロHT鋼に関して一般的に認められている、“Severeな溶接残留応力存在部からの発生条件は、前記の亀裂発生温度が約60°C程度高温側に移動する⁵⁾”という現象をあてはめて考えれば、下記のごとくなる。

素材(As Received材)	} -114 ~ -100°C
下処理材0%加工材	
ノルマ材	} -109 ~ -51°C
B処理材0%加工材	
B処理材3%加工材	
B処理材5%加工材	

したがって、実用上脆性破壊発生に関しては、今回の供試材程度の溶接置きビードならびに冷間加工と溶接の重畠の影響は、問題にならないものと考えられる。

KEN鋼について

- 1) B処理材製作過程におけるノルマ処理条件は適切なものであったと考えられ、脆性破壊発生特性もノルマ処理によって影響を受けなかったものと考えられる。
- 2) B処理材の冷間加工の影響は認められない。したがって、B処理材0%加工材、3%加工材、5%加工材は同等の脆性破壊発生特性を有するものと見なされる。
- 3) ノルマ処理材とB処理材0%加工材の各実験点を比較すれば、脆性亀裂発生特性に及ぼす溶接の影響はほとんどないようである。
- 4) 表3.11に示したごとく使用応力12.5kg/mm²における許容限界亀裂深さ5mmに対しての脆性破壊発生温度を求めると下記のごとくなる。

素材(As Received材)	} -201 ~ -194°C
ノルマ材	
B処理材0%加工材	} -204 ~ -192°C
B処理材3%加工材	
B処理材5%加工材	

さらに、溶接残留応力等の影響として60°C程度高温側に移動するものと仮定すれば、下記のごとくなる。

素材(As Received材)	} -141 ~ -134°C
ノルマ材	
B処理材0%加工材	} -144 ~ -132°C
B処理材3%加工材	
B処理材5%加工材	

したがって、供試試験片に加圧した表面ノッチが、実際の表面亀裂に比べて多少鈍であったとしても、実用上、脆性亀裂発生に関しては、今回の供試材程度の溶接による影響ならびに冷間加工と溶接の重畠の影響は、問題にならないものと考えられる。

3.6 二重引張試験結果

素材と各加工材の脆性亀裂伝播停止特性を求めるため二重引張試験を実施した。試験には亀裂伝播部幅500mmの標準型試験片を用いた(図3.69)。試験結果を表3.13～3.14および図3.70～3.71に示す。また試験片破断面状況を写真3.21～3.22に示す。

K5E鋼における再ノルマ処理に若干の問題があったことは先に述べたとおりであるが、その脆性亀裂伝播停止

特性におよぼす溶接の影響は明瞭には認められなかった。

したがって、素材とT処理材0%加工材は同等の脆性亀裂伝播停止特性を有するものとみなした。

また、二重引張試験結果からは、ノルマ材、B処理材0%加工材、3%加工材の間に有意差を認め難かったのでこれらの脆性亀裂伝播停止特性は同等と認められるものと見なした。

試験結果から実験式を求めるところとなる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{素材 (As Received材)} \\ \text{下処理材 0% 加工材} \\ \text{ノルマ材} \\ \text{B処理材 0% 加工材} \\ \text{B処理材 3% 加工材} \end{array} \right\} \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_c = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 22.5 \cdots \cdots (3.16) \\ \text{最低値 } \ln K_c = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.8 \cdots \cdots (3.17) \\ \text{最高値 } \ln K_c = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.4 \cdots \cdots (3.18) \\ \text{最低値 } \ln K_c = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.1 \cdots \cdots (3.19) \end{array} \right.$$

KEN鋼についてはB処理材製作過程における再ノルマ処理は適切なものであったと考えられ、脆性亀裂伝播停止特性も再ノルマ処理によって影響を受けなかったものと考えられる。したがって、素材とノルマ材は同等の脆性亀裂伝播停止特性を有するものとみなし。冷間曲げ加工の影響については、B処理材3%加工材の実験点が一つしかないので若干問題があるが、B処理材0%加工材と3%加工材とでは同等の脆性亀裂伝播停止特性を有しているものとみなし。それは先に述べたごとく脆性破壊発生特性に関してB処理材0%加工材と3%加工材との間に明瞭な差が認められなかったことから想定したものである。

試験結果から、実験式を求めるところとなる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{素材 (As Received材)} \\ \text{ノルマ材} \\ \text{B処理材 0% 加工材} \\ \text{B処理材 3% 加工材} \end{array} \right\} \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_c = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.4 \cdots \cdots (3.20) \\ \text{最低値 } \ln K_c = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.0 \cdots \cdots (3.21) \\ \text{最高値 } \ln K_c = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 22.4 \cdots \cdots (3.22) \\ \text{最低値 } \ln K_c = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.5 \cdots \cdots (3.23) \end{array} \right.$$

次に温度勾配型標準二重引張試験結果あるいは温度勾配型標準ESSO試験結果から実際の構造物における脆性亀裂停止能力を推定するため、(2.22)式と(2.23)式および(3.16)～(3.23)式を用いて検討した。

図3.72および図3.73は使用温度一定(0°C, -10°C)とした時の脆性亀裂伝播停止限界亀裂長さと使用応力との関係を示したものである。また表3.15～3.16および図3.74～3.77は、伝播する脆性亀裂長さを一定(10m, 5m, 3m, 1m)とし、使用応力をK5E鋼の場合は16.0kg/mm²および8.0kg/mm²、KEN鋼の場合は12.5kg/mm²および8.0kg/mm²としたときの亀裂停止可能な使用限界温度を示したものである。

以上の試験結果を要約すると次のとくとなる。

K5E鋼について

- 1) B処理材製作過程におけるノルマ処理条件に若干問題があり、靭性の低下をきたしたことは脆性亀裂伝播停止特性からも明らかである。
- 2) ノルマ材、B処理材0%加工材、および3%加工材の有効な実験点が少なく、確定的な判断を下すことは多少問題であるが、各供試材の脆性亀裂伝播停止特性には有意差は認められない。すなわち、溶接の影響、冷間加工と溶接の重複による影響は認められない。
- 3) 同様に、有効な実験点が少なく、種々問題を感じるが、ノルマ材で溶接の影響が認められない以上、素材(As Received材)についても認められないはずである。したがって、素材とT処理材0%加工材の脆性亀裂伝播停

止特性は同等なものとみなす。

- 4) 表3.15に示したごとく、使用応力 8.0 kg/mm^2 の場合、停止限界亀裂長さを 10 m としても、 0°C 程度まで亀裂停止能力を期待できる。また、使用応力 16.0 kg/mm^2 の場合、停止限界亀裂長さを 1 m とすれば 0°C 程度まで亀裂停止能力を期待できるはずである。

KEN鋼について

- 1) B処理材製作過程におけるノルマ処理条件は適切であったと考えられ、脆性亀裂伝播停止特性も再ノルマ処理によって影響を受けなかったと考えられるので、素材(As Received材)とノルマ材の脆性亀裂伝播停止特性は同等なものとみなす。
- 2) B処理材3%加工材については、有効な実験点が少ないので、冷間加工の影響は求め難いが、B処理材0%加工材と3%加工材の脆性亀裂伝播停止特性は同等なものとみなす。さらに、溶接の影響によってB処理材0%加工材および3%加工材の脆性亀裂伝播停止特性は、素材およびノルマ材よりも向上している。
- 3) 冷間加工の影響はほとんどなく、溶接の影響で脆性亀裂伝播停止特性はむしろ良くなる傾向にある。この理由については後述するが、
 - a) 溶接棒にJIS D5016を使用したため、母材より韧性の良いDepoが試験片表面に残っていたこと。
 - b) 板厚中央部には圧縮の残留応力が存在しているものと推測されること。などによるためと考えられる。
- 4) 以上の結果から、冷間加工の影響はほとんどなく、溶接ビードの影響により脆性亀裂停止特性は良くなるのであるから、実用上は全然問題ないと考えられる。ただし試験片の残留応力分布を計測した上で、試験結果補正の必要性を検討する必要がある。(46年度に残留応力を計測する予定)

3.7 試験結果に対する考察

Rounded Gunwale部を対象に、冷間曲げ加工と溶接の重複が、鋼材の韧性に及ぼす影響を実験的に求め、各種試験結果を以上に述べて来た。

いわゆるB処理材に対する上述の各種試験結果について若干の検討をしてみよう。

前述の試験結果を要約すると下記のごとくなる。

- (1) 船体用50キロ級高張力鋼(K5E鋼)においては、脆性亀裂発生特性および脆性亀裂伝播停止特性とも、冷間加工の影響・溶接の影響とも明瞭に認められない。
- (2) 一般船体用軟鋼(KEN鋼)においては、脆性亀裂発生特性には冷間加工の影響・溶接の影響とも明瞭に認められないが、脆性亀裂伝播停止特性には溶接の影響は明らかに認められる。すなわち、溶接の影響により二重引張試験結果はむしろ良くなっている。

さて、これらの試験結果を検討するにあたり問題になる点は下記の点であろう。すなわち、

- ① 冷間加工による塑性歪の方向とディープノッチ試験あるいは二重引張試験における脆性亀裂発生・伝播方向との関係
- ② B処理材製作過程での置きビードによる残留応力の影響
- ③ 置きビード溶接時入熱による材質劣化の問題
- ④ 二重引張試験片表層部に存在する置きビード溶着金属の影響

等である。

3.7.1 脆性亀裂発生・伝播停止特性におよぼす冷間加工の影響

一般に、本研究の対象となっている船体用50キロ級高張力鋼および一般船体用軟鋼においては、冷間加工により加工硬化を来たし、靭性が劣化することは良く知られていることである。たとえば一般船体用軟鋼について実施した阿部の研究⁶⁾によれば、

- (1) 加工量が10%位までは予歪量の増加に伴って、靭性は低下するが、加工量が10%以上では靭性値は一定値に漸近する傾向が認められる。
- (2) 加工量7%の場合、二重引張試験結果の脆性亀裂伝播停止遷移温度 Δ_{Tra} (Field Stress 12Kg/mm²)における脆性亀裂伝播停止遷移温度は約40°C上昇する。

等が明らかになっている。阿部が用いた供試材の化学成分ならびに機械的性質を表3.17に、二重引張試験結果を図3.7.8に示す。

しかしながら、今回供試したB処理材においては、船体の重大損傷に関係深いと思われるRounded Gunwale部のButt方向の割れを対象としているので、冷間加工による塑性歪の方向とディープノッチ試験および二重引張試験における脆性亀裂発生・伝播方向とを一致させている。しかも、3~5%程度の曲げ加工であるので、試験片板厚中央部はほとんど冷間加工を受けていない状態である。したがって、ディープノッチ試験結果による脆性亀裂発生特性、および二重引張試験結果による脆性亀裂伝播停止特性に対して、冷間曲げ加工の影響が明瞭に認められなかったことは当然であったとも考えられる。

換言すれば、板厚30mm、曲げ半径750mmのRounded Gunwaleにおいては、板表面の冷間加工量は約2%であり、Butt方向割れに対する冷間加工の影響は無視してよいということである。

3.7.2 置きビードによる残留応力が試験結果におよぼす影響

前述のごとく、B処理材においては、同一断面上の表裏両面に置きビードしているので、たとえ余盛りを切削除去したとしても、当然のことながら残留応力は存在している。しかも残留応力は、供試材の全ての方向においてBalanceしているはずである。したがって、ディープノッチ試験あるいは二重引張試験において、試験結果に影響を及ぼすと考えられる亀裂発生・伝播直角方向すなわちビード直角方向の残留応力を注目してみれば、板表面の分布と板厚中央部の分布とはおそらく対称になっているものと推定される。

さて、ディープノッチ試験片について考えるならば、K5E鋼のサイドスリット+表面ノッチ型の場合は、サイドスリット底では、板厚表面は圧縮、板厚中央部では引張残留応力が、また表面ノッチ底では、サイドスリット底の板幅両端部で圧縮、板幅中央部で引張残留応力が存在しているものと予想される。

したがって、先に試験結果の項で述べたごとく、脆性亀裂がサイドスリット底の板厚中央部から発生した場合が多いとすれば、残留応力により悪影響を受けているはずである。

一方、KEN鋼の表面ノッチ型の場合は、表面ノッチ底は板幅端部で圧縮、板幅中央部では引張残留応力が存在しているものと予想される。したがって、脆性亀裂が板幅端部の表面ノッチ底より発生するとすれば、残留応力により試験結果は良く出ているはずであり、板幅中央部の表面ノッチ底より発生するとすれば残留応力により悪影響を受けているはずである。

さらに、二重引張試験片の場合はどうであろうか。当然のことながら残留応力は存在しているはずである。しかし、各試験片における停止亀裂の長さがほぼ一定であれば、試験片ごとの残留応力の影響はほぼ一定になるはずである。今回の試験においては、停止亀裂長さが約300mm程度になるような条件で実施し、試験結果もほぼ300±50mmの範囲内に収まっている。したがって残留応力による影響はほぼ一定になっているものと推定される。

なお、置きビードによる残留応力分布に対しては、昭和46年度研究において計測することになっている。したがって、場合によっては試験結果を補正しなければならないかも知れない。

3.7.3 置きビード溶接時入熱による材質劣化の影響

一般に、溶接熱影響による材質変化については、 A_1 変態点直上あるいはその温度附近に加熱された部分の焼入れ脆化、および歪時効等が靭性変化の代表的な現象としてあげられるが、鋼種や脱酸の程度で大いに異なることは周知の事実である。一般に、700～300°C程度に加熱された部分を溶接脆化領域とも呼んでいるが、この脆化領域は、普通Bondから3～10mm程度のところに存在することが知られている。

また、最脆化温度としては、一般軟鋼の場合600～500°C、50キロHT鋼の場合500～400°C程度と一般に言われている。今回の供試材においては、板厚30mmの板の表裏両面に置きビードしているので、試験片の置きビード断面すなわち脆性亀裂発生。伝播面においては板厚中央部に脆化領域が存在しているはずである。しかし試験結果によれば、これらの脆化の影響は極くわずかであり、試験結果に明瞭に出て来るような影響はなかったようである。

3.7.4 二重引張試験結果における置きビード溶着金属の影響

前述のごとく、K5E鋼においては、二重引張試験結果による脆性亀裂伝播停止特性に溶接の影響は明瞭には認められないが、KEN鋼においては溶接の影響は明らかに認められ、二重引張試験結果はむしろ良くなっている。

次に図3.70と図3.71を比較すると、K5E鋼素材(As Received材)に置きビードしたT処理材0%加工材と、KEN鋼再ノルマ材に置きビードしたB処理材0%加工材の二重引張試験結果によるKC値は、同一Levelであると判断される。すなわちK5E鋼においては、先に溶接の影響は明瞭には認められないと述べたが、若干溶接により悪影響を受けている傾向にあり、KEN鋼においては明らかに良くなっている。この原因は明確には分らないが、置きビード余盛り除去後の試験片表層部に残存している溶着金属の影響によるものであろうと考えざるを得ない。すなわち、置きビードには、溶接棒としてJIS D5016を用い、しかも3層繰返し溶接しているので、溶着金属下層部すなわち、余盛り除去後の試験片表層部に残存している溶着金属は、かなり靭性の優れたものであったと推定できよう。したがって、K5E鋼より靭性の劣るKEN鋼においては、表層部に母材よりも靭性の優れた溶着金属が存在していたために、脆性亀裂伝播に伴うSheer Lipが大きく、亀裂伝播に対して抵抗となつたために、二重引張試験結果は素材よりも良くなつたと推察するのである。

3.8 結論

クラックアレスターの働きをさせる目的で使用されているRounded Gunwale部のE級鋼に、ブロック搭載用吊金具(Eye Plate)などを溶接することの可否を明らかにするため、E級鋼(一般船体用軟鋼および船体用50キロ級高張力鋼)について冷間曲げ加工と溶接の重複による脆性亀裂発生および伝播停止特性の変化を実験的に求めた。結論として次のことが判明した。

- 1) 脆性亀裂発生特性に関しては、KEN鋼、K5E鋼いずれの場合においても、今回の供試材程度の溶接、ならびに冷間曲げ加工と溶接の重複の影響は、実用上問題にならぬと考えられる。
- 2) 脆性亀裂伝播停止特性に関しては、上記発生特性と同様、実用上は問題ないと考えられる。

4. 船体用 50 キロ級高張力鋼の靱性におよぼすガス加熱加工条件の影響に関する研究

4.1 試験片製作要領

線状ガス加熱加工にはバーナーを直線的に走らす Straight Line Heating と、バーナーを円弧に動かして行なう Weaving Line Heating とがあるが、今回は Straight Line Heating のみを行なった。ガス加熱加工にあたっては、ガス加熱により曲げられたまゝの状態で試験を実施するのは非常に困難であり、試験結果の解析も面倒になる。さらに、Severe Side の条件で試験した方が安全 Side の結論が得られるとの見地から、供試材の表裏両面にガス加熱加工をほどこして平板試験片を製作した。

温度計測にあたっては、移動熱源のため板表面の温度を測定することは非常に困難なので、板表面下 1 mm の位置に C-A 熱電対を Purcussion 溶接して測定した(図 4.1)。以下に述べる最高加熱温度はすべて板表面下 1 mm の最高到達温度である。

本年度は表 4.1 および図 4.1 に示す加熱条件で 800°C → 水冷処理材を中心に試験したが、供試材製作要領としては上記のごとく、板表面下 1 mm の位置での最高到達温度で制御した。さらに、表 4.1 に示すごとくフレームの位置から 50 mm のところに冷却水ノズルをセットして冷却した。

熱サイクルの 1 例を図 4.2 に、加熱表面近傍の温度分布を図 4.3 に示す。

二重引張試験片製作にあたっては、加熱線上を脆性亀裂が伝播するように配慮し、残留応力のバランスを考慮して、試験片表裏両面を各 3 条加熱した。(図 4.4)

なお各試験片に所定の条件のガス加熱が施されているか否かを判定するため、各試験片について、端から 100 mm の位置に C-A 熱電対を Purcussion 溶接し温度測定を行なった。

供試材としては、板厚 30 mm の船体用 50 キロ級の高張力鋼(H.T.50)日本海事協会(以下 N.K. と称す)規格 A 級鋼(K5A 鋼)、D 級鋼(K5D 鋼)および E 級鋼(K5E 鋼)を使用した。供試材の Mill Sheet による化学成分ならびに機械的性質を表 4.2 に示す。

表 4.1 線状ガス加熱条件

項 目	条 件
火 口 (口径)	帝酸バリアル G 2 (2.8 mmφ)
酸 素 壓 力	6 kg/cm ²
酸 素 流 量	2.3 × 10 ³ l/h
アセチレン 壓 力	0.5 kg/cm ²
アセチレン 流 量	2.0 × 10 ³ l/h
火 口 高 さ	20 mm
火口と水口の間隔	50 mm
水 量	約 2.3 l/min
加 热 速 度	22 cm/min
最 高 加 热 温 度	800 ± 30 °C

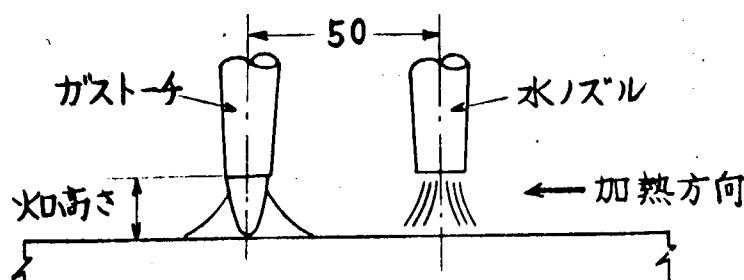


表4.2 供試材の化学成分をらびに機械的性質

鋼種	熱処理	板厚 (mm)	化学成分(%)					引張試験		
			C	Si	Mn	P	S	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)
K5A鋼	As Rolled	30	0.12	0.34	1.24	0.025	0.020	37.8	52.4	25.2
K5D鋼	Normalized	30	0.15	0.46	1.31	0.014	0.019	36.0	53.0	24.0
K5E鋼	Normalized	30	0.13	0.35	1.35	0.027	0.017	38.2	55.1	23.7

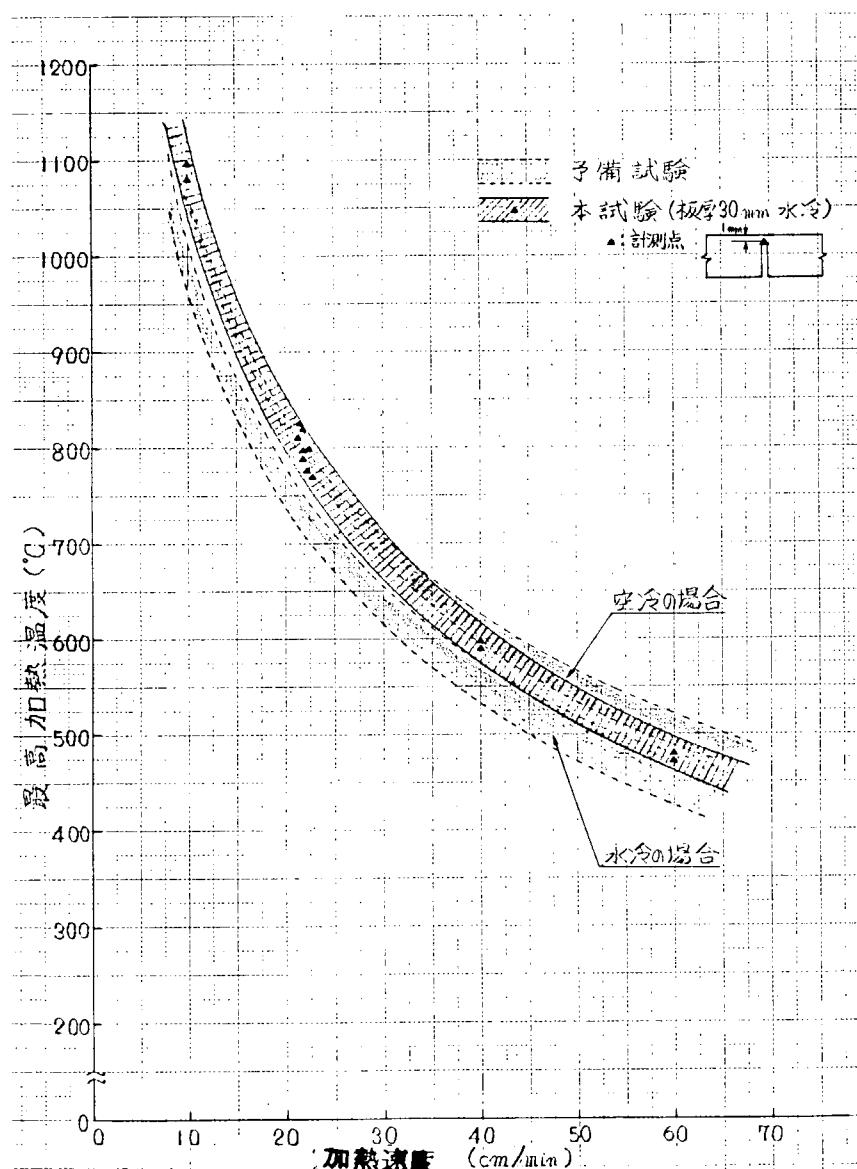


図4.1 線状ガス加熱における加熱速度と最高加熱温度の関係

4.2 低温引張試験結果

試験片採取要領を図4.5に、試験結果を図4.6～4.9に示す。

試験結果からK5D鋼とK5E鋼については差が認められなかった。各供試材について降伏点と温度との間の実験式を求めるとき次式のごとくなる。

$$K5A \text{ 鋼(素材)} \dots \sigma_y = 25.5 \cdot e^{\frac{T_F}{T_K}} \quad \dots \dots \dots \quad (4.1)$$

$$\left. \begin{array}{l} K5D \text{ 鋼(素材)} \\ K5E \text{ 鋼(素材)} \end{array} \right\} \dots \sigma_y = 31.8 \cdot e^{\frac{83.9}{T_K}} \quad \dots \dots \dots \quad (4.2)$$

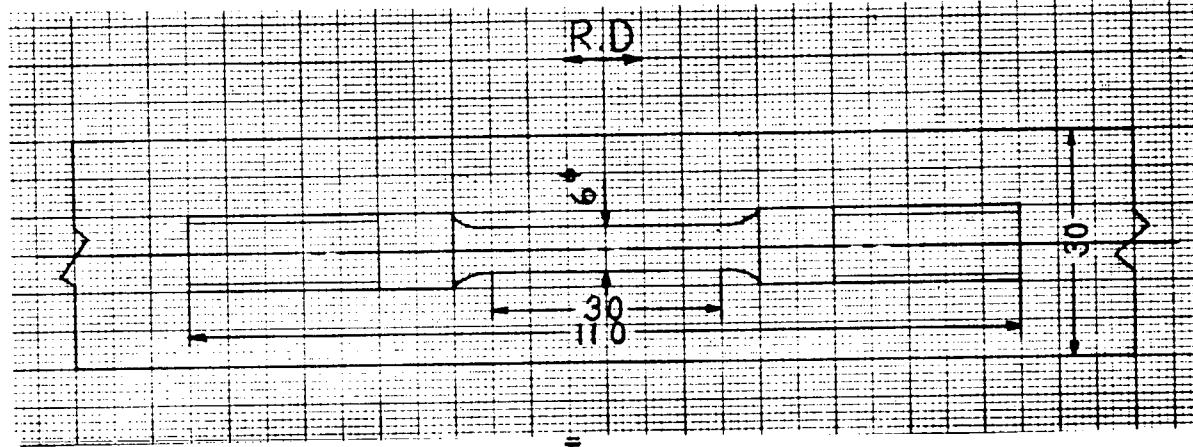


図4.5 低溫引張試験片採取要領

4.3 組織および硬さ調査結果

写真4.1～4.4にマクロ組織および顕微鏡組織を示す。写真に見られるごとく板表面下0.5mm付近の組織は微細化され、一応水冷による焼入れ組織を示しているが、完全な焼入れマルテンサイト組織ではない。1mm付近はA₁変態を若干越えてペーライトの拡散がはじまっている、一部水冷によるマルテンサイトが出ている程度である。いずれにしても移動熱源のため、高温度での保持時間が短かく完全な変態はこの程度の温度では起っていない。

図4.10～4.12および表4.3にビッカース硬さを示す。ビッカース硬さを板厚方向について見ると、各鋼種とも加熱表面下2mmまで大巾な上昇が見られる。

今回の測定では、加熱表面下0.5mmの位置の硬さが最も高く、その値はK5A鋼は267HV、K5D鋼は336HV、K5E鋼は348HVであった。しかし加熱面は当然さらに硬くなっているものと考えられる。

表4.3 ビッカースかたさ試験

(K5A鋼、K5D鋼、K5E鋼、板厚30mm)

鋼種	材料履歴	素材	熱影響部 板表面下0.5mm
K5A鋼	素材	147～155	—
	800°C→水冷材	—	262
K5D鋼	素材	151～169	—
	800°C→水冷材	—	336
K5E鋼	素材	147～153	—
	800°C→水冷材	—	348

荷重 10kg

4.4 V-ノッチシャルビー衝撃試験結果

素材ならびに加熱加工材より、V-ノッチシャルビー衝撃試験片を図4.13の要領で採取し、吸収エネルギー～温度、脆性破面率～温度についてそれぞれの遷移曲線を求めた。

試験片は板表面より1mm削って採取し、板厚面にノッチ加工したので、試験片断面にしめるガス加熱熱影響部の割合は、当然板厚全体のそれと比べて大きくなっている。

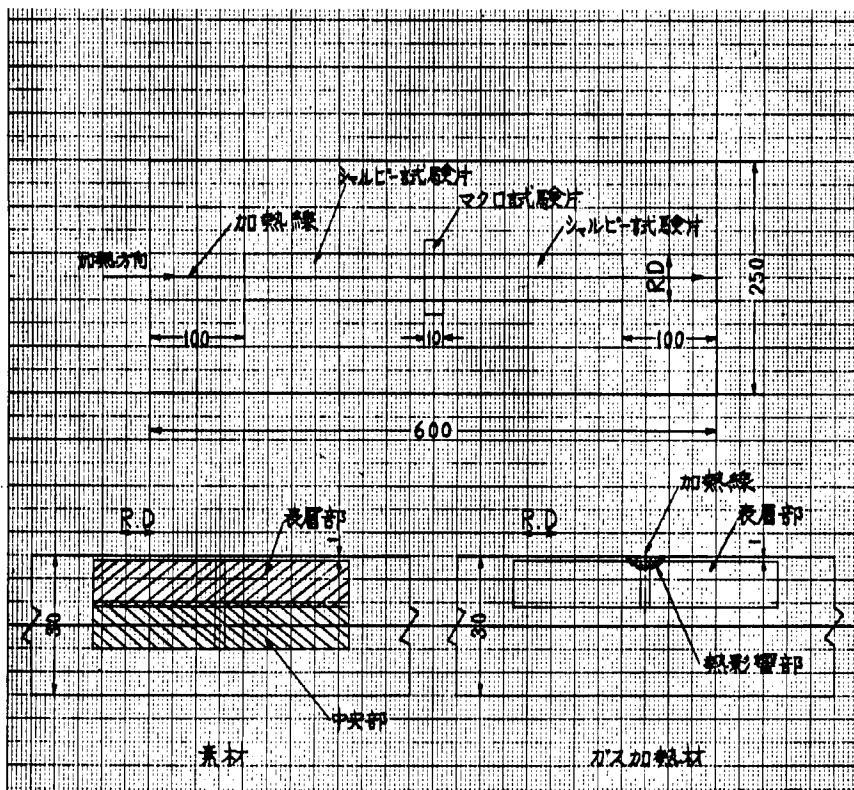


図4.13 シャルピー衝撃試験片および組織かたさ調査試験片採取要領

図4.14～4.29、表4.4および図4.30～4.31に試験結果を示す。

試験結果を要約すると次のとくとなる。

- 1) 各鋼種とも素材においては表層部と中央部との靭性の差は顕著に認められない。
- 2) 表層部のみを比較すると、各鋼種とも800°C→水冷の線状ガス加熱加工によりかなりの靭性劣化が認められる。すなわち、遷移曲線は高温側に移動し、しかもSelf Energyが小さくなっている。
- 3) 800°C→水冷により、各種遷移温度は高温側に移動するが、各鋼種によりその移動量に有意差は認め難い。
- 4) 800°C→水冷の線状ガス加熱加工をほどこすと、表層部の靭性劣化はかなり大きいものと推定される。
- 5) K5D鋼についてのみ加熱温度別に比較すると、加熱表面下1mmの温度で650°C→水冷材および800°C→空冷材の表層部は素材と大差ない。また、700°C→水冷材、750°C→水冷材、800°C→水冷材、900°C→水冷

材の順に表層部の韌性は劣化する。

表4.4 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

(K5A鋼, K5D鋼, K5E鋼 板厚: 30mm)

鋼種	材料 履歴	採取位置	方 位	試験片 符号	各種遷移温度(℃)				Shelf Energy (kg-m)
					vTr ₁₅	vTr ₃₅	vTr _E	vTr _S	
K5A (30t)	素 材	表層部	圧延方向	C23SL	-38	-15	+6	+16	14.4
		中央部	圧延方向	C23ML	-39	-12	+8	+17	14.0
	800°C →水冷材	表層部	圧延方向	C24SL	+20	+35	+36	+46	9.8
K5D (30t)	素 材	表層部	圧延方向	C27SL	-61	-40	-27	-27	17.0
		中央部	圧延方向	C27ML	-58	-37	-26	-28	14.2
	650°C →水冷材	表層部	圧延方向	C32SL	-68	-35	-19	-14	16.0
	700°C →水冷材	表層部	圧延方向	C31B _B SL	-60	-26	-10	-6	16.4
	750°C →水冷材	表層部	圧延方向	C31ASL	-29	-10	-1	+1	15.6
	800°C →水冷材	表層部	圧延方向	C28SL	-31	-12	-2	+7	13.6
	800°C →空冷材	表層部	圧延方向	C30SL	-70	-45	-20	-16	17.2
	800°C →水冷材	表層部	圧延方向	C32ASL	-26	-3	+1	+2	11.2
	素 材	表層部	圧延方向	C19SL	-94	-60	-38	-35	18.2
		中央部	圧延方向	C19ML	-92	-59	-41	-38	16.6
	800°C →水冷材	表層部	圧延方向	C20SL	-35	-8	+3	-6	11.8
K5E (30t)	素 材	表層部	圧延方向	C19SL	-94	-60	-38	-35	18.2

4.5 ディープノッチ試験結果

素材と線状ガス加熱加工材の脆性破壊発生特性を求めるために、ディープノッチ試験を実施した。試験には幅400mm, 切欠深さ120mmの標準型試験片を用いた。(図4.32)

試験結果を表4.5および図4.3-3～4.3-9に示す。また、試験片破断面状況を写真4.5～4.10に示す。

試験結果から実験式を求めると次のごとくなる。

$$\begin{aligned}
 & \text{最高値} \quad Si = 171.9 \cdot e^{\frac{-6452}{T_K}} \quad (4.3) \\
 & \left. \begin{array}{l} \text{素材} \\ \cdots \cdots \end{array} \right\} \quad \text{最低値} \quad Si = 106.1 \cdot e^{\frac{-6452}{T_K}} \quad (4.4) \\
 & \text{800°C} \rightarrow \text{水冷材} \quad Si = 30.2 \cdot e^{\frac{-6452}{T_K}} \quad (4.5) \\
 & \left. \begin{array}{l} \text{素材} \\ \cdots \cdots \end{array} \right\} \quad \text{最高値} \quad Si = 404.3 \cdot e^{\frac{-6452}{T_K}} \quad (4.6) \\
 & \text{最低値} \quad Si = 163.8 \cdot e^{\frac{-6452}{T_K}} \quad (4.7) \\
 & \left. \begin{array}{l} \text{650°C} \rightarrow \text{水冷材} \\ \cdots \cdots \end{array} \right\} \quad \text{最高値} \quad Si = 589.0 \cdot e^{\frac{-6452}{T_K}} \quad (4.8) \\
 & \text{最低値} \quad Si = 83.0 \cdot e^{\frac{-6452}{T_K}} \quad (4.9) \\
 & \text{800°C} \rightarrow \text{水冷材} \quad Si = 39.6 \cdot e^{\frac{-6452}{T_K}} \quad (4.10)
 \end{aligned}$$

$$\text{K5E鋼} \left\{ \begin{array}{l} \text{素材} \cdots \cdots \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } Si = 697.8 \cdot e^{-\frac{645.2}{T_K}} \\ \text{最低値 } Si = 146.9 \cdot e^{-\frac{645.2}{T_K}} \end{array} \right. \\ 800^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots Si = 43.1 \cdot e^{-\frac{645.2}{T_K}} \end{array} \right. \quad (4.11) \quad (4.12) \quad (4.13)$$

図4.40～4.42は、降伏点に対する安全率を2とした場合の許容限界亀裂長さと脆性破壊発生限界温度との関係を、(2.9)式と(4.1)～(4.2)式および(4.3)～(4.13)式を用いて求めたものである。

図4.43～4.48は、温度に関係なく使用応力を一定とした場合の許容限界亀裂長さと脆性破壊発生限界温度との関係を、(2.10)式と(4.3)～(4.13)式を用いて求めたものである。

表4.6～4.7に許容限界亀裂長さを100mm, 60mm, 30mmとした場合の脆性破壊発生限界温度を示す。なお、使用応力16.0kg/mm²および8.0kg/mm²と仮定したのは3.5の項に述べたとおりである。

以上の試験結果を要約すると、次のとくなる。

- 1) 各鋼種とも加熱表面下1mmの温度で800°C→水冷の線状ガス加熱加工をほどこすと、脆性破壊発生特性は悪くなる。
- 2) 800°C→水冷による線状ガス加熱加工部の脆性破壊発生特性には、鋼種別の差はあまり認められない。
- 3) K5D鋼についてのみ述べれば、650°C→水冷材の脆性破壊発生特性は素材と同等かもしくは若干劣化する程度である。
- 4) 表4.6に示したごとく、使用応力16.0kg/mm²における許容限界亀裂長さ60mmに対しての脆性亀裂発生限界温度を求めると、下記のごとくなる。

$$\text{K5A鋼} \left\{ \begin{array}{l} \text{素材} \cdots \cdots \cdots -160 \sim -149^\circ\text{C} \\ 800^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots -110^\circ\text{C} \end{array} \right.$$

$$\text{K5D鋼} \left\{ \begin{array}{l} \text{素材} \cdots \cdots \cdots -174 \sim -159^\circ\text{C} \\ 650^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots -181 \sim -143^\circ\text{C} \\ 800^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots -121^\circ\text{C} \end{array} \right.$$

$$\text{K5E鋼} \left\{ \begin{array}{l} \text{素材} \cdots \cdots \cdots -182 \sim -157^\circ\text{C} \\ 800^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots -124^\circ\text{C} \end{array} \right.$$

さらに、溶接などによる残留応力の影響を考慮して約60°C程度高温側に移動するものと仮定すると、次のとくなる。

$$\text{K5A鋼} \left\{ \begin{array}{l} \text{素材} \cdots \cdots \cdots -100 \sim -89^\circ\text{C} \\ 800^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots -50^\circ\text{C} \end{array} \right.$$

$$\text{K5D鋼} \left\{ \begin{array}{l} \text{素材} \cdots \cdots \cdots -114 \sim -99^\circ\text{C} \\ 650^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots -121 \sim -83^\circ\text{C} \\ 800^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots -61^\circ\text{C} \end{array} \right.$$

$$\text{K5E鋼} \left\{ \begin{array}{l} \text{素材} \cdots \cdots \cdots -122 \sim -97^\circ\text{C} \\ 800^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots -64^\circ\text{C} \end{array} \right.$$

したがって、実用上脆性破壊発生に関しては、800°C→水冷程度の線状ガス加熱加工の影響は問題にならぬと考えられる。

表4.5 デイ一ノツチ試験結果一覧
(鋼種 K5A, K5D, K5E 板厚30mm)

鋼種	材料 履歴	試験片 符号	試験片寸法				破断荷重 P (ton)	平均応力 $\bar{\sigma}_g$ (kg/mm ²)	切欠面 平均応力 $\bar{\sigma}_n$ (kg/mm ²)	$f(\chi)$	Si (kg/mm ²)	K _{cr} (kg/mm ²)	試験温度 T (°C)	$\frac{10^3}{T_k}$ (°K ⁻¹)
			板厚 t (mm)	幅 2B (mm)	引張深さ (mm)	表面凹凸 (mm)								
K5A	素材	N115	30.5	400	121	—	57	4.7	11.7	1.26	0.32	115	-196	12.99
		N113	30.5	400	122	—	59	4.8	12.2	1.26	0.33	118	-160	8.85
		N116	30.2	400	121	—	159	13.2	32.9	1.26	2.50	324	-120	6.54
		N114	30.3	400	121	—	200	16.5	41.5	1.26	3.91	405	-80	5.18
	800°C→ 水冷材	N120	30.5	400	120	—	62	5.1	12.7	1.25	0.36	124	-196	12.99
		N118	30.6	400	120	—	56	4.6	11.4	1.25	0.30	112	-160	8.85
		N119	30.7	400	120	—	75	6.1	15.3	1.25	0.52	148	-120	6.54
		N117	30.3	400	120	—	97	8.0	20.3	1.25	0.90	194	-80	5.18
K5D	素材	N130	30.2	400	120	—	60	5.0	12.4	1.25	0.35	121	-196	12.99
		N131	30.1	400	120	—	76	6.3	15.8	1.25	0.56	153	-160	8.85
		N129	30.0	400	121	—	248	20.7	52.0	1.26	6.16	508	-120	6.54
		N132	30.0	400	121	—	239	19.9	50.1	1.26	5.69	489	-80	5.18
	650°C→ 水冷材	N137	30.0	400	120	—	58	4.8	12.1	1.25	0.32	116	-196	12.99
		N138	29.9	400	119	—	141	11.8	23.2	1.25	1.95	286	-160	8.85
		N140	29.9	400	120	—	113	9.4	29.4	1.25	1.24	228	-120	6.54
		N139	29.9	400	120	—	212	17.7	44.2	1.25	4.39	429	-80	5.18
K5D	800°C→ 水冷材	N135	29.8	400	120	—	58	4.9	12.2	1.25	0.34	119	-196	12.99
		N134	30.0	400	121	—	59	4.9	12.4	1.26	0.35	120	-160	8.85
		N136	30.0	400	121	—	77	6.4	16.1	1.26	0.59	157	-120	6.54
		N133	29.9	400	120	—	118	9.9	24.7	1.25	1.37	240	-80	5.18
	800°C→ 水冷材	N103	30.4	400	120	—	63	5.2	13.0	1.25	0.38	126	-196	12.99
		N101	30.6	400	121	—	157	12.8	32.3	1.26	2.35	314	-160	8.85
		N102	30.7	400	120	—	238	19.4	48.5	1.25	5.28	471	-120	6.54
		N104	30.6	400	120	—	239	19.5	48.8	1.25	5.33	473	-80	5.18

注) 1. $\bar{\sigma}_g$ = gross stress 3. $Si = \frac{\pi}{2E} \{f(\chi) \cdot \bar{\sigma}_g\}^2 \cdot C$ 5. $f(\chi) = \sqrt{\frac{2}{\pi C} \tan \frac{\pi C}{2} + 0.1 \sin \pi C}$
 2. $\bar{\sigma}_n$ = net stress 4. $K_{cr} = f(\chi) \cdot \bar{\sigma}_g \cdot \sqrt{\pi C}$

表4.6 許容亜裂長さと発生限界温度

(鋼種 : K 5 A 鋼 , K 5 D 鋼 , K 5 E 鋼)

(使用応力 : 16.0 kg/mm², 8.0 kg/mm²)

材料 応力 許容亜裂長さ 履歴	16.0 kg/mm ²			8.0 kg/mm ²			条件
	100mm	60mm	30mm	100mm	60mm	30mm	
K5A 素材	-136°C -148	-149°C -160	-164°C -172	-176°C -183	-183°C -189	-189°C -196	破壊発生限界温度 (°C)
K5A 800°C→水冷材	-86	-110	-134	-154	-164	-175	
K5D 素材	-148 -166	-159 -174	-171 -184	-174 -186	-181 -192	-189 -198	
K5D 650°C→水冷材	-128 -174	-143 -181	-159 -188	-163 -190	-172 -195	-182 -202	
K5D 800°C→水冷材	-100	-121	-142	-147	-158	-170	(°C)
K5E 素材	-144 -175	-157 -182	-169 -190	-180 -197	-187 -202	-194 -207	
K5E 800°C→水冷材	-103	-124	-144	-161	-170	-181	

表4.7 許容亜裂長さと発生限界温度

(溶接残留応力を考慮したとして、試験結果を + 60 °C補正)

(鋼種 : K 5 A 鋼 , K 5 D 鋼 , K 5 E 鋼)

(使用応力 : 16.0 kg/mm², 8.0 kg/mm²)

材料 応力 許容亜裂長さ 履歴	16.0 kg/mm ²			8.0 kg/mm ²			条件
	100mm	60mm	30mm	100mm	60mm	30mm	
K5A 素材	-76 -88	-89 -100	-104 -112	-116 -123	-123 -129	-131 -136	破壊発生限界温度 (°C)
K5A 800°C→水冷材	-26	-50	-74	-94	-104	-115	
K5D 素材	-88 -106	-99 -114	-111 -124	-114 -126	-114 -132	-129 -139	
K5D 650°C→水冷材	-68 -114	-83 -121	-99 -128	-103 -130	-112 -135	-122 -142	
K5D 800°C→水冷材	-40	-61	-82	-87	-98	-110	(°C)
K5E 素材	-84 -115	-97 -122	-109 -130	-120 -137	-127 -142	-134 -147	
K5E 800°C→水冷材	-43	-64	-84	-101	-110	-121	

4.6 二重引張試験結果

素材と線状ガス加熱加工材の脆性亀裂伝播停止特性を求めるため温度勾配型標準二重引張試験を実施した。試験には、亀裂伝播部、幅500mmの試験片を用いた(図4.49)。試験結果を表4.8および図4.50~4.52に示す。また試験片破断面状況を写真4.11~4.12に示す。

試験結果から実験式を求めると次のごとくなる。

$$\text{K 5 A鋼} \left\{ \begin{array}{l} \text{素 材} \cdots \cdots \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.4 \\ \text{最低値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 20.7 \end{array} \right. \\ 800^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 20.0 \end{array} \right. \quad (4.14)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{素 材} \cdots \cdots \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 22.3 \\ \text{最低値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.9 \end{array} \right. \\ 800^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.6 \\ \text{最低値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.3 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (4.15)$$

$$800^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 20.0 \quad (4.16)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{素 材} \cdots \cdots \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 22.3 \\ \text{最低値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.9 \end{array} \right. \\ 800^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.6 \\ \text{最低値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.3 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (4.17)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{素 材} \cdots \cdots \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 22.5 \\ \text{最低値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.7 \end{array} \right. \\ 800^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.7 \\ \text{最低値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.5 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (4.18)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{素 材} \cdots \cdots \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 22.5 \\ \text{最低値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.7 \end{array} \right. \\ 800^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.6 \\ \text{最低値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.3 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (4.19)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{素 材} \cdots \cdots \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 22.5 \\ \text{最低値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.7 \end{array} \right. \\ 800^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.7 \\ \text{最低値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.5 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (4.20)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{素 材} \cdots \cdots \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 22.5 \\ \text{最低値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.7 \end{array} \right. \\ 800^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.7 \\ \text{最低値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.5 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (4.21)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{素 材} \cdots \cdots \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 22.5 \\ \text{最低値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.7 \end{array} \right. \\ 800^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.7 \\ \text{最低値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.5 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (4.22)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{素 材} \cdots \cdots \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 22.5 \\ \text{最低値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.7 \end{array} \right. \\ 800^\circ\text{C} \rightarrow \text{水冷材} \cdots \cdots \cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{最高値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.7 \\ \text{最低値 } \ln K_C = -4.25 \left(\frac{10^3}{T_K} \right) + 21.5 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (4.23)$$

次に、温度勾配型標準二重引張試験結果あるいは温度勾配型標準E S S O試験結果から実際の構造物における脆性亀裂停止能力を推定するため、(2.22)式と(2.23)式および(4.14)~(4.23)式を用いて検討した。

図4.53~4.55は使用温度一定(0°C, -10°C)とした時の脆性亀裂伝播停止限界亀裂長さと使用応力との関係を示したものである。また、表4.9および図4.56~4.57は伝播する脆性亀裂長さを一定(10m, 5m, 3m, 1m)とし使用応力を16.0kg/mm²および8.0kg/mm²としたときの停止可能な使用限界温度を示したものである。

以上の試験結果を要約すると次のとくとなる。

- 1) 各鋼種とも加熱表面下1mmの温度で800°C→水冷の線状ガス加熱加工を施すと脆性亀裂伝播停止特性は悪くなる。
- 2) 表4.9に示すとく、実際の構造物における脆性亀裂停止能力を計算すれば、800°C→水冷の線状ガス加熱加工材は、使用応力8.0kg/mm²、最低使用温度を0°Cとすれば、K 5 D鋼の場合は3m程度、K 5 E鋼の場合は5m程度の亀裂まで停止能力を期待出来るが、K 5 A鋼の場合には当然のことながら亀裂停止能力を期待することは不可能である。
- 3) 各鋼種とも、使用応力16.0kg/mm²および8.0kg/mm²において最低使用温度を同一とすれば、素材に対して800°C→水冷線状ガス加熱加工材の停止可能な限界亀裂長さは約1/10になっている。

表4.8 二重引張試験結果一覧表
(K5A鋼, K5D鋼, K5E鋼, 板厚30mm)

鋼種 履歴	材料 符号	試験片 板厚 <i>t</i> (mm)	板幅 <i>B</i> (mm)	亀裂伝播部 平均応力 <i>G</i> (kg/mm ²)	亀裂長さ <i>C</i> (mm)	$\delta = \frac{C}{B}$	$f(\delta) \cdot \sigma_g$ (kg/mm ²)	K_c (kg/mm ²)	停止温度 <i>T</i> (°C)	$\frac{10^3}{T_K}$ (°K ⁻¹)	備考
K5A	素材	T 81	30	500	10	311	0.622	12.3	384	8	3.56
		T 84	30	500	10	342	0.684	13.1	428	18	3.44
		T 83	30	500	15	323	0.646	18.9	602	10	3.53
		T 82	30	500	20	278	0.556	23.4	690	17	3.45
	800°C →水冷材	T 87	30	500	20	367	0.734	27.6	936	50	3.09
		T 85	30	500	15	353	0.706	20.3	675	42	3.18
		T 88	30	500	10						伝播せず
		T 86	30	500	10						伝播せず
K5D	素材	T 98	30	500	10	317	0.634	12.5	395	-5	3.73
		T 100	30	500	15	313	0.626	18.6	582	-2	3.69
		T 99	30	500	20	252	0.504	22.6	635	-2	3.69
		T 97	30	500	20	273	0.546	23.2	678	-4	3.72
	800°C →水冷材	T 102	30	500	15	258	0.516	17.1	487	2	3.64
		T 103	30	500	18	286	0.572	21.6	645	11	3.52
		T 104	30	500	20	312	0.624	24.8	786	19	3.43
		T 101	30	500	15						伝播せず
K5E	素材	T 65	30	500	10	316	0.632	12.4	391	-14	3.87
		T 66	30	500	20	260	0.520	22.8	651	-8	3.77
		T 67	30	500	5						伝播せず
		T 68	30	500	10						伝播せず
	800°C →水冷材	T 71	30	500	20	265	0.530	23.0	664	10	3.53
		T 72	30	500	15	275	0.550	25.0	514	2	3.64
		T 70	30	500	15	248	0.496	16.9	471	0	3.66
		T 69	30	500							伝播せず

注) 1. σ_g = gross stress

$$2. f(\delta) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \delta \tan \frac{\pi \delta}{2}$$

$$3. K_c = f(\delta) \cdot \sigma_g \cdot \sqrt{\pi C}$$

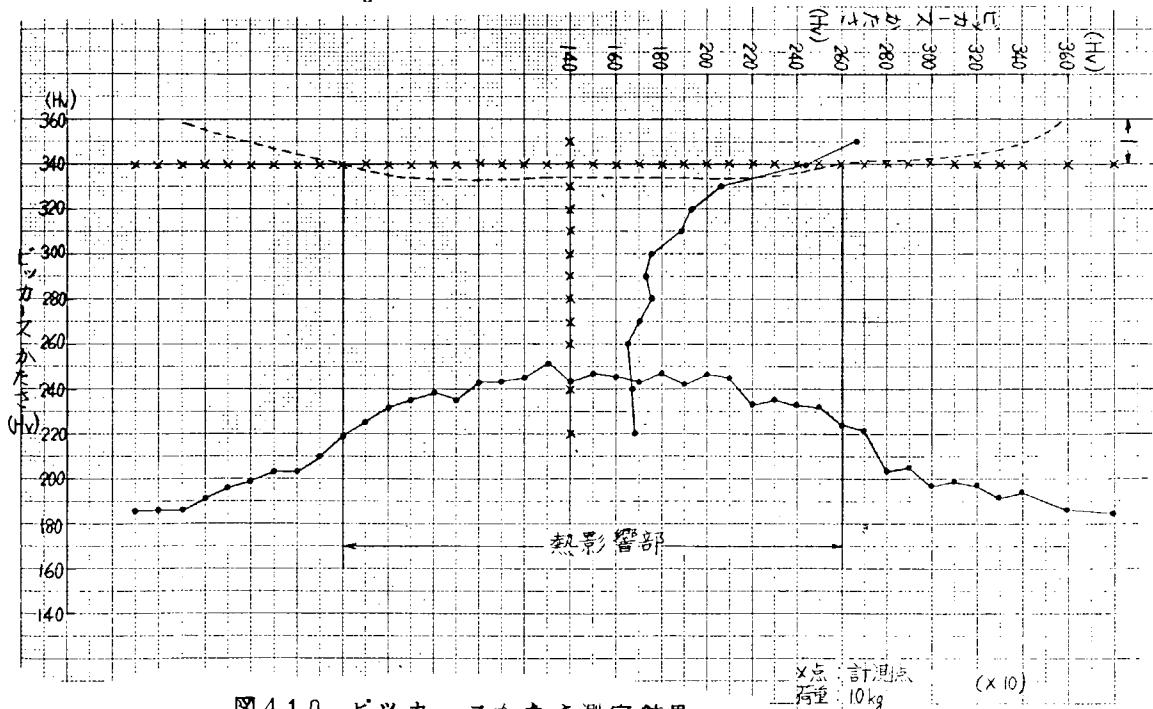


図4.10 ピッカースかたさ測定結果
(K5A鋼、800°C→水冷材)

4.7 試験結果に対する考察

船体用 50 キロ級高張力鋼に対する線状ガス加熱加工の作業能率向上対策として、加熱後の水冷による急速冷却採用についてのバックデータを得る目的で、Straight Line Heating による 800°C → 水冷処理材を中心に各種非性試験を実施し、それらの試験結果を以上に述べて来た。

Straight Line Heating による 800°C → 水冷処理材に対する上述の各種試験結果について若干の検討をしてみよう。

前述の試験結果を要約すると下記のごとくなる。

1) K5A 鋼 (As Rolled 材), K5D 鋼 (Normalized 材) および K5E 鋼 (Normalized 材) とも、800°C → 水冷による線状ガス加熱加工により脆性破壊発生特性は劣化し、3 鋼種共、ほぼ同一の発生特性を示すようになる。

2) 各鋼種共、800°C → 水冷による線状ガス加熱加工により脆性亀裂伝播停止特性は劣化し、使用応力 16 kg/mm^2 および 8 kg/mm^2 において最低使用温度を同一とすれば停止可能な限界亀裂長さは素材に対して約 $1/10$ になる。

一般に、線状ガス加熱加工部の非性試験結果を検討するにあたり、問題になる点は下記の点であろう。すなわち、

- ① 熱履歴を受けたことによる材質変化の問題
- ② 線状ガス加熱加工による残留応力の影響
- ③ 線状ガス加熱加工による角変形の影響

等である。

しかしながら、今回の供試試験片においては、先に試験片製作要領の項で述べたごとく、表裏両面に線状ガス加熱を行なったため、角変形の影響は考慮する必要はない。

4.7.1 材質における線状ガス加熱加工による熱履歴の影響

先に述べたごとく、今回の試験では、800°C → 水冷処理材を中心に供試したが、最高加熱温度は加熱表面下 1 mm の位置での温度を計測したものであり、この場合の加熱表面温度は約 900°C 程度になっていると推定される。

K5D 鋼 (板厚 25 mm) について行なった越賀らの研究⁷⁾によれば、加熱表面下 2 mm の位置の温度から換算した、加熱表面温度 900°C → 650°C w.c. の線状ガス加熱した場合、最高加熱温度が 650 ~ 700°C 以上の領域、すなわち加熱表面から 5 mm 位までの領域にわたって、非常に脆化している。このように 900°C 位の加熱を行なえば、空冷の場合、加熱表面直下は焼準組織となり非性に富むのであるが、A₁ 変態点直上か、その温度付近に加熱された領域は、パーライトの部分的分解によって不安定組織となり、それが冷却または、強制冷却されることによって脆化域となると言われている。この脆化は、一般には、高炭素マルテンサイトの生成によるものと言われている。

一方、木原らの研究⁸⁾によれば、50 キロ HT 鋼を突合せ溶接した場合、Bond 外側の最高加熱温度 500 ~ 400°C 程度の範囲が脆化域になることが判明している。

いずれにしても、今回の供試材に施こした、加熱表面下 1 mm の位置での温度で 800°C → 水冷の線状ガス加熱加工した場合、加熱線周囲に脆化領域が生成されることは事実である。さらに、先に述べたごとく、表裏両面に線状ガス加熱を行なっているため、加熱線断面、すなわち、ディープノッチ試験あるいは二重引張試験における脆性亀裂発生・伝播面においては、板厚中央部に脆化領域が存在しているはずである。

先に述べたごとく、ディープノッチ試験結果による脆性亀裂発生特性、および二重引張試験結果による脆性亀裂伝播停止特性が、800°C → 水冷による線状ガス加熱加工により劣化した原因は、上記の熱履歴による脆化領域の生成によるものであると考えられる。

さらに、越賀ら⁷⁾は、板厚25mmのK5D鋼およびK5E鋼について、Straight Line HeatingとWeaving Line Heatingした場合の板厚全体の強度を求める試験として、van der Veen試験を実施した。使用された材料の化学成分ならびに機械的性質を表4.10に、試験結果等を図4.58～4.59および表4.11に示す。これらの結果によれば、Straight Line HeatingとWeaving Line Heatingによる遷移温度の差は認められなかった。すなわち、熱影響部の幅はWeavingの方がStraightより当然広かったが、その深さにそれほど相違がなかったので、遷移温度には差が認められなかったと考えられている。また、900°C → 650°C w.c.の線状加熱によって、van der Veen試験の遷移温度は、K5D鋼の場合約8°C、K5E鋼の場合約11～13°C上昇している。

4.7.2 線状ガス加熱加工による残留応力が試験結果におよぼす影響

前述のごとく、今回の供試試験片には、線状ガス加熱加工を同一断面上の表裏両面に施しているので、当然のことながら、脆性亀裂発生・伝播面上には大きな残留応力が存在している。また、残留応力は、供試材の全ての方向においてBalanceしているはずである。

金子ら⁹⁾が計測した、50キロHT鋼線状ガス加熱加工部表面の残留応力分布によれば、加熱線直角方向の残留応力は板幅両端部で圧縮、板幅中央部で引張になっている。

さらに、辻ら¹⁰⁾の研究結果により推定するならば、加熱線直角方向残留応力は、板厚中央部と板表面部とがBalanceしているはずである。したがって、ディープノッチ試験片について考えるならば、切欠き先端においては、板表面に圧縮、板厚中央部では引張残留応力が存在しているものと推定される。また、板幅中央部においては、板表面に引張、板厚中央部では圧縮残留応力が存在しているものと推定される。

以上の推定から、ディープノッチ試験において、脆性亀裂が切欠き先端板表面より発生した場合は、残留応力の影響で試験結果は良く出ているはずである。逆に切欠き先端板厚中央部から発生した場合は、残留応力により悪影響を受けているはずである。

一般に、ディープノッチ試験結果が残留応力の影響を受けるのは、脆性亀裂発生時の切欠き先端での塑性変形量が小さい場合、すなわち極低温で破壊応力が非常に小さい場合に大きいはずである。しかしながら、表4.5から明らかなどとく、ディープノッチ試験結果では、試験温度-196°Cにおける破壊応力は、K5A鋼、K5D鋼、K5E鋼とも、素材と線状ガス加熱加工材とは同程度の値を示している。すなわち、加熱線直角方向の残留応力は、ディープノッチ試験結果にほとんど影響していないよう推測されるが、今後もさらに実験を行ない検討を必要とする。

一方、二重引張試験結果は、一般に板厚中央部の状態に大きく影響されることが認められている。表4.8に示したごとく、今回の試験においては、停止亀裂長さが約300mm程度になるような条件で実施し、試験結果もほぼ300±50mmの範囲内に収まっている。したがって、残留応力による影響はほぼ一定になっているものと推定され、しかも亀裂停止点付近においては、板厚中央部に圧縮残留応力が存在しているものと推定されるので、残留応力の影響で試験結果は良く出るはずである。しかしながら、前述のごとく、線状ガス加熱加工材の二重引張試験結果による脆性亀裂伝播停止特性は、素材よりかなり劣化しており、前項で述べた熱履歴による材質劣化の影響が大きく出ているものと推定される。換言すれば、二重引張試験片は両表面に各3条線状ガス加熱を施しているので、残留応力が適当にBalanceして、試験結果に影響するような大きな残留応力は存在しなかったとも推測される。

金子ら⁹⁾が実施した50キロHT鋼の線状ガス加熱加工部のESSO試験結果によれば、加熱線断面での試験、

すなわち横方向加熱試験では、切欠き先端の加熱線直角方向（亀裂伝播直角方向）の圧縮残留応力の影響で素材より良い結果が出ている。一方、加熱線垂直断面での試験、すなわち、縦方向加熱試験では、加熱線平行方向（亀裂伝播直角方向）の引張残留応力の影響により、素材より悪い結果が出ている。金子らが実施した線状ガス加熱加工材のESSO試験片ならびに試験結果を図4.60～4.62に示す。

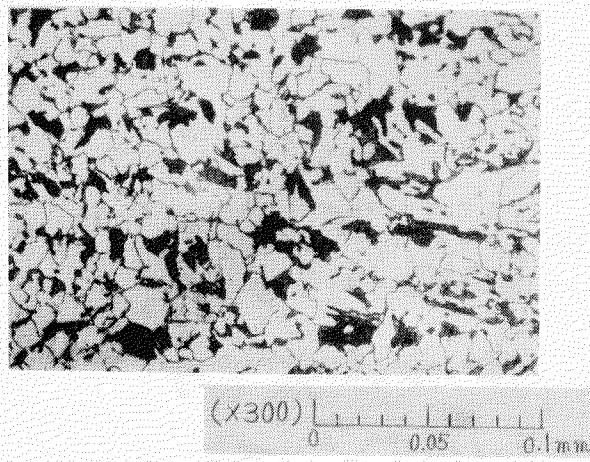
4.8 結論

船体用50キロ級高張力鋼のNK規格A級鋼(K5A鋼)、D級鋼(K5D鋼)、E級鋼(K5E鋼)に“800°C加熱→水冷”（加熱表面下1mmの位置の温度で規定）の線状ガス加熱を施した場合の脆性亀裂発生および伝播停止特性を実験的に求めた。結論として次のことが判明した。

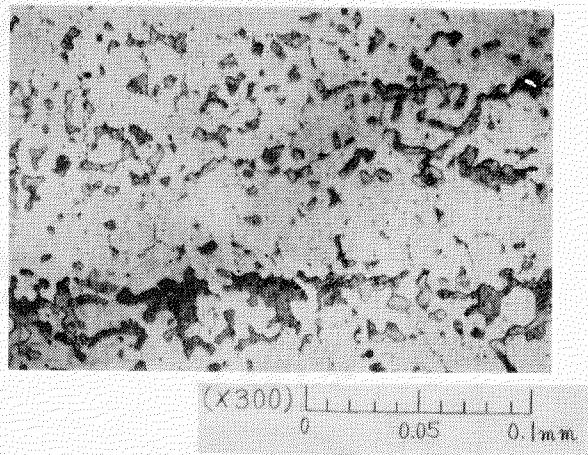
- 1) 800°C加熱→水冷による線状ガス加熱加工を施しても、脆性亀裂発生に対しては、実用上問題ないと考えられる。
- 2) 脆性亀裂伝播停止特性にはある程度悪影響を及ぼす。

参考文献

- 1) 日本造船研究協会“船体用鋼板の韌性におよぼす冷間加工と溶接の重畠効果およびガス加熱加工条件の影響に関する研究”（第111研究部会），日本造船研究協会研究資料No.113，昭45
- 2) 木原博，池田一夫，“脆性破壊の発生に関する研究（第2報）—鋼板の破壊発生特性について—”，造船協会論文集第118号，昭40
- 3) 木原博，金沢武，池田一夫，前中浩，木下勝，永元隆一，矢島浩，“クラックアレスターの有効性について（第2報）”，日本造船学会論文集第124号，昭43
- 4) 池田一夫，前中浩，岡部利正，矢島浩，中島正樹，“溶接型クラックアレスターの研究”，三菱重工技報第6卷，第6号，昭44.11
- 5) 西尾安弘，山本喜宏，梶本勝也，“海洋構造物溶接部の脆性破壊防止の研究”，三菱重工技報第7卷，第2号，昭45
- 6) 阿部三郎，“常温予歪の鋼材の脆性亀裂発生伝播両特性に及ぼす影響”，造船協会論文集第113号，昭38
- 7) 越賀房夫，安藤政明，“線状加熱加工を受けた船体用鋼板の韌性評価に関する一考察”，日本造船学会論文集第128号，昭45
- 8) 運輸技術研究所溶接部資料，“溶接に依る高抗張力鋼の脆化領域試験”，昭和29年5月
- 9) 金子駿介，“HT-50線状加熱材のESSO試験”，日立造船株式会社社内報告，昭和44年11月
- 10) 辻勇，山口喜久次，“線状加熱による軟鋼帯板の変形の解析”，西部造船会会報，第39号，昭35

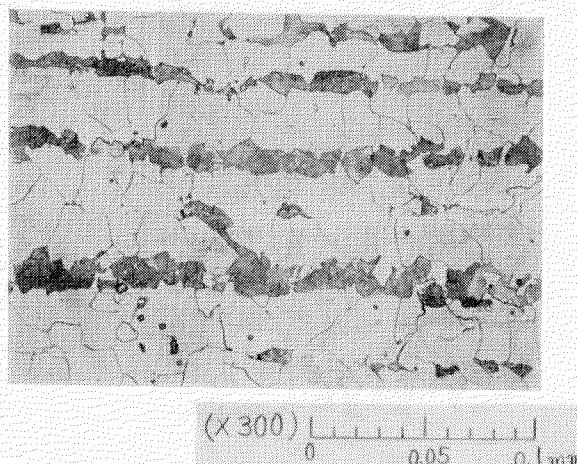


K5E鋼 素材 (C-1)

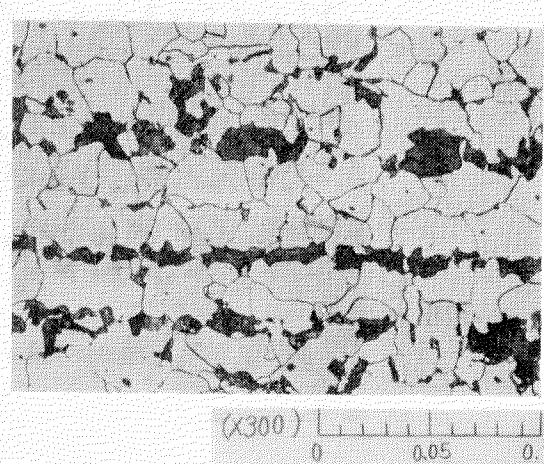


K5E鋼 ノルマ材 (C-2)

写真3.1 素材およびノルマ材の顕微鏡組織
(板中央部)



KEN鋼 素材 (C-10)



KEN鋼 ノルマ材 (C-11)

写真3.2 素材およびノルマ材の顕微鏡組織
(板中央部)

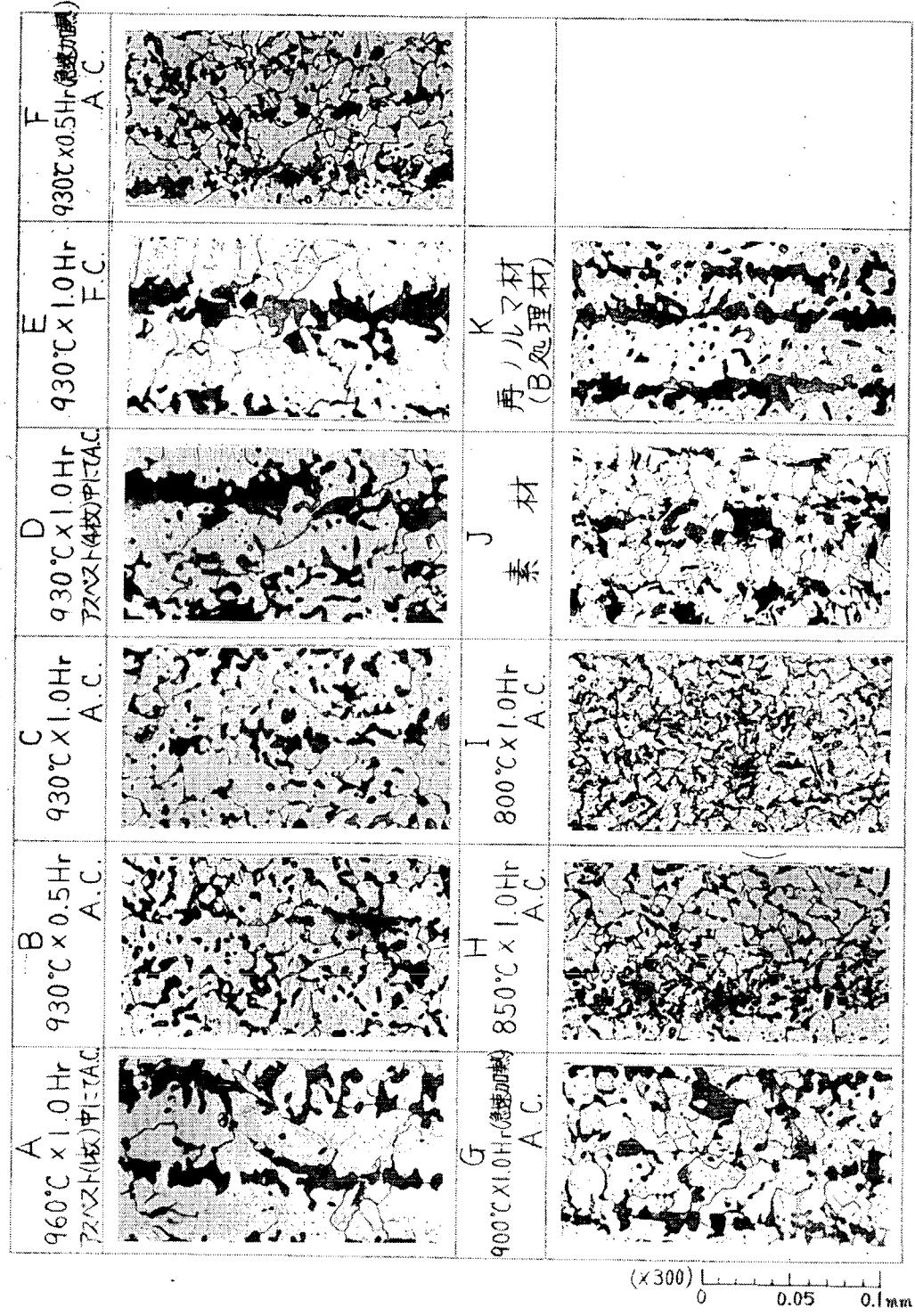


写真3.3 各種熱処理条件によるK5E鋼再ノルマ材の顕微鏡組織

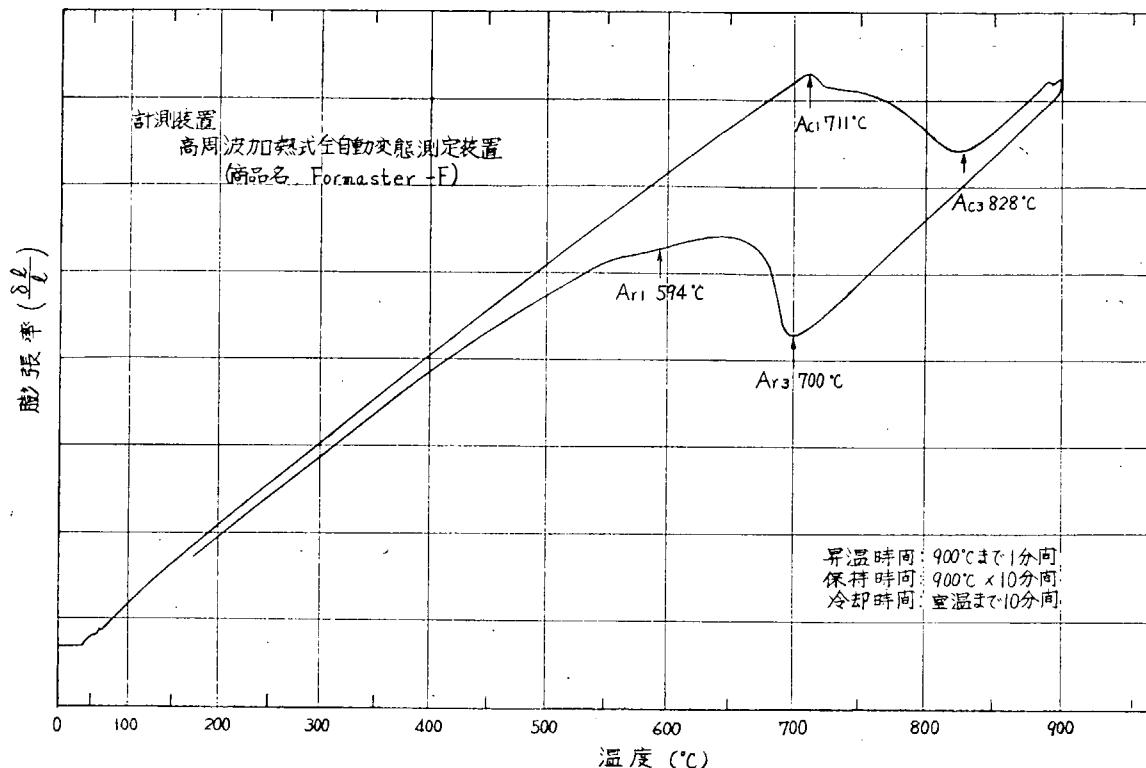


図 3.2 變態点計測結果 (K 5 E 鋼)

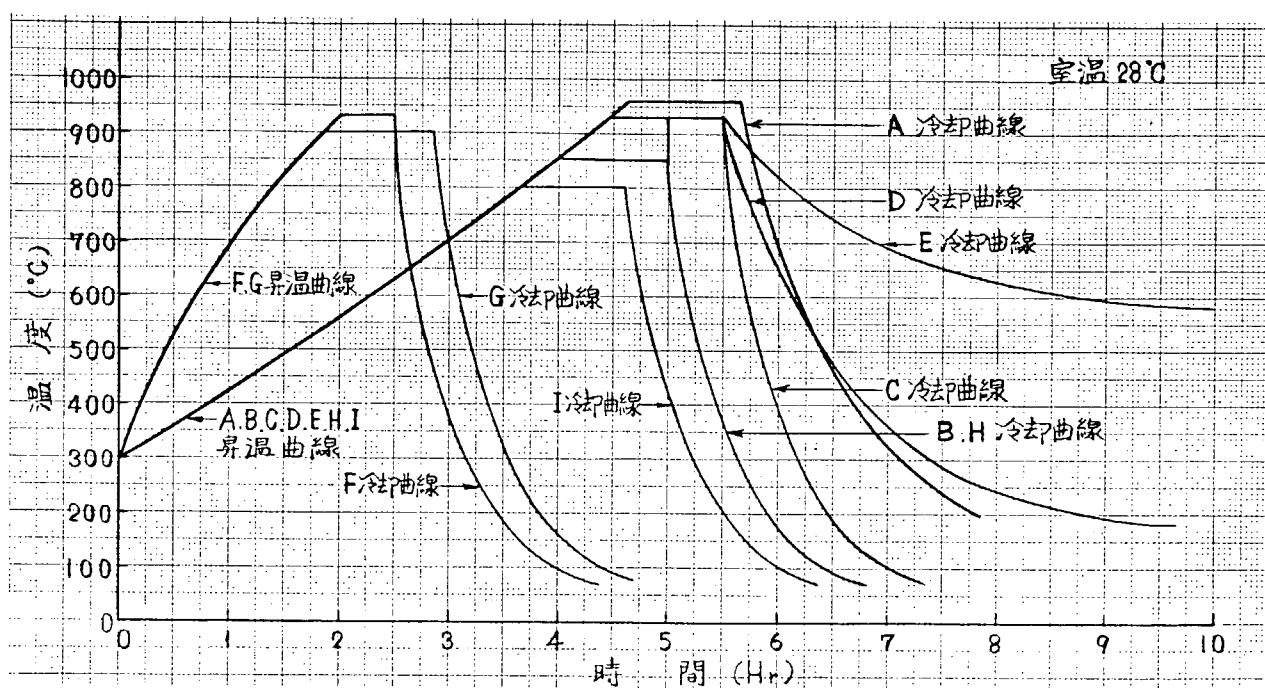


図 3.3 K 5 E 鋼再ノルマ処理の各種熱処理条件熱サイクル曲線

表3.3 各種熱処理条件によるK5E鋼再ノルマ材の機械的性質(引張試験, シヤルピー衝撃試験結果)

符号	熱処理条件	試験片寸法 (mm)	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	硬度 H _v (10kg) (H _e)	標準Vジンバル (0°C) (kg-m)
A	960°C×1.0Hr アスペクト(1枚)中にてA.C.	6.02×24 ^{GL}	32.0	52.4	41.6	76.3	143~157 (131)	10.9, 7.6, 7.2 (8.6)
		6.02×24	31.6	52.2	41.6	75.8		
B	930°C×0.5Hr A.C.	6.04×24	32.1	53.4	39.6	78.5	156~177 (140)	16.6, 12.6, 10.1 (13.1)
		6.04×24	32.1	53.8	38.8	78.5		
C	930°C×1.0Hr A.C.	6.04×24	32.1	53.4	37.5	78.5	160~170 (136)	15.2, 14.6, 16.6 (15.5)
		6.02×24	31.6	53.1	37.9	78.4		
D	930°C×1.0Hr アスペクト(4枚)中にてA.C.	6.04×24	32.5	52.4	38.3	75.3	143~168 (132)	8.3, 11.8, 10.9 (10.3)
		6.02×24	32.3	52.7	40.0	75.2		
E	930°C×1.0Hr F.C.	6.04×24	31.4	51.7	39.2	71.0	146~167 (127.5)	7.5, 5.5, 5.8 (6.3)
		6.02×24	29.9	50.6	40.8	71.7		
F	930°C×0.5Hr(急速加熱) A.C.	6.02×24	35.8	53.4	38.8	75.2	151~178 (136)	15.2, 15.5, 10.8 (13.8)
		6.02×24	37.6	53.4	40.0	76.8		
G	900°C×1.0Hr(急速加熱) A.C.	6.02×24	37.2	53.7	40.4	77.6	153~176 (136)	14.3, 11.2, 16.0 (13.8)
		6.04×24	37.0	53.4	40.0	77.3		
H	850°C×1.0Hr A.C.	6.04×24	37.0	53.4	36.7	76.5	151~172 (142.5)	14.8, 15.2, 15.8 (15.3)
		6.04×24	37.4	53.4	37.1	70.2		
I	800°C×1.0Hr A.C.	6.00×24	34.3	52.0	38.3	71.6	160	9.4, 12.3, 11.1
		6.02×24	32.4	51.4	39.6	71.7	(151)	(10.6)
J	素 材	6.04×24	36.2	52.9	40.8	76.3	149~153	
		6.05×24	39.6	53.4	40.4	76.3		(16.5)
K	再ノルマ材 (B処理材)	6.05×24	27.1	51.2	39.2	76.6	139~146	
		6.02×24	27.2	51.3	41.3	77.8		(13.5)

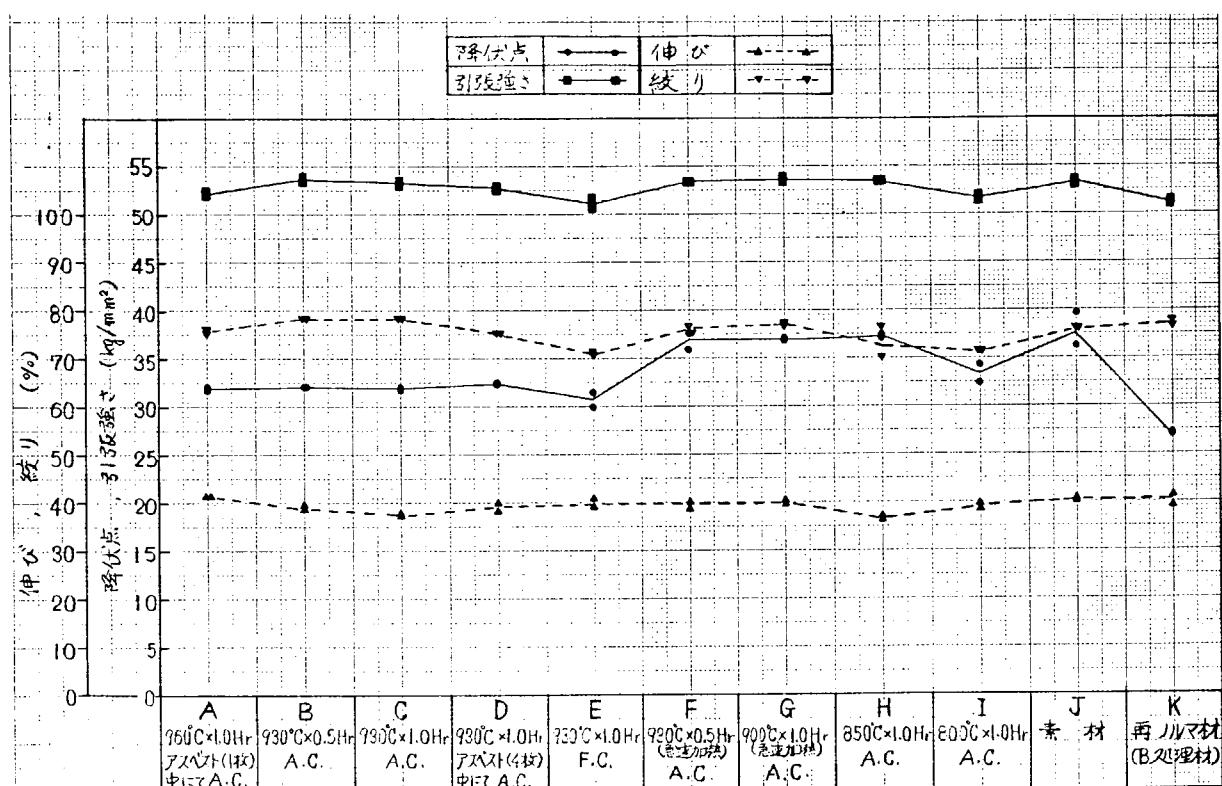
 H_v : 測定点9点のMin.~Max. H_b : 測定点3点の平均値

図3.4 各種熱処理条件によるK5E鋼再ノルマ材の引張試験結果

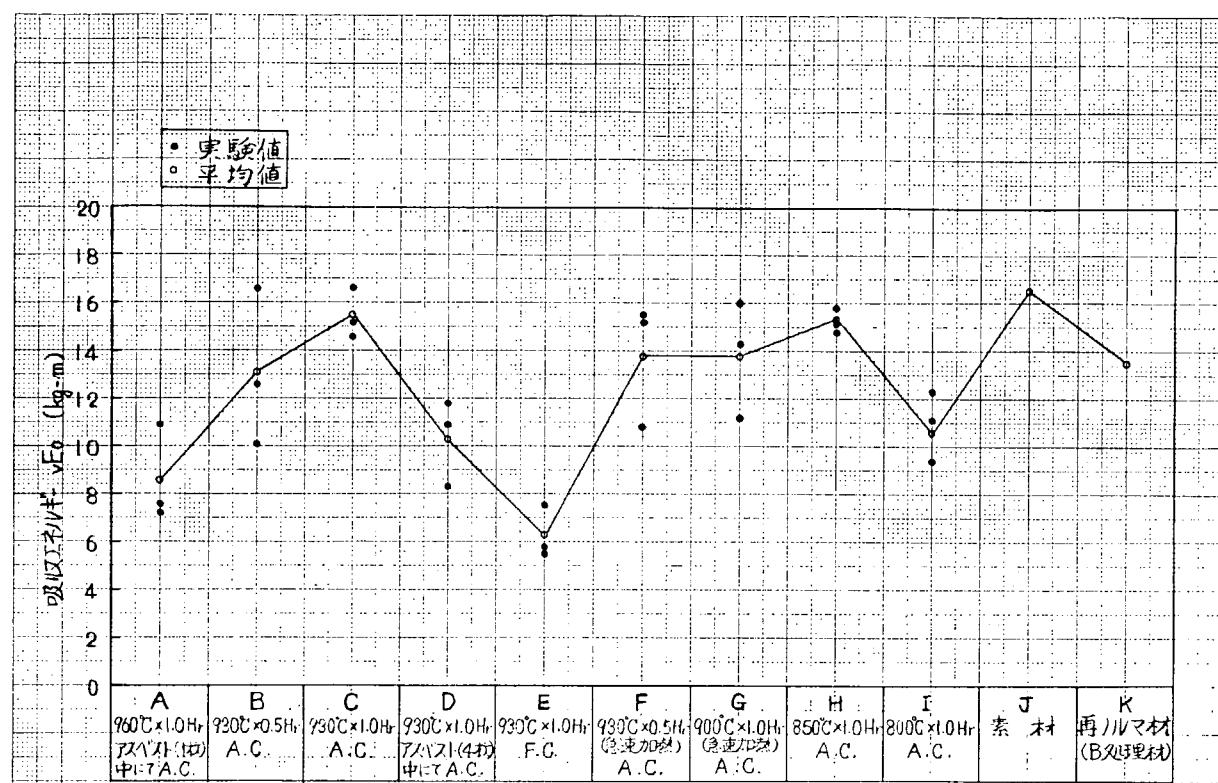


図 3.5 各種熱処理条件によるK 5 E鋼再ノルマ材のV-ノツチシャルピー衝撃試験結果

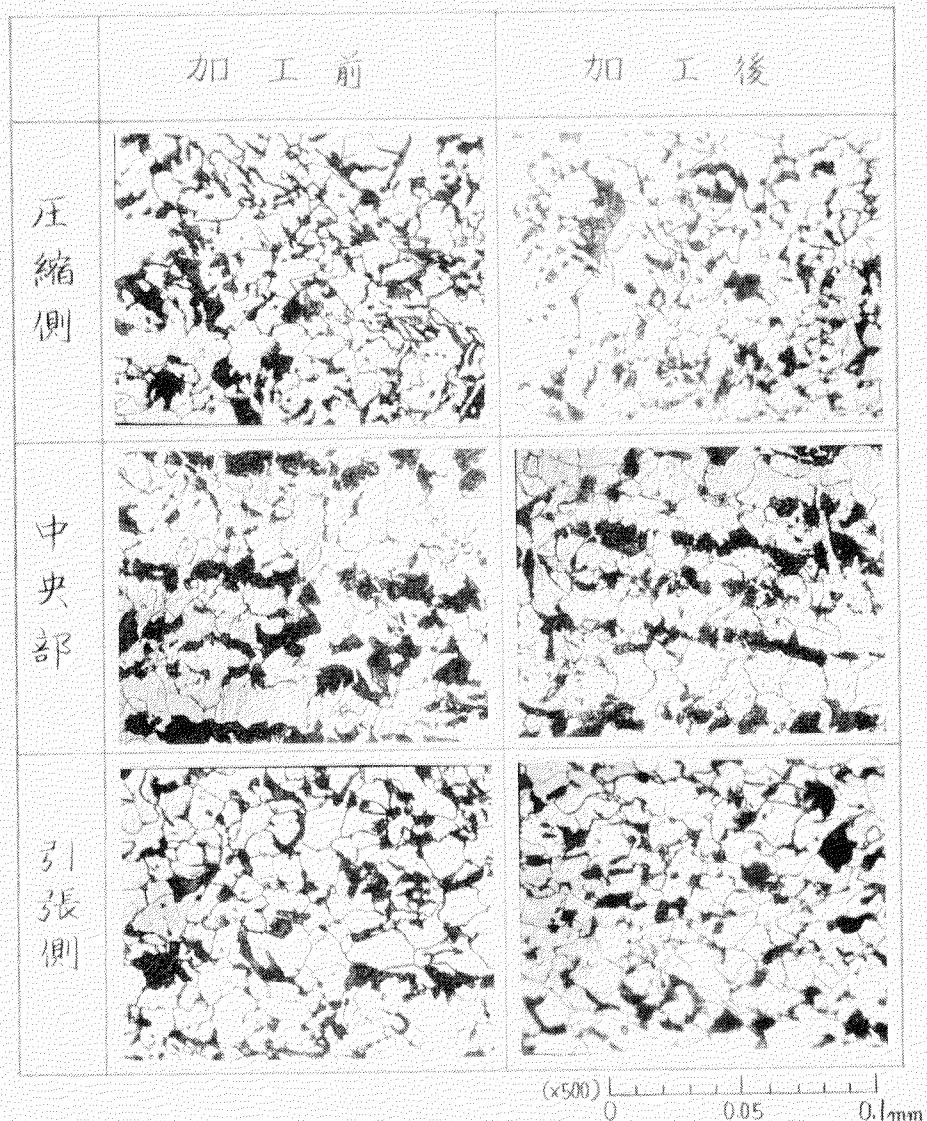


写真 3.4 冷間曲げ加工の影響調査顕微鏡組織

(K5E鋼, 曲げ加工量 5%)

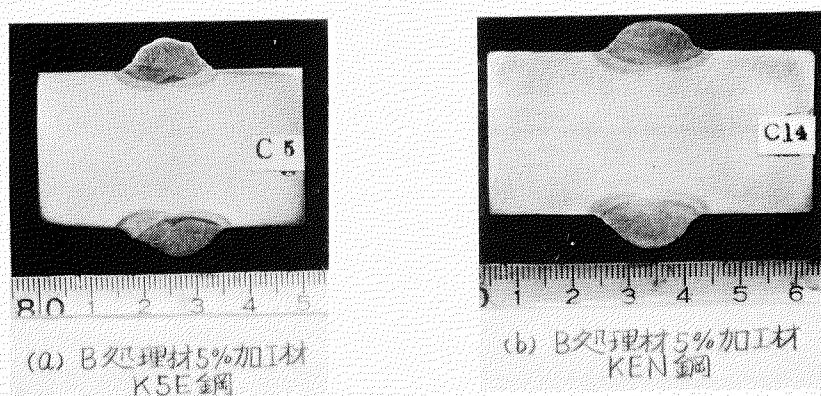


写真 3.5 マクロ組織の一例

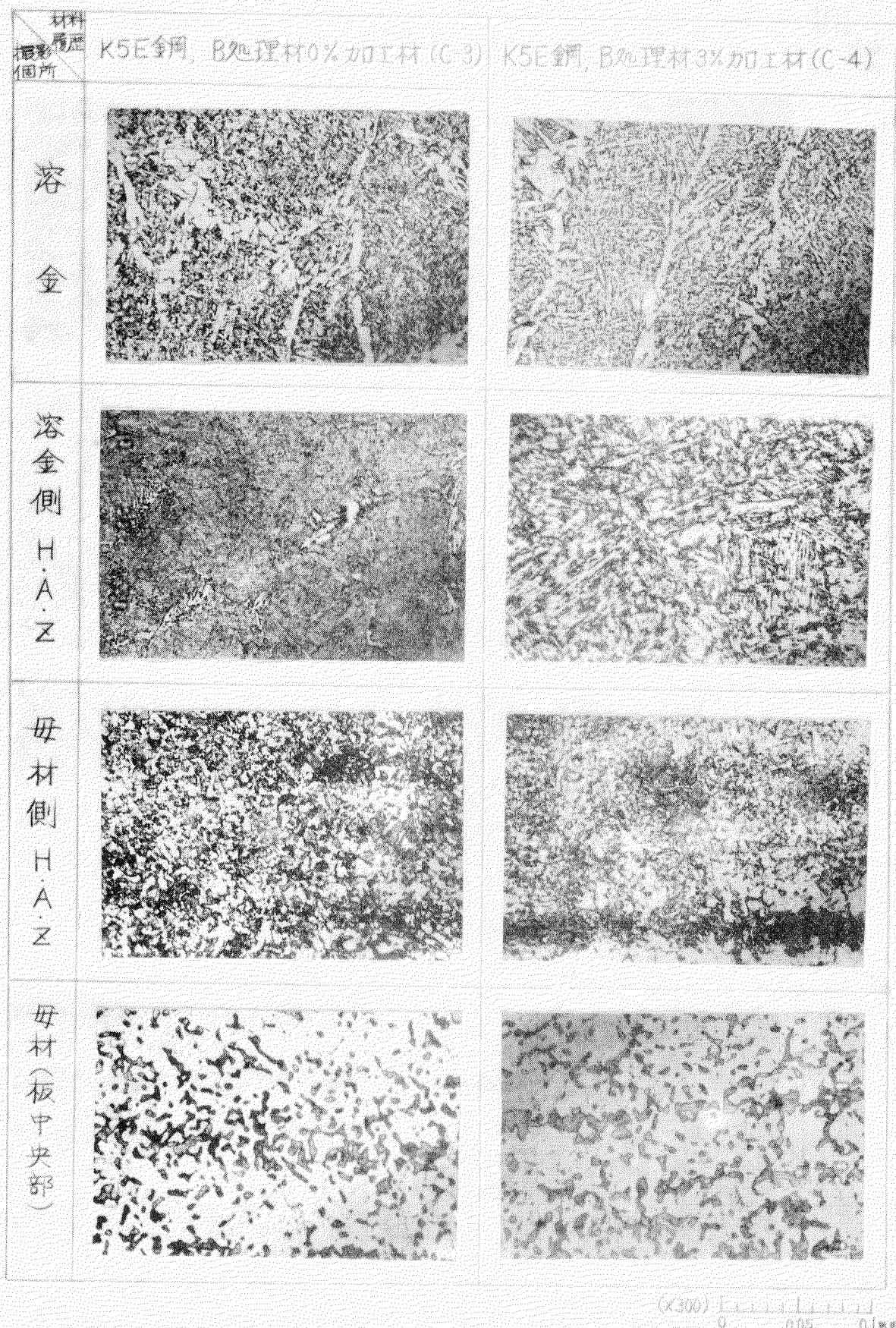
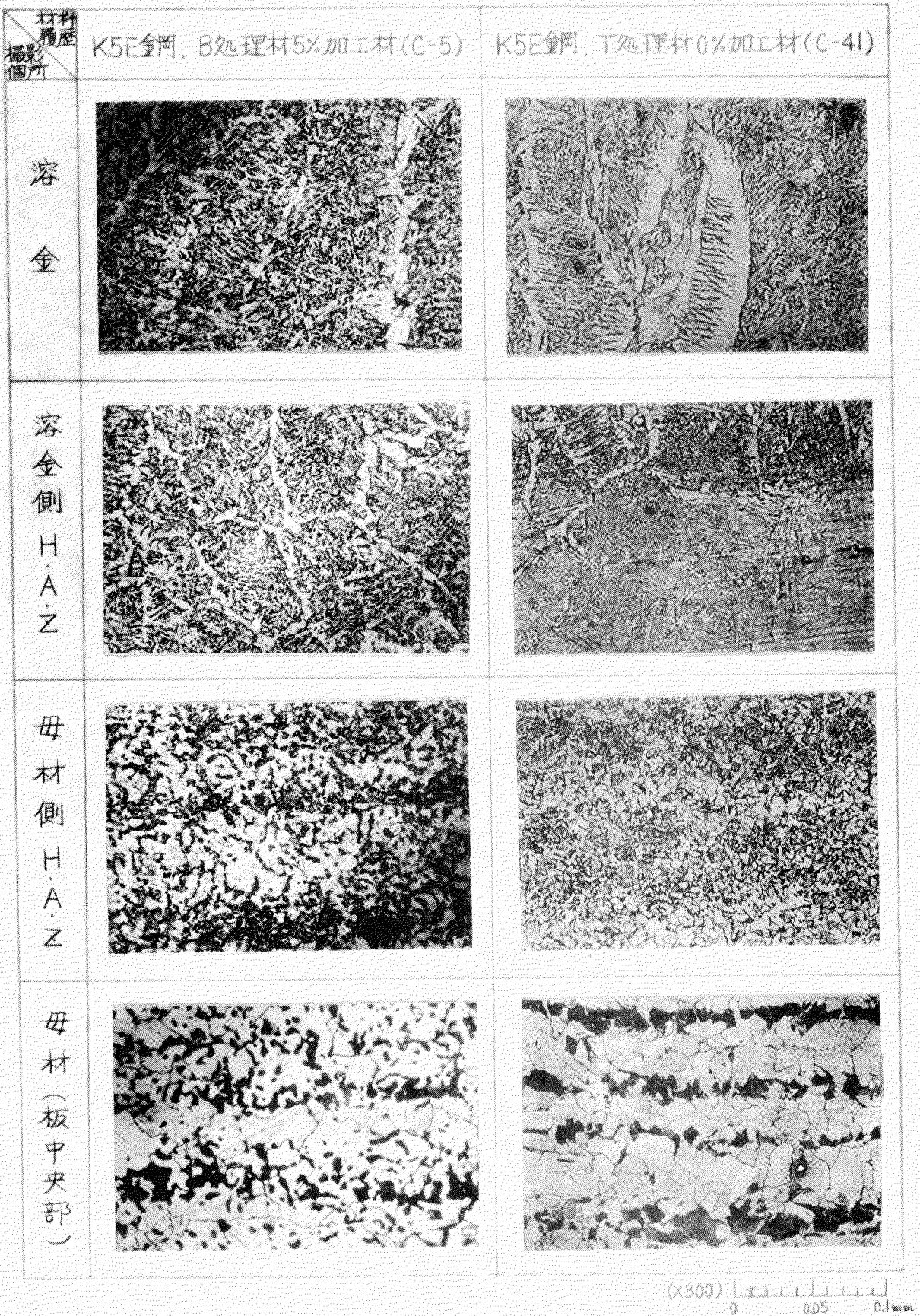
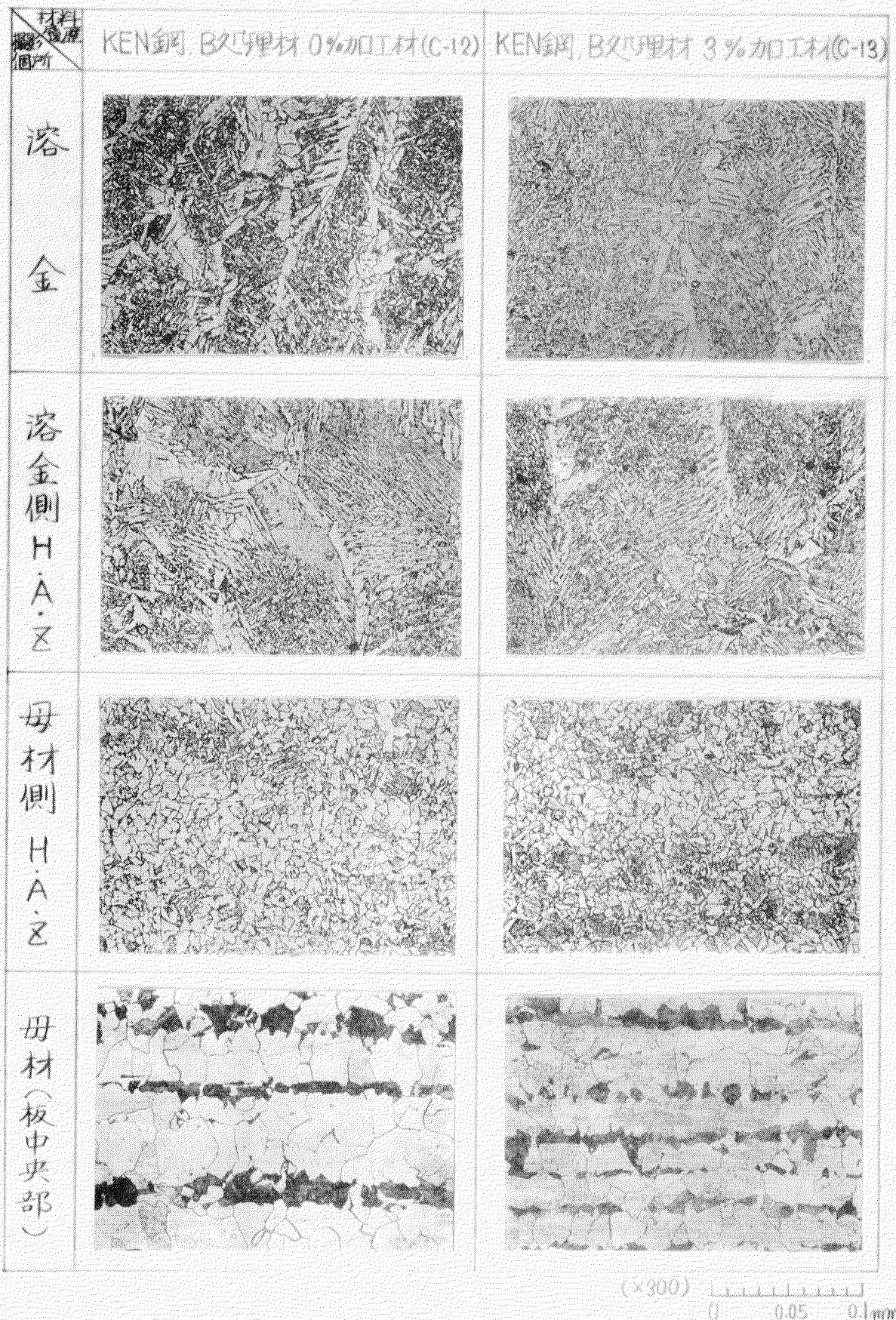


写真3.6 溶接部および母材の顕微鏡組織



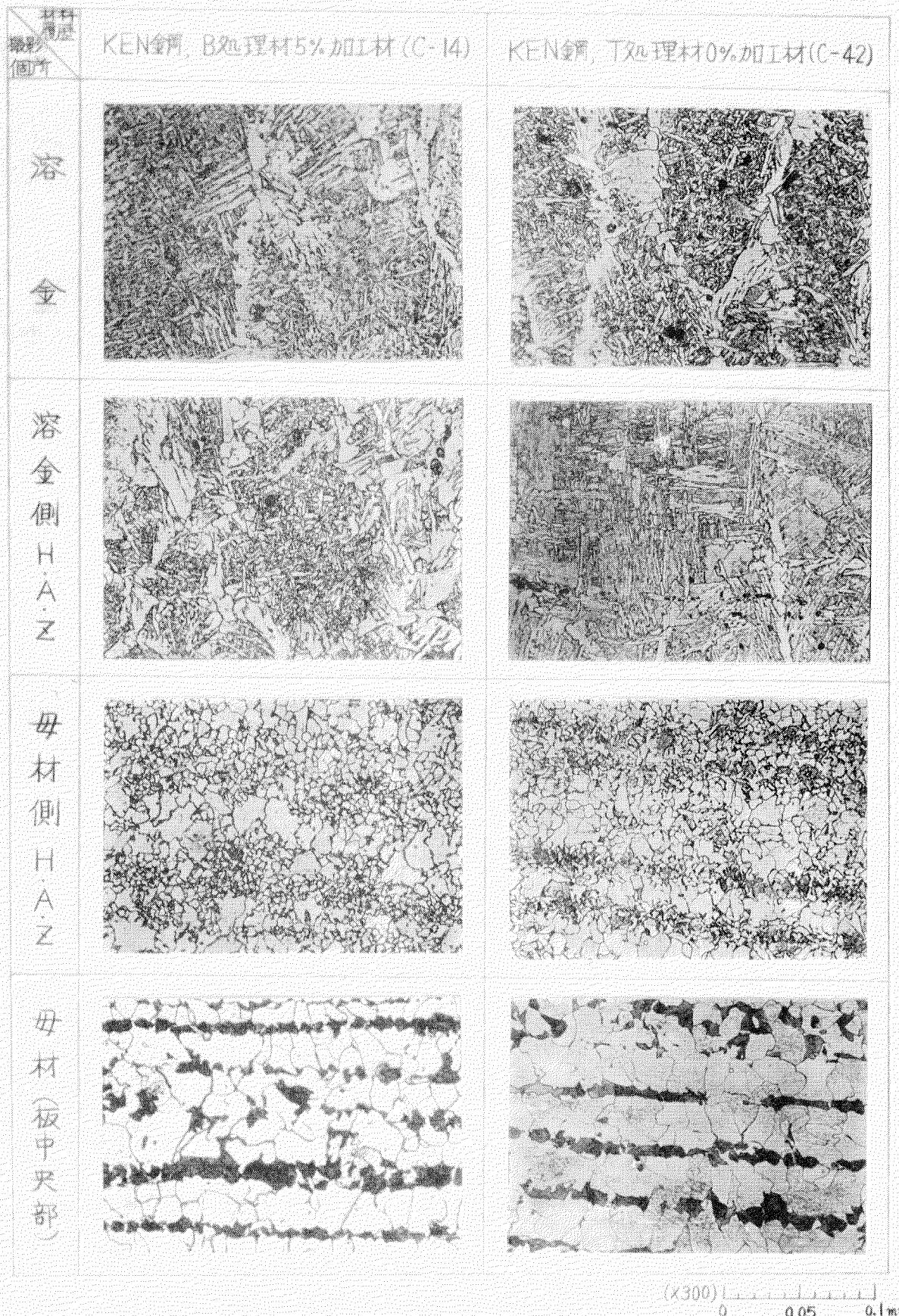
(x300) 0 0.05 0.1 mm

写真3.7 溶接部および母材の顕微鏡組織



($\times 300$)

写真 3.8 溶接部および母材の顕微鏡組織



($\times 300$) 0 0.05 0.1 mm

写真3.9 溶接部および母材の顕微鏡組織

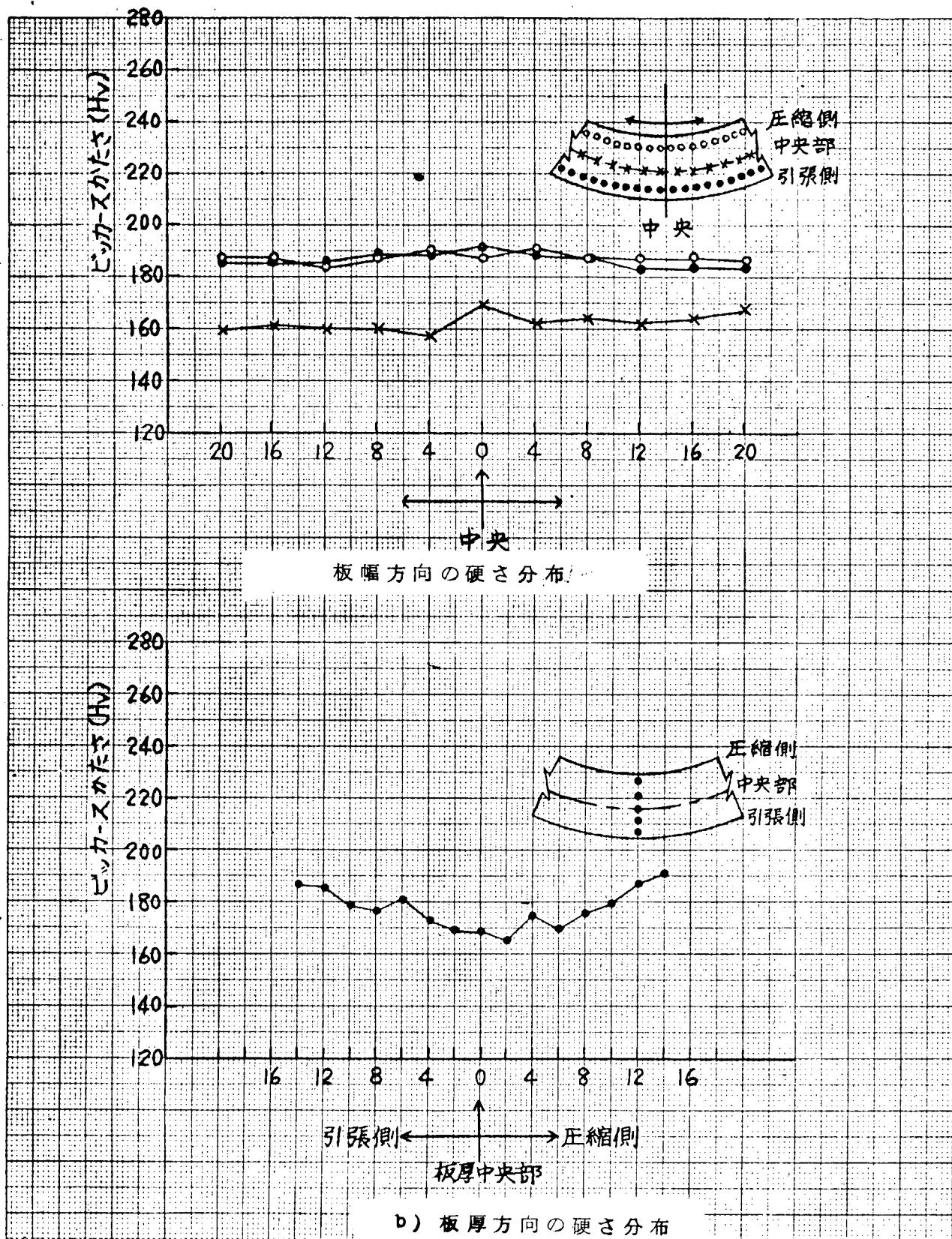


図3.6 冷間曲げ加工によるかたさ変化の一例

(K5E銅, 加工量5%)

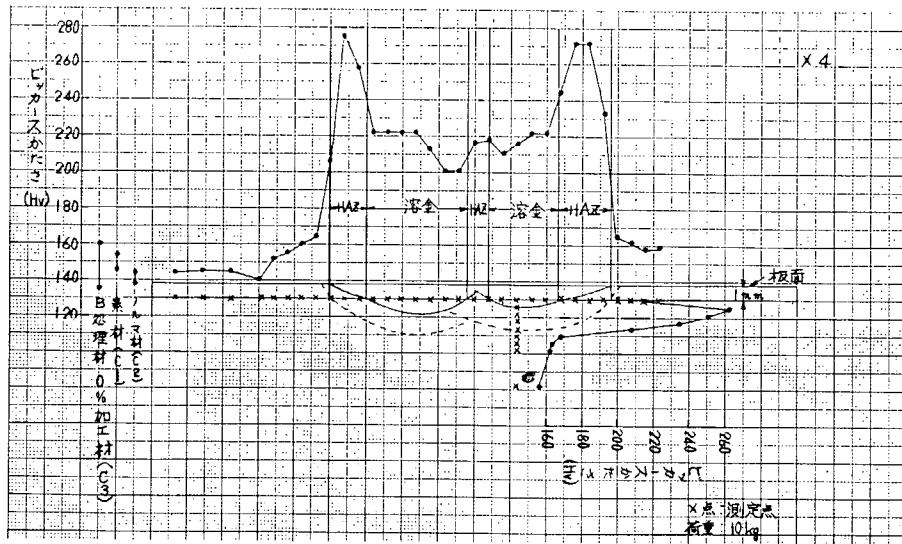


図3.7 かたさ試験結果 (K5E鋼, B処理材, 0%加工材) (O3)

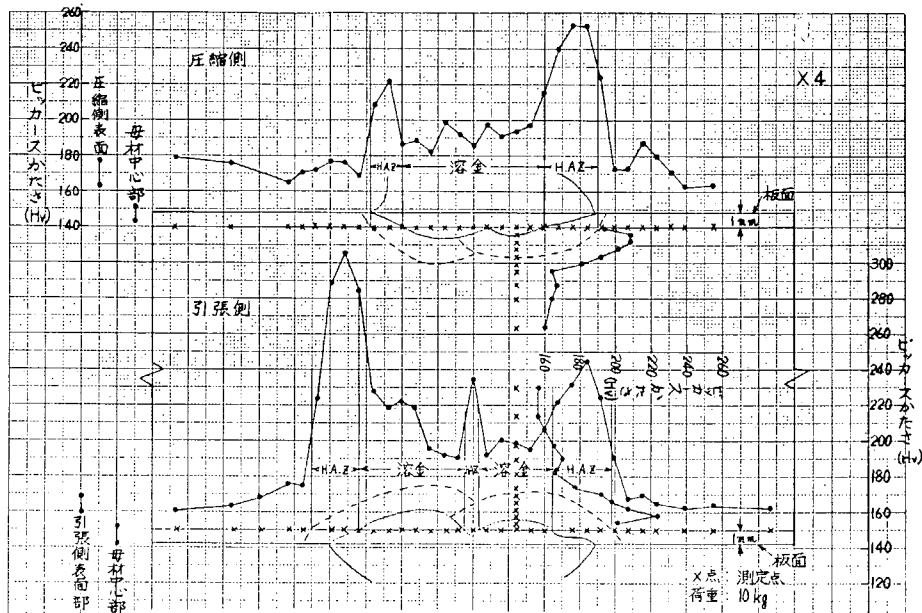


図3.8 かたさ試験結果 (K5E鋼, B処理材, 3%加工材) (C4)

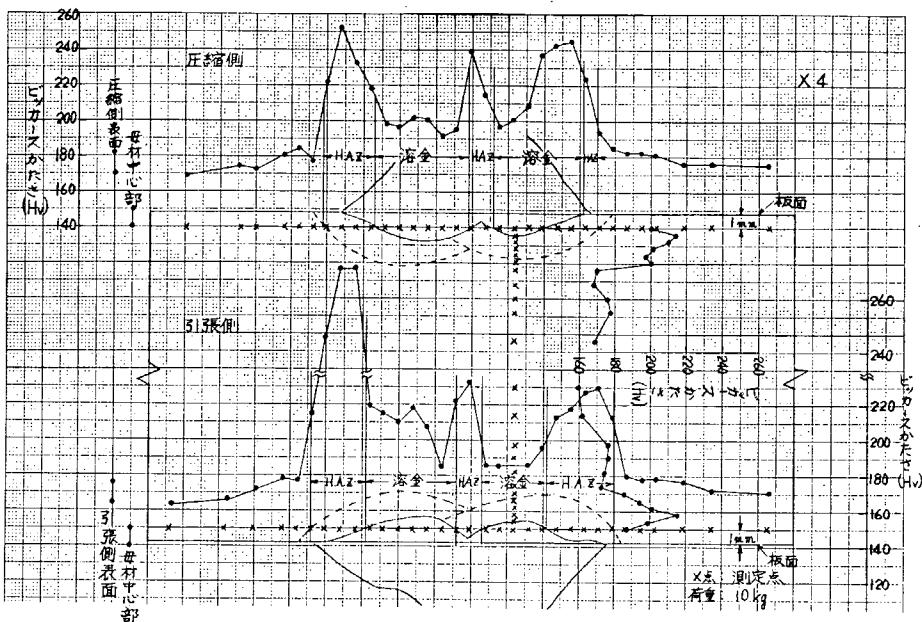


図3.9 かたさ試験結果 (K5E鋼, B処理材, 5%加工材) (C5)

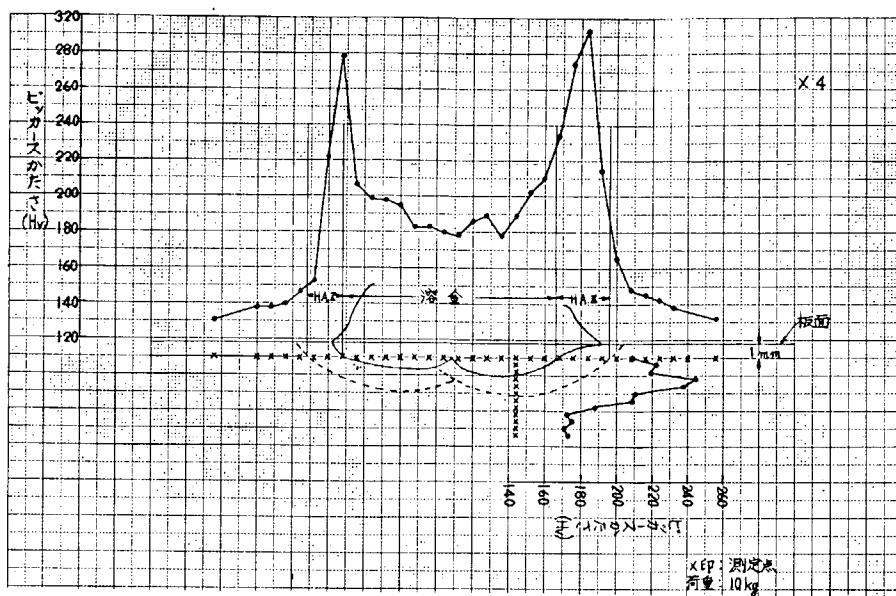


図3.10 かたさ試験結果 (K5E鋼, T処理材, 0%加工材) (O41)

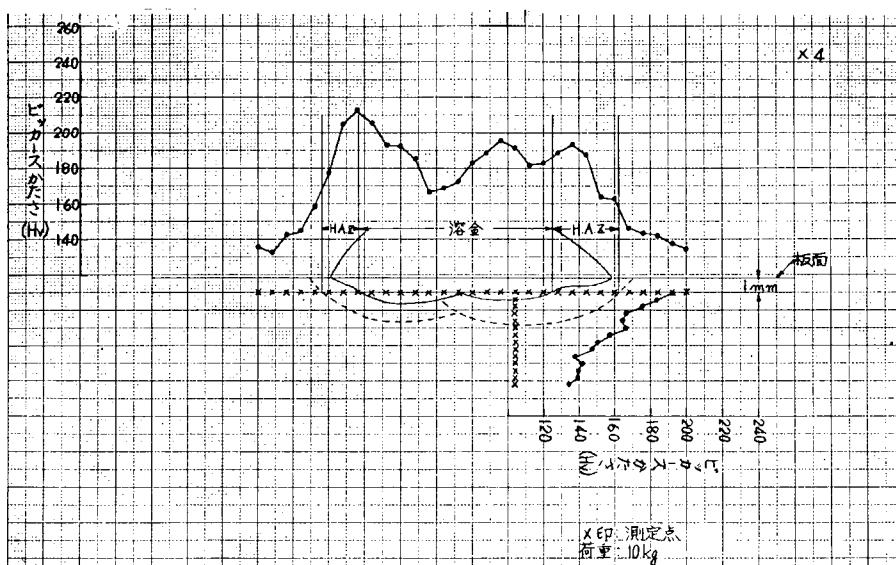


図3.11 かたさ試験結果 (K5E鋼, B処理材, 0%加工材) (C12)

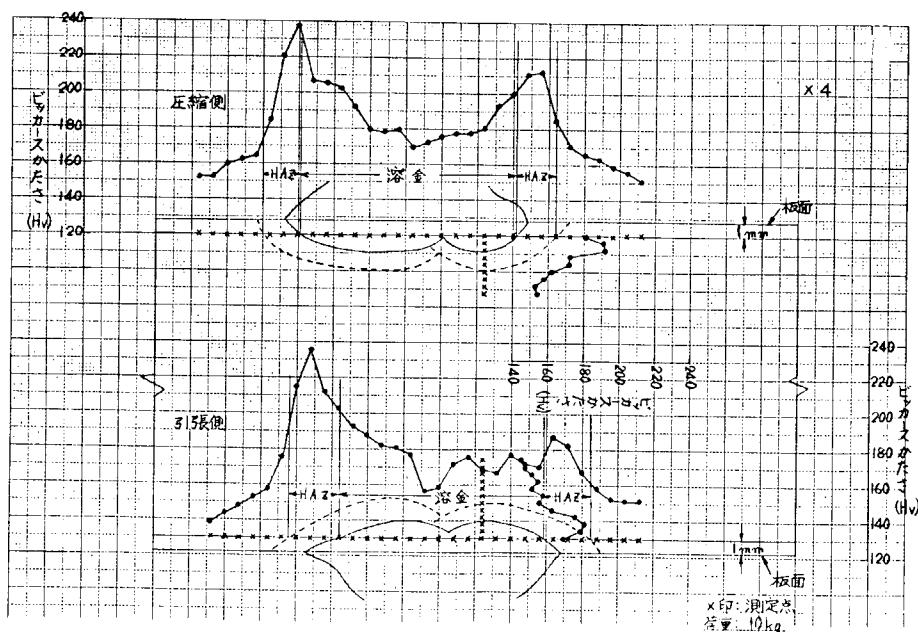


図3.12 かたさ試験結果 (K5E鋼, B処理材, 3%加工材) (C13)

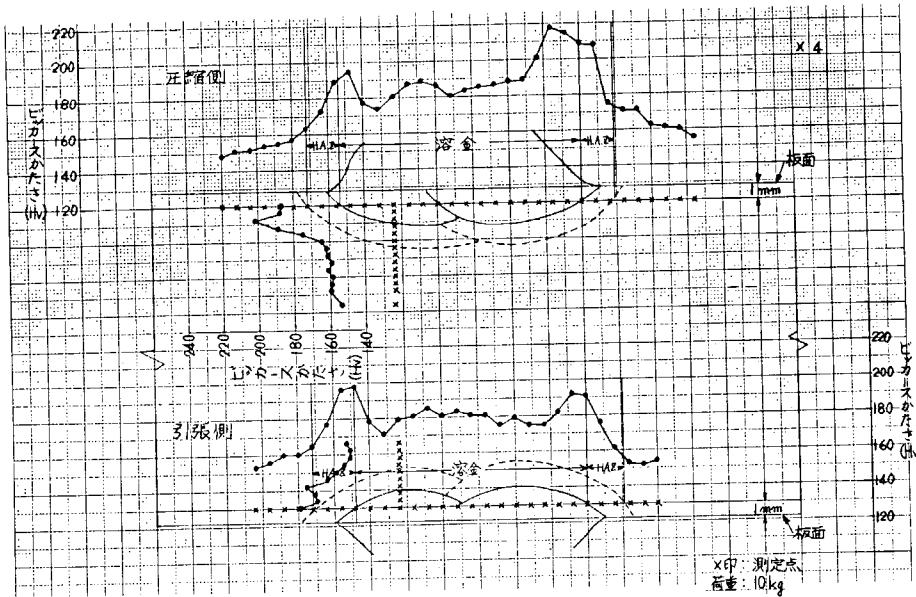


図3.13 かたさ試験結果 (K E N鋼 , B処理材 , 5%加工材) (C 1 4)

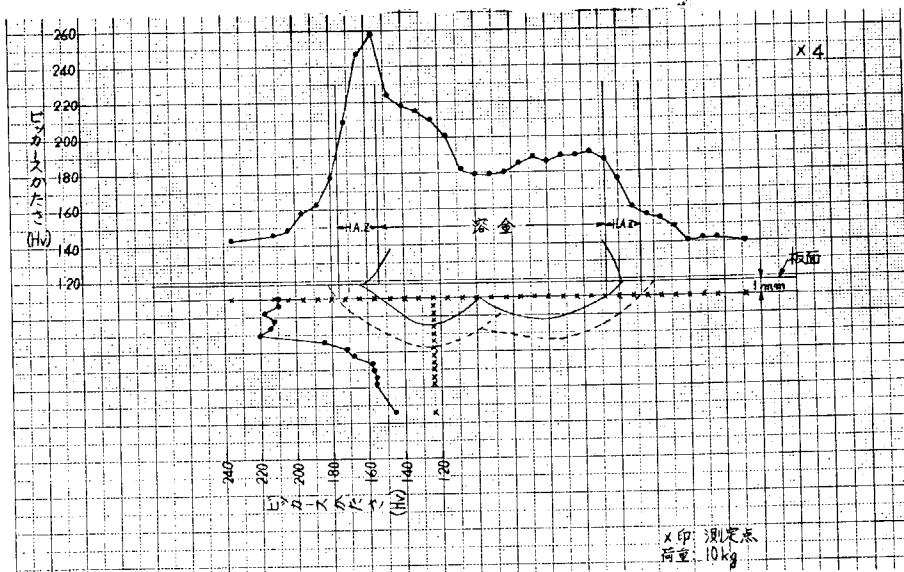
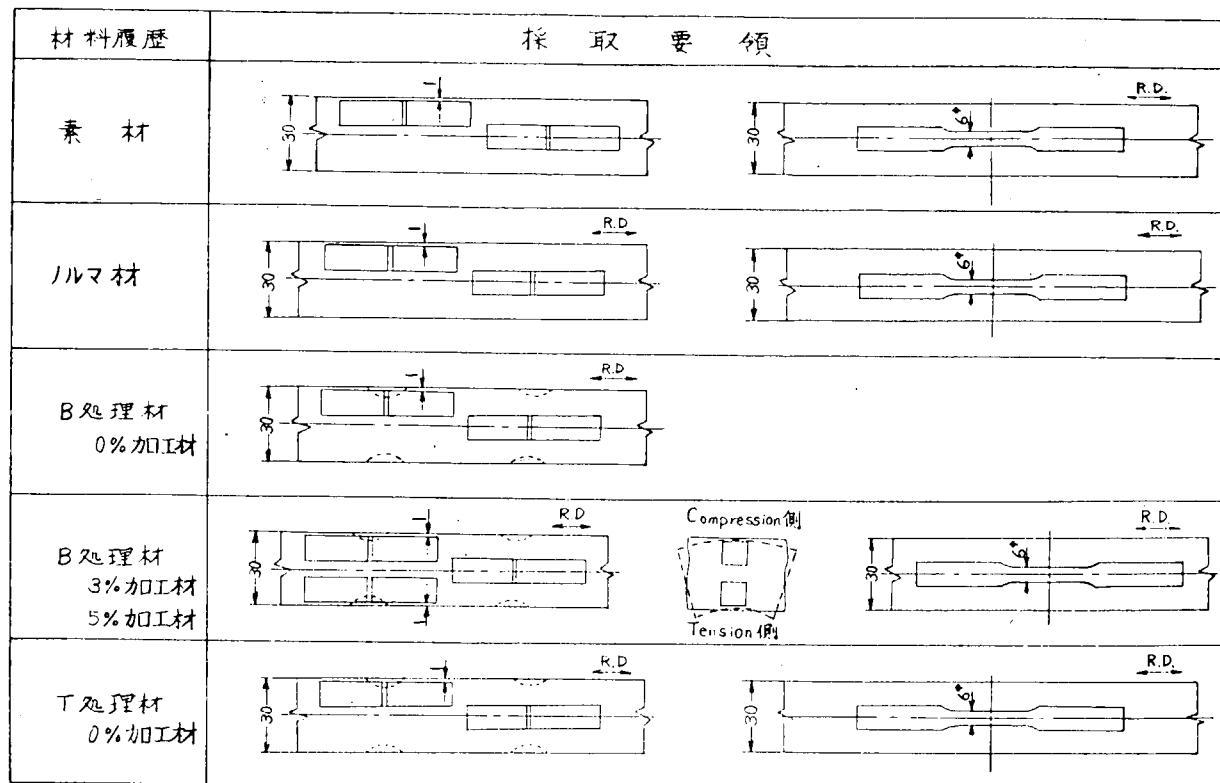


図3.14 かたさ試験結果 (K E N鋼 , T処理材 , 0%加工材) (C 4 2)

表3.4 ビッカース硬さ測定結果

鋼種; K 5 E鋼 , K E N鋼

種類 歴史 符号	鋼材 別 種 別	測定位置	母材		溶接部	
			中心部	板表面	溶金	H.A.Z.
	素材	C 1	149~153	147~152	—	—
	ルマ材	C 2	139~146	142~147	—	—
K5E鋼	B処理材 0%加工材	C 3	140~146	137~152	201~222	180~276
	B処理材 3%加工材	C 4	144~153	163~188	161~168	182~228
	B処理材 5%加工材	C 5	140~150	170~176	153~171	192~219
	素材	C 10	131~133	132~134	—	—
	ルマ材	C 11	131~132	123~132	—	—
KEN鋼	B処理材 0%加工材	C 12	127~133	135~143	170~225	163~227
	B処理材 3%加工材	C 13	121~131	151~154	159~152	170~207
	B処理材 5%加工材	C 14	136~139	148~163	153~158	173~218
	T処理材 0%加工材	C 15	143~146	140~145	169~224	160~258



注) ...溶接熱影響部

図 3.15 低温引張試験片およびシャルピー衝撃試験片採取要領

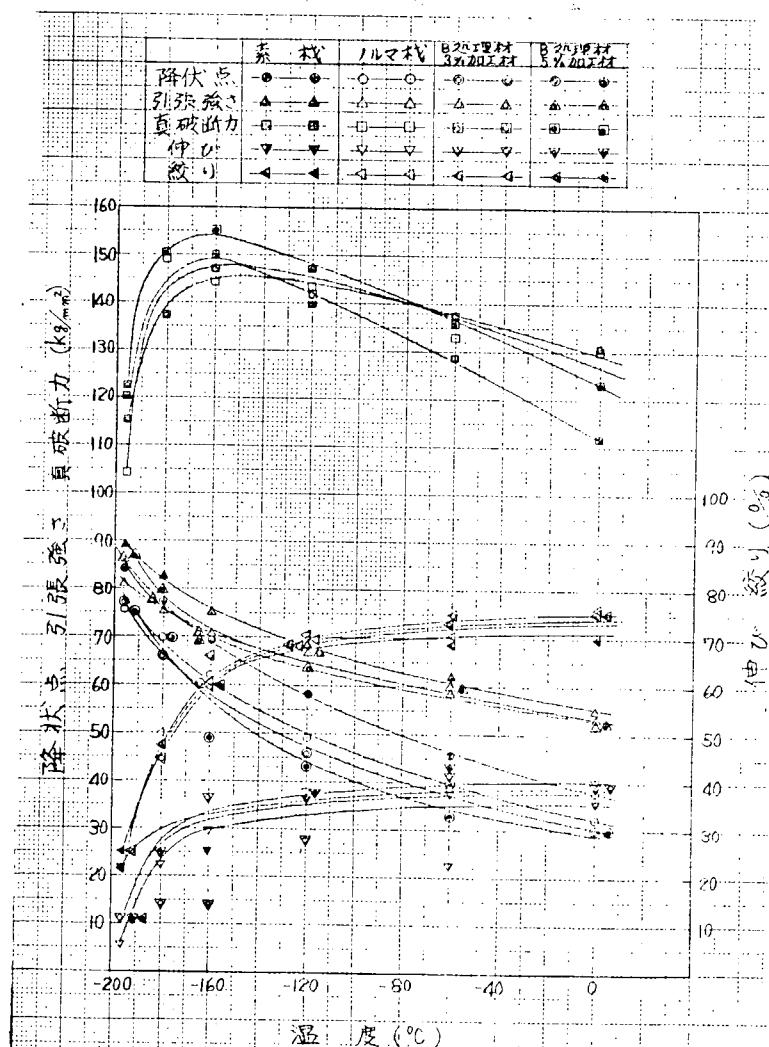
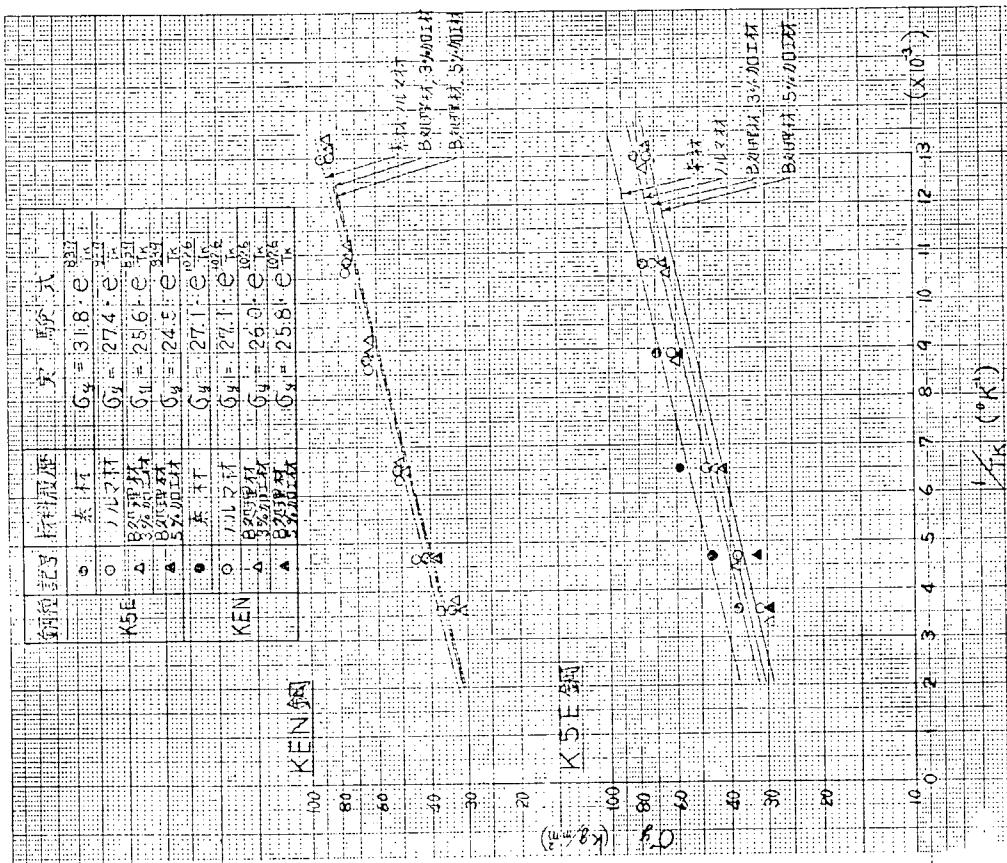
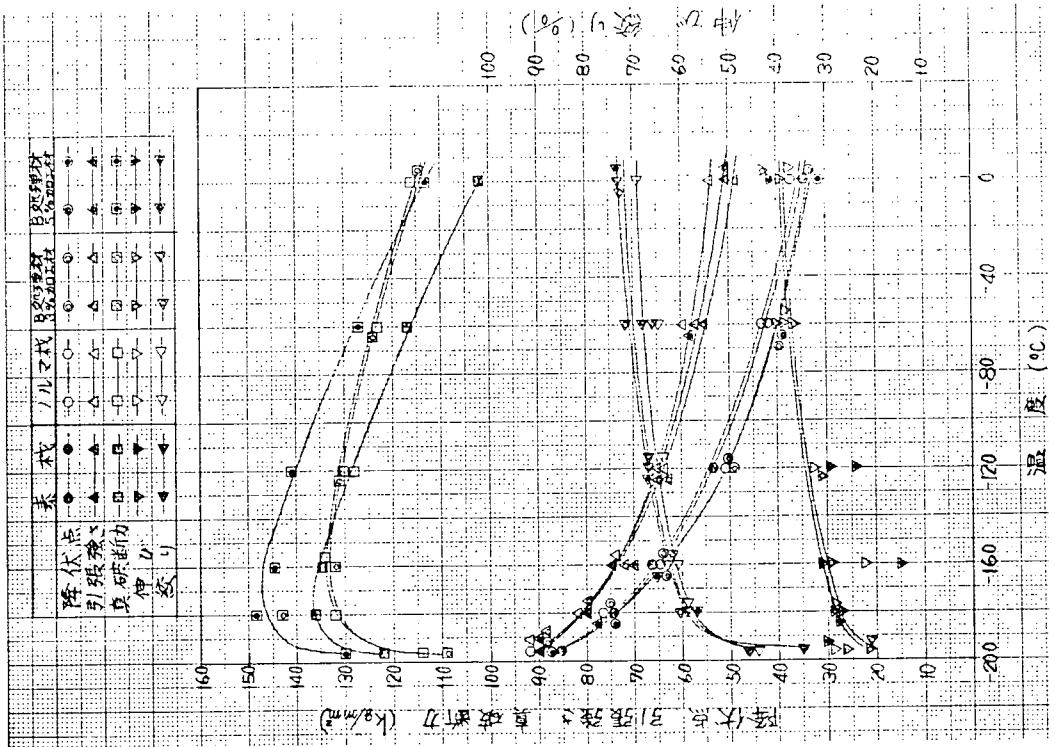


図 3.16 低 温 引 張 試 験 結 果

(K5E鋼, 板厚30mm)



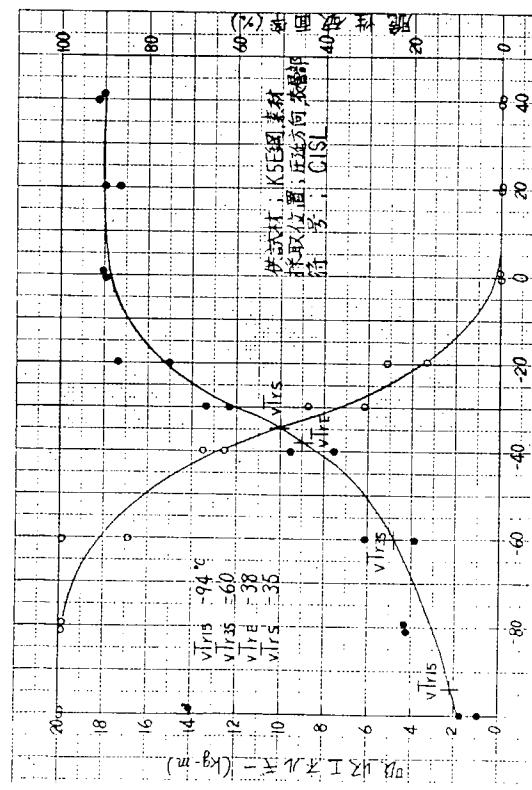


図 3.19 V—ノットチャルビー衝撃試験結果

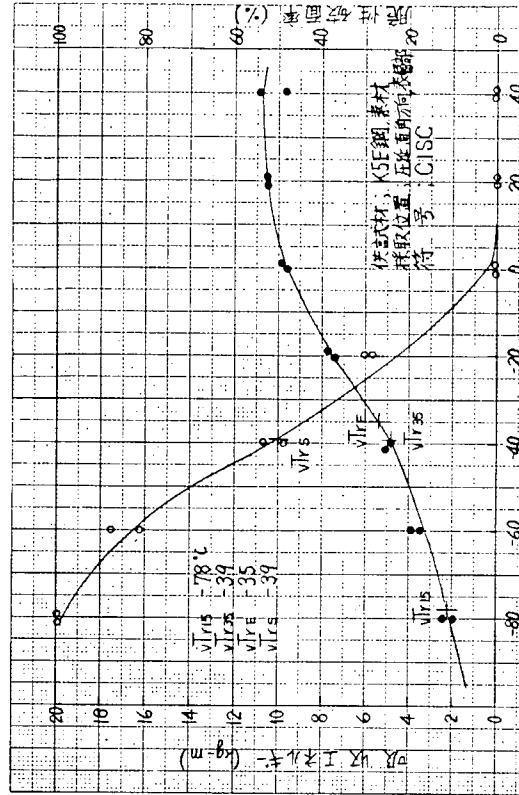


図 3.21 V—ノットチャルビー衝撃試験結果

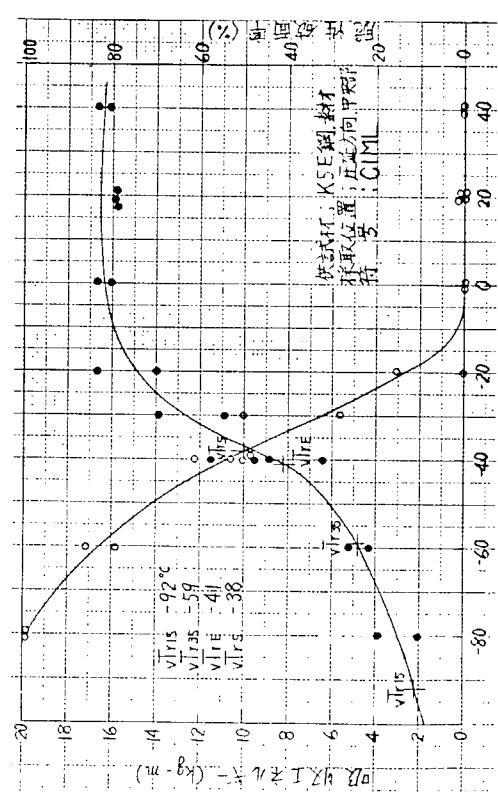


図 3.20 V—ノットチャルビー衝撃試験結果

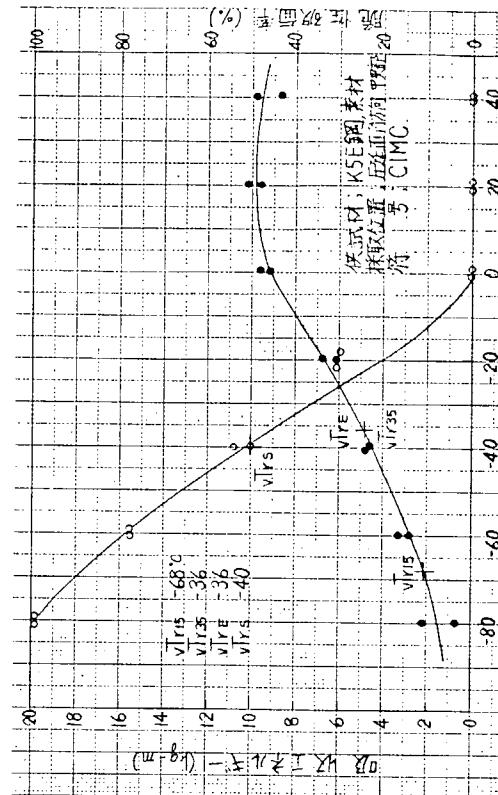


図 3.22 V—ノットチャルビー衝撃試験結果

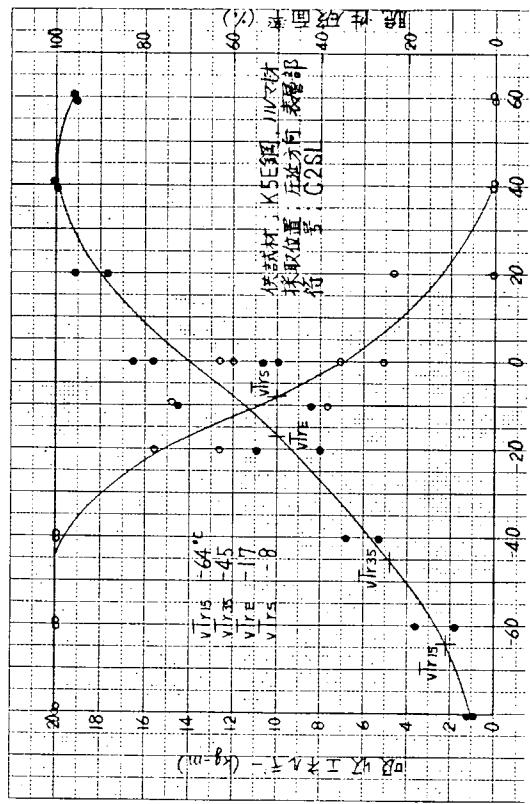


図 3.23 V-ノットシャルビー衝撃試験結果

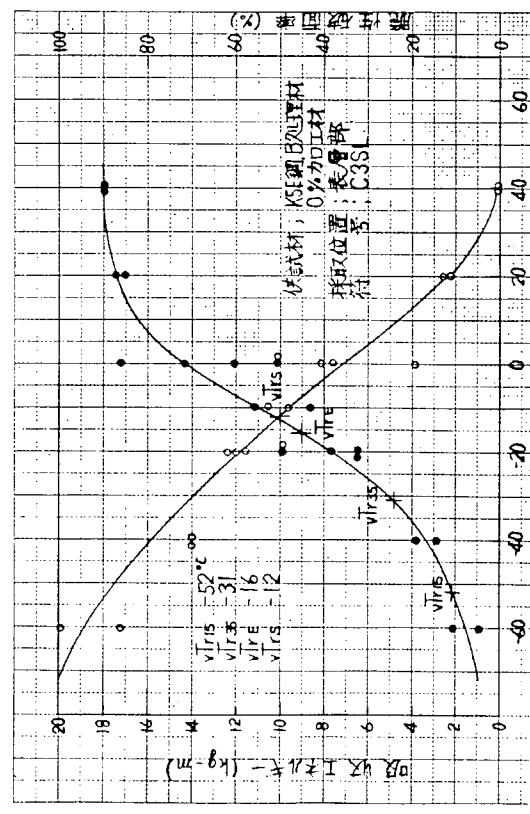


図 3.25 V-ノットシャルビー衝撃試験結果

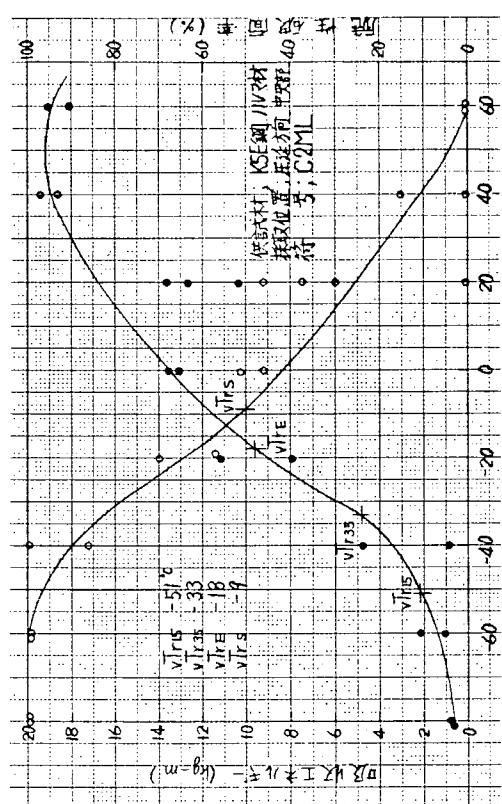


図 3.24 V-ノットシャルビー衝撃試験結果

図 3.26 V-ノットシャルビー衝撃試験結果

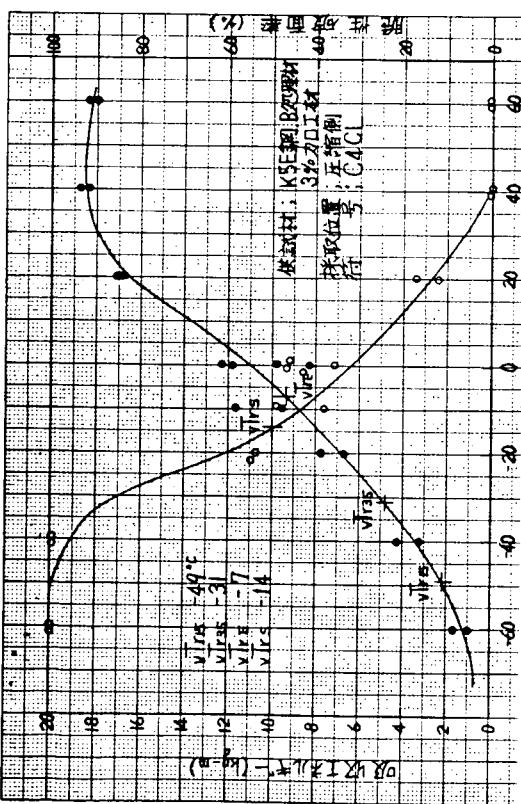


図 3.27 V-ノットシャルビ一衝撃試験結果

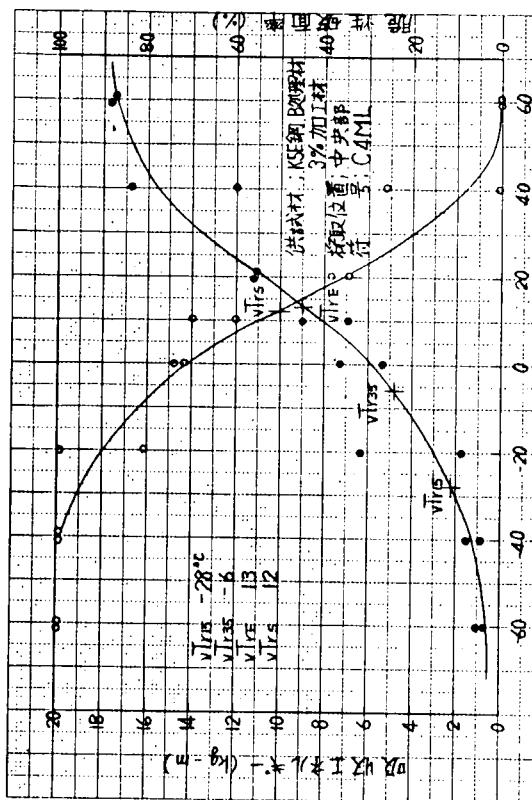


図 3.29 V-ノットシャルビ一衝撃試験結果

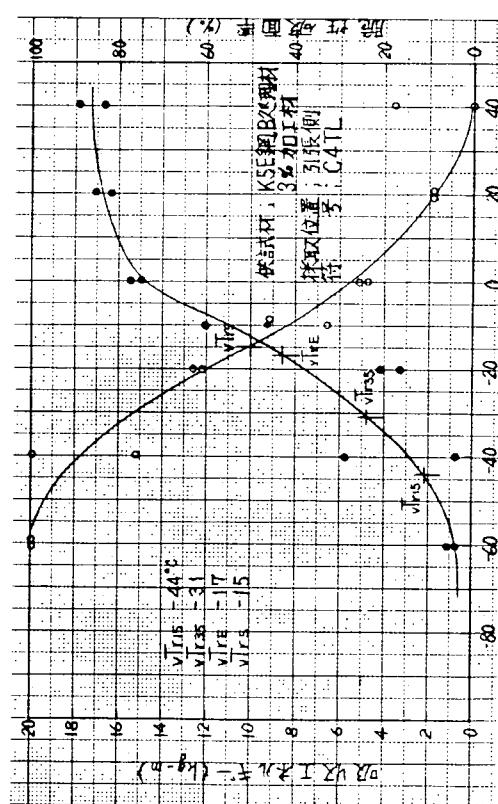


図 3.28 V-ノットシャルビ一衝撃試験結果

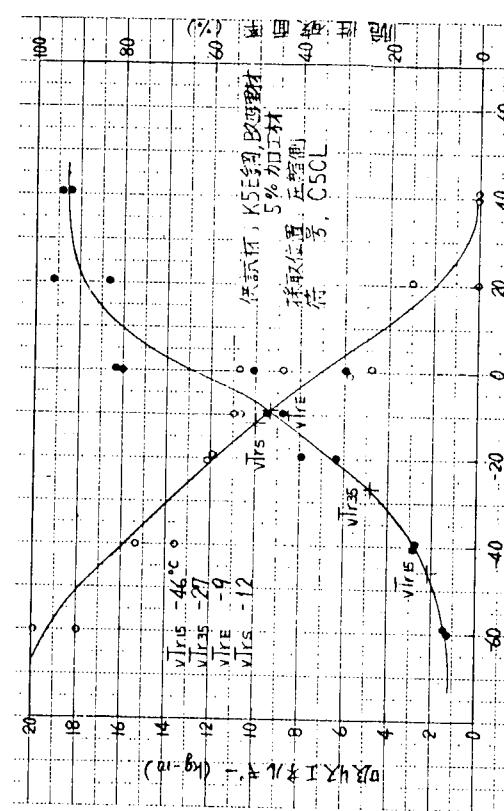


図 3.30 V-ノットシャルビ一衝撃試験結果

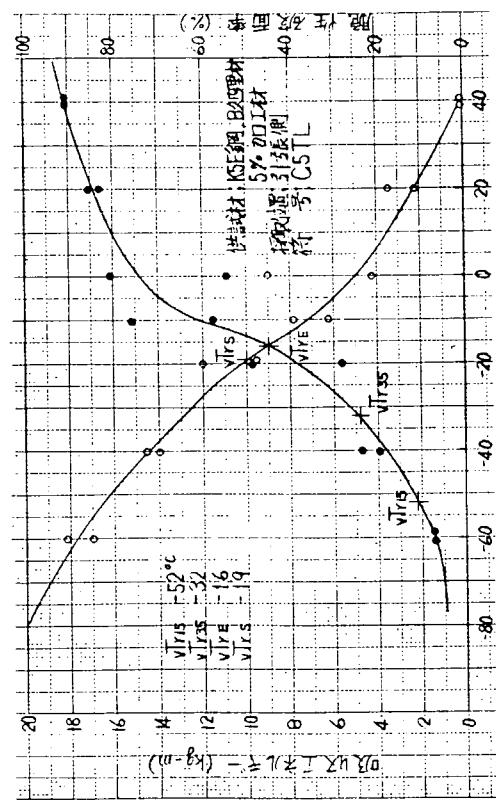


図 3.3.1 V-ノットチシャルビー衝撃試験結果

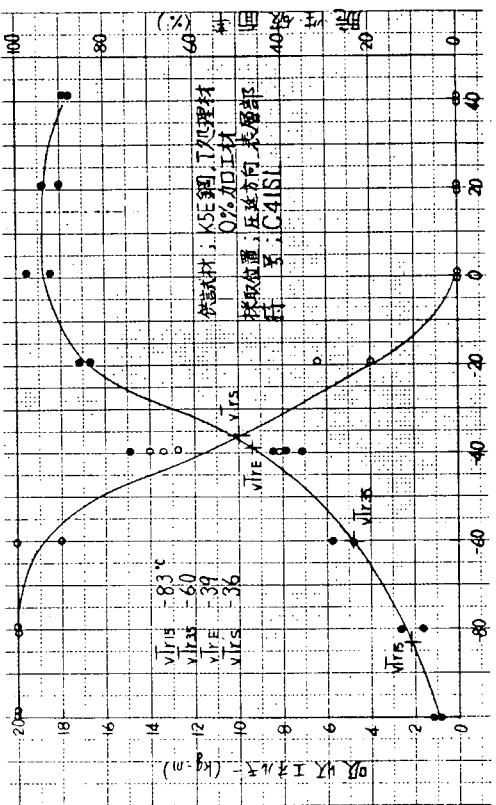


図 3.3.3 V-ノットチシャルビー衝撃試験結果

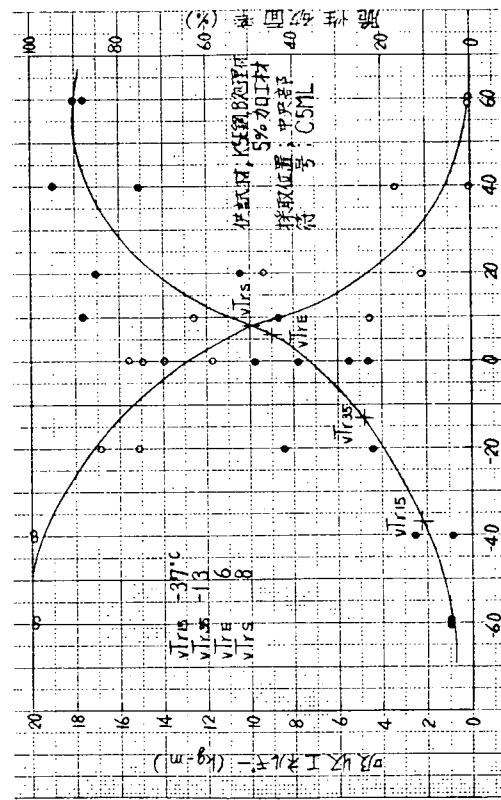


図 3.3.2 V-ノットチシャルビー衝撃試験結果

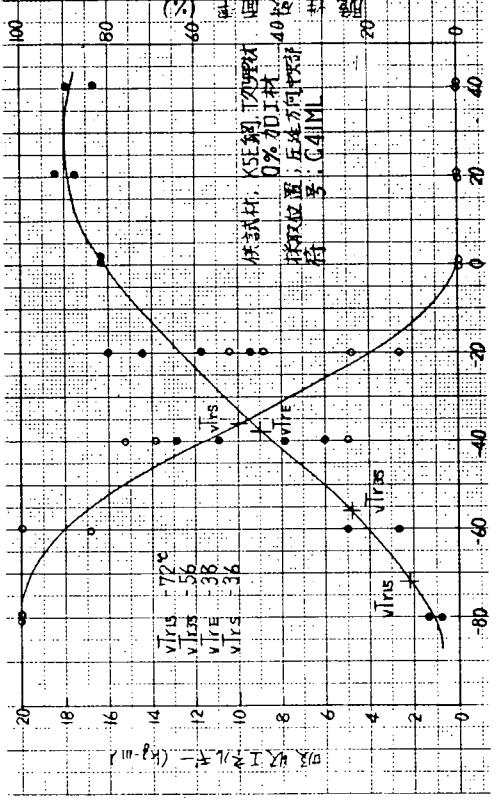


図 3.3.4 V-ノットチシャルビー衝撃試験結果

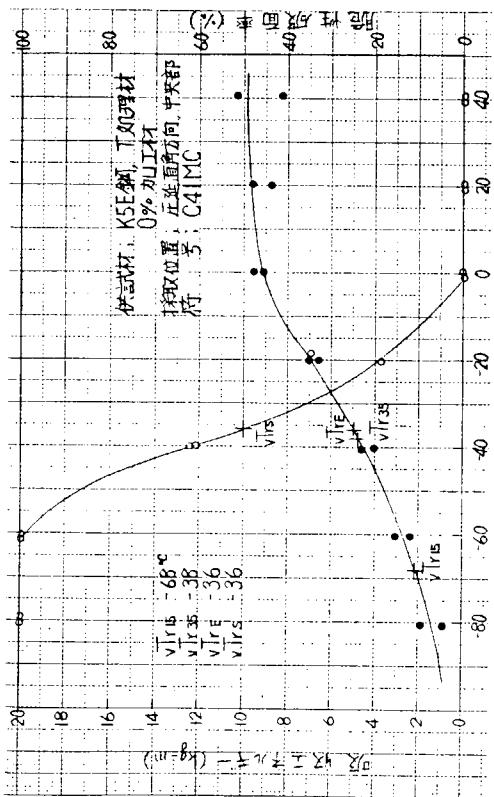


図 3.35 V-ノットチャルビー衝撃試験結果

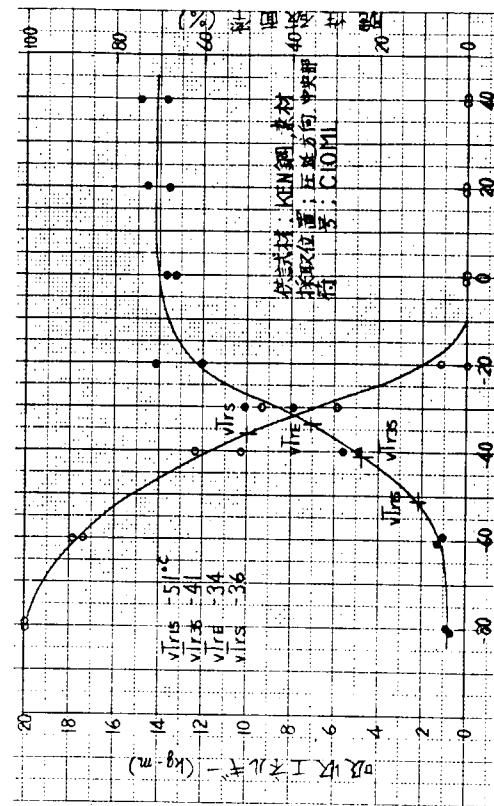


図 3.37 V-ノットチャルビー衝撃試験結果

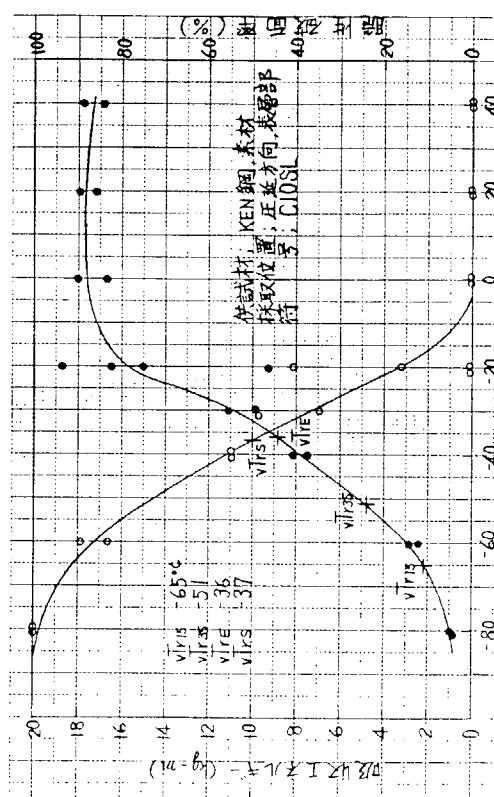


図 3.36 V-ノットチャルビー衝撃試験結果

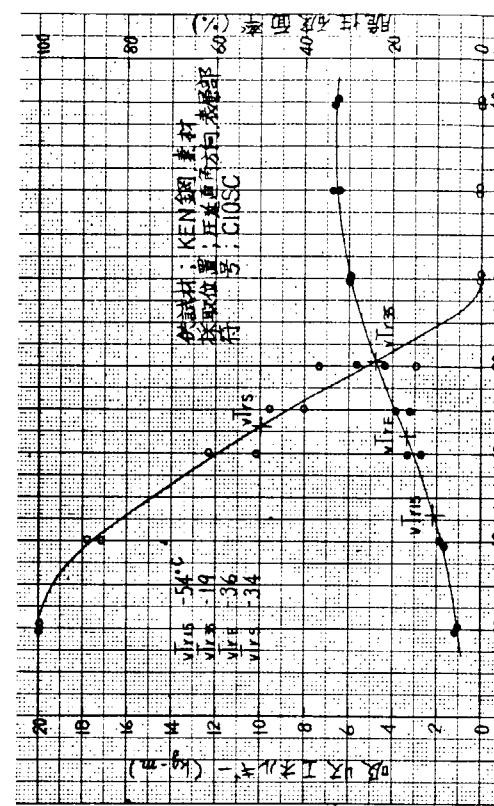


図 3.38 V-ノットチャルビー衝撃試験結果

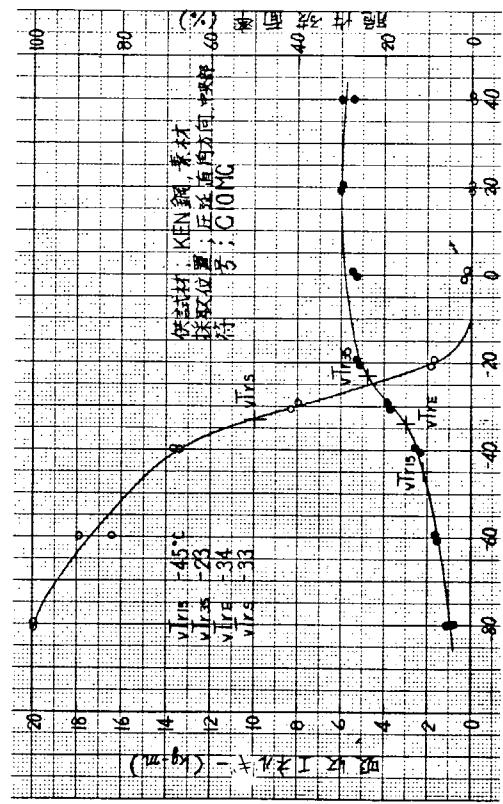


図 3.39 V-ノッチャルシャルビー衝撃試験結果

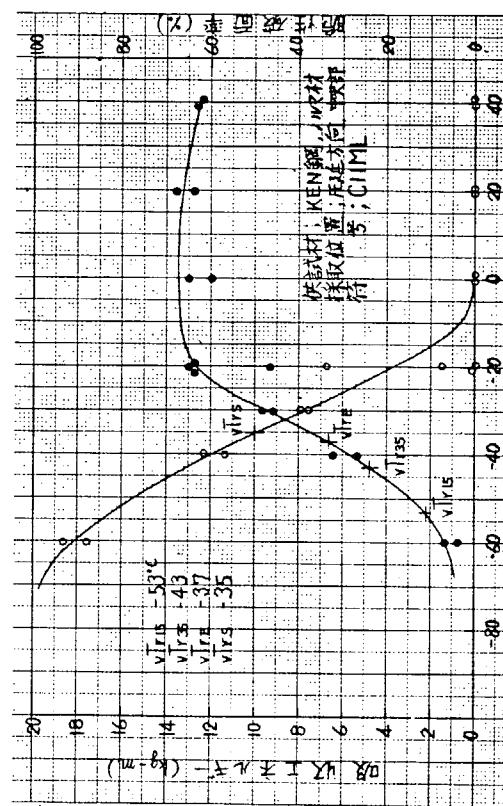


図 3.41 V-ノッチャルシャルビー衝撃試験結果

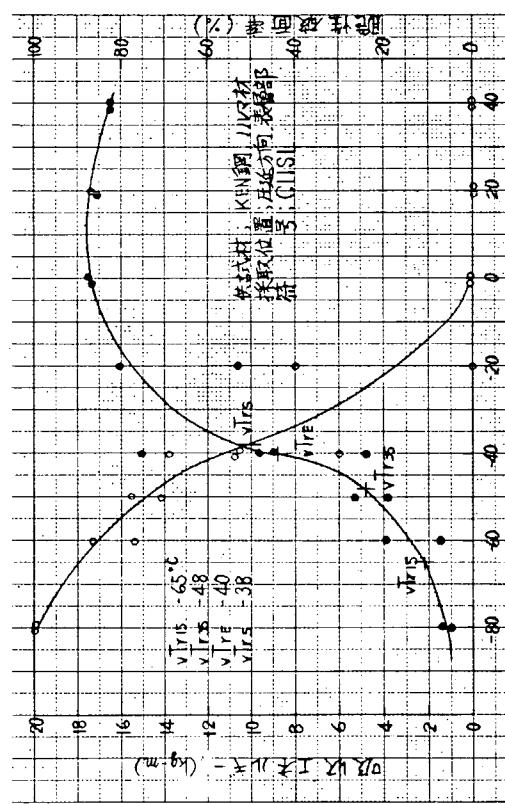


図 3.40 V-ノッチャルシャルビー衝撃試験結果

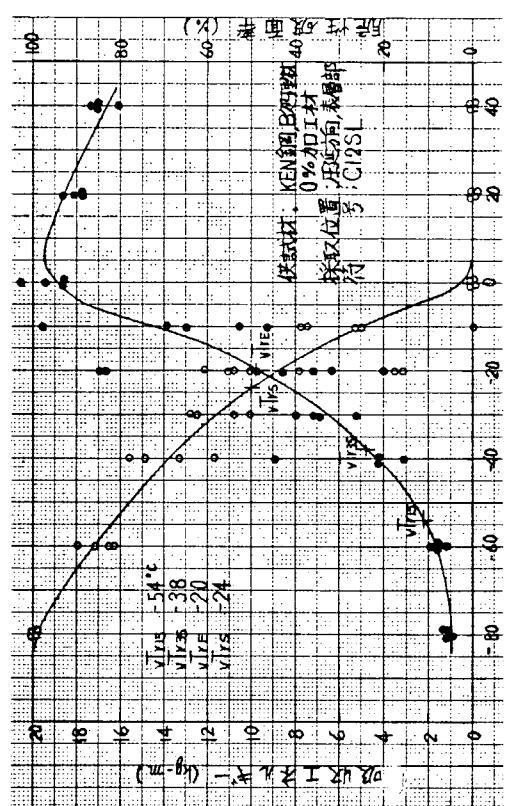


図 3.42 V-ノッチャルシャルビー衝撃試験結果

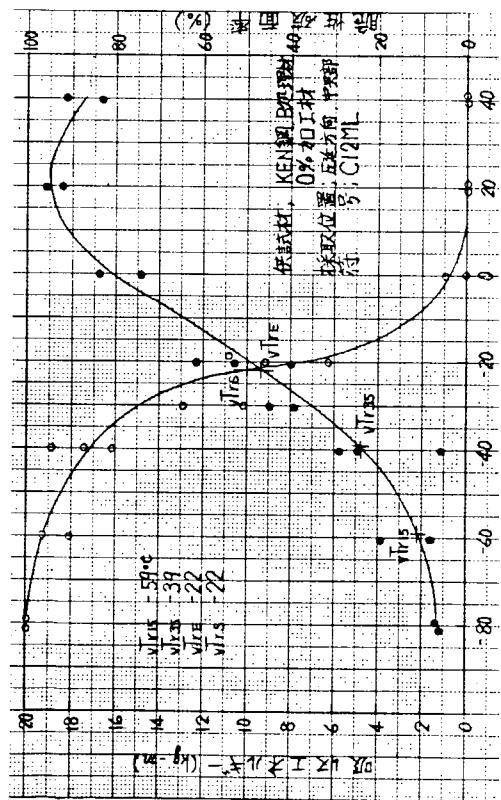


図 3.43 V—ノッチシャルビー衝撃試験結果

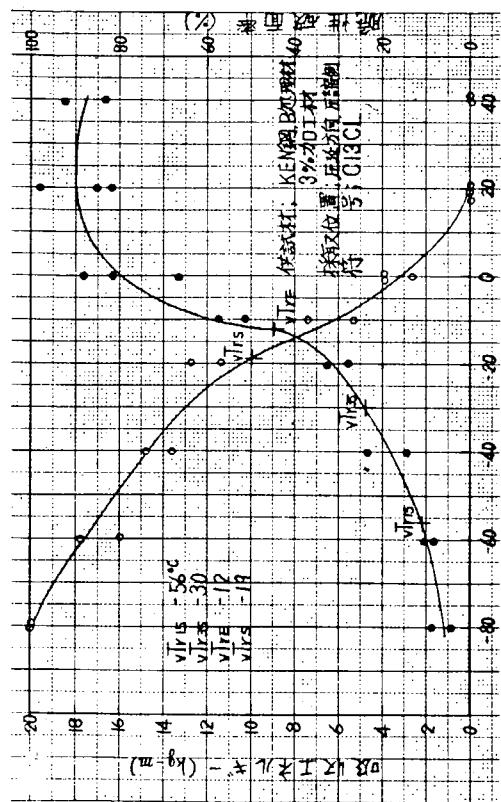


図 3.45 V—ノッチシャルビー衝撃試験結果

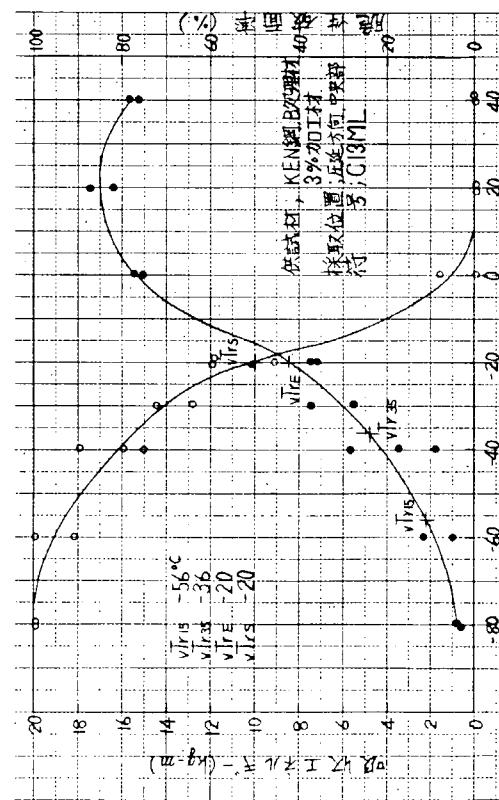


図 3.44 V—ノッチシャルビー衝撃試験結果

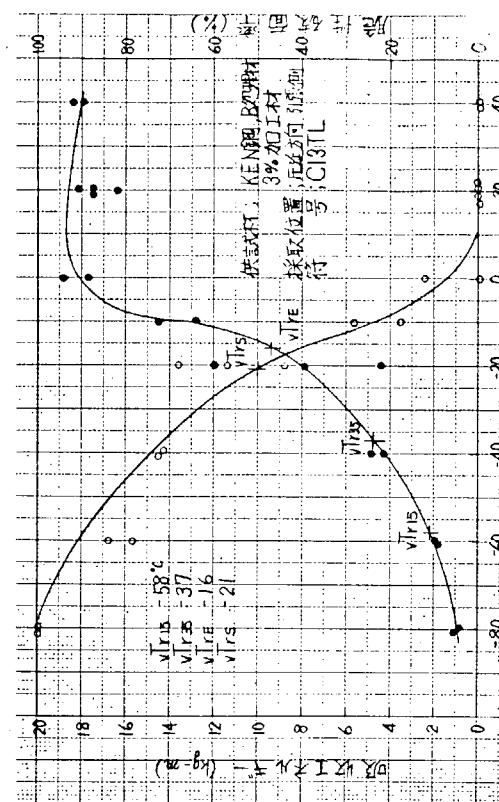


図 3.46 V—ノッチシャルビー衝撃試験結果

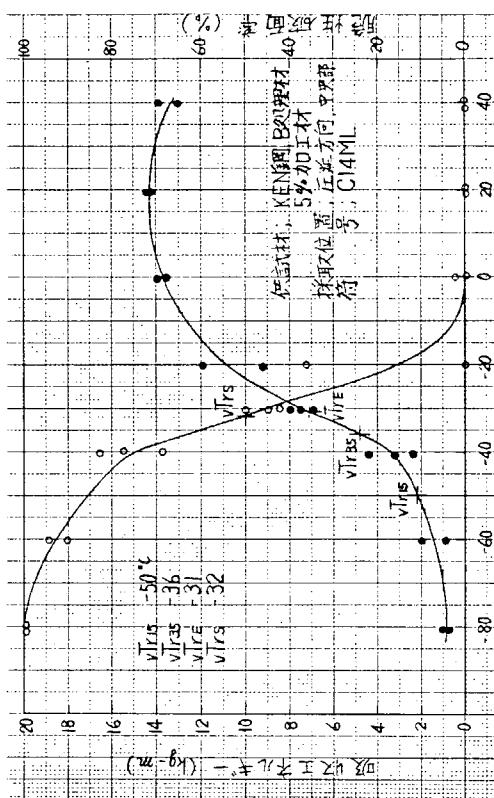


図3.47 V-ノットチャルビー衝撃試験結果

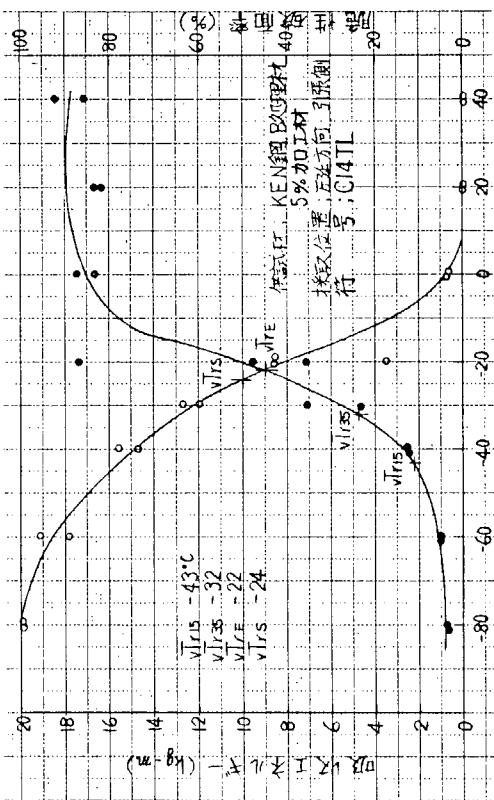


図3.48 V-ノットチャルビー衝撃試験結果

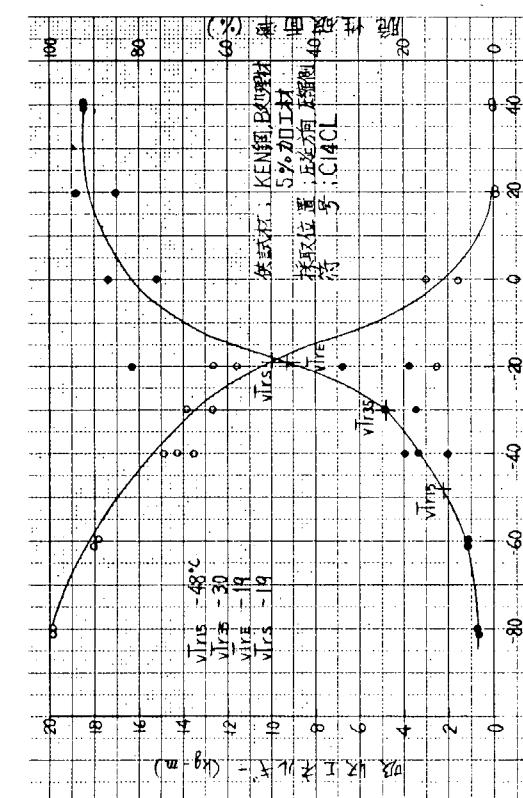
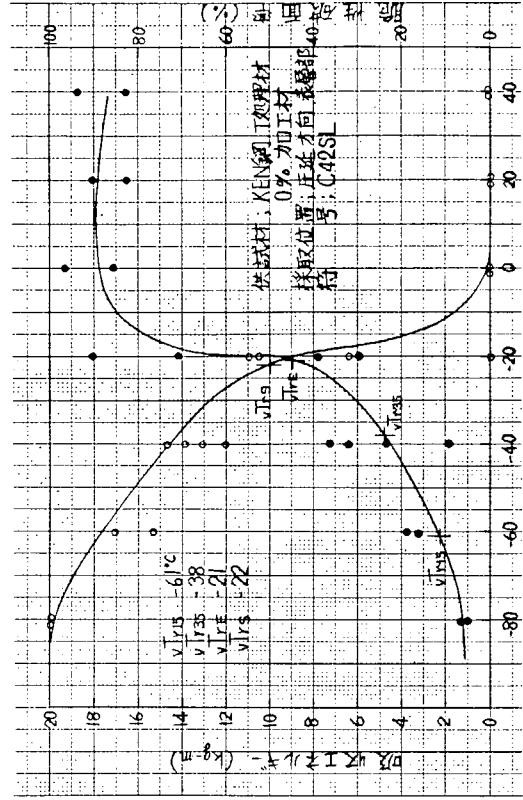


図3.49 V-ノットチャルビー衝撃試験結果



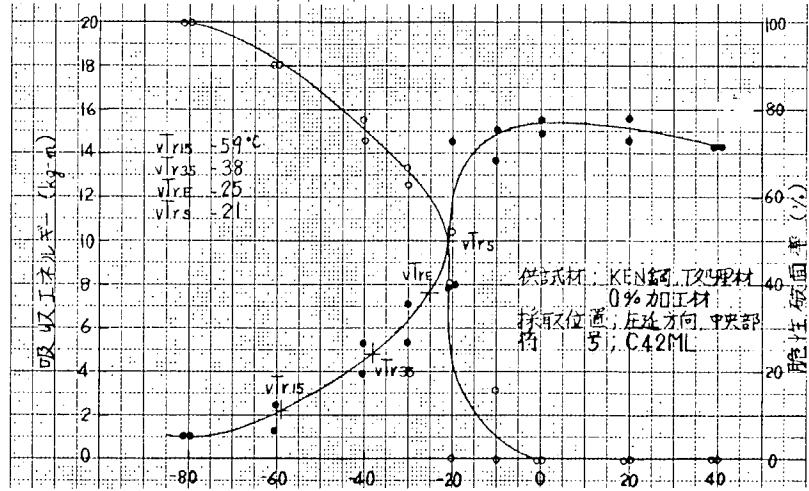


図3.5.1 V-ノッチャルピー衝撃試験結果

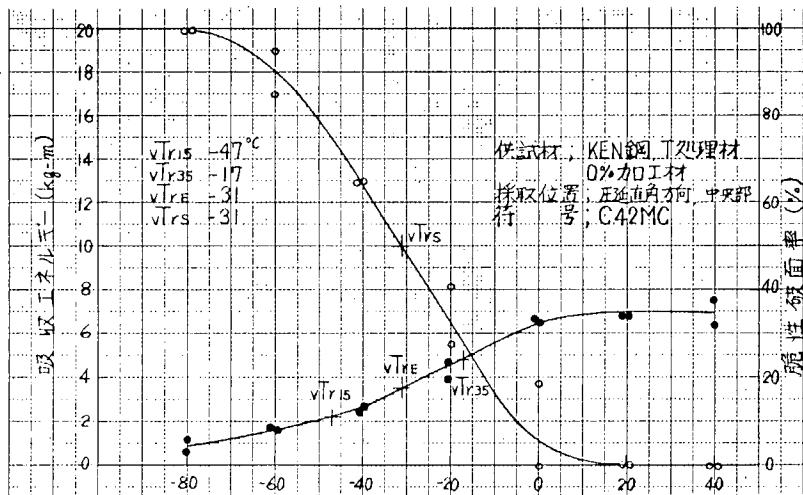


図3.5.2 V-ノッチャルピー衝撃試験結果

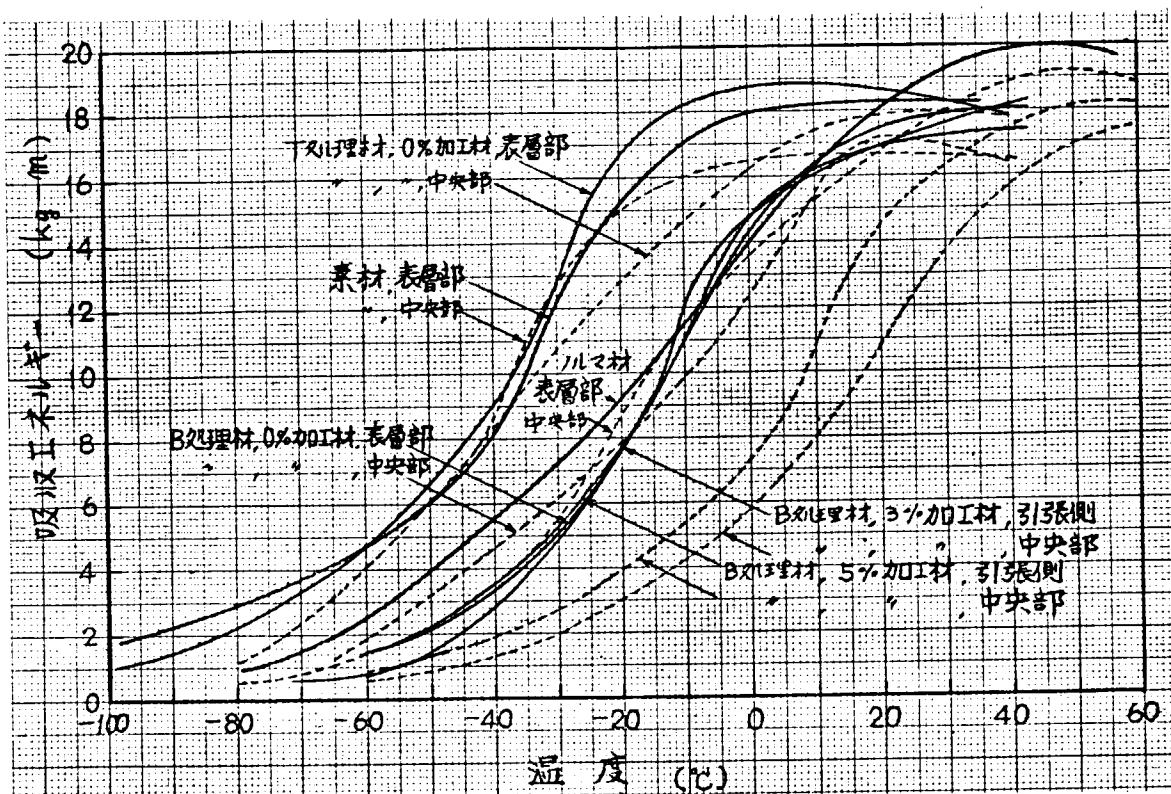


図3.5.3 標準V一ノツチシャルピー衝撃試験結果
(K5E鋼, 板厚: 3.0mm, 壓延方向)

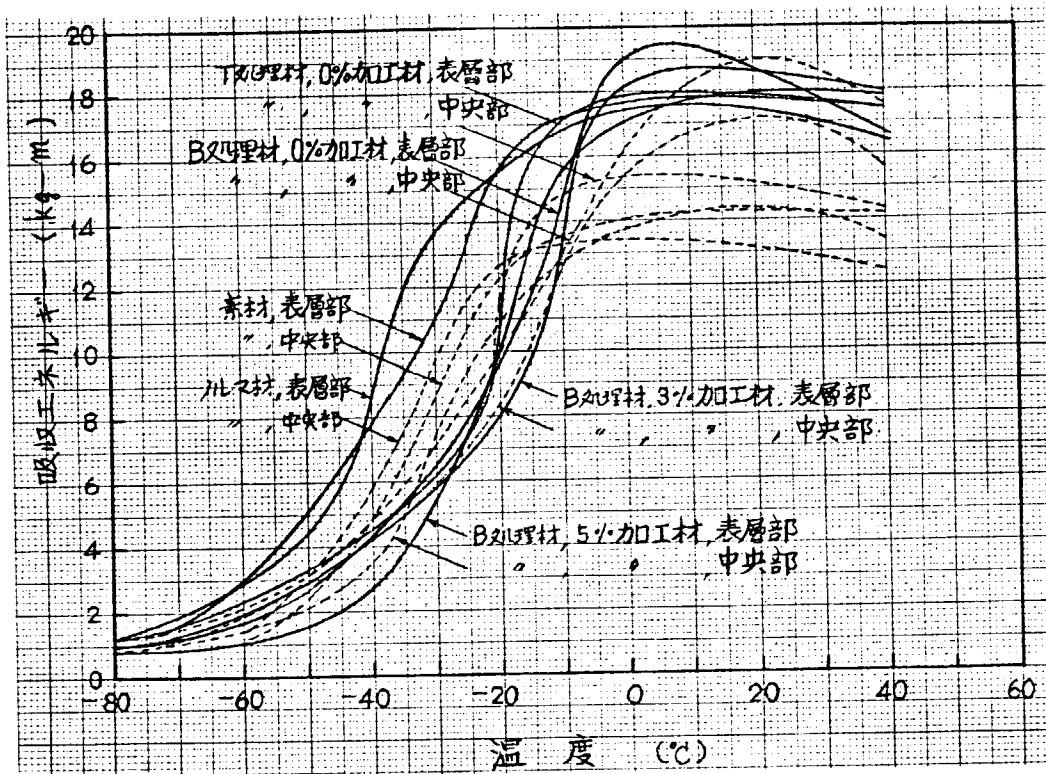


図3.5.4 標準V一ノツチシャルピー衝撃試験結果
(KEN鋼, 板厚: 3.0mm, 壓延方向)

表 3.5 V-ノツチシャルピー衝撃試験結果

(K5 鋼, 板厚 30 mm)

材料履歴	採取位置	方 位	試験片 符号	各種遷移温度(°C)				Shelf Energy kg·m
				vTr15	vTr35	vTre	vTrs	
素 材	表 面	圧延方向	C1SL	-94	-60	-38	-35	18.2
	中央部	圧延方向	C1ML	-92	-59	-41	-38	16.6
	表 面	圧延直角	C1SC	-78	-39	-35	-39	10.8
	中央部	圧延直角	C1MC	-68	-36	-36	-40	9.8
ノルマ材	表 面	圧延方向	C2SL	-64	-45	-17	-8	20.0
	中央部	圧延方向	C2ML	-51	-33	-18	-9	19.2
B処理材	表 面	圧延方向	C3SL	-52	-31	-16	-12	18.1
0%加工材	中央部	圧延方向	C3ML	-59	-39	-17	-11	17.2
B処理材	中央部	圧延方向	C4ML	-28	-6	13	12	17.9
3%加工材	圧縮側	圧延方向	C4CL	-49	-31	-7	-14	18.6
引張側	圧延方向	C4TL	-44	-31	-17	-15	17.4	
B処理材	中央部	圧延方向	C5ML	-37	-13	6	8	18.2
5%加工材	圧縮側	圧延方向	C5CL	-46	-27	-9	-12	18.6
引張側	圧延方向	C5TL	-52	-32	-16	-19	18.8	
T処理材	表 面	圧延方向	C41SL	-83	-60	-39	-36	18.8
0%加工材	中央部	圧延方向	C41ML	-72	-56	-38	-36	18.0
	中央部	圧延直角	C41MC	-68	-38	-36	-36	10.0

表 3.6 V-ノツチシャルピー衝撃試験結果

(KEN 鋼, 板厚 30 mm)

材料履歴	採取位置	方 位	試験片 符号	各種遷移温度(°C)				Shelf Energy kg·m
				vTr15	vTr35	vTre	vTrs	
素 材	表 面	圧延方向	C10SL	-65	-51	-36	-37	17.8
	中央部	圧延方向	C10ML	-51	-41	-34	-36	14.2
	表 面	圧延直角	C10SC	-54	-19	-36	-34	6.6
	中央部	圧延直角	C10MC	-45	-23	-34	-33	6.0
ノルマ材	表 面	圧延方向	C11SL	-65	-48	-40	-38	17.6
	中央部	圧延方向	C11ML	-53	-43	-37	-35	13.4
B処理材	表 面	圧延方向	C12SL	-54	-38	-20	-24	19.5
0%加工材	中央部	圧延方向	C12ML	-59	-39	-22	-22	19.0
B処理材	中央部	圧延方向	C13ML	-56	-36	-20	-20	17.0
3%加工材	圧縮側	圧延方向	C13CL	-56	-30	-12	-19	18.0
引張側	圧延方向	C13TL	-58	-37	-16	-21	18.7	
B処理材	中央部	圧延方向	C14ML	-50	-36	-31	-32	14.4
5%加工材	圧縮側	圧延方向	C14CL	-48	-30	-19	-19	18.6
引張側	圧延方向	C14TL	-43	-32	-22	-24	18.0	
T処理材	表 面	圧延方向	C42SL	-61	-38	-21	-22	18.0
0%加工材	中央部	圧延方向	C42ML	-59	-38	-25	-21	15.4
	中央部	圧延直角	C42MC	-47	-17	-31	-31	7.0

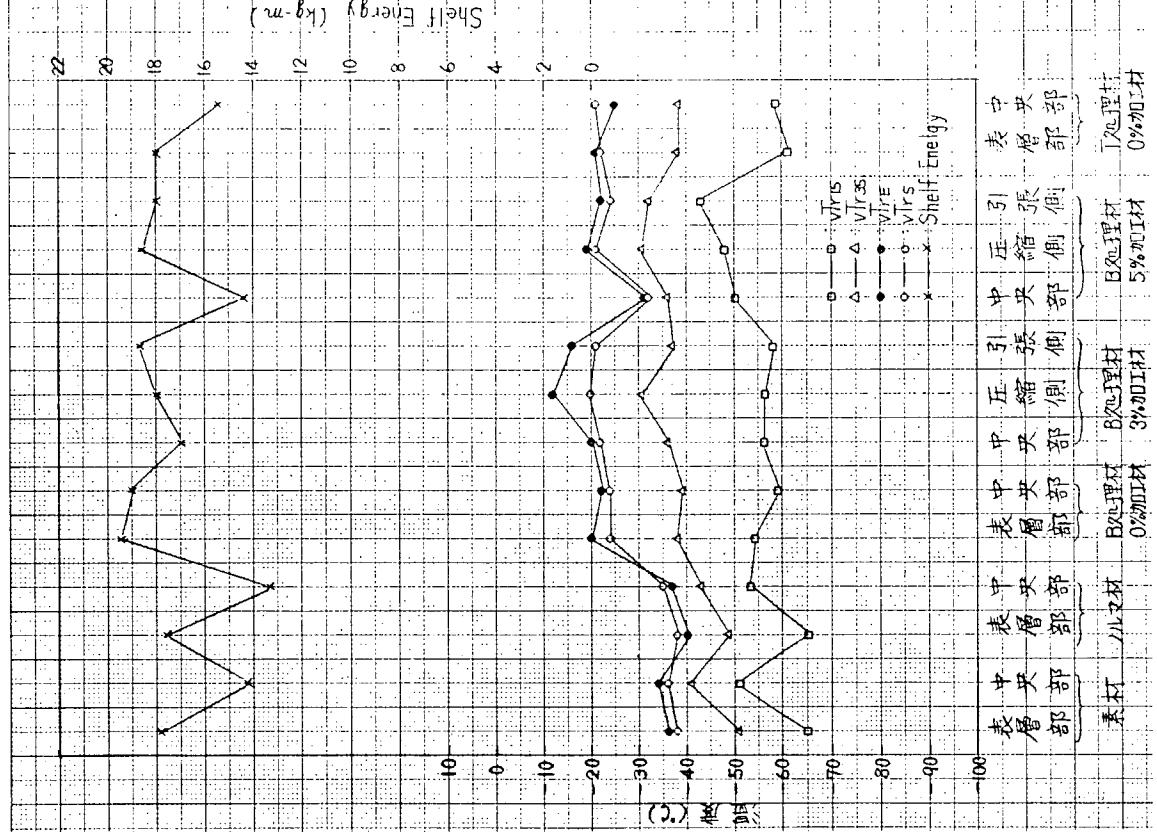


図3.55 V-ノットシャルビ衝撃試験結果
(K5E鋼, 板厚30mm)

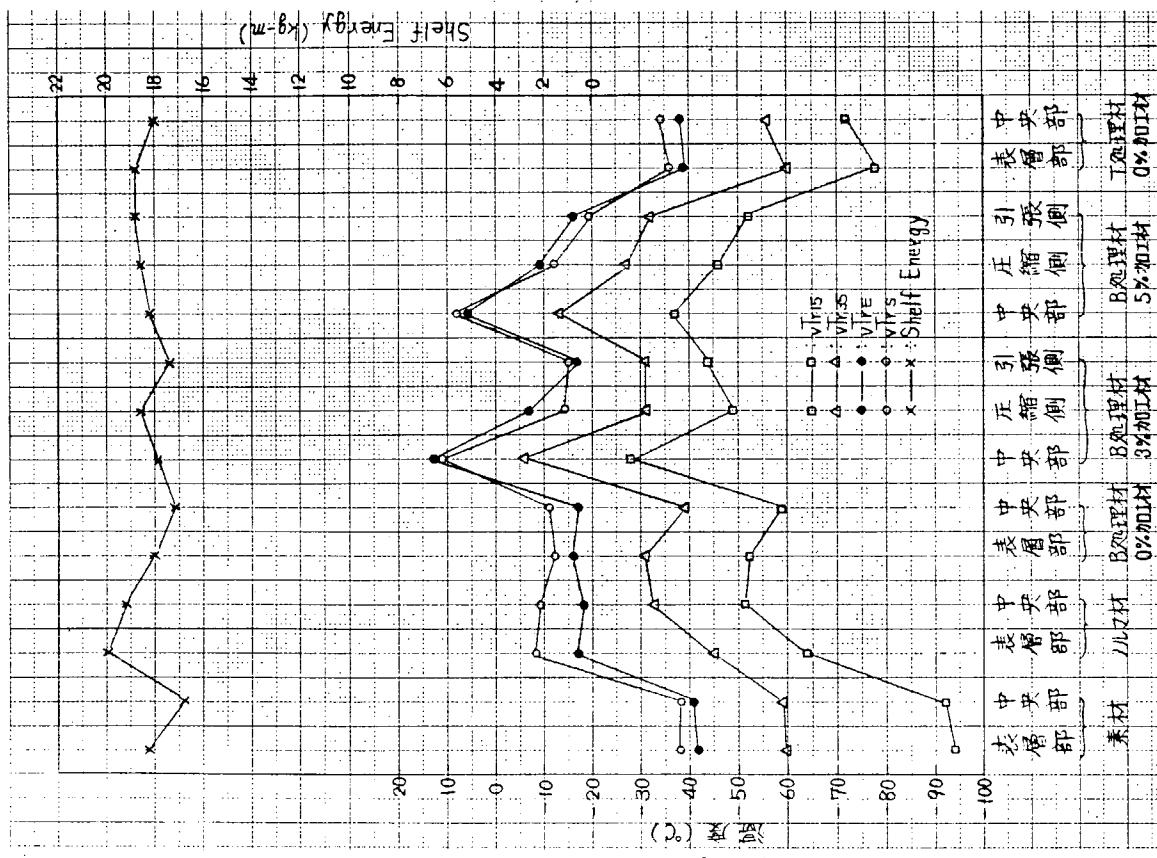
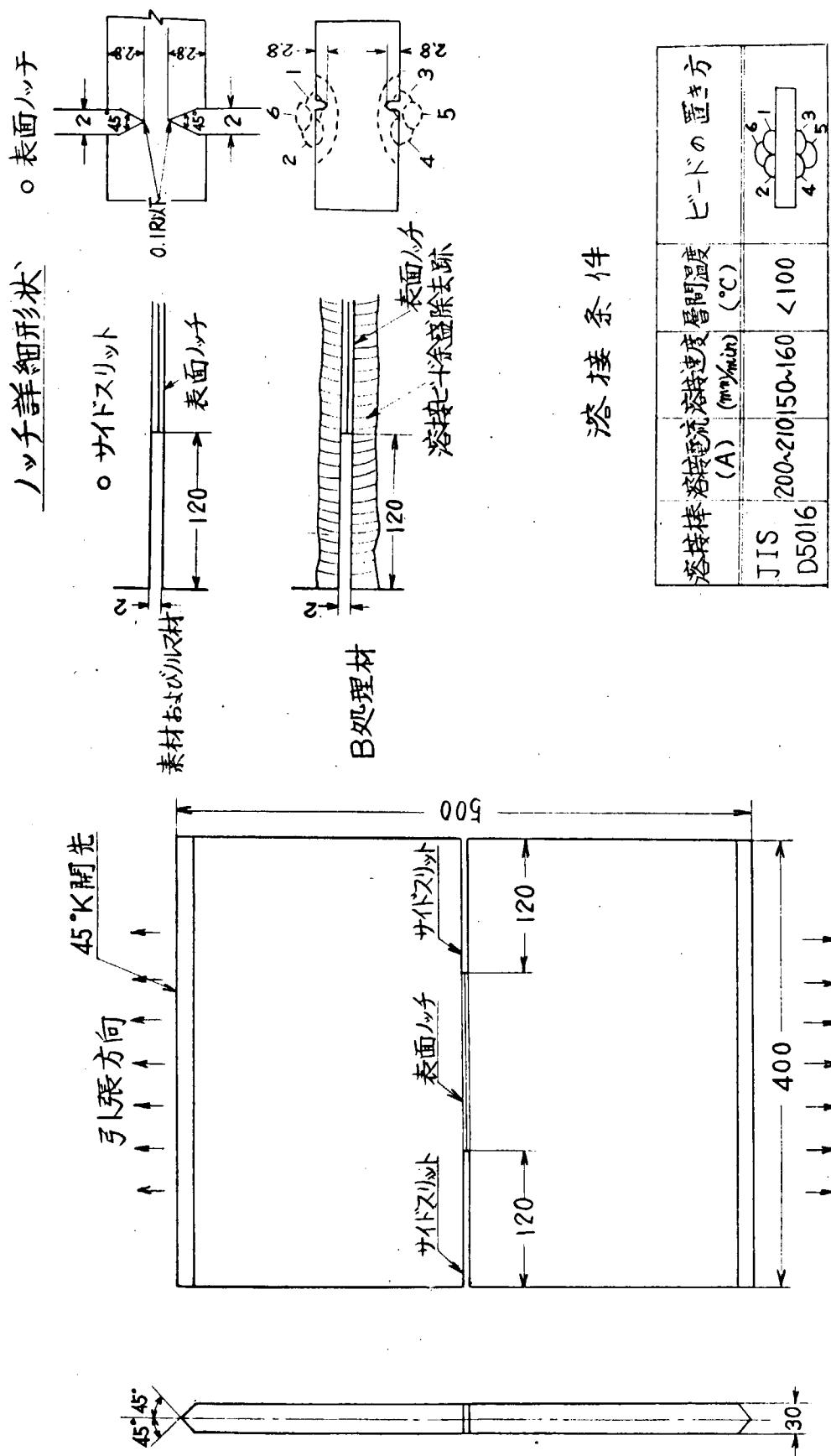
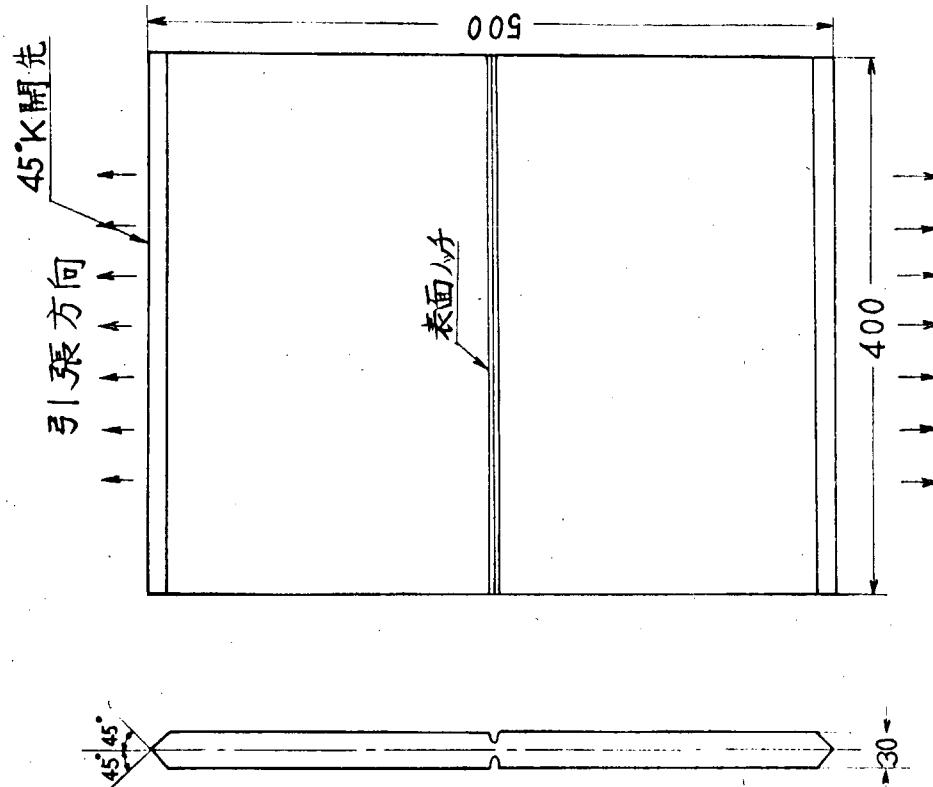
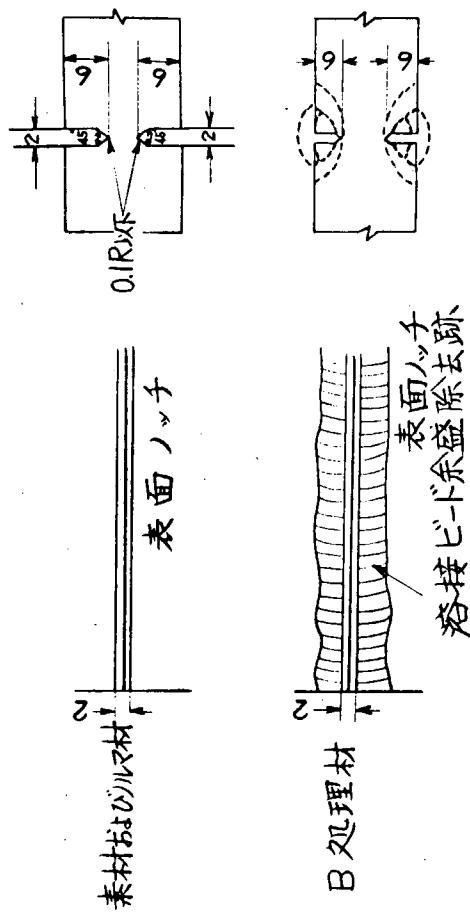


図3.56 V-ノットシャルビ衝撃試験結果
(KEEN鋼, 板厚30mm)

図 3.5.7 ティーノ・ツチ試験片



1) ナット詳細形状、表面ナット



溶接条件

溶接棒 溶接電流 (A)	溶接速度 (mm/min)	溶接温度 (°C)	ビードの置き方
JIS D5016	200~210	150~160 < 100	4, 1
			2, 3

図 3.5.8 表面ナット、チテ試験片

表 3.7 デイープノッチ試験結果一覧

(K5E鋼, 板厚3.0mm)

鋼種 履歴 符号	材料 試験片 番号	試験片寸法 板厚 (mm)	幅 (mm)	ノット (サイド) (mm)	表面ノット (mm)	破断荷重 P (ton)	平均応力 $\bar{\sigma}_g$ (kg/mm ²)	切欠断面 平均応力 $\bar{\sigma}_n$ (kg/mm ²)	f (g)	Si (kg/mm ²)	K _{C1} (kg/mm ²)	試験温度 T (°C)	$10^3/T_K$ (°K ⁻¹)
素材	N 3	30.8	400	120	2.8	53	4.3	13.1	1.38	0.31	115	-196	12.99
	N 1	30.8	400	120	2.8	98	8.0	24.4	1.38	1.09	214	-160	8.85
	N 2	30.5	400	120	2.8	220	18.0	55.1	1.38	5.49	482	-120	6.54
	N 4	30.1	400	120	2.8	237	19.7	60.5	1.38	6.58	528	-80	5.18
	N 6	30.8	400	120	2.8	61	5.0	15.1	1.38	0.42	134	-196	12.99
	N 5	30.8	400	120	2.8	78	6.3	19.4	1.38	0.68	169	-160	8.85
	N 7	30.8	400	120	2.8	138	11.2	34.2	1.38	2.12	300	-120	6.54
	N 8	30.3	400	120	2.8	216	17.8	54.6	1.38	5.34	477	-80	5.18
	N 9	30.7	400	120	2.8	53	4.3	13.1	1.38	0.31	115	-196	12.99
	N 14	30.7	400	120	2.5	74	6.0	18.0	1.38	0.62	161	-160	8.85
	N 10	30.8	400	120	2.8	77	6.3	19.1	1.38	0.68	169	-120	6.54
	N 13	30.5	400	120	2.9	221	18.1	55.7	1.38	5.57	485	-100	5.78
K5E	N 11	30.9	400	120	2.8	173	14.1	42.7	1.38	3.38	378	-80	5.18
	N 12	30.8	400	120	2.8	220	17.9	54.6	1.38	5.42	480	-40	4.29
	N 15	30.2	400	120	2.8	81	6.7	20.3	1.38	0.76	179	-196	12.99
	N 17	30.3	400	120	2.6	82	6.8	20.3	1.38	0.79	182	-160	8.85
	N 19	30.1	400	120	2.8	113	9.4	28.7	1.38	1.50	252	-140	7.54
	N 16	30.2	400	120	2.5	159	13.2	39.2	1.38	2.96	354	-120	6.54
	N 20	30.4	400	120	2.8	132	10.8	33.2	1.38	1.98	289	-100	5.78
	N 18	30.1	400	120	2.8	230	19.1	58.7	1.38	6.18	512	-80	5.18
	N 24	30.4	400	120	2.8	56	4.6	14.1	1.38	0.36	123	-196	12.99
	N 23	30.3	400	120	2.8	68	5.6	17.2	1.38	0.52	150	-160	8.85
	N 22	30.1	400	120	2.7	79	6.6	19.2	1.38	0.74	177	-140	7.54
	N 21	30.4	400	120	2.8	192	15.8	48.4	1.38	4.24	423	-120	6.54
T処理材	N 25	30.0	400	120	3.0	144	12.0	37.5	1.38	2.44	321	-100	5.78
	N 26	30.3	400	120	2.8	189	15.6	47.8	1.38	4.12	418	-80	5.18
	N 201	30.6	400	120	2.8	48	3.9	12.1	1.38	0.26	104	-196	12.99
	N 200	30.6	400	120	2.8	88	7.2	22.1	1.38	0.88	193	-160	8.85
	N 202	30.6	400	120	2.8	80	6.5	20.0	1.38	0.72	174	-140	7.54
	N 199	30.6	400	120	2.8	168	13.7	42.1	1.38	3.19	367	-120	6.54
	N 198	30.4	400	120	3.0	230	18.9	59.0	1.38	6.07	506	-100	5.79
0%加工材	N 197	30.5	400	120	2.8	232	19.0	58.1	1.38	6.11	509	-80	5.18

注) 1. $\bar{\sigma}_g$ = gross stress

3. $F(g) = f(g) \cdot f_a(g)$

2. $\bar{\sigma}_n$ = net stress $f_a(g)$ = サイドスリットによる補正係数 ($f_a(g) = 1.25$)

4. $S_i = \frac{\pi \{ F(g) \cdot \bar{\sigma}_g \}^2 \cdot C}{2E}$

 $f_a(g)$ = 表面ノッチによる補正係数 ($f_a(g) = 1.10$)

5. $K_{C1} = F(g) \cdot \bar{\sigma}_g \cdot \sqrt{C}$

表 3.8 表面ノシチ試験結果一覧

(KEN鋼, 板厚: 30 mm)

鋼種 履歴 条件	材料 試験片 符号	試験片寸法				破断荷重 P (t)	平均 切欠き面 応力 σ_n (kg/mm ²)	$\frac{2\delta}{t}$	f(r)	K_{IC} (kg/mm) $\sqrt{\text{m}}$	試験温度 T (°C)	$\frac{10^3}{T} \frac{1}{K}$ (°K ⁻¹)
		板厚 (mm)	幅 (mm)	2B (mm)	表面凹 凸深さ h (mm)							
素材	N 210	30.4	400	—	6.1	210	17.3	28.9	0.401	1.14	87	-196
	N 209	30.5	400	—	6.0	213	17.5	28.6	0.393	1.14	87	-180
	N 211	30.4	400	—	6.2	228	18.8	31.5	0.408	1.14	96	-140
	N 212	30.3	400	—	6.4	434	35.8	62.0	0.422	1.14	184	-80
	N 54	30.7	400	—	6.3	272	22.1	37.6	0.410	1.14	113	-196
	N 55	30.7	400	—	6.6	268	21.8	38.1	0.430	1.14	114	-160
B處理材	N 56	30.6	400	—	6.0	403	32.9	54.2	0.392	1.14	170	-110
	N 53	30.4	400	—	6.2	415	34.1	57.3	0.408	1.14	181	-80
	N 61	30.3	400	—	6.3	278	22.9	39.1	0.416	1.14	117	-196
	N 58	30.2	400	—	6.0	258	21.4	35.4	0.397	1.14	107	-180
	N 60	30.1	400	—	6.2	318	26.4	44.7	0.412	1.14	135	-160
	N 62	30.3	400	—	6.0	379	31.3	51.5	0.396	1.14	160	-120
B處理材 0%加圧材	N 57	30.1	400	—	6.2	440	36.5	62.1	0.412	1.14	196	-80
	N 64	30.2	400	—	6.3	220	18.2	31.3	0.417	1.14	93	-196
	N 65	30.2	400	—	5.9	283	23.4	38.3	0.391	1.14	116	-160
	N 66	30.0	400	—	6.2	274	22.8	38.7	0.413	1.14	117	-140
	N 67	30.1	400	—	6.3	460	38.2	65.7	0.419	1.14	205	-120
	N 63	29.9	400	—	6.2	350	29.3	49.4	0.415	1.14	152	-120
B處理材 3%加圧材	N 68	30.0	400	—	6.2	420	35.0	59.3	0.413	1.14	188	-80
	N 71	29.7	400	—	6.2	238	20.0	34.4	0.418	1.14	101	-196
	N 69	30.1	400	—	5.9	309	25.7	42.0	0.392	1.14	128	-160
	N 72	30.0	400	—	6.4	370	30.8	53.8	0.427	1.14	163	-120
	N 70	30.0	400	—	6.1	472	39.3	66.3	0.407	1.14	211	-100
	N 74	29.7	400	—	6.2	498	41.9	71.6	0.418	1.14	232	-80

注)

1. σ_g = gross stress

$$3. K_{IC}^2 = \frac{\pi \{ f(r) \cdot \sigma_g \}^2 \cdot h}{1 - 0.77(\frac{h}{\sigma_g})^2}$$

$$4. f(r) = \sqrt{\frac{t}{\pi h}} (\tan \frac{\pi h}{t} + 0.1 \sin \frac{2\pi h}{t})$$

2. σ_n = net stress

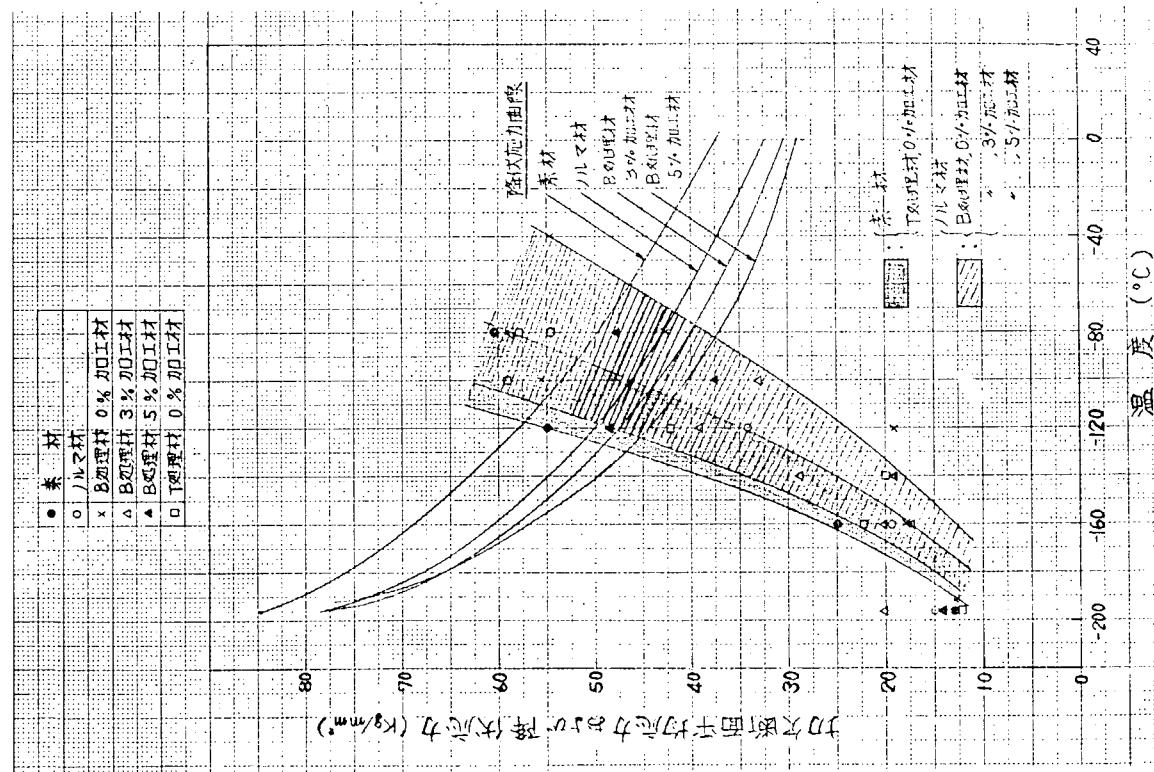


図 3.5.9 降伏応力と切欠き面平均応力
(K5鋼, 板厚30mm)

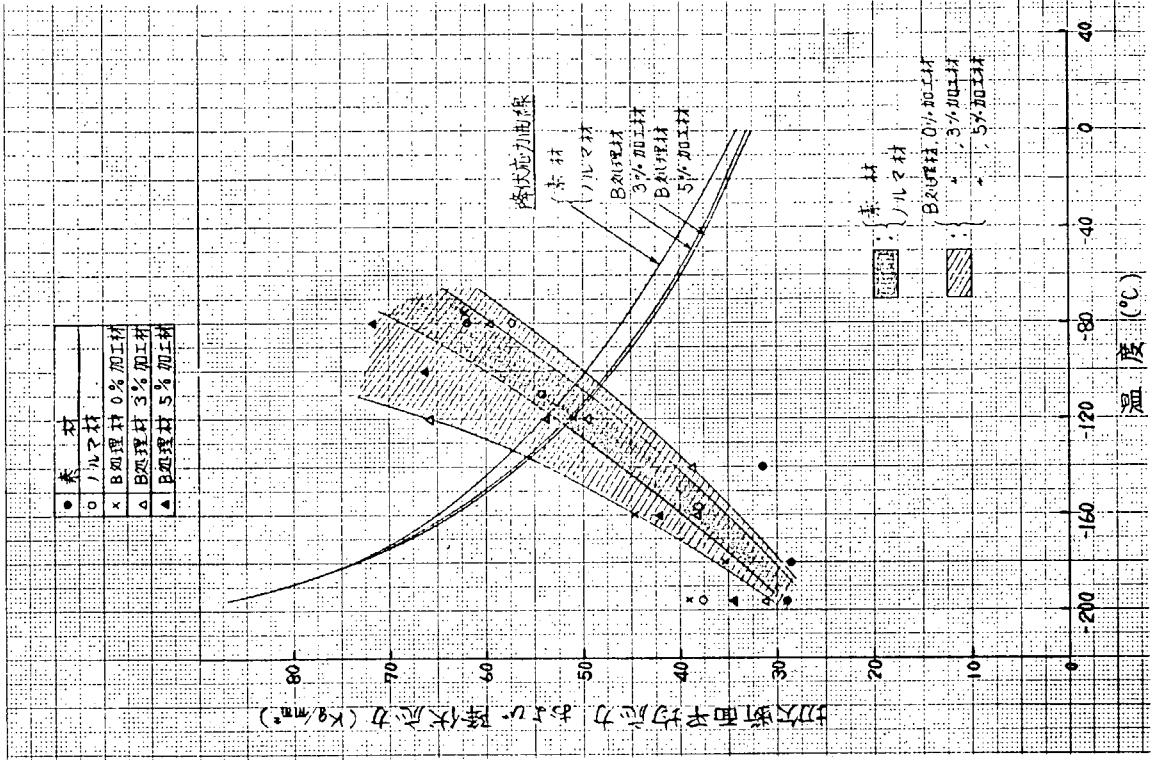


図 3.6.0 降伏応力と切欠き面平均応力
(KE-N鋼, 板厚30mm)

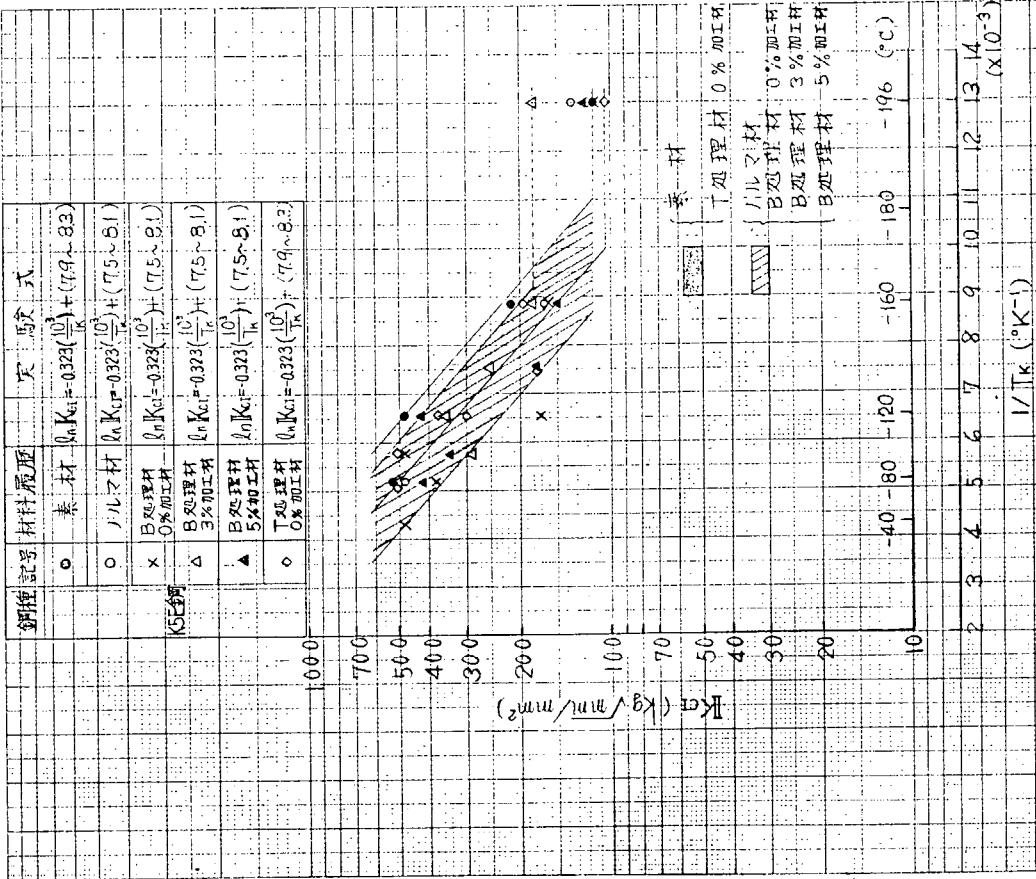
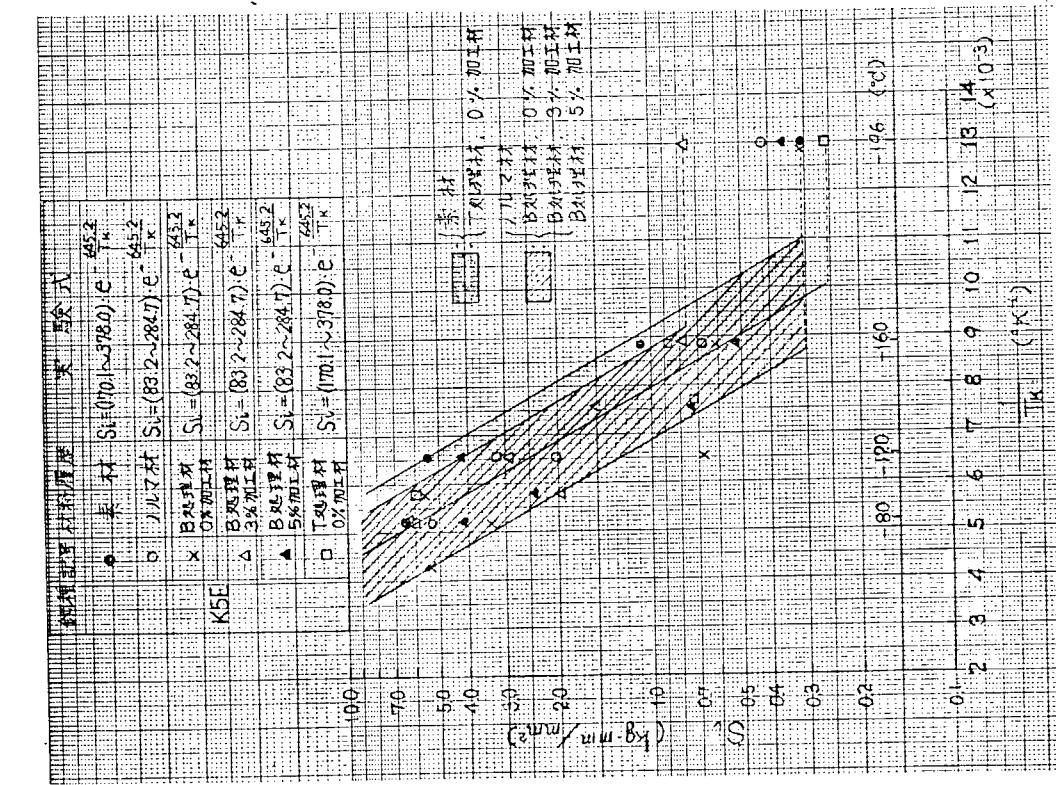


図 3.6.1 デイ一ノンチ試験結果

図 3.6.2 デイ一ノンチ試験結果

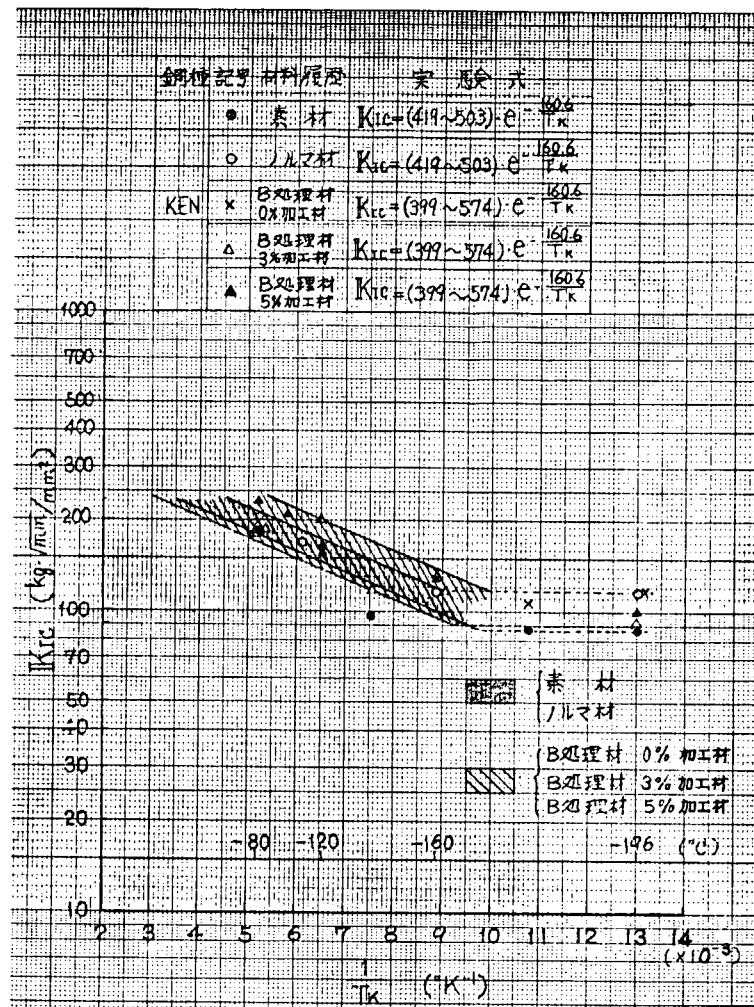
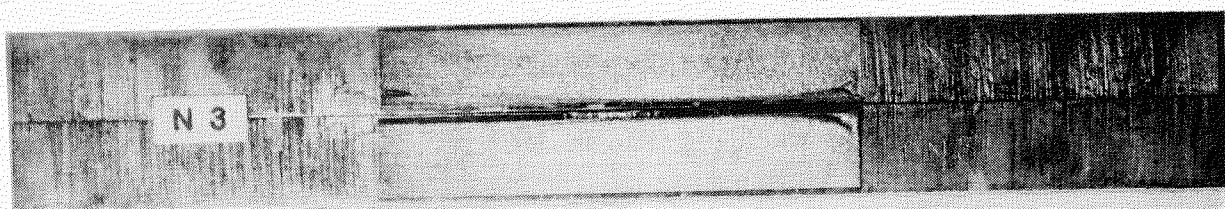
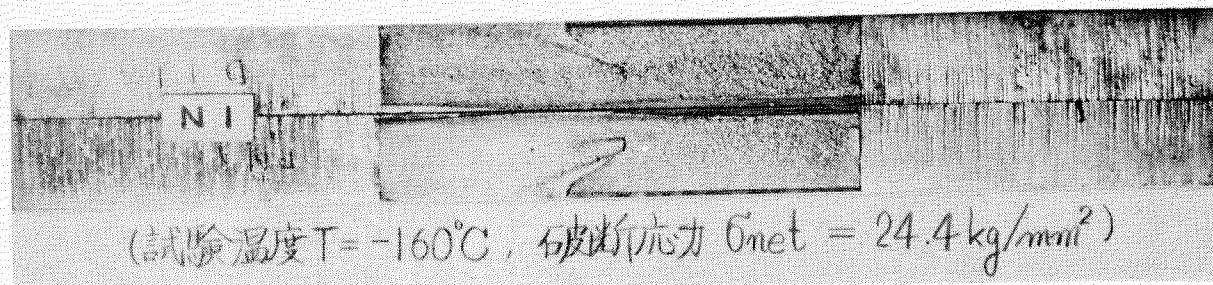


図 3.6.3 表面ノツチ試験結果

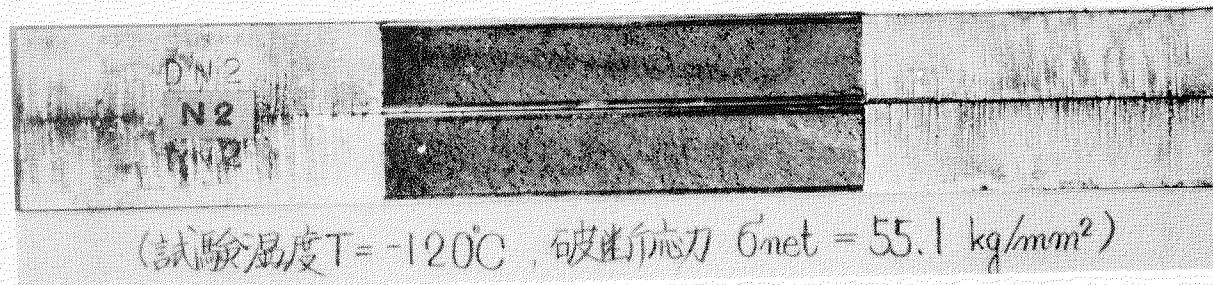
(K E N鋼, 板厚 3.0mm)



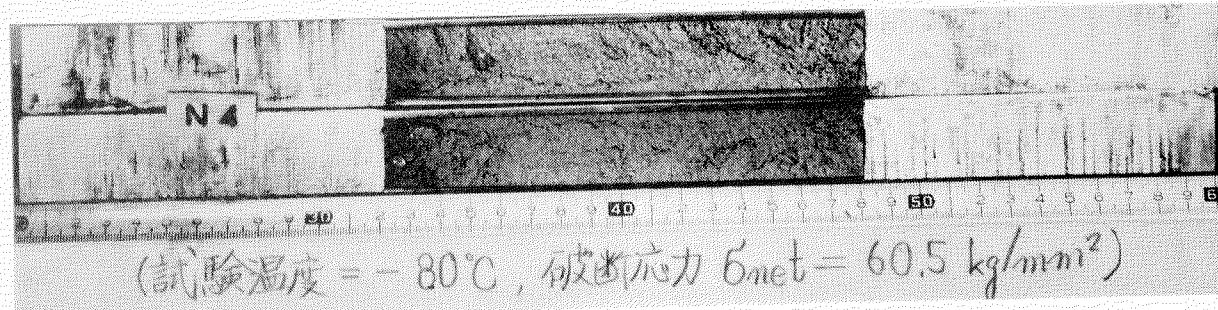
(試験温度 $T = -196^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 13.1 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -160^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 24.4 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -120^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 55.1 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $= -80^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 60.5 \text{ kg/mm}^2$)

写真 3.1.0 デイープノッチ試験片破面状況
(K5E鋼, 素材, 板厚3.0mm)

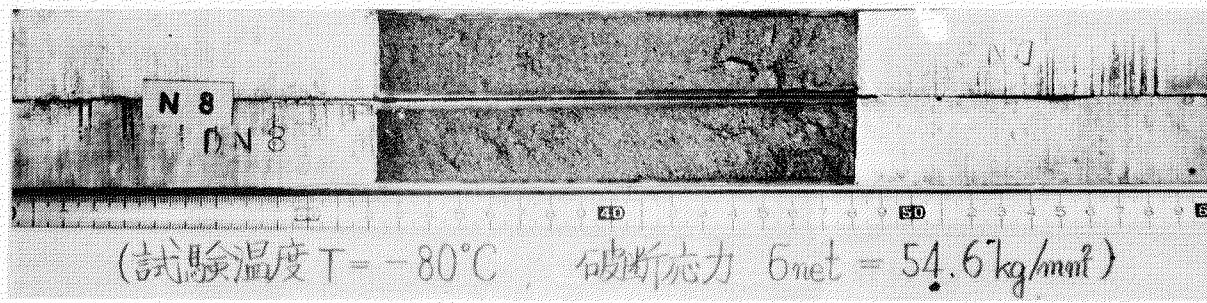
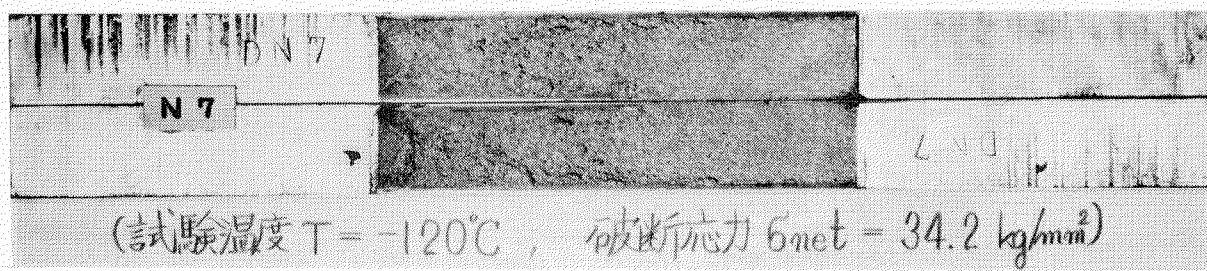
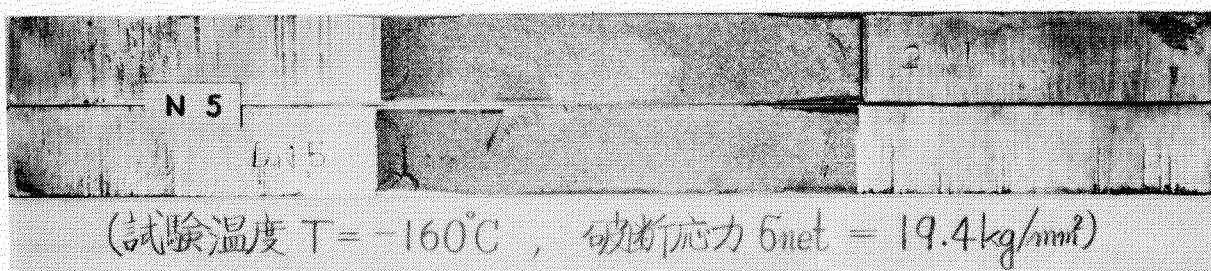
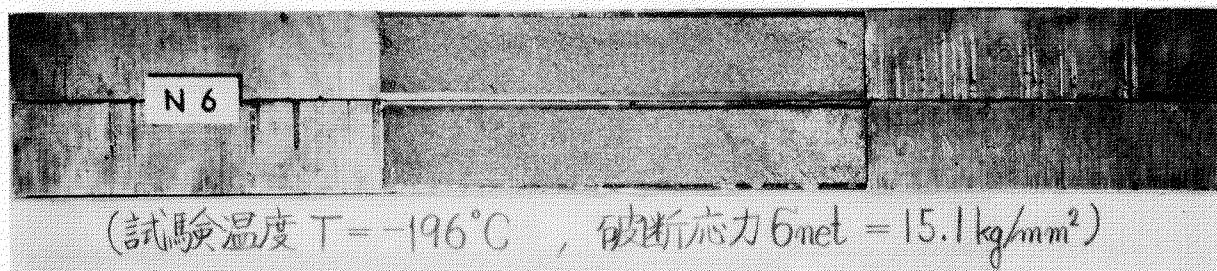


写真 3.1.1 デイープノーチ試験片破面状況
(K5E鋼, ノルマ材, 板厚3.0mm)

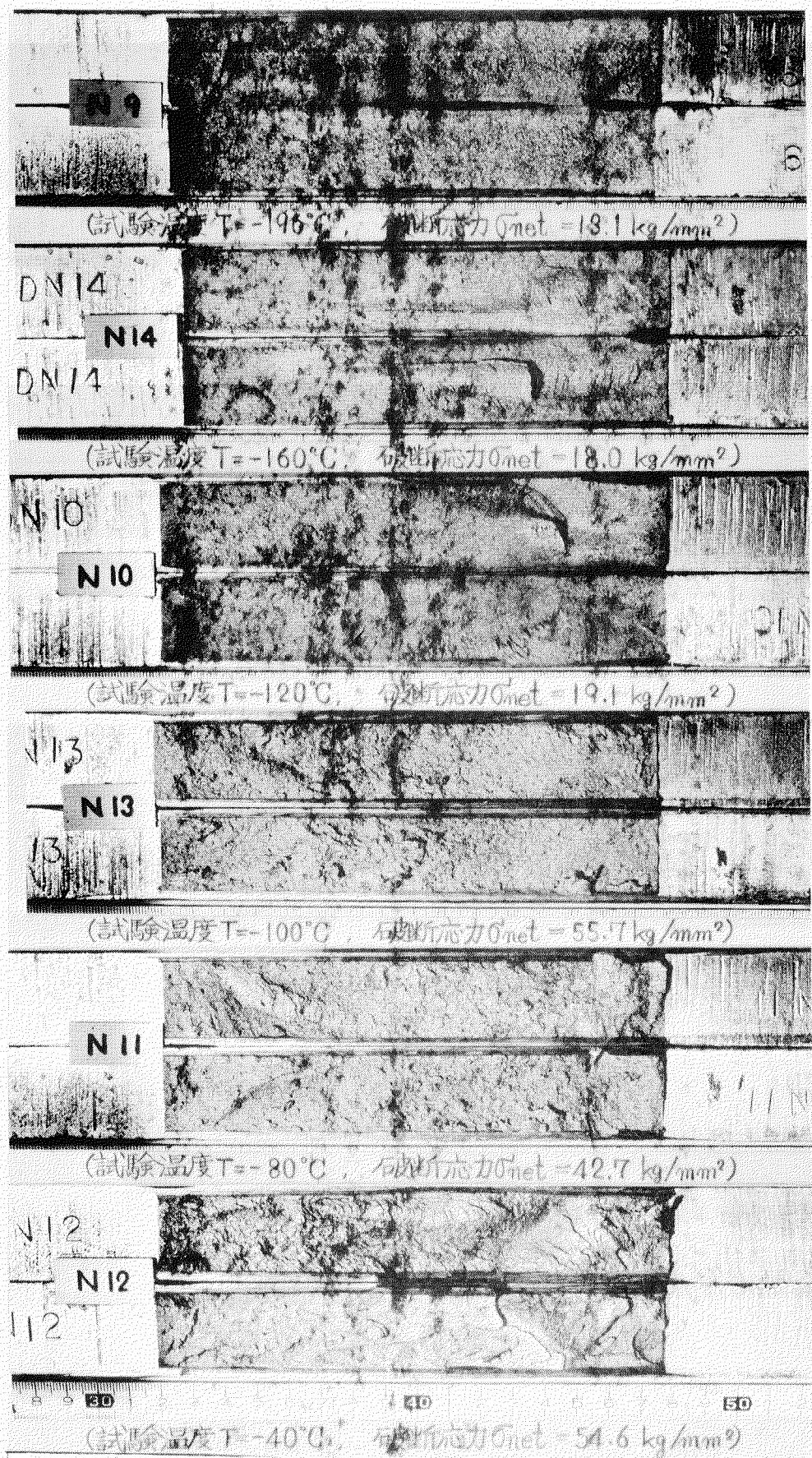


写真 3.1.2 ティープノック試験片破面状況

(K5E鋼, B処理材 0%加工材, 板厚3.0mm)

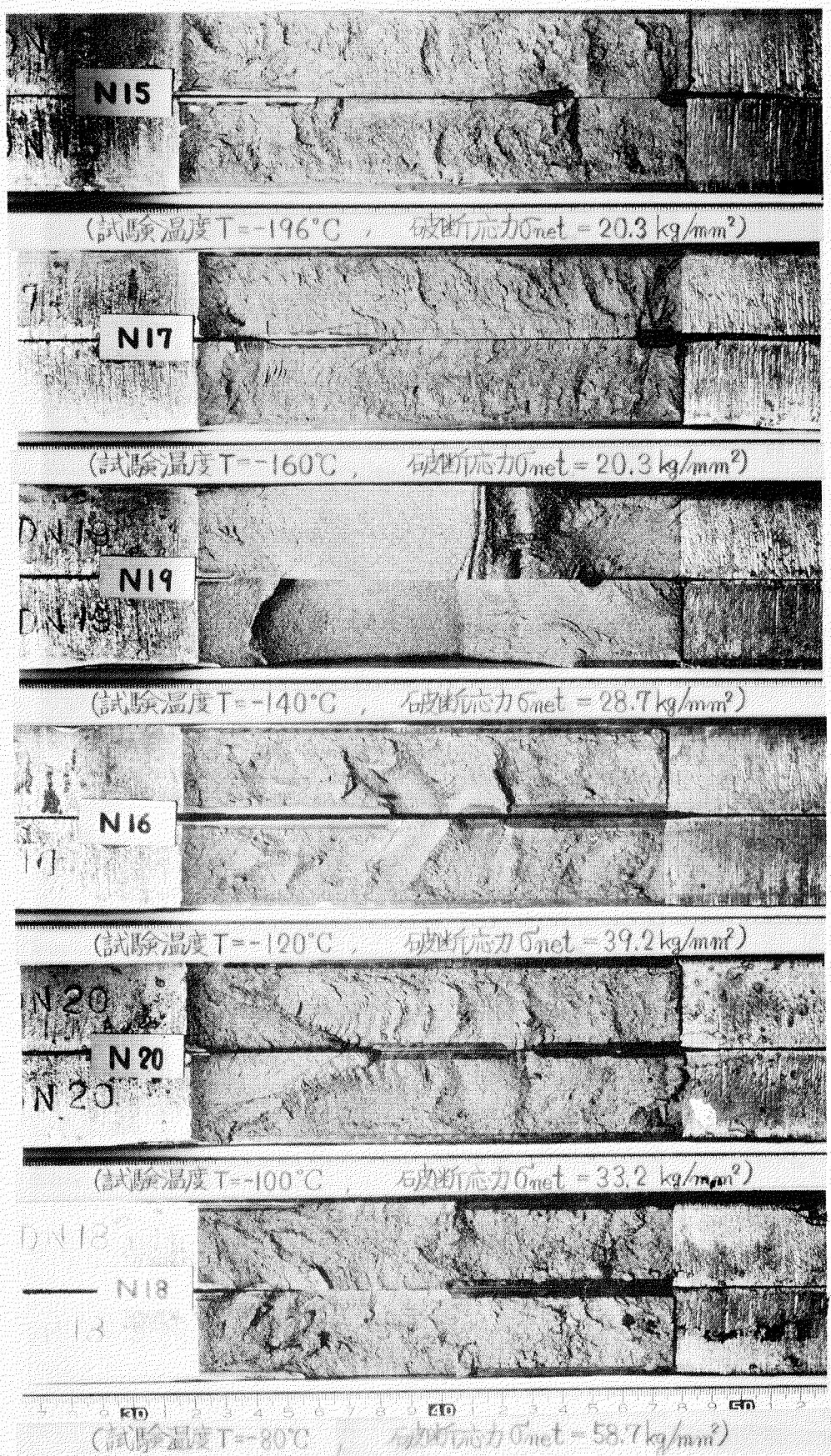


写真3.13 デイープノッチ試験片破面状況
 (K5E鋼, B処理材3%加工材, 板厚3.0mm)

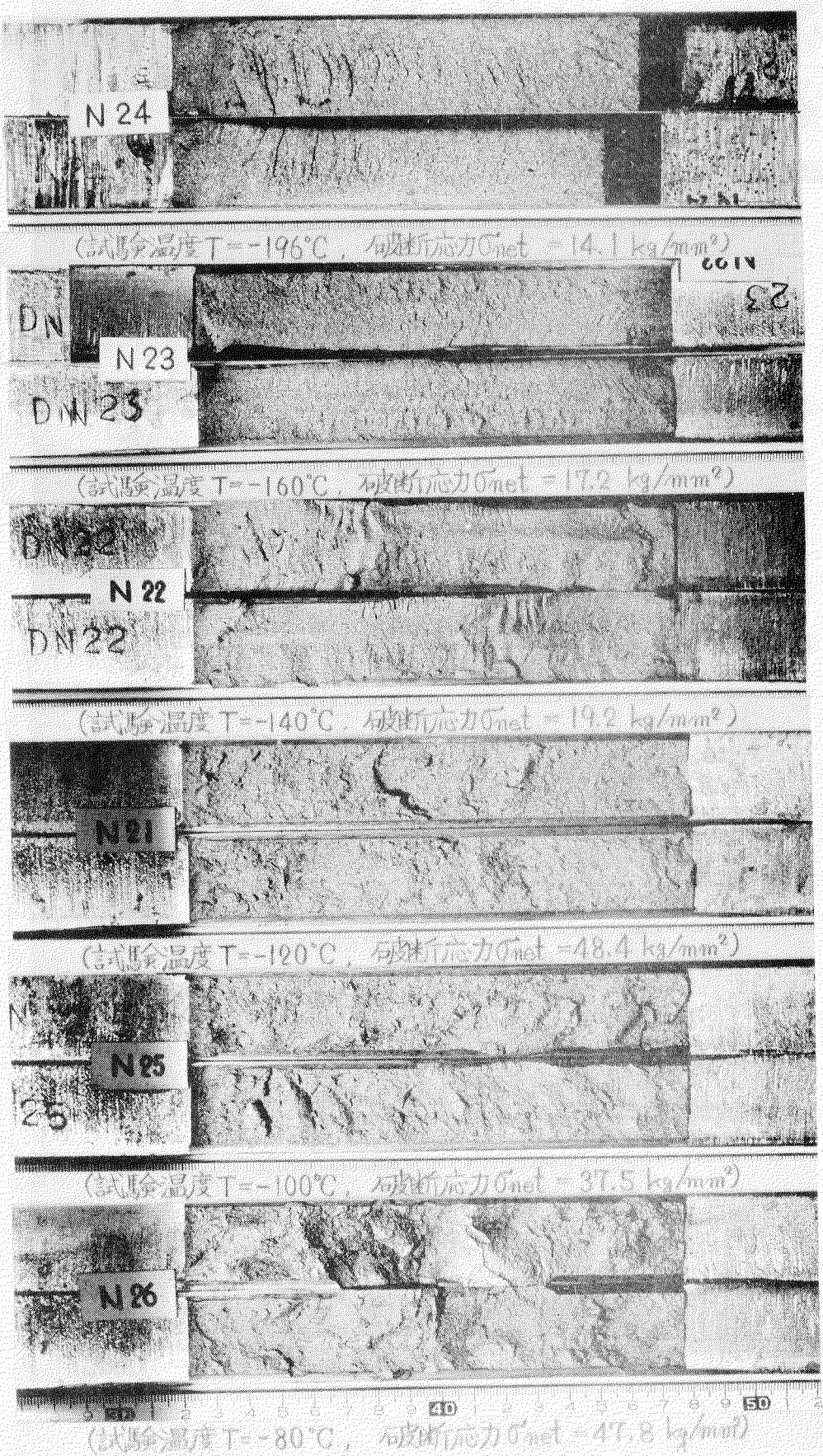
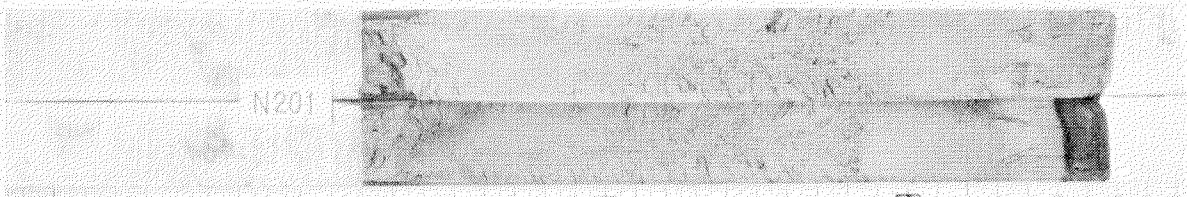
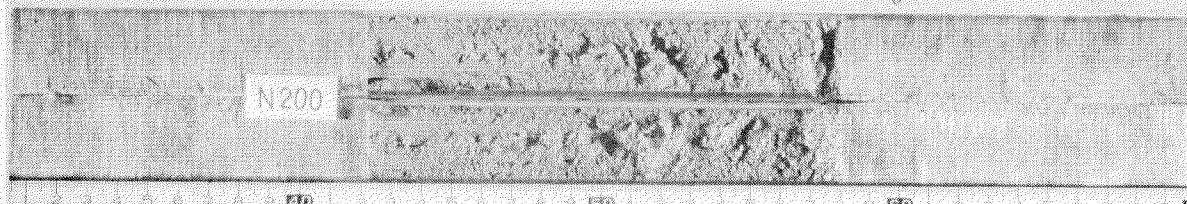


写真 3. 1-4 デイー ブノンチ 試験片 破面状況

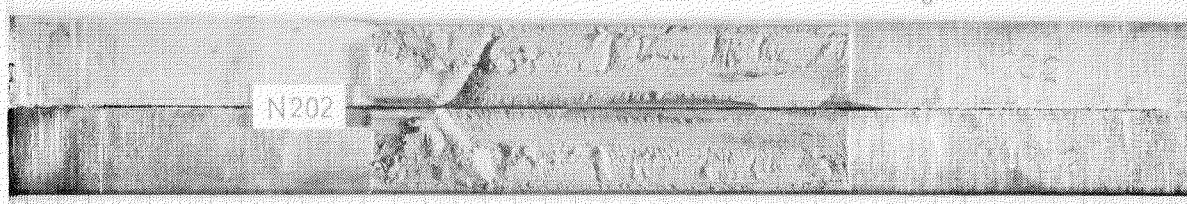
(K5-E鋼, B処理材 5%加工材, 板厚 3.0mm)



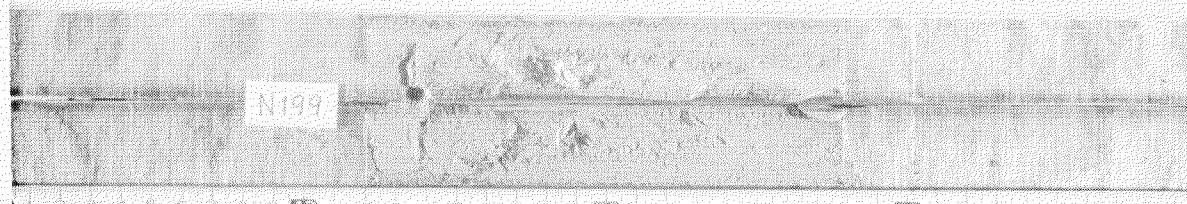
(試験温度 $T = -196^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 12.1 \text{ kg/mm}^2$)



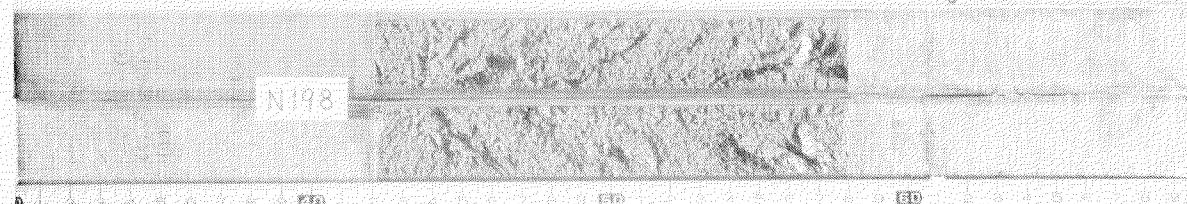
(試験温度 $T = -160^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 22.1 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -140^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 20.0 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -120^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 42.1 \text{ kg/mm}^2$)



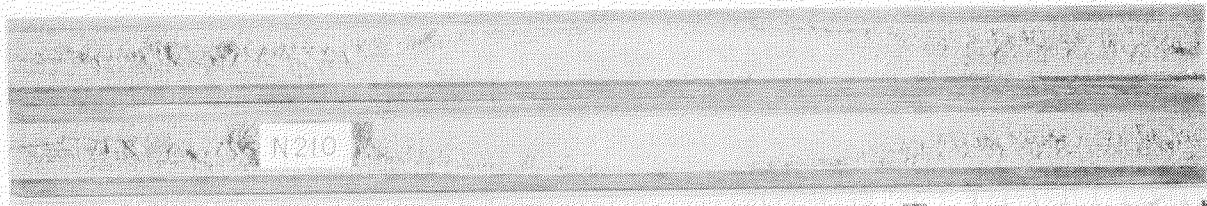
(試験温度 $T = -100^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 59.0 \text{ kg/mm}^2$)



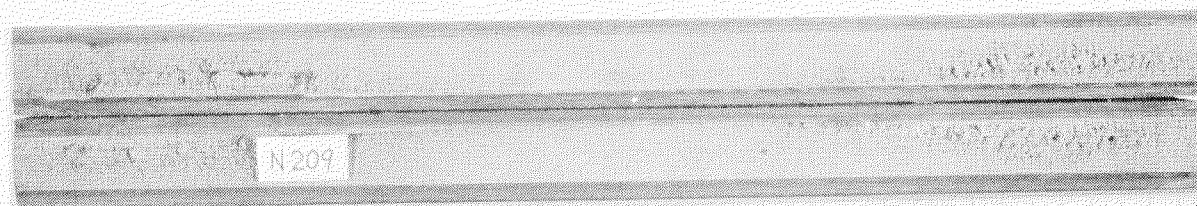
(試験温度 $T = -80^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 58.1 \text{ kg/mm}^2$)

写真 3.1.5 デイ-ブノンチ試験片破面状況

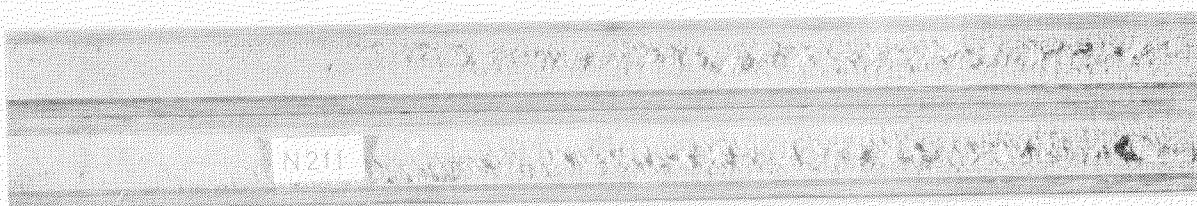
(K-5-E鋼, T処理材 0%加工材, 板厚3.0mm)



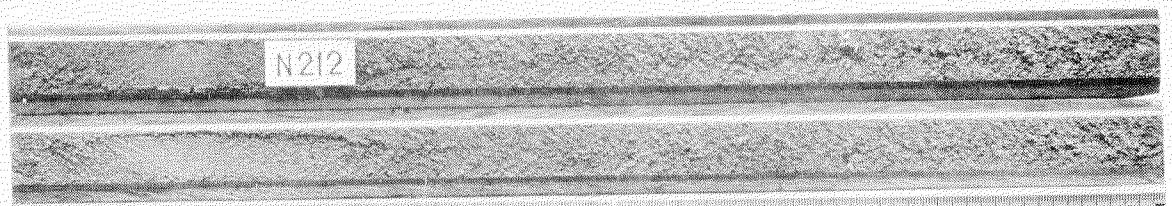
(試験温度 T = -196°C, 破断応力 $\sigma_{net} = 28.9 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 T = -180°C, 破断応力 $\sigma_{net} = 28.6 \text{ kg/mm}^2$)

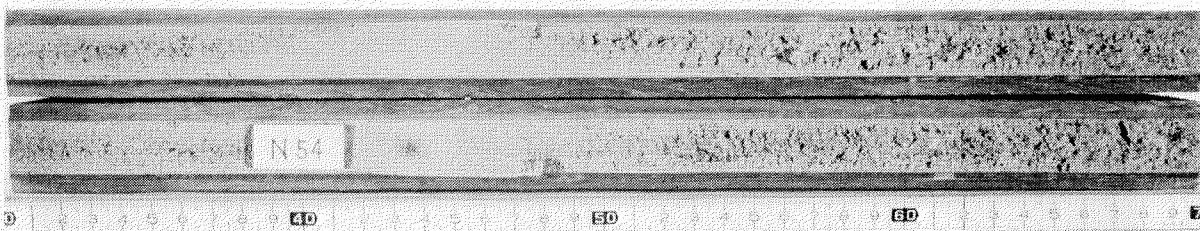


(試験温度 T = -140°C, 破断応力 $\sigma_{net} = 31.5 \text{ kg/mm}^2$)

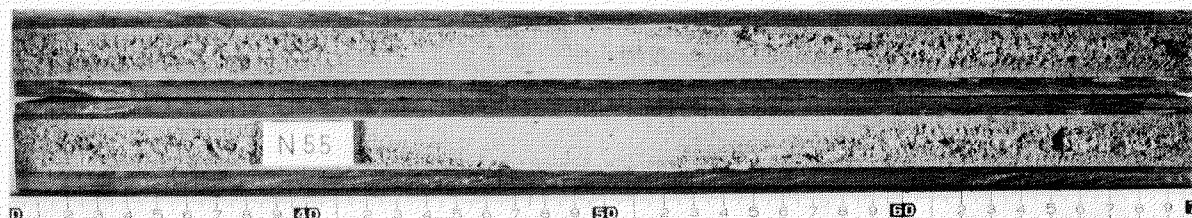


(試験温度 T = -80°C, 破断応力 $\sigma_{net} = 62.0 \text{ kg/mm}^2$)

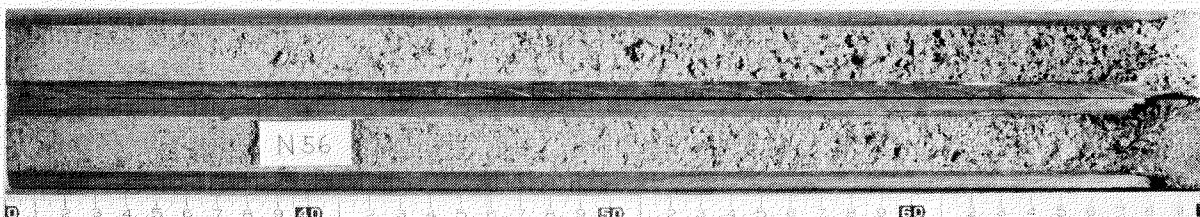
写真 3.1.6 表面ノックチ試験片破面状況
(K.E.N鋼, 素材, 板厚 3.0 mm)



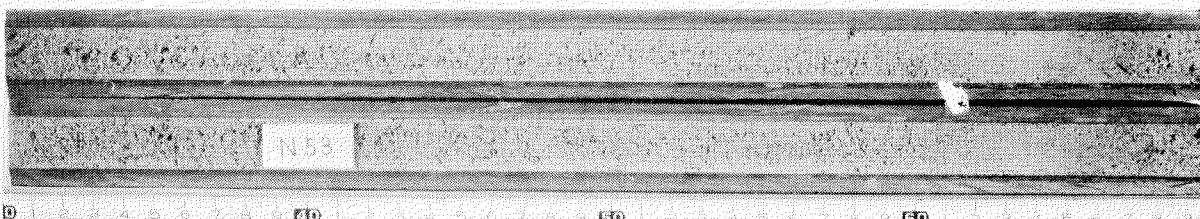
(試験温度 $T = -196^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 37.6 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -160^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 38.1 \text{ kg/mm}^2$)



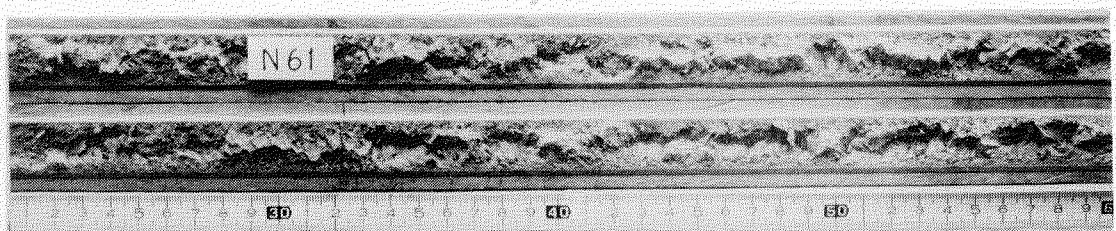
(試験温度 $T = -110^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 54.2 \text{ kg/mm}^2$)



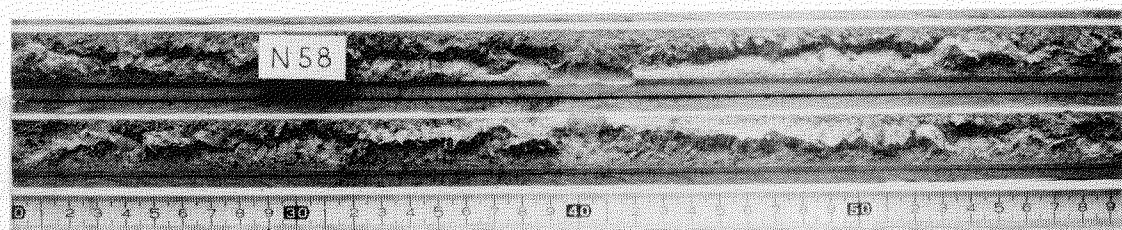
(試験温度 $T = -80^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 57.3 \text{ kg/mm}^2$)

写真 3.1.7 表面ノッチ試験片破面状況

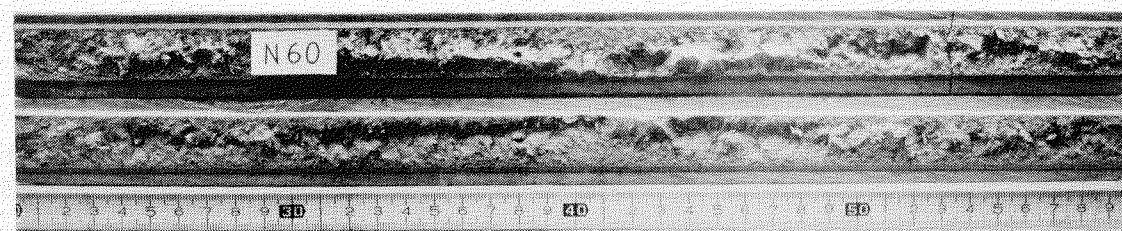
(K E N鋼, ノルマ材, 板厚3.0mm)



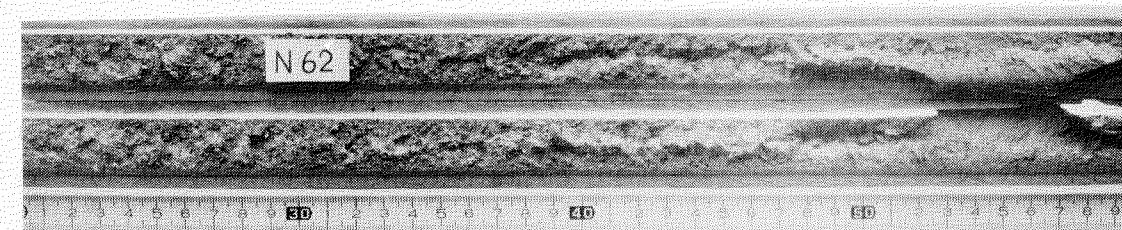
(試験温度 $T = -196^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 39.1 \text{ kg/mm}^2$)



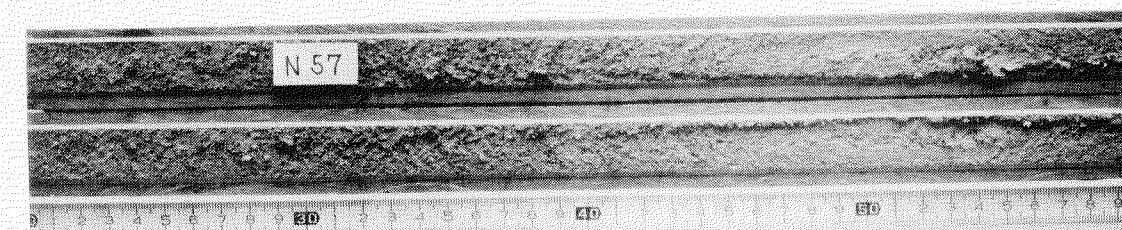
(試験温度 $T = -180^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 35.4 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -160^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 44.7 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -120^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 51.5 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度 $T = -80^{\circ}\text{C}$, 破断応力 $\sigma_{\text{net}} = 62.1 \text{ kg/mm}^2$)

写真 3.18 表面ノックチ試験片破面状況
(K E N鋼, B処理材 0%加工材, 板厚 3.0mm)

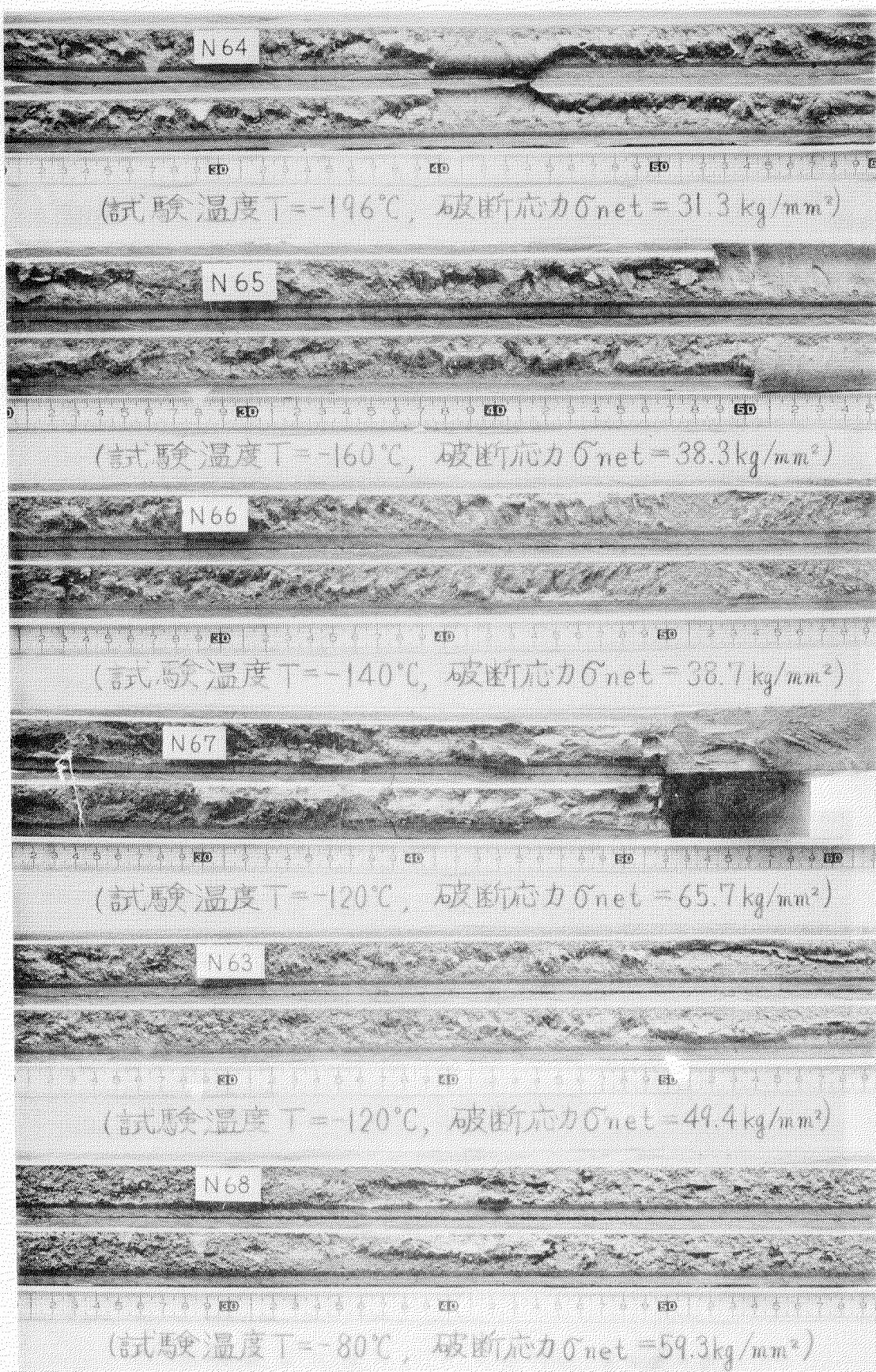


写真3.1.9 表面ノックの試験片破面状況

(K E N鋼, B処理材3%加工材, 板厚3.0mm)

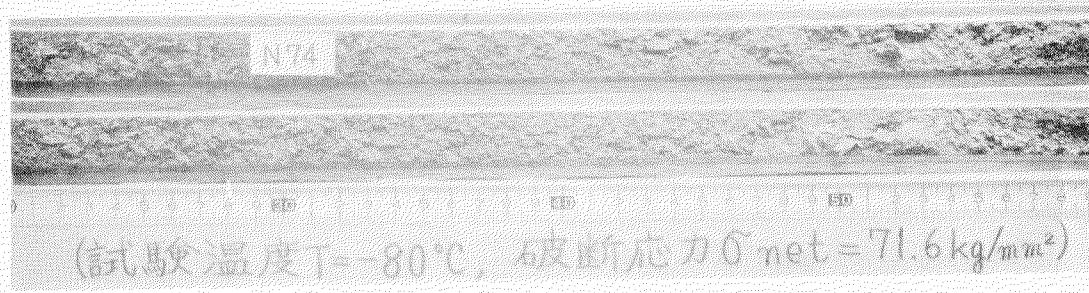
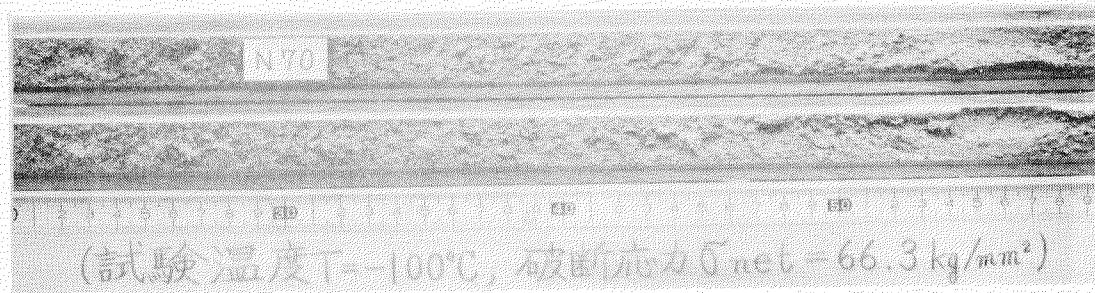
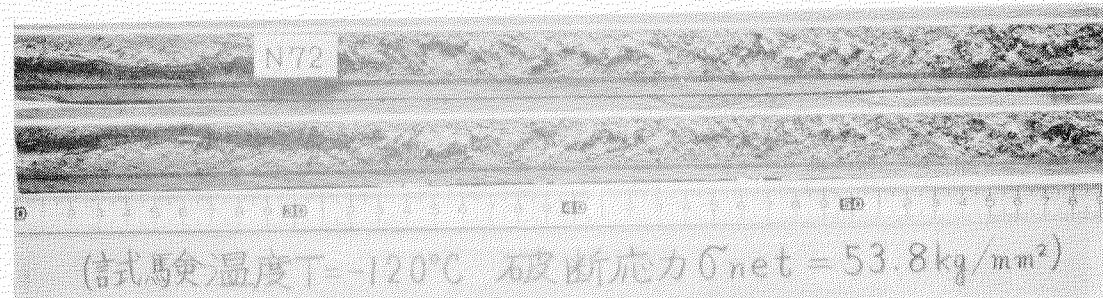
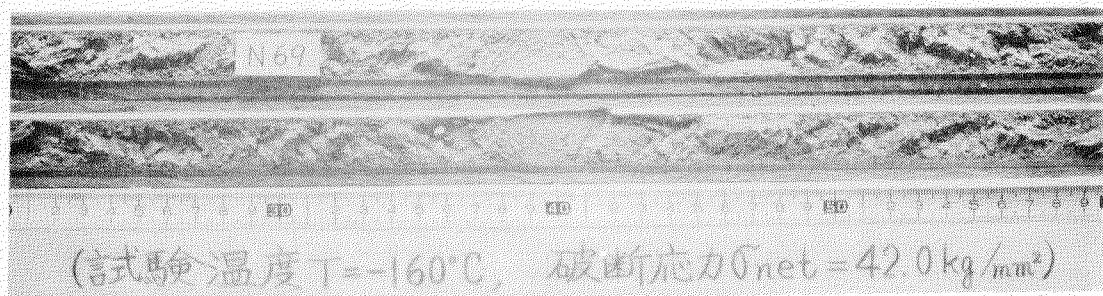
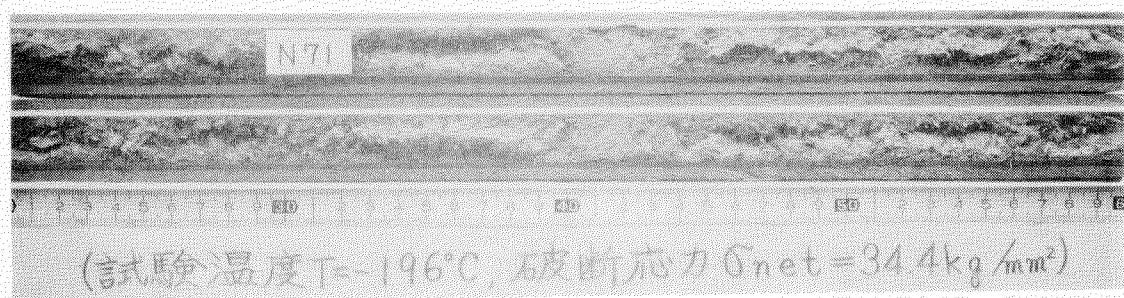


写真 3-2-0 表面ノックの試験片破面状況
(KBN鋼, B処理材 5%加工材, 板厚 3.0 mm)

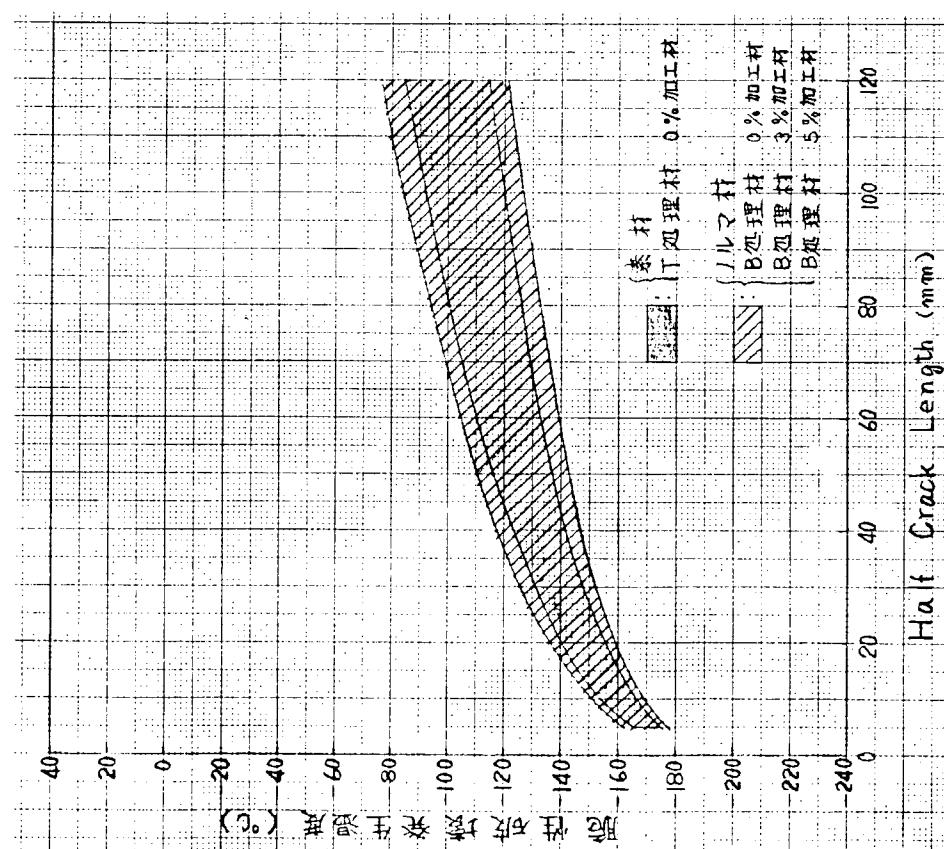


図 3.6.4 使用応用 = $1/2 \sigma_y$ における脆性破壊発生特性
(K5E鋼, 板厚 3.0 mm)

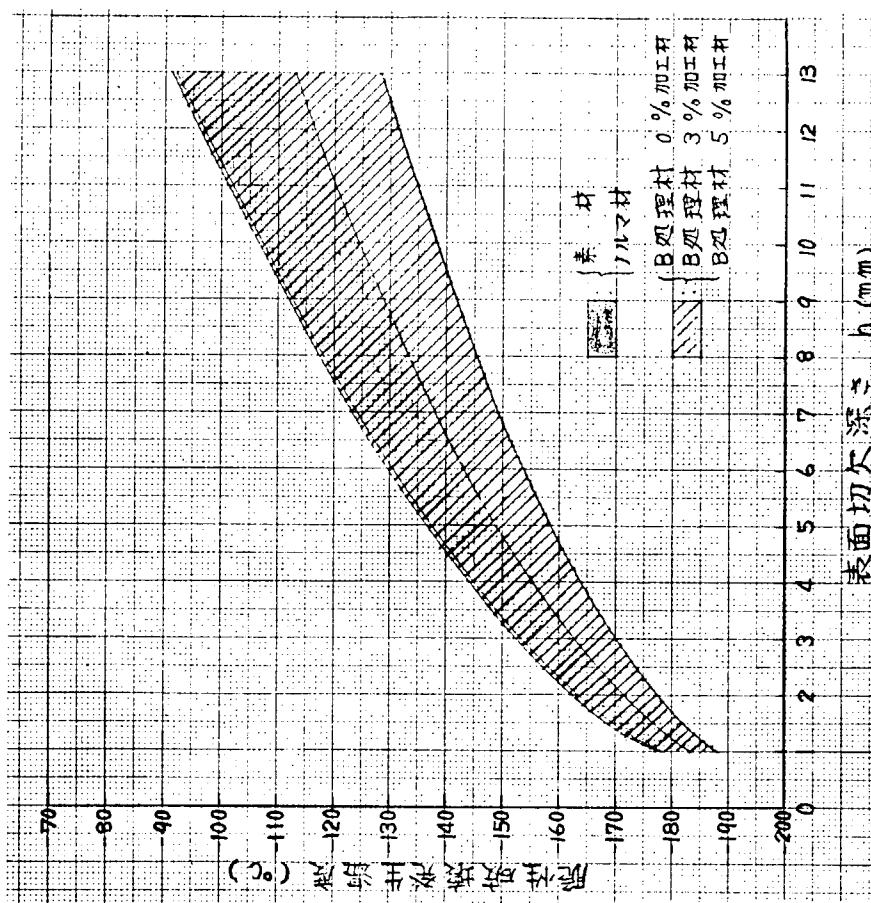


図 3.6.5 無限板厚の供試材に両側表面切欠きがある場合の許容
限界切欠き深さと脆性破壊発生温度の関係
(K5E鋼 使用応力 = $1/2 \sigma_y$)

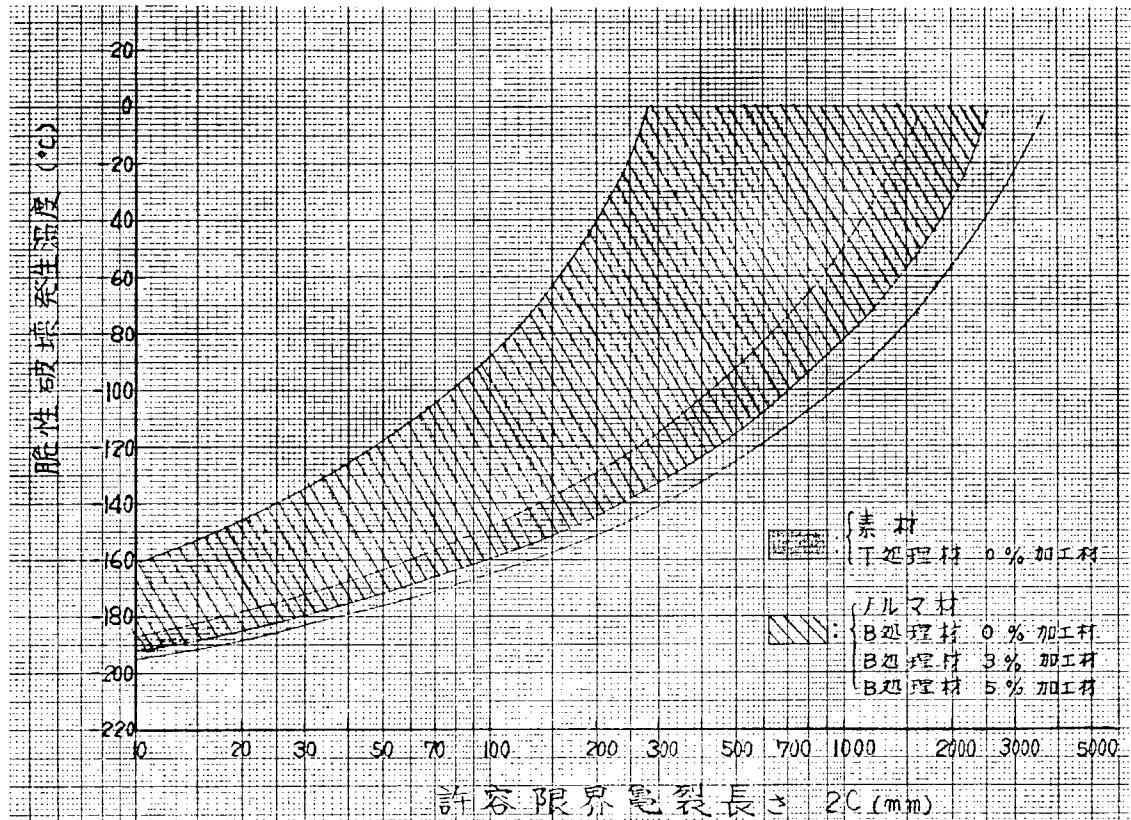


図3.6.6 使用応力 = 16.0 kg/mm^2 における脆性破壊発生特性

(K 5 E鋼, 板厚 30 mm).

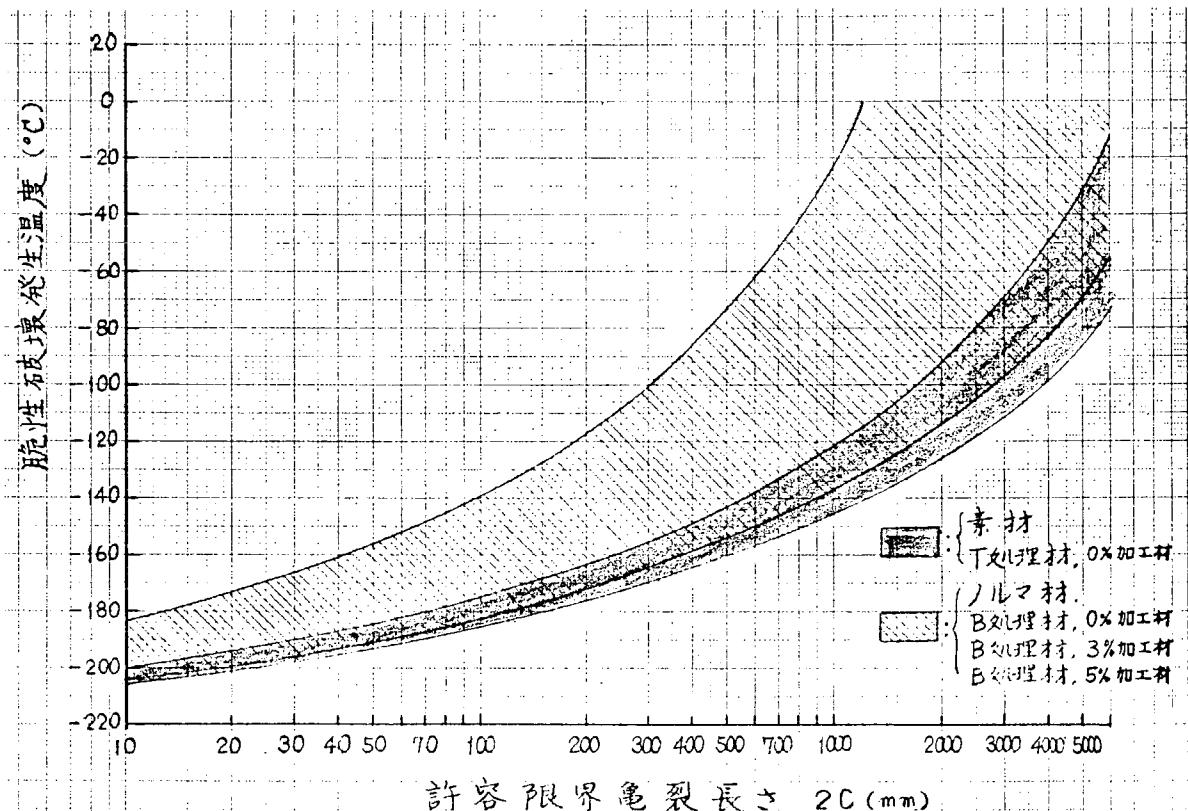


図3.6.7 使用応力 = 8.0 kg/mm^2 における脆性破壊発生特性

(K 5 E鋼, 板厚 30 mm)

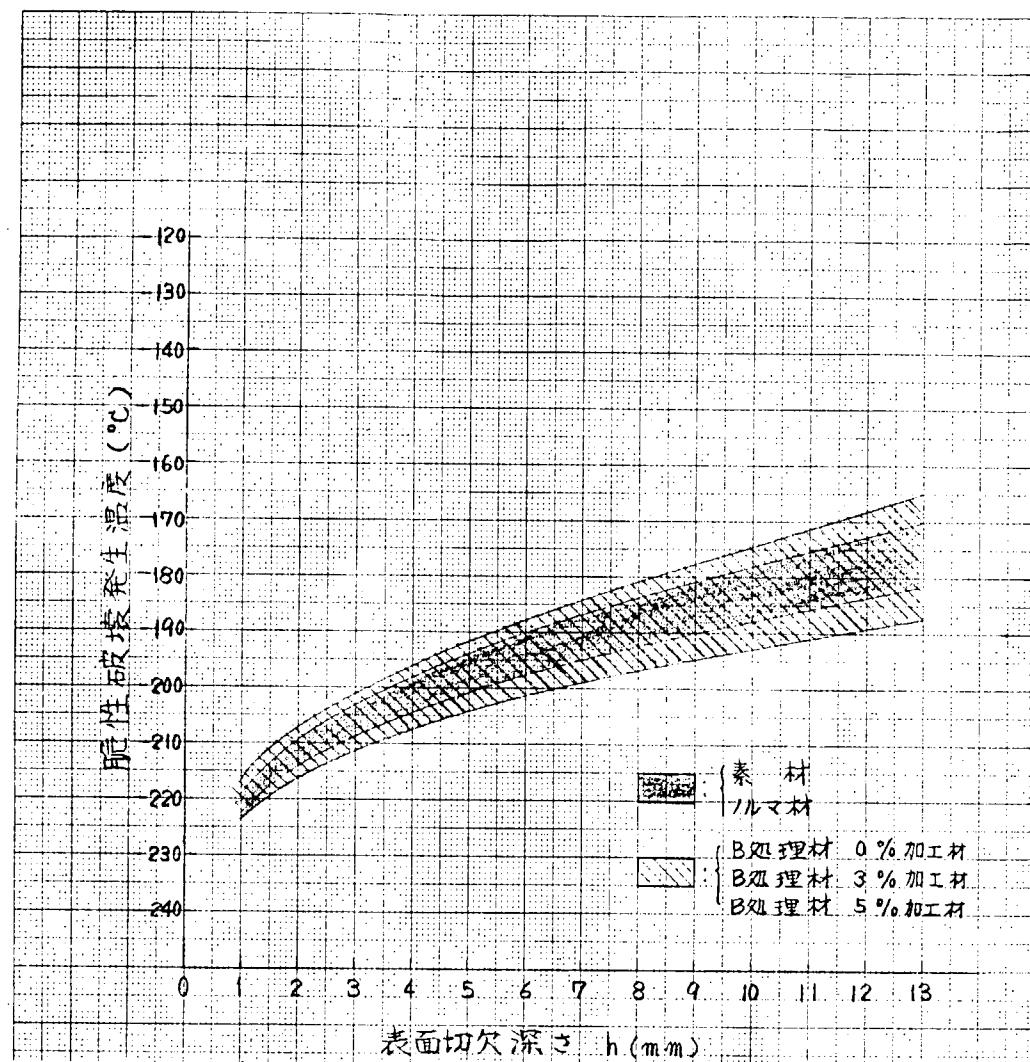


図 3.6.8 無限板厚の供試材に両側表面切欠きがある場合

の許容限界切欠き深さと脆性破壊発生温度の関係

(K E N 鋼 , 使用応力 = 12.5 kg/mm²)

表 3.9 許容亀裂長さと発生限界温度

(溶接残留応力等を考慮した場合試験結果を+60°C補正)

(鋼種: K5E鋼)

(使用応力: 16.0 Kg/mm², 8.0 Kg/mm²)

材 料	許容亀裂 履 歴	応 力	16.0 Kg/mm ²				8.0 Kg/mm ²				条件 件
			100 mm	60 mm	30 mm	100 mm	60 mm	30 mm	100 mm	60 mm	
K5E鋼	素 材	-148 °C	-160 °C	-172 °C	-175 °C	-182 °C	-185 °C	-190 °C	-192 °C	-195 °C	亀裂発生限界温度 (°C)
		{	{	{	{	{	{	{	{	{	
	T 0%加工材	-165	-174	-183	-186	-186	-188	-192	-192	-195	
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
K5E鋼	J 0%加工材	-88	-111	-134	-139	-152	-156	-166	-166	-166	限界温度 (°C)
		{	{	{	{	{	{	{	{	{	
	B 3%加工材	-160	-169	-180	-182	-182	-188	-190	-190	-198	
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	

表 3.10 許容亀裂長さと発生限界温度

(鋼種: K5E鋼)

(使用応力: 16.0 Kg/mm², 8.0 Kg/mm²)

材 料	許容亀裂 履 歴	応 力	16.0 Kg/mm ²				8.0 Kg/mm ²				条件 件
			100 mm	60 mm	30 mm	100 mm	60 mm	30 mm	100 mm	60 mm	
K5E鋼	素 材	-88 °C	-148 °C	-160 °C	-172 °C	-175 °C	-182 °C	-185 °C	-190 °C	-192 °C	亀裂発生限界温度 (°C)
		{	{	{	{	{	{	{	{	{	
	T 0%加工材	-105	-114	-123	-123	-123	-126	-132	-132	-138	
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
K5E鋼	J 0%加工材	-28	-51	-84	-84	-84	-84	-92	-92	-106	限界温度 (°C)
		{	{	{	{	{	{	{	{	{	
	B 3%加工材	-28	-51	-84	-84	-84	-84	-92	-92	-106	
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	

表 3.1.1 許容亀裂深さと発生限界温度

(鋼種: KEN鋼)

(使用応力: $1.2.5 K_q / \text{mm}^2$)

材 料	許容 亀 裂 深 さ	応 力	1.2.5 K_q / mm^2			条件
			5 mm	3 mm	1 mm	
K E N 鋼	素 材	-194	-203	-219	-222	亀裂発生限界温度
	ノルマ材	{	{	{	{	(C)
		-201	-209	-222		
K E N 鋼	B 处理材 0%加工材	-192	-201	-216	-224	
	B 处理材 3%加工材	{	{	{		
	B 处理材 5%加工材	-204	-211	-224		

表 3.1.2 許容亀裂深さと発生限界温度

(溶接残留応力を考慮した場合試験結果を+60°C補正)

(鋼種: KEN鋼)

(使用応力: $1.2.5 K_q / \text{mm}^2$)

材 料	許容 亀 裂 深 さ	応 力	1.2.5 K_q / mm^2			条件
			5 mm	3 mm	1 mm	
K E N 鋼	素 材	-134	-143	-159	-162	亀裂発生限界温度
	ノルマ材	{	{	{	{	(C)
		-141	-149	-151	-164	
K E N 鋼	B 处理材 0%加工材	-132	-141	-156	-164	
	B 处理材 3%加工材	{	{	{	{	
	B 处理材 5%加工材	-162	-151	-151	-164	

図 3.6.9 標準型二重引張試験片

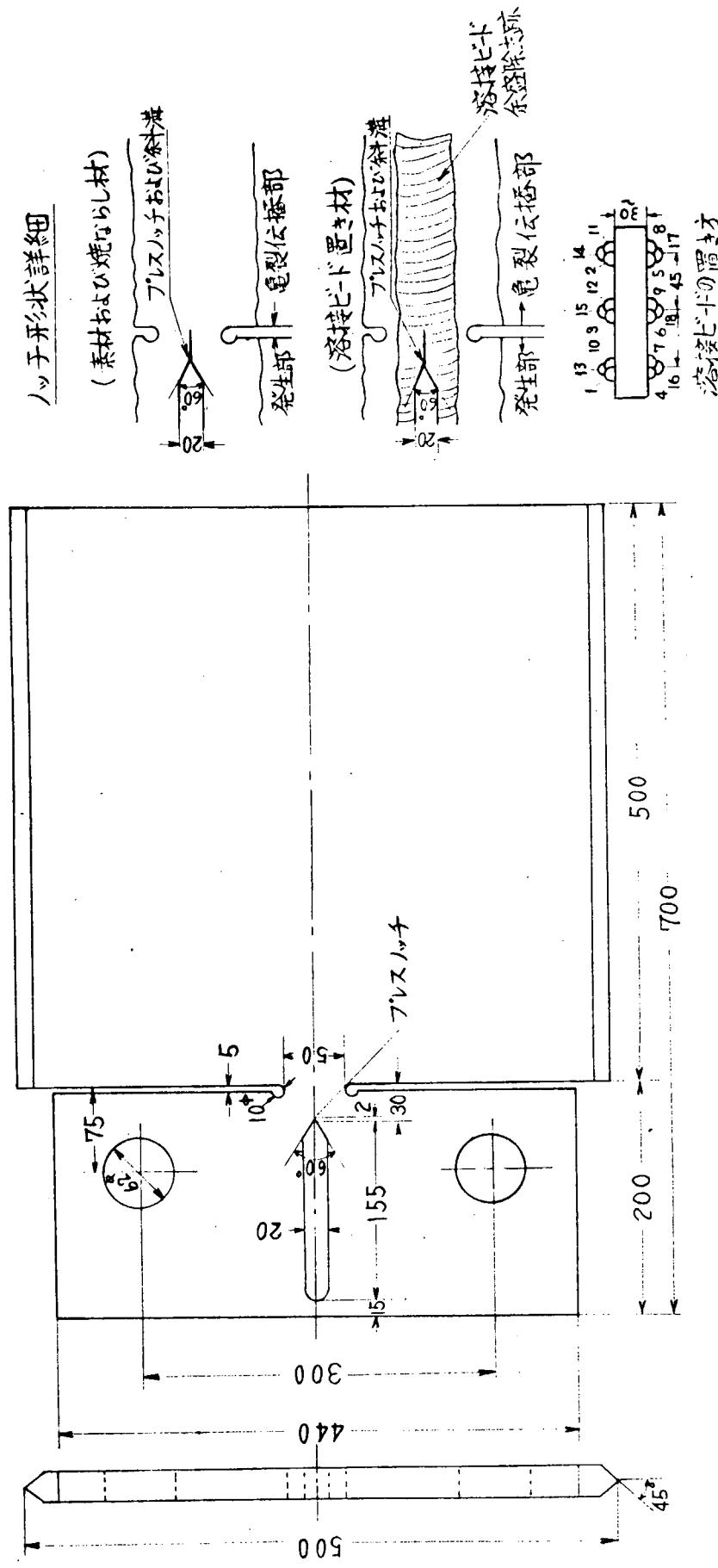


表 3.13 二重引張試験結果一覧
(K5E鋼, 板厚30mm)

鋼種	材料 履歴	試験號 符号	板厚 <i>t</i> (mm)	試験板 幅 <i>B</i> (mm)	試験板 幅 <i>B</i> (kg/mm ²)	屈曲長 <i>C</i> (mm)	$\gamma = \frac{C}{B}$	$f(\gamma) \cdot \sigma_g$ (kg/mm ²)	K_c (kg/mm ²)	停止温度 <i>T</i> (°C)	10^3 $\frac{T_k}{T}$ (°K ⁻¹)	備考
K5E	素材	T 3	30	500	5							伝播せず
		T 4	30	500	5							伝播せず
		T 1	30	500	10	316	0.632	12.4	392	-14	3.87	
		T 2	30	500	20	260	0.520	22.8	652	-8	3.77	
	JVR材	T 8	30	500	8							伝播せず
		T 5	30	500	10	367	0.734	14.0	477	6	3.59	
		T 6	30	500	15	325	0.650	19.0	606	16	3.46	
		T 7	30	500	20	305	0.610	24.4	755	16	3.46	
	B処理材 O%加工材	T 9	30	500	10							伝播せず
		T 11	30	500	15							伝播せず
		T 12	30	500	15							伝播せず
		T 10	30	500	20	322	0.644	25.2	801	22	3.39	
		T 13	30	500	20							伝播せず
	B処理材 3%加工材	T 14	30	500	15							伝播せず
		T 15	30	500	18							伝播せず
		T 16	30	500	20							伝播せず
		T 17	30	500	20	280	0.560	23.4	695	16	3.46	
	T処理材 0%加工材	T 153	30	500	15							伝播せず
		T 154	30	500	18							伝播せず
		T 155	30	500	20							伝播せず
		T 157	30	500	20							
		T 156	30	500	25	330	0.660	32.0	1030	13	3.50	

注) 1. σ_g = gross stress * 母材中にて亀裂停止

$$2. f(\gamma) = \sqrt{\frac{2}{\pi \gamma}} \tan \frac{\pi \gamma}{2}$$

$$3. K_c = f(\gamma) \cdot \sigma_g \cdot \sqrt{\pi C}$$

表 3.14 二重引張試験結果一覧
(KEN鋼, 板厚 30mm)

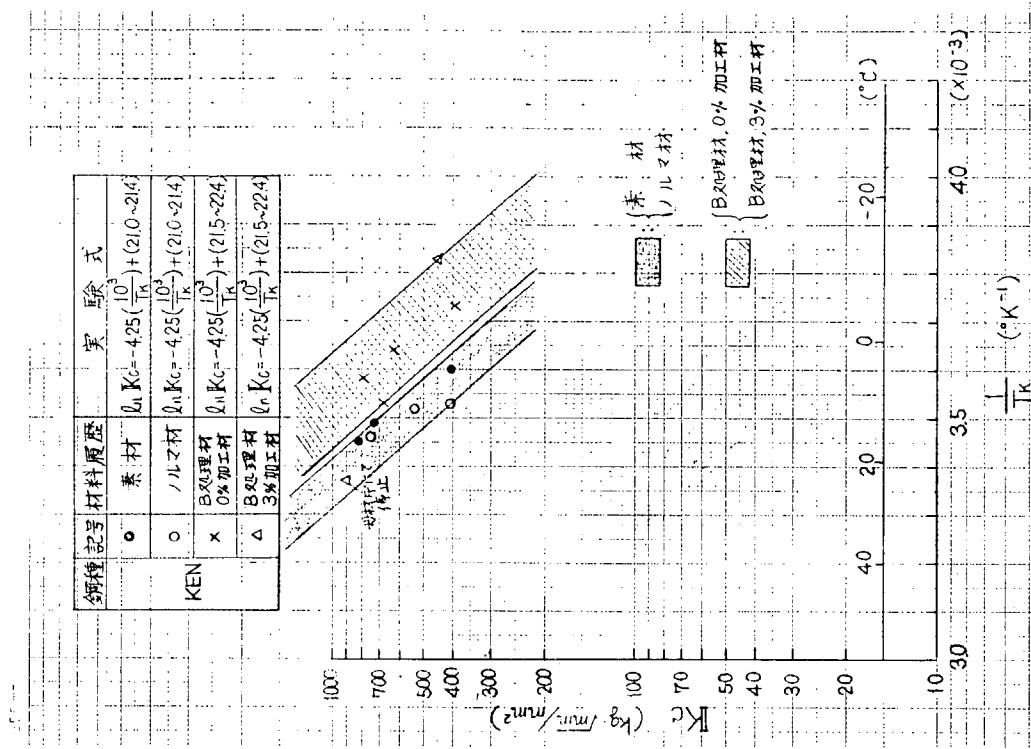
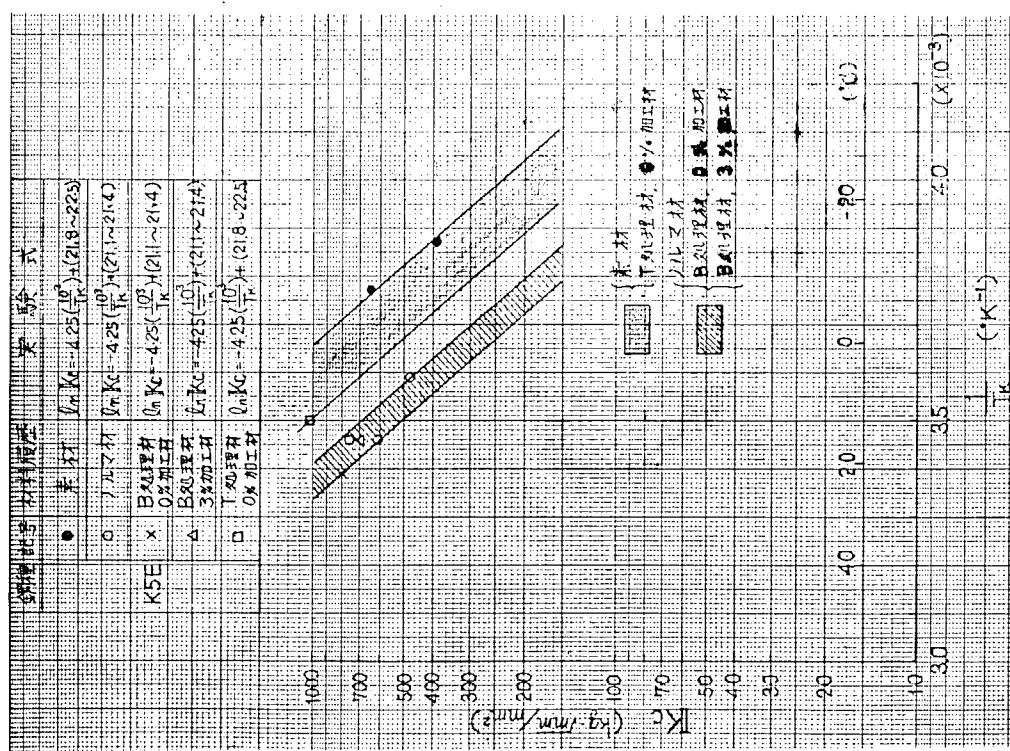
鋼種	材料履歴符号	試験板厚t (mm)	試験幅B (mm)	試験平均応力σ _g (kg/mm ²)	試験長さC (mm)	γ - C/B	f _{cr} ・σ _g (kg/mm ²)	K _C (kg/mm ²)	停止温度T (°C)	10 ³ T _K (°K ⁻¹)	備考
KEN	素材	T 34	30	500	5						伝播せず
		T 33	30	500	10	325	0.650	12.7	406	5	3.60
		T 35	30	500	15	400	0.800	23.4	829	17	3.45
		T 36	30	500	20	296	0.592	24.0	734	14	3.49
	川材	T 39	30	500	8						伝播せず
		T 40	30	500	10	324	0.648	12.7	406	10	3.53
		T 38	30	500	15	287	0.574	17.9	535	11	3.52
		T 37	30	500	20	303	0.606	24.4	753	16	3.46
	B ₀ 処理 0%加工材	T 44	30	500	15						伝播せず
		T 45	30	500	15	262	0.524	17.3	494	-5	3.73
		T 41	30	500	18	283	0.566	20.2	633	2	3.64
		T 43	30	500	20	273	0.546	23.2	679	10	3.53
		T 42	30	500	25	250	0.500	28.3	792	6	3.58
	B ₃ 処理 3%加工材	T 46	30	500	12						伝播せず
		T 50	30	500	12						伝播せず
		T 49	30	500	15						伝播せず
		T 47	30	500	15	232	0.464	16.7	450	-12	3.83
		T 48*	30	500	20	355	0.710	27.0	902	24	3.37

注) 1. σ_g = gross stress
 2. f_{cr} = $\sqrt{\frac{2}{\pi\gamma} \tan \frac{\pi\gamma}{2}}$
 3. K_C = f_{cr} · σ_g · √πC

*母材中に亀裂停止

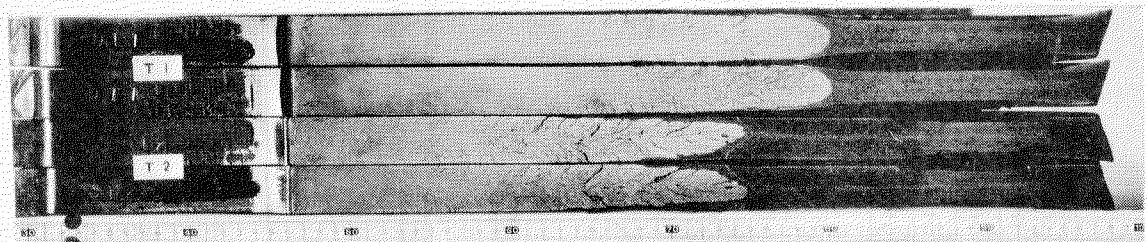
図 3.7.0 二重引張試験結果
(K5E銅, 板厚3.0mm)

図 3.7.1 二重引張試験結果
(KEN銅, 板厚3.0mm)

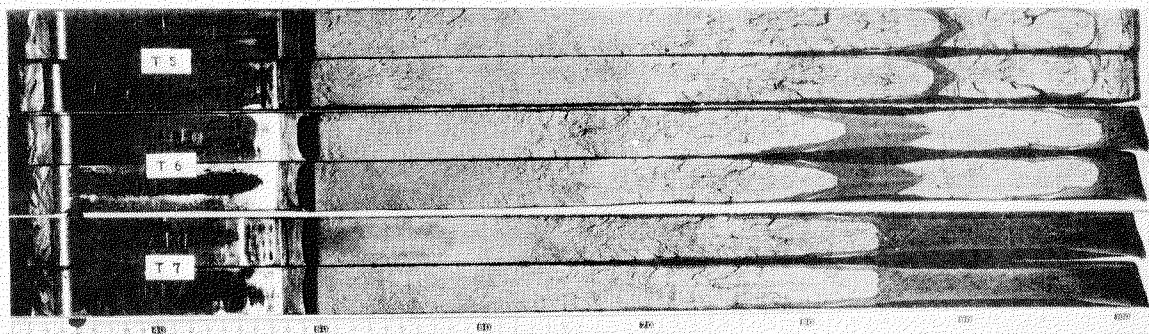


鋼種記号	材料履歴	実験式	
		σ_n	$K_c = -4.25(\frac{10^3}{T_K}) + (21.0 \sim 22.5)$
● 素材	○ ノルマ材	σ_n	$K_c = -4.25(\frac{10^3}{T_K}) + (21.0 \sim 22.5)$
○ ノルマ材	○ B240材, 0%加工材	σ_n	$K_c = -4.25(\frac{10^3}{T_K}) + (21.0 \sim 22.5)$
X K5E	× B240材, 0%加工材	σ_n	$K_c = -4.25(\frac{10^3}{T_K}) + (21.0 \sim 22.5)$
△ B240材, 3%加工材	△ B240材, 0%加工材	σ_n	$K_c = -4.25(\frac{10^3}{T_K}) + (21.0 \sim 22.5)$
□ B240材, 0%加工材	□ B240材, 3%加工材	σ_n	$K_c = -4.25(\frac{10^3}{T_K}) + (21.0 \sim 22.5)$

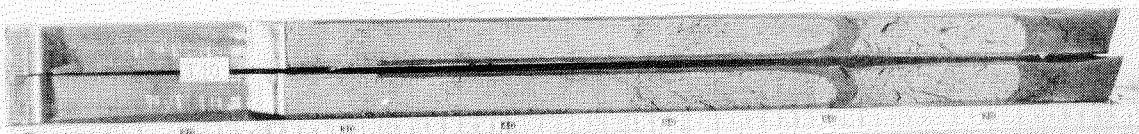
鋼種記号	材料履歴	実験式	
		σ_n	$K_c = -4.25(\frac{10^3}{T_K}) + (21.0 \sim 22.5)$
● 素材	○ ノルマ材	σ_n	$K_c = -4.25(\frac{10^3}{T_K}) + (21.0 \sim 22.5)$
○ ノルマ材	○ B240材, 0%加工材	σ_n	$K_c = -4.25(\frac{10^3}{T_K}) + (21.0 \sim 22.5)$
X KEN	× B240材, 0%加工材	σ_n	$K_c = -4.25(\frac{10^3}{T_K}) + (21.0 \sim 22.5)$
△ B240材, 3%加工材	△ B240材, 0%加工材	σ_n	$K_c = -4.25(\frac{10^3}{T_K}) + (21.0 \sim 22.5)$
□ B240材, 0%加工材	□ B240材, 3%加工材	σ_n	$K_c = -4.25(\frac{10^3}{T_K}) + (21.0 \sim 22.5)$



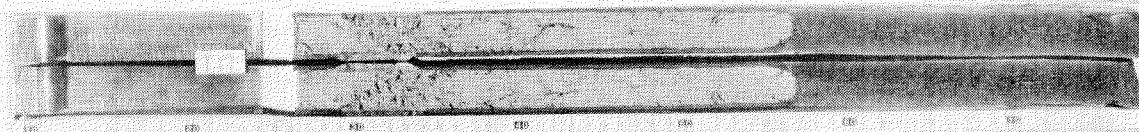
素 材



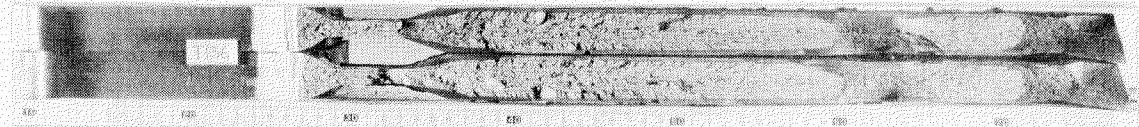
ノ ル マ 材



B処理材 0%加工材



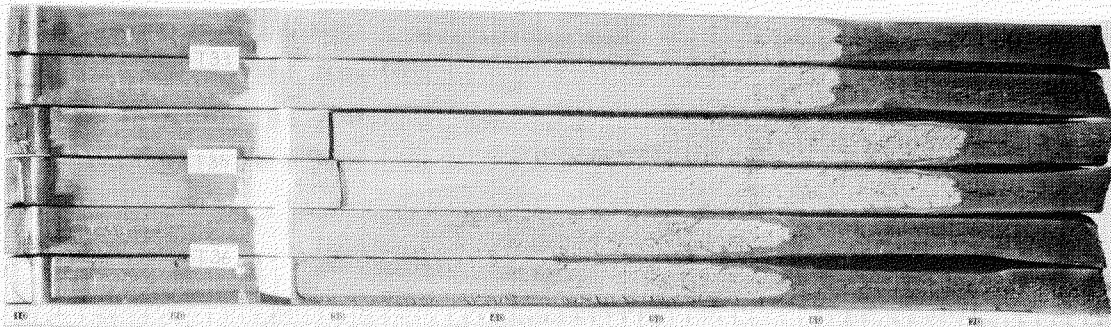
B処理材 3%加工材



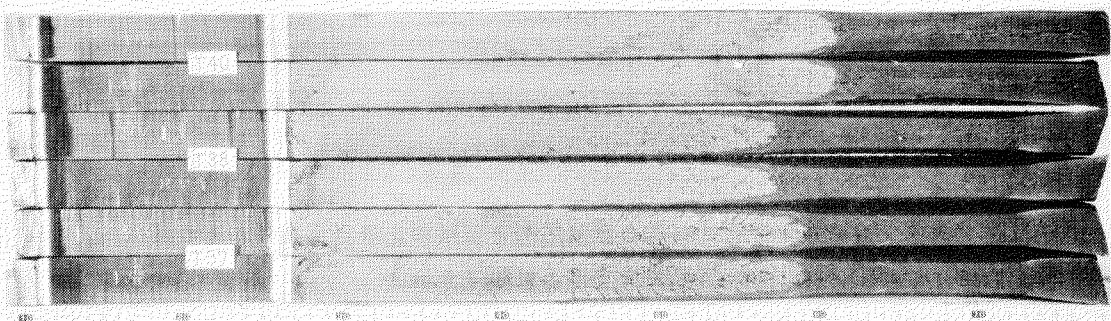
T処理材 0%加工材

写 真 3. 2 1 二 重 引 張 試 験 片 破 面 状 況

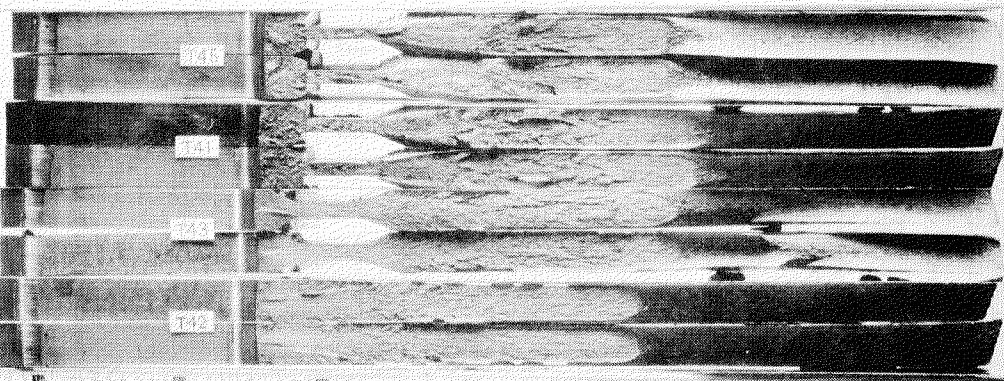
(K 5-E 鋼 , 板 厚 3.0 mm)



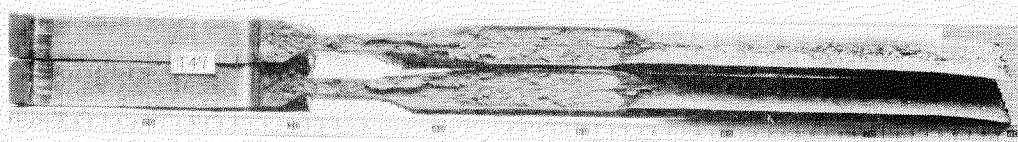
素 材



ノルマ 材



B処理材 0% 加工材



B処理材 3% 加工材

写 真 3. 2 2 二 重 引 張 試 験 片 破 面 状 況

(K E N 鋼 , 板 厚 3.0 mm)

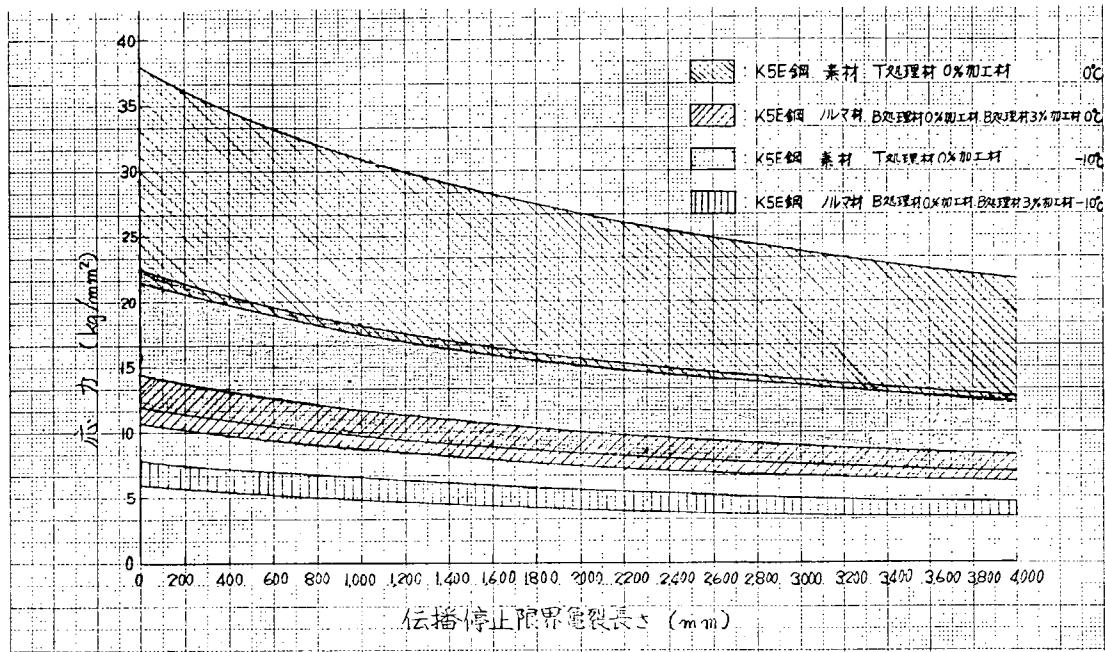


図 3.7.2 温度一定とした場合の使用応力と伝播停止限界亀裂長さとの関係
(K5E鋼, 板厚 30 mm)

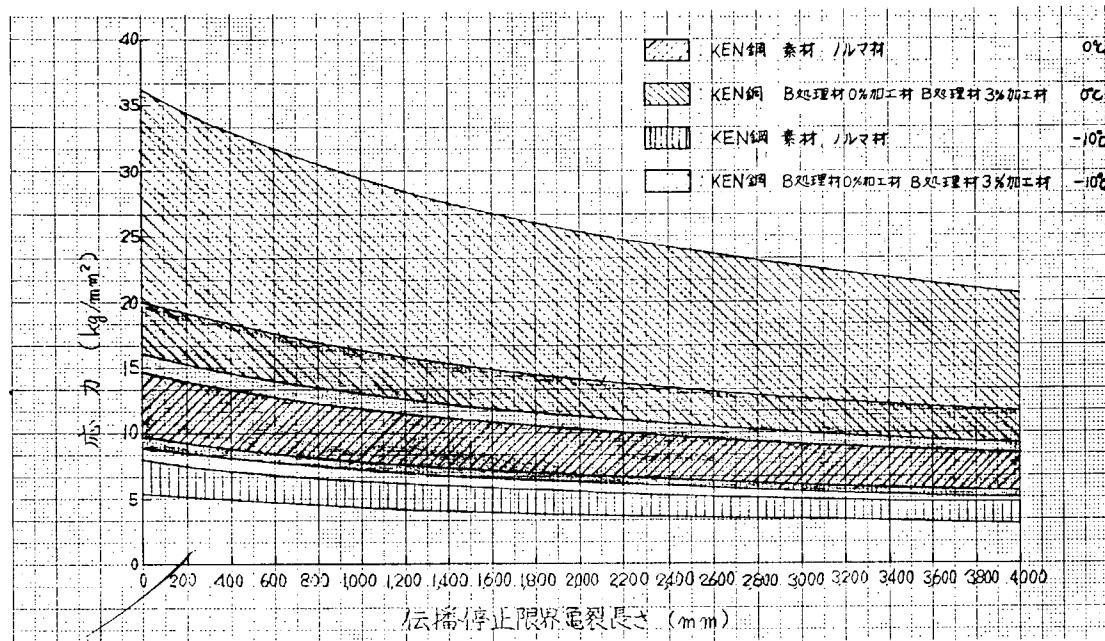


図 3.7.3 温度一定とした場合の使用応力と伝播停止限界亀裂長さとの関係
(KEN鋼, 板厚 30 mm)

表3.15 停止限界亀裂長さを定めた場合の使用限界温度

(鋼種: K 5 E鋼)

(使用応力: 16.0 Kg/mm², 8.0 Kg/mm²)

材 料 履 歴 値	応 力 距 離 IK_c	16.0 Kg/mm ²				8.0 Kg/mm ²				条 件
		10m	5m	3m	1m	10m	5m	3m	1m	
K 5 E 鋼 素 材	-0.2°C	-5.6°C	-7.7°C	-10.9°C	-11.8°C	-16.1°C	-18.7°C	-22.7°C		亀 裂 停 止 限 界 温 度 (°C)
	11.3	5.4	3.1	-1.5	-1.3	-5.9	-8.7	-13.0		
K 5 E 鋼 ノルマ材	19.3	13.1	10.7	5.8	6.0	1.1	-1.8	-6.3		
	1	1	1	1	1	1	1	1		
K 5 E 鋼 B 处理材 0 % 加工材	19.3	13.1	10.7	5.8	6.0	1.1	-1.8	-6.3		
	25.5	19.0	16.5	11.4	11.7	6.5	3.5	-1.2		
K 5 E 鋼 B 处理材 3 % 加工材	19.3	13.1	10.7	5.8	6.0	1.1	-1.8	-6.3		
	25.5	19.0	16.5	11.4	11.7	6.5	3.5	-1.2		
K 5 E 鋼 T 处理材 0 % 加工材	-0.2	-5.6	-7.7	-10.9	-11.8	-16.5	-18.7	-22.7		
	11.3	5.4	3.1	-1.5	-1.3	-5.9	-8.7	-13.0		

表3.16 停止限界亀裂長さを定めた場合の使用限界温度

(鋼種: K EN鋼)

(使用応力: 12.5 Kg/mm², 8.0 Kg/mm²)

材 料 履 歴 値	応 力 距 離 IK_c	12.5 Kg/mm ²				8.0 Kg/mm ²				条 件
		10m	5m	3m	1m	10m	5m	3m	1m	
K E N 鋼 素 材	14.1°C	8.9°C	5.7°C	1.0°C	5.7°C	0.8°C	-2.2°C	-6.7°C		亀 裂 停 止 限 界 温 度 (°C)
	22.5	17.0	13.6	8.6	13.6	8.4	5.3	0.5		
K E N 鋼 ノルマ材	14.1	8.9	5.7	1.0	5.7	0.8	-2.2	-6.7		
	22.5	17.0	13.6	8.6	13.6	8.4	5.3	0.5		
K E N 鋼 B 处理材 0 % 加工材	-2.5	-7.1	-10.0	-14.2	-10.0	-14.4	-17.0	-21.0		
	12.3	7.3	4.0	0.6	4.0	-0.8	-3.7	-8.2		
K E N 鋼 B 处理材 3 % 加工材	-2.5	-7.1	-10.0	-14.2	-10.0	-14.4	-17.0	-21.0		
	12.3	7.3	4.0	0.6	4.0	-0.8	-3.7	-8.2		

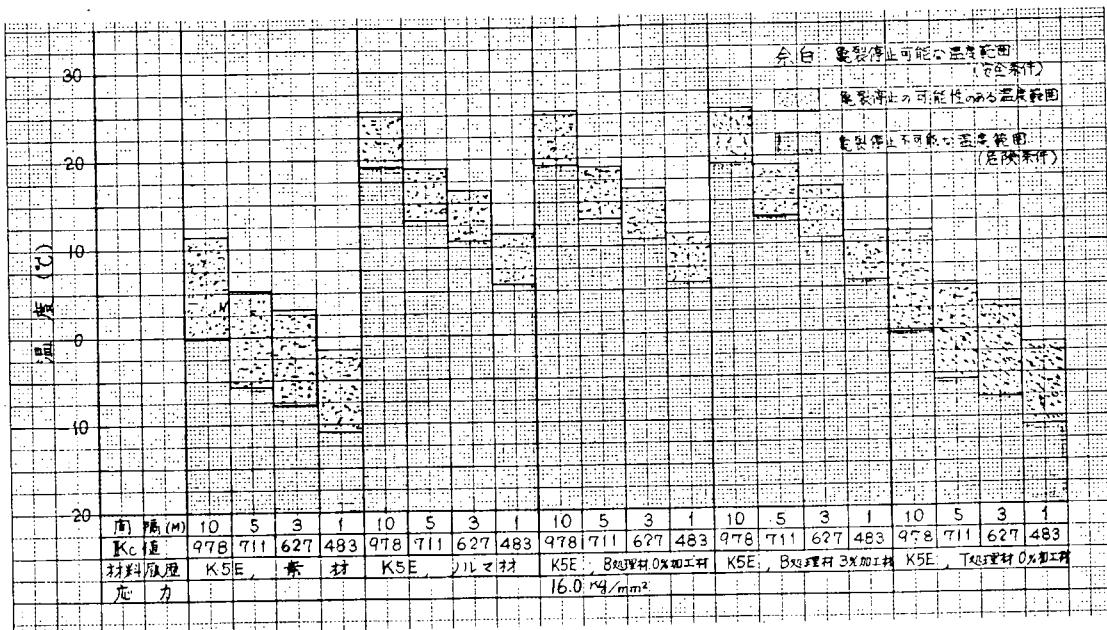


図 3.7.4 停止限界亀裂長さを定めた場合の使用限界温度

(K 5 E 鋼 , 使用応力 = 1 6. 0 kg / mm²)

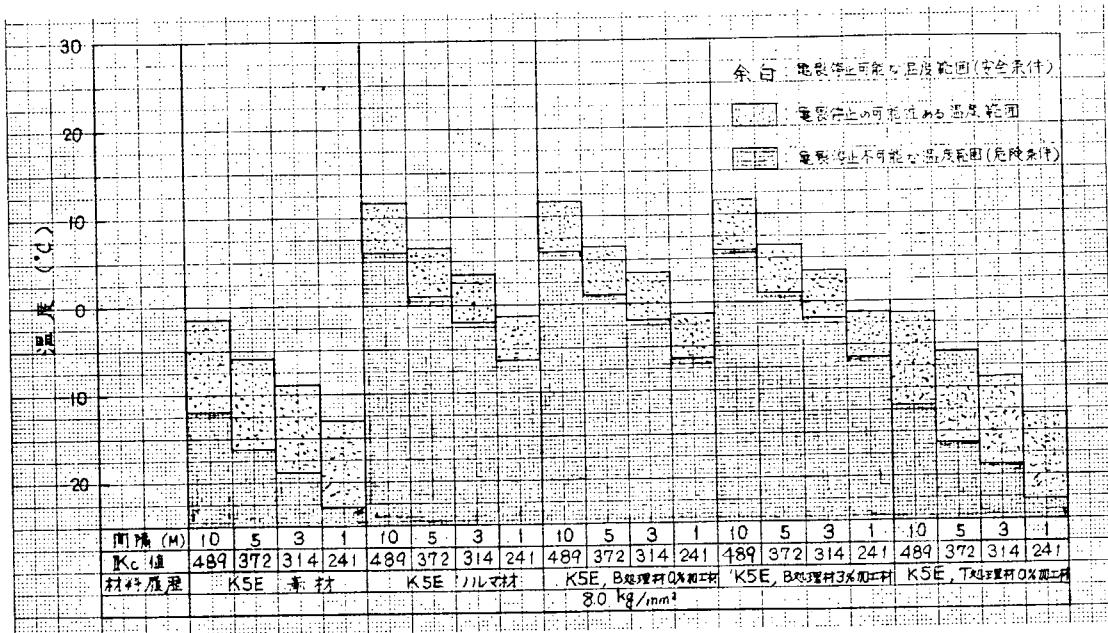


図 3.7.5 停止限界亀裂長さを定めた場合の使用限界温度

(K 5 E 鋼 , 使用応力 = 8. 0 kg / mm²)

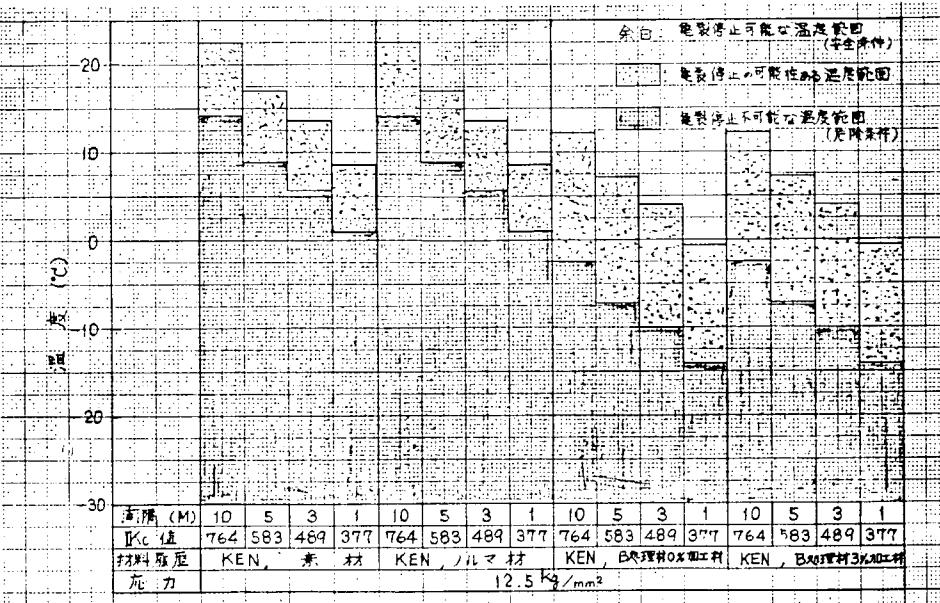


図 3.7.6 停止限界亀裂長さを定めた場合の使用限界温度
(KE-N鋼, 使用応力 = 12.5 kg/mm²)

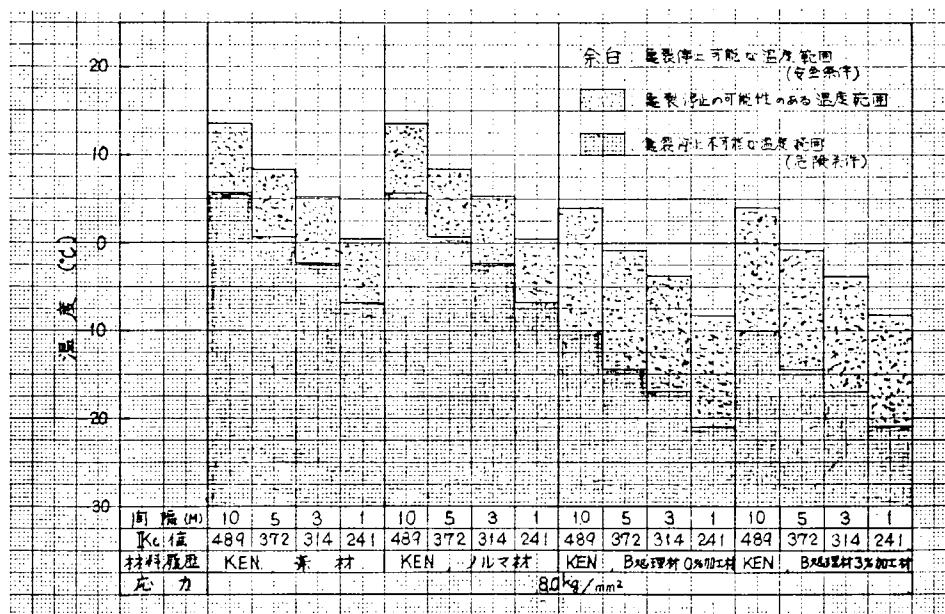


図 3.7.7 停止限界亀裂長さを定めた場合の使用限界温度
(KE-N鋼, 使用応力 = 8.0 kg/mm²)

表3.17 阿部が用いた供試材の化学成分ならびに機械的性質

Kind of Steel	Thickness (mm)	Chemical composition					Mechanical properties			
		C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Y. P. (kg/mm ²)	T. S. (kg/mm ²)	E (%)	BENDING TEST R=1.5T
Rimmed	1.6	0.19	TRACE	0.52	0.021	0.028	25.8	45.0	27	good

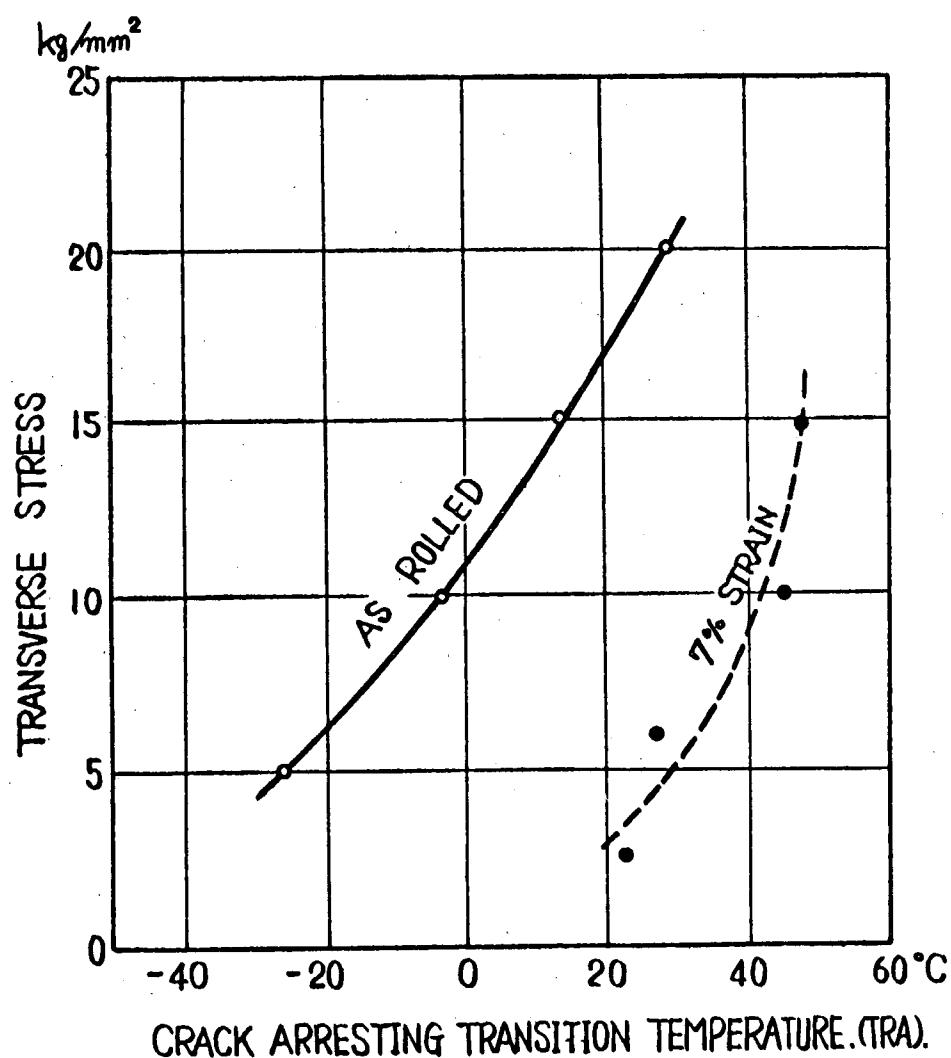


図3.7.8 二重引張試験結果に及ぼす冷間加工の影響による(阿部による)

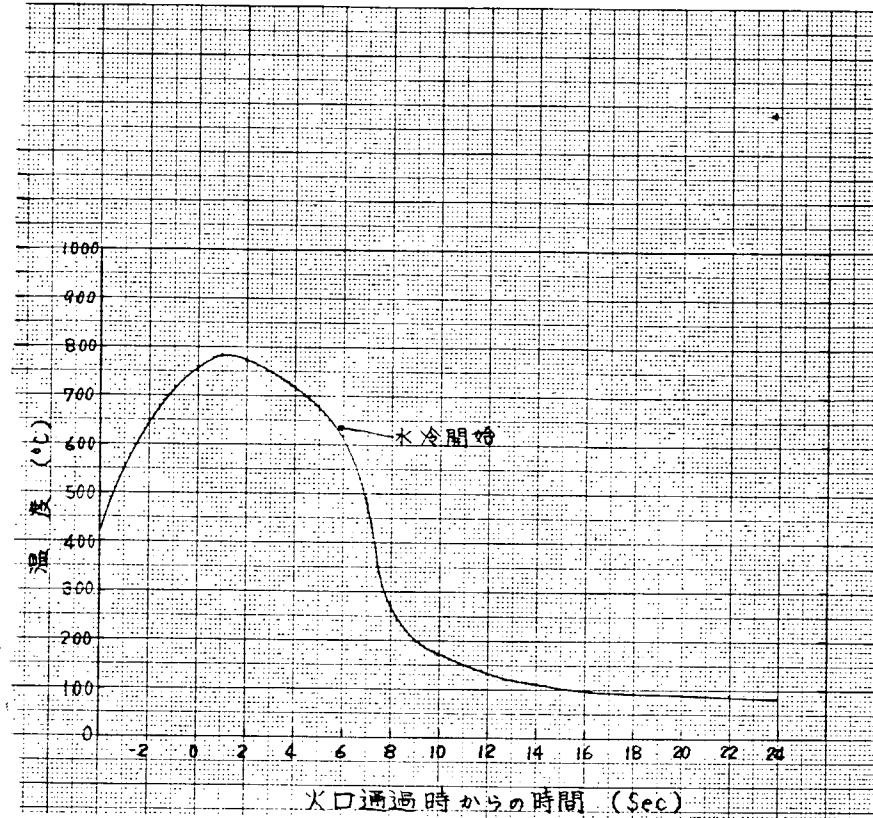


図 4.1 線状ガス加熱における加熱速度と最高加熱温度の関係

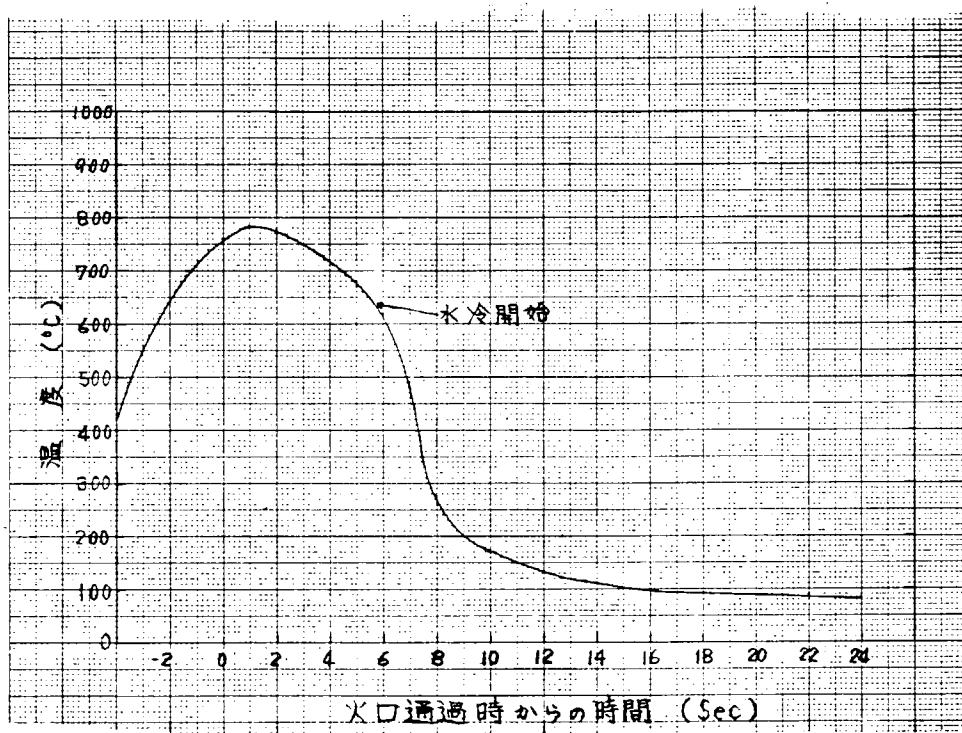


図 4.2 線状ガス加熱における冷却曲線の一例

(最高加熱温度 800°C→水冷)

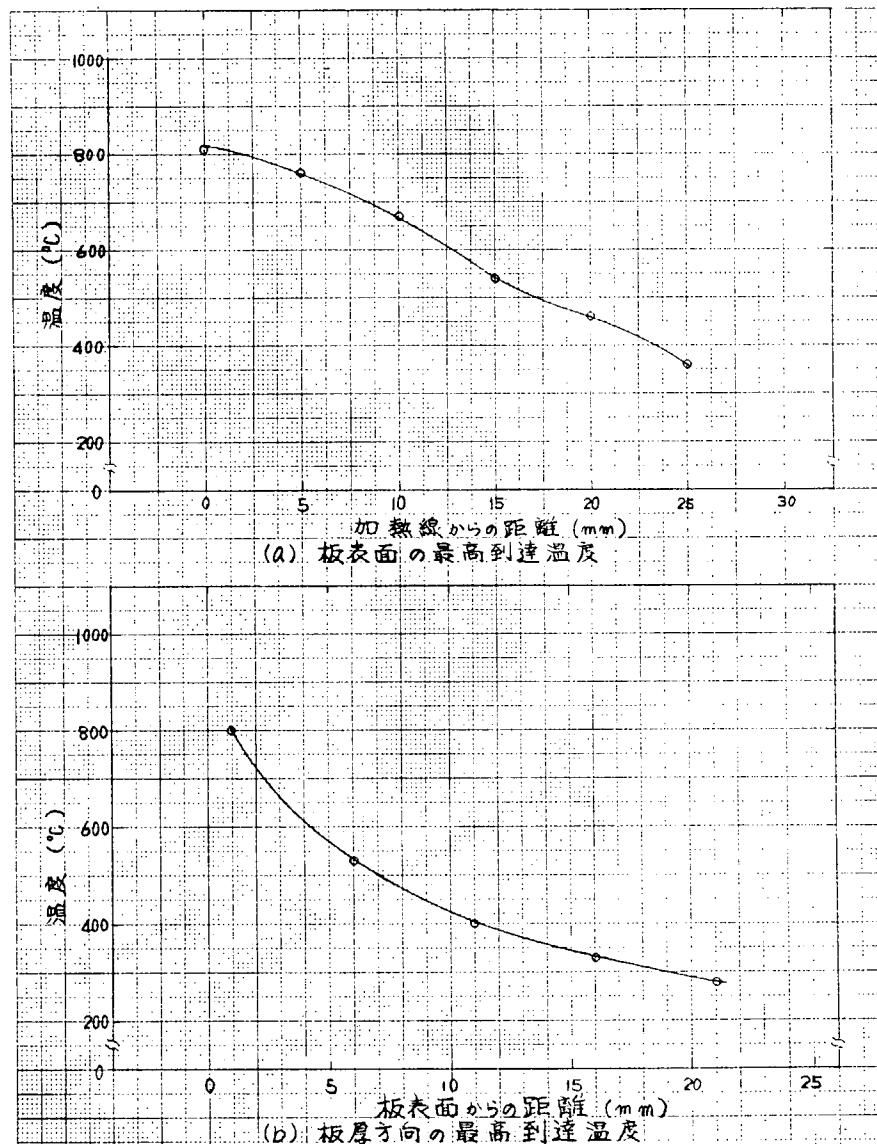
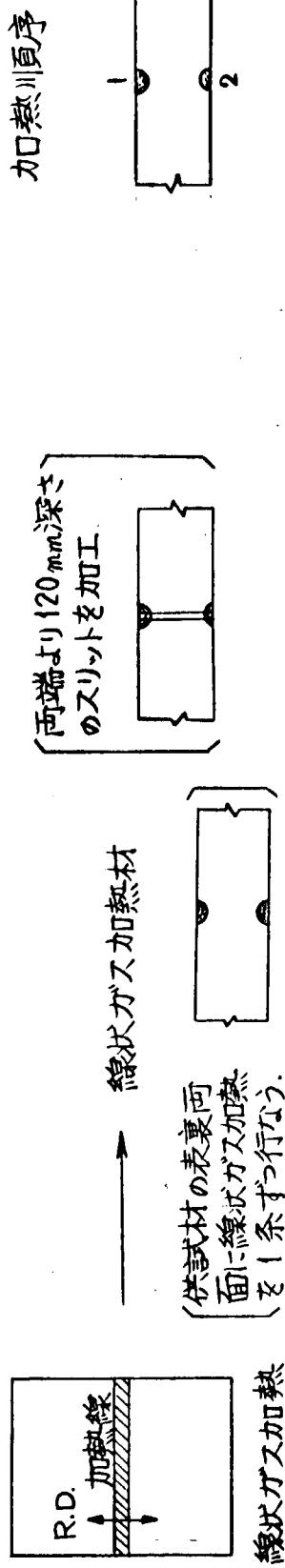


図 4.3 板厚方向および加熱線からの温度分布

ティーフ・ノーチ試験



二重引張試験

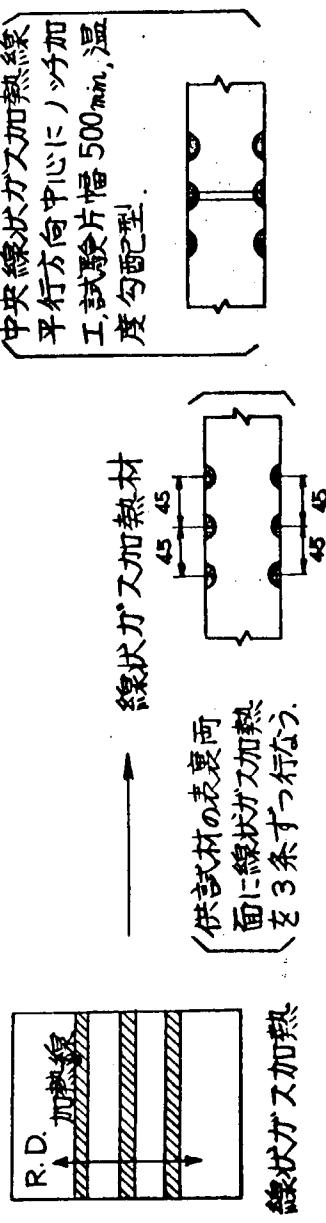


図 4.4 "船体用 50キロ級高張力鋼の塑性におけるガス加熱条件の影響に関する研究" 試験片製作要領

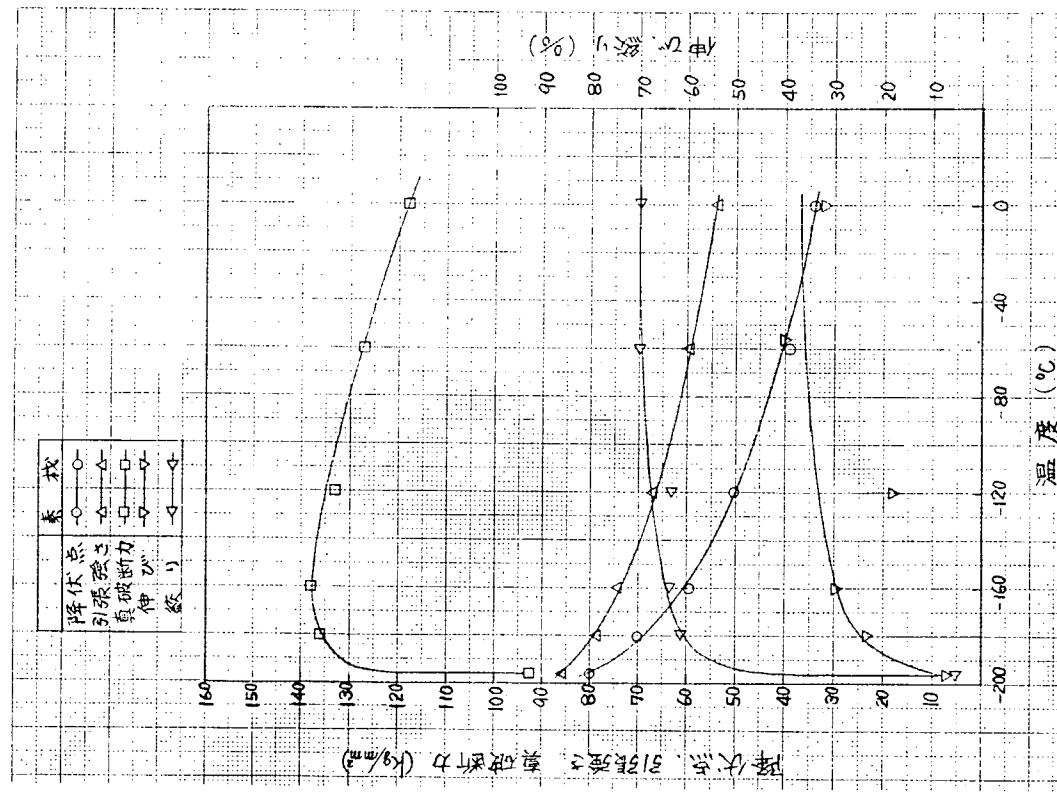


図 4.6 低温引張試験結果
(K5A鋼, 板厚30mm)

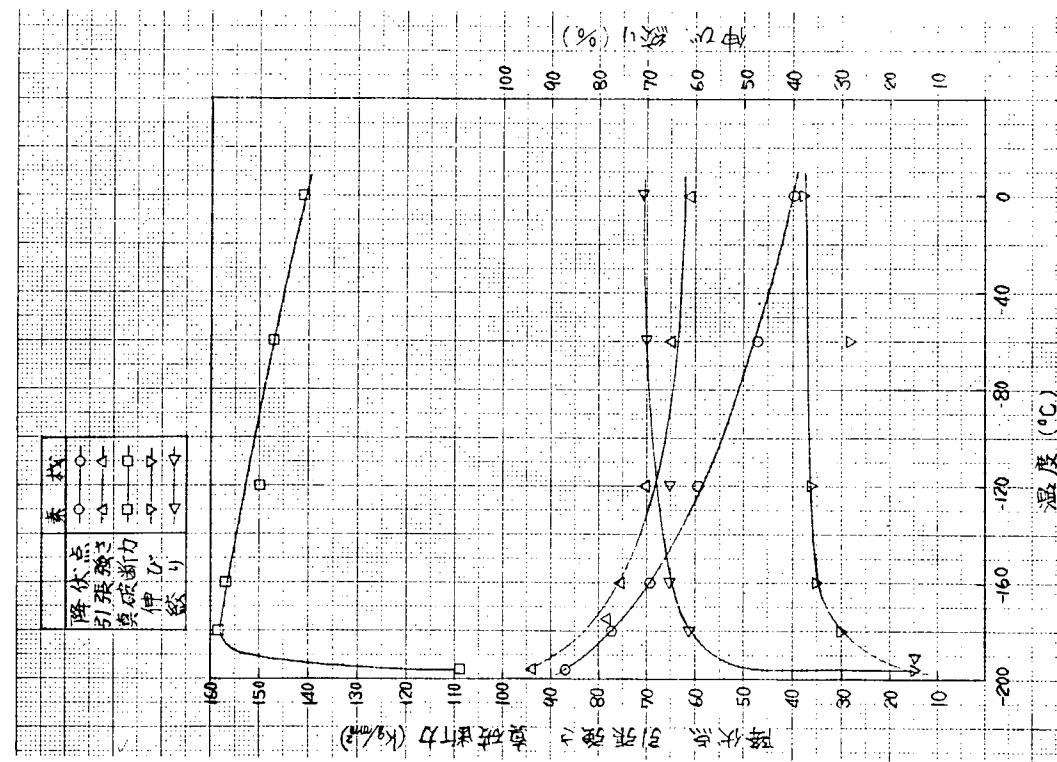


図 4.7 低温引張試験結果
(K5D鋼, 板厚30mm)

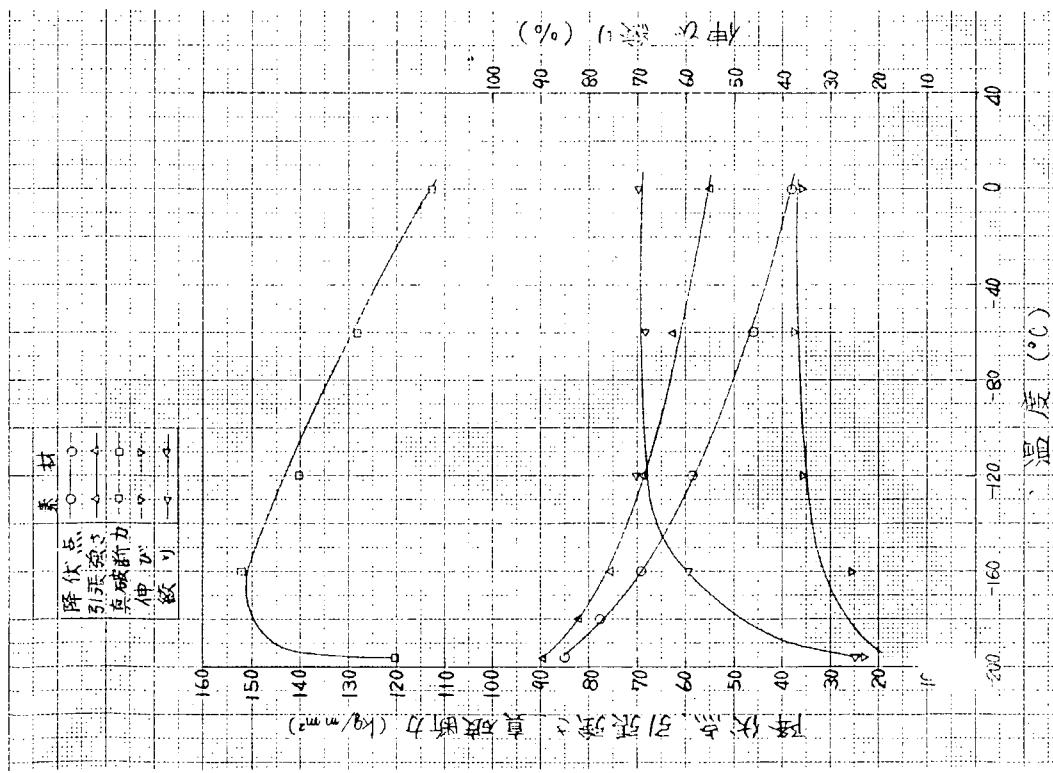


図 4.8 低温引張試験結果
(K5E鋼, 板厚3.0mm)

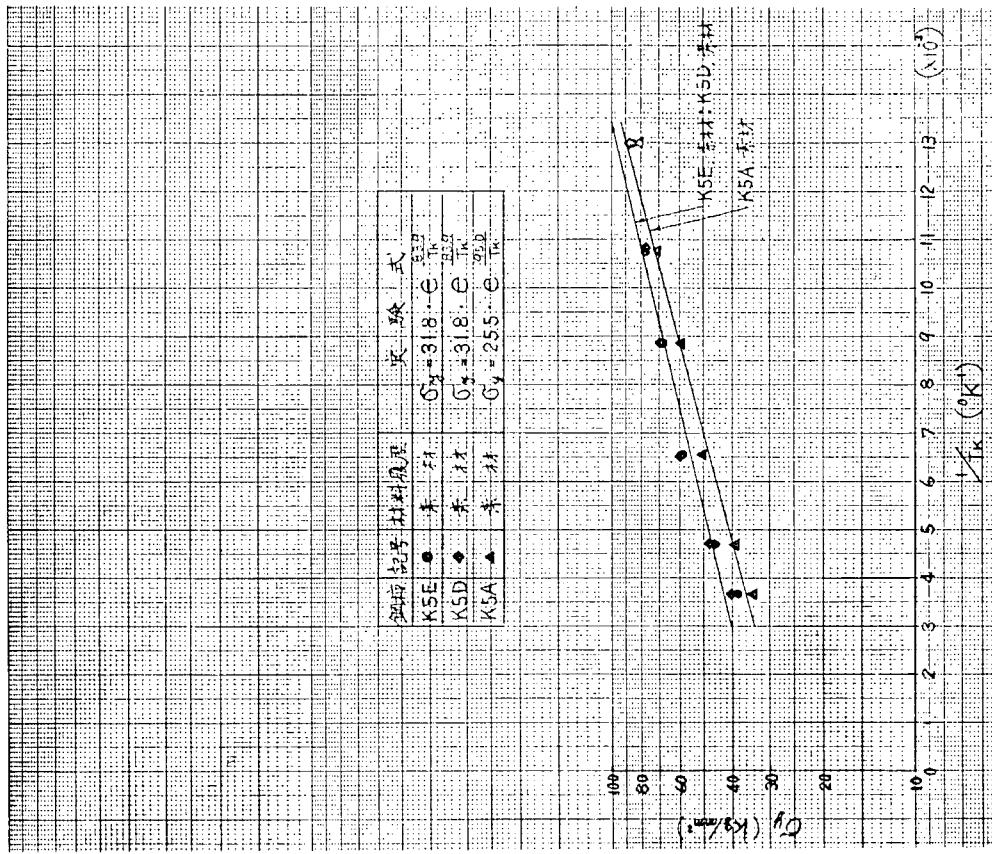
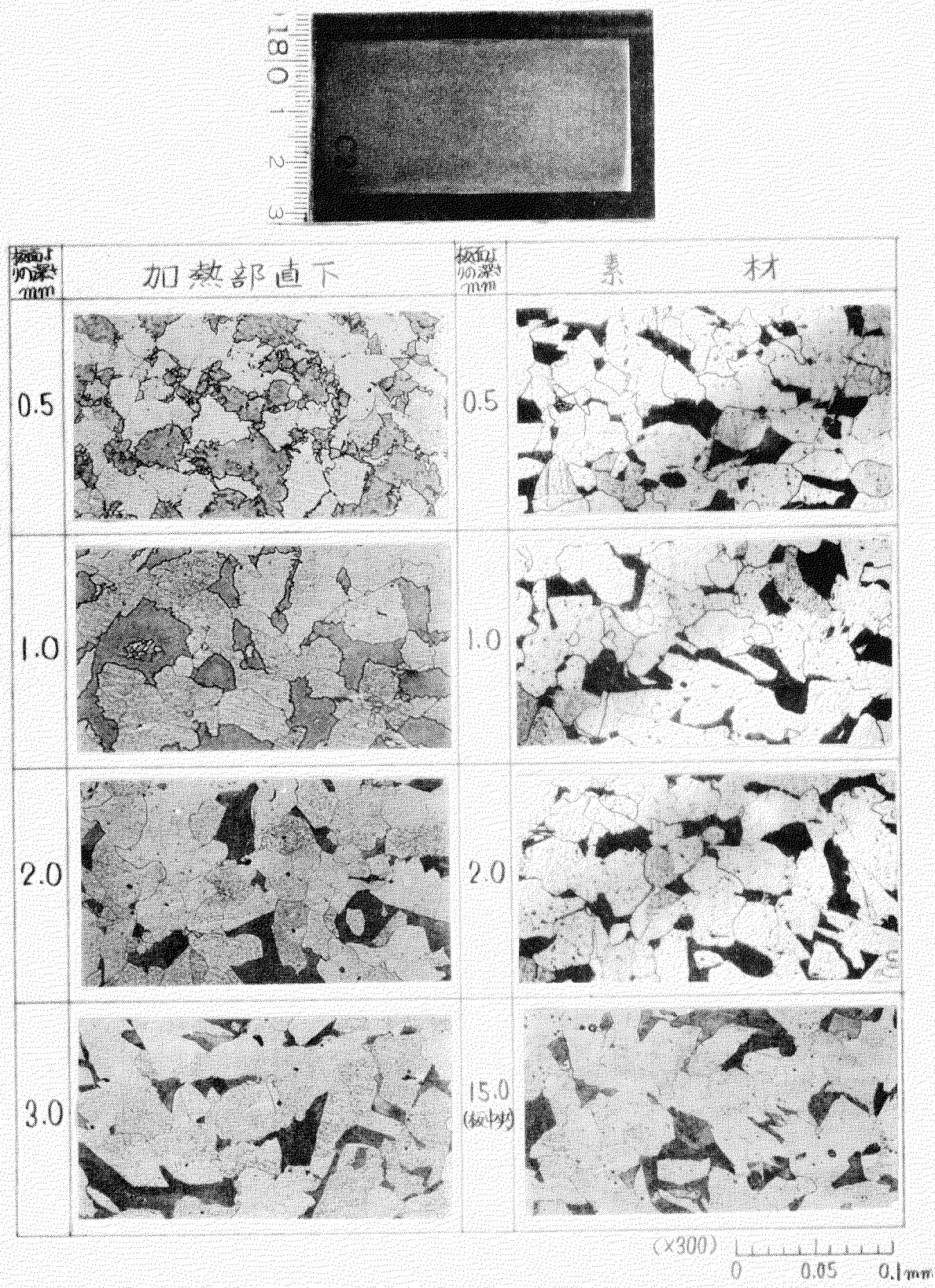


図 4.9 降伏点と温度の関係



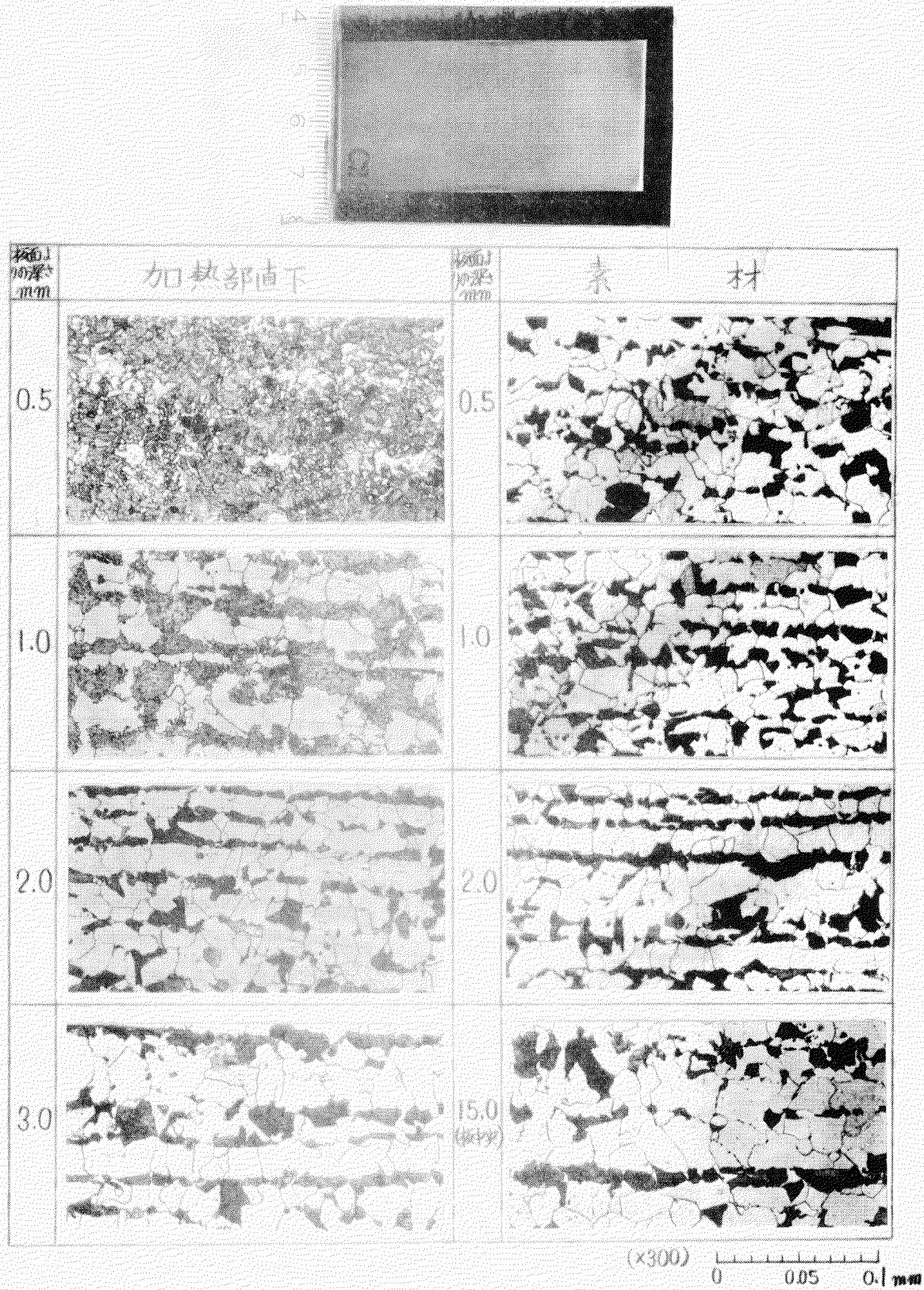
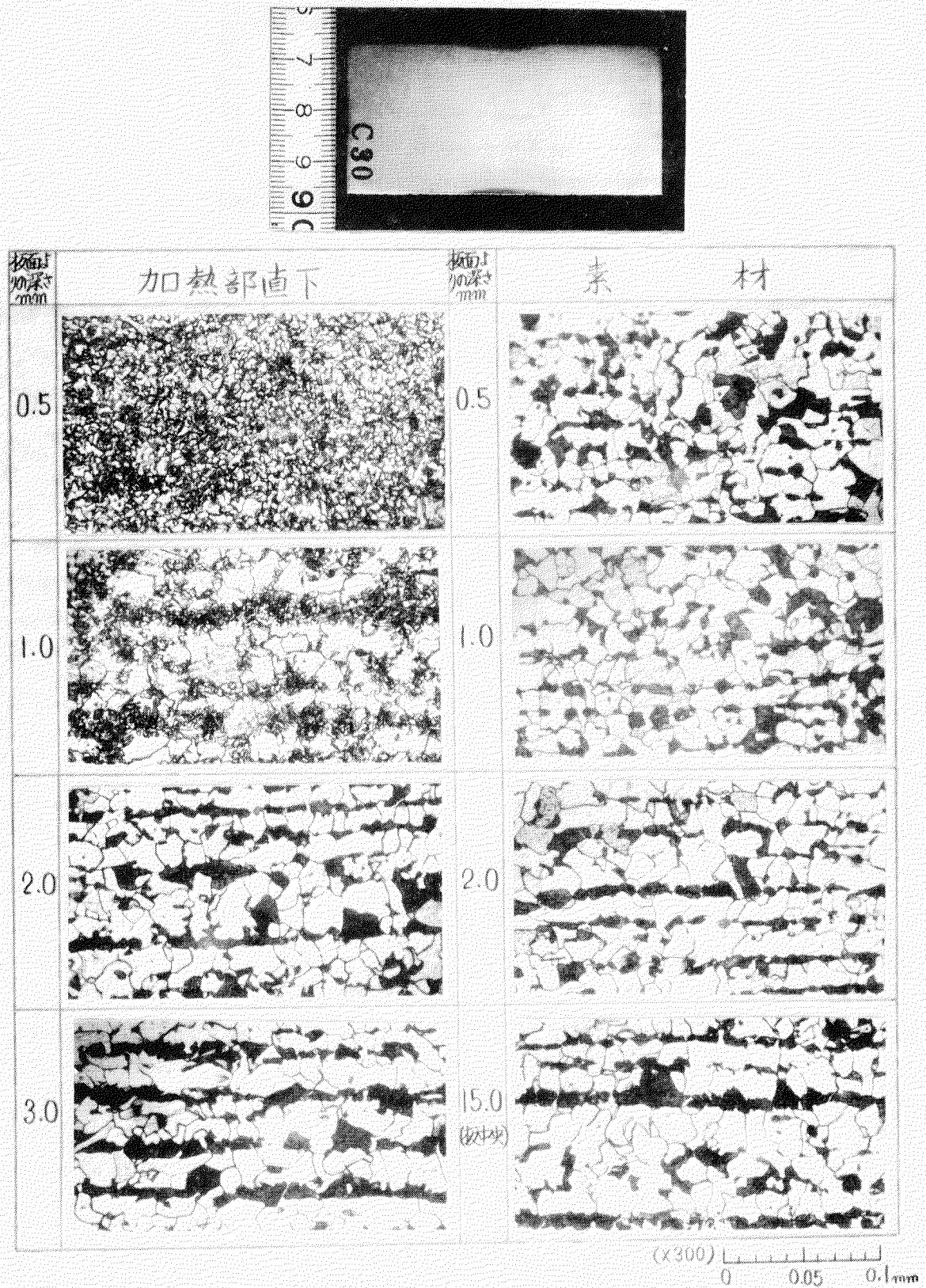


写真4.2 K-5 D銅、800℃→水冷材のマクロおよび顕微鏡組織(0-28)



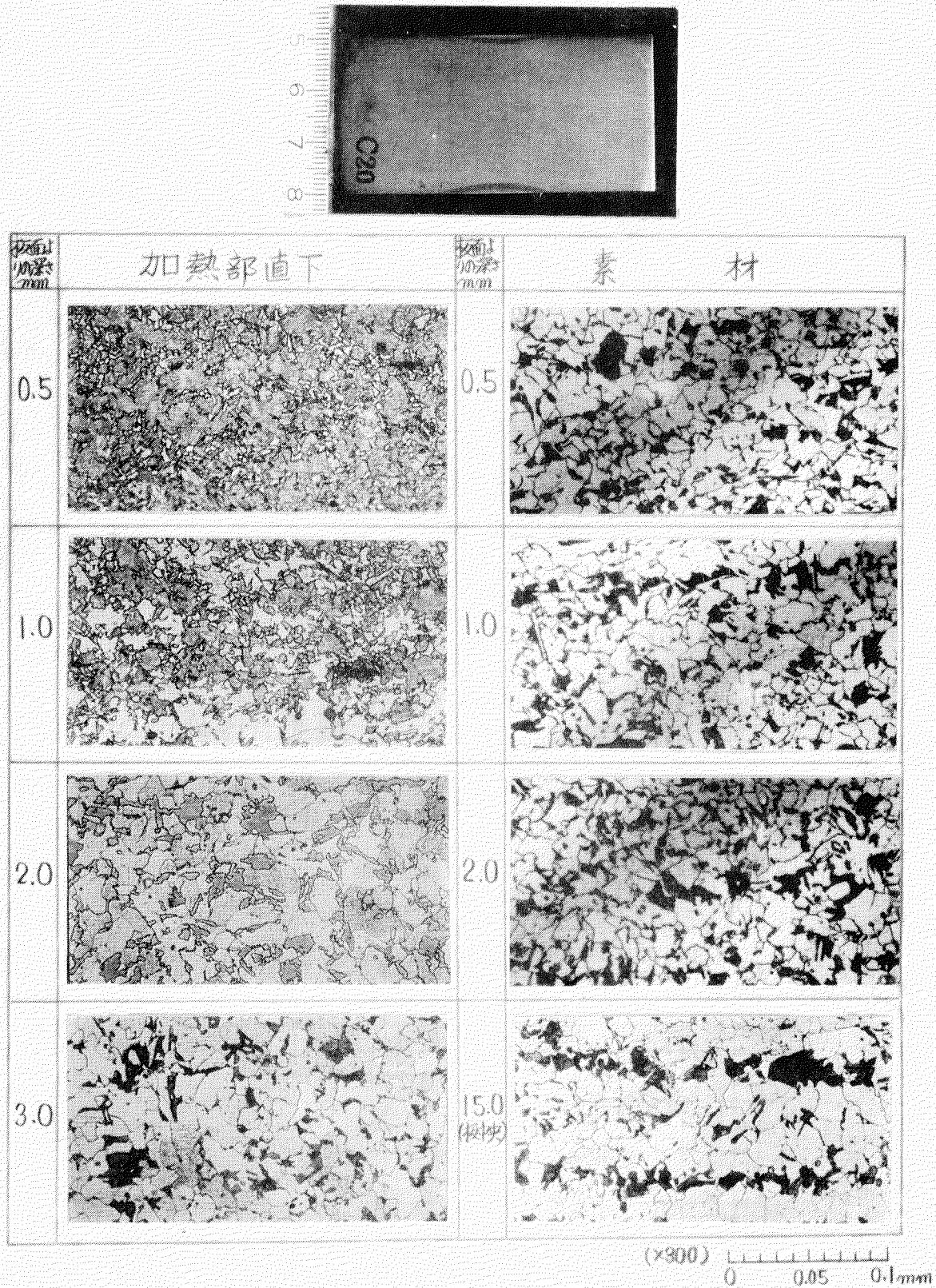


写真4.4 K-5 E鋼, 800°C→水冷材のマクロおよび顕微鏡組織 (C-20)

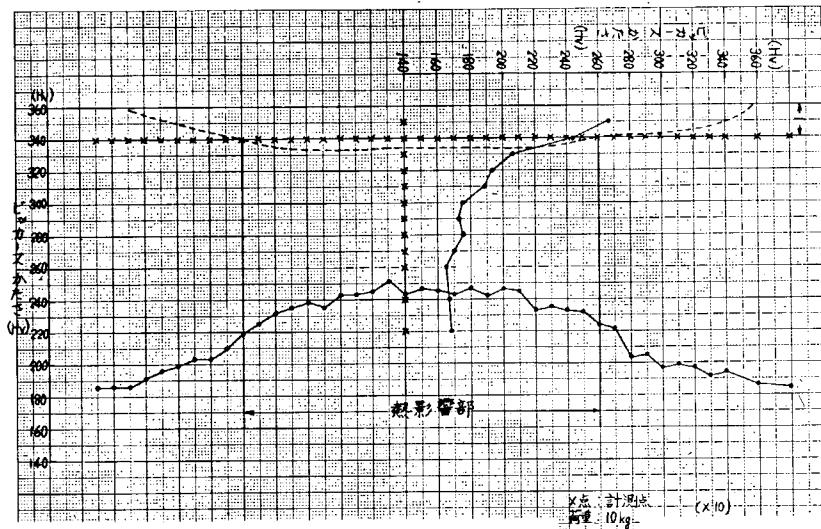


図 4.10 ピッカースかたさ測定結果
(K5A鋼, 800°C→水冷材)

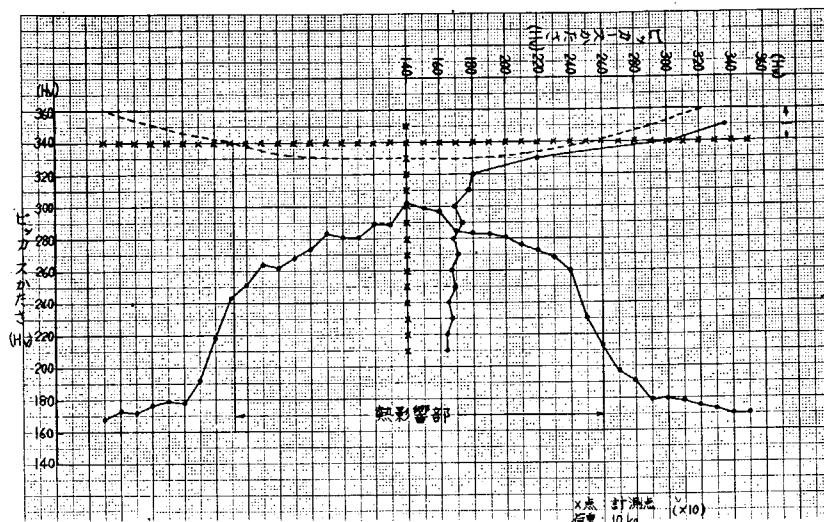


図 4.11 ピッカースかたさ測定結果
(K5D鋼, 800°C→水冷材)

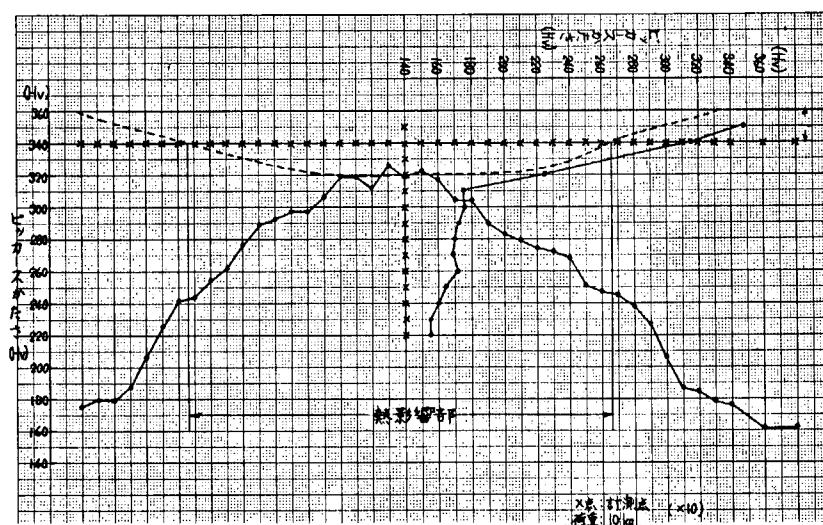


図 4.12 ピッカースかたさ測定結果
(K5E鋼, 800°C→水冷材)

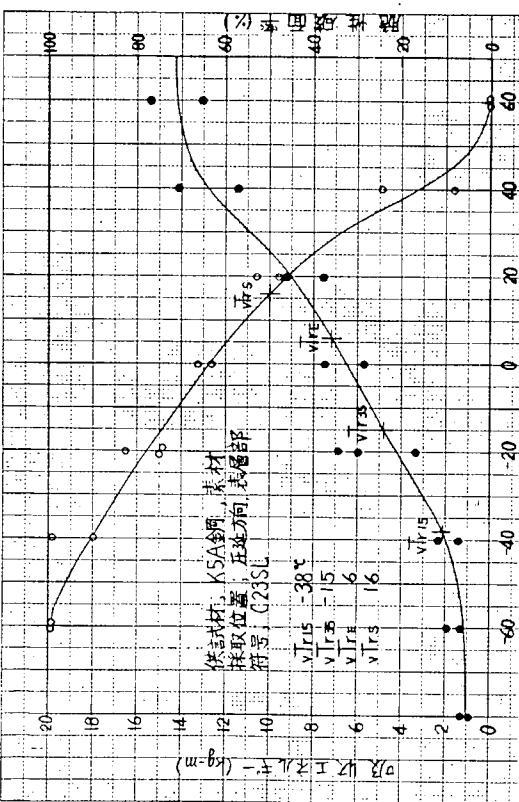


図 4.14 V-notchシャルビー衝撃試験結果

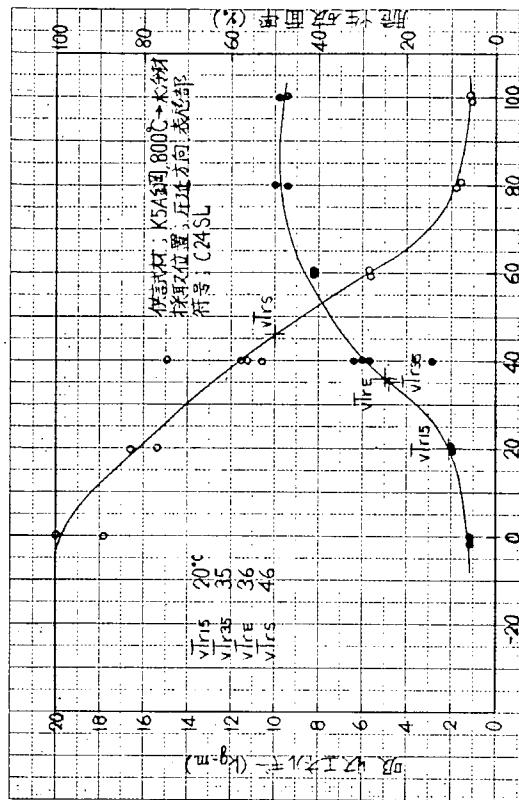


図 4.16 V-notchシャルビー衝撃試験結果

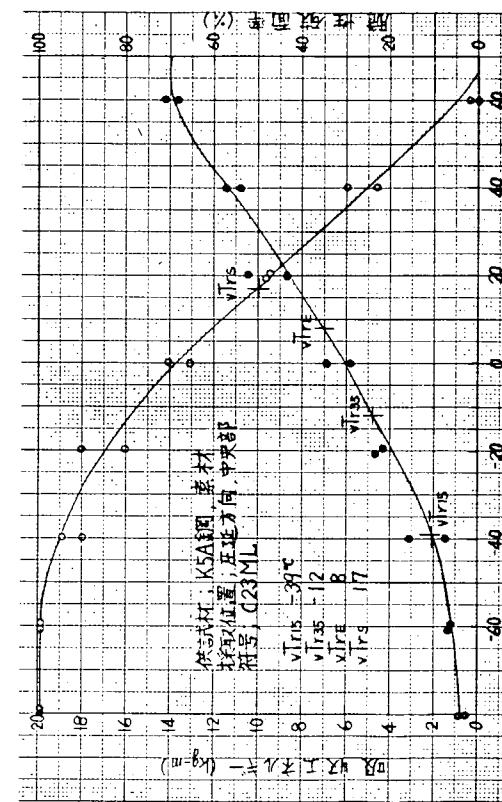


図 4.14 V-notchシャルビー衝撃試験結果

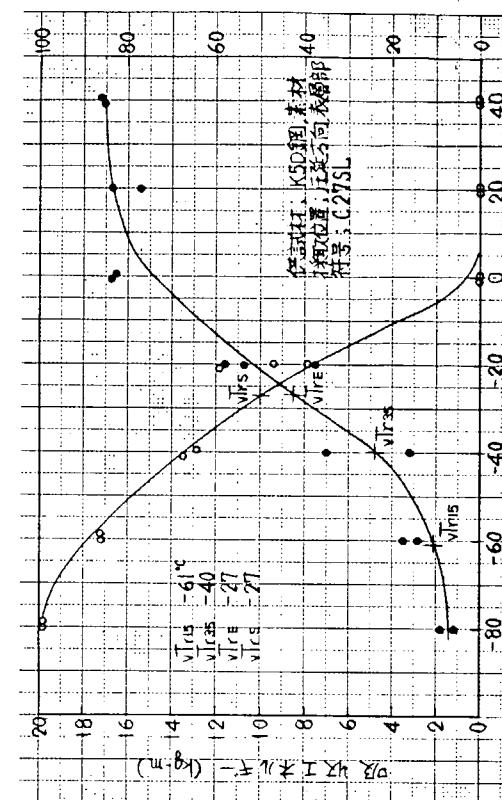


図 4.17 V-notchシャルビー衝撃試験結果

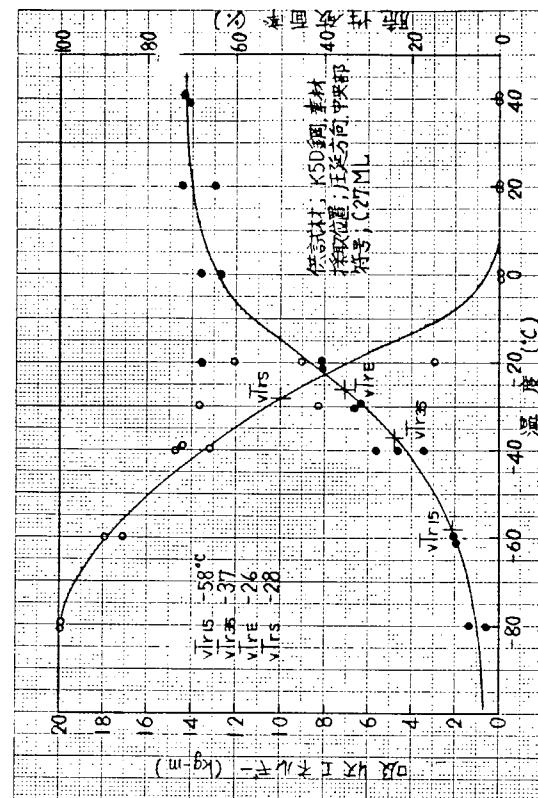


図 4.18 V-ノッチシャルビ一衝撃試験結果

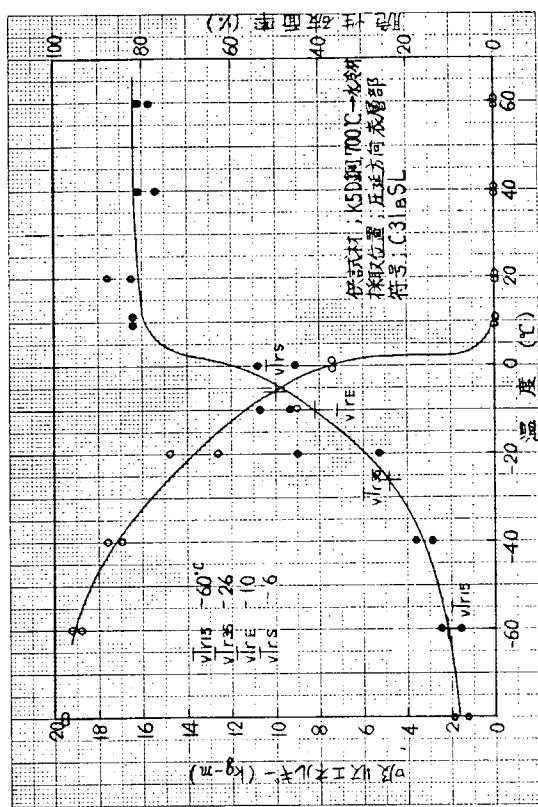


図 4.20 V-ノッチシャルビ一衝撃試験結果

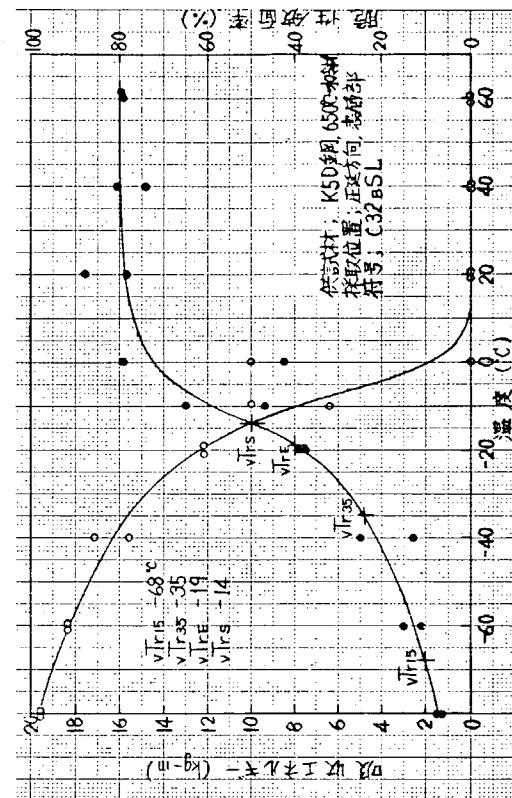
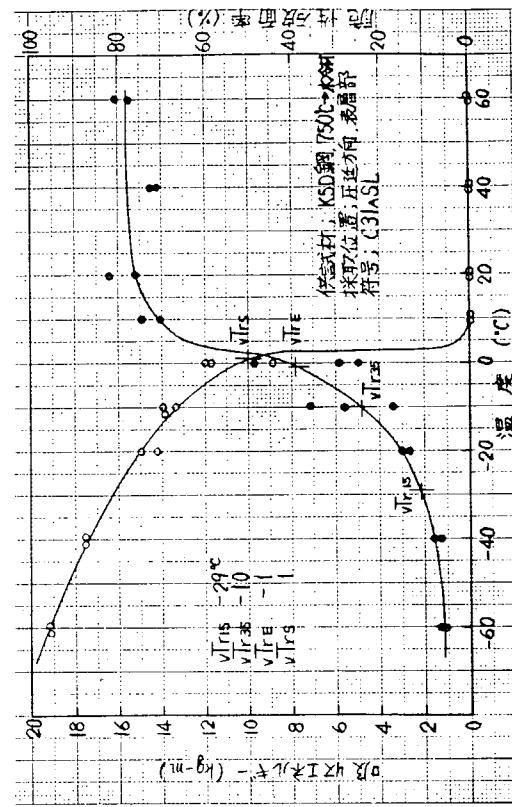


図 4.19 V-ノッチシャルビ一衝撃試験結果

図 4.21 V-ノッチシャルビ一衝撃試験結果



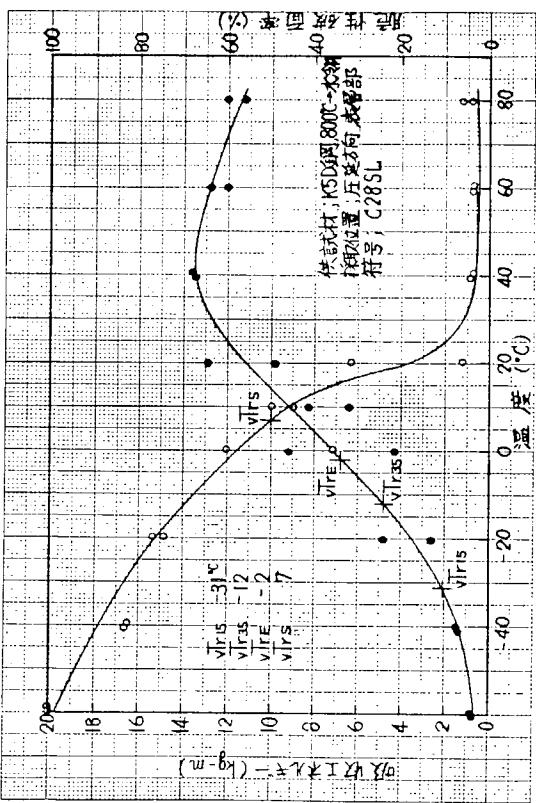


図 4.2.2 V-ノッチシャルビ一衝撃試験結果

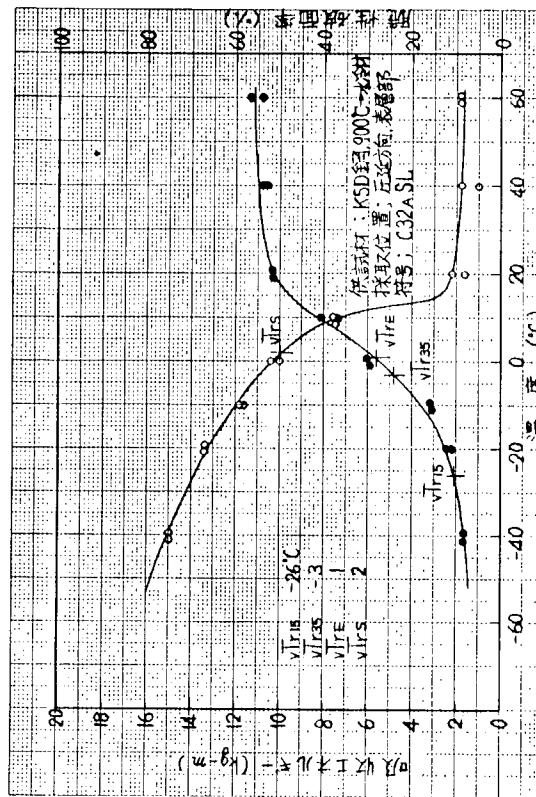


図 4.2.4 V-ノッチシャルビ一衝撃試験結果

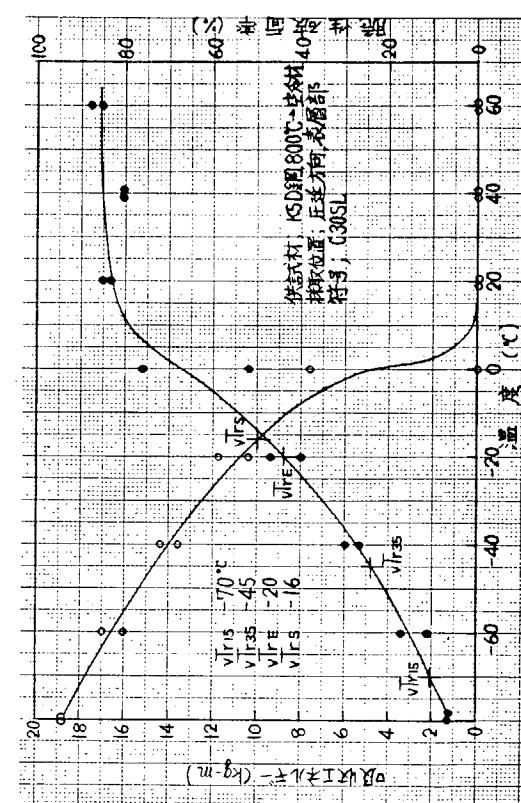


図 4.2.3 V-ノッチシャルビ一衝撃試験結果

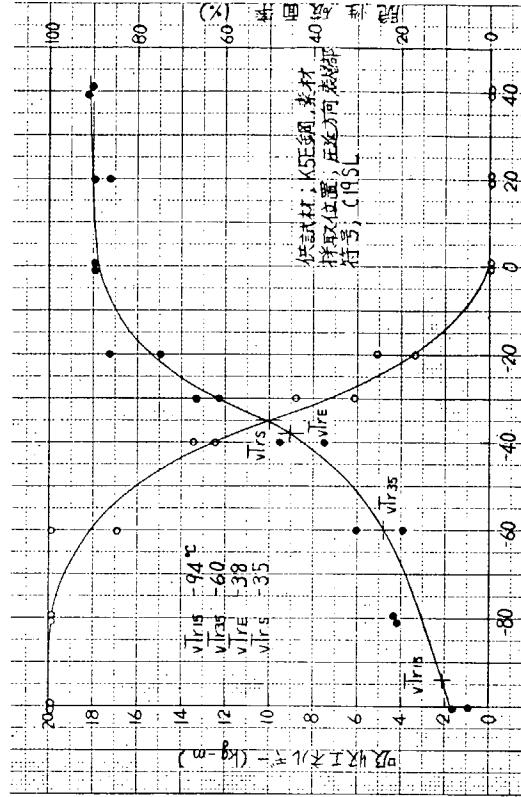


図 4.2.5 V-ノッチシャルビ一衝撃試験結果

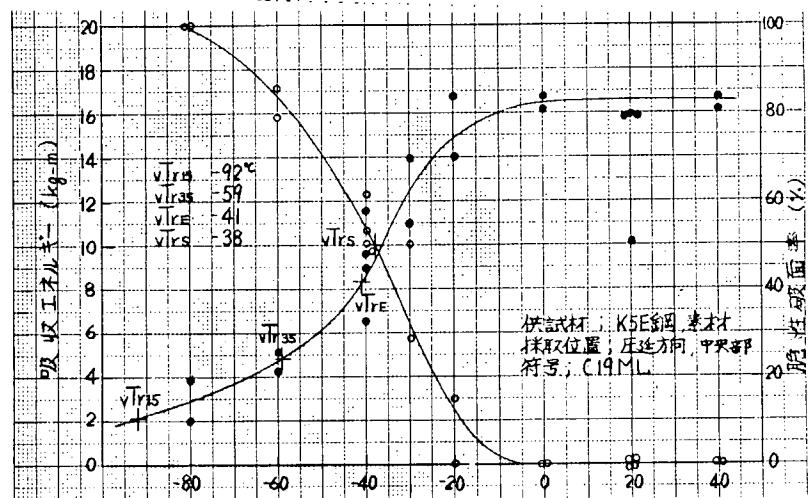


図 4.2.6 V-ノットシャルピー衝撃試験結果

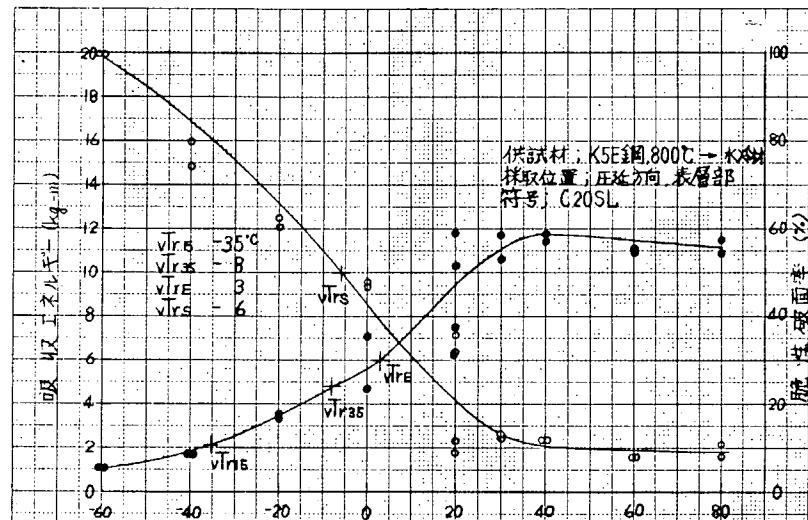


図 4.2.7 V-ノットシャルピー衝撃試験結果

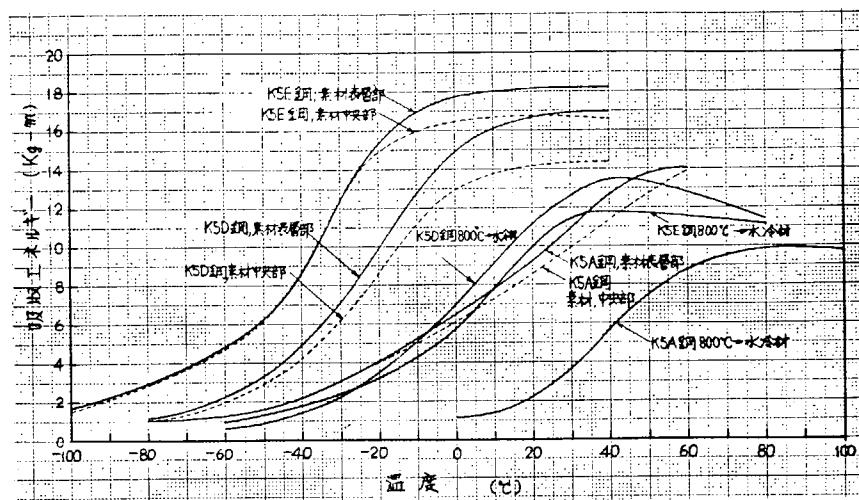


図 4.28 標準V一ノッチシャルピー衝撃試験結果

鋼種: K 5 A 鋼, K 5 D 鋼, K 5 E 鋼

板厚: 30 mm

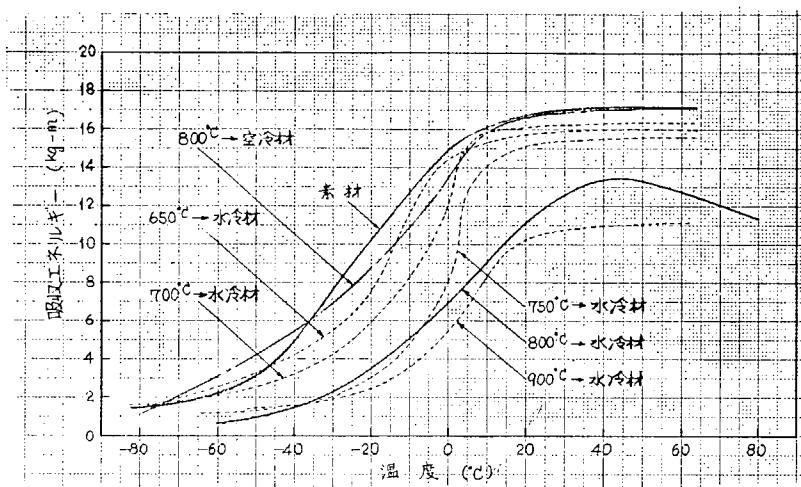


図 4.29 V一ノッチシャルピー衝撃試験結果

(K 5 D 鋼, 板厚 30 mm)

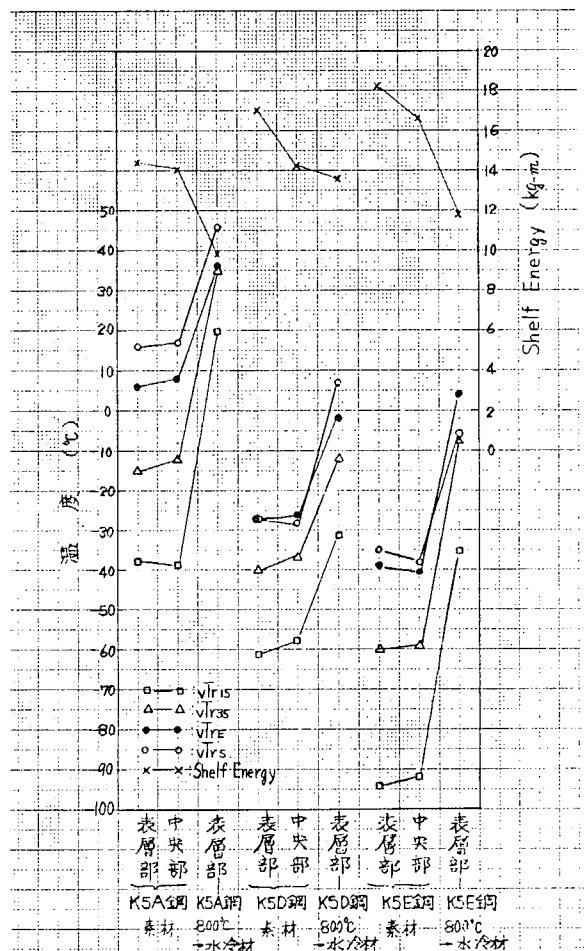


図 4.3.0 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果
(K5A鋼, K5D鋼およびK5E鋼:板厚3.0mm)

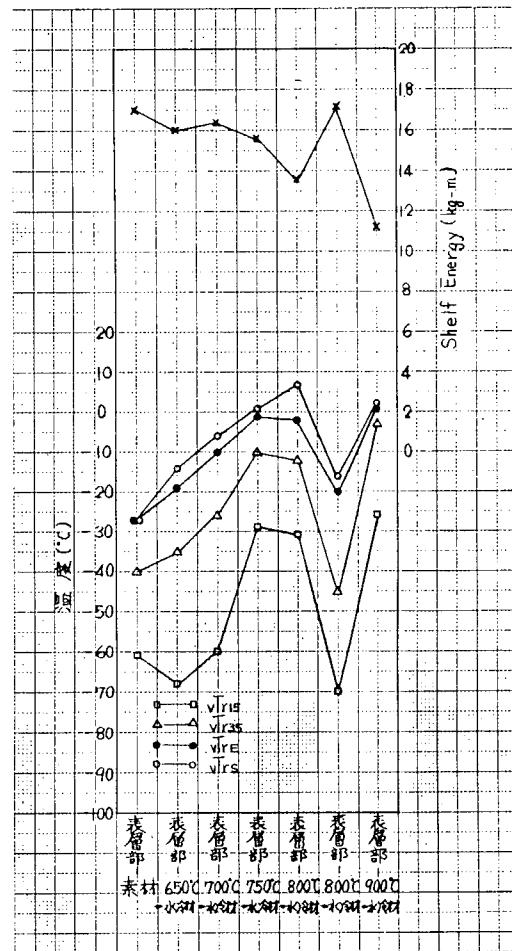


図 4.3.1 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果
(K5D鋼, 板厚3.0mm)

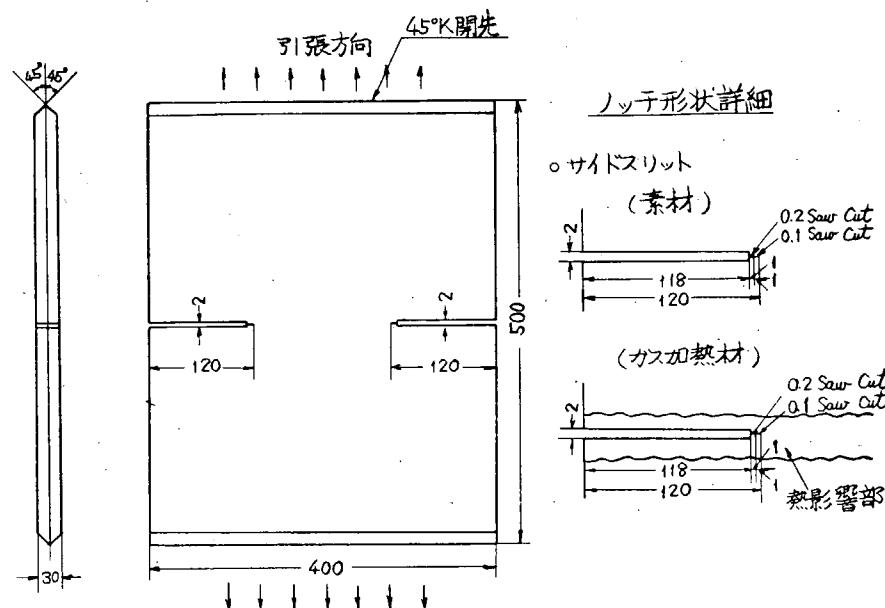


図 4.3.2 ディープノッチ試験片(標準型)

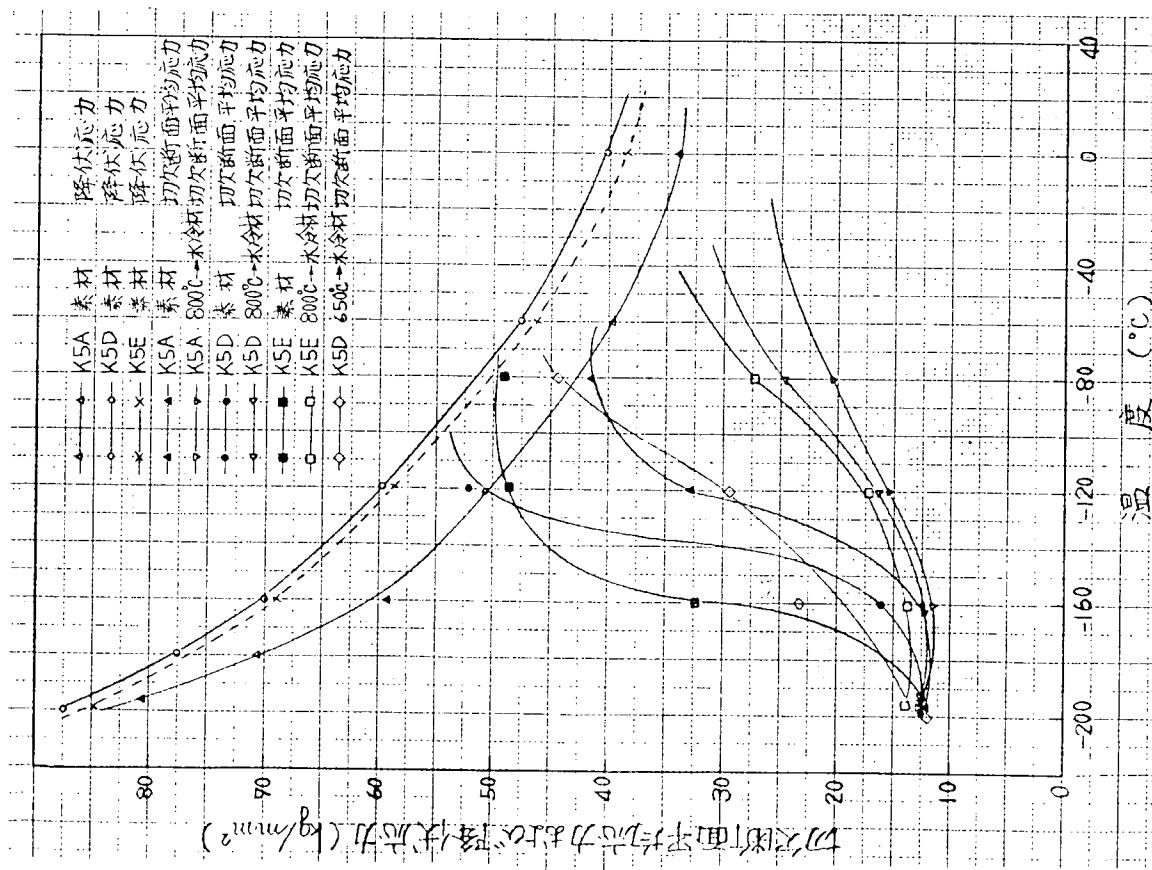


図 4.3.3 降伏応力と切欠断面平均応力
(K5A鋼, K5D鋼, K5E鋼)

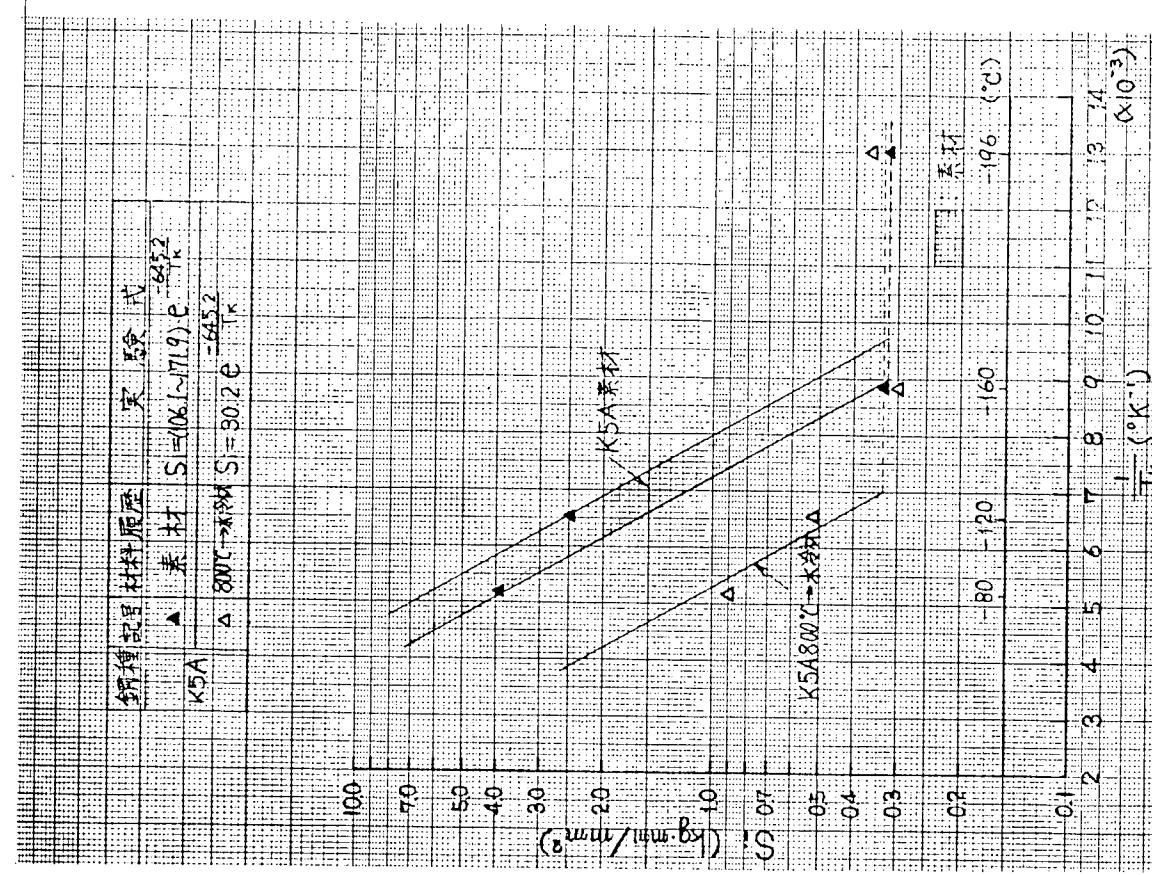


図 4.3.4 ティープローチ試験結果
(K5A鋼, 板厚 30mm)

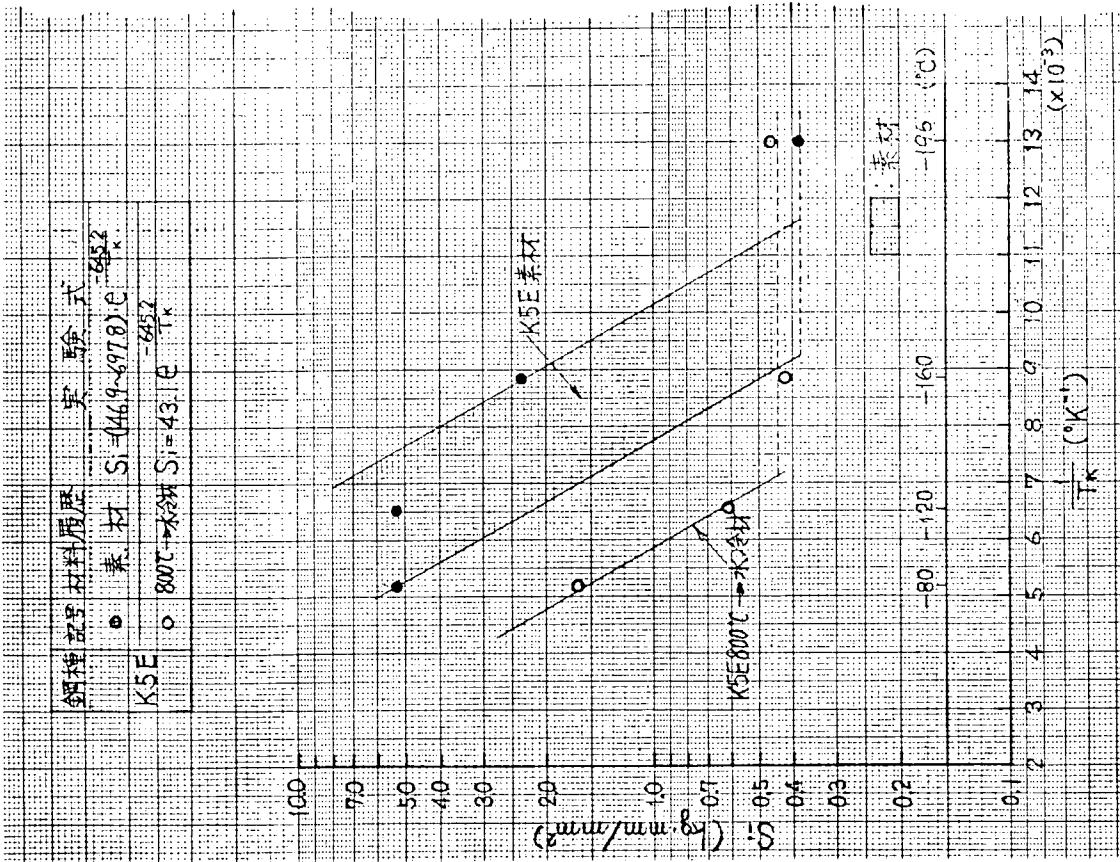


図 4.3.5 デイーブノンチ試験結果
(K5D鋼, 板厚30mm)

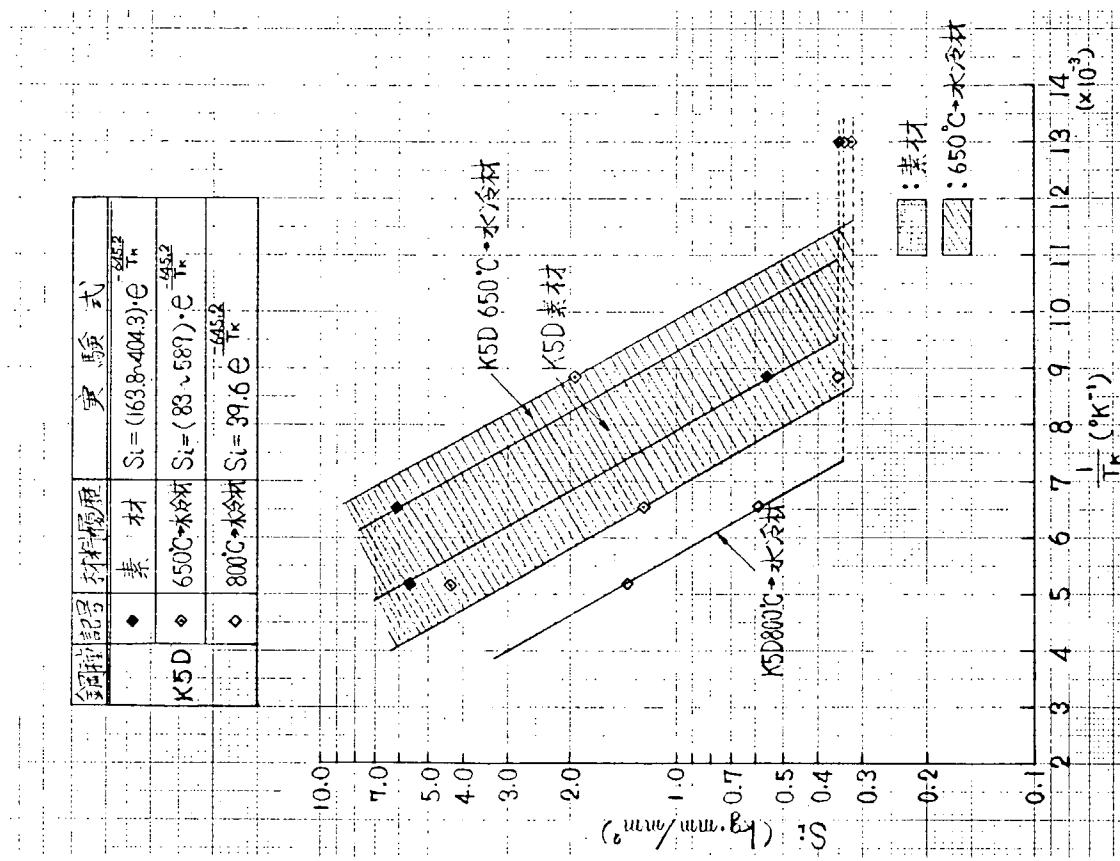


図 4.3.6 デイーブノンチ試験結果
(K5E鋼, 板厚30mm)

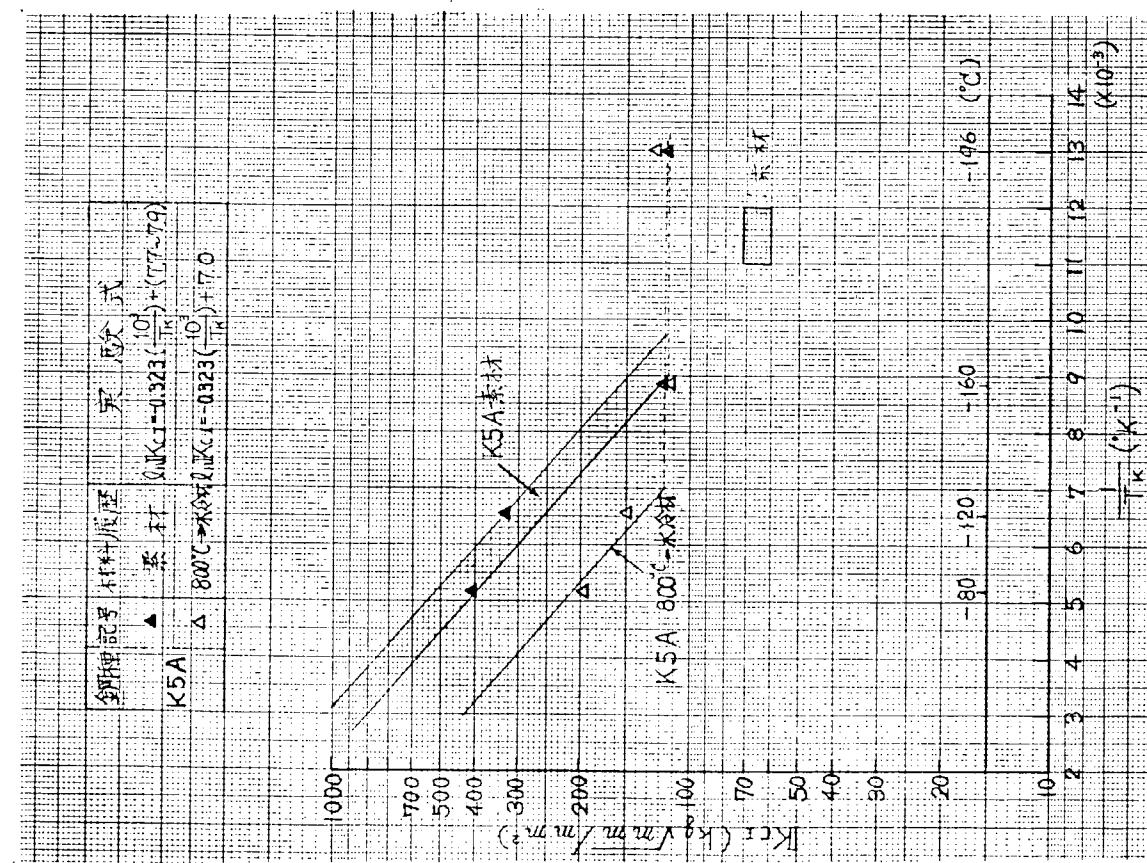


図 4.3.7 ティーブノッチ試験結果
(K5A鋼, 板厚3.0mm)

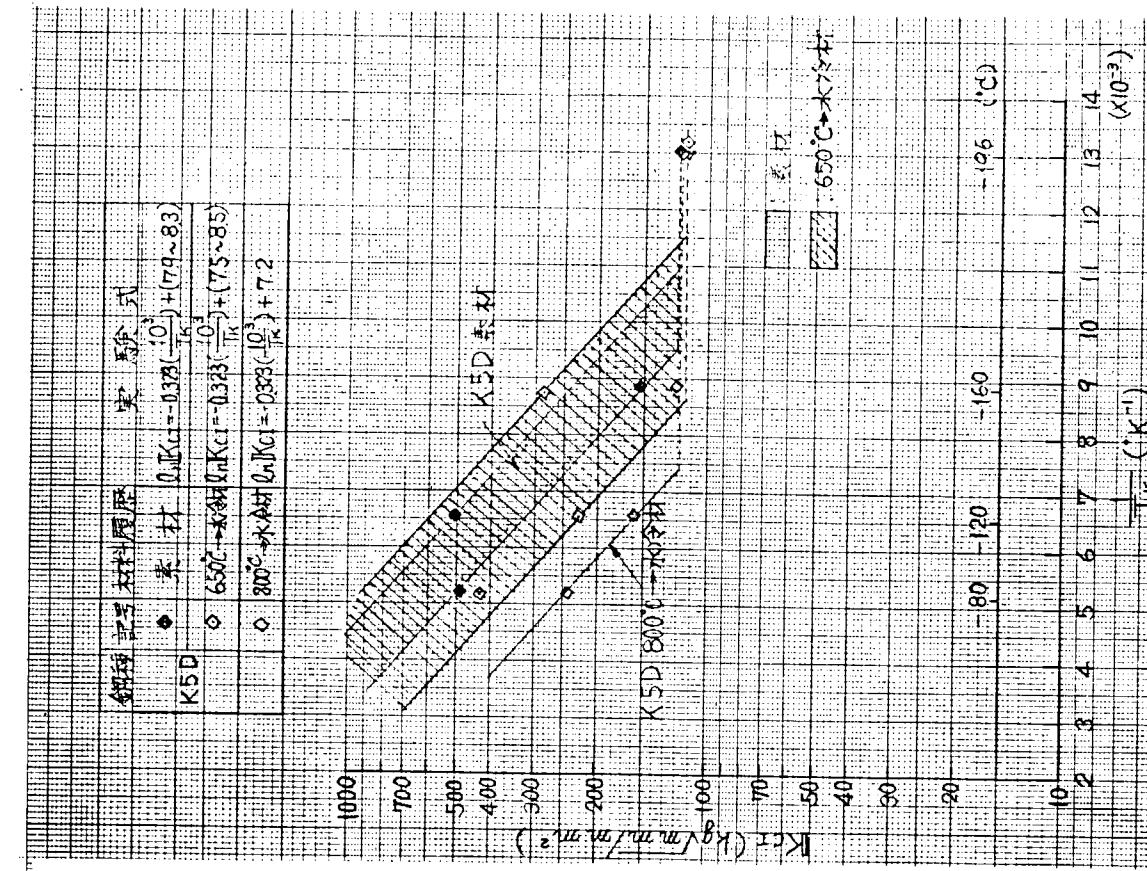
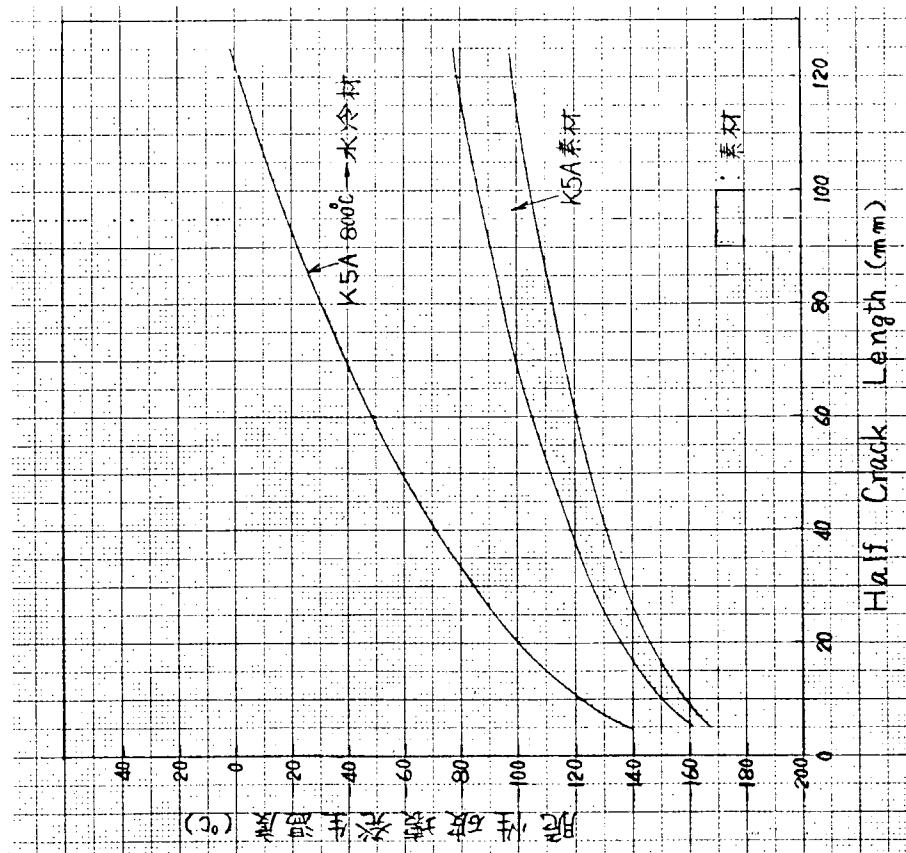
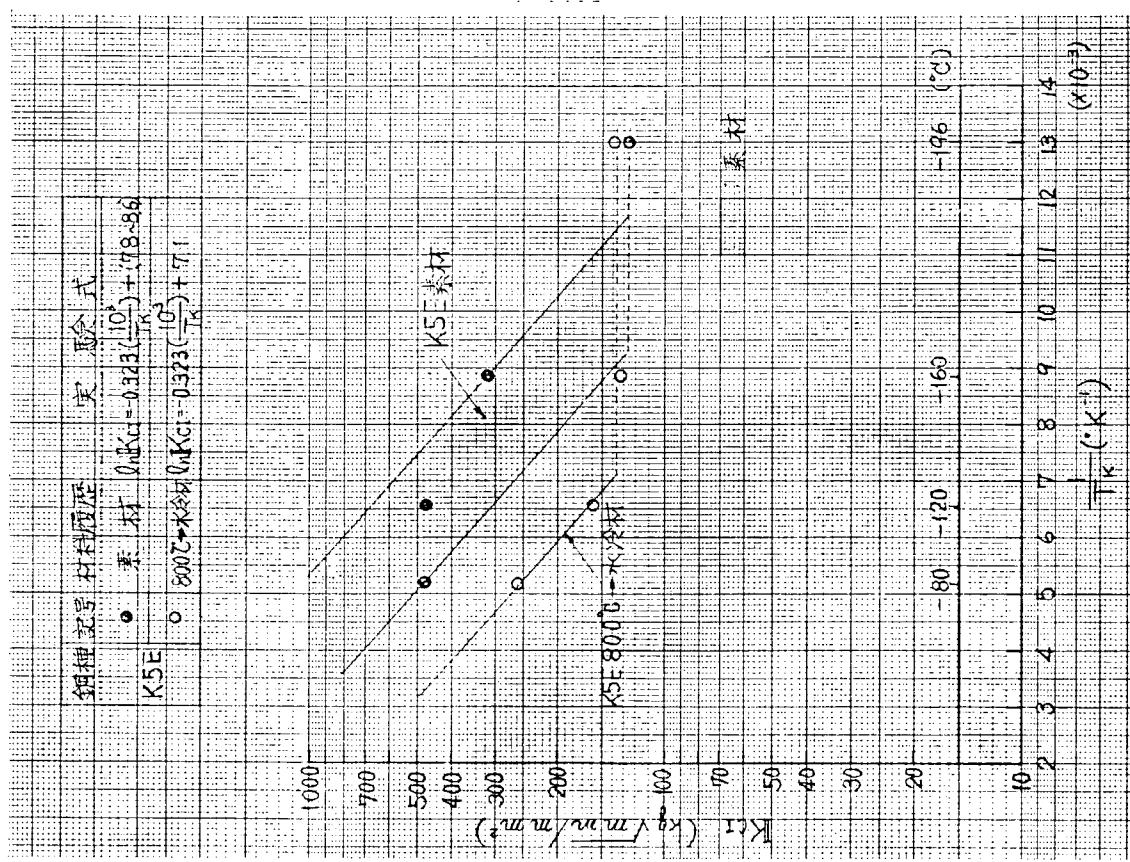
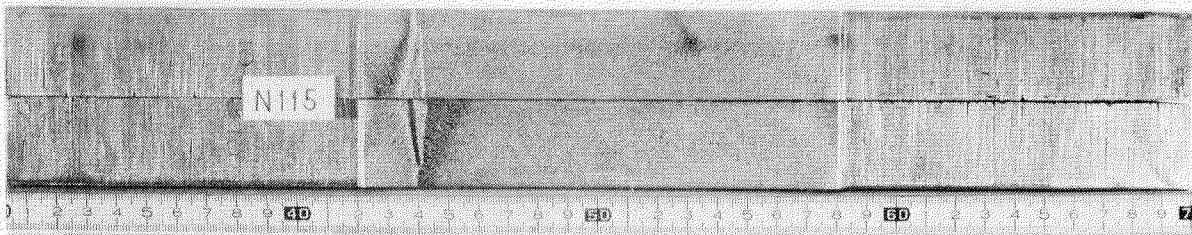
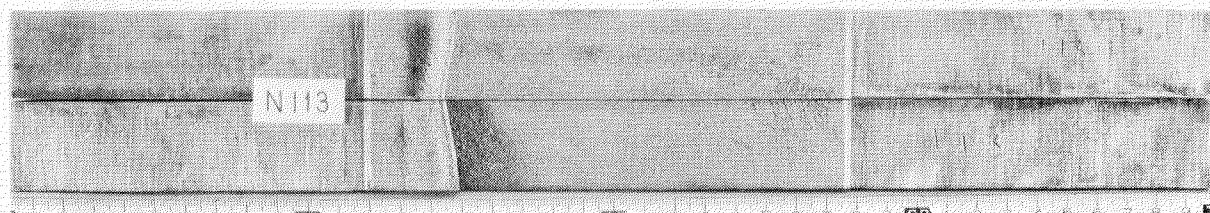


図 4.3.8 ティーブノッチ試験結果
(K5D鋼, 板厚3.0mm)

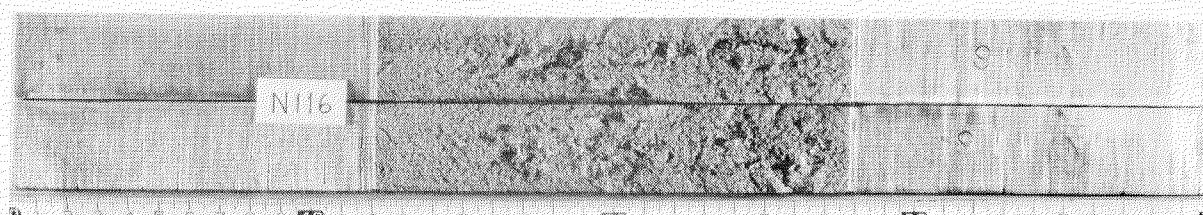




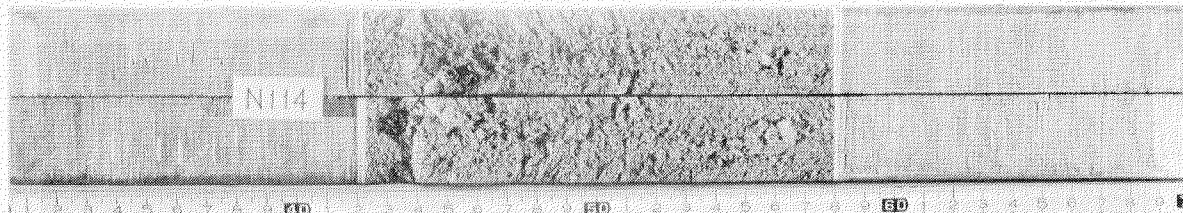
(試験温度T=-196°C, 破断応力 $\delta_{net}=11.7 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度T=-160°C, 破断応力 $\delta_{net}=12.2 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度T=-120°C, 破断応力 $\delta_{net}=32.9 \text{ kg/mm}^2$)



(試験温度T=-80°C, 破断応力 $\delta_{net}=41.5 \text{ kg/mm}^2$)

写真4.5 ディープノッチ試験片破面状況
(K5A鋼, 素材, 板厚3.0mm)

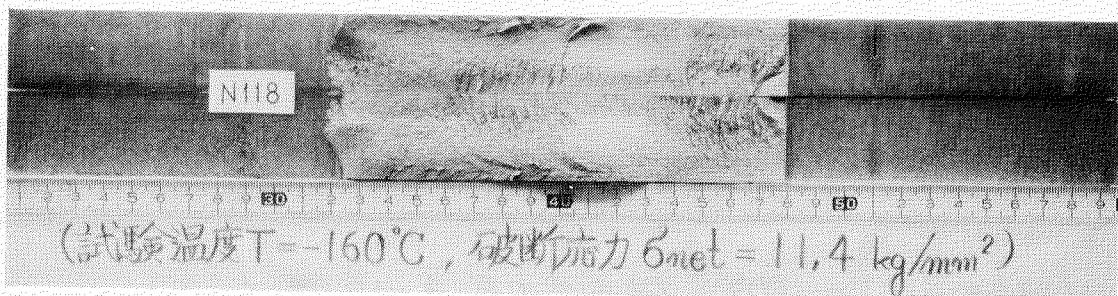
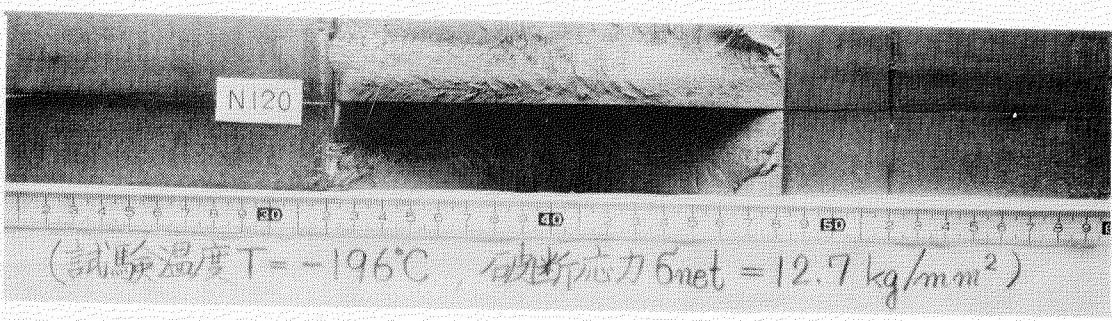


写真4.6 ディープノッチ試験片破面状況

(K5A鋼, 800°C→水冷材, 板厚3.0mm)

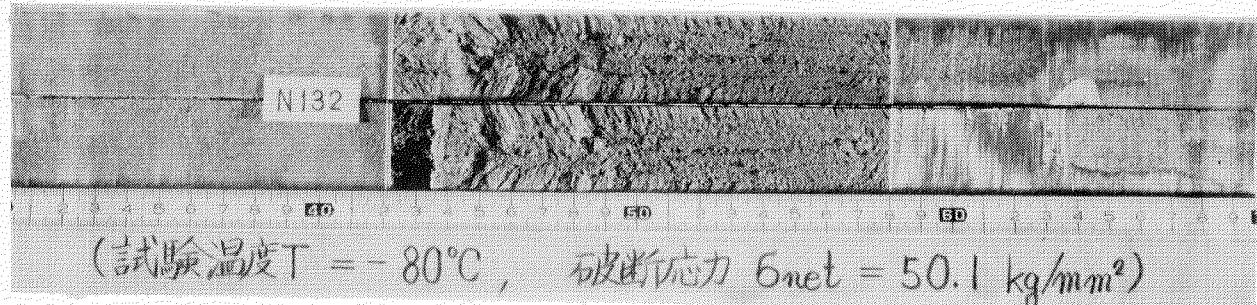
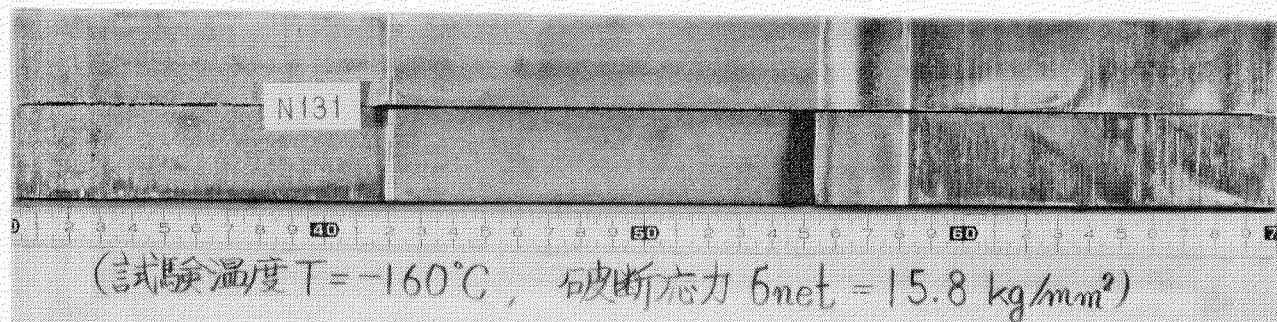
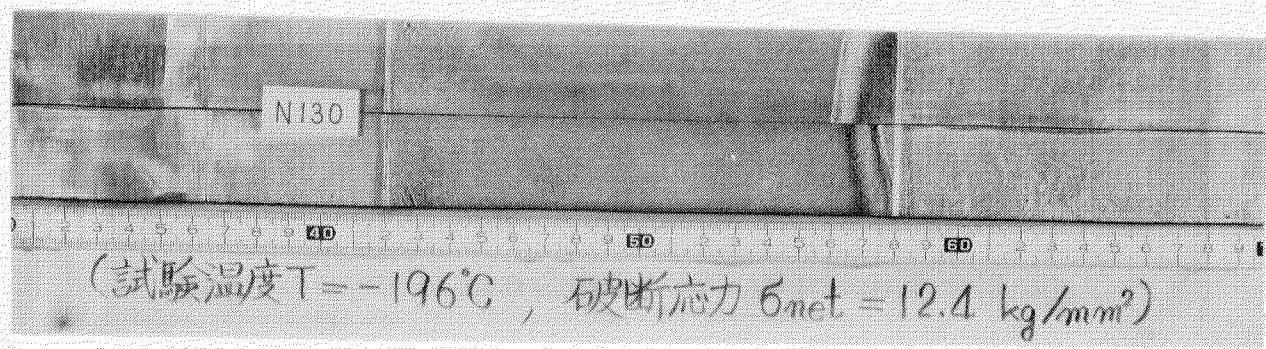


写真4.7 デイープノッチ試験片破面状況
(K5D鋼, 素材, 板厚3.0mm)

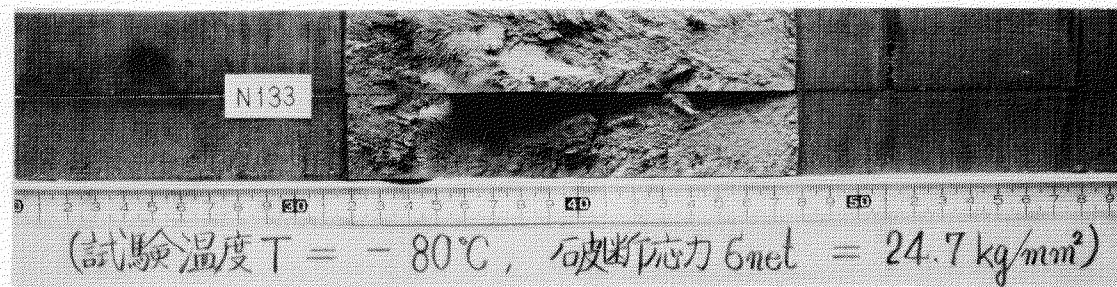
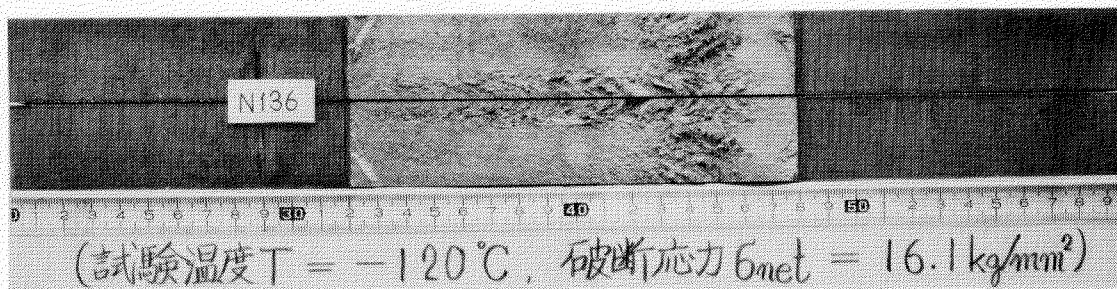
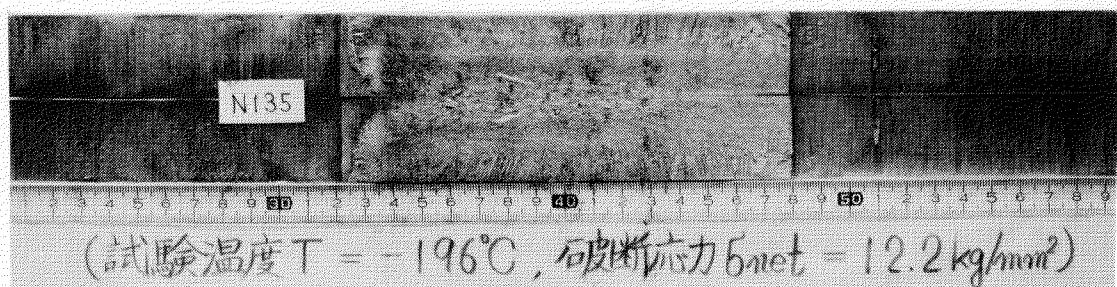


写真 4.8 デイープノッチ試験片破面状況

(K5D鋼, $800^{\circ}\text{C} \rightarrow$ 水冷材, 板厚3.0mm)

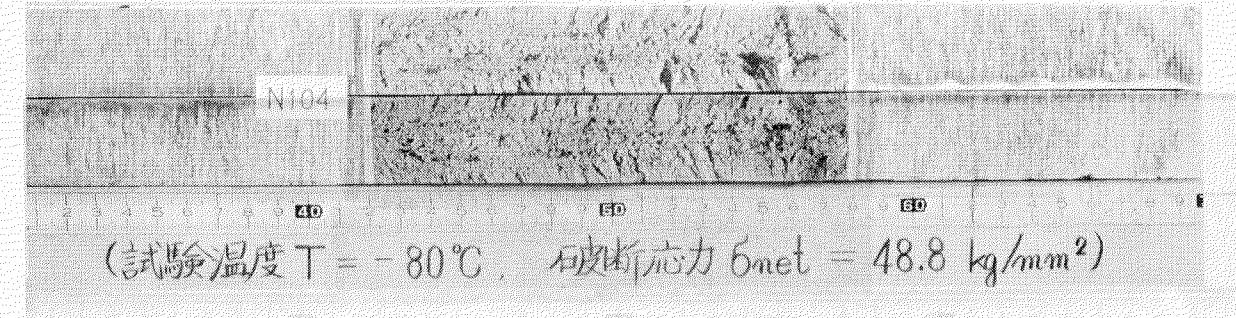
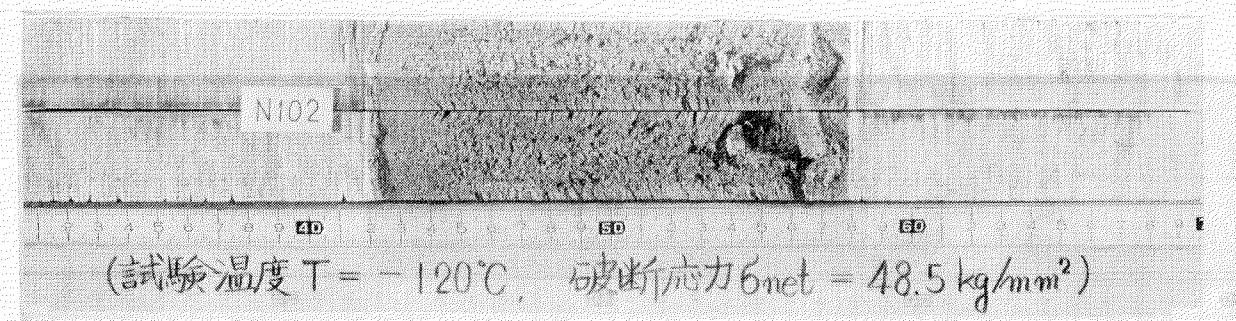
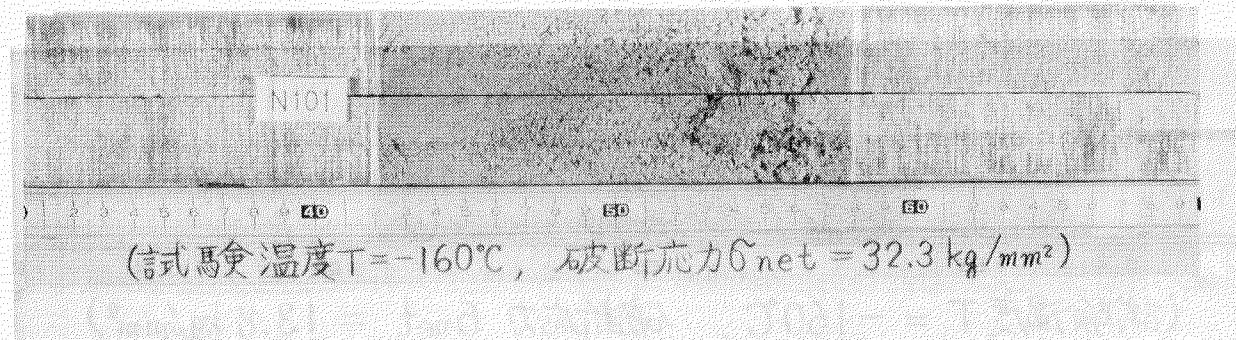
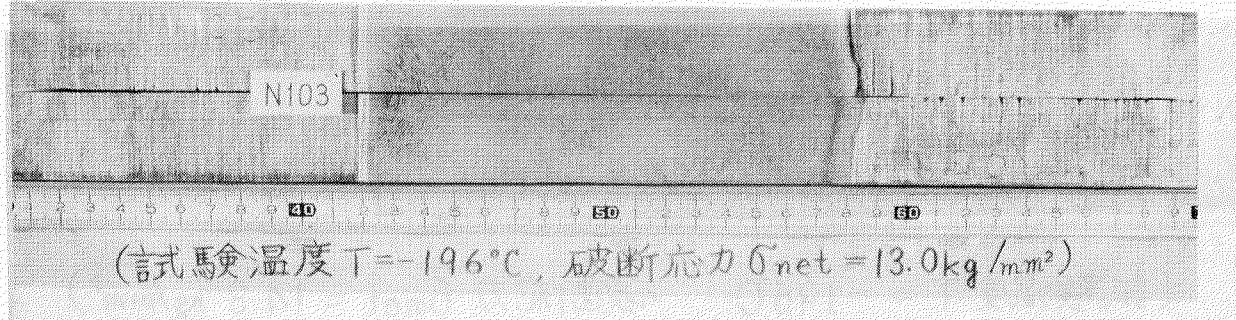


写真 4.9 デイ一ブノッチ試験片破面状況

(K-5 E鋼, 素材, 板厚 3.0 mm)

（写真左側の直線は、試験機の試験片固定部によるもの）

（写真右側の直線は、試験機の試験片固定部によるもの）

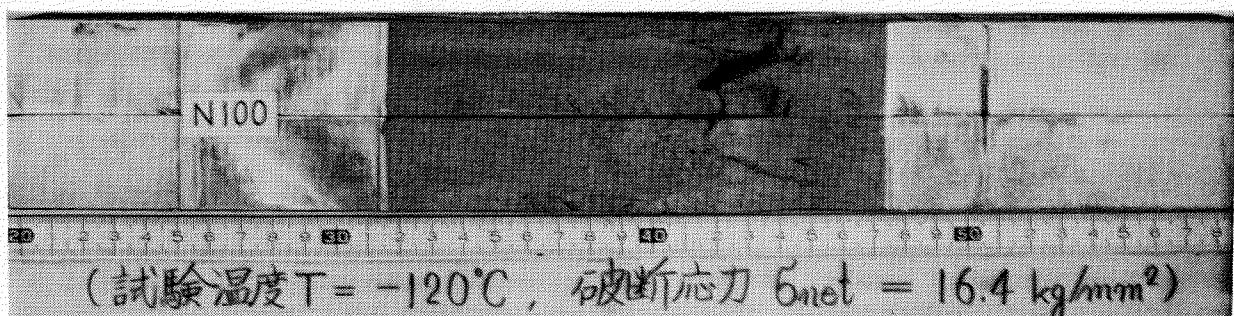
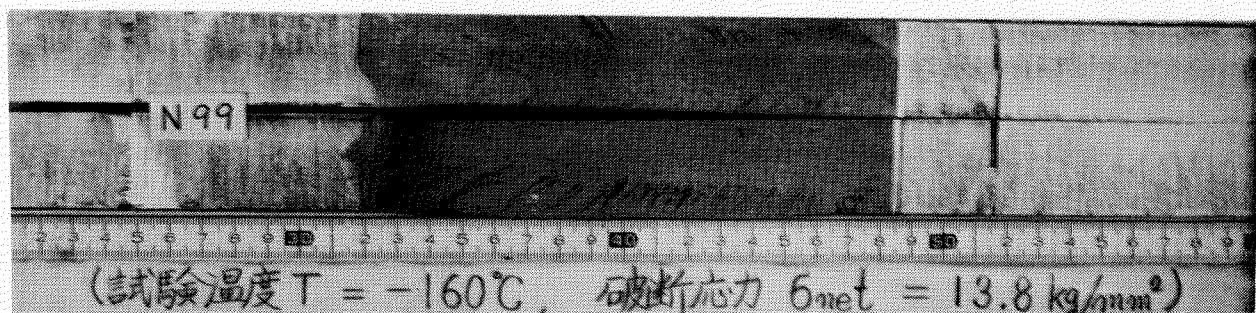
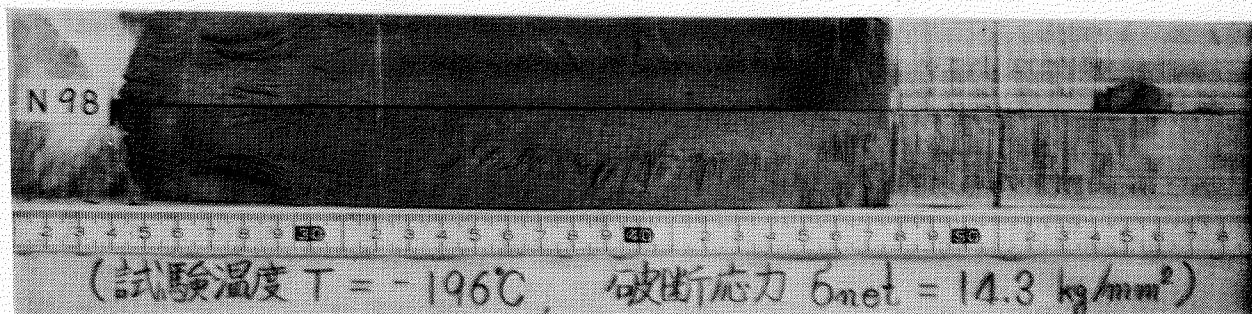


写真 4.10 デイブノツチ試験片破面状況
(K5E鋼, 800°C→水冷材, 板厚3.0mm)

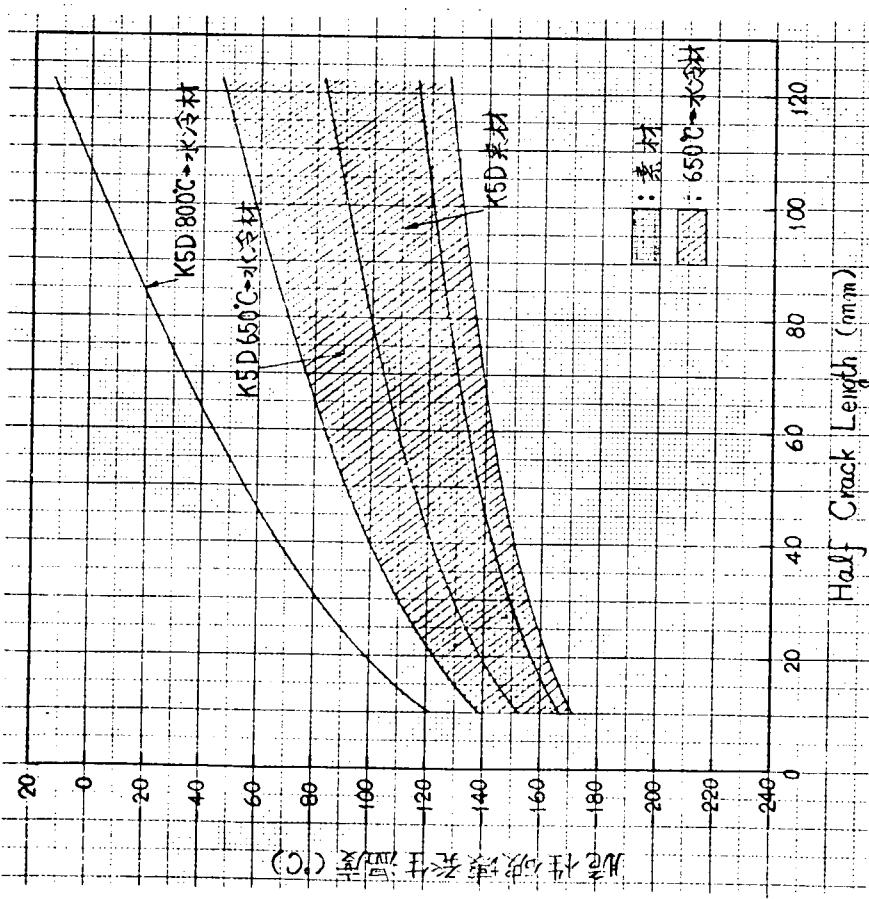


図 4.4.1 使用応力 = $1/\sqrt{2\sigma_y} \sqrt{C}$ における脆性破壊発生特性
(K 5 D 鋼 , 板厚 30 mm)

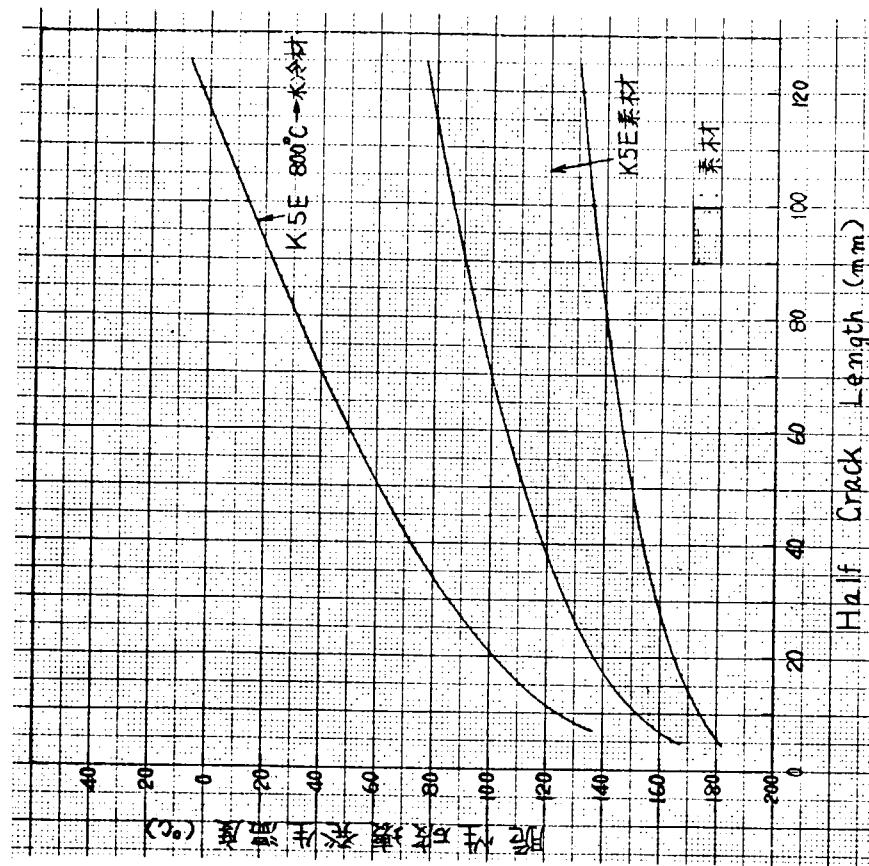


図 4.4.2 使用応力 = $1/\sqrt{2\sigma_y} \sqrt{C}$ における脆性破壊発生特性
(K 5 E 鋼 , 板厚 30 mm)

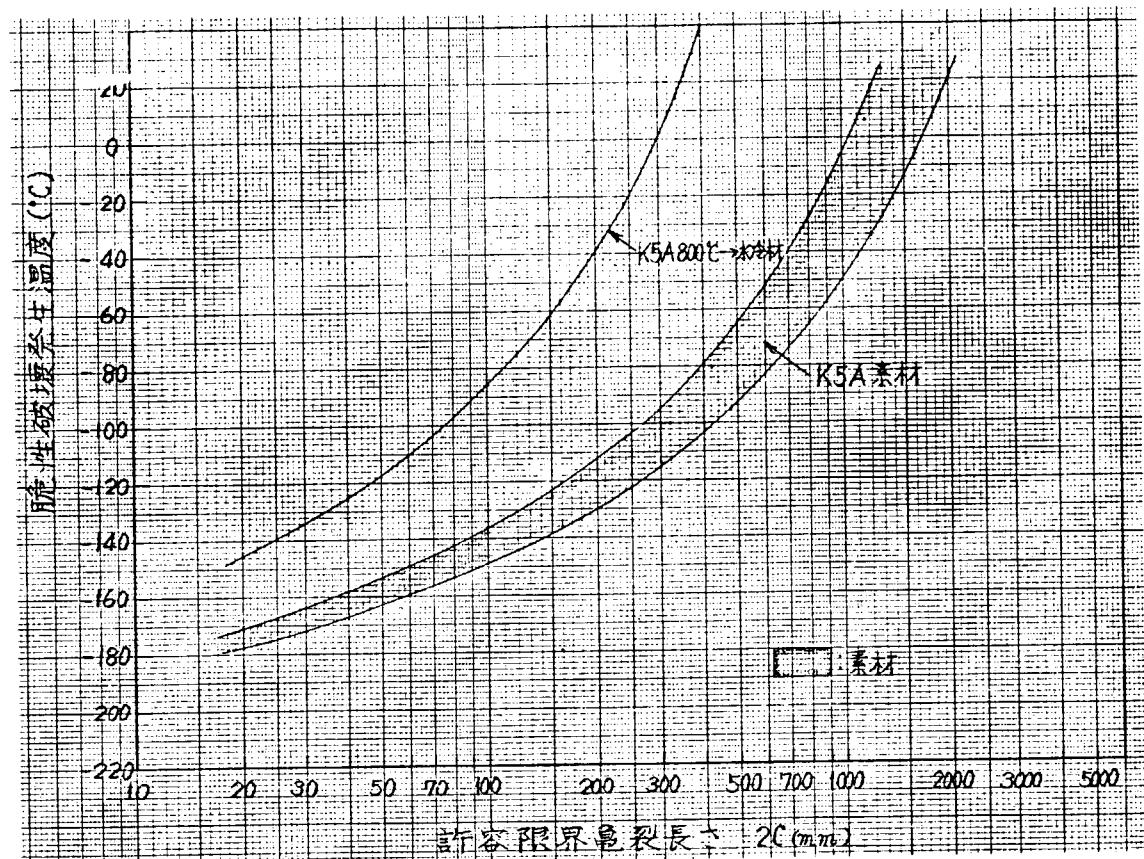


図 4.4.3 使用応力 = 16.0 kg/mm^2 における脆性破壊発生特性

(K 5 A 鋼 , 板厚 3 0 mm)

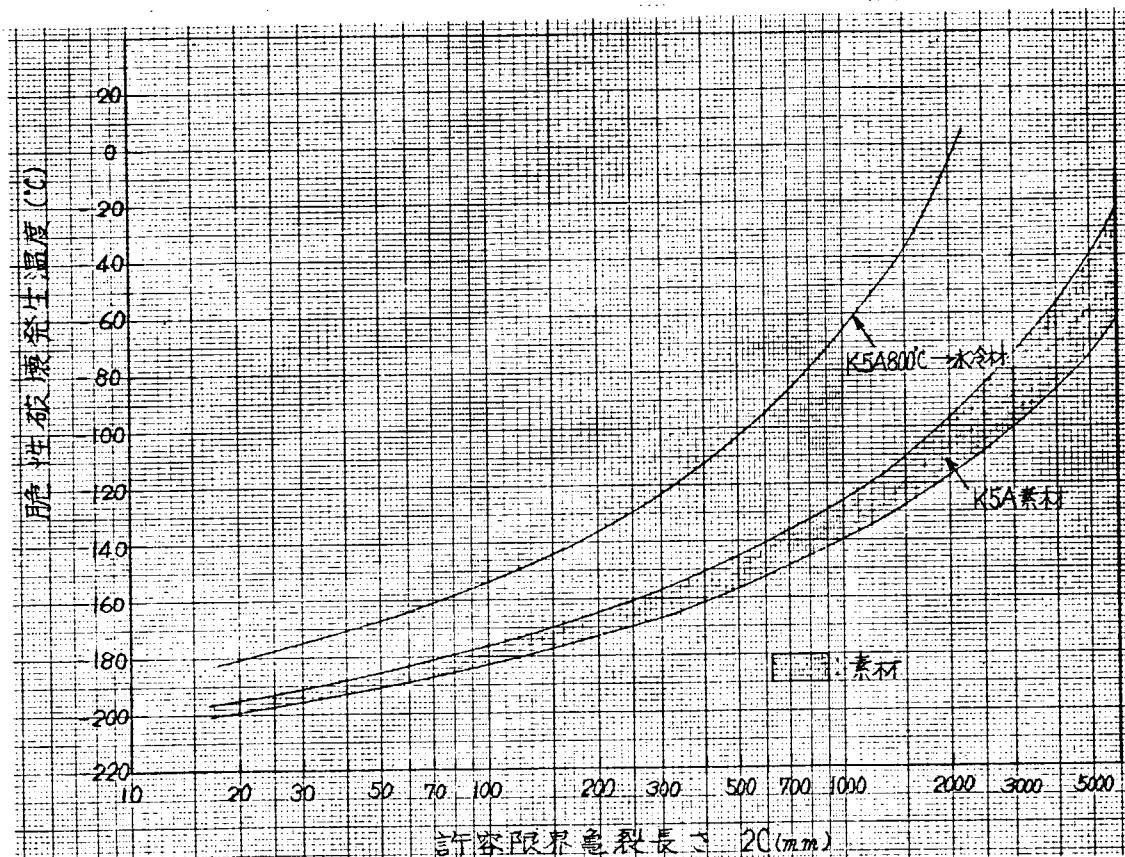


図 4.4.4 使用応力 = 8.0 kg/mm^2 における脆性破壊発生特性

(K 5 A 鋼 , 板厚 3 0 mm)

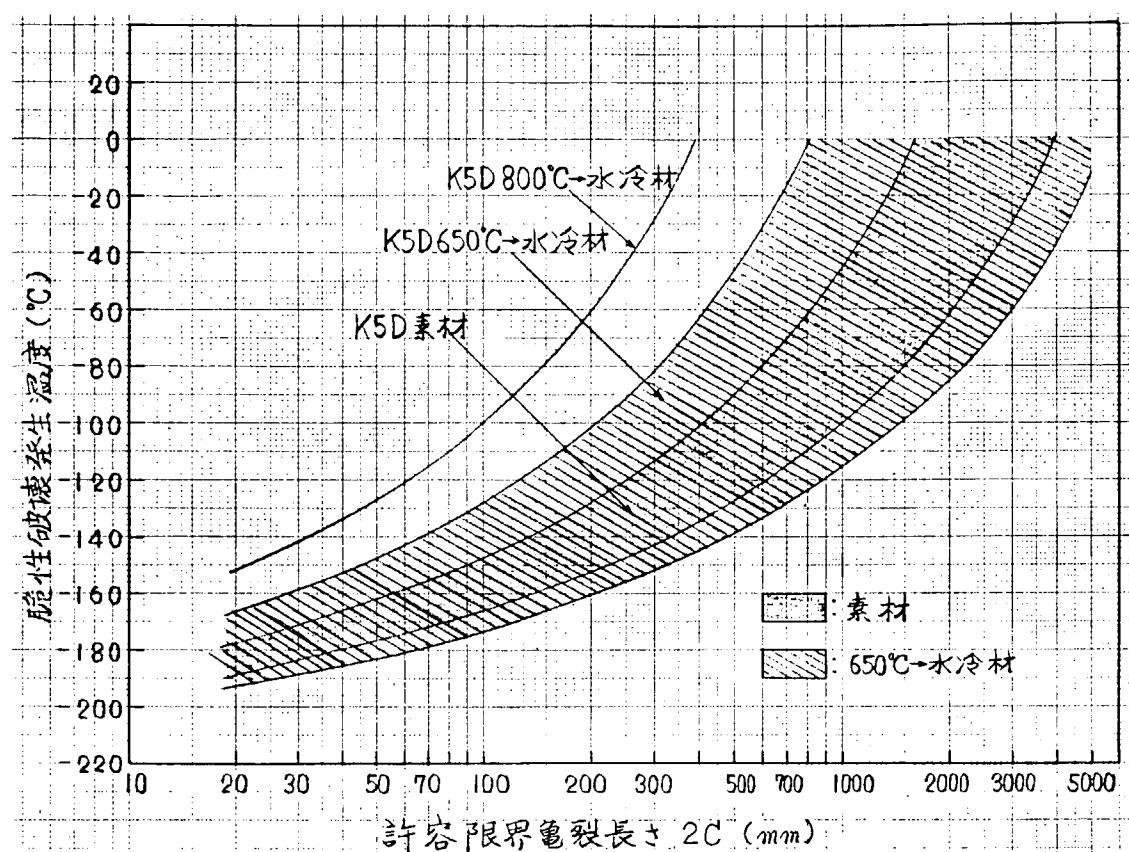


図 4.4.5 使用応力 = 16.0 kg/mm²における脆性破壊発生特性
(K5D鋼, 板厚 30 mm)

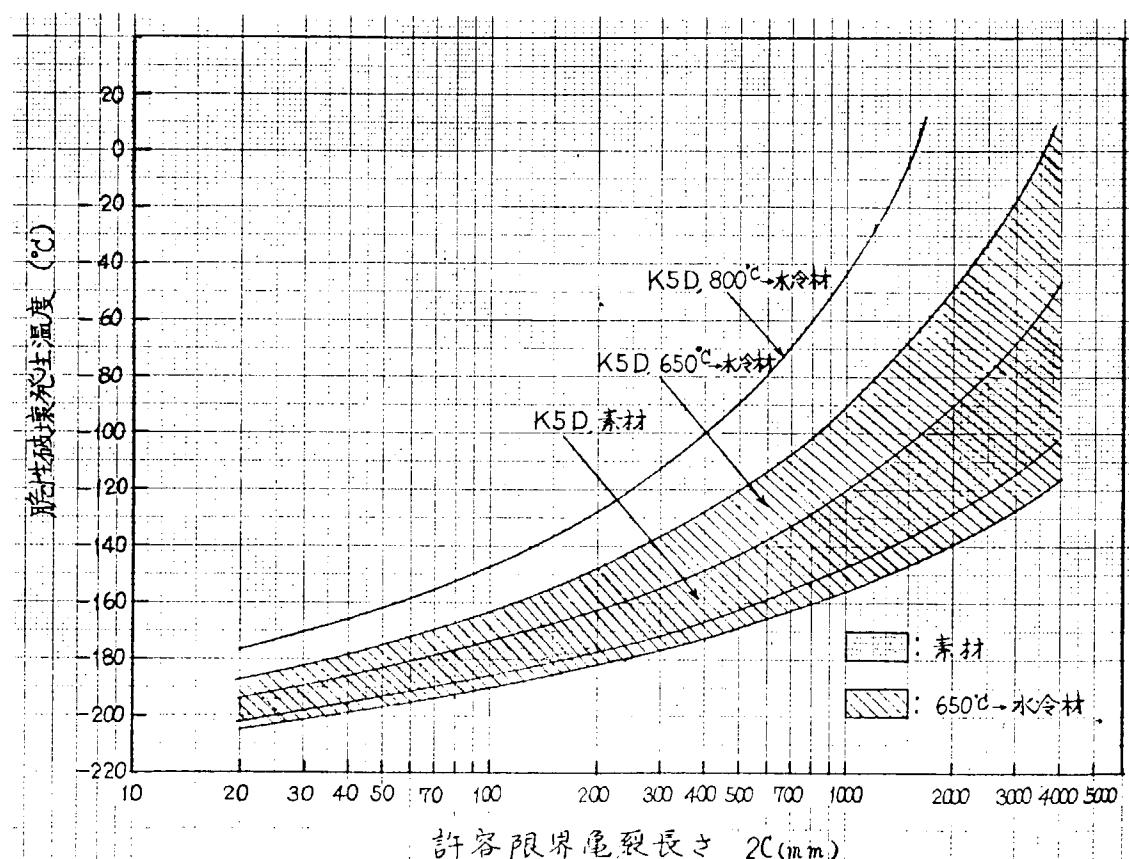


図 4.4.6 使用応力 = 8.0 kg/mm²における脆性破壊発生特性
(K5D鋼, 板厚 30 mm)

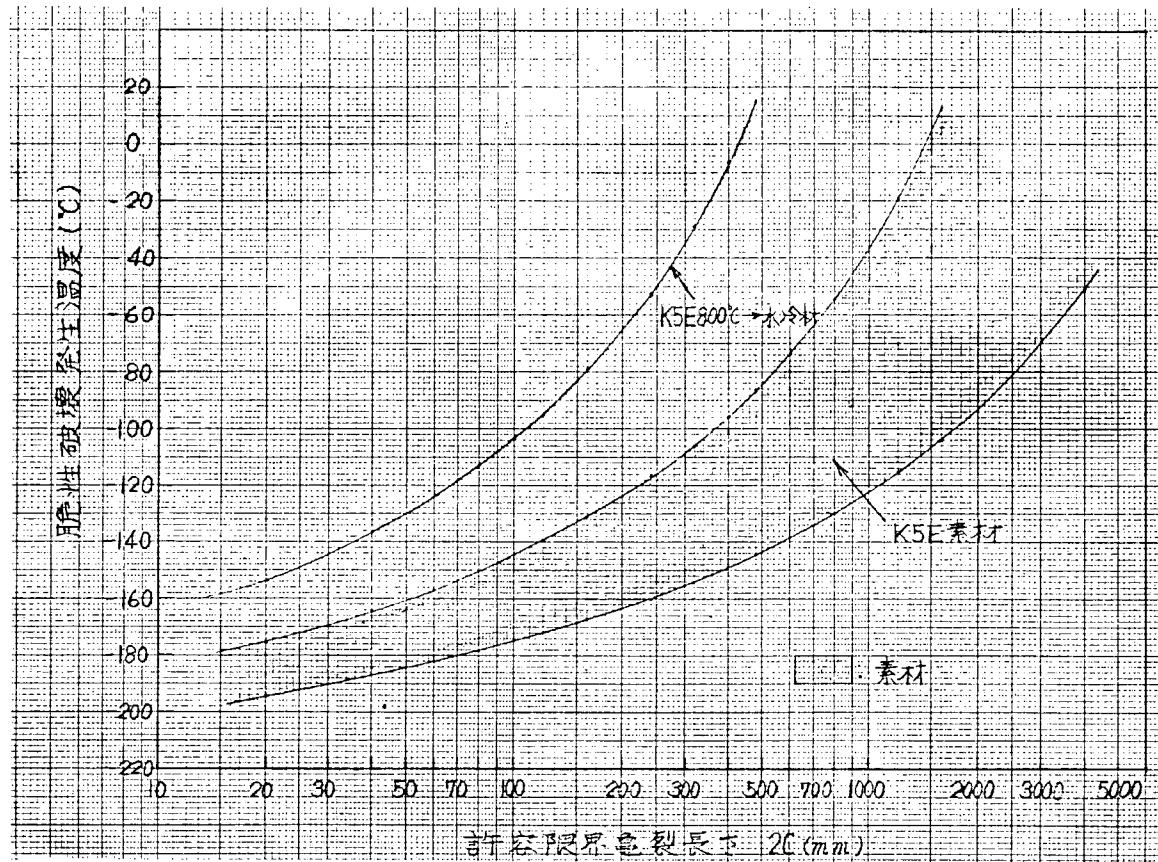


図 4.4.7 使用応力 = 16.0 kg/mm^2 における脆性破壊発生特性
(K5E鋼, 板厚30mm)

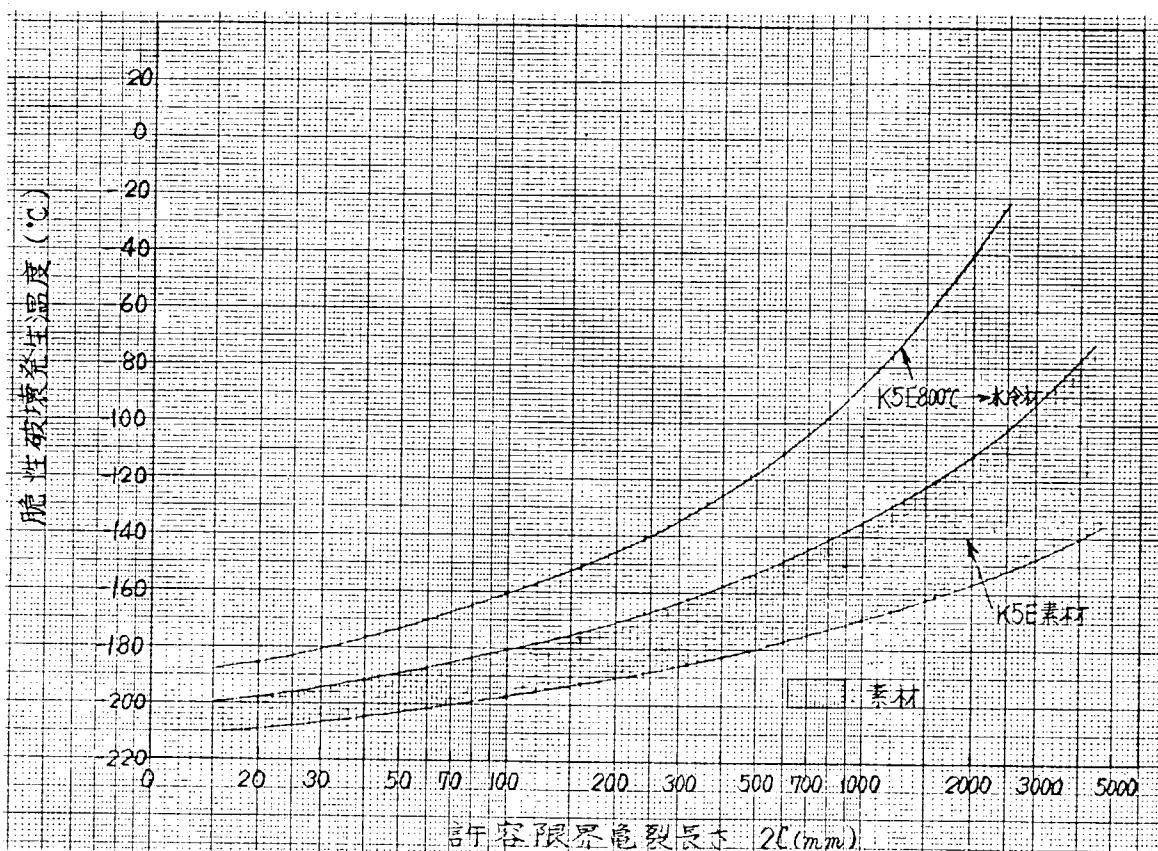


図 4.4.8 使用応力 = 8.0 kg/mm^2 における脆性破壊発生特性
(K5E鋼, 板厚30mm)

表 4.9 , 二重引張試験結果一覧表
(K 5 A 鋼, K 5 D 鋼, K 5 E 鋼, 板厚 3.0 mm)

鋼種	材料 履歴	試験片 符号	板厚 <i>t</i> (mm)	最大幅 <i>B</i> (mm)	最大高 幅 平均応力 σ_g (kg/mm ²)	亀裂長さ <i>C</i> (mm)	$\delta = \frac{C}{B}$	$f(\delta) \sigma_g$ (kg/mm ²)	K_c (kg/mm ²)	停止温度 <i>T</i> (°C)	$10^3 \frac{T}{K}$ (°K ⁻¹)	備考
K5A	素材	T 81	30	500	10	311	0.622	12.3	384	8	3.56	
		T 84	30	500	10	342	0.684	13.1	428	18	3.44	
		T 83	30	500	15	323	0.646	18.9	602	10	3.53	
		T 82	30	500	20	278	0.556	23.4	690	17	3.45	
	800°C	T 87	30	500	20	367	0.734	27.6	936	50	3.09	
		T 85	30	500	15	353	0.706	20.3	675	42	3.18	
	→水冷材	T 88	30	500	10							伝播せず
		T 86	30	500	10							伝播せり
K5D	素材	T 98	30	500	10	317	0.634	12.5	395	-5	3.73	
		T 100	30	500	15	313	0.626	18.6	582	-2	3.69	
		T 99	30	500	20	252	0.504	22.6	635	-2	3.69	
		T 97	30	500	20	273	0.546	23.2	678	-4	3.72	
	800°C	T 102	30	500	15	258	0.516	17.1	487	2	3.64	
		T 103	30	500	18	286	0.572	21.6	645	11	3.52	
	→水冷材	T 104	30	500	20	312	0.624	24.8	786	19	3.43	
		T 101	30	500	15							伝播せず
K5E	素材	T 65	30	500	10	316	0.632	12.4	391	-14	3.87	
		T 66	30	500	20	260	0.520	22.8	651	-8	3.77	
		T 67	30	500	5							伝播せず
		T 68	30	500	10							伝播せり
	800°C	T 71	30	500	20	265	0.530	23.0	664	10	3.53	
		T 72	30	500	15	275	0.550	25.0	514	2	3.64	
	→水冷材	T 70	30	500	15	248	0.496	16.9	471	0	3.66	
		T 69	30	500								伝播せり

注) 1. σ_g = gross stress

$$2. f(\delta) = \sqrt{\frac{2}{\pi} \delta \tan \frac{\pi \delta}{2}}$$

$$3. K_c = f(\delta) \cdot \sigma_g \cdot \sqrt{\pi C}$$

表 4.10 , 停止限界亀裂長さを定めた場合の使用限界温度
(鋼種 : K 5 A 鋼, K 5 D 鋼, K 5 E 鋼)
(使用応力 : 16.0 kg/mm², 8.0 kg/mm²)

材料 履歴	応力 距離 K_c 値	16.0 kg/mm ²				8.0 kg/mm ²				条件
		10 m	5 m	3 m	1 m	10 m	5 m	3 m	1 m	
		978	711	627	483	489	372	314	241	
K5A 素材	20.6 S 35.5	14.2 S 28.5	11.8 S 25.8	6.9 S 20.4	7.1 S 20.7	2.2 S 15.2	-0.8 S 12.0	-5.3 S 7.0		亀裂 停止 限界 温度 (°C)
K5A 800°C→水冷材	50.5	42.8	40.0	34.2	34.5	28.5	25.0	19.5		
K5D 素材	2.3 S 10.6	-3.3 S 4.7	-5.4 S 2.4	-9.7 S -2.2	-9.5 S -2.0	-13.9 S -6.6	-16.6 S -9.4	-20.6 S -13.7		
K5D 800°C→水冷材	15.0 S 23.0	9.0 S 16.6	6.6 S 14.1	1.9 S 9.2	2.1 S 9.4	-2.7 S 4.3	-5.6 S 1.3	-10.0 S -3.3		
K5E 素材	-0.2	-5.6	-7.7	-12.0	-11.8	-16.1	-18.7	-22.7		
K5E 800°C→水冷材	13.4 S 17.5	7.4 S 11.4	5.1 S 9.0	0.4 S 4.2	0.7 S 4.4	-4.1 S -0.5	-6.9 S -3.4	-11.3 S -7.8		

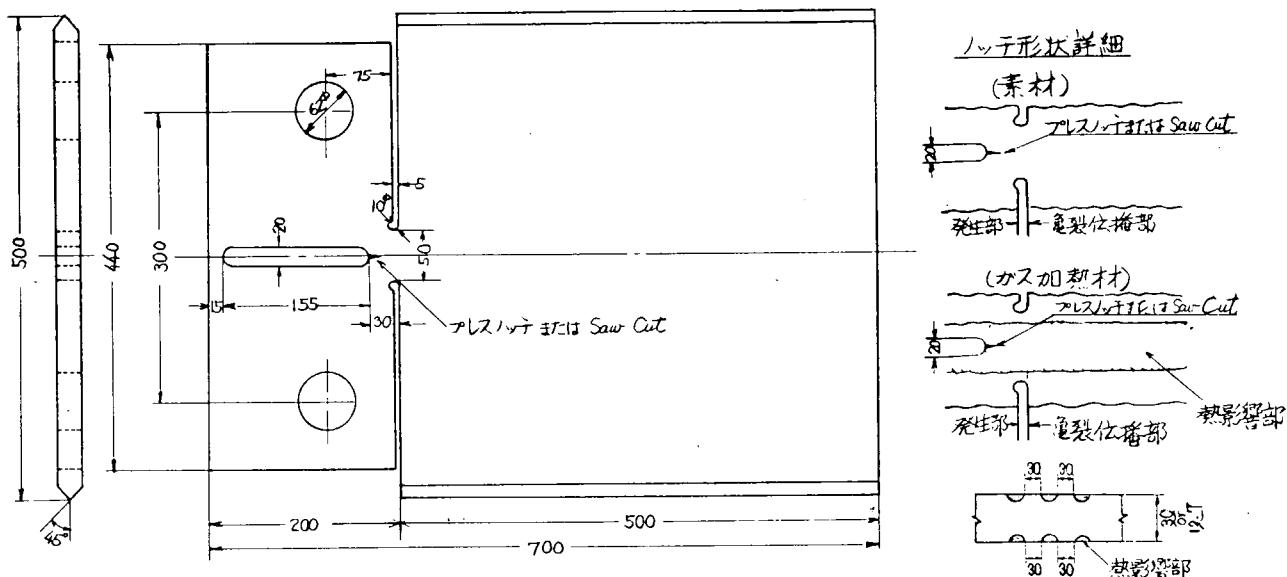


図 4.49 標 準 型 二 重 引 張 試 験 片

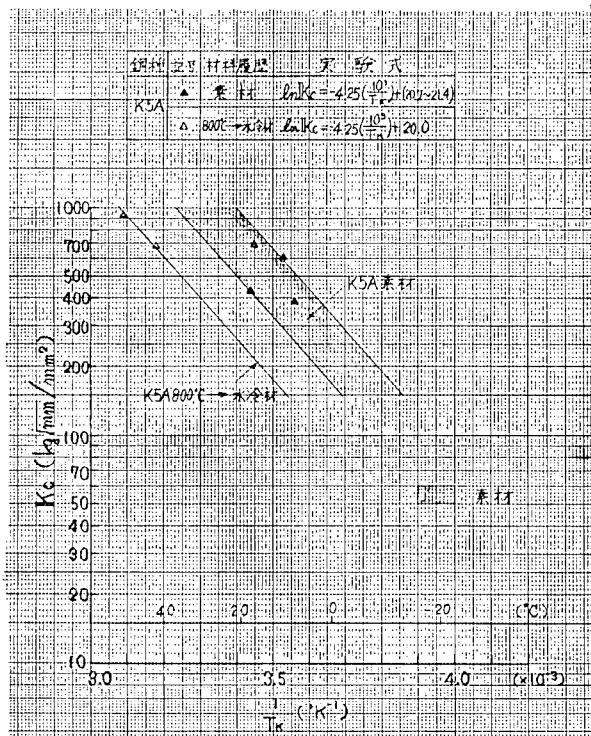


図 4.50 二重引張試験結果
(K5A鋼, 板厚3.0mm)

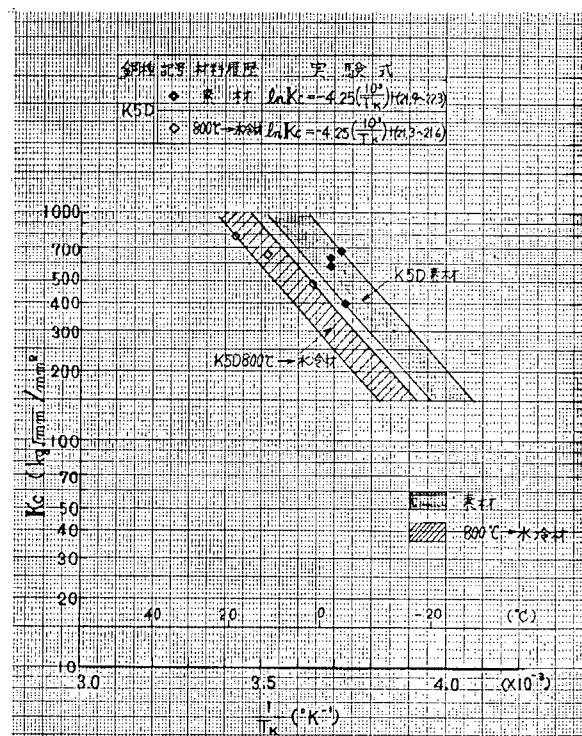


図 4.51 二重引張試験結果
(K5D鋼, 板厚3.0mm)

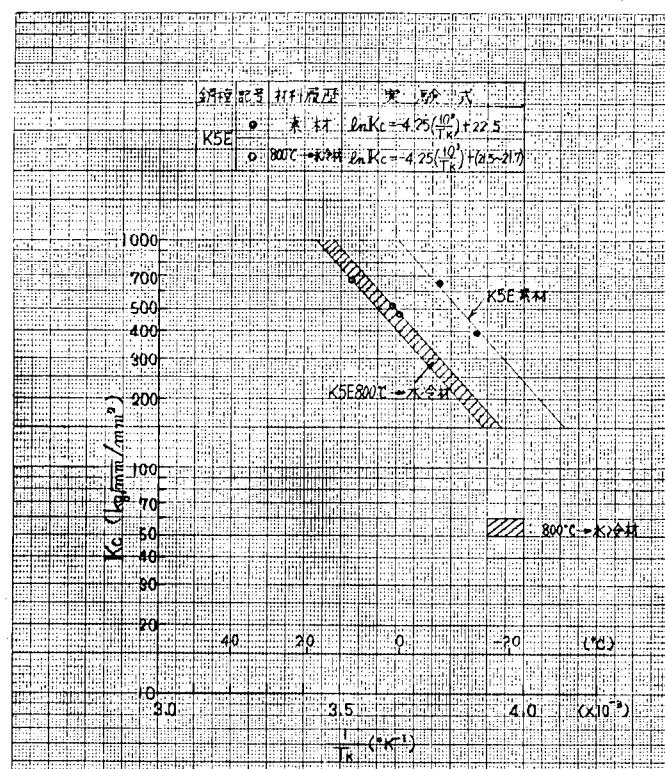


図 4.5.2 二重引張試験結果

(K5E鋼, 板厚3.0mm)

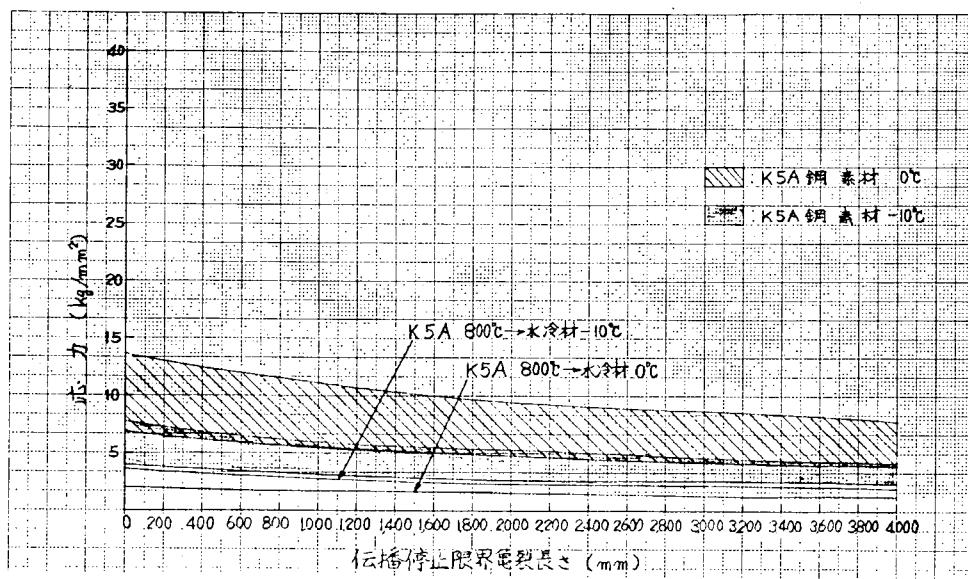


図 4.5.3 温度一定とした場合の使用応力と伝播停止限界亀裂長さとの関係

(K5A鋼, 板厚3.0mm)

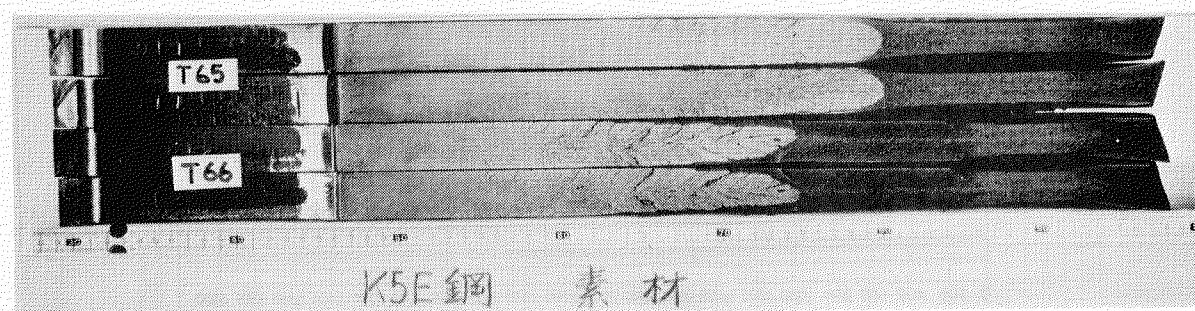
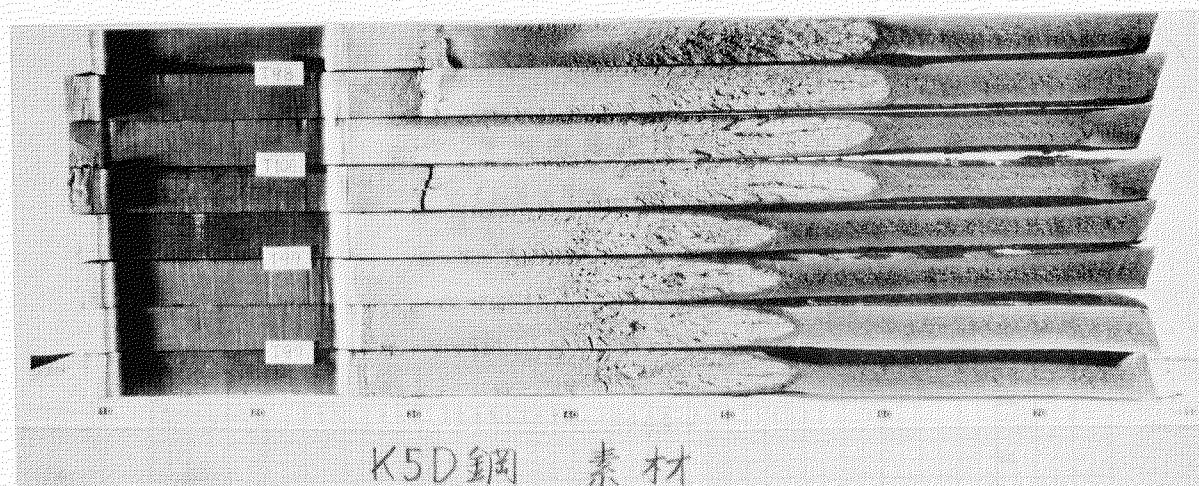
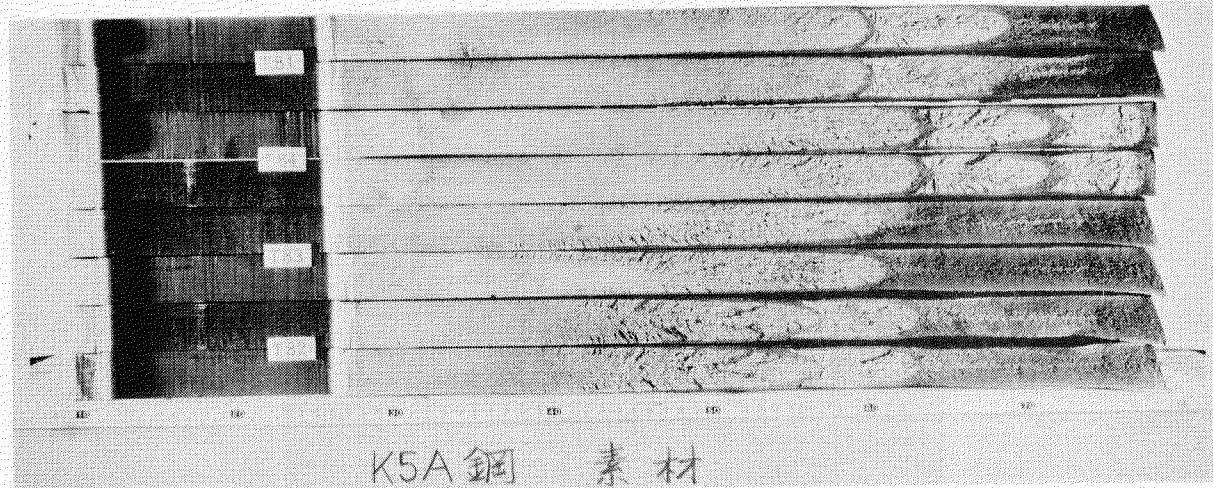
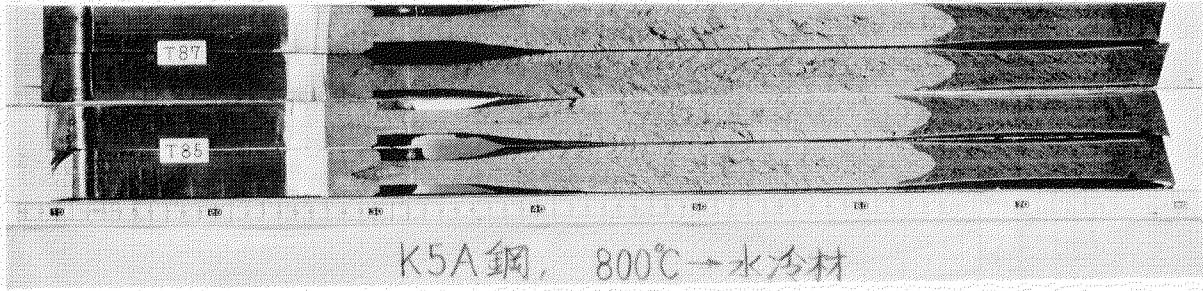
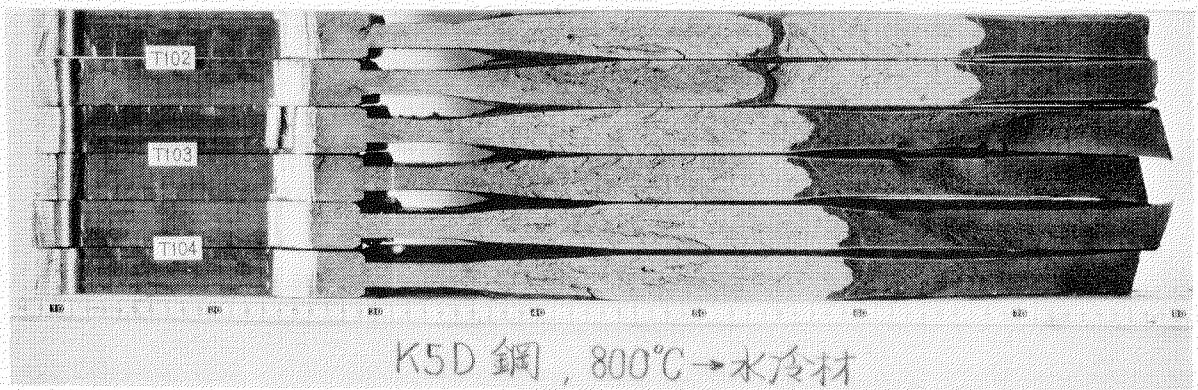


写真 4.1.1 二重引張試験片破面状況

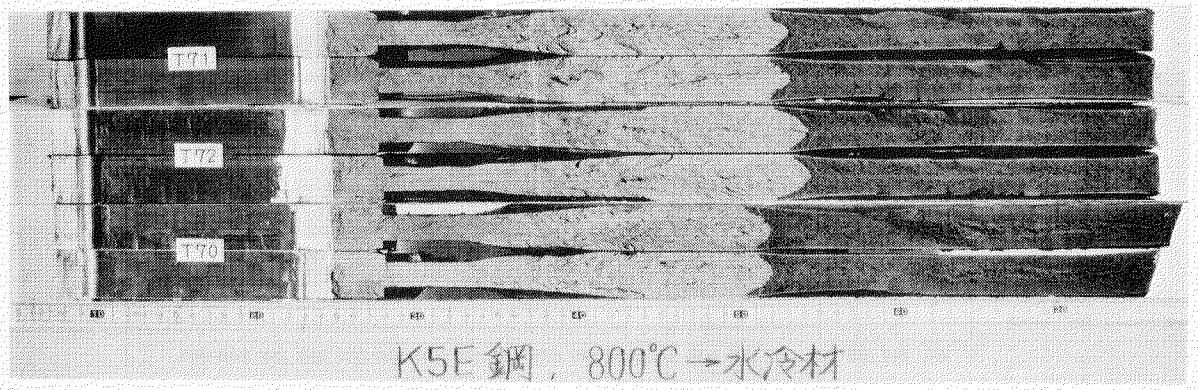
(K5A鋼, K5D鋼およびK5E鋼, 板厚3.0mm)



K5A鋼, 800°C→水冷材



K5D鋼, 800°C→水冷材



K5E鋼, 800°C→水冷材

写真 4.1.2 二重引張試験片破面状況

(K5A鋼, K5D鋼およびK5E鋼, 板厚3.0mm)

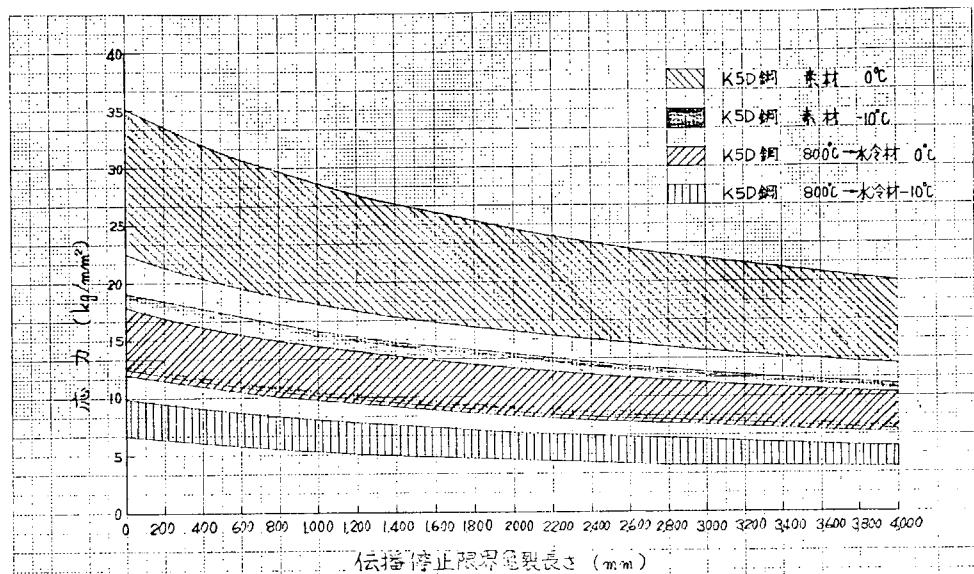


図 4.5.4 溫度一定とした場合の使用応力と伝播停止限界亀裂長さとの関係
(K5D鋼, 板厚30mm)

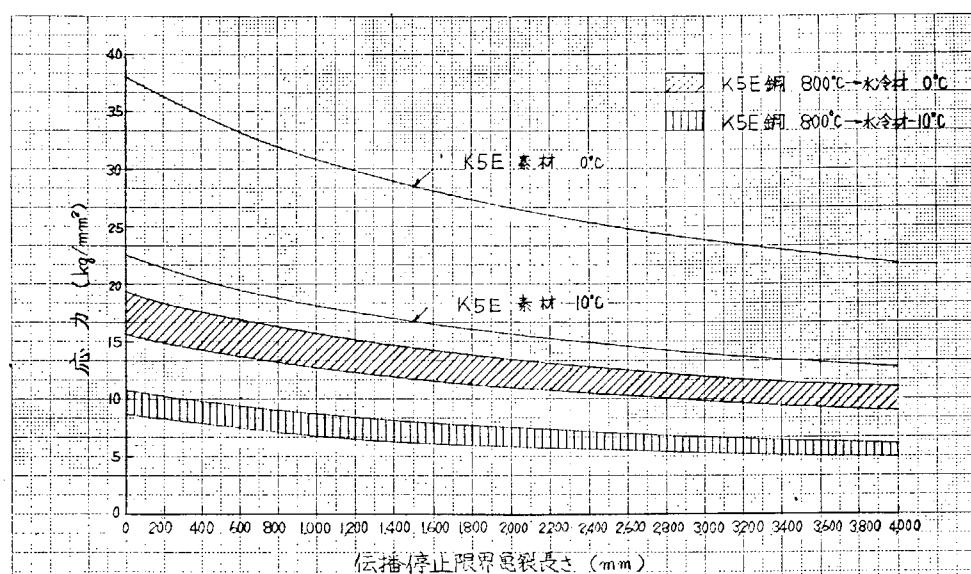


図 4.5.5 溫度一定とした場合の使用応力と伝播停止限界亀裂長さとの関係
(K5E鋼, 板厚30mm)

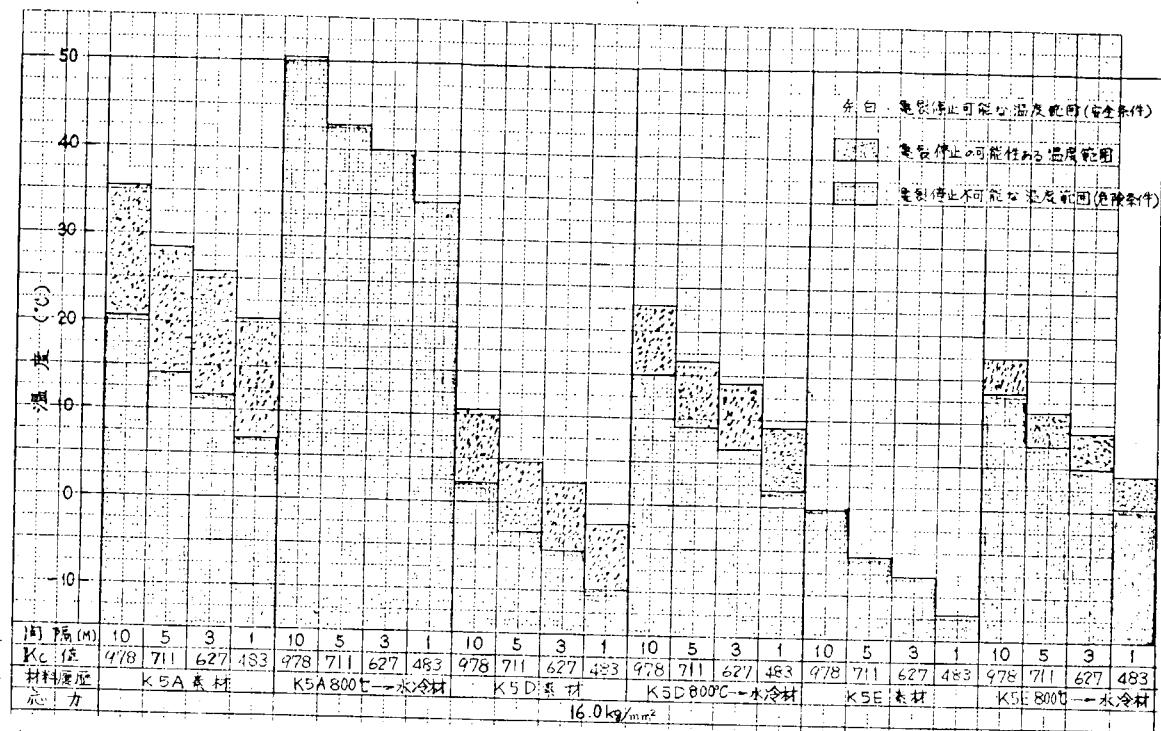


図 4.5.6 停止限界亀裂長さを定めた場合の使用限界温度

(K5A鋼, K5D鋼, K5E鋼, 使用応力 16.0kg/mm²)

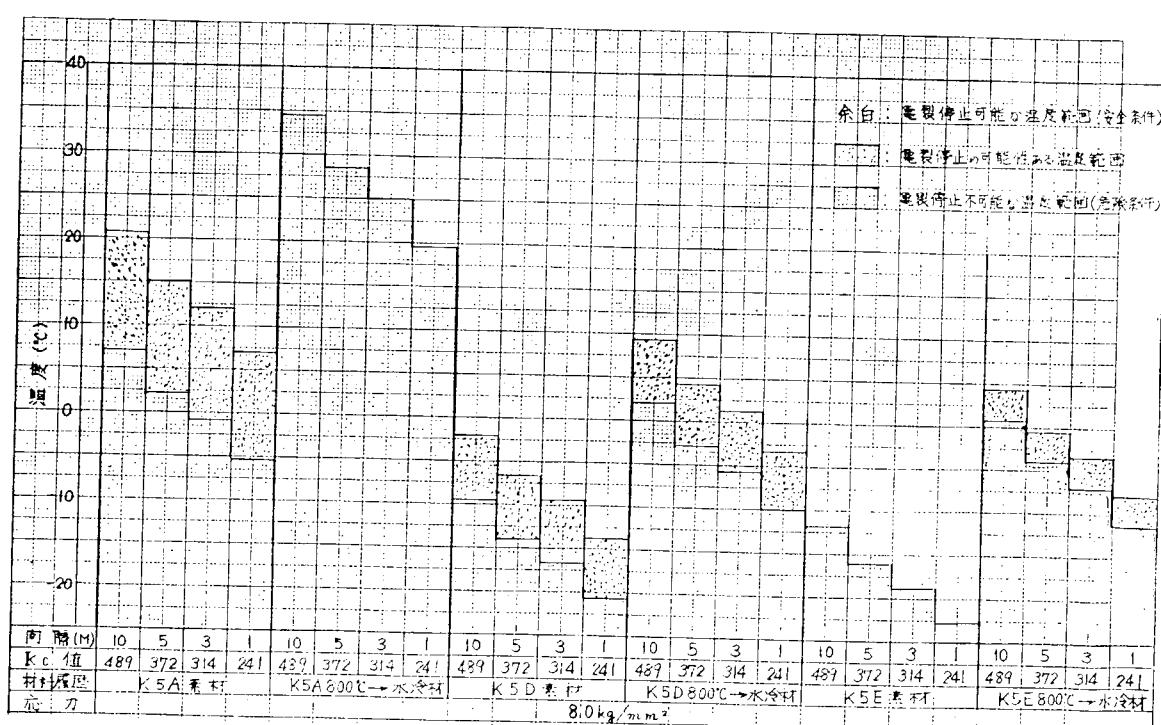


図 4.5.7 停止限界亀裂長さを定めた場合の使用限界温度

(K5A鋼, K5D鋼, K5E鋼, 使用応力 8.0kg/mm²)

表4.1.1 越賀らが用いた供試材の化学成分ならびに機械的性質

S t e e l	C o d e	P l a t e t h i c k n e s s (m m)	C o m p o s i t i o n (%) *						C e g **
			C	S i	M n	P	S	N i	
M n—C u—N i	K 5 D	2 5	0.1 3	0.2 7	1.3 5	0.01 7	0.01 0	0.1 6	0.1 5
	K 5 E	2 5	0.1 6	0.2 6	1.3 6	0.01 9	0.02 0	0.1 5	0.1 4

* Check analysis.

** C e g = C + S i / 2 4 + M n / 6 + C r / 5 + N i / 4 0 + M o / 4 V / 1 4 .

S t e e l	C o d e	M e c h a n i c a l p r o p e r t i e s			
		Y . P . (K g / m²)	T . S . (K g / m²)	E L . (%)	I m p a c t V . (K g — m)
M n—C u—N i	K 5 D	3 4 0	5 1 . 6	2 9 0	9 . 0 a t 0 C
	K 5 E	3 7 . 4	5 3 . 9	2 7 . 0	1 5 . 7 a t - 1 0 C

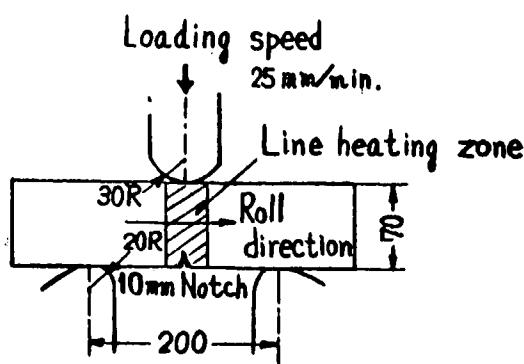


図 4.5.8 van der Veen 試験

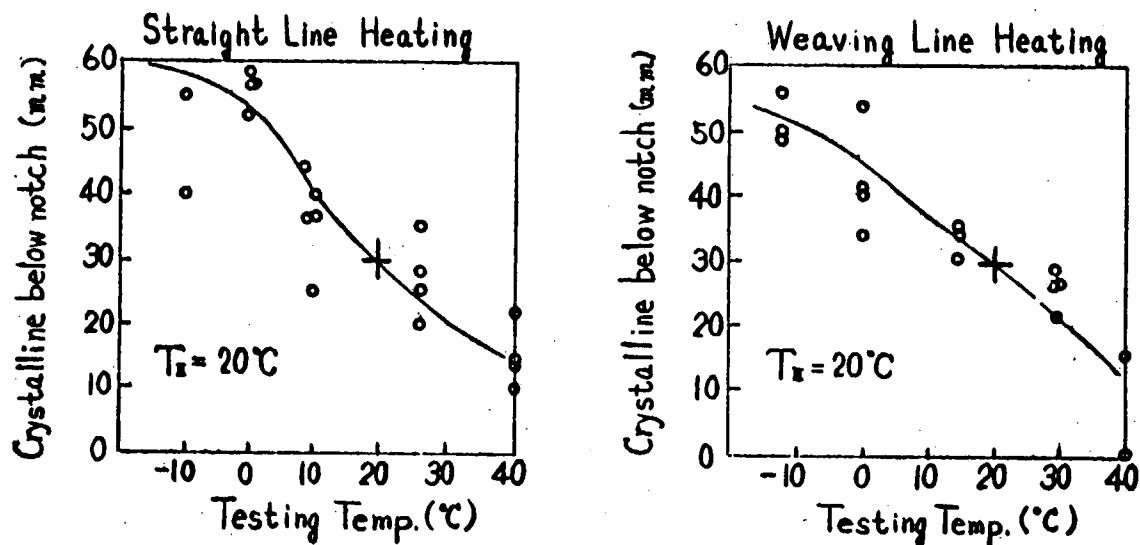


図 4.5.9 越賀らによる van der Veen 試験結果の一例

A.O.
(K5D鋼 2.5, 900°C → 650°C W.C.)

表 4.1.2 越賀らによる van der Veen 試験結果 (遷移温度)

Steel	Plate thickness. (mm)	van der Veen test		
		Base Metal	900°C A.O 650°C W.O	900°C A.O 450°C W.C
K5D	1.1	-24	-16	-
	2.5	12	20	18
K5E	1.1	-40	-27	-
	2.5	-14	-3	-4

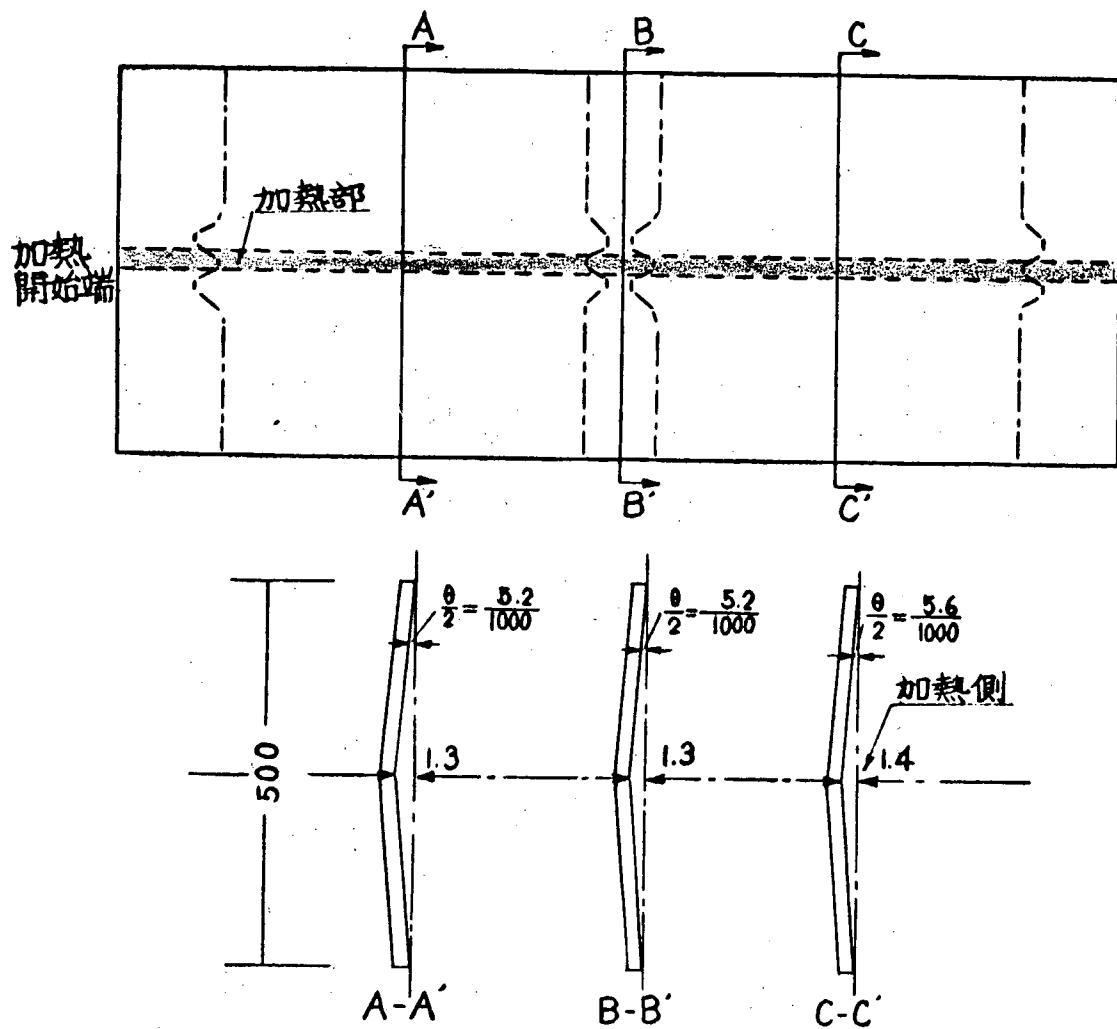


図 4.6.0 金子らによる横方向線状ガス加熱試験片の角変形

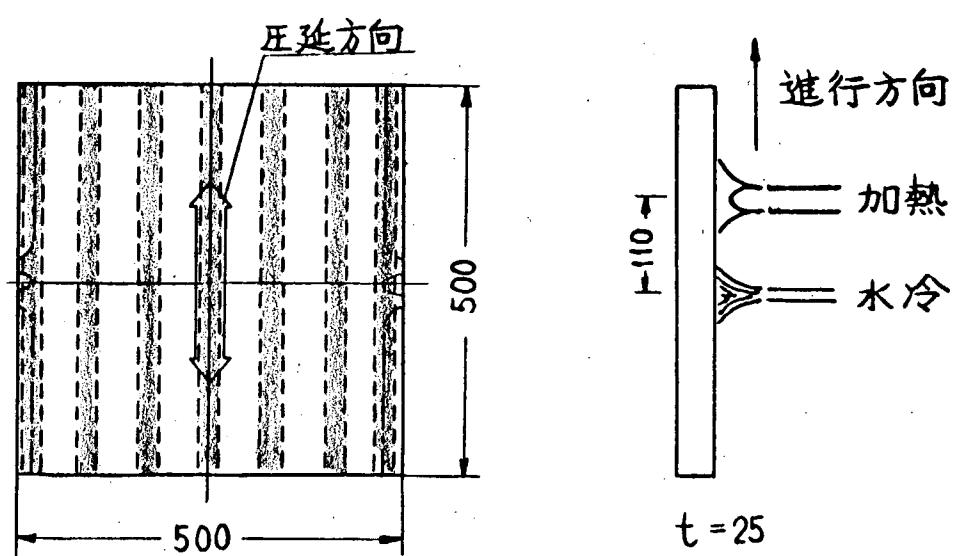


図 4.6.1 金子らによる縦方向線状ガス加熱試験片

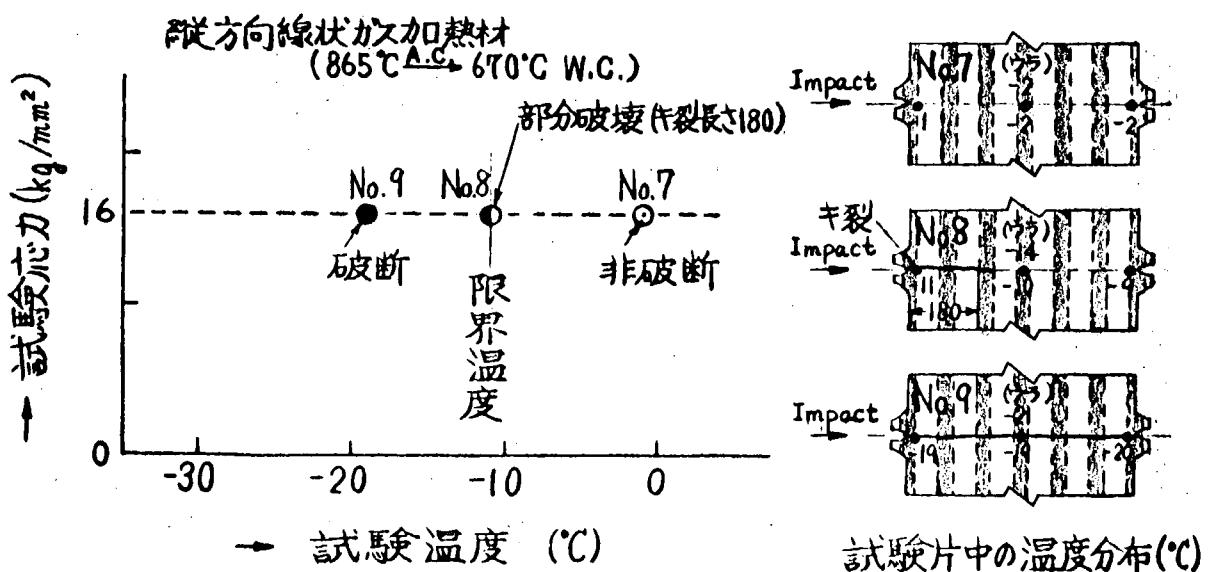
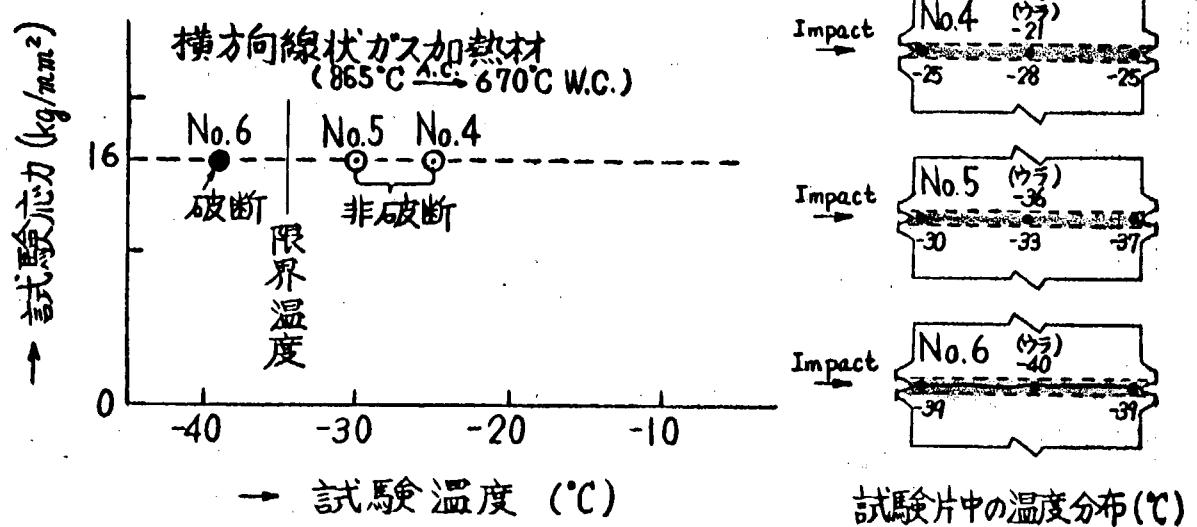
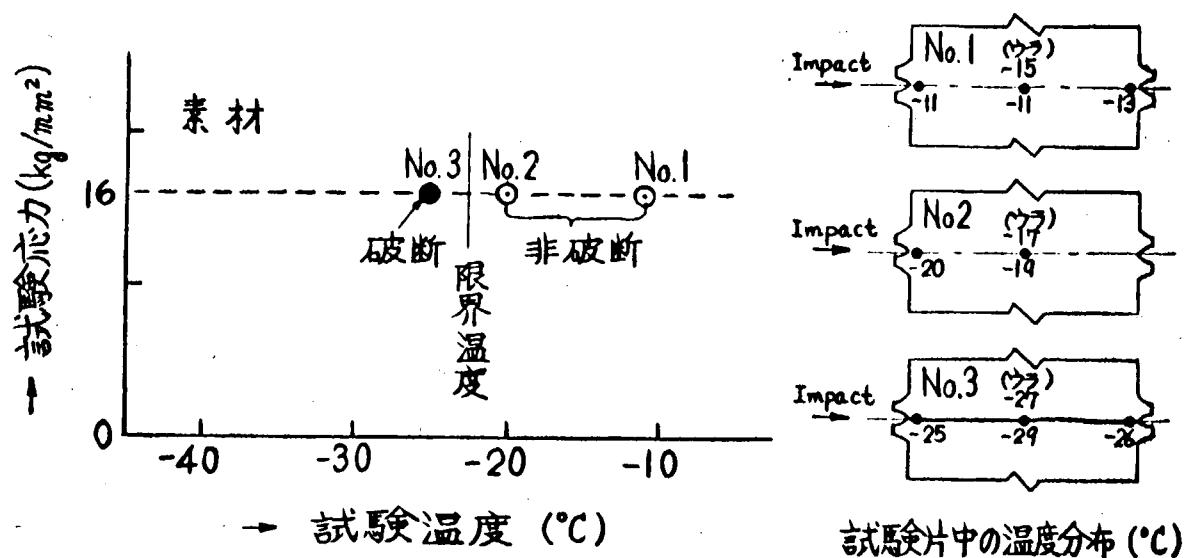


図 4.6.2 金子らによる 50 キロ HT 鋼に対する ESSO 試験結果

(附)

1. 供試鋼板の板取り

図1～5に各供試材について、予備試験および本年度の試験に使用した各試験片の板取を示す。

2. 150トン・サブテンション装置

150トン・サブテンション装置の組立図を図6に示す。150トン・サブテンション装置の主要目は次のとおりである。

主要目

1) サブテンション本体

最大引張荷重	150トン
ピン間距離	300mm
ピン直径	60mm

2) 油圧シリンダー

シリンダー内径	155mm
ストローク	100mm
最大使用圧力	398kg/cm ²

3) 作動油圧ポンプ

ポンプ型式	三菱FGポンプ FG6-12/12
ポンプ吐出量	4.4ℓ/min

4) ポンプ駆動電動機

出力	3.7kW×6P
回転数	1200r.p.m
定格	連続
電源	D.C 200V×60φ

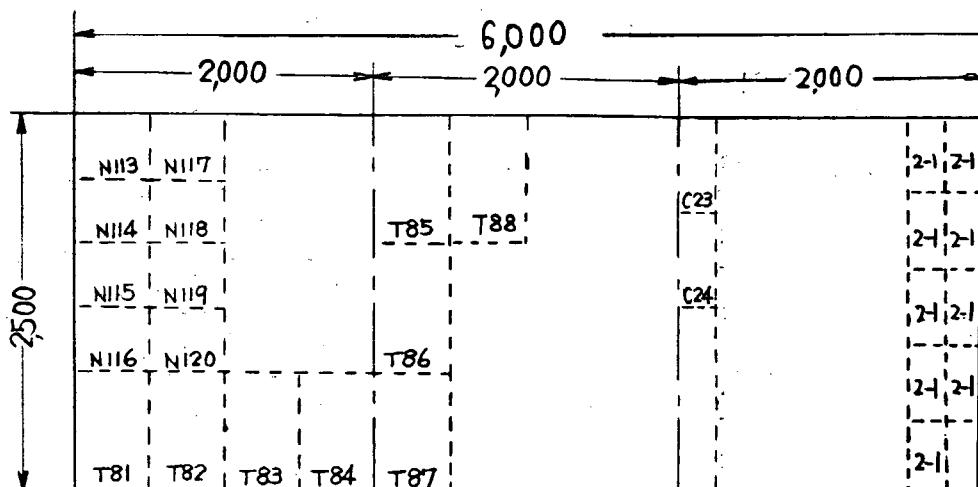


図1 供試鋼板K5A(板厚30mm)板取り要領

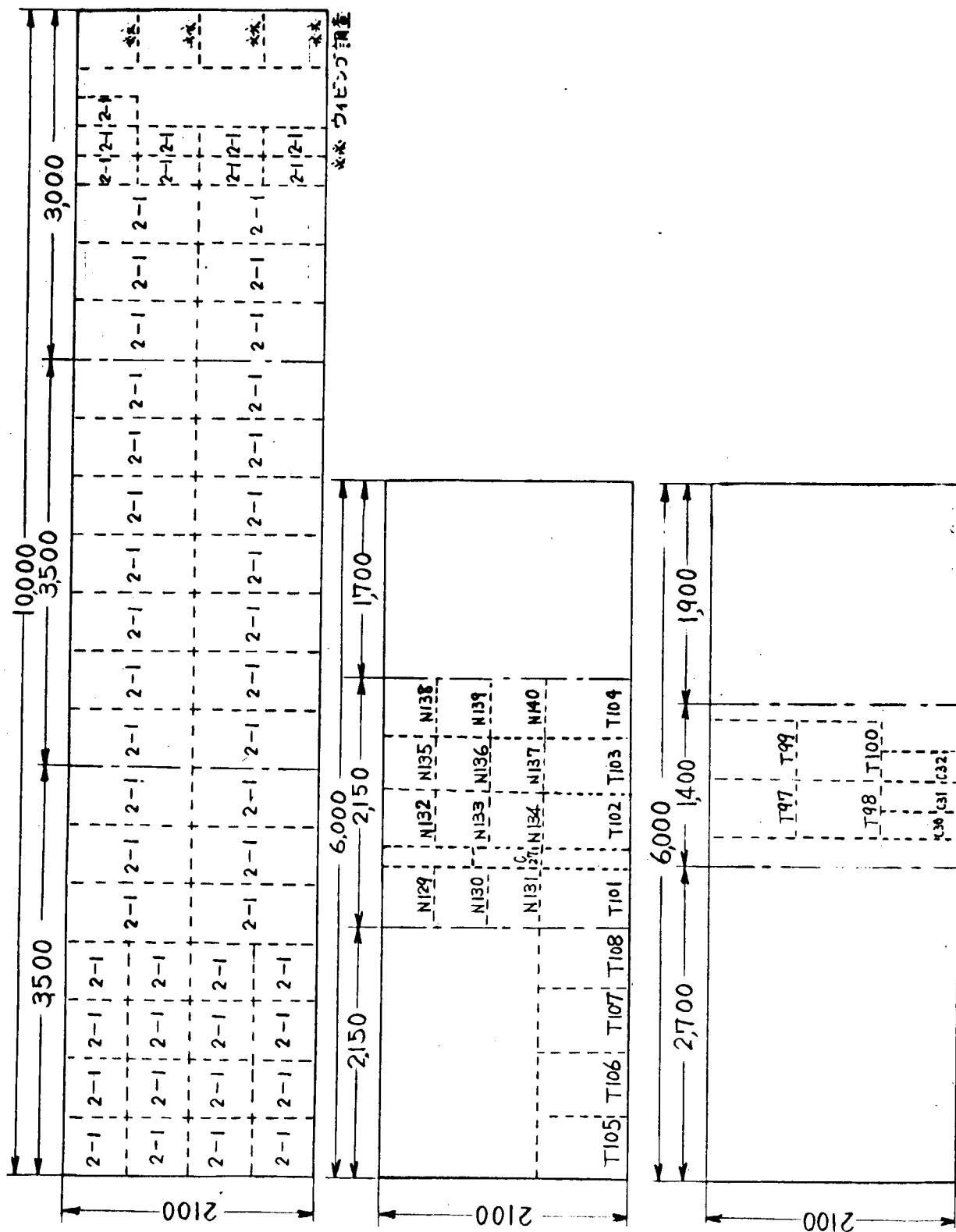
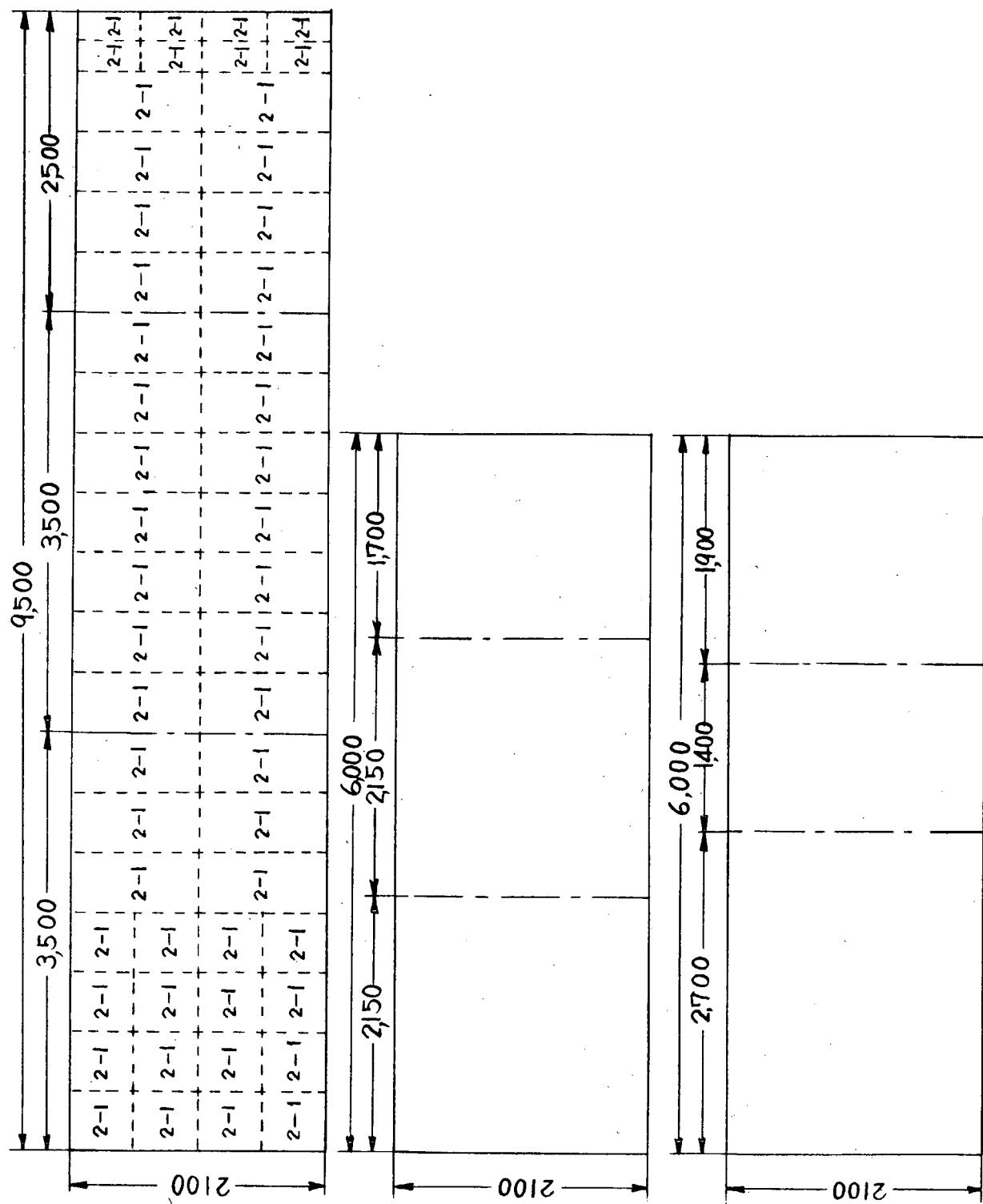


図 2 供試鋼板 K5D (板厚 30 mm) の板取り要領

図 3 供試鋼板 K-5 D (板厚 1.2.7 mm) の板取付要領



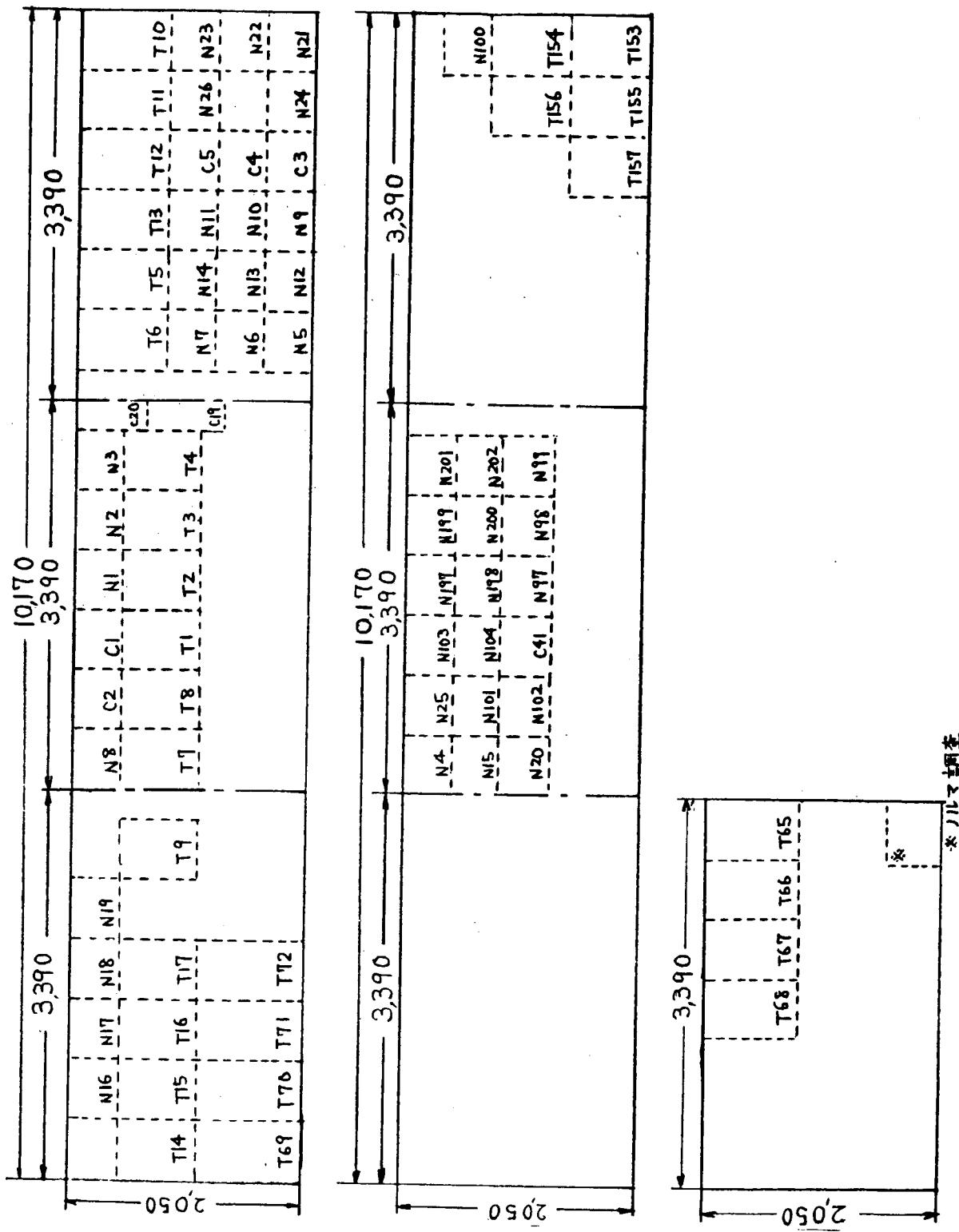


図4 供試鋼板K5E(板厚30mm)の板取り要領

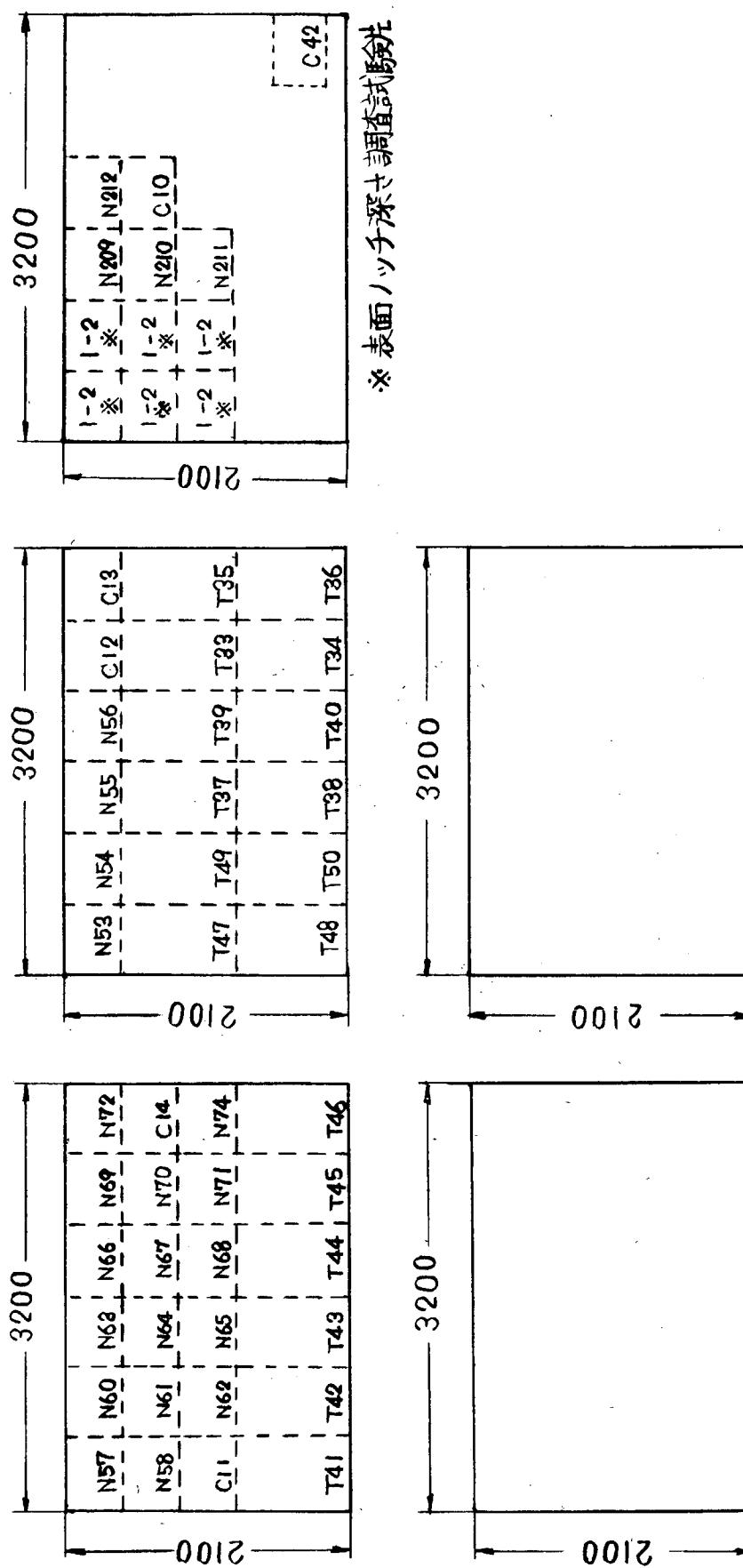
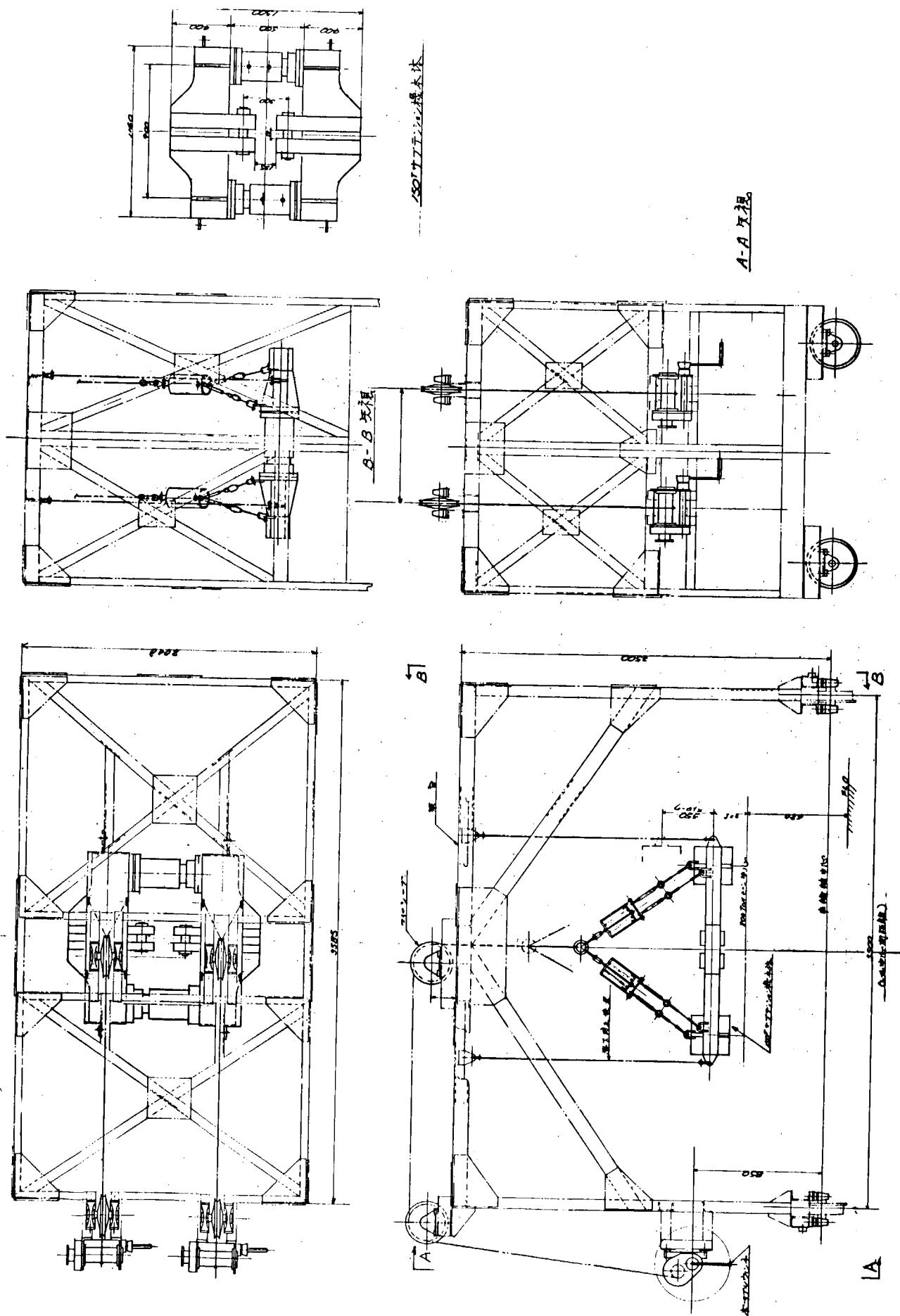


図 5 供試鋼板 KEN (板厚 30 mm) の板取り要領

図 6 150 Ton サブテンション装置組立図



5. む す び

上述のように、本年度の研究実施に際しては種々の技術的障害に遭遇したが、一応計画通りの試験を終了し、所期の目的を達成する見通しが得られたものと思われる。本研究は来年度も引き続き実施し、残された問題や新たに提起された問題を究明していく予定であるので、確定的結論は来年度にゆずりたい。