

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. 137

第121研究部会
船殻の脆性破壊に及ぼす溶接部
疲労亀裂の影響に関する研究
報告書

昭和46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121研究部会においてとりまとめたものである。

本研究の委員は次のとおりである。

第121研究部会委員名簿（敬称略五十音順）

部会長	金沢 武	(東京大学)	池田 一夫	(神戸製鋼)
幹事	飯田 広	(東京大学)	越賀房夫	(日本钢管)
	黒川 常夫	(長崎大学)	矢島 浩	(三菱重工業)
	町田 進	(東京大学)	井上 肇	(船舶技術研究所)
委員	青木 真一	(川崎製鉄)	小倉 信和	(横浜国立大学)
	大野 章	(新日本製鉄)	木下 勝	(三菱重工業)
	賀来信一	(日本海事協会)	酒井 啓一	(石川島播磨重工業)
	桑山 則男	(住友金属工業)	菅 尚司	(佐世保重工業)
	酒戸 恒男	(住友重機)	栖原 二郎	(九州大学)
	修行 稔	(長崎大学)	寺井 清	(川崎重工業)
	土屋 九一	(三井造船)	新田 順	(日本海事協会)
	西牧 興	(日立造船)	的場 正明	(三菱重工業)
	藤井 英輔	(船舶技術研究所)	安永 信常	(大阪造船所)
	村松省吾	(三保造船所)	渡辺次郎	(函館ドック)

目 次

1. まえがき	1
2. 研究の目的・内容	1
3. 材料試験結果	2
4. 脆性亀裂発生試験結果	2
4. 1 中央切欠き型ディープノッチ試験結果	2
4. 2 モデル脆性亀裂発生試験結果	3
5. 残留応力計測結果	3
6. 疲労試験結果	4
7. 試験結果の考察	5
7. 1 モデル脆性亀裂発生試験結果について	5
7. 2 疲労試験結果について	5
8. 結論	6
9. むすび	6
付録 クリップゲージによる開口変位の計測	57

1. まえがき

日本造船研究協会 第121 研究部会は、「船殻の脆性破壊における溶接部疲労亀裂の影響に関する研究」をテーマとして、昭和45年に発足したものである。

この研究の目的は、船殻の隅内溶接等の溶接欠陥から隅内溶接部にそって発生するような、拘束の大きい部分に発生した疲労亀裂からの脆性破壊発生特性を把握し、船殻の致命的損傷である脆性破壊による重大損傷防止の基礎検討資料を得ることである。

なお、本研究は委員会において審議決定した研究計画の基本方針にもとづき、実験担当委員を中心とした幹事会をたびたび開催し、詳細な技術的検討その他を行なって実施したものである。研究の全体計画は、後述のように3ヶ年にわたるものであるが、本報告書は、その第1年度分の経過報告書としてとりまとめたものである。

2. 研究の目的・内容

設計の改善・工作技術の進歩・製鋼技術の進歩による鋼材の改良等により、今日では常識的な設計・工作・材料で船殻が建造される以上、微小な溶接欠陥などから直接脆性破壊が発生し、重大損傷に発展することはまずないといえよう。

しかしながら、構造的・局部的応力集中部である隅内溶接等の溶接欠陥から疲労亀裂が発生・生長するような損傷例が、最近かなり多く報告されている。

脆性破壊発生特性は、応力・温度・欠陥の大きさの函数として表現できることが判明しているので、疲労亀裂の長さがある限界値を越えれば、脆性破壊に移行する危険性があるわけである。

脆性亀裂発生に関しては、これまでにも疲労亀裂との関連に重点をおいたいくつかの研究結果が報告されているが、それらの多くは供試試験片として平板を使用している。したがって、それらの試験片での疲労亀裂発生状況（疲労蓄積状況）は、実際の船殻構造における疲労亀裂発生部と比較した場合、拘束条件にかなりの差があるものと考えられる。それゆえ、平板で行なった研究結果を、船殻構造のように拘束の強い部材に現われる疲労損傷部に、そのまま適用できるかどうかは、今後早急に究明する必要がある。

以上の観点から、昭和45年～47年の3ヶ年計画で、隅内溶接部を有した簡単なモデル試験片を供試して、実際の船殻構造における同様な拘束の強い部材に発生した疲労亀裂からの脆性破壊発生現象を究明するため、以下の研究を実施するものである。

1) 材料試験

供試鋼の基本的機械的性質を把握するため、V-ノッチおよびプレス-ノットシャルピー衝撃試験ならびに丸棒引張試験を実施する。

2) 脆性亀裂発生試験

供試鋼の脆性亀裂発生特性、ならびに隅内溶接部を有した3次元モデルにおける脆性亀裂発生特性を把握するため、中央切欠き型ディープノット試験ならびにモデル脆性亀裂発生試験を実施する。

3) 疲労試験

隅内溶接部を有した3次元モデルにおける隅内溶接にそっての疲労亀裂発生・生長状況を把握するため、3次元モデルを供試、室温にて疲労試験を実施する。

4) 疲労亀裂からの脆性破壊発生試験

隅内溶接部を有した3次元モデルにおける、隅内溶接にそっての疲労亀裂からの脆性亀裂発生特性を把握する。

5) 残留応力計測

脆性亀裂発生試験・疲労試験・疲労亀裂からの脆性破壊発生試験等に供試するモデルの残留応力分布を計測する。

以上を総合解析し、船殻の隅肉溶接等の溶接欠陥から隅肉溶接部にそって発生した疲労亀裂からの脆性破壊発生特性を定量的に把握し、船殻の致命的損傷である脆性破壊による重大損傷防止の基礎検討資料を得るものである。

なお、昭和45年度は、その第1段階として、予備的な実験を実施した。

3. 材料試験結果

今日、船殻に多量に使用されている一般船体用鋼板の代表として、K A S 鋼（板厚 20 mm）を供試した。

供試鋼の化学成分ならびに機械的性質を表1に、今年度予備試験に供試した各種試験片の板取り要領を図1に示す。

供試鋼の基本的な機械的性質を把握するため、板厚中央部圧延方向より採取した 6 mm φ 丸棒試験片を供試して、室温～−196 °C にて引張試験を実施した。試験結果を図2・図3に示す。図3より降伏点と温度との間に

$$\sigma_y = 20.5 \cdot e^{-\frac{108.8}{T_k}} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

なる関係が成り立つことが確認された。

さらに、供試鋼の基本的な韌性を求めるため、板厚中央部圧延方向より採取した試験片による標準V一ノッチおよびプレス一ノッチシャルピー衝撃試験を実施した。試験結果を図4および図5に示す。

図4・図5より、各種遷移温度は下記のごとくであることが確認された。

vTr 15	vTr 35	vTre	vTrs	pTre	pTc
−12 °C	4 °C	10 °C	9 °C	48 °C	35 °C

4. 脆性亀裂発生試験結果

供試鋼の脆性亀裂発生特性、ならびに、隅肉溶接部を有した3次元モデルにおける隅肉溶接 Toe 部に存在する切欠きからの脆性亀裂発生特性を把握するため、中央切欠き型ディープノッチ試験ならびにモデル脆性亀裂発生試験を実施した。

4.1 中央切欠き型ディープノッチ試験結果

試験片幅 400 mm、切欠き全長 240 mm の中央切欠き型ディープノッチ試験片を供試し、低温引張試験を実施した。

試験結果を表2・図6および図7等に示す。また、試験後の破面状況を写真1に示す。表2・図6に示した Kci 値は、脆性亀裂発生に関する Fracture Toughness の Parameter で、次式により求められるものである。

$$K_{ci} = \sigma_g \cdot \sqrt{\pi C} \cdot \sqrt{\frac{2W}{\pi C} \tan \frac{\pi C}{2W}} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ただし、 σ_g = Gross Stress (kg/mm²)

2W = 試験片幅 (mm)

2 C = 切欠き全長(mm)

図 6 から明らかなるとく、供試鋼の脆性亀裂発生特性を、上記の K_{ci} 値と温度との関係で示せば次のとくとなることが確認された。

$$K_{ci} = 2.33 \times 10^3 \cdot e^{\frac{-3.93 \times 10^3}{T_k}} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

ただし、 T_k = 絶対温度

さらに、表 2 ・ 図 7 に示した COD 値は、Be-Cu 製のクリップゲージにより計測したものであり、計測法については、付録(付図 1 ～付図 3)にて簡単に説明する。

図 7 より多少のバラツキはあるが、COD 値と温度との関係も、先に記した K_{ci} 値と温度との関係とほぼ同じ傾向を示していることが明らかである。

4.2 モデル脆性亀裂発生試験結果

隅肉溶接部を有した 3 次元モデルにおける脆性亀裂発生特性を把握するため、荷重垂直方向に Stiffener を有し、その隅肉溶接 Toe 部に全長 240 mm の中央切欠きを有した、幅 400 mm の 4 種類のモデル(A 型・B 型・D 型・F 型)を各々 2 個づつ供試し、低温引張試験を実施した。供試モデルの形状を図 8 ～ 図 11 に示す。

さらに、脆性亀裂発生特性におよぼす溶接の影響を把握するため、荷重垂直方向に溶接ビードを置き、その Toe 部に全長 240 mm の中央切欠きを有した幅 400 mm のモデル(G 型)を 2 個供試し、低温引張試験を実施した。供試モデルの形状を図 12 に示す。

A 型・B 型・D 型・F 型・G 型 5 種類のモデルの低温引張試験結果を表 3 ・ 図 13 および図 14 に示す。表 3 ・ 図 13 に示した K_{ci} 値は、前述の②式により求めたものであり、表 3 ・ 図 14 に示した COD 値は、運輸省船舶技術研究所で開発された静電容量による計測法(付録一付図 4 ・ 付図 5 ～ にて簡単に説明する)を用いて測定したものである。

図 13 より、5 種類のモデルの試験結果は、各々実験点が 2 点しかないが、先に述べた中央切欠き型ディープノッチ試験結果を参考に実験式を求めると下記のごとくなる。

$$\text{A 型} \dots \dots \dots K_{ci} = 0.71 \times 10^3 \cdot e^{\frac{-3.93 \times 10^3}{T_k}} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

$$\text{B 型} \dots \dots \dots K_{ci} = 1.47 \times 10^3 \cdot e^{\frac{-3.93 \times 10^3}{T_k}} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

$$\text{D 型} \dots \dots \dots K_{ci} = 2.60 \times 10^3 \cdot e^{\frac{-3.93 \times 10^3}{T_k}} \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

$$\text{F 型} \dots \dots \dots K_{ci} = 1.74 \times 10^3 \cdot e^{\frac{-3.93 \times 10^3}{T_k}} \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

$$\text{G 型} \dots \dots \dots K_{ci} = 0.88 \times 10^3 \cdot e^{\frac{-3.93 \times 10^3}{T_k}} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

また、図 14 より COD 値と温度との関係も、前述の K_{ci} 値と温度との関係とほぼ同じ傾向を示している。しかしながら、COD 値のバラツキはかなり大きい。

各モデルの低温引張試験後の破断状況を写真 2 ～ 写真 9 に示す。

5. 残留応力計測結果

モデル脆性亀裂発生試験結果ならびに後述する疲労試験結果の解析に使用する目的で、モデル脆性亀裂発生試験に供した 5 種類のモデルについて残留応力を計測した。

計測方法は図 15 に示すごとく、計測点に抵抗線歪ゲージを貼付し、その周囲 15 mm ～ 20 mm をドリルまたは機

機鋸にて切削して、切削による解放ひずみを計測し、残留応力を求めた。

また、抵抗線歪ゲージは図15に示したごとく、隅肉溶接Toe部には1軸方向ゲージ(GL=2mm)2枚を直角に、他の平面部には45度3軸方向ゲージ(GL=5mm)を使用した。応力計算にはロゼット解析にもとづき下記の⑨式～⑬式を用いた。

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\gamma^2} (\varepsilon_x + \gamma \varepsilon_y) \quad \left. \right\} \quad \text{⑨}$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\gamma^2} (\varepsilon_y + \gamma \varepsilon_x) \quad \left. \right\} \quad \text{⑩}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (2\varepsilon_x - \varepsilon_x - \varepsilon_y)^2} \quad \text{⑪}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (2\varepsilon_x - \varepsilon_x - \varepsilon_y)^2} \quad \text{⑫}$$

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\gamma^2} (\varepsilon_1 + \gamma \varepsilon_2) \quad \left. \right\} \quad \text{⑬}$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\gamma^2} (\varepsilon_2 + \gamma \varepsilon_1) \quad \left. \right\} \quad \text{⑭}$$

$$\tan 2\theta = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y - 2\varepsilon_x}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad \text{⑮}$$

ただし、

$$\varepsilon_x > \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2}$$

$\varepsilon_x \cdot \varepsilon_y \cdot \varepsilon_z$; 3軸方向のひずみ

$\varepsilon_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z$; 3軸方向の応力

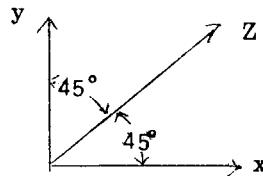
E ; ヤング率

γ ; ポアソン比

$\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$; 最大主ひずみ、最小主ひずみ

$\sigma_1 \cdot \sigma_2$; 最大主応力、最小主応力

θ ; 最大主応力角度(X軸応力となす角度)



残留応力の計測点を図16～図20に、その結果を図21～図35に示す。

さらに、各種試験片の溶接Toe部の残留応力のうち、ビード直角方向応力のみをまとめて図36に示す。

6. 疲労試験結果

隅肉溶接部を有した3次元モデルにおける隅肉溶接にそっての疲労亀裂発生・生長状況を把握するため、荷重方向と45度方向にStiffenerを有したモデルを3種類、計7個供試して、室温・荷重一定条件・片振り引張疲労試験を実施した。

試験機は200tonアムスラー式万能試験機に低サイクル繰返し油圧発生装置を組み合せたものを使用した。

3種類の供試モデル(Ⅲ型・V型およびV'型)形状を図37～図39に、疲労試験結果を表4および図40～図42に示す。

また、疲労試験実施状況を写真10に、各モデルの試験後の疲労亀裂の状況を写真11～写真17に示す。

はじめ、供試モデルはⅢ型とV型を用意し、疲労試験を行なった。試験の結果、写真11～写真14からわかるように下側の切欠き(B)から発生・生長した亀裂はMain Plateを横切り、上側の切欠き(A)からは隅肉溶接Toe部にそっての亀裂がわずかばかり認められた。そこで、下側の亀裂にStop Holeを設け、上側

の隅肉溶接 Toe 部にそっての亀裂の生長を期待したが、再度、 Stop Hole から亀裂が発生し、これらの形状のモデルでは隅肉溶接 Toe 部にそっての亀裂を生長させることはできなかった。その状況を表4・図4①および写真1①～写真1④に示す。

以上の結果より、下側の切欠きも上側の切欠きと同じような応力状態になるモデル V' 型を用意し、同様に疲労試験を行なった。

その結果、表4および図4①に示しているように Stiffener 隅肉溶接 Toe 部にそっての疲労亀裂の発生・生長が実験室的に再現され、ある程度疲労亀裂の生長状況が把握できた。

なお、図4②には繰返し応力と疲労亀裂長さ 10 mm の繰返し回数との関係を示している。モデル A V' - 2 は表4および図4①にも示しているように、応力を試験途中より増して試験しているが、図4②では、応力は増した方のもので示し、繰返し回数は全繰返し回数と応力を増す前の繰返し回数を減じたものの 2 種類で示した。実際はこれらの中間にあると考えられる。

さらに、疲労亀裂の生長状況を K-Value で整理する場合の参考に供するため、疲労試験に先がけ、 V 型および V' 型について、モデルの応力分布状態を計測した。計測は前述した残留応力の場合と同じように抵抗線歪ゲージを使って行なった。計測結果を図4③～図4⑥に示す。

7. 試験結果の考察

7.1 モデル脆性亀裂発生試験結果について

先に図1③に示した試験結果について検討すれば、概略下記のことが考えられる。

- 1) A 型の脆性破壊発生特性が素材に比べて非常に悪くなるのは、 Stiffener による横収縮に対する拘束の影響、ならびに溶接残留応力の影響によるものと考えられる。
- 2) A 型の Stiffener を短くした F 型の脆性破壊発生特性が、 A 型よりかなり良くなっているのは、 Stiffener が低いために拘束が小さくなつたためと考えられる。
- 3) D 型の脆性破壊発生特性が素材よりもむしろ良くなつたのは、複雑な組立、溶接作業によって、切欠き先端近傍の残留応力の解放、あるいは予荷重効果が有利に働いたためであろうと推察される。
- 4) B 型の脆性破壊発生特性があまり悪くならなかつたのは、切欠き先端が Butt 溶接の細粒化部に入っていたためであろうと推察される。

B 型モデルは実船構造にも多く存在する構造なので、この結果は実用上非常に有用な知見である。

- 5) G 型の脆性亀裂発生特性が F 型より悪くなっているのは、 G 型の方が Heat Input が大きく、溶接の熱履歴による脆化部が板厚中央部に形成される可能性があり、しかも表裏の溶接による影響が重複したためかも知れないと推察される。

7.2 疲労試験結果について

先に表4・図4①および図4①に示した試験結果について検討すれば、概略下記のことが考えられる。

- 1) V' - 1 の方が V' - 2 より繰返し応力が大きいのに隅肉溶接 Toe 部にそって伝播した疲労亀裂が長いのは、 V' - 1 の場合は、切欠き先端の応力が大きいため隅肉溶接による残留応力の影響はほとんど効いていないが、 V' - 2 の場合は繰返し応力が小さいため残留応力の影響が効いたためと考えられる。
- 2) V' - 3 においては、疲労亀裂が Main Plate 側に曲ったが、それは繰返し応力が非常に大きかったため、静的破断の場合と同様な現象が起こつたためであろうと考えられる。

8. 結 論

昭和45年度に第1段階として実施した予備的実験により、以下の結論が得られた。

- 1) 供試鋼の諸性質が明確になった。
- 2) 脆性亀裂発生特性におよぼす Stiffener の影響、ならびに、Stiffener 隅肉溶接 Toe 部に存在する切欠きからの脆性亀裂発生特性におよぼす Stiffener 高さの影響等が明らかになった。
- 3) 隅肉溶接部の溶接残留応力分布が把握できた。
- 4) Stiffener 隅肉溶接 Toe 部にそっての疲労亀裂の生長状況が把握できた。

9. む す び

昭和45年度の第1年度は、予備的研究であったが、“Stiffener 隅肉溶接 Toe 部に存在する切欠きからの脆性破壊発生特性、およびそれにおよぼす Stiffener 形状の影響”，ならびに“Stiffener 隅肉溶接部にそっての疲労亀裂の生長状況”，等が明らかとなり船艦の重大損傷防止に関連した有用な基礎設計資料が得られた。

なお、明確な技術結論については、疲労亀裂からの脆性破壊発生試験等、次年度以後に実施する研究結果を総合的に解析した上で求めることにする。

表1 供試材の化学成分ならびに機械的性質

銅種	熱処理	板厚 (mm)	化 学 成 分						機 械 的 性 質		
			C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Mn/C	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)
KAS	As Rolled	20	0.15	0.21	0.52	0.010	0.020	3.4	28	45	28

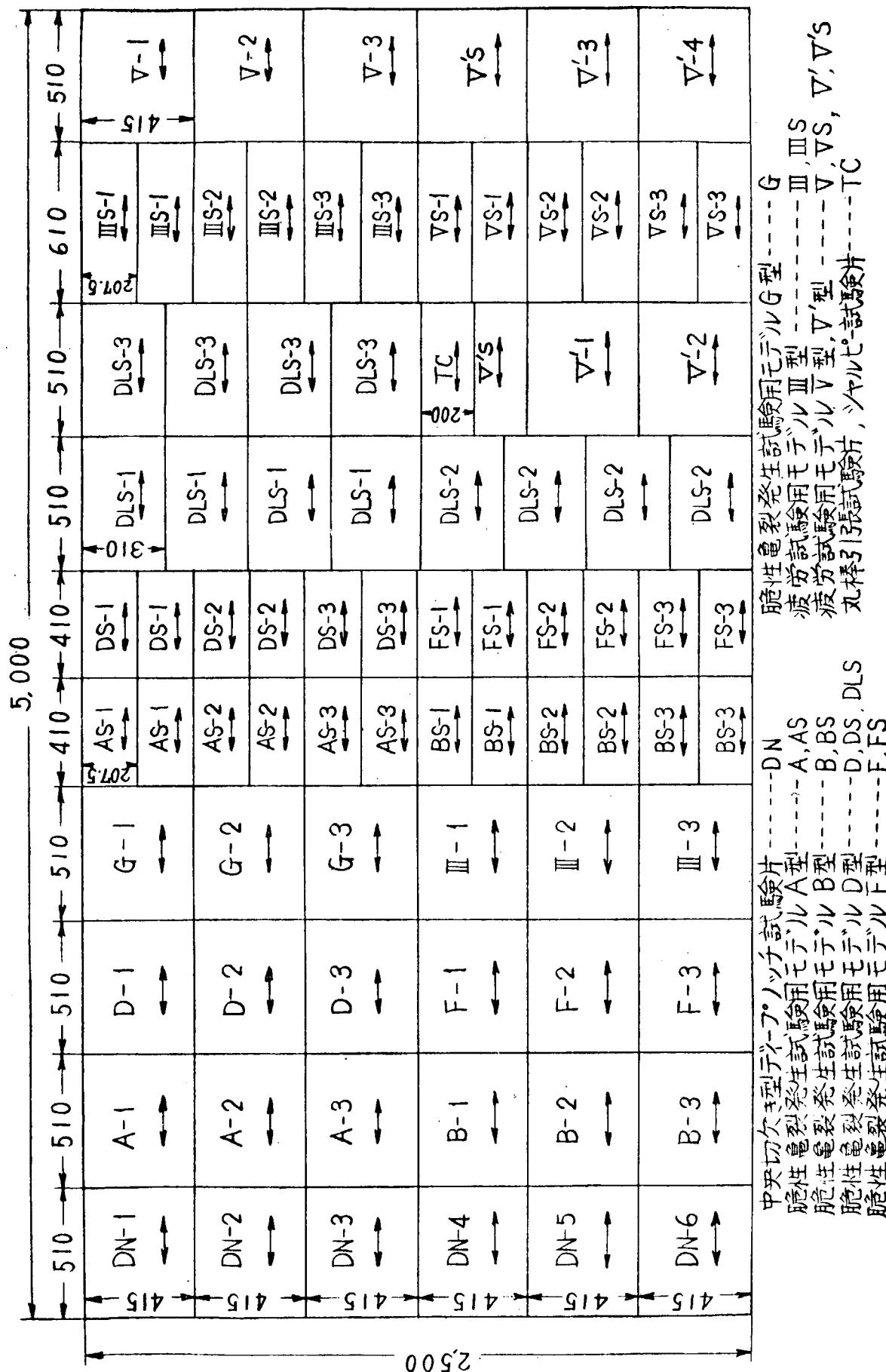


図 1 供試鋼板の板取り要領
(鋼種: KAS 板厚 20mm)

中央切欠型テープノンチ試験片
 脆性亜裂発生試験用モデル A型
 脆性亜裂発生試験用モデル B型
 脆性亜裂発生試験用モデル D型
 脆性亜裂発生試験用モデル F型
 馬鹿発生試験用モデル G型
 疎労試験用モデル III型
 疎労試験用モデル V型
 丸棒引張試験片
 -DN
 -AS
 -BS
 -DS
 -FS
 -III
 -V
 -VS
 -TC
 -G
 -III
 -V
 -VS
 -TC

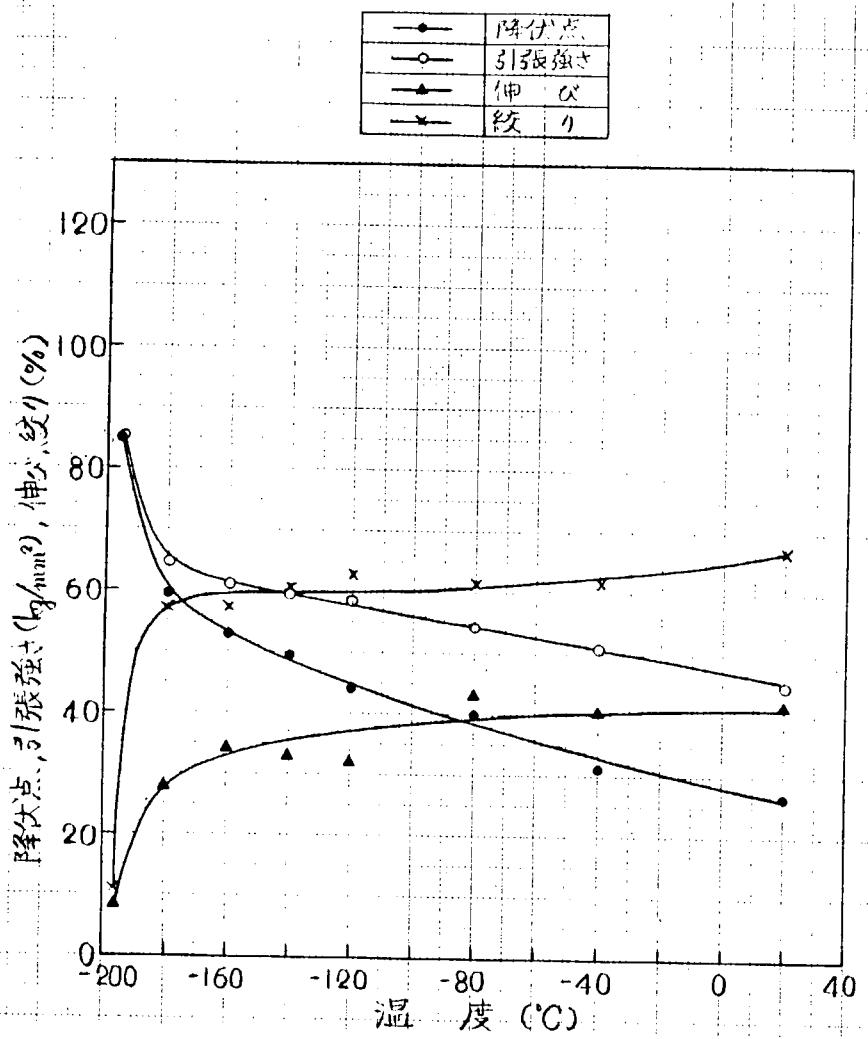


図2 丸棒引張試験結果 ($6\text{ mm}\phi$)
(KAS鋼, 板厚20mm, 板厚中央部, 圧延方向)

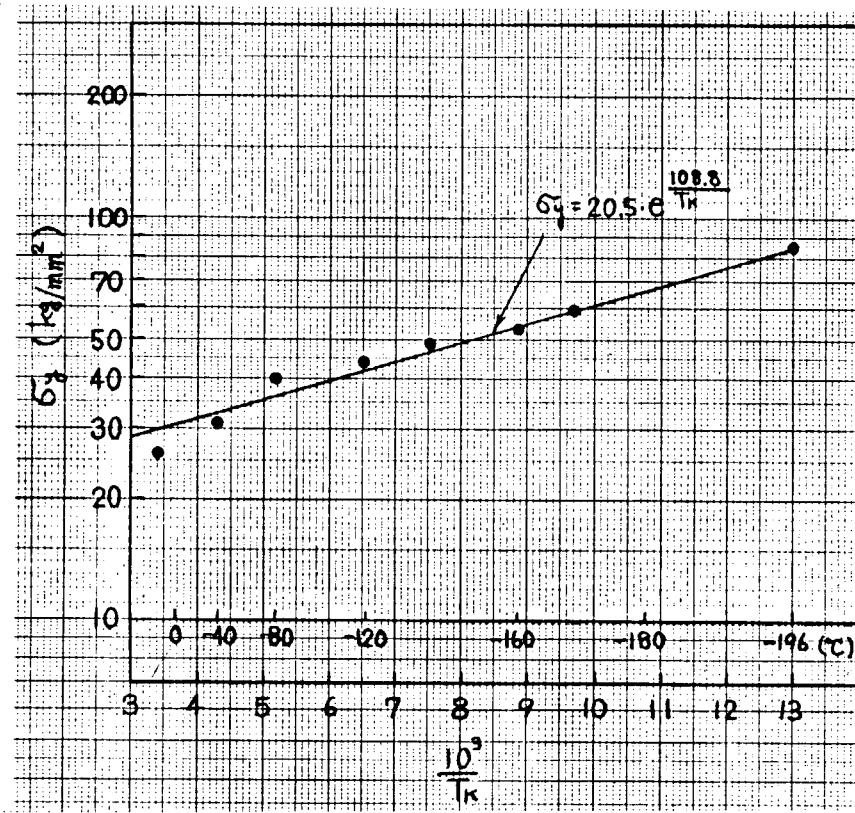


図3 $6\text{ mm}\phi$ 試験片による降伏点と温度の関係

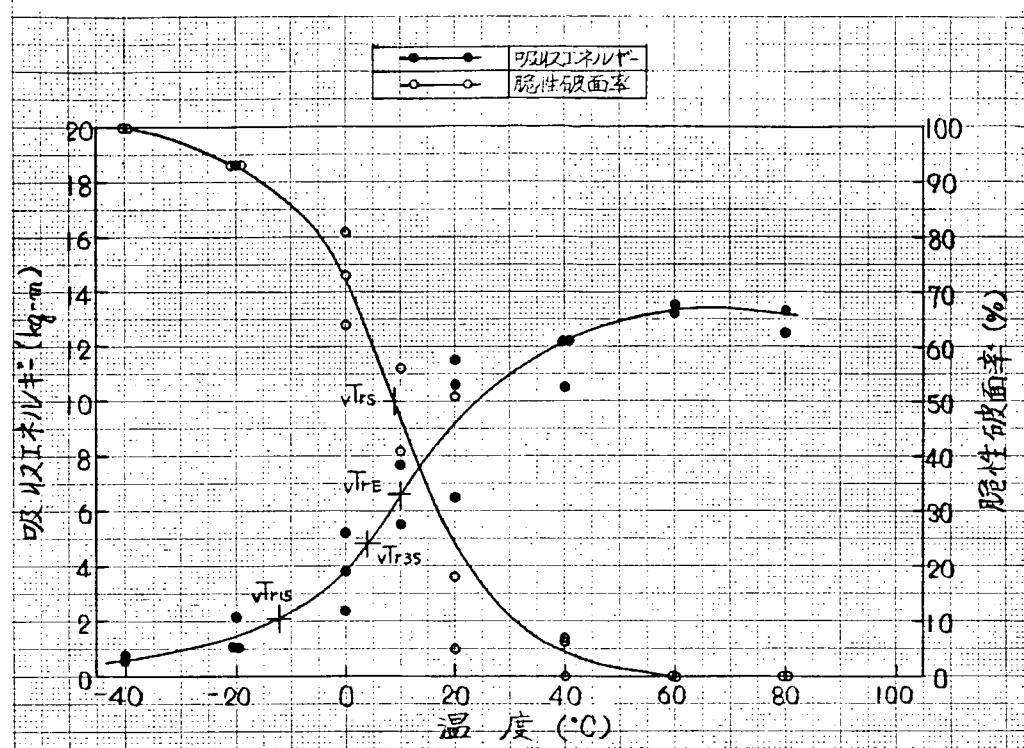


図4 標準V-ノッチシャルピー衝撃試験結果
(KAS鋼, 板厚20mm, 板厚中央部, 圧延方向, 板厚方向ノッチ)

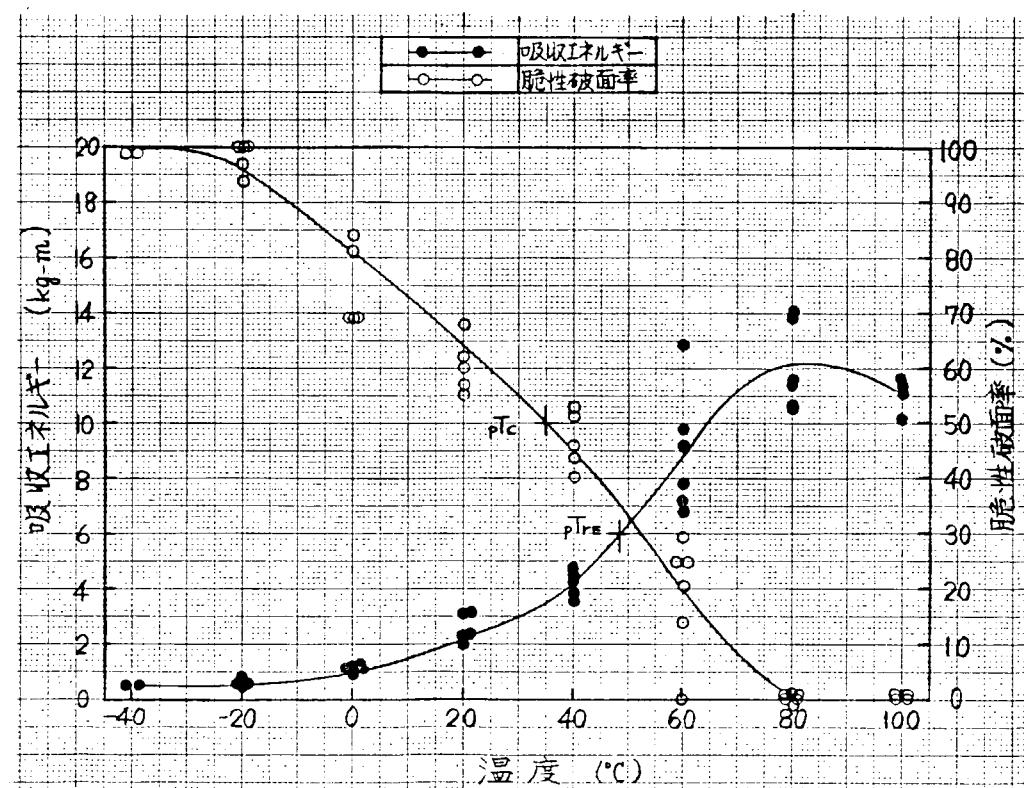


図5 標準プレス-ノッチシャルピー衝撃試験結果
(KAS鋼, 板厚20mm板厚中央部圧延方向, 板厚方向ノッチ)

表 2 中央切欠き型ディープノッチ試験結果一覧表
(K A S 鋼, 板厚 20mm, 圧延方向)

試験片 符号	板厚 (mm)	試験片幅 2W (mm)	切欠き全長 2C (mm)	試験温度		破壊荷重 P (ton)	Gross Stress σ_g (kg/mm ²)	Net Stress σ_n (kg/mm ²)	※ K_{CI} kg·mm/ mm ²	C.O.D. (mm)		
				T (°C)	$10^3/T_k$ (°K ⁻¹)					左側	右側	平均
DN 6	20.1	400	240	-196	12.99	21	2.6	6.5	61	0.10	0.05	0.08
DN 5	20.1	400	240	-180	10.75	25	3.1	7.6	73	0.10	0.10	0.10
DN 3	20.2	400	240	-160	8.85	28	3.5	8.7	82	0.12	0.04	0.08
DN 2	20.1	400	240	-140	7.52	38	4.7	11.8	111	—	—	—
DN 4	20.2	400	240	-100	5.78	88	10.9	27.2	257	0.12	0.11	0.12
DN 1	20.1	400	240	-80	5.18	99	12.3	30.8	289	0.37	0.36	0.37

$$* K_{CI} = \sigma_g \cdot \sqrt{\pi C} \cdot \sqrt{\frac{2w}{\pi C}} \tan \frac{\pi C}{2w}$$

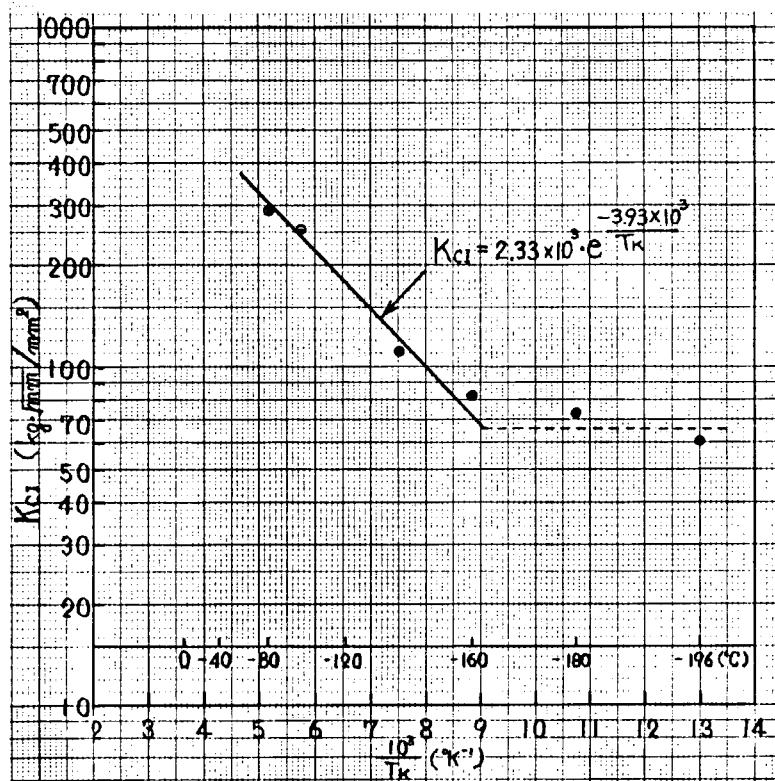


図 6 中央切欠き型ディープノッチ試験結果
(K A S 鋼, 板厚 20mm, 圧延方向)

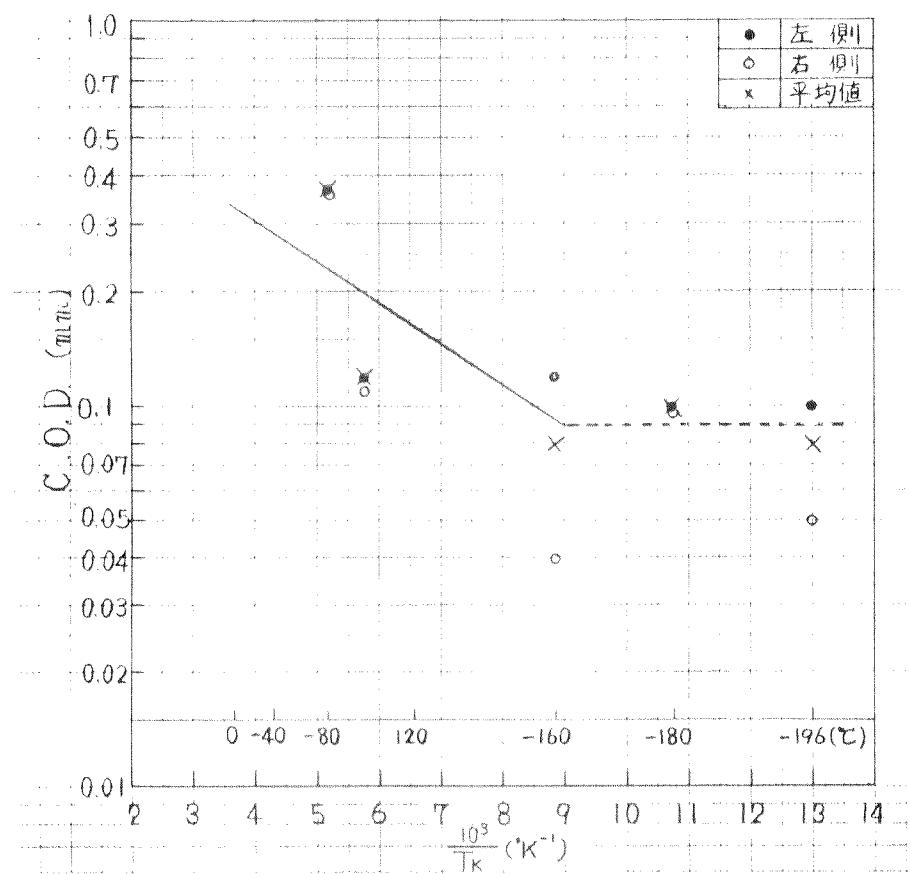


図7 中央切欠き型ディープノッチ試験におけるCOD計測結果
(クリップゲージによる)

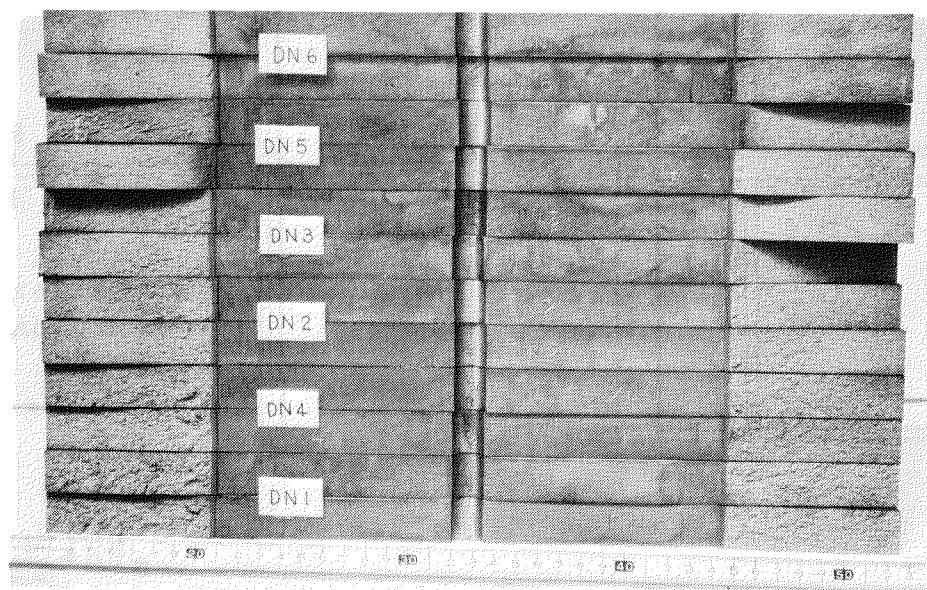


写真1 中央切欠き型ディープノッタ破面状況

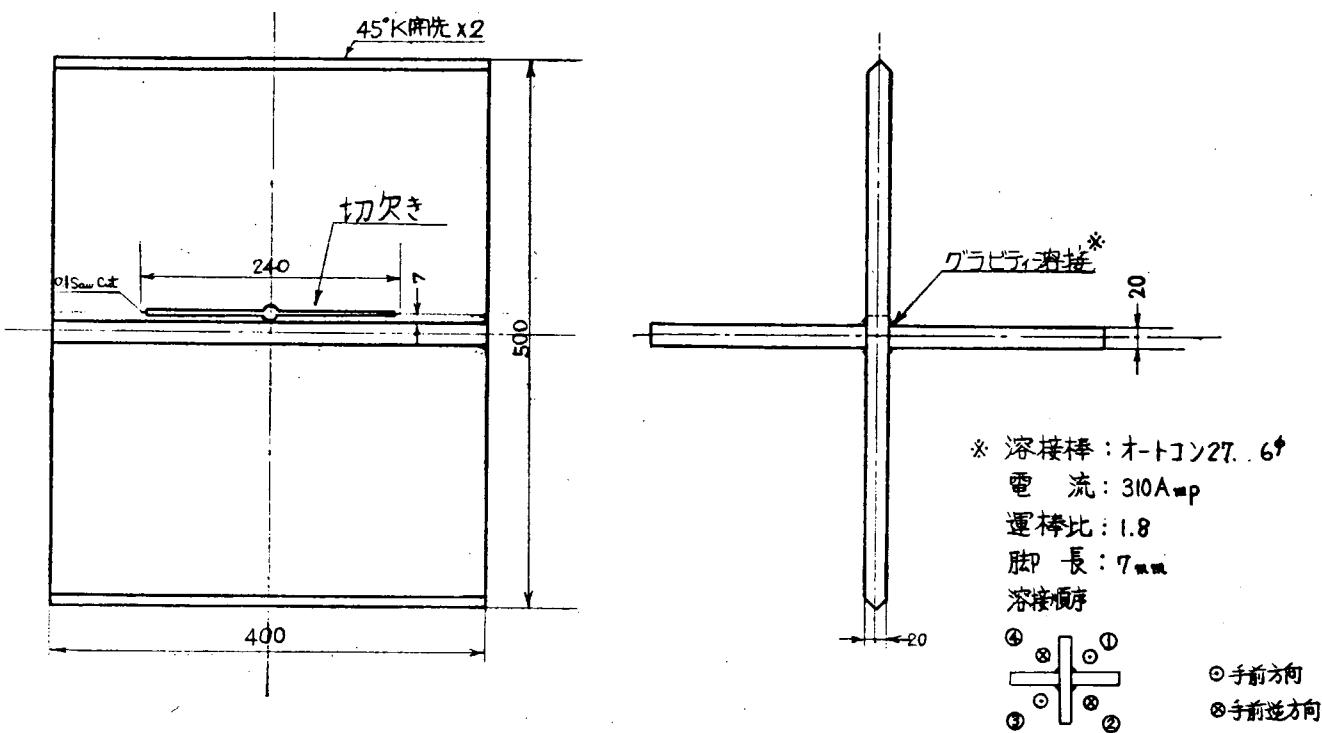


図 8 脆性亀裂発生試験片形状 (A型)

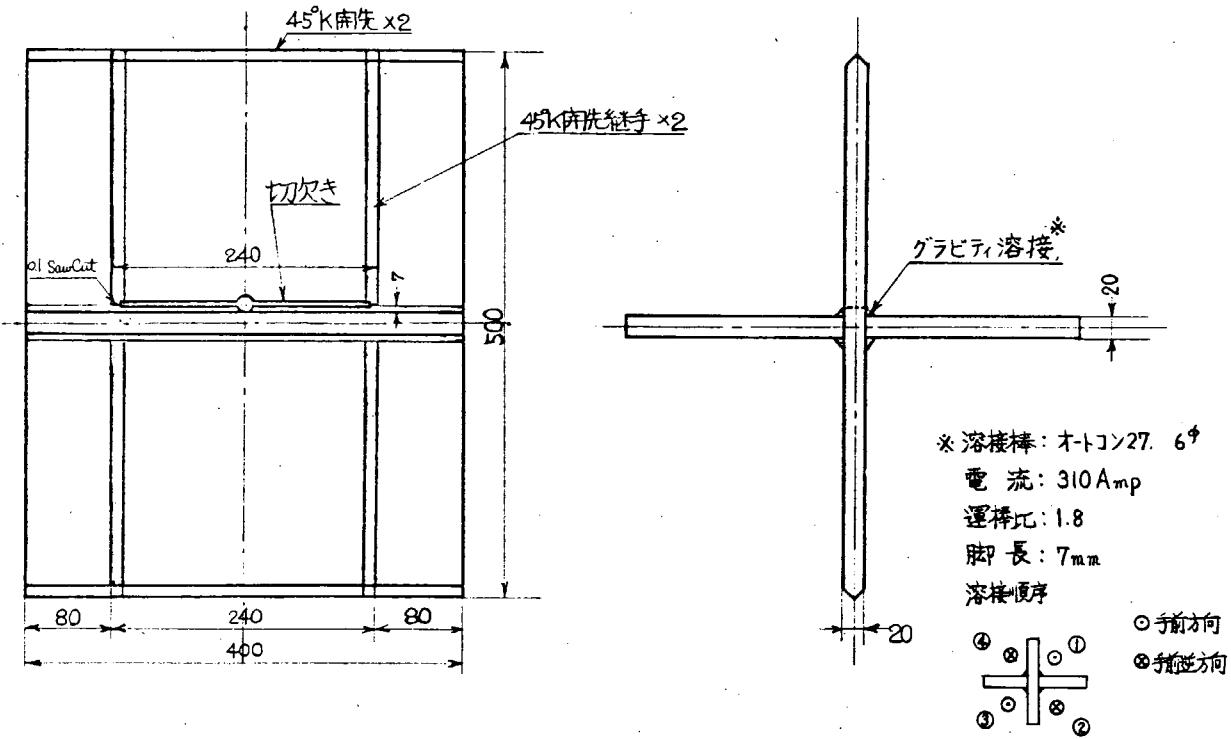


図 9 脆性亀裂発生試験片形状 (B型)

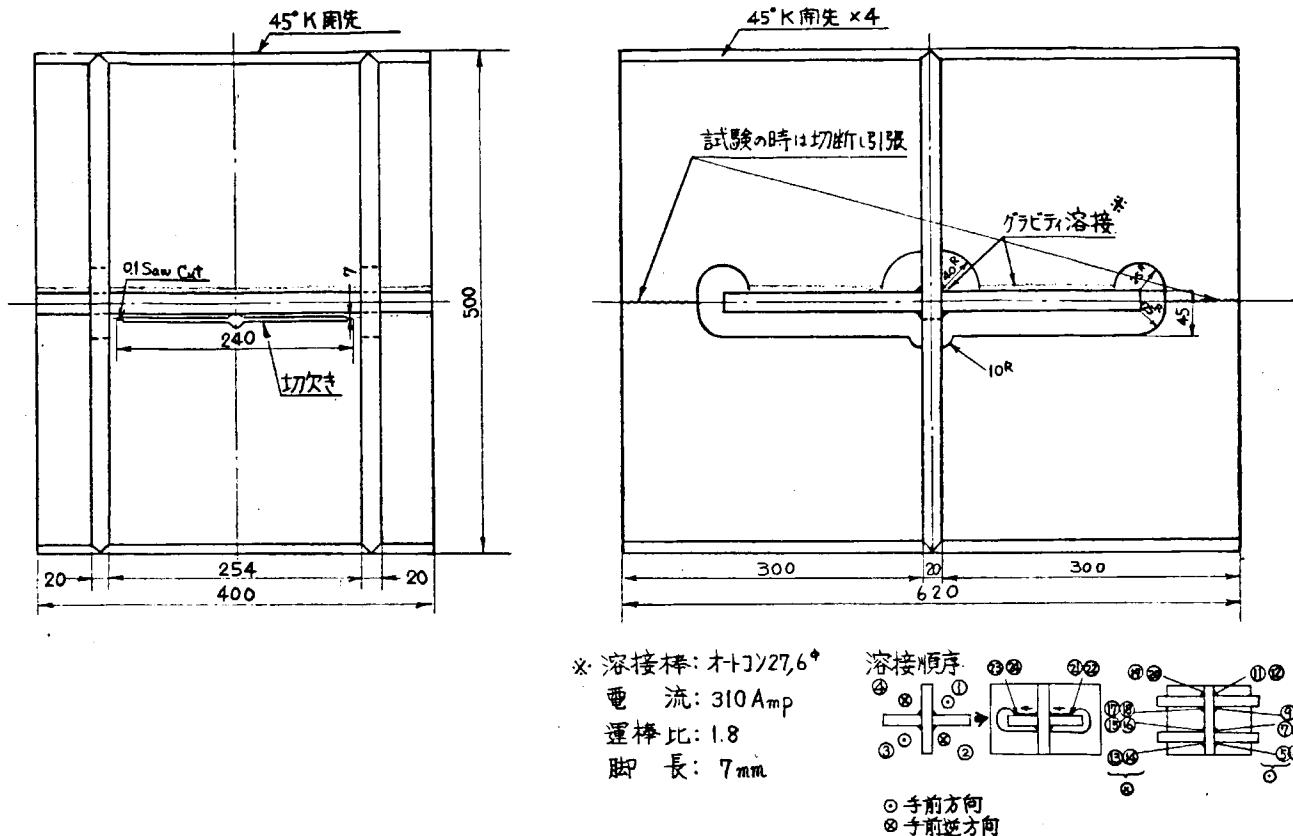


図10 脆性亀裂発生試験片形状(D型)

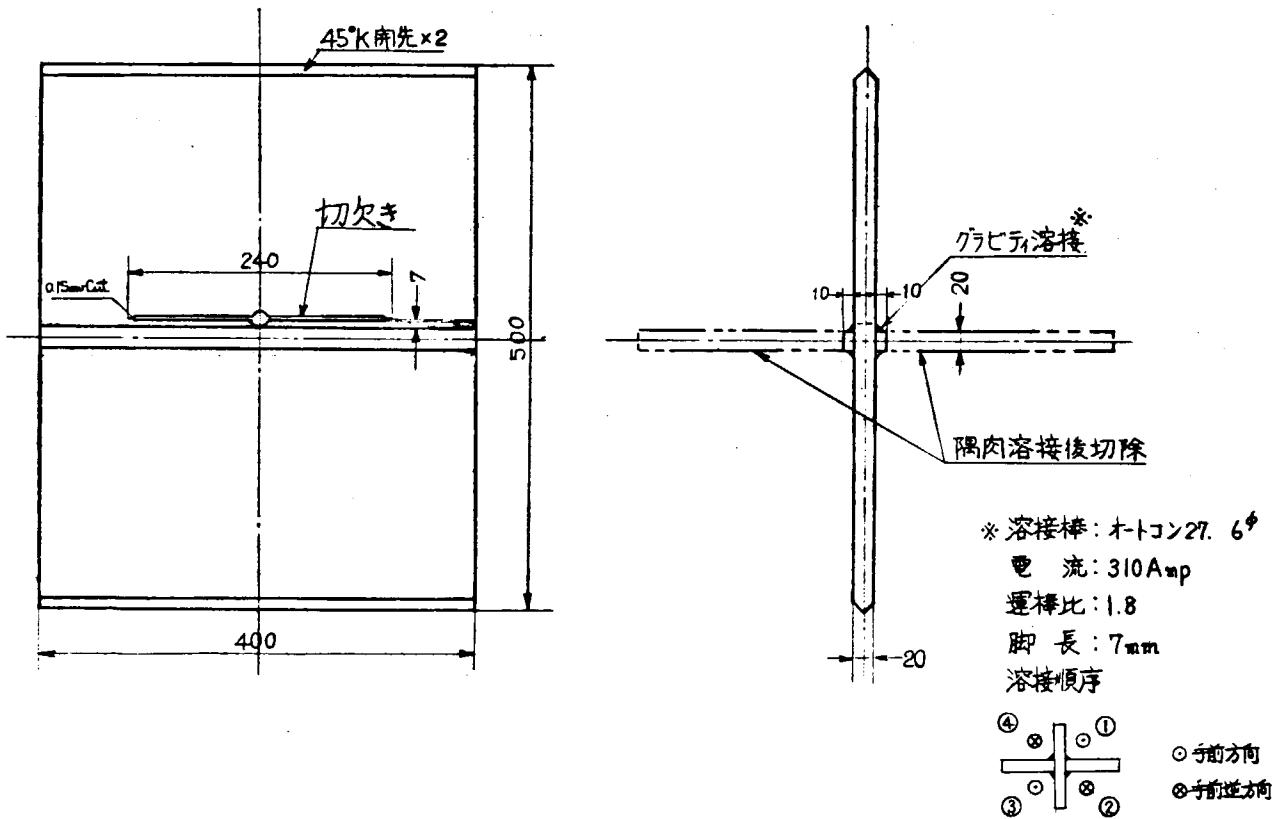


図11 脆性亀裂発生試験片形状(F型)

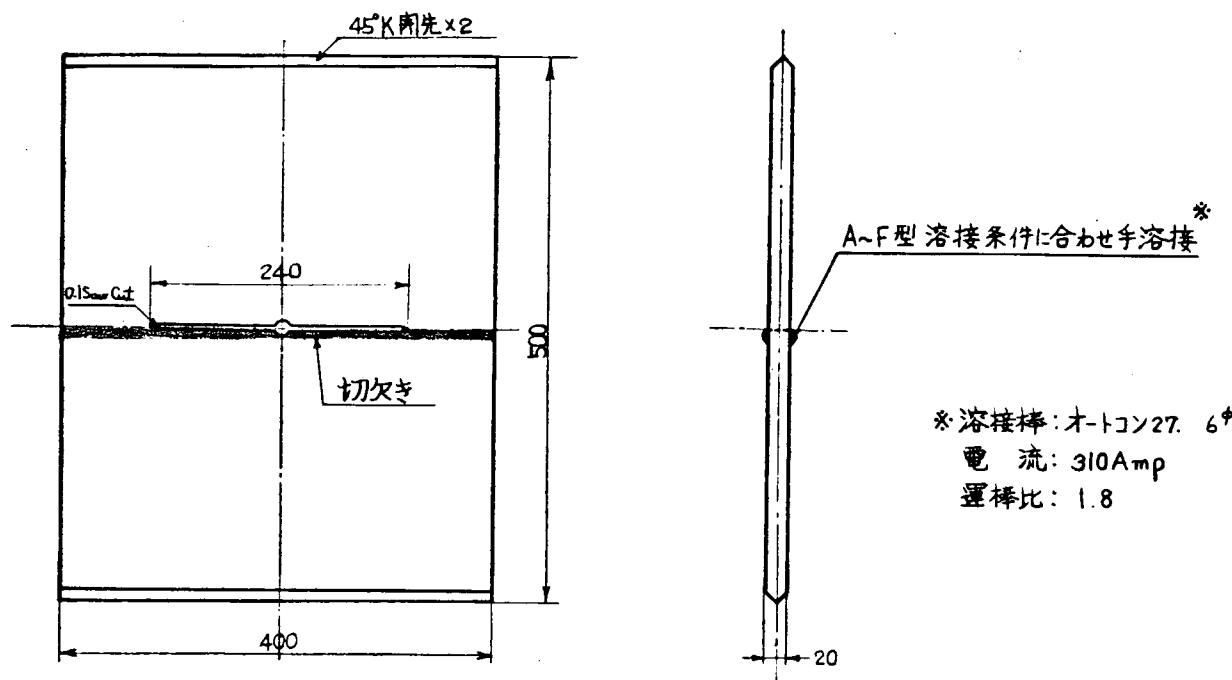


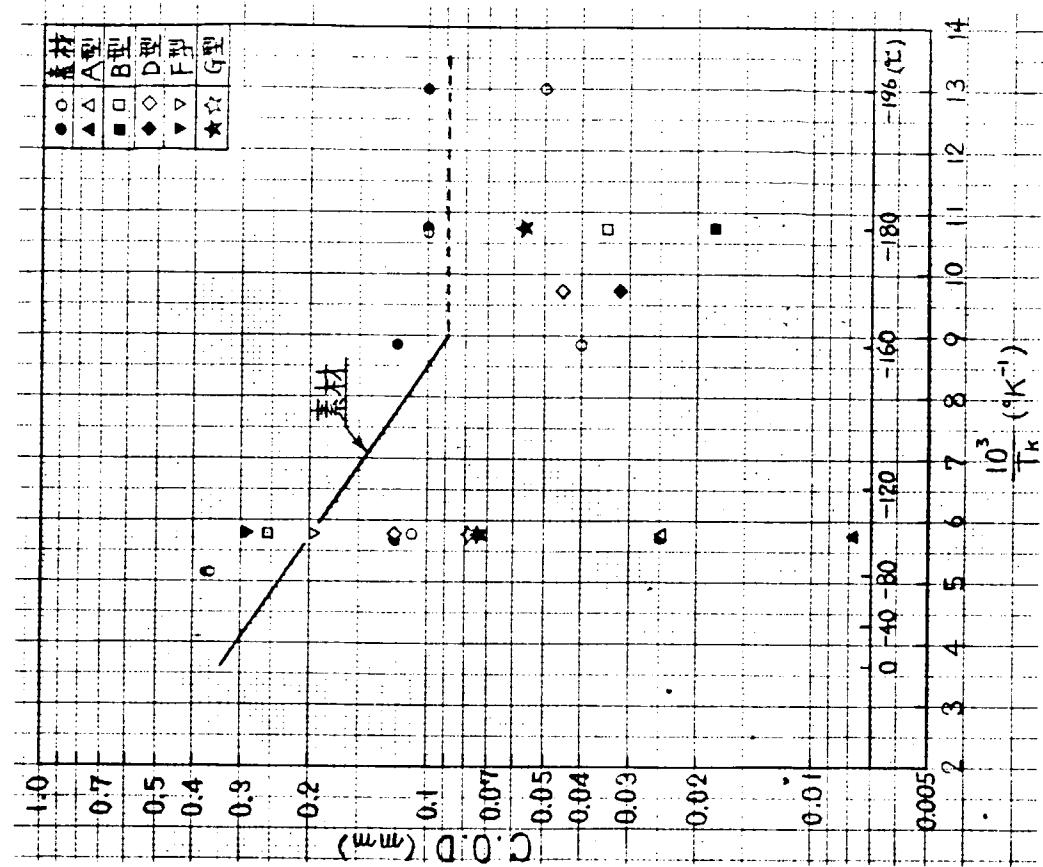
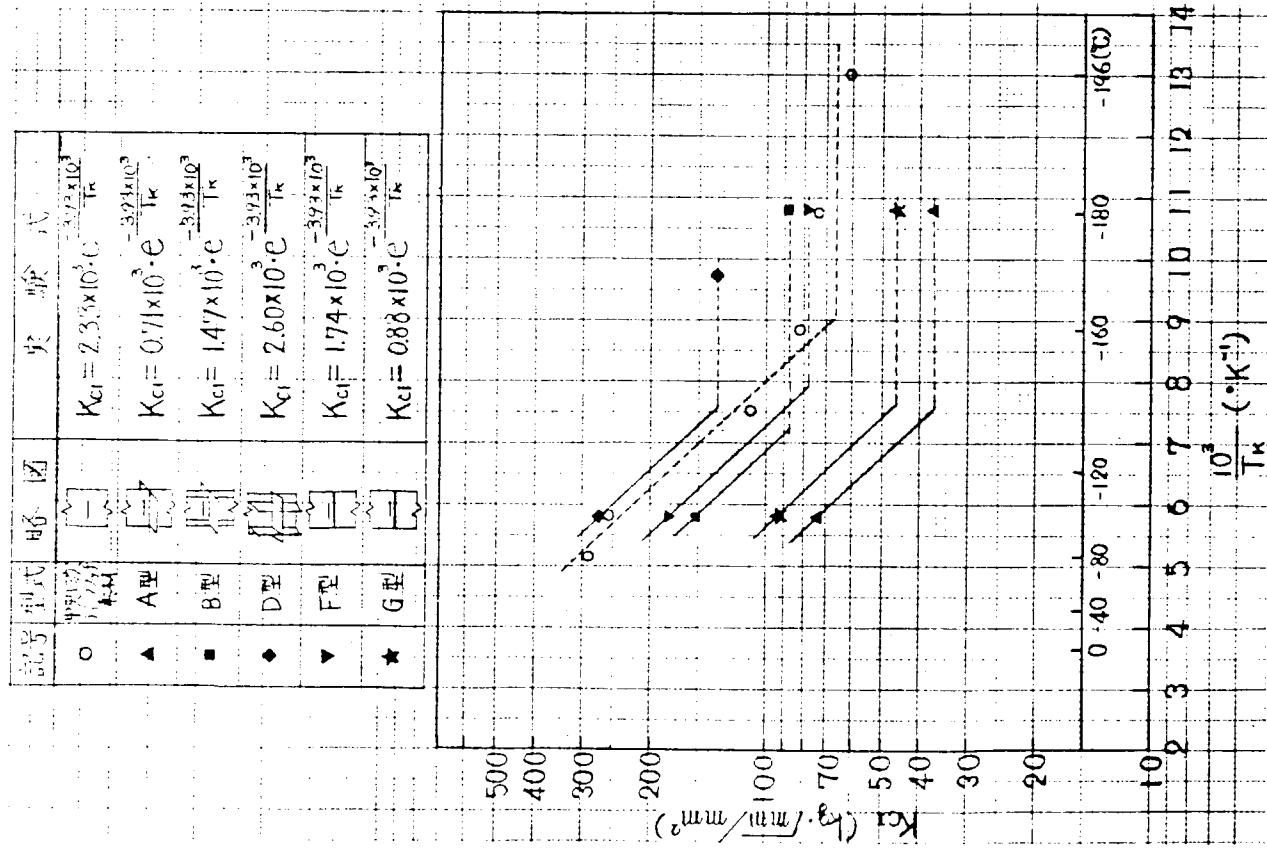
図12 脆性亀裂発生試験片形状 (G型)

表3 脆性亀裂発生試験結果一覧表

試験片 符号	板厚 (mm)	試験片幅 2W (mm)	切欠き全長 2C (mm)	試験温度		破壊荷重 P (ton)	Gross Stress σ_g (kg/mm ²)	Net Stress σ_n (kg/mm ²)	K_{CI} $\frac{kg}{mm^{3/2}}$	C.O.D.(mm)		
				T (°C)	10% T_k (°K')					左側	右側	平均
A1	20.2	400	240	-100	5.78	25.2	3.1	5.2	73.0	0.01	0.02	0.02
A2	20.2	400	240	-180	10.75	12.6	1.6	2.6	36.6	—	—	—
B1	20.1	400	240	-100	5.78	52.0	6.5	10.8	151.7	0.03	0.26	0.15
B2	20.1	400	240	-180	10.75	30.0	3.7	6.2	87.5	0.02*	0.03	0.03
D1	20.2	400	240	-100	5.78	93.0	11.5	19.0	2700	—	0.12	0.04
D2	20.2	400	240	-170	9.71	46.7	5.8	9.6	135.4	0.03	0.04	0.04
F1	20.1	400	240	-100	5.78	61.2	7.6	12.7	179.0	0.29	0.19*	0.24
F2	20.3	400	240	-180	10.75	27.6	3.4	5.7	79.7	0.03	0.07	0.05
G1	20.1	400	240	-100	5.78	31.5	3.9	6.5	91.8	0.07*	0.08	0.08
G2	20.2	400	240	-180	10.75	15.8	2.0	3.3	46.0	0.06	—	0.06

$$\text{※ } K_{CI} = \sigma_g \cdot \sqrt{\pi C} \cdot \sqrt{\frac{2W}{\pi C} \tan \frac{\pi C}{2W}}$$

* 脆性亀裂発生が先に起ったと思われる切欠き側



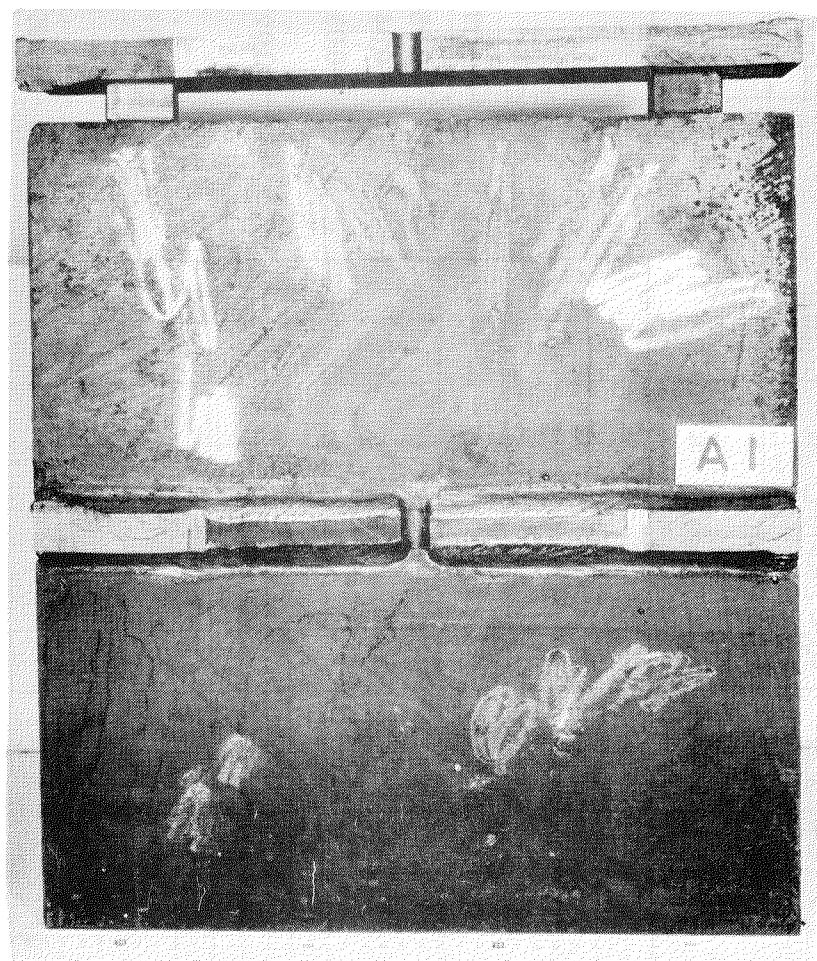
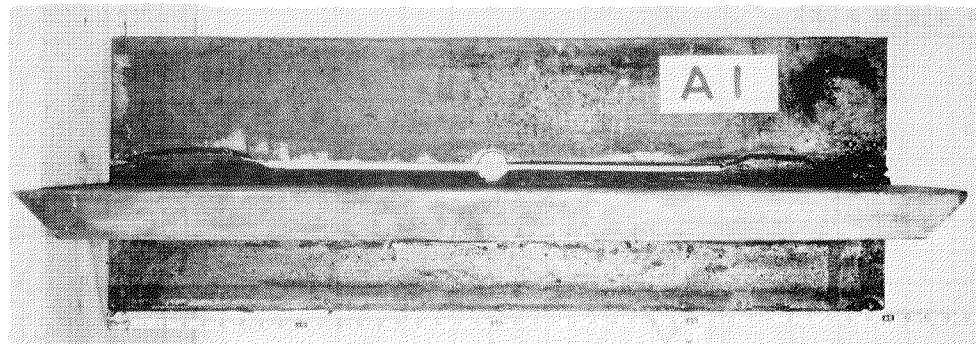


写真2 脆性亀裂発生試験における破断状況
(A型モデル, 試験温度-100°C)

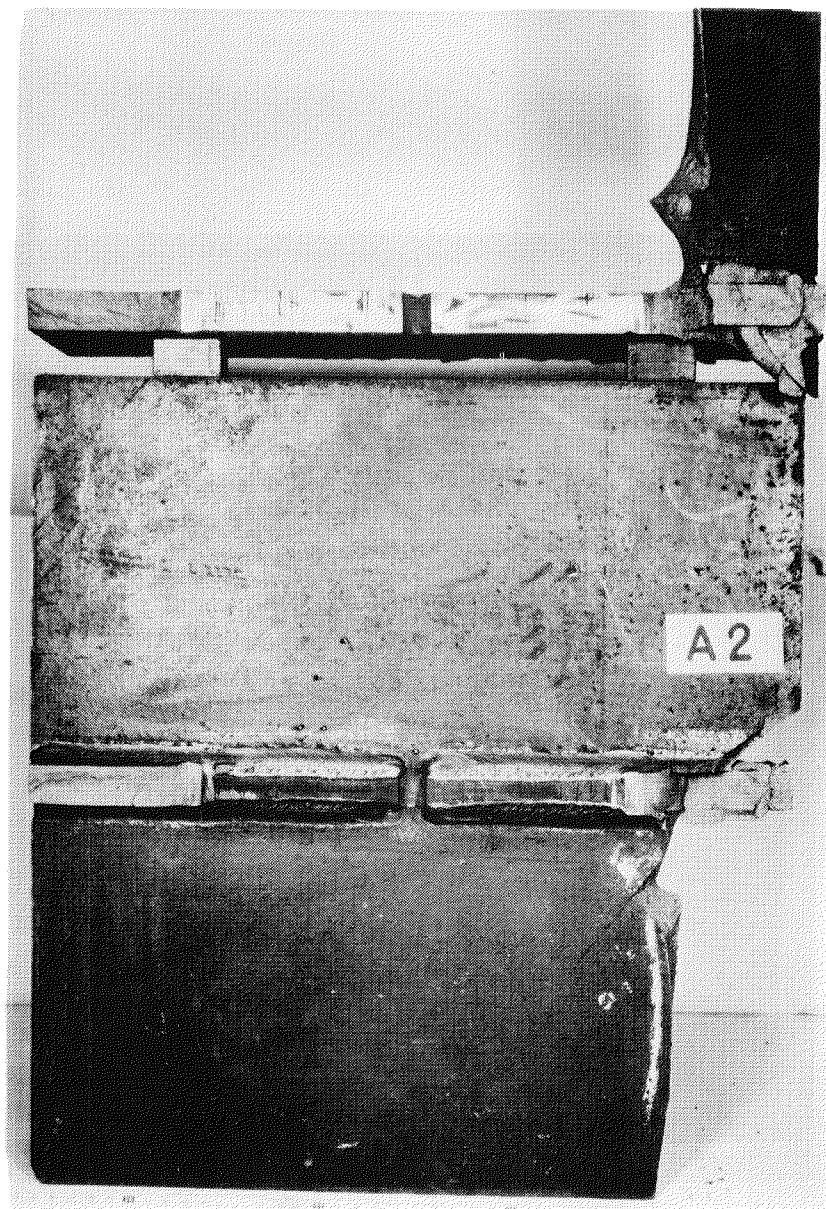
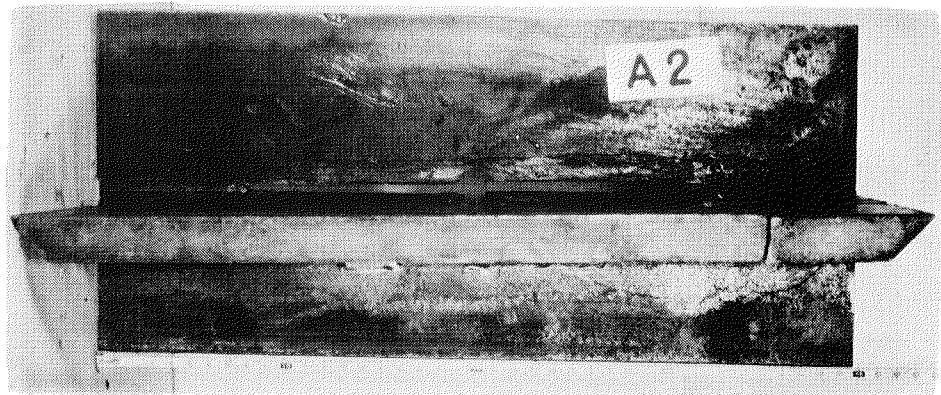


写真3 滑性亀裂発生試験における破断状況
(A型モデル, 試験温度-180℃)

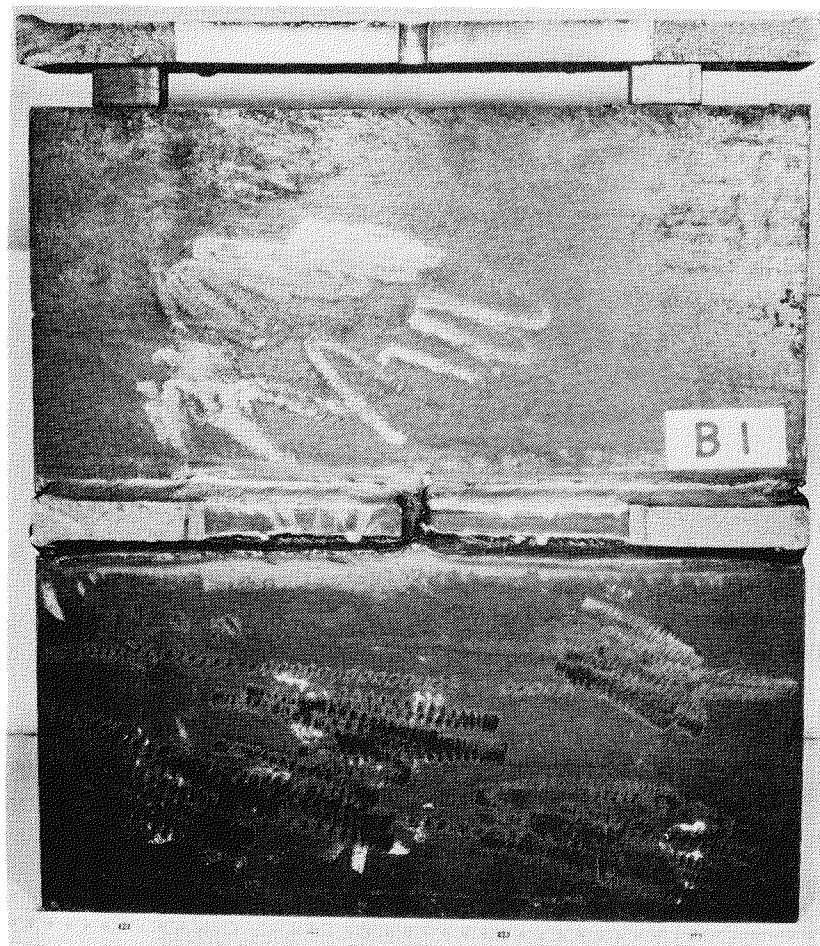
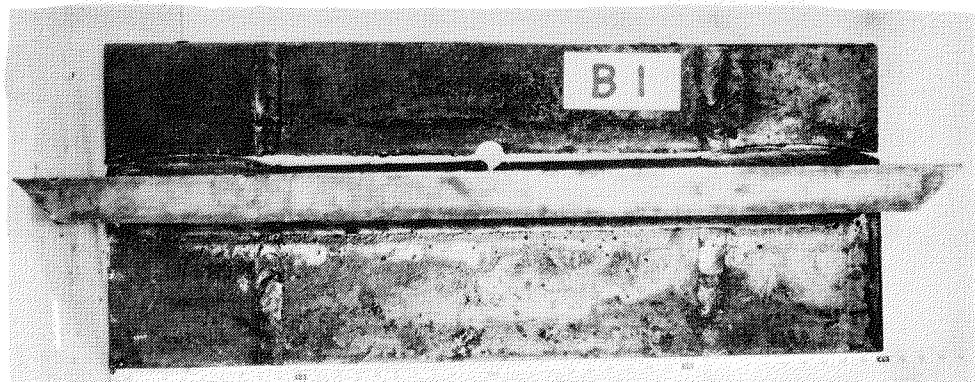


写真4 脆性亀裂発生試験における破断状況
(B型モデル, 試験温度-100°C)

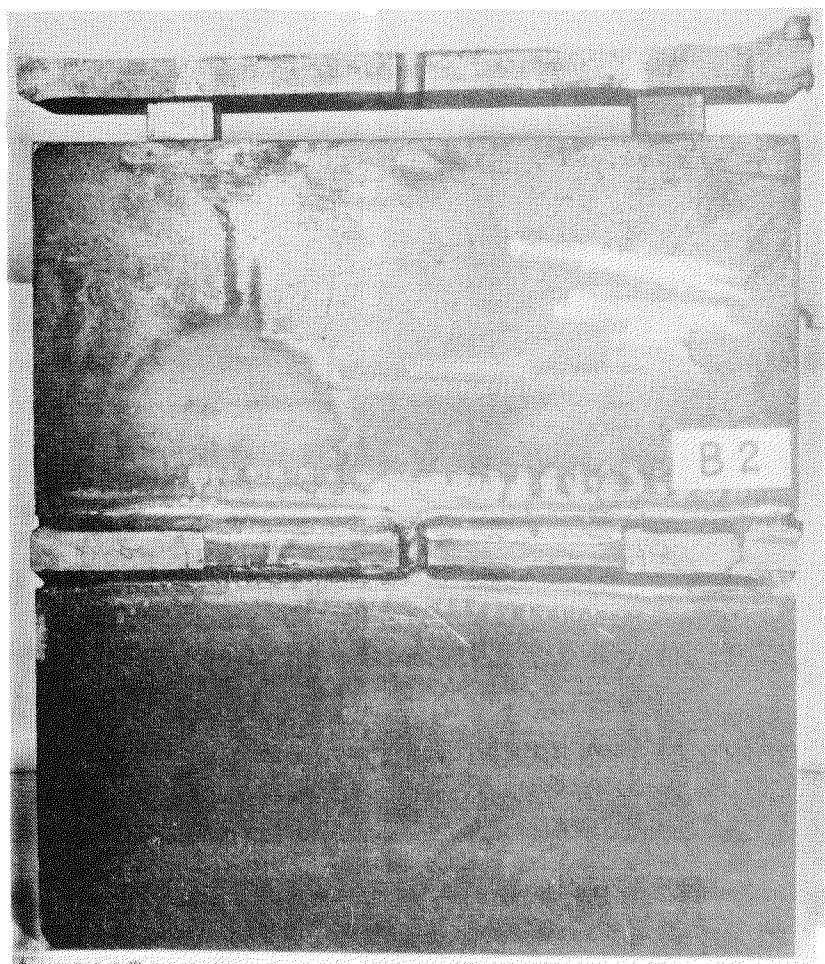
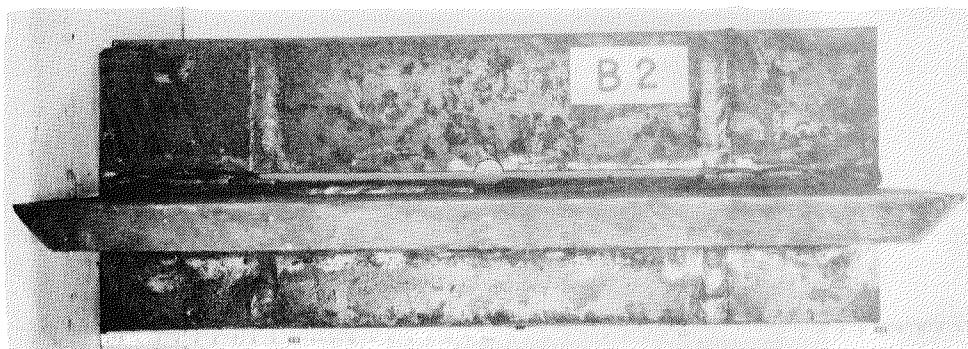


写真5 摃性亀裂発生試験における破断状況
(B型モデル、試験温度-180°C)

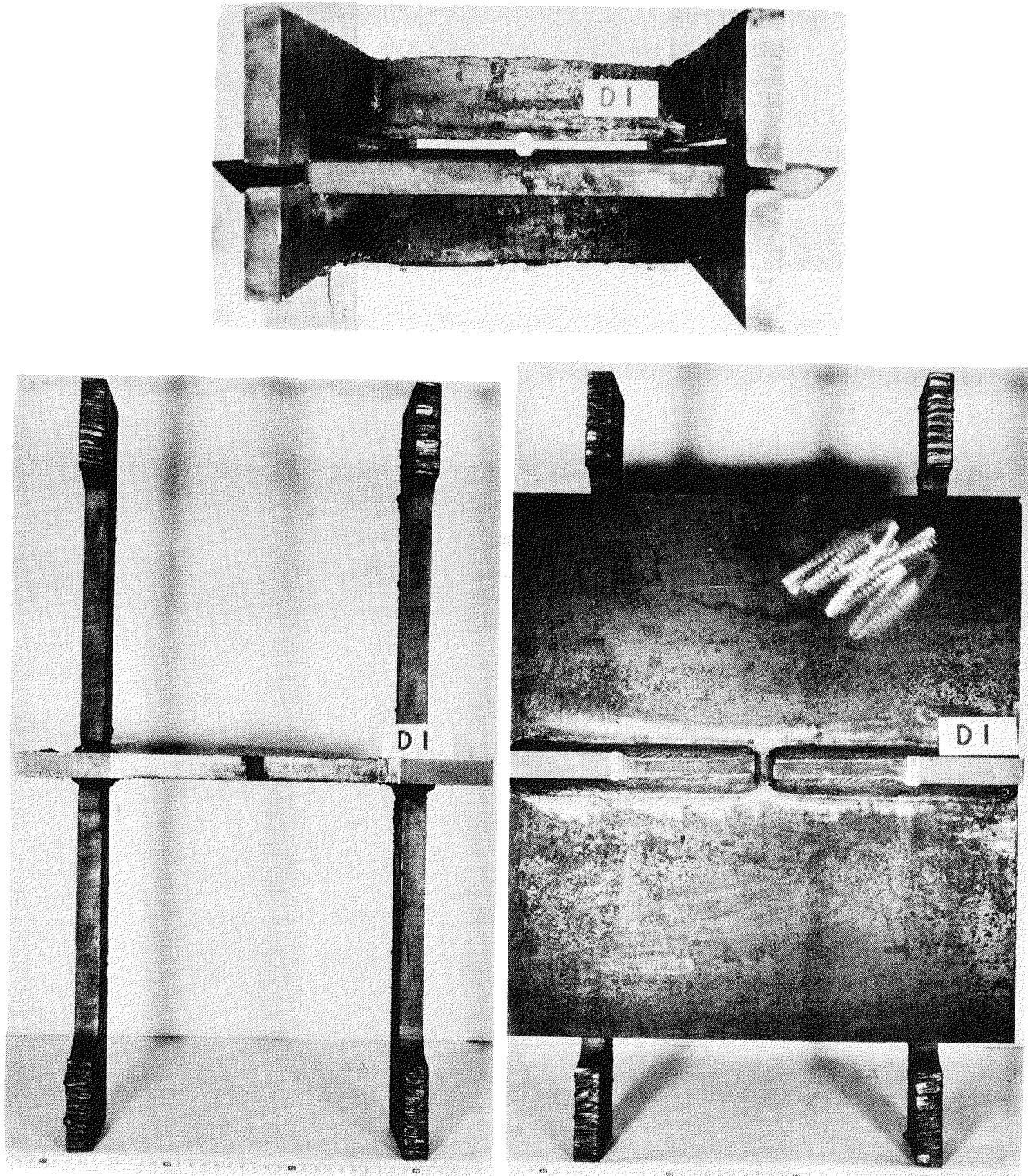


写真6 振性亀裂発生試験における破断状況
(D型モデル, 試験温度-100°C)

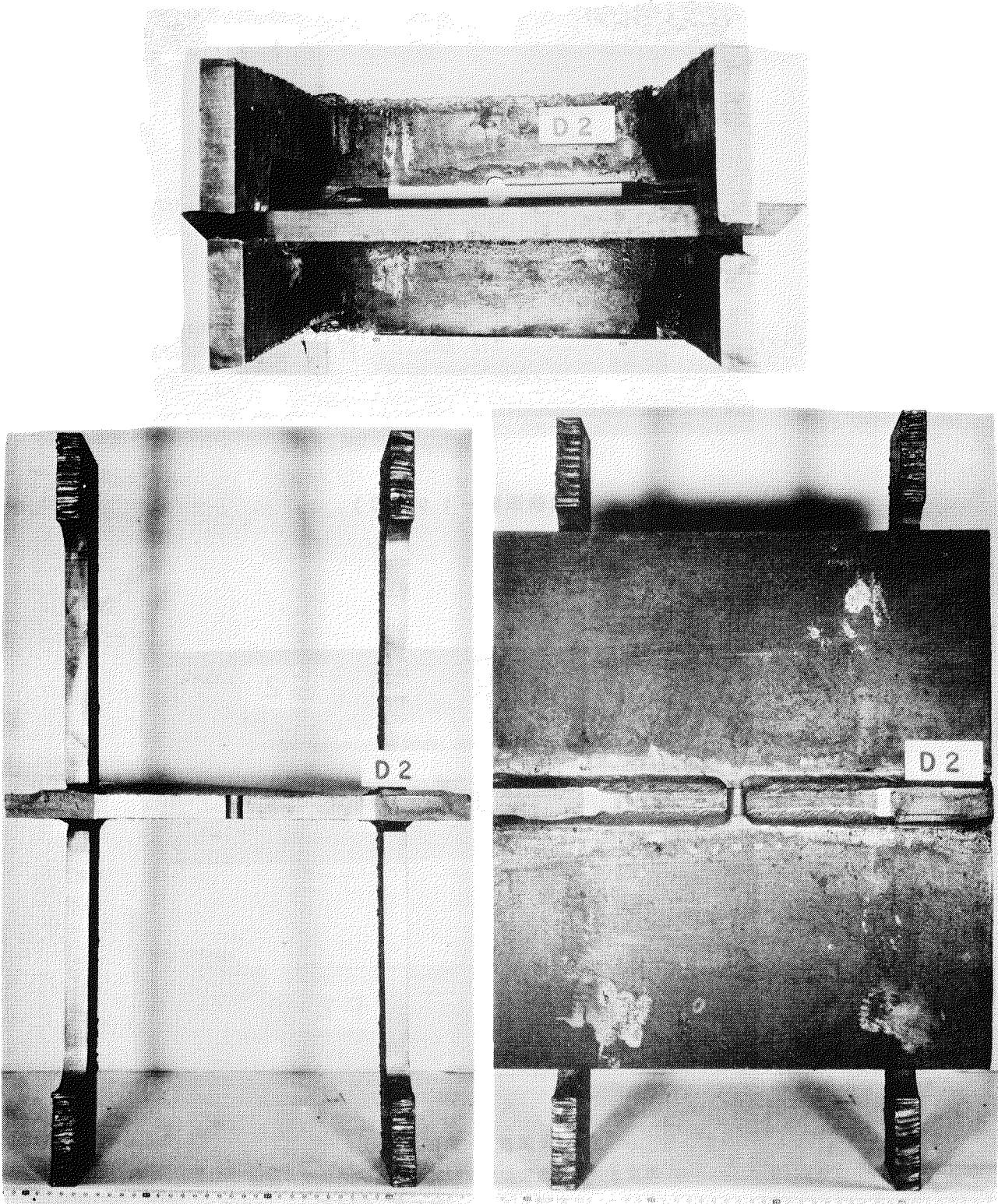
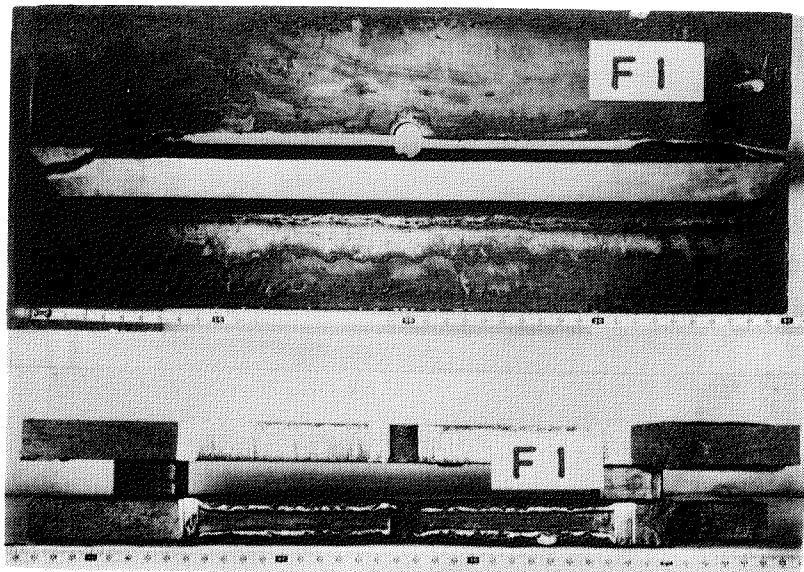
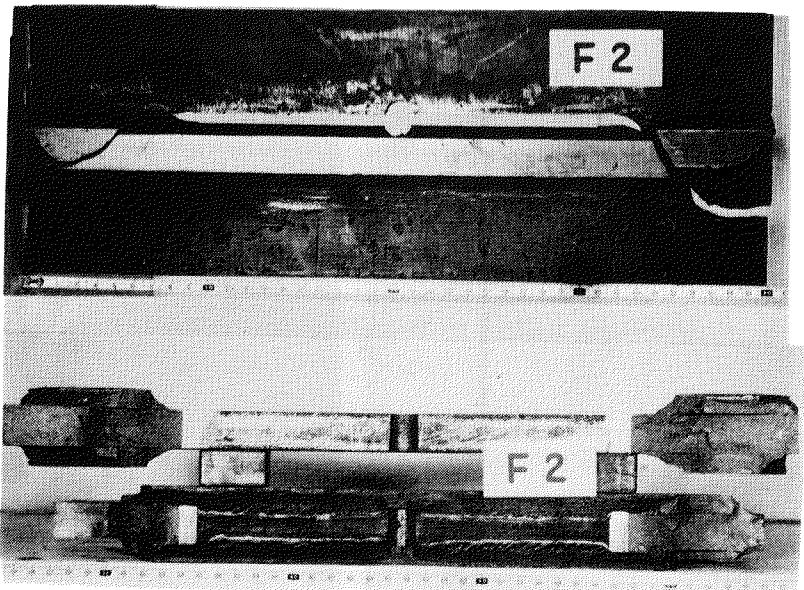


写真7 脆性亀裂発生試験(Cにおける破断状況
(D型モデル, 試験温度-170°C)



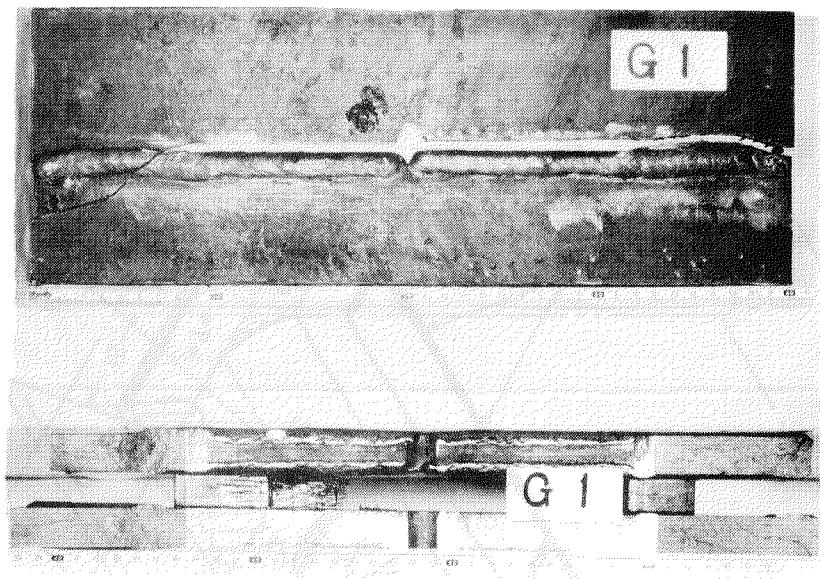
(試験温度 -100°C)



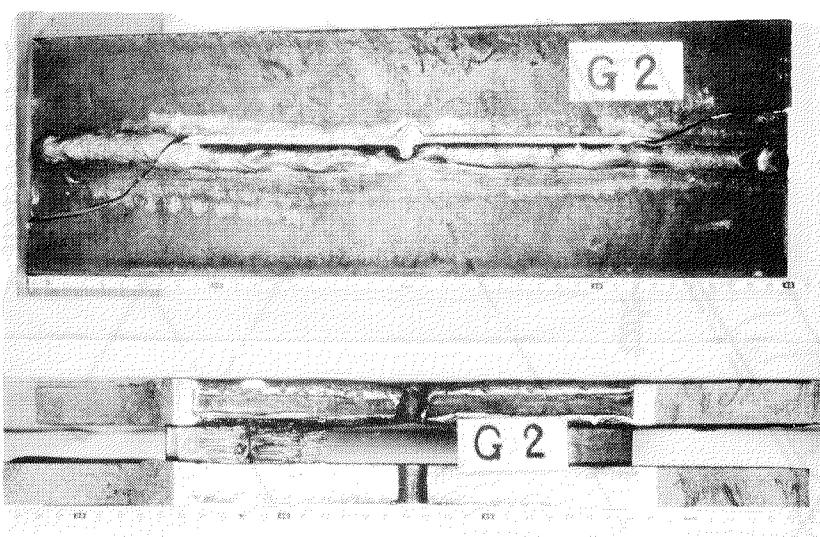
(試験温度 -180°C)

写真8 脆性亀裂発生試験における破断状況

(F型モデル, 試験温度-100°C, -180°C)



(試験 温度 — 100 °C)



(試験 温度 — 180 °C)
写真 9 危性亀裂発生試験における破断状況
(G型モデル, 試験温度—100 °C, 180 °C)

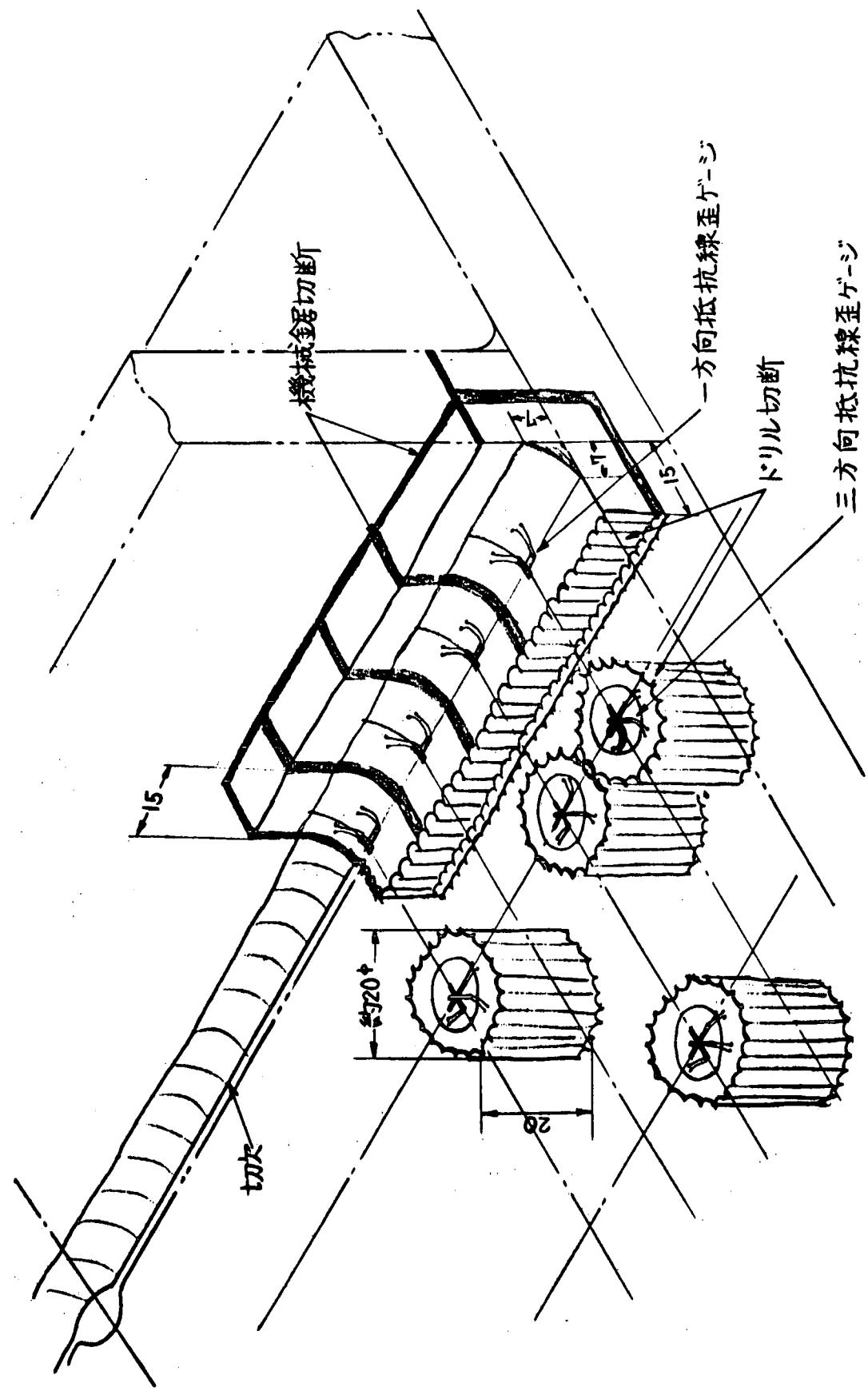


図15 抵抗線歪ゲージ周囲の切削要領

図 16 脆性亜製発生試験片の残留応力計測点 (A型)

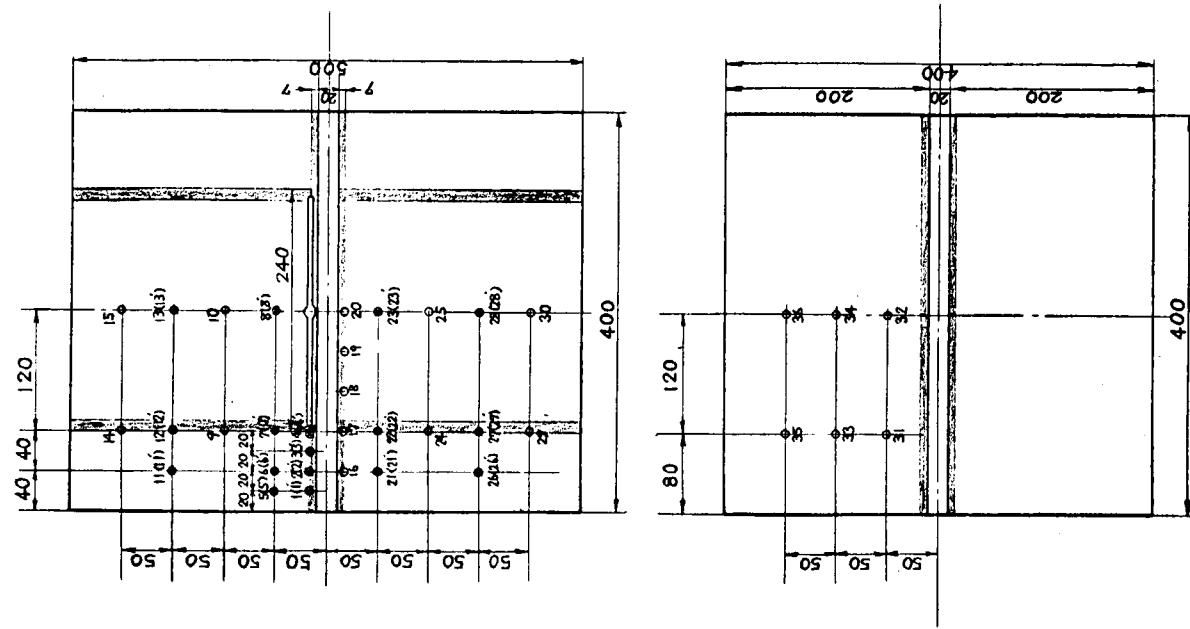
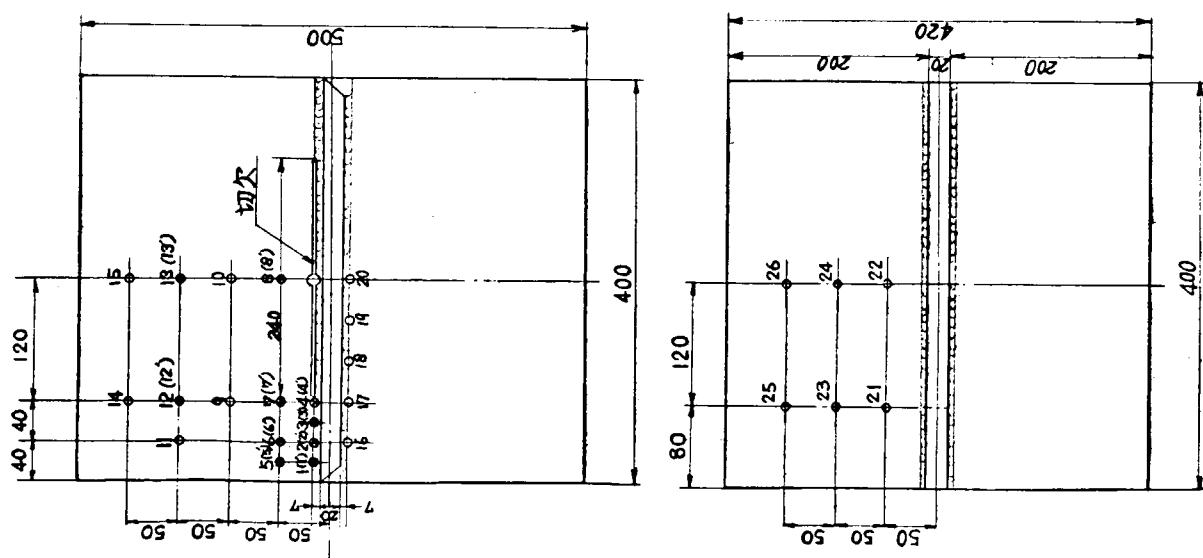
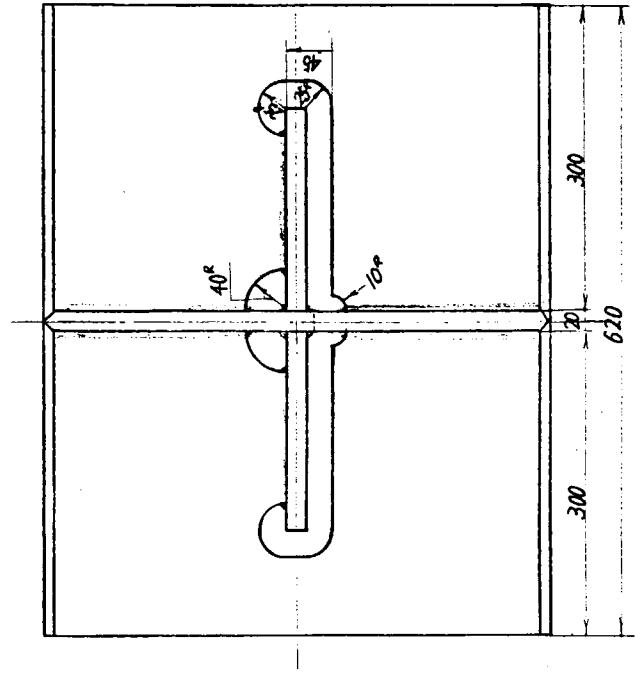
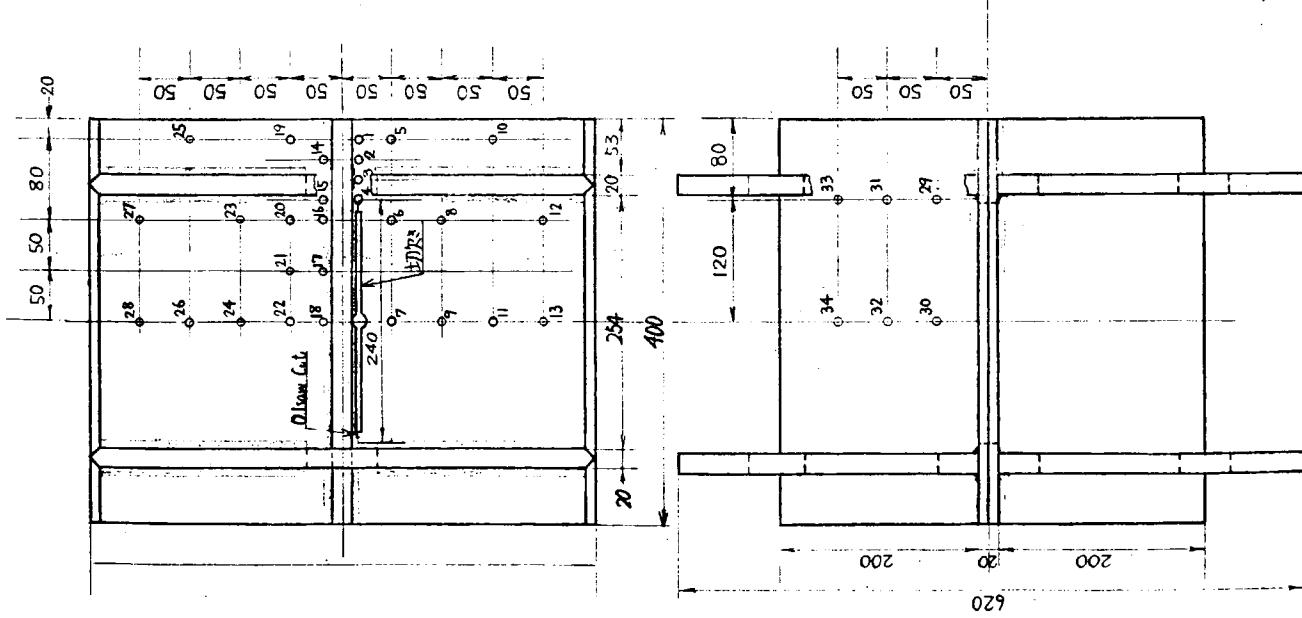


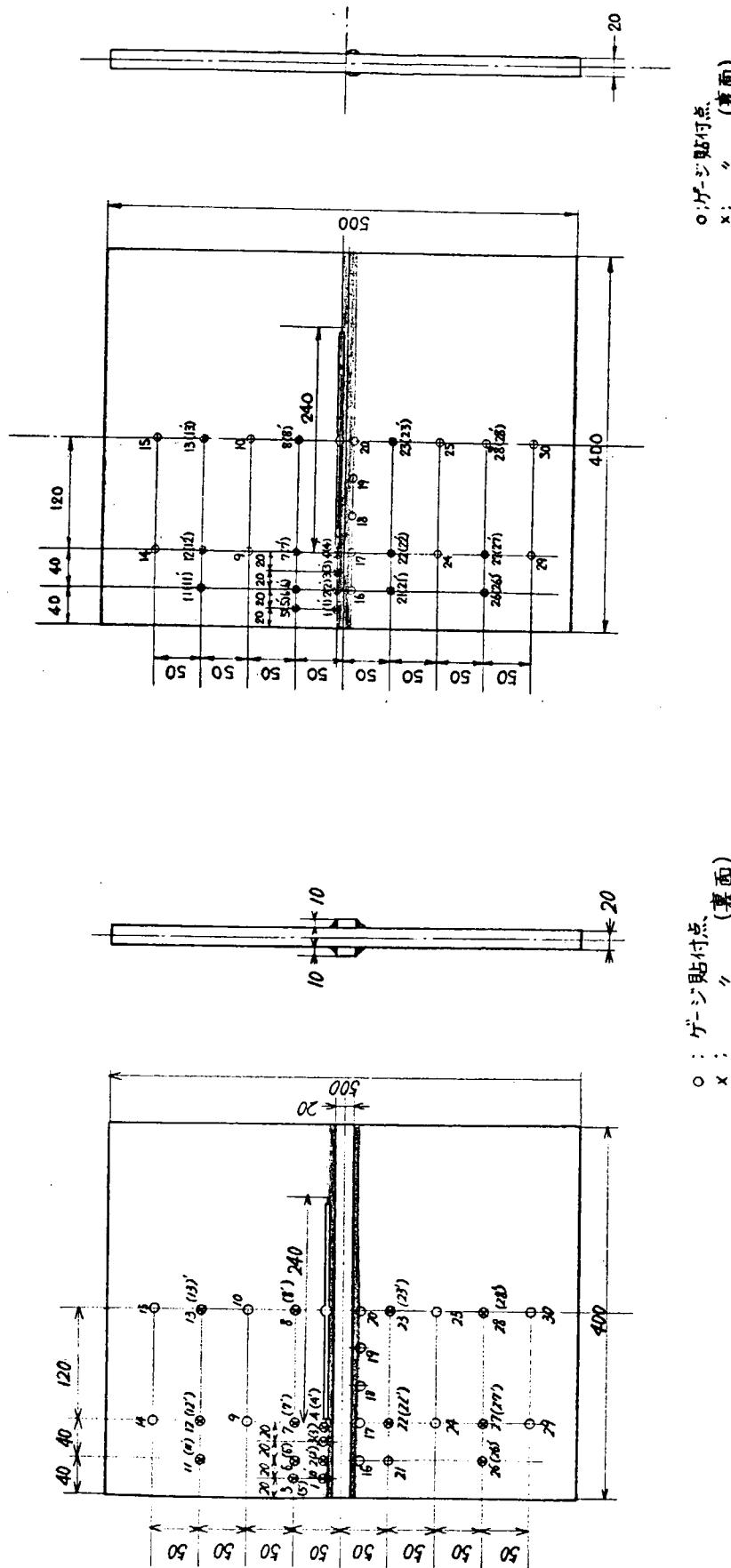
図 17 脆性亜製発生試験片の残留応力計測点 (B型)



○：ゲージ貼付点、
×： strain gauge point (裏面)

図18 脆性亀裂発生試験片の残留応力計測点 (D型)





○：ゲージ貼付点
×：〃 (裏面)

図 1 9 脆性亀裂発生試験片の残留応力計測点 (F型)

図 2 0 脆性亀裂発生試験片の残留応力計測点 (G型)

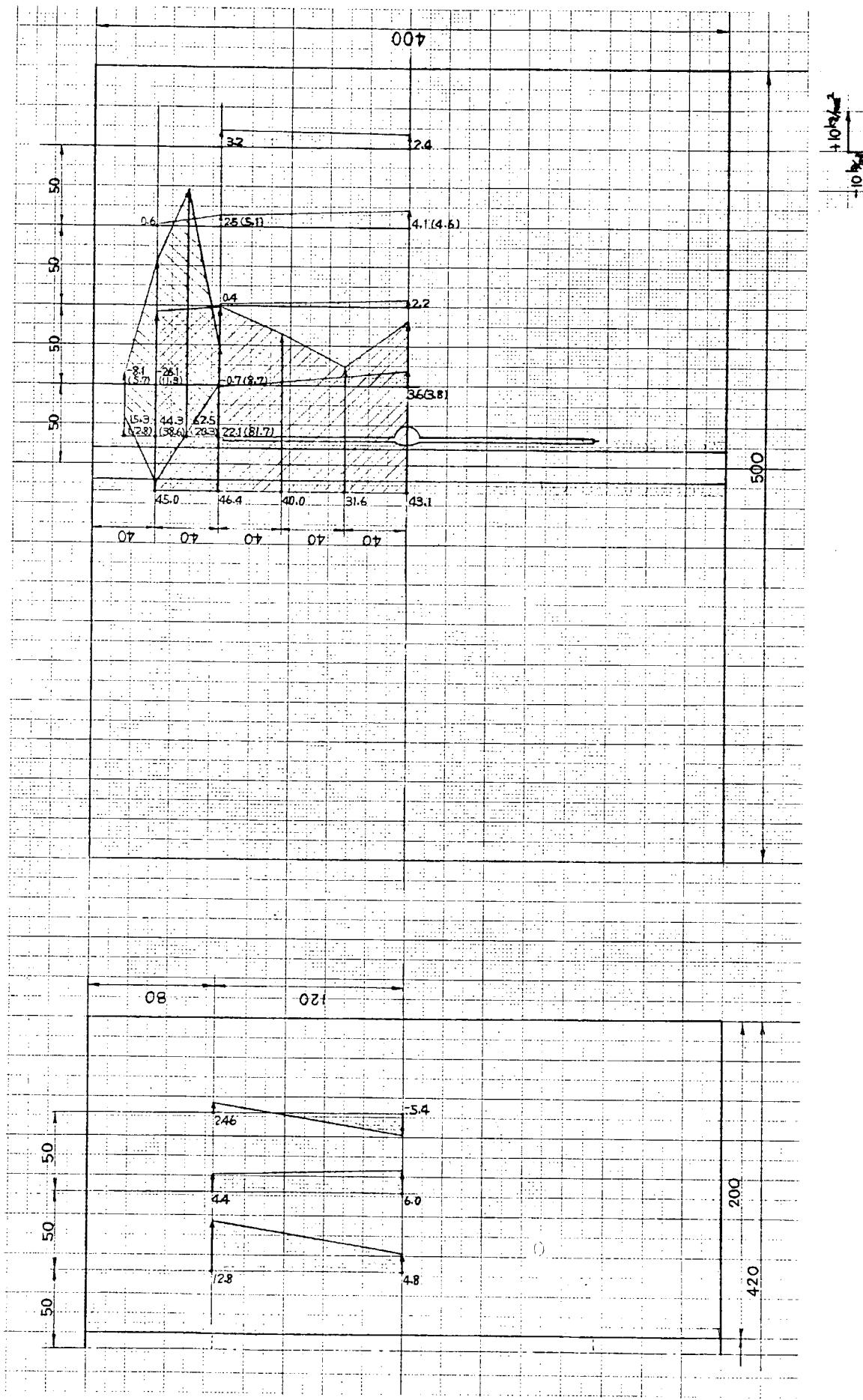
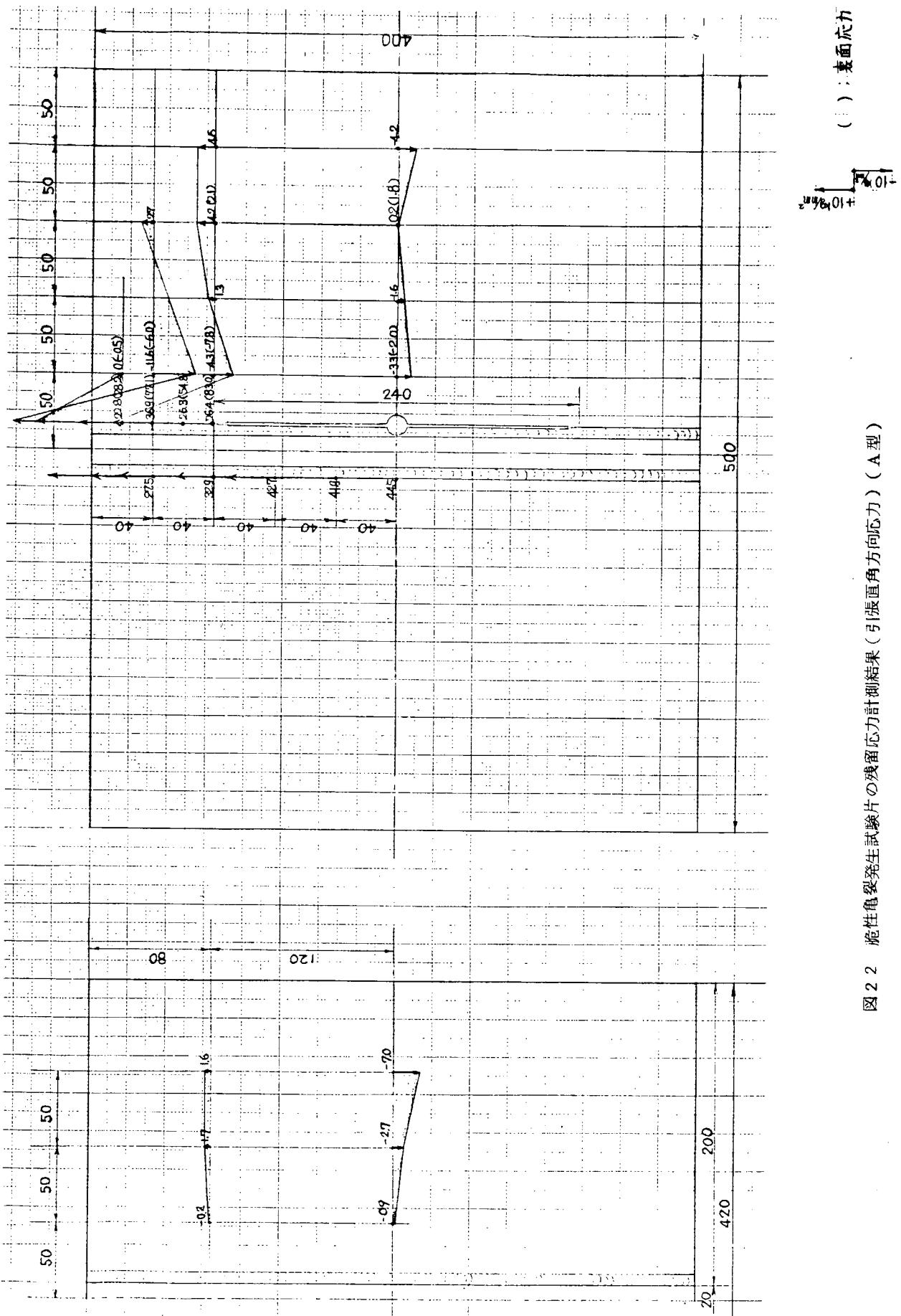


図21 脆性割裂発生試験片の残留応力計測結果（引張方向応力）（A型）

()裏面応力

図 2.2 滅性亀裂発生試験片の残留応力計測結果（引張直角方向応力）（A型）



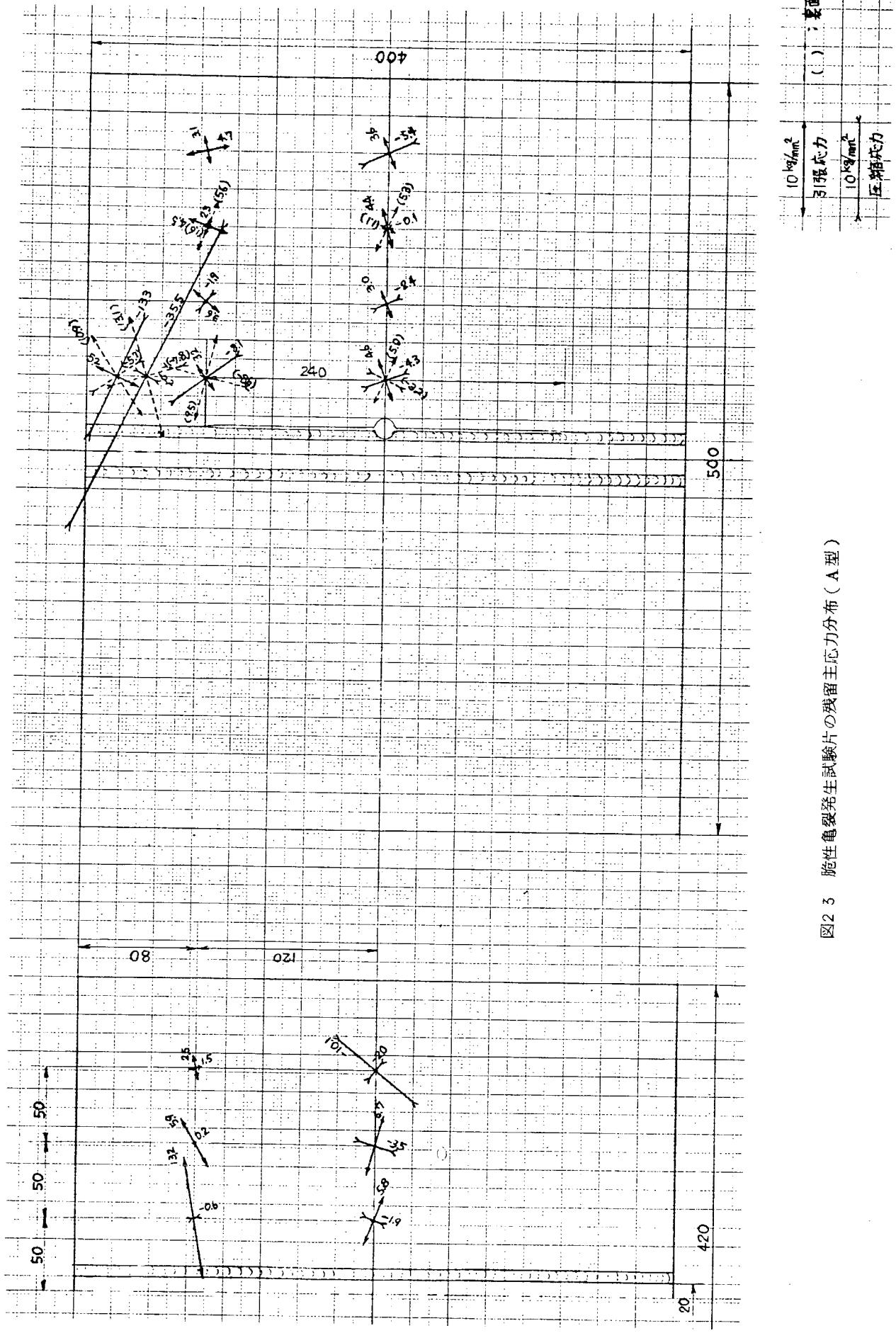
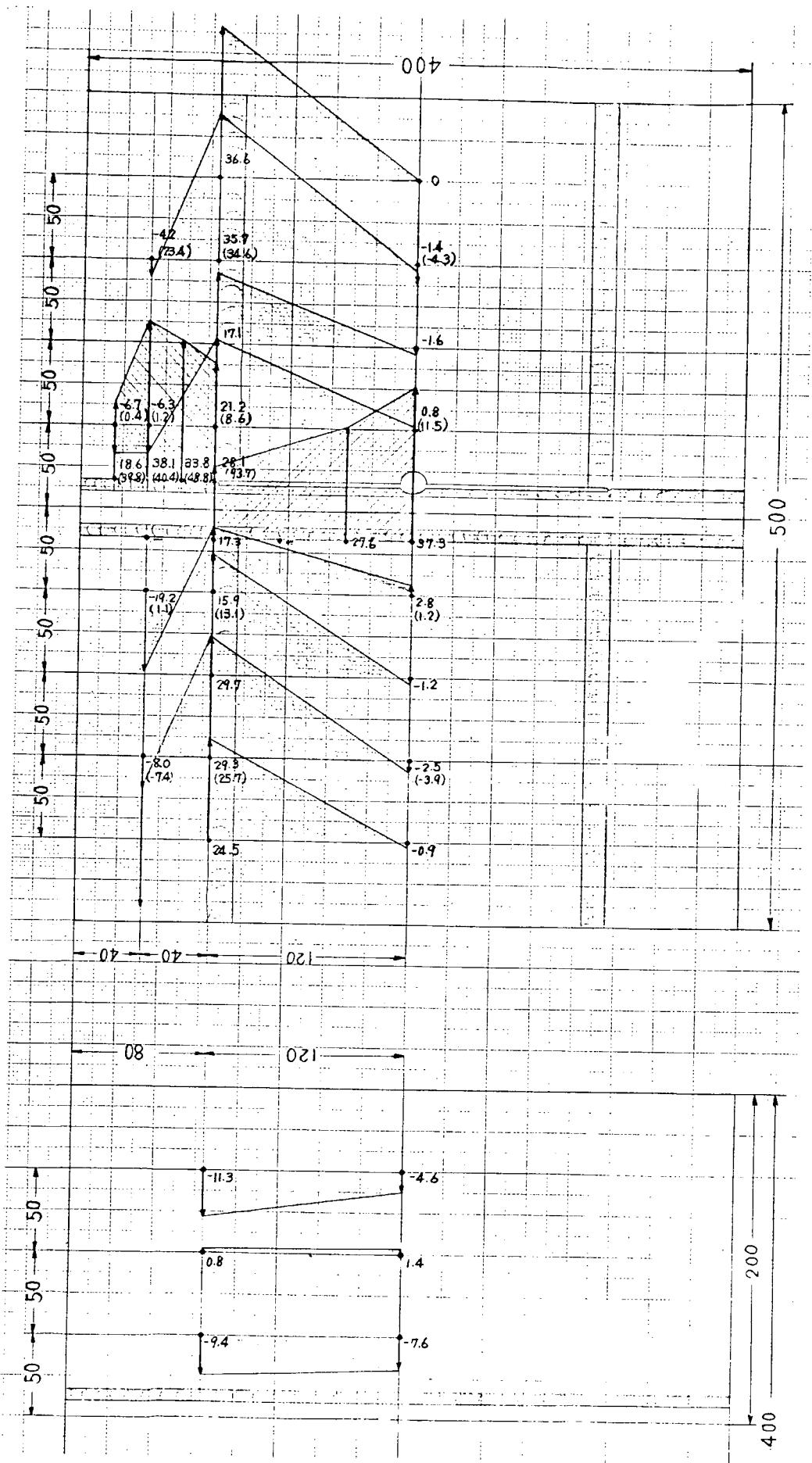


図23 脆性亀裂発生試験片の残留主応力分布（A型）

() ; 裏面応力

図 24 脆性亀裂発生試験片の残留応力計測結果(引張方向応力)(B型)



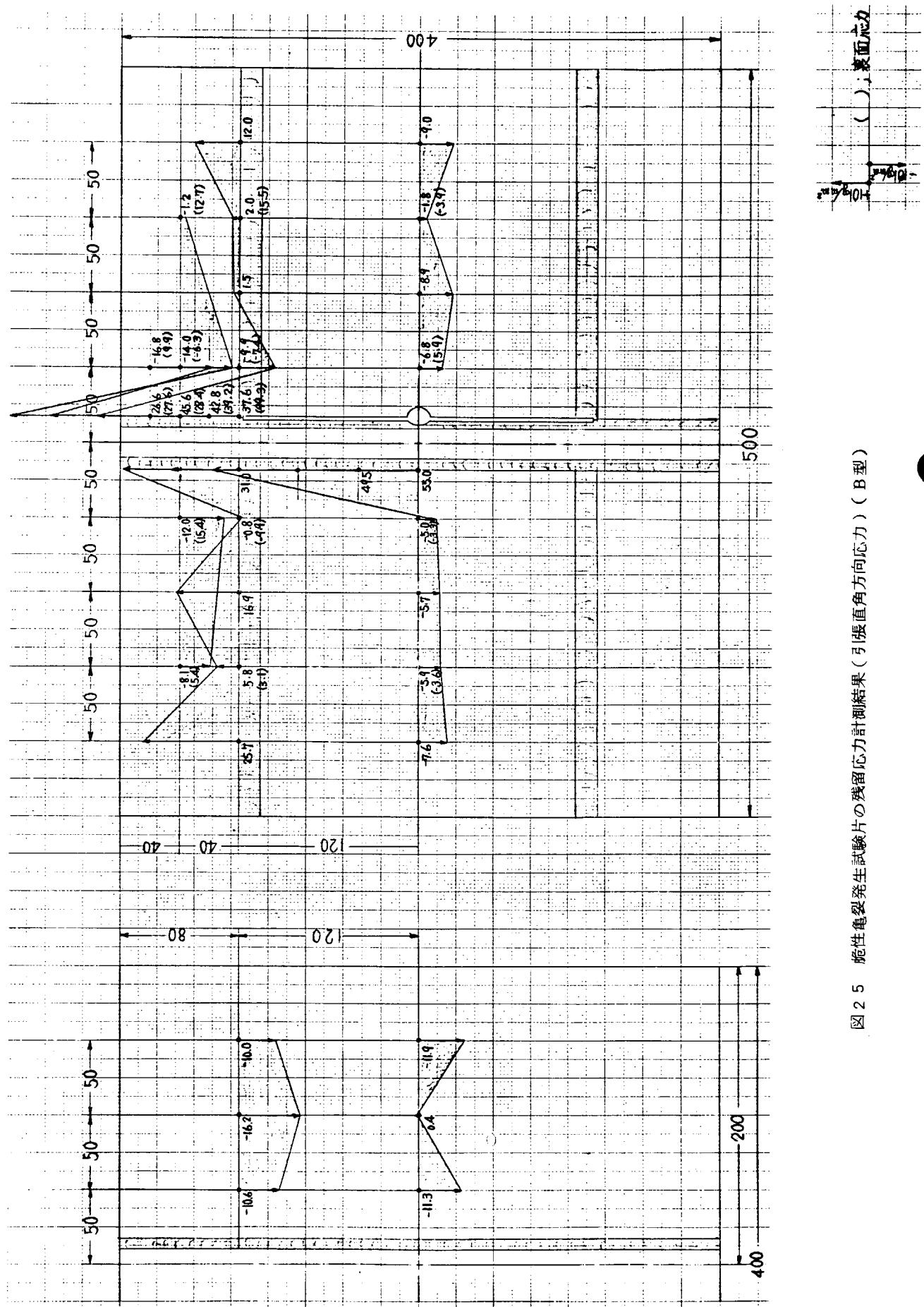


図 2.5 残性亀裂発生試験片の残留応力計測結果(引張直角方向応力)(B型)

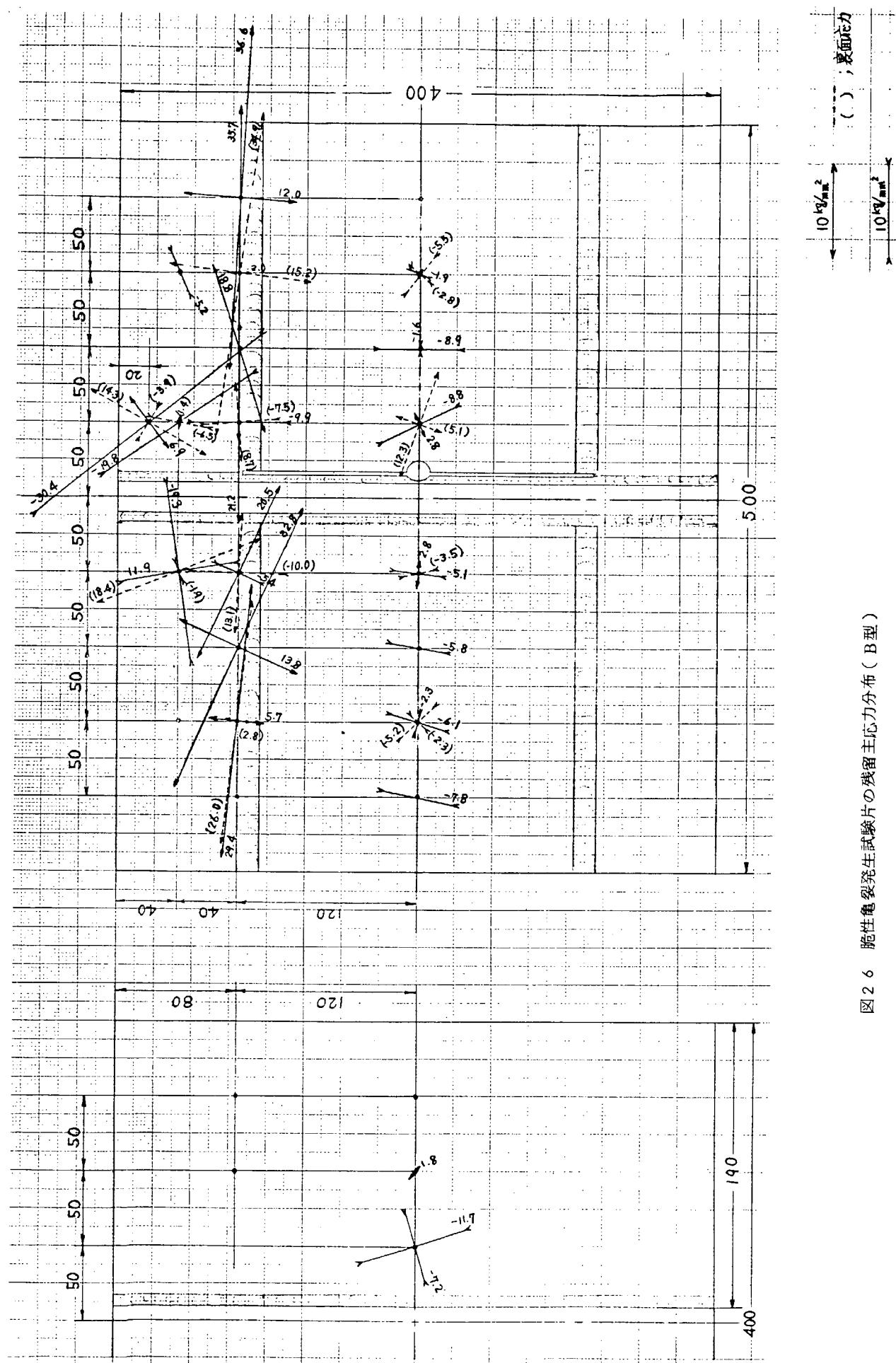


図26 脆性亀裂発生試験片の残留主応力分布（B型）

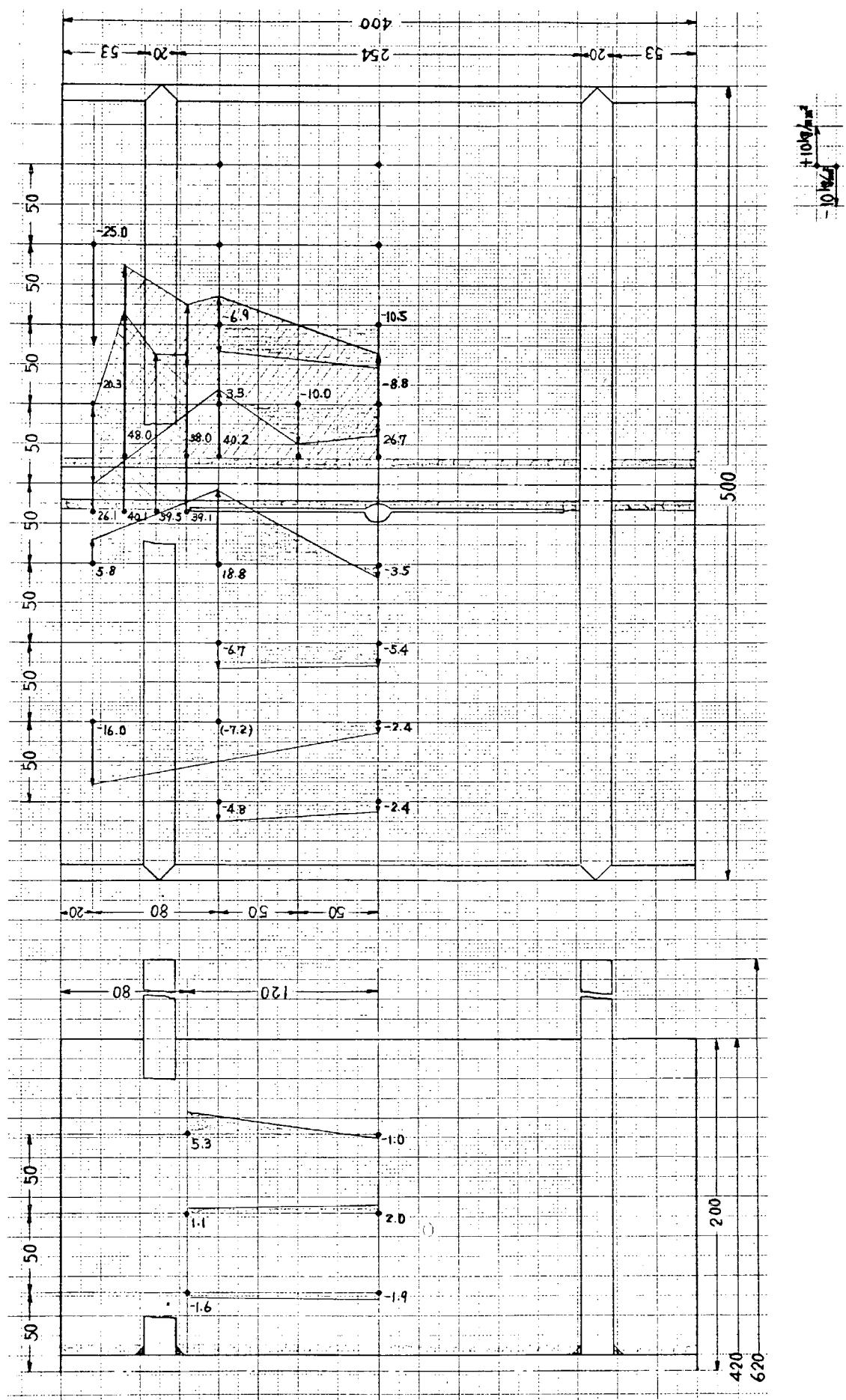
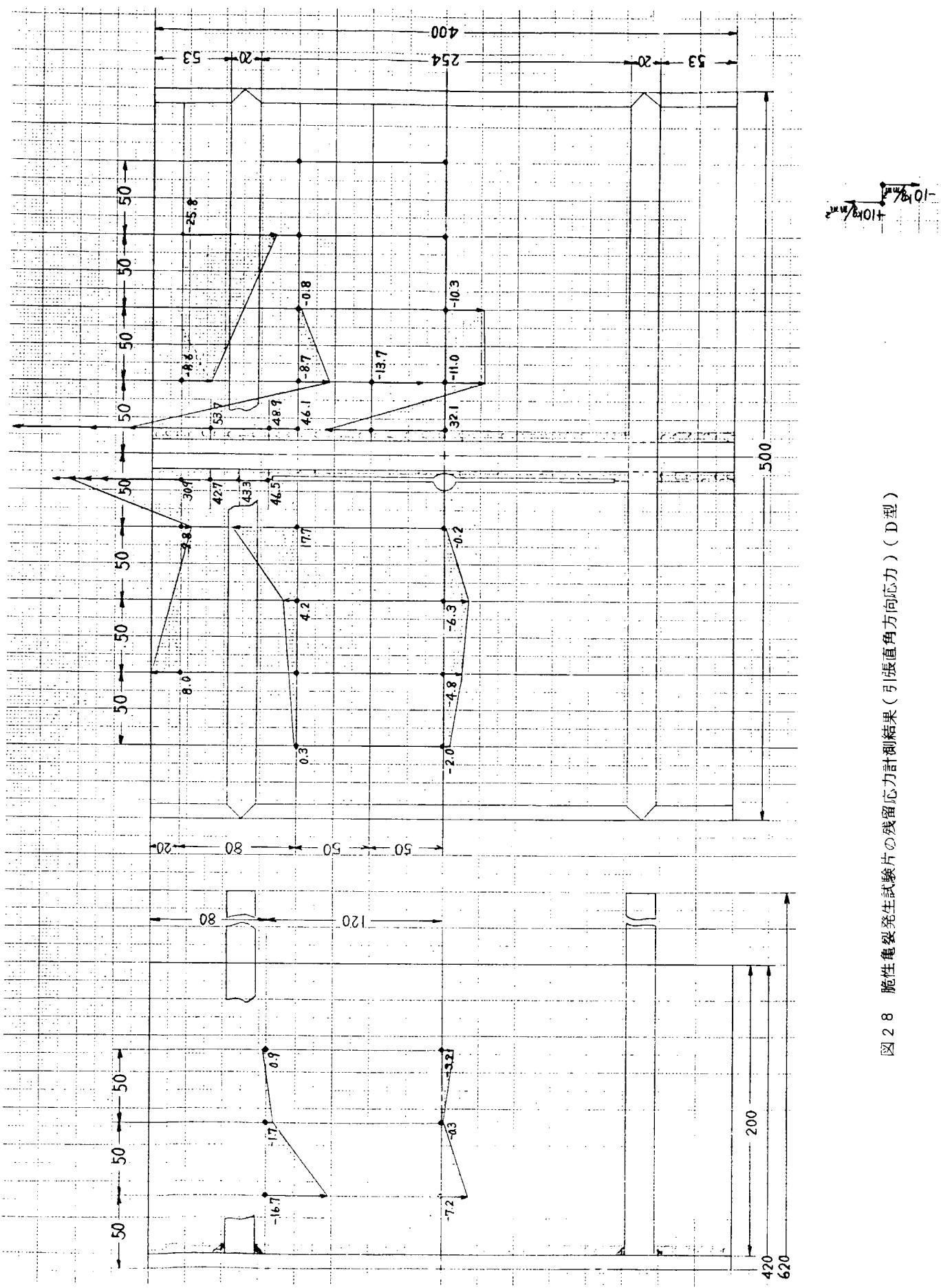


図27 脆性亀裂発生試験片の残留応力計測結果(引張方向応力)(D型)

図 28 脆性亀裂発生試験片の残留応力計測結果（引張直角方向応力）(D型)



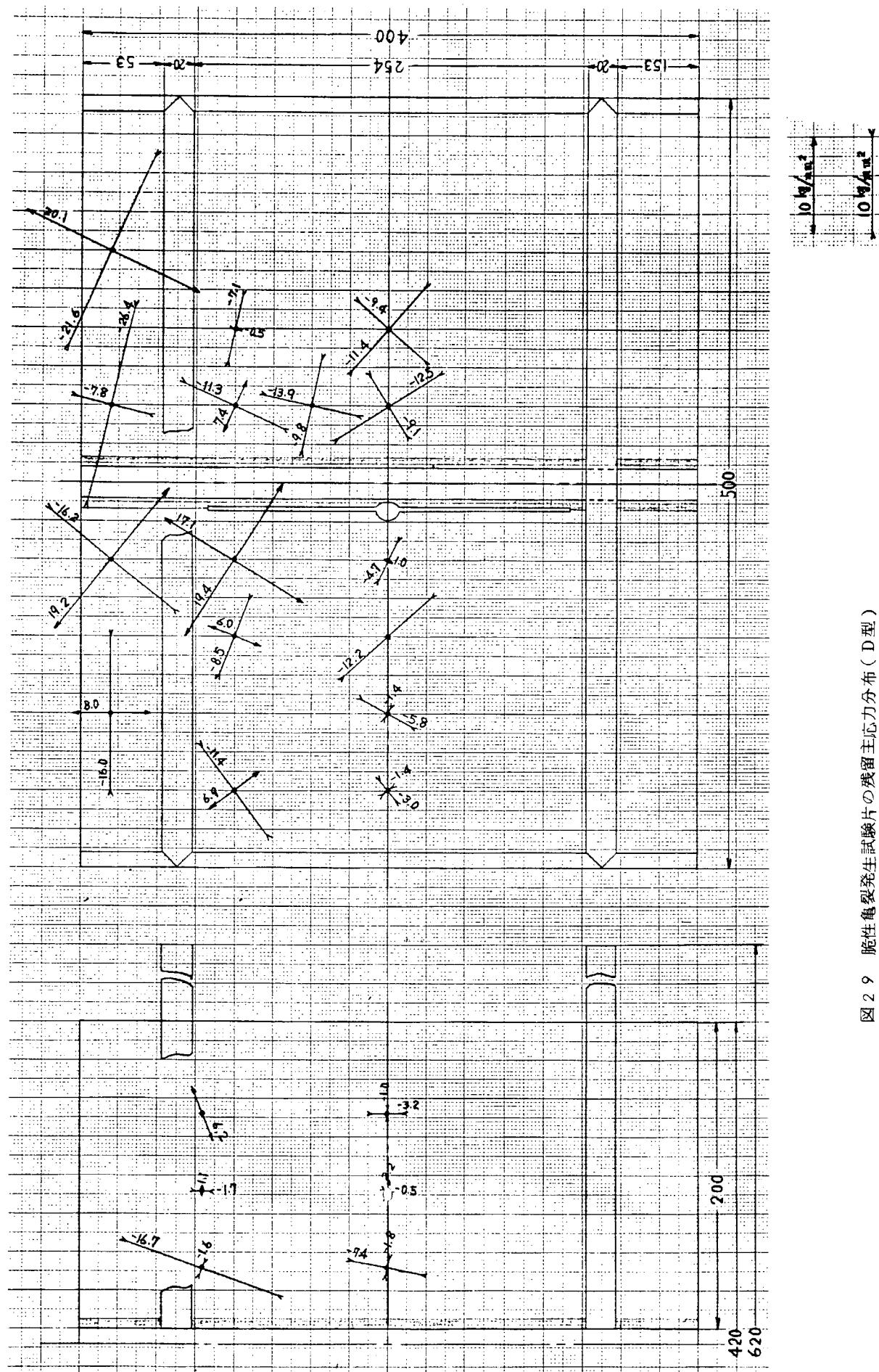


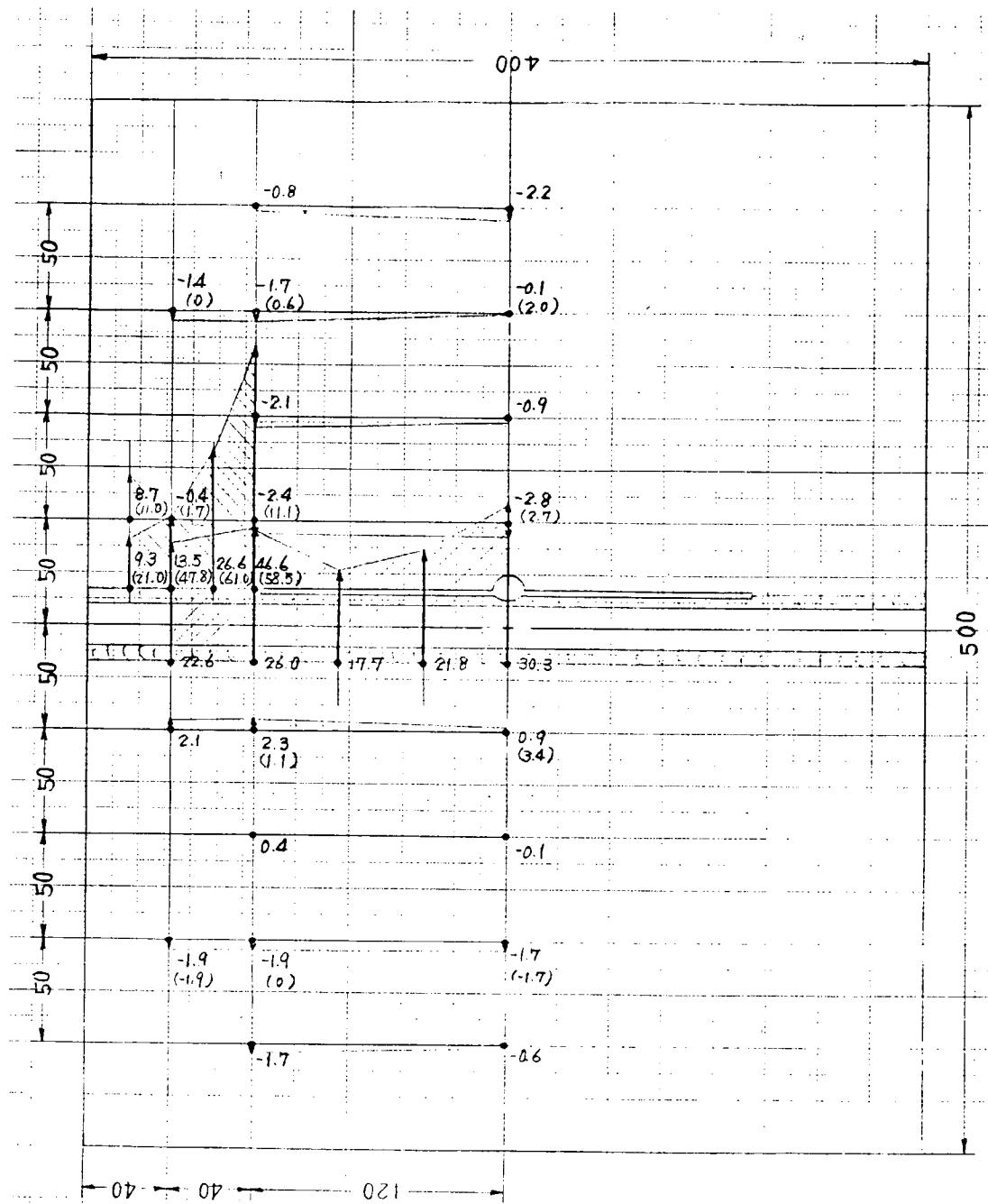
図 29 脆性亀裂発生試験片の残留主応力分布(D型)

() ; 裏面応力

図 30 脆性亀裂発生試験片の残留応力計測結果(引張方向応力)(F型)

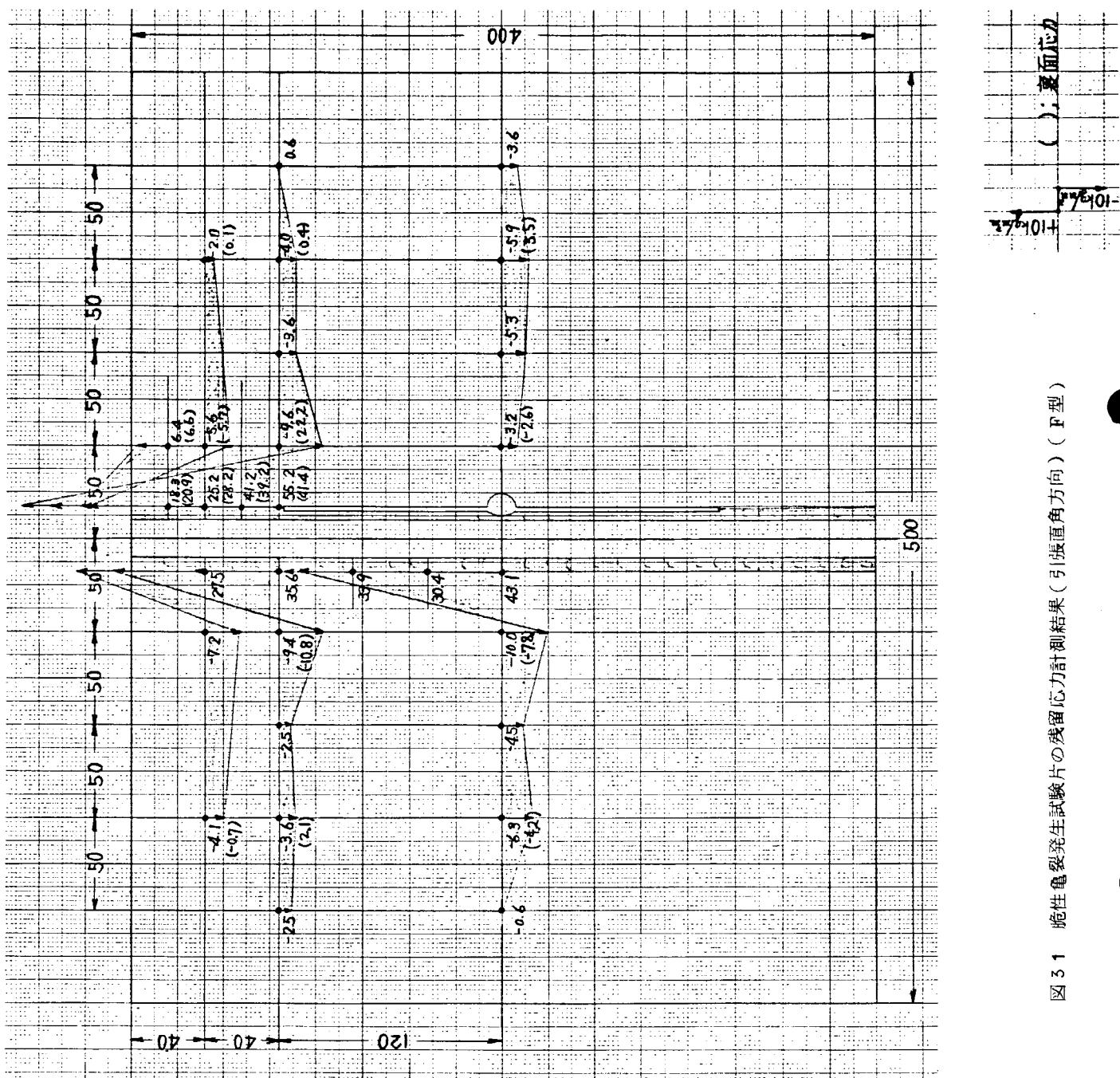
+10 kg/mm²

-10 kg/mm²



() : 複面応力

図 3.1 脆性亀裂発生試験片の残留応力計測結果(引張直角方向)(F型)



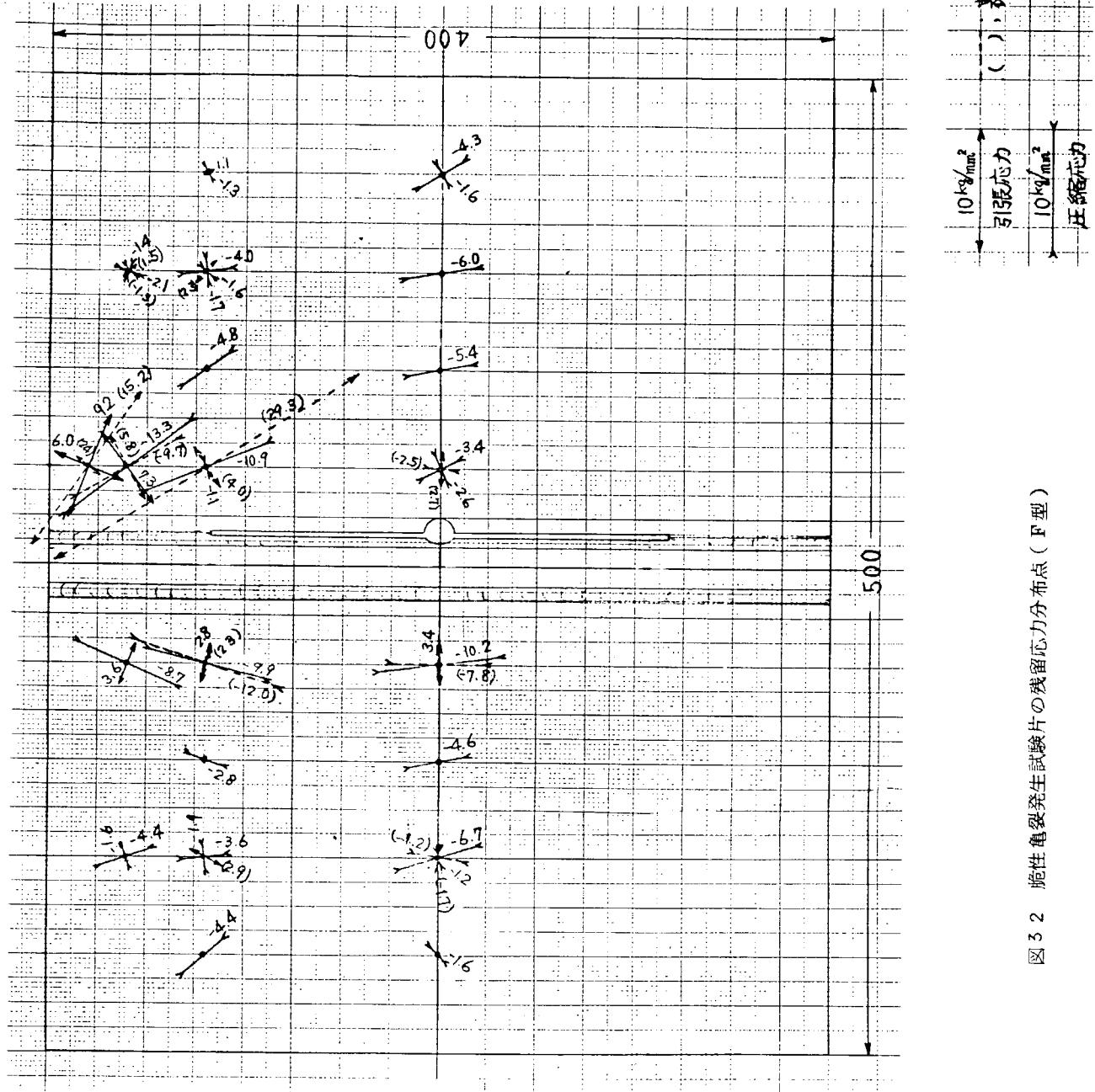


図 3.2 残性亀裂発生試験片の残留応力分布点 (F型)

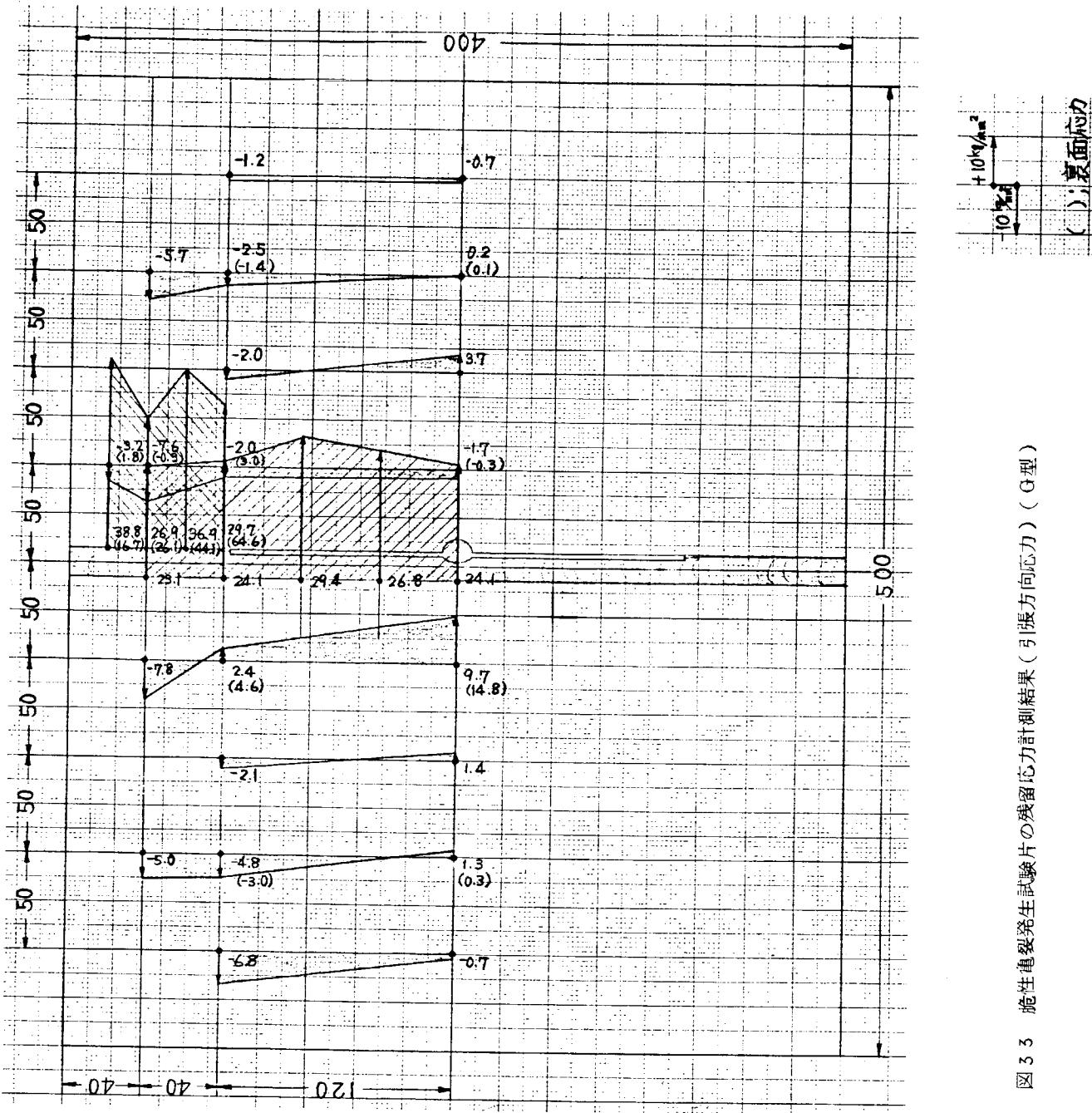


図 3 脆性亀裂発生試験片の残留応力計測結果(引張方向応力)(G型)

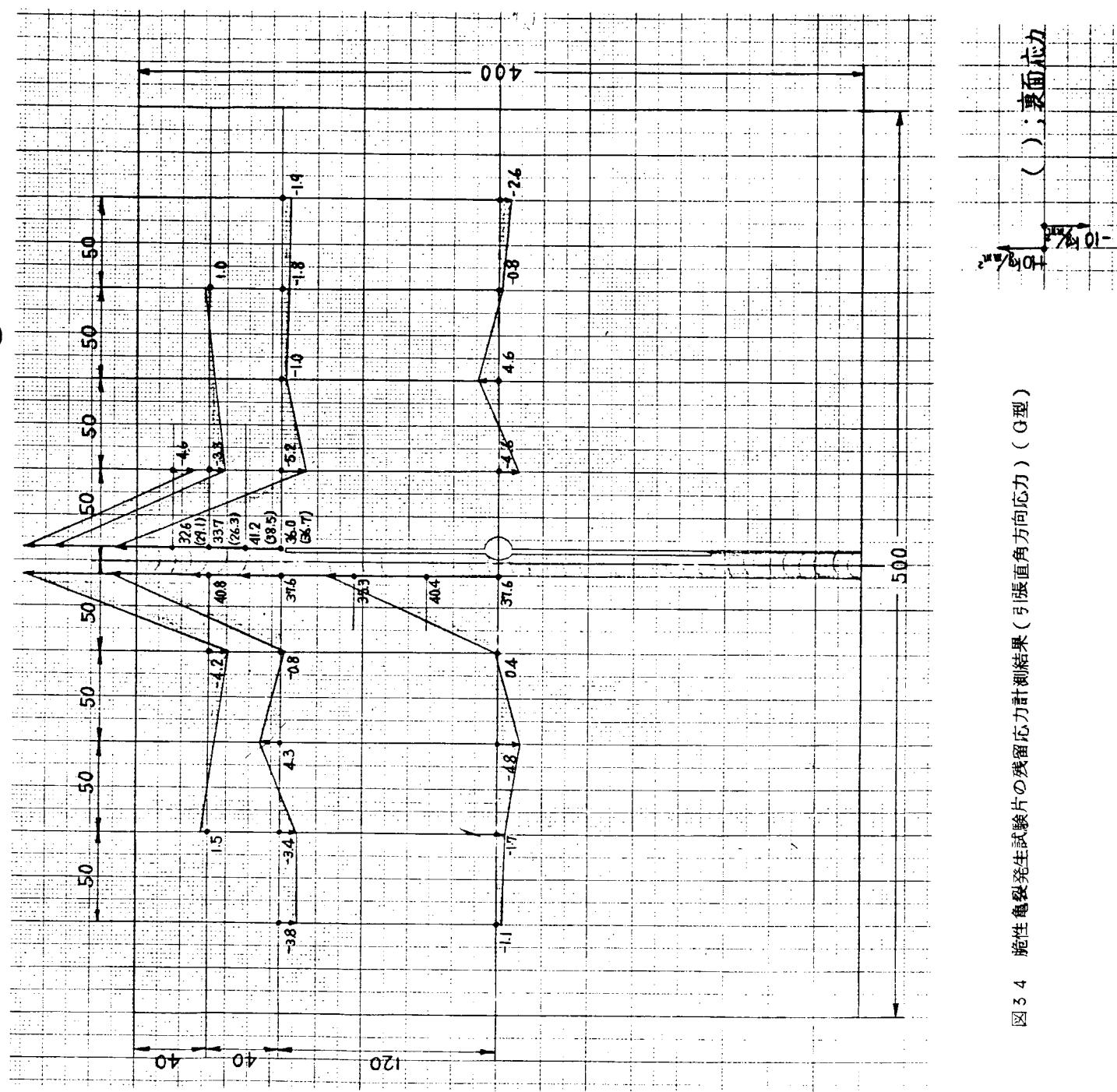


図3.4 脆性亀裂発生試験片の残留応力計測結果（引張直角方向応力）(Q型)

() ; 裏面応力

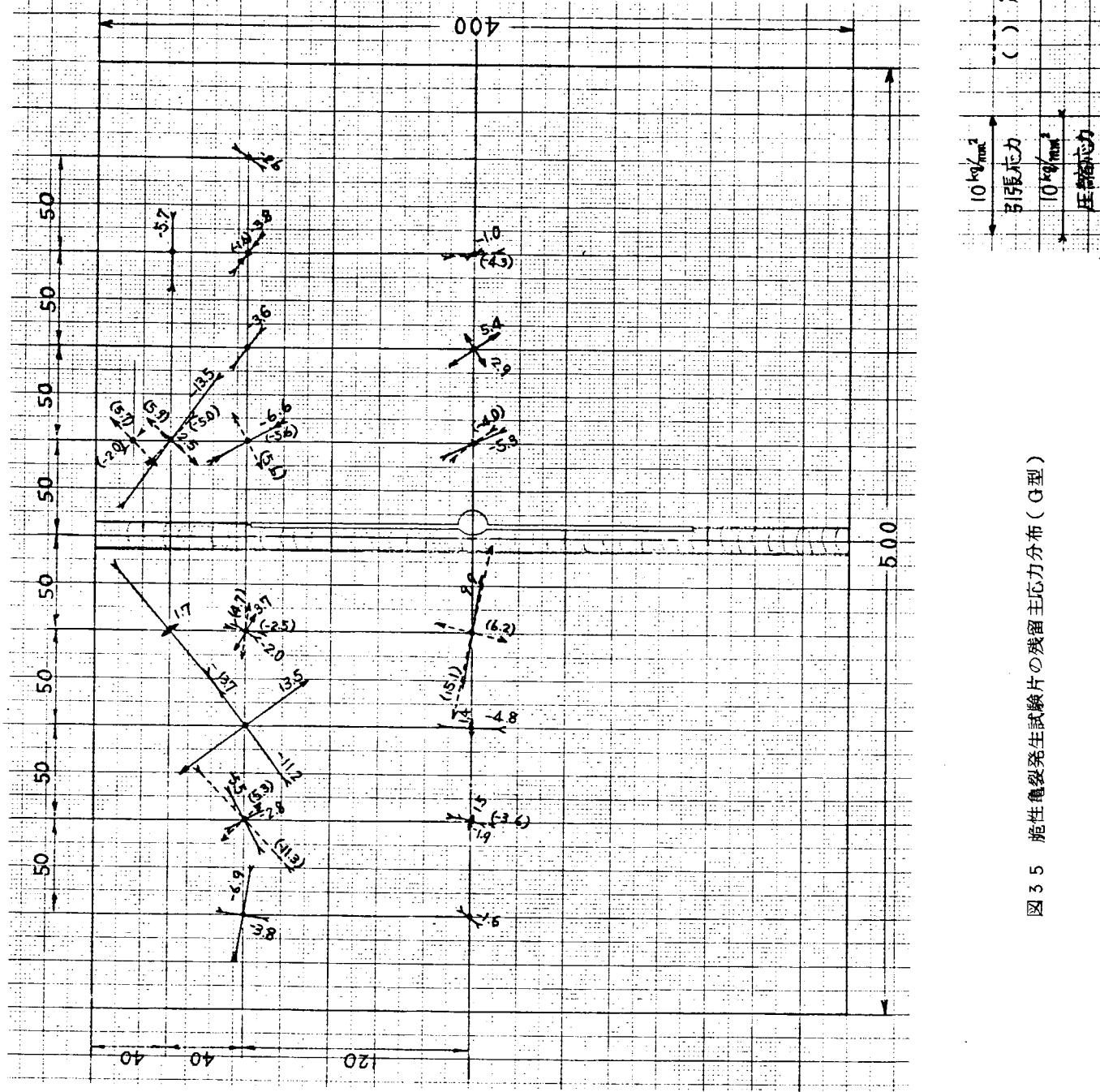


図 3.5 施生亀裂発生試験片の残留主応力分布 (G型)

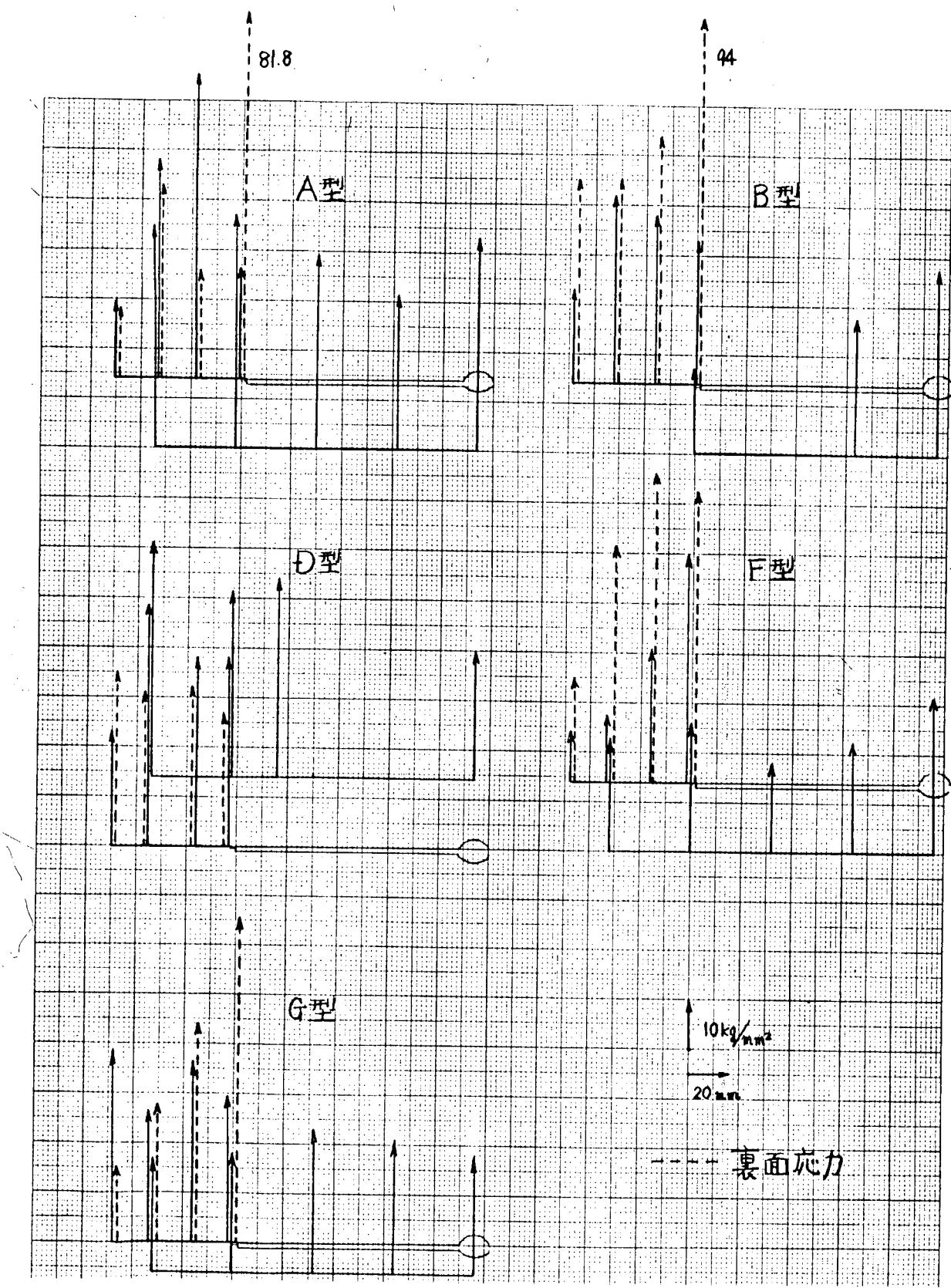


図 3.6 各種脆性亀裂発生試験片隅肉溶接トウ部の残留応力分布
(隅肉および溶接ビード直角方向応力)

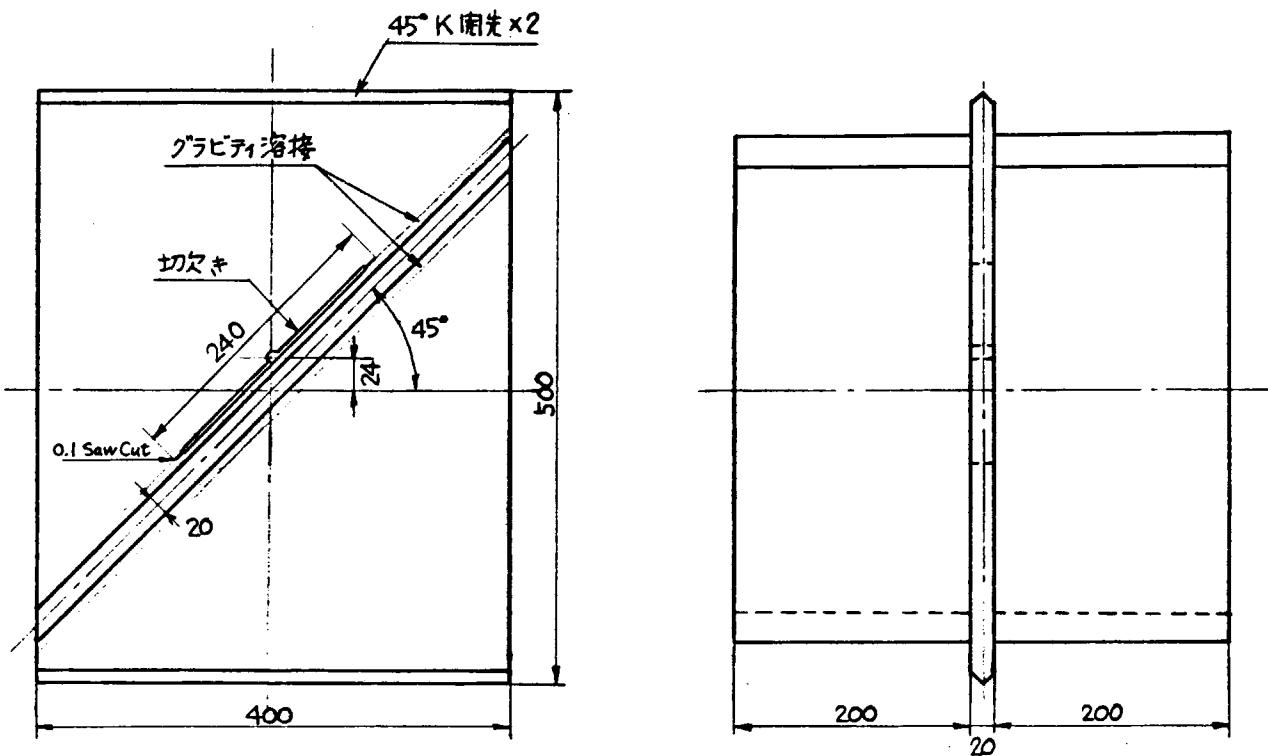


図 3.7 壓労試験片形状(Ⅲ型)

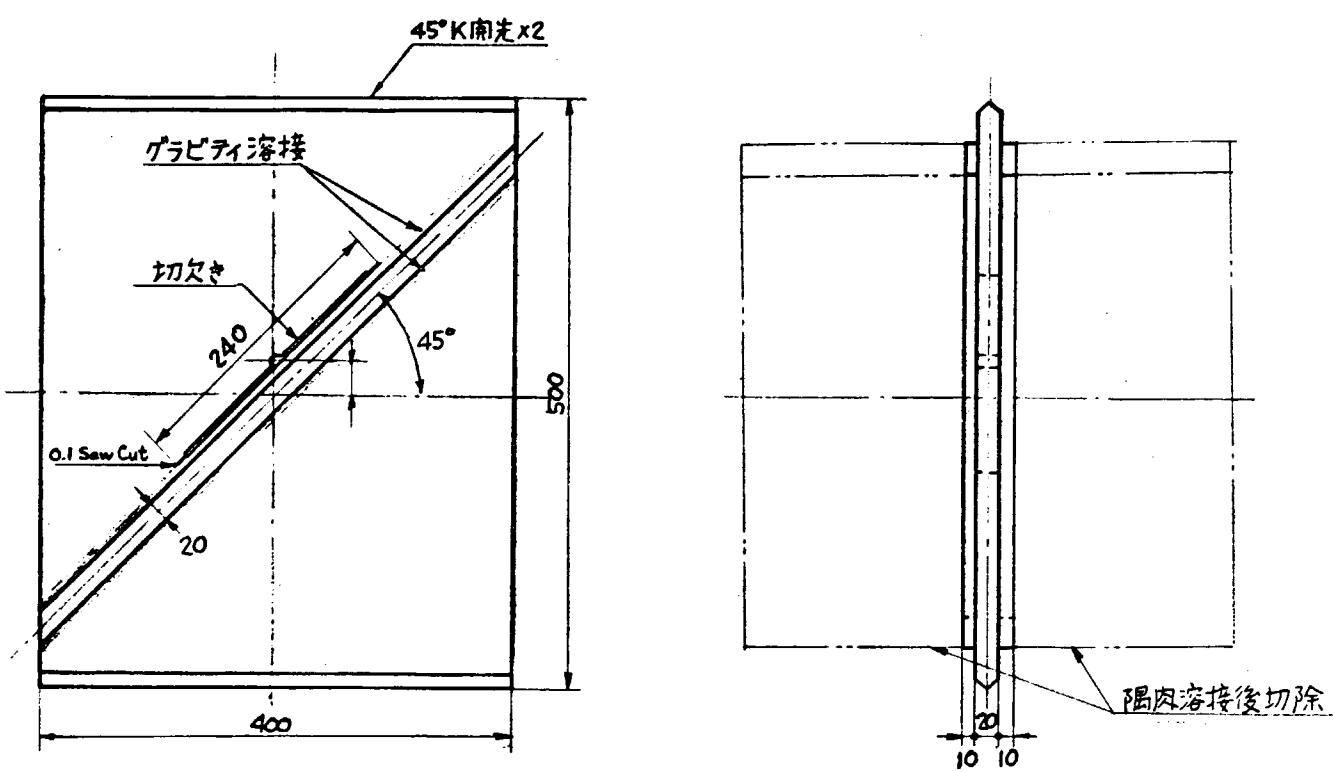


図 3.8 壓労試験片形状(Ⅴ型)

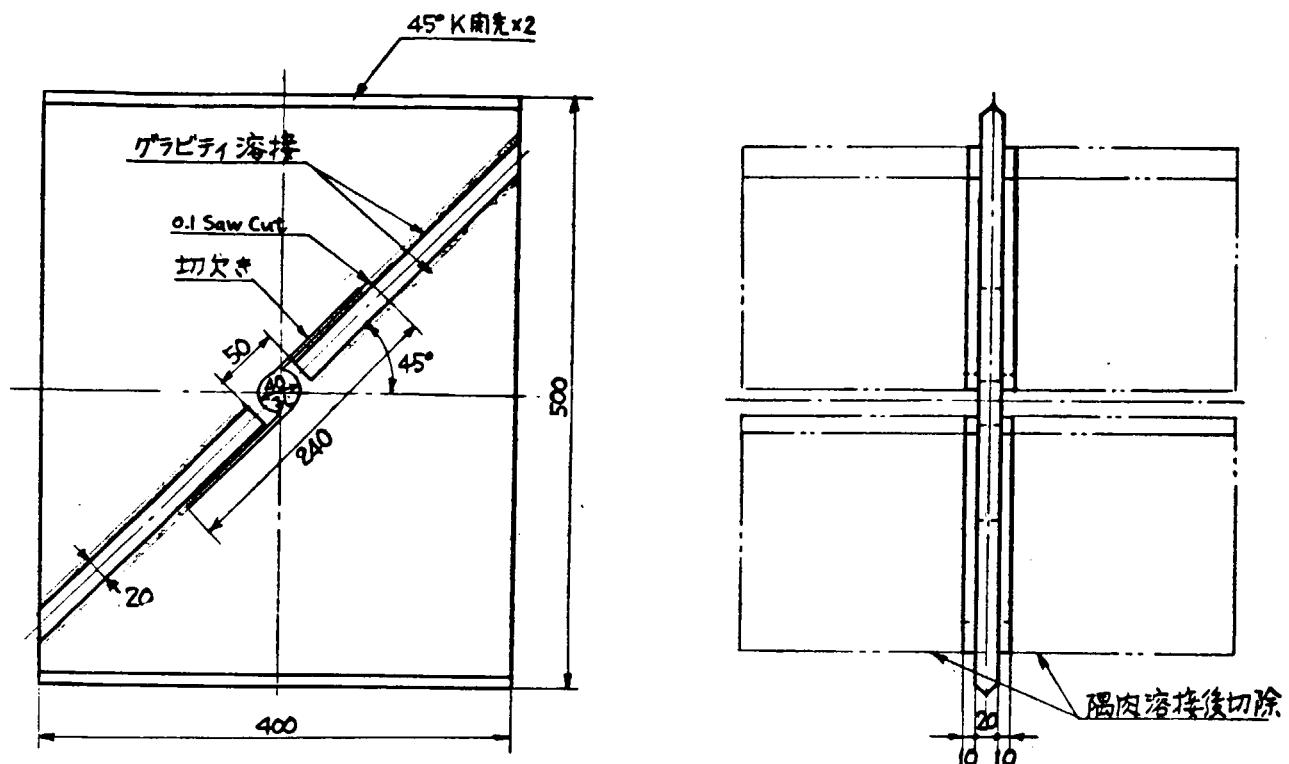


図 39 度労試験片形状 (V'型)

表 4 度労試験結果および経過一覧表

モデルNo.	試験条件				Stop Holeをあけたときの繰返し回数(Cycle)	Stop Holeをあけたときの亀裂長さ(mm)	Stop Holeから成長したときの繰返し回数(Cycle)	亀裂が10mm成長したときの繰返し回数(Cycle)	溶接ビードに沿って成長した亀裂長さ(mm)	亀裂が溶接ビードに沿って成長したときの繰返し回数(Cycle)	破壊寸断繰返し回数(Cycle)
	繰返し荷重 Pmin~Pmax (ton)	Gross Stress Gmin~Gmax (kg/mm ²)	Net Stress Gmin~Gmax (kg/mm ²)	繰返し速度 (cpm)							
III-1	5~69	0.6~8.6	1.1~15.0	4	33,300	31.0	43,000	9,000 19,000	20.5 0.5	44,000 1,500	—
III-2	5~138	0.6~17.2	1.1~30.0	3	660	10.0	1,600	660 1,400	11.0 0.5	1,600 50	—
V-1	5~138	0.6~17.2	1.1~30.0	4	Stop Holeなし			650 730	36.0 0.5	1,464 5	1,464
V-2	5~138	0.6~17.2	1.1~30.0	3	550	10.0	900	550 800	14.0 0.5	1,300 5	—
V'-1	5~138	0.6~17.2	1.0~27.6	3	Stop Holeなし			2,250 2,500	23.3 12.3	5,200 3,400	—
V'-2	5~69 5~90	0.6~8.6 0.6~11.2	1.0~13.8 1.0~18.0	4 3	Stop Holeなし			21,000 21,000	7.3 5.0	17,500 11,000	—
V'-3	5~175	0.6~21.2	1.0~35.0	1	Stop Holeなし			650 550	3.0 3.0	200 200	1,119

* Stiffenerは関係ないものとして算出した。

** 8,000 cycleまでは5~69 ton, それ以後は5~90 ton.

*** 上段は上側亀裂, 下段は下側亀裂 のものを示す。

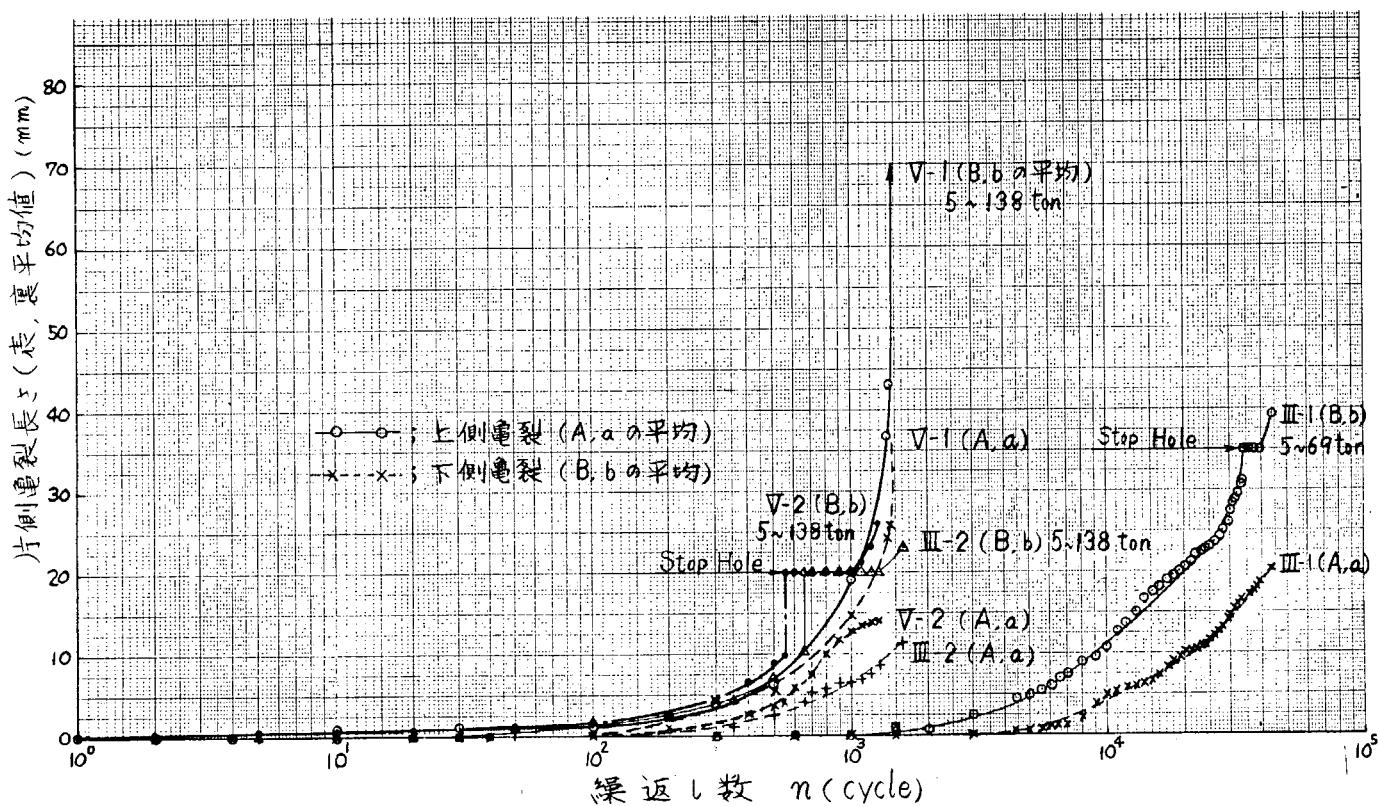


図 4 0 度労亀裂成長状況 (III型, V型)

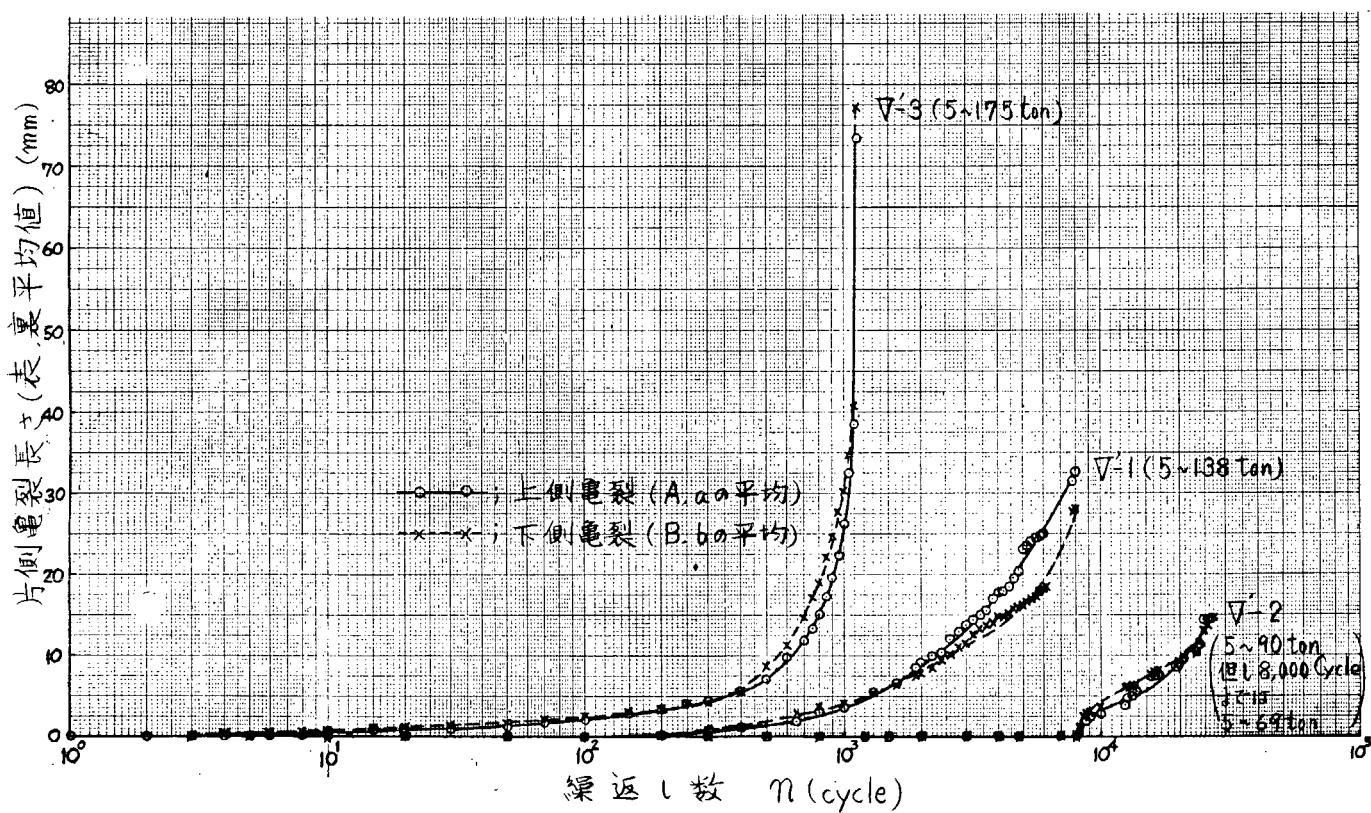


図 4 1 度労亀裂成長状況 (V'型)

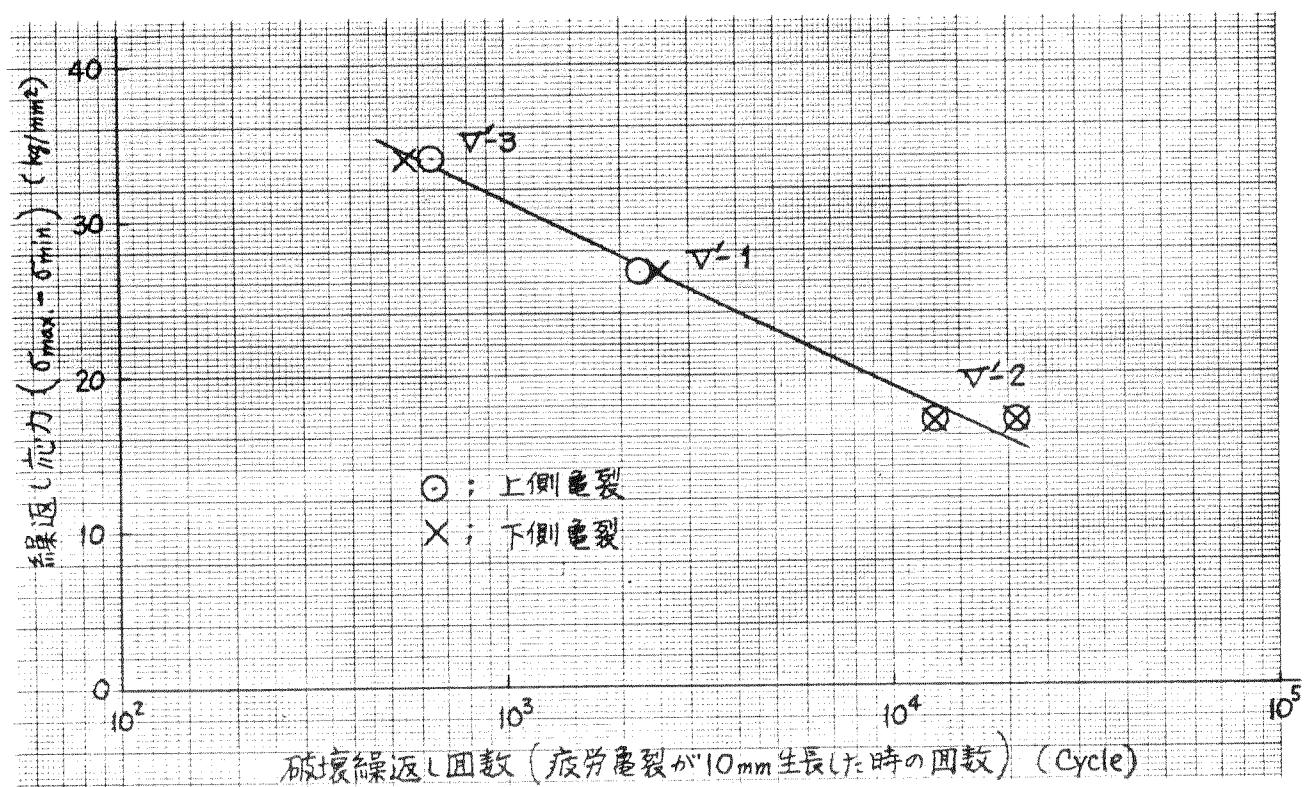


図 4 2 S-N 線図 (V'型)

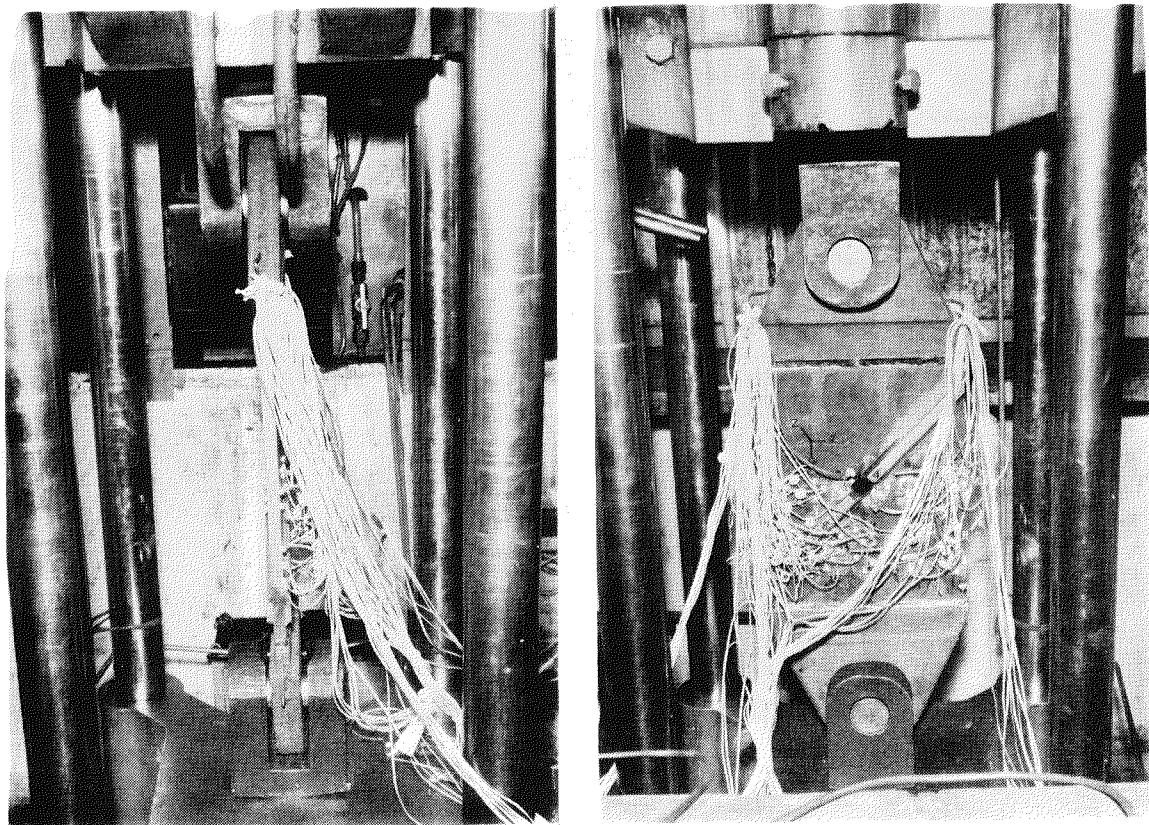
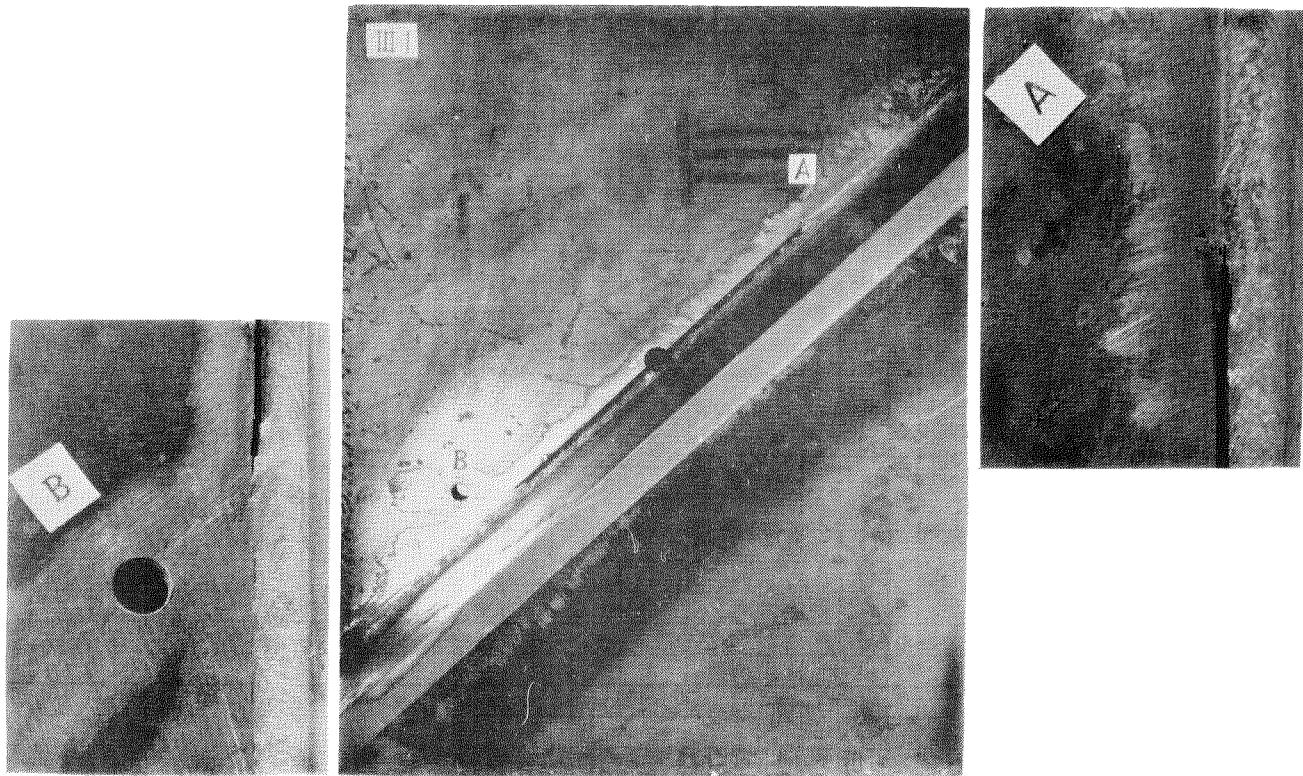
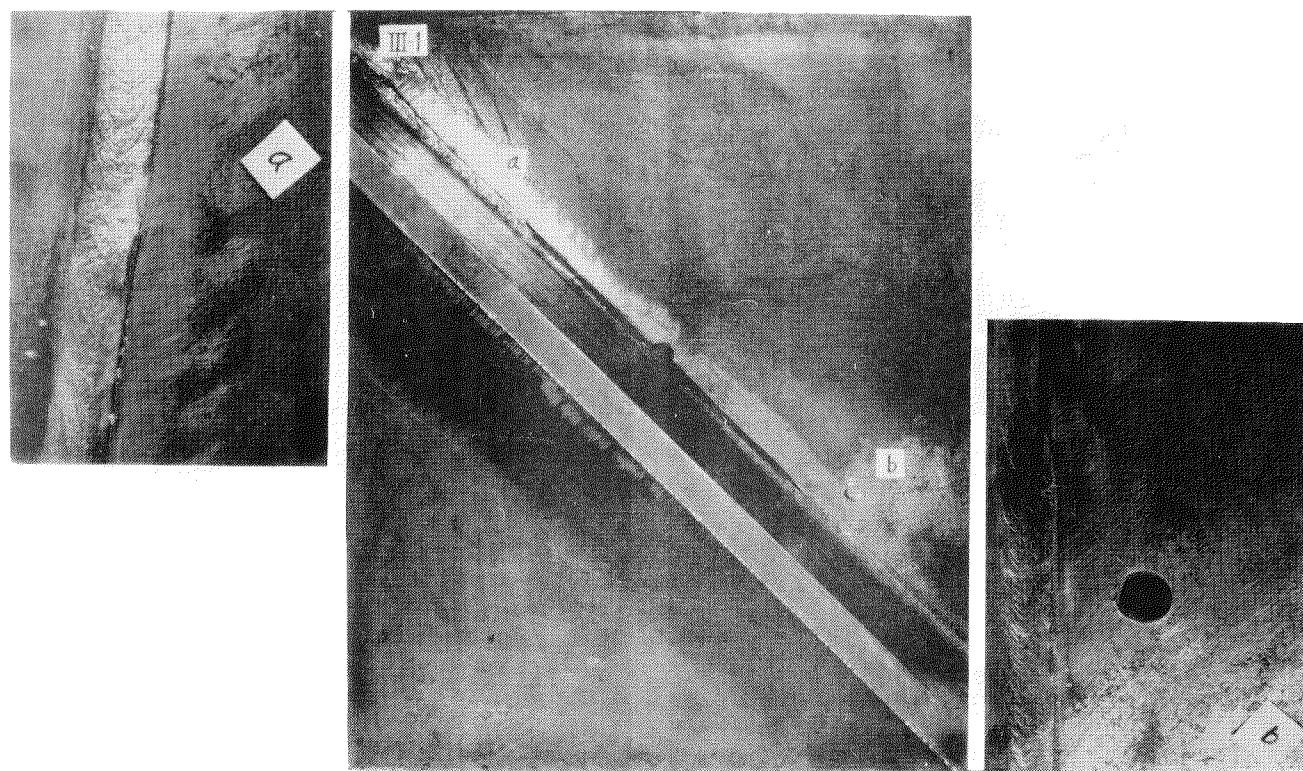


写真 1 0 試験装置 (V'型 No. 2)

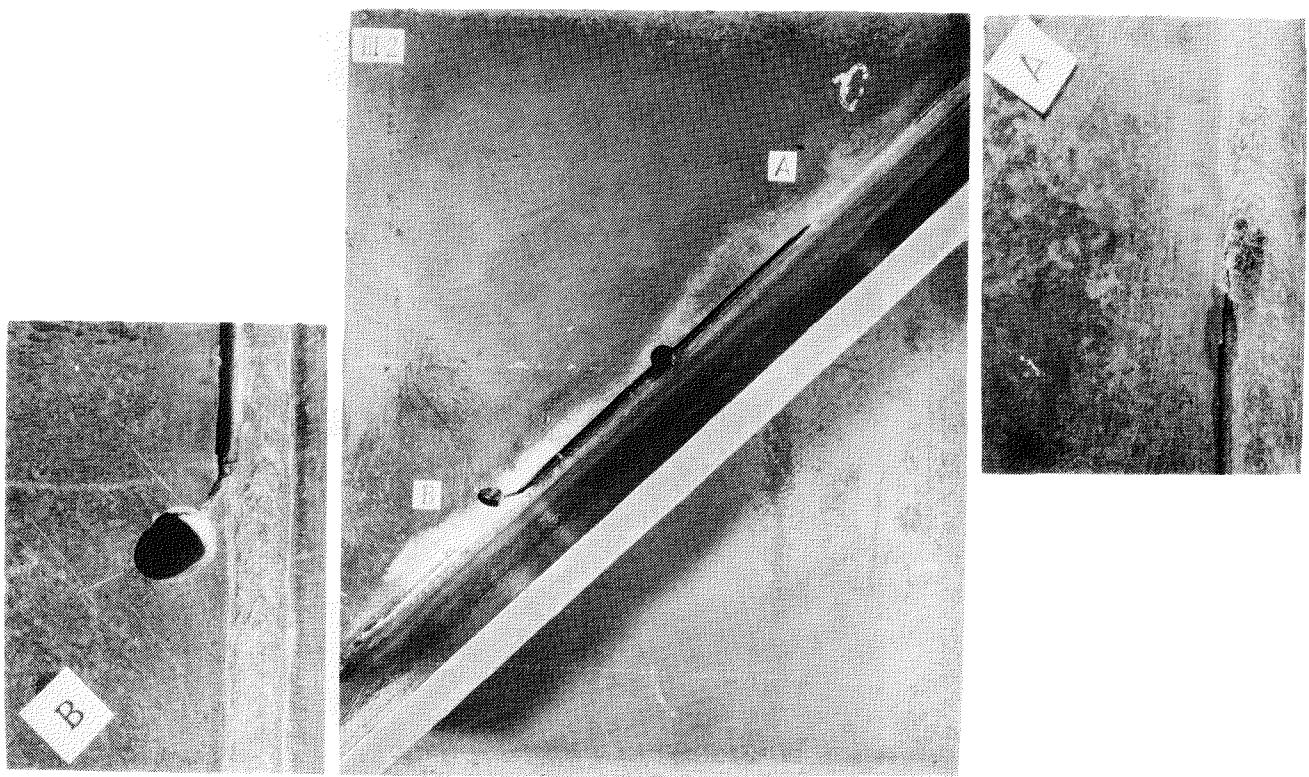


(a) 表 面

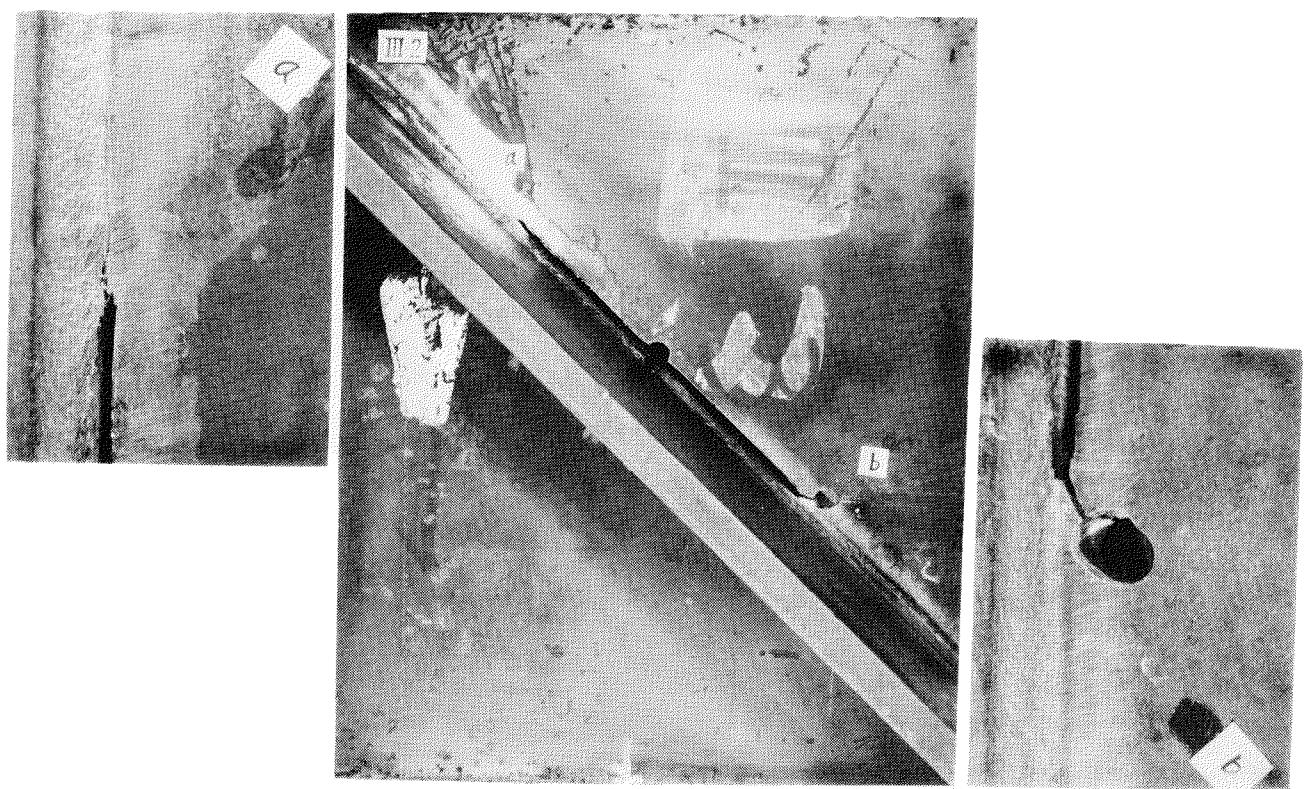


(b) 裏 面

每具 11 式試驗後 (Ⅲ型 檢 1)

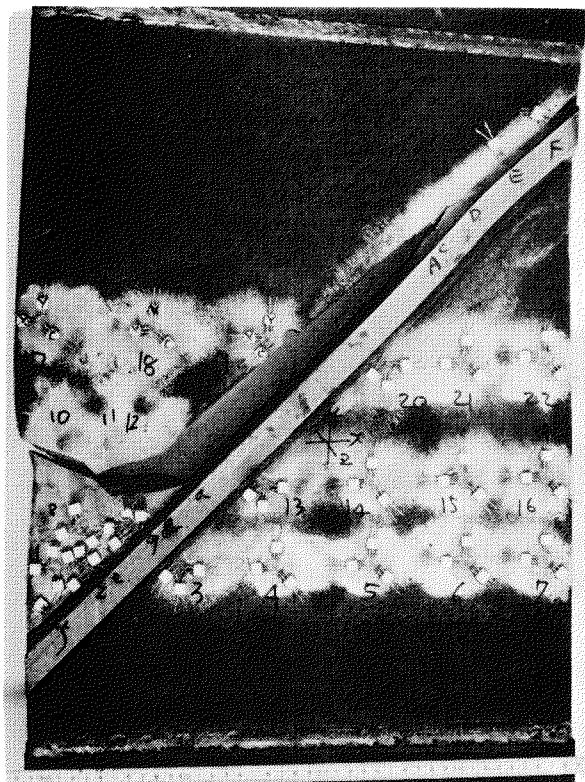


(a) 表面

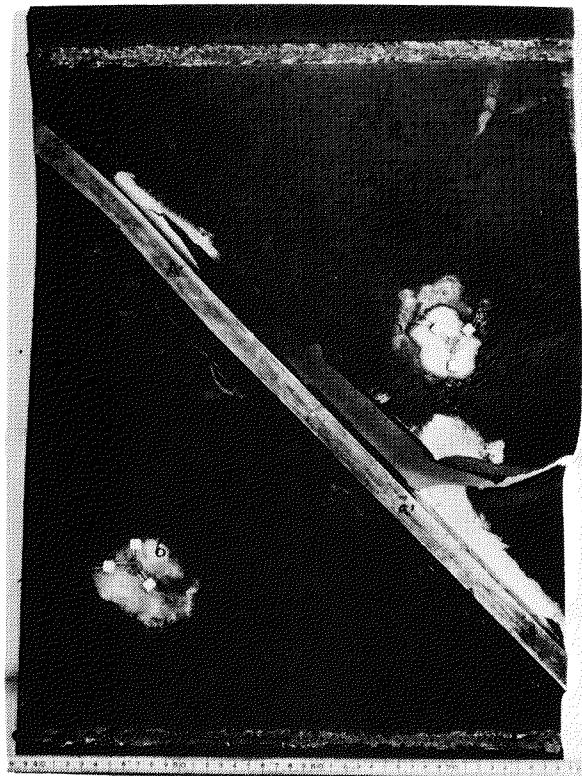


(b) 裏面

写真 1 2 試験後(Ⅱ型 JIS 2)

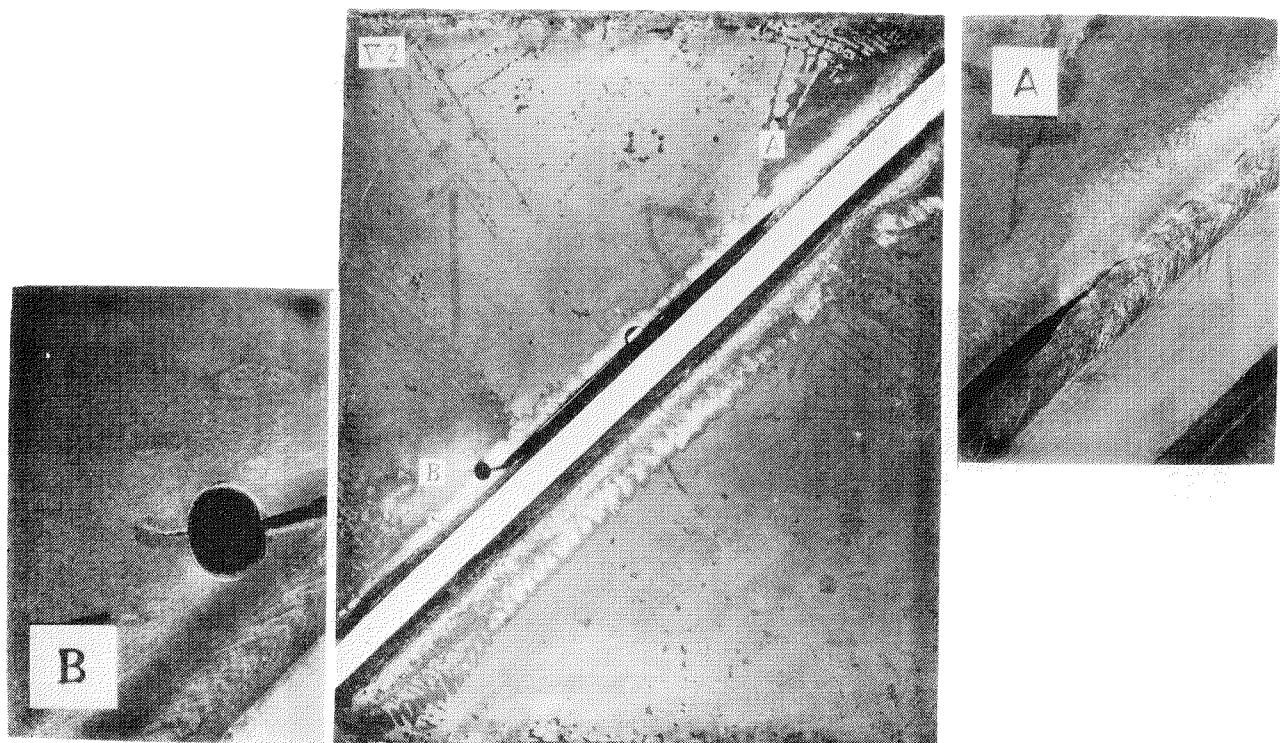


(a) 表 面

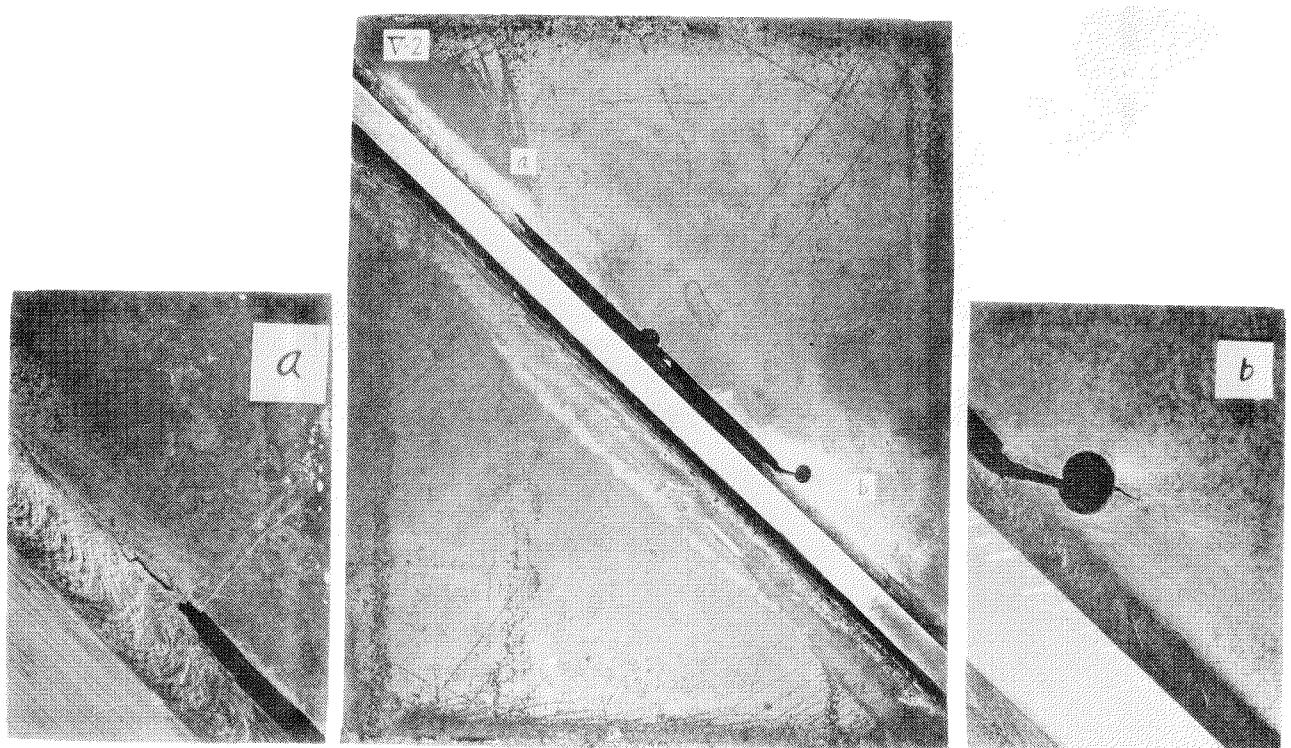


(b) 裏 面

写真 13 試験後 (V型 Jka 1)

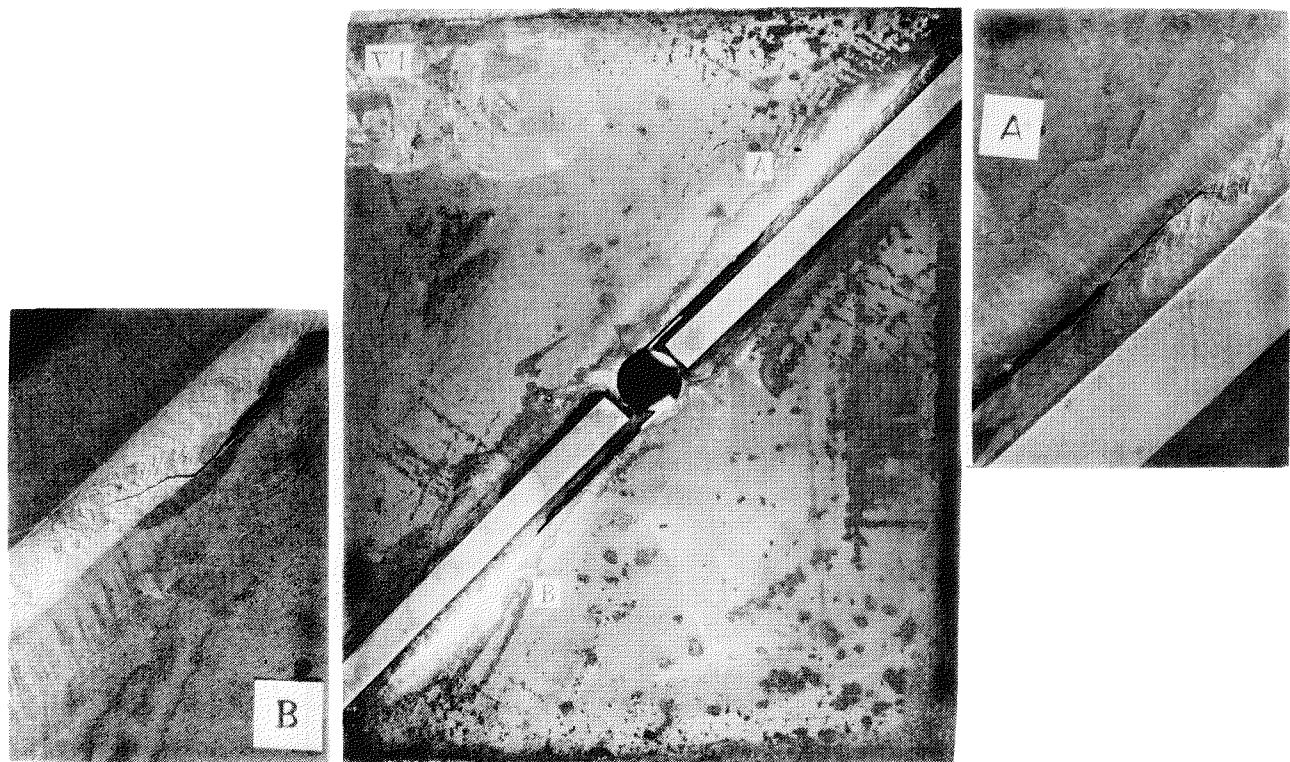


(a) 表面

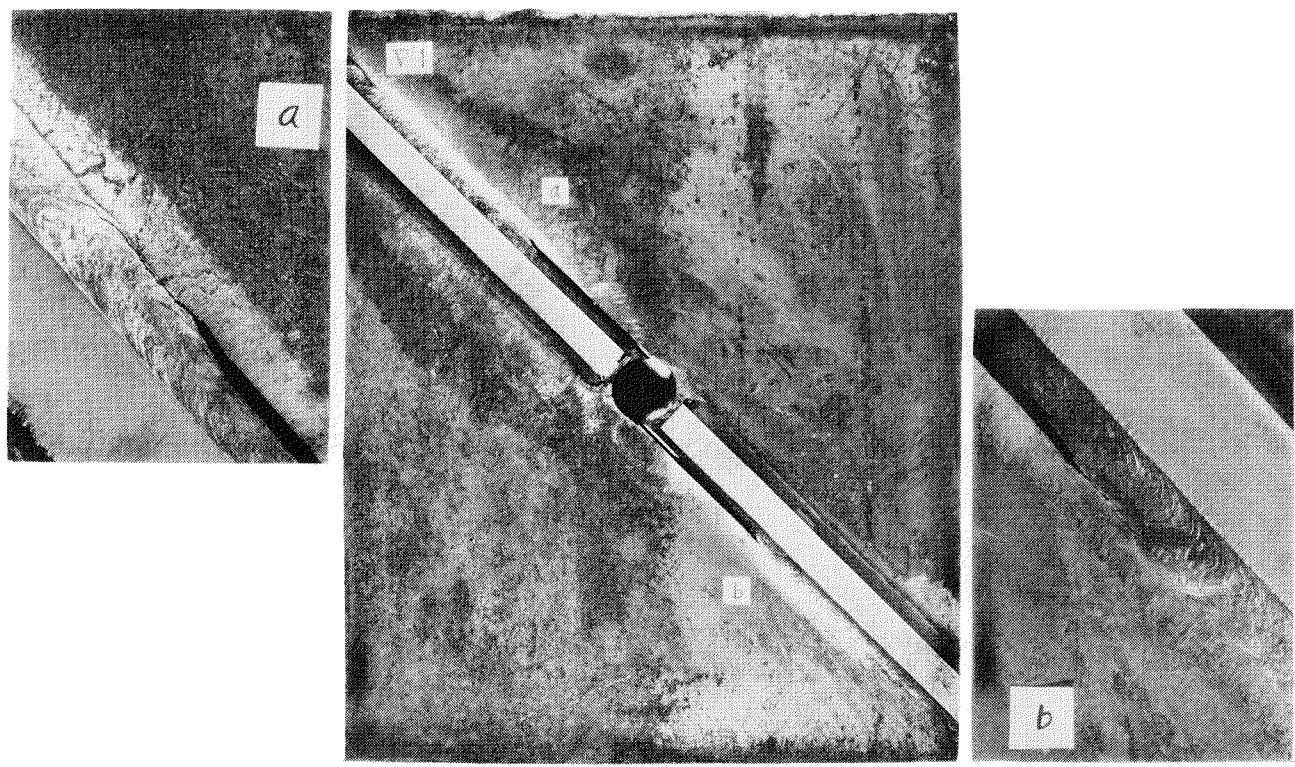


(b) 裏面

写真 1-4 試験後 (V型板2)

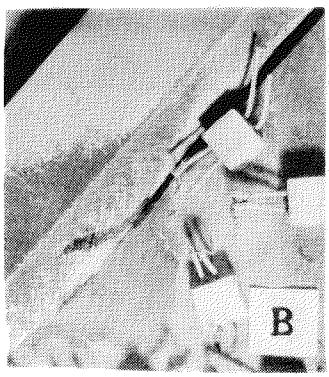
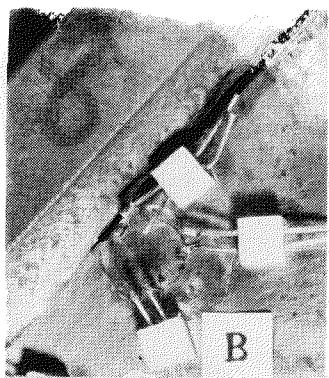


(a) 表 面

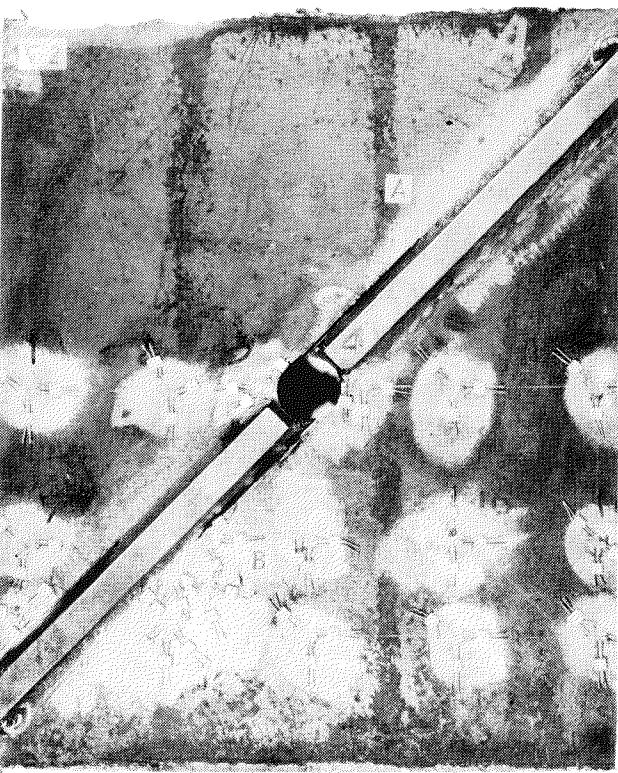


(b) 裏 面

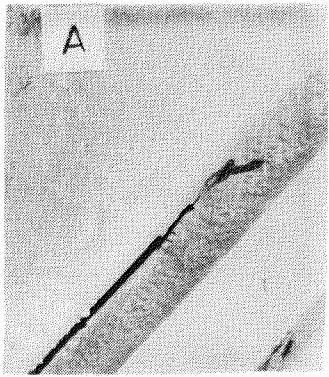
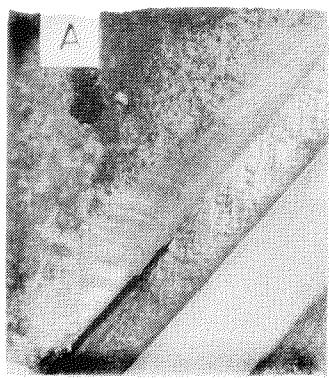
写真 15 試験後(V'型 No.1)



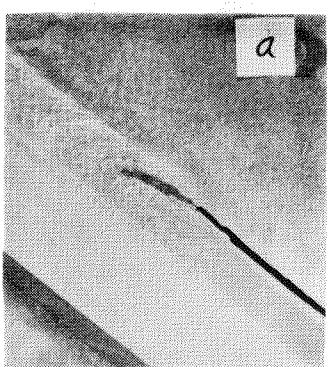
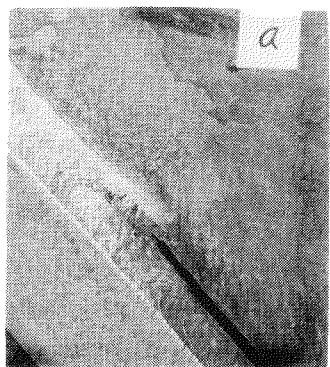
ダイチェック



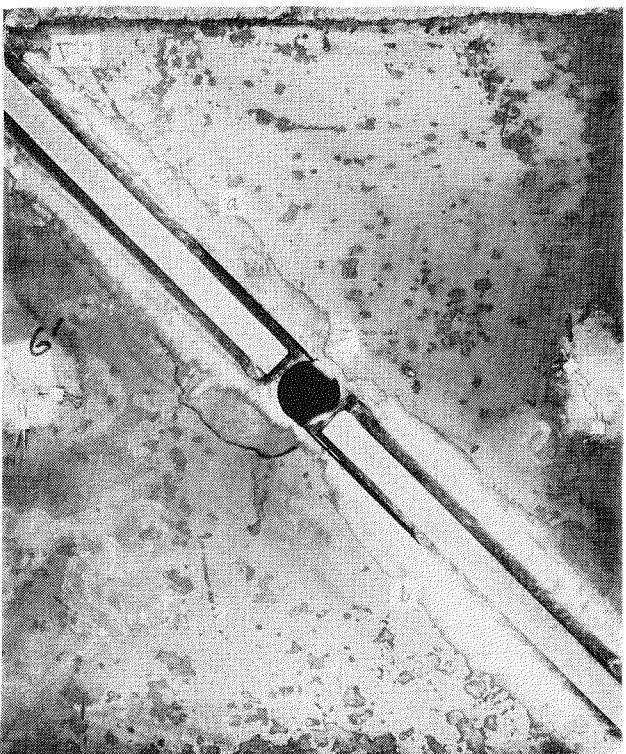
(a) 表面



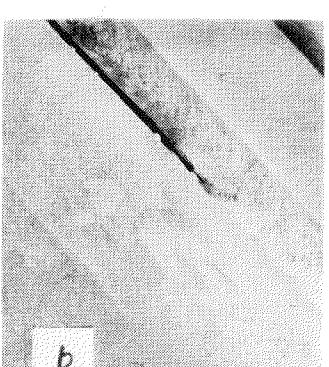
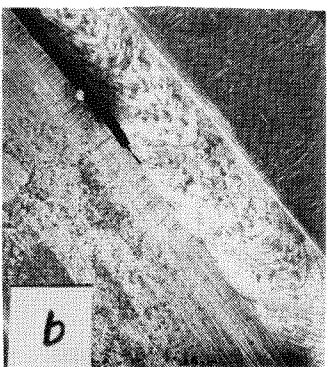
ダイチェック



ダイチェック

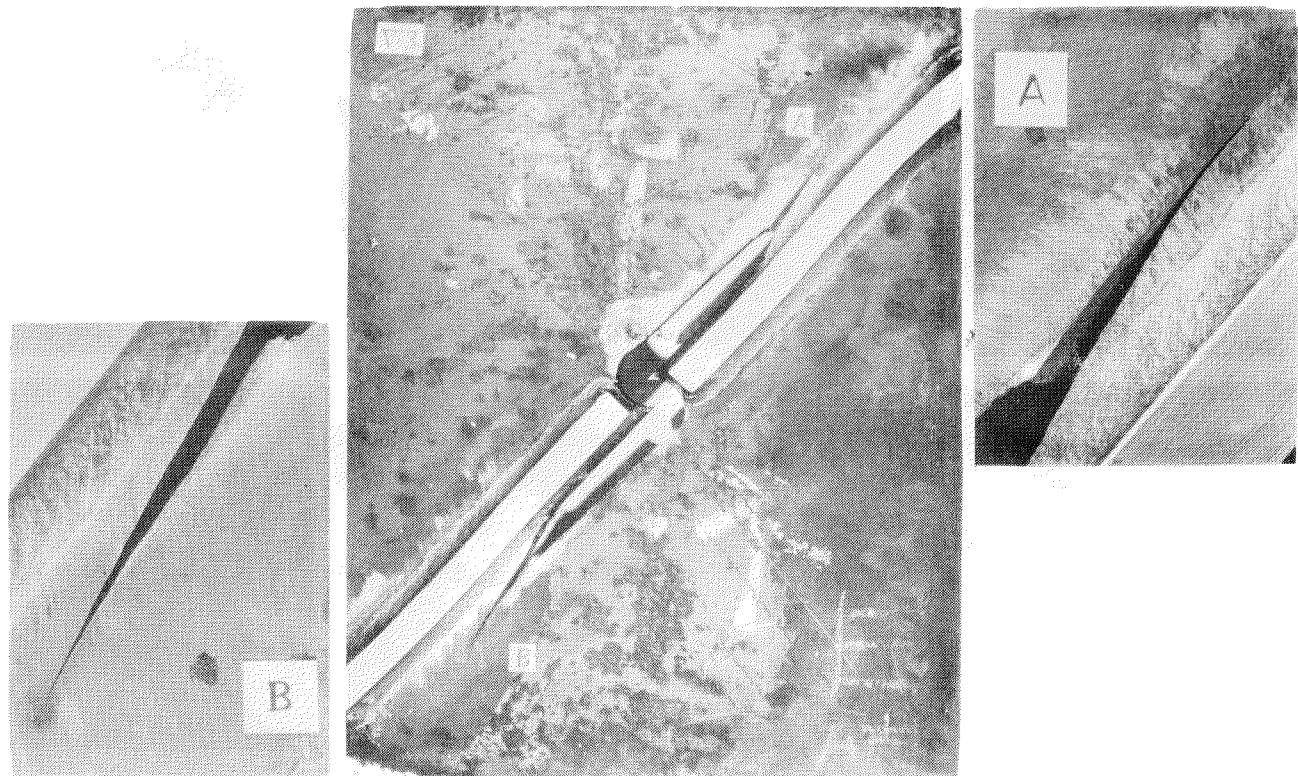


(b) 裏面

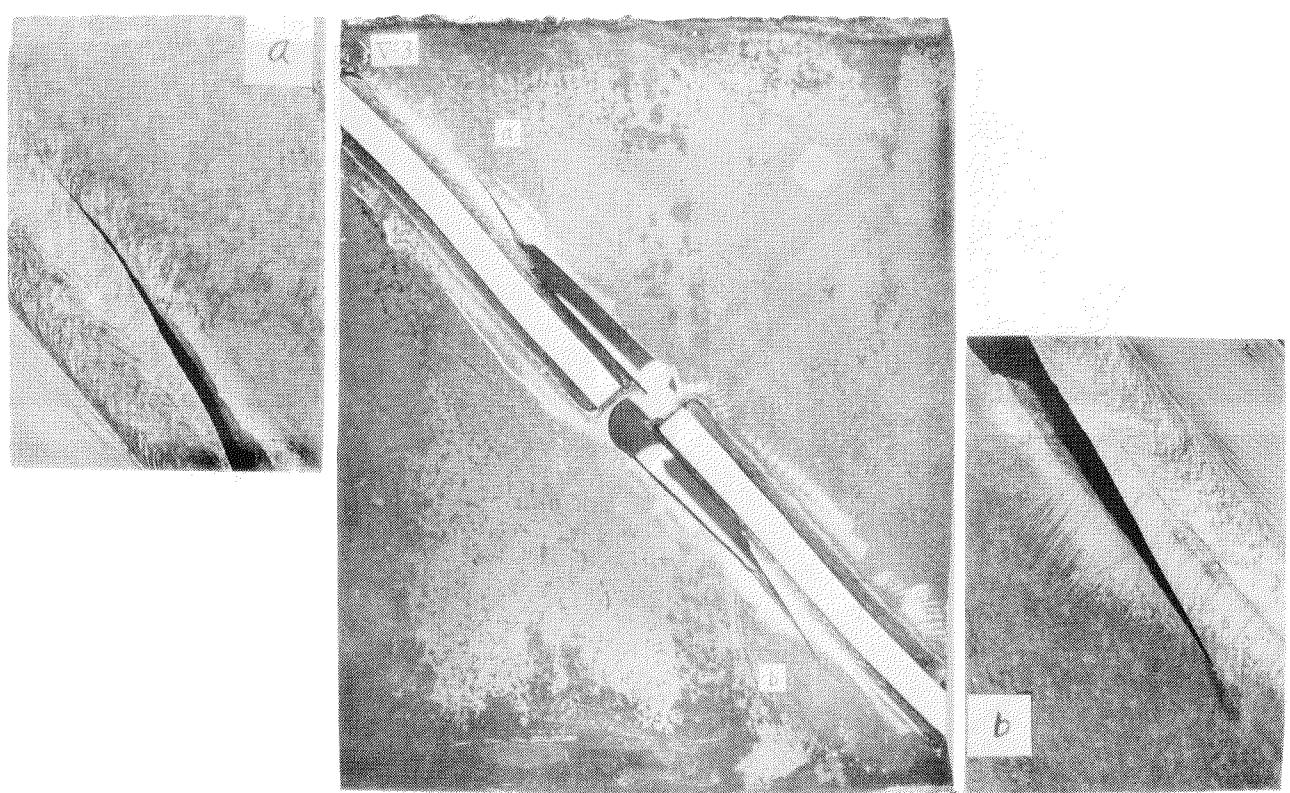


ダイチェック

写真 16 試験後 (V'型 No.2)



(a) 表面



(b) 裏面

写真 17 試験後 (V型 JIS S)

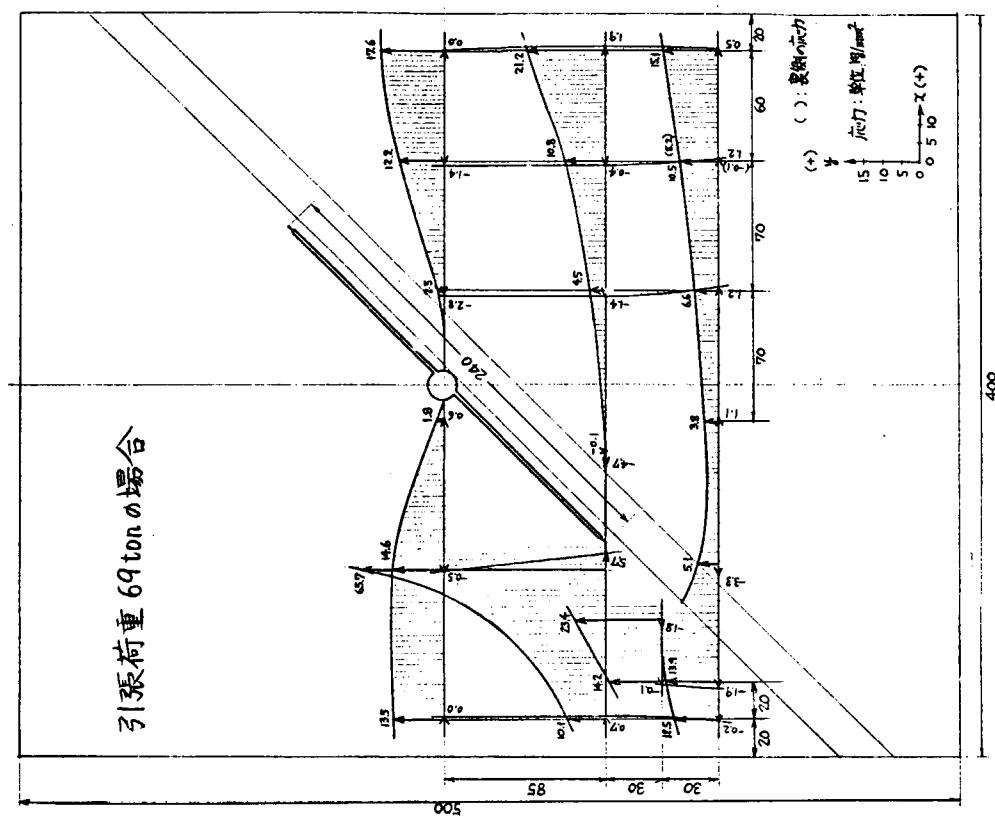


図 4-4 底効試験片 (V型#1) の x, y 方向応力分布

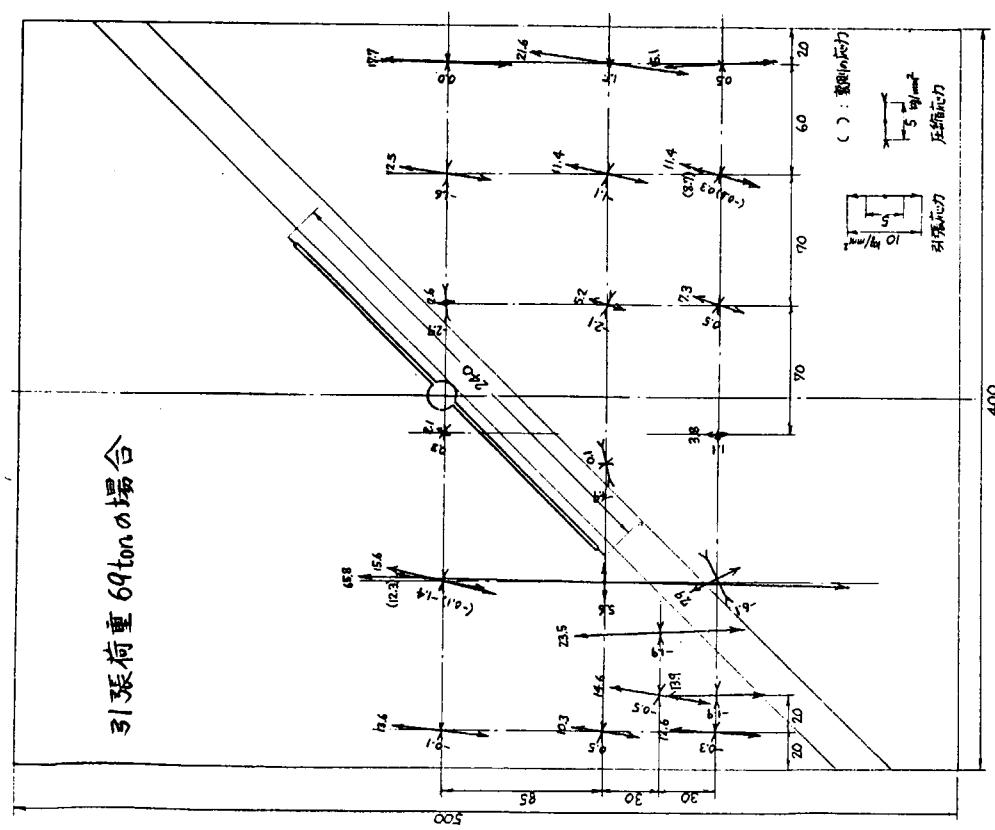


図 4-3 底効試験片 (V型#1) の主応力分布

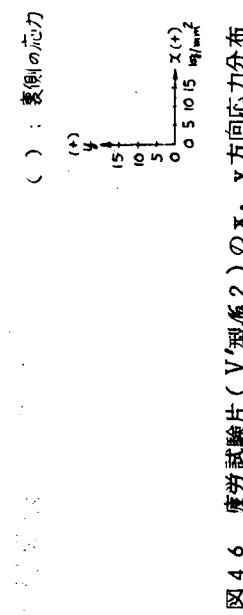
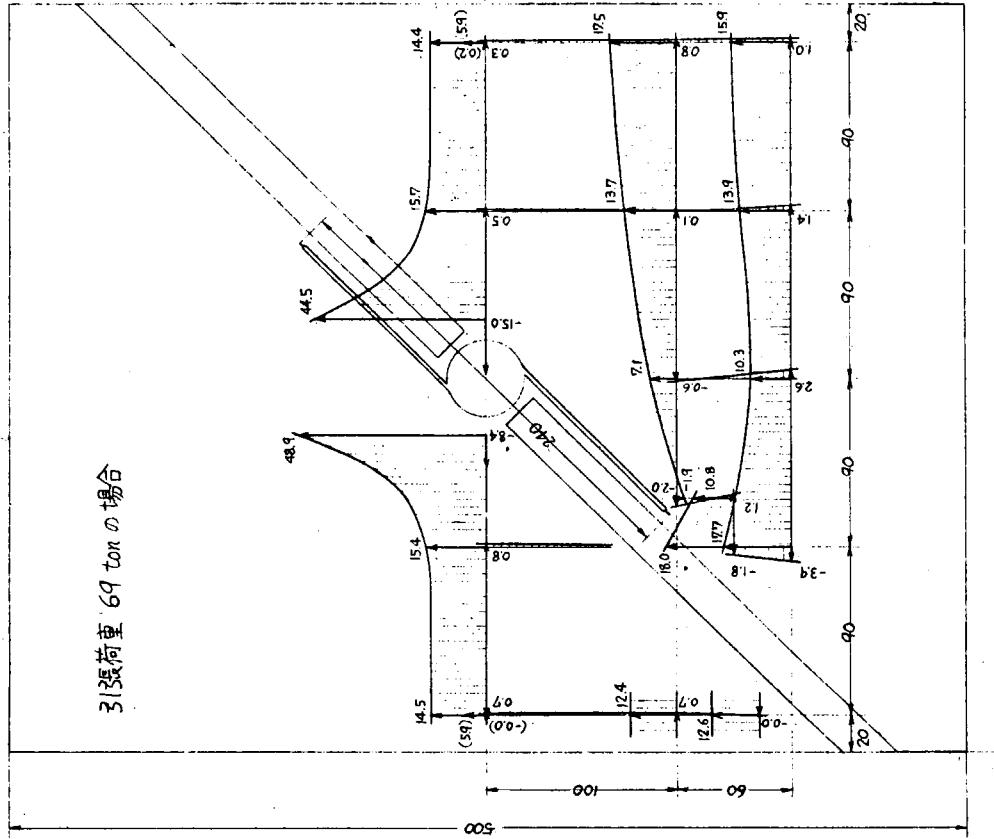


図 46 延効試験片 (V型#2) の x, y 方向応力分布

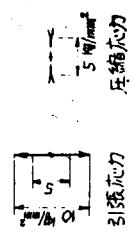
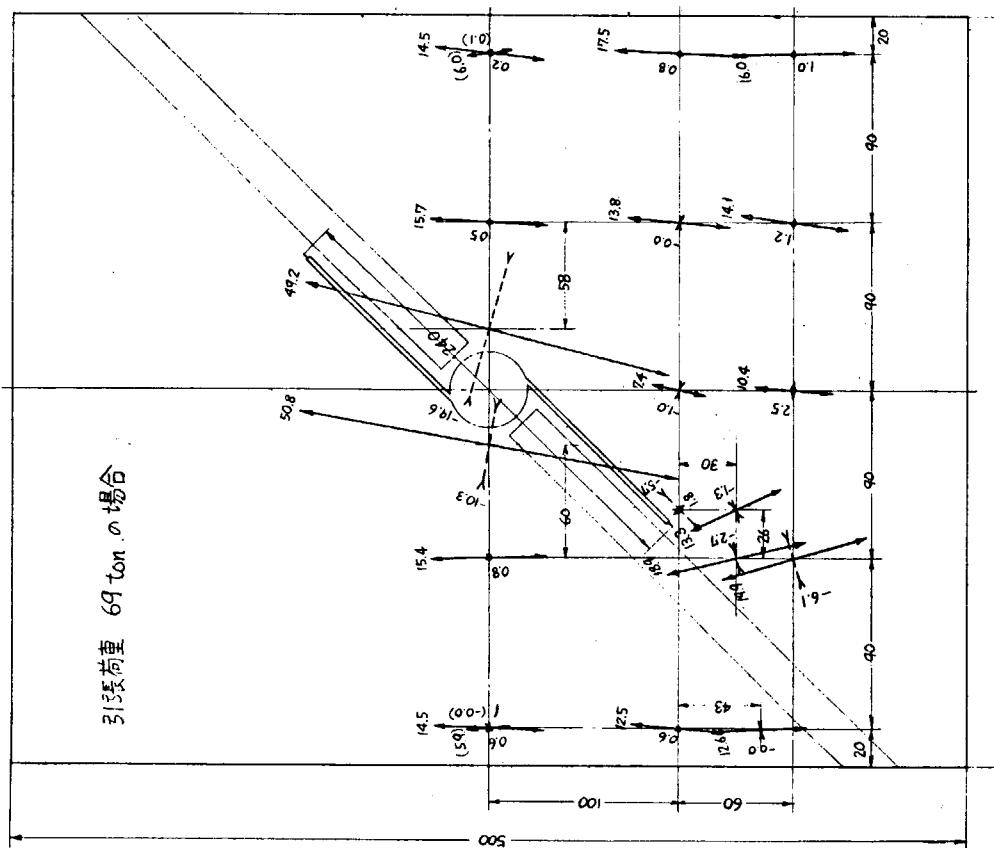


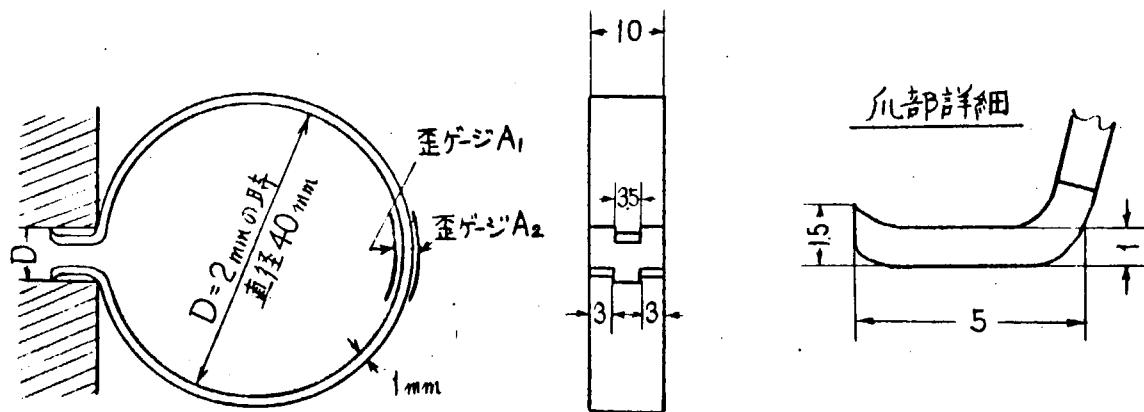
図 45 延効試験片 (V型#2) の主応力分布

クリップゲージによる開口変位の計測

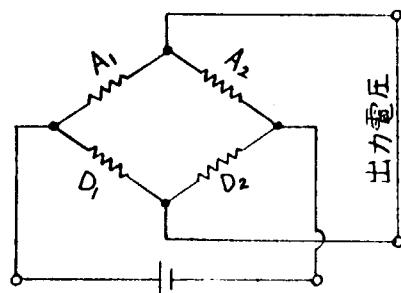
測定原理および計測方法

クリップゲージの寸法形状を付図1に示す。ゲージ材質は、低温時における弾性変化、ならびに腐蝕による消耗等を考慮して、Be-Cu製である。

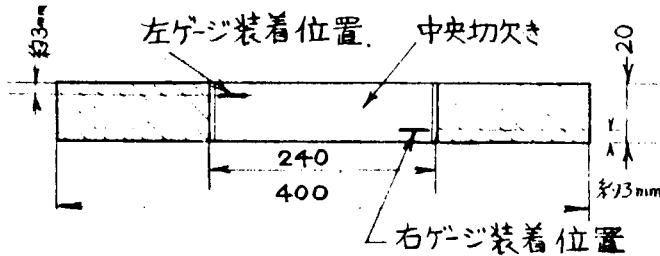
測定原理を付図2に示す。同図に示す如く、変位 ΔD と歪変化 $\Delta \epsilon$ を予め室温にて較正しておき、試験片開口部に装着して破壊時の ϵ_{max} より D_{max} を求めるものである。なお、試験への装着状況を付図3に示す。



付図1 尺 法 形 状



付図2 クリップゲージ単独使用時の等価回路



付図3 中央切欠きディープノツチ試験片への
クリップゲージ装着状況

静電容量による開口変位の計測

付図4に示す如く、金属箔電極を切欠き部に挿入し、アドバンスと対向する金属平面との距離の変化による静電容量の変化から開口変位を求める。

1. 測定方法

固定側 C_0 、および可変側 C をあらかじめ静電容量測定器にて計測しておき、微小変位計に結線する。微小変位計の等価回路は概略付図5の如くであり、 V_{R1} および V_{R2} でプリッヂバランスを取り、開口変位によるキャバシタンスの変化を動的に検出する。

2. 計算式

平行平板電極に誘電体が充填している場合

$$\begin{aligned} C &= \frac{\epsilon_0 \epsilon_s S}{D} \\ &= 0.0885 \times \frac{\epsilon_s S}{D} \quad [PF] \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (1)$$

電極板距離が変化した場合

$$C = \frac{S}{\frac{D_0}{\epsilon_0} + \frac{D}{\epsilon_0 \epsilon_s}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

開口変位

(2)式より負荷前後の電極板距離の差を求める

$$\begin{aligned} C_0 D - D_0 &= D_0 - D_0 = \left(\frac{\epsilon_0 S}{C_2} - \frac{D}{\epsilon_s} \right) - \left(\frac{\epsilon_0 S}{C_1} - \frac{D}{\epsilon_s} \right) \\ &= 0.0885 \times 1.33 \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1} \right) \quad [cm] \end{aligned}$$

ただし、 C ； 静電容量 (C_1 および C_2 は負荷前後の静電容量) $[PF]$

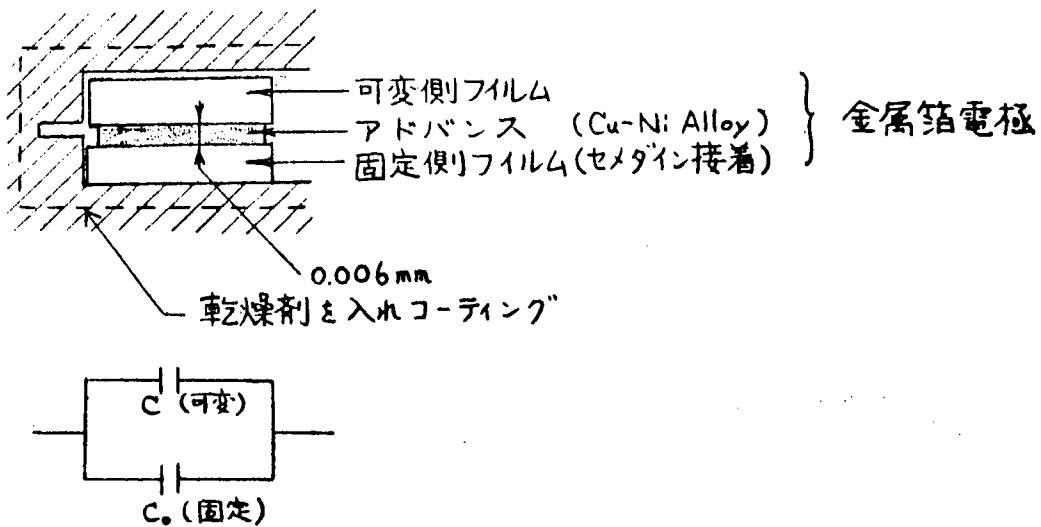
ϵ_0 ； 比誘電率

ϵ_s ； 真空の誘電率

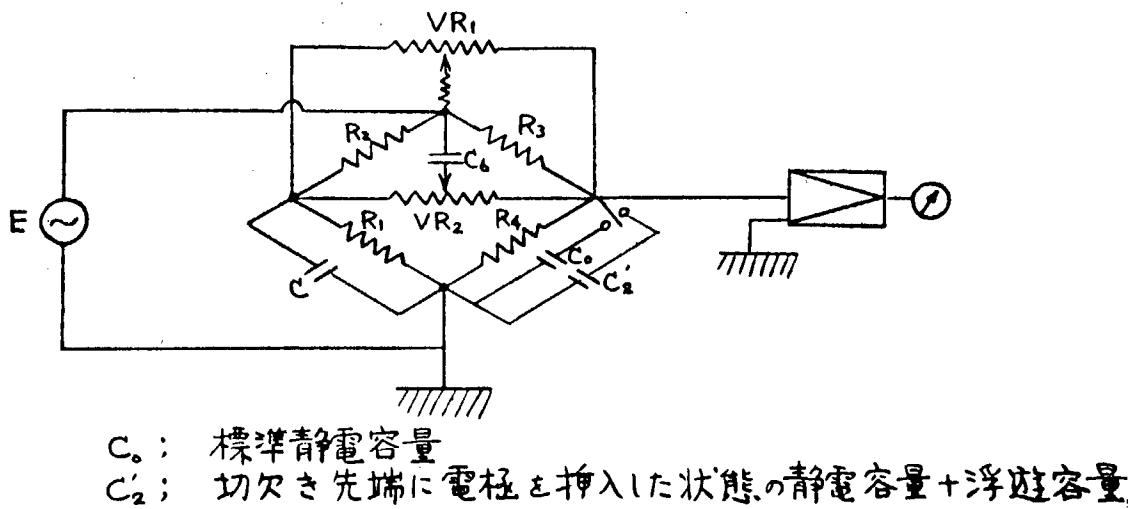
S ； 対向面積 (1.9×0.7) $[cm^2]$

D ； 板間距離 $[cm]$

D_0 ； 変位距離 (D_0 および D_2 は負荷前後の変位距離) $[cm]$



付図 4. 金 属 箔 電 極



付図 5 微小変位計を使った等価回路