

## 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47年3月

社 団 法 人

日 本 造 船 研 究 協 会

本報告書は、日本船舶振興会の昭和46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。

## 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)		
	飯田国広	(東京大学)	池田一夫	(神戸製鋼)
幹 事	黒川常夫	(長崎大学)	越賀房夫	(日本鋼管)
	町田 進	(東京大学)	矢島 浩	(三菱重工業)
委 員	青木真一	(川崎製鉄)	井上 肇	(船舶技術研究所)
	大野 章	(新日本製鉄)	小倉信和	(横浜国立大学)
	賀来信一	(日本海事協会)	梶本勝也	(三菱重工業)
	木下 勝	(三菱重工業)	桑山則男	(住友金属工業)
	酒井啓一	(石川島播磨重工業)	酒戸恒男	(住友重機)
	管 尚司	(佐世保重工業)	修行 稔	(長崎大学)
	柳原二郎	(九州大学)	土屋九一	(三井造船)
	寺井 清	(川崎重工業)	西牧 興	(日立造船)
	新田 顕	(日本海事協会)	藤井英輔	(船舶技術研究所)
	的場正明	(三菱重工業)	村松省吾	(三保造船所)
	安永信常	(大阪造船所)	渡辺次郎	(函館ドック)

## 討議参加者（敬称略五十音順）

青木 満	(神戸製鋼)	伊藤隆章	(住友重機)
飯野 暢	(石川島播磨重工業)	印藤弘郷	(三井造船)
因 克彦	(佐世保重工業)	岡村美津夫	(大阪造船所)
大塚	(日立造船)	河野誠治	(新日本製鉄)
片岡繁夫	(長崎大学)	川辺智信	(三菱重工業)
阪井大輔	(三菱重工業)	征矢勇夫	(新日本製鉄)
多田益男	(三菱重工業)	富永直継	(日立造船)
日野隆博	(三菱重工業)	新村 豊	(東京大学)
松本義文	(三菱重工業)	松村裕之	(川崎重工業)
三浦宏史	(日本海事協会)		

# 目 次

1. まえがき	1
2. 研究の目的・内容	1
3. 供試材	2
4. 脆性亀裂発生試験	3
4.1 供試モデル	3
4.2 試験結果	3
5. 疲労試験	4
5.1 供試モデル	4
5.2 試験結果	4
6. 疲労亀裂からの脆性破壊発生試験	5
6.1 供試モデル	5
6.2 試験結果	5
7. 試験結果の考察	6
7.1 疲労亀裂の成長について	6
7.2 3次元モデルにおける脆性破壊発生特性について	7
7.2.1 有限要素法による計算結果	8
7.2.2 脆性亀裂発生試験結果に対する考察	9
7.3 3次元モデルにおける疲労亀裂からの脆性破壊発生特性について	9
8. 結 論	10
9. お び	11

## 1. まえがき

日本造船研究協会第121研究部会は、「船殻の脆性破壊に及ぼす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、船殻の隅肉溶接等の溶接欠陥から隅肉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2年度分の経過報告書としてとりまとめたものである。

## 2. 研究の目的・内容

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肉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、これまで疲労亀裂との関連性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45～47年の3ヶ年計画で、簡単な3次元モデル試験片を供試して、実際の船殻構造におけると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、以下の研究を実施中である。

### (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-ノッチ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、ならびに隅肉溶接等の拘束部を有した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チ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・生長状況を求めるため、3次元モデルを供試し、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

隅肉溶接等の拘束部を有した3次元モデルにおける、隅肉溶接にそっての疲労亀裂、あるいは拘束部に発生した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、船殻の隅肉溶接等拘束部の溶接欠陥から隅肉溶接部にそって発生するような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46年度は、昭和45年度に実施した予備的試験<sup>3)</sup>と同一チャージの供試鋼、すなわち、現在船殻に多量に使用されている一般船体用軟鋼板 A級鋼 (KAS, 板厚 20mm) を供試し、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を実施した。

## 3. 供試材

供試材は、45年度に実施した予備的試験と同一チャージの供試材、すなわち、現在船殻に多量に使用されている一般船体用軟鋼板、KAS鋼 (板厚 20mm) を使用した。供試材の化学成分および機械的性質を表1に示す。

供試材の基本的な機械的性質を把握するため、45年度と同様に、板厚中央部圧延方向より採取した6mm<sup>φ</sup>丸棒試験片を供試して室温～-196℃にて引張試験を実施した。試験結果を図1に示す。さらに、基本的な靱性を求めるため、45年度と同様に、板厚中央部圧延方向より採取した試験片による標準V-ノッチシャルピー衝撃試験を実施した。試験結果を図2に示す。図2より、各遷移温度は下記のごとくであることが確認された。

$v_{Tr15}$	$v_{Tr35}$	$v_{TrE}$	$v_{Tr8}$
-14°C	0°C	8°C	8°C

以上の結果から、45年度供試材と46年度供試材とでは、引張試験結果の各種機械的性質およびシャルピー衝撃試験結果の靱性に、ほとんど差がないことが確認された。

#### 4. 脆性亀裂発生試験

上述のごとく、供試材の各種機械的性質が、45年度供試材とほとんど同一であったので、供試材の脆性亀裂発生特性も同一であるとみなされる。したがって今年度は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の把握のみを目的に、モデル脆性亀裂発生試験を実施した。

##### 4.1 供試モデル

荷重垂直方向にStiffenerを有し、その隅肉溶接Toe部に全長240mmの中央切欠きを有した、幅400mmのモデル2種類(A型、F型)と、幅1250mmのモデル1種類(RA型)を供試した。

A型モデルは、Stiffenerの高さを200mmとし、F型モデルは10mmとした。またRA型モデルはStiffenerの高さを615mmとした。各モデルの形状ならびにStiffenerの隅肉溶接条件を、～に示す。

A型とF型とにより、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及ぼすStiffener高さの影響を把握するのが目的である。さらにRA型を加えることにより、寸法の影響を把握するのが目的である。

##### 4.2 試験結果

A型、F型およびRA型モデルによる脆性亀裂発生試験結果を、に一覧する。に示した脆性亀裂発生に関するFracture ToughnessのParameter  $K_{ci}$ 値は、Stiffenerの影響、すなわちStiffenerによる板厚方向の拘束の影響を考慮せずに求めた値である。

また、A型、F型、RA型各モデルについて、脆性亀裂発生応力(破壊応力  $\sigma_{net}$ )と温度との関係をに、 $K_{ci}$ 値と温度との関係をに示す。さらに、C.O.D.値(平均値)と温度との関係をに示す。C.O.D.値は、静電容量による計測法を用いて測定したものである。

さらに、各モデルの破断状況を写真1～写真11に示す。

図6に示したごとく、A型、F型、RA型いずれのモデルにおいても、 $-100^{\circ}\text{C}$ 程度で脆性亀裂発生応力が極小値を示している。その理由については種々のことが考えられるが定かではない。したがって、原因追究に関しては今後の問題としてとりあげるべきであろう。

図7の  $K_{ci}$  値と温度との関係線図は平均値を示したものである。A型に比べてF型の脆性破壊発生特性が若干良くなっているのは、一見、Stiffenerが低いために拘束が小さくなったためと考えられるが、本件に関しては後述することにする。さらにA型に比べてRA型の脆性破壊発生特性が若干良くなっているのは、試験片幅に対する切欠き長さの比がかなり異なるためと考えられるが、本件に関しても後述することにする。

さらに、図8に示したごとく、A型、RA型のC.O.D.値とF型のC.O.D.値とでは、温度との相関性に若干の差があることを認めざるをえないようである。

## 5. 疲労試験

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・成長状況を把握するのが目的である。

45年度に、荷重方向と45度方向にStiffenerを有したモデルについて、室温・荷重一定条件・片振り引張疲労試験を実施して、疲労亀裂発生・成長状況を把握した。したがって今年度は、荷重垂直方向にStiffenerを有したモデルについて、室温・荷重一定条件・片振り引張疲労試験を実施した。

### 5.1 供試モデル

前項の脆性亀裂発生試験に供試したA型モデルとはほぼ同形のA'型モデル、すなわち、幅400mmで荷重垂直方向に高さ200mmのStiffenerを有し、その隅肉溶接Toe部に全長200mmの中央切欠きを有したモデルを供試した。

供試モデルの形状ならびにStiffenerの隅肉溶接条件を図9に示す。

### 5.2 試験結果

高応力条件の試験には、200 ton アムスラー型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、低応力条件の試験には、240 ton 油圧疲労試験機を使用した。200 ton アムスラー型万能試験機での疲労試験実施状況を写真12に示す。

疲労試験結果を表3、図10～図12に、また、各モデルの試験後の疲労亀裂の状況を写真13、写真14および図13に示す。

図10は、疲労亀裂成長状況すなわち、繰返し回数と疲労亀裂の成長との関係

を各モデルについて計測した結果を示したものである。

図11は繰返し応力振幅で示したS-N曲線であり、図12は繰返し最大応力で示したS-N曲線を示したものである。

さらに疲労試験に先がけ、A型モデルについて、抵抗線歪ゲージを使って応力分布状態を計測した。

計測結果を図14および図15に示す。図14は主応力分布状態を示したものであり、図15は荷重平行方向および直角方向応力の分布状態を示したものである。

## 6. 疲労亀裂からの脆性破壊発生試験

隅肉溶接等の拘束部を有した3次元モデルにおける、隅肉溶接にそっての疲労亀裂あるいは拘束部に発生した疲労亀裂からの脆性亀裂発生特性を把握するのが目的である。

今年度は、荷重垂直方向にStiffenerを有したモデルについて、隅肉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した。

### 6.1 供試モデル

前に記した脆性亀裂発生試験あるいは疲労試験に供試した、A型モデル、A'型モデルとほぼ同形のA''型モデルを供試した。すなわち、幅400mmで荷重垂直方向に高さ200mmのStiffenerを有し、その隅肉溶接Toe部に全長220mmの中央切欠きを有したモデルを供試した。

供試モデルの形状ならびにStiffenerの隅肉溶接条件を図16に示す。

### 6.2 試験結果

A'型モデルを供試し、室温・荷重一定条件で片振り引張疲労により、中央切欠き先端に約10mm（片側）の疲労亀裂を発生させ、すなわち、疲労亀裂も含め全長240mmの中央切欠きにして、脆性破壊発生試験を実施した。

疲労亀裂発生条件としては、グロス応力で応力振幅 $13 \text{ kg/mm}^2$ のLow Cycle条件および $5 \text{ kg/mm}^2$ のHigh Cycle条件とした。応力振幅 $13 \text{ kg/mm}^2$ の疲労亀裂発生試験には、低サイクル繰返し油圧発生装置付200 tonアムスラー型万能試験機を使用し、応力振幅 $5 \text{ kg/mm}^2$ の疲労亀裂発生試験には、240 ton油圧疲労試験機を使用した。

疲労亀裂発生条件ならびに脆性破壊発生試験結果を表4に一覧する。また脆性破壊発生試験結果、すなわち、疲労亀裂からの脆性破壊発生試験結果を図17および図18に示す。さらに、疲労亀裂からの脆性破壊発生試験において計測したC.O.D値（平均値）と温度との関係を図19に示す。疲労亀裂をLow Cycle

条件で発生させたモデルについては、C.O.D.値は静電容量による計測法を用いて測定したものであり、疲労亀裂をHigh Cycle条件で発生させたモデルについては、クリップゲージを用いて測定したものである。

さらに、各モデルの破断状況を写真15～写真22に、また疲労亀裂をHigh Cycle条件で発生させたモデルについてのみ、疲労亀裂および脆性亀裂伝播状況を図20に示す。

表4および図18に示した脆性亀裂発生に関するFracture ToughnessのParameter  $K_{ci}$  値は、Stiffenerの影響、すなわちStiffenerによる板厚方向の拘束の影響を考慮せずに求めた値である。

図18に示した $K_{ci}$  値と温度との関係線図は平均値を示したものであり、疲労亀裂からの脆性破壊発生特性は、疲労亀裂をHigh Cycle条件で発生させたモデルに比べ、疲労亀裂をLow Cycle条件で発生させたモデルの方が若干良くなっているようである。

## 7. 試験結果の考察

以上に述べたごとく、昭和46年度は、

- ① 荷重垂直方向にStiffenerを有し、その隅肉溶接Toe部に存在する切欠きからの脆性亀裂発生特性の把握
- ② 荷重垂直方向にStiffenerを有したモデルの、Stiffener隅肉溶接Toe部にそっての疲労亀裂発生・生長状況の把握
- ③ 荷重垂直方向にStiffenerを有したモデルのStiffener隅肉溶接Toe部にそっての疲労亀裂からの脆性亀裂発生特性の把握

等を重点的に実施した。

以上の試験結果について検討した

- ① 疲労亀裂の成長
- ② 3次元モデルにおける脆性破壊発生特性
- ③ 3次元モデルにおける疲労亀裂からの脆性破壊発生特性

等についての若干の考察を以下に述べる。

### 7.1 疲労亀裂の成長について

疲労亀裂の成長については、これまでに多くの材料について実施された膨大な研究結果がある<sup>4)</sup>。しかし、そのほとんどは平板試験片によるものであり、本研究で供試したような、Stiffener隅肉溶接Toe部、すなわち拘束の強い部材に発生・生長した疲労亀裂を対象としたものではない。したがって、先に述べたごとく、荷重垂直方向にStiffenerを有したモデルのStiffener隅肉溶接Toe部に

そっての疲労亀裂の成長について定量的な検討が出来るように整理しておくことは意義あることである。

先に記した、疲労試験および疲労亀裂からの脆性破壊発生試験に供試した各モデルについて、疲労亀裂の成長状況を、疲労亀裂先端の応力振幅に対応する Stress Intensity Factor  $\Delta K$  と、疲労亀裂成長速度  $\frac{da}{dN}$  とで整理すると図21のごとくなる。

一般に、 $\Delta K \sim \frac{da}{dN}$  との関係は、

$$\frac{da}{dN} = C_0 \cdot \Delta K^m \text{-----} (7.1)$$

ただし、 $C_0, m$  = 材料定数  
で表示されることが判明している。図21に示したごとく、実験式は概略下記のごとくなるものとみなされる。

$$\frac{da}{dN} = 1.64 \times 10^{-11} \times \Delta K^{3.2} \text{-----} (7.2)$$

すなわち、荷重垂直方向に Stiffener を有し、その Stiffener 隅肉溶接 Toe 部にそっての疲労亀裂の成長に関し、室温・荷重一定条件・片振り引張疲労の場合、(7.2)式が確認されたわけである。

ただし、各モデルについての、疲労亀裂先端の応力振幅に対応する Stress Intensity Factor  $\Delta K$  の計算には、Stiffener の影響、すなわち Stiffener による板厚方向の拘束の影響は考慮していない。

次に、(7.2)式を使用して、荷重垂直方向に Stiffener を有した無限板の、Stiffener 隅肉溶接にそっての板厚貫通型疲労亀裂の成長について推定してみよう。すなわち、初期亀裂 80mm から、想定亀裂長さ 140mm, 200mm, 400mm, 1000mm, 2000mm まで成長する寿命を求め、繰返し応力と繰返し回数との関係として表示すると図22のごとくなる。

すなわち、(7.2)式により、本研究に供試した鋼板 (KAS 鋼) と同等程度の材料により建造されている溶接構造物における Stiffener 隅肉溶接にそっての疲労亀裂の成長について、定量的な推定が可能になったわけである。

## 7.2 3次元モデルにおける脆性破壊発生特性について

先に記したごとく、今年度供試した、A型、F型、RA型、A\*型のいずれのモデルに対しても、脆性亀裂発生に関する Fracture Toughness の Parameter  $K_{ci}$  値の計算には、Stiffener の影響、すなわち、Stiffener による板厚方向の拘束の影響は考慮していない。すなわち、平板に対する Stress Intensity Factor (K 値) の計算式をそのまま利用した。

そこで、Stiffener による影響がどの程度のものであるか定量的に検討するた

め、先に述べた脆性亀裂発生試験結果のうち、特にA型およびRA型モデルについて、有限要素法による計算結果と比較・検討を試みることにする。

### 7.2.1 有限要素法による計算結果

A型およびRA型モデルの負荷状態における外力を、計算の便宜上図23のように一端を固定、他端を一様応力 $\sigma$ としたが、後述する応力分布からも、このような外力条件にしたことによる実際との差異は、ほとんどないと思われる。

A型およびRA型モデルの主板、ならびにStiffener板に対する要素の分割を、それぞれ図24、図25に示す。Stiffener板と主板との隅肉溶接に対する考慮としては、溶接したことによる熱影響は考えずに、幾何学的効果すなわち隅肉溶接によって、その部分における主板の板厚が増したと同じ効果をもたせた。また主板およびStiffener板をそれぞれ平面応力状態として独自に計算し、それらにおける連続条件として、横方向の変位 $u$ を計算の繰返しにより合せた。従って、実際の脆性破壊発生時の主板において生じているであろう、Stiffener板および隅肉溶接部分による板厚方向の拘束は計算の過程には入って来ていない。

さて、計算結果の一例として、A型およびRA型モデルの主板における応力分布を図26に示す。図26において切欠き先端付近の切欠きに直角方向の応力、すなわち $\sigma_y$ の分布から、A型およびRA型モデルに対する切欠き先端のStress Intensity Factor (K値)を求めると次のようになる。

$$\frac{K_A}{\sigma\sqrt{\pi c} f(\phi)} = F_A \text{ ----- (7.3)}$$

$$\frac{K_{RA}}{\sigma\sqrt{\pi c} f(\phi)} = F_{RA} \text{ ----- (7.4)}$$

ただし、 $K_A$  = A型モデルに対するK値

$K_{RA}$  = RA型モデルに対するK値

$F_A$  = A型モデルのStiffener板による補正係数

$F_{RA}$  = RA型モデルのStiffener板による補正係数

とおくと、

$$F_A = 1.23 \text{ ----- (7.5)}$$

$$F_{RA} = 1.03 \text{ ----- (7.6)}$$

となる。

すなわち、A型およびRA型モデルにおいて、同一試験片寸法でStiffener板なしの場合に比べて、Stiffener板がある場合の破壊荷重は、それぞれ約19%および約3%減少することがわかる。

また、A型とRA型のK値計算結果を比較すると、切欠き長さの板幅に対する比が大きいA型モデルの方が、Stiffener板によって横方向の変位 $u$ が拘束さ

れるため、上記のような補正係数の差となって現われたものと考えられる。

### 7.2.2 脆性亀裂発生試験結果に対する考察

A型およびRA型モデルについての有限要素法によるK値計算式である(7.3)式および(7.4)式を用いて、図7に示した脆性亀裂発生試験結果を補正すると図27のごとくなる。すなわち、A型モデルについては補正前後の値を矢印にて示した。また図27には、45年度に実施した供試鋼素材の中央切欠き型デューブノッチ試験の結果も合せて示した。

図27より、明らかなごとく、素材、F型およびRA型の脆性破壊発生特性に比べA型が若干低いものの、ほとんど有意差は認められないようである。しかしながら、A型が若干低いのは、有限要素法による計算では考慮に入れられなかった、板厚方向の拘束等が、RA型に比べ大きかったものと思われる。

### 7.3 3次元モデルにおける疲労亀裂からの脆性破壊発生特性について

先に、脆性亀裂発生試験の項で述べたA型モデルの脆性破壊発生特性と、疲労亀裂からの脆性破壊発生試験の項で述べたA'型モデルの脆性破壊発生特性とを比較検討することにより、荷重垂直方向にStiffenerを有したモデルのStiffener隅肉溶接Toe部に存在する切削切欠きおよび疲労亀裂からの脆性破壊発生特性の差について把握してみよう。

A型およびA'型モデルの脆性破壊発生試験結果、ならびに45年度に実施した供試鋼素材の中央切欠き型デューブノッチ試験結果を、図28、図29に示す。また、それらの試験において計測したC.O.D.値(平均値)と温度との関係を図30に示す。図29に示した、A型、A'型モデルについての $K_{ci}$ 値は、先に述べた、有限要素法によるK値計算式である(7.3)式を用いて補正したものである。

図29より、A'型モデル、すなわち、疲労亀裂からの脆性破壊発生特性が、見掛け上、切削切欠きからの脆性破壊発生特性より優れているといえる。しかも、疲労亀裂発生条件の応力振幅が比較的大きいLow Cycle条件で発生させた疲労亀裂からの脆性破壊発生特性の方が、応力振幅が小さいHigh Cycle条件で発生させた場合より若干優れているといえる。

この理由として考えられることは、疲労亀裂先端付近の圧縮残留応力による、見掛け上の破壊強度の上昇であろう。

次に、疲労亀裂からの脆性破壊発生試験において、疲労亀裂発生最終過程での疲労亀裂先端のK値、すなわち疲労蓄積最終時のK値( $20K_F$ )と、その疲労亀裂からの脆性破壊発生試験における $-100^{\circ}\text{C}$ での $K_{ci}$ 値( $-100K_{ci}$ )との相関関係について検討してみよう。

先に述べたA'型モデルでの脆性破壊発生試験結果の他に、ほぼ同程度の供試材(板厚20mmの一般船体用軟鋼板、LDS鋼)について類似の条件で行なった、

平板試験片での疲労亀裂からの脆性破壊発生試験結果<sup>1)</sup>を図31に合せ示す。さらに、図31に示した各グループの供試試験片について、疲労亀裂発生条件から20KFを求め、図31から-100Kciを求めて、それらの相関関係を図示すると、図32のごとくなる。

図32より、平板試験片に比べ、A型モデルの方が、疲労亀裂からの脆性破壊発生特性に対して、疲労蓄積条件すなわち疲労亀裂発生条件の影響を受け難いことが明らかである。

## 8. 結論

昭和46年度に実施した、荷重垂直方向にStiffenerを有した3次元モデルに対しての脆性亀裂発生試験、疲労試験、疲労亀裂からの脆性破壊発生試験により、以下の結論が得られた。

- 1) 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寸法効果およびStiffener高さの影響等が定量的に把握できた。
- 2) Stiffener隅肉溶接Toe部にそっての疲労亀裂の成長状況について定量的に把握できた。また、その実験式を利用して、溶接構造物におけるStiffener隅肉溶接にそっての疲労亀裂の成長について定量的な推定が可能になった。
- 3) 有限要素法による計算により、Stiffener隅肉溶接Toe部にそっての切欠き先端のStress Intensity Factor (K値)に及ぼすStiffenerの影響が定量的に把握できた。
- 4) 平板に比べStiffener隅肉溶接Toe部のような拘束部材の方が疲労亀裂からの脆性破壊発生特性に対して、疲労亀裂発生条件の影響を受け難いことが明らかになった。

## 参考文献

- 1) 吉識雅夫, 金沢 武, 町田 進, 矢島 浩, 他, “鋼材の脆性破壊発生特性におよぼす疲労の影響”, 造船協会論文集第121号, 昭42.
- 2) 金沢 武, 町田 進, 矢島 浩, 青木 満, 他, “鋼材の脆性破壊発生特性におよぼす疲労の影響(第2報)”, 日本造船学会論文集第126号, 昭44.

- 3) 日本造船研究協会, “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(第121研究部会)”, 日本造船研究協会研究資料 No.137, 昭46.
- 4) ASTM, “Fatigue Crack Propagation”, ASTM Special Technical Publication No. 415, 1967

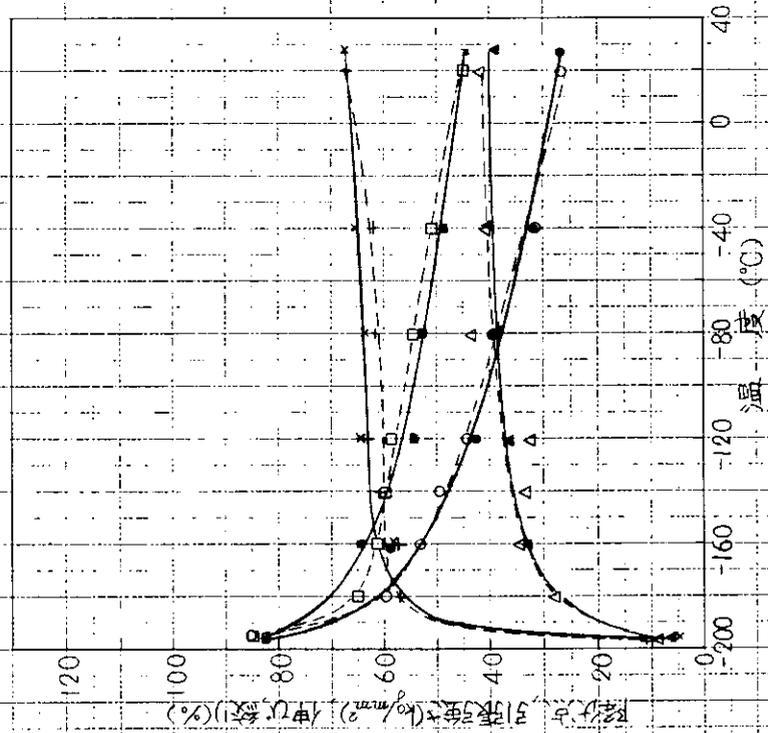
## 9. むすび

上述のように, 昭和46年度の研究では, 荷重垂直方向に Stiffener を有した3次元モデルにおける Stiffener 隅肉溶接 Toe 部について重点的に実施し, 脆性亀裂発生特性, 疲労亀裂の成長状況, 疲労亀裂からの脆性亀裂発生特性等, 船殻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, 確定的な結論については, 引き続き実施予定の昭和47年度研究結果を総合的に解析した上で求めることにしたい。

表1. 供試材の化学成分ならびに機械的性質

鋼種	熱処理	板厚 (mm)	化学成分						機械的性質		
			C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Mn/C	降伏点 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
KAS	As Rolled	20	0.15	0.21	0.52	0.010	0.020	3.4	28	45	28

45年度 供試材	46年度 供試材	降伏点
○	●	引張強さ
□	■	伸び
△	▲	絞り



丸棒引張試験結果(6mmφ)  
(KAS鋼, 板厚20mm, 板厚中央部, 圧延方向)

45年度供試材	46年度供試材	吸収エネルギー
●	○	脆性破面率
▲	△	

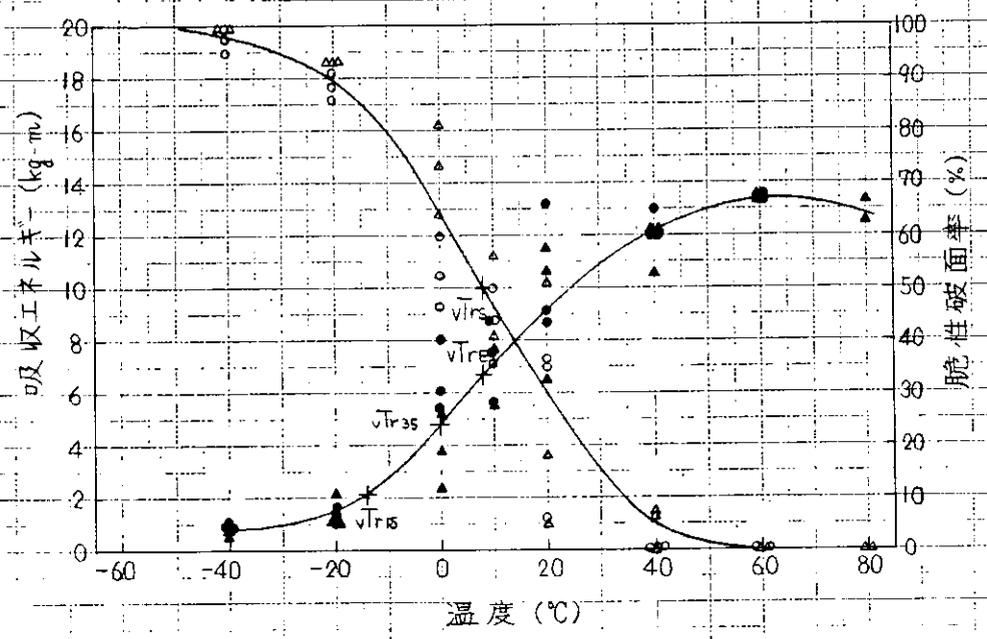
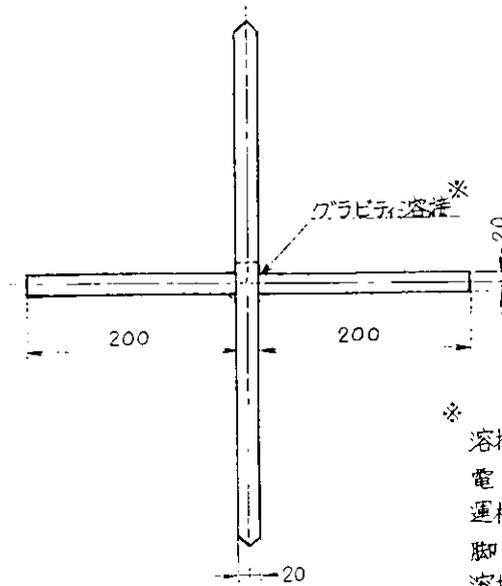
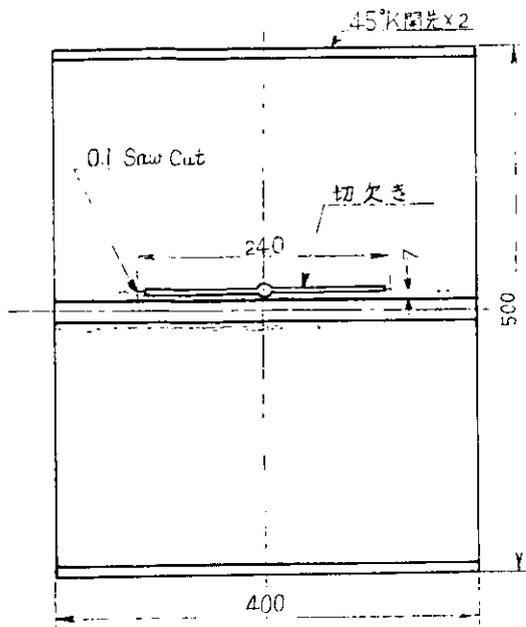


図2. 標準V-ノッチシャルピ-衝撃試験結果  
(KAS鋼, 板厚20mm, 板厚中央部, 圧延方向, 板厚方向ノッチ)



※  
 溶接棒: オトコン 27. 6 $\phi$   
 電 流: 260~270 Amp.  
 運棒比: 1.8  
 脚 長: 7mm  
 溶接順序

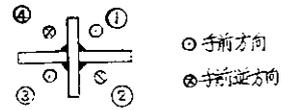
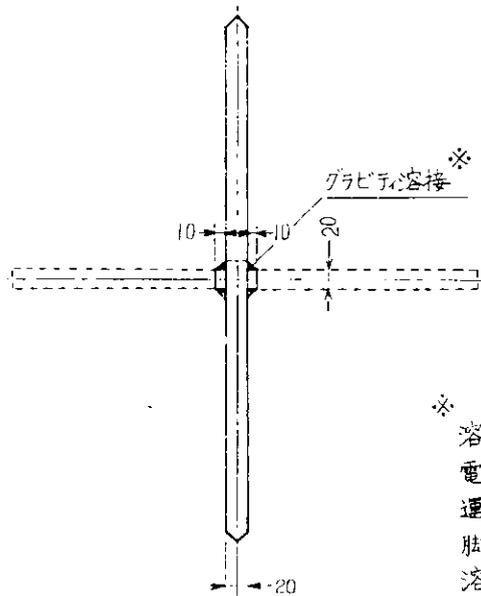
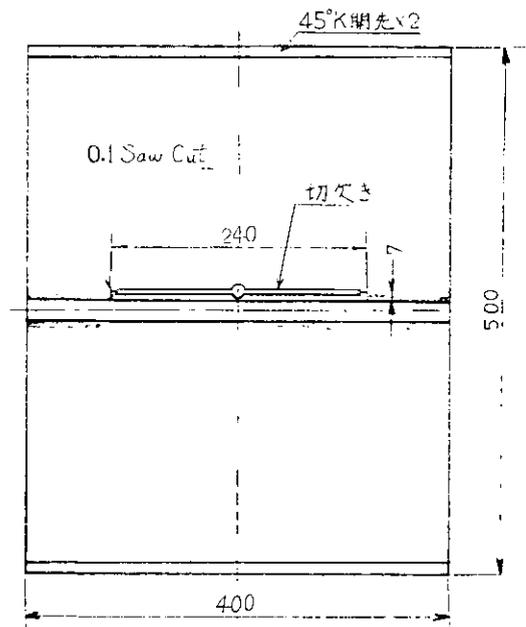


図 3. 脆性亀裂発生試験供試モデル形状 (A型)



※  
 溶接棒: オトコン 27. 6 $\phi$   
 電 流: 260~270 Amp.  
 運棒比: 1.8  
 脚 長: 7mm  
 溶接順序

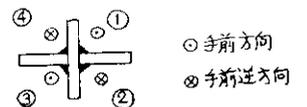


図 4. 脆性亀裂発生試験供試モデル形状 (F型)

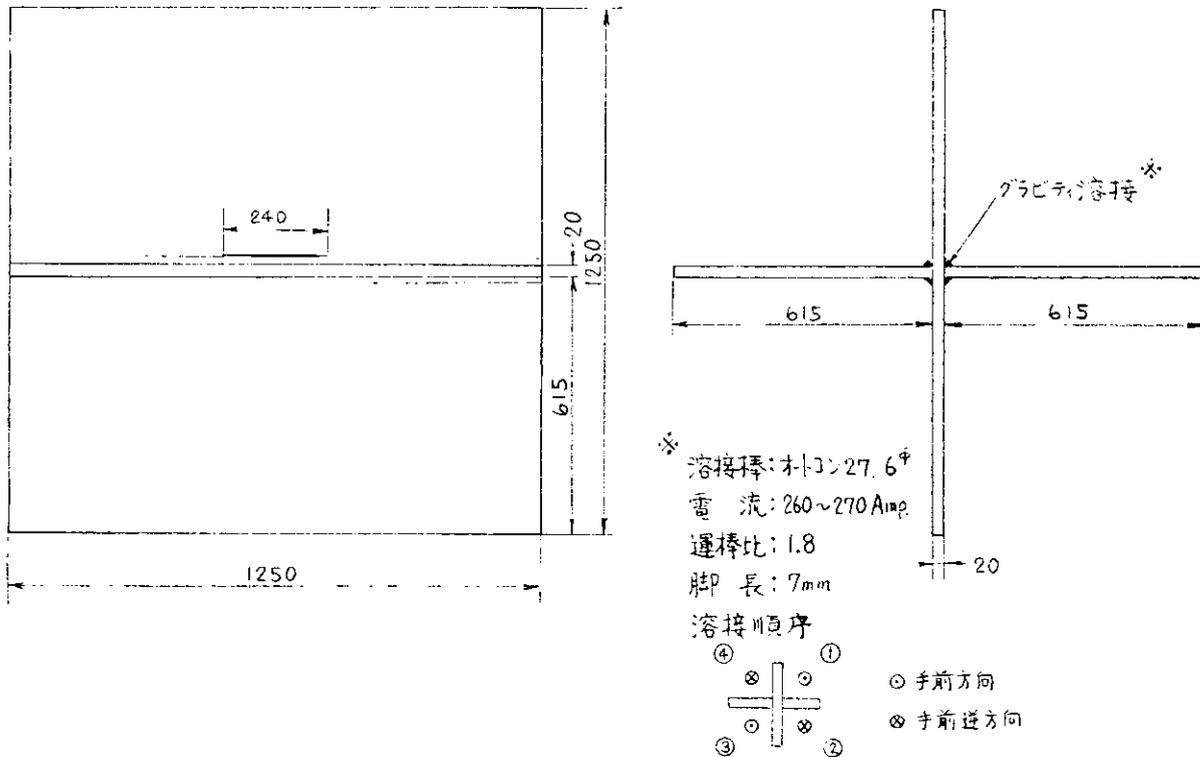


図 5. 脆性亀裂発生試験供試モデル形状 (RA型)

表 2. 脆性亀裂発生試験結果一覧

試験片 符号	板厚 (mm)	試験片幅 2W (mm)	切欠長さ 2C (mm)	試験温度		破壊荷重 P (ton)	Gross	Net	* Kci	C.O.D. (mm)			
				T (°C)	10 <sup>3</sup> /T (°K <sup>-1</sup> )		Stress σ <sub>g</sub> (kg/mm <sup>2</sup> )	Stress σ <sub>n</sub> (kg/mm <sup>2</sup> )		左側	右側	平均	
A-1*	20.2	400	240	-100	5.78	25.2	3.1	7.8	73.0	0.015	0.125	0.07	
A-2*	20.2	400	240	-180	10.75	12.6	1.6	3.9	36.6	—	—	—	
A-3	20.1	400	240	-120	6.54	62.0	7.7	19.2	180.9	0.04	0.19	0.12	
A-4	20.2	400	240	-40	4.30	95.0	11.8	29.4	276.0	0.28	0.38	0.33	
A-5	20.2	400	240	-70	4.93	117.0	14.5	36.2	340.0	0.12	0.08	0.08	
F-1*	20.1	400	240	-100	5.78	61.2	7.6	19.0	179.0	0.55	0.12	0.34	
F-2*	20.3	400	240	-180	10.75	27.6	3.4	8.5	79.7	0.03	0.07	0.05	
F-3	20.1	400	240	-140	7.52	51.0	6.3	15.9	148.8	0.03	0.04	0.04	
F-4	20.2	400	240	-120	6.54	54.0	6.7	16.7	158.0	0.07	0.19	0.13	
F-5	20.2	400	240	-70	4.93	101.0	12.5	31.2	294.0	0.27	1.26	0.77	
RA-1	20	1250	240	-133	7.14	245.0	9.8	12.1	193	0.069	0.080	0.075	0.031
RA-2	20	1250	240	-100	5.78	127.3	5.1	6.3	101	0.082	0.034	0.058	0.012
RA-3	20	1250	240	-72	4.98	408.0	15.4	19.3	310	0.134	0.088	0.111	0.135
RA-4	20	1250	240	-152	8.26	220.0	8.8	10.9	171	0.031	—	—	0.027
RA-5	20	1250	240	-124	6.71	207.5	8.3	10.2	161	0.030	—	—	0.027

\*  $K_{ci} = \sigma_g \cdot \sqrt{\pi C} \cdot \sqrt{\frac{2W}{\pi C} \tan \frac{\pi C}{2W}}$

\* 45年度実施分

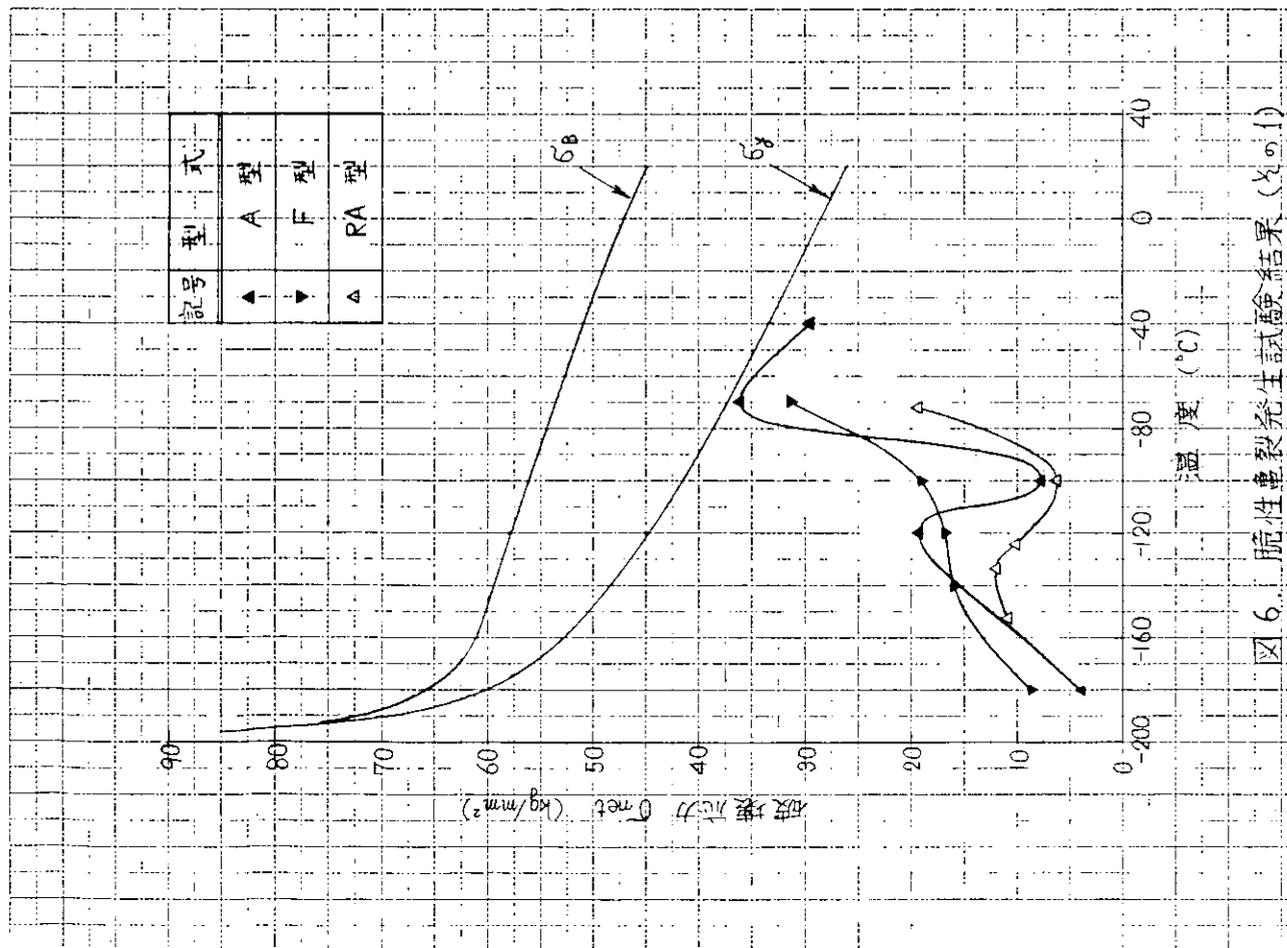


図6. 脆性亀裂発生試験結果 (kgf)

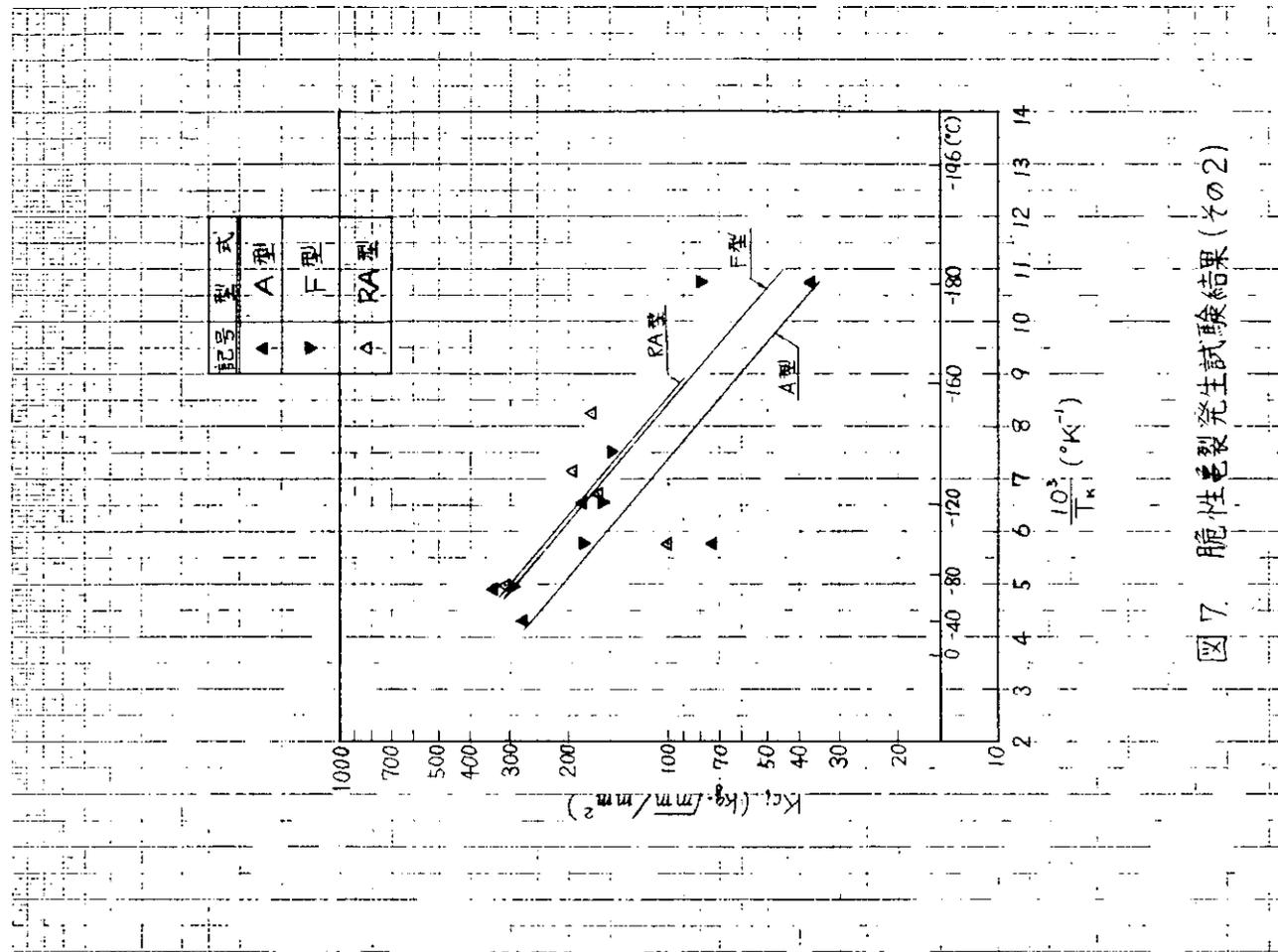


図7. 脆性亀裂発生試験結果 (その2)

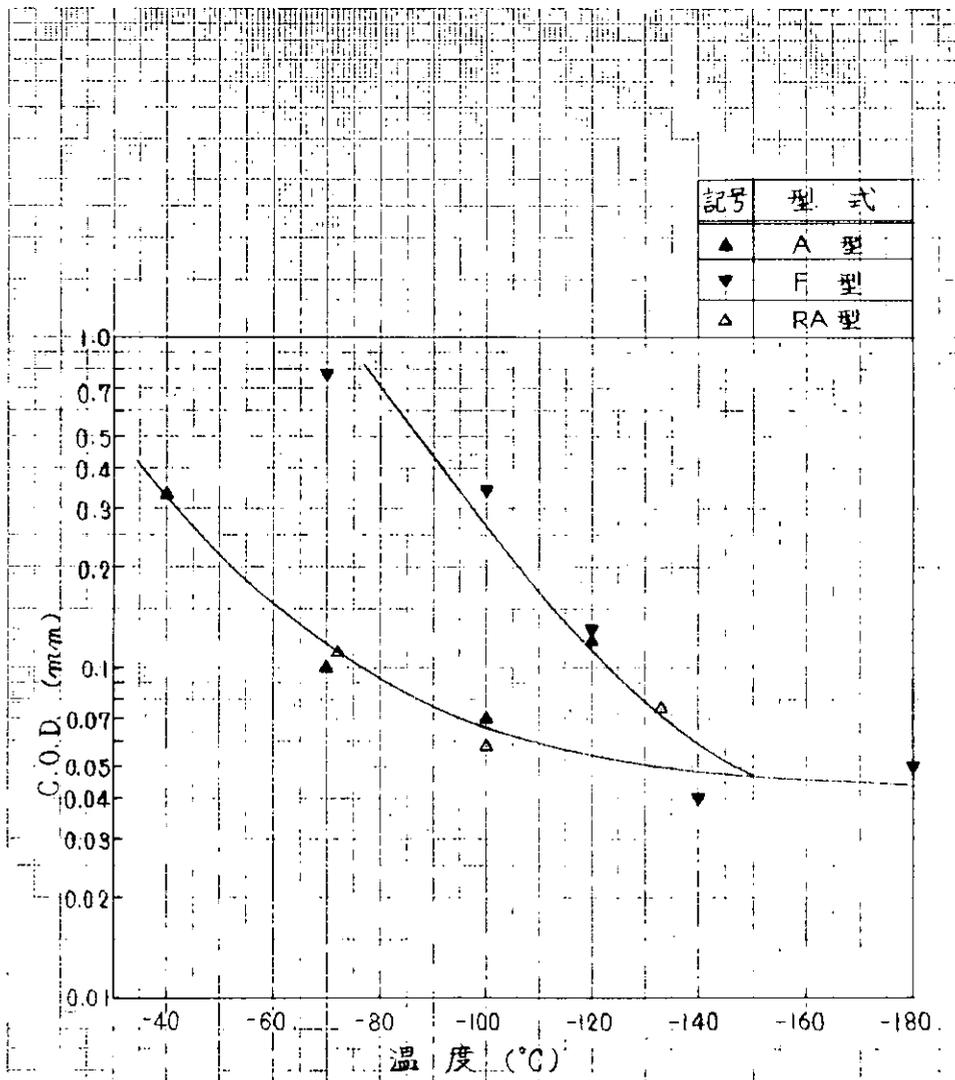


図 8. 脆性亀裂発生試験に用いた C.O.D. 計測結果

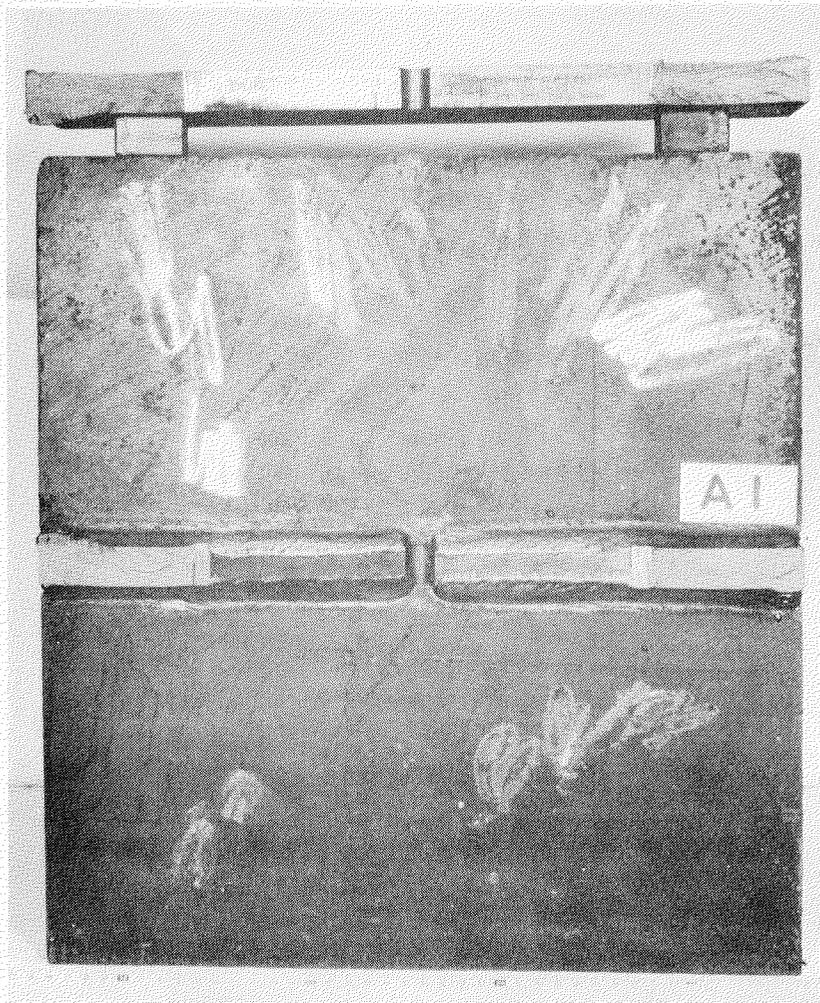
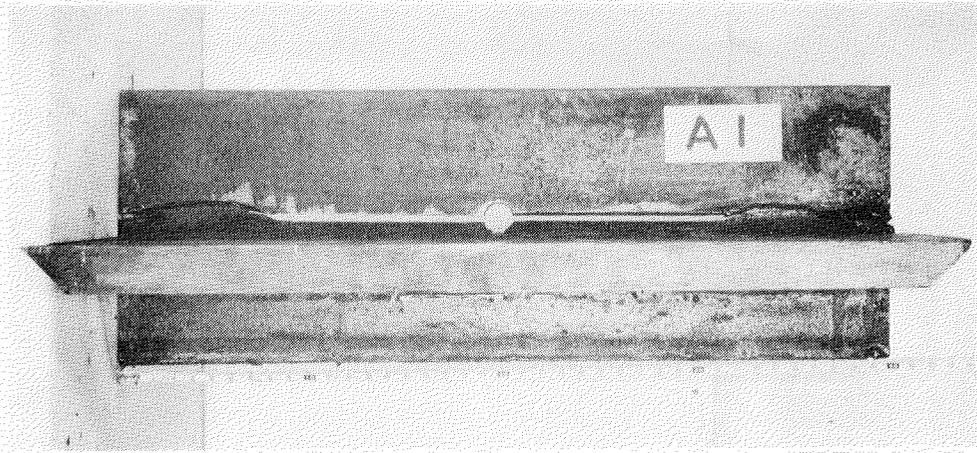


写真1. 脆性亀裂発生試験における破断状況  
(A型Eテル, 試験温度 $-100^{\circ}\text{C}$ )

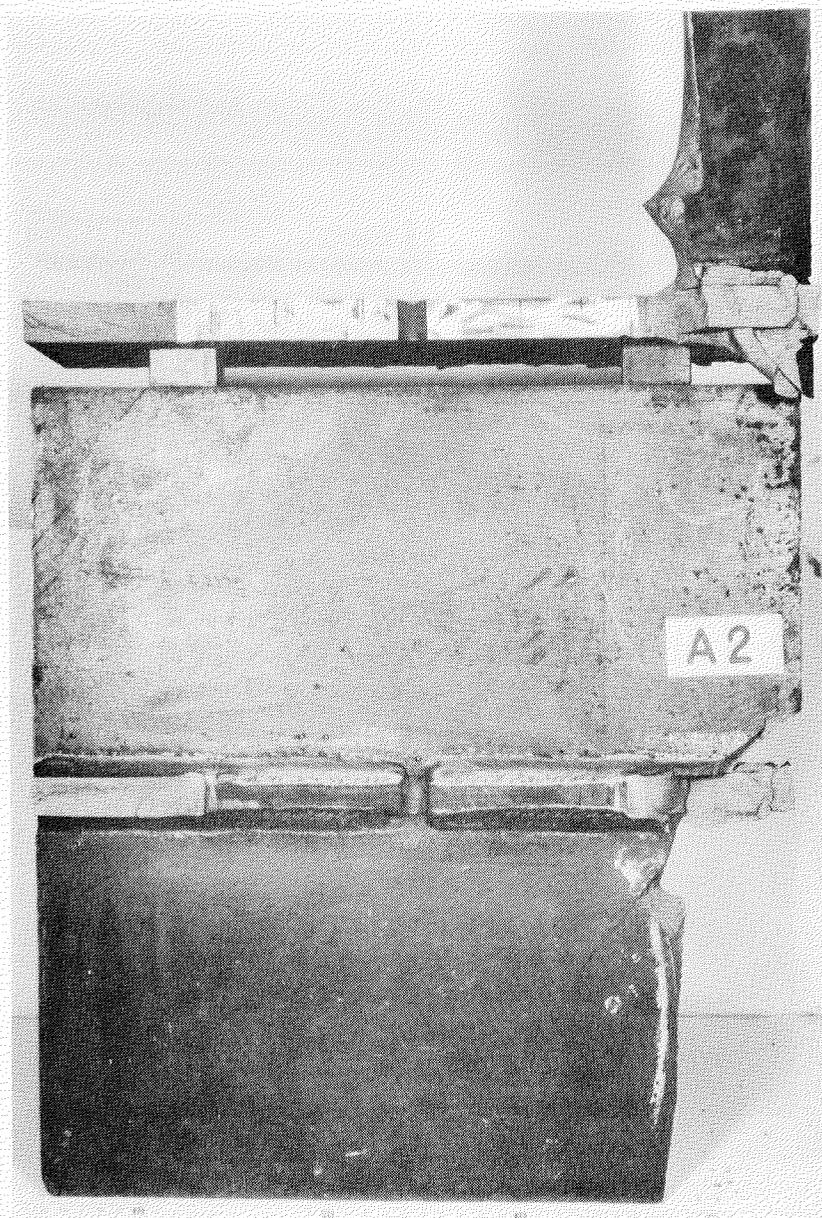
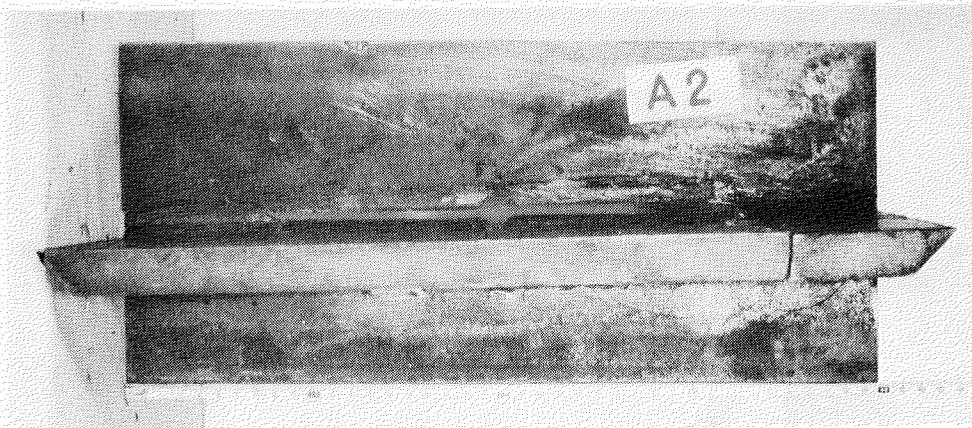


写真2. 脆性亀裂発生試験における破断状況  
(A型Eテール 試験温度 $-180^{\circ}\text{C}$ )

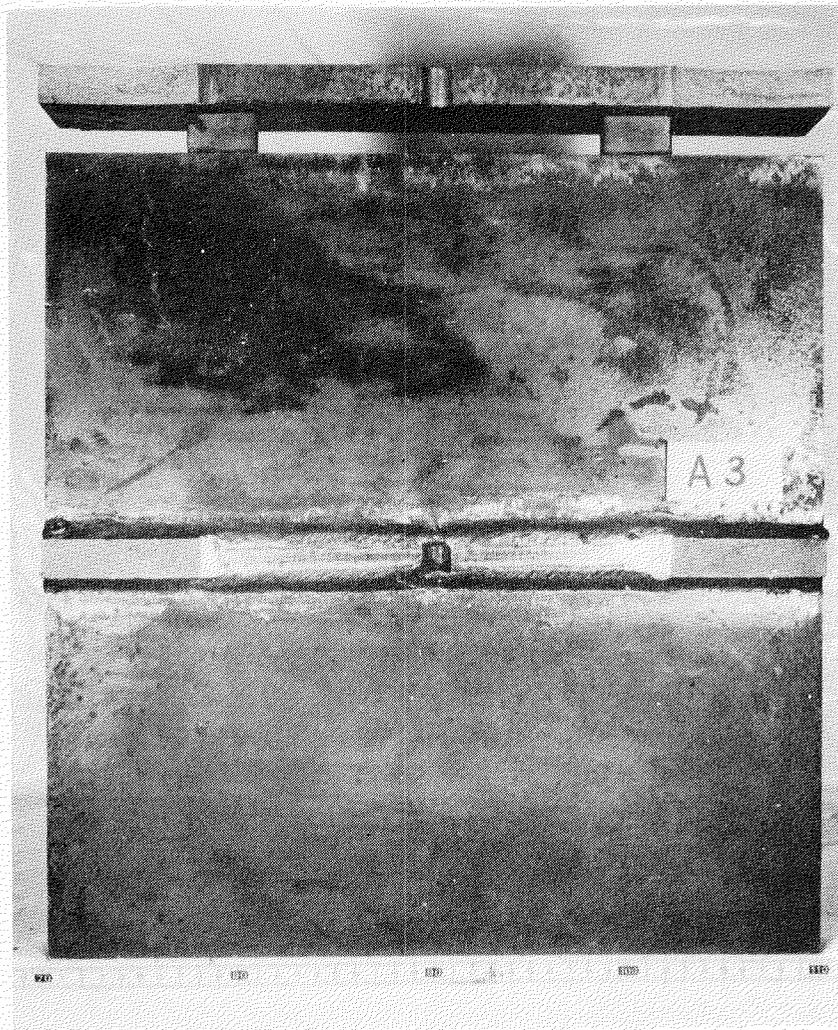
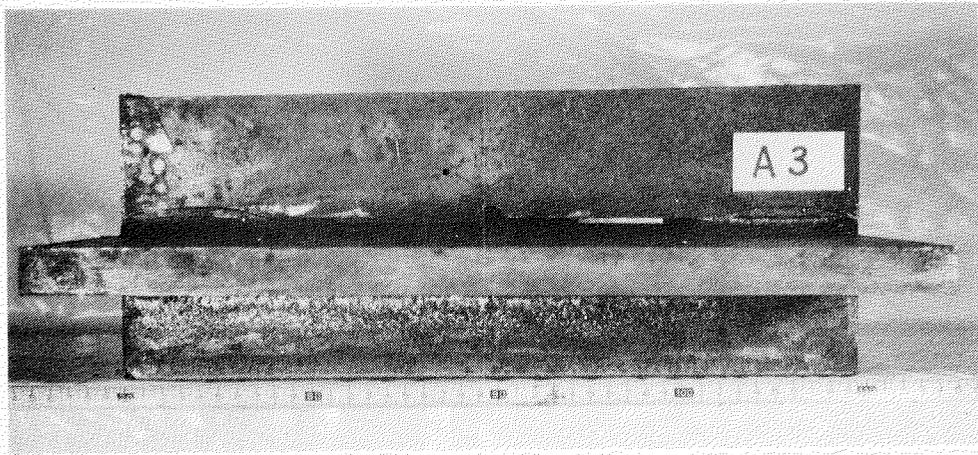


写真3. 脆性亀裂発生試験における破断状況  
(A型モデル, 試験温度 $-120^{\circ}\text{C}$ )

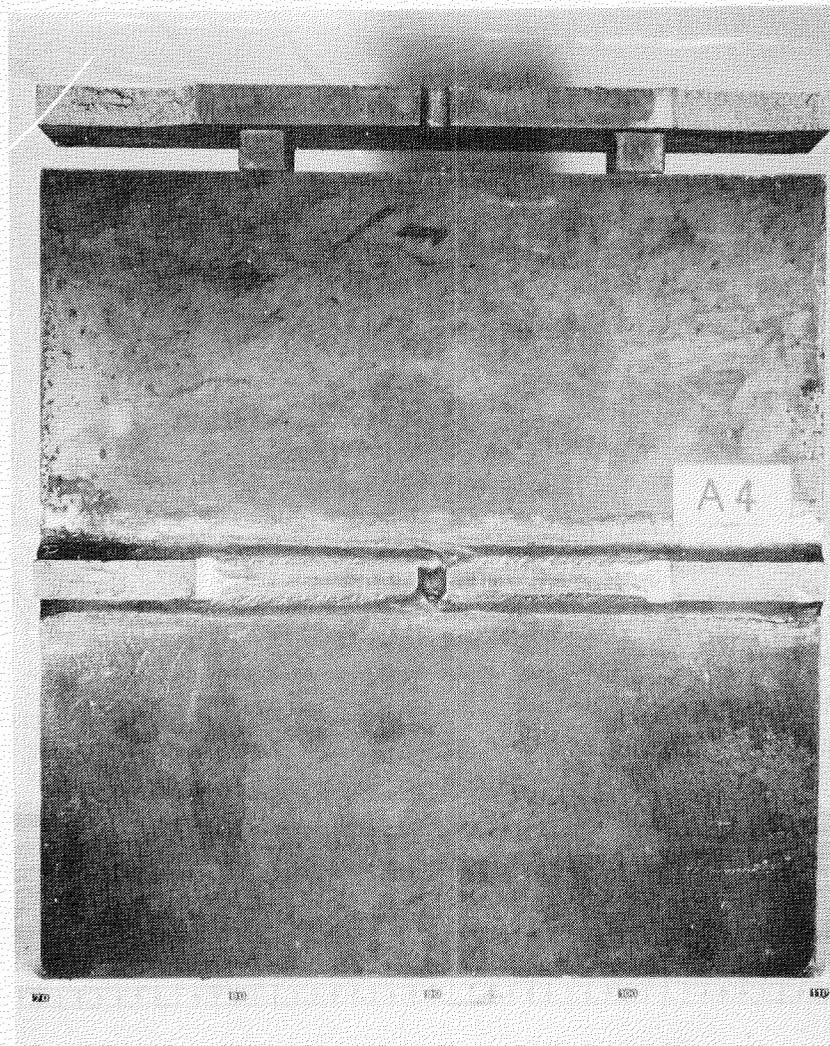
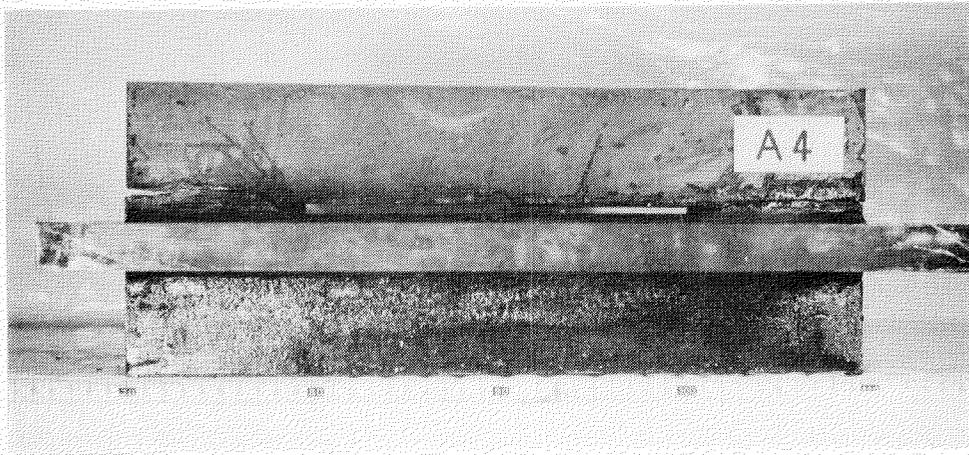


写真4. 脆性亀裂発生試験における破断状況  
(A型モデル, 試験温度 $-40^{\circ}\text{C}$ )

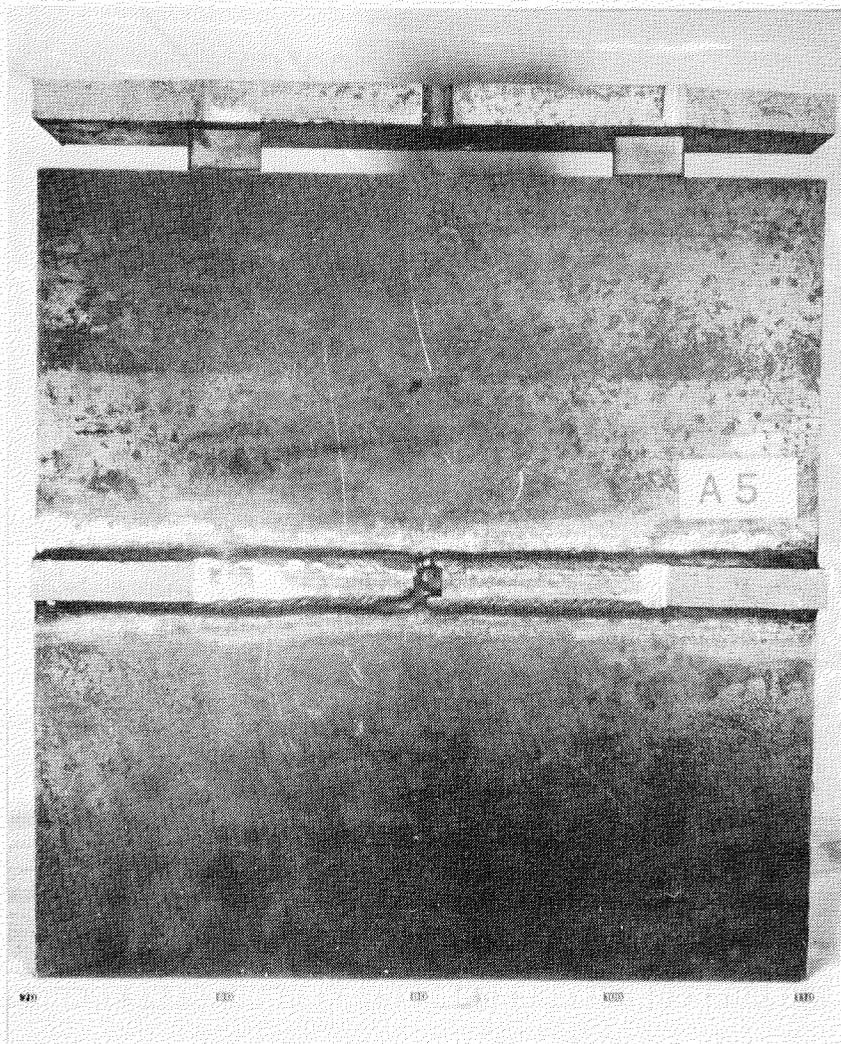
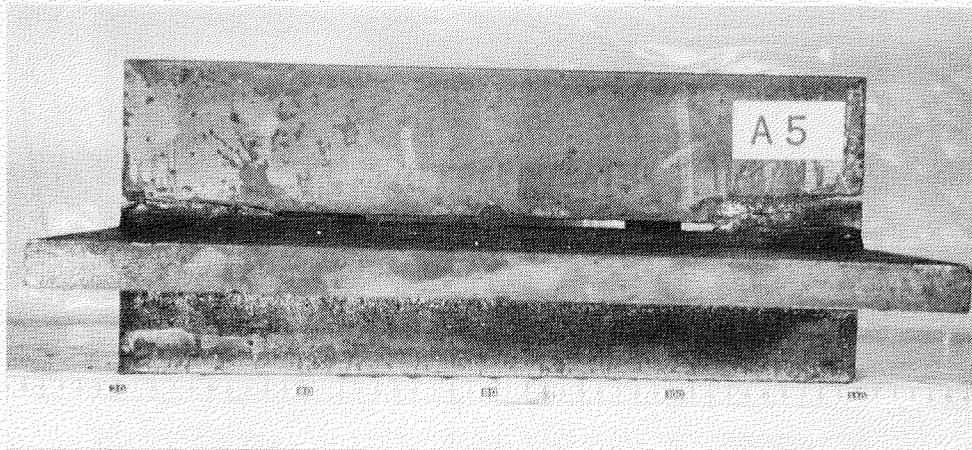
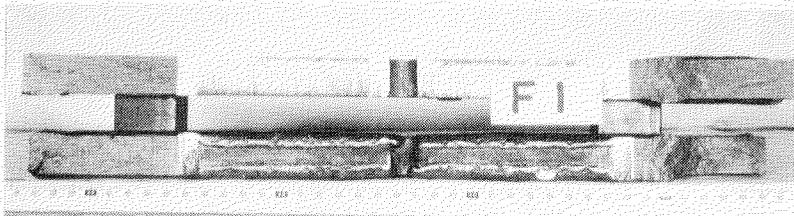
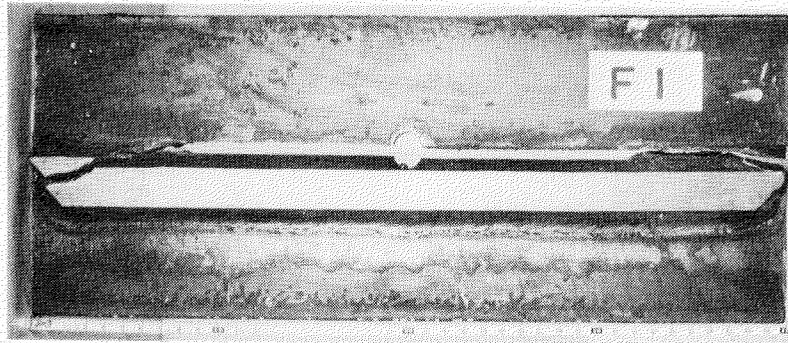
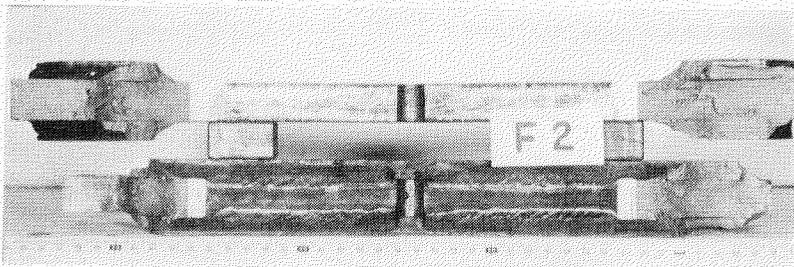
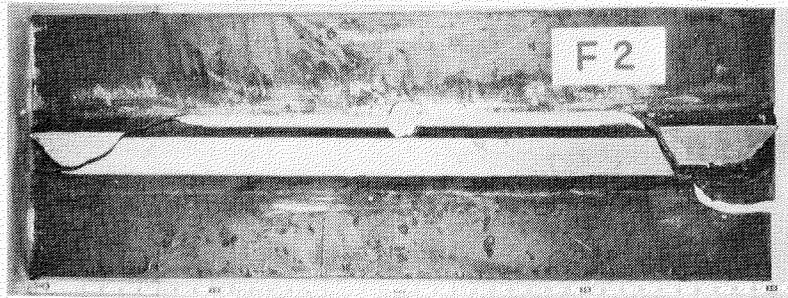


写真5. 脆性亀裂発生試験における破断状況  
(A型モデル, 試験温度 $-70^{\circ}\text{C}$ )

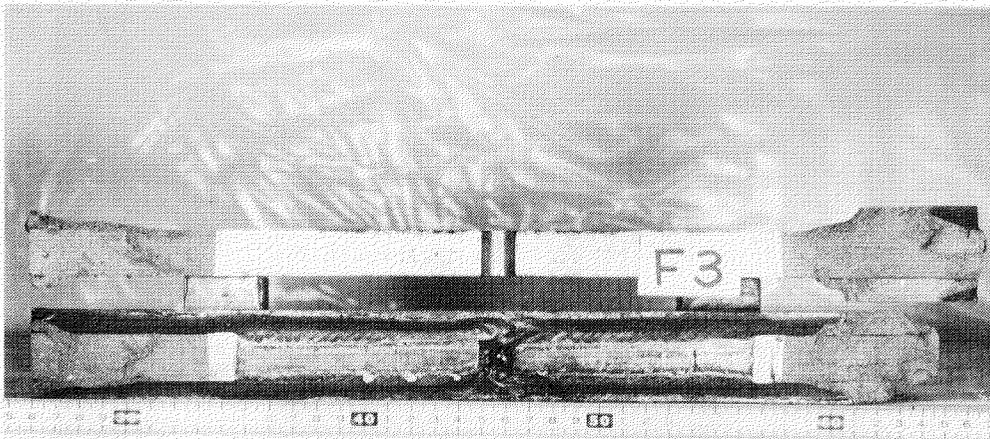
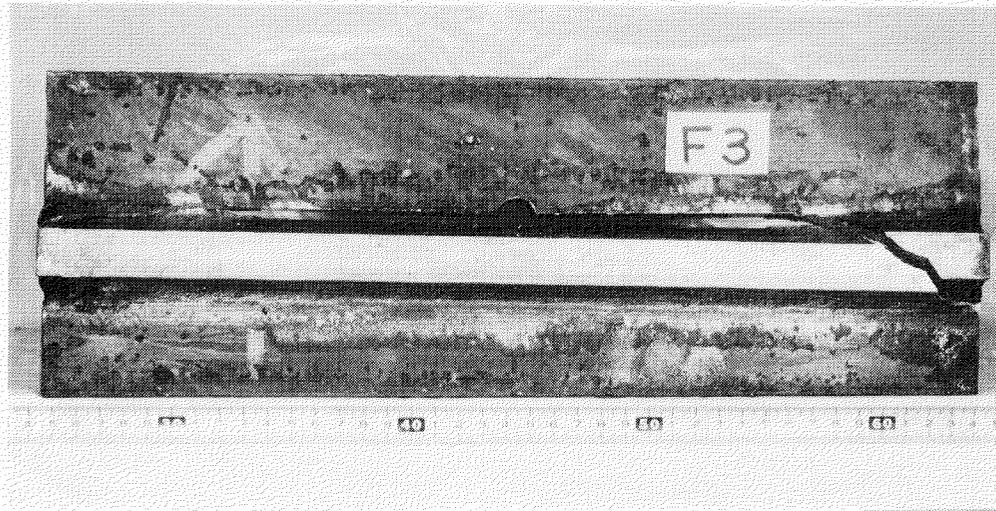


(試験温度 $-100^{\circ}\text{C}$ )



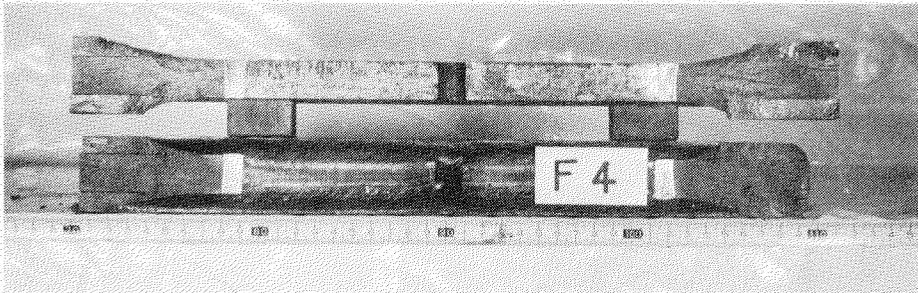
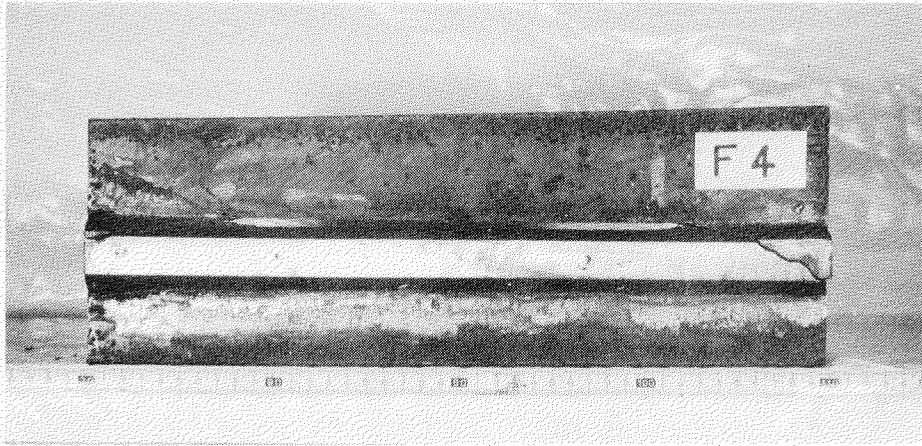
(試験温度 $-180^{\circ}\text{C}$ )

写真6. 脆性亀裂発生試験における破断状況  
(F型Eテル, 試験温度 $-100^{\circ}\text{C}$ ,  $-180^{\circ}\text{C}$ )

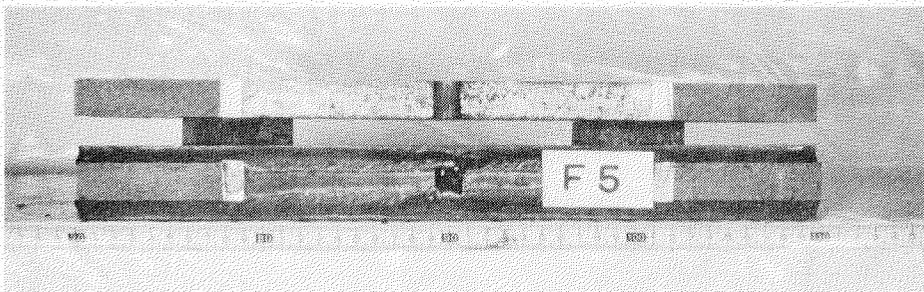
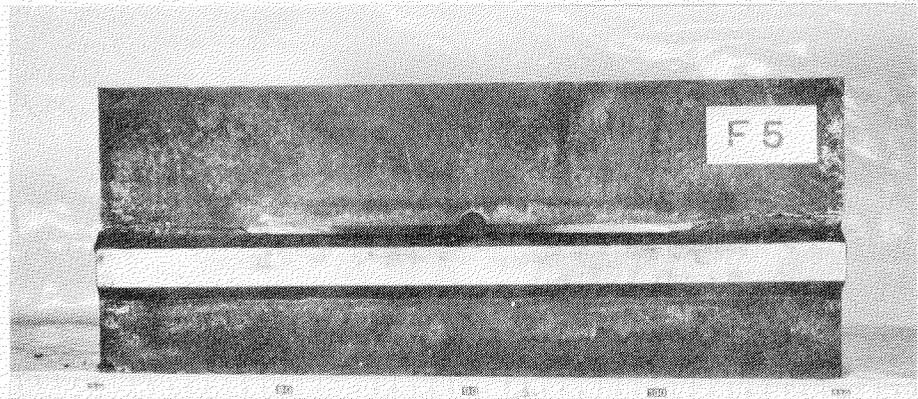


(試験温度  $-140^{\circ}\text{C}$ )

写真7. 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  $-140^{\circ}\text{C}$ )

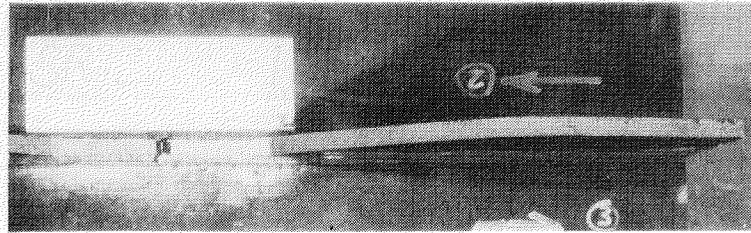


(試験温度  $-120^{\circ}\text{C}$ )

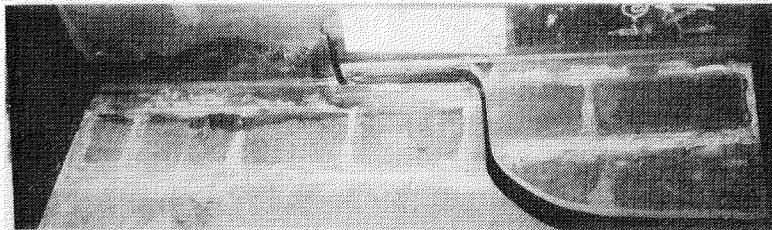


(試験温度  $-70^{\circ}\text{C}$ )

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 $-120^{\circ}\text{C}$ ,  $-70^{\circ}\text{C}$ )

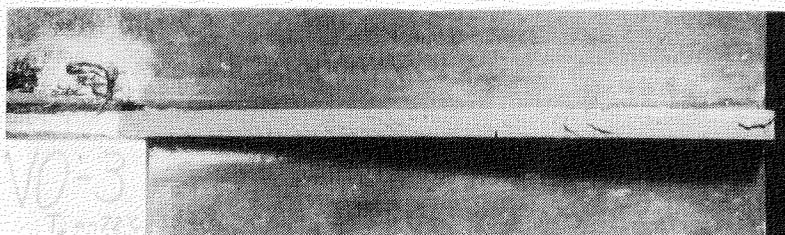


(試験温度  $-133^{\circ}\text{C}$ )

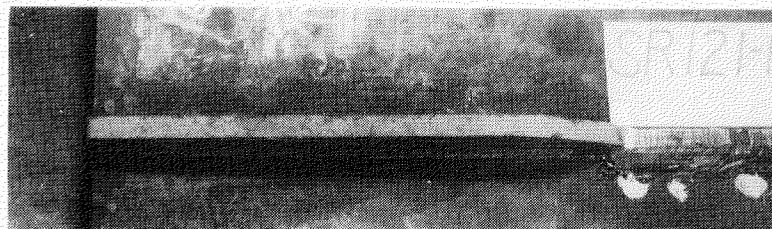
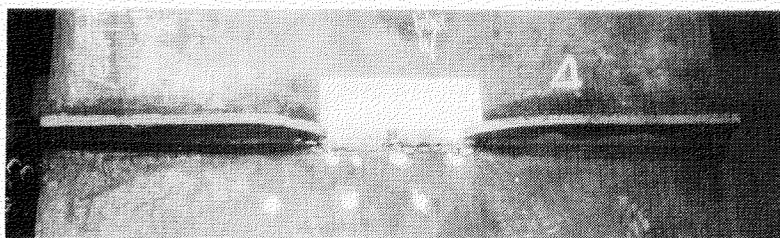


(試験温度  $-100^{\circ}\text{C}$ )

写真 9. 脆性亀裂発生試験における破断状況  
(RA型モデル 試験温度  $-133^{\circ}\text{C}$ ,  $-100^{\circ}\text{C}$ )

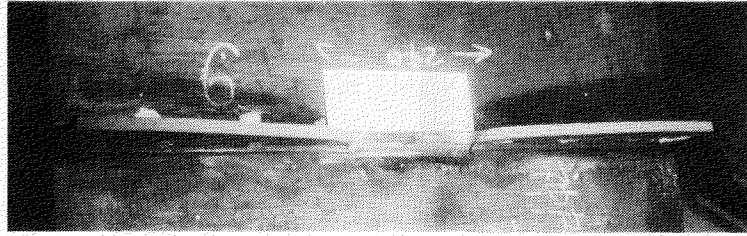


(試験温度  $-72^{\circ}\text{C}$ )



(試験温度  $-152^{\circ}\text{C}$ )

写真10. 脆性亀裂発生試験における破断状況  
(RA型モデル, 試験温度  $-72^{\circ}\text{C}$ ,  $-152^{\circ}\text{C}$ )



(試験温度  $-124^{\circ}\text{C}$ )

写真11. 脆性亀裂発生試験における破断状況  
(RA型モデル 試験温度  $-124^{\circ}\text{C}$ )

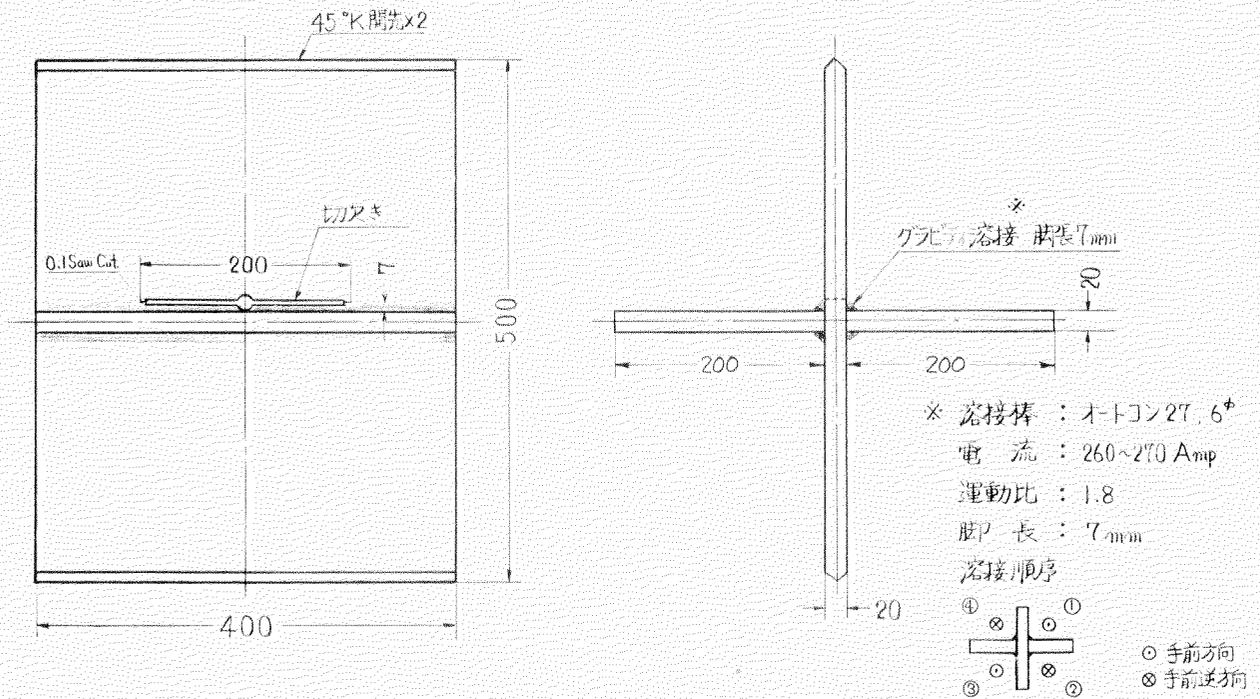
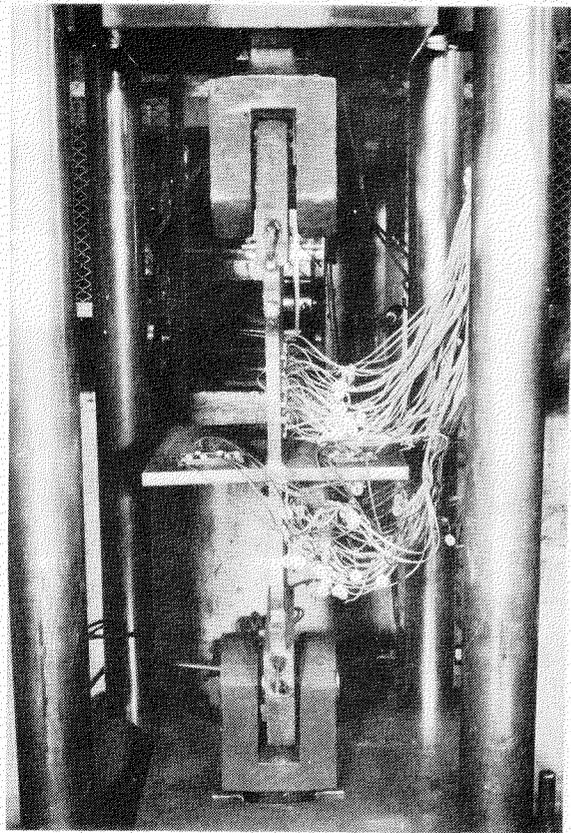
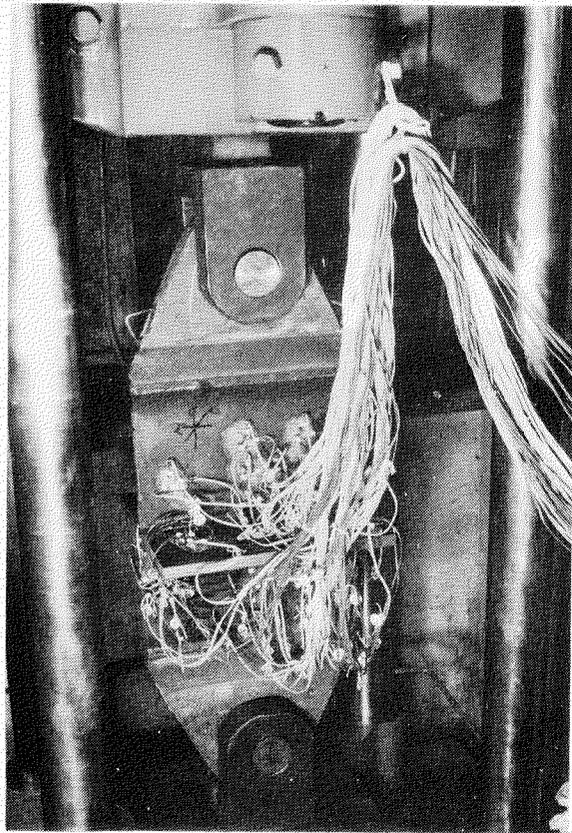


図9. 疲労試験供試モデル形状 (A型)



(a) 正面

(b) 側面

写真12. 疲労試験実施状況  
(A'-2モデルにて応力分布測定中)

表3. 疲労試験結果一覧

試験片 符号	試験条件					試験結果			
	繰返し荷重 P <sub>min.</sub> ~P <sub>max.</sub> (ton)	Gross Stress* σ <sub>min.</sub> ~σ <sub>max.</sub> (kg/mm <sup>2</sup> )	Net Stress* σ <sub>min.</sub> ~σ <sub>max.</sub> (kg/mm <sup>2</sup> )	応力振幅 (kg/mm <sup>2</sup> )	繰返し速度 (C.P.M)	疲労亀裂が10mm成長した 時の繰返し回数 (Cycle)			破断繰返し回数 (Cycle)
						左	右	平均	
A'-1	3~107	0.4~13.4	0.8~26.8	26	3	2550	2650	2600	5520
A'-2	3~139	0.4~17.4	0.8~34.8	34	2	430	600	515	810
A'-3	10~50	1.3~6.3	2.5~12.5	10	15~20	44000	43000	43500	139000
A'-4	10~82	1.3~10.3	2.5~20.5	18	15~20	7000	6500	6750	16500
A'-5	10~66	1.3~8.3	2.5~16.5	14	15~20	12600	14000	13300	39500

\* Stiffener は関係ないものとして算出した。

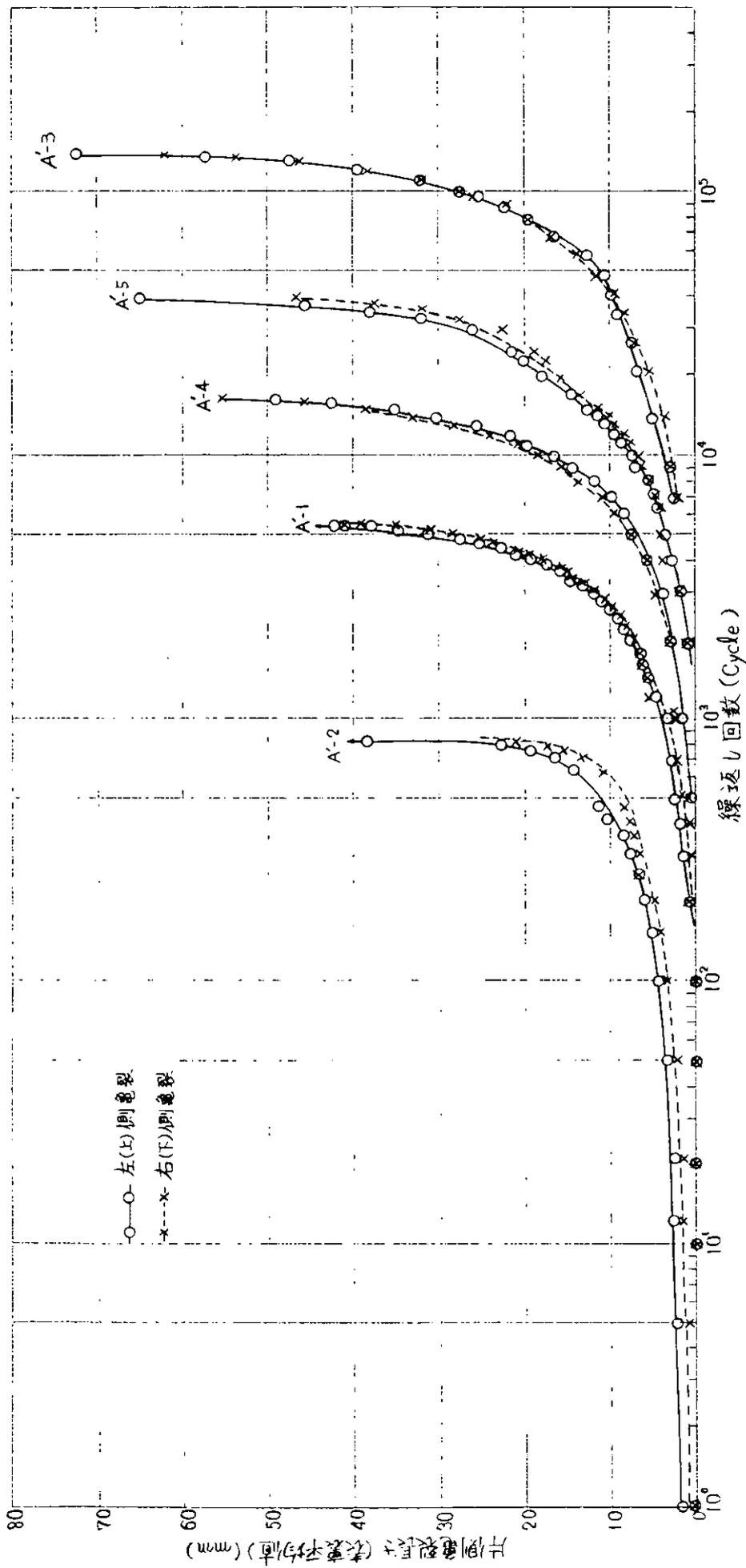


図10. 疲労亀裂成長状況 (A型)

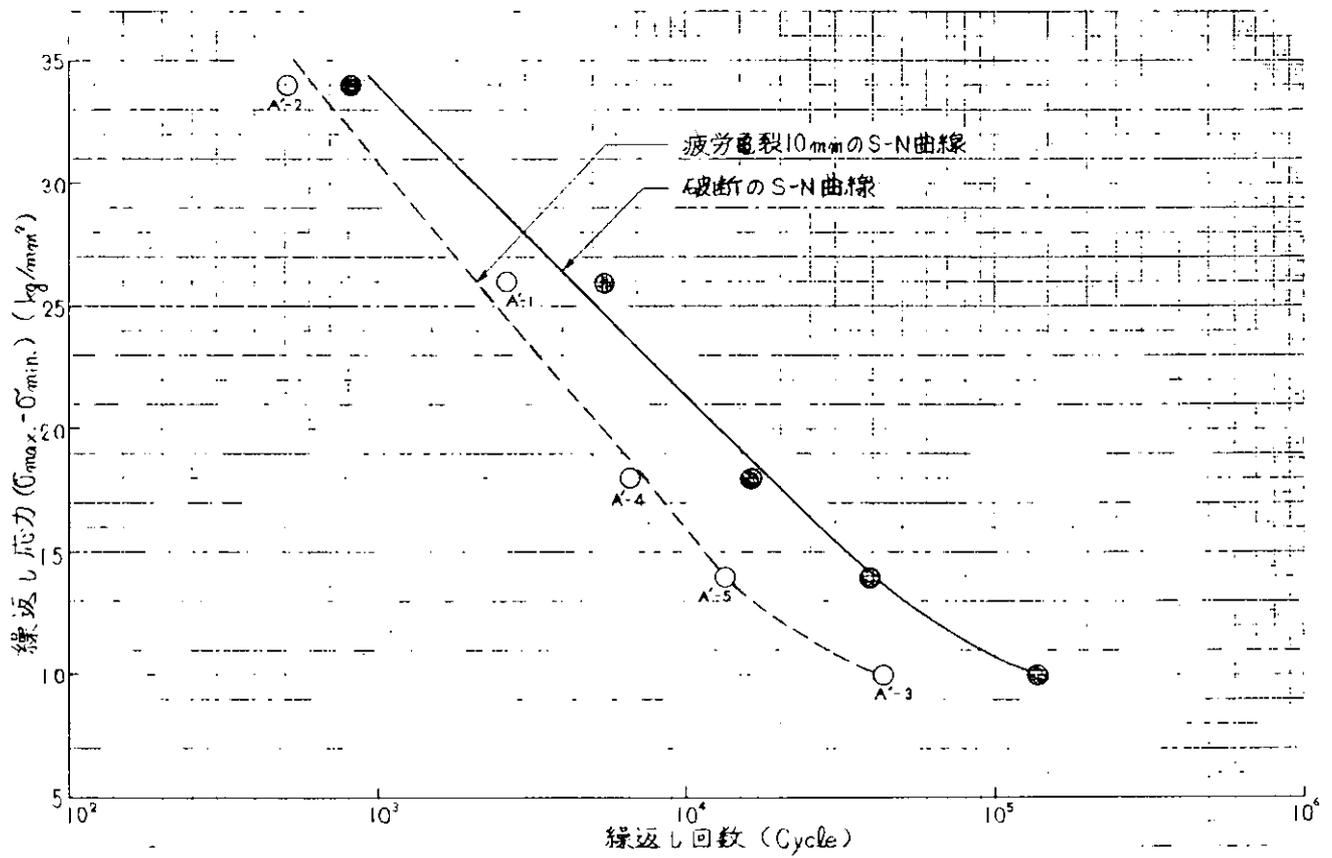


図11. S-N線図(A型) (No.1)

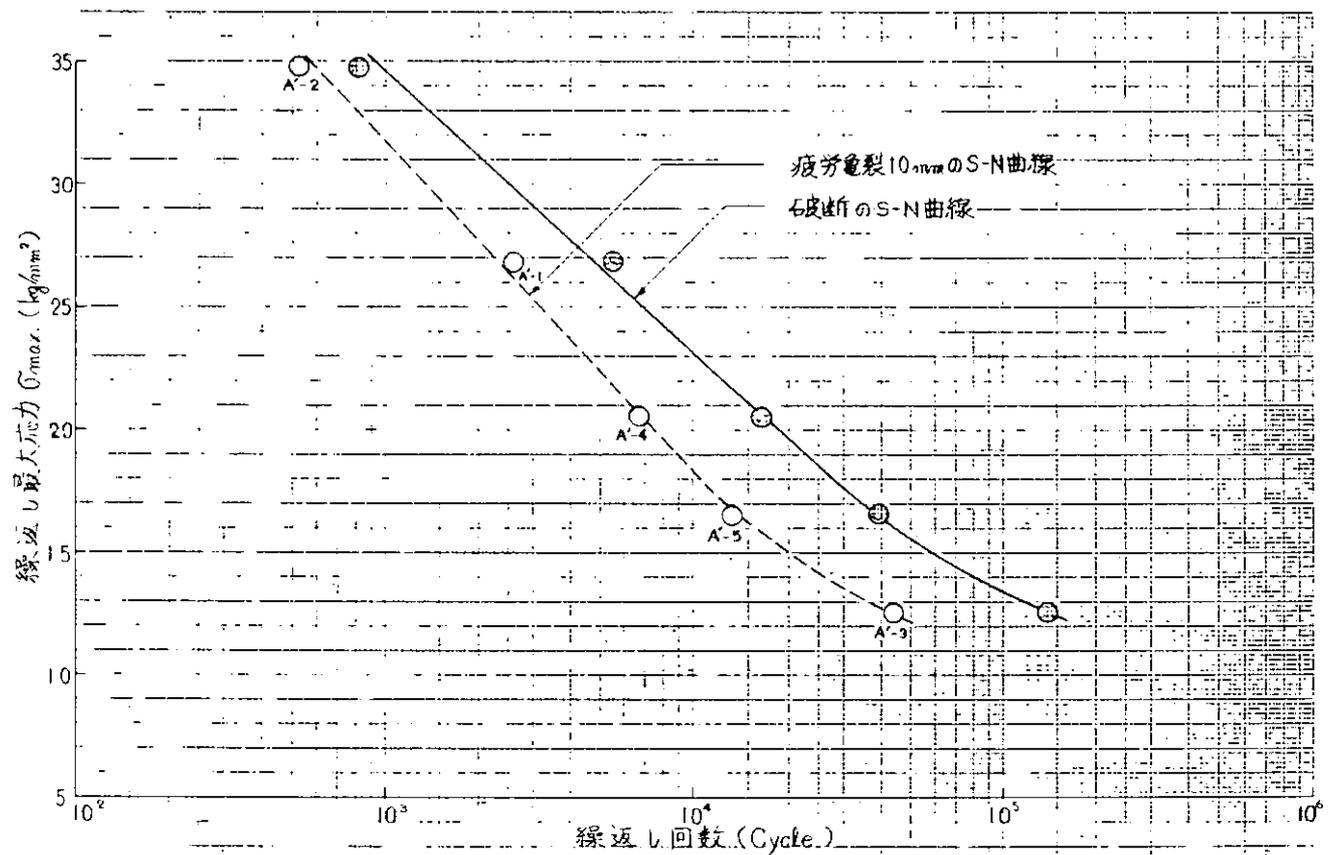
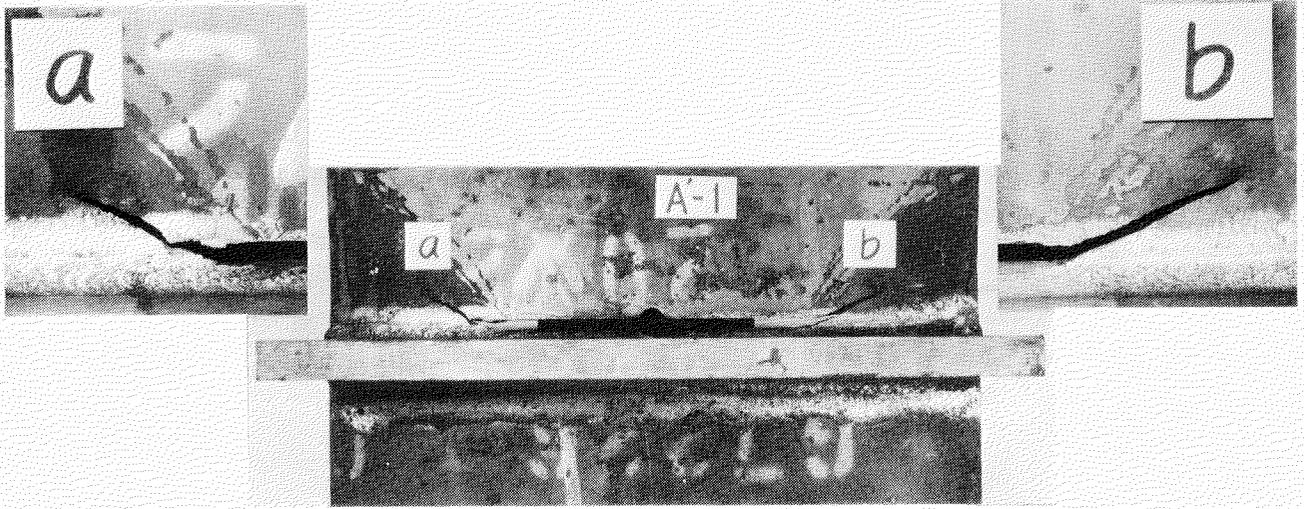
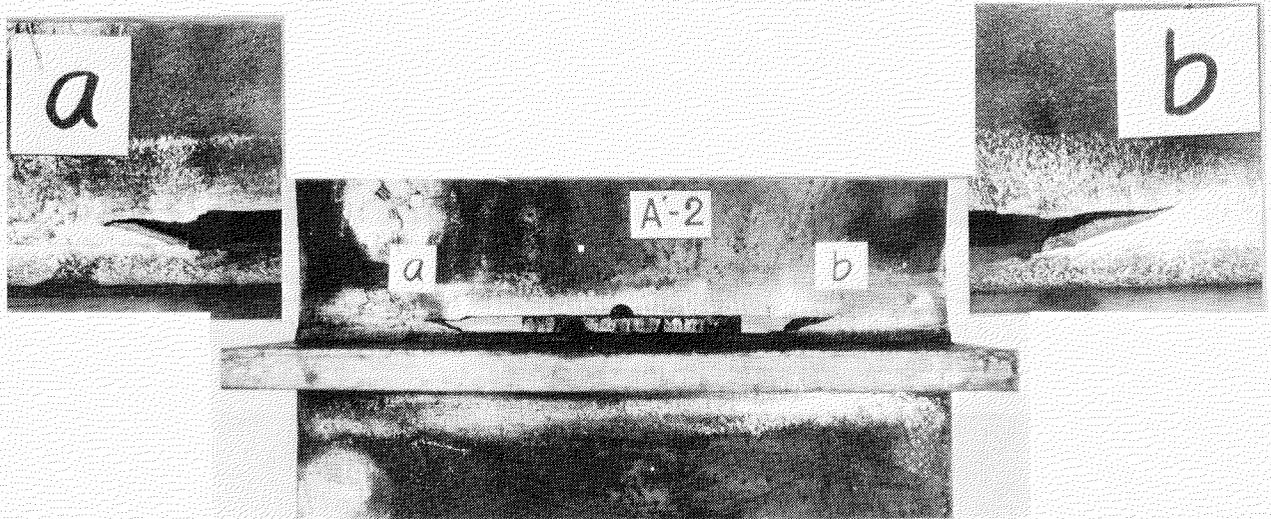


図12. S-N線図(A型) (No.2)

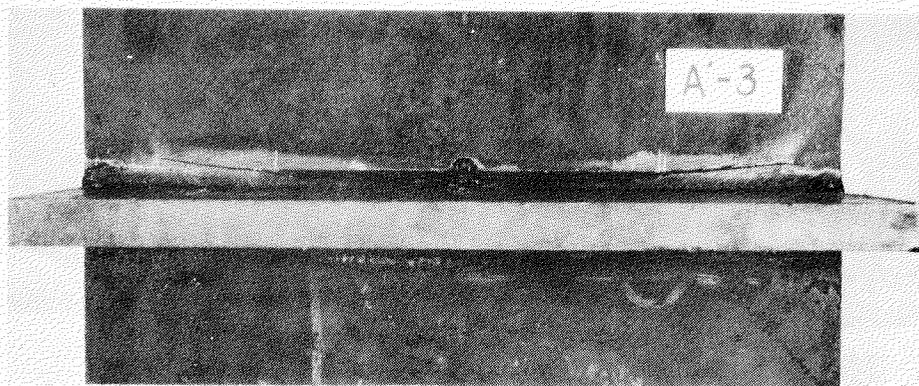


( 応力振幅  $26 \text{ kg/mm}^2$  )

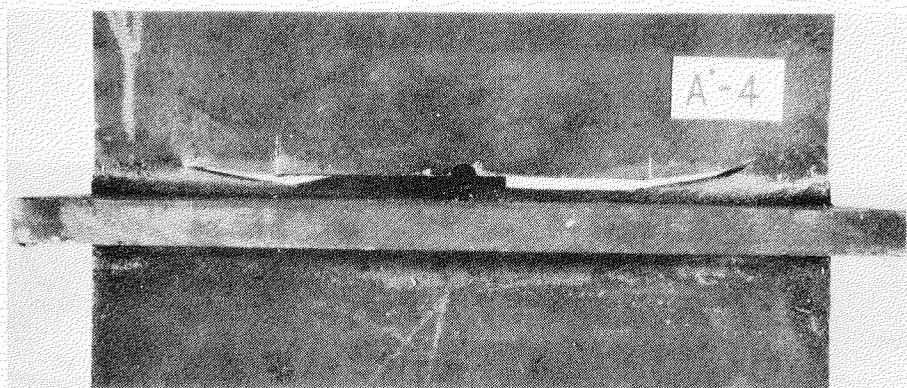


( 応力振幅  $34 \text{ kg/mm}^2$  )

写真13. 疲労亀裂伝播状況



(応力振幅  $10 \text{ kg/mm}^2$ )



(応力振幅  $18 \text{ kg/mm}^2$ )



(応力振幅  $14 \text{ kg/mm}^2$ )

写真14. 疲労亀裂伝播状況

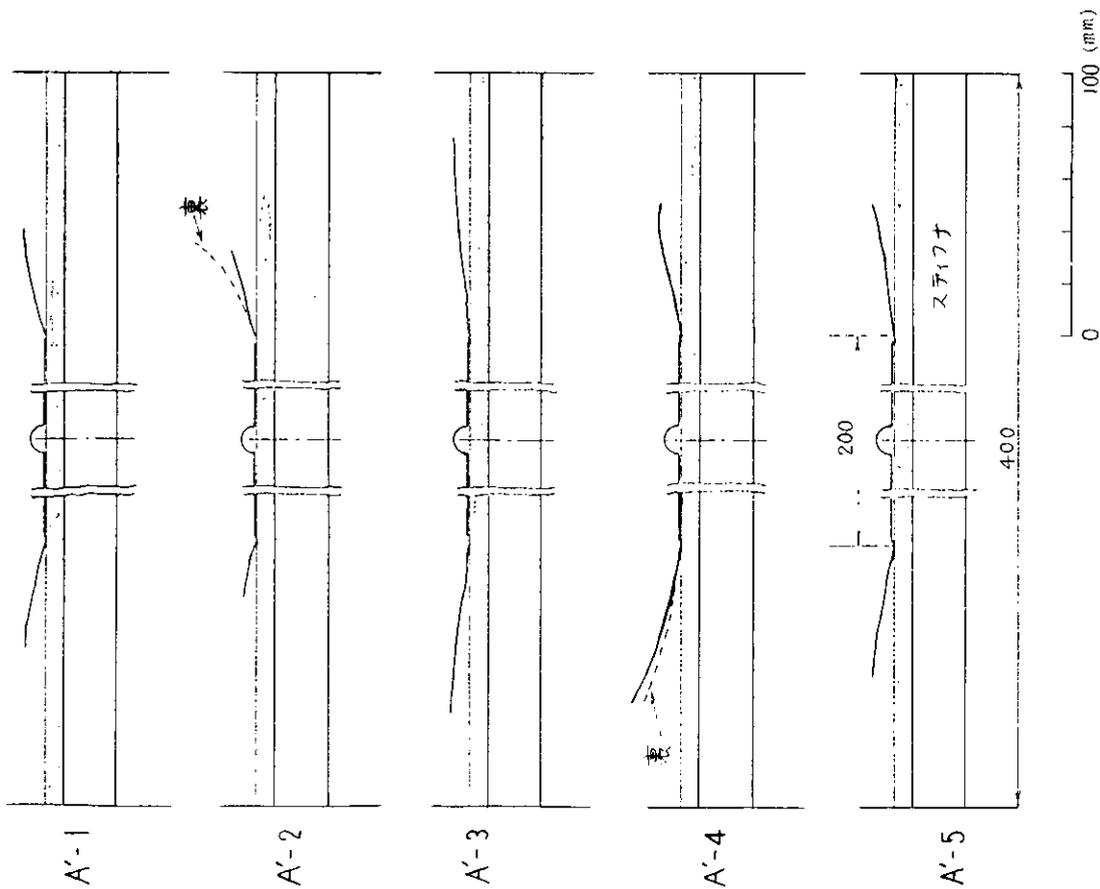


図13. 疲労亀裂伝播状況

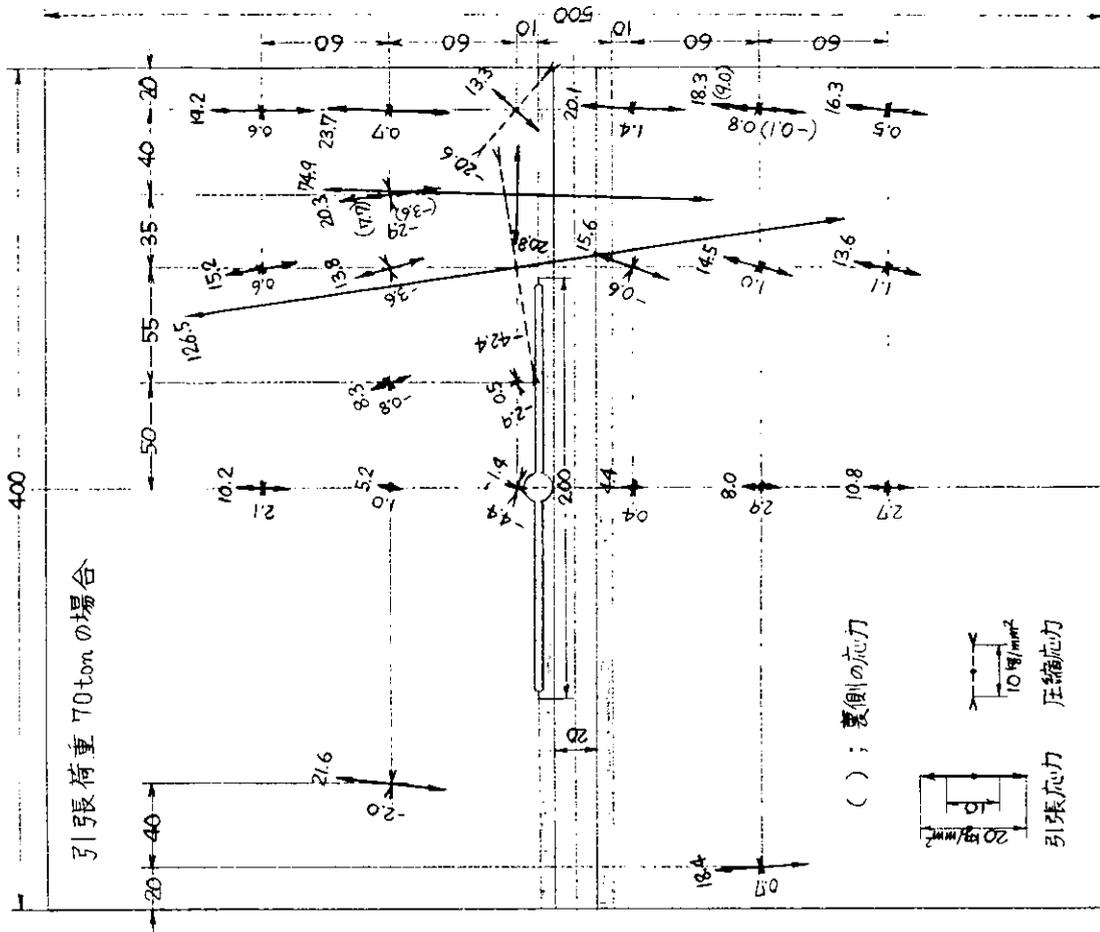


図14. 疲労試験片 (A'-2) の主応力分布

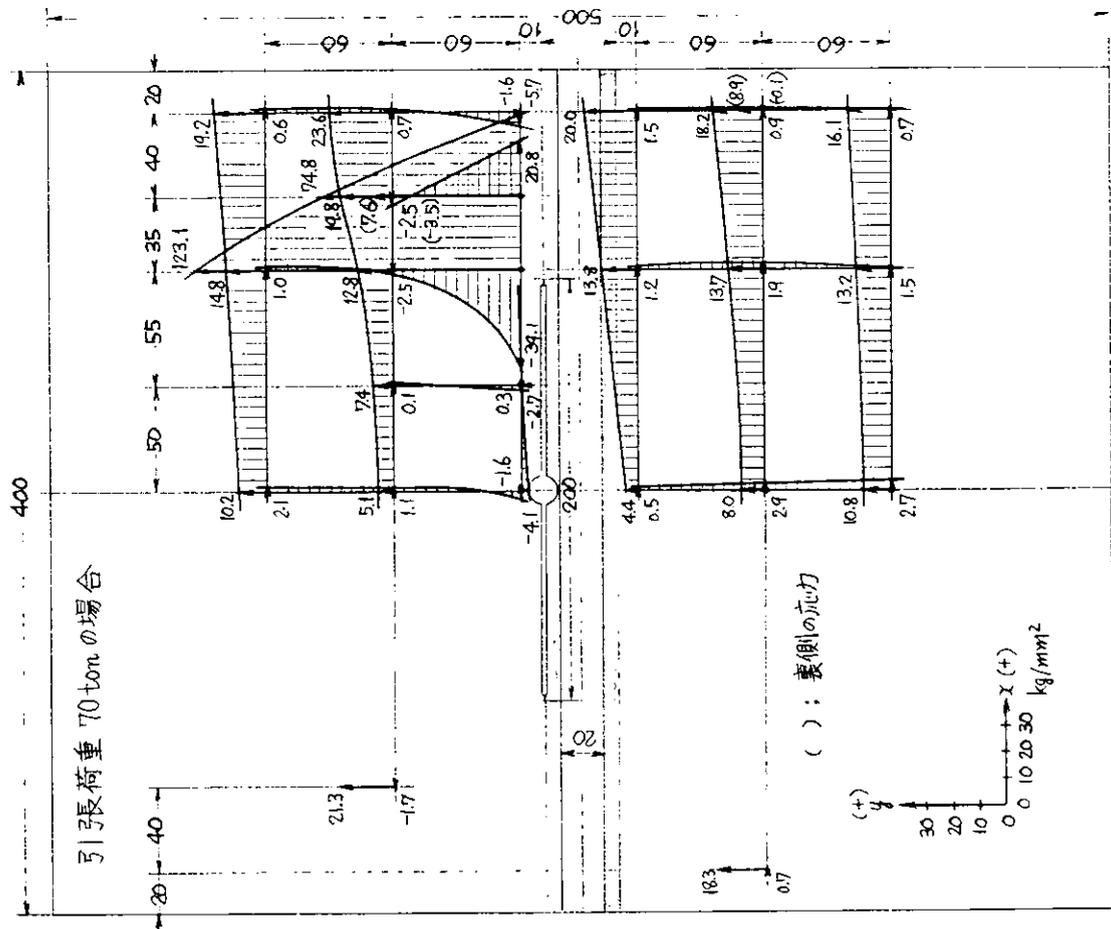


図15. 疲労試験片 (A'-2) のX,y方向応力分布

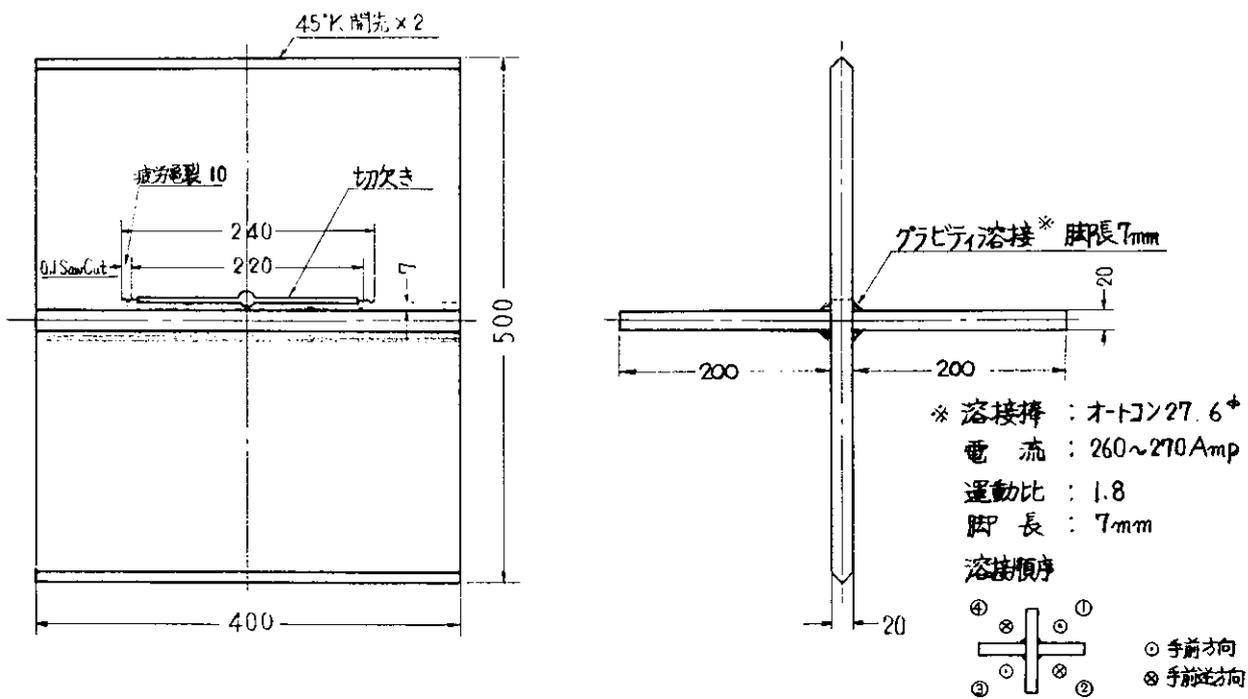


図16. 疲労亀裂からの脆性破壊発生試験供試モデル形状 (A'型)

表 4. 疲労亀裂からの脆性破壊発生試験結果一覧

試験符号	板厚 (mm)	試験片幅 2W (mm)	試験片全長 2C (mm)	試験温度		破壊荷重 P (ton)	Gross Stress σ <sub>g</sub> (kg/mm <sup>2</sup> )	Net Stress σ <sub>n</sub> (kg/mm <sup>2</sup> )	*K <sub>c1</sub> (kg/mm <sup>3/2</sup> )	C. O. D. (mm)			疲労試験条件				
				T (°C)	10 <sup>3</sup> /T <sub>K</sub> (°K <sup>-1</sup> )					左側	右側	平均	繰返し荷重 P <sub>max</sub> ~P <sub>min</sub> (ton)	Gross Stress σ <sub>max</sub> ~σ <sub>min</sub> (kg/mm <sup>2</sup> )	繰返し速度 (C.P.M.)	試験片厚さ 220mm の疲労亀裂 の長さ (mm)	試験片厚さ 220mm の疲労亀裂 の長さ (mm)
A-3	20.0	400	241	-140	7.52	51	6.4	16.0	150	0.014	0.022	0.018	3~107	0.4~13.4	13	3	1464
A-4	20.0	400	241	-70	4.93	138	17.3	43.4	406	—	0.250	0.250	3~107	0.4~13.4	13	3	1505
A-5	20.0	400	239	-160	8.85	47	5.9	14.1	138	0.050	0.022	0.036	3~107	0.4~13.4	13	3	1490
A-6	20.0	400	240	-120	6.54	62	7.8	19.3	182	0.105	—	0.105	3~107	0.4~13.4	13	3	1770
A-7	20.0	400	235	-155	8.46	31	3.9	9.4	90	—	—	—	10~50	1.3~6.3	5	20	41100
A-8	20.0	400	240	-120	6.54	68	8.5	21.2	200	0.12	0.10	0.11	10~50	1.3~6.3	5	20	31900
A-9	20.0	400	235	-75	5.05	96	12.0	29.1	278	0.16	0.28	0.22	10~50	1.3~6.3	5	20	33400
A-10	20.0	400	242	-170	9.70	28	3.5	8.9	82	0.02	0.01	0.015	10~50	1.3~6.3	5	20	31800

$$* K_{c1} = \sigma_g \cdot \sqrt{\pi C} \cdot \sqrt{\frac{2W}{\pi C}} \tan \frac{\pi C}{2W}$$

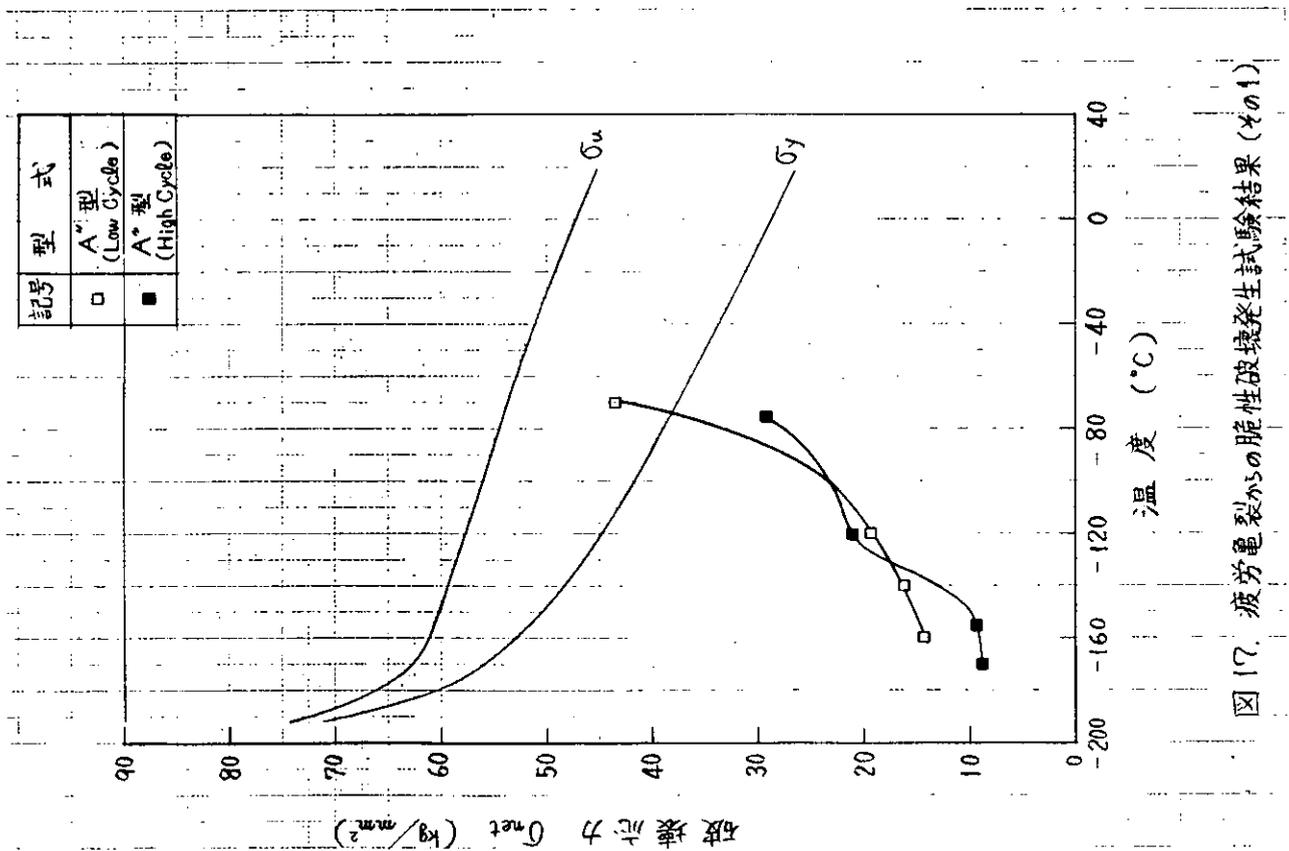


図 17. 疲労亀裂からの脆性破壊発生試験結果 (その1)

記号	型式
□	A'型 (Low Cycle)
■	A''型 (High Cycle)

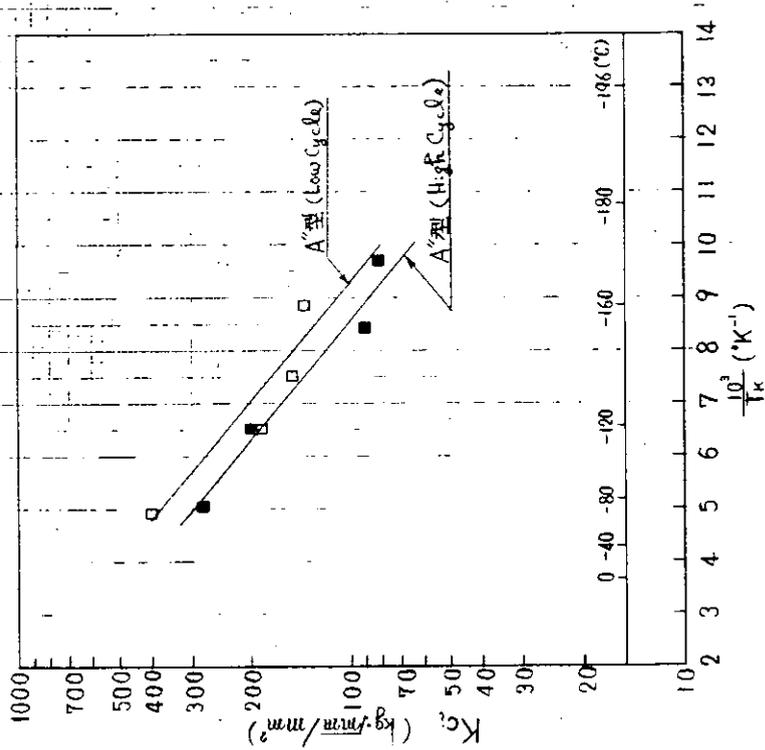


図18. 疲労亀裂からの脆性破壊発生試験の結果 (その2)

記号	型式
□	A'型 (Low Cycle)
■	A''型 (High Cycle)

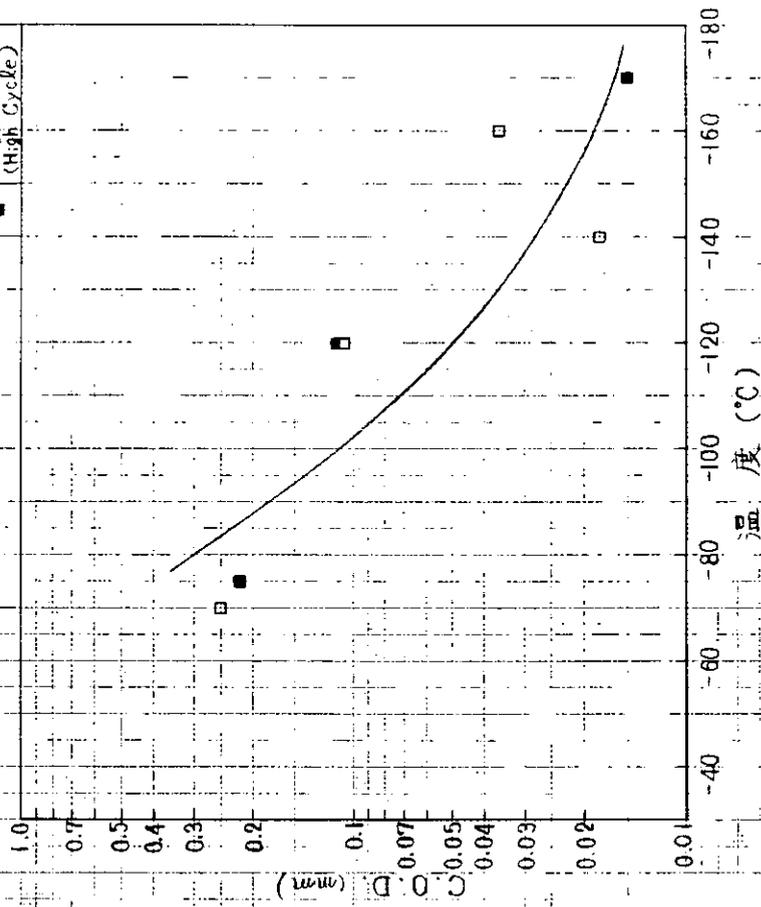


図19. 疲労亀裂からの脆性破壊発生試験によるC.O.D.計測結果

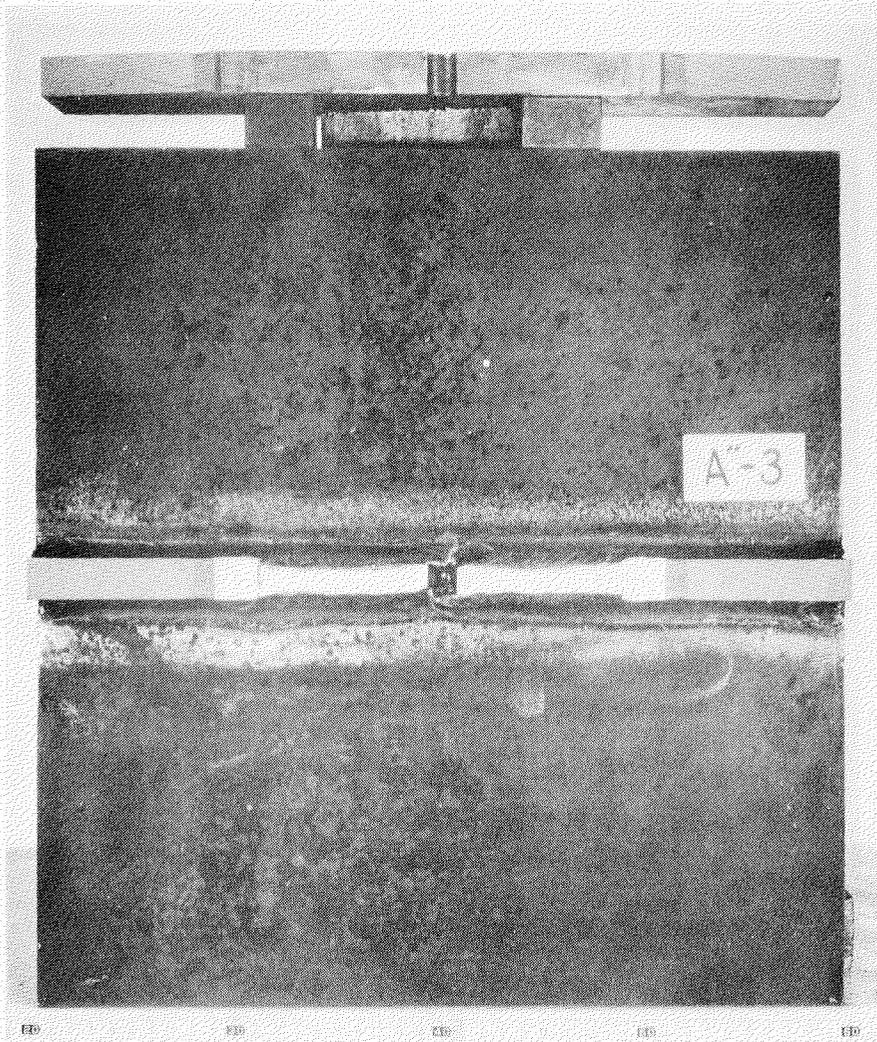
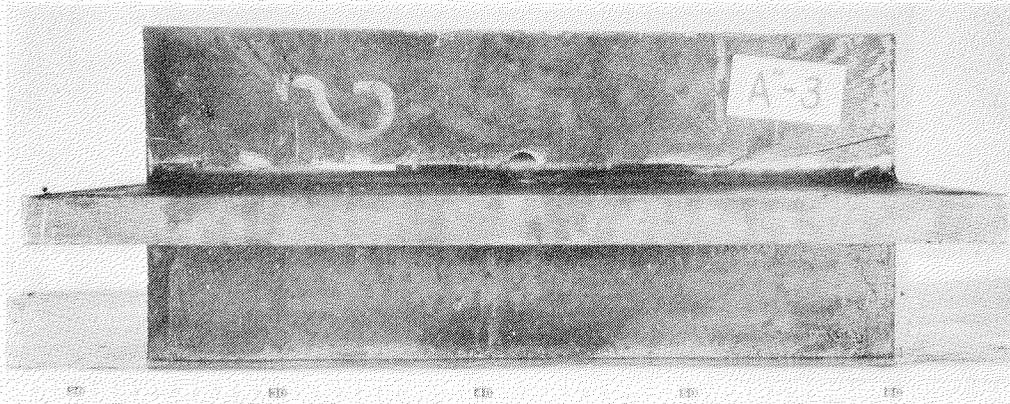


写真15. 疲労亀裂からの脆性破壊発生試験における破断状況  
(A型モデル, 試験温度  $-140^{\circ}\text{C}$ )

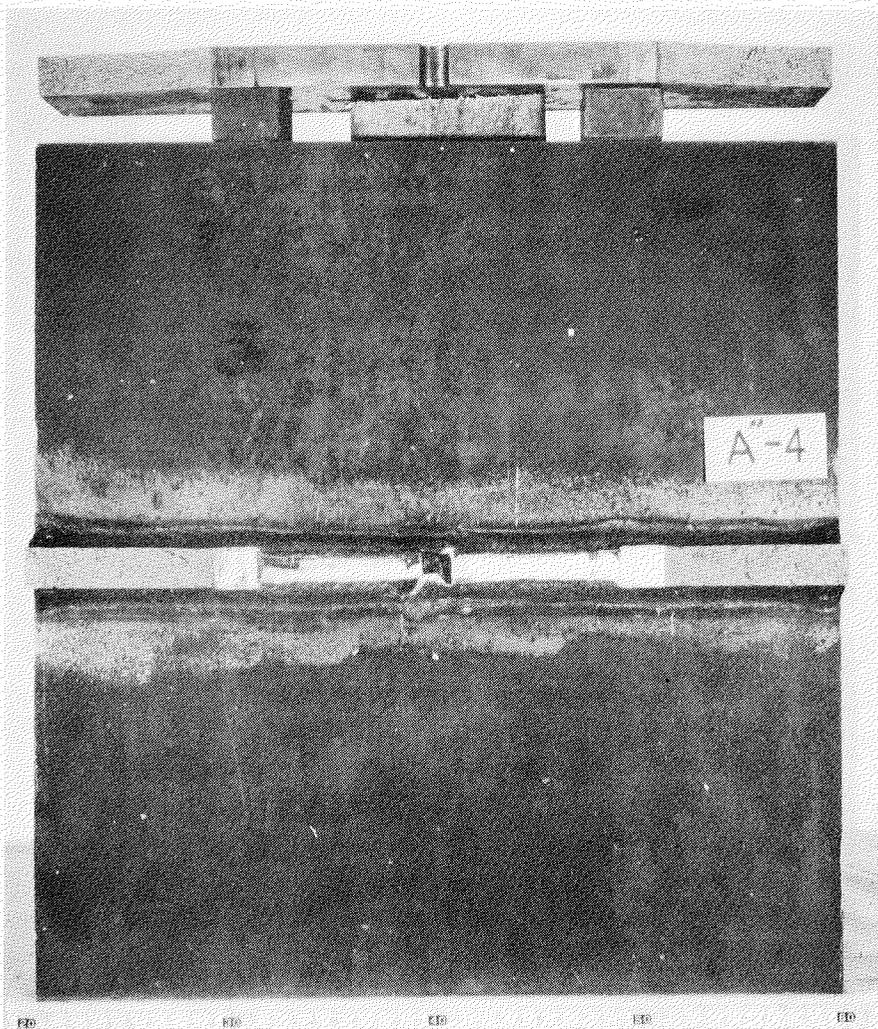
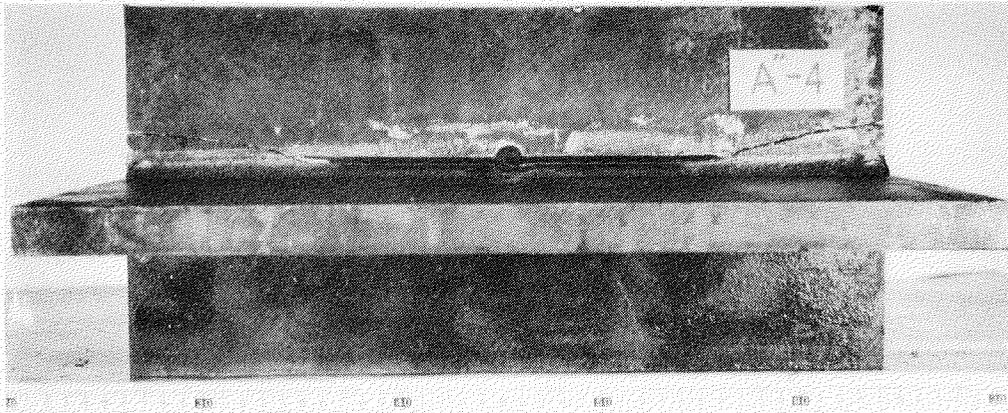


写真16. 疲労亀裂からの脆性破壊発生試験における破断状況  
(A型モデル, 試験温度  $-70^{\circ}\text{C}$ )

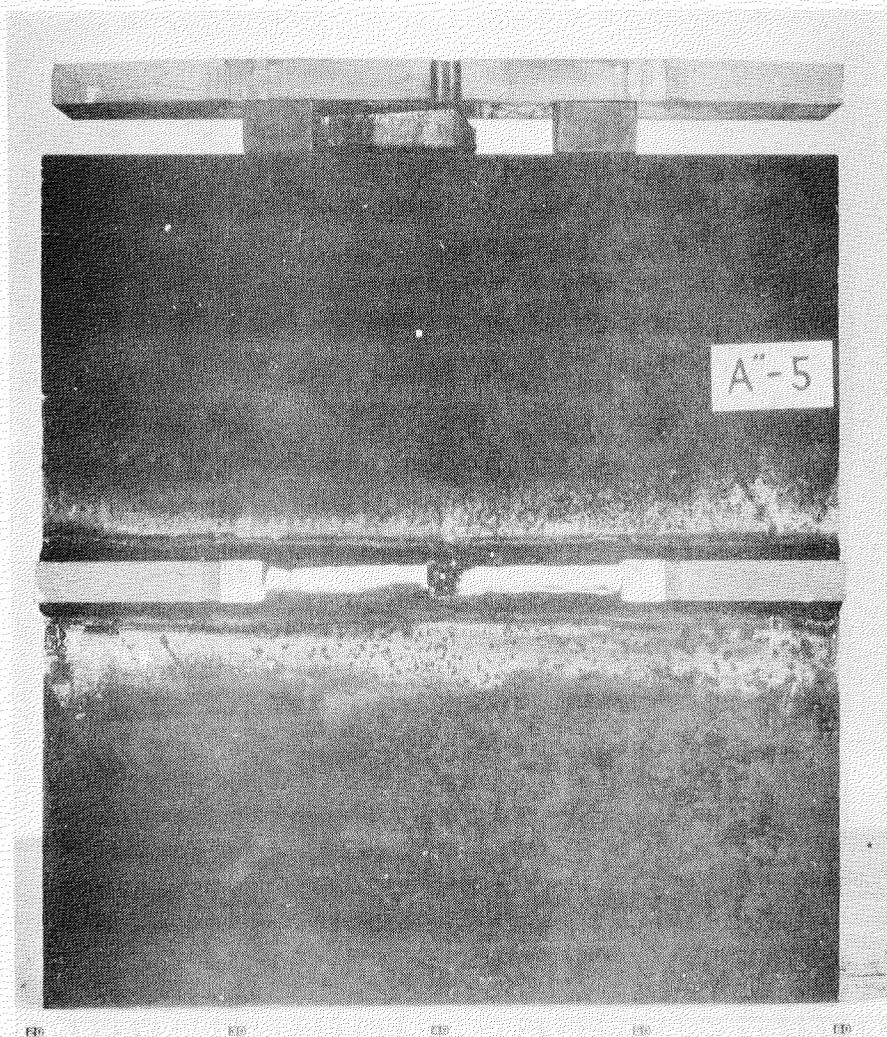
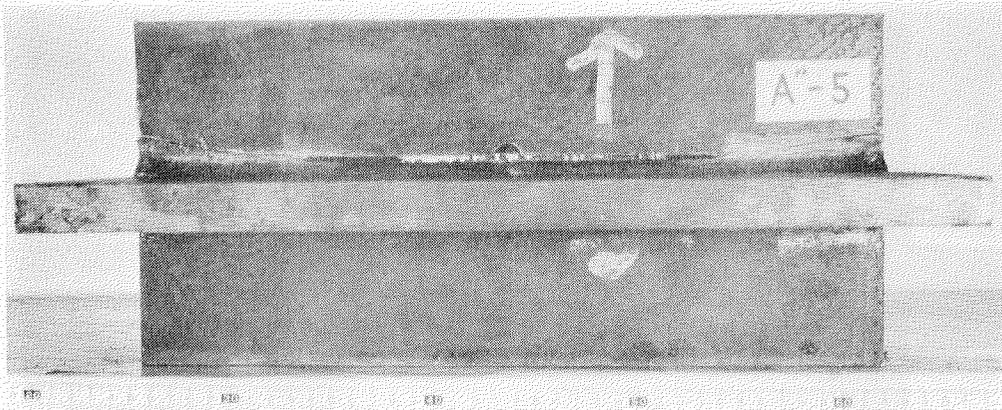
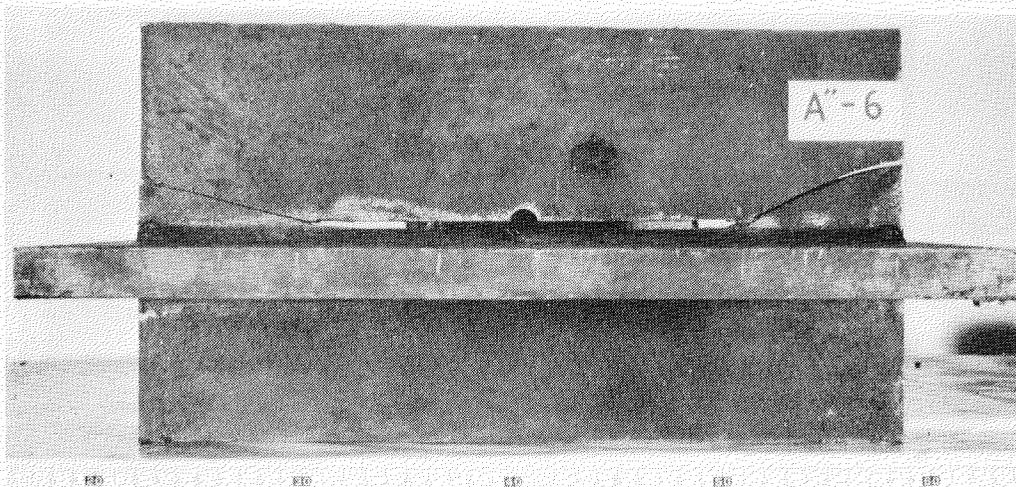
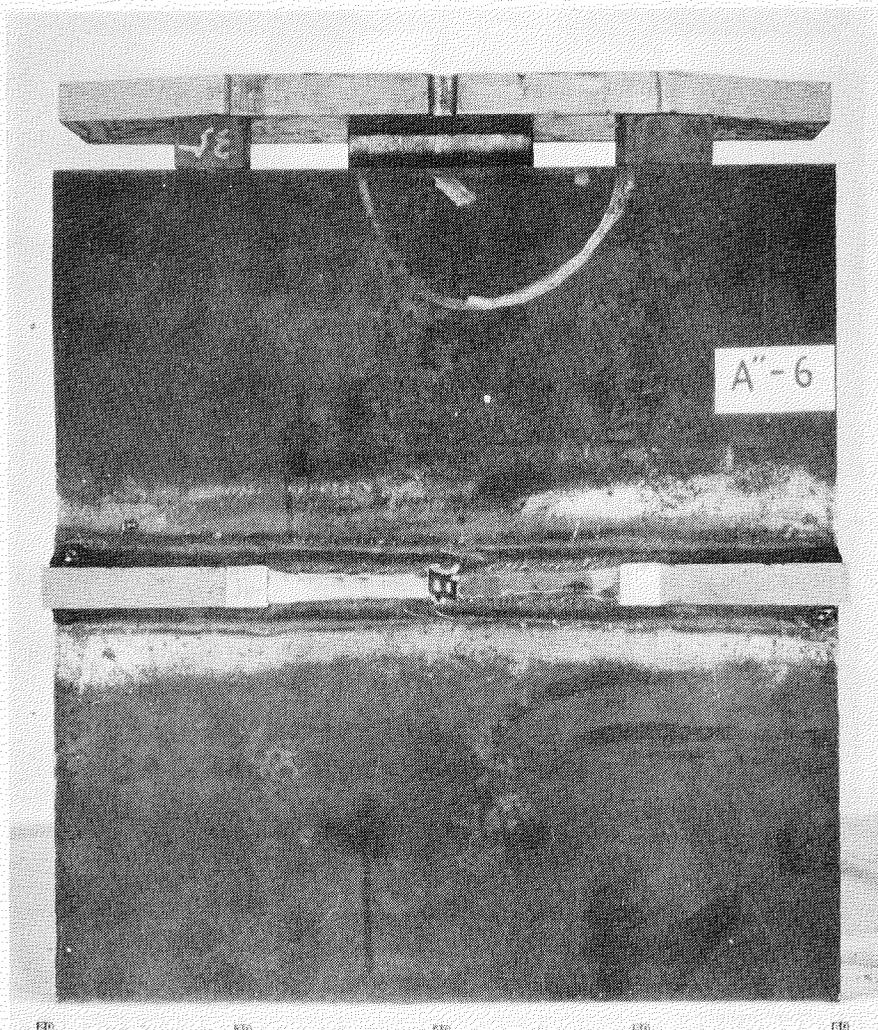


写真17. 疲労亀裂の脆性破壊発生試験における破断状況  
(A<sup>3</sup>型モデル, 試験温度 -160°C)



F10 F10 F10 F10 F10



F10 F10 F10 F10 F10

写真18. 疲労亀裂からの脆性破壊発生試験における破断状況  
(A''型モデル, 試験温度  $-120^{\circ}\text{C}$ )

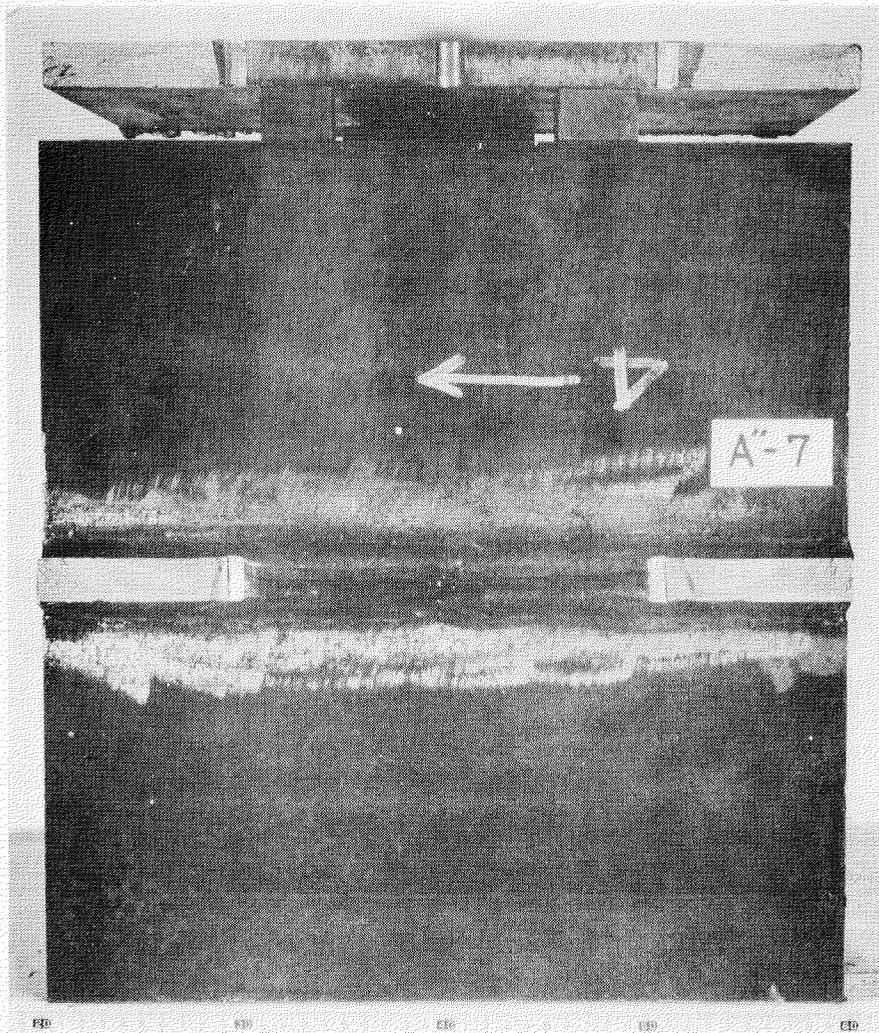
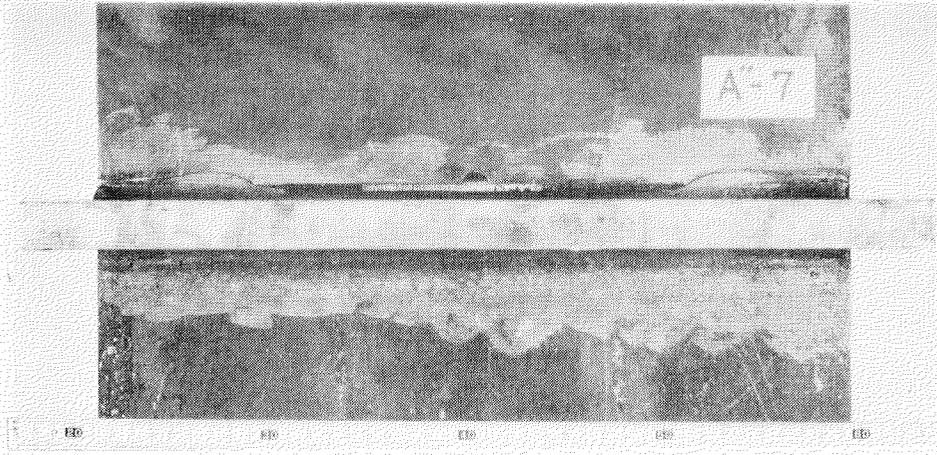


写真19. 疲労亀裂の脆性破壊発生試験における破断状況  
 (A<sup>〃</sup>型モデル, 試験温度 -155℃)

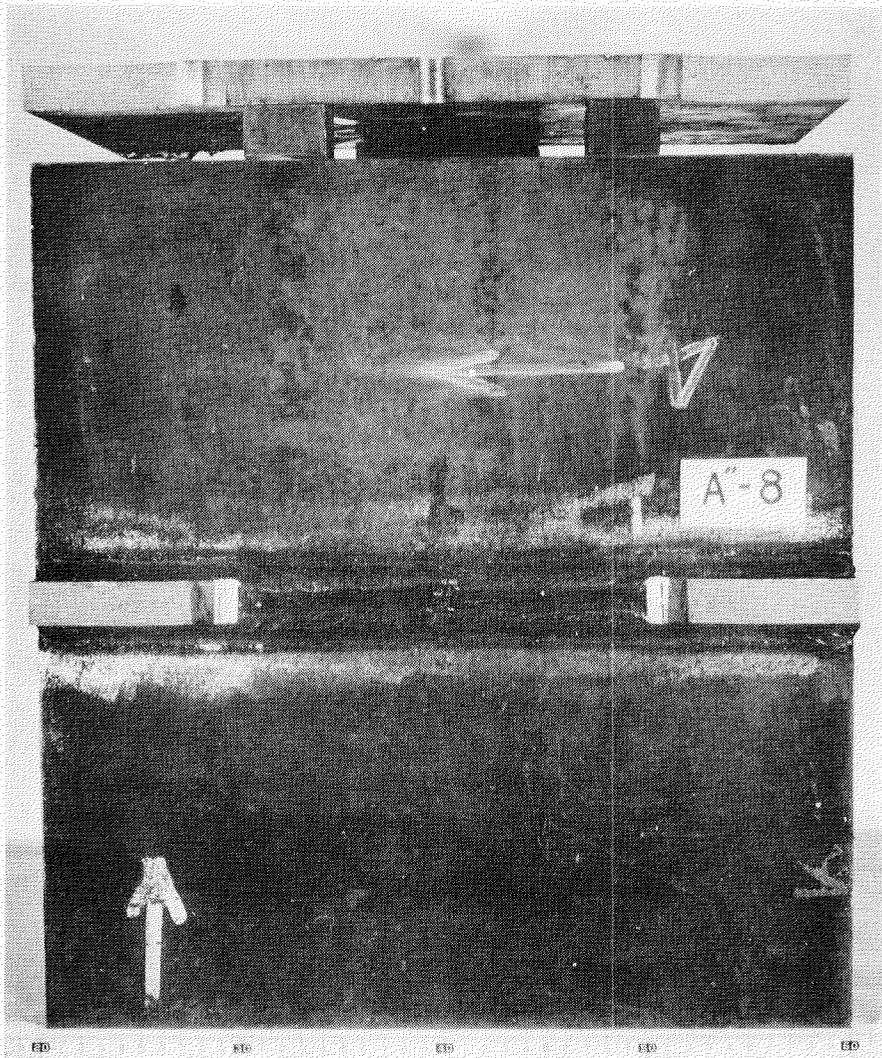
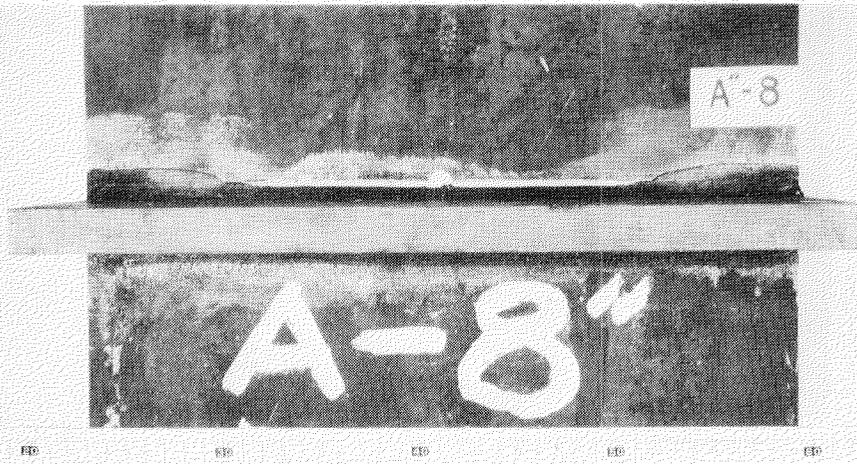


写真20. 疲労亀裂からの脆性破壊発生試験における破断状況  
 (A<sup>〃</sup>型モデル, 試験温度 -120℃)

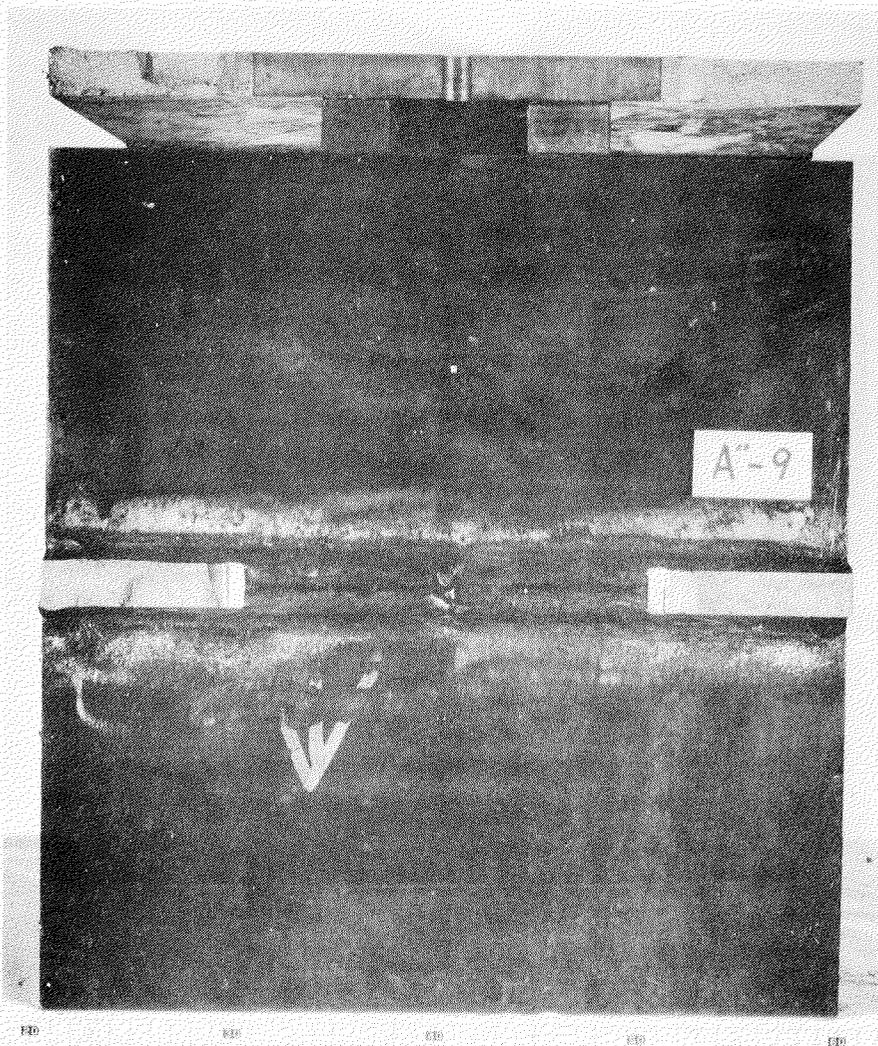
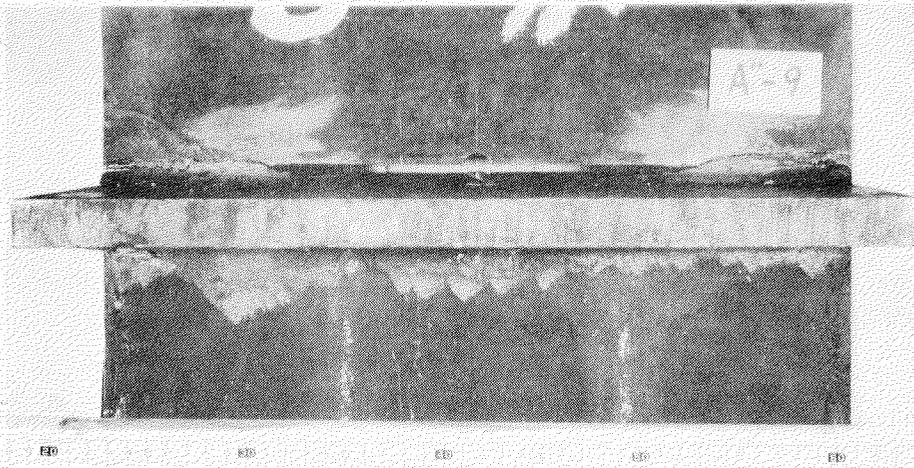
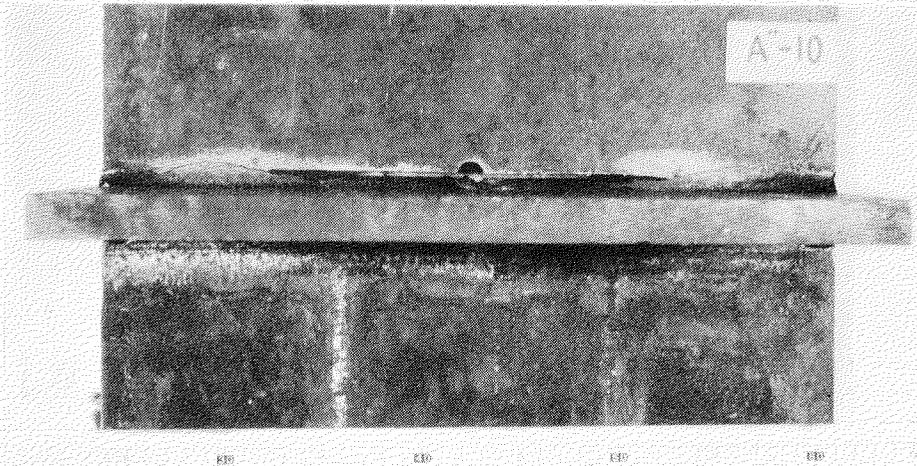
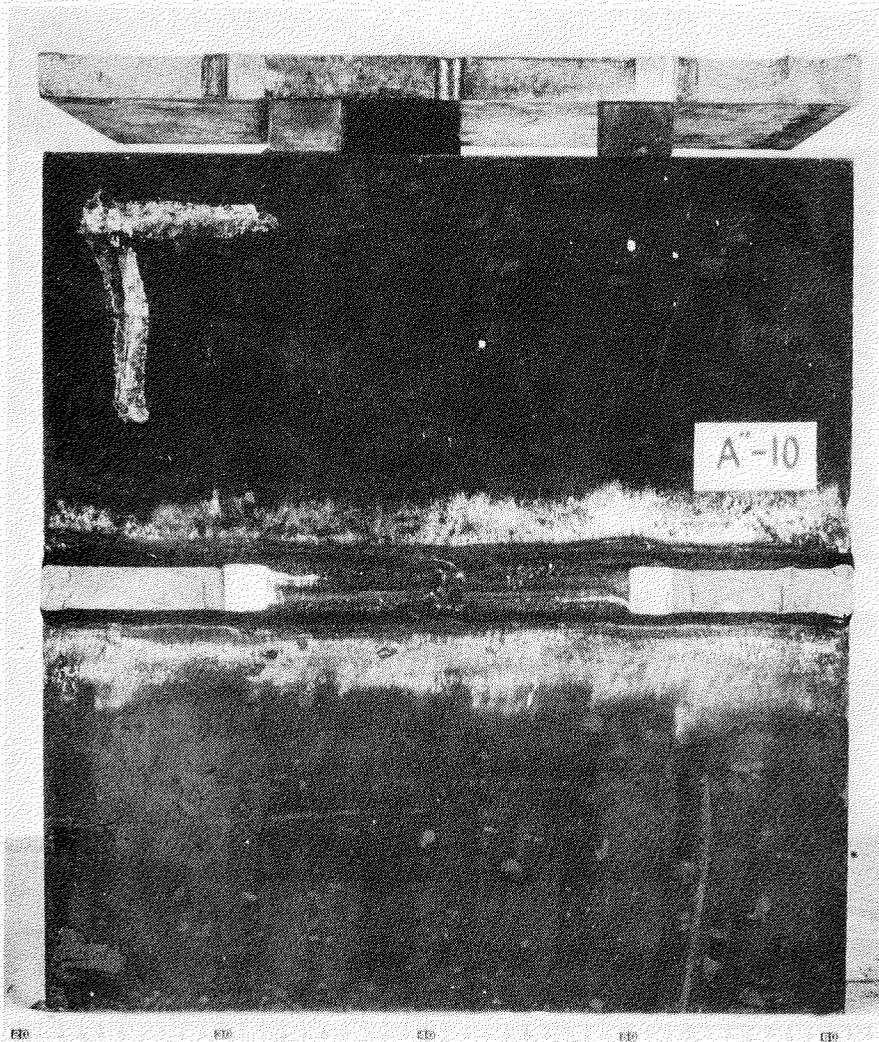


写真21. 疲労亀裂からの脆性破壊発生試験における破断状況  
(A型モデル, 試験温度  $-75^{\circ}\text{C}$ )



EBD EBD EBD EBD



EBD EBD EBD EBD EBD

写真22. 疲労亀裂からの脆性破壊発生試験に於ける破断状況  
(A型モデル, 試験温度  $-170^{\circ}\text{C}$ )

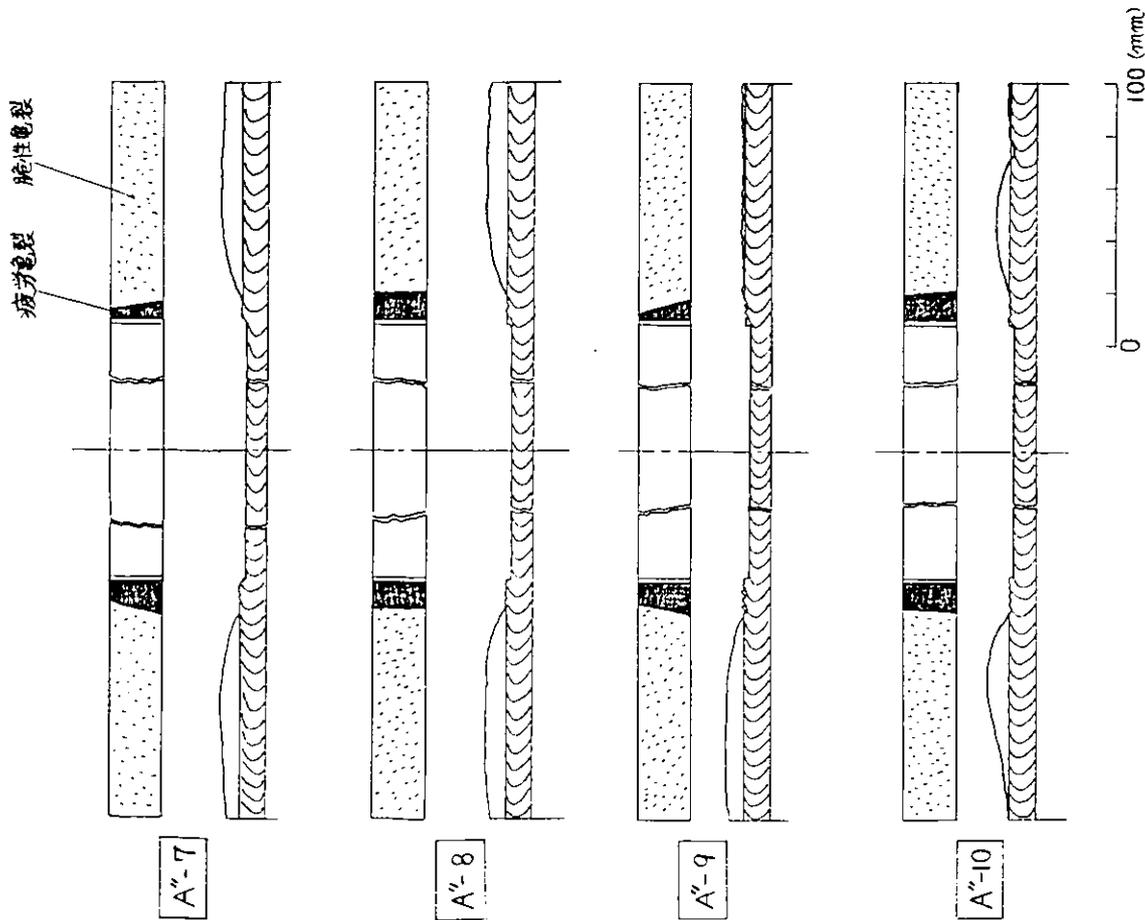


図20. 疲労亀裂および脆性亀裂伝播状況

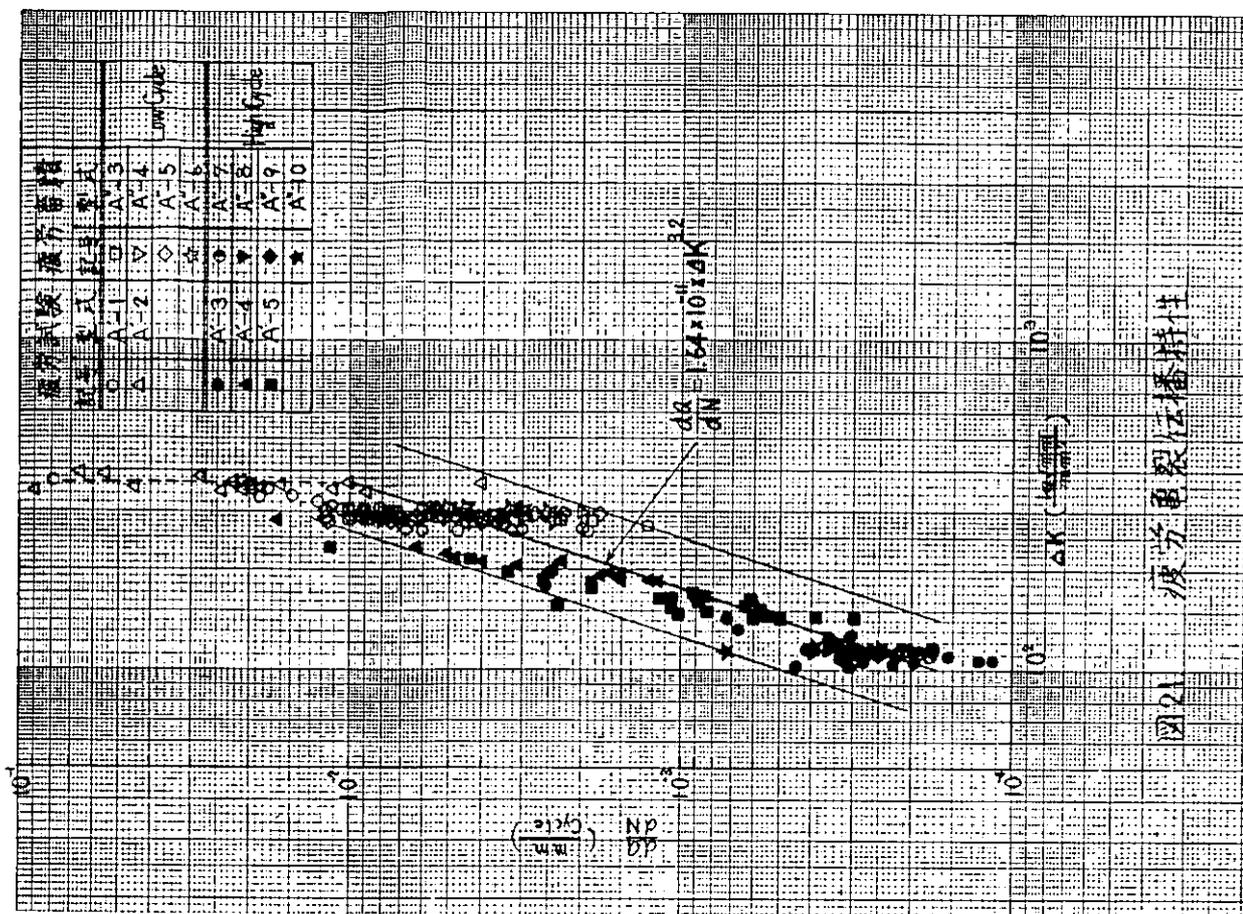


図21. 疲労亀裂伝播特性

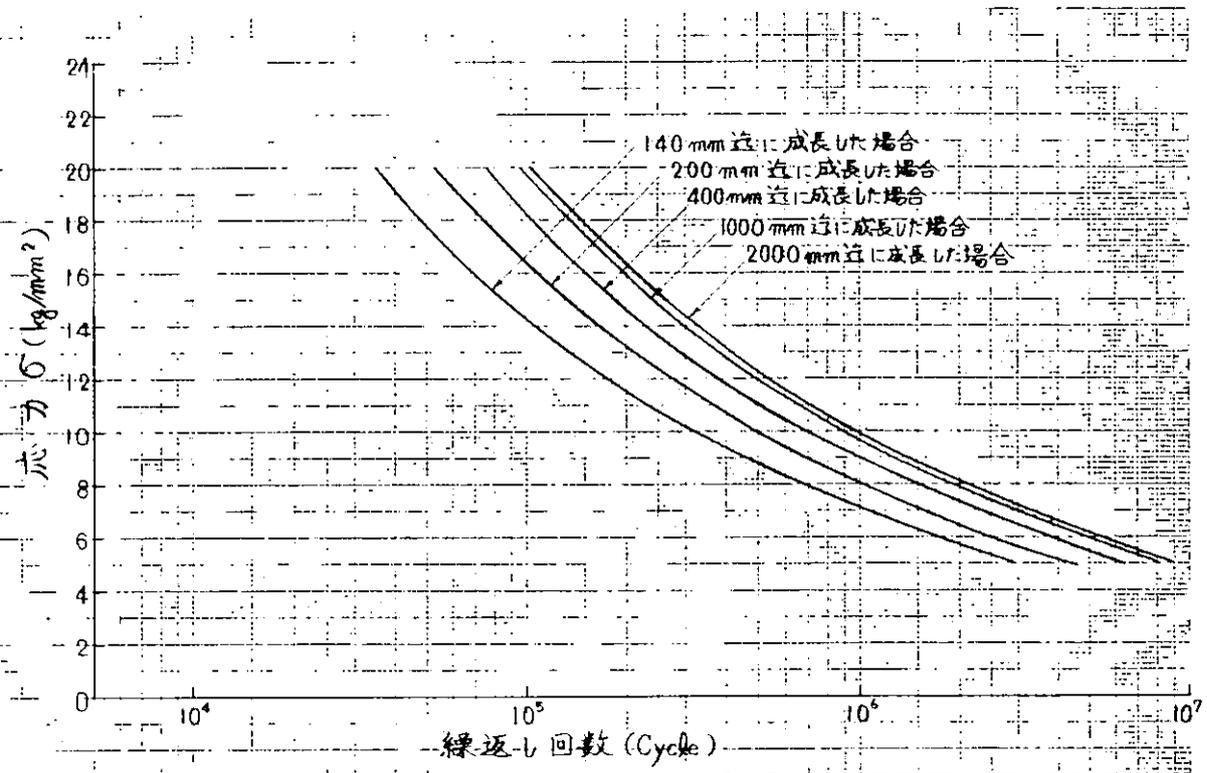


図22. 疲労亀裂伝播特性から推定したS-N線図  
 (初期亀裂長さ80mmからの寿命)

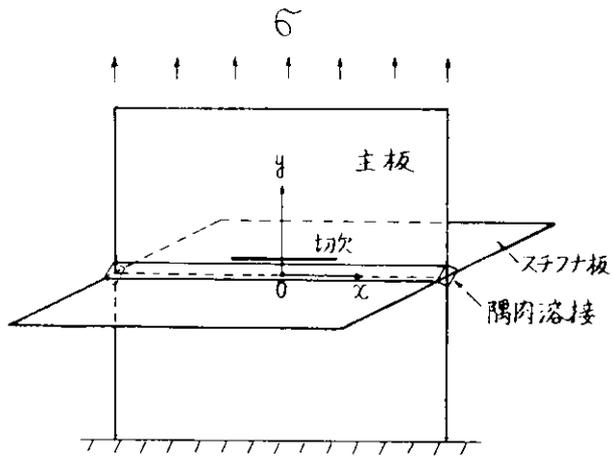


図23. 有限要素法による計算のモデル

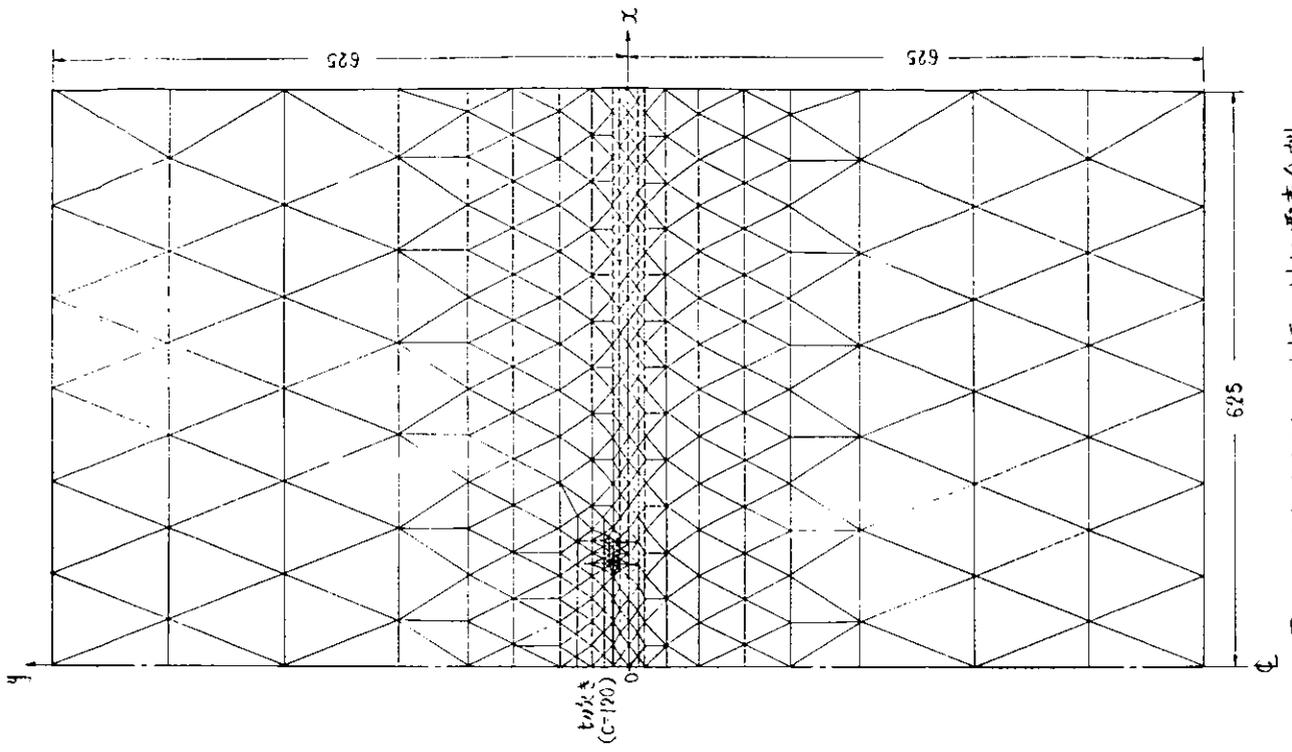


図24(b). RA型モデルの主版に対称要素分割

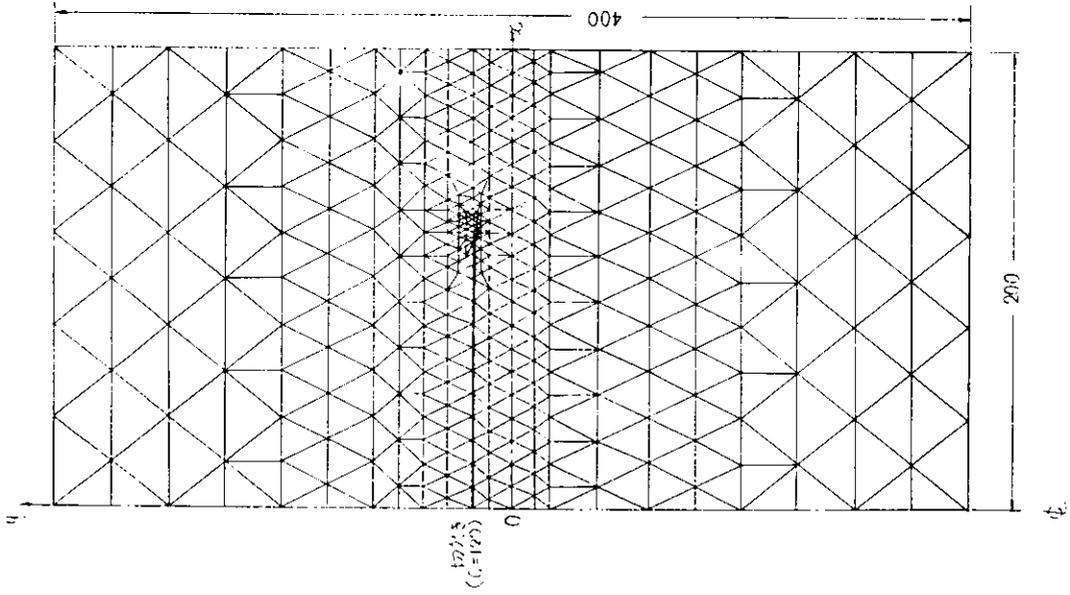


図24(a). A型モデルの主版に対称要素分割

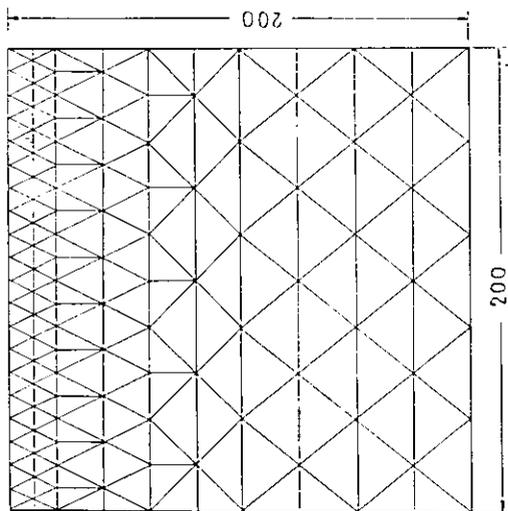


図25(a).  
A型モデルのスタフ板  
に対する要素分割

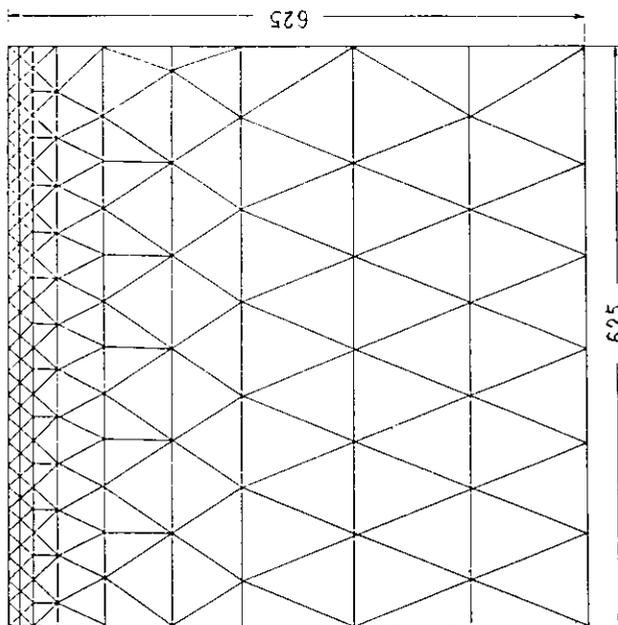


図25(b).  
RA型モデルの  
スタフ板に対する  
要素分割

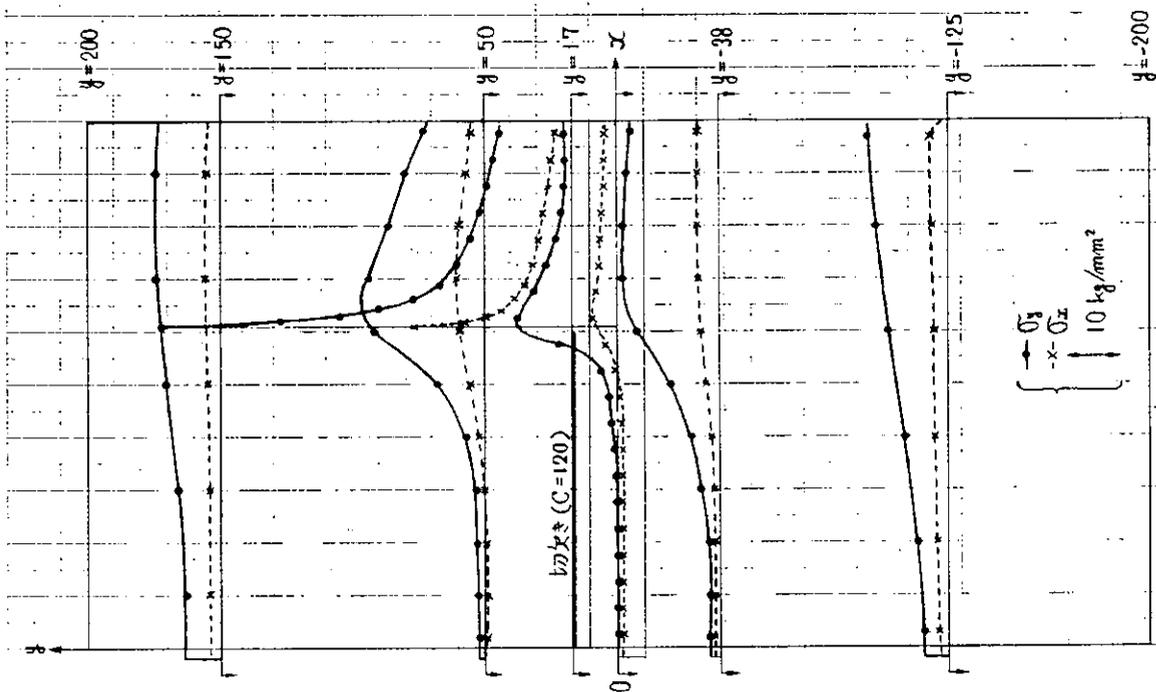


図26(a). A型モデルの主板における応力分布

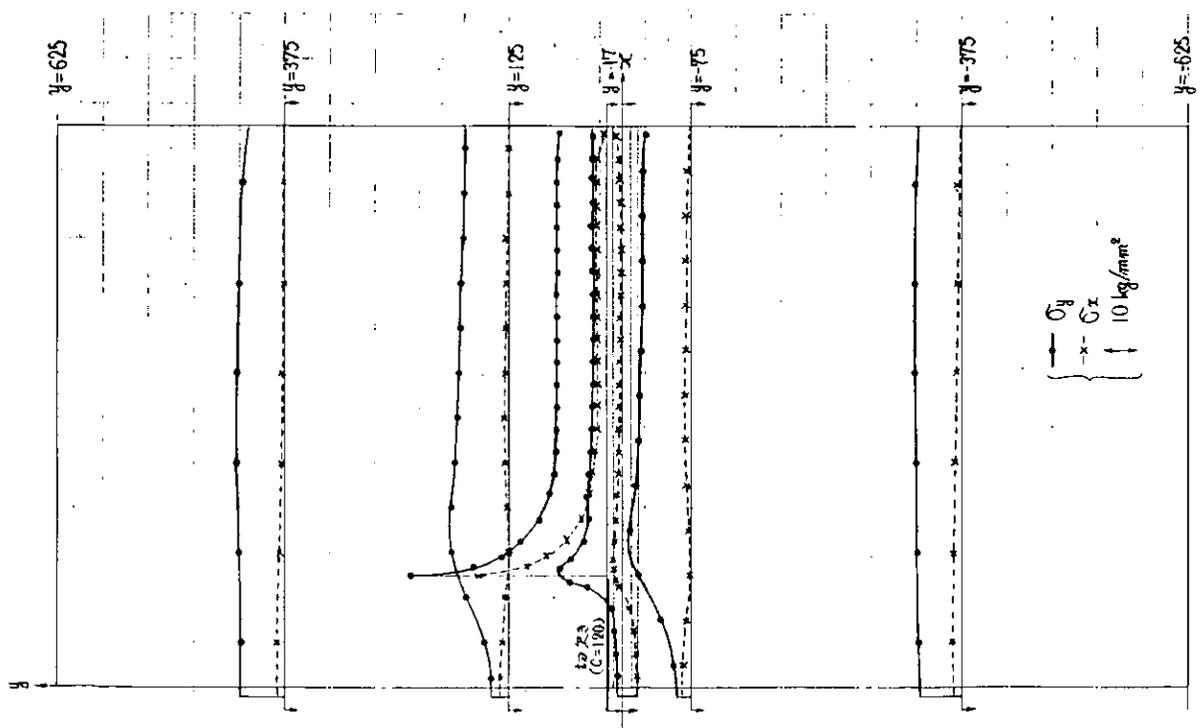


図26 (b). RA型モデルの主板における応力分布

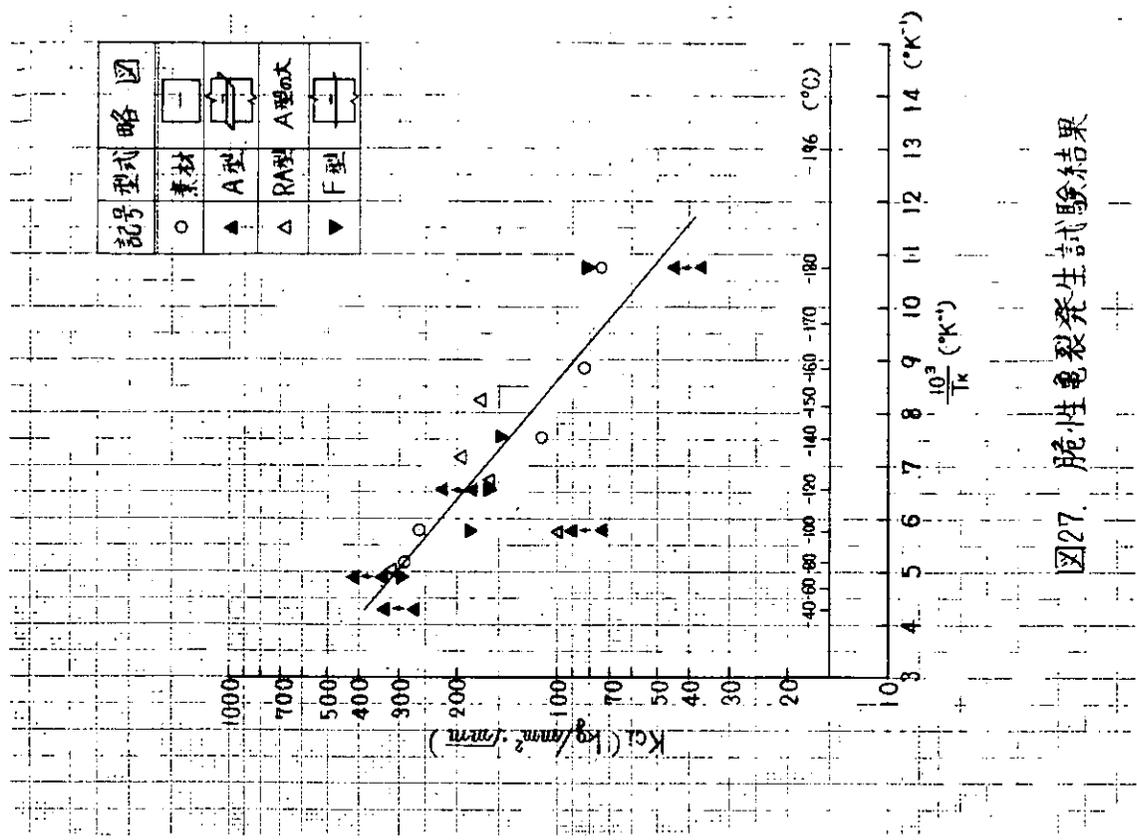


図27. 脆性遷移発生試験結果

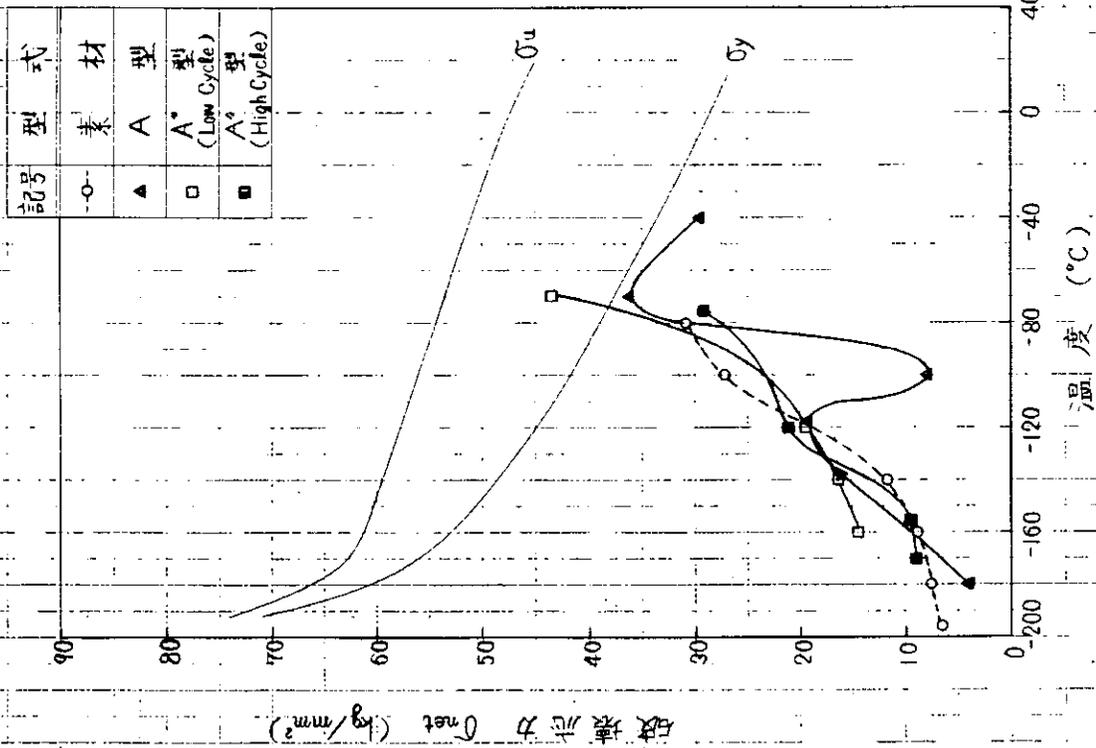


図28. 切削欠きおよび疲労亀裂からの脆性破壊発生試験結果(その1)

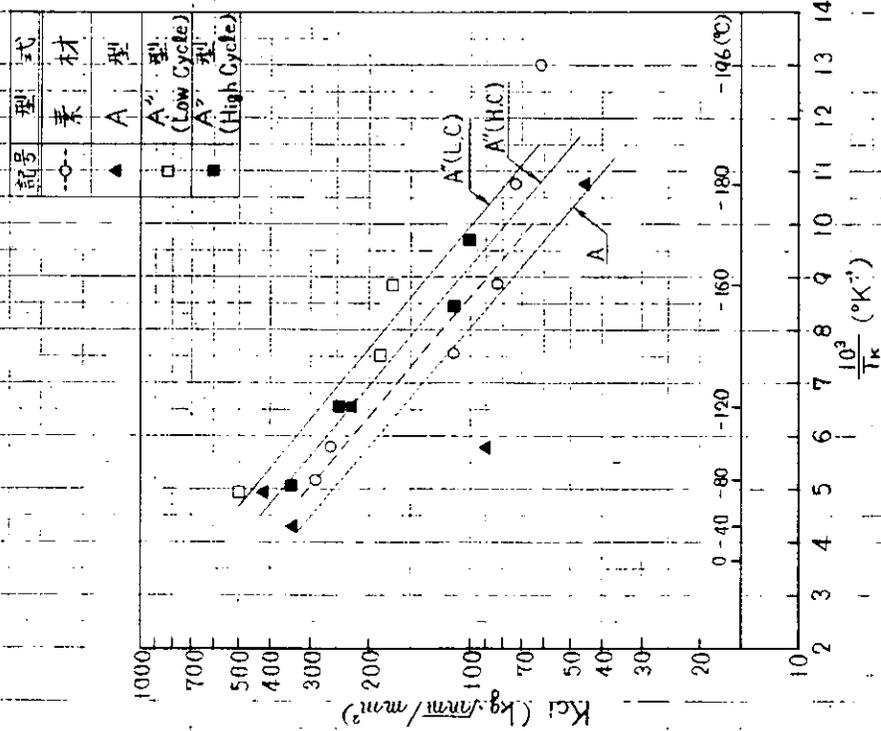


図29. 切削欠きおよび疲労亀裂からの脆性破壊発生試験結果(その2)

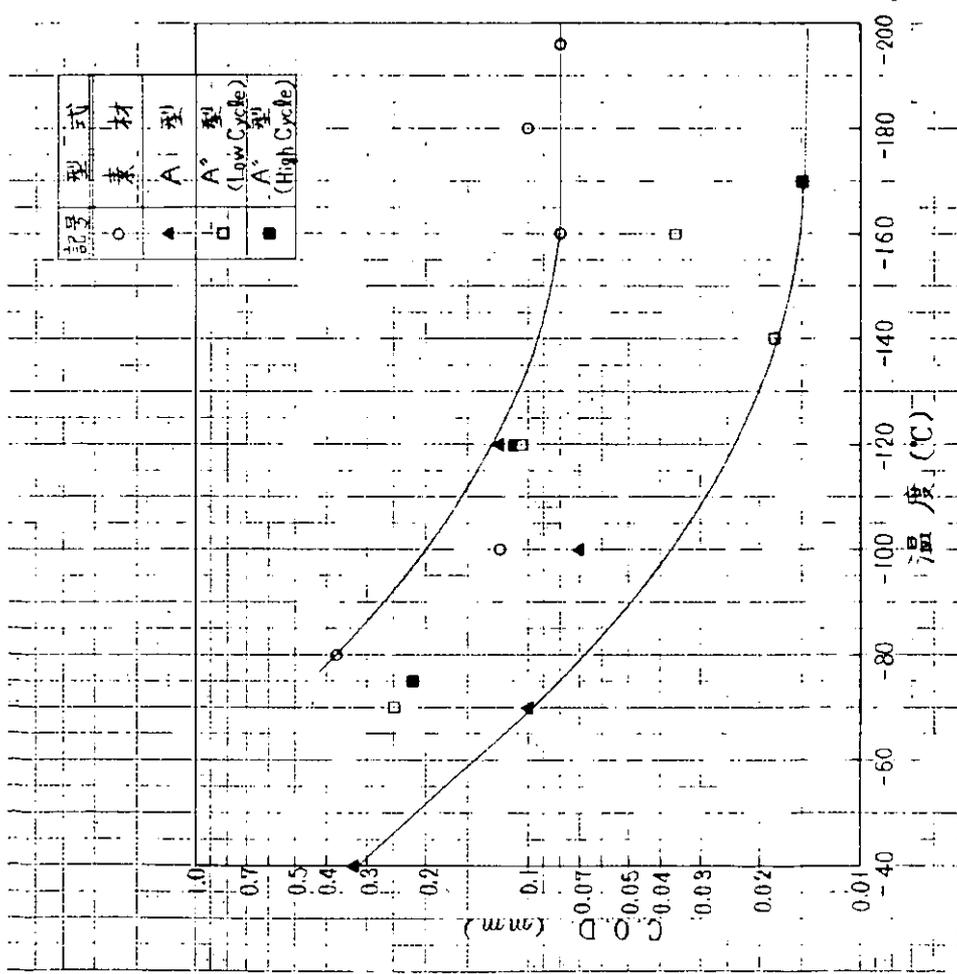


図30. 切削欠きおよび疲労亀裂からの脆性破壊発生試験におけるC.O.D.計測結果

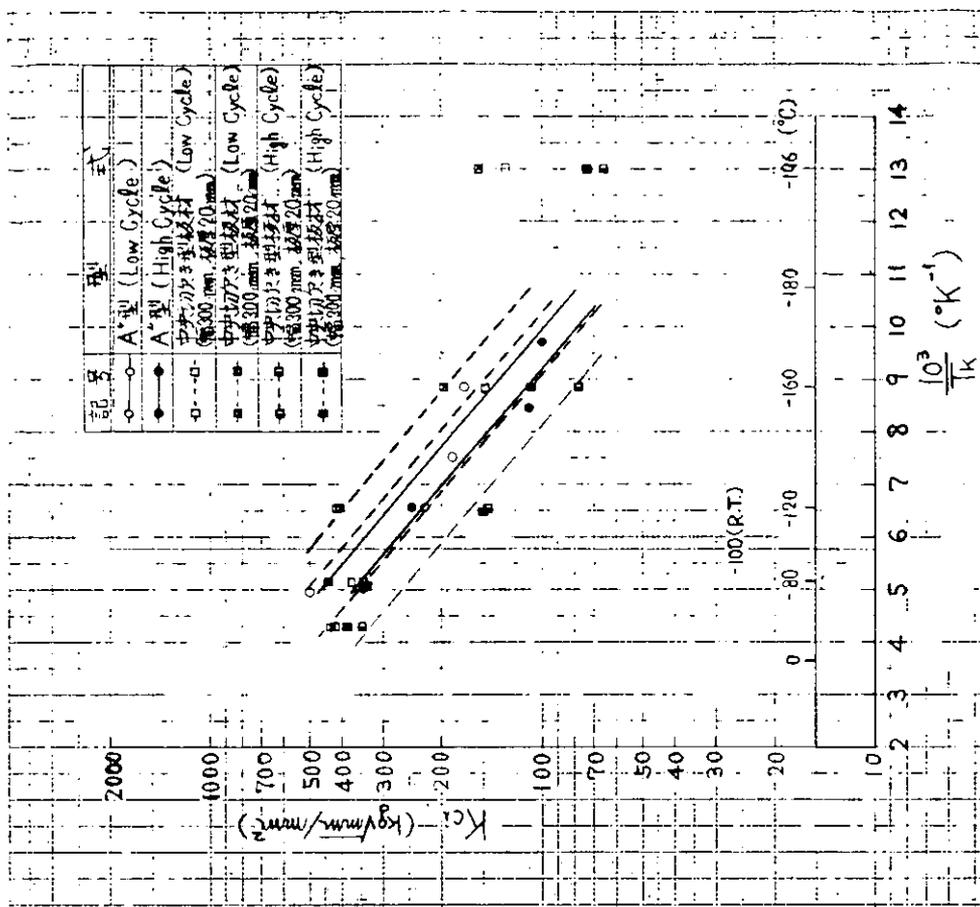


図31. 疲労亀裂からの脆性亀裂発生特性

${}_{20}K_F$ : 疲労蓄積最終時のK値 (試験温度 RT=20°C)

${}_{-100}K_{ci}$ : 疲労亀裂からの脆性亀裂発生限界K<sub>c</sub>値, ただし温度 -100°C に対する値

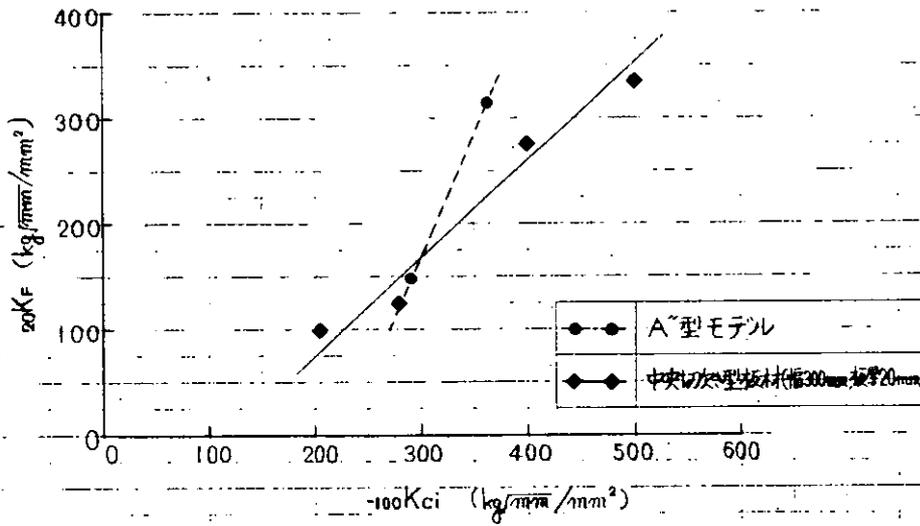


図32 疲労亀裂からの脆性亀裂発生特性に対する疲労蓄積の影響