

日本船舶振興会昭和47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. 169

## 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48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47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)	池田一夫(神戸製鋼)
幹事	飯田国広(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)	梶本勝也(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)
	桑山則夫(住友金属工業)	管 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 槟(長崎大学)	寺井 清(川崎重工業)
	土屋九一(三井造船)	新田 顕(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)	

### 討議参加者(敬称略五十音順)

青木 満(神戸製鋼)	新光明(神戸製鋼)
今井達也(新日本製鉄)	岩城秀夫(日本海事協会)
因 克彦(佐世保重工業)	大塚隆夫(日立造船)
岡部利正(三菱重工業)	織田貞四郎(三菱重工業)
河野誠治(新日本製鉄)	阪井大輔(三菱重工業)
阪野賢治(石川島播磨重工業)	白倉貴雄(神戸製鋼)
多田益男(三菱重工業)	豊岡昭正(川崎重工業)
豊貞雅宏(日立造船)	日野隆博(三菱重工業)
松村裕之(川崎重工業)	三波建市(新日本製鉄)
宮本修治(大阪大学)	矢尾哲也(大阪大学)

## 目 次

1. まえがき	1
2. 研究の目的・内容	1
3. 供試材	2
4. 不連続縦方向スチフナ基部からの脆性破壊発生特性	3
4.1 供試モデルおよび試験内容	3
4.2 試験結果	4
4.3 残留応力計測結果	4
4.4 有限要素法による計算	4
4.5 考察	6
4.5.1 スチフナ高さの影響	6
4.5.2 スチフナ隅肉溶接残留応力の影響	7
5. 縦方向スチフナ端部表面切欠きからの脆性破壊発生特性	7
5.1 供試モデルおよび試験内容	8
5.1.1 脆性破壊の発生試験	8
5.1.2 残留応力の計測	8
5.2 試験結果	9
5.3 残留応力計測結果	10
5.4 考察	10
5.4.1 スチフナ端部の応力分布	10
5.4.2 スチフナ端部の表面切欠きから生じる脆性破壊に影響する要因	10
6. 横方向スチフナ隅肉溶接部表面切欠きからの脆性破壊発生特性	11
6.1 供試モデルおよび試験内容	11
6.2 試験結果	12
6.3 考察	13
6.3.1 切欠き形状の影響	14
6.3.2 横方向スチフナの影響	14
6.3.3 疲労の影響	15
7. 結論	16
8. むすび	17

## 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年度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ったが、本報告書はその第3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。

脆性破壊発生に関しては、これまで疲労亀裂との関連性に重点を置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。<sup>1), 2)</sup> 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次元立体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、以下の研究を実施した。

### (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した。

### (2) 脆性破壊発生試験

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破壊発生試験を実施した。

### (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・成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した。

### (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した。

### (5) 残留応力計測

脆性破壊発生試験・疲労試験・疲労亀裂からの脆性破壊発生試験等に供試したモデルの残留応力分布を計測した。

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47年度は、昭和45年度<sup>3)</sup>および昭和46年度<sup>4)</sup>に実施した諸試験の供試鋼と同一鋼種、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、脆性破壊発生試験、疲労亀裂からの脆性破壊発生試験、残留応力計測等を実施した。

## 3. 供試材

供試材は、45年度および46年度に実施した諸試験の供試鋼と同一鋼種の鋼板、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。供試材の化学成分ならびに機械的性質を表3.1に示す。

後述の各種試験に供試した試験片の板取り要領を図3.1～図3.3に示す。

供試材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、6mmおよび8mm丸棒引張試験片を供試して、室温～-196°Cにて引張試験を実施した。試験結果を図3.4に示す。さらに、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-ノッチおよびプレス-ノッチシャルピー衝撃試験を実施した。試験結果を図3.5、図3.6に示す。

また、供試材の脆性亀裂発生特性を把握するため、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を実施した。試験結果を表 3.2, 図 3.7, 図 3.8 および図 3.9 等に示す。表 3.2, 図 3.8 に示した  $K_c$  値は、脆性亀裂発生に関する Fracture Toughness の Parameter で、次式により、求めたものである。

$$K_c = \bar{\sigma}_g \sqrt{\pi c} \sqrt{\frac{2b}{\pi c} \tan \frac{\pi c}{2b}} \quad \dots \quad (3.1)$$

ただし、 $\bar{\sigma}_g$  = Gross Stress

$2b$  = 試験片幅 (mm)

$2c$  = 切欠き全長 (mm)

さらに、表 3.2, 図 3.9 に示した限界 C.O.D 値  $\delta_c$  は、Be-Cu 製のクリップゲージにより、切欠き先端から 6 mm 離れた位置で計測した値（表裏面の平均値）から、切欠き先端での限界 C.O.D. 値を推定した値である。

以上の今年度（47年度）供試材の各種機械的性質と、45年度および46年度供試材の機械的性質とを比較すると表 3.3 のごとくなる。すなわち、標準プレスノッチシャルピー衝撃試験結果を除いては、ほぼ等しい性質を有すると判断してよさそうである。

#### 4. 不連続縦方向スチフナ基部からの脆性破壊発生特性

主板に不連続な縦方向（荷重方向）スチフナが隅肉溶接によってついているような拘束部を有した 3 次元立体モデルにおいて、そのスチフナ高さが脆性亀裂発生特性に及ぼす影響を、電子計算機を用いた有限要素法による計算、あるいは実験により把握することが目的である。

##### 4.1 供試モデルおよび試験内容

供試モデルは、荷重方向に不連続なスチフナ（スチフナ間隔なし）を主板に隅肉溶接した 3 次元立体モデル（R H 型モデルとよぶ）である。スチフナは断続しており、その形状および寸法を図 4.1 に示す。同図に示すスチフナ高さを 100, 250, 500, 750 mm の 4 種に変化させてその影響を調べる。

また、スチフナ不連続部の主板には、荷重直角方向に長さ 30 mm の中央切欠きを隅肉溶接する前に機械加工により設けてある。試験条件を表 4.1 に示す。隅肉溶接することにより残留応力が生ずるが、スチフナ高さのみによる影響を把握するために、供試モデルは 3 体を除き応力除去焼純（SR）した。その条件としては  $625^{\circ}\text{C} \times 0.8 \text{ hr}$ . とした。

溶接ままの供試モデルとして、スチフナ高さ 250 mm と 500 mm のものそれ

それ2体および1体の計3体を供試した。スチフナ高さ250mmと500mmの各1体につき脆性破壊発生試験を行ない、さきの応力除去焼鈍を施した供試モデルの試験結果と比較検討することにより、溶接残留応力の影響を調べることにした。残りのスチフナ高さ250mmの供試モデル1体は溶接残留応力測定用とした。

#### 4.2 試験結果

脆性破壊発生試験結果を表4.1および図4.2に示す。ただし破壊応力 $\sigma_n$ は破壊時の切欠き断面における平均応力である。図4.2において“素材（スチフナなし）”はRH型モデルの主板と同じ形状および寸法をもつ平板（以後平面モデルとよぶ）の破壊応力 $\sigma_n$ を、先に述べた供試材（素材）の破壊靱性値と温度の関係（図3.8参照）から推定したものである。

#### 4.3 残留応力計測結果

溶接残留応力が脆性亀裂発生特性に及ぼす影響を定量的に把握するために、スチフナ不連続部の主板における溶接残留応力を全幅にわたって測定した。2方向抵抗線歪ゲージを表裏面に貼付し、測定点の周囲20~25mmをドリルおよび機械鋸により切断し、そのときの解放歪から溶接残留応力を求めた。測定結果を図4.3に示す。 $\sigma_x$ および $\sigma_y$ はそれぞれ図4.1に示した座標軸の、 $x$ 軸方向および $y$ 軸方向の応力である。

測定された溶接残留応力分布は、突合せ継手の場合と非常によく似ている。図4.3からわかるように、 $\sigma_y$ の分布は、その正負の値が必ずしも釣合っていないようである。これは隅肉溶接であるため、表面と板厚中心でその分布が異なっていることが原因しているのではないかと思われる。

#### 4.4 有限要素法による計算

図4.1に示した供試モデルにおける、スチフナ高さの脆性亀裂発生特性に及ぼす影響を調べるために、有限要素法による計算を行なった。これは平面応力状態での弾性計算であり、スチフナ高さの幾何学的影响のみを調べるために行なったものである。したがって、隅肉溶接による熱サイクルの影響や主板の切欠き先端での板厚方向の塑性拘束は考慮されていない。

まず、歪エネルギー解放率に対応する破壊発生のParameter K ( Stress Intensity Factor)を計算する。その計算法には、切欠き先端の応力分布、あるいは開口変位分布などから求める方法があるが、ここではTotal Energy Methodを用いた。

この方法は、図4.4に示すような定荷重状態で、切欠き（クラック）が微小

長さだけ伸びた時の外力仕事の半分が、構造物全体のエネルギー減少量の絶対値に等しいことを利用してG値(Crack Extension Force)を求める。

すなわち、

$$G = \frac{1}{2} \sum P \cdot \frac{\Delta \delta}{\Delta C} \quad \text{----- (4.1)}$$

よりG値を求め、さらに次式を用いてK値を求める方法である。

$$G = \frac{K^2}{E} \quad \text{----- (4.2)}$$

計算に当っては問題の対称性より供試モデルの $1/8$ のみを考えることにした。次に供試モデルの境界条件として、図4.5(a)の $y = 800\text{mm}$ のところでの応力分布を考えると、供試モデルのスチフナ高さが大きいもの( $750\text{mm}$ のもの)では、試験体の全長(約 $5,000\text{mm}$ )から考えると、図4.5(b)に示すような一様な分布荷重になるかどうか疑わしく思われたので、載荷時の各位置での応力分布を測定した。その結果を、スチフナ高さ別に図4.6(a)~(d)に実線で示す。同図には、図4.5(a)に示すように供試モデル全体の $1/8$ を考えた場合の有限要素法による計算結果も破線により示した。なお、計算に用いた要素分割図を図4.7に示す。

図4.6に示したごとく、いずれも $y = 625\text{mm}$ の主板に近い位置で、計算による応力と実測による応力との間に少し差があるのは、計算において同部のスカラップを考慮しなかったためであるが、この部分を除外すれば、実験結果と計算結果は比較的よく一致していることがわかる。

図4.5(b)に示したような一様分布荷重と仮定した場合、および図4.5(c)に示したような実測した応力を境界条件として用いた場合について、有限要素法によりK値を求め、それぞれ破線および実線により図4.8に示す。ここで縦軸はスチフナがない場合( $K_0$ )に比較してスチフナがある場合のK値の倍率を示す。

なお、切欠きがある場合の、有限要素法による計算に用いた要素分割図を、図4.9に示す。

図4.8において、スチフナが低いところでは両者の間にそれほど差がなく、一様分布荷重と見なしてさしつかえないようであるが、スチフナ高さが $750\text{mm}$ にもなると両者の差はかなり大きい。以後、K値としては実測した応力分布を境界条件として計算した値を用いて考察する。前述したように、供試モデルに対する境界条件として考えている $y = 800\text{mm}$ での実測による応力分布は、有限要素法の計算結果と非常によく一致しており、今後は逐一境界での応力分布を実測しなくとも計算結果による値を用いてK値を求めることができる。

各種のスチフナ高さを有する供試モデルの脆性破壊発生試験で得られた破壊応力と、有限要素法で得られた図4.8の計算結果を用いて算出した $K_c$ 値を、図4.10に示す。同図には、比較のために先に述べた供試材(素材)のディープノ

ノッチ試験の結果も示してある。

#### 4.5 考察

不連続縦方向スチフナを有し、しかもスチフナ不連続部に鋭い切欠きが存在するようなRH型モデルの脆性亀裂発生特性に影響を及ぼす大きな因子として、次の4点が考えられる。

- (1) 構造上の不連続による応力集中
- (2) スチフナによる主板の板厚方向の塑性拘束
- (3) 隅肉溶接による残留応力
- (4) 隅肉溶接による熱サイクルのための材質変化

大部分の供試モデルを応力除去焼鈍することによって、残留応力の影響という因子を除外して、上記の(1)および(2)、すなわち、スチフナ高さのみによる影響を調べたことは前述した通りである。また、前項に述べたように、有限要素法の計算結果から上記の(1)、すなわち、構造上の不連続による応力集中の効果がわかるので、破壊試験結果と有限要素法による計算結果を比較・検討することによって、上記(2)の板厚方向の塑性拘束の影響が明らかになると考えられる。また、応力除去焼鈍されていない溶接ままの供試モデル2体の破壊試験結果と、他の応力除去焼鈍をした供試モデルの破壊試験結果を比較することによって、隅肉溶接による残留応力の影響が明らかになると考えられる。また、上記の(4)、すなわち、隅肉溶接による材質変化は既報の昭和46年度報告書<sup>4)</sup>で述べたように、貫通切欠きの場合、脆性破壊の発生点が隅肉溶接のとき熱サイクルの影響を受けにくい板厚中心部であるためか、ほとんどないと考えられる。

##### 4.5.1 スチフナ高さの影響

構造上の不連続による応力集中のみを考慮した有限要素法による計算結果、すなわち図4.8の実線と、図4.10の実線で示す素材のディープノッチ試験で得られた破壊靱性値を用い、不連続縦方向スチフナがある場合の破壊応力を推定できる。その結果を図4.11に示す。

RH型モデルはスチフナ高さの大小にかかわらず、-100°C以下ではスチフナがない平面モデルに比べて破壊応力が大きく減少していく、その値は平面モデルの1/3～1/4である。また、これらの推定が有効である、Small Scale Yielding状態、すなわち切欠き先端の塑性領域の寸法が切欠き長さに比べて小さい低応力破壊の領域、つまり-100°C以下の温度範囲では、応力除去焼鈍した場合の破壊応力と計算による推定値とは比較的良い一致をみている。このことから、このような低応力破壊の領域では塑性拘束の影響が少ないようと思われる。

しかし、平面モデルにおいて破壊応力 $\sigma_n$ がほぼ降伏応力 $\sigma_y$ に等しく、かつ破面が脆性である領域、いわゆるⅡの領域、すなわち-100°C～-20°Cの温度範

図では、スチフナ高さによらず、破壊応力～温度曲線はほぼ单一の曲線で表わされるようである。なお、破壊応力が同一温度での降伏応力より若干低いのは、塑性拘束の影響によるものであろう。したがって、このような温度範囲における塑性拘束の影響を定量的に把握することは、今後に残された課題といえよう。もし、今回のような試験体と異なり、スチフナ長さがその高さに比べかなり大きいような、実際に近い供試モデルの場合には、境界条件が図4.5(b)に示すような一様分布荷重に近い状態となるため、スチフナ高さの影響が顕著になることは、図4.8の有限要素法による計算結果からも容易に推測できる。

#### 4.5.2 スチフナ隅肉溶接残留応力の影響

スチフナ高さ250 mmおよび500 mmのものに対する溶接ままおよび応力除去焼鈍をした供試モデルの破壊試験から、溶接残留応力がRH型モデルの脆性破壊発生特性に及ぼす影響をもとめる。表4.1においてスチフナ高さ250 mmの場合、試験片符号RH-5とRH-7の破壊応力 $\sigma_n$ の差が約4.4 kg/mm<sup>2</sup>であることがわかる。また、スチフナ高さ500 mmの場合は、溶接ままの試験片符号RH-11に対応する同一温度の結果がないため、それと比較してあまりスチフナ高さの影響がないと考えられるスチフナ高さ750 mmの場合の試験片符号RH-14の破壊応力を比べると、約5.2 kg/mm<sup>2</sup>である。いずれにしろその影響は破壊応力 $\sigma_n$ にして4～5 kg/mm<sup>2</sup>と考えられる。これは、切欠きが存在する範囲で図4.3に示した溶接残留応力が直接そのまま弾性的に影響するのではなく、その一部が有効に働いているように思われる。この原因は今のところよくわからないが、溶接残留応力が負荷に重畠して、溶接近傍の大きな引張残留応力場は局部的に過負荷状態になり、そのために起こる塑性変形により応力緩和が起こっていることや、貫通切欠きの場合の脆性破壊発生点である板厚中心では、隅肉溶接による残留応力は表裏面のそれより小さいことなどが原因しているのではないかと思われる。

また、破面を観察すると、主板に切欠き加工をした後に隅肉溶接しているため、この隅肉溶接部の大部分は破壊試験前に割れていたことがわかる。しかし、主板の表裏およびスチフナの左右、計4ヶ所の隅肉溶接部のうち、中には割れていなかつたものもあり、これが実験点のばらつきの一因となっていることも考えられる。さらに、材料のばらつきならびに供試モデル製作上の工作誤差等も、実験点のばらつきの一因と考えられる。

### 5. 縦方向スチフナ端部表面切欠きからの脆性破壊発生特性

スチフナ端部、プラケット端部あるいはスロット部などの隅肉まわし溶接部分には、きびしい応力繰返し条件のもとでは疲労亀裂を生じることがある。こ

これは3次元的な構造的不連続による応力集中と溶接ビードトウ部の局部的応力集中がおもな原因になっていると考えられる。また、まわし溶接部近傍には複雑な溶接残留応力が分布しているため、疲労亀裂から生じる脆性破壊の発生特性を明らかにしておくことは、鋼構造物の安全性を検討する上で重要であろう。

スチフナ端部のモデル試験片を用いて、まわし溶接のトウ部に生じる比較的小さい亀裂から発生する脆性破壊特性を把握するのが目的である。

## 5.1 供試モデルおよび試験内容

### 5.1.1 脆性破壊の発生試験

スチフナ端部の表面切欠きから生じる脆性破壊の発生特性を調べるために、Ra型、Rb型およびRa'型の3種類のモデルを用い、低温引張破壊試験を行なった。供試モデルの形状、寸法を図5.1に示す。

Ra型モデルは、幅400 mm、長さ750 mmの平板に、全長450 mm、高さ100 mmのスチフナを平板の両面に隅肉溶接で取りつけた立体モデルで、まわし溶接端部に切欠きを機械加工した後、その切欠きの底部に疲労亀裂を進展させたものである。

Rb型モデルは、Ra型モデルと同一形状であるが、疲労亀裂の加工を省略したもので、Ra型モデルでの疲労の影響を調べる目的で供試したものである。

Ra'型モデルは、Ra型モデルと同様に疲労亀裂を進展させた後、スチフナおよび隅肉溶接ビードを削除したもので、スチフナによる応力集中および拘束の影響を調べる目的で供試したものである。

供試モデルは全て先に述べた供試材(板厚20 mm)で構成され、スチフナと主板は脚長9~12 mmの隅肉溶接で組立てられている。切欠きはまわし溶接先端の主板側トウ部に、全長約28 mm、深さ約4 mm、中約0.3 mmの、部分円形表面切欠きを主板の表裏両面に切削加工した。

RaおよびRa'型モデルについては上述の切欠きを加工した後、室温で共振引張疲労により、切欠き底部に疲労亀裂を進展させた。疲労亀裂の作製条件は、切欠き部断面の応力値1.5~15.0 kg/mm<sup>2</sup>(応力振巾13.5 kg/mm<sup>2</sup>)、繰返し回数は約4×10<sup>4</sup>を標準とした。なお、疲労試験装置は800 tonパルセータつきの1,200 tonテストリグを使用し、Rb型モデルを除きそのまま低温引張破壊試験を行なった。Rb型モデルは600 ton引張試験機を使用し低温破壊試験を行なった。いずれの場合でも、引張試験用タブ板にも長さ約400 mmのスチフナを取りつけ、モデルスチフナに連続させ、モデルスチフナに有効に応力が加えられるようにした。

### 5.1.2 溶接残留応力の計測

切欠き加工を行なっていないスチフナつきモデルを用い、まわし溶接部先端

に重点をおいて、溶接残留応力の計測を実施した。

モデルの表裏面に2軸および3軸のストレインゲージ（（株）東京測器研究所製PC-3およびPR-3）を接着し、切断法によりひずみ変化を測定し、残留応力の主応力分布を求めた。

## 5.2 試験結果

破壊試験の結果を表5.1に示す。破壊応力 $\sigma_g$ （切欠き断面のGross Stress）と試験温度との関係を図示すると図5.2のようである。

表5.1中に示した破壊靱性値 $K_{cg}$ は、各モデルについて亀裂あるいは切欠きを、表面橢円亀裂（半橢円切欠き）とみなし、次式より求めた<sup>5)</sup>、切欠き底、すなわち $B = \frac{\pi}{2}$ における値である。

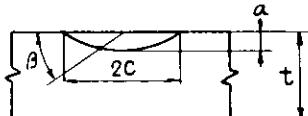
$$K_{cg} = \frac{\sigma_g \sqrt{\pi a}}{\Psi_0} \sqrt{\frac{t}{\pi a} \cdot \tan \frac{\pi a}{t}} \cdot \frac{(a^2 \cos^2 \beta + C^2 \sin^2 \beta)^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{C}} \quad \dots \dots \dots \quad (5.1)$$

$$\Psi_0 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \left(\frac{C^2 - a^2}{C^2}\right) \cdot \sin^2 \theta} \cdot d\theta \quad \dots \dots \dots \quad (5.2)$$

$a$  : 切欠き深さ

$2C$  : 切欠き長さ

$t$  : 板厚



ただし、RaおよびRbモデルについてはスチフナによる応力集中および拘束の影響、またRa'モデルも含めて残留応力の影響などは考慮せずに求めた値である。

亀裂あるいは切欠きの寸法がかなりばらついているため、図5.2では実験値相互の比較が困難であるが、Ra型モデルの破壊強度が、Ra'およびRb型モデルに比べて、低温側で高いことが認められる。Ra-4とRa-7のモデルが全面降伏応力レベルにほぼ等しい破壊応力を示すが、低温側のRa-7モデルがRa-4に比べ亀裂寸法が大きいにもかかわらず強度が高くなっていることは注目すべきことであろう。

Ra'型モデルはスチフナを削除したにもかかわらず、Ra型モデルに比べむしろ低温側で低い強度を示した。

Rb型モデルは低温(-165°C)でRa型に比べ著しく低い強度を示している。

写真5.1～写真5.5に破断状況の例を示す。Ra-1およびRb-3モデルは、まわし溶接部のスチフナ側の、隅肉トウ部から破壊を生じている。いずれのモデルも破面は脆性破面であり、まわし溶接端部の亀裂から発生した脆性亀裂は、スチフナ側の破面がスチフナ側から見て凸状になる傾向を示しながら主板を伝播しているのが特徴である。

### 5.3 残留応力計測結果

図5.3(a),(b)に溶接残留応力の分布と主応力の大きさを図示する。計測値はかなりばらつきが見られるが、まわし溶接部の残留応力は溶接線の回転に従い主応力の向きが回転するような形で分布しており、溶接線のごく近くでは法線方向および接線方向応力はともに引張であるが、隅内溶接トウから5mm程度離れた主板部分では接線方向応力は圧縮となり、また法線方向応力は急勾配で低下している。まわし溶接トウ部の法線方向残留応力は引張応力で10kg/mm<sup>2</sup>程度と推定され、通常の溶接継手内に生じる溶接残留応力に比べ特に大きいものではないことが判る。

### 5.4 考察

#### 5.4.1 スチフナ端部の応力分布

図5.4に切欠きなしのモデルに引張荷重を加えたときの、スチフナ端部主板のひずみ量εの変化を示す。平板部の断面平均応力、 $\sigma_g = 7.5 \text{ kg/mm}^2$ 程度から $\sigma_g \sim \epsilon$ が直線からはずれる。この理由は溶接残留応力の影響によるものと考えられる。一方、 $\sigma_g = 11.2$  および $15.0 \text{ kg/mm}^2$ より除荷するときの $\sigma_g \sim \epsilon$ の関係は、ほぼ直線的な変化を示す。除荷過程の $\sigma_g \sim \epsilon$ の勾配から、まわし溶接近傍の応力集中は約1.5と考えられる。

実験計測のチェックをかねて、供試モデルを3次元面内モデルと見なし、F.E.M.により応力分布の計算を行なった結果を図5.5に示す。使用した計算プログラムはIHI技研開発のISTRAN/PLである。

計算で得られた引張方向最大の応力集中は2.25であるが、スチフナの先端部を離れるにしたがい急激に応力集中が低下しており、切欠き位置の応力集中の平均は1.5程度であると考えられる。

#### 5.4.2 スチフナ端部の表面切欠きから生じる脆性破壊に影響する要因

5.4.1項において述べたように、供試モデルのスチフナ端トウ部の応力集中は1.5程度があるので、この応力集中を考慮して破壊靭性値K<sub>c</sub>を求め、各モデルの比較をすると、図5.6のようである。ここでK<sub>c</sub>値は(5.1), (5.2)式を用い、R<sub>a</sub>型およびR<sub>b</sub>型モデルについては、一様な局部応力をとして $\sigma_g \times 1.5$ の応力が亀裂に作用するものとして計算した。図5.6には素材の表面半楕円切欠き試験片:S型および溶接熱影響部の表面半楕円切欠き試験片:S'型試験片により得られたK<sub>c</sub>値(第6章参照)を比較のために記載した。また図5.6のK<sub>c</sub>と温度の関係から、a=6.0mm, 2C=28mmの場合の破壊応力と温度の関係をR<sub>a</sub>型, S型およびS'型試験片について求め、図5.1中に図示した。

このようにして靭性値を比較すると、R<sub>a</sub>, R<sub>b</sub>, Sおよびディープノッチ試験

$R_a$ , S'型の順に小さい値となる。これらの結果について若干の考察を行なうとつきのようである。

### (1) 疲労亀裂の影響

$R_a$ 型と $R_b$ 型モデルの $K_c$ 値は、高温側では差が小さいが、低温域で $R_a$ 型の韧性が高くなっている。 $R_a$ 型とS型の比較においても同様である。すなわち $R_a$ 型モデルでは、疲労亀裂加工を行なうことにより脆性破壊強度が改善されている。この理由は、室温で最大 $15.0 \text{ kg/mm}^2$ の繰返し引張応力を受けることにより、いわゆる予荷重効果が現われたこと、および繰返し応力によりスチフナ端部近傍に塑性変形を生じ溶接残留応力が緩和されたためと考えられる。

### (2) 溶接残留応力の影響

$R_b$ 型モデルは上述の溶接残留応力の緩和がなく、溶接残留応力の影響により特に低温( $-165^\circ\text{C}$ )の試験結果が低い韧性を示したものと考えられる。しかし、全面降伏応力近くで破壊を生じるような温度域では、残留応力の影響はないようである。

### (3) スチフナの拘束の影響

$R_a$ 型と $R_b$ 型を比較すると、スチフナを削除した $R_a$ 型の方が低温領域で韧性が小さくなっている。すなわち、スチフナの拘束の効果は、少くとも低応力で脆性破壊を生じる温度領域では見られないといえる。 $R_a$ 型の破壊強度が $R_b$ 型あるいは $R_b$ 型などに比べて低いのは、スチフナ削除により予荷重効果を打ち消すような残留応力が新たに生じたか、あるいはスチフナ削除の際、若干の熱履歴によりエイジングを受けた可能性が考えられるが明らかではない。

## 6. 横方向スチフナ隅肉溶接部表面切欠きからの脆性破壊発生特性

横方向スチフナ隅肉溶接トウ部に存在する切欠き、あるいは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。

45年度、46年度は、横方向スチフナ隅肉溶接トウ部にそった板厚貫通切欠きおよび疲労亀裂からの脆性亀裂発生特性を把握した。

今年度(47年度)は、同じく隅肉溶接トウ部にそった表面切欠きおよび表面疲労亀裂からの脆性破壊発生試験を実施した。

### 6.1 供試モデルおよび試験内容

先づ、横方向スチフナ隅肉溶接トウ部にそつての表面切欠きからの脆性亀裂発生特性を求めるため、FS型、S型およびS'型モデルを供試した。供試モデルの形状、寸法ならびに溶接条件等を図6.1に示す。

FS型モデルは、45年度、46年度の供試モデルA形と形状、寸法ならびに溶

接条件等を同じくした、幅400mm、フチフナ高さ200mmのモデルであり、主板板幅中央部の隅肉溶接トウ部に、全長約80mm、深さ約8mm、幅0.2mmの長円形表面切欠きを精密切断機（卓上小型精密切断機を改造したもの）にて切削加工したものである。また、S型、S'型モデルは、FS型モデルの試験結果を検討する上での基礎データを得る目的で供試したものである。すなわち、S型モデルは、供試鋼板にFS型モデルと同一寸法の表面切欠きのみを加工したものであり、S'型モデルは、供試鋼板表面にFS型モデルのスチフナ隅肉溶接と同一条件で溶接ビードを置き、余盛を切削除去後、溶接ビードトウ跡にそってFS型モデルと同一寸法の表面切欠きを加工したものである。

次に、表面疲労亀裂からの脆性亀裂発生特性を求めるため、FS'型モデルを供試した。供試モデルの形状、寸法、溶接条件等を図6.2に示す。FS'型モデルは、前述のFS型モデルの表面切欠きの先端に、室温にて、片振り引張疲労による疲労亀裂を生ぜしめたものである。

疲労亀裂発生条件としては、Net Stressで2.0～15.7kg/mm<sup>2</sup>（応力振幅13.7kg/mm<sup>2</sup>）のLow Cycle条件、および0.3～5.3kg/mm<sup>2</sup>（応力振幅5.0kg/mm<sup>2</sup>）のHigh Cycle条件の2通りとした。この場合、Low Cycle条件は、46年度に実施したA型モデルによる“疲労亀裂からの脆性破壊発生試験”の、High Cycle条件とNet Stressでほぼ一致する条件である。応力振幅13.7kg/mm<sup>2</sup>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150ton引張試験機を使用し、応力振幅5.0kg/mm<sup>2</sup>の疲労亀裂発生試験には、60ton電気油圧式疲労試験機を使用した。なおLow Cycle条件としては疲労蓄積繰返し回数を $2 \times 10^4$ 回とし、High Cycle条件としては $1 \times 10^6$ 回とした。

## 6.2 試験結果

先づ、表面切欠きからの脆性亀裂発生特性として、FS型、S型およびS'型モデルによる脆性破壊発生試験結果を表6.1、図6.3および図6.4に示す。

表6.1および図6.4に示したK<sub>c</sub>値は、脆性亀裂発生に関するFracture ToughnessのParameterで、各モデルに加工した表面切欠きを表面横円切欠きと見なし、次式により求めたものである。<sup>5)</sup>

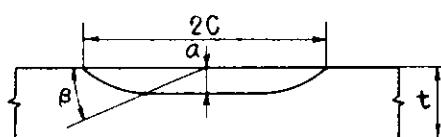
$$K_c = \frac{\sigma_0 \sqrt{\pi a}}{\Psi_0} \sqrt{\frac{2t}{\pi a} \cdot \tan \frac{\pi a}{2t} \cdot \frac{(a^2 \cos^2 \beta + C^2 \sin^2 \beta)^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{C}}} \quad \dots \dots \dots \quad (6.1)$$

$$\Psi_0 = \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \left( \frac{C^2 - a^2}{C^2} \right) \cdot \sin^2 \theta} \cdot d\theta \div \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{C^2 - a^2}{4C^2} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (6.2)$$

ただし、a = 切欠き深さ

C = 切欠き長さの $\frac{1}{2}$

t = 板厚



また、FS型モデルのK<sub>c</sub>値は、スチフナによる拘束の影響を考慮せずに、上記(6.1)式、(6.2)式等により求めた値である。さらに、表6.1および図6.4に示したK<sub>c</sub>値は、全て表面切欠き底、すなわち $\beta = \frac{\pi}{2}$ における値である。表6.1に示したV<sub>c</sub>値は、参考までに計測した表面切欠き部のC.O.D.計測値である。計測要領は表6.1下段に示すごとく、切欠き中央部に深さ約3mmのカッターグリットを切削し、Be-Cu製のクリップゲージを一部変形させて計測したものである。さらに各モデルの破断状況を写真6.1～写真6.6に示す。

図6.3より、FS型モデルの脆性亀裂発生特性は、-100°C付近でバラツキが大きく、実験点の中には-100°C以下の脆性亀裂発生応力より、むしろ低い値を示すものも現われている。先に図3.8にも示したが、S型モデルの脆性亀裂発生特性は、供試材の中央切欠き型ディープノッチ試験結果とほぼ同等である。また、図6.3、図6.4より、FS型モデルおよびS'型モデルの脆性亀裂発生特性が、S型モデルに比べかなり低下していることがわかる。

次に、表面疲労亀裂からの脆性亀裂発生特性として、FS型(Low Cycle)モデルおよびFS'型(High Cycle)モデルの疲労亀裂発生条件ならびに脆性破壊発生試験結果を表6.2、図6.5および図6.6に示す。表6.2および図6.6に示したK<sub>c</sub>値の計算法ならびにV<sub>c</sub>値の計測要領は、前述のFS型モデルにおける場合と同一である。さらに、各モデルの破断状況を写真6.7～写真6.10に示す。

図6.5よりFS型モデルにおいて現われた-100°C付近でのバラツキ現象(図6.3参照)は、FS'型モデルにおいては見られなかった。図6.5および図6.6よりFS'型(High Cycle)モデルの脆性亀裂発生特性はFS型モデルとほとんど同等であり、FS'型(Low Cycle)モデルの脆性亀裂発生に関する最低限界応力値(脆性亀裂発生応力が温度によらず一定になる見掛け上の最低値)は、FS型ならびにFS'型(High Cycle)モデルよりかなり大きくなっていることが明らかである。

### 6.3 考察

以上に述べたごとく、昭和47年度は、

- ① 横方向(荷重垂直方向)にスチフナを有し、その隅肉溶接トウ部にそって存在する表面切欠きからの脆性亀裂発生特性の把握
  - ② 横方向(荷重垂直方向)にスチフナを有したモデルのスチフナ隅肉溶接トウ部にそっての表面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) 切欠き形状の影響

- (2) 横方向スチフナの影響
- (3) 疲労の影響

等について若干の考察を以下に述べる。

### 6.3.1 切欠き形状の影響

先に述べたごとく、45年度、46年度は板厚貫通切欠きを、今年度(47年度)は表面切欠きを対象にした。したがって、板厚貫通切欠きと表面切欠きとについて、脆性亀裂発生特性を比較検討してみる。

図3.8に示したごとく、幅400mm、切欠き全長240mmの中央切欠き型ディープノッチ試験結果による脆性亀裂発生特性と、幅400mm、切欠き全長80mm、深さ8mm程度の表面切欠きを有したS型モデルによる脆性亀裂発生特性とは良く一致している。この場合、S型モデルによる脆性亀裂発生特性は、脆性亀裂が最初に発生したと見られる表面切欠き底でのK<sub>c</sub>値により評価している。ただし、下記の仮定条件の上に立ってのことであるが、すなわち、

(1) 板厚貫通切欠きと表面切欠き先端の幾何学的形状の破壊発生に及ぼす影響は等しい。

(2) S型モデルの表面切欠きからの脆性亀裂発生に対する破壊靭性値は、切欠き断面形状からK<sub>IC</sub>値ではなくK<sub>c</sub>値とみなす。

一方、横方向スチフナ隅肉溶接トウ部にそっての板厚貫通切欠きと表面切欠きとの脆性亀裂発生特性について比較してみる。先づ、45年度、46年度供試材と今年度(47年度)の供試材について、中央切欠き型ディープノッチ試験結果による脆性亀裂発生特性を比較すると、図6.7に示されるごとく、両者間には有意差はないと考えてよさそうである。したがって、45年度、46年度に実施したA型モデルと47年度のFS型モデルとは、スチフナ隅肉溶接条件も揃えてあるので、同等に比較してよさそうである。以上の観点から、両者の脆性亀裂発生特性(図6.8参照)を比較すると、K<sub>c</sub>値の温度依存性には明瞭な有意差はないと考えてよさそうである。ただし、この場合、A型モデルのK<sub>c</sub>値にはスチフナの影響(46年度研究で検討した結果)を考慮してあるが、FS型モデルについては、スチフナの影響を無視し、脆性亀裂が最初に発生したと見られる表面切欠き底でのK<sub>c</sub>値により評価している。

以上により、極く大雑把には、平板では勿論のこと、横方向スチフナを有した3次元モデルにおけるスチフナ隅肉溶接トウ部にそっての切欠きからの脆性亀裂発生特性には、切欠き形状の影響は本質的にはないと考えてよいであろう。

### 6.3.2 横方向スチフナの影響

先に図6.4に示したごとく、FS型モデルとS型モデルの脆性亀裂発生特性を比較すると、K<sub>c</sub>値の温度依存性には有意差を認め難い。すなわち、FS型モデルの脆性亀裂発生特性は、同モデルのスチフナ隅肉溶接と同一条件で溶接ビ-

ドを置き、余盛を切削除去後、溶接ビードトウ跡にそって同一寸法の表面切欠きを加工したS'型モデルの発生特性とほぼ等しいと言えるわけである。換言すれば、FS型モデルのように横方向(荷重垂直方向)スチフナ隅肉溶接トウ部に存在する比較的短かい表面切欠きからの破壊靱性値には、スチフナによる拘束の影響はほとんど無いといつてもよさそうである。

しかしながら、図6.3および図6.4から明らかなるごとく、脆性亀裂発生に関する最低限界応力値(脆性亀裂発生応力が温度によらず一定になる見掛け上の最低値)は、S'型モデルよりFS型モデルの方がかなり大きくなっている。この理由として、スチフナを有したFS型モデルの方が、表面切欠き底の脆性亀裂発生点附近に存在する、亀裂発生に有効に作用する残留応力が小さい可能性が考えられるが明らかではない。

先に述べた、横方向スチフナ隅肉溶接トウ部の比較的短かい表面切欠きからの破壊靱性値には、スチフナによる拘束はほとんど影響ないということは、46年度に実施した、A型モデル、A"型モデルの破壊靱性値に及ぼすスチフナの影響について有限要素法で求めた計算結果からも、容易に想像出来ることである。

### 6.3.3 疲労の影響

先に、6.2項で述べた、供試各モデルについての脆性破壊発生試験結果を一グラフに示すと図6.9のごとくなる。また比較検討のために、46年度に実施したA型モデル、A"型モデル等に対する脆性破壊発生試験結果を図6.10に示す。

6.1項で述べたごとく、FS'型(Low Cycle)モデルの疲労亀裂発生の繰返し荷重条件は、46年度に実施したA"型(High Cycle)モデルの場合と、Net Stressでほぼ同一である。したがって、横方向(荷重垂直方向)スチフナ隅肉溶接トウ部に存在する疲労亀裂からの脆性破壊発生に対する検討は、図6.9におけるFS型モデルとFS'型(Low Cycle)モデルの破壊靱性値の差と、図6.10におけるA型モデルとA"型(High Cycle)モデルの破壊靱性値の差を比較することによって可能であろう。

一般に、疲労亀裂からの脆性破壊発生現象について検討する場合に考慮すべき問題は、繰返し歪履歴による疲労亀裂先端の材質劣化と残留応力であろう。

さて、FS'型(Low Cycle)モデルとA"型(High Cycle)モデルにおいて、疲労亀裂先端の材質劣化がほぼ同程度であったと仮定しても、残留応力はA"型(High Cycle)モデルの方が大きいものと推定される。

図6.9において、FS型モデルとFS'型(Low Cycle)モデルの破壊靱性値を比較すると、比較的高温側の、 $K_c$ 値が温度に対して変化する領域では、材質劣化の影響が現われ、FS'型(Low Cycle)モデルの $K_c$ 値の方が小さくなっているが、低温側の $K_c$ 値が一定になる低応力破壊領域では、残留応力(疲労亀裂先

端の圧縮残留応力) の影響が顕著に現われて逆の傾向になっているものと推察される。さらに、図6.10のA型モデルとA"型(High Cycle)モデルの場合、A'型(High Cycle)モデルの疲労亀裂先端の圧縮残留応力は、FS'型(Low Cycle)モデルの場合よりかなり大きいと推定されるので、全試験温度領域でA型モデルの破壊靱性値より大きな値となって現われているものと考えられる。また、低温側のK<sub>c</sub>値が一定になる低応力破壊領域で見られる、FS型モデルとFS'型(Low Cycle)モデルのK<sub>c</sub>値の差より、A型モデルとA"型(High Cycle)モデルのK<sub>c</sub>値の差の方が大きいことは、先に述べたように、A'型(High Cycle)モデルの方がFS'型(Low Cycle)モデルより疲労亀裂先端の圧縮残留応力が大きいことを示しているものと推察される。

一方、FS'型(High Cycle)モデルがFS型モデルと同等の破壊靱性値を示したのは(図6.9参照)、先に述べた材質劣化と残留応力の影響が共に小さく、しかも釣り合っているためと考えられる。

以上により、疲労亀裂からの低応力脆性破壊発生現象に、疲労蓄積による亀裂先端の残留応力が大きく影響するものと推察されるので、引張残留応力が存在するような場合には、見掛け上の破壊靱性値は低下するはずである。しかしながら、船殻をはじめ一般構造物に発生する疲労亀裂の場合、多くは開口しているのでその亀裂先端に大きな引張残留応力が存在している場合は少ないと推定される。

## 7. 結論

昭和47年度に実施した、縦方向(荷重方向)あるいは横方向(荷重垂直方向)にスチフナを有した3次元モデルに対しての脆性破壊発生試験、疲労亀裂からの脆性破壊発生試験、残留応力計測等により、以下の結論が得られた。

- (1) 不連続縦方向スチフナ基部からの脆性破壊発生特性に及ぼす、スチフナ高さおよび隅内溶接による残留応力の影響が定量的に把握できた。
- (2) 縦方向スチフナ端部表面切欠きからの脆性破壊発生特性として、
  - i) 縦方向スチフナ端部の主板表面切欠きから生じる脆性破壊に関して、スチフナは構造的不連続による応力集中の原因となり破壊強度を低下させる。
  - ii) 切欠きが片振り引張疲労による亀裂である場合には、ごく低応力で脆性破壊を発生する低温度領域では、同一寸法の切欠きをもつものに比べ強度が上昇する。
  - iii) 本研究の範囲では、スチフナが主板を拘束する効果は認められなかった。

iv) まわし溶接部主板の溶接残留応力は比較的小さいが、ごく低温度領域の脆性破壊には影響し強度低下を示すことがある。  
等が把握できた。

(3) 横方向スチフナ隅肉溶接部表面切欠きからの脆性破壊発性特性として、  
i) 破壊靱性値に及ぼすスチフナによる拘束の影響は、本研究に供試した  
モデル程度では、ほとんど認められなかった。  
ii) 片振り引張疲労亀裂からの脆性破壊発性特性が定量的に把握され、比較  
的低温度の低応力破壊領域で、破壊靱性値に疲労蓄積による残留応力が大  
きく影響する。  
等が把握できた。

## 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) 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.154, 昭47.
- 5) ASTM, “FRACTURE TOUGHNESS TESTING AND ITS  
APPLICATIONS”, ASTM Special Technical Publication No. 381  
1964

## 8 むすび

上述のように、昭和47年度の研究では、縦方向(荷重方向)あるいは横方向  
(荷重垂直方向)にスチフナを有した3次元モデルにおける、スチフナ隅肉溶  
接トウ部あるいは拘束部の切欠きおよび疲労亀裂からの脆性破壊発生特性を重  
点的に把握した。

本研究部会の共同研究は、昭和45年4月より3ヶ年計画で実施されたもので  
あり、昭和47年度で全計画を終了した。船殻をはじめ一般鋼構造物の拘束の強  
い部材に現われる疲労損傷からの脆性破壊発生現象を究明する上での重要な基  
礎設計資料が得られ、脆性破壊による重大損傷防止の観点から所期の目的を達

成することが出来たものと思われる。

なお、追って、3ヶ年間の研究成果を総合的にとりまとめた最終報告書を公表する予定である。

表3.1 供試材の化学成分ならびに機械的性質

鋼種	熱処理	板厚 (mm)	化学成分						機械的性質		
			C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	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	0.14	0.20	0.66	0.011	0.024	4.7	25	43	30

5,000

2,500	FS-1	S-1	S'-1	CD-1	Ra-1	Ra-7	Ra'-1				
	FS-2	S-2	S'-2	CD-2	Ra-2	Ra-8	Ra'-2				
	FS-3	S-3	S'-3	CD-3	Ra-3	Ra-9	R(残存)				
	FS-4	S-4	S'-4	CD-4	Ra-4	Rb-1	R(残存)				
	FS'-1	FS'-3	FS'-5	FS'-7	Ra-5	Rb-2	CD-5	B			
	FS'-2	FS'-4	FS'-6	FS'-8	Ra-6	Rb-3	CD-6		R.D.		
								Pl.No.=2927782			
			RH-1			RH-3			RH-5		
			RH-2			RH-4			RH-6		
			RH-7			RH-8			R.D.		
								Pl.No.=2927802			
			RH-9			RH-11			RH-13		
			RH-10			RH-12			R.D.		
								Pl.No.=2927803			

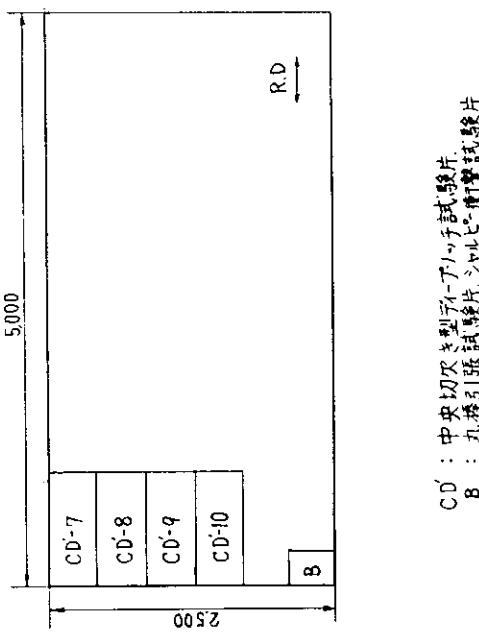
FS : FS型モデル主板  
 S : S型モデル主板  
 S' : S'型モデル主板  
 RH : RH型モデル主板  
 FS' : FS'型モデル主板  
 Ra, Ra', Rb : Ra, Ra', Rb型モデル主板  
 CD : 中央切欠き型ティーフラット試験片  
 B : 丸棒引張試験片、シャルビー衝撃試験片

図3.1 供試鋼板の板取り要領 (その1)  
(KAS鋼, 板厚20mm)

RHS 750	RHS 750	RHS 750	RHS 750
RHS 500	RHS 500	RHS 500	RHS 500
RHS 250	RHS 250	RHS 250	RHS 250
RHS 250	RHS 250	RHS 250	RHS 250

FSS : FS型モデルスナフナ  
RHS : RH型モデルスナフナ  
R, R<sub>a</sub>, R<sub>b</sub> : Ra, R<sub>a</sub>', R<sub>b</sub>型モデルスナフナ

図3.2 供試鋼板の板取り要領(No.2)  
(KAS鋼、板厚20mm)



C'D' : 中央切欠き型アリット試験片.

B : 丸棒引張試験片. シルビウス管試験片.

図3.3 供試鋼板の板取り要領(No.3)  
(KAS鋼、板厚20mm)

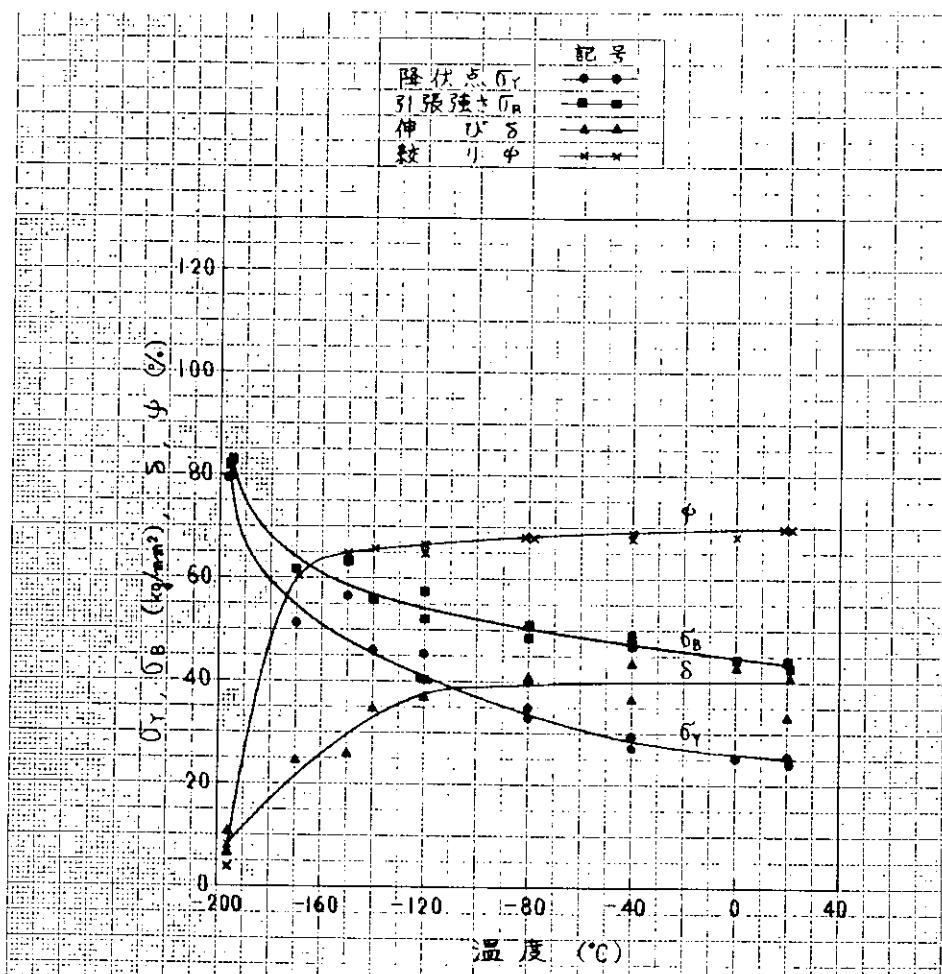


図3.4 丸棒引張試験結果 ( $6\text{mm}+GL=25\text{mm}, 8\text{mm}+GL=50\text{mm}$ )  
(KAS鋼, 板厚20mm, 板厚中央部, 壓延方向)

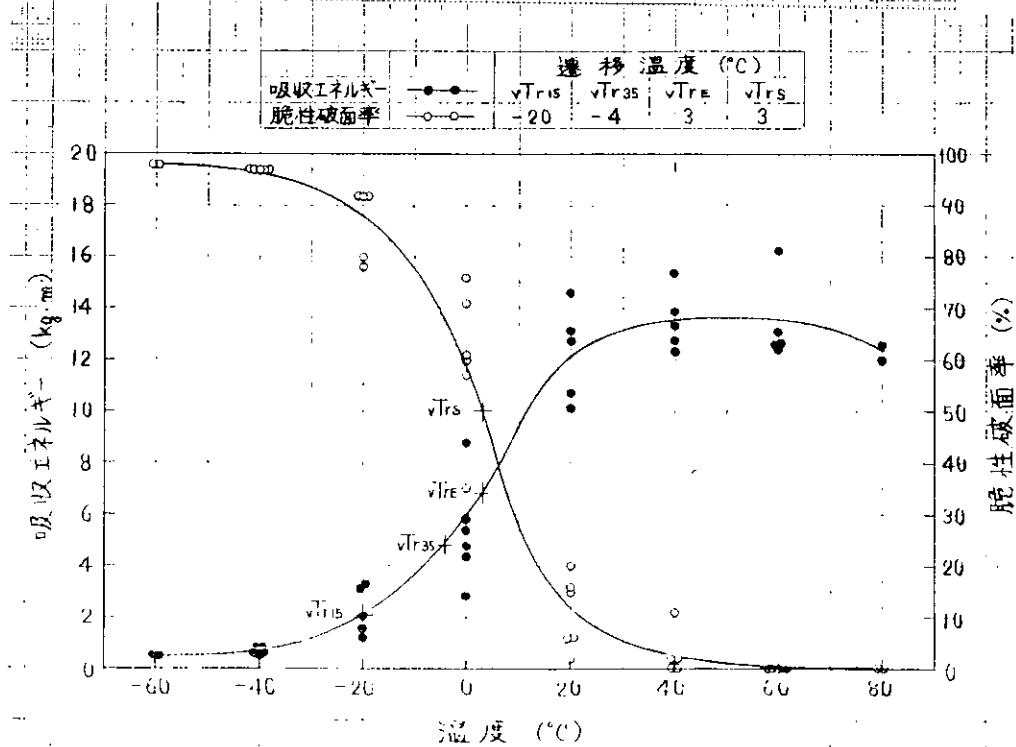


図3.5 標準V-ノンチヤルビー衝撃試験結果  
(KAS鋼, 板厚20mm, 板厚中央部, 壓延方向, 板厚方向のみ)

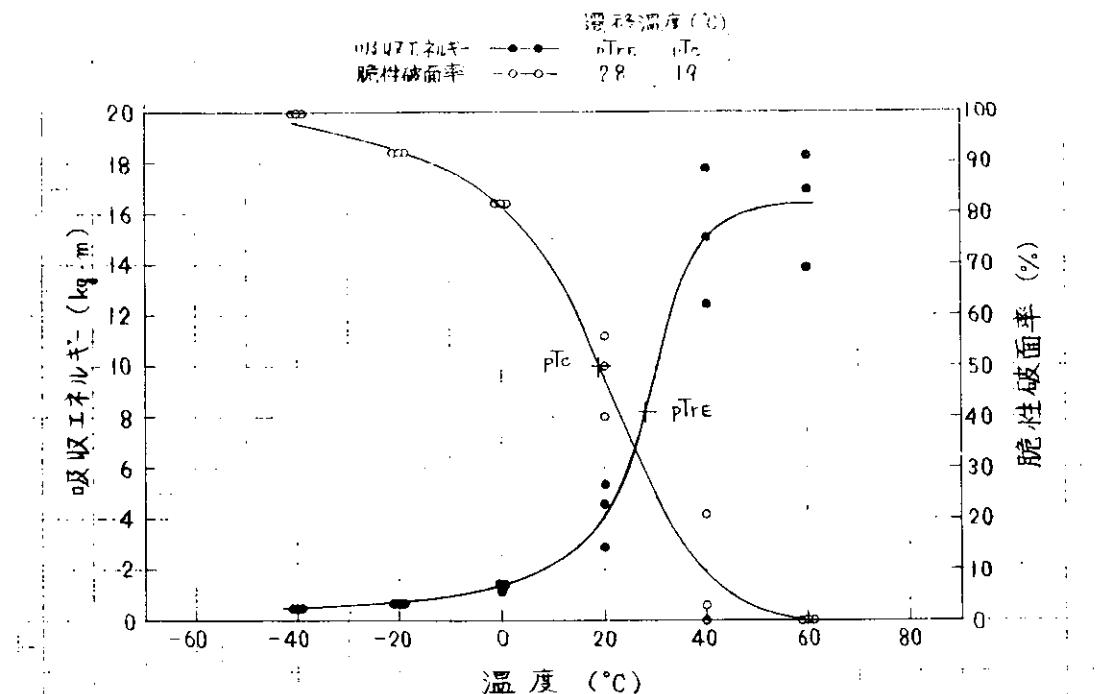


図3.6 標準プレス-ノッチシャルピー衝撃試験結果  
(KAS鋼, 板厚20mm, 板厚中央部, 压延方向, 板厚方向ノッチ)

表3.2 中央切欠き型ディープノッチ試験結果一覧  
(KAS鋼, 板厚20mm, 压延方向)

試験片 符号	板厚 (mm)	試験片寸法 幅 (mm)	破断荷重 P (ton)	Gross Stress $\sigma_g$ (kg/mm <sup>2</sup> )	Net Stress $\sigma_n$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\gamma = \frac{C}{b}$	$f(\gamma)$	$S_i$	$K_c$	試験温度		$\delta_c$ (mm) 右 左 平均
										$T \cdot \frac{10^3}{T_K}$ (°C)	$\delta_c$ (mm) 右 左 平均	
CD-1	20.1	400	240	29.5	3.7	9.2	0.60	1.21	0.18	88	-120	6.54 0.036 0.092 0.064
CD-2	20.1	400	240	27.3	3.4	8.5	0.60	1.21	0.15	80	-140	7.52 0.057 0.021 0.039
CD-3	20.1	400	240	116.0	14.4	36.1	0.60	1.21	—	—	-80	5.18 0.304 0.304 — 0.304
CD-4	20.1	400	240	23.9	3.0	7.4	0.60	1.21	0.12	70	-160	8.85 0.027 0.013 0.020
CD-5	20.1	400	240	111.0	13.8	34.5	0.60	1.21	—	—	-80	5.18 0.407 0.575 0.491
CD-6	20.1	400	240	103.0	12.8	32.0	0.60	1.21	—	—	-60	4.70 0.480 0.575 0.528
CD-7	20.2	400	242	47.0	5.8	14.7	0.60	1.21	0.45	138	-140	7.52 — 0.024 0.024
CD-8	20.1	400	240	65.0	8.1	20.2	0.60	1.21	0.86	190	-120	6.54 0.046 0.054 0.050
CD-9	20.2	400	240	124.0	15.4	38.4	0.60	1.21	3.12	360	-102	5.85 0.172 0.225 0.199
CD-10	20.2	400	243	121.0	15.0	38.2	0.60	1.22	—	—	-82	5.24 0.343 0.300 0.322

注) 1.  $S_i = \frac{\pi (f_{(0)} \cdot 0.1)^2 C}{2E}$

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

2.  $K_c = f_{(0)} \cdot \sigma_g \cdot \sqrt{E}$

4.  $\delta_c$ : 限界COB

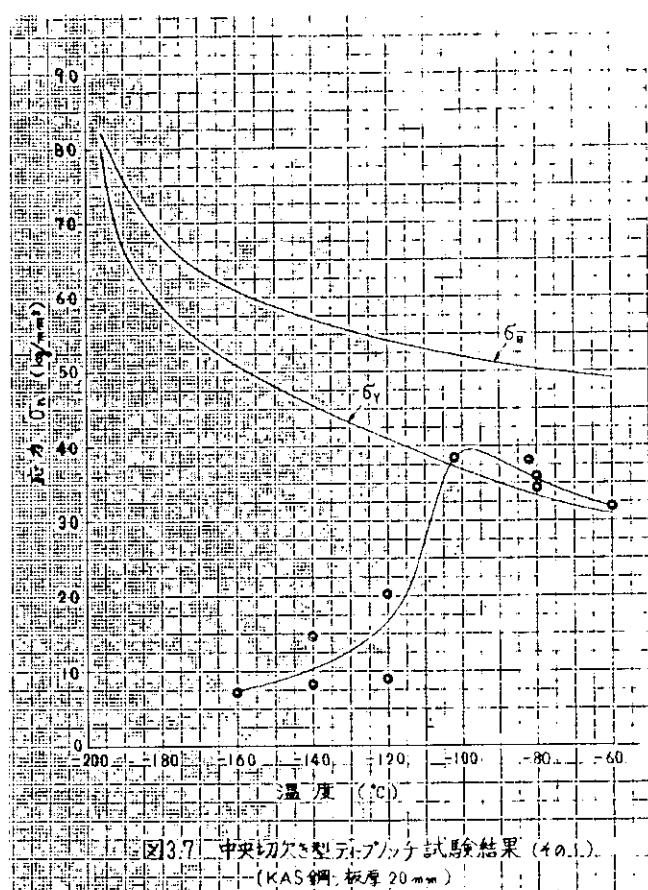


図3.7 中央切欠き型元アノンチ試験結果(No.1)  
(KAS鋼、板厚20mm)

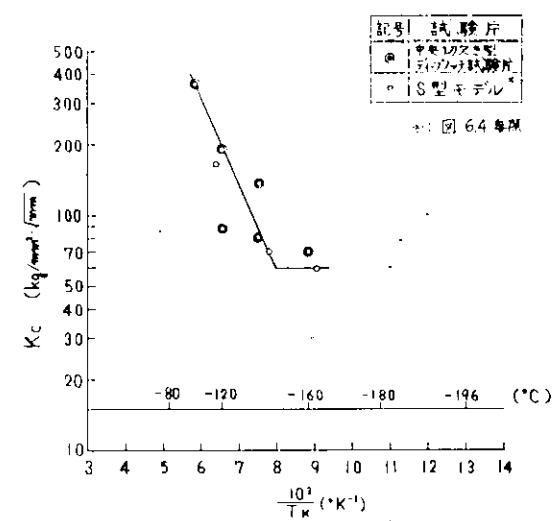


図3.8 中央切欠き型ディーノンチ試験結果(No.2)  
(KAS鋼、板厚20mm)

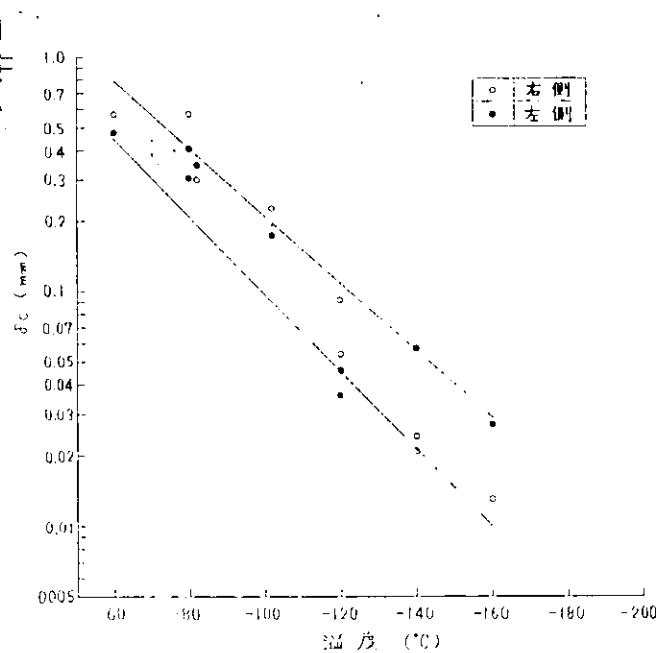


図3.9 中央切欠き型ディーノンチ試験結果(No.3)  
(KAS鋼、板厚20mm)

表3.3 45,46年度供試材と47年度供試材の比較

年 度	鋼 種	熱 処理	板 厚 (mm)	化 學 成 分				機 械 的 性 質		
				C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	MnC (mg/cm <sup>3</sup> )	伸 び (%elongation)
45,46年度 供試材	KAS	As Rolled	2.0	0.15	0.21	0.52	0.010	0.020	3.4	28
47年度 供試材	KAS	As Rolled	2.0	0.14	0.20	0.66	0.011	0.024	4.7	25

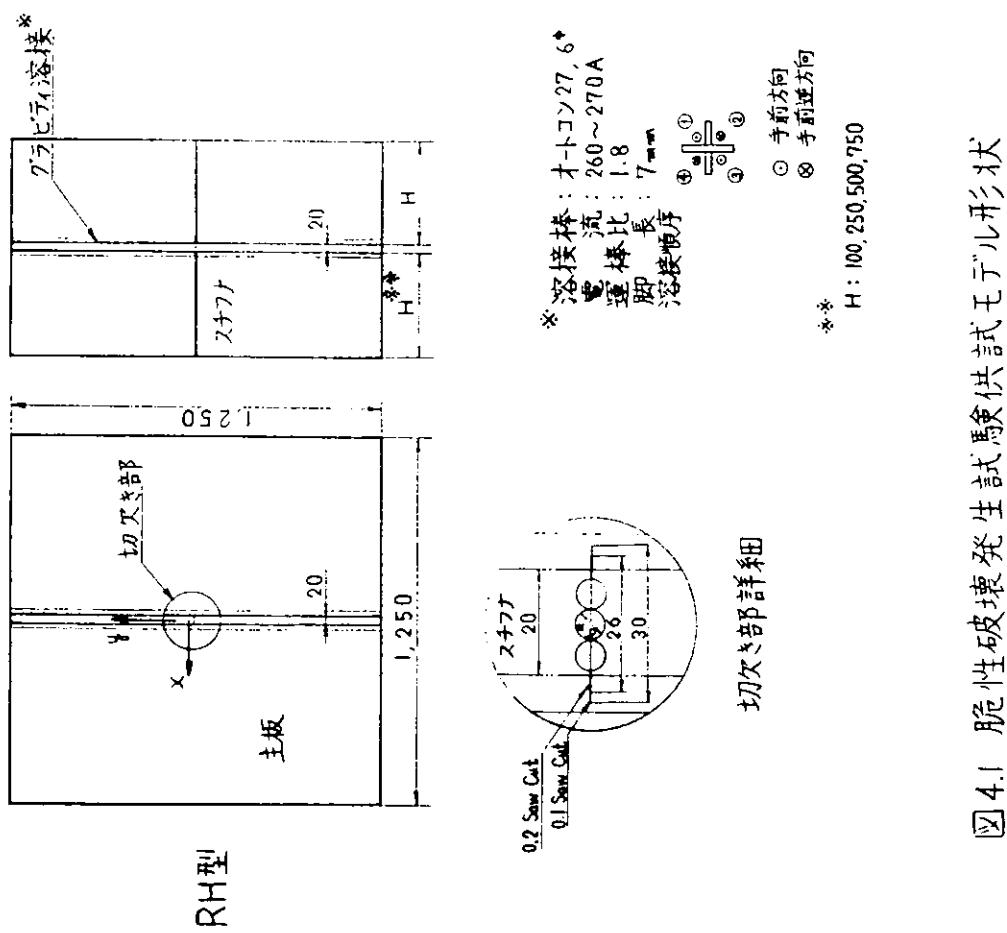


図4.1 脆性破壊発生試験供試材モルタル形状

供試材の化学成分ならびに機械的性質

年 度	鋼 種	熱 処理	板 厚 (mm)	化 學 成 分				機 械 的 性 質		
				C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	MnC (mg/cm <sup>3</sup> )	伸 び (%elongation)
45,46年度 供試材	KAS	As Rolled	2.0	0.15	0.21	0.52	0.010	0.020	3.4	28
47年度 供試材	KAS	As Rolled	2.0	0.14	0.20	0.66	0.011	0.024	4.7	25

シャルヒ°-衝撃試験結果

年 度	鋼 種	熱 処理	各種遷移温度(°C)				
			$\sqrt{T_{r15}}$	$\sqrt{T_{r35}}$	$\sqrt{T_{re}}$	$\sqrt{T_{rs}}$	$pT_{re}$
45,46年度 供試材	KAS	As Rolled	-14	0	8	8	48
47年度 供試材	KAS	As Rolled	-20	-4	3	3	28

H : 100, 250, 500, 750

表 4.1. 脆性破壊発生試験結果一覧  
(RH型モデル)

試験片 符号	板厚 (mm)	試験片幅 (mm)	切欠長さ C (mm)	スチフナ高さ H (mm)	応力除去 焼 鈍	試験温度		破断荷重 P (ton)	Net Stress $\sigma_n$ (kg/mm <sup>2</sup> )
						$10^3 / \tau_K$	T (°K) (°C)		
RH - 1	20	1250	30	100	あり	-115	6.33	3.97	16.3
RH - 2	20	1250	30	100	あり	-60	4.69	6.20	25.4
RH - 3	20	1250	30	100	あり	-25	4.03	6.20	25.4
RH - 4	20	1250	30	100	あり	-125	6.76	2.91	11.9
RH - 5	20	1250	30	250	なし	-115	6.33	1.67	6.8
RH - 6	20	1250	30	250	あり	-145	7.81	2.14	8.8
RH - 7	20	1250	30	250	あり	-115	6.33	2.73	11.2
RH - 8	20	1250	30	250	なし	残留応力測定用			
RH - 9	20	1250	30	500	あり	-45	4.39	6.00	24.6
RH - 10	20	1250	30	500	あり	-140	7.52	1.55	6.4
RH - 11	20	1250	30	500	なし	-120	6.54	2.50	10.2
RH - 12	20	1250	30	750	あり	-100	5.78	6.10	25.0
RH - 13	20	1250	30	750	あり	-75	5.05	6.45	26.4
RH - 14	20	1250	30	750	あり	-125	6.76	3.76	15.4
RH - 15	20	1250	30	750	あり	-135	7.25	1.97	8.1

応力除去焼鈍: 625°C × 0.8h.

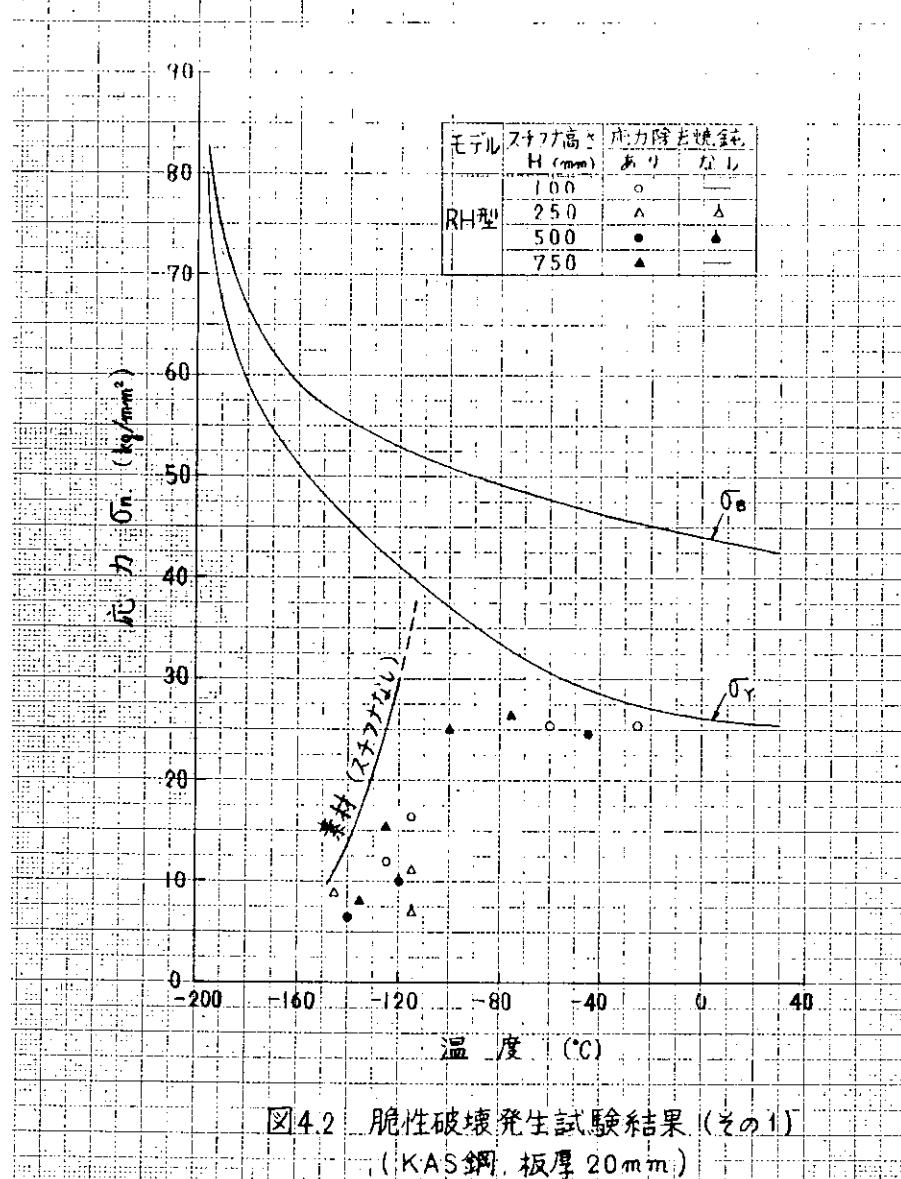


図4.2 脆性破壊発生試験結果(その1)  
(KAS鋼, 板厚 20mm)

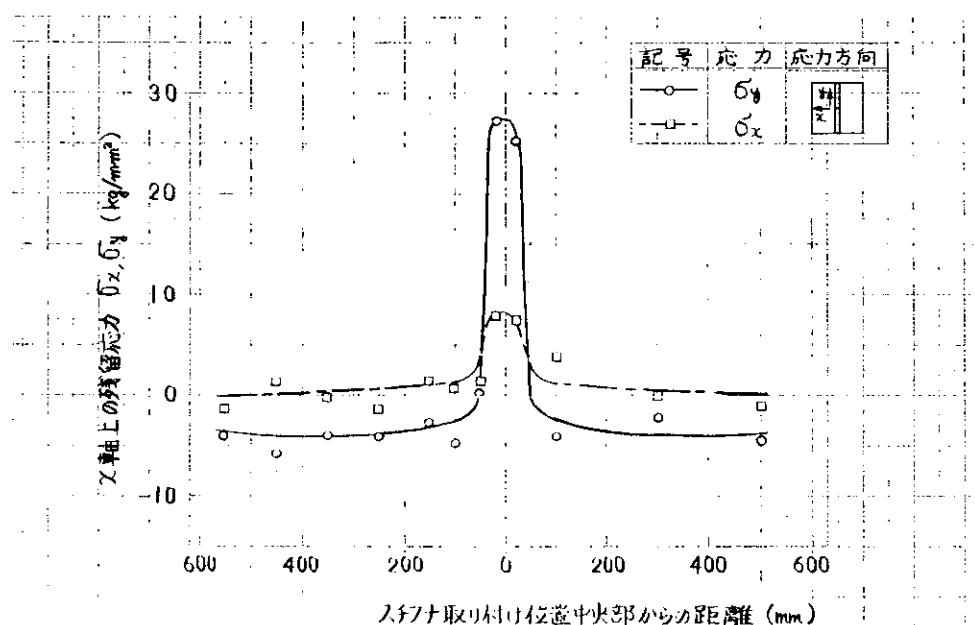


図4.3 脆性破壊発生試験供試モデルにおける残留応力計測結果  
(RH型モデルスチナ不連続部断面の主板における残留応力分布)

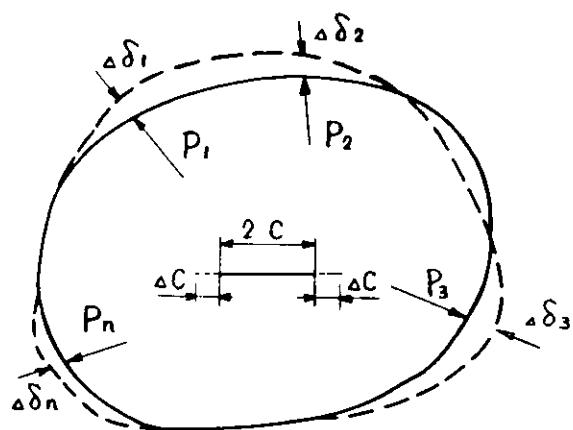
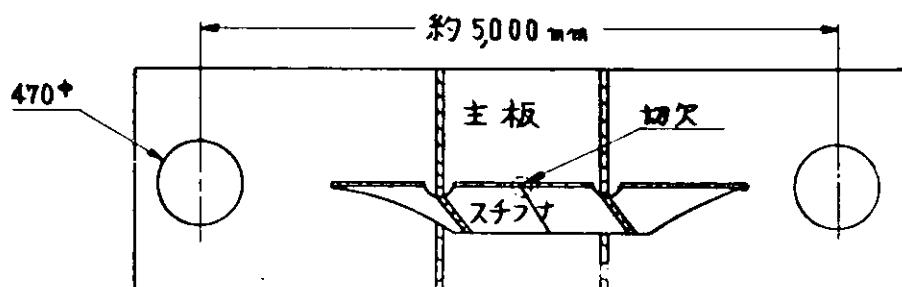
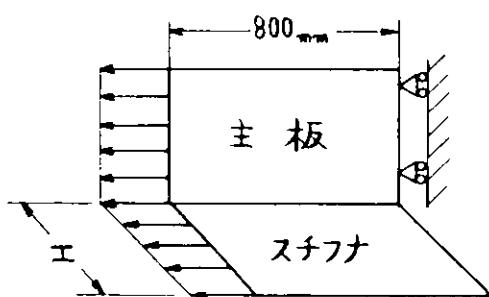


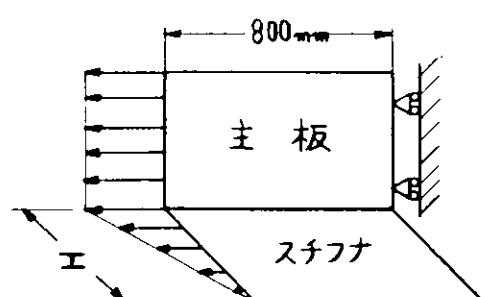
図4.4 クラックを有する任意形状の構造物



(a) 供試モデル概略図

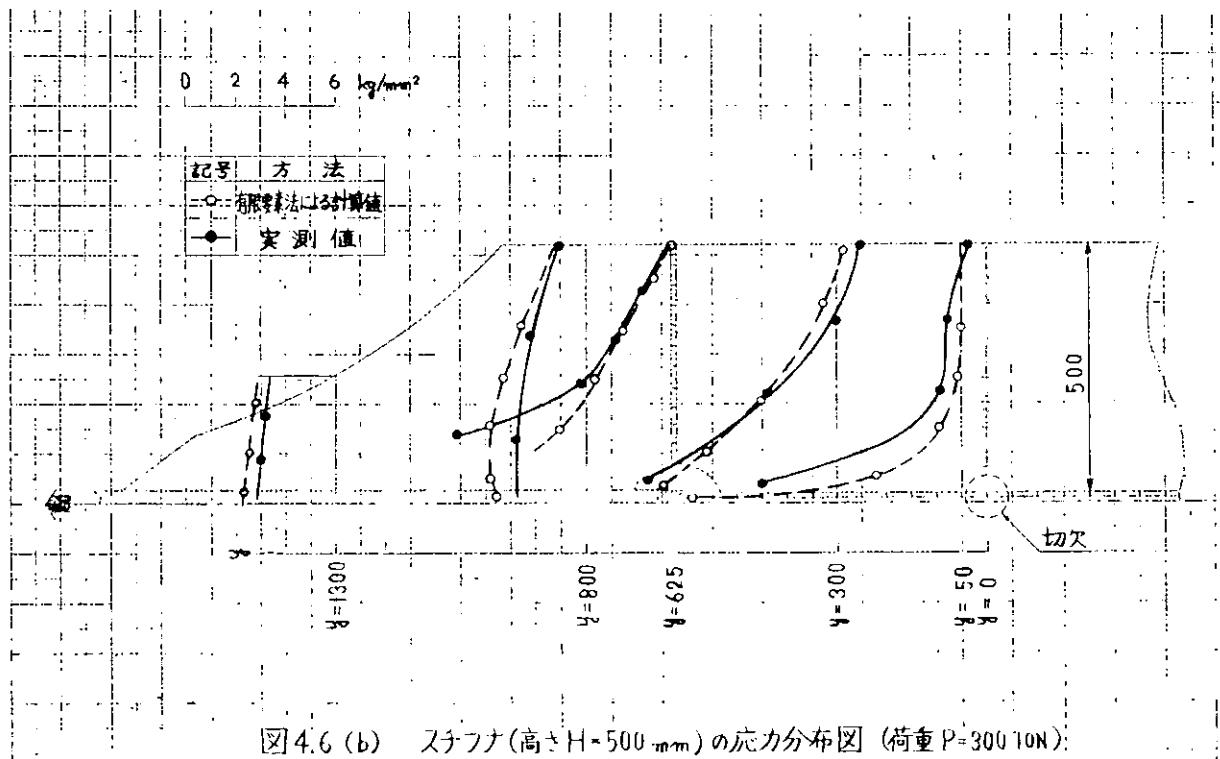
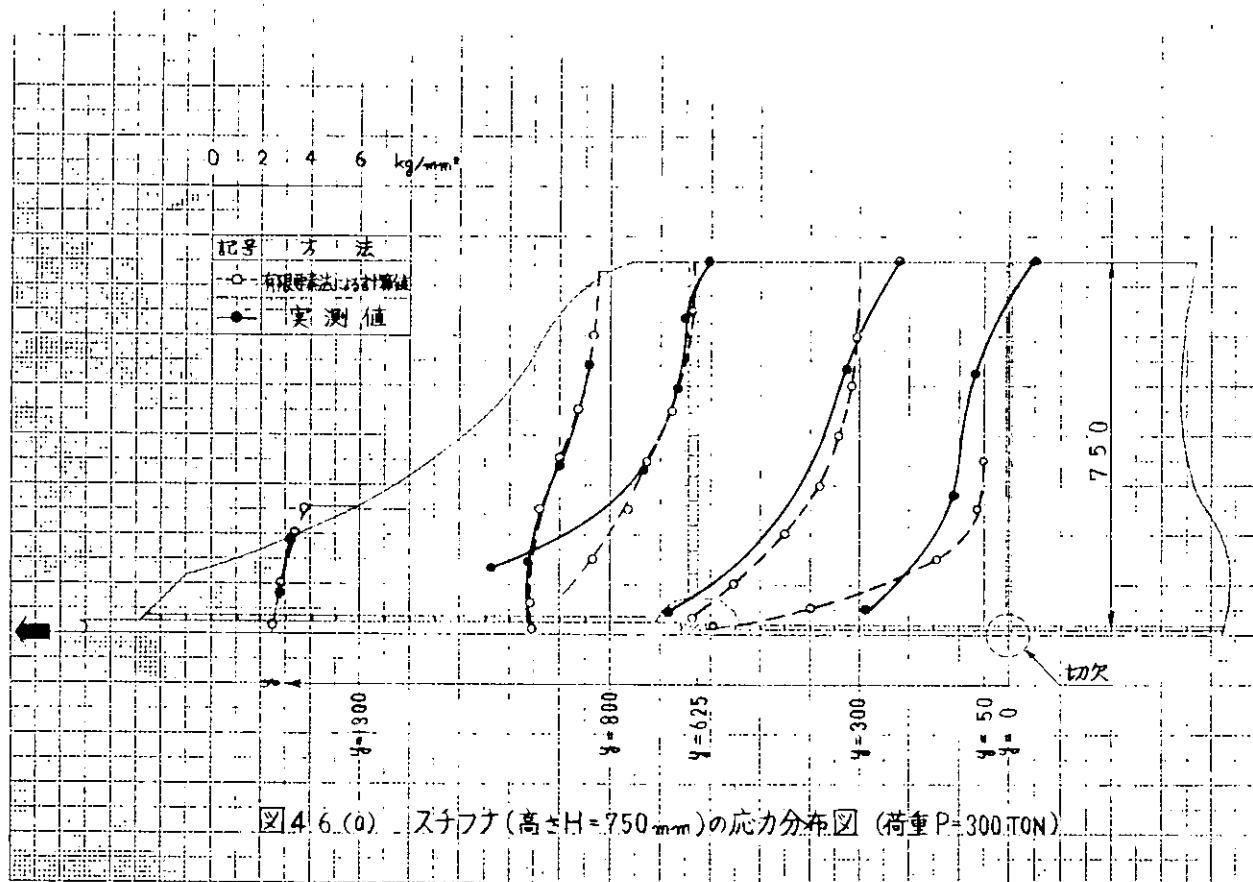


(b) 境界において一様分布荷重を受ける  
と仮定した場合の計算モデル



(c) 境界における荷重として実測値を  
使う場合の計算モデル

図4.5 脆性破壊発生試験供試モデル(RH型)概略図および計算モデル



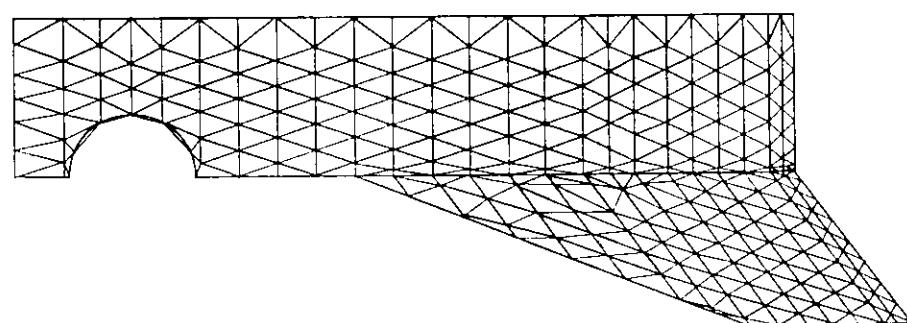
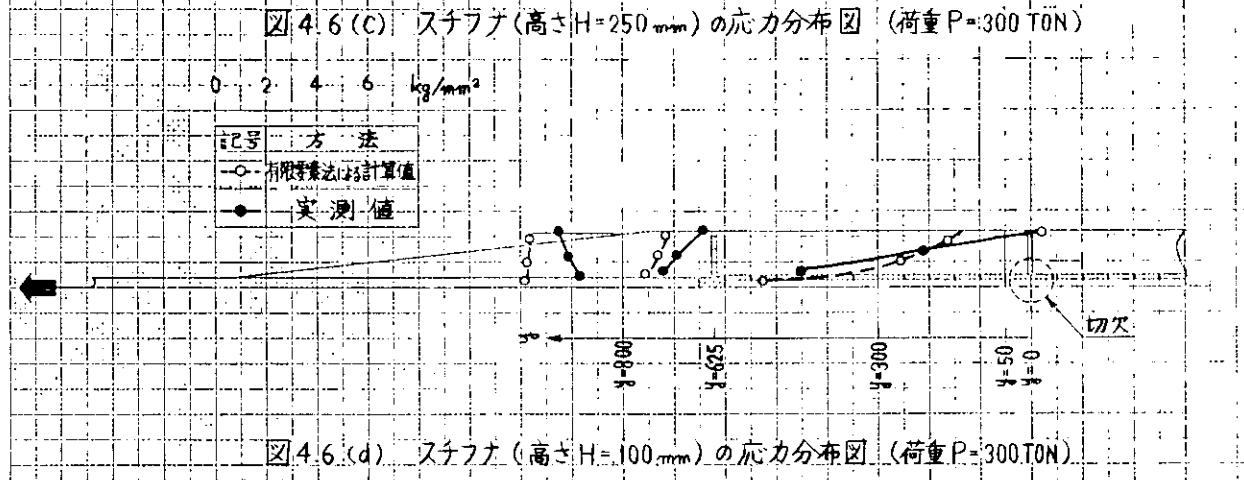
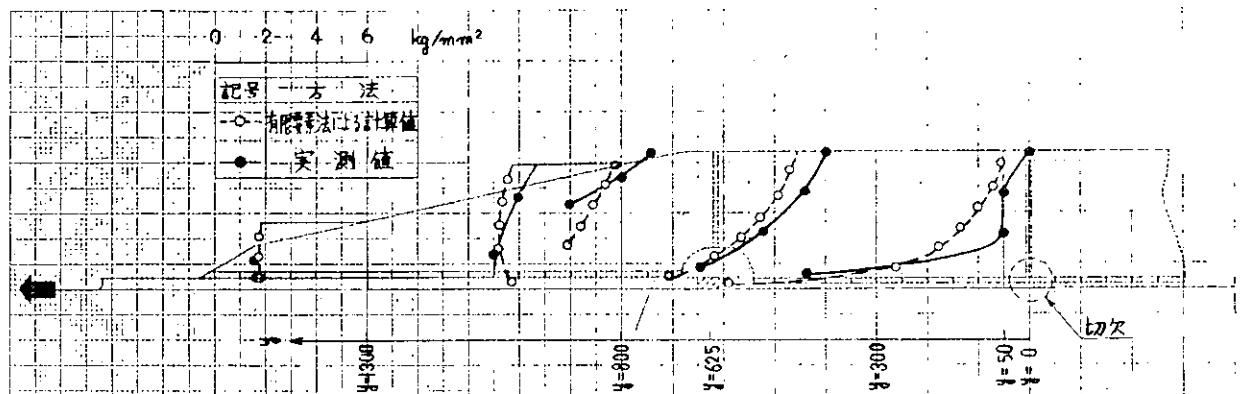


図 4.7 RH型供試モデルの要素分割(モデルの  $1/8$ )

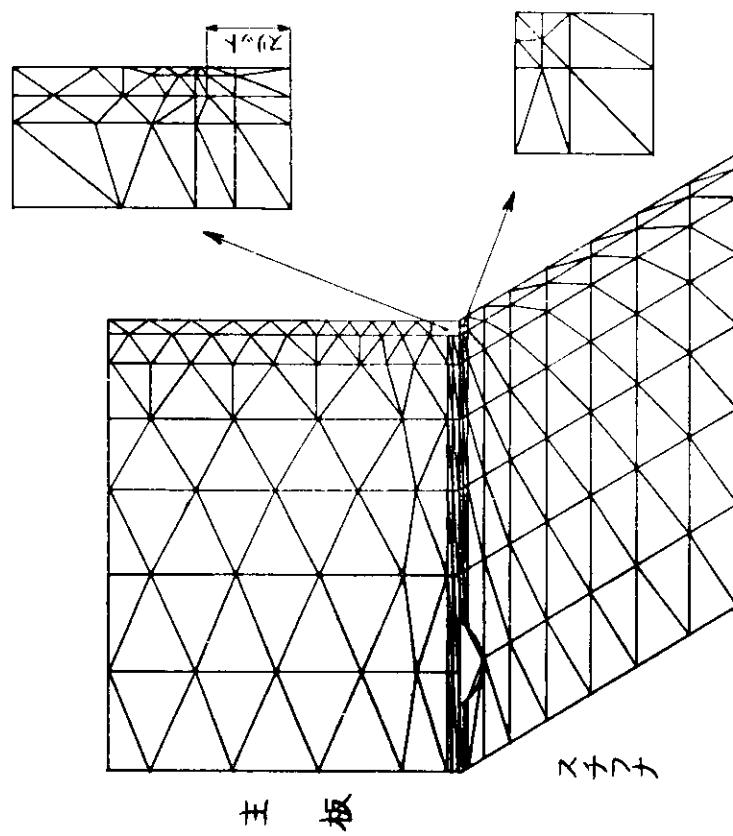


図4.9 RH型供試モデルのK値の計算に用いた要素分割

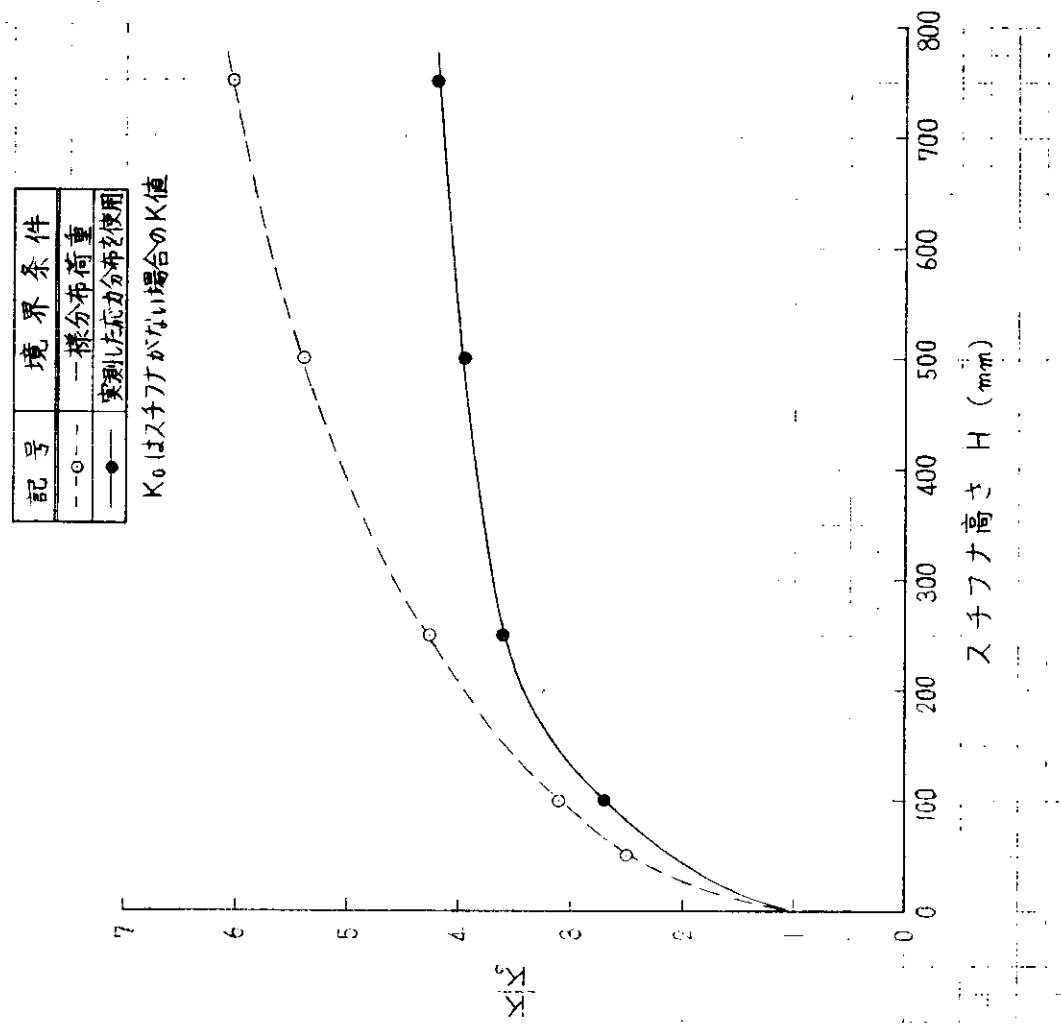


図4.8 RH型供試モデルにおけるスチナ高さによるK値の変化

モデル		試験結果			
H (mm)	応力除去焼純	H (mm)	スナフナ高さ	応力除去焼純	有効塑性歪定値
100	○	100	○	—	—
250	△	250	△	—	—
500	●	500	●	—	—
750	▲	750	▲	—	—

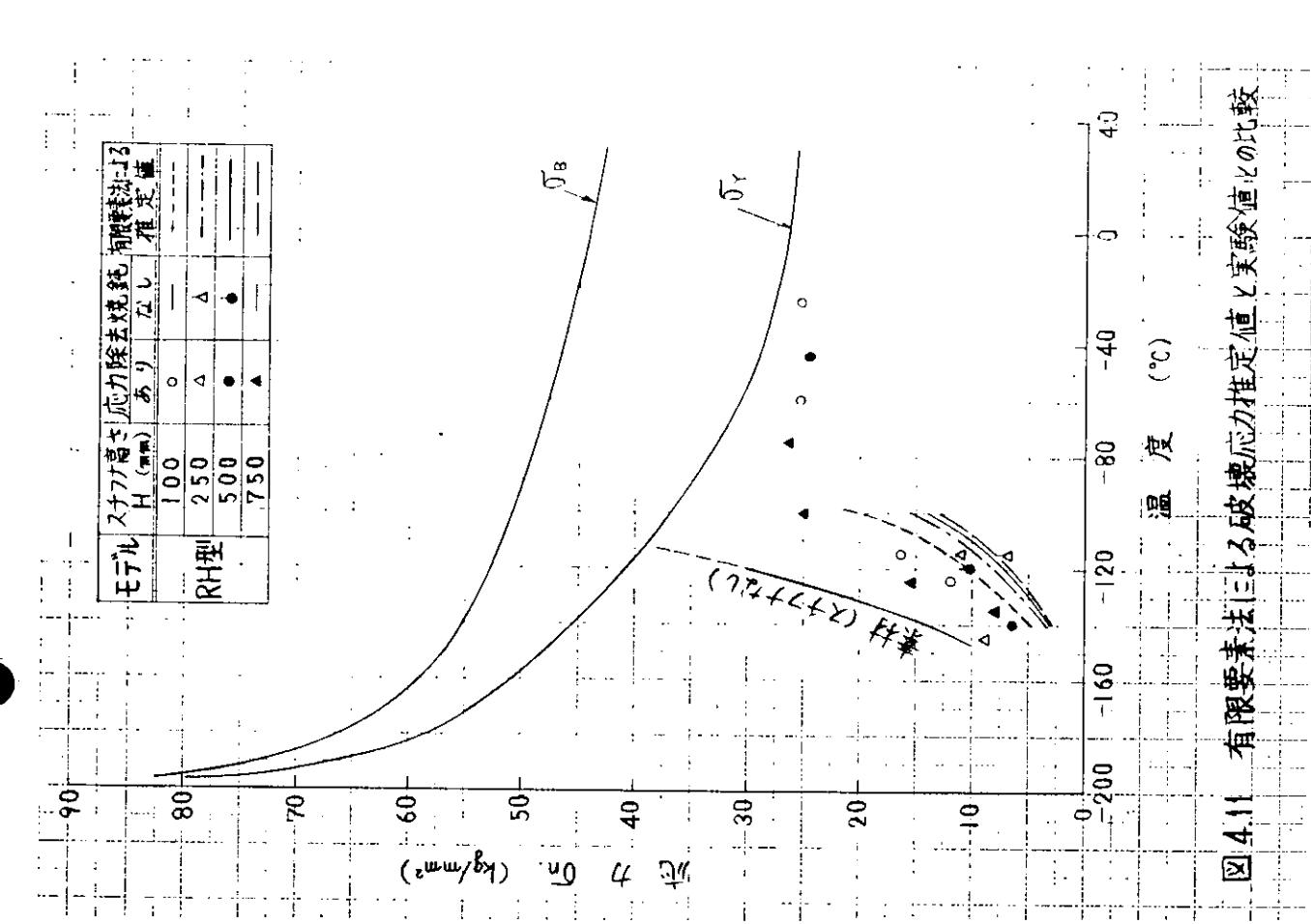
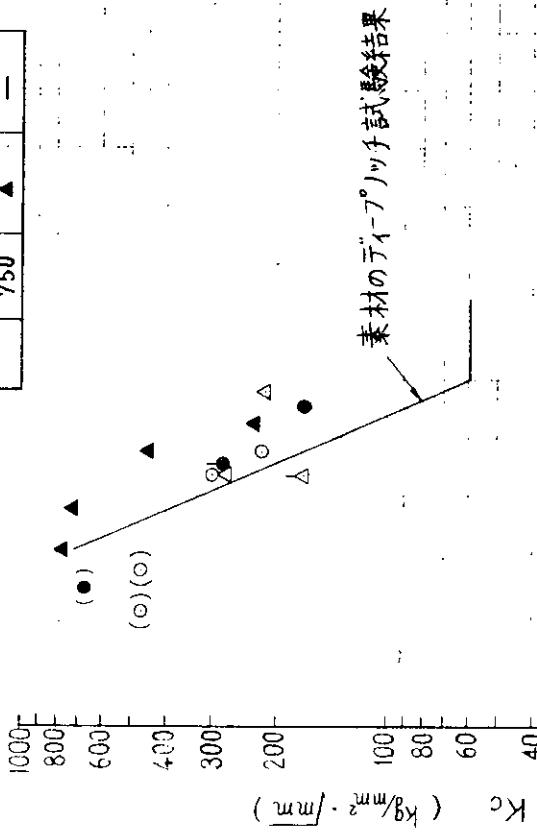
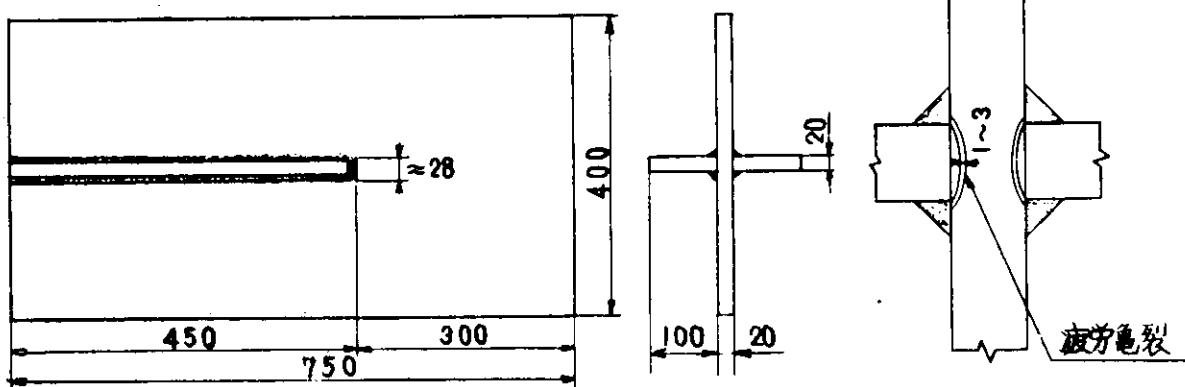
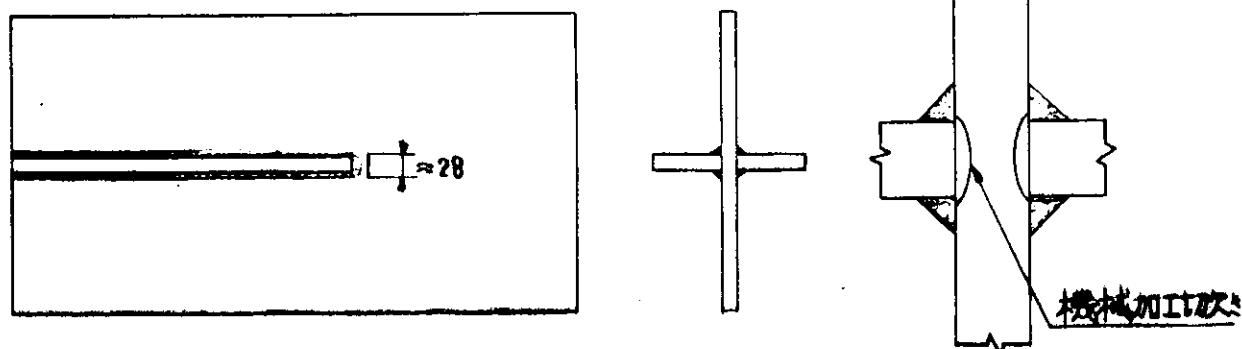


図 4.10 脆性破壊発生試験結果 (その2)  
(KAS鋼, 板厚 20 mm)

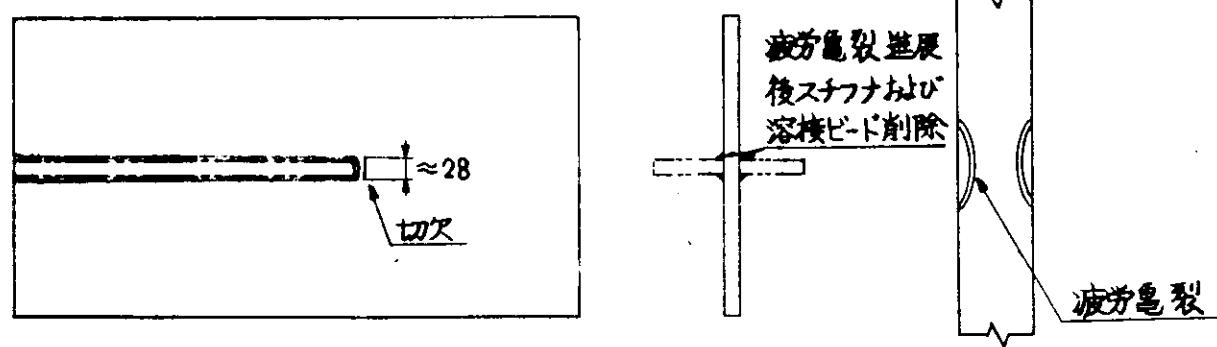
R<sub>a</sub>型



R<sub>b</sub>型



R<sub>a'</sub>型



### 溶接条件

1層 B17, 5 mm<sup>Φ</sup>, 240~250Amp, 210~240 mm/min  
2層 B17, 4 mm<sup>Φ</sup>, 130~140Amp, 180~200 mm/min

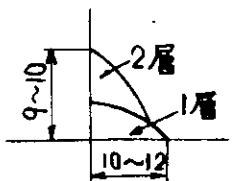


図5.1 脆性破壊発生試験供試モデル形状

表 5.1 脆性破壊発生試験結果一覧  
(Ra, Ra', Rb型モデル)

試験片 符号	板厚 (mm)	試験片幅 2B (mm)	疲労裂合せ切欠 全長 $2C$ (mm)	疲労裂合せ切欠 深さ $a$ (初期深さ) (mm)	試験 温度 T (°C)	破壊荷重 P (ton)	$10^3/T_k$ (°K <sup>-1</sup> )	Gross Stress $\sigma_g$ (kg/mm <sup>2</sup> )	K <sub>Cg</sub>	疲労条件(室温)		備 考
										P <sub>min</sub> ~P <sub>max</sub> (ton)	P <sub>min</sub> ~P <sub>max</sub> (kg/mm <sup>2</sup> )	
Ra-1	20	400	16	—	-48	4.44	34.0	42.5	—	12~120	1.5~15	34.83 ノック加工前に2~120 tonで1950回繰返し荷重繰返し応力繰返し回数
Ra-2	20	400	23	3.5 (3.0)	-75	5.05	32.6	40.7	117.3	12~120	1.5~15	5.867 ノック加工前に2~120 tonで1950回繰返し荷重繰返し応力繰返し回数
Ra-3	20	400	26 (20)	—	-35	4.20	32.2	40.2	—	12~120	1.5~15	47.097 ノック加工前に2~120 tonで1950回繰返し荷重繰返し応力繰返し回数
Ra-4	20	400	25	3.5 (—)	-85	5.32	26.8	33.4	96.7	12~120	1.5~15	40.552 ノック加工前に2~120 tonで1950回繰返し荷重繰返し応力繰返し回数
Ra-5	20	400	29 (29)	6.3 (3.5)	-128	6.89	20.4	25.5	112.3	12~120	1.5~15	40.985 ノック加工前に2~120 tonで1950回繰返し荷重繰返し応力繰返し回数
Ra-6	20	400	26.5	4.8 (—)	-175	10.20	16.0	20.0	70.5	12~120	1.5~15	40.000 ノック加工前に2~120 tonで1950回繰返し荷重繰返し応力繰返し回数
Ra-7	20	400	28 (27)	6.0 (5.5)	-115	6.33	31.8	39.9	167.4	12~120	1.5~15	40.111 ノック加工前に2~120 tonで1950回繰返し荷重繰返し応力繰返し回数
Ra-8	20	400	板厚通切欠 裏面55, 裏面40	-120	6.55	180	22.5	175	12~120	1.5~15	74.000 表裏面のねじ穴から疲労きずが成長し板厚貫通の疲労きずになった。	
Ra-9	20	400	(30)	(6.0)	-145	7.82 (165) <sup>xt</sup>	(20.6) <sup>xt</sup>	(87.1) <sup>xt</sup>	12~120	1.5~15	40.000 ノック溶接部から破断	
Ra'-1	20	400	34	7.5	-135	7.25	87	10.9	60.4	12~120	1.5~15	40.100 ノック溶接部から破断
Ra'-2	20	400	35 (25)	7.5 (4.0)	-105	5.95	31.0	38.8	215.6	12~120	1.5~15	40.000 ノック溶接部から破断
Rb-1	20	400	31 (28)	5.5 (4.5)	-13	6.25	26.7	33.4	131.7	—	—	—
Rb-2	20	400	28	4.5	-165	9.25	45	5.6	22.0	—	—	—
Rb-3	20	400	25	(3.5)	-135	7.25	31.8	40.0 (111.1) <sup>xt</sup>	—	—	—	側面隅肉部より破断

( ) 内 : 推定値

記号	モデル	切欠き部形状
●	R <sub>a</sub> 型	
○	R <sub>b</sub> 型	
▲	R <sub>a'</sub> 型	
	R <sub>b'</sub>	機械加工
	R <sub>a</sub> , R <sub>a'</sub>	疲労電解



—○—

写真5.1 脆性破壊発生試験における破断状況  
(R<sub>a</sub>型, 試験温度 -48°C)

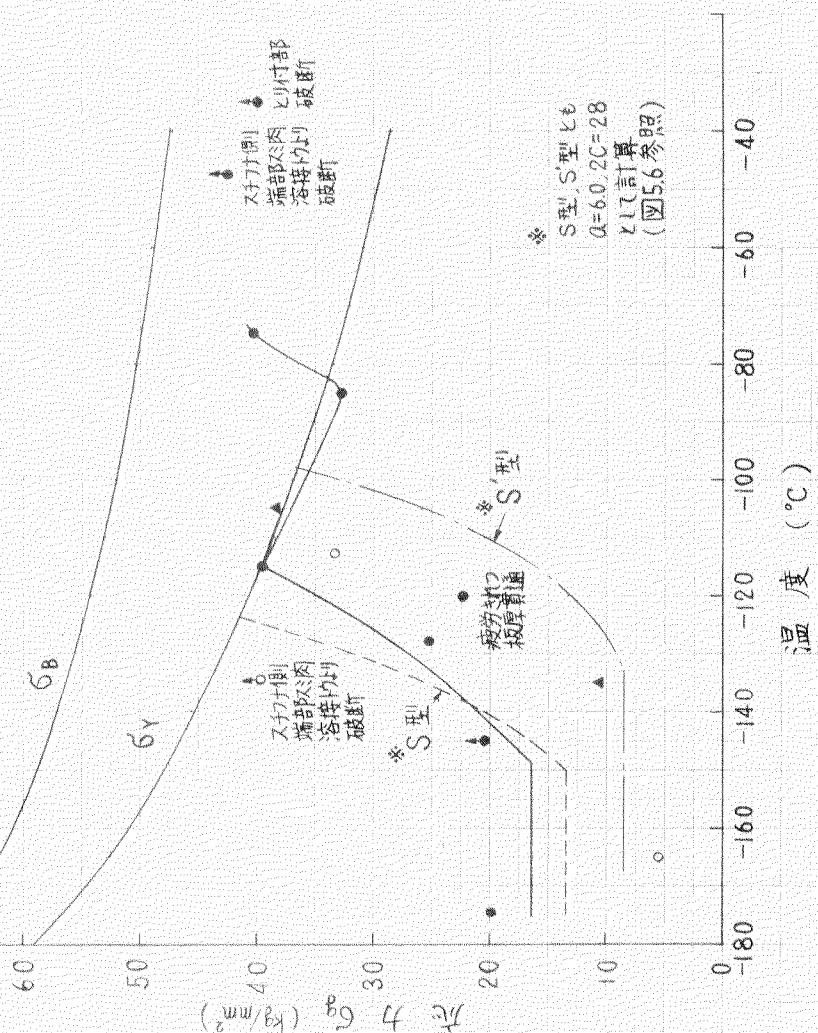


図5.2 脆性破壊発生試験結果(その1)  
(KAS鋼, 板厚20mm)

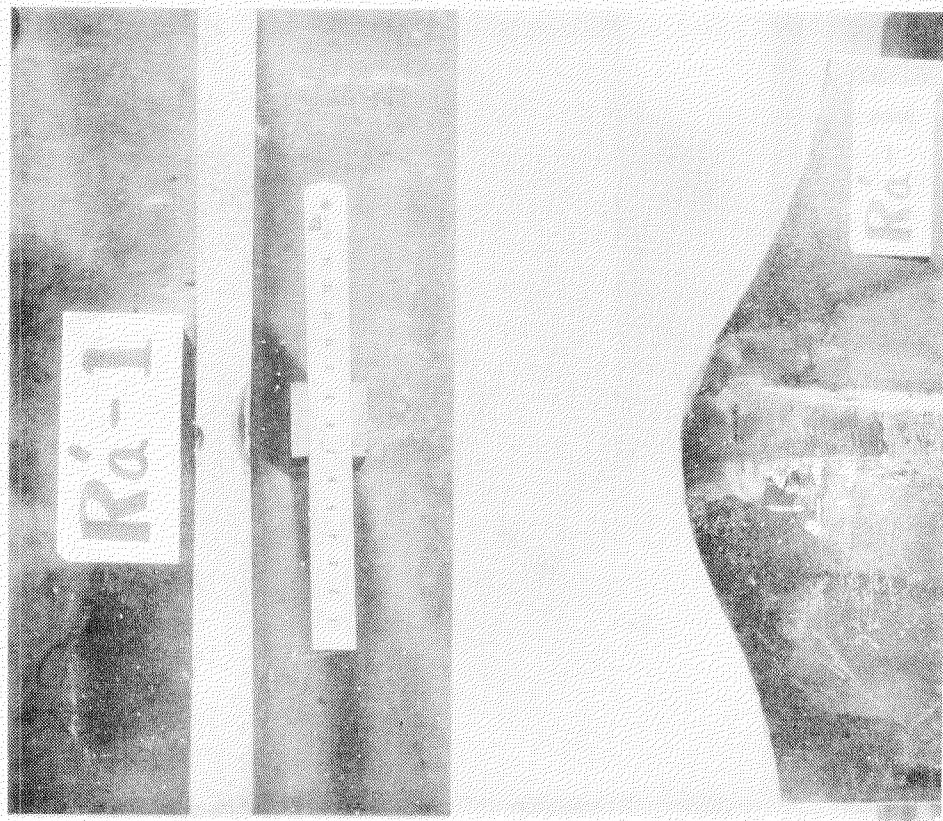
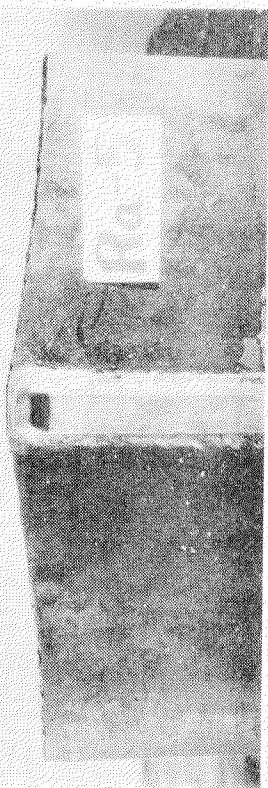
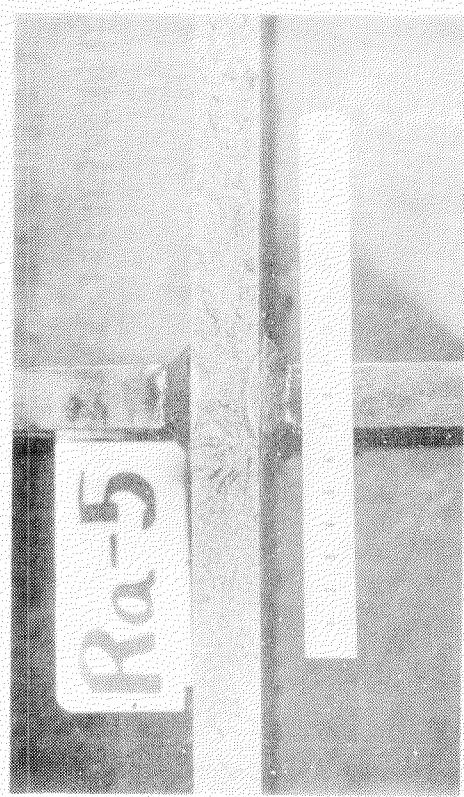


写真 5.2 脆性破壊発生試験における破断状況  
( Ra 型 , 試験温度 -128°C )

写真 5.3 脆性破壊発生試験における破断状況  
( Ra' 型 , 試験温度 -135°C )

( R<sub>b</sub>型, 試験温度 -135°C )

写真 5.4 脆性破壊発生試験における破断状況  
( R<sub>b</sub>型, 試験温度 -113°C )

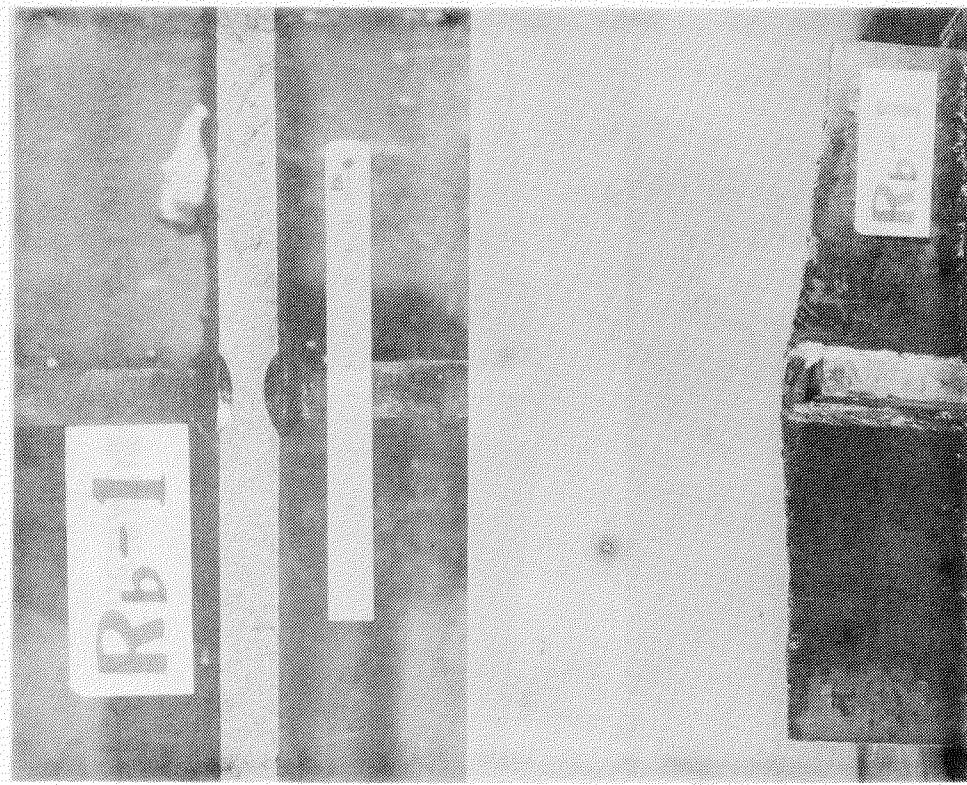
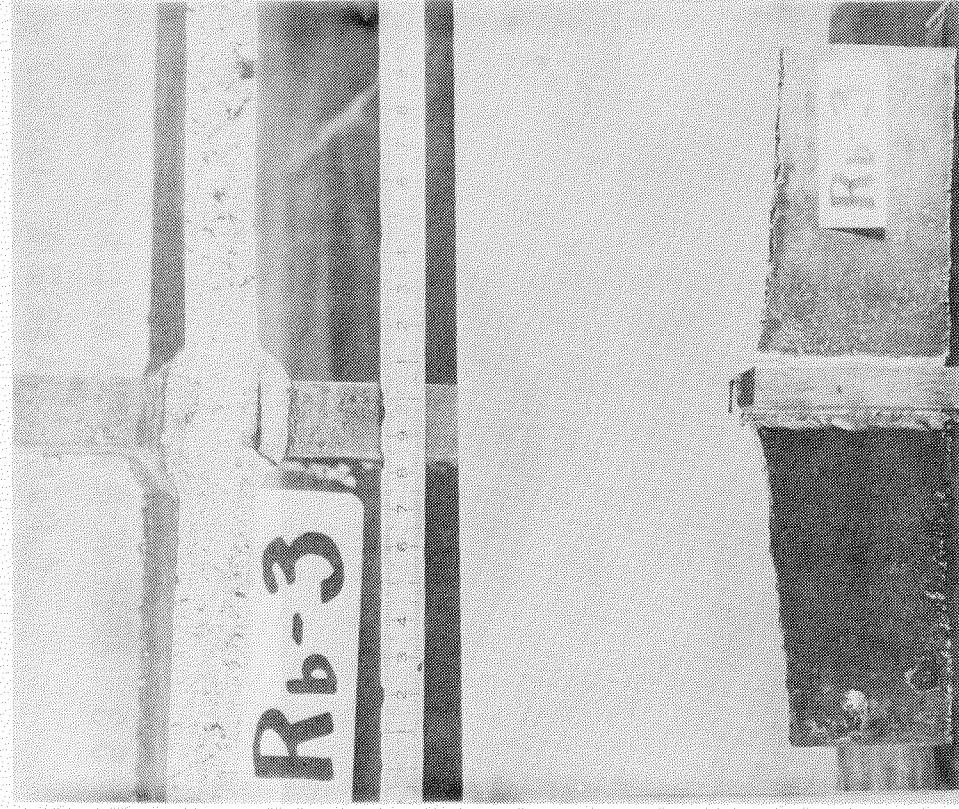
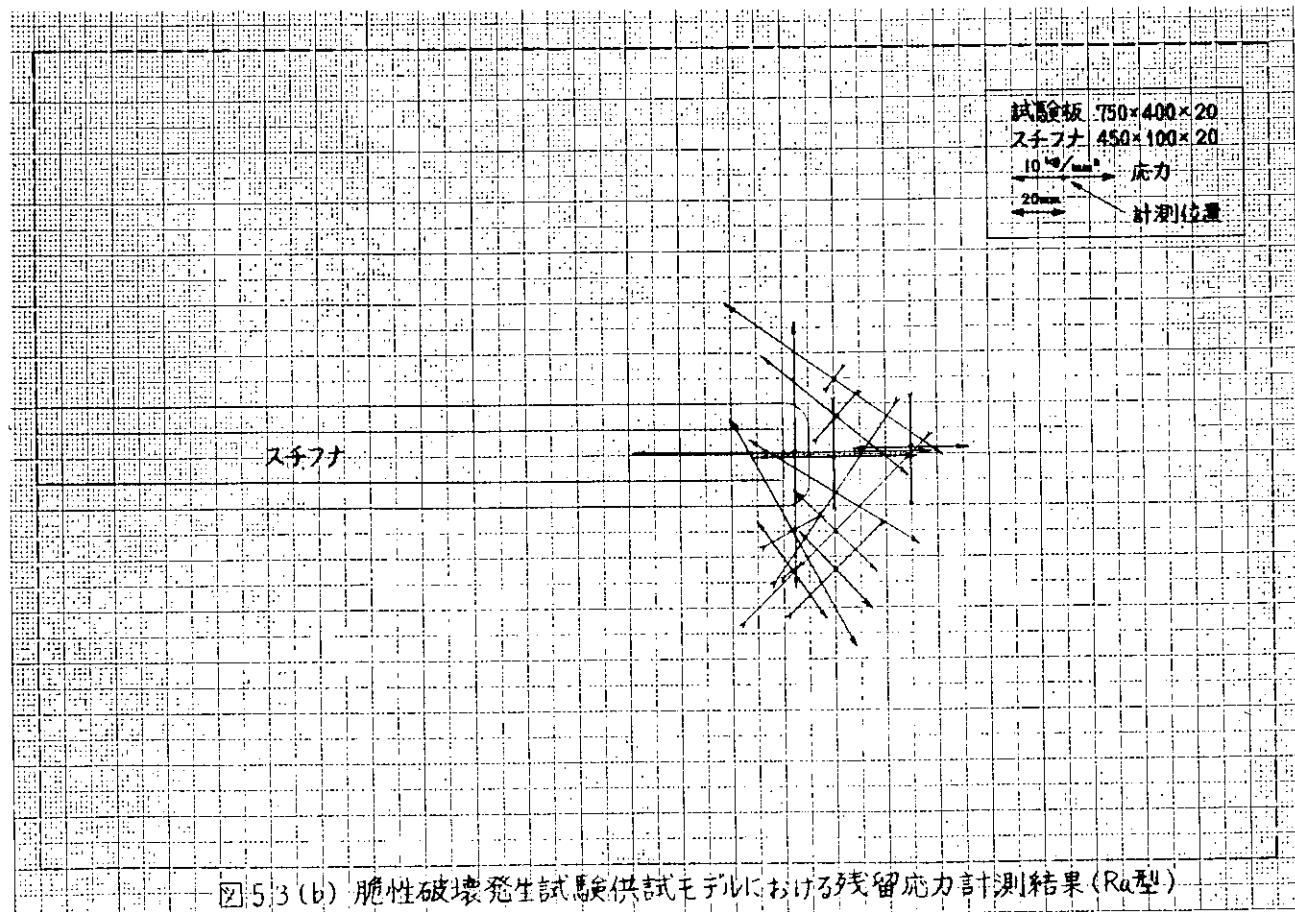
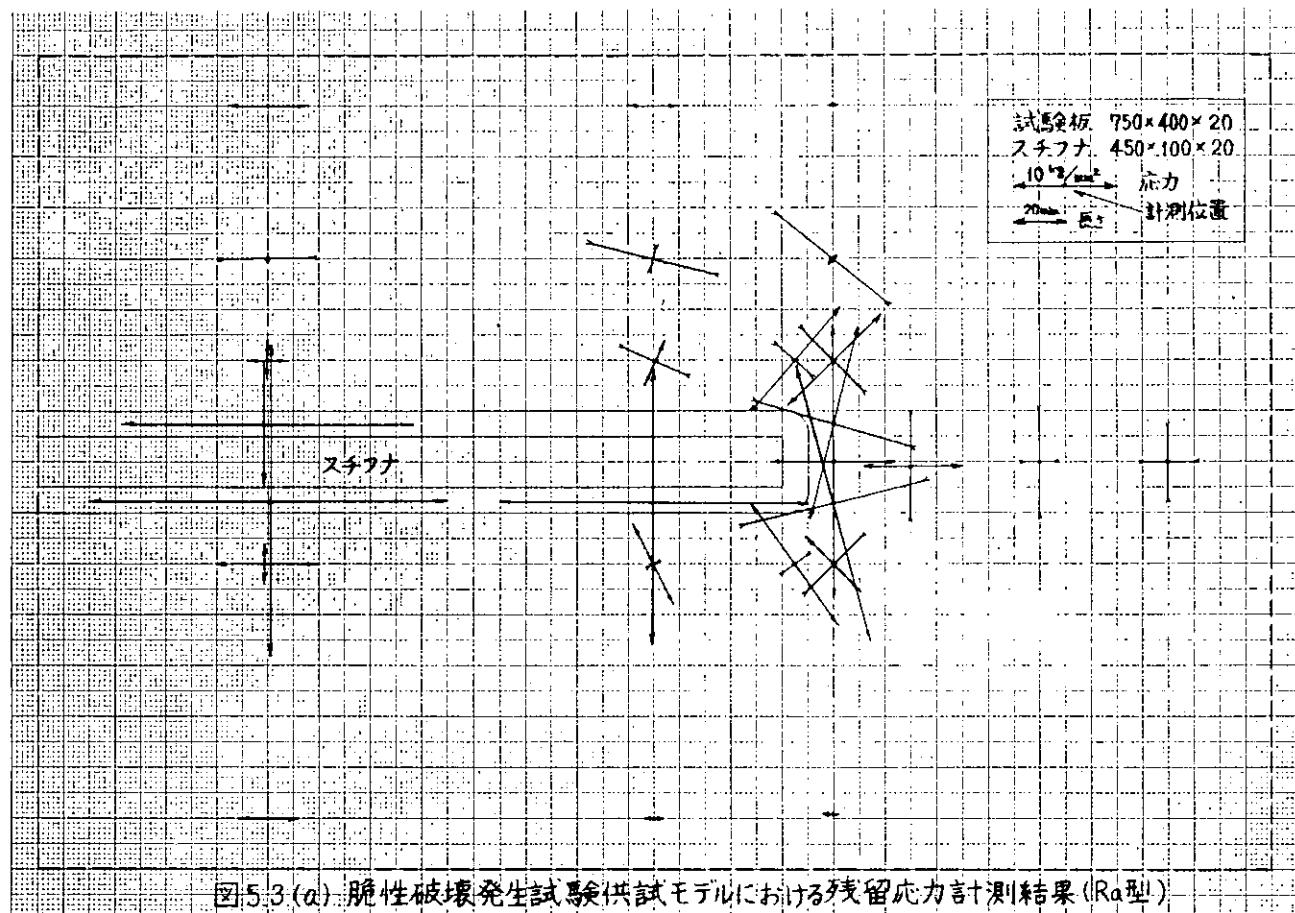


写真 5.5 脆性破壊発生試験における破断状況  
( R<sub>b</sub>型, 試験温度 -135°C )





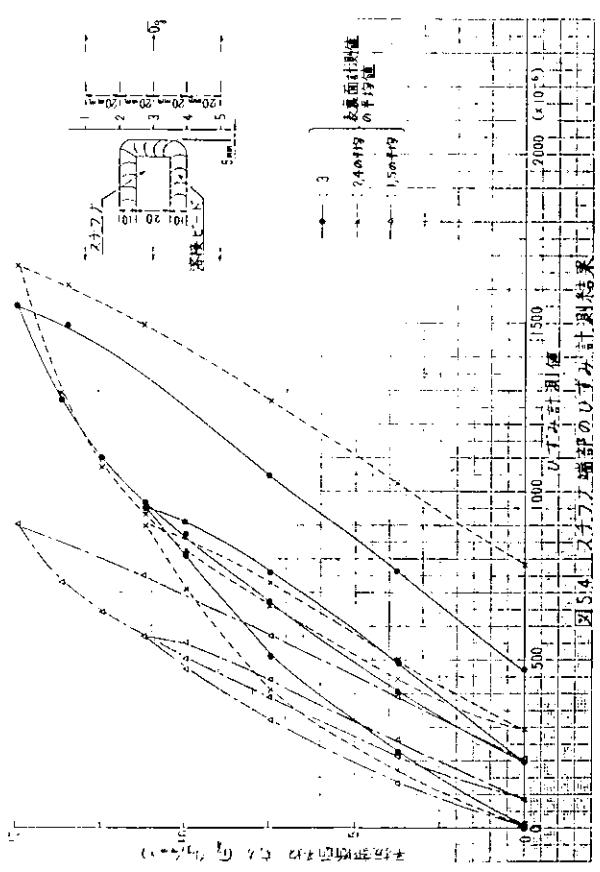


図 5.4 ステップ法端部のひずみ計測結果  
（試験荷重と試験回数の関係）

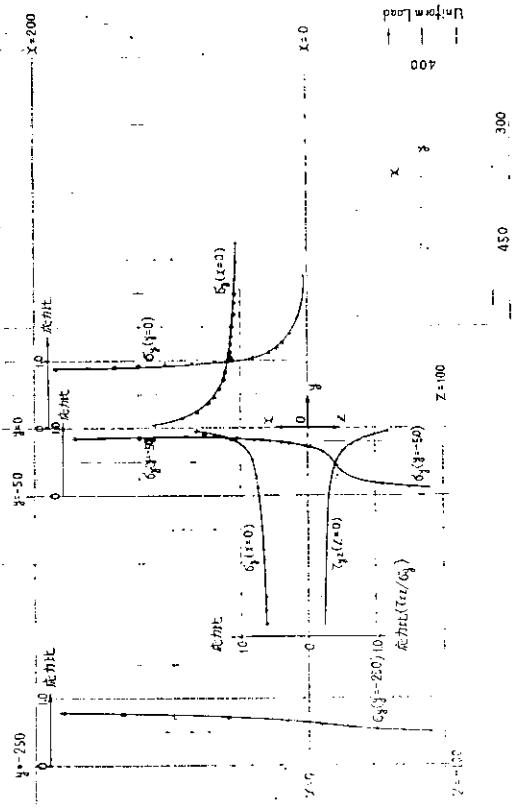


図 5.5 脆性強度急減試験結果 (KAS 鋼, 板厚 20 mm)

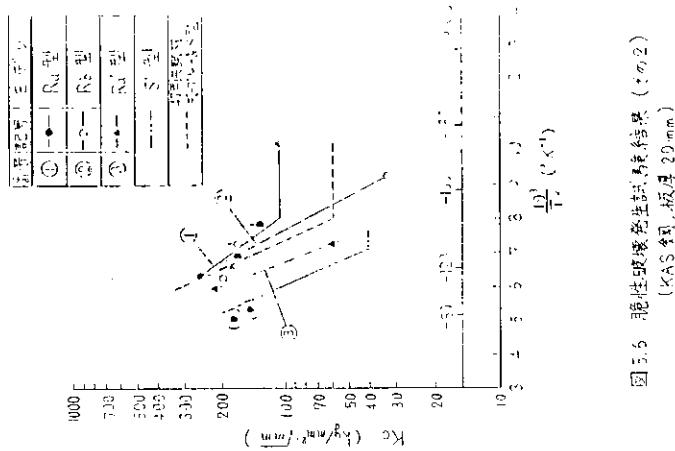


図 5.6 脆性強度急減試験結果 (Ra, Re 型モーテルの応力分布計算結果)

図 5.5 Ra, Re 型モーテルの応力分布計算結果

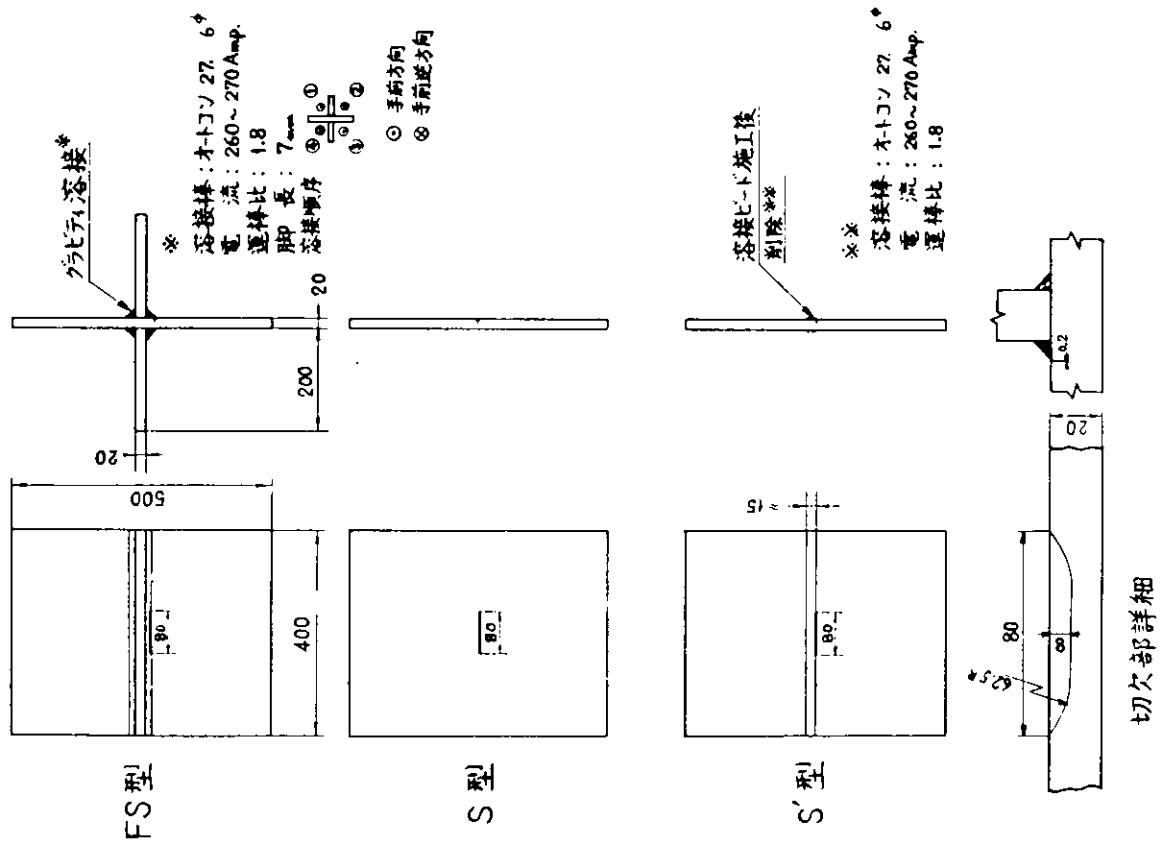


图 6.1 脆性破坏发生試驗供試毛子"儿形状

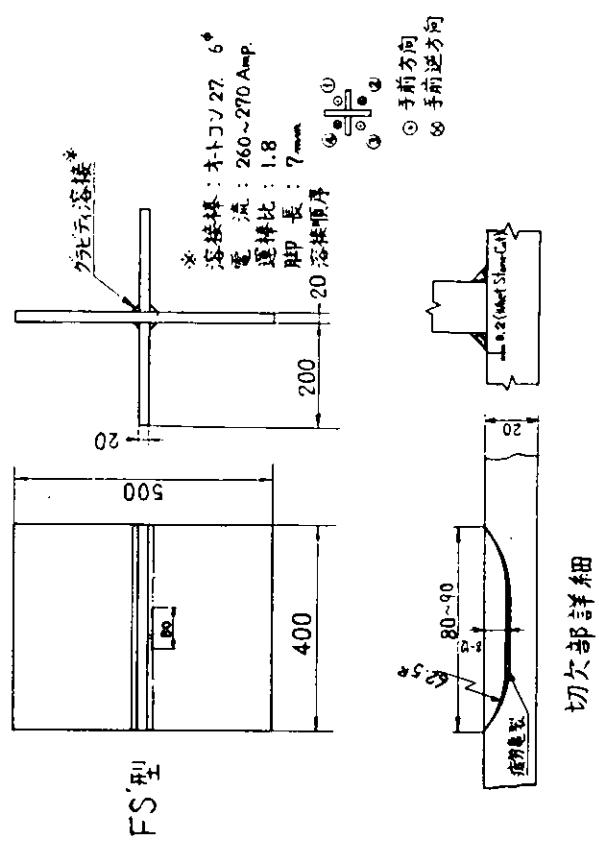
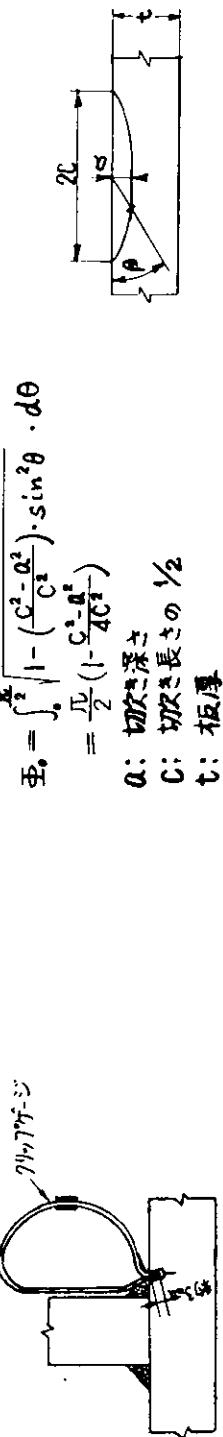


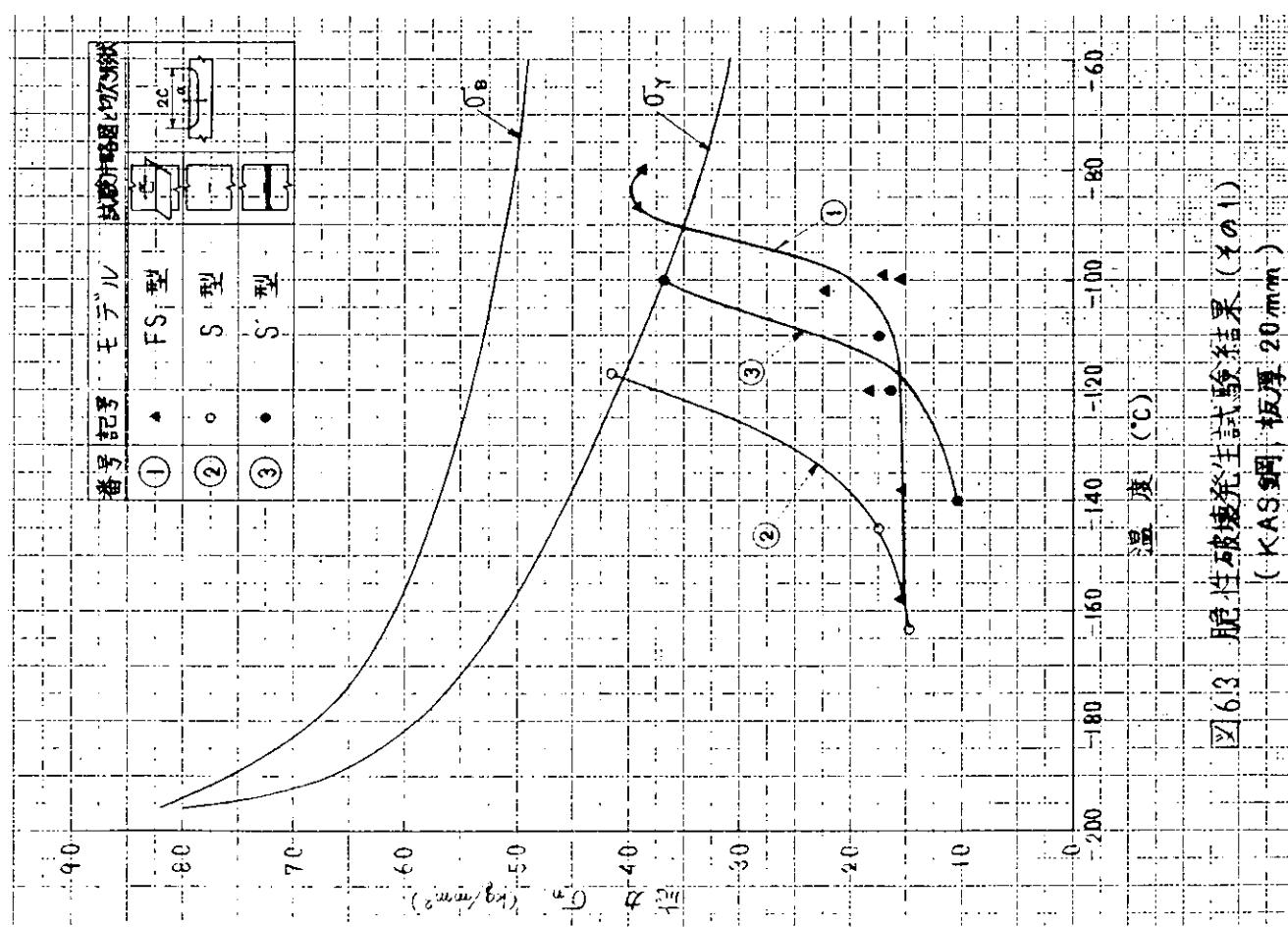
図6.2 渡労亀裂からの脆性破壊発生試験供試モデル形状

表 6.1 脆性破壊発生試験結果一覧

試験片 符号	板厚 $t$ (mm)	試験片幅 $2b$ (mm)	切欠き長 $a$ (mm)	切欠き深 $q$ (mm)	破断荷重 $P$ (ton)	Gross Stress $\sigma_g$ (kg/mm <sup>2</sup> )	Net Stress $\sigma_n$ (kg/mm <sup>2</sup> )	K <sub>C</sub>	試験 温度 $T$ (°C)	$10^3/T_k$ (°K <sup>-1</sup> )	V <sub>C</sub> (mm)	脆性亜裂 発生位置 $\beta$ (ラジアン)
FS - 1	20.2	39.9	7.8	7.7	294	36.5	38.7	—	-80	5.18	0.45	$\pi/2$
FS - 2	20.3	39.9	8.0	8.6	116	14.3	15.3	6.3	-38	7.42	0.05	$\pi/2$
FS - 3	20.4	39.9	7.8	7.7	140	17.2	18.2	7.2	-120	6.54	0.10	$\pi/2$
FS - 4	20.3	39.9	7.9	7.3	119	14.7	15.5	6.0	-100	5.78	0.05	$\pi/2$
FS - 5	20.3	40.4	7.7	8.4	172	21.0	22.3	9.2	-102	5.85	0.02	$\pi/2$
FS - 6	20.2	40.5	7.9	8.1	120	14.7	15.6	6.3	-158	8.70	0.06	$\pi/2$
FS - 7	20.2	40.5	7.9	7.4	132	16.1	17.1	6.6	-99	5.75	0.09	$\pi/2$
FS - 8	20.4	39.9	7.9	7.6	300	36.9	39.2	1.54	-87	5.38	0.25	$\pi/2$
S - 1	20.2	39.9	7.9	7.9	132	16.4	17.4	7.0	-145	7.82	—	$\pi/2$
S - 2	20.0	400	—	—	—	—	—	—	—	—	—	切欠
S - 3	20.3	39.9	7.9	8.0	112	13.8	14.7	5.9	-163	9.08	0.04	$\pi/2$
S - 4	20.3	39.9	8.0	7.7	318	39.3	41.7	16.4	-117	6.42	0.19	$\pi/2$
S' - 1	20.0	400	7.5	7.6	123	15.4	16.3	6.4	-120	6.54	—	$\pi/2$
S' - 2	20.2	39.9	7.9	7.8	280	34.7	36.8	14.6	-100	5.79	—	$\pi/2$
S' - 3	20.3	39.9	8.0	8.9	130	16.0	17.2	7.2	-110	6.14	—	$\pi/2$
S' - 4	20.2	400	8.9	8.0	78	9.7	10.4	4.1	-140	7.52	—	$\pi/2$

注) 1). V<sub>C</sub> : 計測 COD 2). K<sub>C</sub> =  $\frac{\sqrt{qa}}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \tan \frac{\pi a}{2t} \cdot d\theta \cdot \frac{(a^2 \cos^2 \beta + C^2 \sin^2 \beta)^{1/2}}{\sqrt{C}}$





- 41 -

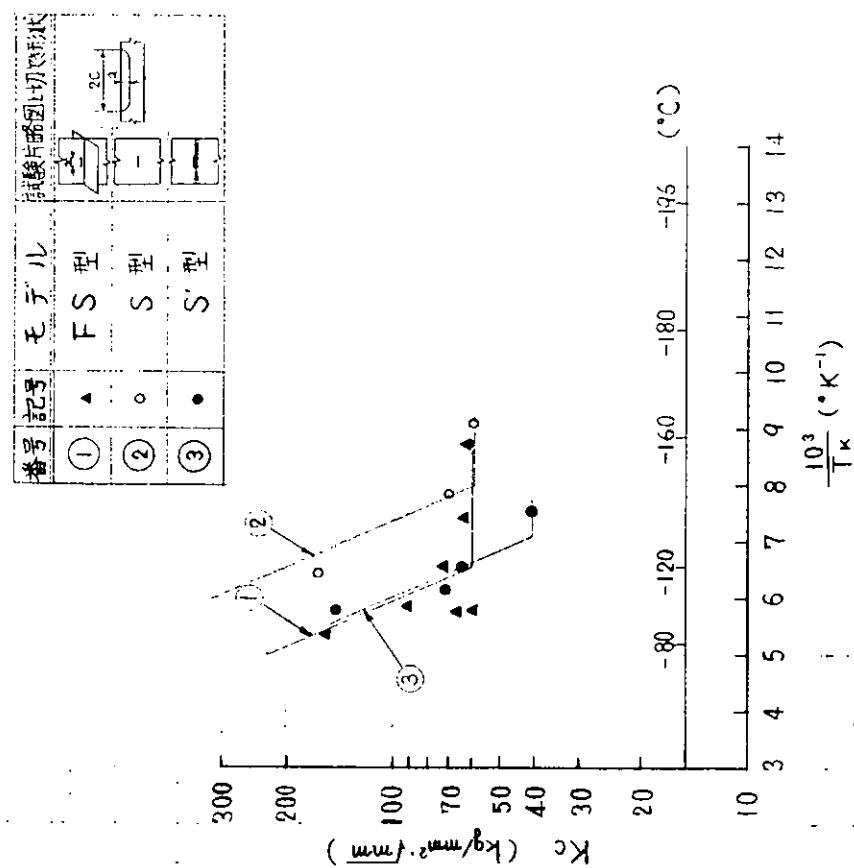


図 6.4 脆性破壊発生試験結果 (KAS鋼 板厚 20mm)

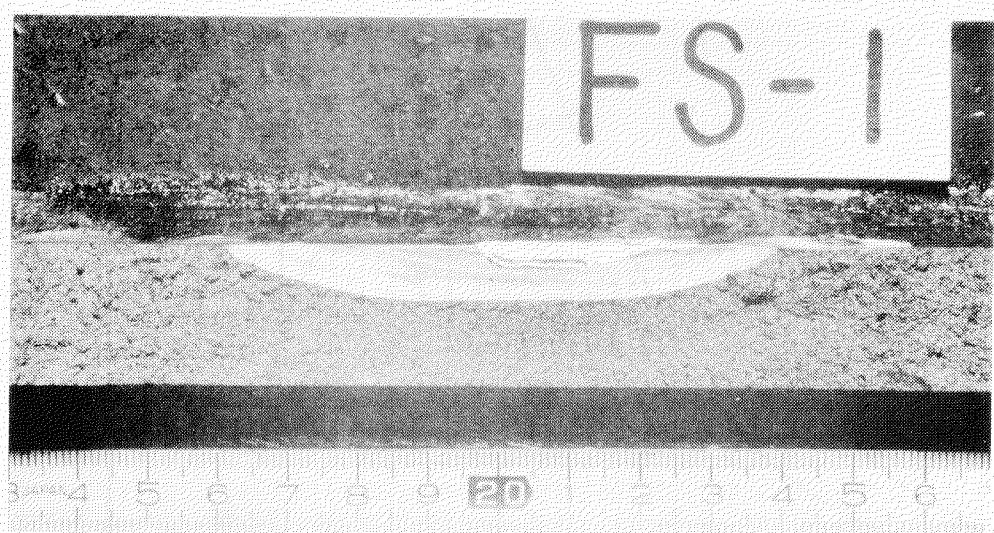
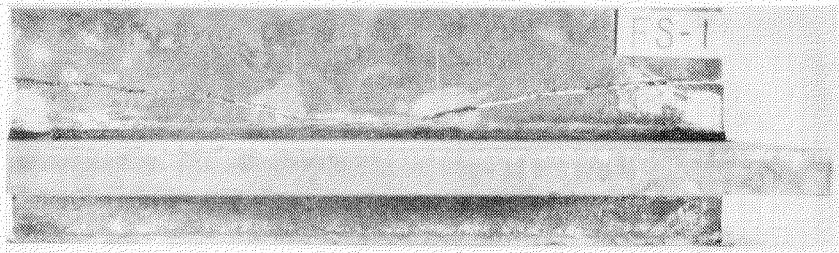


写真 6.1 脆性破壊発生試験における破断状況  
(FS型, 試験温度 -80°C)

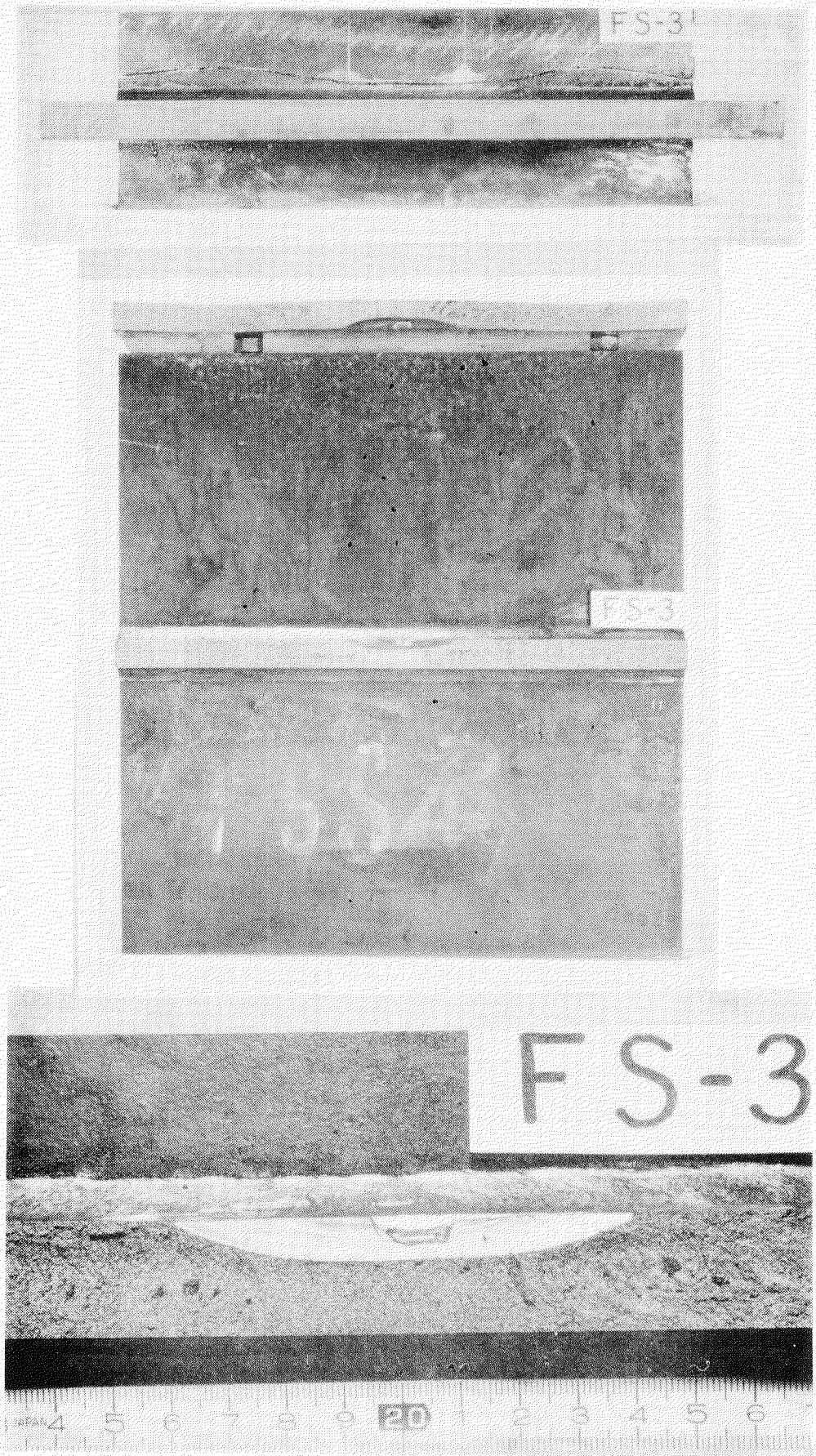
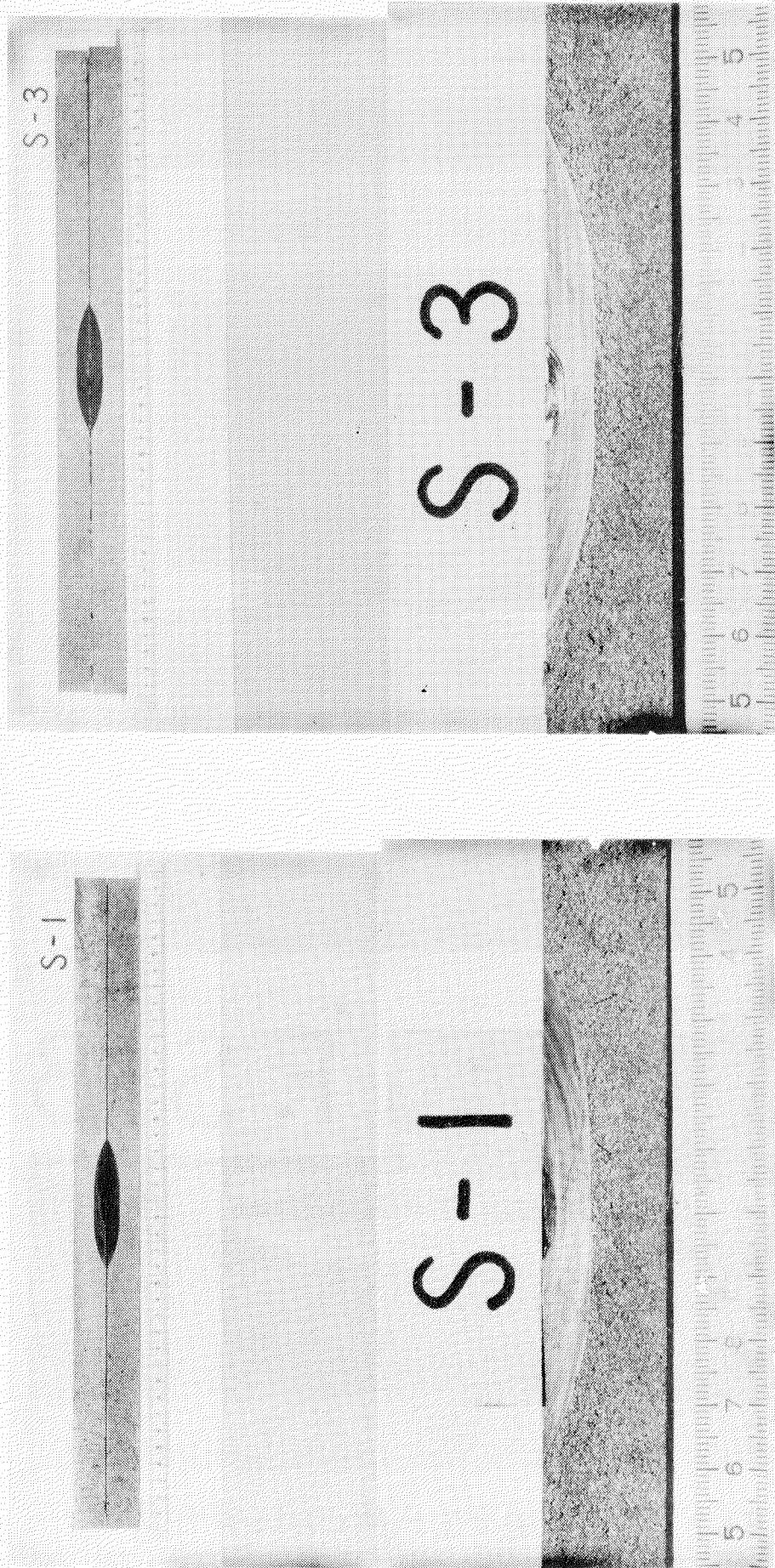


写真6.2 脆性破壊発生試験における破断状況  
(FS型, 試験温度 -120°C)

写真6.3 脆性破壊発生試験における破断状況  
(S型, 試験温度 -145°C)

写真6.4 脆性破壊発生試験における破断状況  
(S型, 試験温度 -163°C)



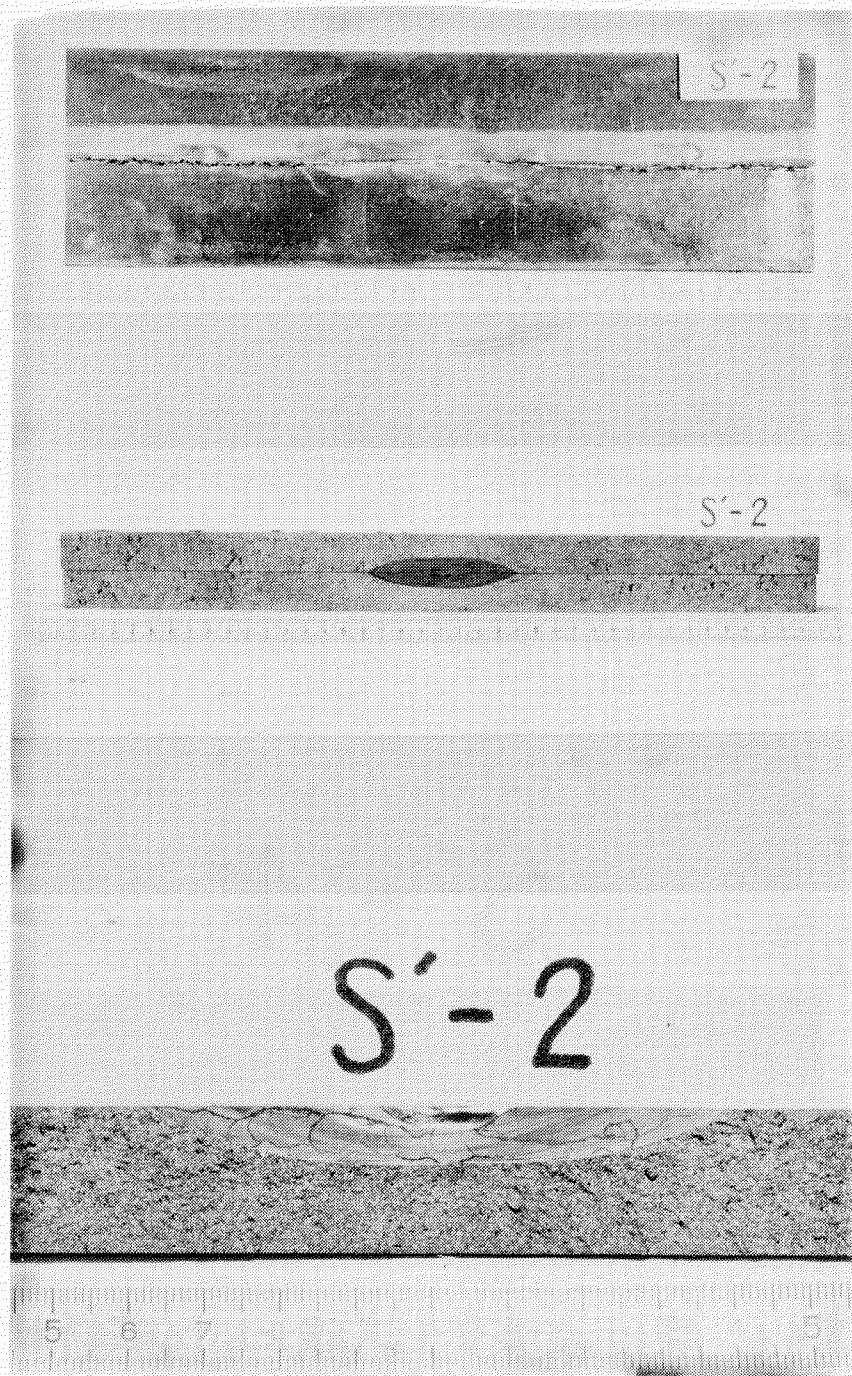


写真6.5 脆性破壊発生試験における破断状況  
( S'型, 試験温度 -100°C )

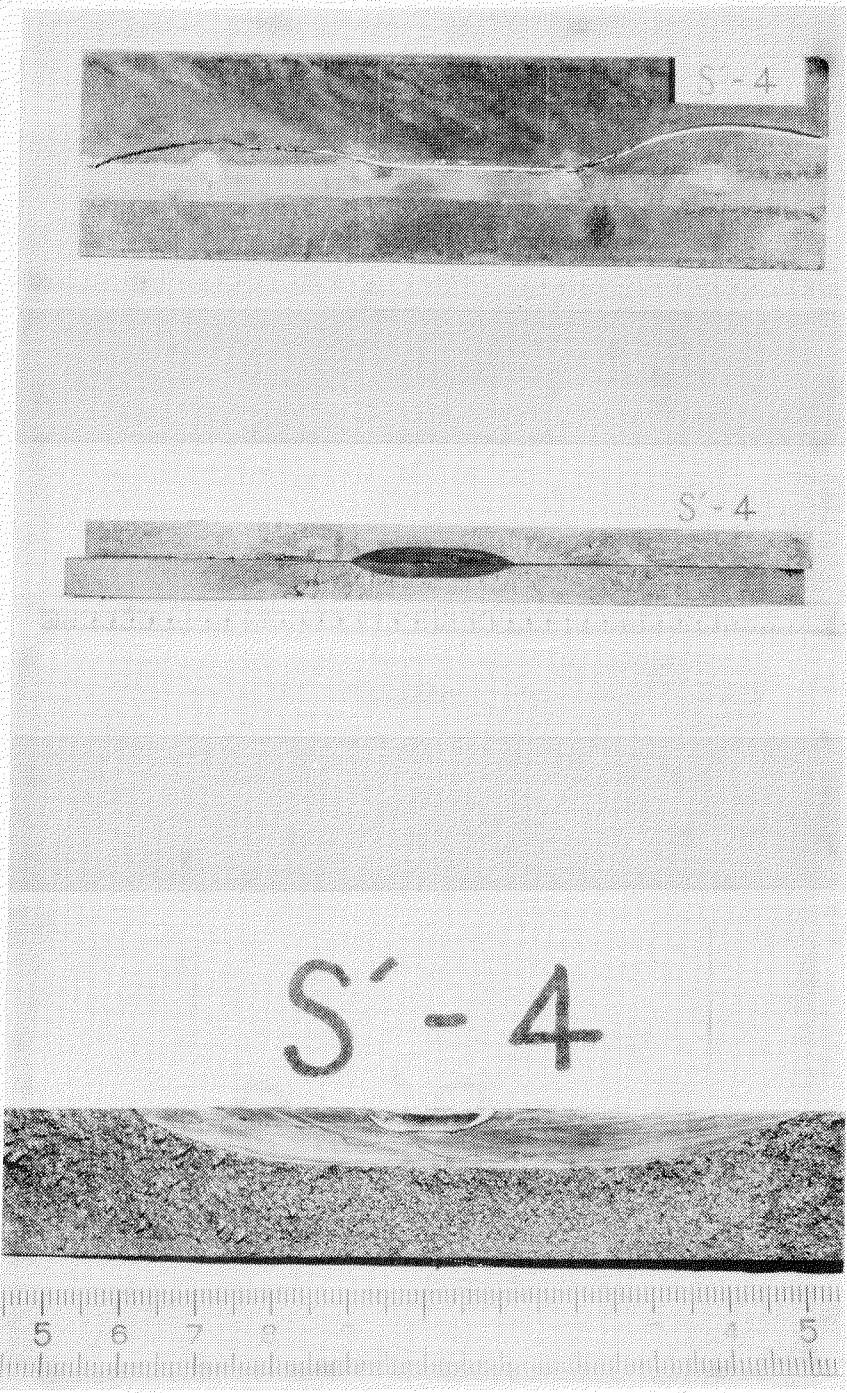


写真6.6 脆性破壊発生試験における破断状況  
(S'型, 試験温度 -140°C)

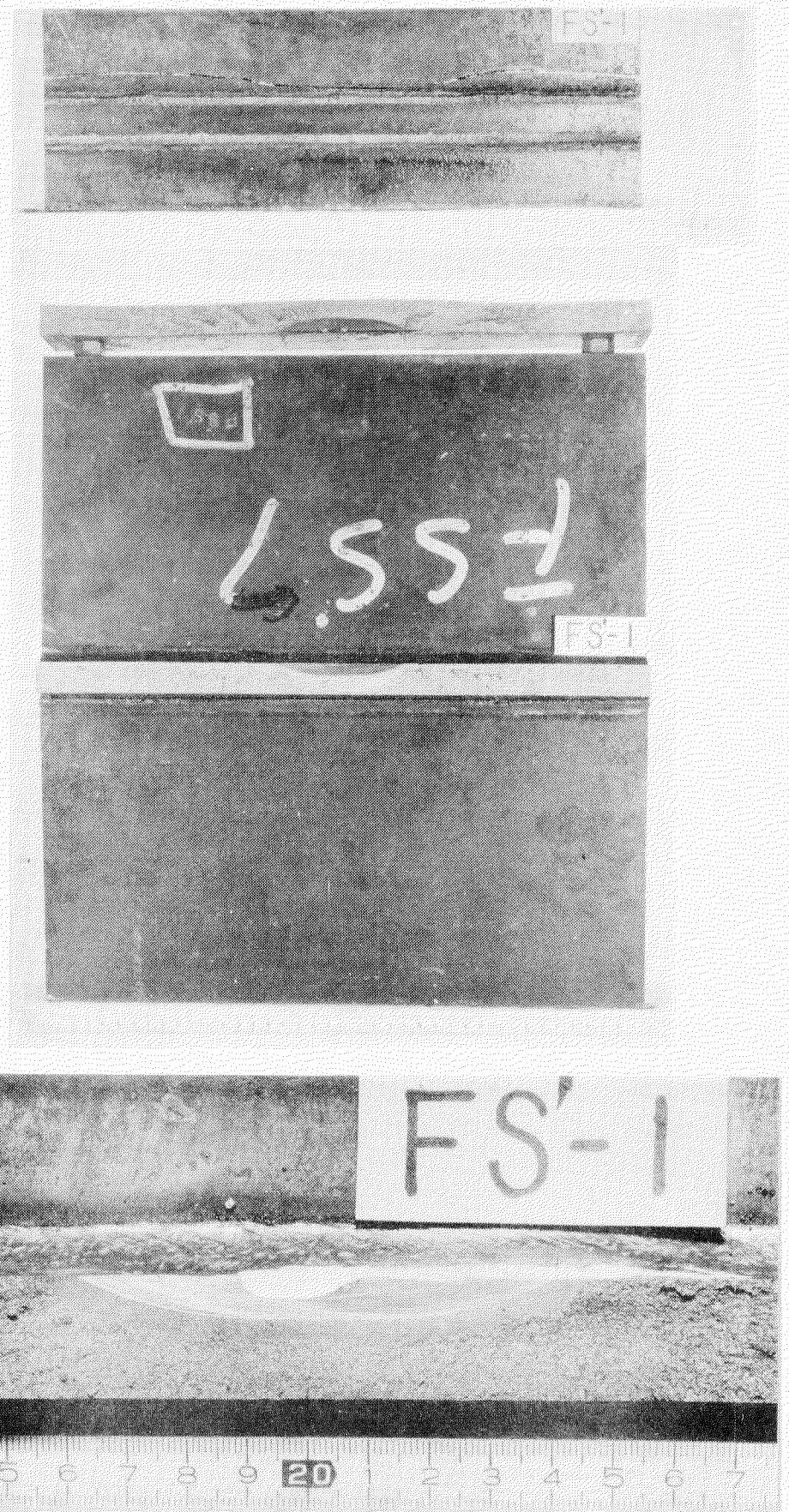


写真6.7 脆性破壊発生試験における破断状況  
(FS型, 試験温度 -91°C)

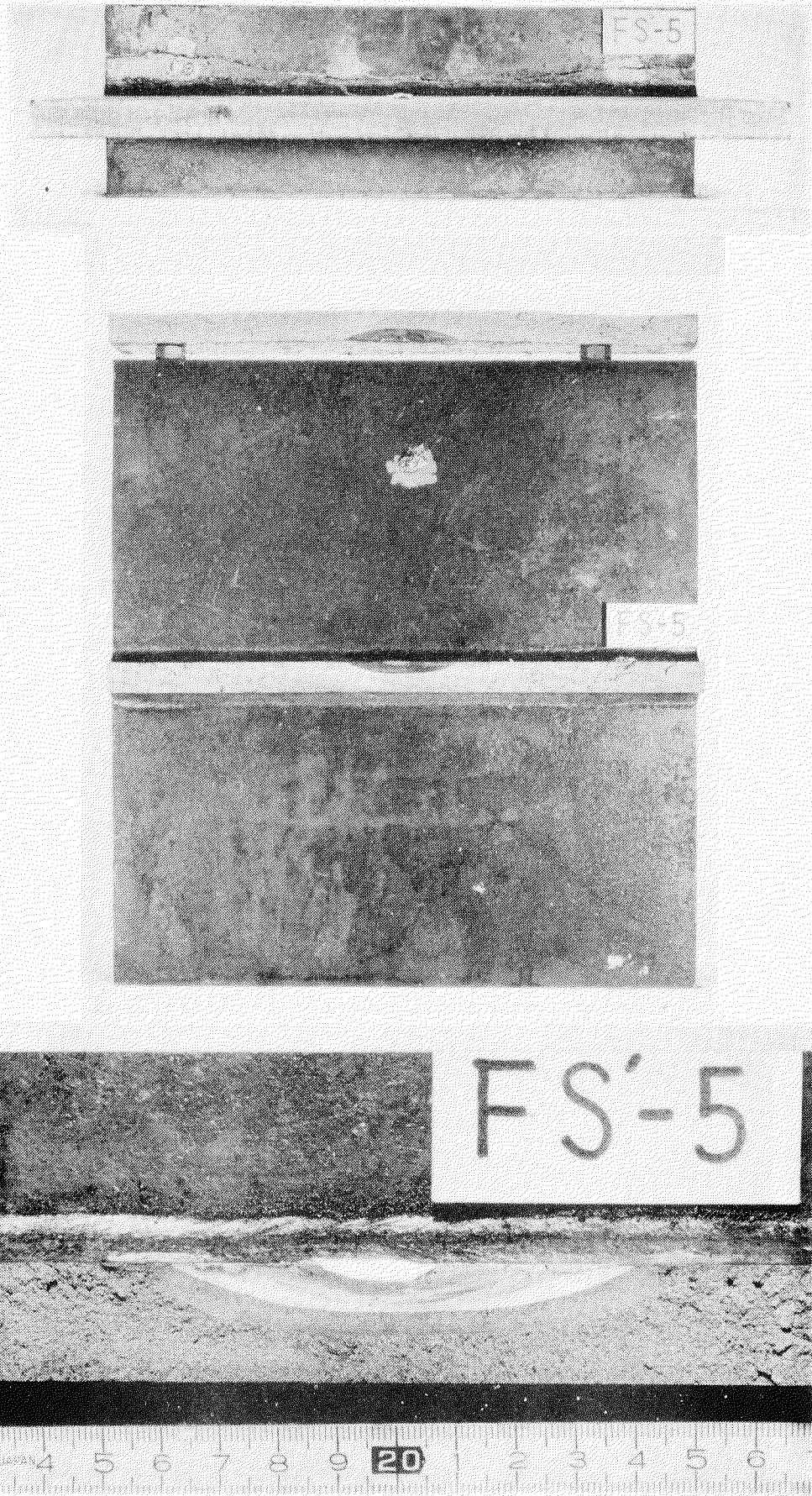


写真6.8 脆性破壊発生試験における破断状況  
( FS'型, 試験温度 -68°C )

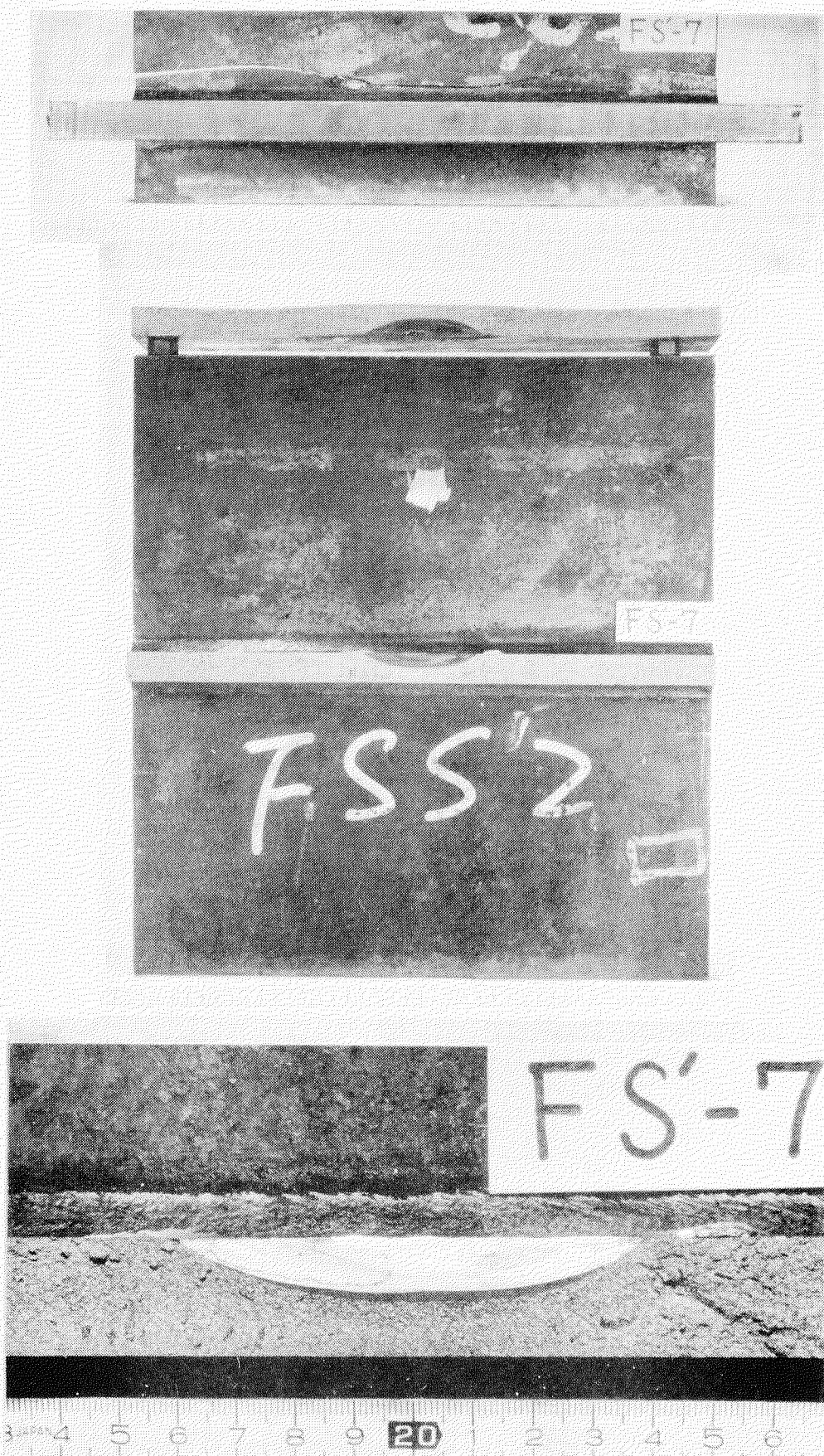


写真6.9 脆性破壊発生試験における破断状況  
( FS'型 試験温度 -100°C )

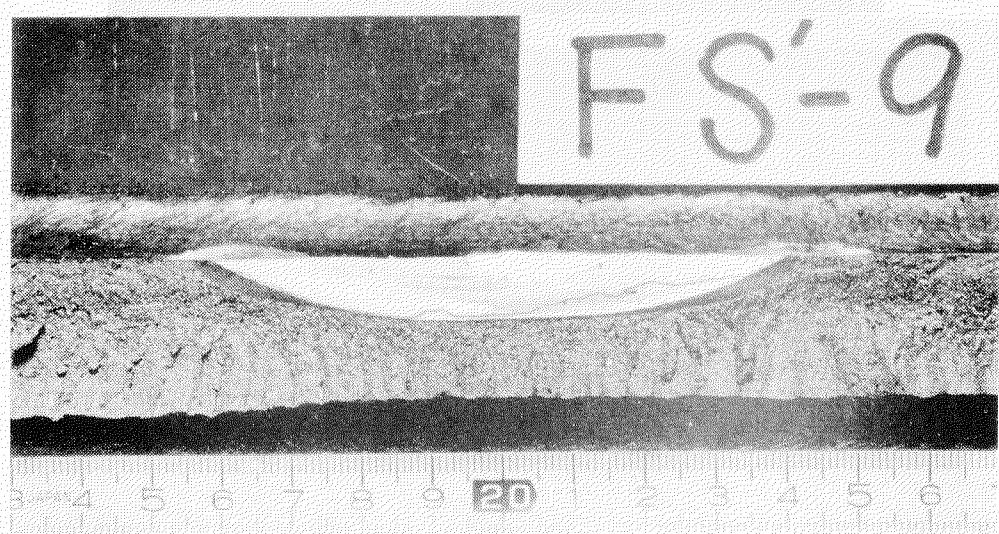
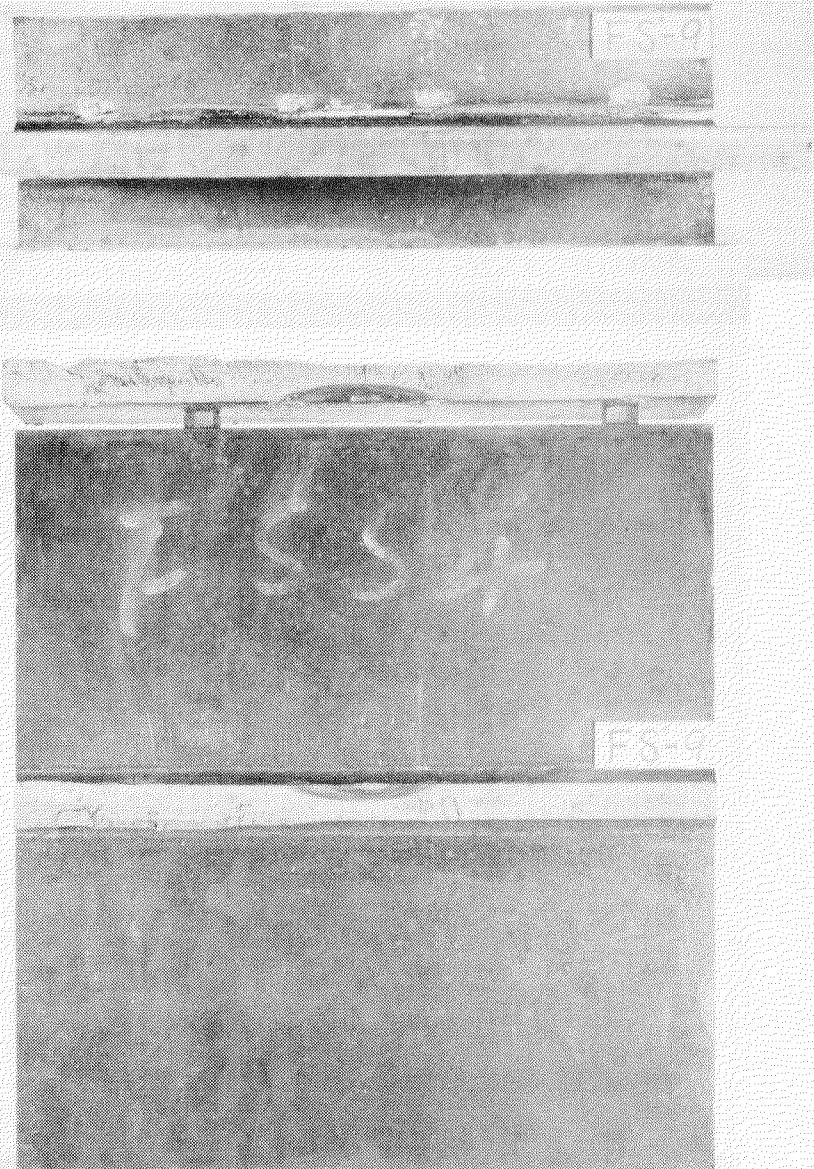


写真6.10 脆性破壊発生試験における破断状況  
( FS型, 試験温度 -119°C )

表 6.2 疲労破裂からの脆性破壊発生試験結果一覧

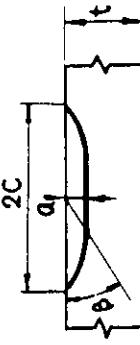
試験片 符 号	板厚 $t$ (mm)	試験機 種別	切欠き全深さ $a$ (mm)	切欠き形状 (切欠き底 半径)	切欠き底面 粗さ (mm)	疲労裂 傷荷重 $P$ (ton)	Gross Stress $\sigma_g$ (kg/mm <sup>2</sup> )	Net Stress $\sigma_n$ (kg/mm <sup>2</sup> )	K <sub>C</sub>	試験温 度 (°C)	$10^3/T_k$ (°K <sup>-1</sup> )	V <sub>C</sub>	疲労試験条件 (R.T.)	脆性破 壊発生位置 $B$ (5インチ)			
													疲労荷重 $P_{f-t}$ (ton)	疲労温度 $T$ (°C)	試験時間 $\Delta t$ (sec)	疲労荷重 $P_{f-n}$ (ton)	応力振幅 $\Delta \sigma$ (kg/mm <sup>2</sup> )
FS'-1	20.2	400	8.9 (7.7)	10.0 (6.8)	161	19.9	21.6	105	-91	5.49	0.08	15~117	20~15.7	13.7	13	$2 \times 10^4$	$\pi/2$
FS'-2	20.3	399	8.0 (7.9)	8.0 (7.5)	164	20.2	21.5	86	-140	7.52	0.08	15~117	20~15.7	13.7	13	$2 \times 10^4$	$\pi/2$
FS'-3	20.0	399	8.2 (8.1)	8.2 (7.5)	157	19.7	21.0	84	-125	6.75	0.03	15~117	20~15.7	13.7	13	$2 \times 10^4$	$\pi/2$
FS'-4	20.2	399	8.0 (7.9)	8.2 (8.1)	159	19.7	21.0	90	-109	6.10	0.03	15~117	20~15.7	13.7	13	$2 \times 10^4$	$\pi/2$
FS'-5	20.3	400	9.0 (7.8)	12.0 (7.7)	267	32.9	35.9	201	-68	4.88	0.56	15~117	20~15.7	13.7	13	$2 \times 10^4$	$\pi/2$
FS'-6	20.0	402	8.8 (7.8)	11.2 (7.8)	208	25.9	28.5	149	-77	5.10	0.09	15~117	20~15.7	13.7	13	$2 \times 10^4$	$\pi/2$
FS'-7	20.0	400	7.9 (7.7)	10.4 (9.6)	146	18.2	20.0	99	-100	5.78	0.12	2~40	0.3~5.3	5.0	600	$1 \times 10^6$	$\pi/2$
FS'-8	20.0	399	8.0 (7.9)	9.5 (7.4)	291	36.5	39.6	185	-81	5.21	0.25	2~40	0.3~5.3	5.0	600	$1 \times 10^6$	$\pi/2$
FS'-9	20.0	400	8.7 (8.0)	9.3 (8.7)	99	12.3	13.3	62	-119	6.49	0.02	2~40	0.3~5.3	5.0	600	$1 \times 10^6$	$\pi/2$
FS'-10	20.0	398	7.7 (7.7)	7.3 (7.2)	327	41.0	42.0	175	-90	5.46	0.24	2~40	0.3~5.3	5.0	600	$1 \times 10^6$	$\pi/2$

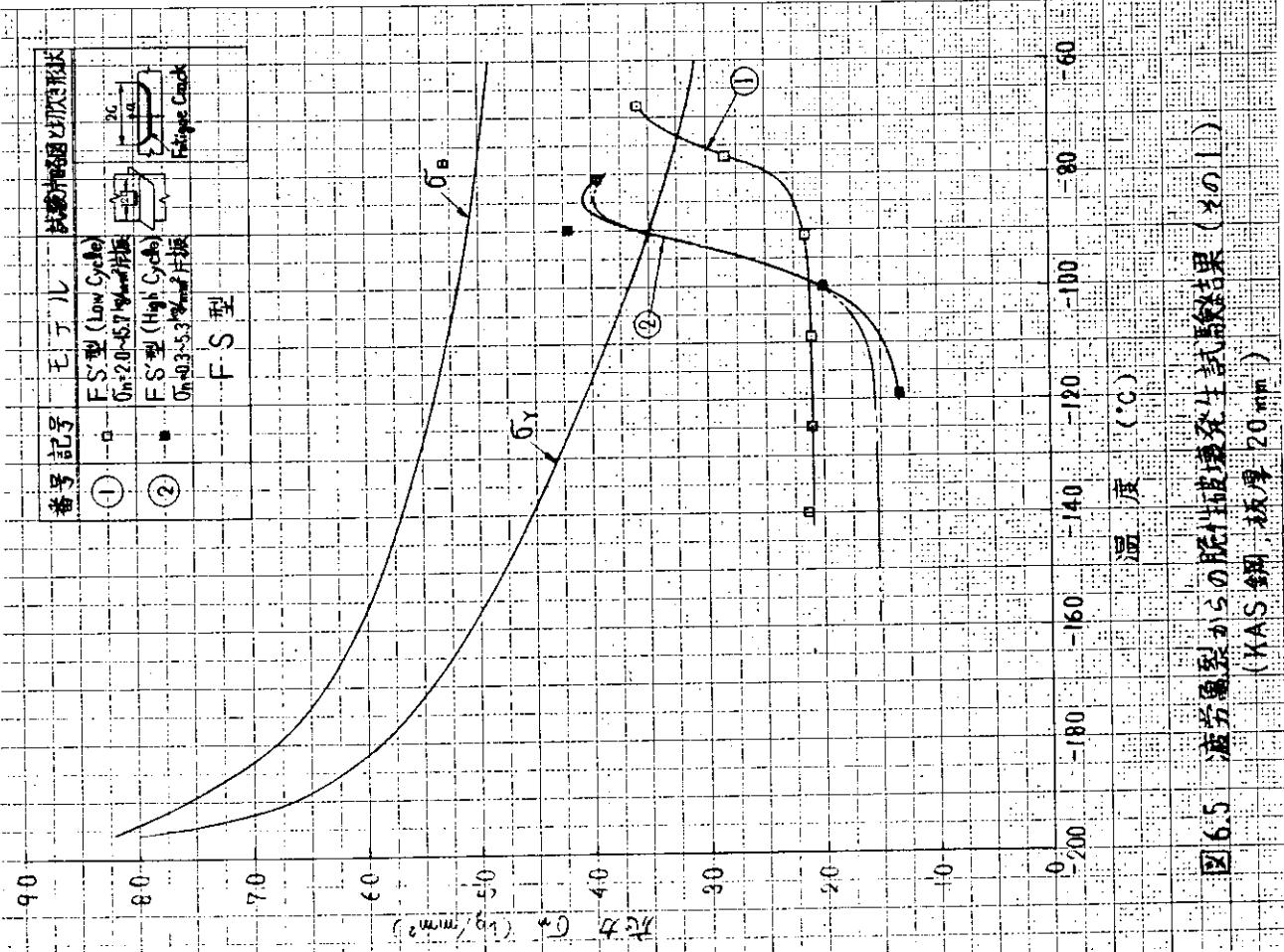
注 1)  $V_C$  ; 対測 COD

$$2) K_C = \frac{S_2 \sqrt{\pi a}}{\Phi_0} \sqrt{\frac{2t}{\pi a} \cdot \tan \frac{\pi a}{2t}} \cdot \frac{(a^2 \cos^2 \beta + C^2 \sin^2 \beta)^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{C}}$$

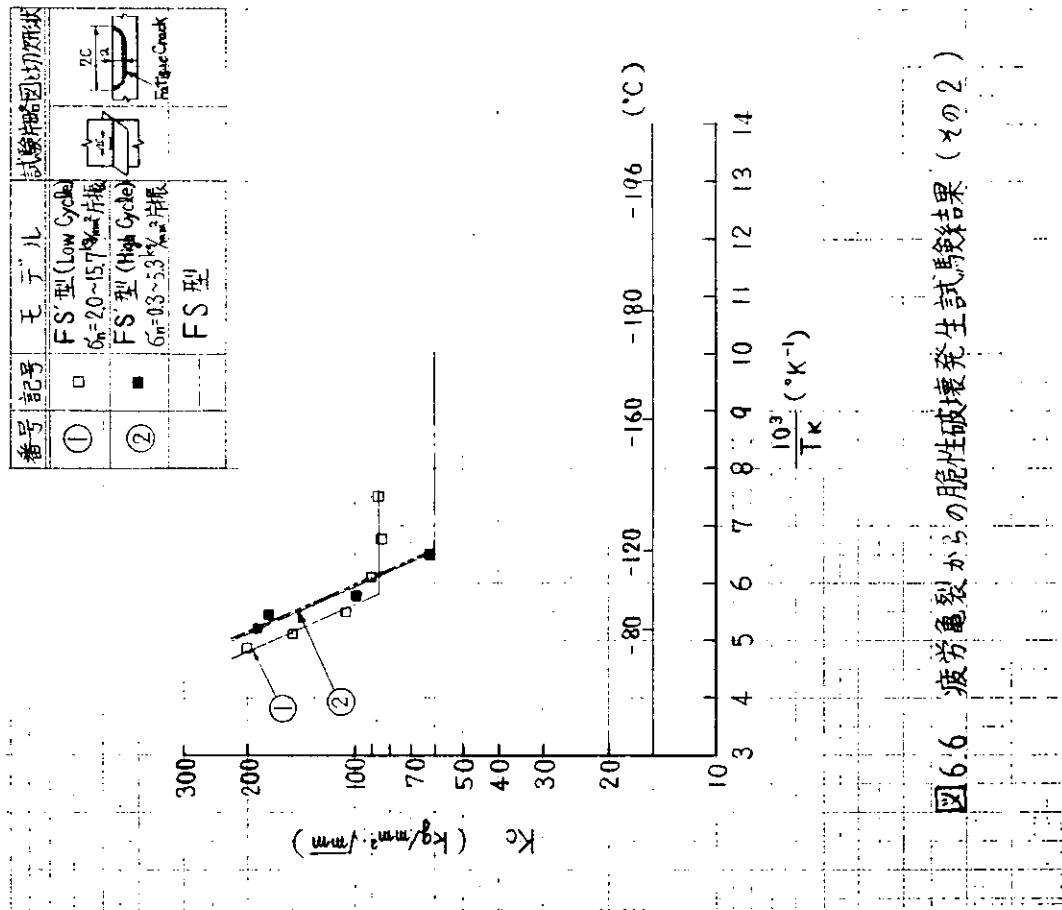
$$\Phi_0 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \left( \frac{C^2 - a^2}{C^2} \right) \sin^2 \theta} \cdot d\theta$$

$$= \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{C^2 - a^2}{4C^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$





- 52 -



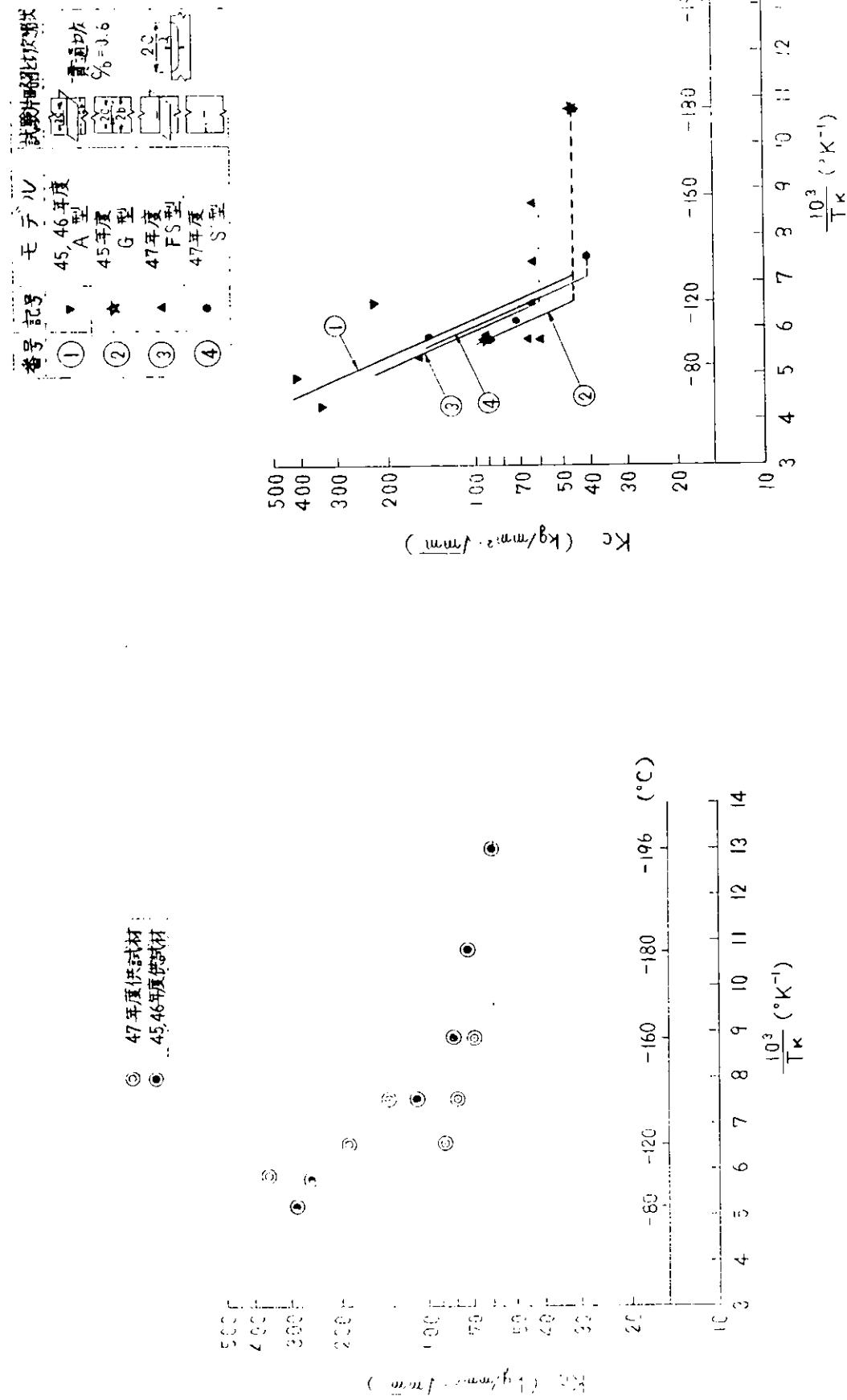


図 6.8 板厚貫通刃モード試験結果(中央切欠き型ディーブル試験結果)

図 6.7 45, 46年度供試材と47年度供試材の脆性破壊発生試験結果(中央切欠き型ディーブル試験結果)

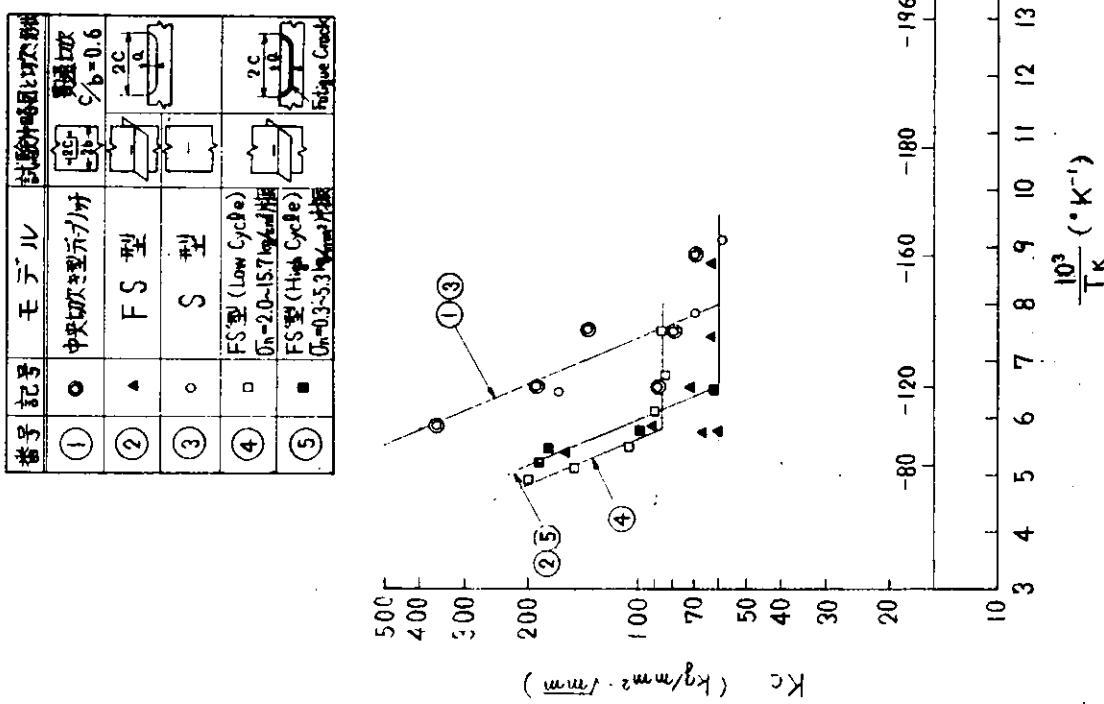


図6.9 各種切欠き形状からのかの脆性亀裂発生特性と  
表面疲労亀裂からのかの脆性亀裂発生特性

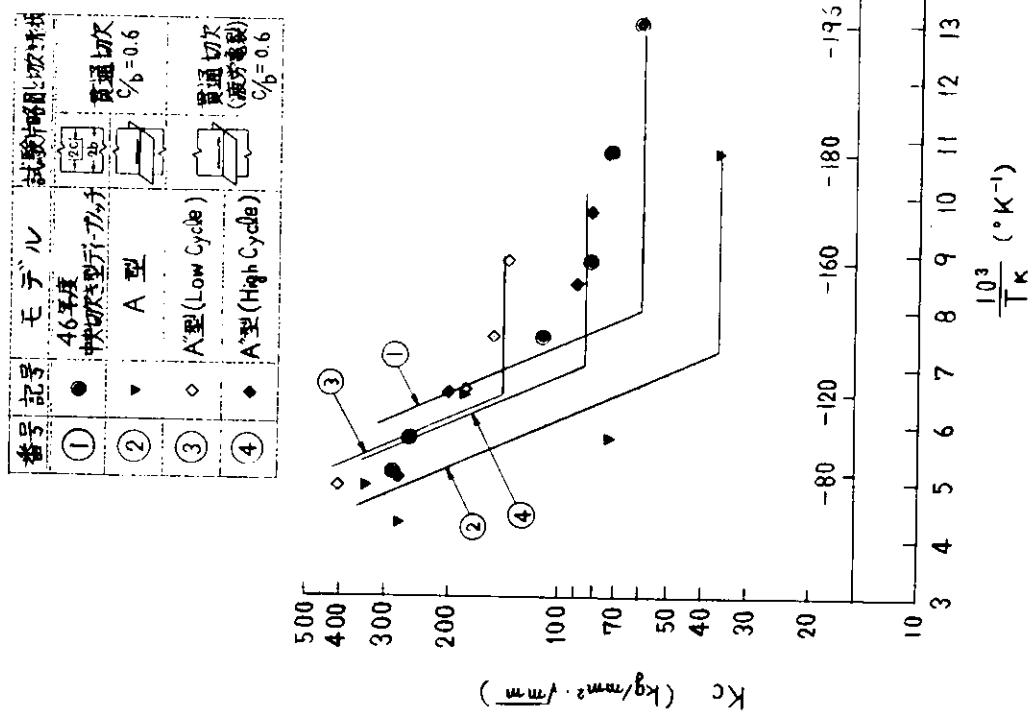


図6.10 板厚貫通形切欠きからのかの脆性亀裂  
発生特性と疲労亀裂からのかの脆性亀裂  
発生特性