

第153研究部会
厚鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度
および疲労強度に関する研究
報告書
I

昭和52年3月

社団法人
日本造船研究協会

本年度研究は、3カ年計画の最終年度として、船体用50キロ級高張力鋼板（板厚25.4mm）のエレクトロスラグ溶接継手を供試し、ボンド部破壊靭性値のバラツキを統計的に検討・把握するとともに、脆性挙動におよぼすコンプライアンスの影響を調査した。

また、一般用船体用鋼板（板厚25.4mm）のエレクトロスラグ溶接継手および船体用50キロ級高張力鋼板（板厚25.4mm）のエレクトロガス溶接継手について疲労強度を把握した。

はしがき

本報告書は、日本船舶振興会の昭和51年度補助事業「巨大タンカーの研究」の一部として、日本造船研究協会が第153研究部会においてとりまとめたものである。

第153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)	飯野 賢(石川島播磨重工業)
幹事	飯田国広(東京大学)	池田 一夫(神戸製鋼所)
		印藤 弘郷(三井造船)
		仰木 盛綱(佐世保重工業)
		川原 正言(日本钢管)
		川口 喜昭(住友金属工業)
		黒川 常夫(長崎大学)
		酒井 啓一(石川島播磨重工業)
		永井 欣一(広島大学)
		町田 進(東京大学)
		松本 宏之(石川島播磨重工業)
		三村 宏(新日本製鐵)
委員	青木 満(神戸製鋼所)	飯塚 真平(住友重機械工業)
	池田 稔(川崎製鉄)	井上 錠(船舶技術研究所)
	太田 幹二(日本钢管)	賀来信一(日本海事協会)
	片坐 泰治(日立造船)	坂井 大輔(三菱重工業)
	佐藤 邦彦(大阪大学)	佐藤 邦彦(大阪大学)
	西原 二郎(九州大学)	豊貞 雅宏(日立造船)
	武富 孝作(神戸製鋼所)	中牟田 浩(石川島播磨重工業)
	秦 数実(日本钢管)	秦 数実(日本钢管)
	松村 正夫(函館ドック)	矢田 敏夫(石川島播磨重工業)
	吉永 昭男(船舶技術研究所)	吉永 昭男(船舶技術研究所)
		渡辺 昌建(三菱重工業)

疲労小委員会

主査	飯田国広(東京大学)	石黒 隆義(新日本製鐵)
	飯野 賢(石川島播磨重工業)	大橋 延夫(川崎製鉄)
		岡野 伊史(佐世保重工業)

川口 喜昭(住友金属工業)
岸本 宏次(三井造船)
豊貞 雅宏(日立造船)

川原 正言(日本钢管)
恒成 利康(川崎重工業)
的場 正明(三菱重工業)

船殻破壊強度検討小委員会

主査 片坐 泰治(日立造船)	惠美 洋彦(日本海事協会)
池田 一夫(神戸製鋼所)	酒戸 恒男(住友重機械工業)
川原 正言(日本钢管)	佐藤 邦彦(大阪大学)
堺 由輝(川崎重工業)	秦 数実(日本钢管)
豊貞 雅宏(日立造船)	町田 進(東京大学)
原田 耕次(日立造船)	三村 宏(新日本製鉄)
松本 宏之(石川島播磨重工業)	吉識 恒夫(三井造船)
矢島 浩(三菱重工業)	
渡辺 昌建(三菱重工業)	
討議参加者 有川 信一(佐世保重工業)	石沢 隆(神戸製鋼)
伊藤 隆規(日立造船)	井上 克明(石川島播磨重工業)
今井 純一郎(三菱重工業)	岩崎 紀夫(日本钢管)
海野 誠(川崎重工業)	岡野 伊史(佐世保重工業)
尾野 英夫(川崎重工業)	岡 実(日本海事協会)
金井 良助(三菱重工業)	金綱 正夫(三井造船)
神尾 善二(三井造船)	鷹井 紀之(川崎重工業)
川野 始(三菱重工業)	北田 博重(日本海事協会)
小林 邦彦(川崎製鉄)	佐藤 博一(日本钢管)
白倉 貴雄(神戸製鋼)	竹内 直記(神戸製鋼)
多々良 敏行(住友重機械工業)	中島 明(新日本製鉄)
中野 善文(川崎製鉄)	中村 隆英(佐世保重工業)
成本 朝雄(川崎製鉄)	二見 吉雄(住友重機械工業)
萩原 行人(新日本製鉄)	半沢 貢(新日本製鉄)
東田 喜輔(住友重機械工業)	東村 正義(日立造船)
日野 隆博(三菱重工業)	藤井 和章(石川島播磨重工業)
前中 浩(船舶技術研究所)	松下 久雄(三井造船)
松本 健男(住友重機械工業)	宮迫 計典(東京大学)
宮成 恭慶(石川島播磨重工業)	宮本 官士(神戸製鋼)
森 正浩(三菱重工業)	村田 征一郎(日立造船)
山田 桑太郎(川崎重工業)	

目 次

1. まえがき	1
2. 研究の目的・内容	1
3. 供 試 材	7
4. 脆性破壊の発生・伝播停止特性に関する研究	9
4.1 組織・硬度分布調査	9
4.1.1 目 的	9
4.1.2 試験内容	9
4.1.3 試験結果および考察	9
4.1.4 まとめ	9
4.2 丸棒引張試験	13
4.2.1 目 的	13
4.2.2 試験内容	13
4.2.3 試験結果および考察	13
4.2.4 まとめ	13
4.3 V - ノッチシャルピー試験	15
4.3.1 目 的	15
4.3.2 試験内容	15
4.3.3 試験結果および考察	15
— 試験結果のバラツキに対する統計的検討 —	
4.3.4 まとめ	16
4.4 小形 COD 曲げ試験	32
4.4.1 目 的	32
4.4.2 試験内容	32
4.4.3 試験結果および考察	32
— 破壊靭性値のバラツキに対する統計的検討 —	
4.4.4 まとめ	33
4.5 複数貫通切欠大形引張試験	48
4.5.1 目 的	48
4.5.2 試験内容	48
4.5.3 試験結果および考察	48
— 脆性亀裂伝播停止特性に及ぼすコンプライアンスの影響に関する検討 —	
4.5.4 まとめ	52
5. 疲労特性に関する研究	66
5.1 繼手疲労試験	66
5.1.1 目 的	66
5.1.2 試験内容	66

5.1.3 試験結果および考察	66
5.1.4 まとめ	68
5.2 継手疲労亀裂伝播試験	75
5.2.1 縦継手疲労亀裂伝播試験	75
5.2.1.1 目的	75
5.2.1.2 試験内容	75
5.2.1.3 試験結果および考察	76
5.2.1.4 まとめ	78
5.2.2 複数表面欠陥からの疲労亀裂伝播試験	88
5.2.2.1 目的	88
5.2.2.2 試験内容	88
5.2.2.3 試験結果および考察	88
5.2.2.4 まとめ	90
5.3 隅肉溶接曲げ疲労試験	102
5.3.1 目的	102
5.3.2 試験内容	102
5.3.3 試験結果および考察	103
5.3.4 まとめ	104
5.4 縦通材スカラップ部の疲労試験	119
5.4.1 目的	119
5.4.2 試験内容	199
5.4.3 試験結果および考察	119
5.4.4 まとめ	121
5.5 内構材から外板への疲労亀裂伝播試験	148
5.5.1 目的	148
5.5.2 試験内容	148
5.5.3 試験結果および考察	148
5.5.4 まとめ	149
5.6 隅肉脚長に関する総合考察	162
6. むすび	164

1. まえがき

日本造船研究協会第153研究部会は、"巨大タンカー用厚鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度および疲労強度に関する研究"をテーマとして、昭和49年4月より3ヶ年計画で発足したものである。

この研究の目的は、100万重量トン程度の巨大タンカー開発の基礎資料を得るために、その船体外殻材に使用される予想される、一般船体用軟鋼板および船体用50キロ級高張力鋼板の厚板およびその溶接継手について、破壊非性ならびに疲労特性を把握することであった。

しかしながら、造船不況による巨大タンカー需要減と相俟って、研究内容に、"船殻の破壊管理制御に関する基礎検討"的色彩をもたせるべく、若干の軌道修正が行なわれた。すなわち、昭和51年度(第3年度)研究として実施された。

- 溶接継手ボンド部破壊非性値のバラツキに対する統計的検討
 - 脆性亀裂伝播停止特性に及ぼすコンプライアンスの影響に関する検討
 - 疲労強度に及ぼす隅肉脚長の影響に関する総合的考察
 - 船殻破壊強度検討小委員会の設置・活動
- などである。

なお、本研究は、委員会において審議決定された研究計画の基本方針にもとづき、実験担当委員を中心とした委員会・幹事会をたびたび開催し、詳細な技術的検討を行なって実施されたものである。研究の全体計画は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られたものである。なお、船殻破壊強度検討小委員会報告書は、別冊としてとりまとめられことになっている。

2. 研究の目的・内容

従来原油タンカーは、精製地荷揚げの方式を探っているため30万重量トン程度が標準船型と見なされていたが、二次輸送方式の採用によりさらに大型化する趨勢にある。

船殻の大型化にともない軟鋼板、50キロ級高張力鋼板ともかなりの厚鋼板が使用される場合が多くなるが、巨大船殻に実用可能な厚鋼板およびその溶接継手の強度特性は必ずしも明らかではない。

100万重量トン程度のタンカーの船体外殻材は、ある試算によれば軟鋼板の場合板厚40mm程度に、降伏点32Kg Kg/mm²級の50キロ級高張力鋼板の場合板厚35mm程度になると予想される。しかし、これら厚鋼板は、造船用としてはこれまでの実績が少ないため、軟鋼板、50キロ級高張力鋼板の厚鋼板およびその溶接継手について、脆性破壊の発生および伝播停止特性ならびに疲労特性を研究把握する必要がある。

さらに、これらの研究成果および他のS.R研究部会で実施された破壊非性関係の研究成果をはじめ、これまでに蓄積された脆性破壊強度・疲労強度に関する研究成果を有効に活用し、船殻破壊強度の定量的検討・把握を試み、設計・工作へ feed back せしめるべく努力する必要がある。

以上により、昭和49年4月より3ヶ年計画で下記内容の研究が実施された。

1) 脆性破壊の発生・伝播停止特性に関する研究

巨大タンカーの船体外殻材に使用されると予想される、一般船体用軟鋼板および船体用50キロ級高張力鋼板の厚板材母材、およびそれらに既存の溶接法を適用した場合の継手の脆性破壊強度を把握した。

2) 疲労特性に関する研究

巨大タンカーの船殻材に使用されると予想される、一般船体用軟鋼板および船体用50キロ級高張力鋼板の母材、ならびにそれらに既存の溶接法を適用した場合の継手の疲労強度を把握した。

さらに、厚板化する船殻部材の隅肉溶接脚長決定の基礎資料を得るために、各種条件下（スニップエンド曲げ、剪断、曲げ、軸力スカラップ部等）における隅肉溶接脚長と疲労強度との関係を把握した。

さらに、小委員会活動として、設計担当者と破壊力学に関する研究担当者を交えた“船殻破壊強度検討小委員会”が設置され、船殻破壊強度の定量的検討・把握が試みられ、設計・工作への feed back が努力された。すなわち、図2.1 および図2.2 に示すようなフローチャートを完成させるべく努力されると同時に、2種類の船殻構造要素例に対する case study が試みられた。

なお、昭和51年度は、その第3年次として下記内容の研究が実施された。

1) 脆性破壊の発生・伝播停止特性に関する研究

昭和49年度・昭和50年度の研究で、甲板および船底板を対象に、一般船体用軟鋼板（K E N鋼板、板厚40mm および K D K鋼板、板厚35mm、controlled rolled 材）の3電極片面1層サブマージアーク溶接継手についての、また船側外板を対象に、一般船体用軟鋼板（K D K鋼板、板厚35mm、controlled rolled 材）ならびに船体用50キロ級高張力鋼板（K D 32鋼板、板厚35mm、controlled rolled 材）のエレクトロガス溶接継手およびエレクトロスラグ溶接継手等についての脆性破壊強度を把握した。

引き続き、昭和51年度研究においては、船体用50キロ級高張力鋼板（K D 32鋼板、板厚25.4mm、controlled rolled 材）のエレクトロガス溶接継手を供試し、ボンド部破壊非性値のバラツキを統計的に検討・把握するとともに、脆性破壊挙動におけるコンプライアンスの影響を調べるため、下記の試験を実施した。

1. 1) 組織・硬度分布調査

供試溶接継手の $\frac{1}{2}t$ 部と表面から2mmの位置の硬度分布（H_v）を測定した。また、顕微鏡組織を調査した。

1. 2) 丸棒引張試験

供試 KD 32 鋼板（25.4）の母材について、室温～-196℃の温度範囲で丸棒引張試験片による静的引張試験を実施した。

1. 3) V - ノッチシャルピー試験

供試 KD 32 鋼板（25.4）の母材、およびエレクトロガス溶接継手溶接金属中央、ボンド、HAZ 2mm、HAZ 4mm、HAZ 8mm の各位置にノッチ加工した試験片により、遷移曲線を求めた。さらに、遷移曲線上の数温度で多数の試験片を供試し、データのバラツキを把握した。なお、試験片は全て $\frac{1}{2}t$ 部より採取し、板厚面にノッチ加工した。

1. 4) 小形 COD 曲げ試験

供試 KD 32 鋼板（25.4）の母材、およびエレクトロガス溶接継手ボンドにノッチ加工した試験片を供試し、3点曲げ試験によって限界 COD 値を計測し、限界 COD 値～温度の関係を求めた。さらに、多数の試験片を数温度で供試し、限界 COD 値のバラツキを把握した。

1. 5) 複数貫通切欠大形引張試験

脆性破壊挙動におけるコンプライアンスの影響を調べる目的で、コンプライアンスを変化させ得る装置を作製した。

さらに、この装置を使用して、亀裂伝播部幅1600mm程度の大形二重引張試験を実施し、脆性亀裂伝播停止特性に及ぼすコンプライアンスの影響を把握する基礎データを得た。

2) 疲労特性に関する研究

昭和49年度・昭和50年度研究に引き続き、一般船体用軟鋼板（K D K鋼板、板厚25.4mm、controlled rolled 材）のエレクトロスラグ溶接継手、および船体用50キロ級高張力鋼板（K D 32鋼板、板厚25.4mm、controlled rolled 材）のエレクトロガス溶接継手について疲労強度を把握した。さらに、厚板化する船殻部材の隅肉溶接脚長決定の基礎資料を得る目的で、隅肉溶接曲げ疲労強度、縦通材スカラップ部の疲労強度および内構材から外板への疲労亀裂伝播挙動等を把握した。

昭和 51 年度研究実施内容を以下に記す。

2. 1) 継手疲労試験

大入熱溶接継手の疲労強度ならびにアンダーカットの許容基準に関する資料を求める目的とし、昭和 50 年度研究結果の追加データを得るために、供試 KDK 鋼板 (25.4) エレクトロスラグ溶接継手の健全およびアンダーカット付試験片を供試して、軸力荷重下での疲労試験を実施した。

2. 2) 継手疲労亀裂伝播試験

- (1) 溶接継手による残留応力や組立拘束力の大きい場合も含めて、疲労亀裂の伝播特性を明らかにすることを目的として、供試 KD32 鋼板 (25.4) の母材およびエレクトロガス溶接継手について、室温部分片振軸力荷重制御での疲労亀裂伝播試験を実施した。
- (2) 溶接部に多数の欠陥が存在する場合、あるいは内構材から外板へ亀裂が伝播する場合の亀裂伝播挙動を把握するため、供試 KD32 鋼板 (25.4) の母材を用い、複数個の表面切欠きを有する試験片を製作・供試して、疲労亀裂伝播試験を実施した。

2. 3) 隅内溶接曲げ疲労試験

隅内溶接部が面外曲げ荷重を受ける場合の、疲労強度に及ぼす隅内溶接脚長ならびに止端部形状の影響を把握した。昭和 50 年度研究結果の補足データを求めるため、隅肉寸法を変化させた試験片、および隅肉止端の形状を変えた試験片を供試した。材料は供試 KDK 鋼板 (25.4) を使用した。

2. 4) 縦通材スカラップ部の疲労試験

昭和 50 年度に実施した予備試験に引き続き、船殻構造部材の疲労亀裂発生寿命と小形試験片の疲労亀裂発生寿命との相関を明らかにすることを目的として、縦通材スカラップ部を供試モデルとした疲労試験を実施した。静荷重および疲労荷重時のスカラップ部における応力分布測定を行ないながら、疲労亀裂発生挙動ならびに亀裂伝播挙動を調べた。材料は供試 KD32 鋼板 (25.4, 12.7) を使用した。

2. 5) 内構材から外板への疲労亀裂伝播試験

内構材に生じた疲労亀裂が、外板との隅内溶接部に達した後の伝播特性を把握することを目的に、スチフナを平板に隅内溶接で取付けた組立試験片を供試し、内構相当部材からの疲労亀裂伝播試験を実施した。隅内溶接部の脚長を変えてその影響について調べた。材料は供試 KD32 鋼板 (25.4) を使用した。

なお、以上の試験は表 2.1 および表 2.2 に示す分担で実施された。

さらに、先に述べたごとく、船殻破壊強度検討小委員会が設置され、

- (1) 破壊力学の設計手法および理念の確立に関する調査
- (2) 破壊力学設計の実用化に至る諸問題および今後の研究方針のまとめ
- (3) 2種類の船殻構造要素例に対しての case study

などが行なわれた。なお、先に述べたごとく、船殻破壊強度検討小委員会報告書は、別冊としてとりまとめられることになっている。

船殻構造要素例（破壊挙動に着目した基本要素分類例）

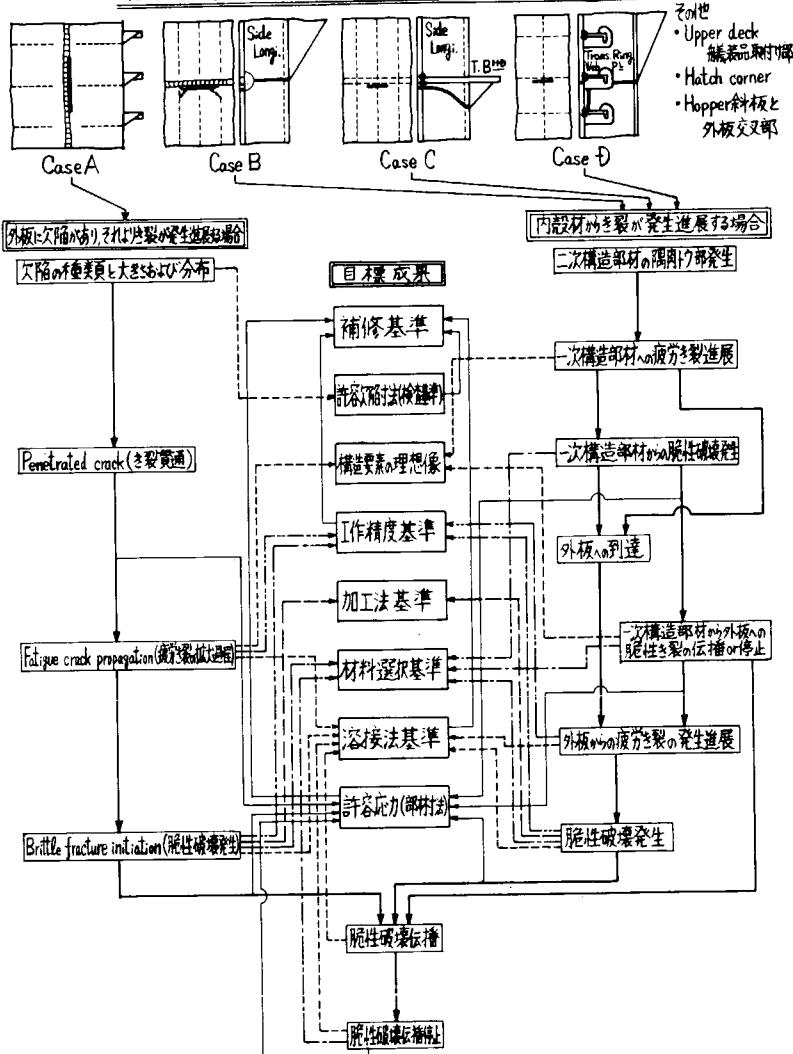


図 2.1 船殻破壊強度検討 flow chart 案(その1)

外版(欠陥があり、それより裂が発生進展する場合
(合併部が大きい)

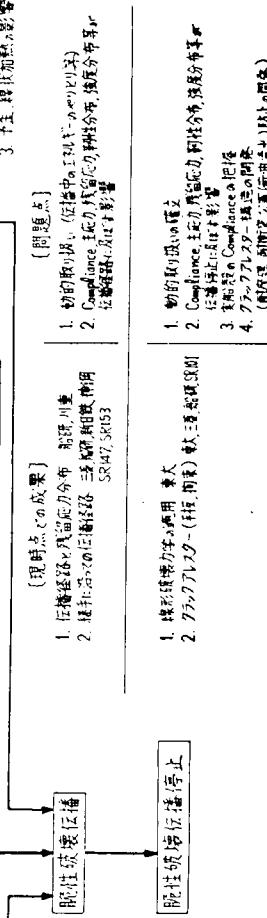
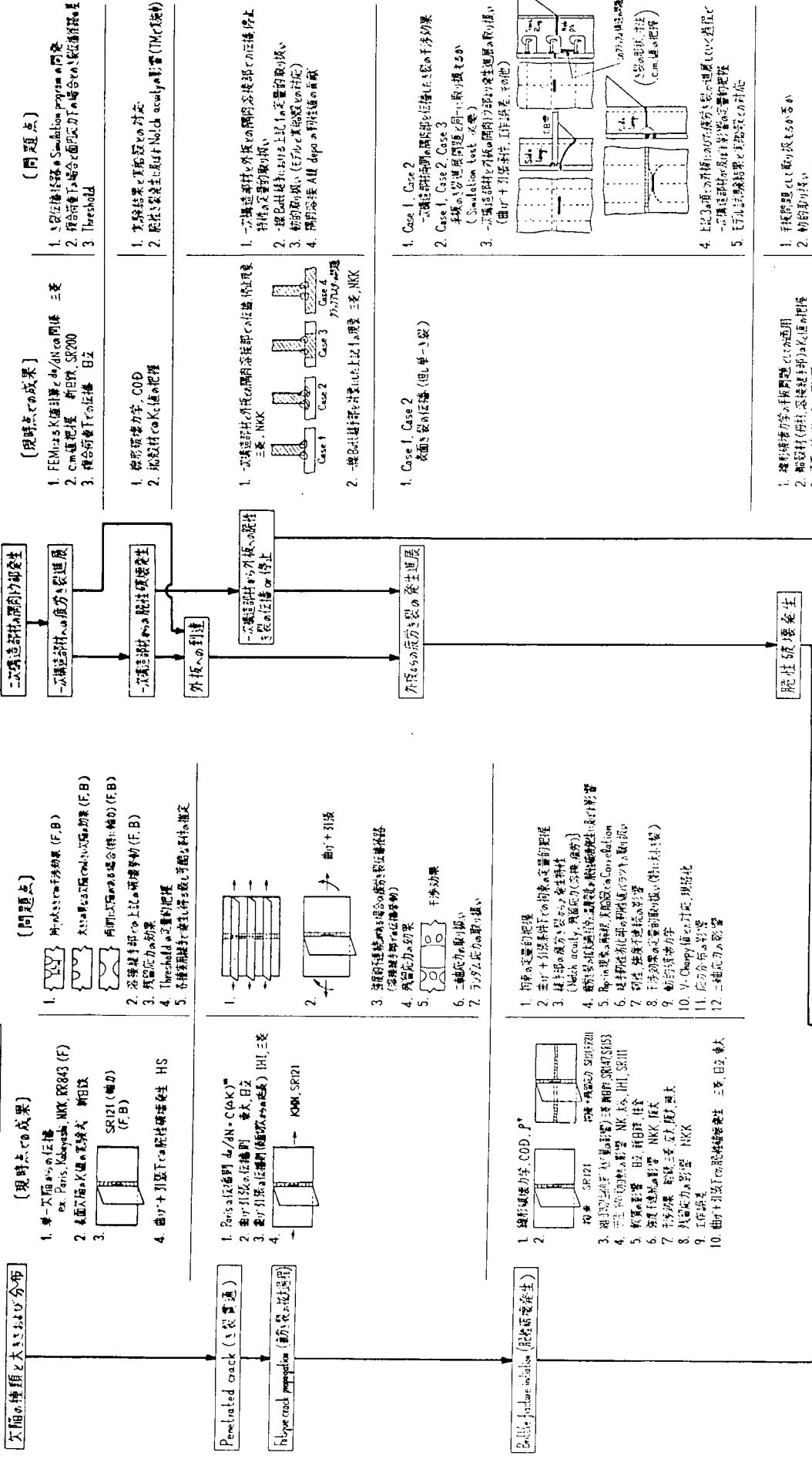


図 2.2 船殻破壊強度検討 flow chart 第 2 回 (その 2)

表 2.1 SR153研究部会“巨大タンカー用厚鋼板大入熱溶接
継手の脆性破壊強度および疲労強度に関する研究”第3
年次（昭和51年度）研究分担一覧（その1）

研究項目	試験内容		KD32 25.4		KD32 25.4		KD32 25.4	
	試験片 製作場所	試験片 試験場所	母材 試験片 製作場所	母材 試験片 製作場所	母材 試験片 製作場所	母材 試験片 製作場所	母材 試験片 製作場所	母材 試験片 製作場所
1.1 組織・硬さ分布調査	1 長大	長大	母材 7 Depo	母材 7 Depo	母材 5 石椿	5 石椿	5 石椿	5 石椿
1.2 丸棒引張試験	三菱	三菱	母材 20 Depo 20 Bond 200	母材 20 Depo 20 Bond 200	母材 22 鋼管	22 鋼管	22 鋼管	22 鋼管
1.3 V-レット／ハリピ試験 伝播挙動特性 に関する研究	HAZ 20 HAZ 20 HAZ 20	三菱	HAZ 20 HAZ 20 HAZ 20	HAZ 20 HAZ 20 HAZ 20	6 三菱 内構材から外板への 伝播試験	6 三菱 内構材から外板への 伝播試験	6 三菱 内構材から外板への 伝播試験	6 三菱 内構材から外板への 伝播試験
1.4 小形COO曲げ試験	160	東大 長大 川鉄 新日鐵 住金 川重 三井 三菱	160	東大 長大 川鉄 新日鐵 住金 川重 三井 三菱	Depo Bond 160	Depo Bond 160	Depo Bond 160	Depo Bond 160
1.5 機関部形状試験			Bond 22	Bond 22	三菱	三菱	三菱	三菱
備考 (溶接継手製作担当者に於ける溶接条件、その他)								
三井								

表 2.2 SR153研究部会“巨大タンカー用厚鋼板大入熱溶接
継手の脆性破壊強度および疲労強度に関する研究”第3
年次（昭和51年度）研究分担一覧（その2）

研究項目	試験内容		KD32 25.4		KD32 25.4		KD32 25.4	
	試験片 製作場所	試験片 試験場所	母材 試験片 製作場所	母材 試験片 製作場所	母材 試験片 製作場所	母材 試験片 製作場所	母材 試験片 製作場所	母材 試験片 製作場所
2.1 継手疲労試験	無欠陥 アラカ外							
2.2 継手疲労電気伝導試験	織機手							
2.3 隅接脚溶接試験								
2.4 布通材から外板への 伝播試験								
2.5 継手電気伝導試験								
(溶接継手製作担当者に於ける溶接条件、その他)								
三井								

3. 供 試 材

一般船材として多量に使用されている、船体用 50 キロ級高張力鋼板および一般船体用軟鋼板の代表として、KD 32 鋼板（板厚 25.4 mm、controlled rolled 材、および板厚 12.7 mm、as rolled 材）ならびに KDK 鋼板（板厚 25.4 mm、as rolled 材）を供試した。

供試材の化学成分ならびに機械的性質を表 3.1 に示す。

また、昭和 51 年度に実施された各種試験の試験片に当たられた供試材板取りを図 3.1～図 3.3 に示す。

なお、これら供試材は、新日本製鉄株式会社、川崎製鉄株式会社、住友金属工業株式会社および株式会社神戸製鋼所などにて製造されたものである。先にも記したが、昭和 51 年度は、KD32 鋼板のエレクトロガス溶接継手、および KDK 鋼板エレクトロスラグ溶接継手を研究の対象とした。各継手の溶接条件は、委員会で十分検討された後表 3.2 に示すとく決定され、昭和 51 年度供試試験片の継手は、全て表 3.2 の溶接条件で溶接された。

表 3.1 供試材の化学成分ならびに機械的性質

鋼種	熱処理	板厚 (mm)	化学成分(%)					機械的性質		
			C	Si	Mn	P	S	降伏点 σ_y (kg/mm ²)	引張り強さ σ_b (kg/mm ²)	伸び El. (%)
KD32 [*]	As Rolled	25.4	0.15	0.34	1.32	0.020	0.008	38	52	30
			0.15	0.34	1.32	0.020	0.008	35	50	29
KD32 ^{**}	As Rolled	25.4	0.13	0.35	1.39	0.017	0.008	34	50	28
KD32 ^{**}	As Rolled	12.7	0.15	0.29	1.35	0.018	0.005	41	54	26
KDK ^{**}	As Rolled	25.4	0.12	0.25	1.09	0.017	0.008	32	46	30

* 脆性破壊の発生・伝播停止特性に関する研究用供試材

** 疲労特性に関する研究用供試材

表 3.2 溶接条件

鋼種	溶接法	溶接ワイヤ	フラックス	雰囲気	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (kJ/cm)	開先形状および継手断面
KD32 [*] (25.4)	エレクトロガス	HS42G 3.2 ^Φ	—	CO ₂ 40l/min	580 ~590	32 ~35	8 ~10.5	109.4 ~139.2	
KD32 ^{**} (25.4)	エレクトロガス	HS42G 3.2 ^Φ	—	CO ₂ 30l/min	630 ~660	35 ~38	6.5 ~7.3	198 ~228	
KDK ^{**} (25.4)	エレクトロスラグ	ES50 2.4 ^Φ	MF38	—	600	38	6.2	221	

* 脆性破壊の発生・伝播停止特性に関する研究用

** 疲労特性に関する研究用(継手疲労試験用、継手疲労亀裂伝播試験用)

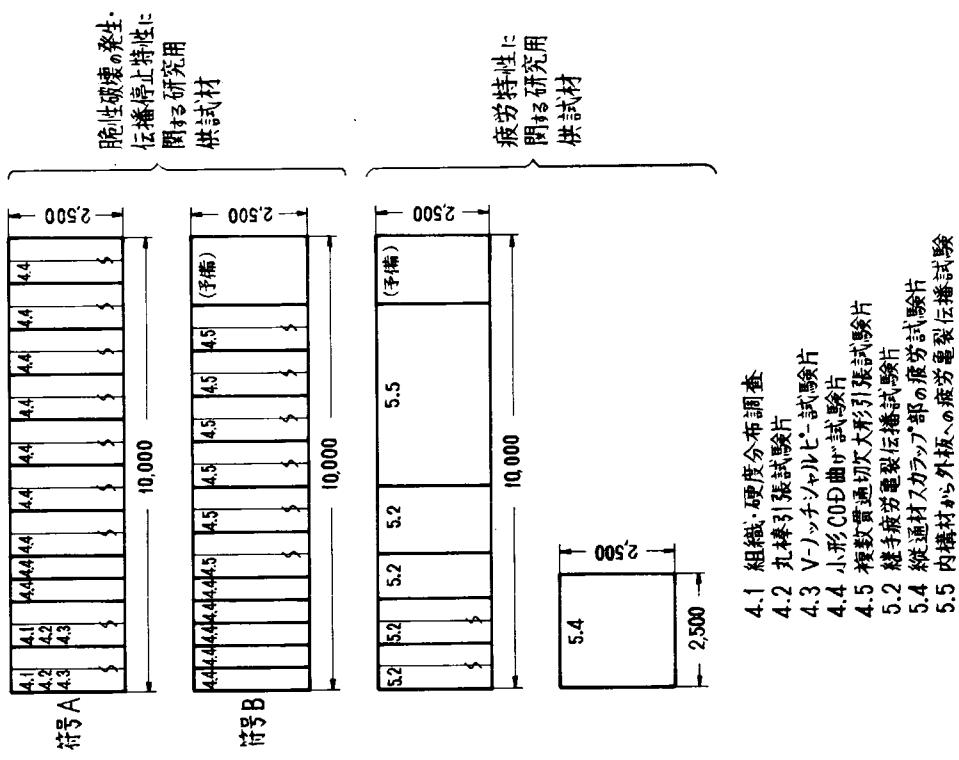


図 3.1 供試材の板取り要領 (KD32、25.4)

— 8 —

4. 脆性破壊の発生・伝播停止特性に関する研究

4.1 組織・硬度分布調査

4.1.1 目的

供試鋼板については、大入熱溶接による材質変化を把握するため、溶接継手部のピッカース硬さ分布測定ならびに顕微鏡組織調査を行ない、大入熱溶接継手部の破壊靭性評価に関する基礎データを得ることを目的とした。

4.1.2 試験内容

調査は、KD32鋼板（板厚25.4mm、符号A）のエレクトロガス溶接継手部について行なった。試験片は、溶接継手の溶接始端部より約1000mmの位置から採取した。

ピッカース硬さ調査は、荷重10kgにて溶接継手部の板厚中央および板表裏面より2mmの位置の硬さ分布を測定した。組織調査は継手部断面のマクロ組織を観察するとともに溶接金属中央部、ボンド部、ボンドから2mm・4mmおよび8mmの各位置の板厚中心部の組織を光学顕微鏡により倍率100倍にてミクロ組織を調査した。

ピッカース硬さ測定ならびに顕微鏡組織撮影要領を図4.1.1に示す。

4.1.3 試験結果および考察

溶接継手部のピッカース硬さ分布を図4.1.2にその結果を取りまとめたものを表4.1.1に示す。また、写真4.1.1に溶接継手部断面のマクロならびにミクロ組織を示す。

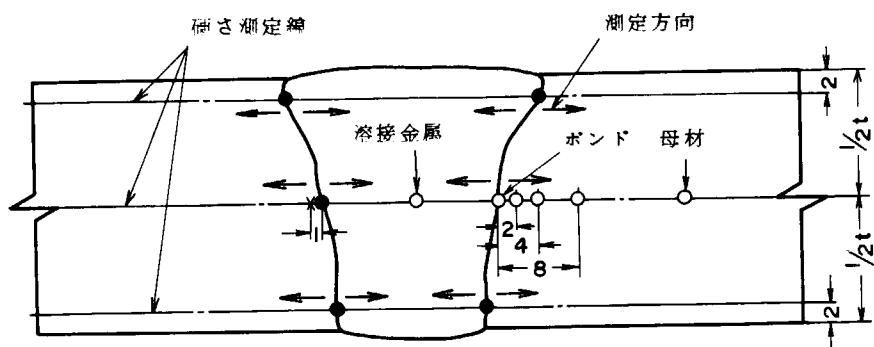
以上の結果より次のことが明らかになった。

- 1) 溶接継手板厚中央部においてボンド部ならびに熱影響部の最高硬さは181HVであり、母材より($\approx 145HV$)約35HV程度高くなっている。また、溶接金属の硬さは平均値で17.5HVであり、母材より約30HV程度高くなっている。
- 2) 溶接継手のマクロ組織における熱影響部の幅は通常の溶接継手に比べて広く約11mm程度である。ミクロ組織において大入熱溶接による入熱のために、ボンド部およびその近傍の熱影響部に原オーステナイト結晶粒が異常に粗大化した領域があり、かつ過熱組織であるwidmanstatten組織および上部ベイナイトの混合組織が認められる。すなわち、この領域は原オーステナイト結晶粒界に大きく成長した初析フェライトと、粒内には塊状あるいは棒状の粗粒フェライトが析出している。この結晶粒が粗大化した領域は母材に比べてかなり脆化していることが予想される。

この脆化現象は次の様に考えられる。溶接入熱量が大きいため、ボンド部およびその近傍の熱影響部は広範囲にわたって長時間高温にさらされる。したがって、この領域の結晶粒界に存在していた高温で不安定な析出物がオーステナイト中へ溶解し、粒界に存在していた結晶の成長を抑制する要素がなくなり結晶粒が異常に粗大化する。その後の冷却過程において、冷却速度がかなり遅いため靭性の低い上部ベイナイトあるいは粗大なフェライトを析出し、母材に比べて著しく脆化するものと考えられる。

また、この結晶粒が粗大化した領域の外側の熱影響部には再結晶による細粒化域が認められ、粗粒化域に比べて靭性の回復が予想される。

- 3) 組織的に認められた脆化領域は、溶接継手板厚中央部において、ボンドから約4mmまでの範囲となっており通常の多層盛溶接継手に比べて、かなり広範囲にわたり脆化していることが推定される。また細粒化域はボンドから6～10mmの間に存在している。



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

図 4.1.1 継手部ピッカース硬さ測定および顕微鏡組織撮影位置

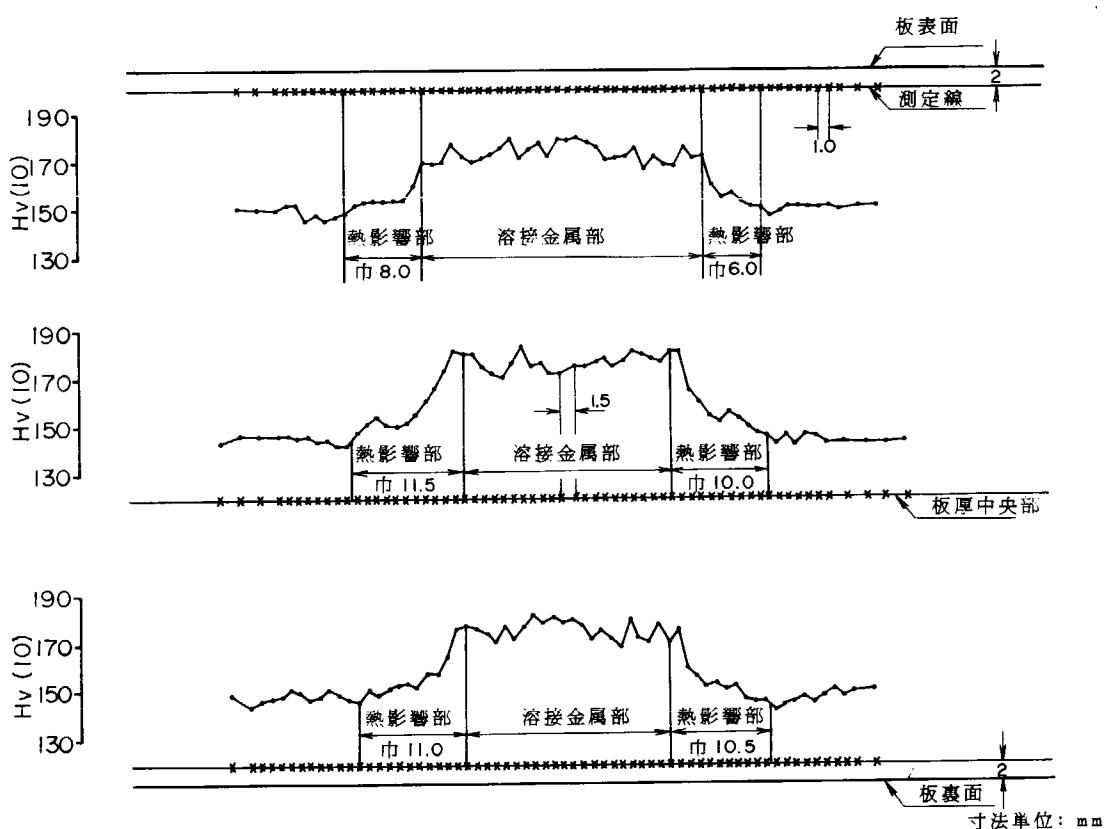


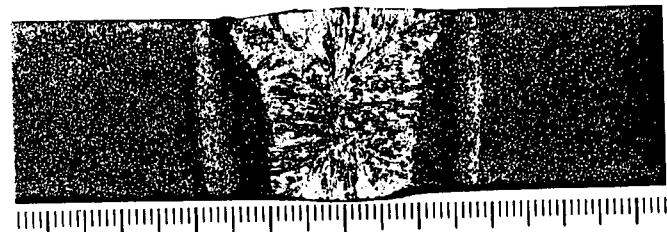
図 4.1.2 ピッカース硬さ試験結果 (KD32、エレクトロガス溶接継手)

表 4.1.1 継手部のピッカース硬さ試験結果

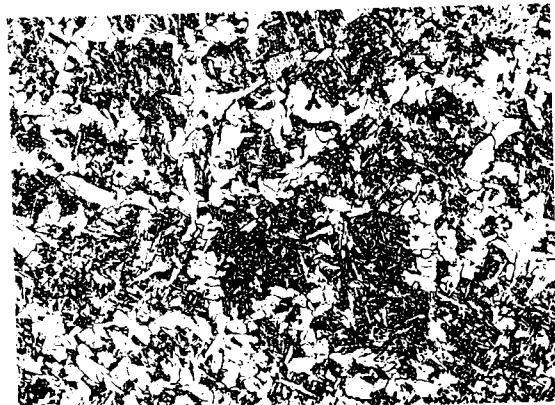
溶接法	編 種	測定位標	ピッカース硬さ Hv(10)		
			溶接金属部	熱影響部	ボンド部
母 材	KD32 (A材)	板面より 2mm と板厚中央部	139	—	156
		板表面より 2mm	167-180	149-160	172
		板 厚 中 央	170-183	146-181	181
		板裏面より 2mm	169-182	146-176	178

備 考

1. 測定位標は 1 mm
2. 母材の硬さは試験片の最低～最高を示す
3. ボンド部は高い方を示す



継手部マクロ × 1



溶接金属



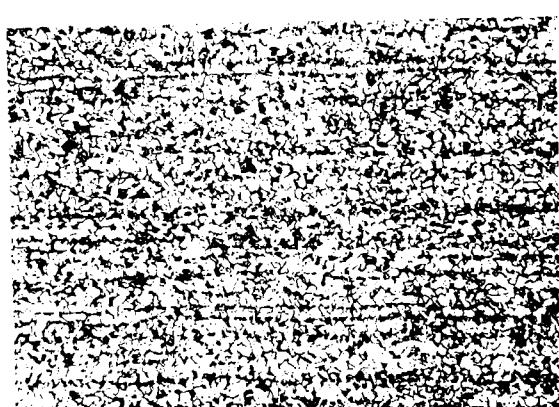
ボンド



ボンドより 2 mm



ボンドより 4 mm



ボンドより 8 mm



母材 × 100

写真 4.1.1 エレクトロガス溶接継手 (KD32鋼)

H.I. = 109400 ~ 139200 J/cm

4.1.4 まとめ

試験結果から供試したKD32鋼板(符号A)のエレクトロガス溶接継手において、通常の溶接継手に比べてボンド部および熱影響部の硬さの上昇の程度は少ない。組織は、通常の溶接継手に比べて熱影響部の幅は広く、ボンド部およびその近傍の結晶粒は著しく粗大化しておりその粗粒化域も広く、組織的にもボンド部およびその近傍の熱影響部は脆化していることが予想される。

4.2 丸棒引張試験

4.2.1 目的

本委員会の共通供試鋼であるKD32鋼板(符号A、符号B、表3.1および図3.1参照)母材について、室温から-196°Cにおける数温度で引張試験を行ない、それぞれの機械的性質を把握することとした。

4.2.2 試験内容

図4.2.1に供試した丸棒引張試験片形状を示す。試験片は、表3.1および図3.1に示したKD32鋼板(板厚25.4mm、符号Aおよび符号B)から、鋼板圧延方向、板厚中心部より採取した。

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

4.2.3 試験結果および考察

試験結果を表4.2.1に示す。さらに、図4.2.2は、温度と各種機械的性質の関係を示すもので、横軸に試験温度、縦軸に降伏応力、引張強さ、伸びおよび絞りをプロットしたものである。図より、符号A材は符号B材に比し降伏比が若干低くなっているが、その他はほぼ同等で、極く一般的な材質であると判断される。

つぎに、降伏応力の温度依存性をみるために、降伏応力の対数と絶対温度の逆数の関係で整理し直し、図4.2.3に示す。図より、降伏応力の温度依存性は極低温で若干小さくなる傾向があり、従来と同様な結果を示している。

4.2.4 まとめ

本委員会の共通供試鋼板であるKD32鋼板(板厚25.4mm、符号Aおよび符号B)の低温での機械的性質を調べるため、低温丸棒引張試験を実施し、降伏応力、引張強さ、伸びおよび絞りを求めた。

その結果、符号A材、符号B材ともほぼ同等な機械的性質を示し、KD32鋼板としては極く一般的な材料であることがわかった。

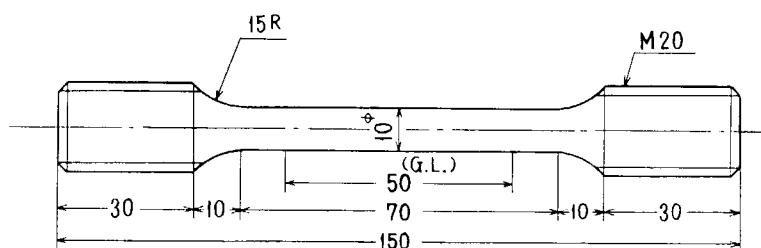


図4.2.1 丸棒引張試験片形状

表 4.2.1 丸棒引張試験結果

鋼種	符号	試験温度 (°C)	降伏応力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
KD32 (25.4)	A	26	33.0	50.6	35.6	73.7
		-40	37.7	56.6	33.8	71.1
		-80	42.9	60.3	34.0	69.6
		-120	51.1	65.0	33.8	66.3
		-160	63.0	71.2	27.0	65.6
	B	-196	85.2	88.8	14.4	17.4
		25	37.7	51.3	37.0	72.2
		25	38.3	51.2	34.0	74.9
		-40	41.4	57.3	32.2	72.0
		-80	45.8	60.6	31.8	69.6
		-120	52.3	66.3	34.6	68.5
		-160	68.4	73.5	34.4	64.7
		-196	89.1	90.1	30.8	43.6

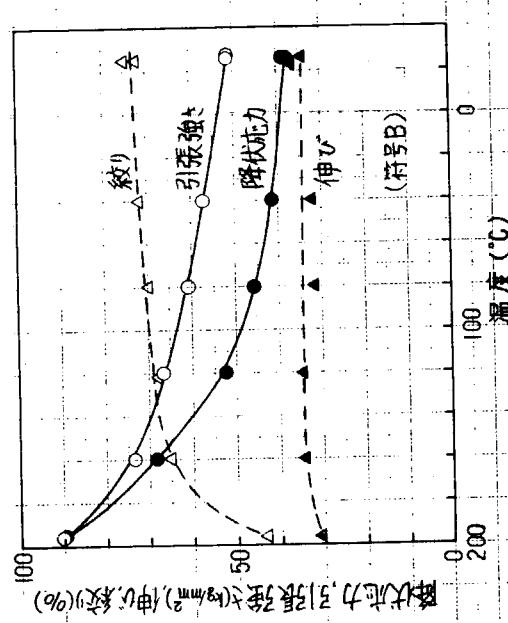
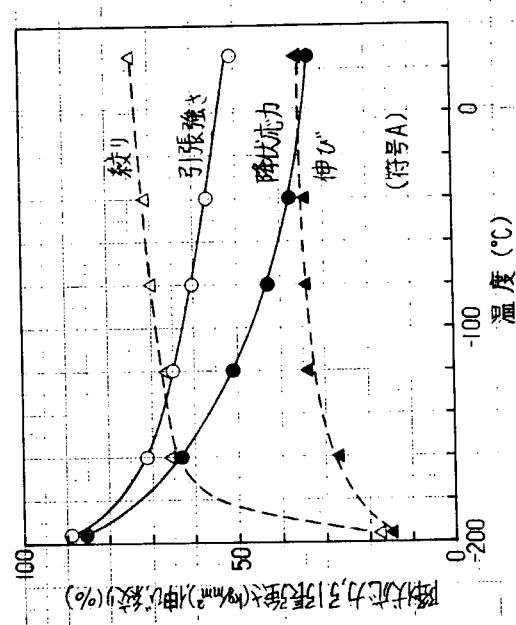


図 4.2.2 丸棒引張試験結果
(KD32 鋼)

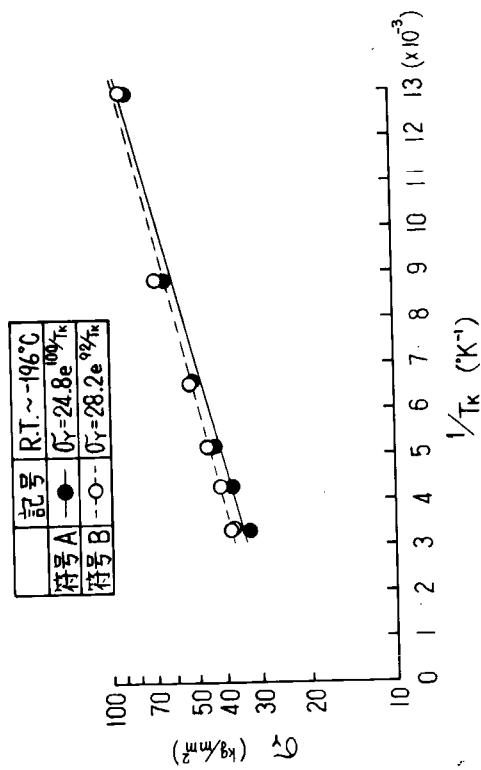


図 4.2.3 降伏応力と温度との関係 (KD32 鋼)

4.3 V - ノッチシャルピー試験

4.3.1 目的

本年度研究では、KD32鋼板（板厚25.4mm）のエレクトロガス溶接継手を共通供試継手として、ボンド部破壊非性値のバラツキ把握が実施された。

本節では、供試KD32鋼板の母材ならびにエレクトロガス溶接継手部のV - ノッチシャルピー衝撃試験を実施し、吸収エネルギー～温度、脆性破面率～温度遷移曲線を求め、共通供試継手の基本特性を把握した。

さらに、供試エレクトロガス溶接継手ボンド部にノッチ加工した試験片170本と、母材試験片90本を供試し、前者は5温度で後者は3温度で試験して、データのバラツキを把握した。

4.3.2 試験内容

試験片は、母材および溶接継手部の板厚中央部より採取し、溶接金属中央部、ボンド部、ボンドから2mm、4mm、8mmの熱影響部の各位置にノッチ加工した。なお、ノッチは、試験片採取後マクロエッチし、ボンドの位置を確認後、所定の位置に加工した。試験片採取要領およびノッチ加工位置を図4.3.1に示す。遷移曲線把握用として、これらの試験片を各々20本供試した。

試験に際しては、吸収エネルギーと脆性破面率の計測を行なった。脆性破面率の算定は、破面写真を10倍に拡大し、ブランイメータで脆性破面部分の面積を計測して行なった。

さらに、上記試験によって得られた吸収エネルギー～温度、脆性破面率～温度遷移曲線をもとに、遷移領域の温度を中心とした、-40℃、0℃、40℃、80℃、120℃の5温度を選び、これらの温度での試験結果のバラツキを把握した。すなわち、ボンド部にノッチ加工した試験片を170本用意し、上記5温度で各々30本～40本供試した。また、母材試験片を90本用意し、-40℃、0℃、40℃の3温度で各々30本供試した。

4.3.3 試験結果および考察

— 試験結果のバラツキに対する統計的検討 —

母材および溶接継手部より採取した試験片によるV - ノッチシャルピー衝撃試験結果の吸収エネルギー～温度ならびに脆性破面率～温度遷移曲線を図4.3.2～図4.3.7に示す。また、これら遷移曲線の平均線をまとめて、図4.3.8に示す。

これらの結果から、ボンド部およびその近傍の熱影響部は非性劣化が著しいことがわかる。これは昨年度（昭和50年度）研究においても指摘されているように、この部分では過熱組織であるウッドマン組織が認められ、しかも結晶粒が異常に粗大化し、原オーステナイト結晶粒界に大きく成長した初析フェライトと、それに囲まれた中間段階組織となっているため（4.1節参照）と考えられる。

しかし、吸収エネルギー値については、溶接金属に対するNK規格の要求値とほぼ同等ないしは若干良好であることがわかる。すなわち、

KD32鋼板（エレクトロガス溶接継手）に対する要求衝撃値（平均値）： $vE_0 \geq 3.5 \text{Kg} \cdot \text{m}$

であるのに對し、実験結果は溶接金属中央部で $vE_0 \approx 5.4 \text{Kg} \cdot \text{m}$ 、また最も非性劣化の著しいボンド部でも $vE_0 \approx 3.8 \text{Kg} \cdot \text{m}$ であった。

次に、図4.3.2～図4.3.7の結果から、ボンド部については約40℃が、母材については0℃が遷移温度域のはば中央に位置することがわかったので、これを試験温度設定の手掛りとして、V - ノッチシャルピー衝撃試験結果のバラツキ評価のための試験を行なった。すなわち、ボンド部については、-40℃、0℃、40℃、80℃および120℃の各試験温度で、各々30本～40本の試験を実施した。その結果を図4.3.9に示す。また、母材については、-40℃、0℃および40℃の各温度で各々30本の試験を実施した。その結果を図4.3.10に示す。なお、図4.3.9お

より図 4.3.10 中のプロットは、見易くするために、一部横軸の位置を所定温度位置からずらして表現した。

各試験温度での吸収エネルギー値および脆性破面率の頻度分布を、ボンド部については図 4.3.11 に、母材については図 4.3.12 に示す。これらの図から、吸収エネルギー値、脆性破面率のいずれも、或る平均値の周りにはばらついていることが認められるので、このバラツキが従う確率分布型の検討を行なった。確率分布型として正規分布、対数正規分布および Weibull 分布を想定し、これらの確率紙上に累積度数をプロットした。

ボンド部についての吸収エネルギー値、脆性破面率のプロットの結果を、図 4.3.13、および図 4.3.14 に示す。

また、母材についての吸収エネルギー値、脆性破面率の結果を図 4.3.15 および図 4.3.16 に示す。図 4.3.13～図 4.3.16 の結果からは、吸収エネルギー値と脆性破面率のいずれも、上記の 3 分布型のうち、特に適合度（確率紙上での直線性）が他に比較して優れているものは認められないようと思われる。ボンド部と母材とを比較した場合には、吸収エネルギー値、脆性破面率のいずれに於いても、母材の方が直線性が高いように見なされる。これは、ボンド部のバラツキの原因の方が、母材に比べて多くの因子に基づくであろうという一般通念と合致する。

資料¹⁾ では、母材の V - ノッチシャルピー試験での吸収エネルギー値のバラツキ分布型として、平均値周辺部分については正規分布を考えて必要試験片数の議論を行なっている。しかし、今回の試験結果によれば、図 4.3.15 で示されている如く、必ずしも正規分布が優れているとは断言し難い。むしろ、0 °C と 40 °C での結果については、対数正規分布の方が適合度が高いように見なされる。

試験温度別に、吸収エネルギー値と脆性破面率の平均値、および標準偏差を求めて表 4.3.1 に掲げた。温度を一定とした場合の吸収エネルギー値の平均値と標準偏差の関係（母材のみ）については文献^{1), 2)} があるので、これとの比較を試みた。

図 4.3.17 は各種試験温度における吸収エネルギー平均値： $E(X)$ と標準偏差： $D(X)$ を、軟鋼から HT60 の種々の鋼種について調べた文献²⁾ の結果である。図中に今回実施した結果（HT50）を併記した。それによれば、母材は文献²⁾ とほぼ同等のバラツキ具合を呈しており、平均値もほぼ同一レベルにあると考えられる。また、ボンド部については、母材データに比較して吸収エネルギーの平均値を一致させた場合に、標準偏差が大きい（約 2～3 倍）ことが認められる。また図 4.3.18 は文献^{1), 2)} にある吸収エネルギーの平均値と標準偏差との関係を記したものである。同図中に今回の試験結果を併記したが、ボンド部のデータはこれら母材のデータの上限近くの値を示していることがわかる。また、母材のデータについては、設定温度数が少なく十分な比較は出来ないが、-40 °C のデータから判断すれば、幾分大きなバラツキを呈していることになる。

或る温度での V - ノッチシャルピー試験での吸収エネルギー値を把握するための最低必要本数として、Descovich¹⁾ や諸団体規格（NK など）は 3 本を規定しているが、3 本の平均値 $\bar{X}_n = 3$ から母集団平均 (μ) を推定した場合の 95 % 信頼度推定範囲を次式（(4.3.1) 式）から求め、図 4.3.9 および図 4.3.10 中に破線で示した。

$$\text{Prob} \left\{ \left| \bar{X}_n - \mu \right| < \frac{1.96 \sigma}{\sqrt{n}} \right\}_{n=3} = 0.95 \quad \dots \dots \dots \quad (4.3.1)$$

ただし、母集団の平均値まわりのバラツキ分布型は、便宜上の措置として仮に正規分布とし、その平均値 (μ)、標準偏差 (σ) の値については表 4.3.1 の値を用いた。

また、KD32 鋼板母材における吸収エネルギー値と脆性破面率の相関を、図 4.3.19 に示す。

4.3.4 まとめ

本委員会の共通供試材である、KD32 鋼板およびそのエレクトロガス溶接継手について V - ノッチシャルピー衝撃試験を実施し、各種遷移曲線を把握した。すなわち、母材、溶接金属中央部、ボンド部、ボンドから 2mm、4mm、8mm の熱影響部に対する吸収エネルギー～温度、脆性破面率～温度遷移曲線を得た。

さらに、母材およびボンド部の試験片に対し、同一試験温度に於いて30本～40本供試して試験結果のバラツキを把握した。すなわち、吸収エネルギー値や脆性破面率のバラツキに関する定量的把握のための貴重なデータを得た。

参考文献

- 1) Messrs H. Herbiet, S. Descovich, "Contribution to The Study of An Acceptance Method of Testing for Weldable Steels C & D Using the Vee-Notch Charpy Test on The Basis of A Conventional Specimen," I IW-X - 184 - 57
- 2) M. Yoshiki, "Statistical Investigation on V-Charpy Transition Curve and Fluctuation of Impact Data," I IW. Doc. X - 268 - 60

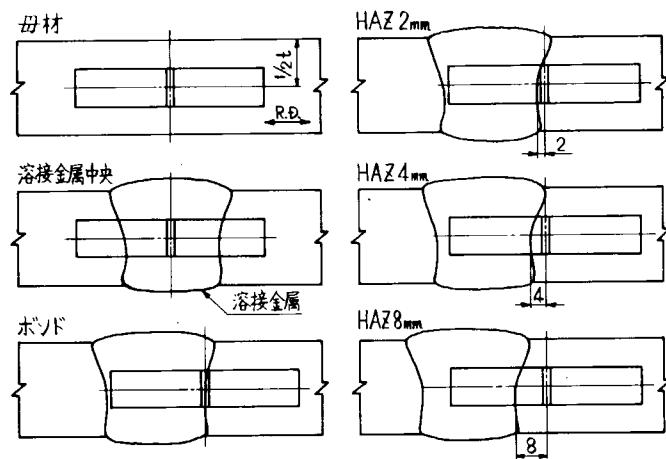


図 4.3.1 V - ノッチシャルピー試験片採取位置

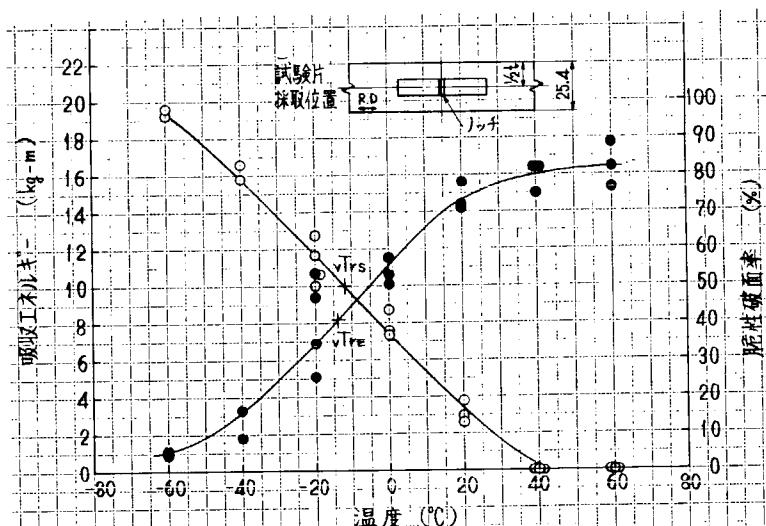


図 4.3.2 V - ノッチシャルピー試験結果

(KD32鋼、母材)

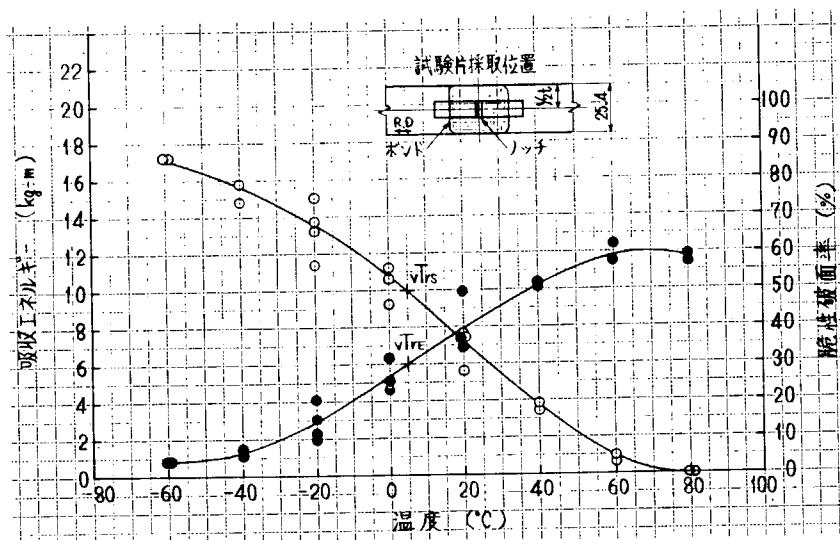


図 4.3.3 V - ノッチシャルピー試験結果

(KD32鋼、エレクトロガス溶接継手、溶接金属中央)

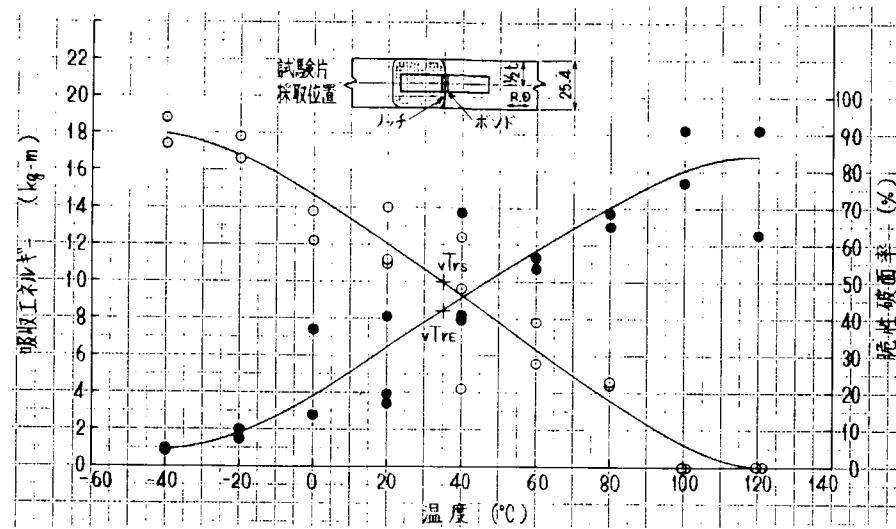


図 4.3.4 V - ノッチシャルピー試験結果
(KD32鋼、エレクトロガス溶接継手、ボンド)

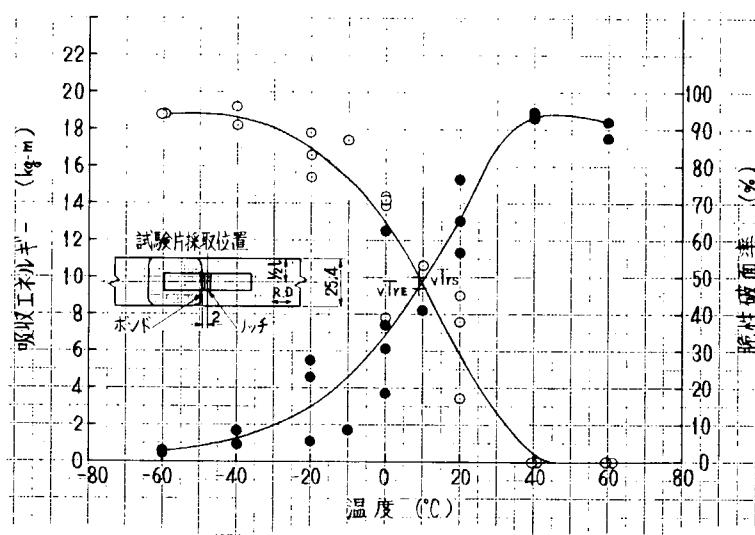


図 4.3.5 V - ノッチシャルピー試験結果
(KD32鋼、エレクトロガス溶接継手、HAZ 2mm)

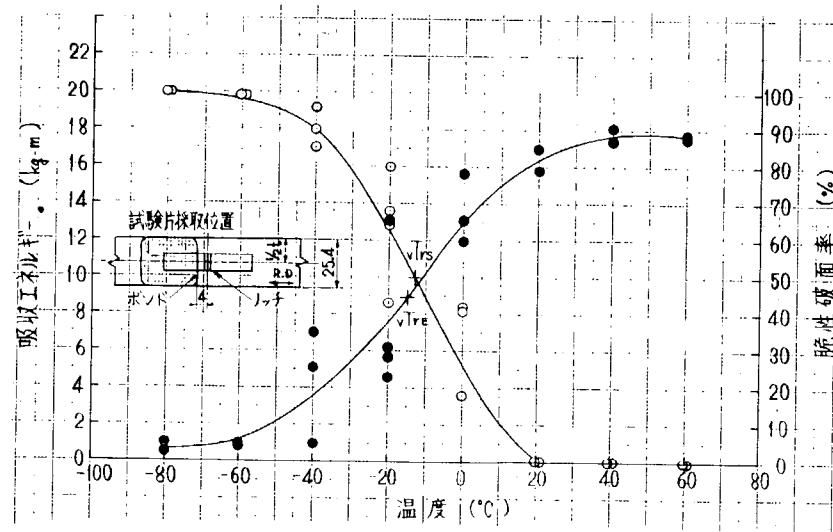


図 4.3.6 V - ノッチシャルピー試験結果
(KD32鋼、エレクトロガス溶接継手、HAZ 4mm)

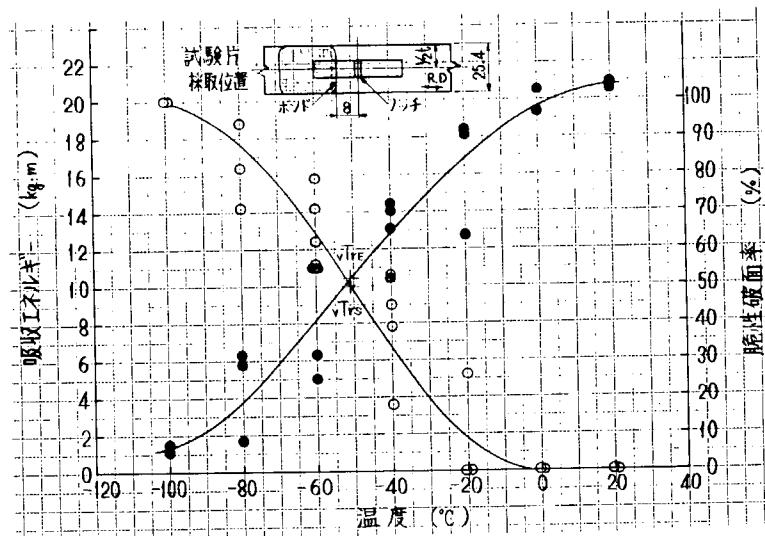


図 4.3.7 V - ノッチシャルピー試験結果
(KD32鋼、エレクトロガス溶接継手、HAZ 8 mm)

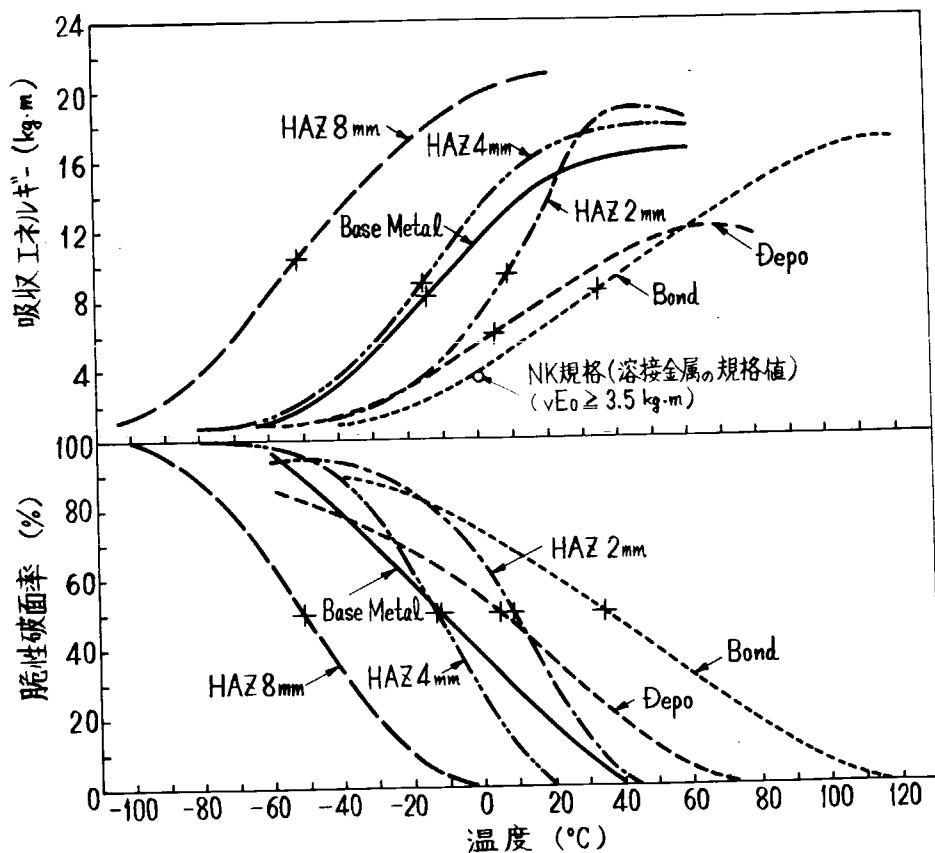


図 4.3.8 V - ノッチシャルピー試験遷移曲線
(KD32鋼、エレクトロガス溶接継手)

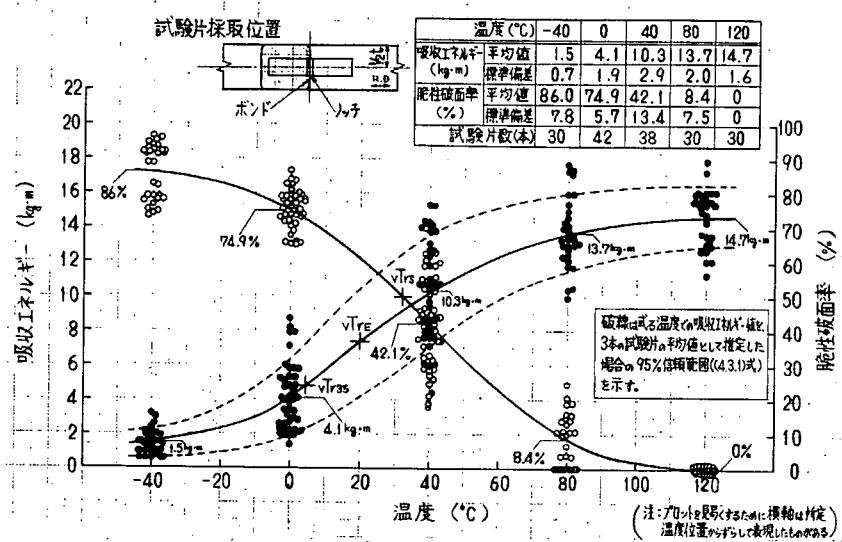


図 4.3.9 V-ノッチシャルピー試験結果 — バラツキ調査 —
(KD32鋼、エレクトロガス溶接継手、ボンド部)

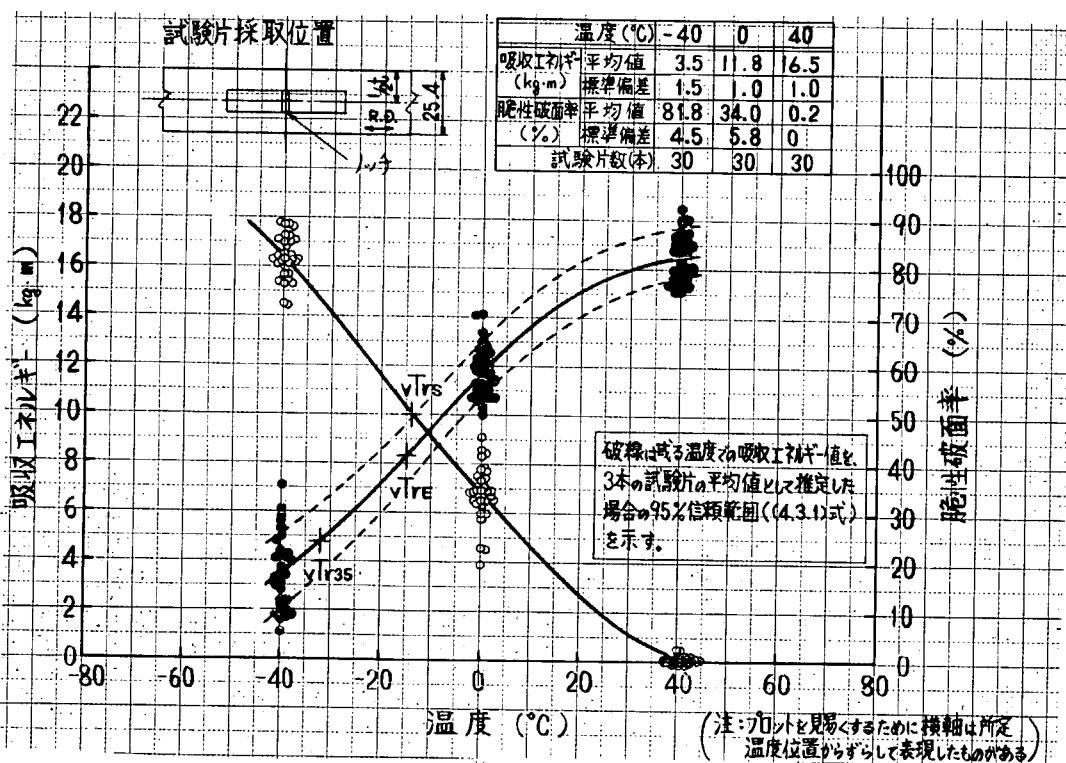


図 4.3.10 V-ノッチシャルピー試験結果 — バラツキ調査 —
(KD32鋼、母材)

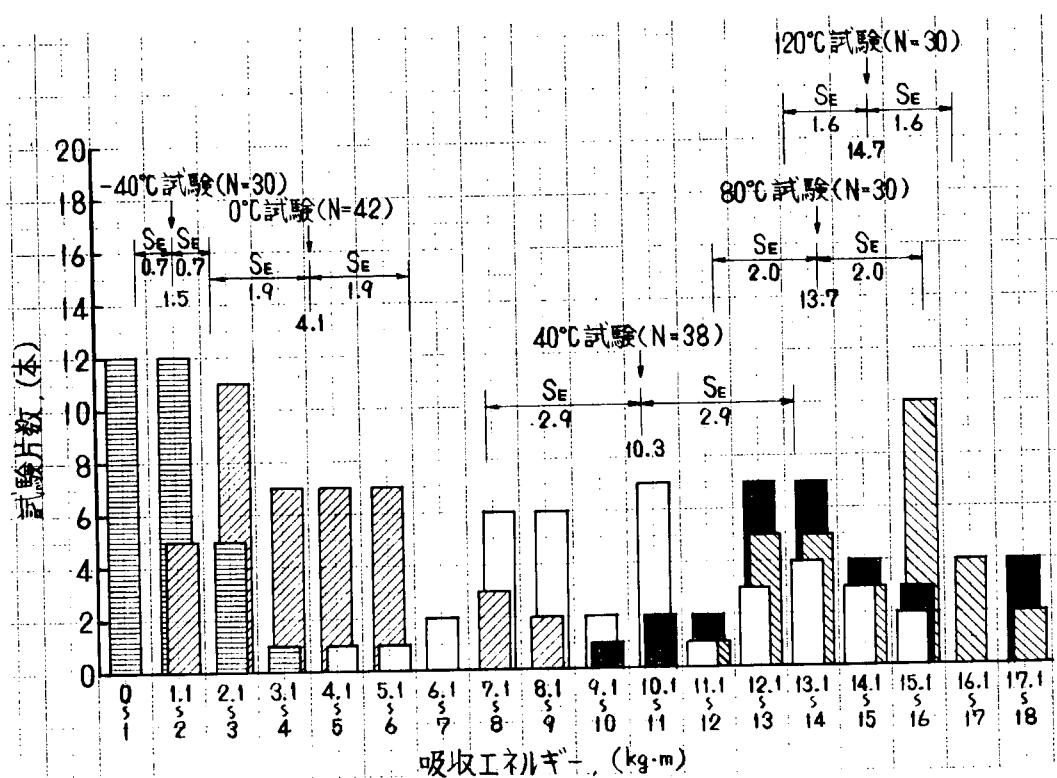


図 4.3.11 (a) V - ノッチシャルピー試験における吸収エネルギー値の頻度分布
(KD32鋼、エレクトロガス溶接継手、ボンド部)

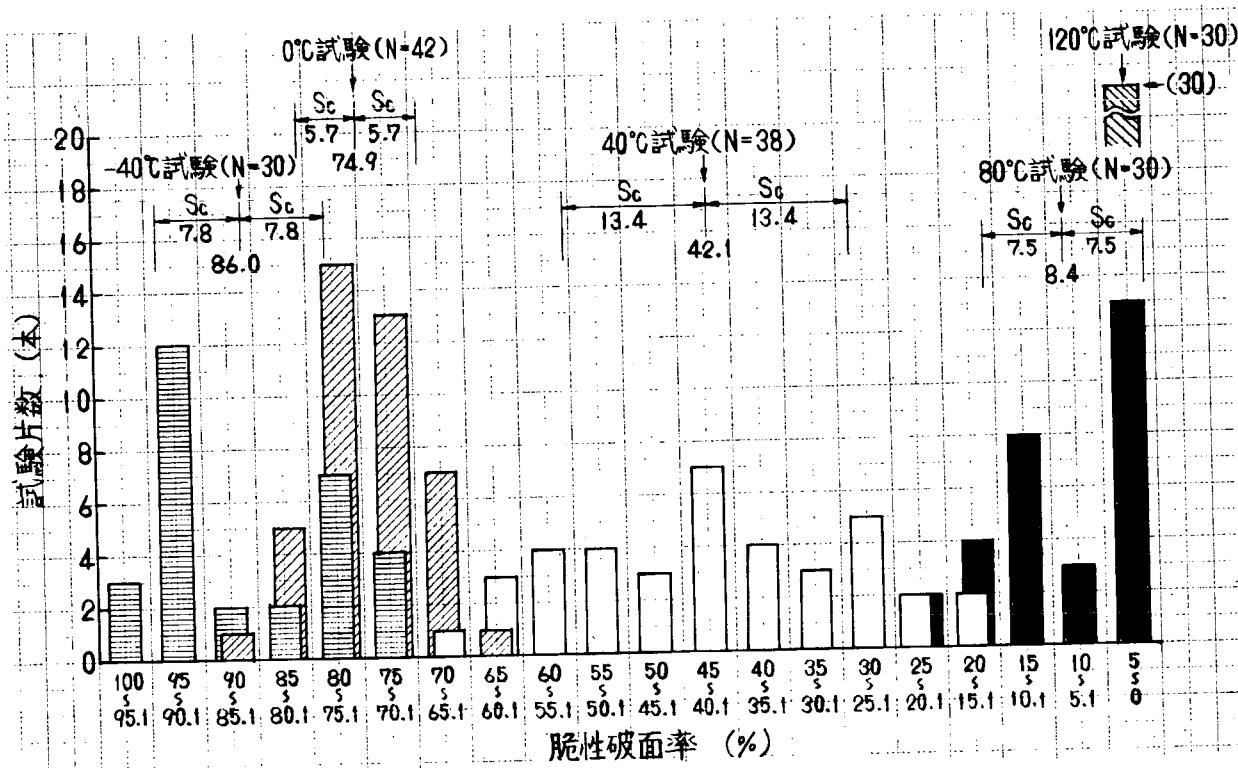


図 4.3.11 (b) V - ノッチシャルピー試験における脆性破面率の頻度分布
(KD32鋼、エレクトロガス溶接継手、ボンド部)

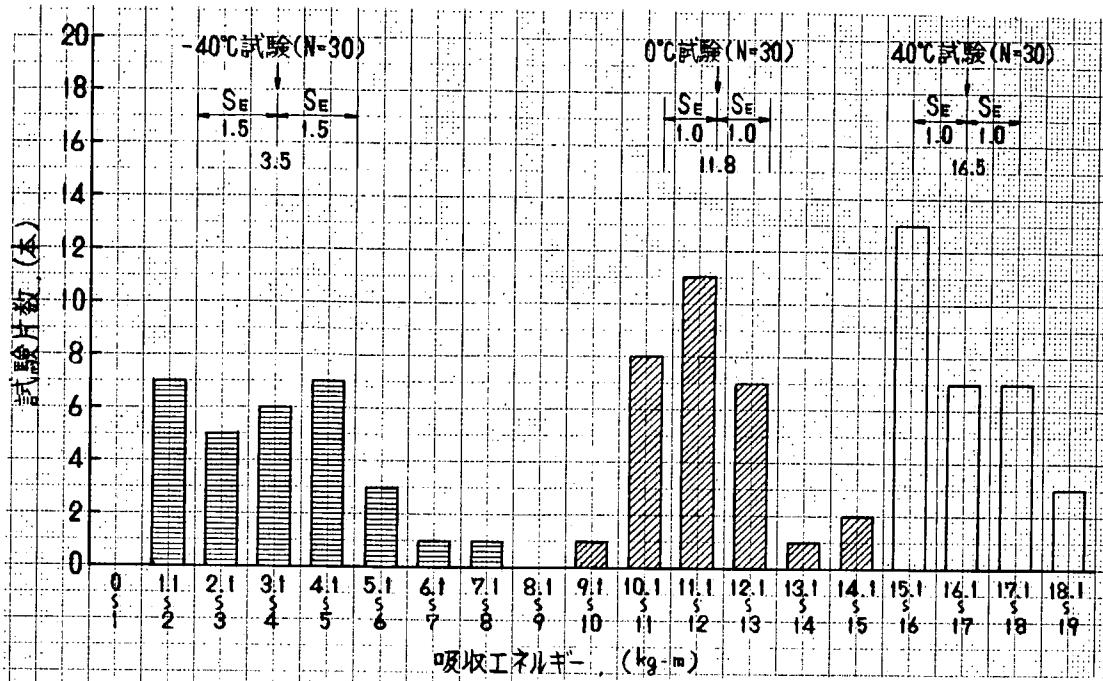


図 4.3.12 (a) V - ノッチシャルピー試験における吸収エネルギー値の頻度分布
(KD32鋼、板厚25.4mm、母材)

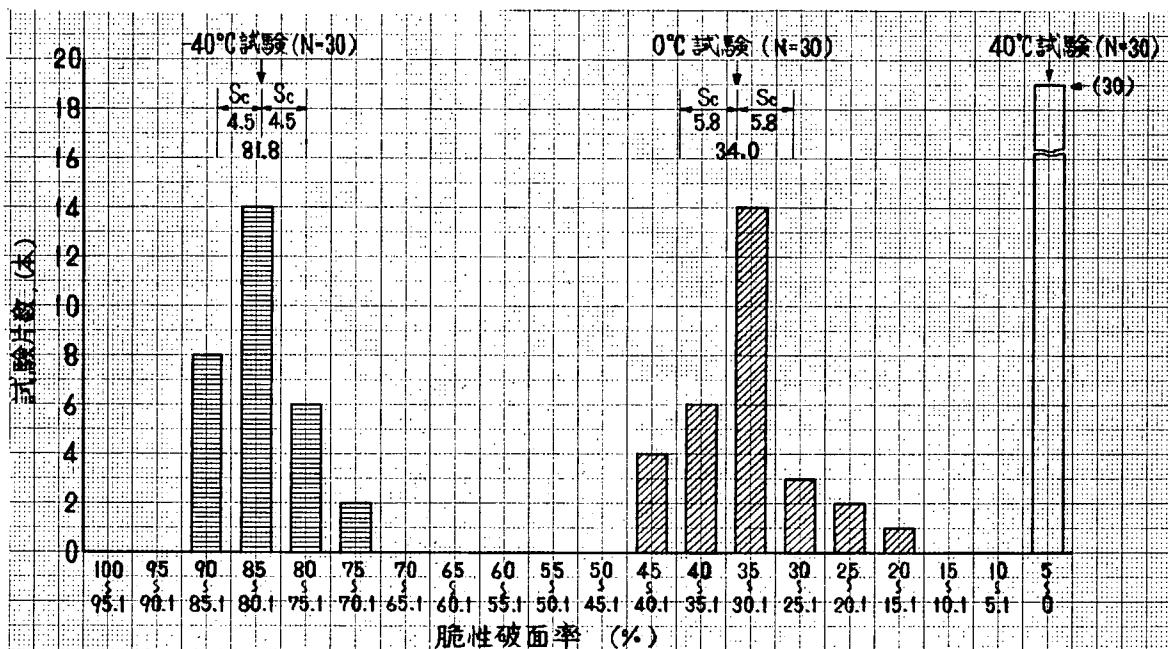


図 4.3.12(b) V - ノッチシャルピー試験における脆性破面率の頻度分布
(KD32鋼、板厚25.4mm、母材)

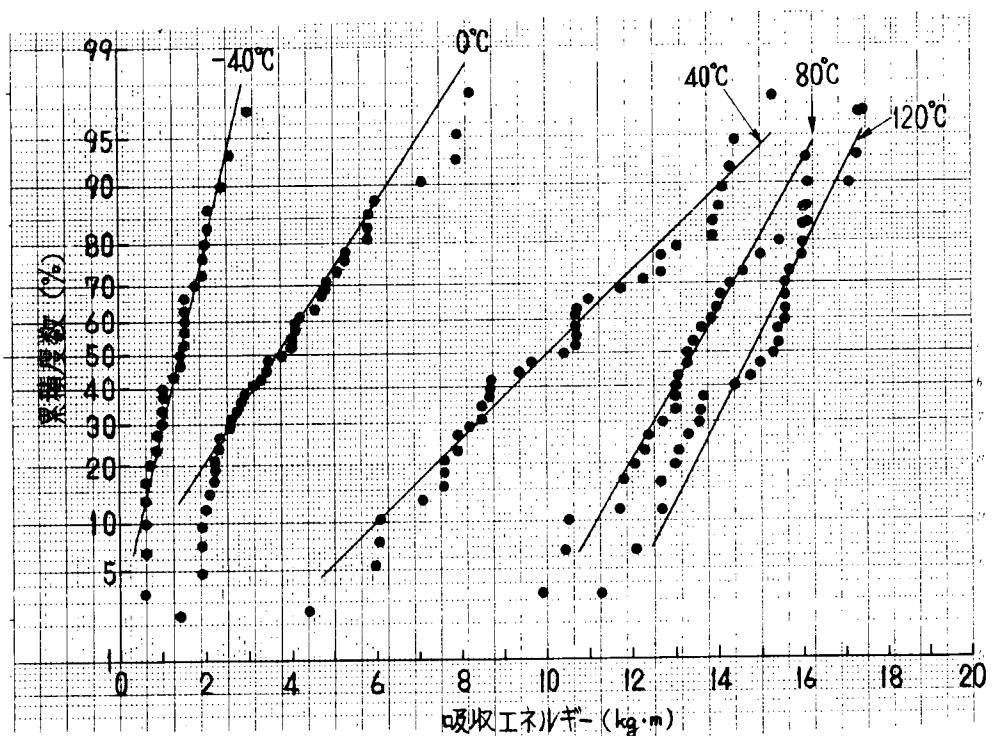


図 4.3.13(a) 吸収エネルギー値のバラツキ分布型の調査(正規分布)
(KD32鋼、エレクトロガス溶接継手、ボンド部)

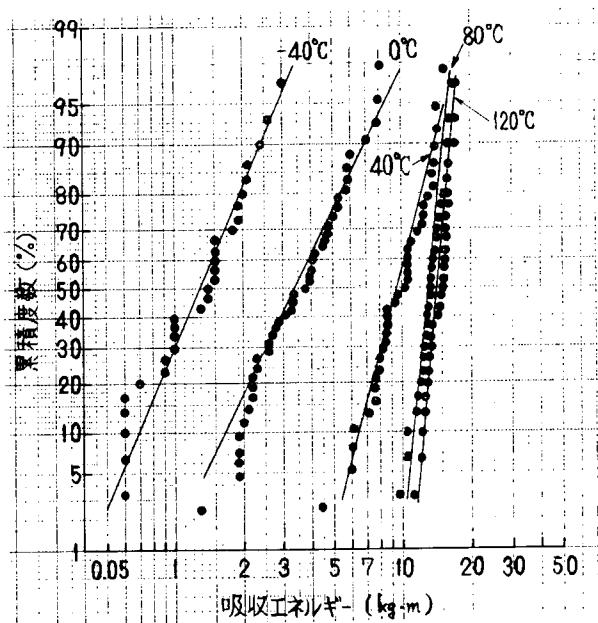


図 4.3.13(b) 吸収エネルギー値のバラツキ分布型の調査(対数正規分布)
(KD32鋼、エレクトロガス溶接継手、ボンド部)

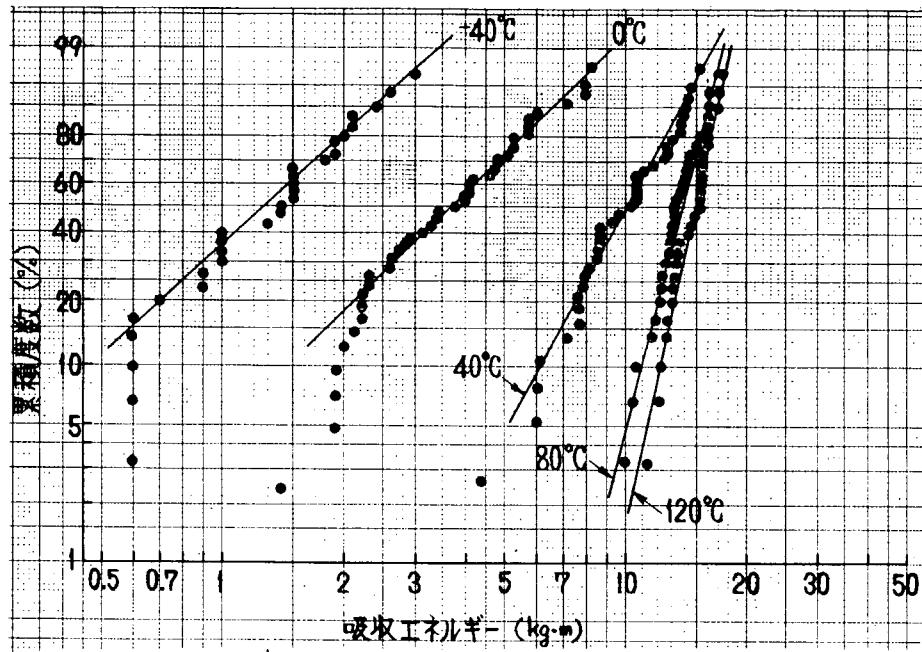


図 4.3.13(c) 吸収エネルギー値のバラツキ分布型の調査 (Weibull 分布)
(KD32鋼、エレクトロガス溶接継手、ボンド部)

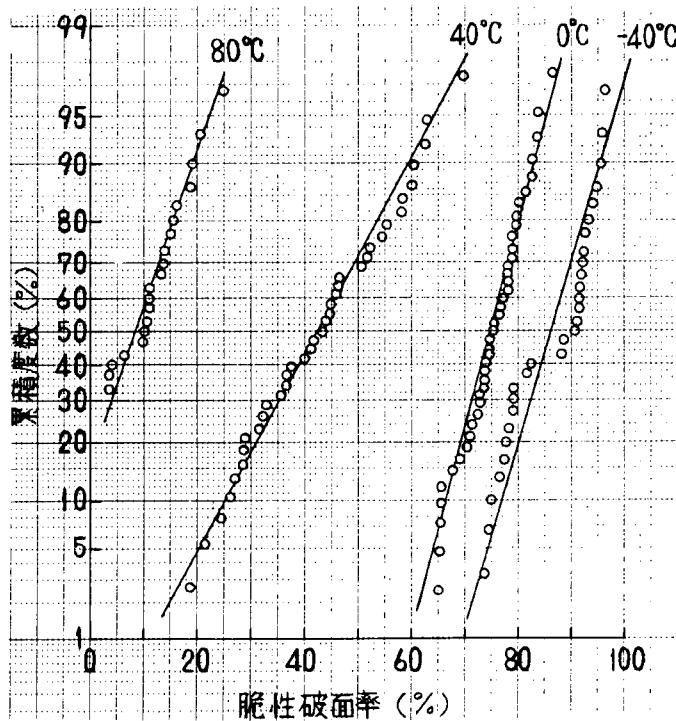


図 4.3.14(a) 脆性破面率のバラツキ分布型の調査 (正規分布)
(KD32鋼、エレクトロガス溶接継手、ボンド部)

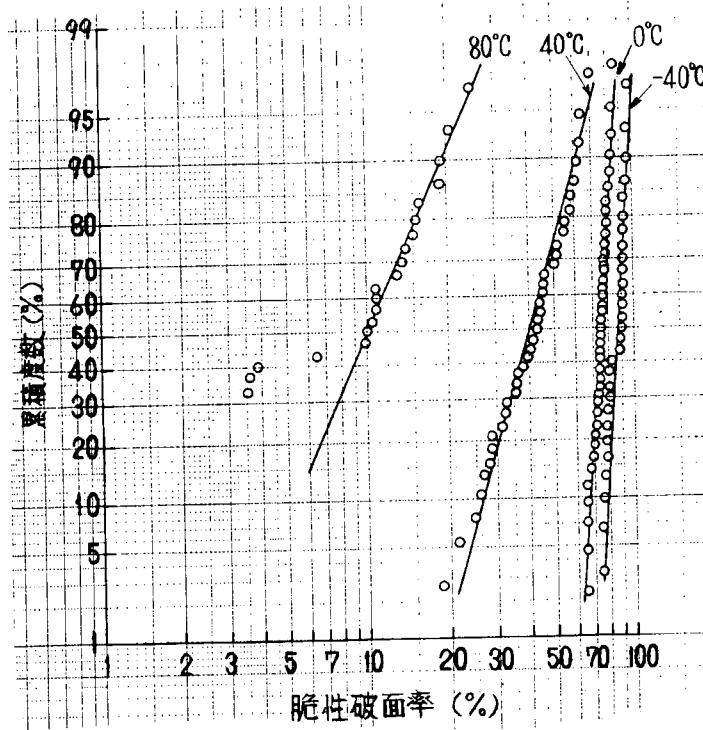


図 4.3.14(b) 脆性破面率のバラツキ分布型の調査(対数正規分布)
(KD32鋼、エレクトロガス溶接継手、ボンド部)

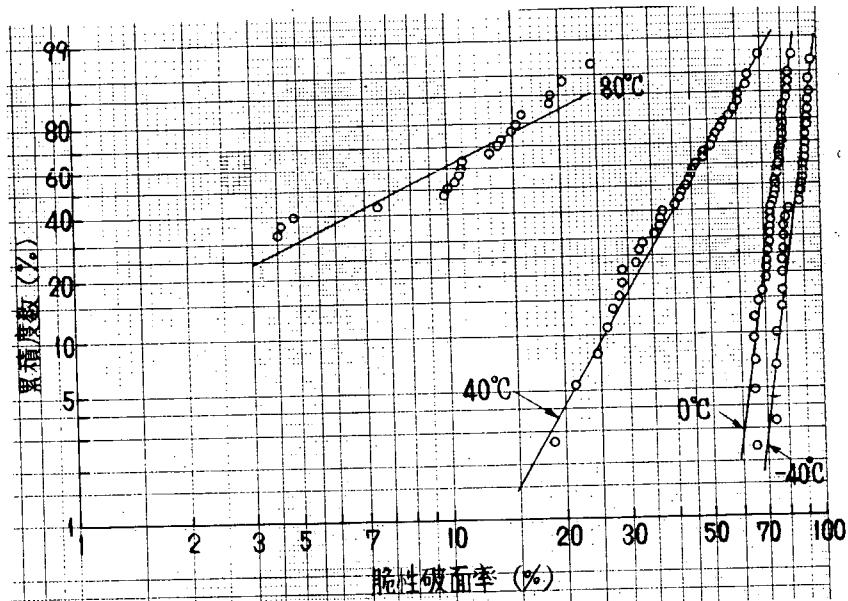


図 4.3.14(c) 脆性破面率のバラツキ分布型の調査(Weibull 分布)
(KD32鋼、エレクトロガス溶接継手、ボンド部)

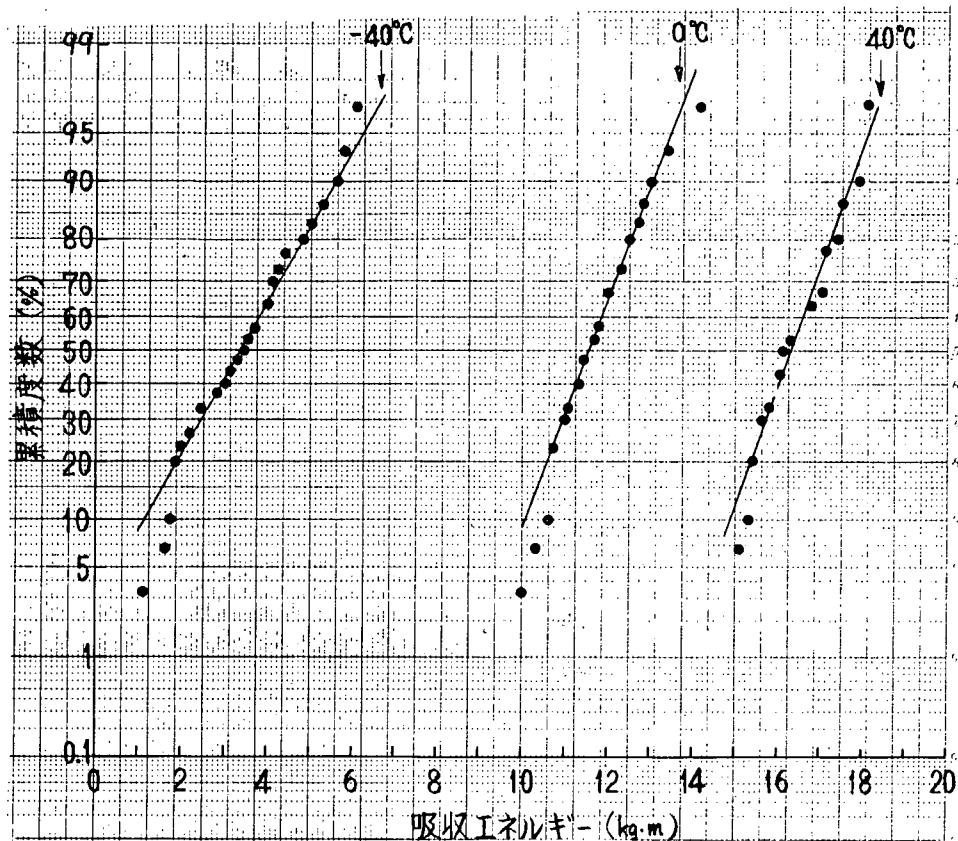


図 4.3.15(a) 吸収エネルギー値のバラツキ分布型の調査(正規分布)
(KD32鋼、母材)

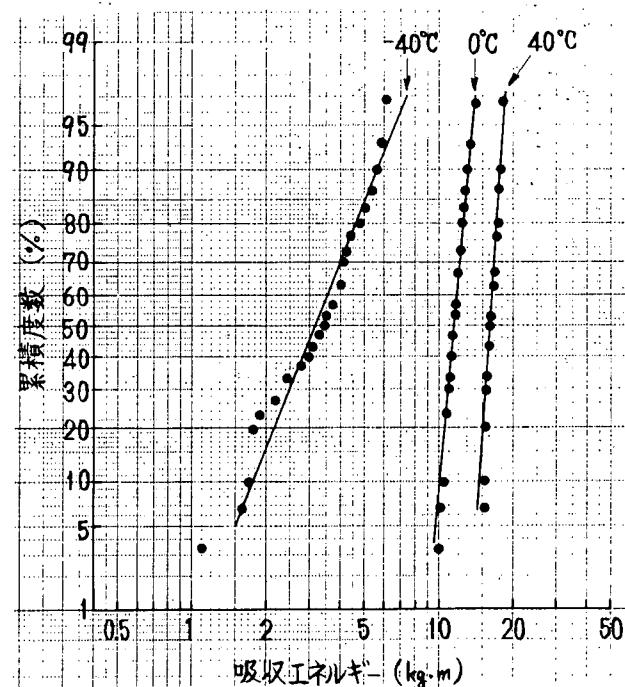


図 4.3.15(b) 吸収エネルギー値のバラツキ分布型の調査(対数正規分布)
(KD32鋼、母材)

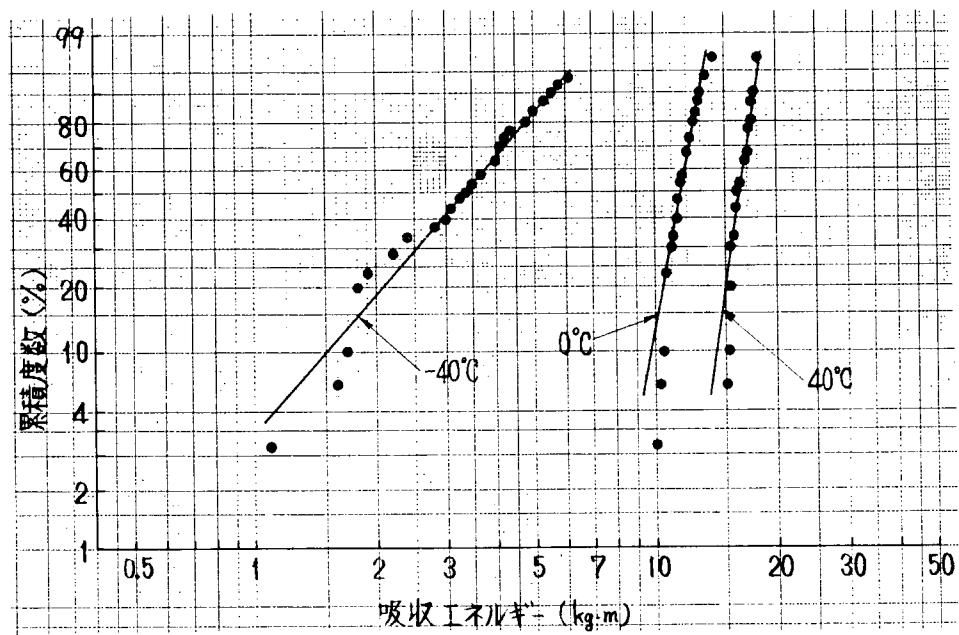


図 4.3.15(c) 吸収エネルギー値のバラツキ分布型の調査(Weibull 分布)
(KD32 鋼、母材)

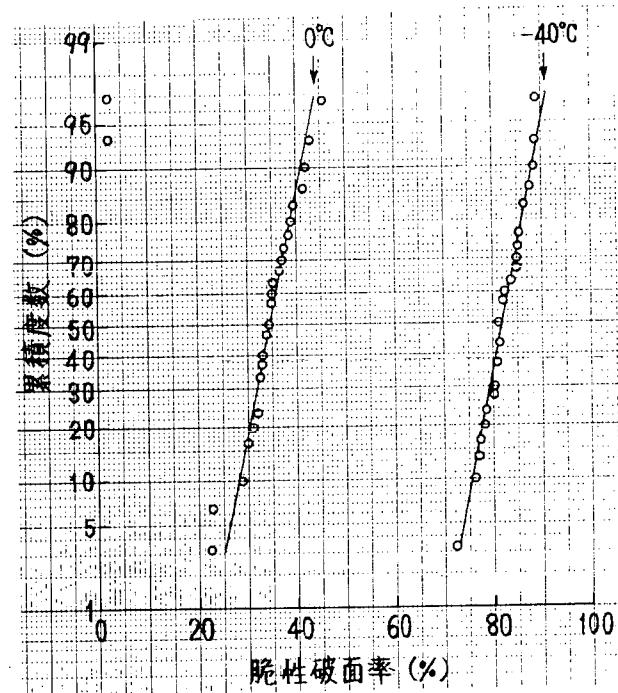


図 4.3.16(a) 脆性破面率のバラツキ分布型の調査(正規分布)
(KD32 鋼、母材)

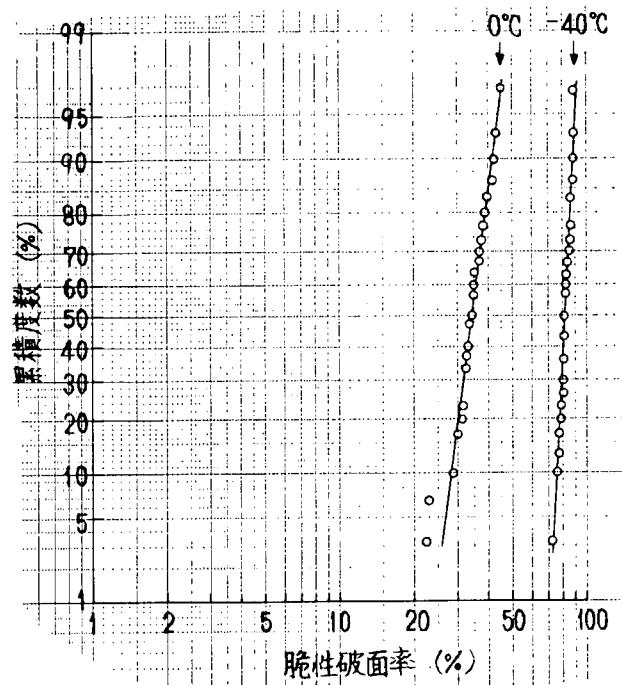


図 4.3.16(b) 脆性破面率のパラツキ分布型の調査(対数正規分布)
(KD32鋼、母材)

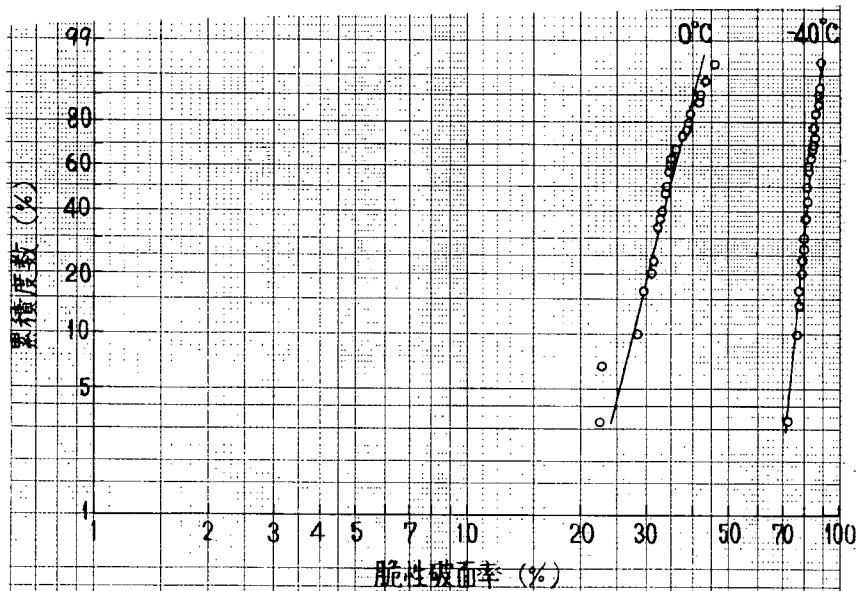


図 4.3.16(c) 脆性破面率のパラツキ分布型の調査(Weibull分布)
(KD32鋼、母材)

表 4.3.1 V - ノッチシャルピー試験結果のバラツキ特性
(平均値・標準偏差)

温度 (°C)	-40 0 40 80 120				
	試験片数 (本)	平均値	標準偏差	標準偏差 (%)	吸収エネルギー (kg·m)
ILGJガス溶接 継手ボンド部	30	42	38	30	30
	平均値	1.5	4.1	10.3	13.7
	標準偏差	0.7	1.9	2.9	2.0
	脆性破面率 (%)	86.0	74.9	42.1	8.4
	平均値	7.8	5.7	13.4	7.5
	標準偏差	3.5	11.8	16.5	—
母材 (KD32)	1.5	1.0	1.0	—	—
	平均値	81.8	34.0	0.2	—
	標準偏差	4.5	5.8	0	—

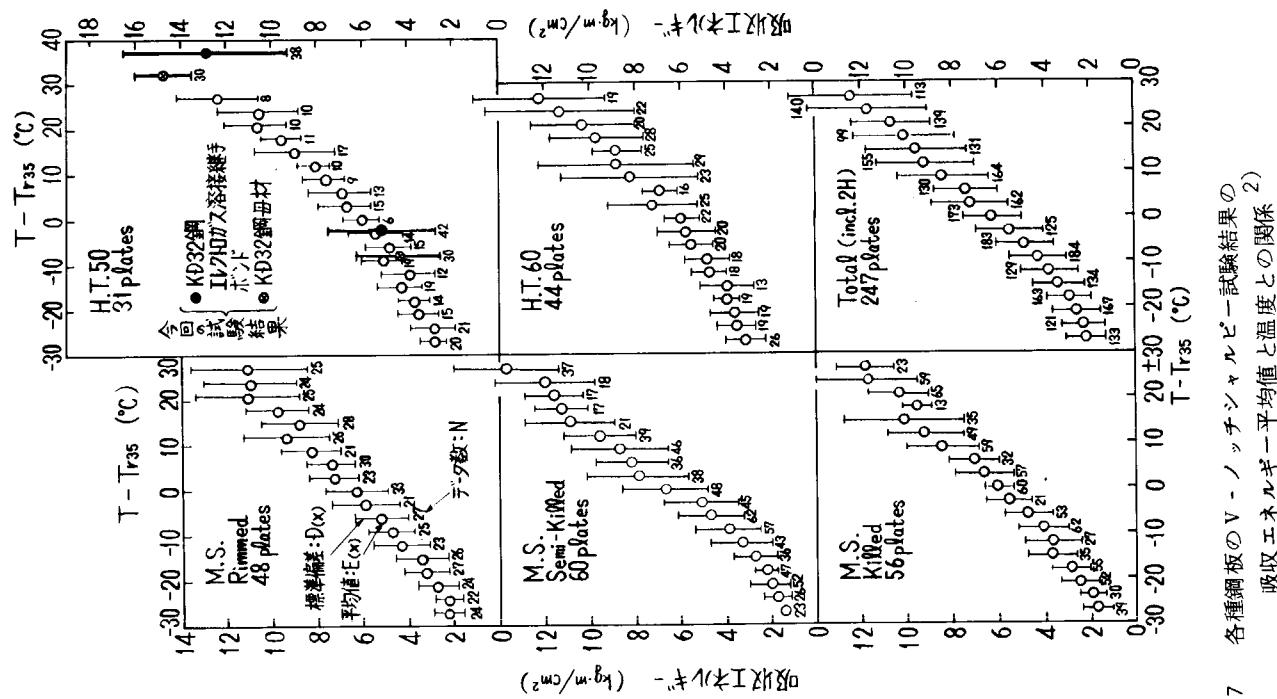
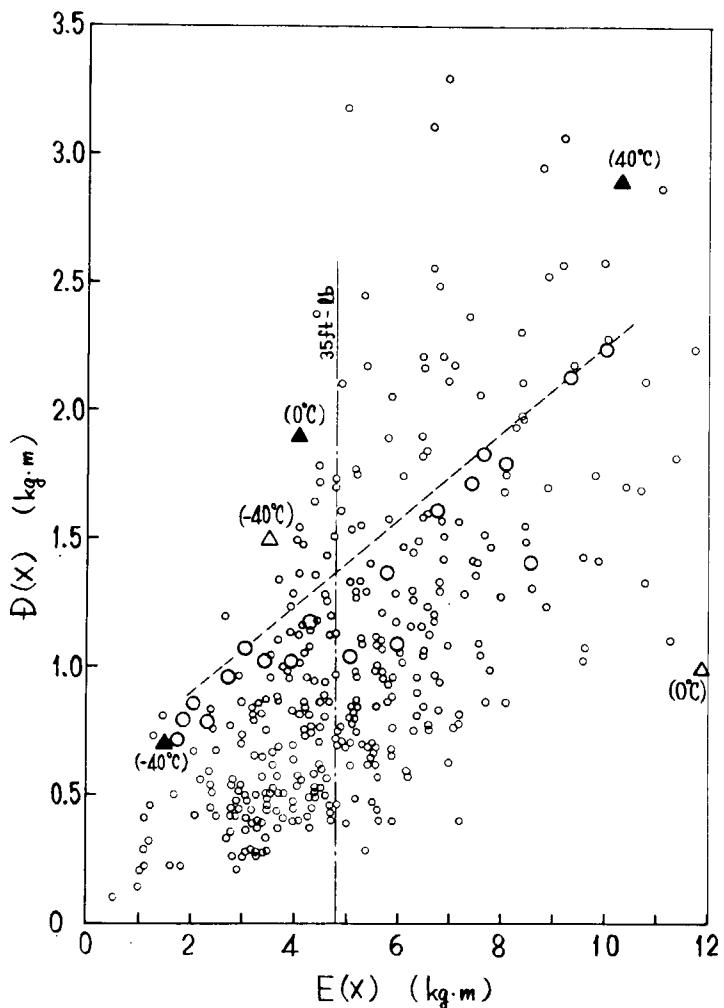


図 4.3.17 各種鋼板の V - ノッチシャルピー試験結果の
吸収エネルギー平均値と温度との関係 2)



データの出典

○ M. Yoshiaki ²⁾	N=99~184 (軟鋼, HT50, HT60, 2H の母材)
○ Heribet-Descovich ¹⁾	N=30 (軟鋼の母材)
△ 今回の試験結果	N=30 (KD32鋼板母材)
▲ 今回の試験結果	N=30~40 (KD32鋼板エレトロガス溶接継手ボルト部)

図 4.3.18 V - ノッチシャルピー試験結果の吸収エネルギー平均値と標準偏差との関係^{1), 2)}

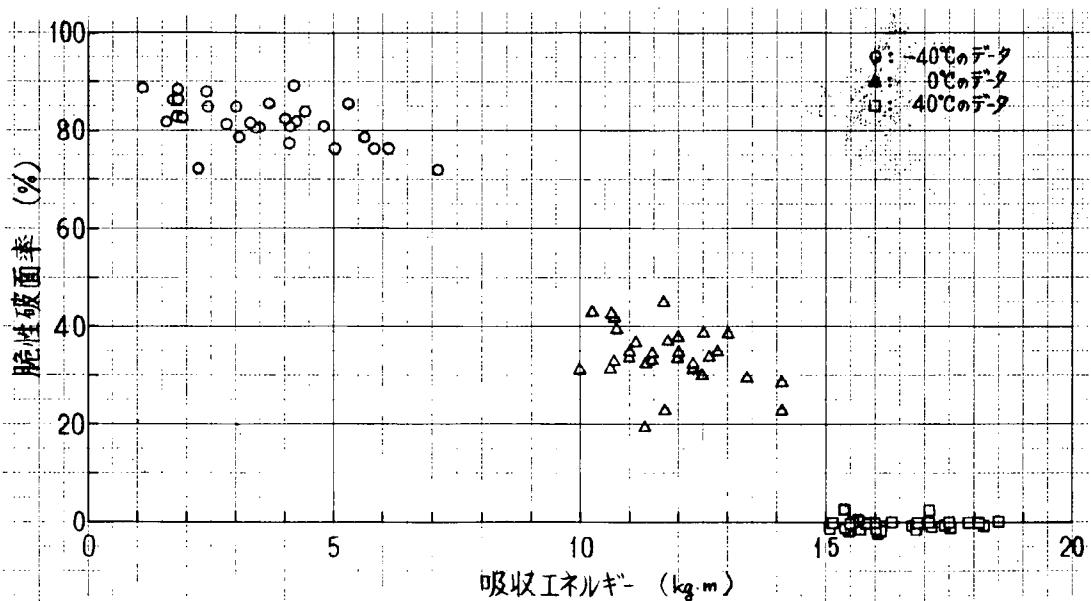


図 4.3.19 吸収エネルギー値と脆性破面率の相関
(KD32鋼、板厚 25.4 mm、母材)

4.4 小形COD曲げ試験

4.4.1 目的

供試材K D 3 2鋼(板厚2.5.4)の母材およびエレクトロガス溶接継手ボンドにノッチを加工した試験片により、小形曲げ試験によってCODを計測し、限界COD(δ_c)と温度の関係を求める。さらに母材、ボンドにノッチを加工した試験片を母材について3温度、ボンドについては4温度でそれぞれ50~60本供試して、各温度における δ_c のバラツキを把握する。

4.4.2 試験内容

試験片は上記鋼種の母材および溶接継手部のボンドに対するもので、いずれも供試鋼板から母材の圧延方向に直角にノッチが位置するように採取し、機械切削によって製作した。試験片板厚は原厚のままとし、ボンド部試験片では表裏面の溶接余盛りを削除した。ノッチは板厚面に入れた機械加工ノッチで、先端から2mmは幅0.2mmのソウカットノッチである。ボンド部試験片については、板厚中心のボンドを通るようにノッチを入れた。試験片形状と寸法およびボンド部試験片のノッチ位置の概念図を図4.4.1に示す。

小形曲げCOD試験における δ_c のバラツキを把握するための試験に先立ち、前年度と同様に室温~-196℃の温度で各温度2本ずつ曲げ試験を行ない δ_c と温度の関係を求めた。この試験結果をもとに、母材については、-78℃, -110℃, -196℃の3温度、ボンド部については、0℃, -40℃, -75℃, -196℃の4温度でそれぞれ50~60本の曲げ試験を行ない δ_c のバラツキを調べた。

試験に際しては、ノッチ部の開口変位(COD)と荷重の関係を計測した。CODの計測にはクリップゲージを用い、クリップゲージ変位(V_g)と荷重の関係をX-Yレコーダで連続的に記録し、破壊時の変位(V_c)などを求めた。破壊試験は、エチルアルコール、ドライアイスおよび液体窒素を適宜用いて、試験片を所定の温度に冷却したのち行なった。

4.4.3 試験結果および考察

—破壊靭性値のバラツキに対する統計的検討—

小形COD曲げ試験結果を表4.4.1(a)~表4.4.1(c)および表4.4.2(a)~表4.4.2(g)に示す。表中で V_c の δ_c への交換は、次に示すWellsの式によった。

$$(1) V_c \geq \frac{2\gamma\sigma_y W(1-\nu^2)}{E} \text{ のとき}$$

$$\delta_c = \frac{0.45(W-a)}{0.45W+0.55a+Z} \left[V_c - \frac{\gamma\sigma_y W(1-\nu^2)}{E} \right] \quad (1)$$

$$(2) V_c < \frac{2\gamma\sigma_y W(1-\nu^2)}{E} \text{ のとき}$$

$$\delta_c = \frac{0.45(W-a)}{0.45W+0.55a+Z} \frac{V_c^2 E}{4\gamma\sigma_y W(1-\nu^2)} \quad (2)$$

ここで

γ =限界弾性クリップゲージ変位の無次元値

σ_y =試験温度での降伏応力

E=ヤング係数

ν =ポアソン比

W=試験片深さ

a=ノッチ長さ

Z=試験片上面からクリップゲージ取付け位置までの距離

計算には、4.2項の丸棒引張試で求められた降伏応力を用いた。ただしボンド部に関しては母材の降伏応力を用いて計算した。なお、一部の試験については、FEMによる方法でも δ_c の δ_c への換算を行った。

先ず δ_c 値の分布をヒストグラムでみると図4.4.3に示すようになる。ヒストグラムのかき方にはいくつかの方法があるが、ここでは階級数を公式

$$k = 1.0 + 3.3 \log n \quad (3)$$

k: 階級数 n: データ数 (= 50)

を用いてすべて7階級に分類した。図には頻度数に各々2つの実験担当別の区別をも示した。

これらの図をみると、実験担当場所により分布の傾向が異なるようにみられるものもあり、事実、たとえばt検定により25個ずつが別の母集団とみなす方が妥当であるとの結論がえられるものもある。バラツキの要因としては δ_c という物体が本来もっている確率的性質にもとづくもの他に、材料の不均一性（試験片採取位置）や実験、測定方法の設定やくせに基因するものとがあろう。

本研究項目ではこれらの要因すべてをくるめて、 δ_c データにどの程度の不確実さがあるかを調べることを目的としたため、試験片採取位置や実験方法、測定方法について、実験担当場所毎の系統的な差を出来るだけ小さくするための意図的操作は特にしなかった。とくに図中(a)と(c)では板番の異なる供試鋼板から採取されたもので、むしろ別の材料とみなすべきであるという考え方も成り立つし、事実図にもこの差がみてとれるようにも思える。しかしこの差も他の同一板番から採取したデータにくらべ、とくに甚だしい違いといえるほどのものではないといえる。結論的には上記のような目的のバラツキ調査という見地から実験担当場所による区別をしないで分析することにした。

図4.4.3のヒストグラムの形状からは、 δ_c の分布関数形がどのようなものであるかをかなりの確度をもって特定することはむずかしい。ここでは正規分布、対数正規分布、Weibull分布の3つをえらんで確率紙にプロットしてみた。結果を図4.4.4に示す。これらを採用した理由は前2者についてはバラツキの統計的取扱いでしばしば用いられる確率モデルであり、確率パラメタのイメージも分りやすいことを考慮したためであり、Weibull分布は破壊という物性の物理的性質（最小値の分布）を重視したためである。

図4.4.4をみると1.2の例をのぞき、正規確率紙上のプロットの直線性はよくないといえる。これは図4.4.3にみるよう明瞭な左右対称とはいえない分布を示しているものが多いことからもうかがえる。また、対数正規分布に関しても全体的にわん曲した形となっているものが多く、これら2つの分布へのあてはめは無理なように見える。

確率密度関数における“すそ”の部分を無視すれば3者の中では総じて良好と思われるはWeibull分布といえよう。表4.4.3に図から定めたWeibull分布の確率パラメタを一括して示した。 m が4をこえるものは実質上正規分布との差が小さいことが理論的に言えるが、これは図4.4.3からもわかる。

4.4.4 まとめ

本委員会の共通供試鋼板および共通供試継手であるKD32鋼板の母材およびそのエレクトロガス溶接継手のボンドに対する小形COD曲げ試験を実施し、 δ_c と温度の関係を求めるとともに、同一温度において50~60本の曲げ試験を行い δ_c のバラツキを調べた。すなわち δ_c 分布を正規確率分布、対数正規確率分布およびWeibull確率分布にそれぞれあてはめて検討し、 δ_c のバラツキに関する定量的把握のための貴重な資料を得た。

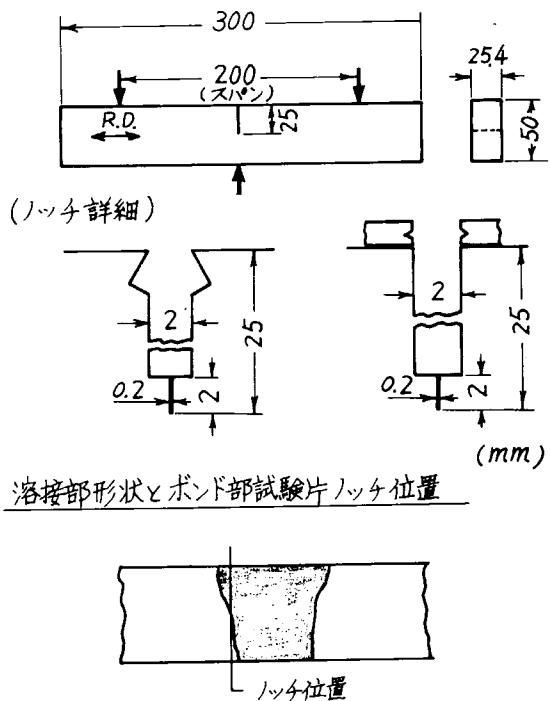


図 4.4.† 試験片の形状と寸法

表 4.4.1(a) 小形 C O D 曲げ試験結果
(K D 3 2 鋼、母材・B材)

試験片番号	試験温度 T (°C)	降伏点 σ_Y (kg/mm²)	破壊荷重		$\frac{\sigma_N}{\sigma_Y}$	クリップゲージ変位 $\frac{V_c}{L_c}$ (mm)	δ_c^{**} (mm)
			P (kg)	σ_N (kg/mm²)			
1	-40	42	5350*	102.7	2.45	6.92	(1) 1.66 (2) 2.02
2	-40	42	5530*	106.2	2.53	5.43	1.30 1.58
3	-60	43	5460	104.8	2.44	2.72	0.651 0.771
4	-60	43	5515*	105.9	2.46	4.91	1.17 1.42
5	-75	45	5310	102.0	2.27	3.34	0.799 0.953
6	-75	45	5760	110.6	2.46	5.63	1.35 1.63
7	-101	49	5600	107.5	2.19	1.11	0.265 0.284
8	-101	49	5390	103.5	2.11	1.53	0.366 0.409
9	-117	53	5960	114.4	2.16	1.35	0.324 0.352
10	-118	53	5980	114.8	2.17	0.874	0.209 0.210
11	-140	60	6425	123.4	2.06	0.477	0.114 0.0859
12	-142	60.5	4240	81.4	1.35	0.461	0.0363 0.0806
13	-160	68.5	2480	47.6	0.69	0.120	0.0102 0.0051
14	-161	69	2480	47.6	0.69	0.139	0.0104 0.0068
15	-196	89.5	1820	34.9	0.39	0.070	0.0055 0.0013
16	-196	89.5	2200	42.2	0.47	0.100	0.0072 0.0026

* 最大荷重

** (1) $r = \frac{1}{3} + FEM$

(2) Wells

表 4.4.1 (b) 小形 COD 試験結果 (母材・A材)

試験片番号	試験温度 T (°C)	降伏点 σ_Y (kg/mm²)	破壊荷重		$\frac{\sigma_N}{\sigma_Y}$	クリップゲージ変位 V_c (mm)	δ_c^* (mm)
			P (kg)	σ_N (kg/mm²)			
1	-40	37.5	5160	100.25	2.67	3.905	1.172
2	-40	37.5	4790	92.82	2.48	2.290	0.671
3	-40	37.5	4820	94.27	2.51	2.650	0.782
4	-60	40	4580	87.94	2.20	1.41	0.395
5	-78	43	4720	88.25	2.05	2.13	0.616
6	-100	47	4820	93.55	1.99	0.810	0.202
7	-100	47	5080	96.84	2.06	1.540	0.428
8	-120	51	4900	94.08	1.84	0.496	0.100
9	-140	56.5	5040	96.77	1.73	0.460	0.083
10	-160	63.5	2540	50.43	0.80	0.382	0.052

* Wells

表 4.4.1 (c) 小形 COD 曲げ試験結果
(KD32 鋼、A材・エレクトロガス溶接・ボンド)

試験片番号	試験温度 T (°C)	降伏点 σ_Y (kg/mm²)	破壊荷重		$\frac{\sigma_N}{\sigma_Y}$	クリップゲージ変位 V_c (mm)	δ_c^{**} (mm)
			P (kg)	σ_N (kg/mm²)			
1	0	34.5	4470	85.8	2.49	0.688	(1) 0.165 (2) 0.171
2	0	34.5	4650	89.3	2.59	0.869	0.208 0.225
3	-20	36	4860	93.3	2.59	1.271	0.304 0.343
4	-20	36	4950	95.0	2.64	1.549	0.371 0.426
5	-40	37.5	4940	94.8	2.53	1.646	0.394 0.453
6	-40	37.5	4430	85.1	2.27	0.492	0.118 0.109
7	-60	40	5160	99.1	2.48	1.216	0.291 0.323
8	-60	40	4550	87.4	2.18	0.369	0.0883 0.0701
9	-76	42.5	4760	91.4	2.15	0.521	0.125 0.113
10	-76	42.5	5000	96.0	2.26	0.946	0.226 0.240
11	-119	51	3570	68.5	1.34	0.216	0.0296 0.0204
12	-120	51	4870	93.5	1.83	0.385	0.0810 0.0640
13	-161	63.5	2680	51.5	0.81	0.177	0.0127 0.0110
14	-161	63.5	2340	44.9	0.71	0.110	0.0107 0.0043
15	+23	33	5325*	102.2	3.10	5.32	1.27 1.55
16	+23	33	5300	101.8	3.08	3.98	0.952 1.15
17	-101	47	3860	74.1	1.58	0.284	0.0552 0.0383

* 最大荷重

** (1) $t = \frac{1}{3} + FEM$

(2) Wells

表 4.4.2(a) 小形 COD 曲げ試験結果(母材・-78°C)

母材・-78°C			長大			重量		
番号	破壊荷重 (kg)	クリップゲージ 変位 δ_c (mm)	番号	破壊荷重 (kg)	クリップゲージ 変位 δ_c (mm)	番号	破壊荷重 (kg)	クリップゲージ 変位 δ_c (mm)
1	4855	1.75	0.495	26	5525	1.506	0.430	
2	4850	1.42	0.394	27	6070	1.926	0.560	
3	5600	0.88	0.227	28	5850	1.880	0.545	
4	4750	1.42	0.394	29	5600	1.533	0.433	
5	4650	1.27	0.347	30	5750	1.606	0.456	
6	4780	1.15	0.312	31	5575	2.039	0.589	
7	4080	0.75	0.187	32	5460	1.546	0.435	
8	4400	0.62	0.146	33	5660	2.145	0.622	
9	4376	0.84	0.213	34	5540	1.693	0.484	
10	4590	1.24	0.337	35	5400	2.097	0.614	
11	5175	2.15	0.628	36	5500	1.902	0.546	
12	4750	1.70	0.480	37	5460	1.693	0.481	
13	4600	0.86	0.220	38	5565	1.505	0.425	
14	5070	2.12	0.611	39	5400	1.586	0.453	
15	4980	1.80	0.515	40	5640	1.355	0.382	
16	4650	1.20	0.327	41	5915	2.903	0.850	
17	4795	1.92	0.544	42	5700	2.473	0.720	
18	5100	2.35	0.680	43	5560	2.580	0.754	
19	4935	1.42	0.393	44	5700	1.962	0.565	
20	4855	1.60	0.448	45	5650	2.191	0.640	
21	4678	1.07	0.287	46	5825	2.231	0.649	
22	4650	1.07	0.287	47	5450	1.806	0.519	
23	4600	0.93	0.242	48	5525	1.625	0.465	
24	4755	1.05	0.278	49	5550	2.111	0.611	
25	4750	1.18	0.318	50	5365	1.683	0.478	

表 4.2(c) 小形 COD 曲げ試験結果 (母材 - 196 °C)

母材 - 196 °C		長大							
番号	破壊荷重 P (kg)	変位 Vc (mm)	δc (mm)	破壊荷重 P (kg)	変位 Vc (mm)	δc (mm)	破壊荷重 P (kg)	変位 Vc (mm)	δc (mm)
1	1800	0.091	0.0022	0.0051	26	1930	0.104	0.0029	0.0062
2	2380	0.130	0.0046	0.0096	27	1630	0.085	0.0019	0.0042
3	1955	0.111	0.0033	0.0058	28	1780	0.095	0.0024	0.0055
4	2070	0.122	0.0040	0.0064	29	1620	0.110	0.0032	0.0048
5	2394	0.139	0.0052	0.0078	30	415	0.030	0.0002	0.0013
6	2125	0.137	0.0051	0.0064	31	1880	0.109	0.0032	0.0059
7	2037	0.128	0.0045	0.0059	32	1550	0.100	0.0027	0.0045
8	2060	0.139	0.0052	0.0063	33	1360	0.082	0.0018	0.0038
9	2335	0.119	0.0039	0.0065	34	1350	0.060	0.0010	0.0038
10	2080	0.118	0.0037	0.0064	35	1920	0.110	0.0032	0.0061
11	1980	0.136	0.0049	0.0059	36	1950	0.101	0.0027	0.0062
12	2355	0.165	0.0074	0.0076	37	1680	0.090	0.0022	0.0052
13	2160	0.126	0.0043	0.0062	38	1520	0.084	0.0019	0.0044
14	2090	0.142	0.0054	0.0064	39	1960	0.105	0.0029	0.0063
15	2180	0.129	0.0045	0.0067	40	1970	0.102	0.0028	0.0061
16	2060	0.128	0.0044	0.0063	41	1790	0.101	0.0027	0.0055
17	1790	0.117	0.0037	0.0049	42	1910	0.107	0.0029	0.0061
18	2075	0.130	0.0044	0.0065	43	1770	0.101	0.0027	0.0054
19	2245	0.128	0.0044	0.0070	44	2050	0.105	0.0029	0.0066
20	2140	0.113	0.0034	0.0067	45	1720	0.095	0.0024	0.0053
21	2140	0.122	0.0040	0.0066	46	2160	0.115	0.0035	0.0072
22	2190	0.125	0.0042	0.0068	47	1830	0.103	0.0028	0.0057
23	2050	0.122	0.0040	0.0062	48	1990	0.106	0.0030	0.0064
24	1600	0.103	0.0028	0.0044	49	1740	0.108	0.0031	0.0053
25	2450	0.150	0.0058	0.0084	50	1810	0.102	0.0028	0.0055

表 4.2(d) 小形 COD 曲げ試験結果 (ボンド - 0 °C)

ボンド - 0 °C		東大						#	
番号	破壊荷重 P (kg)	変位 Vc (mm)	δc (mm)	破壊荷重 P (kg)	変位 Vc (mm)	δc (mm)	破壊荷重 P (kg)	変位 Vc (mm)	δc (mm)
1	5260	1.775	0.515	26	5910	3.824	1.150		
2	5150	1.470	0.420	27	6110	3.620	1.087		
3	5150	1.766	0.518	28	5650	2.300	0.677		
4	4910	1.325	0.375	29	6050	3.560	1.068		
5	5150	1.636	0.471	30	5020	1.080	0.298		
6	5540	2.224	0.654	31	5420	1.560	0.447		
7	5870	3.138	1.010	32	5200	1.240	0.348		
8	5550	1.913	0.557	33	5330	1.360	0.385		
9	5960	3.972	1.196	34	5830	2.460	0.727		
10	5850	1.356	0.385	35	6150	3.860	1.161		
11	5710	2.430	0.718	36	5730	2.162	0.636		
12	4400	0.560	0.138	37	5530	2.376	0.701		
13	5800	2.644	0.784	38	5650	2.740	0.814		
14	4740	0.829	0.221	39	4670	0.712	0.184		
15	5750	2.652	0.786	40	5930	3.880	1.167		
16	5300	1.953	0.570	41	5620	2.460	0.727		
17	5040	1.425	0.406	42	4750	0.260	0.230		
18	5560	2.593	0.768	43	5750	3.440	1.031		
19	5490	2.095	0.614	44	5280	2.160	0.634		
20	5450	1.690	0.488	45	5130	1.860	0.540		
21	5700	2.632	0.781	46	5380	1.960	0.571		
22	6000	2.802	0.833	47	4930	1.000	0.274		
23	5900	2.667	0.791	48	5700	2.220	0.652		
24	5150	1.288	0.363	49	5320	1.468	0.419		
25	5150	1.320	0.373	50	6070	3.700	1.111		

(B#)

(A#)

(A#)

(A#)

表 4.4.2(e) 小形 COD 曲げ試験結果 (ボンド・-40°C)

ボンド・-40°C							ボンド・-75°C								
住金				三義			東大				三義				
番号	破壊荷重 P (kg)	クリップゲージ 変位 Vc (mm)	δc	番号	破壊荷重 P (kg)	クリップゲージ 変位 Vc (mm)	δc	番号	破壊荷重 P (kg)	クリップゲージ 変位 Vc (mm)	δc	番号	破壊荷重 P (kg)	クリップゲージ 変位 Vc (mm)	δc
1	3366	0.25	0.039	26	5840	1.50	0.428	1	5400	0.610	0.144	26	5320	0.692	0.171
2	4255	0.38	0.080	27	5190	1.04	0.281	2	3800	0.258	0.036	27	5790	1.175	0.320
3	3810	0.33	0.065	28	5105	1.09	0.301	3	4800	0.534	0.121	28	4535	0.640	0.156
4	4636	0.45	0.102	29	5255	1.02	0.278	4	5000	0.604	0.143	29	5805	0.527	0.120
5	4255	0.40	0.087	30	5410	1.20	0.333	5	5760	0.968	0.256	30	4725	0.440	0.092
6	3531	0.30	0.055	31	5980	1.88	0.536	6	3750	0.254	0.035	31	5550	1.258	0.349
7	4318	0.42	0.093	32	5820	2.10	0.627	7	4400	0.329	0.058	32	4440	0.315	0.053
8	5169	0.80	0.213	33	5600	1.34	0.376	8	5200	0.551	0.126	33	4785	0.500	0.110
9	4318	0.45	0.102	34	4735	0.48	0.110	9	4480	0.391	0.077	34	5190	0.905	0.233
10	4445	0.80	0.213	35	4900	0.59	0.141	10	4800	0.390	0.076	35	4735	0.510	0.112
11	4636	0.55	0.134	36	5160	1.02	0.279	11	4800	0.478	0.104	36	4260	0.340	0.060
12	4636	0.65	0.165	37	4935	0.80	0.209	12	3910	0.259	0.036	37	5350	0.738	0.183
13	4407	0.50	0.118	38	4660	0.68	0.160	13	5600	1.120	0.303	38	4980	0.395	0.078
14	5118	1.05	0.291	39	4955	0.94	0.254	14	5100	0.666	0.162	39	5260	0.743	0.184
15	4001	0.40	0.087	40	4770	0.58	0.140	15	5600	1.032	0.276	40	4040	0.280	0.042
16	4191	0.50	0.118	41	4540	0.64	0.160	16	5260	1.040	0.278	41	4740	0.418	0.085
17	5169	0.70	0.181	42	4920	0.64	0.160	17	5210	0.934	0.245	42	5040	0.490	0.109
18	5156	0.85	0.228	43	5230	1.03	0.280	18	5600	0.910	0.238	43	5470	0.930	0.246
19	3721	0.40	0.087	44	4875	0.62	0.156	19	4680	0.515	0.115	44	5020	0.388	0.060
20	5029	0.90	0.244	45	5260	1.36	0.380	20	4450	0.387	0.076	45	5370	0.645	0.156
21	4674	0.65	0.165	46	5605	1.96	0.557	21	5210	0.904	0.236	46	3680	0.210	0.020
22	4166	0.45	0.102	47	5450	1.60	0.453	22	4750	0.500	0.111	47	5430	0.640	0.154
23	4407	0.60	0.150	48	4950	1.28	0.360	23	4780	0.544	0.127	48	4980	0.482	0.105
24	3574	0.30	0.055	49	5150	0.54	0.128	24	4300	0.325	0.056	49	5020	0.518	0.116
25	4801	0.55	0.134					25	5260	0.713	0.177	50	5750	0.575	0.134

表 4.4.2(f) 小形 COD 曲げ試験結果 (ボンド・-75°C)

ボンド・-75°C							
東大				三義			
番号	破壊荷重 P (kg)	クリップゲージ 変位 Vc (mm)	δc	番号	破壊荷重 P (kg)	クリップゲージ 変位 Vc (mm)	δc
1	5400	0.610	0.144	26	5320	0.692	0.171
2	3800	0.258	0.036	27	5790	1.175	0.320
3	4800	0.534	0.121	28	4535	0.640	0.156
4	5000	0.604	0.143	29	5805	0.527	0.120
5	5760	0.968	0.256	30	4725	0.440	0.092
6	3750	0.254	0.035	31	5550	1.258	0.349
7	4400	0.329	0.058	32	4440	0.315	0.053
8	5200	0.551	0.126	33	4785	0.500	0.110
9	4480	0.391	0.077	34	5190	0.905	0.233
10	4800	0.390	0.076	35	4735	0.510	0.112
11	4800	0.478	0.104	36	4260	0.340	0.060
12	3910	0.259	0.036	37	5350	0.738	0.183
13	5600	1.120	0.303	38	4980	0.395	0.078
14	5100	0.666	0.162	39	5260	0.743	0.184
15	5600	1.032	0.276	40	4040	0.280	0.042
16	5260	1.040	0.278	41	4740	0.418	0.085
17	5210	0.934	0.245	42	5040	0.490	0.109
18	5600	0.910	0.238	43	5470	0.930	0.246
19	4680	0.515	0.115	44	5020	0.388	0.060
20	4450	0.387	0.076	45	5370	0.645	0.156
21	5210	0.904	0.236	46	3680	0.210	0.020
22	4750	0.500	0.111	47	5430	0.640	0.154
23	4780	0.544	0.127	48	4980	0.482	0.105
24	4300	0.325	0.056	49	5020	0.518	0.116
25	5260	0.713	0.177	50	5750	0.575	0.134

表 4.4.2(g) 小形 COD 曲げ試験結果 (ボンド・196 °C)

ボンド・196 °C						
#			住金			
番号	破壊荷重 P (kg)	クリップゲージ 変位 Vc (mm)	δ_c (mm) Wells	番号 P (kg)	破壊荷重 P (kg)	δ_c (mm) Wells
1	2230	0.120	0.00405	0.00774	26	2372
2	2170	0.132	0.00490	0.00737	27	2435
3	2260	0.116	0.00379	0.00781	28	2842
4	2560	0.148	0.00616	0.00933	29	2486
5	2050	0.100	0.00281	0.00671	30	1991
6	2270	0.112	0.00353	0.00791	31	2524
7	2240	0.132	0.00490	0.00770	32	2143
8	2480	0.132	0.00490	0.00899	33	2435
9	1820	0.108	0.00328	0.00580	34	2575
10	2630	0.144	0.00583	0.00990	35	1991
11	2420	0.140	0.00551	0.00864	36	2257
12	2620	0.144	0.00583	0.00971	37	2257
13	2270	0.120	0.00405	0.00781	38	2372
14	2220	0.120	0.00405	0.00754	39	2118
15	2570	0.128	0.00461	0.00966	40	2257
16	2150	0.120	0.00405	0.00772	41	2118
17	2110	0.108	0.00328	0.00702	42	2334
18	2060	0.100	0.00281	0.00872	43	2416
19	2160	0.120	0.00405	0.00727	44	2168
20	2230	0.112	0.00353	0.00760	45	2219
21	2350	0.136	0.00520	0.00825	46	2715
22	2300	0.128	0.00461	0.00802	47	1991
23	2370	0.140	0.00551	0.00836	48	1864
24	2330	0.140	0.00551	0.00814	49	2270
25	2450	0.140	0.00551	0.00882	50	2359

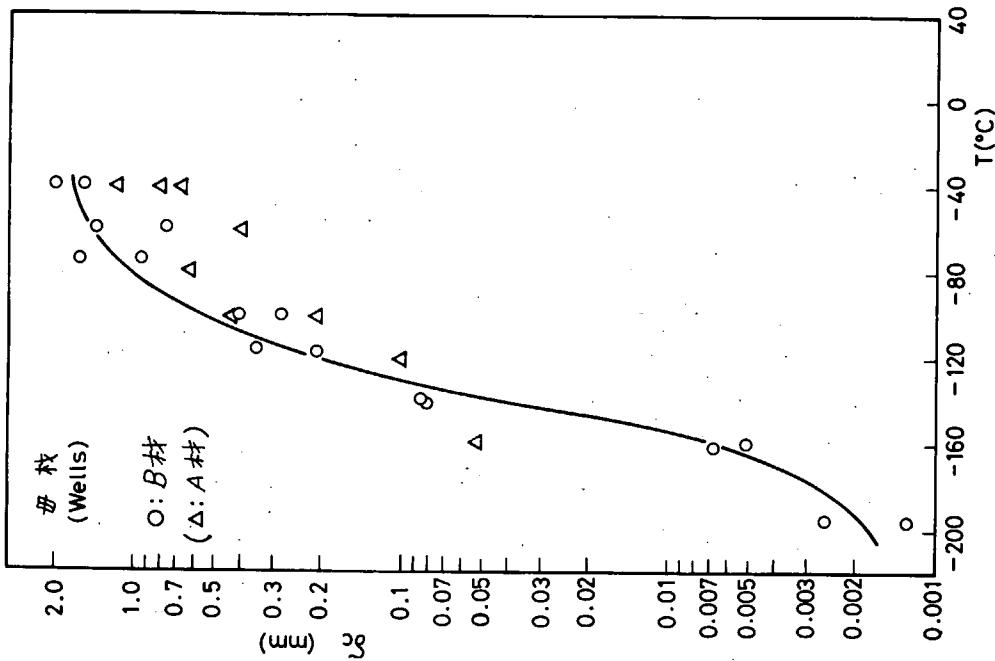


図 4.4.2(a) δ_c と 温 度 の 関 係 (母材)

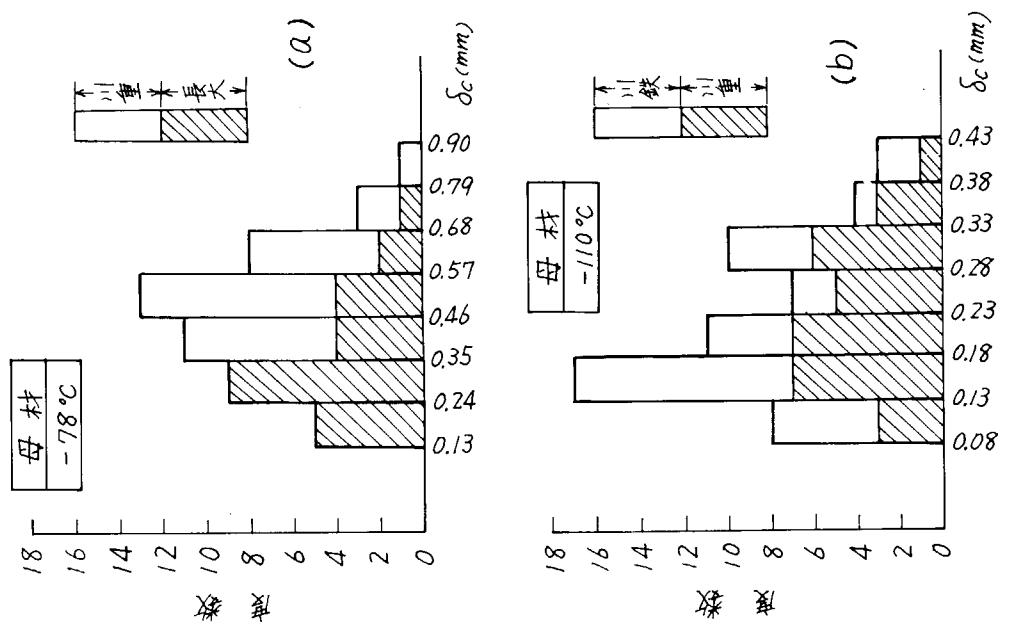


図 4.3 (a) δ_c の分布

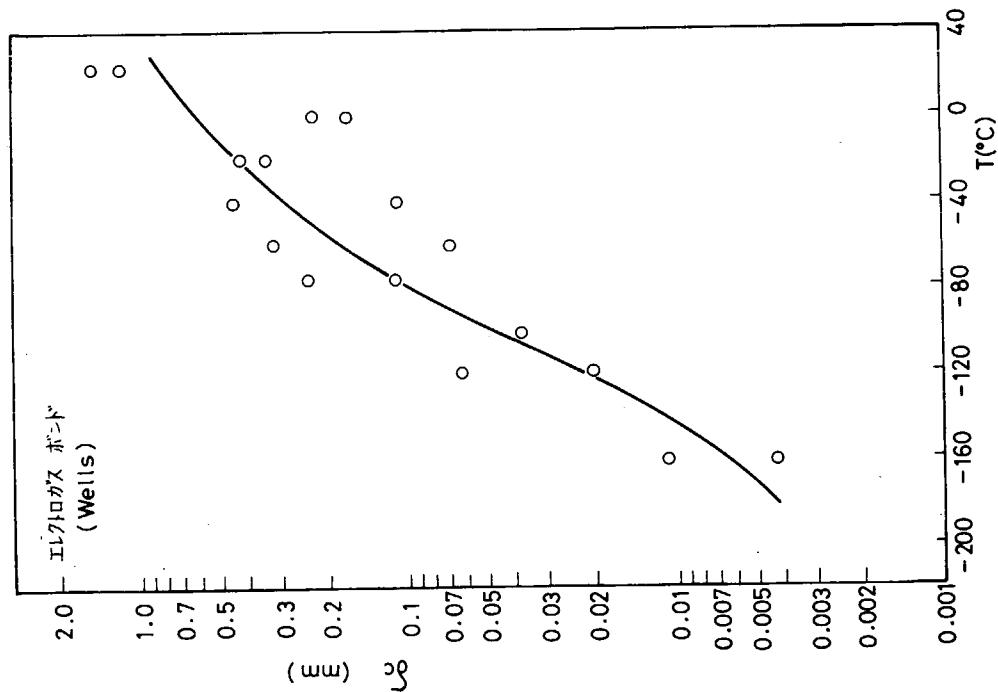
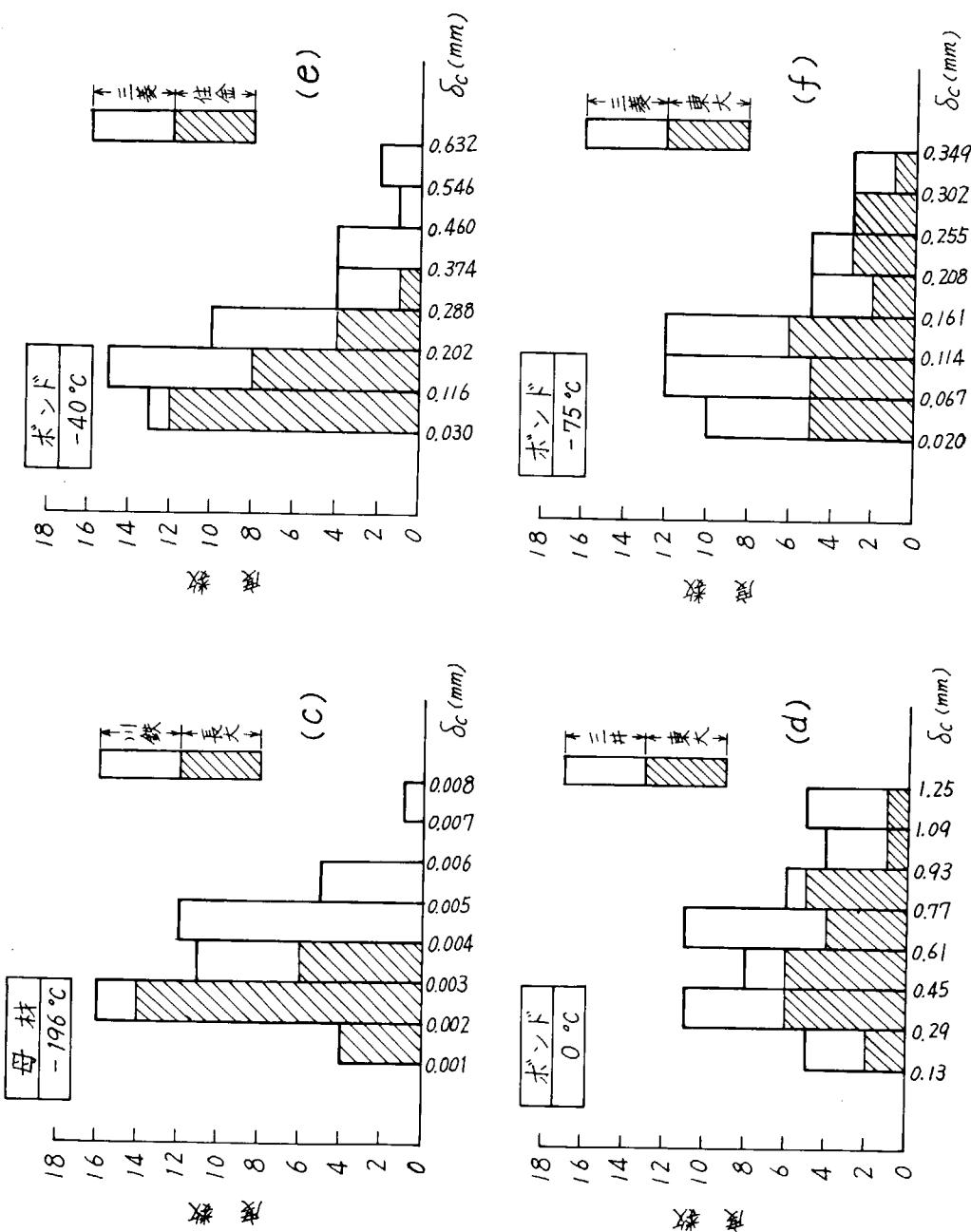


図 4.2 (b) δ_c と 温度の関係 (ボンド)

図 4.4.3(d) δ_c の分布



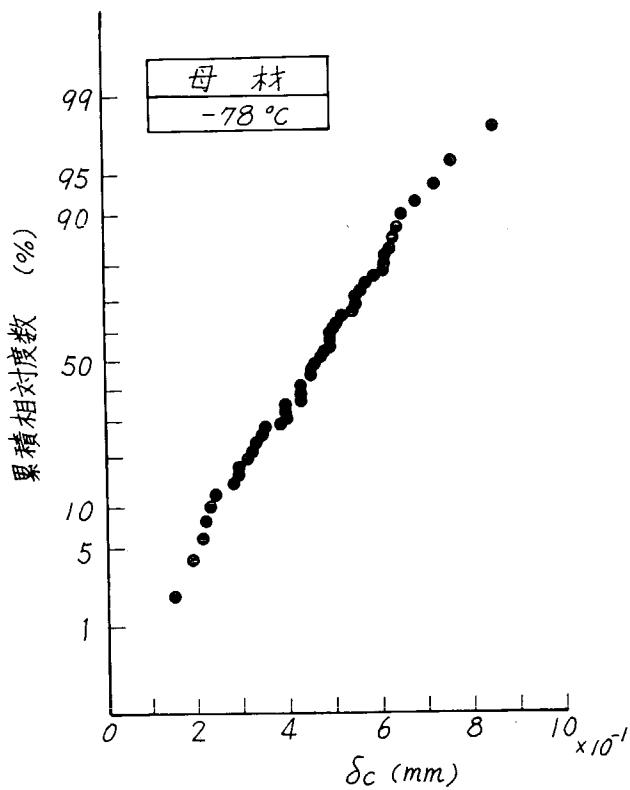


図 4.4.4 (a) δ_c の累積相対度数の正規確率紙へのプロット

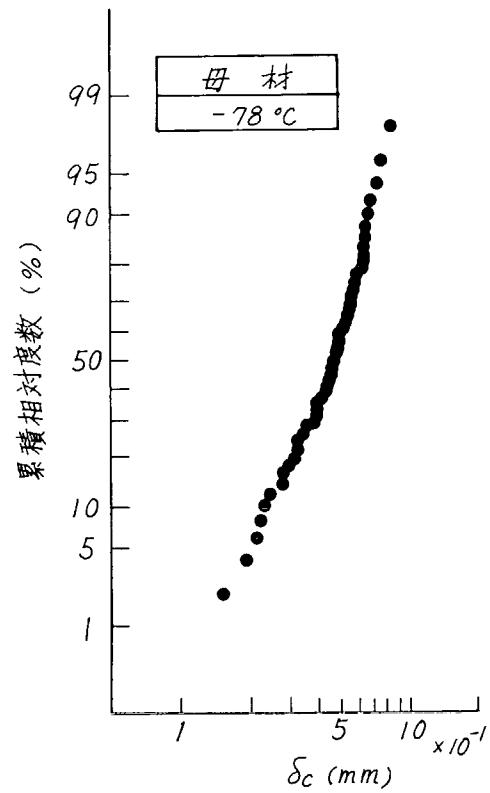


図 4.4.4 (b) δ_c の累積相対度数の対数正規確率紙へのプロット

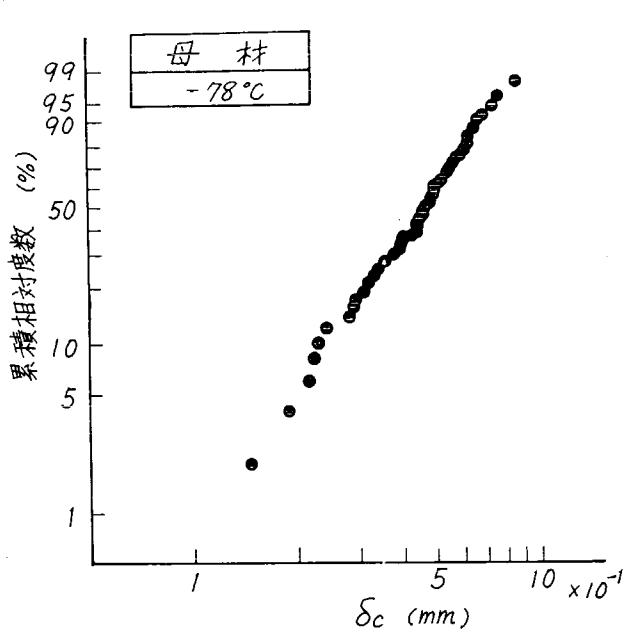


図 4.4.4 (c) δ_c の累積相対度数のWeibull 確率紙へのプロット

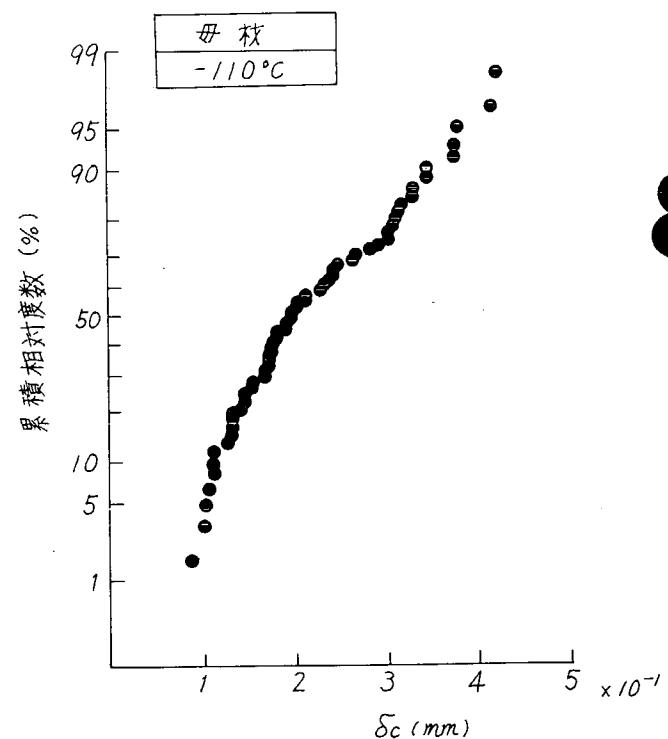


図 4.4.4 (d) (正規確率紙へのプロット)

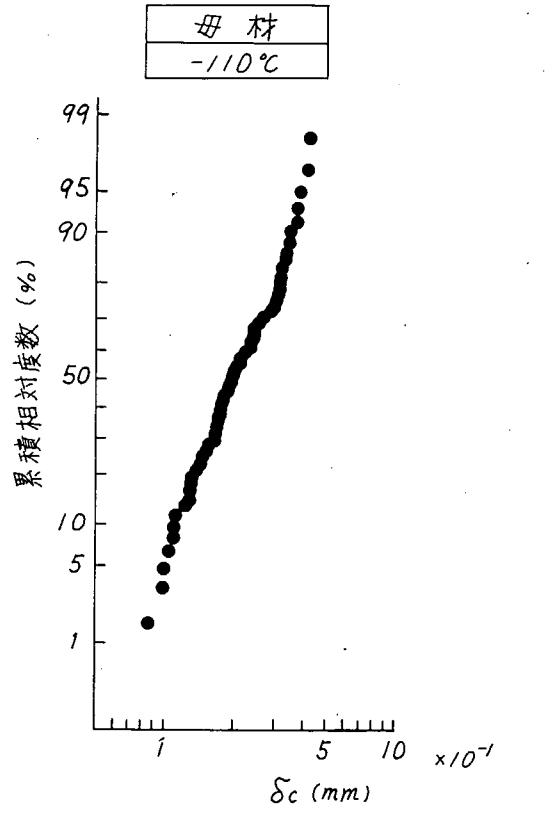


図 4.4.4(e) (対数正規確率紙へのプロット)

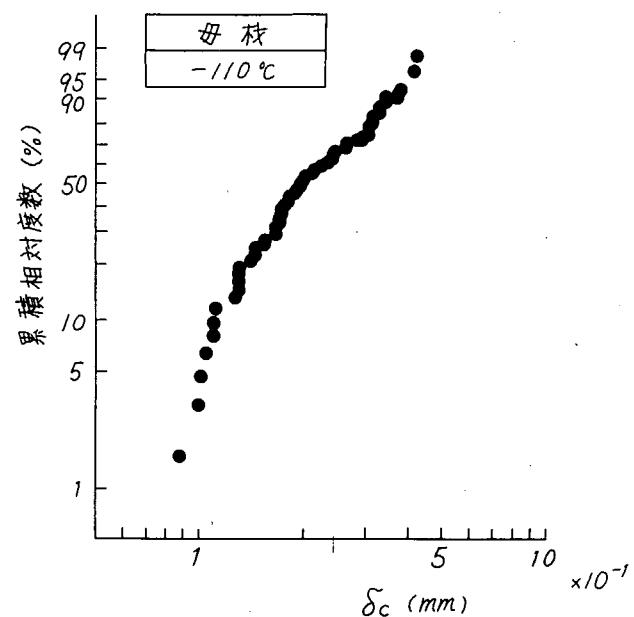


図 4.4.4(f) (Weibull 確率紙へのプロット)

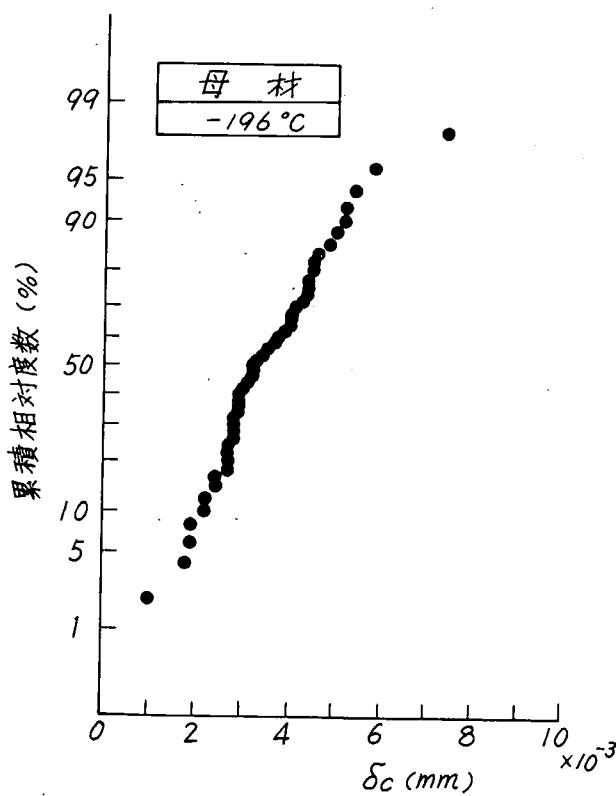


図 4.4.4(g) (正規確率紙へのプロット)

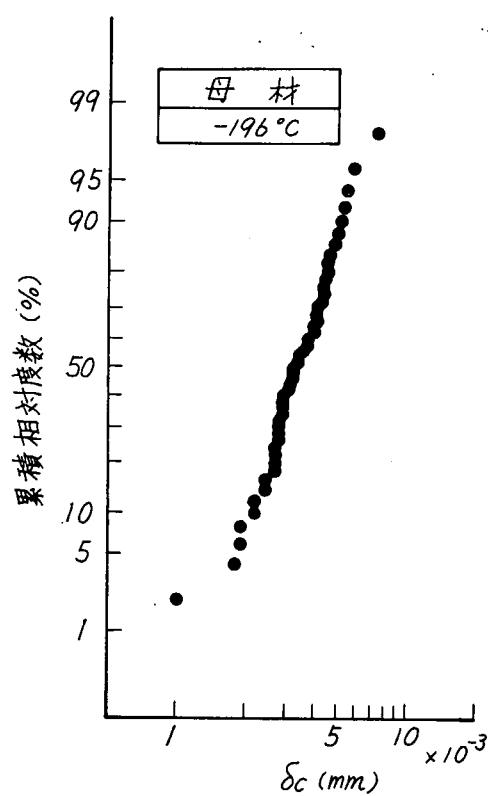


図 4.4.4(h) (対数正規確率紙へのプロット)

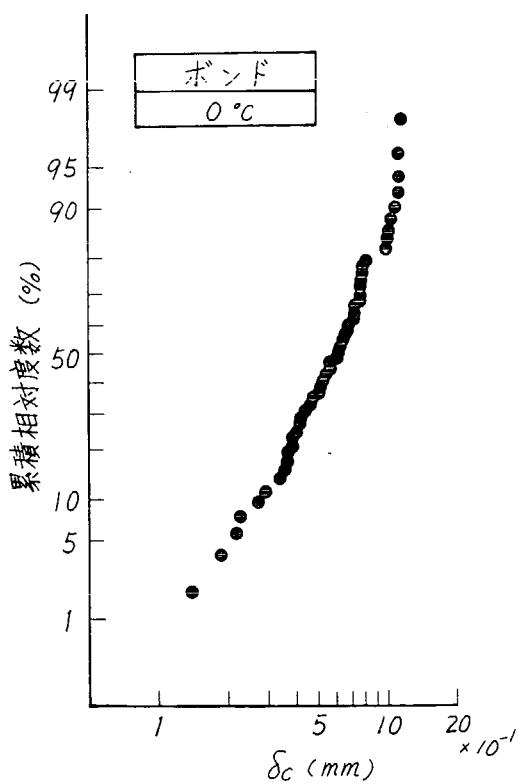
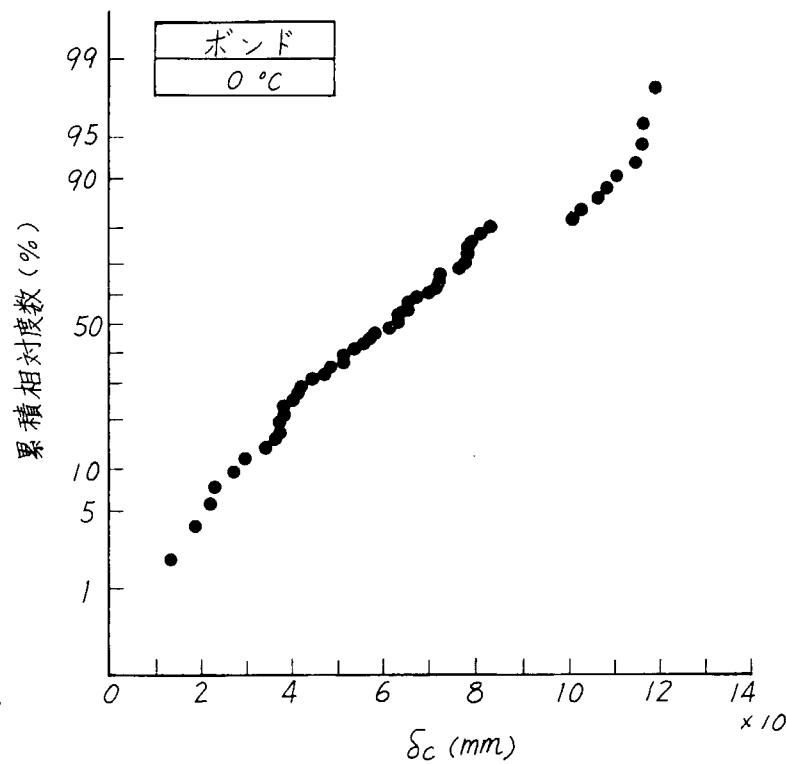
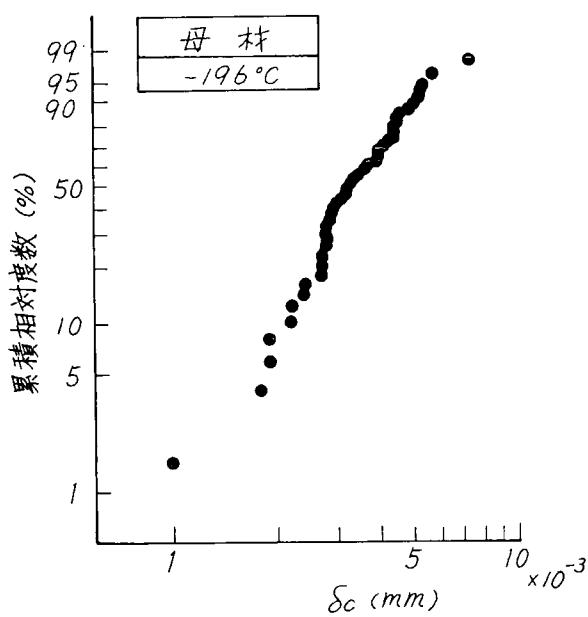
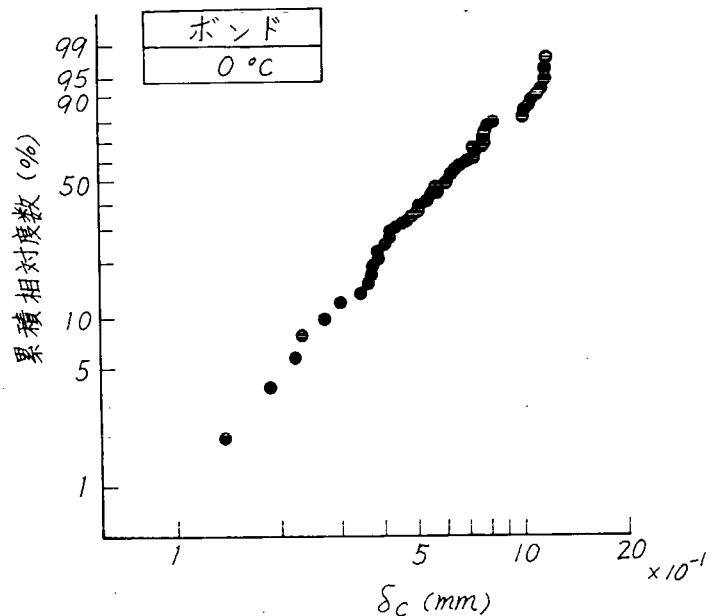
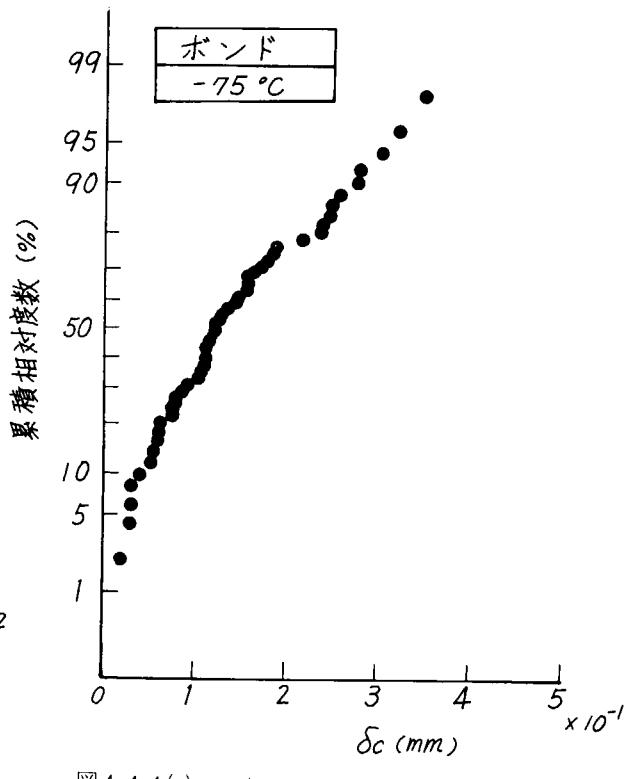
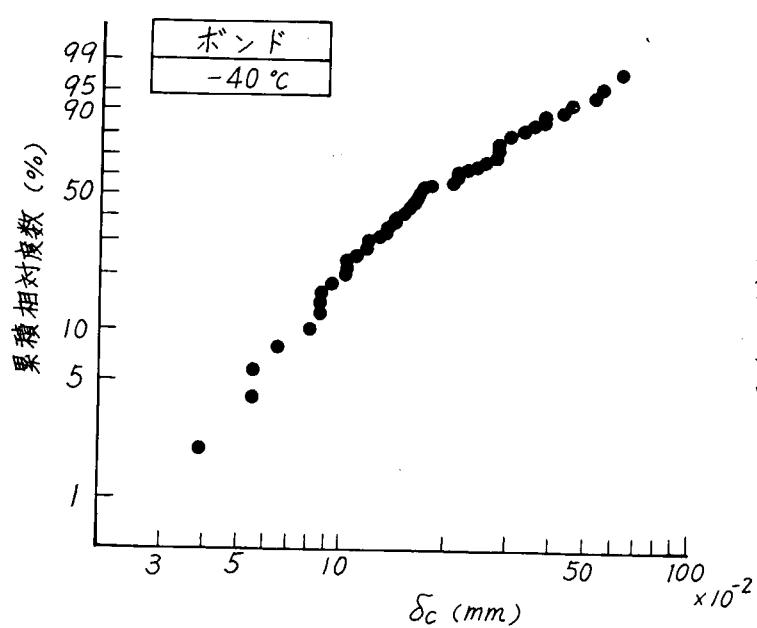
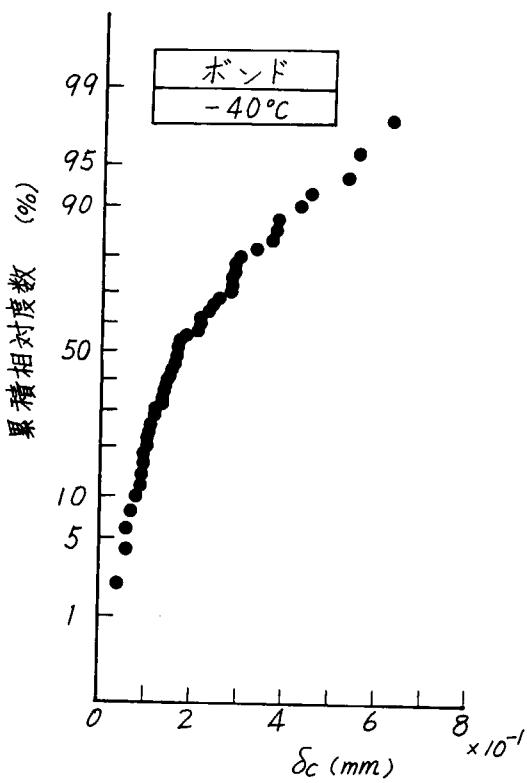
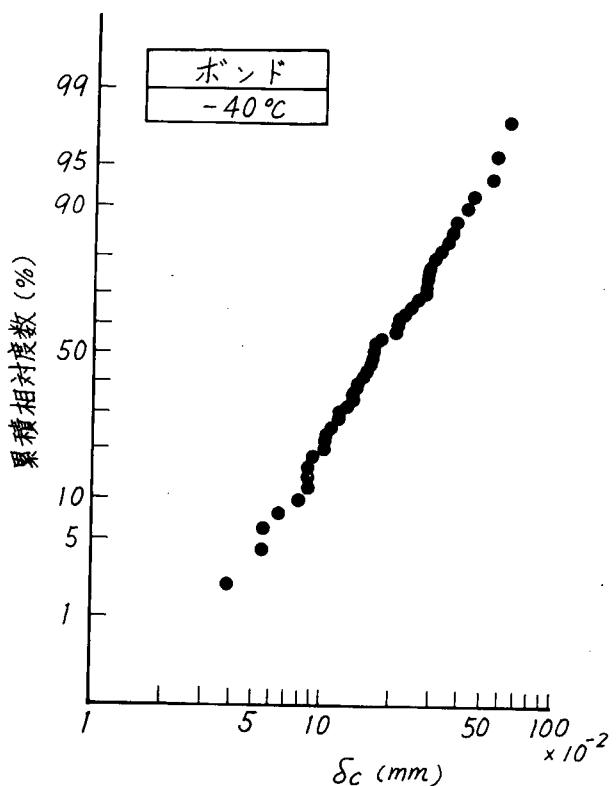


図 4.4.4(k) (対数正規確率紙へのプロット)





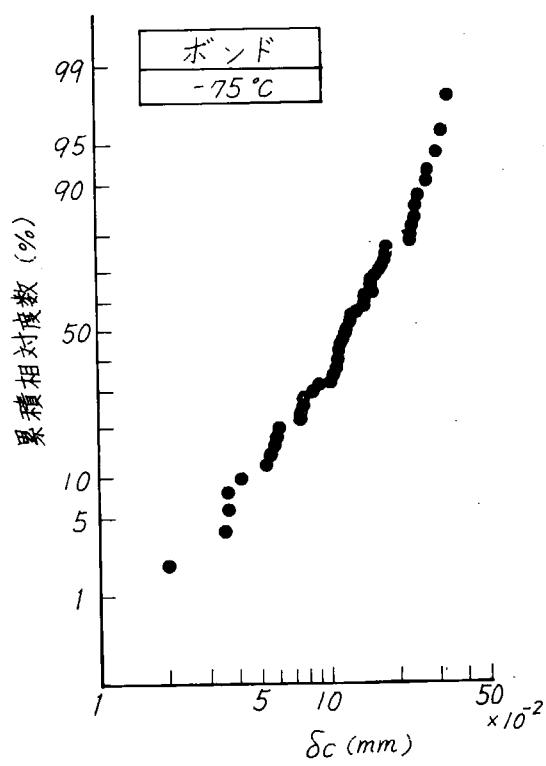


図 4.4.4 (q) (対数正規確率紙へのプロット)

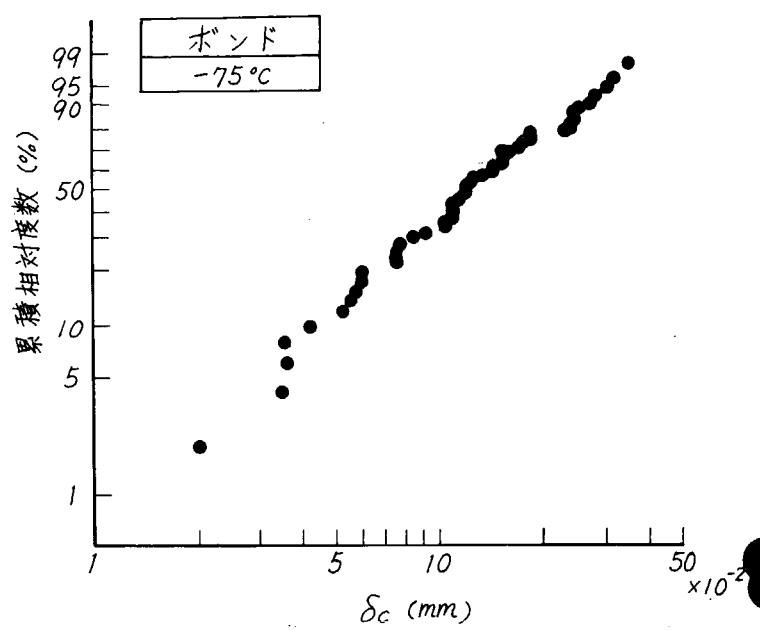


図 4.4.4 (r) (Weibull 確率紙へのプロット)

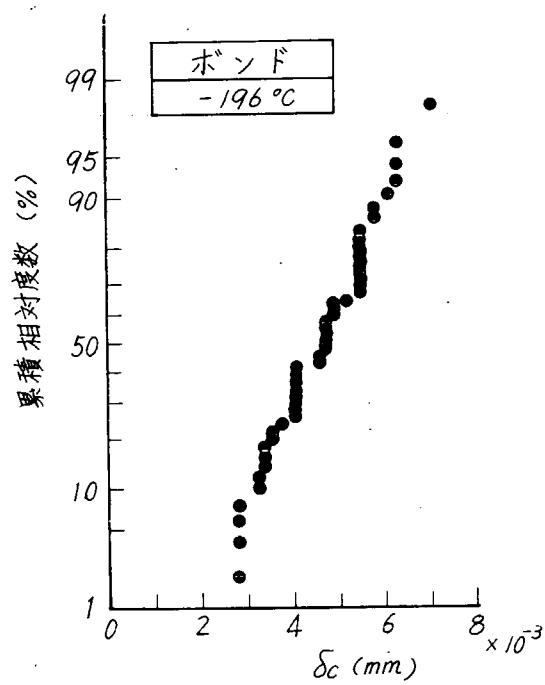


図 4.4.4 (s) (対数正規確率紙へのプロット)

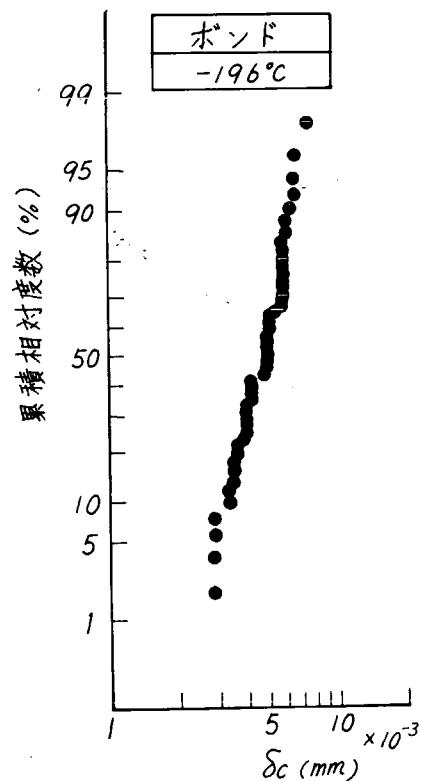
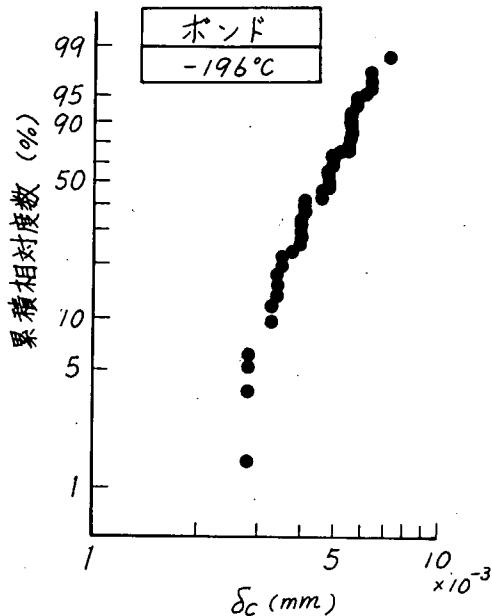


図 4.4.4 (t) (対数正規確率紙へのプロット)

表 4.4.3 Weibull 分布の確率パラメータ



$$f(x) = \frac{m}{\alpha} x^{m-1} \exp(-\frac{x^m}{\alpha})$$

切欠位置	試験温度 (°C)	m	α
母材	-78	4.61	3.88×10^{-3}
	-110	2.40	3.42×10^{-2}
	-196	3.10	3.14×10^{-8}
ボンド	0	2.28	4.73×10^{-1}
	-40	1.54	1.08×10^{-1}
	-75	1.61	5.02×10^{-2}
	-196	4.30	1.39×10^{-10}

図 4.4.4 (u) (Weibull 確率紙へのプロット)

4.5 複數貫通切欠大形引張試験

4.5.1 目的

脆性亀裂伝播停止特性に及ぼす試験片端部剛性、すなわち試験片を囲む系のコンプライアンスの影響を把握するための基礎資料を得るべく、実験的検討を行なうこととした。

なお、当初の計画では、近接切欠きからの破壊発生が、2段破壊から1段破壊へ移行する様相におよぼすコンプライアンスの影響を実験的に調べる方針であった。しかしながら、その場合の試験条件設定の非常な困難さを考え、その前段階として、どの程度コンプライアンスを変化させ得るかを明らかにしておく必要があると考えられたので、標記の研究課題に対する基礎試験として、脆性亀裂伝播停止試験を行ない、コンプライアンスの影響を調べた。

4.5.2 試驗內容

試験片端部剛性を変化させる方法として、試験機と試験片の間に、パイプの輪切り構造をした治具（以後コンプライアンス・ユニットと称す）を配置し、パイプの歪み変形で剛性を低くする、すなわち変位を吸収する方法を採った。製作したコンプライアンス・ユニットの形状・寸法を図4.5.1に示す。

まず、このコンプライアンス・ユニットの基本特性を把握するための試験を行なった。試験機としては800トンテストリグを使用した。

次に、予備試験として、亀裂伝播部幅 500 mm の標準型二重引張試験を実施した。この予備試験では、製作したコンプライアンス・ユニットが正常に機能するかどうかの確認、また、脆性亀裂伝播速度の計測手段として採用した歪ゲージ切断法のチェック、および試験片に作用する荷重の過渡変動計測装置（ウェブメモリーおよびシンクロスコープ）のチェック等をねらいとした。

予備試験によって明らかとなった不具合点の改良を施してから、本試験を実施した。本試験では、亀裂伝播部幅1600mm(板厚15mm)の試験片を用いての大形二重引張試験(温度勾配型)を、コンプライアンス・ユニットを装着して4枚、装着しないで4枚行なった。コンプライアンス・ユニットを装着した場合(C型)と装着しない場合(S型)で、作用応力と設定温度勾配を一致させておき、停止亀裂長さ、亀裂伝播速度、荷重の過渡変化などを計測した。

4.5.3 試験結果および考察

— 滅性亜裂伝播停止特性に及ぼすコンプライアンスの影響に関する検討 —

(1) コンプライアンス・ユニットの基本特性について

コンプライアンス・ユニットの概観写真を写真4.5.1に示す。また、コンプライアンス・ユニットの引張り特性を図4.5.2に示す。コンプライアンス・ユニットは板厚20mmのパイプの4枚重ね構造である。製作時において、各パイプ間の間隔が左右の合計で約3mmあったことやピン接合部での遊びなどのために、低荷重時($P \leq 20\text{ ton}$)での荷重と変位との関係は直線的では無いが、約20ton以上では直線性があり、以下に示すような推定上の荷重～変位関係式(4.5.3)式と良い一致を見せている。

一枚重ねの単独パイプに於ける荷重(P_i)と変位(δ_i)の関係は、次式で与えられる。¹⁾

$$\text{ただし } k_i = \left[0.148 r_i^3 / \left(\frac{\ell t^3}{12} E \right) \right]^{-1}$$

r_i = パイプ半径

t =パイプ厚さ

ℓ = パイプ長さ

E = ヤング率

添字 i は多重パイプの場合に内側からの順番を示すものとする。

(a) 隣接パイプ間のギャップが無い場合

$$\delta_{\alpha_1} = \delta_{\alpha_2} = \delta_{\alpha_3} = \delta_{\alpha_4} (= \delta)$$

より

である。

(b) 隣接パイプ間のギャップが等しく d である場合

この場合には荷重レベルに応じて、内側パイプ 1 枚しか動かない場合、2 枚の場合、3 枚の場合、4 枚の場合に分けて考えることができる。

4枚の場合には、次式のように考えられる。

$$\delta_{o_1} = \delta_{o_2} + d = \delta_{o_3} + 2d = \delta_{o_4} + 3d \quad (= \delta)$$

より

$$P = (k_1 + k_2 + k_3 + k_4) \delta - (k_2 + 2k_3 + 3k_4) d$$

である。

他の場合も同様の考え方により、結局次式が得られる。

$$P = \begin{cases} k_1 \delta, & (0 \leq \delta \leq d) \\ (k_1 + k_2) \delta - k_2 d, & (d < \delta \leq 2d) \\ (k_1 + k_2 + k_3) \delta - (k_2 + 2k_3)d, & (2d < \delta \leq 3d) \\ (k_1 + k_2 + k_3 + k_4) \delta - (k_2 + 2k_3 + 3k_4)d, & (3d < \delta) \end{cases} \dots \dots (4.5.3)$$

数値例として、 $r_1 = 250\text{mm}$ 、 $t = 20\text{mm}$ 、 $\ell = 1200\text{mm}$ 、 $d = 3.2\text{mm}$ を与えた場合を図4.5.2中に破線で示した。

コンプライアンス・ユニットの引張り試験は約10回の負荷・除荷を繰り返したが、図4.5.2から判断できるように、負荷300tonに対しても全体の変形挙動はほぼ弾性的であった。また、本ユニットの自重は約4.8tonであり、その振動特性については次項(2)での二重引張試験で調べた亜裂停止後のパネ系振動との関連で触れることがある。

(2) 予備試験（標準型二重引張試験）の結果と考察

KD32鋼板(板厚25.4mm)を供試して、母材の標準型二重引張試験を行なった。コンプライアンス・ユニットを装着した場合(P C型)および装着しない場合(P S型)のピン間部材(試験片、コンプライアンス・ユニット、タブ板)配置図を、図4.5.3に示す。同図中には、亀裂伝播速度計測用の歪ゲージ(TRIGおよびR₁～R₉)の貼付位置と、荷重変化計測用歪ゲージ(A₁、A₂)の貼付位置も記してある。また、これらの計測要領については、図4.5.4に示す。

予備試験結果の一覧を表4.5.1に掲げる。P C型とP S型試験片で、グロス応力(σ_g)が合っているものについては、図4.5.5に示すように、温度勾配もほぼ一致するように揃えて試験した。ただし、P S-4試験片については、温度平坦型試験としたので揃っていない。表4.5.1からは、例えば停止亀裂長さ(C_a)については殆ど有意な差は認められない。しかし、荷重の過渡変化については若干の系統的な差があるようと思われる。すなわち(推定)亀裂停止時の荷重値は、歪ゲージから読みとった値では、コンプライアンス・ユニットを装着しない方が幾分高いが、油圧からの指示計の読みでは、コンプライアンス・ユニットを装着して試験したものの方が荷重低下は少ない傾向を示している。歪ゲージが亀裂に近すぎて極く局部の変化を検出している可能性があること、油圧指示計の応答性に問題があることなどがこの相反の原因であろう。歪ゲージからの荷重の過渡変化を図4.5.6に示す。

荷重変化計測用の歪ゲージは、亀裂経路から 600 mm 離れた位置に貼付していた(図 4.5.3)が、荷重変化計測値にはこれに起因すると思われる時間遅れが記録されている。すなわち、鋼材中の縦波伝播速度 C はおよそ

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$\Rightarrow \sqrt{\frac{(21000 \times 10^3) \times (9.8 \times 10^3)}{(7.8 \times 10^{-8})}} = 5.2 \times 10^3 \text{ (m/sec)} \dots\dots\dots (4.5.4)$$

であるから、時間遅れ(Δt)は、次式で概算される。

この値は実測された値(図4.5.6)に比較的近い。試験片PS-4については、ゲージ位置を他のものの2倍、すなわち1200mmの位置に貼付したが、実測値もほぼ2倍の時間遅れを示している。

図4.5.7には亀裂進展に伴なう荷重変化の様子を示したが、上記のように検出ゲージが感知する迄の時間遅れがあるのでこれを修正したものも併記している。また、図4.5.8には、歪ゲージ切断による亀裂通過の計測結果を示した。この結果から、伝播速度として $700\sim 1500\text{ m/sec}$ が読みとれる。

脆性亀裂停止後、荷重が振動する様子を写真4.5.2に掲げた。コンプライアンス・ユニットを装着して試験した場合には、試験片や試験機およびコンプライアンス・ユニットを含む全体のバネ系の振動の具合によって、初期荷重時よりも大きな負荷状態が現われることが観察された。また、振動周波数については、応力波の伝播によると思われる高次振動が重複して解読が困難であるが、バネ系としての振動特性が写真4.5.2中の低次振動（例えば、写真に於ける極小値包絡線）として表わされていると解釈すれば、次のようになる。すなわち、コンプライアンス・ユニットが装着された試験の場合には、極小値包絡線の周期はおよそ $2 \times 4200 \mu\text{sec}$ 、すなわち約120Hzであるのに對し、コンプライアンス・ユニットが装着されて無い場合は、およそ $2 \times 1500 \mu\text{sec}$ 、つまり約330Hzであった。

この予備試験の実施によって次の点が明らかとなった。

- 1) 応力の伝達に要する時間、例えば亀裂のある位置からコンプライアンス・ユニット迄の所要時間と、脆性亀裂が伝播している時間（表 4.5.1 の右端欄に推定値を示す）とを比較した場合、前者は $300 \sim 400 \mu\text{sec}$ であろうと推定され、後者の値と同等か若干大きい程度になっている。すなわち、コンプライアンス・ユニットが脆性亀裂の伝播過程に影響を及ぼし得ないということになる。実測データ上で多少なりとも差異が表されているのは、脆性亀裂が低速化し更に延性亀裂化（亀裂停止点近辺の破面は 45 度剪断タイプである）して時間を稼いでいるうちに、コンプライアンス・ユニットまで応力波が到達するようになり、その影響が微かではあるが入り込んだものと思われる。なお、表 4.5.1 中の停止亀裂長さは、脆性破面部分のみをとっている。

2) 計測装置類は、大旨望みどおりの性能を発揮し得ることがわかったが、亀裂速度計測用の歪ゲージの貼付位置については必ずしも等間隔でなく、停止点付近を密にした方が計測上有効であることなど、2.3 の改良すべき点が認められた。

このような点についての改善を計った上で次項で述べる本試験を実施した。

- ### 3) 本試験（大形二重引張試験）の結果と考察

予備試験の結果から、試験片とコンプライアンス・ユニットの距離を近づけた方が良いこと、加えて脆亀裂伝播時間を長くすること、すなわち亀裂伝播距離を長くする必要があること、などが明らかになった。この両方の要請に答えるものとして、図 4.5.9 に示すような大形二重引張試験片を製作・供試することにした。試験片は亀裂伝播部幅 1600 mm (板厚 15 mm) とし、コンプライアンス・ユニットと可能な限り接近させた。

また、荷重計測用の歪ゲージも局部応力による擾乱を避けるため（貼付位置までの応力伝達時間は、予備試験によってほぼ評価可能であることが判明しているので）、ピン孔周辺部に貼付することとした。コンプライアンス・ユニットを介して試験片と反対側のタブ板中央部にも、追加の荷重計測用歪ゲージを添えた。

試験片は、一般船体用軟鋼 LAS 鋼板を用いて製作した。この供試鋼板の化学成分ならびに機械的性質を表 4.5.2 に記す。また V - ノッチシャルピー衝撃試験結果を図 4.5.10 に示す。

実施した大形二重引張試験は、コンプライアンス・ユニットを装着したもの（O型）4枚、装着しないもの（S型）4枚である。試験時の概観を写真 4.5.3 に示す。試験結果の一覧を表 4.5.3 に記す。O型と S型でクロス応力が対応するものについては、試験片の温度勾配もほぼ同一になる様にした（図 4.5.11）。しかし、試験片符号 O-4だけは、亀裂は試験片の中心線上を伝播せずに、中心線から約 60 mm 離れた位置で停止したので、この径路に沿っての温度勾配を記してある。

表 4.5.3 中の停止亀裂長さの結果をみると、明らかに O型の方が S型よりも長いことが認められる。また図 4.5.12 では、亀裂速度を計るために貼付した歪ゲージの切断時刻を記す。このデータを基にして計算した亀裂速度を、図 4.5.13 (a) および (b) に示す。亀裂伝播速度の平均値としては 550~600 m/sec が得られるが、これは予備試験結果に比較して若干遅い。試験片板厚の違いや設定温度勾配の違いが原因であろうが、詳細は明らかでない。また図 4.5.13 から、コンプライアンス・ユニットを装着した試験の方が伝播速度は安全していることがわかる。

亀裂発生後の経過時間に対する荷重変化の様子を、図 4.5.14 に示す。予備試験でも認められた様に、歪ゲージ貼付位置に応力波が達する迄の時間遅れ (Δt) が観察できる ($\Delta t \approx 450 \mu\text{sec}$ (O型)、 $550 \mu\text{sec}$ (S型))。また、(推定) 亀裂停止時の荷重については、図 4.5.14 (および表 4.5.3) から、コンプライアンス・ユニットを装着した場合の方が、最初は殆んど差異が無いにもかかわらず亀裂停止に近づくにつれて大きな低下を示していることがわかる。しかし、図 4.5.15 に示すように、横軸に亀裂長さをとって表わした場合には、コンプライアンス・ユニットを装着した場合の方が装着しない場合に比較して、亀裂長さの短かい領域では荷重低下の少ない傾向にあり、亀裂が長くなるにつれて、つまり停止亀裂長さ近くになると、逆に大きな荷重低下を示すことがわかる。この結果は、先の予備試験では、歪ゲージ貼付位置が適切でなかったために全体としての真の荷重変化を計測できていなかったことを示すものであろう。

荷重変化計測用に貼付しておいた歪ゲージのうち、コンプライアンス・ユニットに対して試験片と反対側のもの（計測点 B）の計測結果を、図 4.5.16 に示す。この図から、脆性亀裂の伝播停止時（図 4.5.14 より、亀裂発生後 $1600 \sim 2000 \mu\text{sec}$ ）には、未だ計測点 B まで応力波が伝わっていないことがわかる。しかしながら、(4.5.4) 式で示される縦波伝播速度を考えると、一様に連続した鋼板ならば、亀裂の伝播停止時までに応力波は $8 \sim 10 \text{ m}$ は伝播している筈であり、当然コンプライアンス・ユニットのうち近い方のパイプ位置までは到達していて、その影響が亀裂伝播部に跳ね返っているものと考えられる。すなわち、コンプライアンス・ユニットの影響としては、その特性が脆性亀裂伝播過程に完全に織り込まれた試験が行なえたわけでは無いが、確かにコンプライアンス・ユニットの影響が入った試験を実施し得たと判断できるわけである。

図 4.5.17 には、表 4.5.3 中に示した K_c 値と亀裂停止位置での温度の関係を示した。すなわち、初期設定荷重と停止亀裂長さとを用いた整理では、図中の実線の如く殆んど差が無いものが、亀裂停止時の荷重と停止亀裂長さを用いて整理すれば（図中の破線）、コンプライアンス・ユニットを装着したものと装着しなかったものとに分離できることが確認された。ただ、この図 4.5.17 中の 2 本の破線の上下関係については、試験が温度勾配型で実施されているので、亀裂が停止する迄の遭遇温度が刻々変化しており、必ずしも停止位置の温度で表現することの必然性が有るわけではないので、特に強調すべき事柄ではないと考えられる。しかし、先に述べた様に、停止亀裂長さがコンプライアンス・ユニットを装着した場合に長くなることは、注目しておくべき結果であ

る。これは、静的問題として考えるならば、コンプライアンス・ユニットを装着して変位を吸収させておくということは、より多くのエネルギーを貯えた上で脆性亀裂の発生に臨むということである。従って、既述の如く、脆性亀裂伝播現象が極めて瞬間に完結してしまい、十分に貯えたエネルギーを放出する時間的余裕が与えられない場合でも、如何程かの放出はあるわけであり、その量はエネルギーの貯えをしない場合よりも少なくなることは無いものと考えられる。つまり、温度勾配や初期荷重を同一に保てば、停止亀裂長さは長くなるのである。この点については、亀裂発生時に発せられる音がコンプライアンス・ユニットを装着した場合は装着しない場合に比べてかなり大きく感ぜられること、および写真 4.5.4 に示すように、試験終了後の試験片の開口量が、コンプライアンス・ユニットを装着した場合の方が相当大きくなること（もっともこれは亀裂停止後のバネ系としての振動挙動も加味されたものではあるが）、などともよく符合するものである。

4.5.4 まとめ

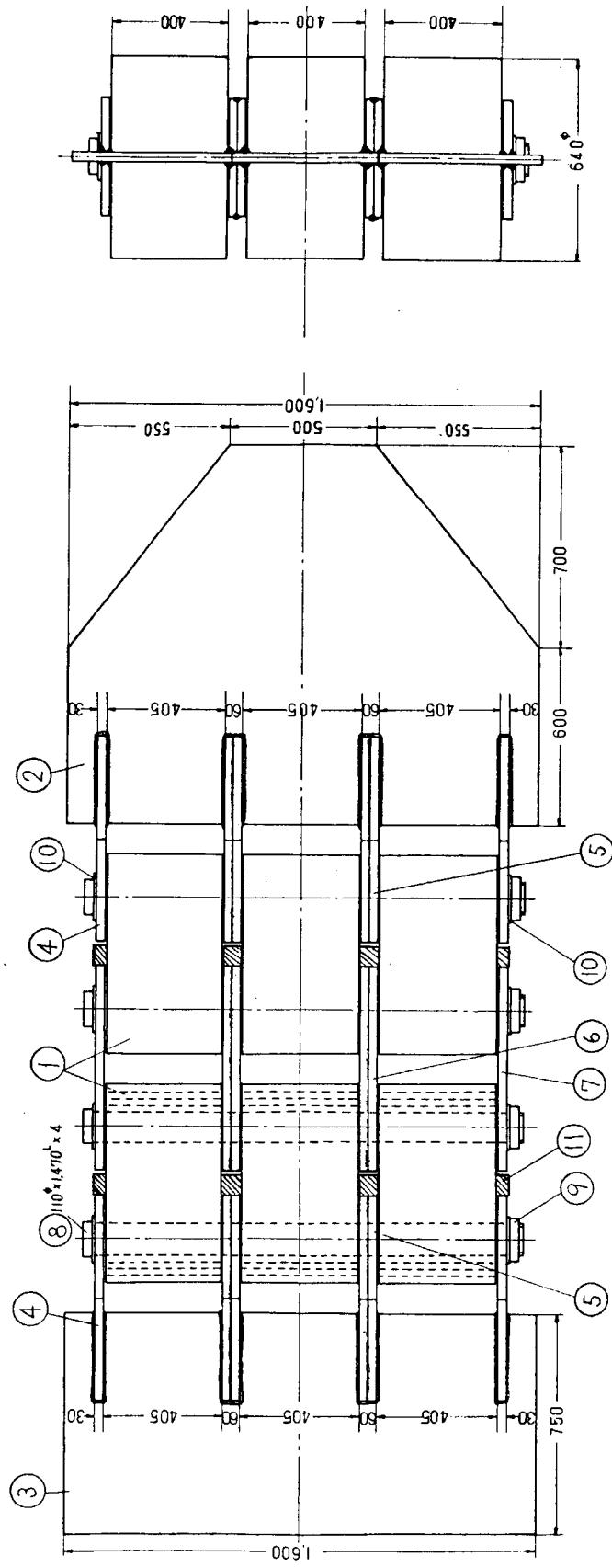
パイプの歪み変形で変位を吸収する（剛性を下げる）治具（コンプライアンス・ユニット）を製作し、この治具を用いて試験片の端部剛性を変え、温度勾配型大形二重引張試験（亀裂伝播部幅 1600 mm）を実施した。その結果次の点が明らかになった。

- 1) コンプライアンス・ユニットを装着した試験では、装着しない試験に比べて、温度勾配や設定応力を合わせておいた場合、停止亀裂長さが長大化する。
- 2) コンプライアンス・ユニットを装着した試験では、伝播中の脆性亀裂の速度がより安定的に一定値を示す傾向が認められる。
- 3) コンプライアンス・ユニットを装着した試験では、亀裂伝播長さが短かい範囲では、装着しない場合に比べて荷重低下は少ない。しかし、亀裂停止時の荷重は、コンプライアンス・ユニットを装着した場合の方が低い値を示すようである。

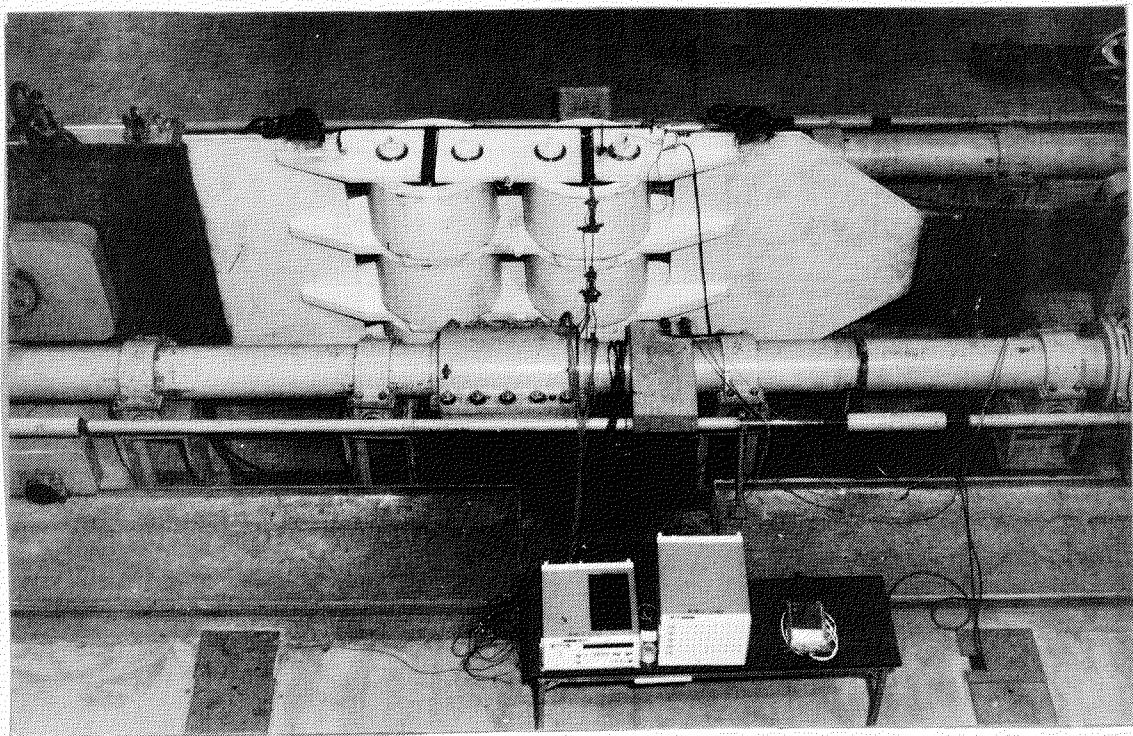
本試験によって明らかとなった主な点は以上である。今後の問題として、実船殻構造では一体どの程度の剛性があるのか、言い換れば、亀裂を用む周辺部材がどれくらいエネルギーを貯えた上で脆性亀裂の発生が起こるものか、あるいは脆性亀裂が発生する場合、それに供給されるエネルギーはどれくらいの範囲から提供されるのか、などを検討する必要がある。この場合、本試験結果が示唆するように、脆性亀裂の伝播現象は極めて瞬間に完結するので、必ずしも貯えられたエネルギー全部が亀裂伝播現象に影響を与えるものでは無いことに留意すべきであろう。なお、これらの問題点の解明のため今後も研究を継続してゆく所存である。

参考文献

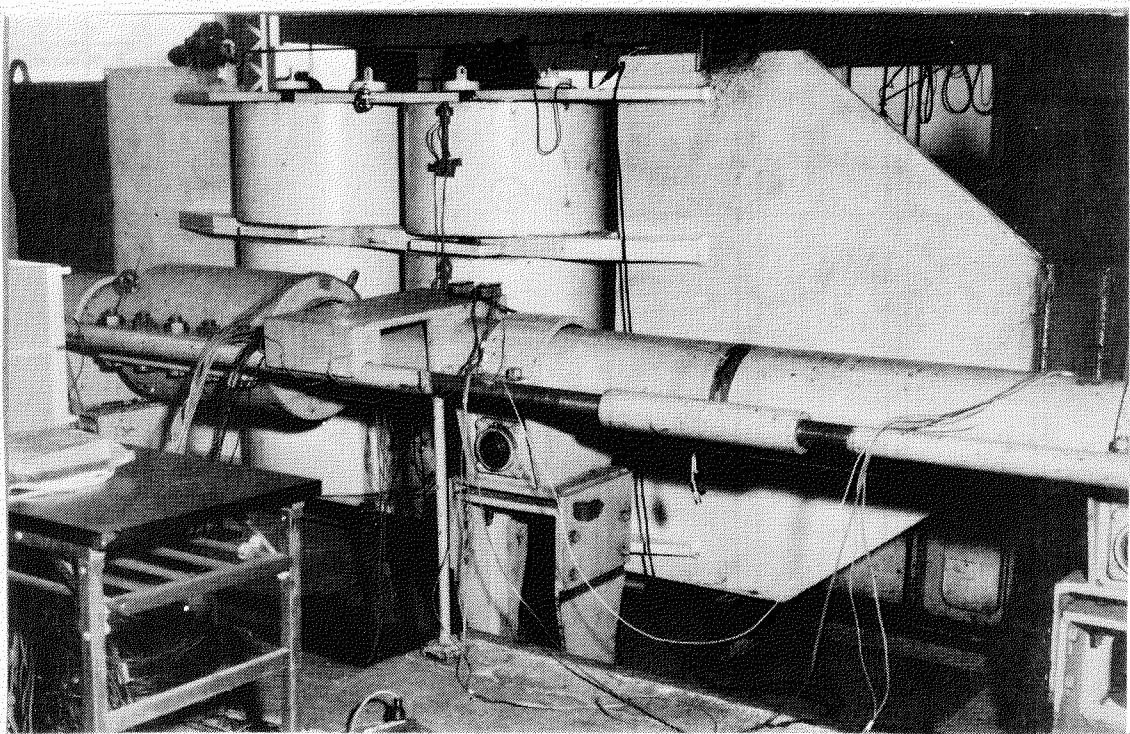
- 1) たとえば、吉織雅夫、金沢武、『材料力学明解』 215頁、養賢堂出版



11	横臂ブーム	8	-
10	座金	SS-	8
9	ナット	SS-	4
8	締付ビン	SE55	4 440
6.7	中間脚子板	K320	4 310
4.5	脚子板	K320	8 660
P3	本体	K32 D	2 700
1	4重管	METRA 6 2700	1
		PA1	1
		DISC 1	1
		DISC 2	1
		DISC 3	1
		DISC 4	1
		DISC 5	1
		DISC 6	1
		DISC 7	1
		DISC 8	1
		DISC 9	1
		DISC 10	1
		DISC 11	1
		DISC 12	1
		DISC 13	1
		DISC 14	1
		DISC 15	1
		DISC 16	1
		DISC 17	1
		DISC 18	1
		DISC 19	1
		DISC 20	1
		DISC 21	1
		DISC 22	1
		DISC 23	1
		DISC 24	1
		DISC 25	1
		DISC 26	1
		DISC 27	1
		DISC 28	1
		DISC 29	1
		DISC 30	1
		DISC 31	1
		DISC 32	1
		DISC 33	1
		DISC 34	1
		DISC 35	1
		DISC 36	1
		DISC 37	1
		DISC 38	1
		DISC 39	1
		DISC 40	1
		DISC 41	1
		DISC 42	1
		DISC 43	1
		DISC 44	1
		DISC 45	1
		DISC 46	1
		DISC 47	1
		DISC 48	1
		DISC 49	1
		DISC 50	1
		DISC 51	1
		DISC 52	1
		DISC 53	1
		DISC 54	1
		DISC 55	1
		DISC 56	1
		DISC 57	1
		DISC 58	1
		DISC 59	1
		DISC 60	1
		DISC 61	1
		DISC 62	1
		DISC 63	1
		DISC 64	1
		DISC 65	1
		DISC 66	1
		DISC 67	1
		DISC 68	1
		DISC 69	1
		DISC 70	1
		DISC 71	1
		DISC 72	1
		DISC 73	1
		DISC 74	1
		DISC 75	1
		DISC 76	1
		DISC 77	1
		DISC 78	1
		DISC 79	1
		DISC 80	1
		DISC 81	1
		DISC 82	1
		DISC 83	1
		DISC 84	1
		DISC 85	1
		DISC 86	1
		DISC 87	1
		DISC 88	1
		DISC 89	1
		DISC 90	1
		DISC 91	1
		DISC 92	1
		DISC 93	1
		DISC 94	1
		DISC 95	1
		DISC 96	1
		DISC 97	1
		DISC 98	1
		DISC 99	1
		DISC 100	1
		DISC 101	1
		DISC 102	1
		DISC 103	1
		DISC 104	1
		DISC 105	1
		DISC 106	1
		DISC 107	1
		DISC 108	1
		DISC 109	1
		DISC 110	1
		DISC 111	1
		DISC 112	1
		DISC 113	1
		DISC 114	1
		DISC 115	1
		DISC 116	1
		DISC 117	1
		DISC 118	1
		DISC 119	1
		DISC 120	1
		DISC 121	1
		DISC 122	1
		DISC 123	1
		DISC 124	1
		DISC 125	1
		DISC 126	1
		DISC 127	1
		DISC 128	1
		DISC 129	1
		DISC 130	1
		DISC 131	1
		DISC 132	1
		DISC 133	1
		DISC 134	1
		DISC 135	1
		DISC 136	1
		DISC 137	1
		DISC 138	1
		DISC 139	1
		DISC 140	1
		DISC 141	1
		DISC 142	1
		DISC 143	1
		DISC 144	1
		DISC 145	1
		DISC 146	1
		DISC 147	1
		DISC 148	1
		DISC 149	1
		DISC 150	1
		DISC 151	1
		DISC 152	1
		DISC 153	1
		DISC 154	1
		DISC 155	1
		DISC 156	1
		DISC 157	1
		DISC 158	1
		DISC 159	1
		DISC 160	1
		DISC 161	1
		DISC 162	1
		DISC 163	1
		DISC 164	1
		DISC 165	1
		DISC 166	1
		DISC 167	1
		DISC 168	1
		DISC 169	1
		DISC 170	1
		DISC 171	1
		DISC 172	1
		DISC 173	1
		DISC 174	1
		DISC 175	1
		DISC 176	1
		DISC 177	1
		DISC 178	1
		DISC 179	1
		DISC 180	1
		DISC 181	1
		DISC 182	1
		DISC 183	1
		DISC 184	1
		DISC 185	1
		DISC 186	1
		DISC 187	1
		DISC 188	1
		DISC 189	1
		DISC 190	1
		DISC 191	1
		DISC 192	1
		DISC 193	1
		DISC 194	1
		DISC 195	1
		DISC 196	1
		DISC 197	1
		DISC 198	1
		DISC 199	1
		DISC 200	1
		DISC 201	1
		DISC 202	1
		DISC 203	1
		DISC 204	1
		DISC 205	1
		DISC 206	1
		DISC 207	1
		DISC 208	1
		DISC 209	1
		DISC 210	1
		DISC 211	1
		DISC 212	1
		DISC 213	1
		DISC 214	1
		DISC 215	1
		DISC 216	1
		DISC 217	1
		DISC 218	1
		DISC 219	1
		DISC 220	1
		DISC 221	1
		DISC 222	1
		DISC 223	1
		DISC 224	1
		DISC 225	1
		DISC 226	1
		DISC 227	1
		DISC 228	1
		DISC 229	1
		DISC 230	1
		DISC 231	1
		DISC 232	1
		DISC 233	1
		DISC 234	1
		DISC 235	1
		DISC 236	1
		DISC 237	1
		DISC 238	1
		DISC 239	1
		DISC 240	1
		DISC 241	1
		DISC 242	1
		DISC 243	1
		DISC 244	1
		DISC 245	1
		DISC 246	1
		DISC 247	1
		DISC 248	1
		DISC 249	1
		DISC 250	1
		DISC 251	1
		DISC 252	1
		DISC 253	1
		DISC 254	1
		DISC 255	1
		DISC 256	1
		DISC 257	1
		DISC 258	1
		DISC 259	1
		DISC 260	1
		DISC 261	1
		DISC 262	1
		DISC 263	1
		DISC 264	1
		DISC 265	1
		DISC 266	1
		DISC 267	1
		DISC 268	1
		DISC 269	1
		DISC 270	1
		DISC 271	1
		DISC 272	1
		DISC 273	1
		DISC 274	1
		DISC 275	1
		DISC 276	1
		DISC 277	1
		DISC 278	1
		DISC 279	1
		DISC 280	1
		DISC 281	1
		DISC 282	1
		DISC 283	1
		DISC 284	1
		DISC 285	1
		DISC 286	1
		DISC 287	1
		DISC 288	1
		DISC 289	1
		DISC 290	1
		DISC 291	1
		DISC 292	1
		DISC 293	1
		DISC 294	1
		DISC 295	1
		DISC 296	1
		DISC 297	1
		DISC 298	1
		DISC 299	1
		DISC 300	1
		DISC 301	1
		DISC 302	1
		DISC 303	1
		DISC 304	1
		DISC 305	1
		DISC 306	1
		DISC 307	1
		DISC 308	1
		DISC 309	1
		DISC 310	1
		DISC 311	1
		DISC 312	1
		DISC 313	1
		DISC 314	1
		DISC 315	1
		DISC 316	1
		DISC 317	1
		DISC 318	1
		DISC 319	1
		DISC 320	1
		DISC 321	1
		DISC 322	1
		DISC 323	1
		DISC 324	1
		DISC 325	1
		DISC 326	1
		DISC 327	1
		DISC 328	1
		DISC 329	1
		DISC 330	1
		DISC 331	1
		DISC 332	1
		DISC 333	1
		DISC 334	1
		DISC 335	1
		DISC 336	1
		DISC 337	1
		DISC 338	1
		DISC 339	1
		DISC 340	1
		DISC 341	1
		DISC 342	1
		DISC 343	1
		DISC 344	1
		DISC 345	1
		DISC 346	1
		DISC 347	1
		DISC 348	1
		DISC 349	1
		DISC 350	1
		DISC 351	1
		DISC 352	1
		DISC 353	1
		DISC 354	1
		DISC 355	1
		DISC 356	1
		DISC 357	1
		DISC 358	1
		DISC 359	1
		DISC 360	1
		DISC 361	1
		DISC 362	1
		DISC 363	1
		DISC 364	1
		DISC 365	1
		DISC 366	1
		DISC 367	1
		DISC 368</	



(a) コンプライアンス・ユニット装着時の状況



(b) コンプライアンス・ユニットの概観

写真 4.5.1 コンプライアンス・ユニットの引張試験時概観

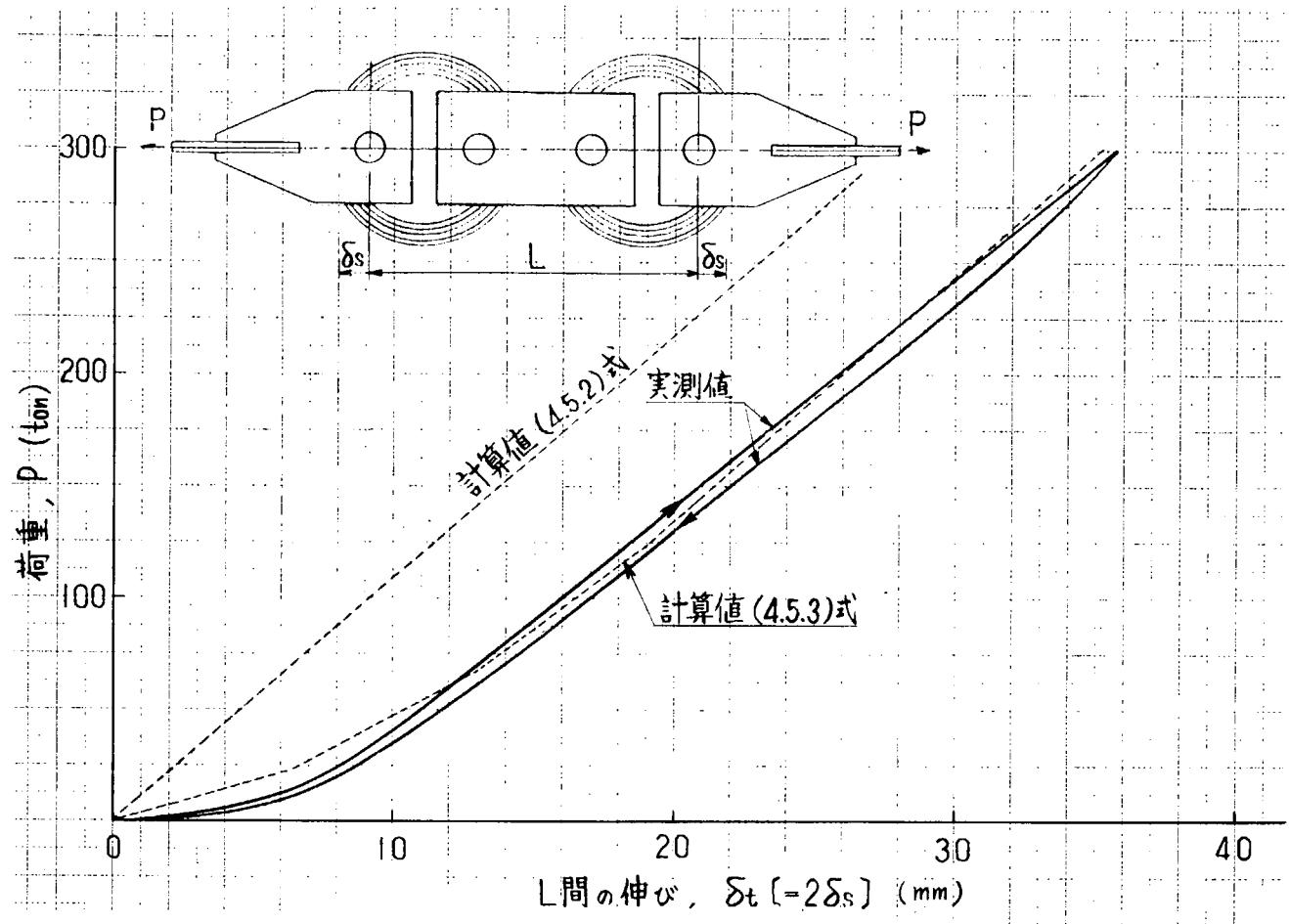


図 4.5.2 コンプライアンス・ユニットの引張り特性（荷重～伸び線図）

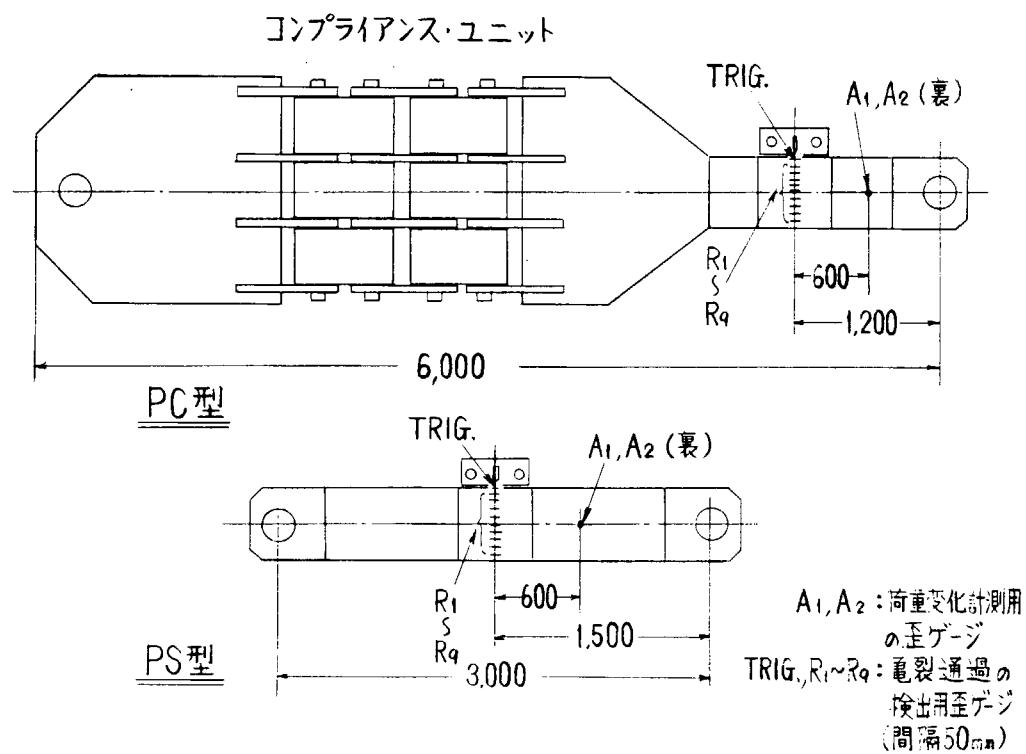


図 4.5.3 標準型二重引張試験（予備試験）でのピン間部材配置

脆性亀裂伝播
速度計測法
(ゲージ切断法)

荷重変化計測法

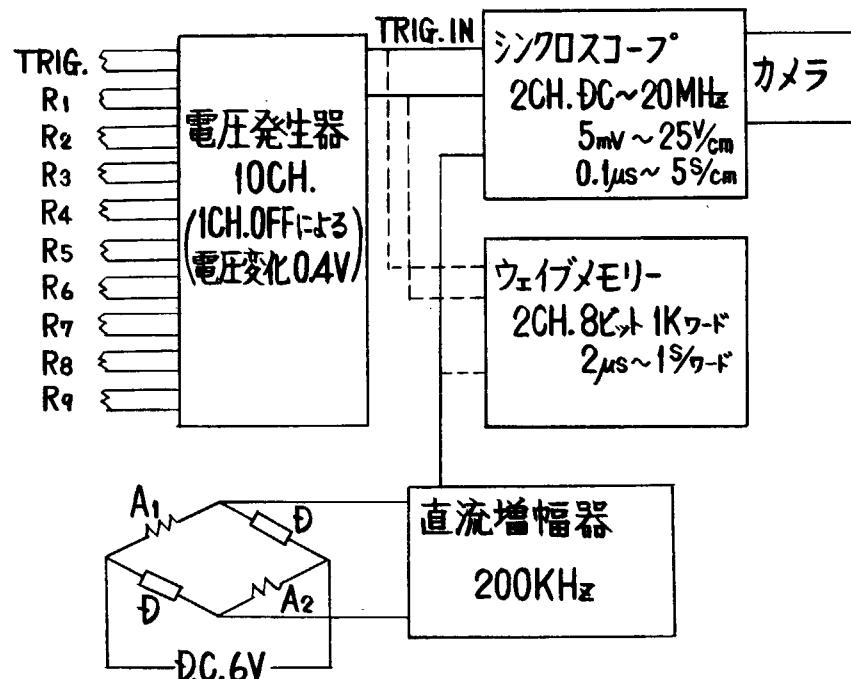


図 4.5.4 脆性亀裂伝播速度および脆性亀裂進展による荷重変化の計測要領(予備試験)

表 4.5.1 標準型二重引張試験(予備試験)結果一覧

鋼種	板厚 t (mm)	試験片幅 B (mm)	試験片間距離 L (mm)	試験片 符号	グロス応力 σ_g (kg/mm ²)	停止亀裂長 C _a (mm)	亀裂/停止温度 T (°C)	重裂/停止温度 T_k (°K ⁻¹)	K_c (kg/mm ²)	C_a B	荷重変化		
											(*3), (*4) 初期荷重 P_0 (ton)	(*3), (*4) 停止荷重 P_0 (ton)	(*3), (*4) 停止時間 (μsec)
KD32 ^{(*)1}	25.4	500	6,000 引張り エンド使用	PC-1	15	310	-1	3.68	576	0.62	191	95 (102)	(220)
				PC-2	20	301	6	3.58	744	0.60	254	108 (148)	(220)
				PC-3	10	—	—	—	—	—	127	—	—
				PC-4	10	318	-10	3.80	394	0.64	127	90 (62)	(260)
	3,000		PS-1 PS-2 PS-3 PS-4	PS-1	15	300	-3	3.70	557	0.60	191	76 (115)	(180)
				PS-2	20	292	4	3.61	664	0.58	254	83 (190)	(200)
				PS-3	10	320	-8	3.77	397	0.64	127	46 (62)	(260)
				PS-4	15	破断	>-30	<-4.12	—	—	191	0 (>400)	

(*)1 : SR147 研究部会 昭和49年度供試材(残材を使用)

$$(*2) : K_c = \sigma_g \cdot f \left(\frac{C_a}{B} \right) / \pi C_a, f \left(\frac{C_a}{B} \right) = \sqrt{\frac{2B}{\pi C_a}} \tan \frac{\pi C_a}{2B}$$

(*)3 : 停止荷重 P_0 は、伝播停止1~2秒後の荷重指示計(油圧からの指示)読みの極小値を示したもの。
荷重は極小値を示した後に漸次上昇を始める。

(*)4 : (*)内値は、ひずみゲージから読み取った極小値(荷重低下の最初の値)、およびその状態に至る迄の脆性
亀裂伝播時間。

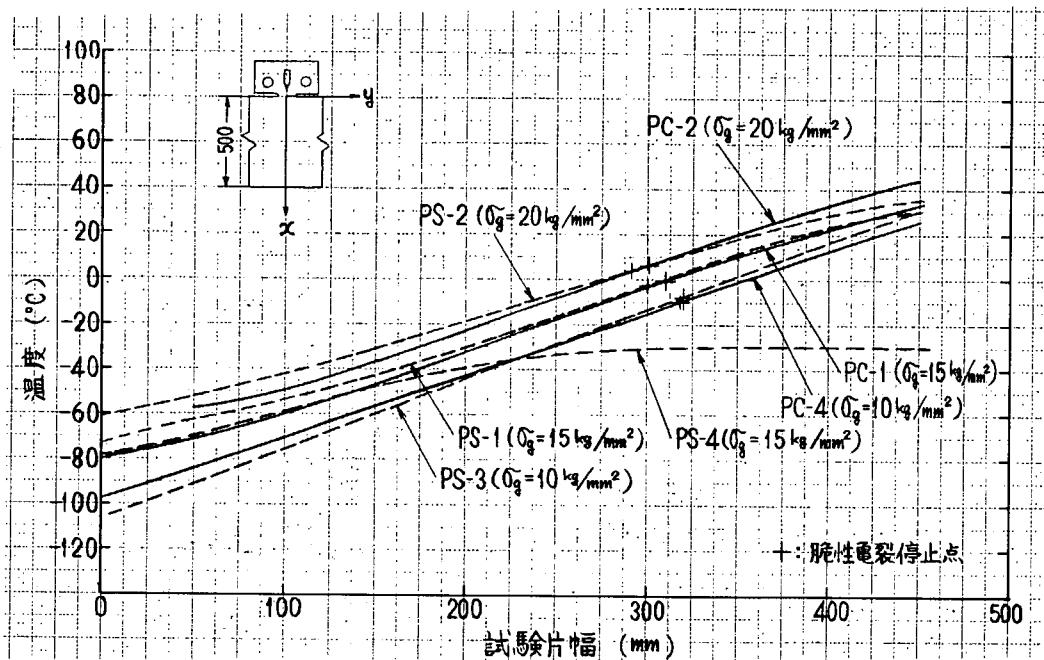


図 4.5.5 標準型二重引張試験(予備試験)での温度分布および脆性亀裂停止点

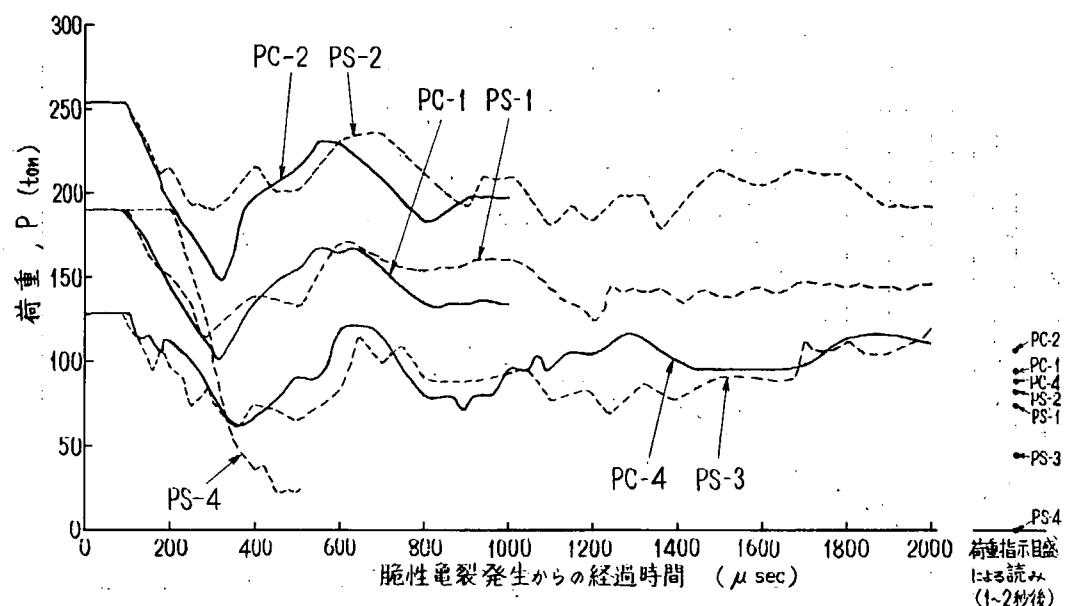


図 4.5.6 脆性亀裂進展とともになう荷重変化(予備試験)

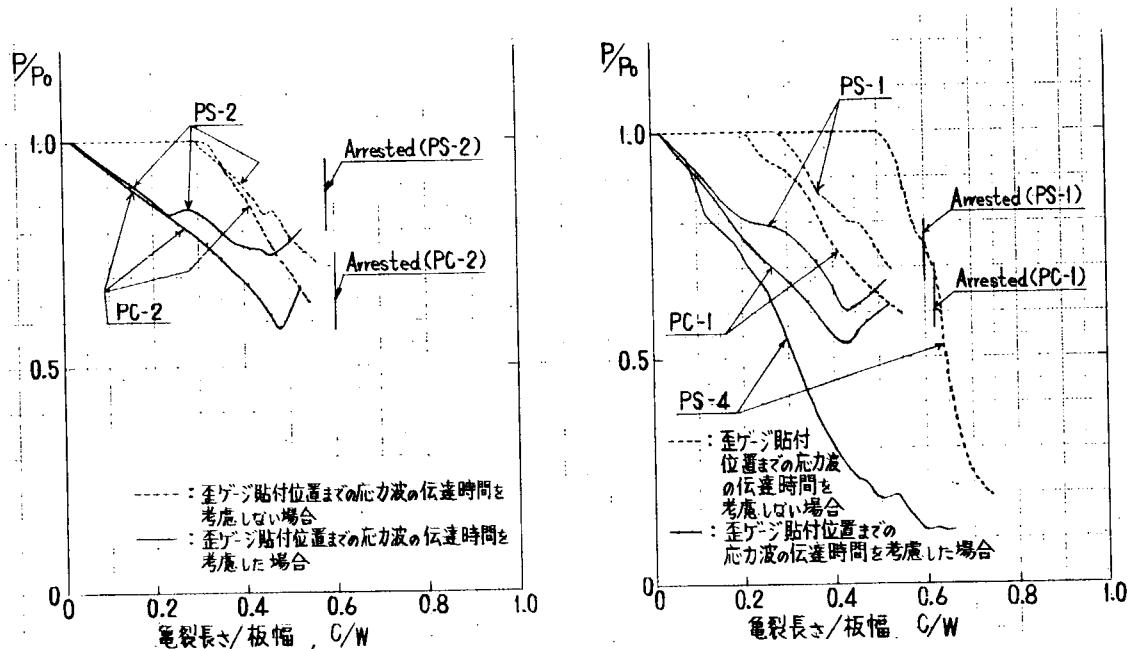


図 4.5.7 脆性亀裂進展にともなう荷重変化(予備試験)

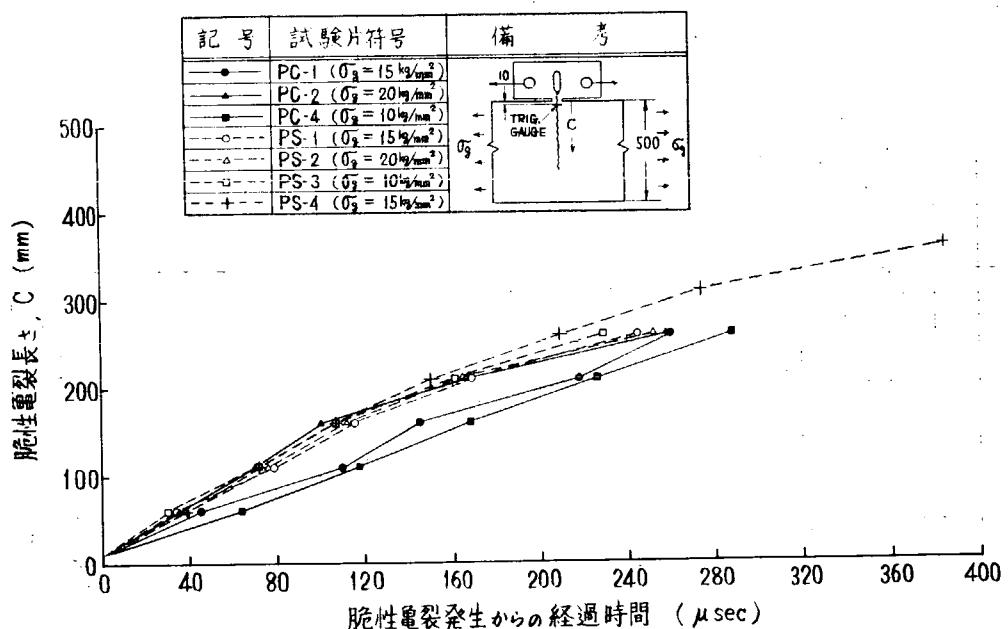
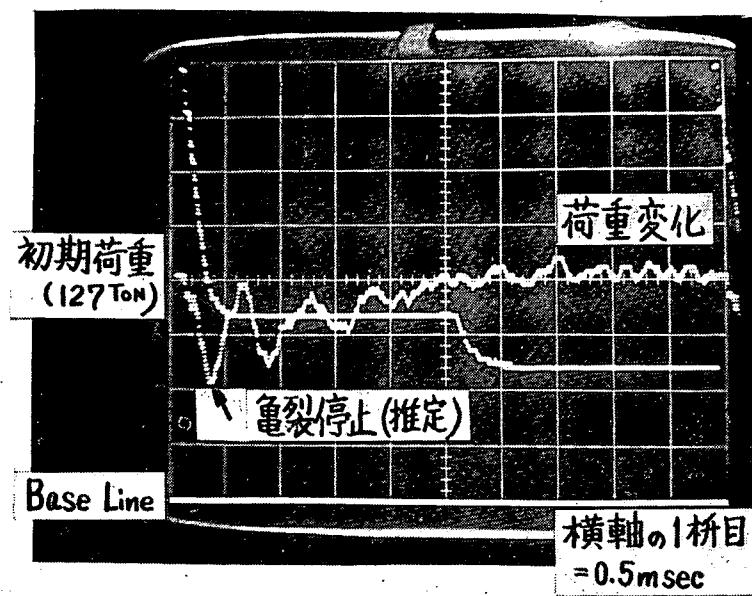
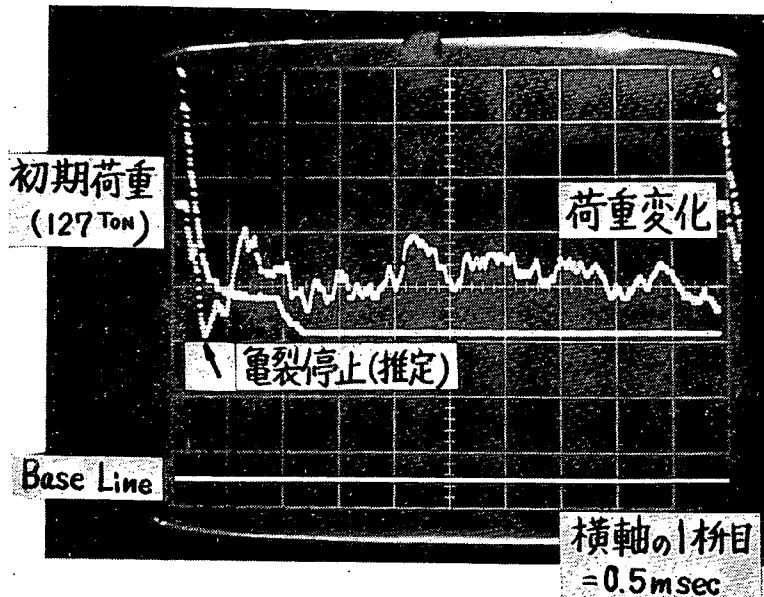


図 4.5.8 脆性亀裂先端の位置とその経過時間の関係(予備試験)



(a) 試験片 PC-4 での荷重計測用ひずみゲージの読み



(b) 試験片 PS-3 での荷重計測用ひずみの読み

写真 4.5.2 脆性亀裂停止後の荷重振動の様子
(予備試験でのウェイプメモリー出力)

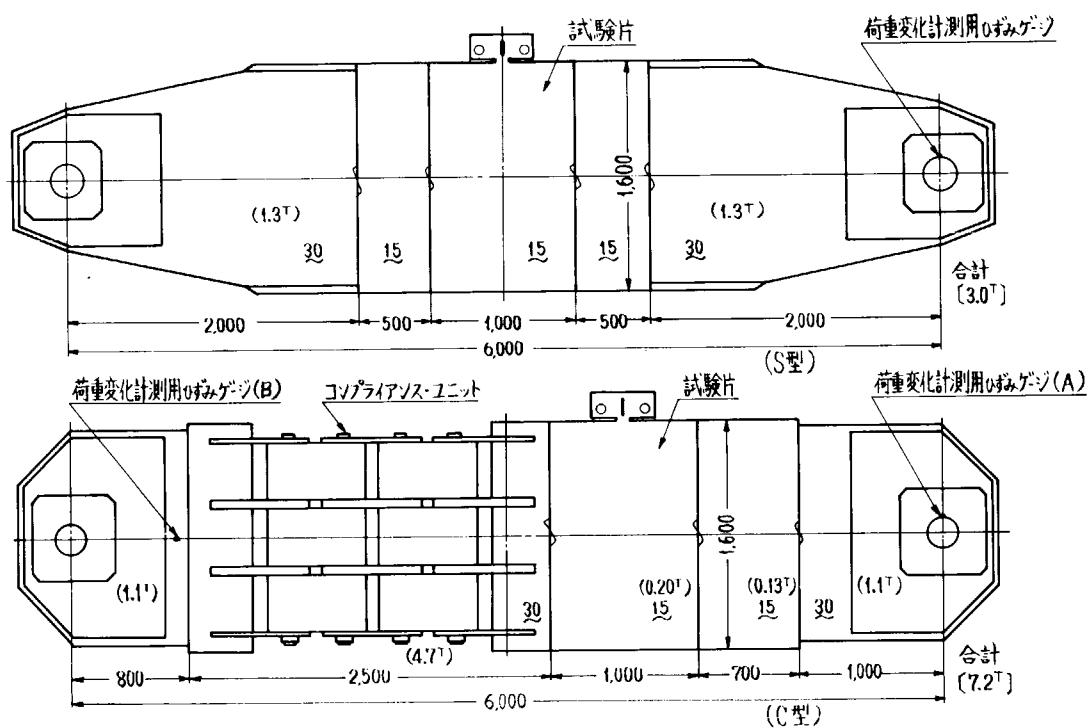


図 4.5.9 大形二重引張試験片 (S型ならびにC型)

表 4.5.2 大形二重引張試験用供試材の化学成分ならびに機械的性質

鋼種	熱処理	板厚 (mm)	化学成分 (%)					機械的性質		
			C	Si	Mn	P	S	降伏点 σ_y (kg/mm ²)	引張り強さ σ_b (kg/mm ²)	伸び El. (%)
LAS	As Rolled	15	0.15	0.18	0.61	0.012	0.012	28	42	30

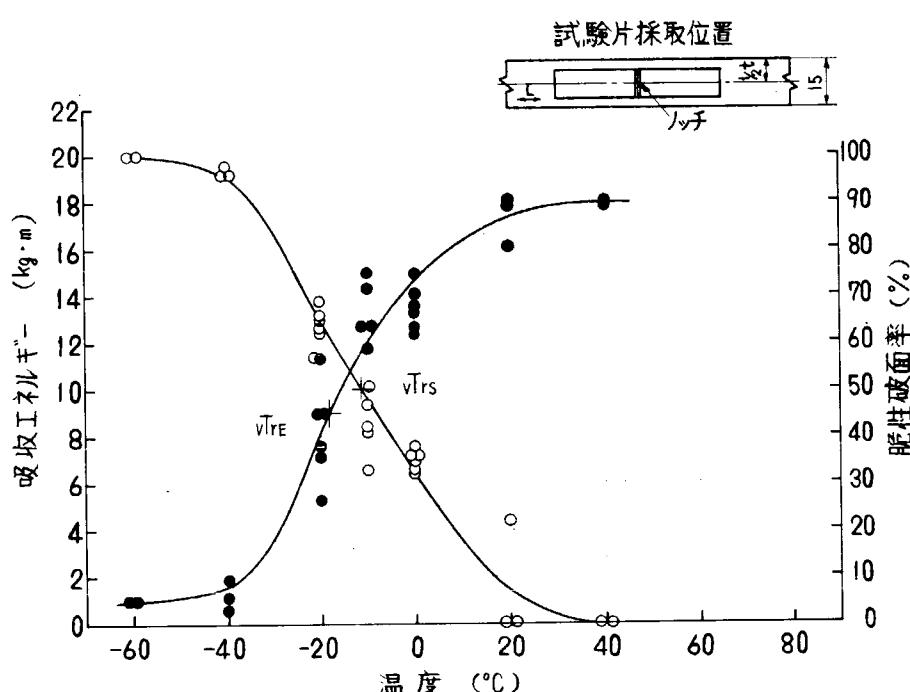
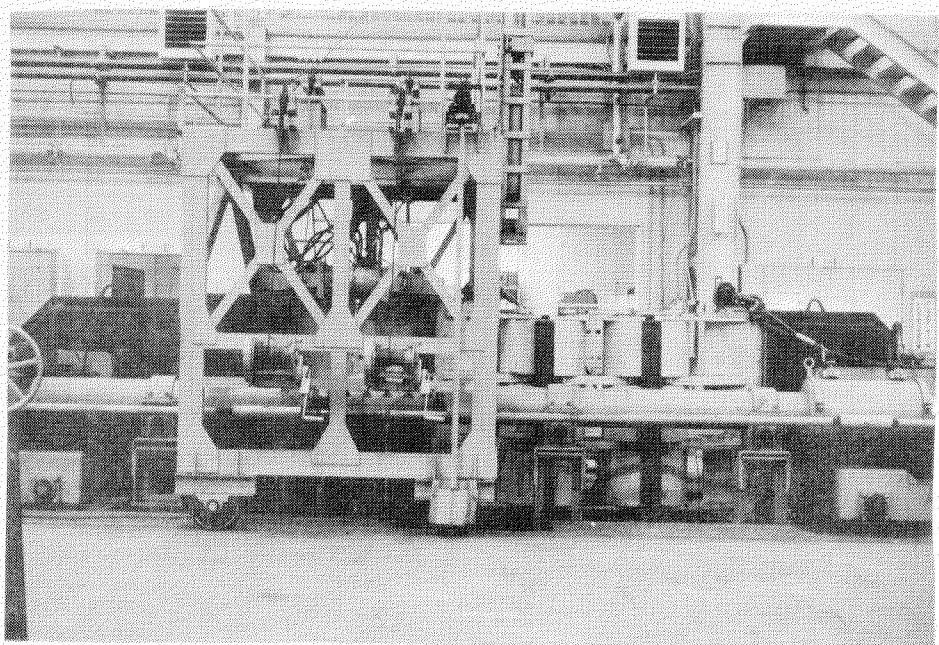
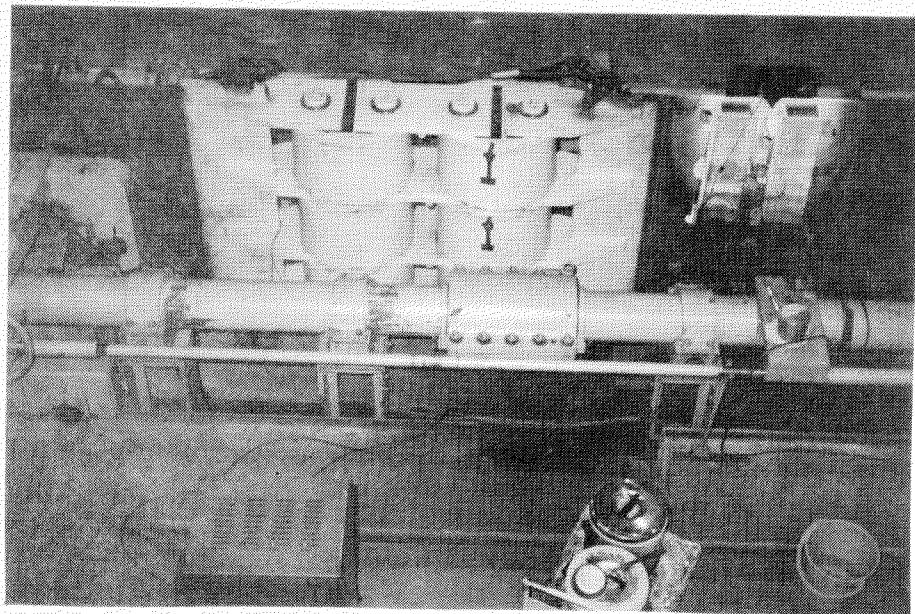


図 4.5.10 V - ノッチシャルピー試験結果 (LAS 鋼、母材)



(a) 大形二重引張試験の終了直後



(b) コンプライアンス・ユニット装着時の状況

写真 4.5.3 大形二重引張試験時の概観

表 4.5.3 大形二重引張試験結果一覧

鋼種	板厚 t (mm)	試験片幅 B (mm)	ビン間距離 L (mm)	試験片 号	拘束応力 σ_g (kg/mm ²)	拘束長さ Ca (mm)	亜裂停止温度 T (°C)	10 ³ /T _K (°K ⁻¹)	荷重変化 ^{(*)2}	
									(*)1 $K_{c,0}$ (kg/mm ²)	(*)1 $K_{c,2}$ (kg/mm ²)
LAS	15.0	1600	6,000 [ソラリアス 2ニット使用]	C-1	10	1115	14	3.48	786	367
				C-2	12	1105	18	3.44	931	(482)
				C-3	7	1100	-4	3.72	540	280
				C-4	12	1100	24 ^{(*)3}	3.37	926	537
	15.0	1600	6,000	S-1	15	860	17	3.45	901	541
				S-2	10	1030	9	3.55	714	464
				S-3	12	930	1.0	3.53	772	469
				S-4	7	800	-14	3.86	396	283

$$(*)1 \quad K_{c,0} = \left(\frac{P_0}{tB} \right) f \left(\frac{Ca}{B} \right) \sqrt{\pi Ca}$$

$$K_{c,2} = \left(\frac{P_2}{tB} \right) f \left(\frac{Ca}{B} \right) \sqrt{\pi Ca}$$

$$f \left(\frac{Ca}{B} \right) = \sqrt{\frac{2B}{\pi Ca}} \tan \frac{\pi Ca}{2B}$$

(*)2 P_1 : 油圧より求めた値

P_2 : ビン孔側のひずみゲージより求めた値

ただし、()内値は、図4.5.15に示す推定停止荷重、ならびにその値を

用いたもの。

(*)3 C-4だけは、伝播経路が中心線上より約60mm離れた。

停止温度としては実際の亜裂停止位置の値をとった。

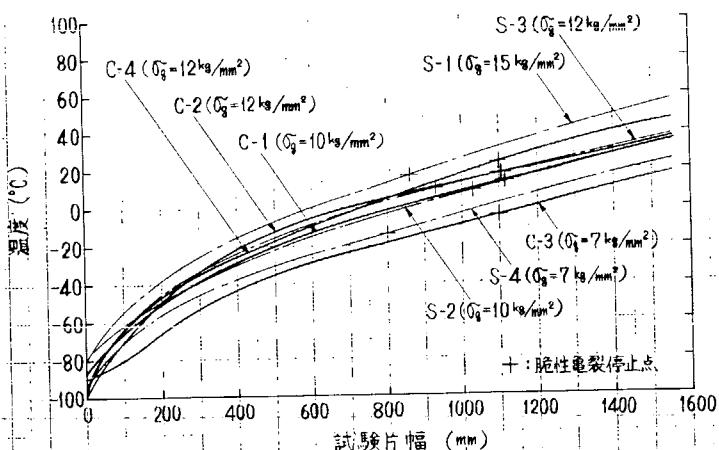


図 4.5.11 大形二重引張試験での温度分布および脆性亜裂停止点

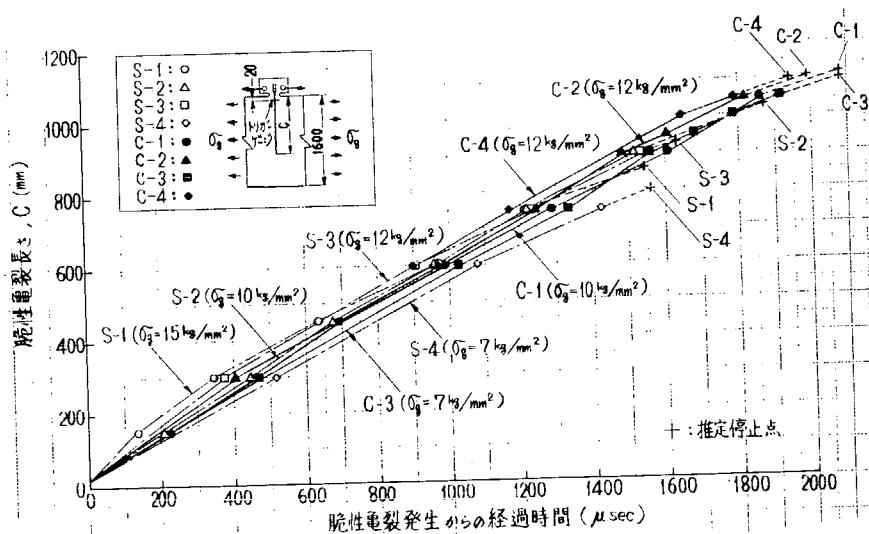


図 4.5.12 脆性亜裂先端の位置とその経過時間の関係（大形二重引張試験）

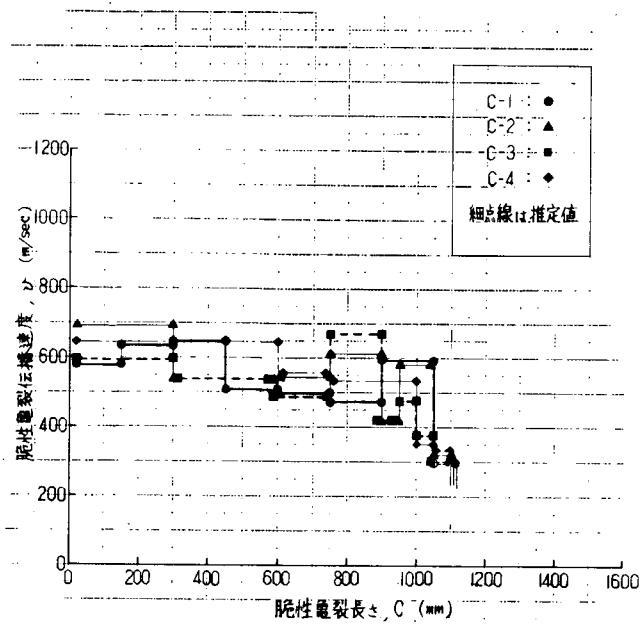


図 4.5.13 (a) 脆性亀裂伝播速度

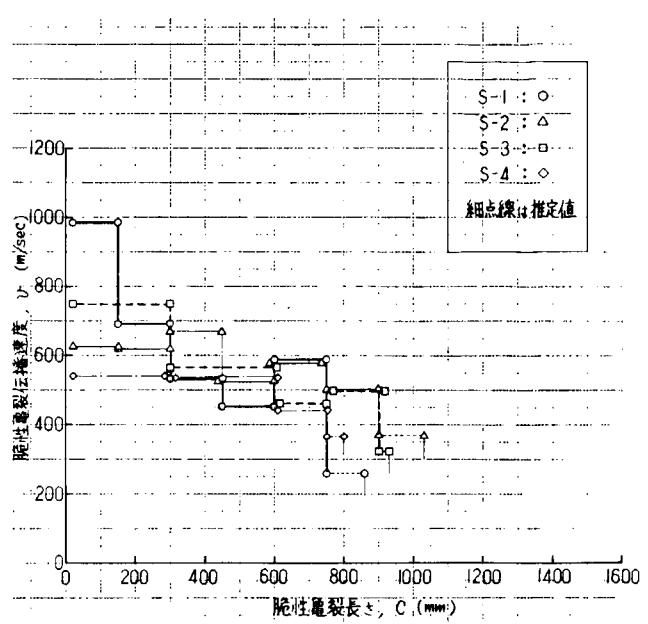


図 4.5.13 (b) 脆性亀裂伝播速度

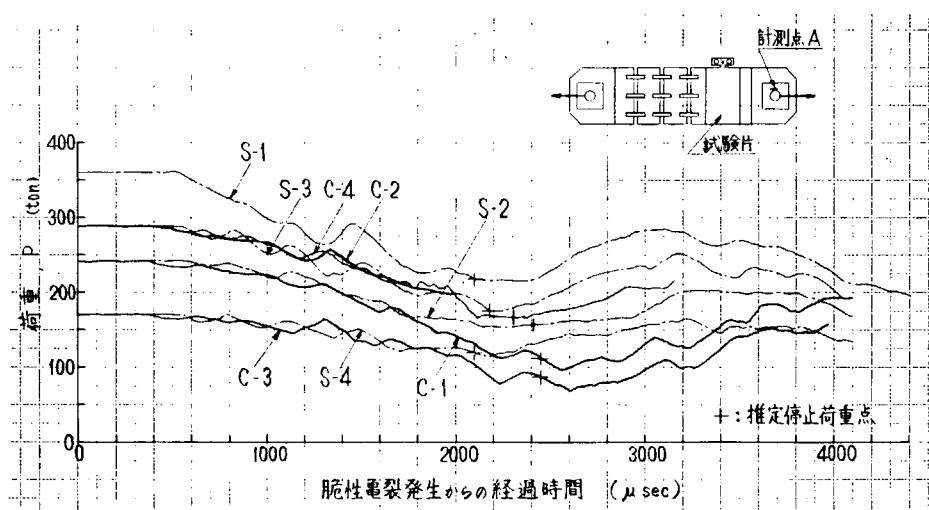


図 4.5.14 脆性亀裂進展にともなう荷重変化(計測点 A)

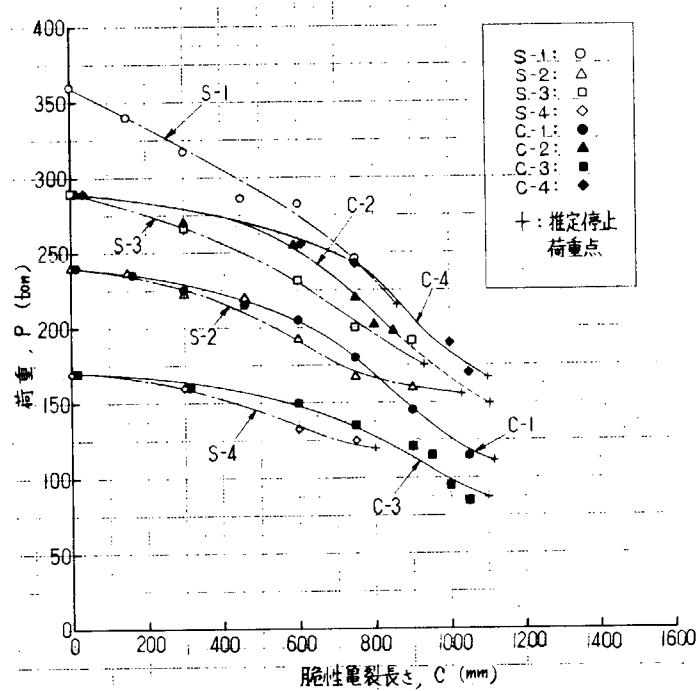


図 4.5.15 脆性亀裂伝播にともなう荷重変化

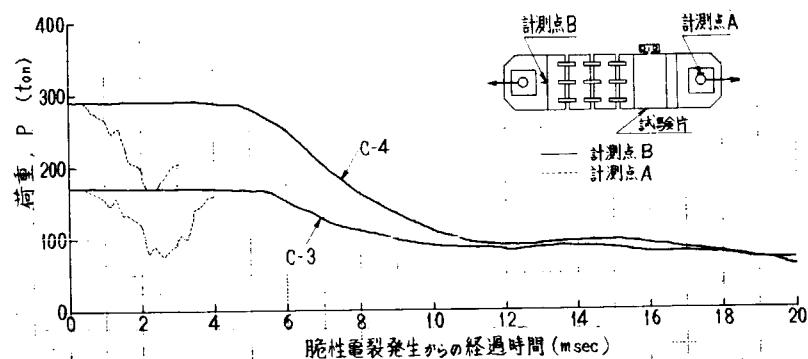


図 4.5.16 脆性亀裂進展にともなう荷重変化(計測点 B)

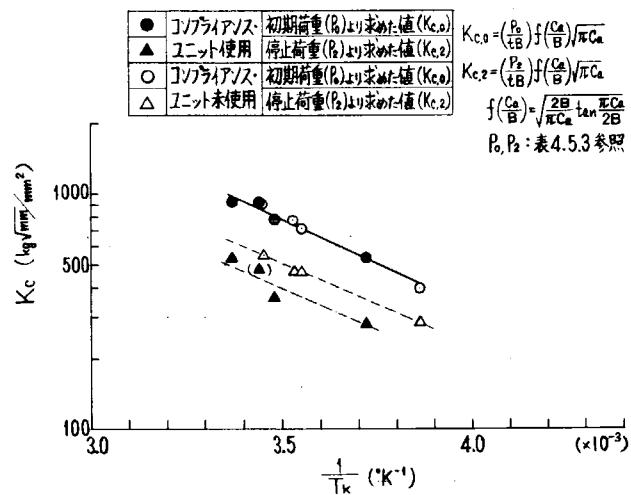
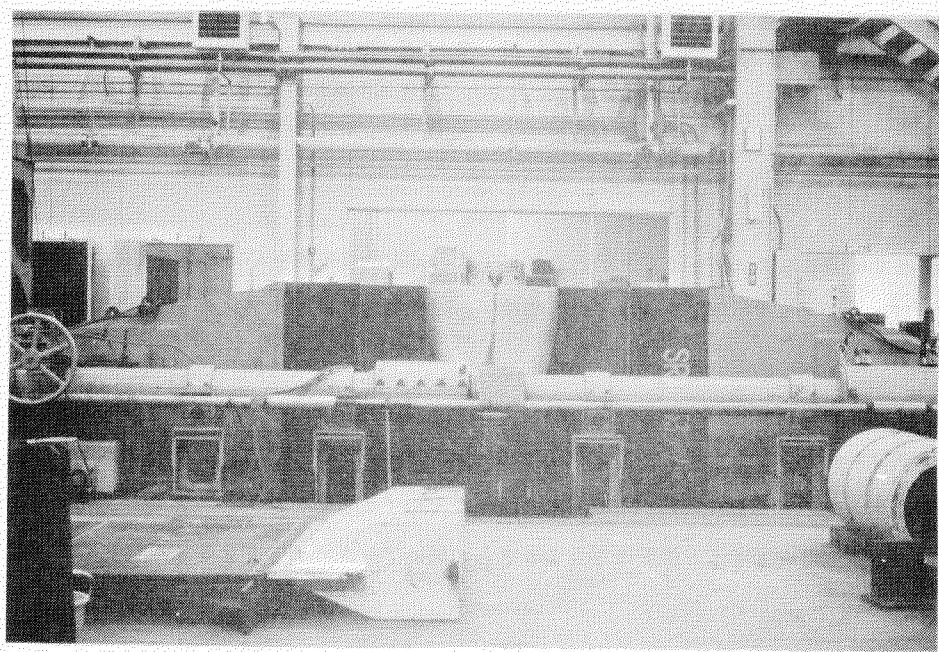
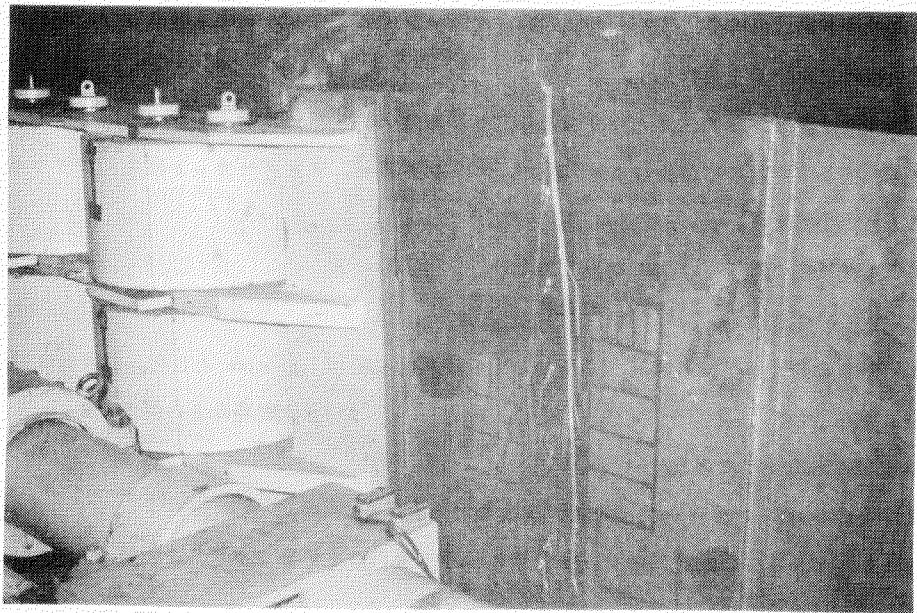


図 4.5.17 大形二重引張試験結果(LAS 鋼、板厚 15 mm、母材)

$$(K_c \sim \frac{1}{T_k} の関係)$$



(a) コンプライアンス・ユニット無し(S型)



(b) コンプライアンス・ユニット付き(O型)

写真 4.5.4 大形二重引張試験後の試験片の様子

5. 疲労特性に関する研究

5.1 継手疲労試験

5.1.1 目的

大入熱自動溶接継手に生じるアンダーカットの許容度に関する基本的な資料を得ることを目的として、アンダーカットの生じ易いエレクトロスラグ溶接法を選びその溶接継手の疲労強度に及ぼすアンダーカットの影響を実験的に検討したものである。

50年度には 1) 健全継手 (SSシリーズ)、2) 相対的に浅いアンダーカットを有する継手 (SUAシリーズ)、3) 相対的に深いアンダーカットを有する継手 (SUBシリーズ) の3系列について実験を行なったが、応力範囲と破断寿命の関係で整理するといずれも有意差がなく一本の直線で表わすことができた。

そこで 51年度は追加実験として 50年度の場合よりさらに深いアンダーカットを有する継手について疲労試験を行なった。

5.1.2 試験内容

(1) 試験片

供試材は委員会供試の 25.4 mm 厚 KDK 鋼である。図 5.1.1 に示すように切断した鋼板をエレクトロスラグ溶接し、表 5.1.1 に示す 2 種類の継手、すなわち相対的に深いアンダーカットを有する継手及びそのアンダーカットをグラインダー掛けした継手を製作した。

基本的な溶接条件は表 5.1.2 に示すとおりであり、これは深いアンダーカットを発生させるための予備試験から設定されたもので 50年度の標準条件より入熱が 15%程度高い。アンダーカットは主にワイヤの狙い位置を変えることにより発生させた。

試験片は図 5.1.2 に示す形状・寸法に切出した。

(2) 試験方法

負荷形式は片振りの荷重制御軸力繰返しであり、その繰返し速度は 180 cpm とした。試験温度は室温である。繰返し数の範囲は主として $10^4 \sim 2 \times 10^6$ とし、繰返し応力範囲と破断寿命との関係 ($S_{R} \sim N_f$) を求めた。応力比 R は 0.01 ～ 0.03 である。

使用した試験機は 100 トンサーボ油圧式疲労試験機である。

各試験片にはそれぞれ 4 枚の抵抗線歪ゲージを貼りつけて偏心量をチェックし、その値を 10%以下にするよう調整した。偏心量の計算は次式を用いた。

$$\text{板厚方向の偏心量 } \epsilon_x = \frac{|\epsilon_1 - \epsilon_2|}{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4} \quad \epsilon_1, \epsilon_2 : \text{板厚方向の歪}$$

$$\text{板巾方向の偏心量 } \epsilon_y = \frac{|\epsilon_3 - \epsilon_4|}{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4} \quad \epsilon_3, \epsilon_4 : \text{板巾方向の歪}$$

余盛止端部の形状は予めモーリングコンパウンドで型取りしておき、疲労試験後破面から疲労亀裂の発生点を見い出し、その点に相当する型の断面寸法を 10 倍の投影機により測定した。

5.1.3 試験結果および考察

試験結果を表 5.1.3(a), 表 5.1.3(b) にまとめ、図 5.1.3 に $S_R \sim N_f$ 線図を示す。また止端部の形状(代表例)を

写真 5.1.1 に、破断部の写真（代表例）を写真 5.1.2(a)、写真 5.1.2(b) に示す。SUC シリーズの亀裂発生点のアンダーカット深さは表 5.1.3(a) に示すように 0.35~0.9 mm と 50 年度の場合 (0.1~0.4 mm) よりも深かった。

図 5.1.3 からわかるように SUC・SUD シリーズとも 50 年度疲労試験結果（健全継手強度に相当）に比べ疲れ強さが低い。これは通常止端部で破断したものが健全継手の疲れ強さに近いこと。（SUD-9 は溶接のオーバーラップ部から破断したのでその影響で低下したものと考えられる。）アンダーカット部破断（SUC シリーズ）のものが通常止端部破断のものより明らかに疲れ強さが低下していることから SUC シリーズの疲れ強さの低下はアンダーカットの影響によるものと考えられる。そこでアンダーカット部の応力集中係数 (K_t) を計算してみる。計算には次の仮定をおいた。

- 1) 余盛の影響は無視し、試験片の表裏に同一のアンダーカットを有するものとする。
- 2) 浅いアンダーカットは巾が狭く、深いアンダーカットは巾が広いということを考慮して、50 年度の試験片ではアンダーカットは全体の形状が疲れ強さに影響するものとし、51 年度の試験片ではアンダーカットの局部的な形状が疲れ強さに影響するものとする。

すなわち、図 5.1.4 で示すようにモデル化を行ない、SS、SUA、SUB シリーズではアンダーカットの開き角と深さ d から曲率半径 ρ' を求め d と ρ' から、SUC、SUD シリーズではアンダーカット部の最小曲率半径 ρ と深さ d から応力集中係数を計算した。用いた計算式は (5.1.1) 式である。

$$K_t = 1 + \left(\frac{1}{1.55B/b - 1.3} \cdot \frac{d}{\rho'} \right)^n \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (5.1.1)$$

$$n = \frac{(B/b - 1) + 0.5\sqrt{d/\rho'}}{(B/b - 1) + \sqrt{d/\rho'}}$$

B : $\frac{b_2}{2} \times$ 板厚 (mm)

d : アンダーカット深さ (mm)

ρ' : 曲率半径 (mm)

b : $(B - d)$ (mm)

計算結果を表 5.1.4 に示す。平均値で比較すると SUC シリーズ $K_t = 1.84$ SUD シリーズ $K_t = 1.39$ 、(SS、SUA、SUB) シリーズ $K_t = 1.47$ となり SUC シリーズが最も大きい。このため疲れ強さが健全継手のそれに比べ低下したものと思われる。また SUD シリーズは SUC シリーズより疲れ強さが高く、止端部をドレンシングした効果が現われている。しかし健全継手に比して K_t は同等かそれ以下であるにもかかわらず健全継手の疲れ強さに達しておらず、しかもデータがばらついているのはグラインダー掛けによる表面粗さの影響と思われる。

SUC シリーズでアンダーカット部から破断したものに対し、応力範囲と破断寿命との関係を最小自乗法で直線近似させると次のようになる。

$$S_R = 306 N_t^{-0.213} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (5.1.2)$$

$N_t = 5 \times 10^5$ での図 5.1.3 に併記した母材に対する時間強度を求めるとき健全継手、アンダーカットを有する継手はそれぞれ $\frac{22.9}{32.5} = \frac{1}{1.42}$ 、 $\frac{18.7}{32.5} = \frac{1}{1.73}$ となり K_t の逆数とだいたい同程度の値である。

以上の実験結果からアンダーカットが深くなるとその局部的な形状が影響して疲れ強さが低下することがわかった。

5.1.4 ま と め

アンダーカットを有するエレクトロスラグ溶接継手について片振引張による疲労試験を行ない次の結果を得た。

- 1) 浅いアンダーカット（深さ 0.4mm以下）を有する継手では通常の健全止端部に対し、疲れ強さの低下は認められず健全止端部の疲れ強さ $S_R = 187 N_f^{-0.160}$ と同一の直線で表わせる。
- 2) 深いアンダーカット（深さ 0.4～0.9mm）を有する継手では通常の健全止端部に対し、疲れ強さの低下が認められその疲れ強さは $S_R = 306 N_f^{-0.213}$ で表わせる。 $N_f = 5 \times 10^5$ での時間強度は健全継手の約 80%に減少する。
- 3) 深いアンダーカットに対し、グラインダー掛けをしてドレッシングを施すことにより疲れ強さを向上させることができる。

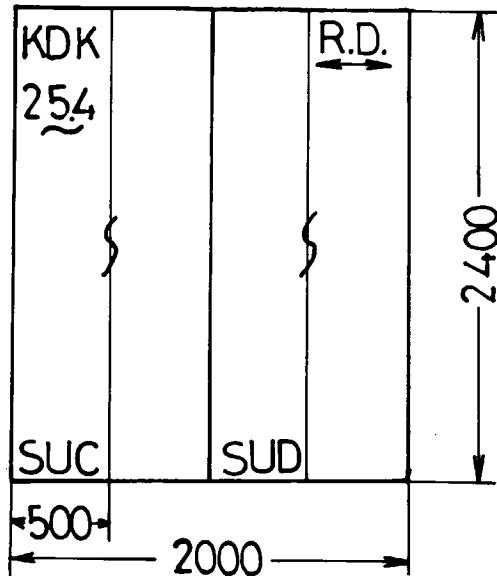


図 5. 1. 1 供試材の切断要領

表 5. 1. 1 試験片の種類

符号	溶接法	欠陥の種類	本数
SUC-1~10	ES	深いアンダーカット	10
SUD-1~10	ES	深いアンダーカットを グラインダー掛け	10

表 5. 1. 2 標準溶接条件

溶接法	ワイヤ×フックス	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	開先形状
エレクトロ スラグ 溶接	ES-50 (2.4 ^Ø) X MF-38	600	38	6.2	

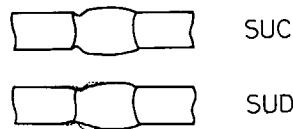
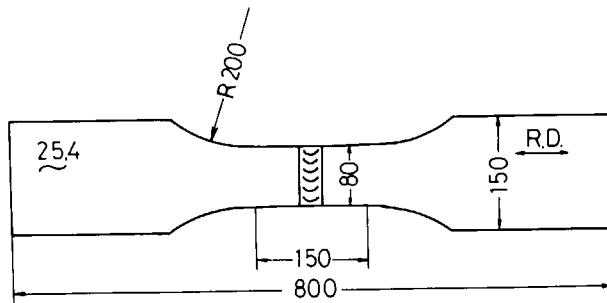


図 5.1.2 試験片の形状および寸法

表 5.1.3 (a) アンダーカットを有するエレクトロスラグ溶接継手の疲労試験結果 (SUCシリーズ)

試験片番号	最大応力 Smax (Kg/mm ²)	最小応力 Smin (Kg/mm ²)	破断寿命 Nf (サイクル)	荷重偏心率 ϵ (%)	注1) き裂発生 位置	き裂発生点の形状 注2)			
						曲率半径 P(mm)	止端角 θ (度)	余盛高さ h(mm)	深さ d(mm)
SUC-1	21.8	0.5	248400	$\epsilon_x=16.8$ $\epsilon_y=2.3$	U.C.	1.8	28.2	1.8	0.55
SUC-2	19.9	0.5	437300	$\epsilon_x=165$ $\epsilon_y=33$	U.C.	1.4	34.0	1.9	0.35
SUC-3	29.7	0.5	59700	$\epsilon_x=—$ $\epsilon_y=90$	U.C.	24	25.7	1.3	0.6
SUC-4	18.0	0.5	721200	$\epsilon_x=65$ $\epsilon_y=4.3$	U.C.	3.2	24.5	1.1	0.55
SUC-5	16.0	0.5	1156300	$\epsilon_x=14.8$ $\epsilon_y=9.7$	U.C.	3.6	30.2	1.2	0.8
SUC-6	34.5	0.5	>28900	$\epsilon_x=1.1$ $\epsilon_y=6.3$	U.C.	—	—	—	—
SUC-7	24.7	0.5	146800	$\epsilon_x=125$ $\epsilon_y=1.0$	U.C.	4.3	35.0	1.6	0.9
SUC-8	27.7	0.5	92200	$\epsilon_x=94$ $\epsilon_y=3.1$	U.C.	2.0	21.2	1.35	0.55
SUC-9	23.8	0.5	299100	$\epsilon_x=1.3$ $\epsilon_y=1.1$	N.T.	0.15	24.4	1.2	—
SUC-10	32.6	0.5	41900	$\epsilon_x=50$ $\epsilon_y=0.7$	N.T.	0.3	28.9	1.75	—

注1)
UC. Undercut
MM. Mother Metal
N.T. Natural Toe



表 5.1.3 (b) アンダーカットを有するエレクトロスラグ溶接継手の疲労試験結果 (SUDシリーズ)

試験片番号	最大応力 Smax (Kg/mm ²)	最小応力 Smin (Kg/mm ²)	破断寿命 Nf (サイクル)	荷重偏心率 ϵ (%)	注1) き裂発生 位置	き裂発生点の形状 注2)			
						曲率半径 P(mm)	止端角 θ (度)	余盛高さ h(mm)	深さ d(mm)
SUD-1	45.7	静的引張り		M.M.	—	—	—	—	—
SUD-2	30.6	0.5	85200	$\epsilon_x=75$ $\epsilon_y=—$	N.T.	0.15	36.0	1.6	—
SUD-3	19.9	0.5	718100	$\epsilon_x=7.8$ $\epsilon_y=1.1$	U.C.	80	12.8	2.0	0.1
SUD-4	23.7	0.5	332700	$\epsilon_x=114$ $\epsilon_y=4.5$	U.C.	5.8	17.9	1.3	0.8
SUD-5	22.1	0.5	576700	$\epsilon_x=7.3$ $\epsilon_y=9.7$	U.C.	80	14.4	1.4	0.2
SUD-6	35.7	0.5	>28300	$\epsilon_x=25$ $\epsilon_y=2.9$	U.C.	—	—	—	—
SUD-7	26.8	0.5	114800	$\epsilon_x=105$ $\epsilon_y=2.0$	U.C.	4.4	20.6	1.4	0.4
SUD-8	25.8	0.5	105200	$\epsilon_x=54$ $\epsilon_y=1.0$	U.C.	7.0	16.5	1.75	0.45
SUD-9	17.9	0.5	1021100	$\epsilon_x=85$ $\epsilon_y=0.7$	N.T.	1.4	46.0	1.75	—
SUD-10	32.6	0.5	47300	$\epsilon_x=26$ $\epsilon_y=6.6$	U.C.	10.0	12.2	1.6	0.55

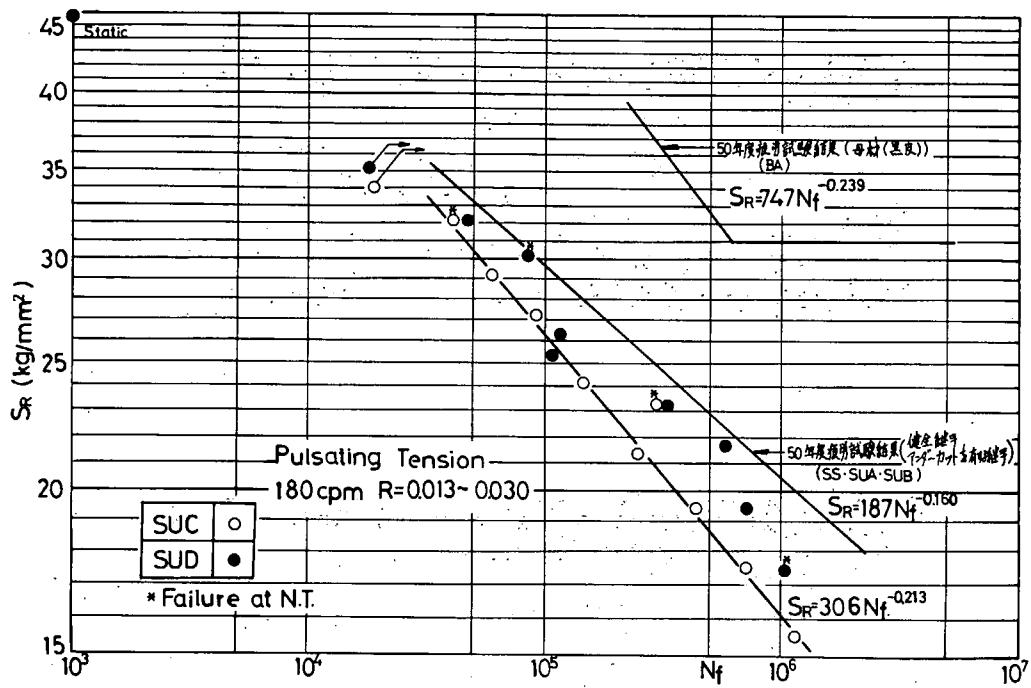


図 5.1.3 アンダーカットを有するエレクトロスラグ溶接継手の疲労試験結果

表 5.1.4 応力集中係数

研究 年度	試験片 系列	き裂発生部の 形状(法1)			応力集中係数	
		$\theta/2$ (度)	d (mm)	P' (mm)	Kt	平均
50	SS-2	69.6	0.1	1.6	1.51	147
	SS-3	62.0	0.25	2.1	1.64	
	SS-10	70.0	0.25	4.1	1.47	
	SS-16	83.1	0.1	13.8	1.15	
	SUA-6	73.0	0.2	4.6	1.37	
	SUB-2	65.4	0.35	3.9	1.21	
	SUB-4	56.1	0.3	1.8	1.75	
	SUB-5	73.0	0.15	3.4	1.39	
	SUB-8	62.7	0.4	3.6	1.58	
	SUB-9	64.3	0.2	2.0	1.59	
51	SUC-1	65.8	0.55	1.8	1.98	184
	SUC-2	64.5	0.35	1.4	1.92	
	SUC-3	65.7	0.6	2.4	1.87	
	SUC-4	67.7	0.55	3.2	1.71	
	SUC-5	66.9	0.8	3.6	1.77	
	SUC-7	62.7	0.9	4.3	1.73	
	SUC-8	67.8	0.55	20	1.92	
	SUD-3	82.9	0.1	8.0	1.20	
	SUD-4	78.2	0.8	5.8	1.58	
	SUD-5	80.3	0.2	8.0	1.27	

注) 図 5.1.4 参照

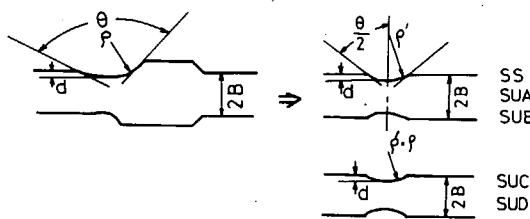
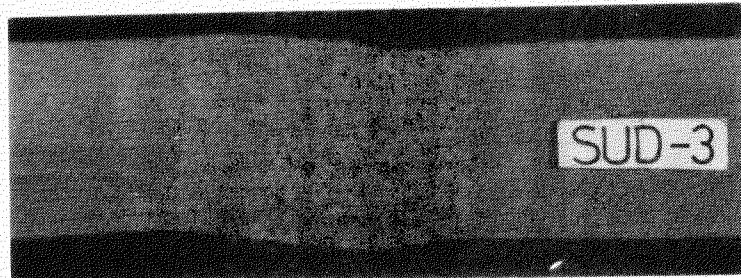
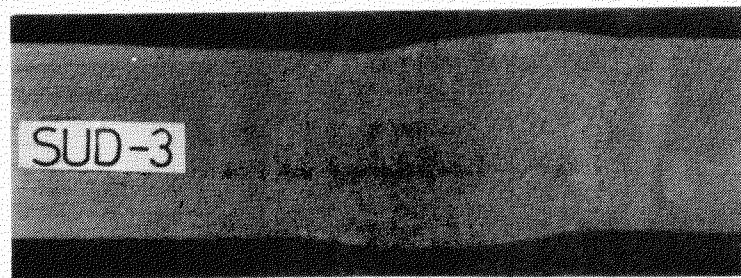
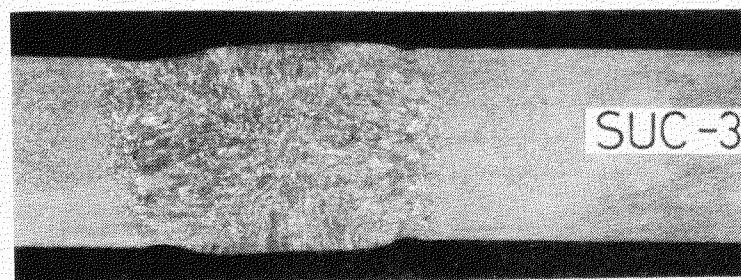
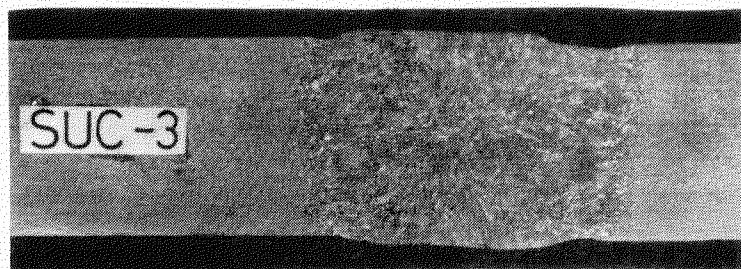


図 5.1.4 アンダーカット部のモデル化



写 真 5.1.1 余 盛 形 状

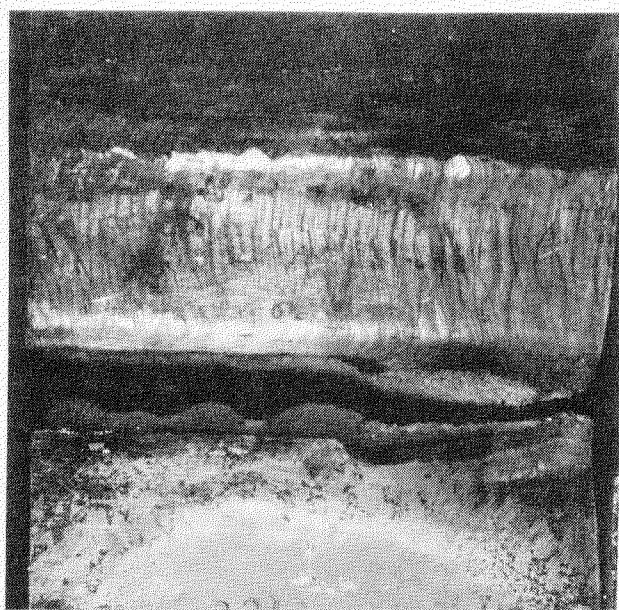
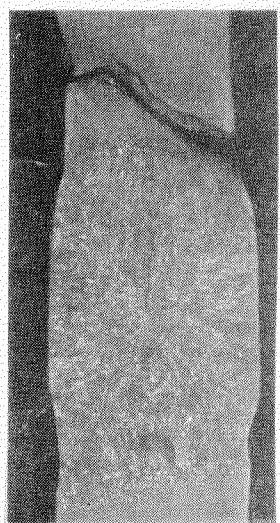
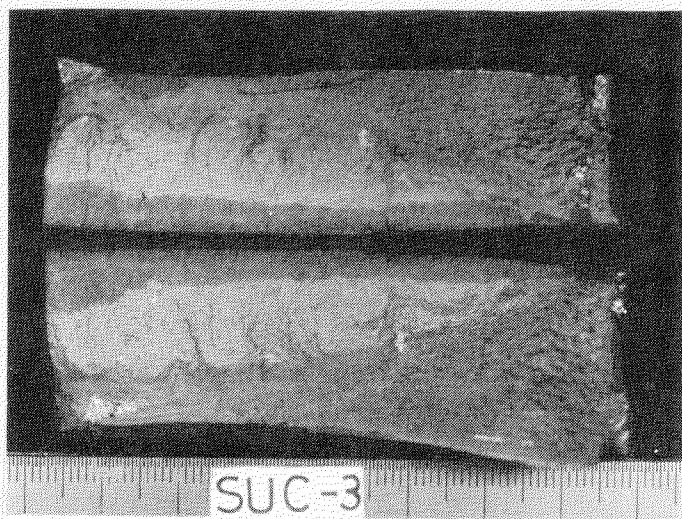
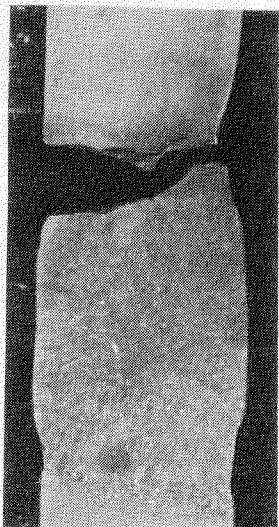


写真 5.1.2(a) 破断部の詳細例 (SUC-3)

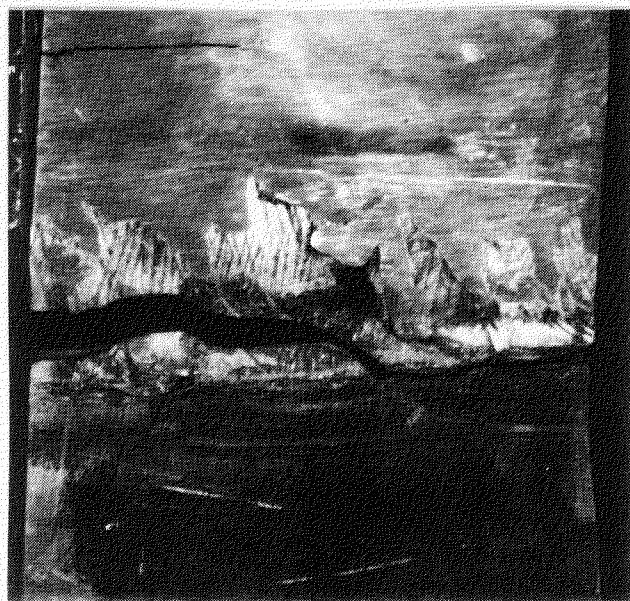
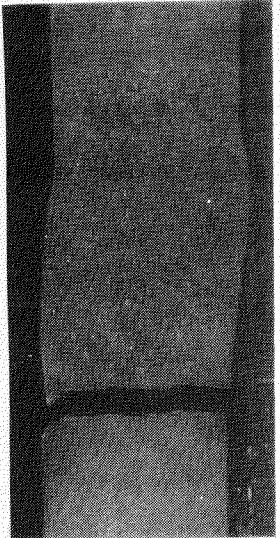
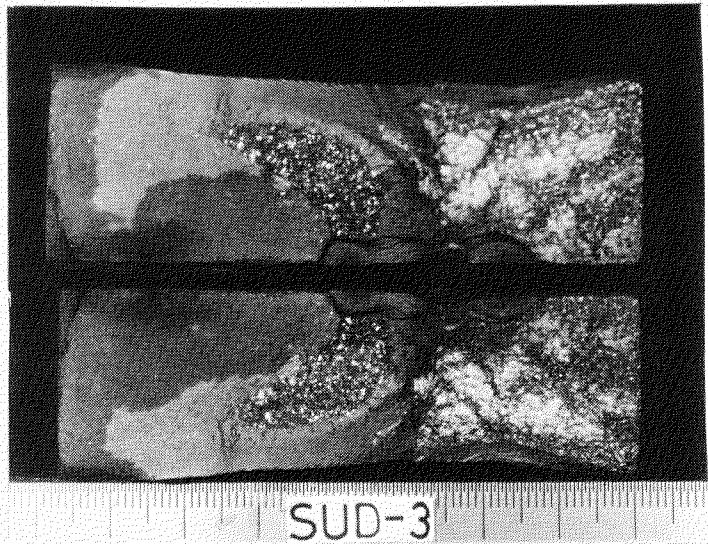
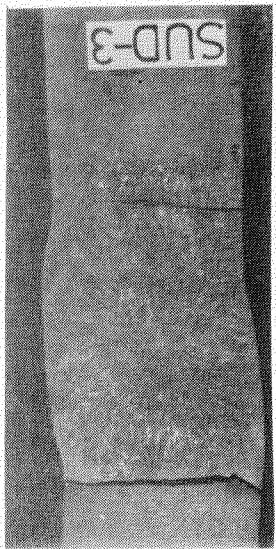


写真 5. 1. 2 (b) 破断部の詳細例 (SUD-3)

5.2 継手疲労亀裂伝播試験

5.2.1 縦縦手疲労亀裂伝播試験

5.2.1.1 目的

51年度の研究においては、造船用軟鋼に各種大入熱溶接法を用いて突合せ継手を製作し、溶接方向に平行な切欠きから伝播する疲労亀裂の伝播特性をしらべた。

この結果、溶接の方法、母材、HAZ、ボンドなど位置の差による進展挙動の違いは殆んどみられず、いずれもそれぞれ母材で求められた伝播特性を表示する式で代表できるという結論を得た。52年度の研究においては供試材の母材およびエレクトロガス溶接縦縦手部材の疲労亀裂伝播試験を行ない、平均応力残留応力および切欠き加工前の予歪が疲労亀裂伝播特性におよぼす影響を明らかにすべく試験研究を行なった。

5.2.1.2 試験内容

52年度に実施した試験項目はつぎのとおりである。

(i) 母材およびエレクトロガス縦縦手の疲労亀裂伝播試験

(ii) エレクトロガス溶接継手の as weld および負荷後の残留応力分布計測

である。試験片の採取要領は図 5.2.1.1 に示す。またエレクトロガス溶接継手の溶接条件は表 3.2 の第 2 棚に示す。

(1) 試験片

(a) 中央切欠付疲労試験片

供試材の疲労亀裂伝播特性を求めるため図 5.2.1.2 に示す試験片を製作した。本項の全ての試験片について負荷は圧延方向と直向する方向であるので別途材料試験を行なった。この結果をミルシートにある機械的性質とともに表 5.2.1.1 に示した。切欠きは全長 20mm の中央切欠きである。

(b) 予歪切欠試験片

引張塑性歪を与えた後に切欠加工を行ない疲労試験を実施するための試験片である。この予歪材の疲労亀裂伝播試験片も図 5.2.1.2 に示す(a)と同一形であるが引張りにより試験片断面が収縮するため、寸法を試験前に計測し、試験結果とともに表 5.2.1.2 に示した。

(c) 縦溶接継手の疲労試験片

図 5.2.1.1 のごとく、幅 1M 000 溶接線全長 2M 500 の溶接試験片より図 5.2.1.3 に示すような試験片を製作した。

溶接継手試験片の切欠きは全長 30mm の中央切欠きである。

(d) 溶接残留応力計測用試験片

この研究で用いる疲労試験片寸法に加工したときの溶接残留応力を求めるため、幅 1M × 長さ 2.5M のエレクトロガス溶接継手試験板の切出し前にひずみゲージを貼り、図 5.2.1.7 に示した形状と寸法を経て、図 5.2.1.3 に示す形状に加工した。静的負荷または繰返しによる残留応力分布の変化を求めるための試験片形状は図 5.2.1.7 に示したものを使いた。

(2) 試験方法

(a) 疲労亀裂伝播試験

いづれの試験片についても軸方向荷重制御の部分片振り疲労試験を室温で動的 150 トンの油圧サーボ試験機を用いて行なった。繰返し速度は荷重条件などにより異なるが、いづれも 3 ~ 6 Hz である。ここでは供試材の疲労亀裂伝播特性を求め、応力比の影響を明らかにするとともに数 % の予歪が亀裂の伝播にどのような影響を示すかを調べた。予歪後の疲労試験片では標点距離 50 mm となるように試験片の幅方向ひずみ分布が求められるよう表裏 7 個所、14 点ずつ打刻して所定のひずみ量を与える引張荷重を負荷した。

予歪の量は5%および10%である。応力比はR($= S_{min} / S_{max}$)=0.1を主とし応力比の影響をみるためR=0.4の場合についても試験を行なった。

また、いづれの試験においても疲労亀裂の発生寿命(N_c)、伝播速さ($\frac{dC}{dN}$)および破断寿命(N_f)を計測した。伝播速さについてはクラックゲージを用いて電気的に亀裂長さの計測を行なった。

(b) 残留応力の計測

溶接継手部材の残留応力および繰返し負荷後の残留応力計測には二軸ひずみのゲージ(FCA-2-11(株東京測器研究所製))を使用した。各試験片のひずみのゲージ貼付位置を図5.2.1.5および図5.2.1.6に示した。溶接残留応力計測用の試験片には幅1M000×長さ2M500の溶接継手試験片の状態でひずみゲージを貼り、他の(図5.2.1.6)の残留応力分布計測用試験片では負荷用のチャックプレート溶接後にひずみゲージを貼った。溶接残留応力計測試験片の応力解放手順を図5.2.1.7に示す。試験には動的600トンの試験機を用い、速度は9cpmとした。

5.2.1.3 試験結果および考察

(1) 試験結果

疲労亀裂伝播試験の諸条件および結果は表5.2.1.2に示す。母材の伝播特性を $AK = AS \sqrt{\sec \frac{\pi a}{2B}} \sqrt{\pi a}$ と $\frac{da}{dN}$ の関係で図5.2.1.8に示した。同様に予歪材の伝播特性を図5.2.1.9に示した。広幅(2B-400mm)のエレクトロガス溶接継手試験片で求められた結果を図5.2.1.10にまとめて示した。

亀裂の発生は20倍のルーペにより0.5mmの亀裂を確認し、この繰返し数をもって亀裂発生回数N_cとした。各シリーズの応力範囲ASと亀裂寿命(N_cおよびN_f)の関係を示したもののが図5.2.1.11である。同じ試験片のシリーズで応力比が等しいものは図中のAS-N_cまたはAS-N_f曲線に実験点がのるが予歪材については処女材の寿命に比べ亀裂発生破断とともに30~50%程度増加している。

残留応力は図5.2.1.7に示されるような手順で解放されたが、大板から順次切出していく過程の累積開放応力分布を図5.2.1.12に示した。これより溶接線近傍の残留応力は溶接試験板を幅1M000×長さ700mmに加工することで約9kg/mmに相当するひずみが解放されるが、その後400mmまで板幅を減じても変化は少ない。即ち各ステップにおける溶接線方向の各段階に切り出した時点の解放応力の最大値 $\sigma_y|_{max}$ は

のようになる。

ステップⅠはⅡにくらべ $\sigma_y|_{max}$ が約1.5kg/mm大きくなっているが $\sigma_y=0$ となる点は板中央から約220mmで変わらない。ステップⅢにおいては圧縮応力域はなくなり全幅

切出しきっぷ	板幅×長さ(mm)	$\sigma_y _{max}$ (kg/mm)
I	1,000×700	9.0
II	600×700	10.5
III	400×700	11.0

(400mm)に亘って、8.5~11.0kg/mm相当のひずみが解放される。継手の直向する方向の残留応力 σ_x は絶対値も小さく(±3kg/mm以下)顕著な変化はみられなかった。

1M000×700mm(ステップⅠ)の継手については分割法によって求めた残留応力分布を図5.2.1.13に示す。この状態において部材は溶接線をはさみ、幅約140mmに亘って降伏していると考えられる。しかしさらに板幅を減じると残留応力は解放されていくため、板幅600mmおよび400mmにおいては降伏応力に達していないことがわかる。(図5.2.1.14)

引張り応力を負荷した後の残留応力計測の結果を図5.2.1.15に示した。図中には寸法の等しいas weldの溶接部材より求めた残留応力分布を参考のために併記してある。荷重の繰返し条件は表5.2.1.4に示した通りであるが1回負荷を与えたRS-2と繰返しを行なったRS-3では有意差は生じていない。すなわち約20kg/mmの負荷で除荷後の残留応力は引張り領域で8~14kg/mm減少している。また、残留応力が正から負に転ずる位

置が中央から約 110 mm であったのが 85 mm となり引張りの領域が約 30 mm 小さくなっている。

(2) 考 察

(a) 疲労亀裂進展特性におよぼす諸因子の影響

KD32 の母材試験で応力比 $R = 0.1$ および 0.4 について調べた結果応力比の影響は殆んどない。50 年度の研究では KDK 鋼についても同様の結果⁽¹⁾が得られている。KDK32 鋼では予歪材での結果も含めて $60 < \Delta K < 250$ (単位 $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$) の範囲では次式のような直線表示ができる。

$$\frac{da}{dN} = 6.75 \times 10^{-10} (\Delta K)^{2.81} \quad : \text{mm/cycle} \quad (5.2.1.1)$$

図 5.2.1.8 の直線は 5.2.1.1 式を実測値と対比させたものである。

応力比の影響について、アルミニウム合金では考慮する必要のある場合が多い。⁽²⁾ 鋼材の室温における部分片振り引張り試験においてはあまり顕著でないという結果が多く報告されている。⁽³⁾ しかし一方 Forman ら⁽⁴⁾ の提案する

$$\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K)^m}{(1 - R) K_c - \Delta K} \quad : \text{mm/cycle} \quad (5.2.1.2)$$

が適応できるという報告もある。⁽⁵⁾ 研究者⁽⁶⁾によれば材料の靱性が高く、かつ、R が大きい場合は影響が少なく、靱性の低いものでは R の影響があるとしている。

予歪を与えることで疲労亀裂の伝播特性が著しく改良されるとの報告⁽⁷⁾がある。繰返して塑性ひずみが加わった場合には材料は damage を受け劣化することが考えられるので進展特性は悪くなる。⁽⁸⁾ しかし、平滑母材に負荷される 1 回の塑性ひずみの damage は鋭い亀裂の先端近傍の要素が応力繰返しにより受ける塑性ひずみ繰返し数とひずみ量と比較して少ないと考えられるので、材料に著しいひずみ時効硬化がない限り、本研究で 5 %、10 % の引張り変形を与えた材料から得られた疲労亀裂伝播特性に殆んど差がないという結果は妥当であると考える。容接残留応力が亀裂伝播速さにおよぼす影響を調べる試験の結果は図 5.2.1.10 に示した。応力比はいずれも $R = 0.1$ であるが、応力範囲 ΔS の異なる結果を同一図中に示し比較した。ここで $50 < \Delta K < 300$ (単位 : $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$) のデータが得られたが、高 ΔK 領域では全面降伏域に近いことと亀裂先端の塑性域が大きいことによりばらつきが大きくなったものと考えられる。

図中の S 字型曲線は、実験式

$$\frac{da}{dN} = \frac{1.48 \times 10^{-4} (\Delta K)^{1.32}}{C_0 - \Delta K} \quad (5.2.1.3)$$

を表示している。400 mm 板幅の試験片に対し定数 $C_0 = 315 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ を与えたが、これは材料固有値でなく試験片の残り断面の応力 S_{net} などと関連して決まる寸法効果を含んだ値であると考えられ、寸法効果の影響をしらべるために板幅の異なる結果を求める必要がある。図中には母材の結果から決めた (5.2.1.1) 式をも表示したが、この表示でも実用上支障はないので、現段階では母材、継手部材とも直線表示 5.2.1.1 式を適用する。前述のように幅 1 M 000 の試験板の容接残留応力は降伏応力以上であるのに対し、幅 400 mm の継手試験片では 1 M 000 幅に比べて約 10 kg/mm の応力が開放され、降伏応力の 2% 程度の値となっている。本研究では試験機能力の制約から負荷応力が余り高くない条件 (負荷応力と残留応力の最大値の和が若干降伏応力を越える) にて試験を行なった。さらに応力値の高い場合については今後さらに研究を行なう必要があろう。公称で σ_y 程度の最大負荷応力とする静的負荷または部分片振り疲労を行なっ

た後に、密接残留応力が再配分する状態をしらべたが、計測の結果この程度の応力条件では繰返し負荷により、応力緩和を生じないことが明らかにされた。

5.2.1.4 まとめ

船体用高張力鋼板（KD32）母材およびそのエレクトロガス密接縫手部材について疲労亀裂伝播試験および継手部材の残留応力計測を行ない、以下の結論を得た。

(1) 疲労亀裂伝播特性について

- (i) 母材試験片において応力比の影響をしらべた結果部分片振り条件下では有意差はない。
 - (ii) この供試鋼においては 5 %、10 % の予歪を加えても亀裂伝播特性は変らない。
 - (iii) 焊接縫手試験片で行なった試験について疲労亀裂伝播特性を整理した結果、溶接継手の近傍の伝播特性は引張残留応力場の影響を特に考慮せず、母材の特性を用い評価しても実用上問題はない。

従って母材および溶接継手の残留応力場を伝播する疲労亀裂の特性は次式の表示が妥当と考える。

(2) 熔接残留应力

- (i) 供試溶接板においては板幅が 1 M の時、溶接部の残留応力は降伏応力以上であるが板幅を 600 mm、400 mm の寸法に切断することにより残留応力は 10 kg/mm^2 以上開放される。

(ii) 公称応力で降伏応力の $\frac{1}{3}$ の応力を 10^5 回程度繰返し与えても除荷の状態における残留応力分布は、同一応力を 1 回与えた後除荷したときとほとんど変わることを確認した。

参 考 文 献

- (1) 第153研究部会報告書、日本造船研究協会研究資料No.249、昭和51年3月
 - (2) たとえば、矢田他「引張・曲げ疲労を受ける部材の安全性評価に関する一考察」 日本造船学会論文集
295～302(135)1974
 - (3) たとえば、Yokobori, T. et al., Rpt. RISFM, Tohoku Univ. 3-2(1967)39
 - (4) Forman et al., "Numerical Analysis of Crack Propagation in cyclic-Loaded Structures" Trans ASME,
Ser. D(1967), 459
 - (5) Adams, N.J.I. "Crack Growth in the Vicinity of Welds" Welding Joun. Nov.(1973)508
 - (6) たとえば、Richards and Lindley, Engng. Fract. Mech. 4, (1972)951
 - (7) Radhakrishnan V.M., et al., "Initiation and Propagation of Fatigue Crack in Pre-Strained Material"
Kang, T.S. and Liu, H.W. "Effect of Cyclic Prestressing" Engng. Fract. Mech., 6(1974)23

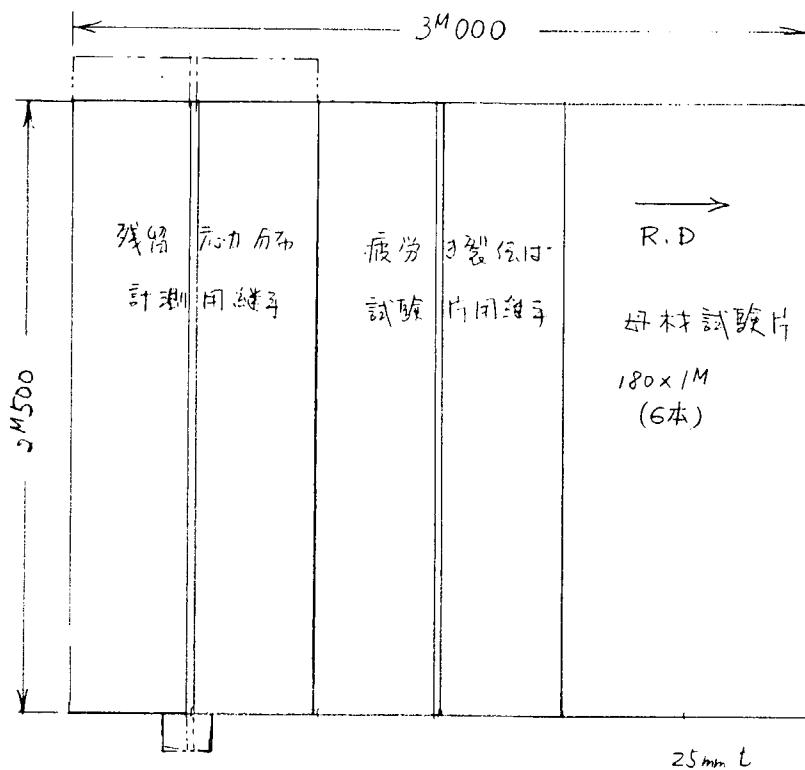


図 5.2.1.1 試験片採取要領

表 5.2.1.1 供試材のミルシートおよび Transverse 方向引張試験結果の比較

降伏点 σ_y 、 Kg/mm ²	抗張力 σ_u 、 Kg/mm ²	伸び e、%	断面収縮率 ϕ	備考
37.0	51.7	36	0.596	J I S 4号 GL 50mm
34	50	28		ミルシート

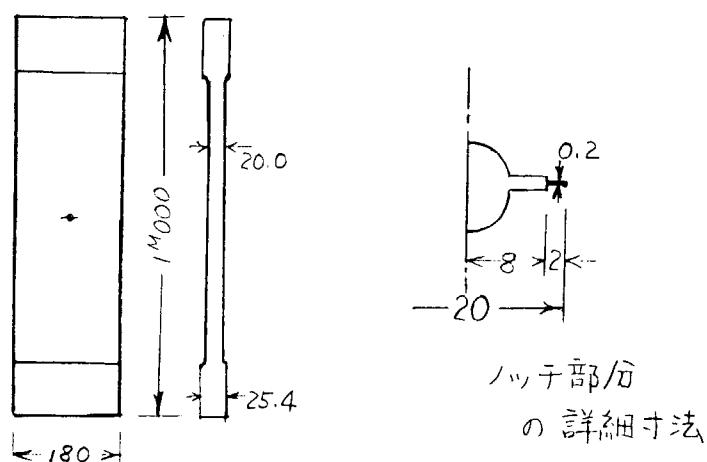


図 5.2.1.2 中央切欠つき試験片(母材)

表 5.2.1.2 KD32 病労亀裂伝播試験結果

試験片の種類	番号	計測寸法 (mm)			応力条件 (kg/mm ²)			応力比			繰返し数 ($\times 10^4$)		破断時の亀裂長さ (mm) $2a_t$	備考		
		板厚 t	板幅 2B	切欠長さ $2a_0$	上限 S_{max}	下限 S_{min}	範囲 ΔS	R	亀裂発生 $N_c (\ell=0.5)$		応力比 R	繰返し数 $\times 10^4$				
									応力比 R	繰返し数 $\times 10^4$						
母材	B-1	20.0	178	20.0	15.0	1.5	1.35	0.1	1.00	9.99	1.05					
	B-2	20.0	179	195	10.0	1.0	9.0	0.1	7.15	9.651	1.25					
	B-3	20.0	179	201	20.0	2.0	18.0	0.1	0.52	4.68	78					
	B-4	20.3	179	20.0	15.0	6.0	9.0	0.4	($\ell=0.8mm$)	5.15	38.03	103				
(予歪材)	PS-1	19.1	162.7	20.7	15.0	1.5	13.5	0.1	1.48	1.268	120			予歪 10% ($S=4.7 \text{ kg/mm}^2$)		
	PS-2	19.6	166.8	19.6	15.0	1.5	13.5	0.1	1.58	1.449	115			予歪 5% ($S=4.2 \text{ kg/mm}^2$)		
(400mm)	EW-1	25.3	389.0	31.7	10.0	1.0	9.0	0.1	1.80	2.929	275					
	EW-2	25.0	389.4	31.7	8.0	0.8	7.2	0.1	4.81	63.72	310					
	EW-3	25.0	390.0	31.4	15.0	1.5	13.5	0.1	0.42	8.81	230					

表 5.2.1.4 残留応力計測試験片と条件

試験片記号	荷重 (ton)	応力 (kg/mm ²)	繰返し速度 (cpm)	繰返し数
RS-1	—	—	—	—
RS-2	300	19.7	—	1
RS-3	170±130	11.2±8.5	9	8.9×10^4

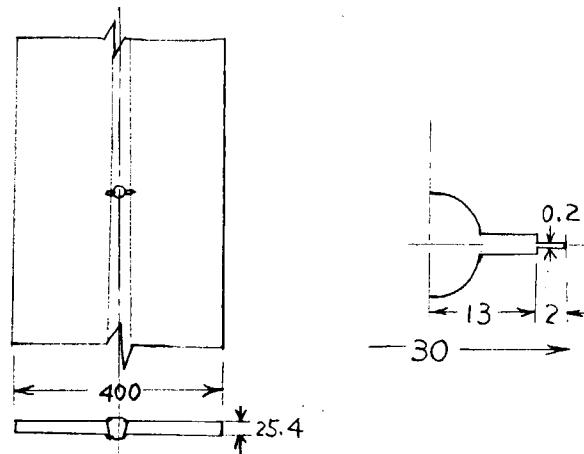


図 5.2.1.3 中央切欠つき縫接継手試験片

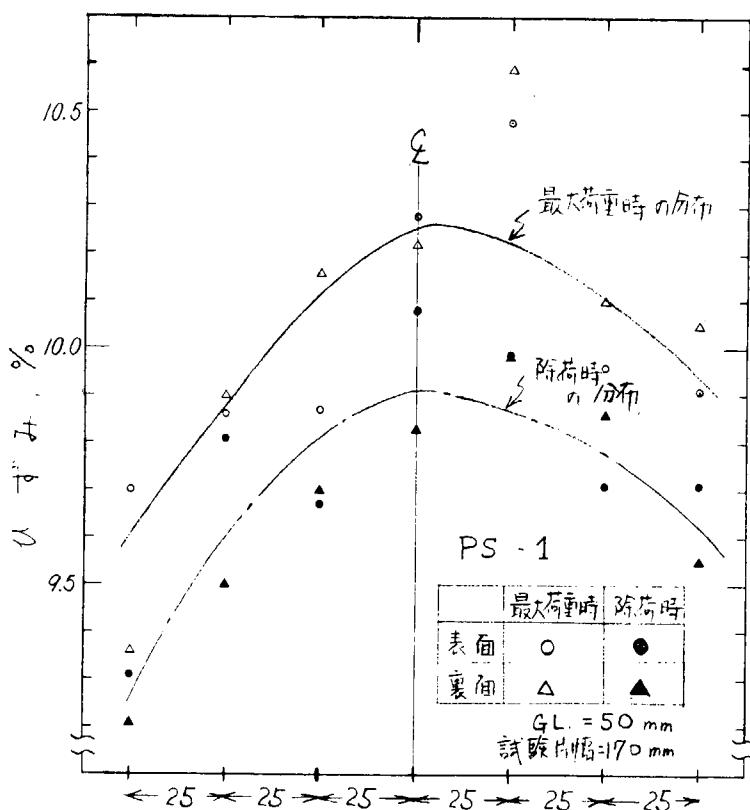


図 5.2.1.4(a) 母材試験片 予ひずみの分布 (10 %)

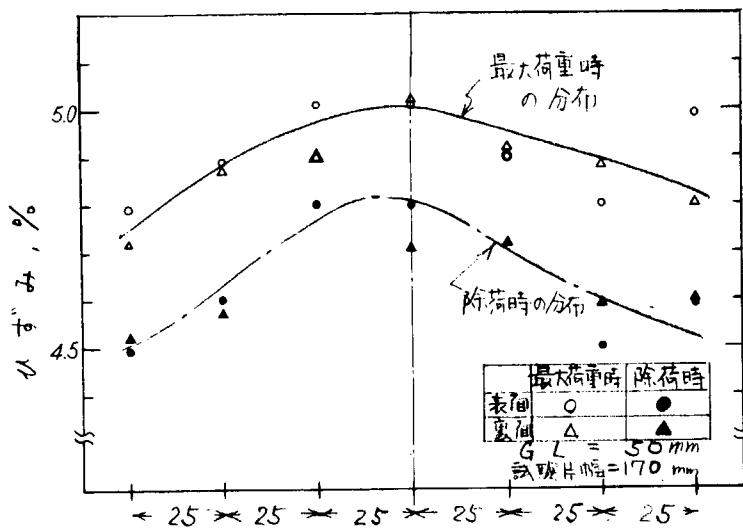


図 5.2.1.4.(b) 母材試験片予ひずみの分布(5%)

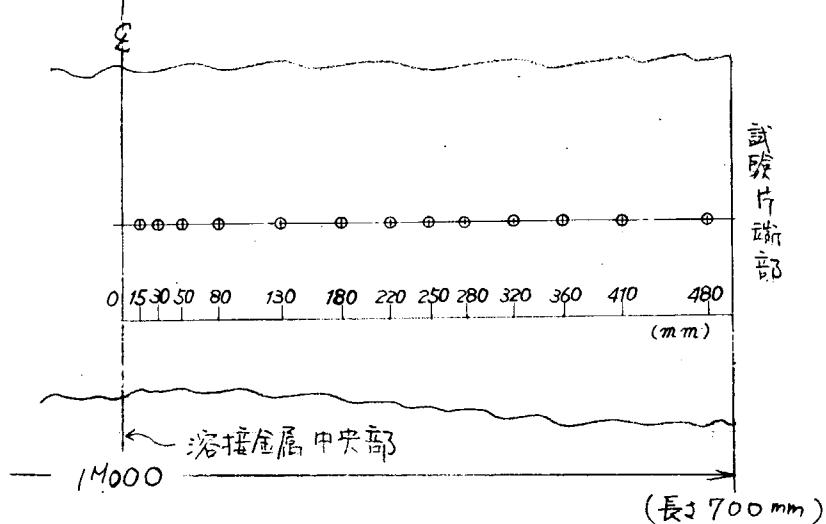


図 5.2.1.5 溶接残留応力計測用試験片(RS-1)のひずみゲージ貼付位置

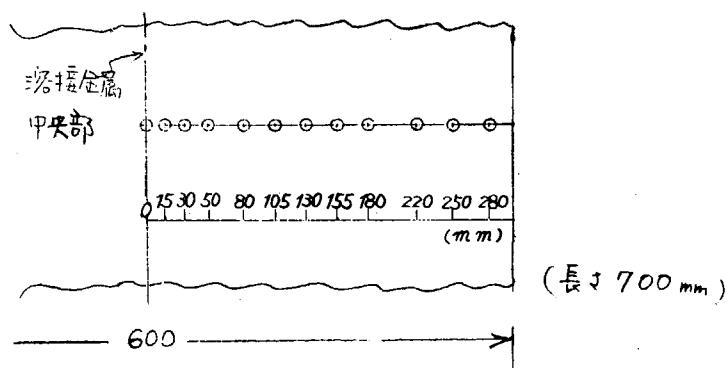
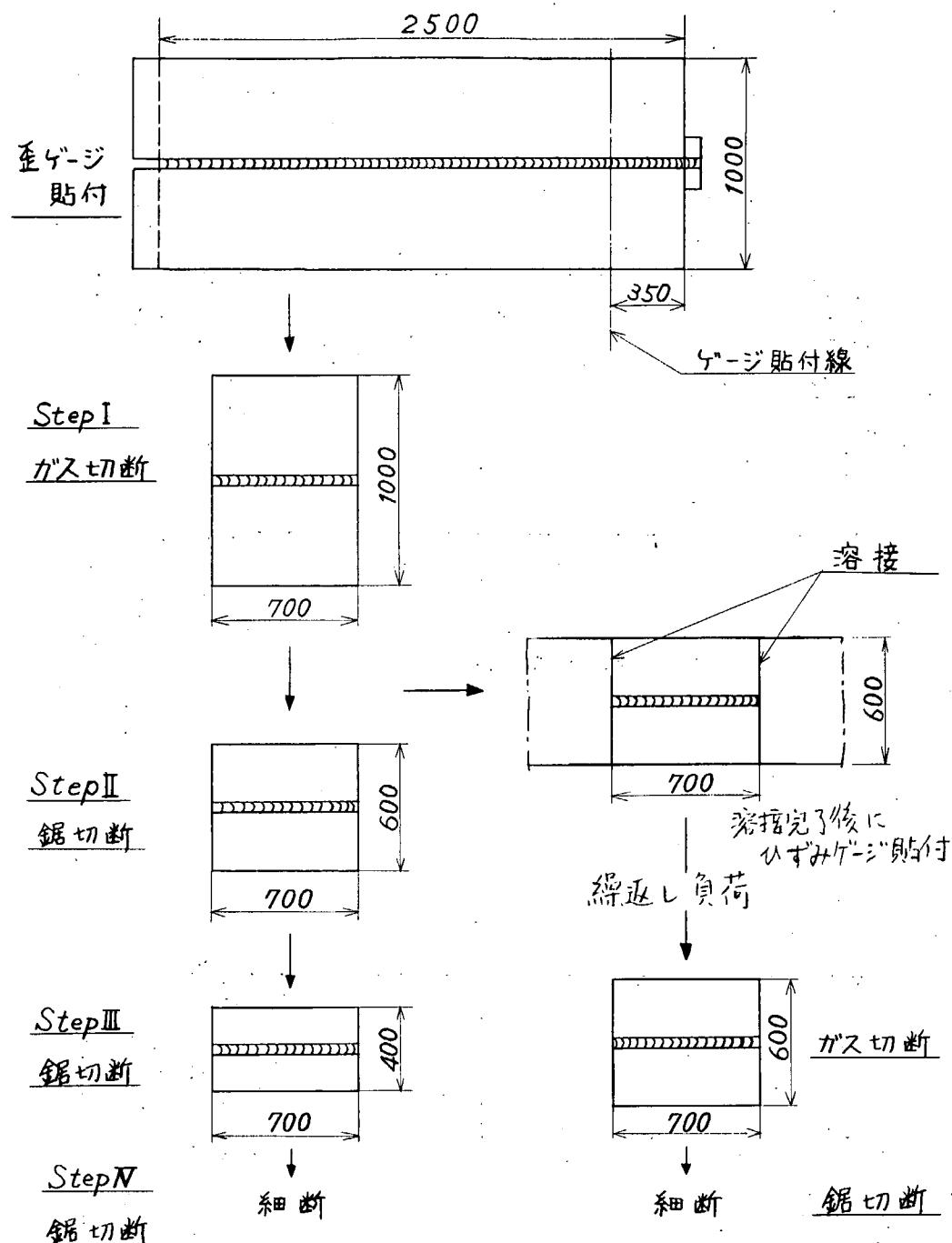


図 5.2.1.6 繰返し負荷後の残留応力分布計測(RS-2・3)用ひずみゲージ貼付位置



溶接残留応力測定用試験片 (RS-1)

線返し負荷後の残留応力測定用

試験片 (RS-2・3)

図 5.2.1.7 残留応力計測用試験片の応力解放手順

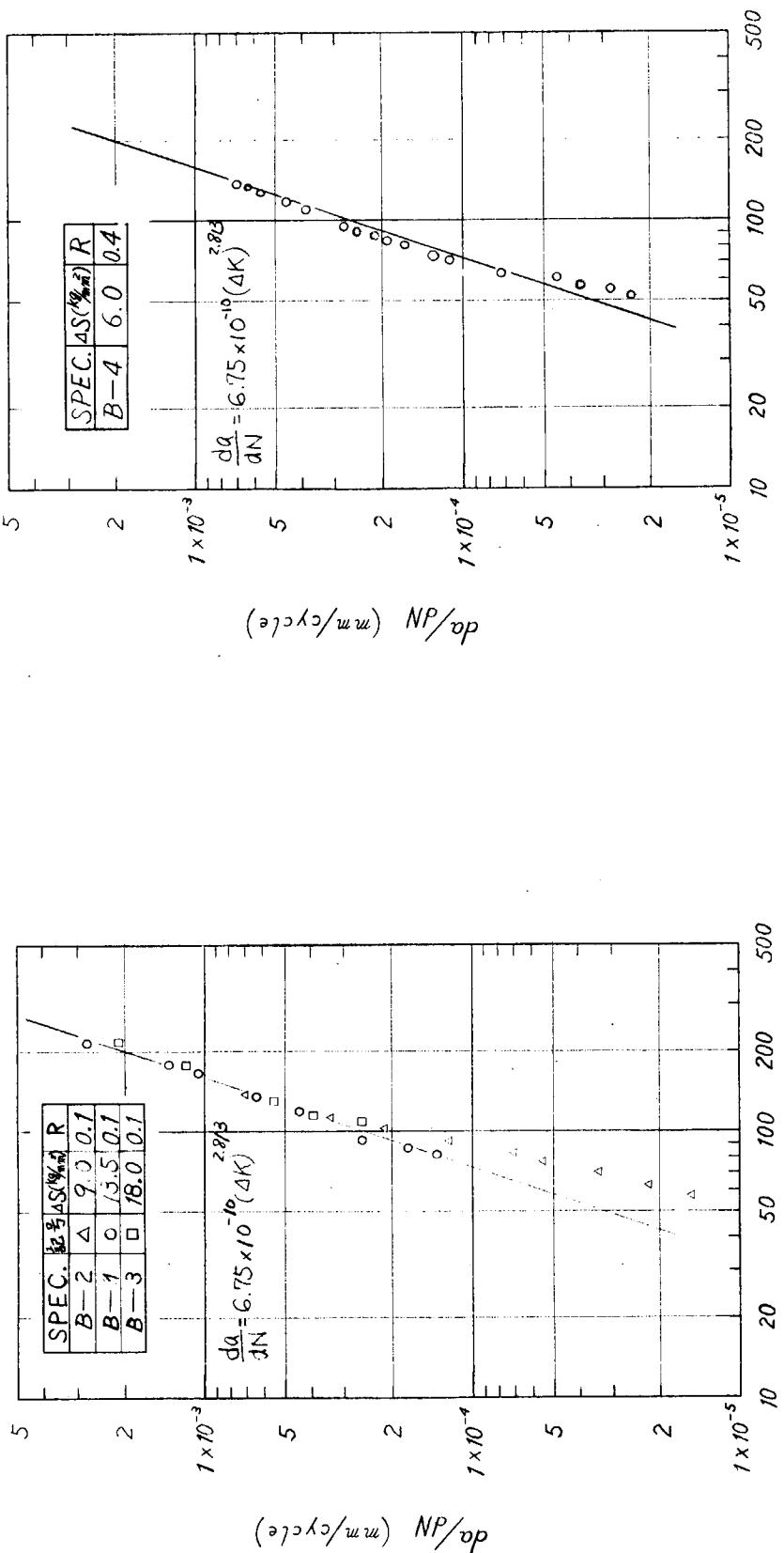


図 5.2.1.8.(a) $\Delta K (kg \cdot mm^{-3/2})$
母材試験片の疲労亀裂伝播特性 (R = 0.1)



図 5.2.1.8.(b) $\Delta K (kg \cdot mm^{-3/2})$
母材試験片の疲労亀裂伝播特性 (R = 0.4)

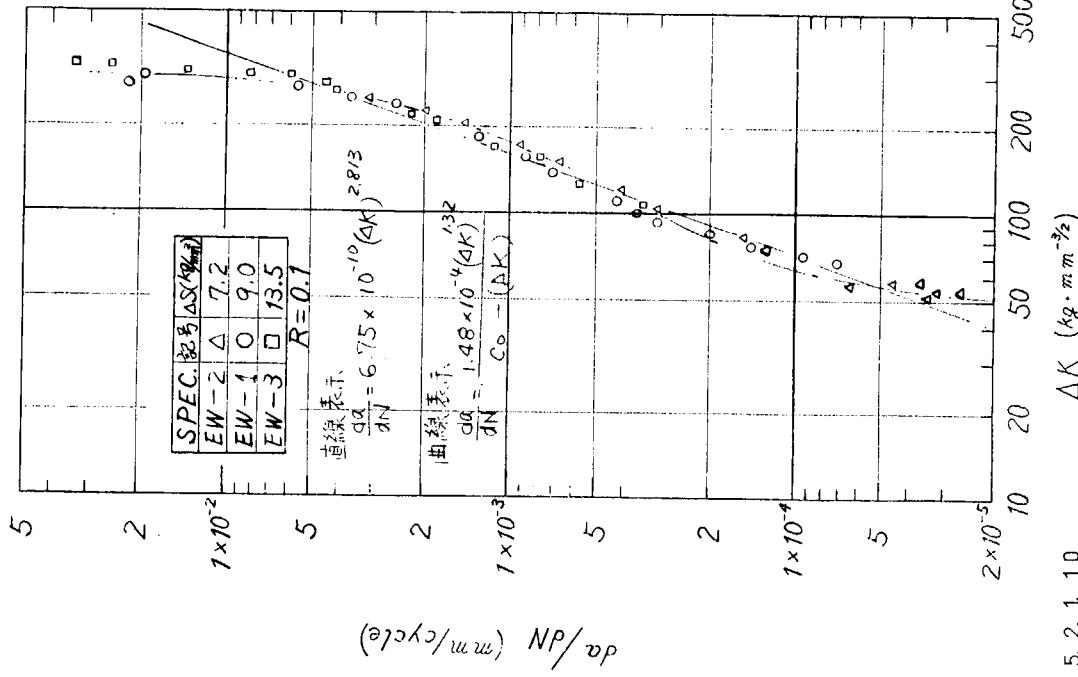


図 5.2.1.9 母材試験片の疲労亀裂伝播特性
母材試験片の疲労亀裂伝播特性(予ひがみ材)

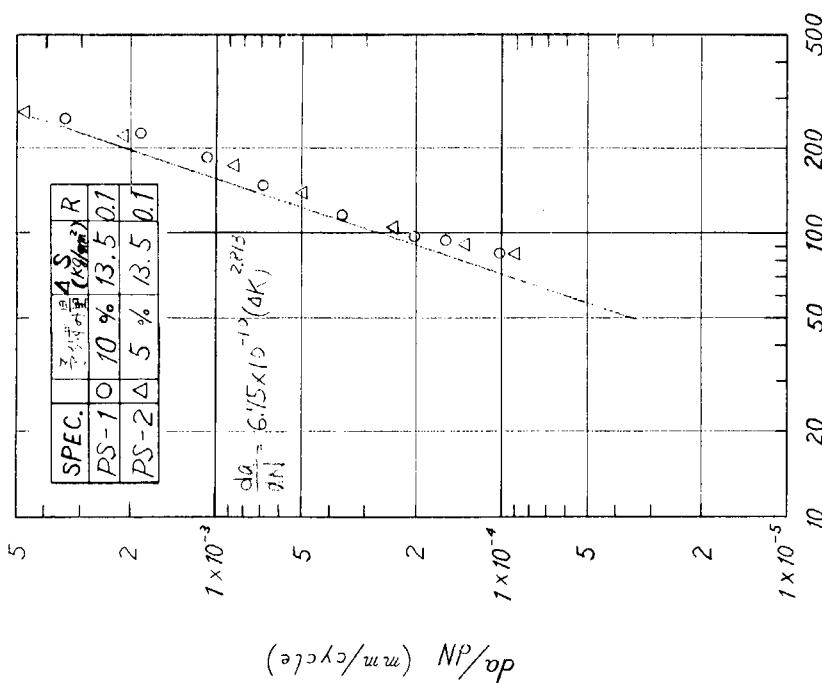


図 5.2.1.10 織接継手部材の疲労亀裂伝播特性
織接継手部材の疲労亀裂伝播特性

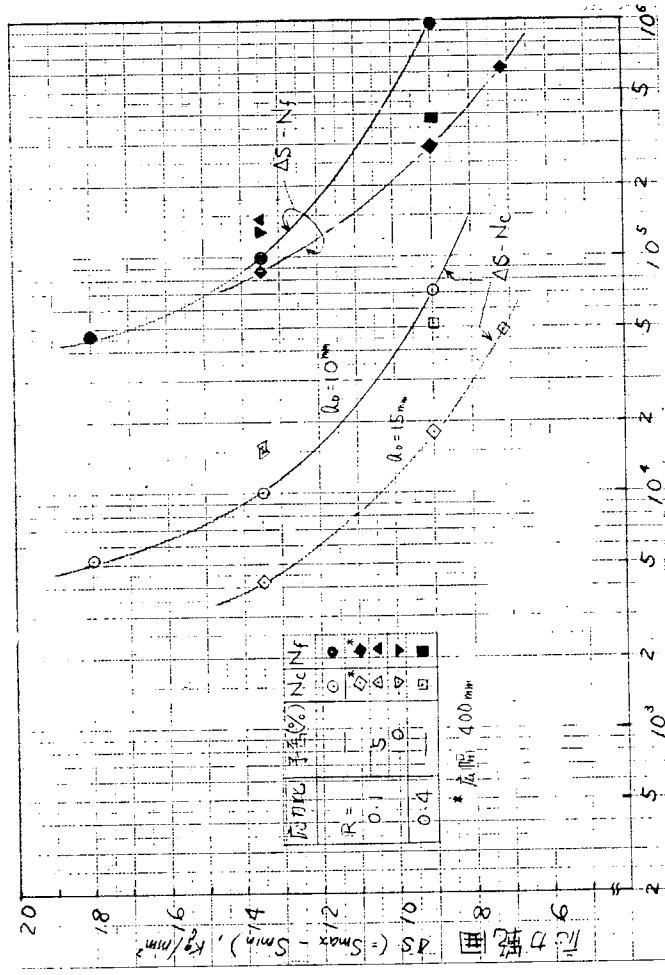
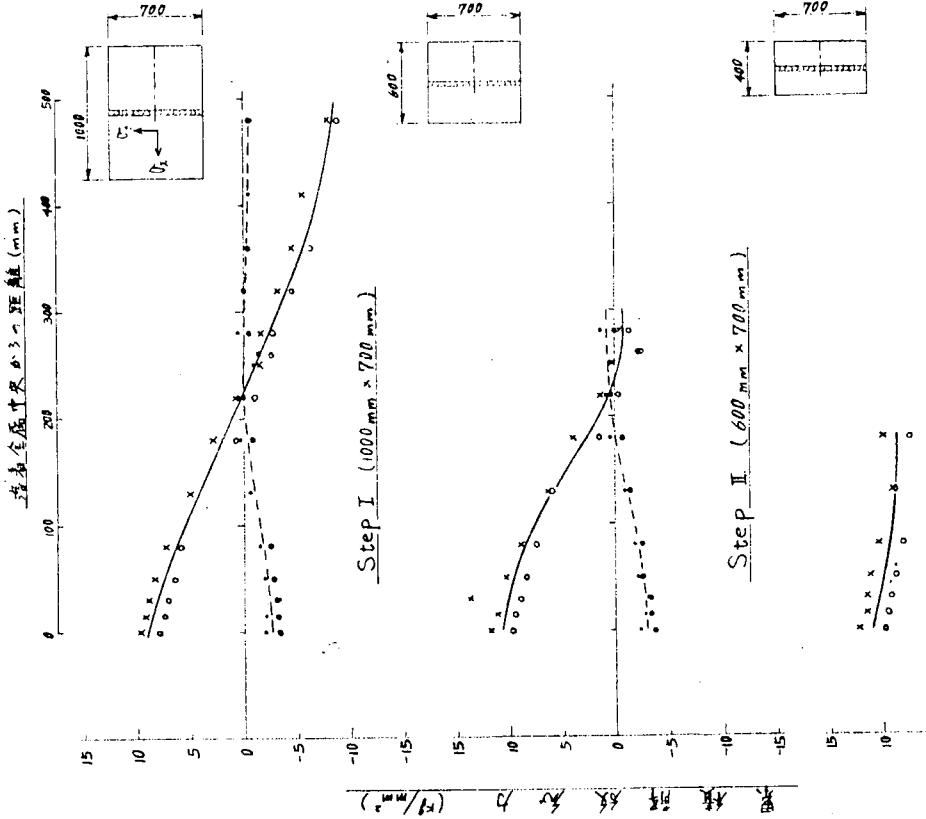


図 5.2.1.11 応力範囲 (A_s) と繰返し数 (N_c 、 N_t)

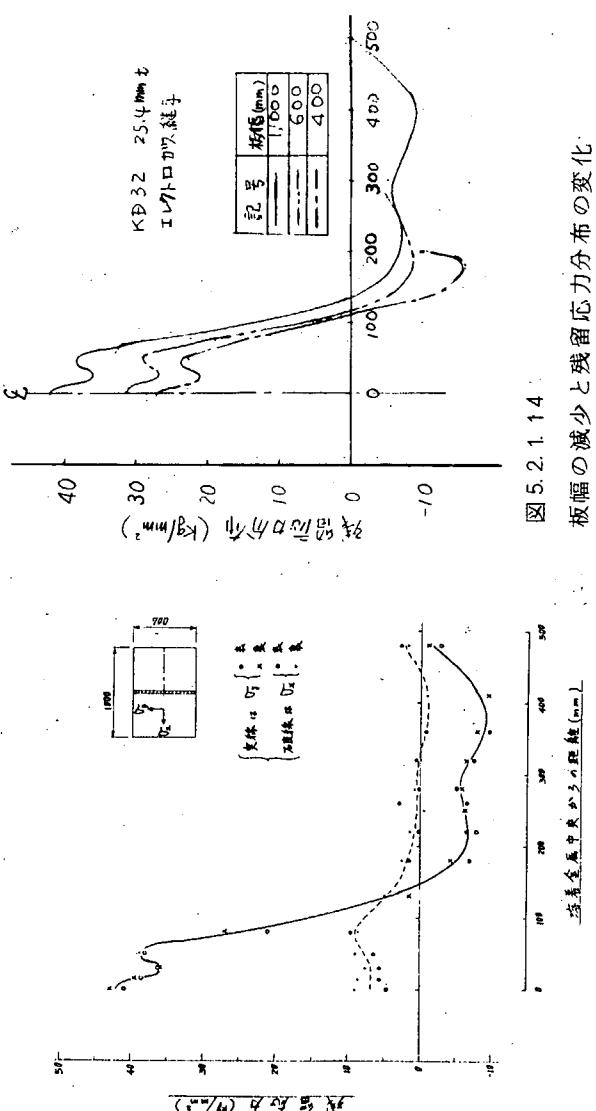


図 5.2.1.13

エレクトロガス溶接継手の残留応力分布
(板幅 1 M 000 × 長さ 700 mm)

図 5.2.1.14
板幅の減少と残留応力分布の変化

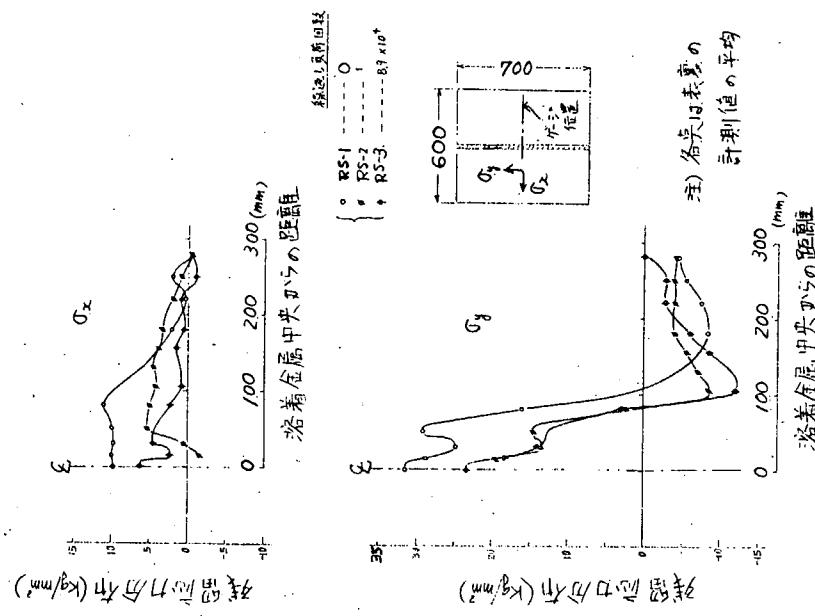


図 5.2.1.14

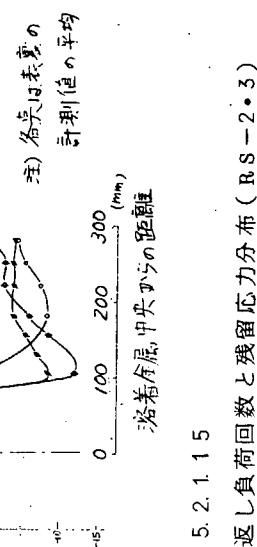


図 5.2.1.15
繰返し負荷回数と残留応力分布 (R.S-2・3)

5.2.2 複数表面欠陥からの疲労亀裂伝播試験

5.2.2.1 目的

溶接継手余盛上端部など、構造部材表面に隣接して存在する表面欠陥より発生する疲労亀裂の伝播試験を実施し、表面亀裂の成長・合体挙動について解析を加える。

5.2.2.2 試験内容

供試材として用いたのは、K32D鋼である。

試験片形状は、図5.2.2.1に示すもので、初期表面欠陥としては、試験片研削時に板面に高さ2mm程度の突起部を2本残し、それぞれの突起部に0.2mm厚のソー・カットを入れて疲労亀裂伝播のスターとした。ここで、 $2b_{01}$ 、 $2b_{02}$ はそれぞれの初期欠陥寸法 L_0 、 H_0 は欠陥間隔である。

試験は、10ton電磁共振型万能疲労試験機を用い、上支点間距離140mm、下支点間距離340mm、荷重振幅 $\Delta P=4\text{ton}$ の片振り4点曲げの載荷方法をとった。繰返し速度は100Hzとした。

応力の測定に際しては、2本の突起部をはさむようにして試験片長手方向に50mm、幅方向に70mmの間隔で表裏4枚ずつ歪ゲージを貼付し、疲労試験機検定器(FT-105A)を用いて計測を行なった。

荷重繰返しに伴う亀裂成長の測定にはピーチ・マーク法を用い、板表面で測定した亀裂長さに対応する亀裂の深さに対応する亀裂の深さを、破断後の破面より読み取っていった。

表5.2.2.1に試験条件の一覧表を示す。

5.2.2.3 試験結果および考察

図5.2.2.2は、表面亀裂形状の模式図を合体前と合体後のそれについて示したものであり、 a は亀裂深さ、 $2b$ は板表面における亀裂長さ、 b_{in} は互いに近づく方向への亀裂進展長さ、 b_{out} は外側方向への亀裂進展長さである。

図5.2.2.3～図5.2.2.12に各条件における板表面での亀裂長さの変化と、亀裂の平均半長 b を用いて整理した亀裂形状変化の様相を示す。なお、各図の条件表中、 $\Delta \sigma_B$ は曲げ応力振幅値(Kg/mm²)を、Rは応力比($\sigma_{min}/\sigma_{max}$)を示すものである。

図5.2.2.3と図5.2.2.4は、単一な表面欠陥よりの亀裂伝播を示すものであり、板表面における亀裂の成長は、初期欠陥を中心にしてほぼ対称であることが示されている。

図5.2.2.5～図5.2.2.8は、2個直列された表面欠陥よりの亀裂伝播を表わした図である。それぞれの欠陥より発生した亀裂が合体し、その後、単一な亀裂として成長していく過程が示されている。ここで合体前の成長過程においては、内側方向への亀裂伝播が外側方向への伝播に比較して加速される傾向にあり、亀裂合体に伴う相互干渉効果が認められる。また、亀裂形状変化図においては、合体後の亀裂成長は、あたかもある有限長さの単一な初期欠陥よりの亀裂形状変化と同様の過程をとどっていることが示されている。

図5.2.2.9～図5.2.2.12は、2個の表面欠陥が並列に配置されている場合の結果である。亀裂の内側方向への伝播は、各々の亀裂先端がすれ違った後より減速することが示され、また、ほぼこの時点より、内側方向へ伝播してきた亀裂は、相手の亀裂経路へ近づく方向へ曲がり始めることが認められた。亀裂形状変化図の中で矢印で示す位置は、内側方向の亀裂先端がすれ違った時点を示すものである。

ここで本試験より得られた結果を解析していくにあたり、表面欠陥より伝播する疲労亀裂形状変化に着目した解析モデルとして提案されている手法¹⁾を用いて検討を加えていくこととする。

図5.2.2.3(b)において、図中の亀裂形状変化を代表する直線は、次式によって表現される。

$$a/b = 0.95 - a/h$$

… … … … … (5.2.2.1)

図中、点線で示される関係は、試験片の板幅の影響により限定される亀裂形状変化の限界線であり、この点線の下側の領域には $a/b - a/h$ の関係は存在しない。初期欠陥寸法が小さい单一欠陥よりの亀裂形状変化を表わす関係式として(5.2.2.1)式を用いると、亀裂が板厚近くまで成長した場合に不都合が生じ、最終的に亀裂は板厚を貫通しない結果となるが、亀裂伝播過程においては、亀裂形状変化を表わす非常に簡便な関係であることより、伝播過程に対しても(5.2.2.1)式を用いて解析を進めていくこととする。

初期欠陥寸法がある有限長さ $2b_0$ である場合、亀裂形状変化は次式により表わされる。

$$a/\left[b^2 - b_0^2\right]^{1/2} = 0.95 - a/h \quad \dots \dots \dots \dots \quad (5.2.2.2)$$

亀裂合体後の形状変化については、合体後の亀裂が単一な表面欠陥より成長してきたものと想定し、亀裂深さ 0 に対応する亀裂長さとして \widetilde{b}_0 を仮定することにより、次式によって表現される。

$$a/\left[b^2 - \widetilde{b}_0^2\right]^{1/2} = 0.95 - a/h \quad \dots \dots \dots \dots \quad (5.2.2.3)$$

ここで、 \widetilde{b}_0 は次式で与えられる関係であり、

$$\widetilde{b}_0 = \left[0.75(0.95L_0 + 0.1b_0)^2 + b_0^2\right]^{1/2} \quad \dots \dots \dots \dots \quad (5.2.2.4)$$

初期欠陥寸法が不等長である場合は、次のように簡易的に置き換えることにより、合体後の亀裂形状変化を表現していくこととする。

$$b_0 = (b_{01} + b_{02})/2 \quad \dots \dots \dots \dots \quad (5.2.2.5)$$

図5.2.2.13は、单一欠陥よりの亀裂伝播ならびに合体前の亀裂伝播に対して(5.2.2.1)式と(5.2.2.2)式を用い、合体後の亀裂伝播に対して(5.2.2.3)式を用いて、実測された板表面での亀裂長さより亀裂深さを計算していった結果である。なお、初期欠陥が並列に配列されている場合には、亀裂の外側方向への進展長さ b_{out} を用いて計算した。各条件において、推定値と実測値の間にはほぼよい一致が認められる。

図5.2.2.14は、パラメーター $(\Delta\sigma_b/2)\sqrt{\pi b_{out}}$ を用いて、板表面における亀裂の外側方向への伝播速度を整理した結果である。図中、直線で示される関係は

$$a b_{out} / dN = C \left[(\Delta\sigma_b/2) \sqrt{\pi b_{out}} \right]^m \quad \dots \dots \dots \dots \quad (5.2.2.6)$$

$$C = 1.5 \times 10^{-8}, \quad m = 2 \quad \dots \dots \dots \dots \quad (5.2.2.7)$$

によって表現されるものである。

初期欠陥が直列に配列されている場合の亀裂合体前の伝播速度、ならびに並列配列で初期欠陥長が異なる場合の小さい方の欠陥よりの伝播速度(図中△印)は、その他の場合に比較して加速される傾向にあることが認められる。図中、点線で示される関係は、亀裂伝播に対する安全側の推定として、Cの値を試験結果より2倍程大きくとり

$$C = 3.0 \times 10^{-8}, \quad m = 2 \quad \dots \dots \dots \dots \quad (5.2.2.8)$$

とした結果である。したがって、板表面における亀裂伝播に対する安全側の表現式としては、(5.2.2.8)式の関係を用いることが有効であると考えられる。なお、図中☆印で示されるプロットは、直列に配列された欠陥より伝播する内側方向への亀裂伝播速度を参考のために示したものである。亀裂の相互干渉による加速効果の大きい合体前の内側方向への亀裂伝播に対しても(5.2.2.8)式の関係は安全側の推定となっていることが認められる。

5.2.2.4 まとめ

本試験より次のような結論が得られた。

- (1) 単一な表面欠陥より伝播する疲労亀裂の伝播過程での形状変化ならびに、2個直列に配列された表面欠陥より伝播する亀裂の合体前の形状変化は、曲げ荷重下において、亀裂の板表面での平均半長 b を用いた次式より表現される。

$$a / \left[b^2 - b_0^2 \right]^{1/2} = 0.95 - 2/h$$

初期欠陥が並列に配列されている場合には平均半長 b の代わりに、板表面での外側方向への亀裂伝播長さ b_{out} を用いることにより試験結果とよい一致が認められる。

- (2) 2個直列に配列された表面欠陥より伝播する亀裂の合体後の形状変化は、亀裂深さ 0 に対応する亀裂長さ $2\tilde{b}_0$ を仮定することにより、次式で与えられる。

$$a / \left[b^2 - \tilde{b}_0^2 \right]^{1/2} = 0.95 - a/h$$

$$\tilde{b}_0 = \left[0.75 \left\{ 0.95 L_0 + 0.05 (b_{01} + b_{02}) \right\}^2 + \left\{ (b_{01} + b_{02}) / 2 \right\}^2 \right]^{1/2}$$

- (3) 板表面での亀裂の外側方向への伝播速度はパラメータ $(4\sigma_b/2)\sqrt{\pi b_{out}}$ を用いることにより次式で表現される。

$$db_{out} / dN = C \left[(4\sigma_b/2) \sqrt{\pi b_{out}} \right]^m$$

ここで安全側の推定として C , m の値は次のように与えられる。

$$C = 3.0 \times 10^{-8}, \quad m = 2$$

なお、亀裂の相互干渉による加速効果の大きい直列に欠陥が配置された場合の内側方向への亀裂伝播に対しても、上記 C , m の値は安全側の推定となる。

- (4) 初期欠陥が並列に配列されている場合の板表面での亀裂の内側方向への伝播は、それぞれの亀裂先端がすれ違った後より減速する傾向にあり、またこの時点より互いに相手の亀裂経路へ近づく方向に曲がり始める。

参考文献

- 1) 川原・栗原：表面欠陥からの亀裂伝播（第2報）、日本造船学会論文集第141号、(1977)に掲載予定

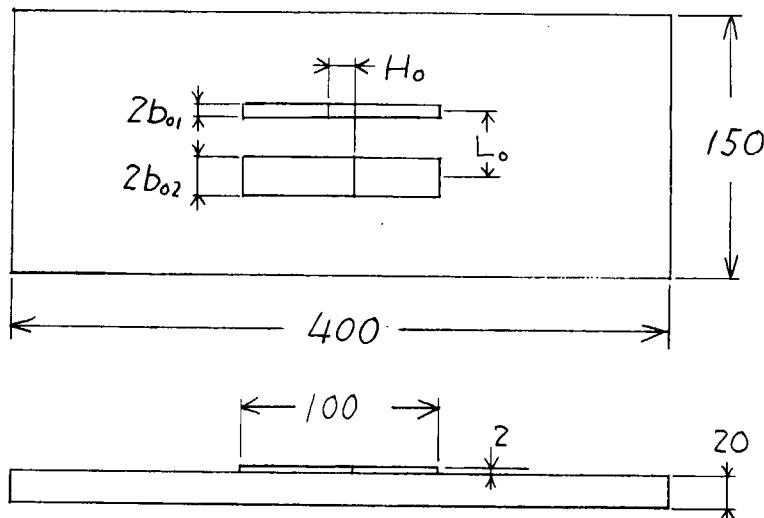


図 5.2.2.1 試験片形状

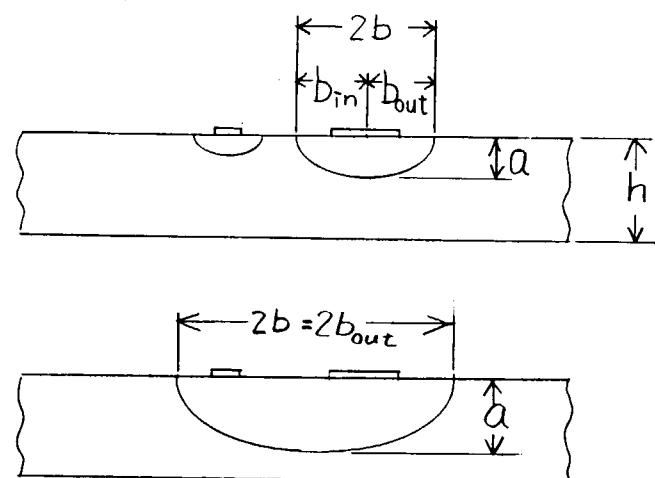


図 5.2.2.2 表面亀裂形状

表 5.2.2.1 試験条件

	欠陥寸法 (mm)		欠陥間隔 (mm)		供試体数	備考
	2b_01	2b_02	L_0	H_0		
单一欠陥	1	—	—	—	2	予備試験
	1	—	—	—	2	確認用
	30	—	—	—	2	
2 欠陥	1	1	20	0	2	直列配置
	1	2	20	0	2	
	1	3	20	0	2	
	1	5	20	0	2	
	1	1	20	5	2	並列配置
	1	1	20	10	2	
	1	2	20	5	2	
	1	3	20	5	2	

T.P.No.	$2b_{01}$	$2b_{02}$	L_0	H_0	$\Delta\sigma_B$	R
S-1	1	—	—	—	20.5	0.16

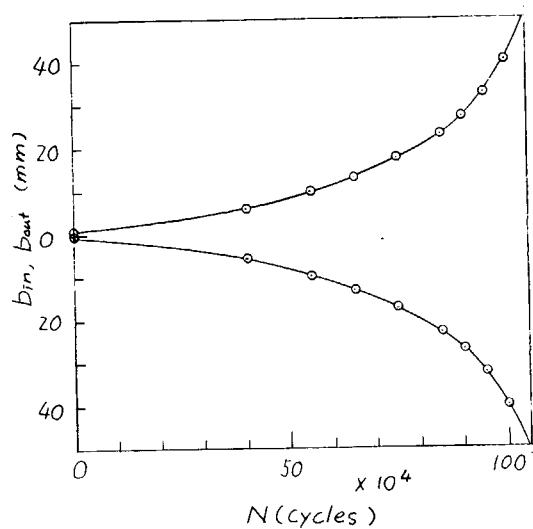


図 5. 2. 2. 3.(a)

板表面における亀裂成長線図

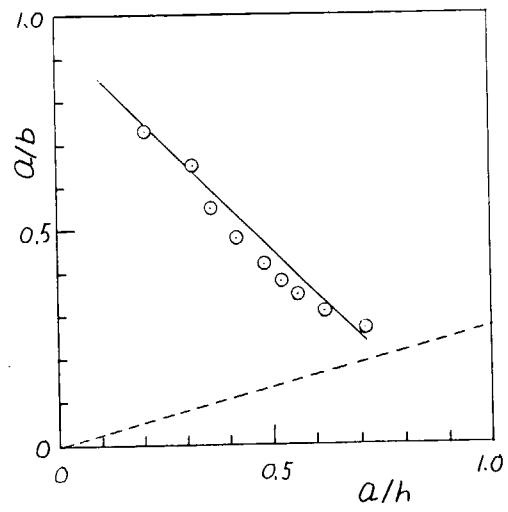


図 5. 2. 2. 3.(b)

亀裂形状変化図

T.P.No.	$2b_{01}$	$2b_{02}$	L_0	H_0	$\Delta\sigma_B$	R
S-2	30	—	—	—	18.4	0.22

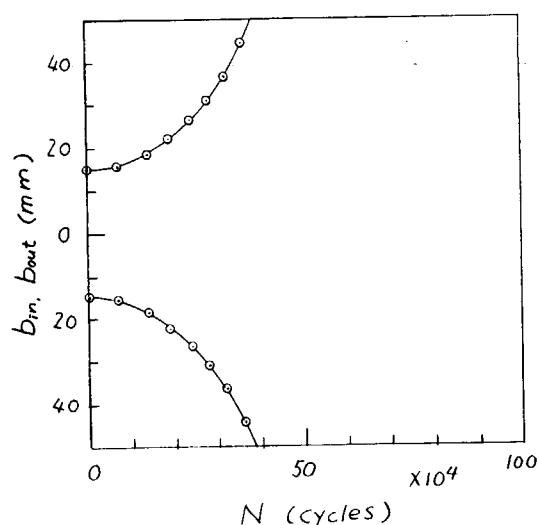


図 5. 2. 2. 4.(a)

板表面における亀裂成長線図

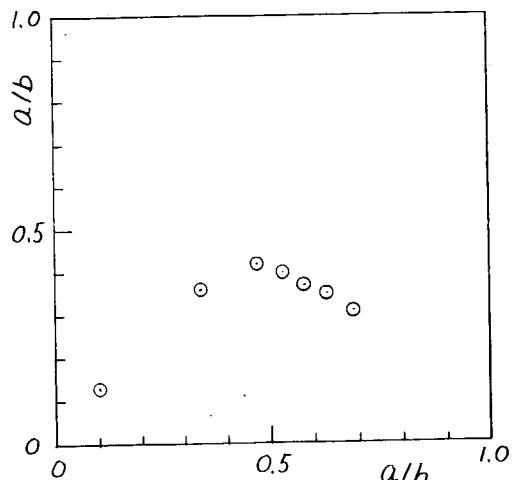


図 5. 2. 2. 4.(b)

亀裂形状変化図

T.P.No.	$2b_{01}$	$2b_{02}$	L_0	H_0	$\Delta\sigma_B$	R
DS-1	1	1	20	0	19.7	0.22

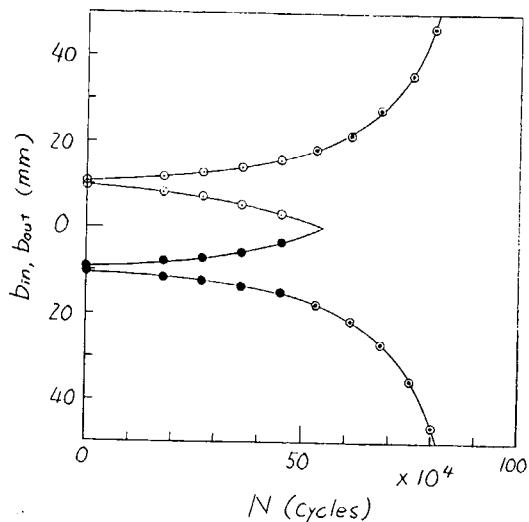


図 5.2.2.5.(a)

板表面における亀裂成長線図

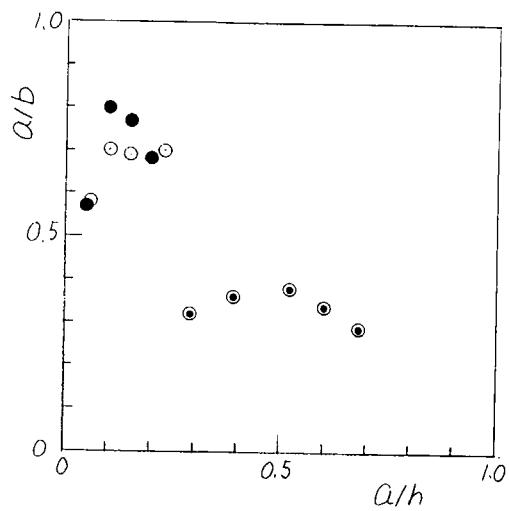


図 5.2.2.5.(b)

亀裂形状変化図

T.P.No.	$2b_{01}$	$2b_{02}$	L_0	H_0	$\Delta\sigma_B$	R
DS-2	1	2	20	0	19.6	0.23

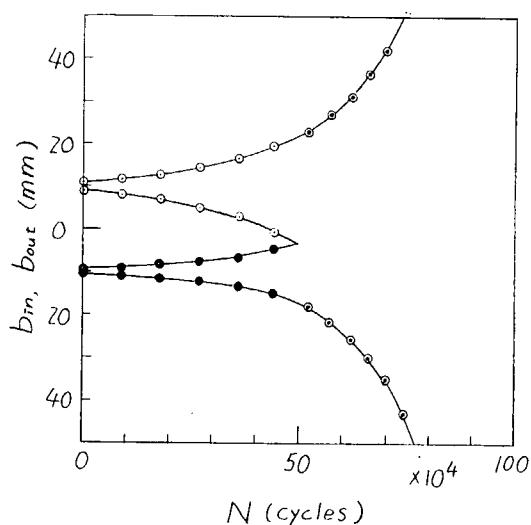


図 5.2.2.6.(a)

板表面における亀裂成長線図

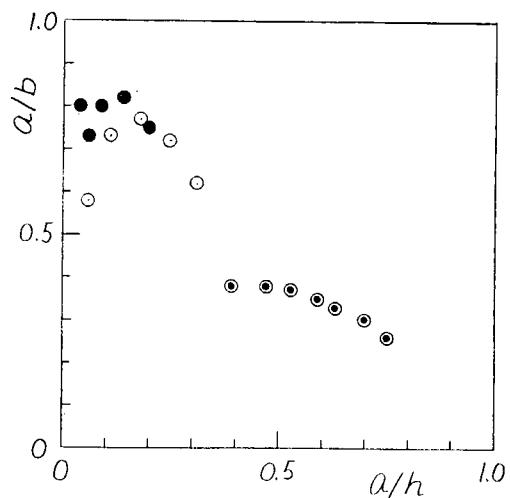


図 5.2.2.6.(b)

亀裂形状変化図

T.P.No.	$2b_{01}$	$2b_{02}$	L_0	H_0	$\Delta\sigma_B$	R
DS-3	1	3	20	0	20.3	0.42

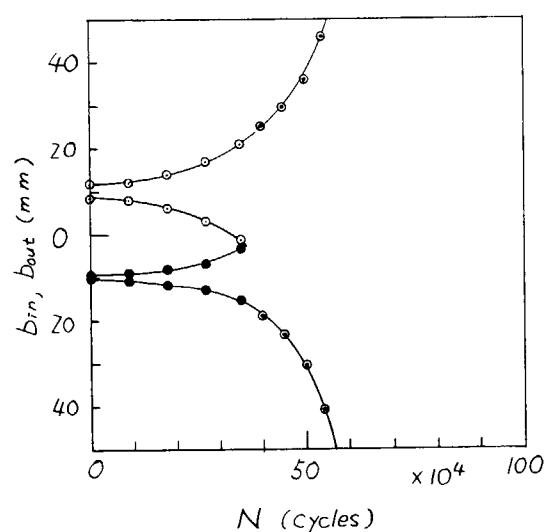


図 5.2.2.7.(a)

板表面における亀裂成長線図

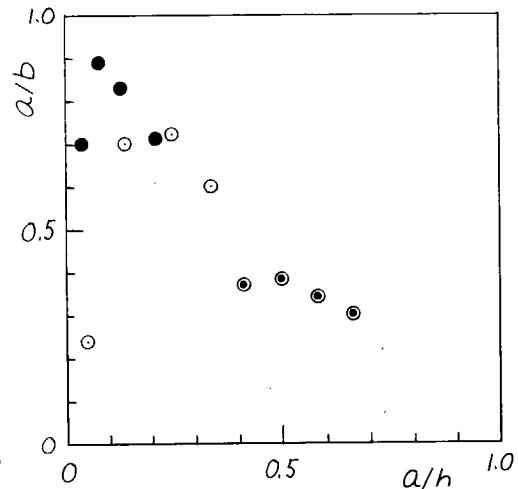


図 5.2.2.7.(b)

亀裂形状変化図

T.P.No.	$2b_{01}$	$2b_{02}$	L_0	H_0	$\Delta\sigma_B$	R
DS-4	1	5	20	0	19.3	0.21

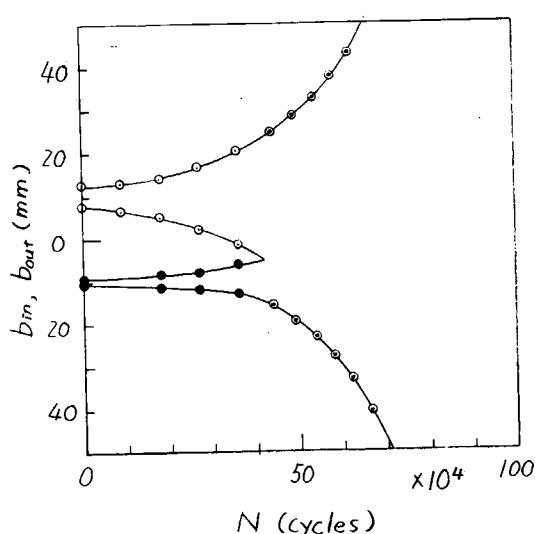


図 5.2.2.8.(a)

板表面における亀裂成長線図

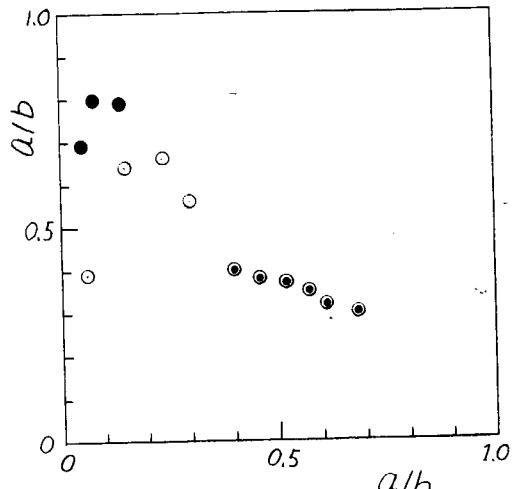


図 5.2.2.8.(b)

亀裂形状変化図

T.P.No.	Zb_{01}	Zb_{02}	L_0	H_0	$\Delta\sigma_B$	R
DP-1	1	1	20	5	20.0	0.21

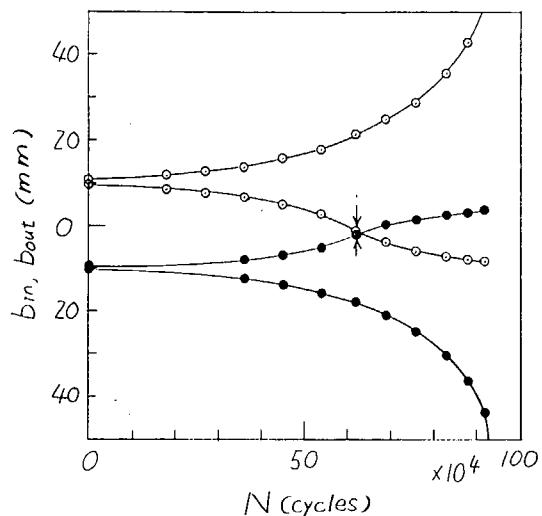


図 5.2.2.9.(a)

板表面における亀裂成長線図

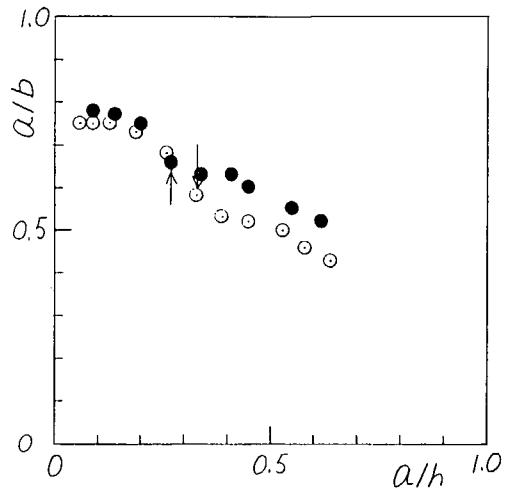


図 5.2.2.9.(b)

亀裂形状変化図

T.P.No.	Zb_{01}	Zb_{02}	L_0	H_0	$\Delta\sigma_B$	R
DP-2	1	1	20	10	19.6	0.24

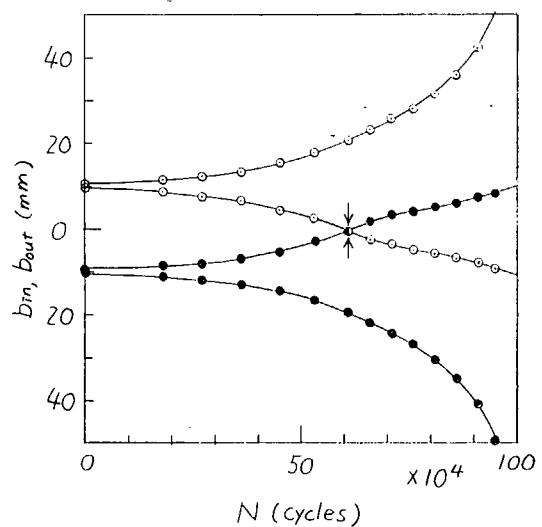


図 5.2.2.10.(a)

板表面における亀裂成長線図

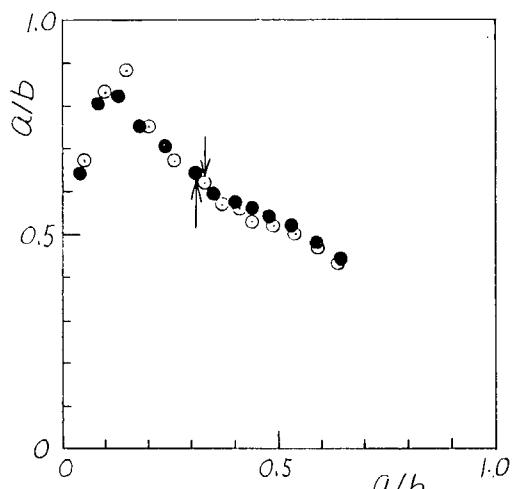


図 5.2.2.10.(b)

亀裂形状変化図

T.P.No.	Zb_{01}	Zb_{02}	L_0	H_0	$\Delta\sigma_B$	R
DP-3	1	2	20	5	19.9	0.19

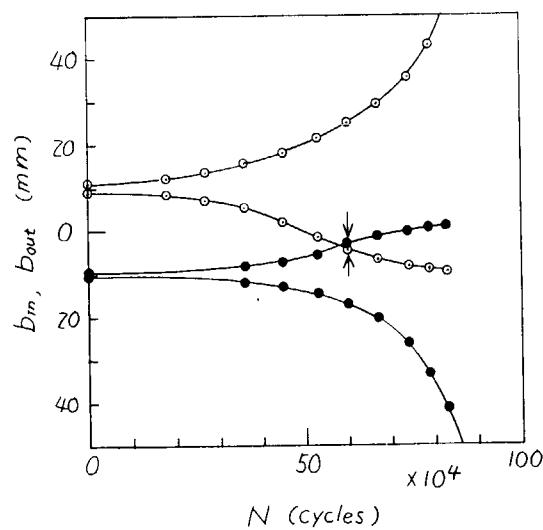


図 5.2.2.11.(a)

板表面における亀裂成長線図

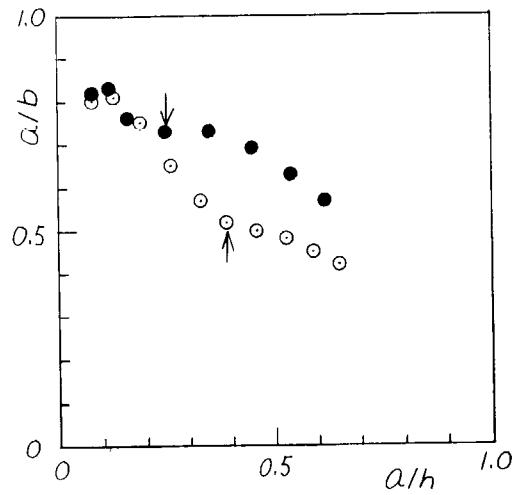


図 5.2.2.11.(b)

亀裂形状変化図

T.P.No.	Zb_{01}	Zb_{02}	L_0	H_0	$\Delta\sigma_B$	R
DP-4	1	3	20	5	19.6	0.25

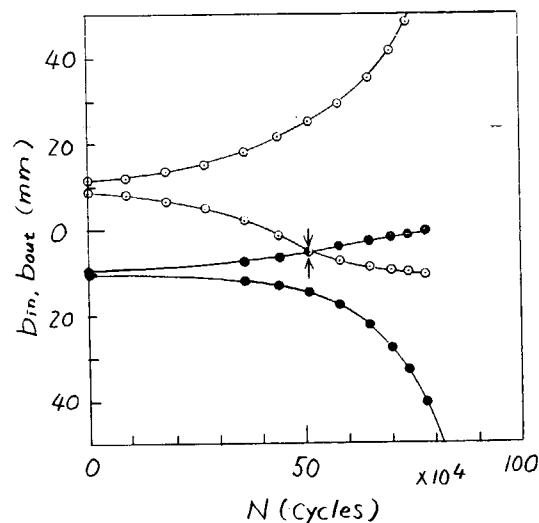


図 5.2.2.12.(a)

板表面における亀裂成長線図

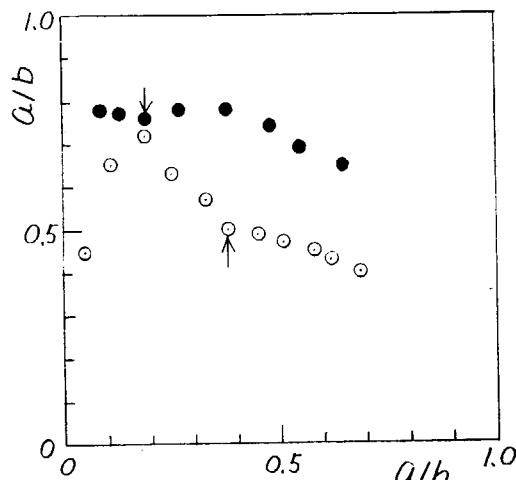


図 5.2.2.12.(b)

亀裂形状変化図

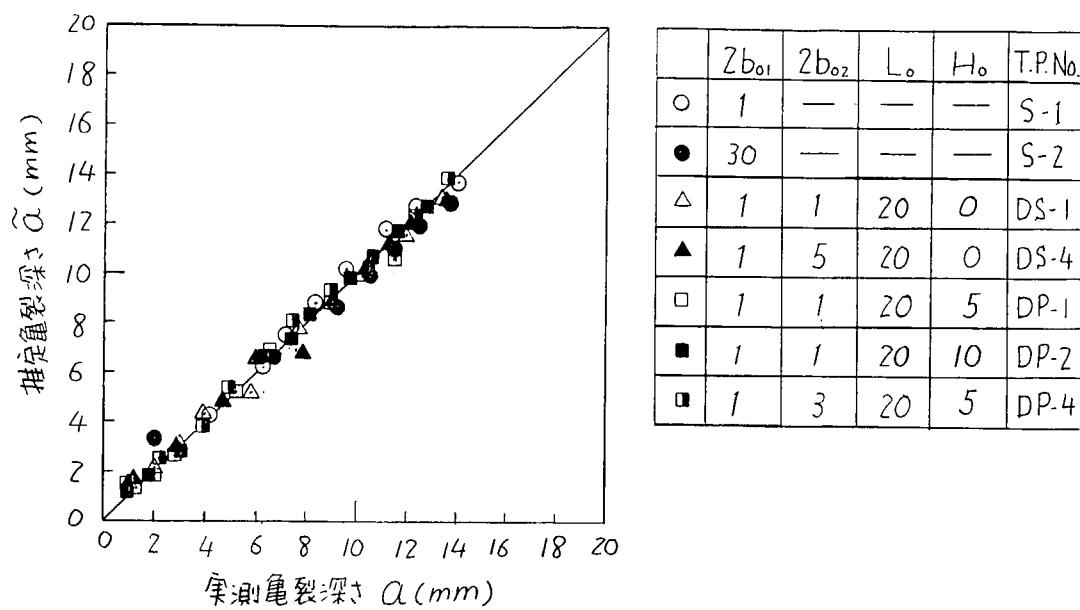


図 5.2.2.13 亀裂深さの実測値と推定値との相関

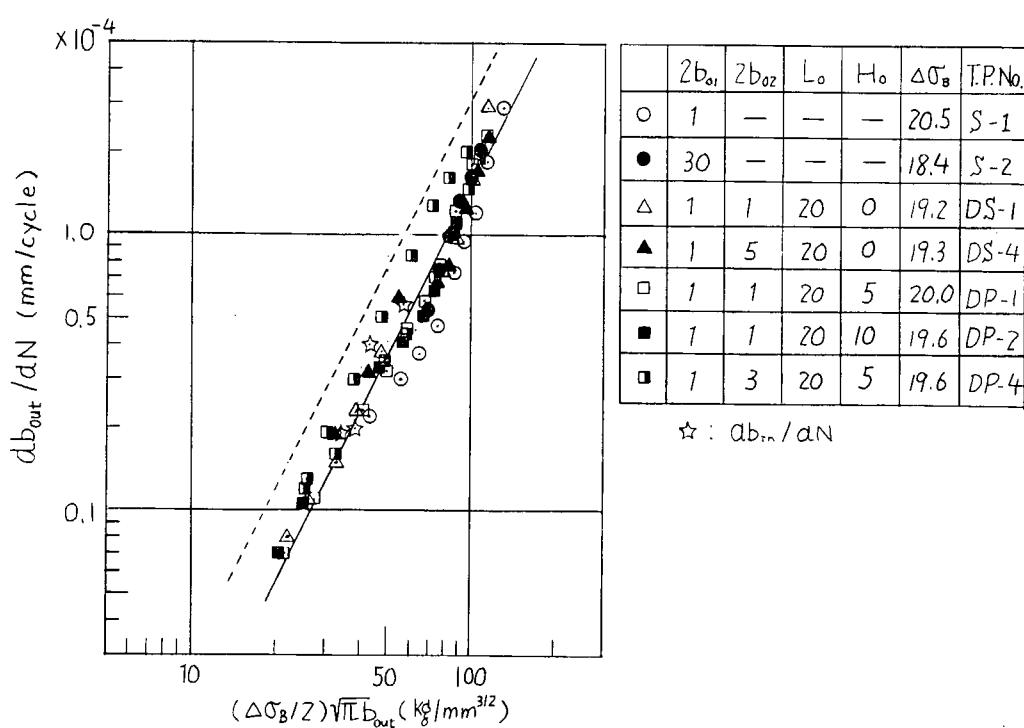


図 5.2.2.14 板表面での外側方向への亀裂伝播速度

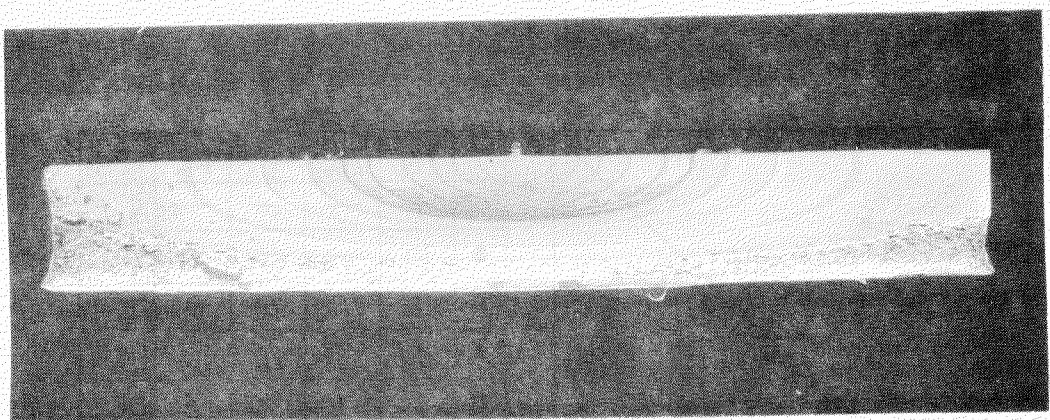


写真 5.2.2.1 破面写真 S-1 ($2b_0 = 1\text{mm}$)

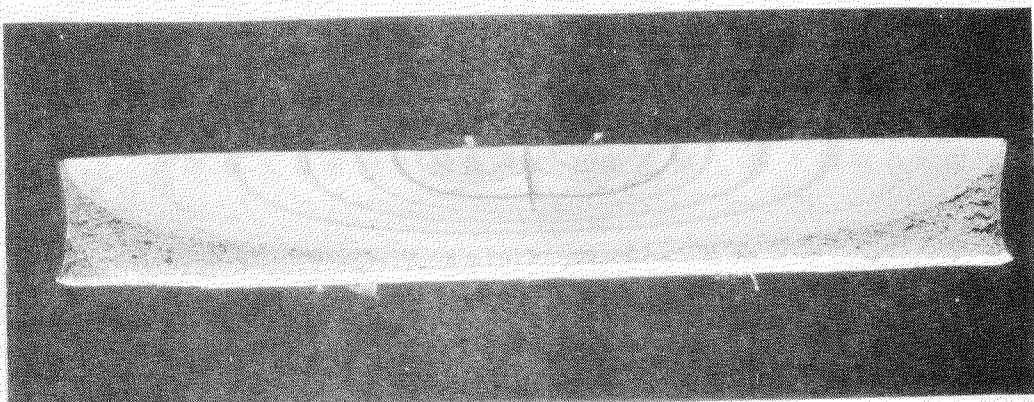


写真 5.2.2.2 破面写真 D.S-1 ($2b_{01} = 2b_{02} = 1\text{mm}$ 、 $L_0 = 20\text{mm}$)

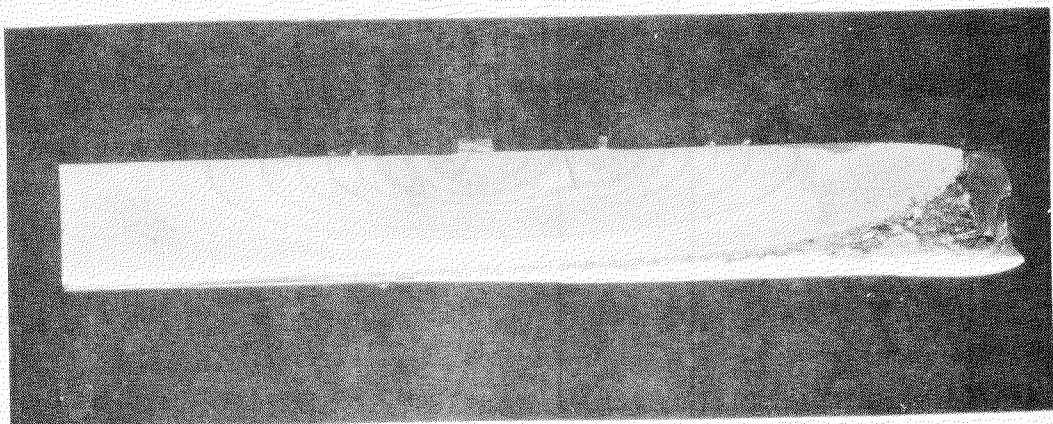


写真 5.2.2.3 破面写真 D.S-4 ($2b_{01} = 1\text{mm}$ 、 $2b_{02} = 5\text{mm}$ 、 $L_0 = 20\text{mm}$)

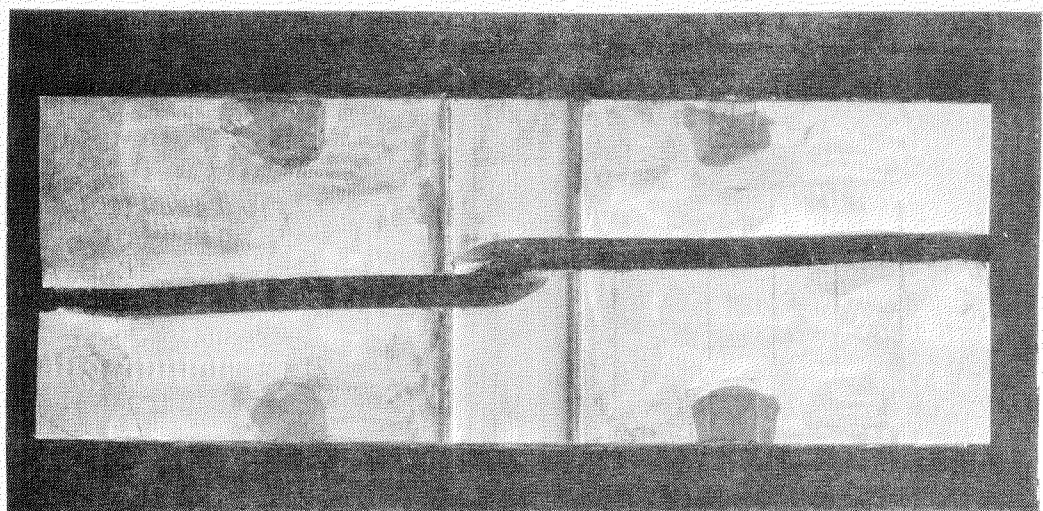
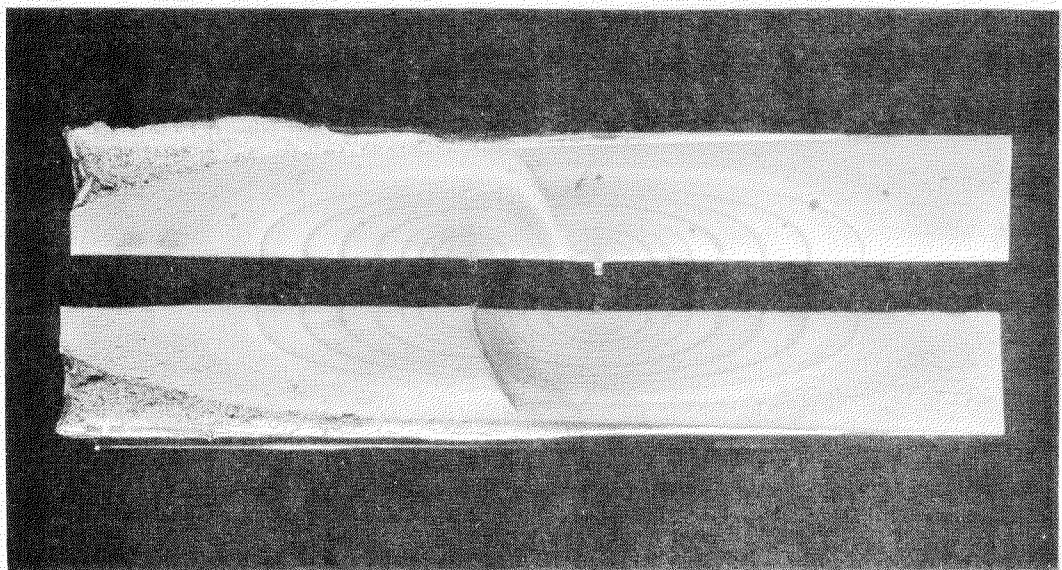


写真 5.2.2-4 破面写真 D.P. = 1

($2b_{01} = 2b_{02} = 1 \text{ mm}$, $L_0 = 20 \text{ mm}$, $H_0 = 5 \text{ mm}$)

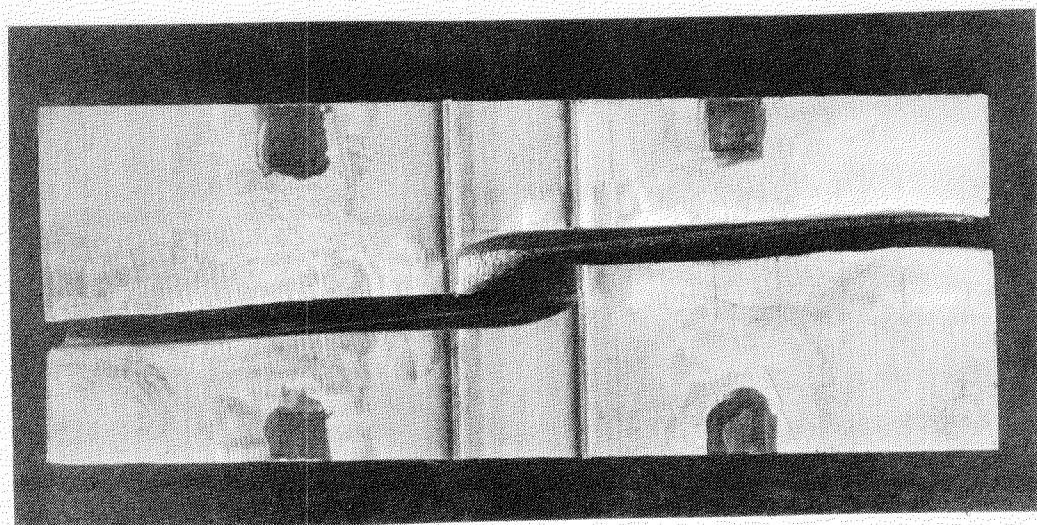
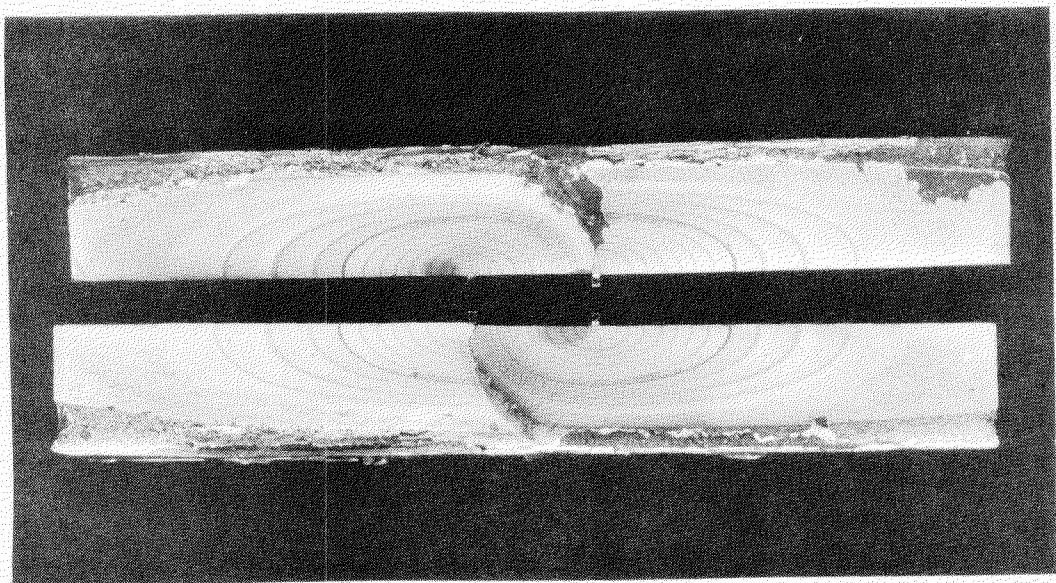


写真 5.2.2.5 破面写真 D.P.-2
($2b_{01} = 2$ $b_{02} = 1$ mm, $L_0 = 20$ mm, $H_0 = 10$ mm)

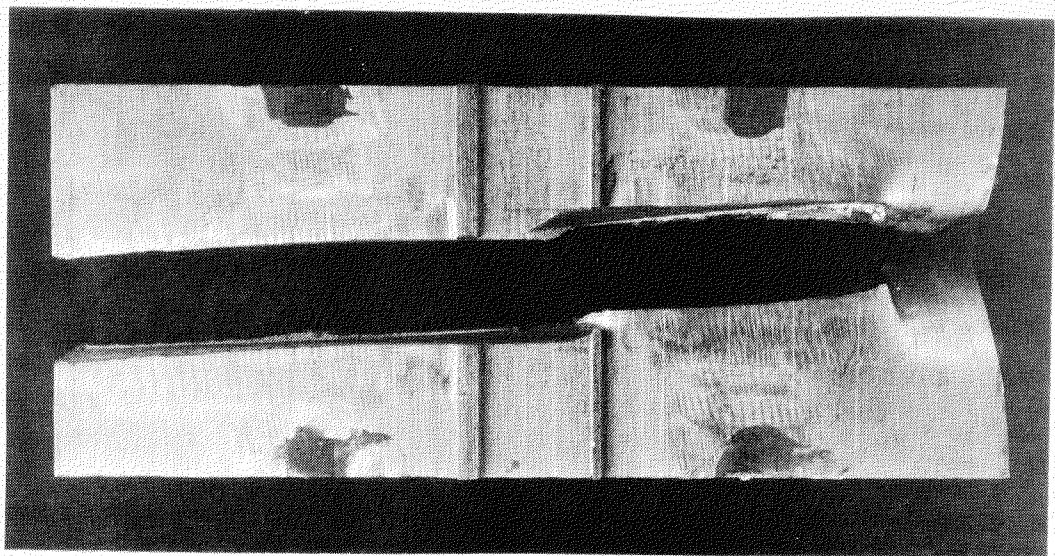
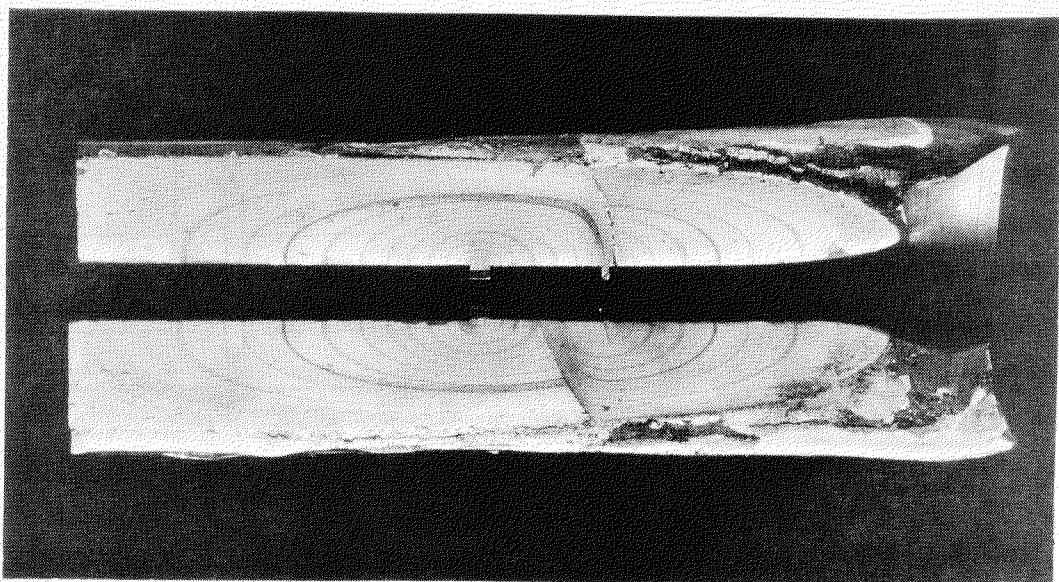


写真 5.2.2.6 破面写真 DP-4

($2b_{01} = 1\text{ mm}$, $2b_{02} = 3\text{ mm}$, $L_0 = 20\text{ mm}$, $H_0 = 5\text{ mm}$)

5.3隅肉溶接曲げ疲労試験

記号

P : 中央の縦板に加えた両振り荷重振幅 (ton)

b : 板幅。右図参照 (mm)

h : 板厚。右図参照 (mm)

ℓ : 支持点間距離。右図参照 (mm)

S_a : 公称応力振幅。両端を支持した梁の中央部に荷重 P を負荷した時の中央部の表面応力として次式で計算する (kg/mm²)。

$$S_a = \frac{3 P \ell}{2 b h^2}$$

C.L. : 表面亀裂長さ (mm)

N_c : 亀裂発生寿命、 N_c を定義する疲労亀裂長さは一定していないので亀裂長 (C.L.) を合わせ示した。なお H B 系列ではほとんど亀裂が幅方向端面より内部に入ったルート部から発生したので、この場合は N_c を定義できなかった

N_f : 破断寿命。トウ破断した試験片では横材が縦材から完全に破断した時の繰返し数とし、ルート破断したもののについては4箇所の溶接部のうち1つが破断した時の繰返し数とした。

ϵ_R : 測定した歪範囲 (10^{-6} mm/mm)

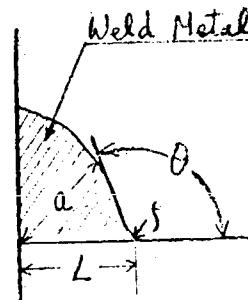
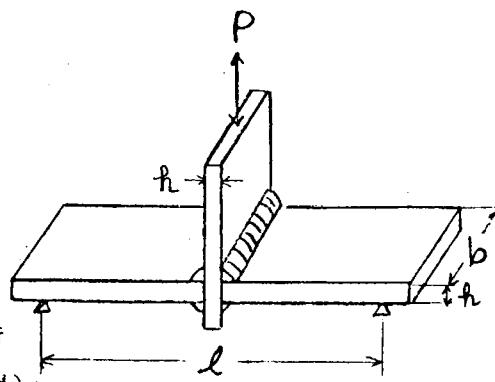
L : 脚長。右図参照 (mm)。

θ : コンタクトアングル。右図参照 (deg)

ρ : 止端半径。右図参照 (mm)。

d : アンダーカット深さ (mm)。

a : のど厚。右図参照 (mm)。



5.3.1 目的

50年度の研究において隅肉溶接部が板面外曲げ荷重をうける場合の疲労強度に及ぼす隅肉溶接脚長の影響を調べた。その結果、板厚25.4mmのKDK鋼では脚長10mmの試験片(FBB系列)はすべてルート破断しており、脚長15mmの試験片(FBA系列)はすべてトウ破断していた。このことから臨界脚長は10~15mmの間にあると考えられたので、この点の確認ならびに余盛形状およびアンダーカットが疲労強度に及ぼす影響を調べることを目的として、本年度の研究を行なった。

5.3.2 試験内容

(1) 試験片

溶接脚長を臨界脚長と予想される12.5mmとして、余盛形状を3種類(凸形、凹形、直線形)変えて、そのそれについて止端部にアンダーカットがないもの、約0.5mmのもの、約1mmのものを委員会供試材のKDK鋼板(板厚25.4mm)で作製した、各試験片の名称、本数、脚長、アンダーカット深さ、余盛形状を表5.3.1に示す。参考のため昨年度の試験片も合せ示す。試験片形状を図5.3.1に示す。なお、溶接継手は余盛のままで、アンダーカットの作成については、0.5mmおよび1mmを深さの目標値として、自然にかつ試験片の全幅に発生するよう溶接条件をコントロールすることとした。溶接条件の詳細を表5.3.2に示す。

(2) 荷重方法

十字型試験片用曲げ装置を用いてスパン400mmで支え、中央の縦板に正弦波形の外力を加え完全両振荷重制御で疲労試験を行なった。試験機は CU5 系列については 30 ton 油圧サーボ疲労試験機を行い、60～250 c.p.m で行なった。CU1、BU5、BU1 系列については 60 ton 油圧サーボ疲労試験機を行い 60～600 c.p.m で行なった。その他の系列については 20 ton ローゼンハウゼン型万能疲労試験機を行い 330～660 c.p.m で行なった。

(3) 計測方法

各試験片について横材の板幅中央で溶接止端より 4 mm、8 mm、12 mm の各位置にゲージ (G.L. = 0.3 mm) を貼付し、長手方向の歪を適当な繰返し数において測定した。BU5、BU1、CU5、CU1 系列では、さらに止端から 30 mm、60 mm の位置と反対側の横材の止端から 4 mm の位置で長手方向の歪を測定した。

試験前に各試験片の脚長、コンタクトアングル、止端半径、のど厚を測定するため、試験片を横から撮影し、拡大器 (3～4 倍) を用いてそれらを計測している。またアンダーカットつきのものについてはモデリングコンバウンドを用いて余盛止端部形状を複刻し破壊起点の形状寸法を測定している。

5.3.3 試験結果および考察

5.3.3.1 試験結果

各試験片の各部の形状寸法を表 5.3.3～表 5.3.5 に示す。各試験片について負荷荷重 P、公称応力 S_a 、 N_e 、 N_f 、破断箇所及び測定した歪 (代表点) を表 5.3.6～表 5.3.8 に示す。破断様式は主に次の二つの型に分けられる。

ルート破断型……… HB 系列、BU5-1

トウ破断型……… HA、HC、AU5、AU1、BU1、CU1、BU5-2～7、CU5-2～7

CU5-1 の試験片ではこれらの合体した破断型を示している。即ち板幅の約 3 分の 1 はルートから発生した亀裂が溶着金属中を伝播しており、残りの 3 分の 2 はトウから発生した亀裂が母材中を伝播して破断している。これらの破断様式の概略を図 5.3.2 に示す。また試験片の破断面のマクロ写真の代表例を写真 5.3.1～写真 5.3.3 に示す。

歪挙動の例として試験片 HA-3 で測定した歪範囲を図 5.3.3 に示す。この図からわかるように歪範囲は N_c 以前ではほとんど変化していないようである。なおアンダーカットがあるものではトウから 4 mm 点での歪範囲はアンダーカットの影響を受けて一般に低い値を示している。

$S_a - N_f$ 線図を図 5.3.4～図 5.3.6 に示す。

亀裂はトウ破断の場合ほとんど板幅の中央付近から発生している。ルート破断した試験片でも、試験の板幅の両側に亀裂側に亀裂が出たとほぼ同時に破断しており、板幅中央部では両側に亀裂が発生する前に亀裂がかなり進展していると考えられる。そのため、ルート破断した HB 系列では N_c を定義できなかった。そこでトウ破断した試験片についてのみ $S_a - N_f$ 線図を図 5.3.7～図 5.3.9 に示す。各系列の $S_a - N_f$ 、 $S_a - N_c$ 線図の中央線として表 5.3.9 に示す値が得られた。なお同表に昨年度の結果も合せ示す。

5.3.3.2 考察

1) ルート破断に及ぼすのど厚の影響

ルート破断した FBB、FBC、HB 系列および BU5-1 の $S_a - N_f$ 線図を図 5.3.10 に示す。ルート破断の場合、疲労強度に強く影響するのはのど厚と考えられるので、のど厚 a と $\log S_a$ 、 $\log N_f$ が線形関係にあると仮定して多変量解析した結果次の式が得られた。

$$S_a = 10^{1.757 + 0.0585a} \times N_f^{-0.1739} \quad \dots \dots \dots \dots \quad (5.3.1)$$

なお、昨年度の FBB、FBC 系列では、個々ののど厚データがなかったので、同一系列のもので残存する試験

片の寸法で代用した。その寸法は FBB で $a = 6.6\text{mm}$ 、FBC で $a = 4.1\text{mm}$ である。

2) トウ破断に及ぼすコンタクトアングルの影響

アンダーカットがない系列でトウ破断した昨年度の FBA 系列の $S_a - N_c$ 線図、 $S_a - N_f$ 線図をそれぞれ図 5.3.7、図 5.3.4 に合せ示す。トウ破断する場合コンタクトアングルが疲労強度に影響すると考えられる。そこで $\log N$ 、 $\log S_a$ 、コンタクトアングル θ が線形関係にあると仮定して HA、HC、FBA 系列の実験結果を多変量解析した結果 N_c 、 N_f について次式が得られた。

$$S_a = 10^{2.057 + 0.00292\theta} \times N_c^{-0.2364} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \quad (5.3.2)$$

$$S_a = 10^{2.453 + 0.00178\theta} \times N_f^{-0.2678} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \quad (5.3.3)$$

なお、昨年度の FBA 系列のコンタクトアングルは残存する試験片の寸法で代用した。その値は $\theta = 150^\circ$ である。

3) 疲労強度に及ぼすアンダーカットの影響

余盛形状が同じものでアンダーカットがあるものとないものの 5×10^4 と 10^6 回寿命における疲労強度を比較すると図 5.3.11 のようになる。これからわかるように、余盛形状が凸形及び直線形の場合はアンダーカットにより疲労強度が著しく低下するが、余盛形状が凹形の場合は低下していない。従って止端部にアンダーカット等の欠陥がある場合には余盛形状が凹形であることが望ましいと考えられる。また、アンダーカット深さ 0.5mm の系列と 1.0mm の系列を比較すると 1.0mm の方が疲労強度は高くなっているが、これはアンダーカットを自然発生的に作成したため図 5.3.12 にあるように必ずしも 0.5mm 、 1.0mm 深さとなっていないためであると考える。

5.3.4 まとめ

1) トウ破断とルート破断の臨界となる脚長はほぼ 12.5mm で、この脚長ではアンダーカットの有無、コンタクトアングルの大きさ等によって破断様式が変化している。

2) のど厚 $4.1\text{mm} \sim 7.1\text{mm}$ の範囲ではルート破断の場合の疲労強度とのど厚 a の関係が次式で与えられた。

$$S_a = 10^{1.757 + 0.0585a} \times N_f^{-0.139}$$

3) コンタクトアングル θ が $110^\circ \sim 150^\circ$ の範囲でトウ破断の場合のクラック発生寿命 N_c と θ の関係が次式で与えられた。

$$S_a = 10^{2.057 + 0.00292\theta} \times N_c^{-0.2364}$$

4) コンタクトアングル θ が $110^\circ \sim 150^\circ$ の範囲でトウ破断の場合の破断寿命と θ の関係が次式で与えられた。

$$S_a = 10^{2.453 + 0.00178\theta} \times N_f^{-0.2678}$$

5) トウ破断とルート破断の臨界脚長と考えられる 12.5mm の脚長の場合、アンダーカットの影響は、余盛形状が凸形及び直線形の場合顕著で、凹形の場合全くなかった。

表 5.3.1 隅肉溶接曲げ疲労試験内容一覧

	名 称	本 数	脚 長 設計値 / 実寸法	アンダーカット 深さ(mm) 1)	余盛形状
本年度	HA - 1~6	6	12.5 / 15.3	—	凸
	HB - 1~7	7	12.5 / 12.9	—	凹
	HC - 1~6	6	12.5 / 13.3	—	直 線
	AU5 - 1~5	5	12.5 / 14.6	0.5	凸
	BU5 - 1~7	7	12.5 / 11.1	0.5	凹
	CU5 - 1~7	7	12.5 / 13.7	0.5	直 線
	AU1 - 1~5	5	12.5 / 13.6	1.0	凸
	BU1 - 1~7	7	12.5 / 11.2	1.0	凹
	CU1 - 1~7	7	12.5 / 12.1	1.0	直 線
昨年度	FBA - 1~7	7	15.0 / 16.9	—	直 線
	FBB - 1~7	7	10.0 / 11.0	—	直 線
	FBC - 1~7	7	5.0 / 6.5	—	直 線
	FBK - 1~7	7	K開先開先角 ルート面 45° 6 mm	—	直 線

1) 設計値

表 5.3.2 溶接条件

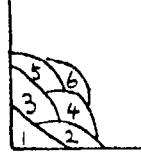
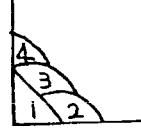
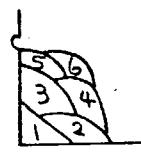
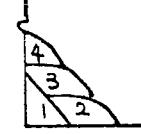
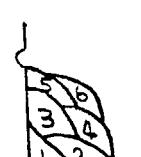
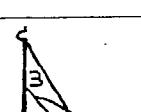
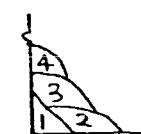
試験片	積層法	累層	棒径	電流(A)	電圧(V)	速度(cm/min)
HA		1	5	220	27	21
		2	〃	〃	〃	20
		3	〃	〃	〃	24
		4	〃	〃	〃	20
		5	〃	〃	〃	20
		6	4	160	24	42
HB		1	5	220	27	21
		2	〃	〃	〃	39
		3	〃	〃	〃	39
HC		1	5	220	27	21
		2	〃	〃	〃	20
		3	〃	〃	〃	22
		4	〃	〃	〃	27
AU5		1	5	220	27	21
		2	〃	〃	〃	20
		3	〃	〃	〃	24
		4	〃	〃	〃	20
		5	4	200	26	25
		6	〃	160	24	40
BU5		1	5	220	27	21
		2	〃	〃	〃	39
		3	4	250	28	40
CU5		1	5	220	27	21
		2	〃	〃	〃	20
		3	〃	〃	〃	22
		4	4	200	26	33
AU1		1	5	220	27	21
		2	〃	〃	〃	21
		3	〃	〃	〃	20
		4	〃	〃	〃	24
		5	〃	〃	〃	20
		6	4	180	25	42
BU1		1	5	220	27	21
		2	〃	〃	〃	40
		3	〃	280	32	42
CU1		1	5	230	27.5	22
		2	〃	〃	〃	30
		3	〃	〃	〃	23
		4	4	220	27	40

表 5.3.3 試験片形状寸法 (HA、HB、HC系列)

試験片名	b (mm)	h (mm)	ℓ (mm)	破断した点の脚長 (mm)	破断した点の止端角 (deg)	破断した点の止端半径 (mm)	破断した点ののど厚 (mm)
HA-1	99.9	25.67	399.5	15.8	130	3.3	10.7
HA-2	99.9	25.68	399.3	15.9	114	1.9	11.5
HA-3	99.9	25.71	399.0	14.2	110	1.7	12.4
HA-4	99.9	25.73	400.0	15.5	109	3.0	12.7
HA-6	100.0	25.70	399.0	15.1	112	1.2	11.9
HA-7	99.7	25.72	399.0	15.0	115	0.9	10.9
HB-1	100.2	25.67	402.0	13.2	162	11.7	7.0
HB-2	100.1	25.69	401.3	13.1	163	10.8	6.4
HB-3	100.1	25.70	401.0	14.2	161	12.4	7.1
HB-4	100.1	25.71	402.0	12.4	151	2.2	6.6
HB-5	100.1	25.73	401.0	12.1	163	8.2	6.3
HB-6	100.1	25.68	400.5	12.6	151	6.8	6.6
HB-7	100.0	25.71	401.8	12.4	152	10.3	6.4
HC-1	99.9	25.77	400.3	14.0	136	2.0	9.4
HC-2	99.9	25.77	400.3	12.5	137	0.5	9.2
HC-3	99.9	25.78	400.3	13.7	134	3.3	9.7
HC-4	99.9	25.77	400.3	13.1	137	1.1	9.1
HC-5	100.0	25.74	399.8	12.7	141	1.6	9.2
HC-6	100.0	25.68	399.5	12.8	130	1.1	9.2

表 5.3.4 試験片形状寸法 (AU5、BU5、CU5系列)

試験片名	b (mm)	h (mm)	ℓ (mm)	破断した点の脚長 (mm)	破断起点の止端角 (deg)	破断起点の止端半径 (mm)	破断した点ののど厚 (mm)	破断起点のアンダーカット深さ(mm)
AU5-1	100.0	25.55	400.0	14.3	105	1.3	11.2	1.2
AU5-2	99.9	25.51	399.5	14.3	94	0.9	11.9	0.7
AU5-3	100.0	25.50	399.3	15.1	109	1.2	12.0	0.8
AU5-4	100.0	25.48	399.8	15.4	107	1.9	11.0	0.8
AU5-5	100.0	25.48	399.3	14.0	107	2.0	11.1	0.9
BU5-1	100.0	25.52	402.2	10.0	123	4.0	6.0	-0.0
BU5-2	100.7	25.63	400.3	11.0	133	1.5	6.8	0.8
BU5-3	100.1	25.54	401.0	—	—	—	—	—
BU5-4	100.0	25.64	401.1	11.0	136	1.0	6.0	1.2
BU5-5	99.9	25.70	401.2	11.5	149	1.0	6.0	0.3
BU5-6	100.0	25.75	401.6	11.0	157	3.0	6.5	0.6
BU5-7	99.7	25.72	401.1	12.0	144	2.0	6.5	0.7
CU5-1	100.0	25.76	399.9	14.5	131	2.3	9.1	0.5
CU5-2	100.0	25.78	399.5	14.7	126	2.7	10.0	0.0
CU5-3	99.9	25.85	399.6	13.5	137	2.0	9.5	1.0
CU5-4	99.9	25.81	399.9	14.0	140	1.7	10.0	0.3
CU5-5	99.9	25.79	399.7	12.0	121	1.0	8.4	0.8
CU5-6	99.9	25.85	399.8	12.0	108	1.7	8.7	0.7
CU5-7	99.9	25.88	399.9	15.0	141	7.6	9.0	0.0

表 5.3.5 試験片形状寸法 (AUI、BUI、CUI系列)

試験片名	b (mm)	h (mm)	ℓ (mm)	破断した点の脚長 (mm)	破断起点の止端角 (deg)	破断起点の止端半径 (mm)	破断した点のど厚 (mm)	破断起点のアンダーカット深さ(mm)
AUI-1	100.0	25.66	399.8	13.4	104.	0.5	11.5	1.2
AUI-2	100.1	25.61	399.3	12.6	98.	1.6	11.1	1.4
AUI-3	100.0	25.61	399.8	13.9	118.	1.8	11.1	0.6
AUI-4	100.1	25.61	400.0	13.5	106.	1.4	11.0	0.9
AUI-5	100.0	25.62	399.0	14.4	120.	0.7	10.9	0.7
BUI-1	99.8	25.59	400.0	10.0	128.	2.0	7.4	1.7
BUI-2	99.9	25.56	399.6	11.0	134.	2.5	6.5	1.3
BUI-3	99.9	25.57	400.7	13.5	139.	1.0	7.1	1.5
BUI-4	100.4	25.57	400.7	10.5	154.	2.0	6.5	0.7
BUI-5	99.9	25.66	399.8	11.5	127.	1.5	6.7	0.9
BUI-6	99.9	25.53	399.5	—	—	—	—	—
BUI-7	100.2	25.54	399.7	10.5	143.	4.0	7.0	0.6
CUI-1	100.3	25.61	399.5	12.0	112.	2.0	8.0	0.7
CUI-2	100.1	25.65	399.2	12.0	105.	1.0	8.7	0.5
CUI-3	99.9	25.58	400.8	12.5	120.	1.3	9.0	0.5
CUI-4	99.8	25.42	399.8	11.0	120.	3.0	8.7	0.5
CUI-5	100.1	25.64	400.1	13.5	109.	2.0	9.0	0.2
CUI-6	100.0	25.67	400.8	13.6	93.	1.0	8.8	1.3
CUI-7	100.0	25.65	400.4	10.0	114.	1.0	8.4	0.8

表 5.3.6 試験結果 (HA、HB、HC系列)

試験片名	P (ton)	Sa (kg/mm)	測定した歪範囲 (μ)		Nc (C. L.)	Nf	備考1)
			トウから4mm	トウから12mm			
HA-1	2.58	23.5	2030	1675	1.50×10^4 (40)	4.86×10^4	T
HA-2	1.68	15.3	1190	1098	2.18×10^5 (5)	3.41×10^5	T
HA-3	1.35	12.2	931	855	3.17×10^5 (15)	6.67×10^5	T, C
HA-4	2.13	19.3	1590	1383	4.73×10^4 (40)	1.18×10^5	T
HA-6	3.14	28.5	2108	2028	9.00×10^3 (3)	3.92×10^4	T
HA-7	1.12	10.2	867	770	3.16×10^5 (47)	8.05×10^5	T
HB-1	2.58	23.6	1958	1680	—	1.50×10^4	R
HB-2	1.68	15.3	1238	1135	—	3.89×10^5	R
HB-3	2.13	19.4	1620	1450	—	1.60×10^5	R
HB-4	1.35	12.3	968	915	—	5.75×10^5	R
HB-5	1.12	10.2	812	786	—	2.36×10^6	R
HB-6	3.14	28.6	2425	2105	—	1.18×10^4	R
HB-7	2.58	23.5	2023	1735	—	6.60×10^4	R
HC-1	2.58	23.4	2025	1975	—	7.22×10^4	T
HC-2	2.13	19.3	1450	1365	1.33×10^5 (25)	1.60×10^5	T, C
HC-3	1.68	15.2	1225	1108	1.89×10^5 (15)	3.23×10^5	T, C
HC-4	1.35	12.2	968	865	4.88×10^5 (6)	1.03×10^6	T, C
HC-5	3.14	28.4	2228	2048	8.70×10^3 (5)	4.36×10^4	T, C
HC-6	1.12	10.2	841	722	1.01×10^6 (15)	2.06×10^6	T

1) T: トウ破断
R: ルート破断

NB: 破断せず
C: Nc を定義した亀裂以外の亀裂から破断

表 5.3.7 試験結果 (AU5、BU5、CU5系列)

試験片名	P (ton)	S _a (Kg/mm)	測定した歪範囲(μ)		N _c (C. L.)	N _f	備考 1)
			トウから4mm	トウから12mm			
AU5-1	3.14	28.9	1828	1983	3.40×10^3 (4)	1.37×10^4	T
AU5-2	1.68	15.5	1060	1101	3.65×10^4 (10)	9.30×10^4	T
AU5-3	1.12	10.3	549	705	7.80×10^4 (35)	3.55×10^5	T
AU5-4	.897	8.29	455	588	1.45×10^5 (2)	7.23×10^5	T
AU5-5	.785	7.24	415	523	5.72×10^5 (20)	1.75×10^6	T
BU5-1	1.76	16.3	744	639	9.81×10^4 (2)	3.50×10^5	R
BU5-2	1.28	11.6	448	425	3.94×10^5 (2)	1.19×10^6	T
BU5-3	1.04	9.58	289	372	2.70×10^5 でクラック発生せず	2.70×10^6 で中止	NB
BU5-4	2.16	19.8	656	716	3.32×10^4 (2)	1.47×10^5	T
BU5-5	2.56	23.3	697	853	1.40×10^4 (2)	8.14×10^4	T, C
BU5-6	1.60	14.5	601	504	4.86×10^5 (2)	1.59×10^6	T
BU5-7	1.12	10.2	414	366	1.12×10^5 (2)	5.05×10^5	T
CU5-1	2.49	22.5	777	735	1.54×10^4 (2)	2.70×10^4	R, T
CU5-2	2.13	19.2	875	815	4.80×10^4 (2)	8.47×10^4	T
CU5-3	1.91	17.1	719	735	2.98×10^4 (2)	7.02×10^4	T
CU5-4	1.30	11.7	568	504	—	2.17×10^5	T
CU5-5	1.01	9.08	355	368	5.78×10^5 (2)	1.38×10^6	T
CU5-6	.869	7.81	362	295	1.28×10^6 (2)	3.11×10^6 で中止	NB
CU5-7	1.12	10.1	408	360	6.23×10^5 (2)	1.72×10^6	T

1) T: トウ破断

R: ルート破断

NB: 破断せず

C: N_cを定義した亀裂以外から破断

表 5. 3. 8 試験結果 (AU1, BU1, CU1 系列)

試験片名	P (ton)	S a (Kg/mm ²)	測定した歪範囲 (μ)		Nc (C. L.)	Nf	備考 1)
			トウから 4mm	トウから 12mm			
AU1-1	2.13	19.4	925	1368	—	7.45×10^4	T
AU1-2	1.12	10.2	912	770	2.29×10^5 (42)	5.18×10^5	T
AU1-3	.841	7.69	560	509	—	2.94×10^6	T
AU1-4	3.14	28.7	1770	2003	3.90×10^8 (3)	2.30×10^4	T, C
AU1-5	1.46	13.3	833	927	1.10×10^6 (20)	3.02×10^5	T
BU1-1	1.28	11.8	480	425	3.40×10^6 (2)	2.11×10^6	T
BU1-2	1.84	16.9	578	553	2.23×10^6 (2)	6.95×10^5	T
BU1-3	2.24	20.6	587	690	1.67×10^4 (2)	2.20×10^5	T
BU1-4	2.08	19.0	573	688	2.97×10^4 (2)	1.50×10^5	T, C
BU1-5	1.44	13.1	463	468	1.56×10^6 (2)	4.13×10^5	T
BU1-6	—	—	—	—	—	—	
BU1-7	1.60	14.7	433	487	8.27×10^4 (2)	2.79×10^5	T, C
CU1-1	1.92	17.5	462	617	1.72×10^4 (2)	6.65×10^4	T
CU1-2	1.28	11.9	436	445	1.48×10^5 (2)	8.05×10^5	T, C
CU1-3	.96	8.83	354	333	1.33×10^6 (2)	3.83×10^6	T
CU1-4	1.60	14.9	647	532	4.49×10^4 (2)	2.47×10^5	T, C
CU1-5	1.12	10.4	257	336	3.97×10^8 (2)	1.07×10^6	T
CU1-6	2.08	19.0	910	677	7.83×10^3 (2)	7.29×10^4	T, C
CU1-7	1.44	13.2	494	245	9.05×10^4 (2)	3.91×10^5	T

1) T : トウ破断

C : Nc を定義した亀裂以外の亀裂から破断

表 5.3.9 各系列の中央値

系列名	$S_a = CN_f^{-k}$ における C, k		$S_a (kg/m^2)$	$S_a (kg/m^2)$	$S_a = CN_c^{-k}$ における C, k	
	C	k	for $N_f = 5 \times 10^4$	for $N_f = 10^6$	C	k
H A	6 1 3.3	.2 9 5	2 5.2	1 0.4	2 4 5.9	. 2 3 9
H B	1 6 4.2	.1 8 7	2 1.7	1 2.4	—	—
H C	4 3 2.7	.2 5 9	2 6.3	1 2.1	2 1 2.5	. 2 1 6
AU5	4 5 6.1	.2 9 4	1 8.9	7.9	2 9 3.0	. 2 8 8
BU5	1 9 5.6	.1 9 2	2 4.5	1 3.8	1 2 6.8	. 1 7 8
CU5	1 8 5.6	.2 1 0	1 9.1	1 0.2	2 0 9.1	. 2 3 2
AU1	4 4 0.1	.2 7 7	2 2.0	9.6	2 2 2.6	. 2 4 7
BU1	1 4 2.0	.1 7 0	2 2.6	1 3.6	9 1.3	. 1 5 5
CU1	1 4 5.4	.1 8 6	1 9.4	1 1.1	7 7.4	. 1 5 5
FBA	5 7 7.7	.2 7 6	2 9.2	1 2.7	5 2 7.8	. 2 8 0
FBB	9 3.0	.1 4 5	1 9.4	1 2.5	—	—
FBC	1 1 3.8	.1 8 6	1 5.2	8.7	—	—
FBK	2 0 7.1	.1 6 4	3 5.1	2 1.6	1 0 6.1	. 1 1 3

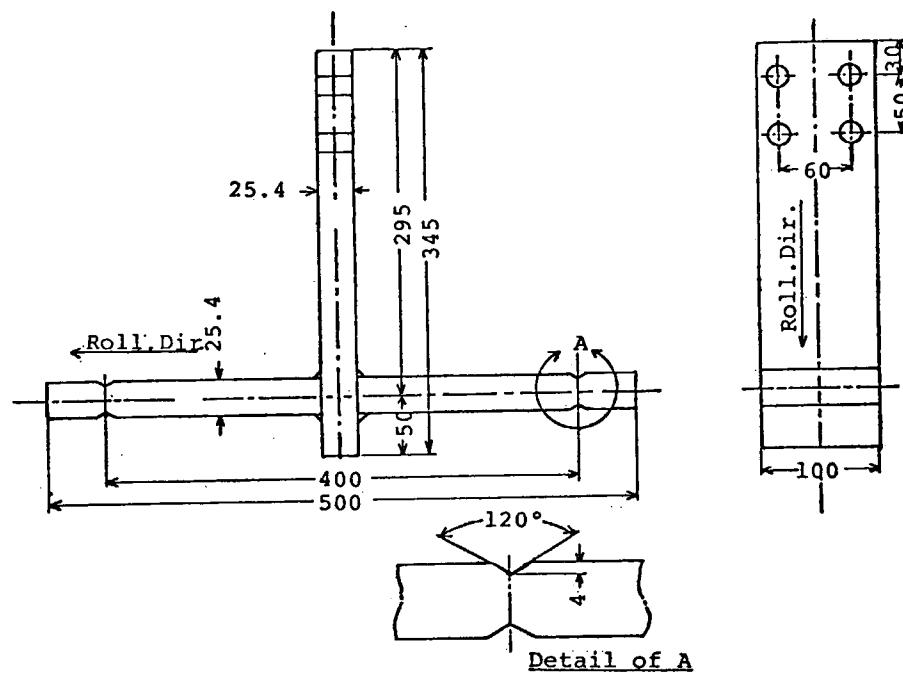


図 5.3.1 DETAILS OF SPECIMEN

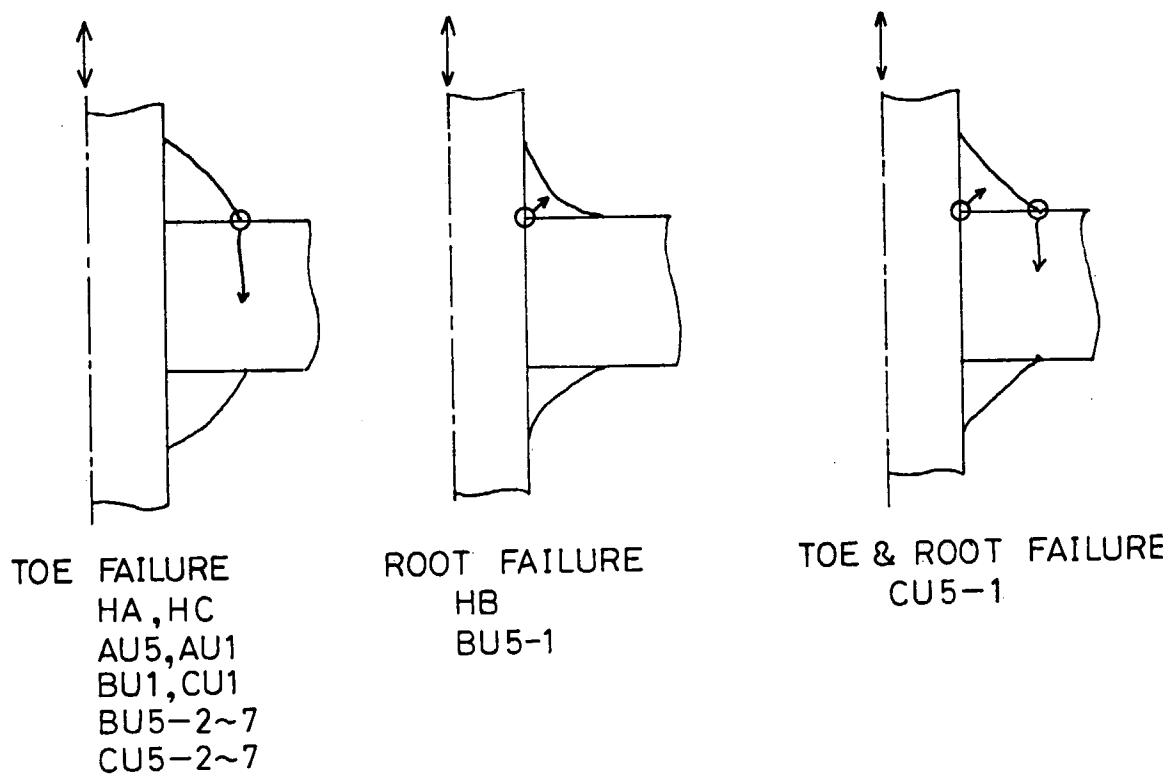


図 5.3.2 FAILURE MODE

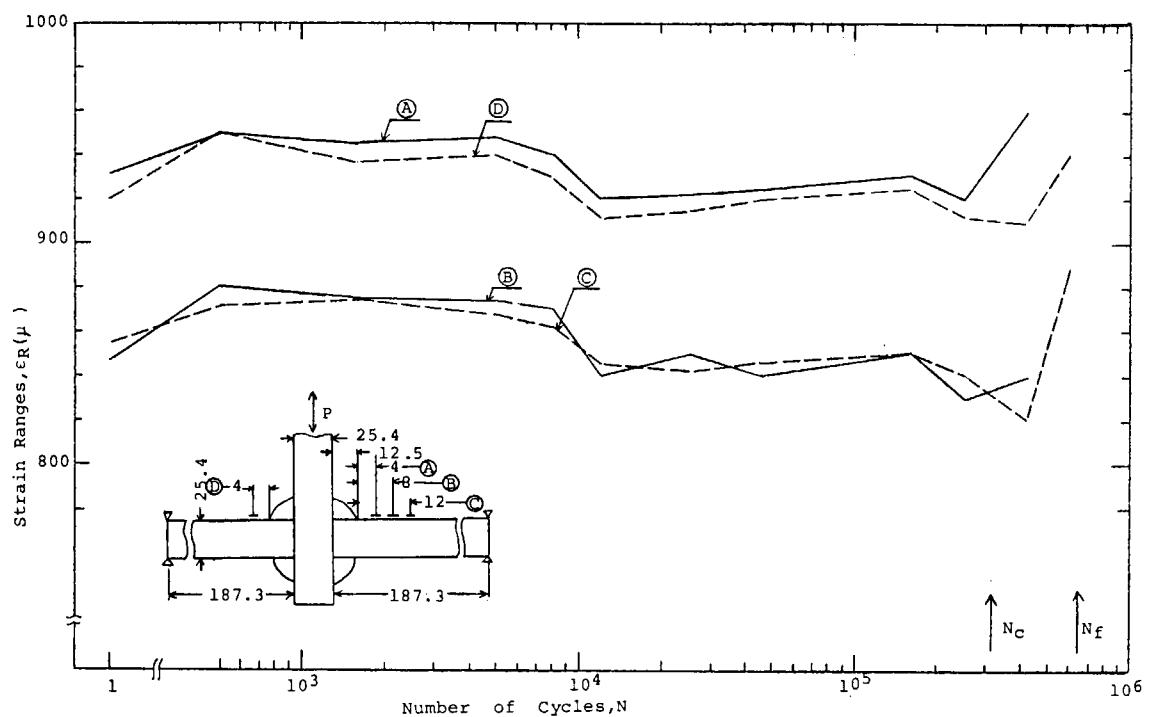


図 5.3.3 Strain Changes With Cycles (HA - 3)

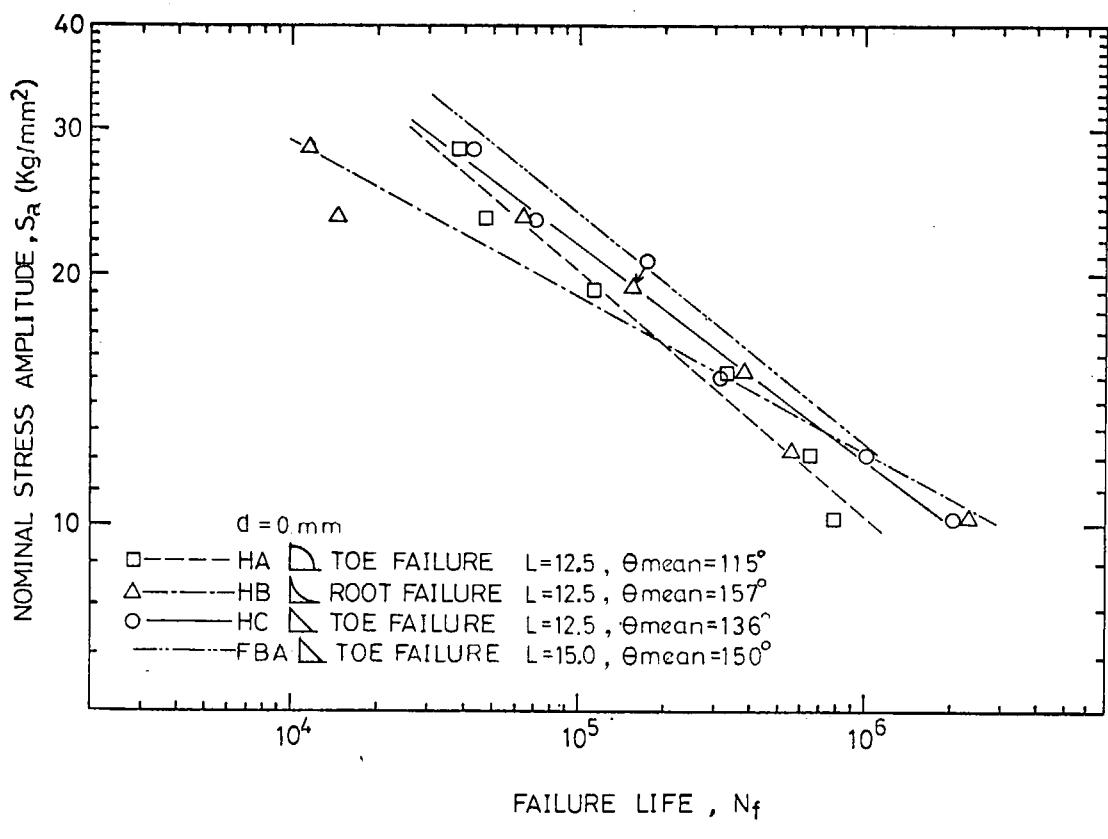
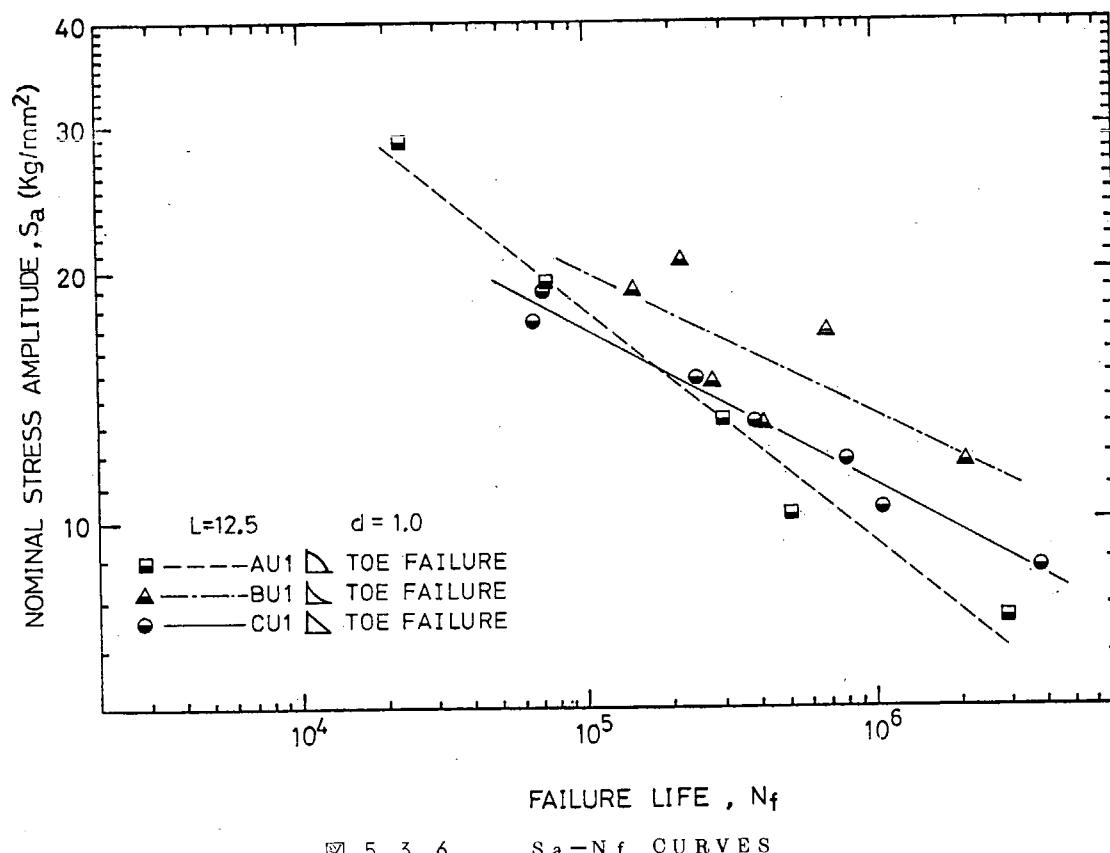
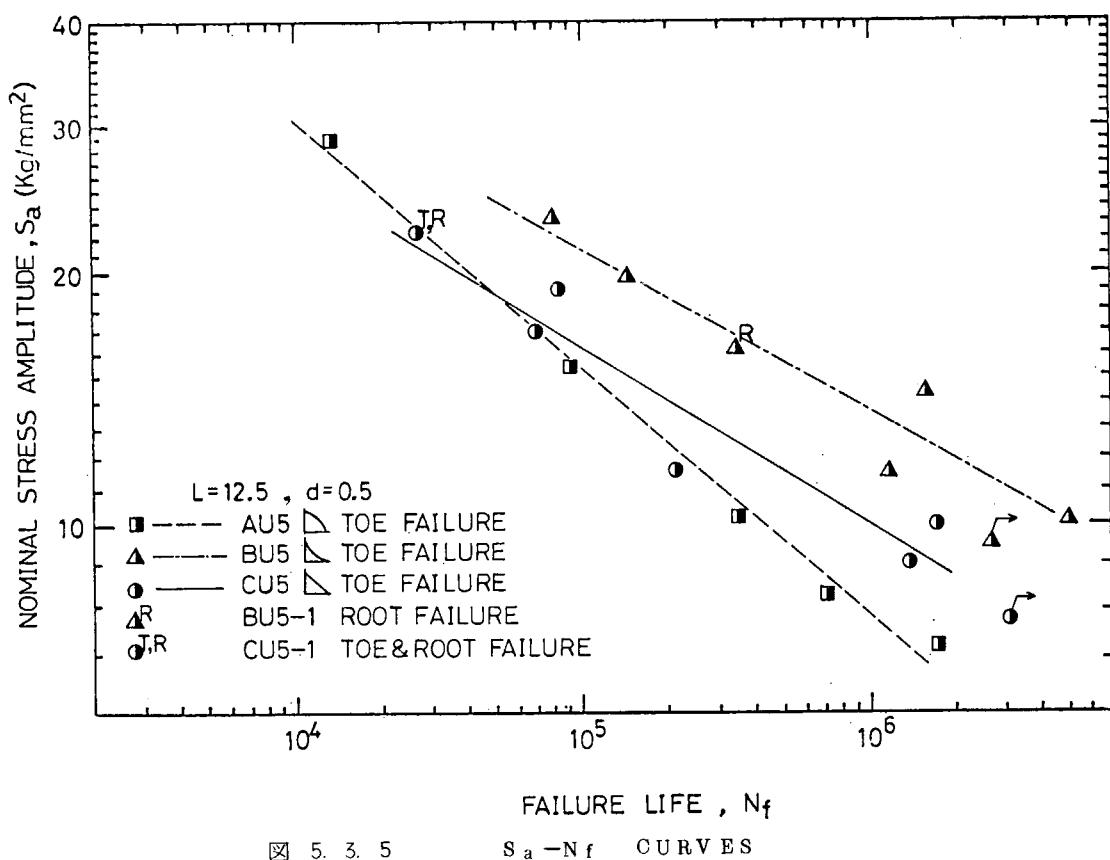


図 5.3.4 $S_a - N_f$ CURVES



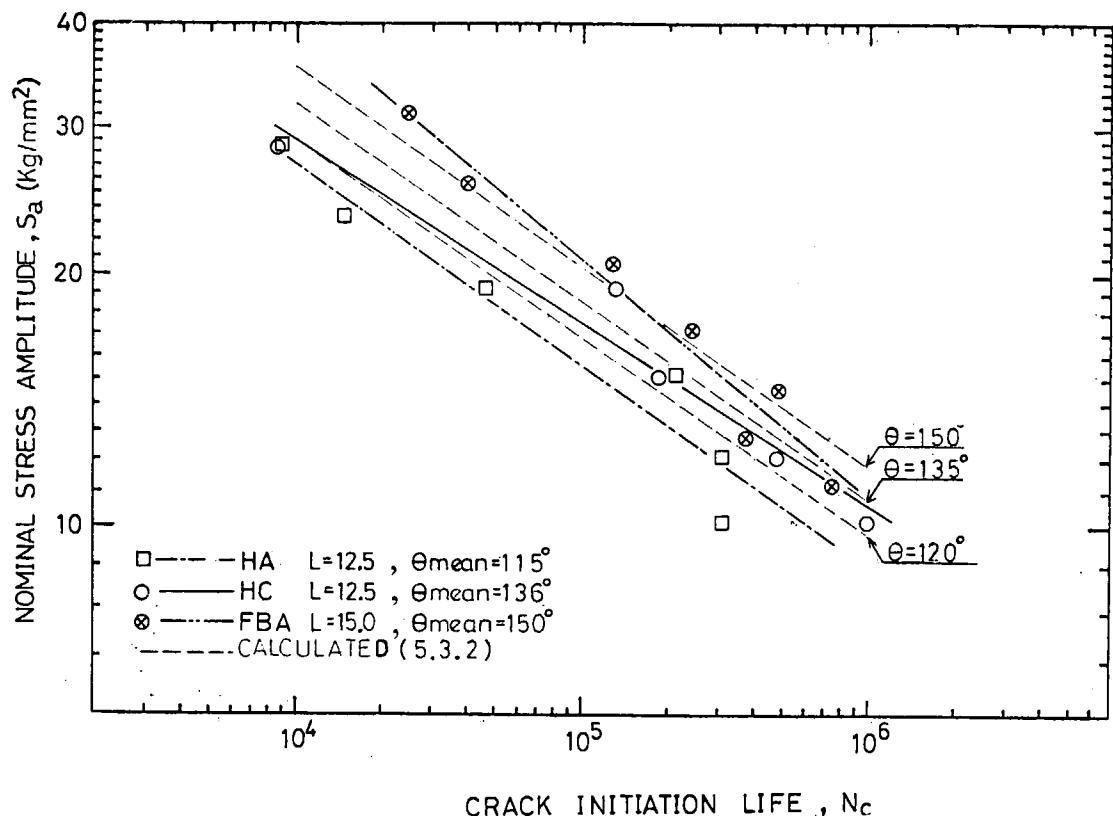


FIG. 5. 3. 7 S_a - N_c CURVES

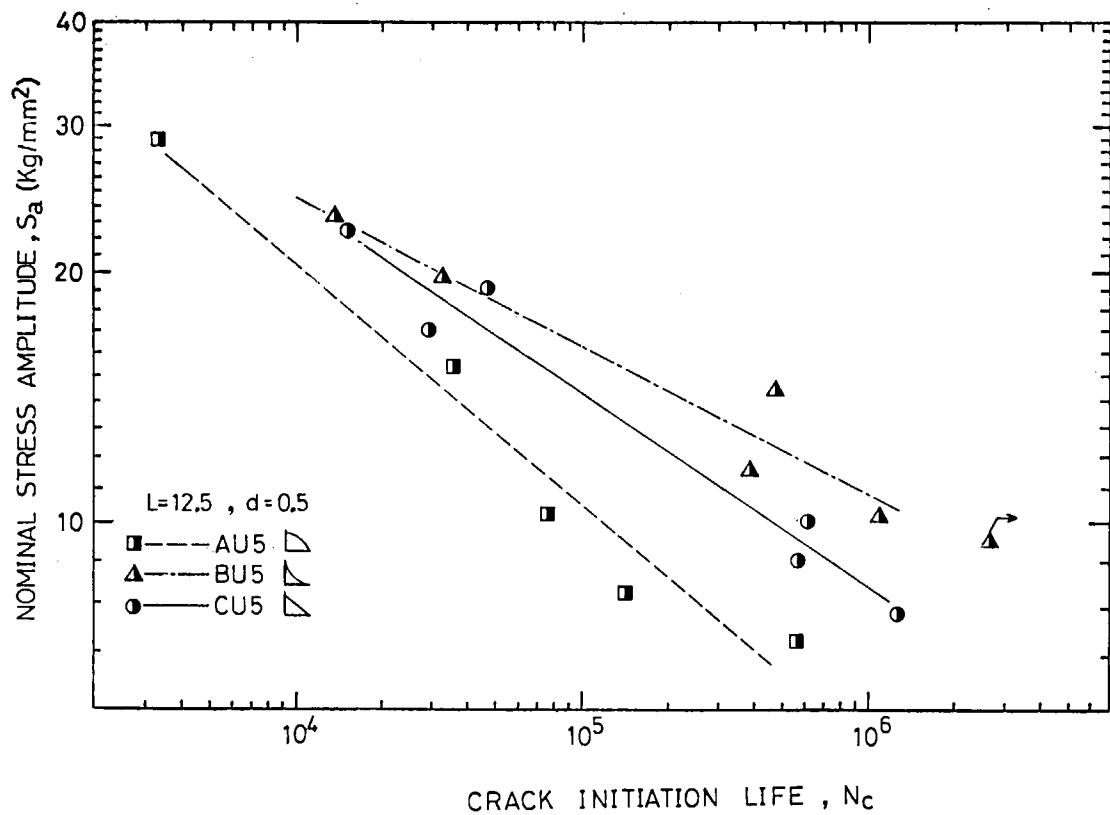


FIG. 5. 3. 8 S_a - N_c CURVES

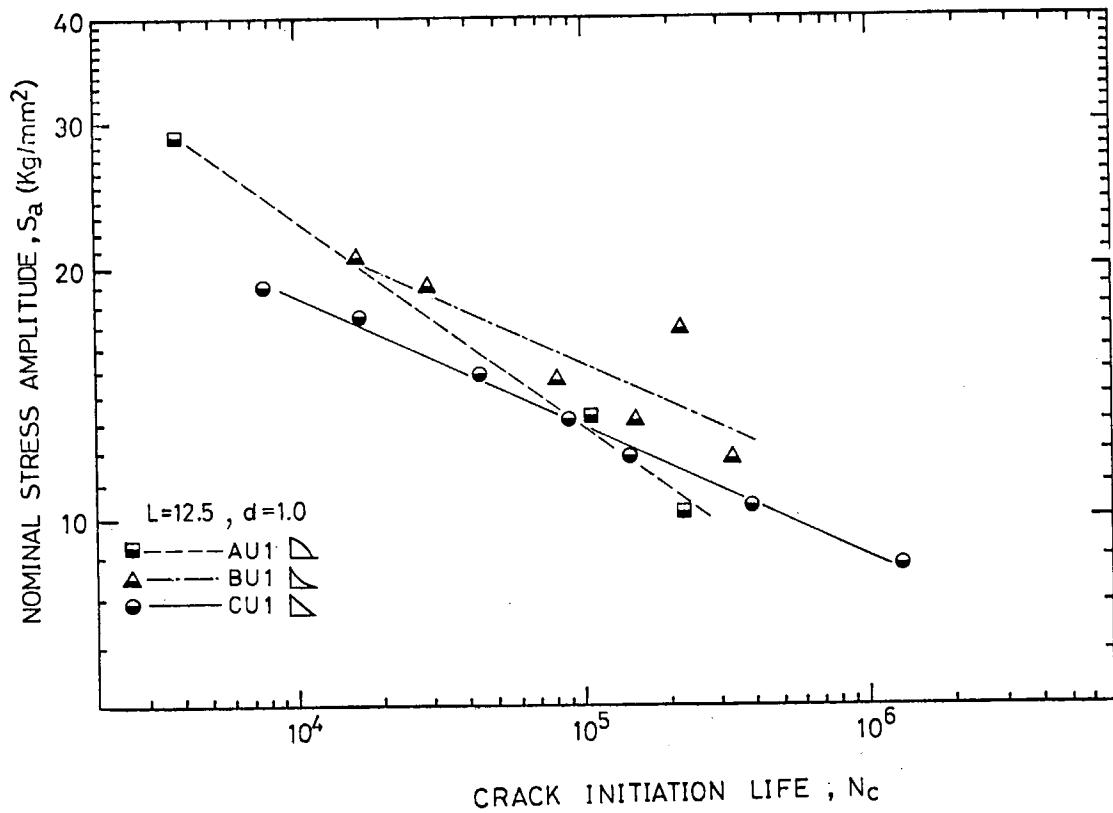


図 5. 3. 9 $S_a - N_c$ CURVES

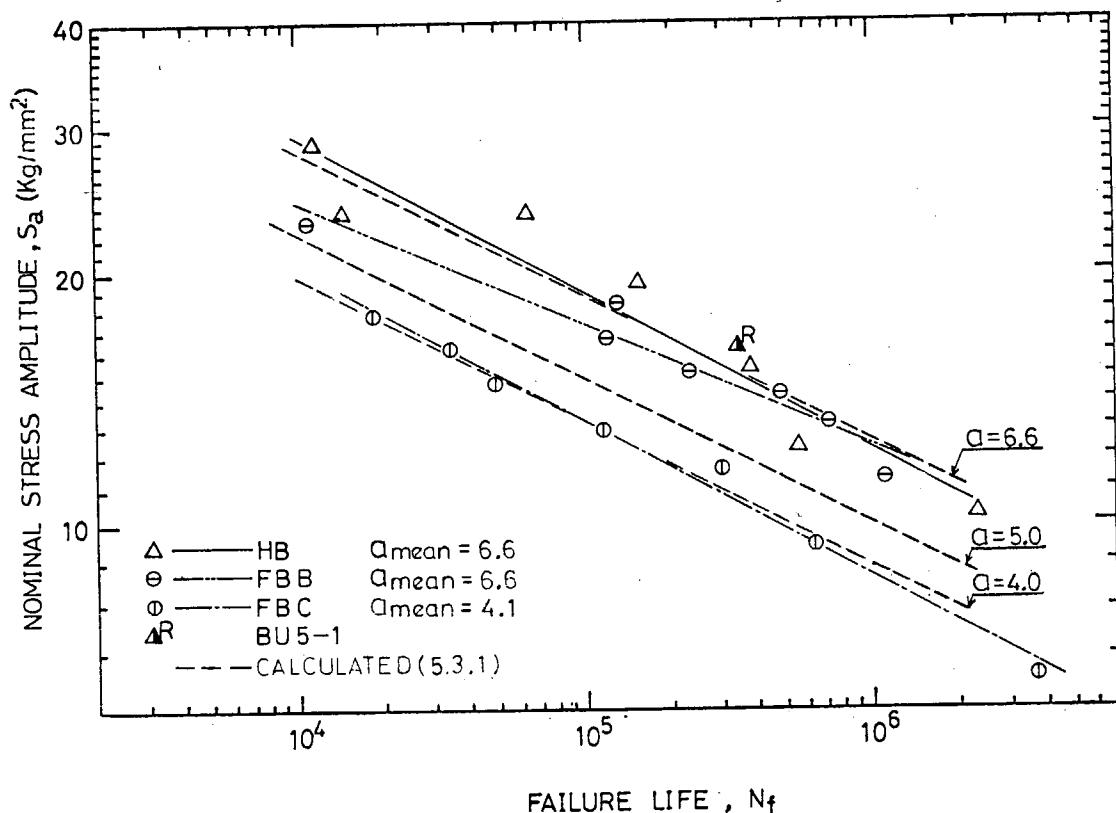


図 5. 3. 10 $S_a - N_f$ CURVES

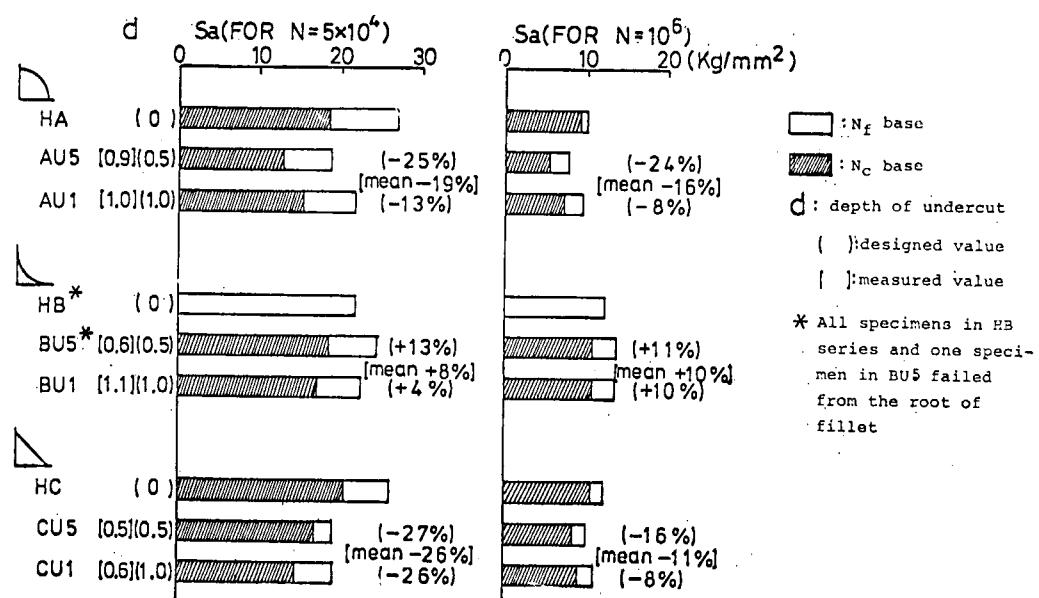


図 5.3.11 EFFECT OF UNDERCUT

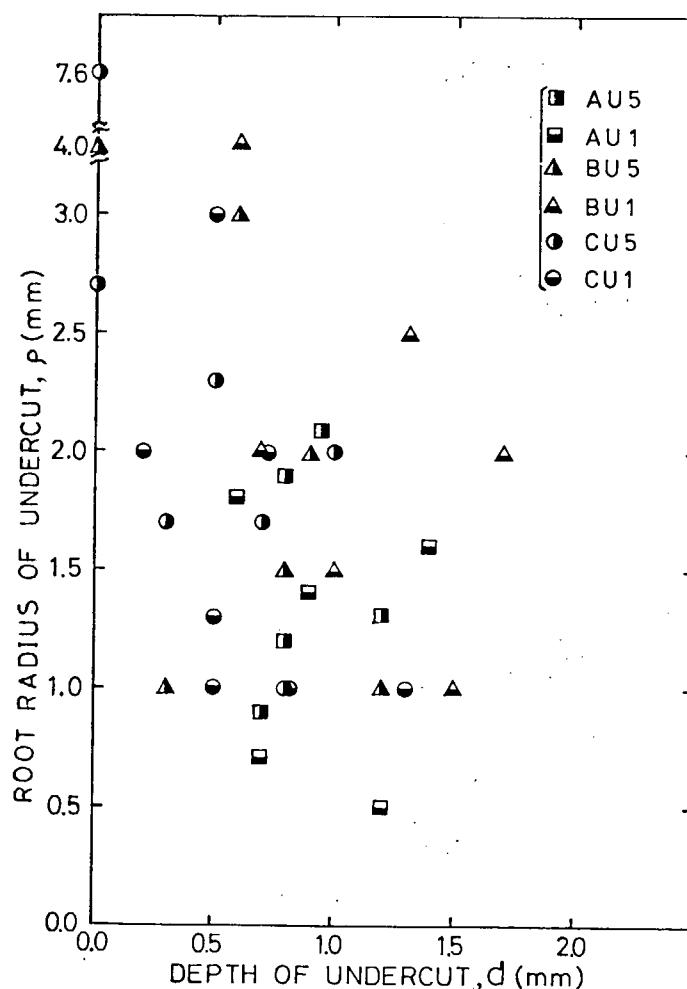


図 5.3.12 ROOT RADIUS and DEPTH of UNDERCUT

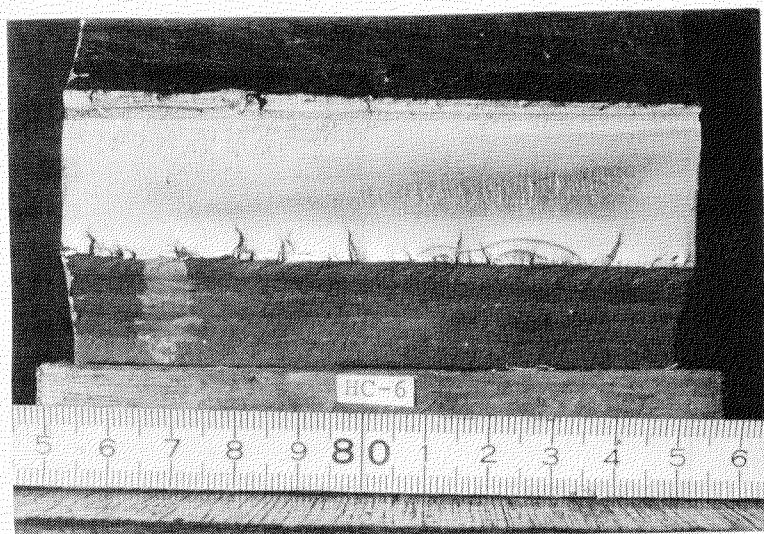


写真 5.3.1 破断面(トウ破断)

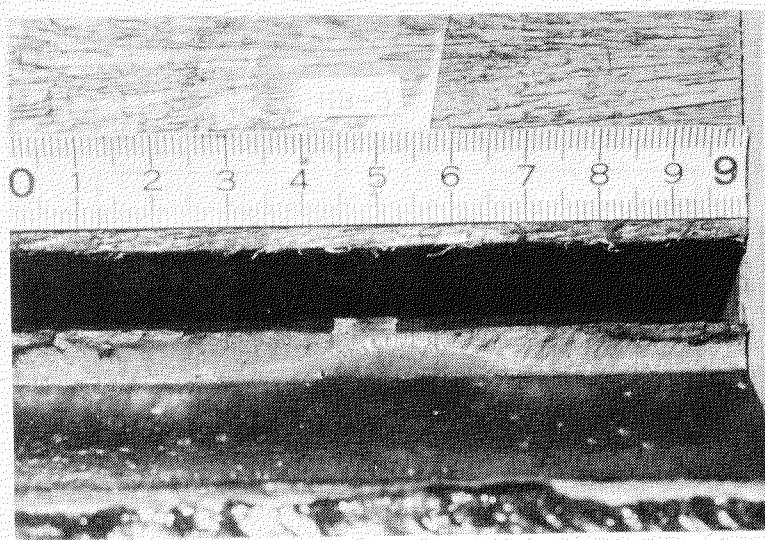


写真 5.3.2 破断面(ルート破断)

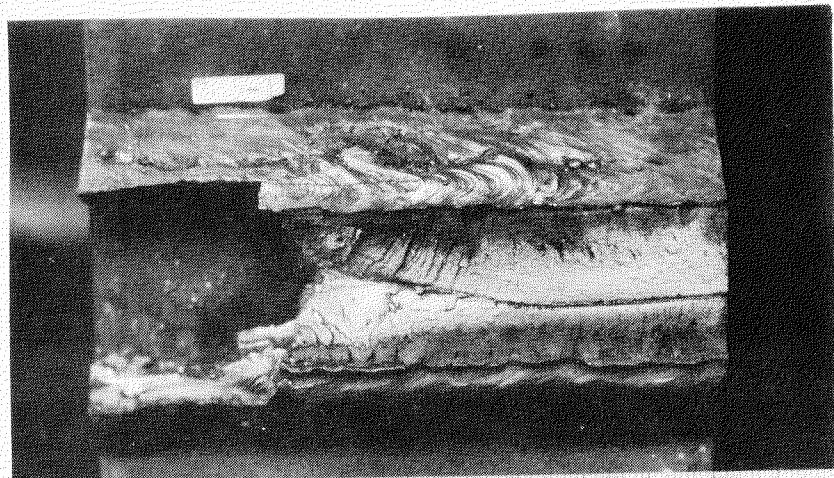


写真 5.3.3 破断面(トウ & ルート破断)

5.4 縦通材スカラップ部の疲労試験

5.4.1 目的

基本的な隅内溶接に比較的近く、しかも実船殻におけるハードスポットにも成り得る構造不連続部の一つとして、縦通材スカラップ部の溶接部疲労強度を検討する。

昨年度（昭和50年度研究として）実施した予備疲労試験（2試験体供試）結果によれば、板厚25.4mm（KDK鋼板）に対し隅内脚長5mm、10mmいずれの場合も、角まき溶接止端部から亀裂発生が起り、疲労寿命にも殆んど差が無い結果が得られている。さらに、スカラップ開孔形状（寸法）により大きな疲労強度差があることなども明らかになっている。

これら予備疲労試験結果に基づき、本年度研究としては、
最適と思われる脚長を決めた上で、スカラップ部の疲労強度（S-N）線図を把握すること
開孔形状の相異による疲労強度の違いを定量的に把握すること
これらのデータから、ある開孔形状を有するスカラップ部の疲労強度が推定できるようにすること
などを目標とした。

5.4.2 試験内容

(1) 試験体形状および溶接条件

本委員会供試の船体用50キロ級高張力鋼板（KD32鋼板）を用いて、手溶接によりI型梁を製作し試験体とした。溶接条件を表5.4.1に示す。

試験体ウェブプレート部分には半円形またはキノコ形のスカラップを一つ切明け、慎重に角まき溶接した。溶接脚長は、前年度予備試験結果から、実脚長7mm（予備試験の目標脚長5mmに相当）とした。試験体は、半円形スカラップを有するSLCシリーズ（3体）と、キノコ形スカラップのSLMシリーズ（3体）を用意した。試験体形状寸法を図5.4.1に示す。また、製作した試験体溶接部の各種寸法計測結果を、図5.4.2に示す。

(2) 試験内容

繰返し荷重一定の制御のもとで、荷重比（最小荷重／最大荷重）0.1の条件でI型梁試験体の4点曲げ疲労試験を実施した。

試験機は、電気油圧式125t構造物疲労試験機を用いた。試験装置の概形を図5.4.3に示す。

繰返し荷重を負荷する前に、試験体応力集中部の応力分布状態を調べる目的で、静試験（歪計測）を実施した。その際の歪ゲージ貼付位置を図5.4.4に示す。疲労試験に際しては、繰返し数増大による試験体各部の応力振幅変動を記録しながら、亀裂発生の可能性の高い箇所について、油塗布しながら倍率20倍のルーペを用いて観察を続けた。また亀裂発生後は、発生したすべての亀裂に対し、繰返し数の増大による成長状況を、適宜デバイダとスケールにより計測した。

試験は、フェイスプレートの破断によりI型梁が大変形した時点を以って終りとした。試験終了後は、破断面の観察から、亀裂の表面長さと深さの成長の相関を調べた。

また、隅内溶接の継手断面をエッチングし、隅内溶接の溶込み量等を調べた。

5.4.3 試験結果および考察

静試験（歪計測）結果を、図5.4.5（SLCシリーズ）および図5.4.6（SLMシリーズ）に示す。歪ゲージは、スカラップ部周辺の応力集中部に貼付したものと、スカラップから離れた（2着力点スパン内の）位置に貼付したものとの二種類ある。後者の測定値から、試験体の荷重のかかり方がほぼ対称であり、バランスがとれていること、および梁理論による曲げ応力推定と良い一致を呈していることがわかる。また、応力集中部に貼付した応力集中ゲージ

(ゲージ間隔 2mm) の値から、応力集中率 (K_t) を推定した(表 5.4.2)。すなわち、応力集中ゲージは、余盛止端部より 3mm 離れた位置から 2mm 間隔で 5 枚貼付されているので、これらの歪の測定値をもとに、応力変化を指數分布 ($\sigma = \sigma_0 (1 - ae^{-\beta r})$, r : 止端部からの距離 (0~11mm), a, β : 未定々数, σ_0 : 梁理論による曲げ公称応力) と仮定し、止端部応力を推定して求めた。表 5.4.2 からわかるように、キノコ形スカラップを有する試験体は 1.4~1.5 であった。前年度予備試験結果(キノコ形: 1.7~1.8、半円形: 1.6)に比べて若干差があるが、これは板厚の相異とゲージ貼付位置の幾分の違い(予備試験では止端部から 4mm 位置より集中ゲージを貼付)からくる推定誤差によるものであろう。

次に、繰返し数と亀裂の発生・成長の様子を図 5.4.7 (SLC シリーズ) および図 5.4.8 (SLM シリーズ) に示す。亀裂はスカラップの角まき溶接止端部からいずれも発生していた。最終破断に導いた亀裂の成長の様子を、6 試験体まとめて表わしたもののが図 5.4.9 である。応力集中率 (K_t) の比較から予想されるように、SLC シリーズの方が SLM シリーズよりも疲労強度が勝っていることが明らかである。また、亀裂長さ 20mm 付近 [\approx (ウェブ厚さ + 2 × (脚長))] で、一時的に板表面での亀裂成長が急減することがわかる。

破断寿命 (N_f) および表面亀裂長さが 10mm に達する繰返し数 ($N_{2a} = 10$) の一覧を表 5.4.3 に記した。この結果を S-N 線図(公称応力～繰返し数)で表示したものが、図 5.4.10 (SLC シリーズ) および図 5.4.11 (SLM シリーズ) である。また、応力集中部の隅肉溶接止端部から 3mm の位置で計測した局部歪をもとに、局部応力と繰返し数の関係を表わしたもののが図 5.4.12 の [1] および [2] の線である。止端部から 3mm の位置での局部応力複振幅 (σ_a) と繰返し数の関係で整理すれば、スカラップ形状の違いにかかわらずほぼ一本の S-N 線図で表現できることがわかる。後述するように、構造物中の或る特定の形式をもつハードスポットの疲労強度特性は、板厚や形状寸法に幾通りかの変動があっても、局部歪(応力)と繰返し数の関係で捉えれば一本の特性曲線 (ϵ -N 線図あるいは S-N 線図) に帰着されるという報告が幾つかある。図 5.4.12 [2] の線は、縦通材スカラップ部に対する特性曲線として得られたものと考えることができる。

試験体各部に貼付した歪ゲージでの測定値が疲労試験中にどのように変動したかを、図 5.4.13 (SLC シリーズ) および図 5.4.14 (SLM シリーズ) に示す。両図中には亀裂の成長も併記されており、この曲線と歪振幅の変動との関係を考えると、亀裂の接近・通過により複雑に変動している様子が認められる。

疲労試験後に破断面の観察を行ない、亀裂形状寸法の変化を計測した。表面亀裂長さ ($2a$) と亀裂深さ (b) の関係を図 5.4.15 に示す。同じ表示を板厚で無次元化し、前年度の予備試験結果と合わせて図 5.4.16 に示した。破断亀裂の概観と破断面写真を図 5.4.17 ~ 図 5.4.22 に示す。また隅肉溶接の溶込み具合を見るために、試験体隅肉溶接部を溶接線直角方向に切断しエッティングした断面写真を図 5.4.23 に示す。

先に述べたように、図 5.4.12 [2] の線は縦通材スカラップ部の疲労強度特性曲線であると考えられる。そこで、この特性曲線と現在までに得られている幾つかの報告例との比較を試みる。

寺本ら¹⁾ は、海洋構造物のパイプ継手部ハードスポットの疲労強度を模型試験(縮尺 $1/5$ 模型: 図 5.4.24) を用いて検討している。パイプ継手は板厚 6mm の SM50A 鋼で作られており、完全溶込みの手溶接である。ハードスポット部の隅肉溶接止端部 (dressed) の実測(および推定) 局部歪振幅と亀裂発生繰返し数の関係として、図 5.4.25 を与えている。同図では、パイプ継手概形の相異にもかかわらず一本の S-N 線図としてまとまっており、しかもその線図は、小型試験により飯田ら²⁾ が求めた ϵ -N 線図(図 5.4.25 中の破線)とほぼ一致している。今回のスカラップ部の試験結果を図 5.4.25 中に二点鎖線で記したが、幾分低目の値を与えている。余盛止端部から 3mm の局部歪振幅でプロットしていること、溶接残留応力あるいは歪の板厚方向分布の相異がその原因として考えられる。

また飯田・飯野³⁾ は、HW50 および 70 高張力鋼を用いた角変形を有する突合せ継手部の疲労強度について、局部歪と繰返し数の関係を捉えたうえで、角変形量が疲労強度に及ぼす影響を明らかにしている。

海洋構造物の疲労設計規格の中にも、この局部歪と繰返し数の関係を捉えた規格があることを飯田⁴⁾ は紹介して

いる。その内で、AWS(American Welding Society) D 1.1 - 72 における疲労設計線図を図 5.4.2.6 に転記し、今回のスカラップ部の試験結果を併記した。AWS の規定する設計線図(図 5.4.2.6)のうち A 曲線～G 曲線および K、T 曲線は、実際の応力集中率あるいは問題とする点での歪がわからない場合に、それぞれのパイプ継手型式に従って用いるべき線図である。また X 曲線は、パイプ結合様式の如何にかかわらず、問題視される点(ハードスポット)での歪振幅が詳細な計算あるいは実験によって把握できた場合に許容される寿命を算出するためのものである。今回のスカラップ試験結果、すなわち溶接止端部から 3mm の位置での局部歪振幅で整理した結果は、殆んどこの X 曲線と一致していることがわかる。X 曲線で想定している局部歪の計測位置が不詳であること、板厚方向の歪分布がパイプ継手とスカラップ部で同じかどうか疑わしいこと、あるいは X 曲線がどの程度の安全率(信頼度)を相定しているのか不詳であることなどの諸条件があるので単純比較にどの程度意義があるか問題であるが、非常に興味のある結果である。

5.4.4 まとめ

船体用 50 キロ級高張力鋼板(KD3.2 鋼板)を供試し、縦通材スカラップ部の疲労試験を実施し次の結論を得た。

- (1) 板厚 12.7 mm または 25.4 mm の縦通材のスカラップ部に対し、実脚長 7 mm の連続隅肉溶接(溶込み具合は図 5.4.2.3)を施して疲労試験した結果、疲労亀裂はスカラップ部角まき溶接止端部から発生した(図 5.4.1.2)。すなわち、この程度の脚長をもてば、ルート破断の危険は無いといえる。
- (2) 縦通材スカラップ部の S-N 線図を把握することができた(図 5.4.1.0、図 5.4.1.1)。
- (3) 縦通材スカラップ部の開孔形状や寸法変化による疲労強度の相異は、角まき溶接止端部近傍(Toe より 3 mm の位置)の局部歪振幅で整理することにより説明できる(図 5.4.1.2)。

また、今後の問題として次のような点が考えられる。

構造物の疲労強度特性が、ハードスポット部の局部歪振幅と繰返し数のマスターカーブにより評価できることがわかったが、次段階の問題として、局部歪をどのようにして精度良く評価するかという問題がある。前述の寺本らの報告¹⁾には、パイプ継手ハードスポット部の歪の簡易推定式が提案されており、また吉田・飯田⁵⁾は、パイプ継手の詳細解析を実施して実構造物の寿命と素材疲労試験によるそれとのギャップを埋めるための研究を進めている。縦通材スカラップ部のように構造不連続部に位置する隅肉溶接部の局部歪推定についても、今後努力が払われねばならない。

参考文献

- 1) S.Teramoto, et al., "Fatigue Strength of Welded Tubular Joints in Offshore Structure", Mitsubishi Technical Bulletin No 100, April 1975
- 2) Iida K, Fukuda Y., "Strain Cycling Fatigue of Ship Structure Steels", Annual Assembly of IIW(1969)
- 3) 飯田國廣、飯野暢、"角変形をもつ溶接継手の疲労強度"、日本造船学会論文集第 140 号、昭和 51 年 12 月
- 4) 飯田國廣、"溶接構造物の疲労設計規格とその背景"、日本造船学会誌 第 569 号、昭和 51 年 11 月
- 5) 吉田宏一郎、乾泰司、飯田國廣、"パイプ継手の詳細解析"、日本造船学会論文集 第 140 号、昭和 51 年 12 月

表 5. 4. 1 溶接条件

試験体シリーズ	溶接法	溶接棒	電流 (A)	電圧 (V)	運棒速度 (mm/min.)	入熱量 (kJ/cm)	(目標)脚長 (mm)	積層法
SLCシリーズ (半円形スカラップ)	下向き 手溶接	LB-50A 4°	220	30	200	19.8	7	1層1パス
SLMシリーズ (キコ形スカラップ)								

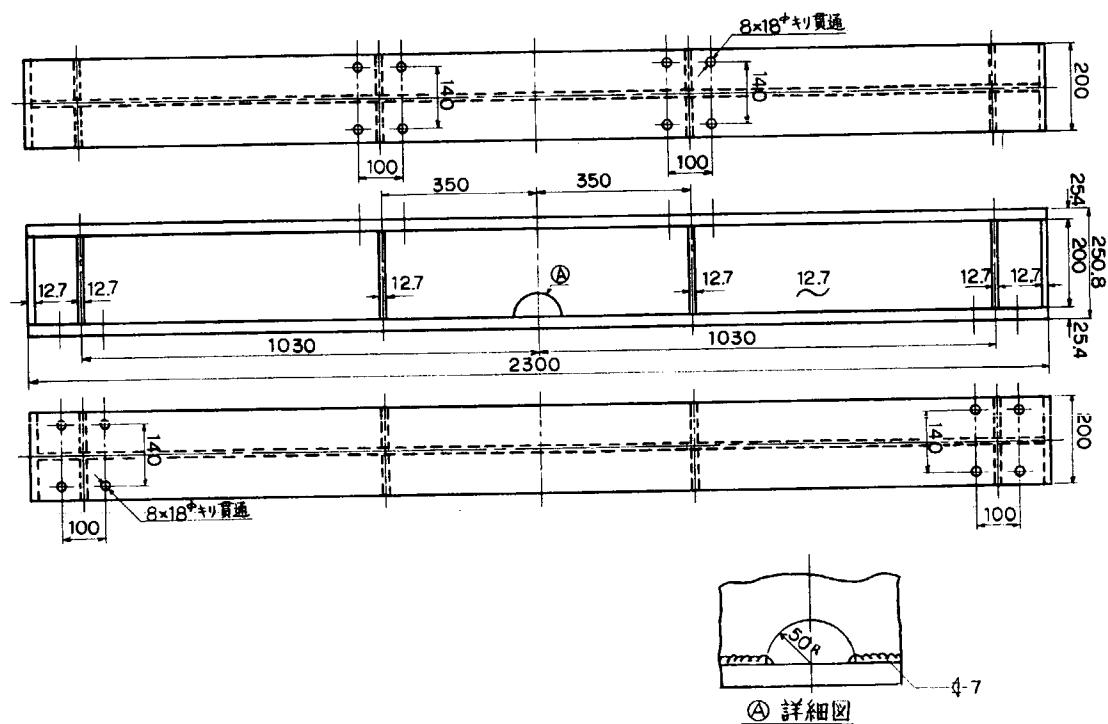


図 5. 4. 1 (a) 試験体形状寸法
(半円形スカラップ: SLCシリーズ)

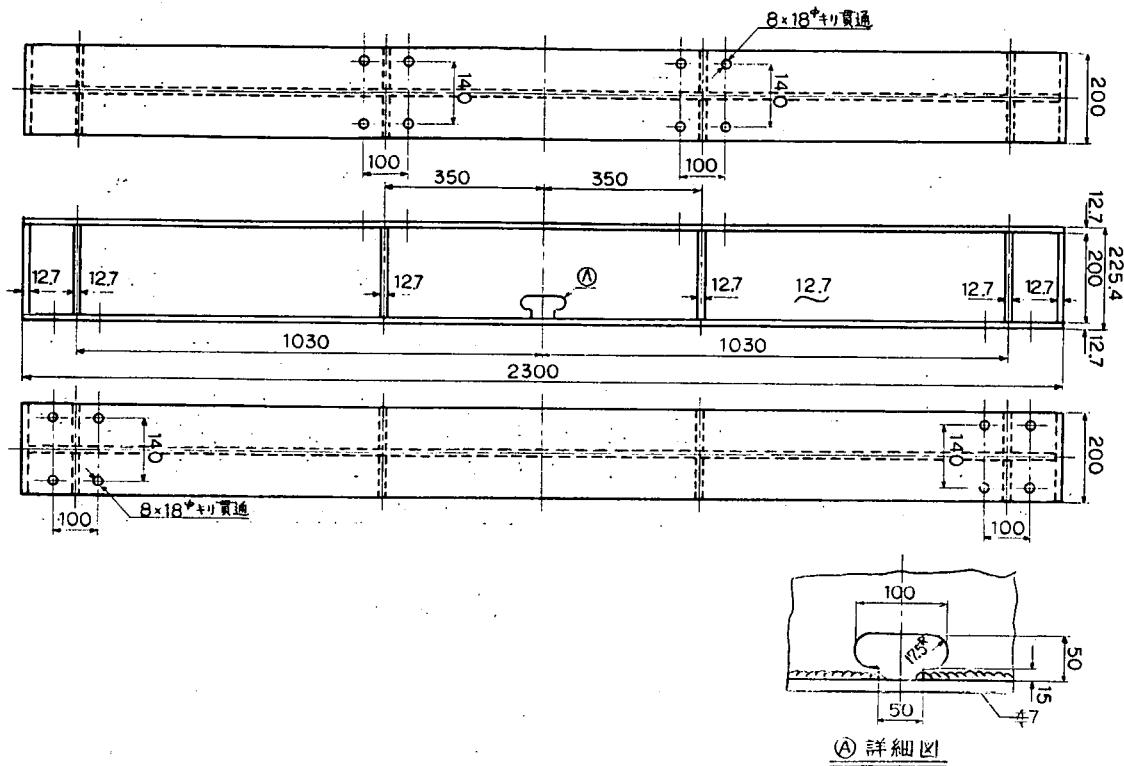
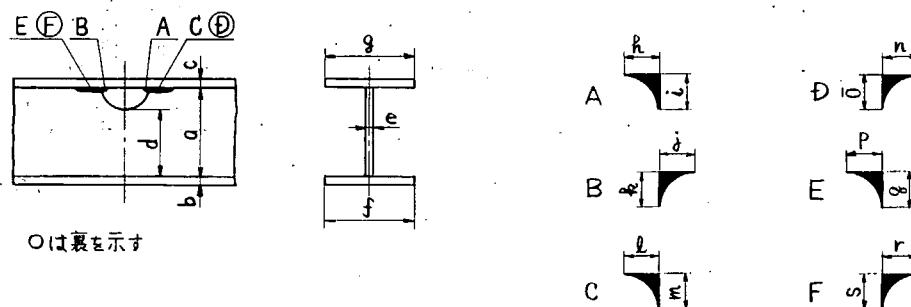
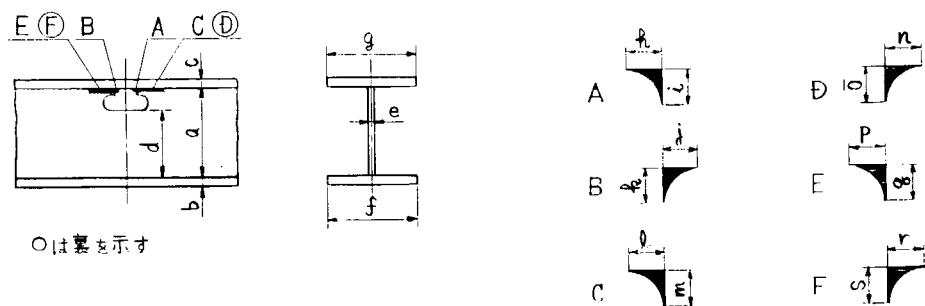


図 5. 4. 1 (b) 試験体形状寸法
(キノコ形スカラップ: SLMシリーズ)



	母板実測寸法 (mm)						溶接ビード実測寸法 (mm)												
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	P	q	r	s
SLC-1	199.0	25.1	25.0	147.5	13.2	200.2	200.3	8.8	7.6	7.8	8.3	9.1	8.0	8.6	7.7	8.4	8.3	8.8	8.4
SLC-2	199.4	25.1	25.0	150.9	13.3	200.3	200.2	9.0	7.3	9.0	8.5	6.3	8.6	6.0	8.0	6.3	8.0	7.0	8.0
SLC-3	199.1	25.0	25.0	150.0	13.3	200.2	200.2	10.0	8.0	9.5	7.0	8.5	7.0	7.5	7.2	8.0	8.0	7.0	6.0

図 5. 4. 2 (a) 試験体溶接部の実測寸法 (SLCシリーズ)



	母板実測寸法 (mm)						溶接ビード実測寸法 (mm)												
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	P	q	r	s
SLM-1	196.9	13.3	13.2	150.0	13.0	200.0	200.2	10.0	7.5	8.0	7.5	7.5	7.0	7.0	7.3	6.0	7.0	7.8	8.0
SLM-2	196.7	13.4	13.4	150.0	13.4	200.0	200.0	10.0	7.0	10.0	6.5	8.0	7.5	8.5	7.5	7.5	7.0	7.2	8.0
SLM-3	196.4	13.3	13.3	149.9	13.1	200.0	200.1	9.2	7.5	9.2	8.3	7.3	9.0	8.1	7.2	7.9	8.5	8.9	8.0

図 5. 4. 2 (b) 試験体溶接部の実測寸法 (SLM シリーズ)

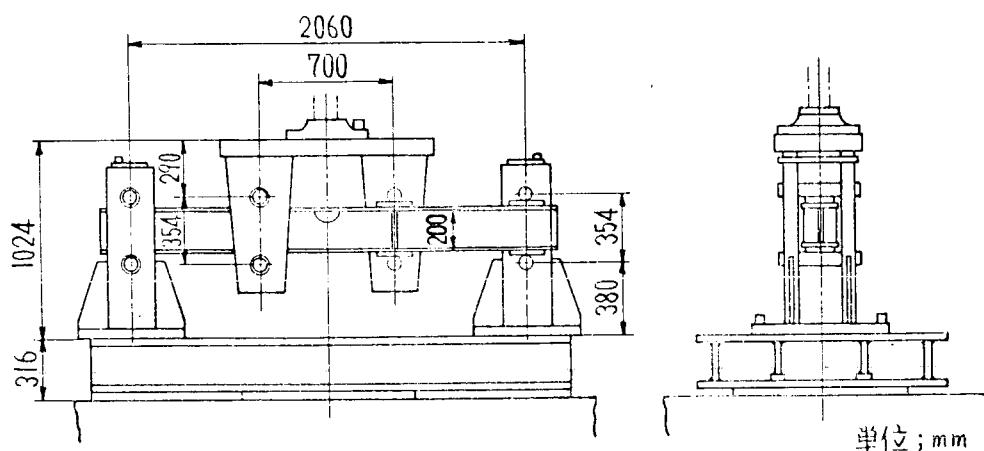


図 5. 4. 3 試験装置概要

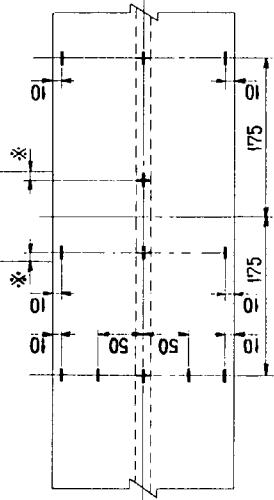
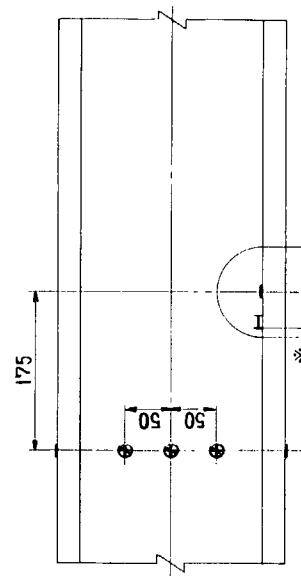
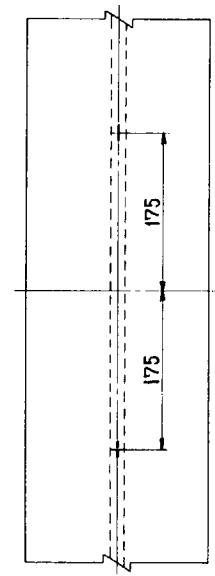
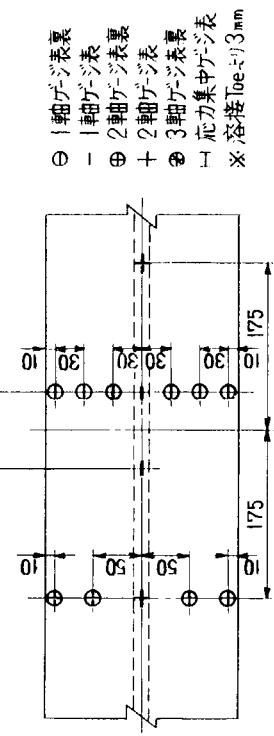
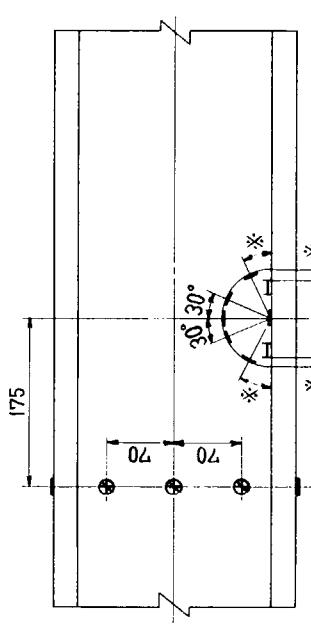
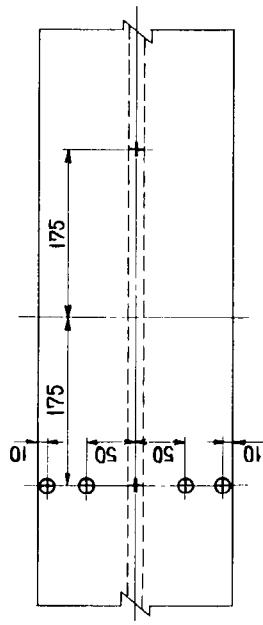


図 5.4.4 (a) ゲージ貼付図 (S L C - 1)

図 5.4.4 (b) ゲージ貼付図 (S L C - 2 , S L C - 3)

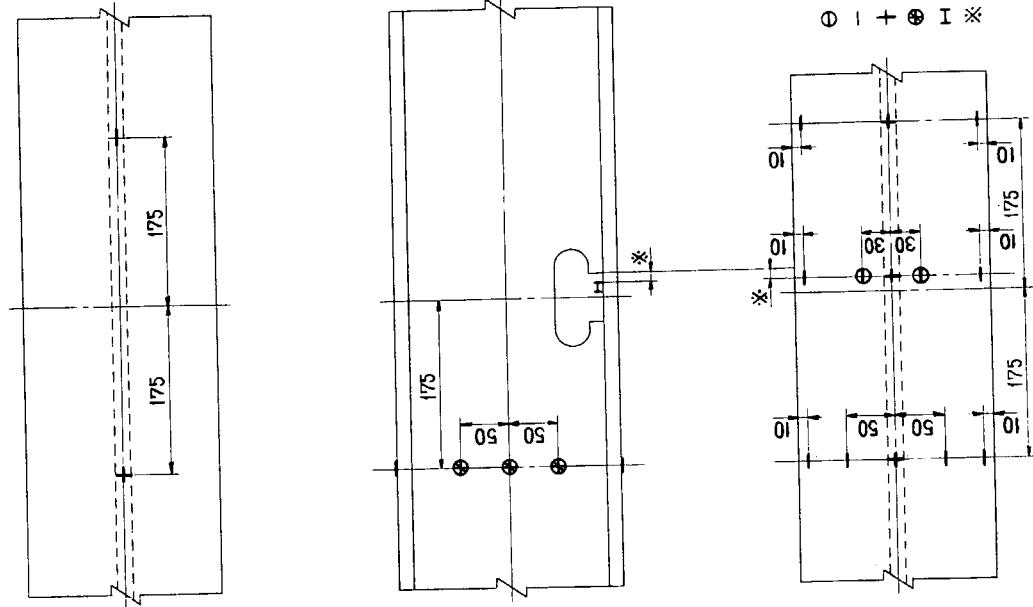


図 5.4.4 (c) ゲージ貼付図 (SLM-1)

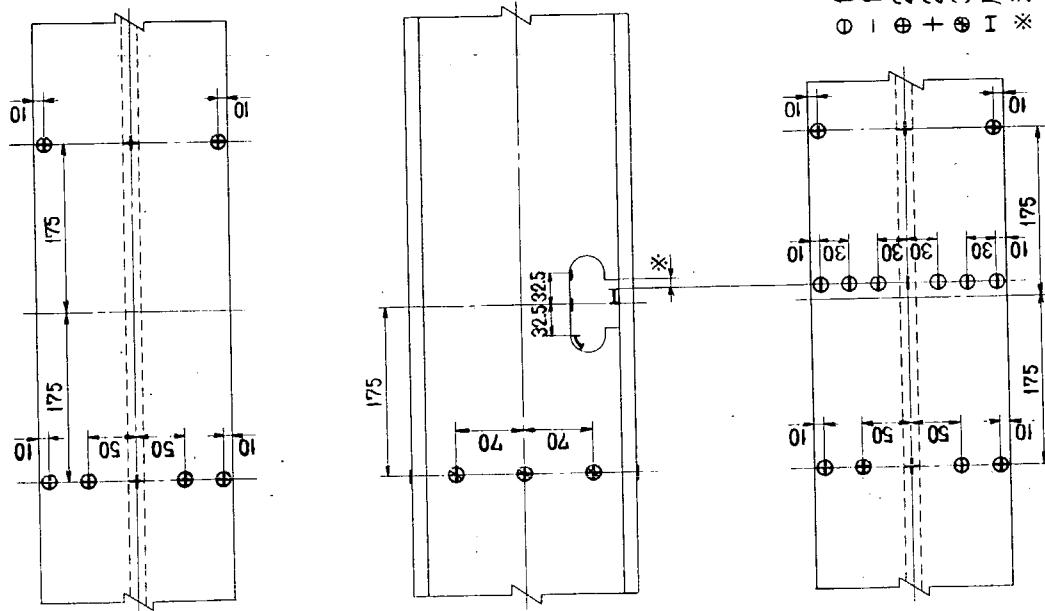
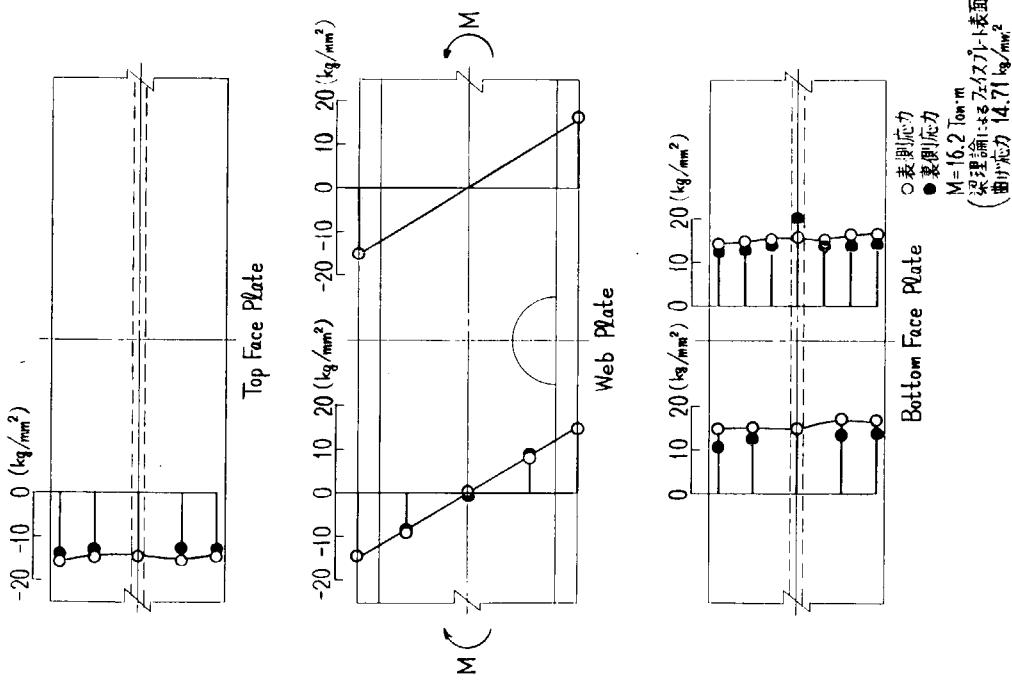
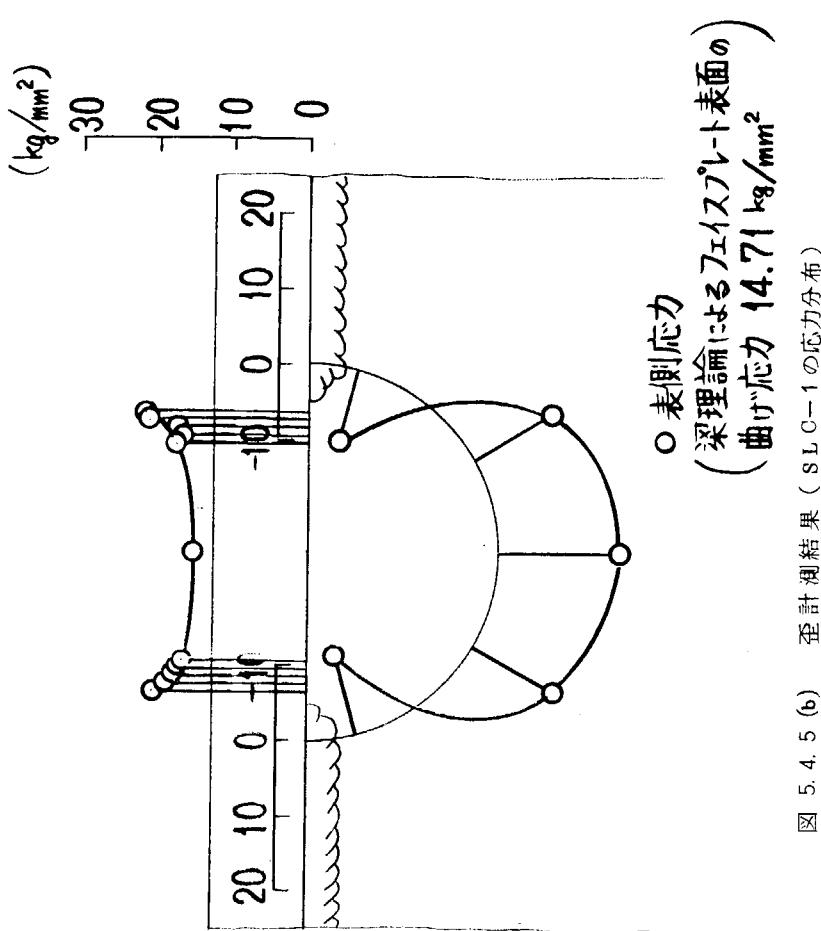


図 5.4.4 (d) ゲージ貼付図 (SLM-2, SLM-3)



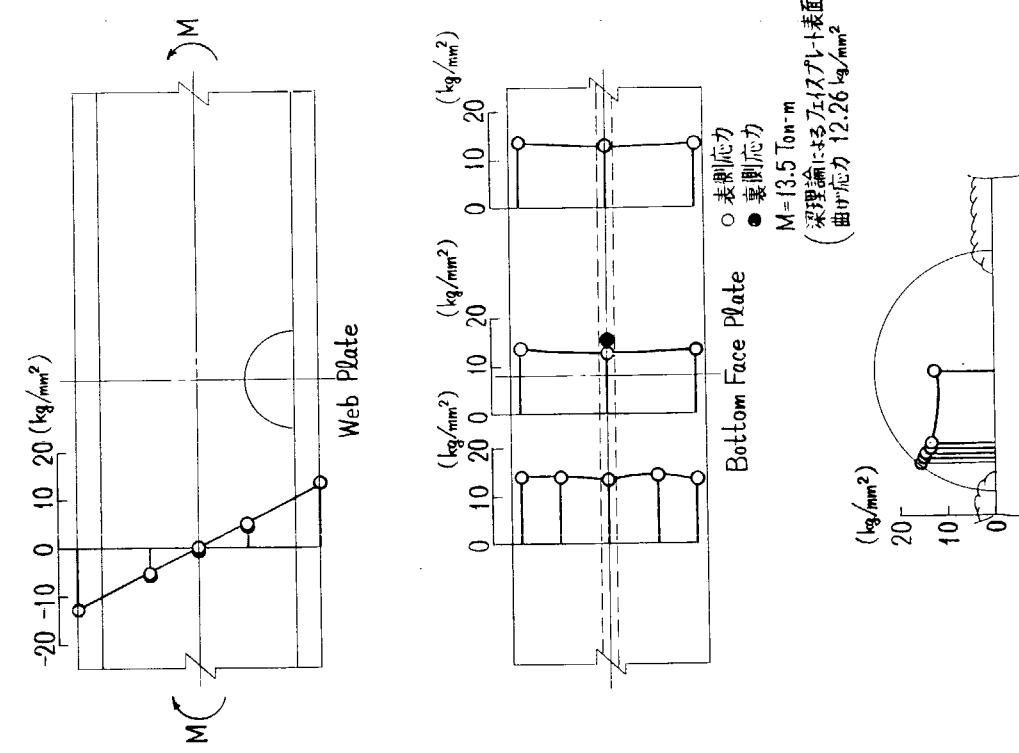


図 5.4.5(c) 積計測結果 (SLC-2 の応力分布)

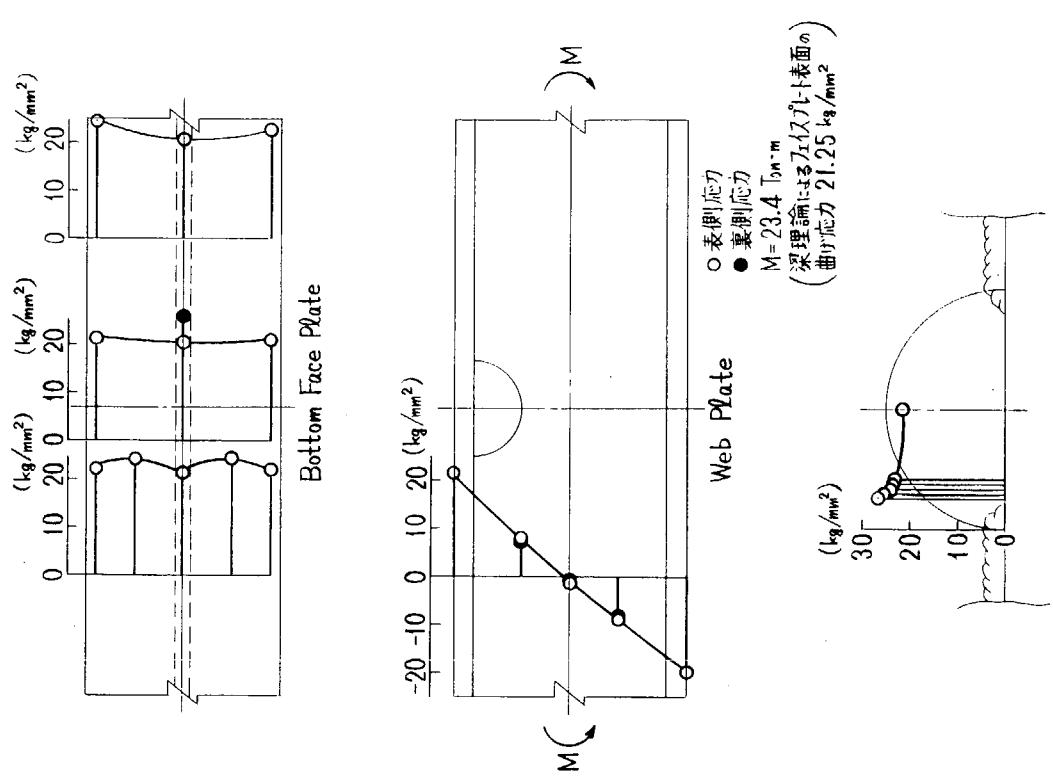


図 5.4.5(d) 積計測結果 (SLC-3 の応力分布)

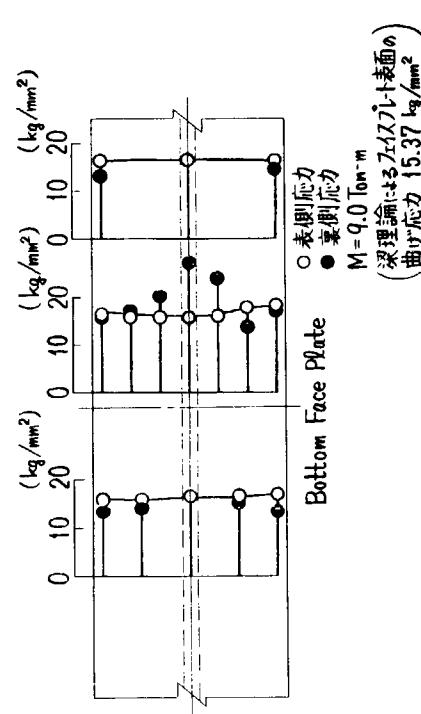
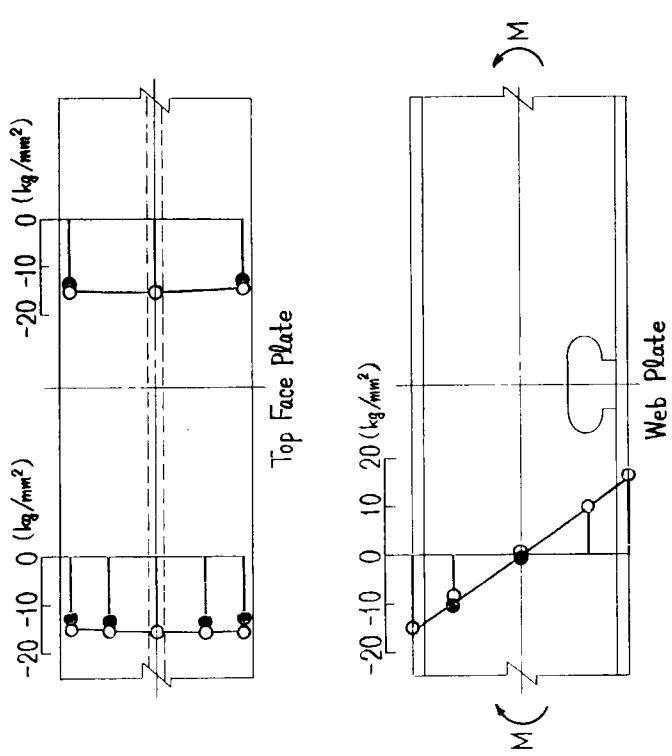


図 5. 4. 6 (a) 算計測結果 (SLM-1 の応力分布)

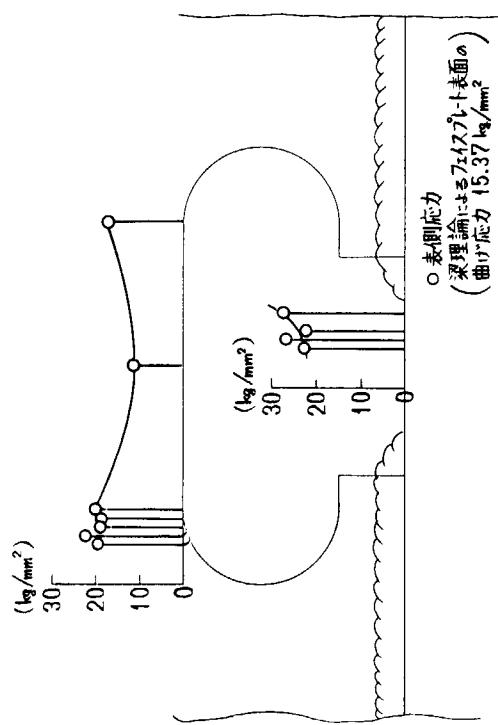


図 5. 4. 6 (b) 算計測結果 (SLM-1 の応力分布)

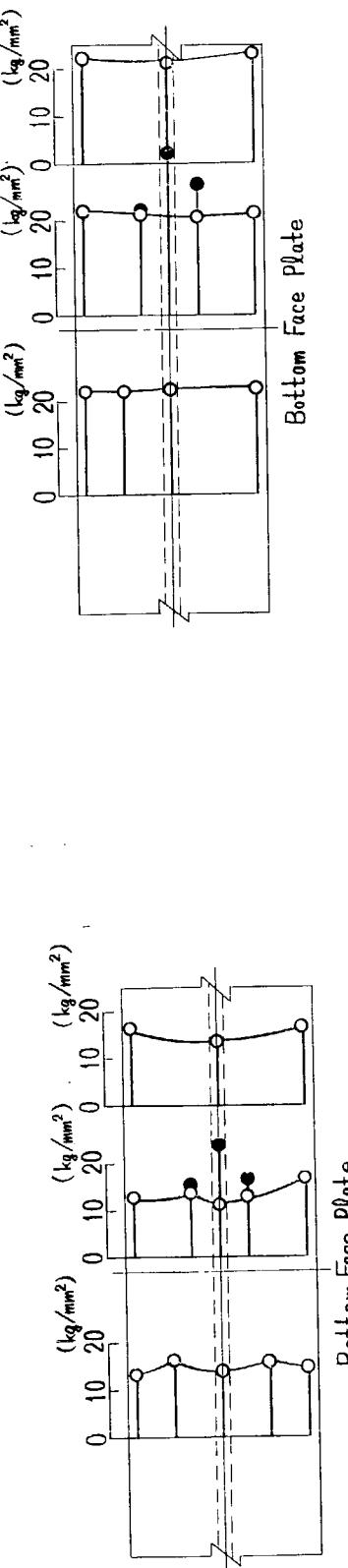


図 5.4, 6 (c) 歪計測結果 (SLM - 2 の応力分布)

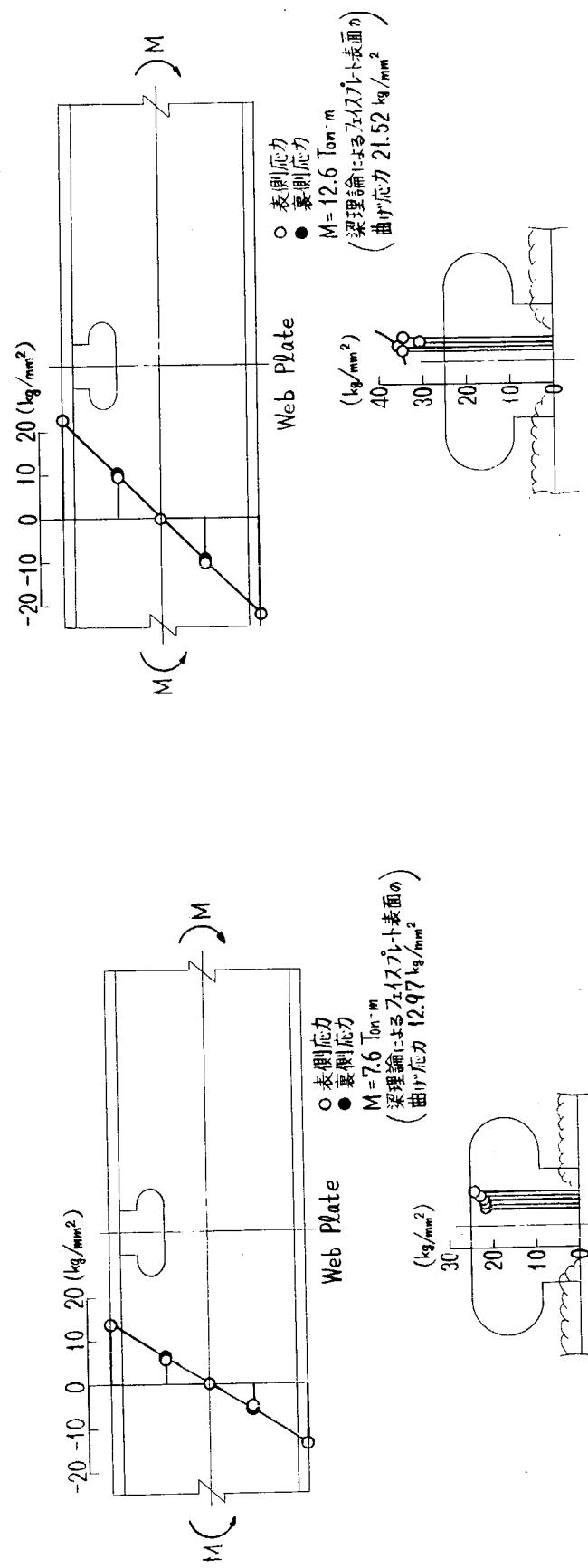


図 5.4, 6 (d) 歪計測結果 (SLM - 3 の応力分布)

表 5. 4. 2 静試験(歪計測)による応力集中率(K_t)評価

試験体	曲げモーメント M ($T_{ON} \cdot m$)	断面係数 I/y (mm^3)	梁理論による 曲げ表面応力 σ_b (kg/mm^2)	実測による 曲げ表面応力 σ_o, exp (kg/mm^2)	スカラップ周辺の応力			備考
					止端部から 3mmまでの応力 $\sigma_r = r_o$ (kg/mm^2)	止端部から 1mmまでの応力 $\sigma_r = r_o$ (kg/mm^2)	推定される応力集中率 K_t ($=\sigma_{max}/\sigma_o$)	
SLC-1	16.2		14.7	14.7	20.4 ($r_o=11$)	17.0 ($r_o=11$)	22.7	1.54
SLC-2	13.5	11.01×10^5	12.3	12.8	15.5 ($r_o=11$)	13.1 ($r_o=11$)	17.6	1.43
SLC-3	23.4		21.3	21.5	26.7 ($r_o=11$)	22.9 ($r_o=11$)	30.0	1.40
SLM-1	9.0		15.4	15.8	27.2 ($r_o=11$)	22.7 ($r_o=11$)	29.7	1.93
SLM-2	7.6	5.86×10^5	13.0	13.5	24.0 ($r_o=11$)	21.7 ($r_o=11$)	25.0	1.93
SLM-3	12.6		21.5	22.4	(38.0) ($r_o=9$)	34.5 ($r_o=9$)	40.2	1.87

(※1) 止端部近傍の応力変化を、 $\delta=\sigma_o(1-\alpha e^{-\beta r})$ 、(α, β :未定係数)と仮定して推定した。

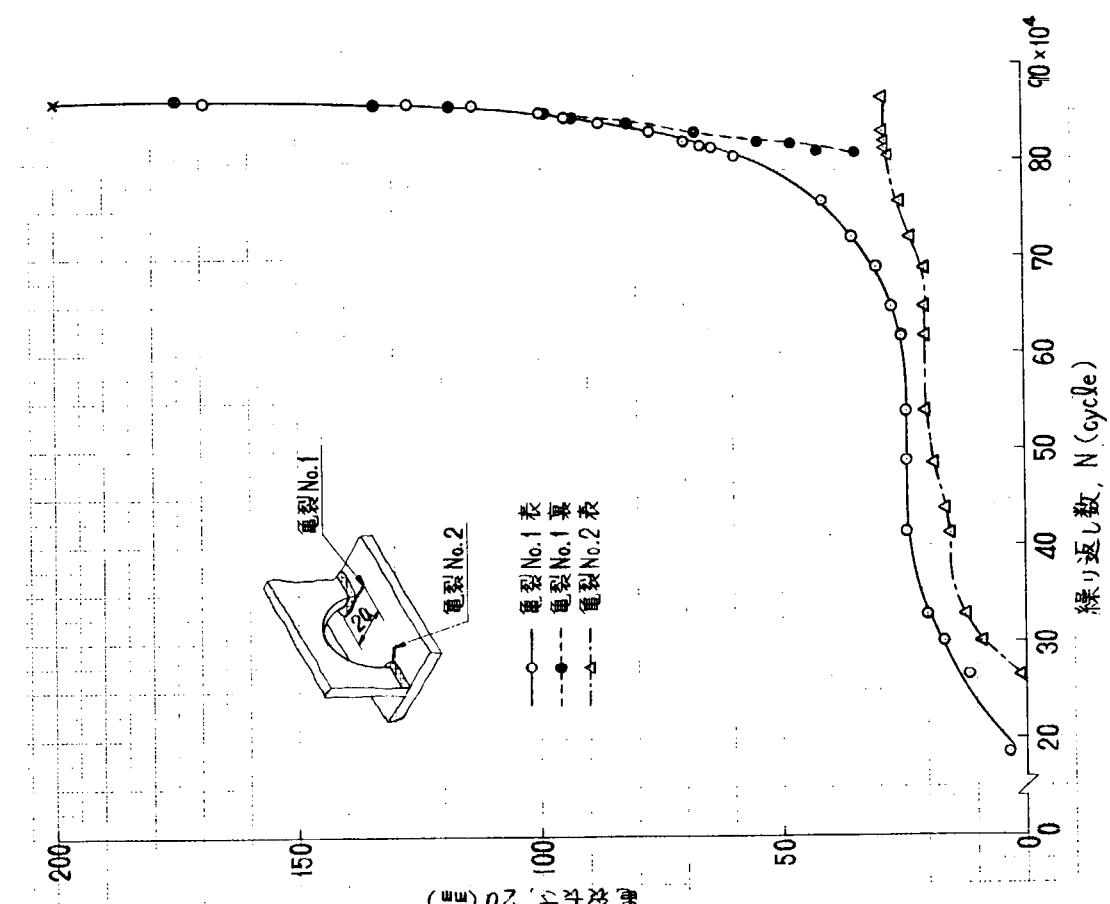
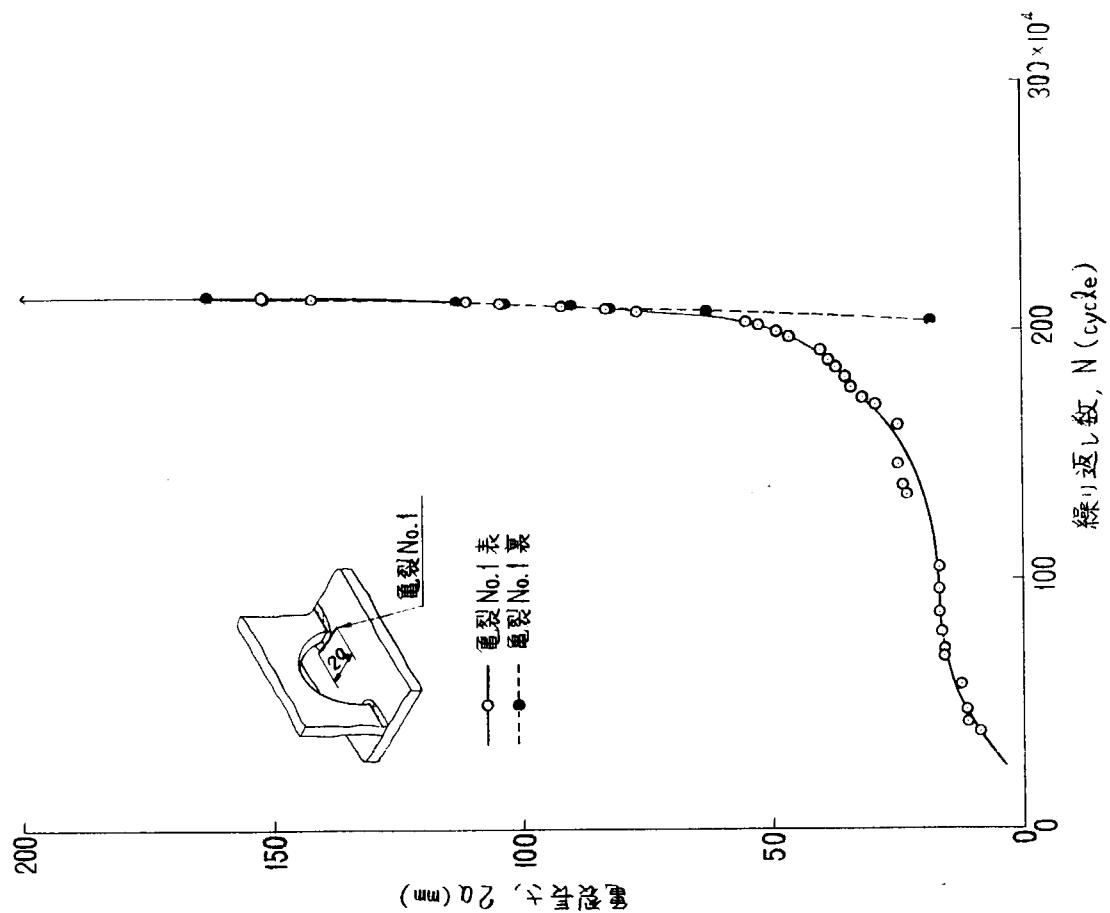


図 5.4.7 (b) 売裂長さと繰り返し数の関係 (S1.O-2)

図 5.4.7 (a) 売裂長さと繰り返し数の関係 (S1.O-1)

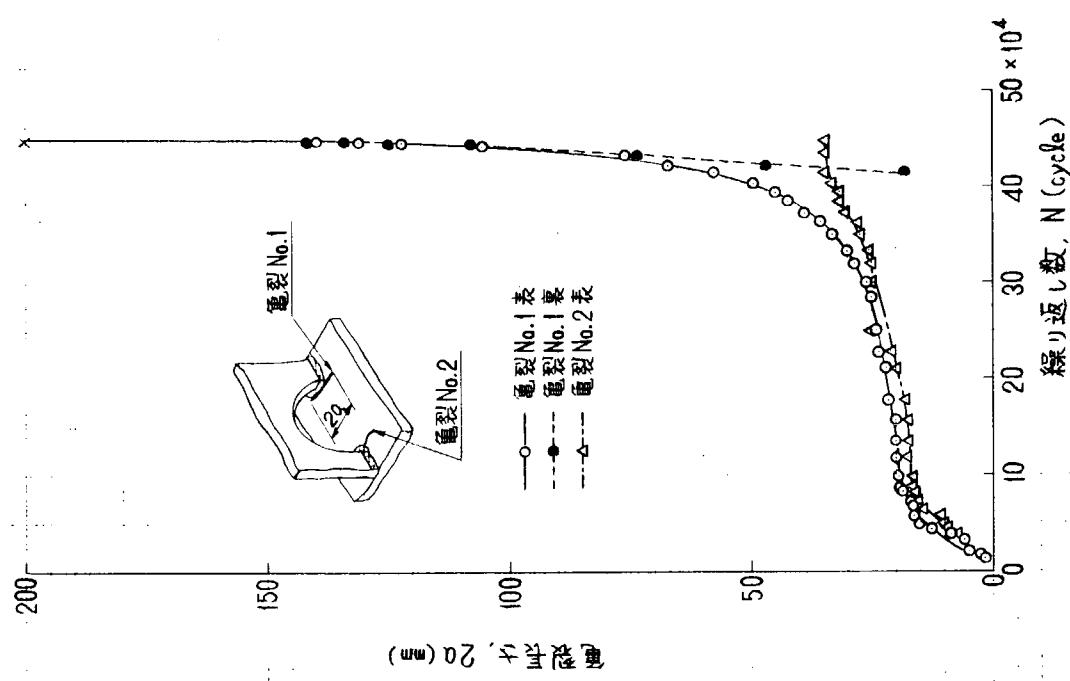


図 5.4.7 (c) 龜裂長さと繰り返し数の関係 (SLC-3)

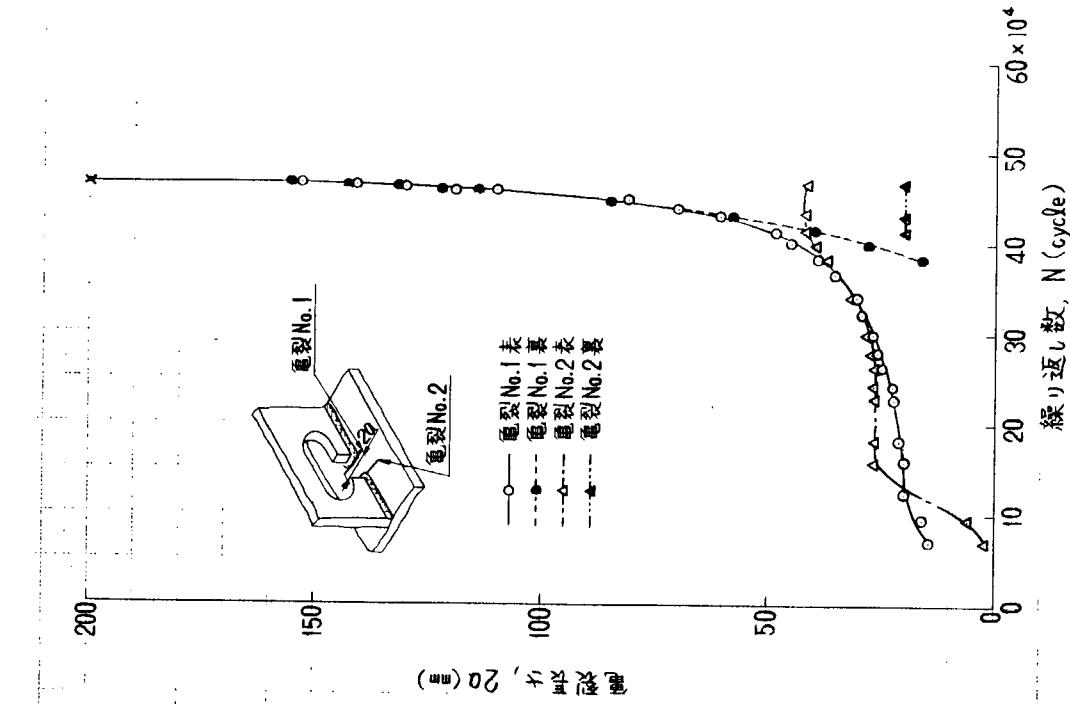


図 5.4.8 (a) 龜裂長さと繰り返し数の関係 (SLIM-1)

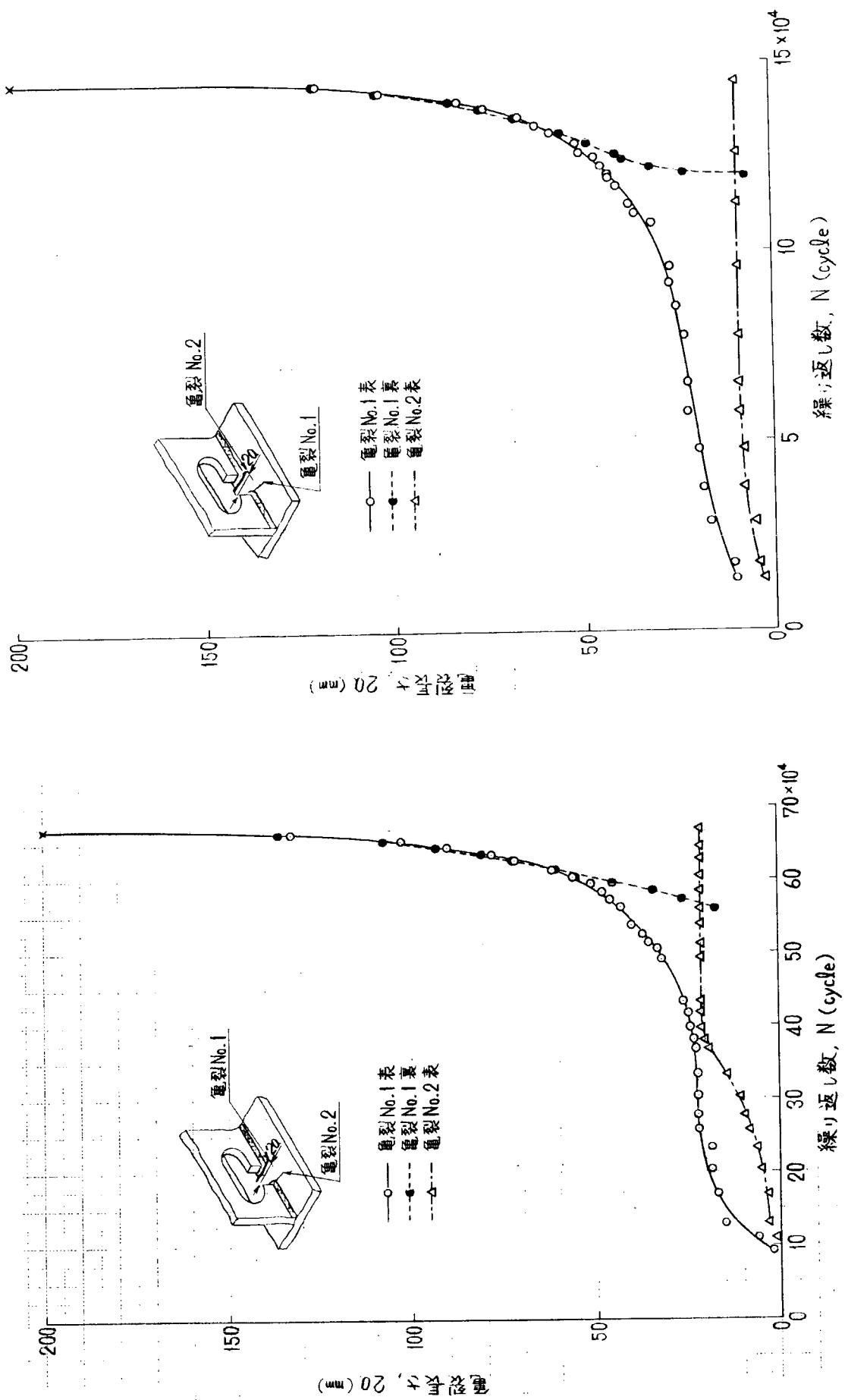


図 5.4.8 (b) 龜裂長さと繰り返し数の関係 (SLM-2)

図 5.4.8 (c) 龜裂長さと繰り返し数の関係 (SLM-3)

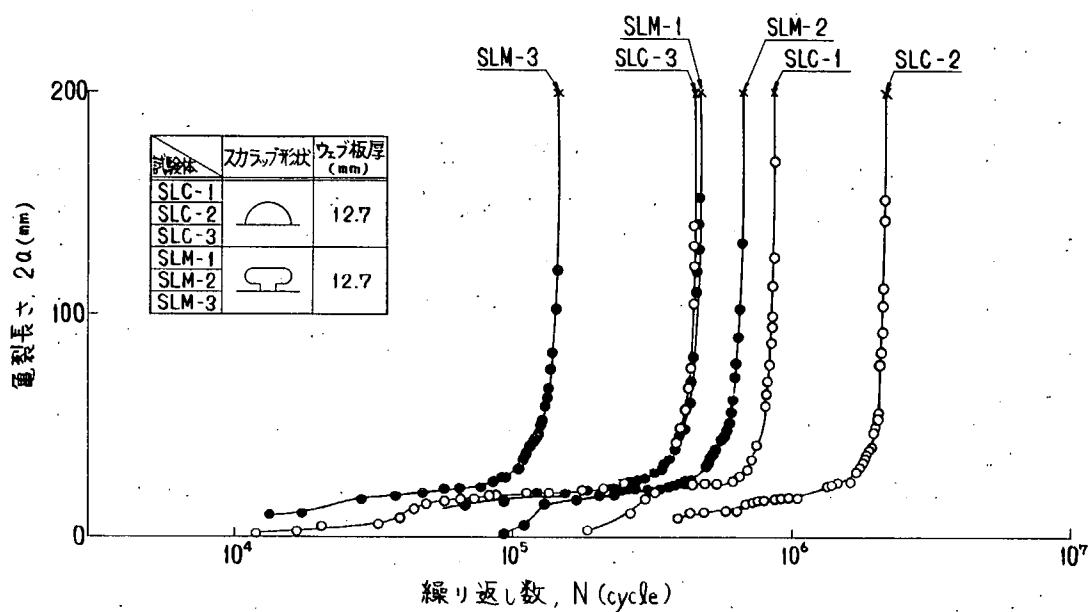


図 5.4.9 表面亀裂長さと繰り返し数との関係

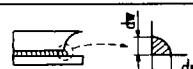
表 5.4.3 スカラップ部疲労試験結果一覧表

図 5.4.3 スカラップ部疲労試験結果一覧表

試験体 番号	試験体形状寸法		公称応力 複振幅 σ_R (MPa)	応力比 R	上部部材 複振幅 初期応力 複振幅倍 $(\frac{\sigma_0}{\sigma_{R,0}})$	表面亀裂 初期長さ 初期複 合倍 $(\frac{a_0}{a_{R,0}})$	繰り返 し回数 (cycles) $N_{2a=10}$	破断 繰り返 し回数 N_f	SN曲線の数式表示(図5.4.12参照)				備考	
	スカラップ 部厚 d (mm)				複振幅 初期板厚 $d_{R,0}$ (mm)	表面亀裂 初期長さ 初期複 合倍 $(\frac{a_0}{a_{R,0}})$								
	スカラップ 部厚 d (mm)	初期板厚 $d_{R,0}$ (mm)	初期複 合倍 $(\frac{a_0}{a_{R,0}})$	初期複 合倍 $(\frac{a_0}{a_{R,0}})$	初期複 合倍 $(\frac{a_0}{a_{R,0}})$	初期複 合倍 $(\frac{a_0}{a_{R,0}})$								
SLC-1	7.6 8.8	12.7 25.4	13.2	0.1	20.4	2.30×10^5	8.65×10^5							
SLC-2	7.3 9.0	12.7 25.4	11.1	0.1	15.5	4.10×10^5	2.137×10^6							
SLC-3	8.0 10.0	12.7 25.4	19.2	0.1	26.7	4.1×10^4	4.47×10^5	②	⑤	①	③			
SLM-1	7.5 10.0	12.7 25.4	13.9	0.1	27.2	5.3×10^4	4.65×10^5	$\times N_{2a=10}^{-0.2386}$	$\times N_{2a=10}^{2.417 \times 10^2}$	$\times N_f^{-0.2386}$	$\times N_f^{1.662 \times 10^3}$			
SLM-2	7.0 10.0	12.7 25.4	11.7	0.1	24.0	1.20×10^5	6.69×10^5	$\times N_{2a=10}^{-0.2386}$	$\times N_f^{3.240 \times 10^2}$	$\times N_f^{-0.2386}$	$\times N_f^{2.168 \times 10^3}$			
SLM-3	7.5 9.2	12.7 25.4	19.4	0.1	38.0	1.4×10^4	1.45×10^5		⑥	④	④			
SLA	11.2 12.0	25.4 25.4	18.0	-1.0		6.6×10^4	2.38×10^5							
SLB	6.3 7.5	25.4 25.4	18.0	-1.0		5.0×10^4	2.69×10^5							

(*)1 上段はウェブ側の値(d_w)、下段はフリス側の値(d_f)

(*)2 キノコ形スカラップの値



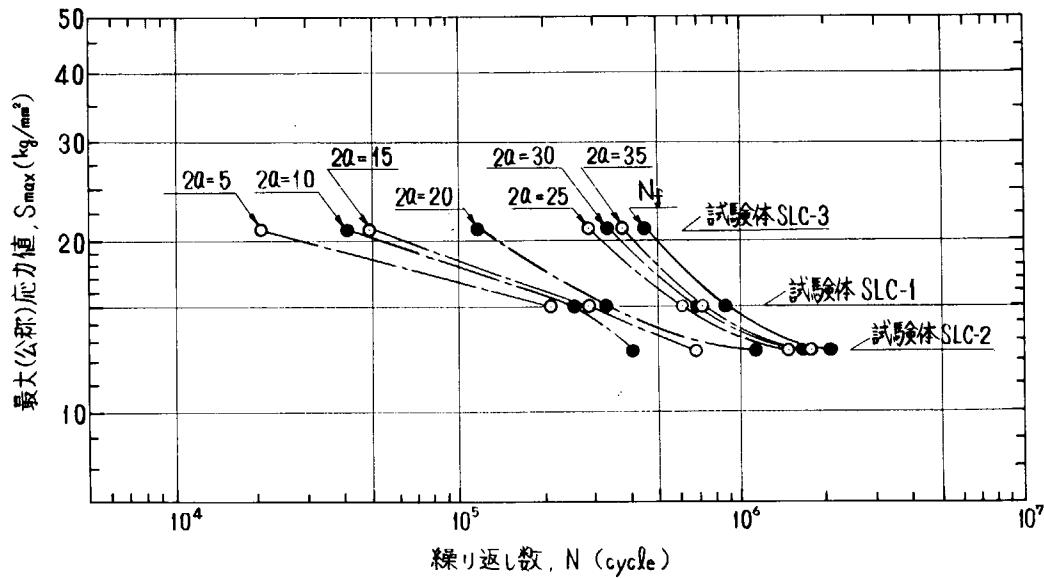


図 5.4.10 最大(公称)応力と繰り返し数の関係(半円形スカラップ: SLCシリーズ)

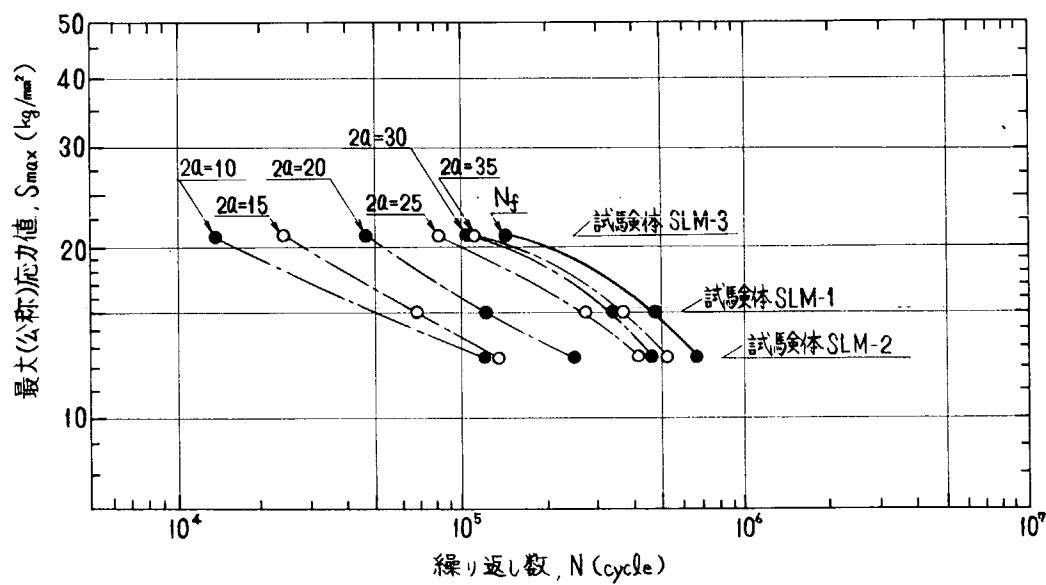


図 5.4.11 最大(公称)応力と繰り返し数の関係(キノコ形スカラップ: SLMシリーズ)

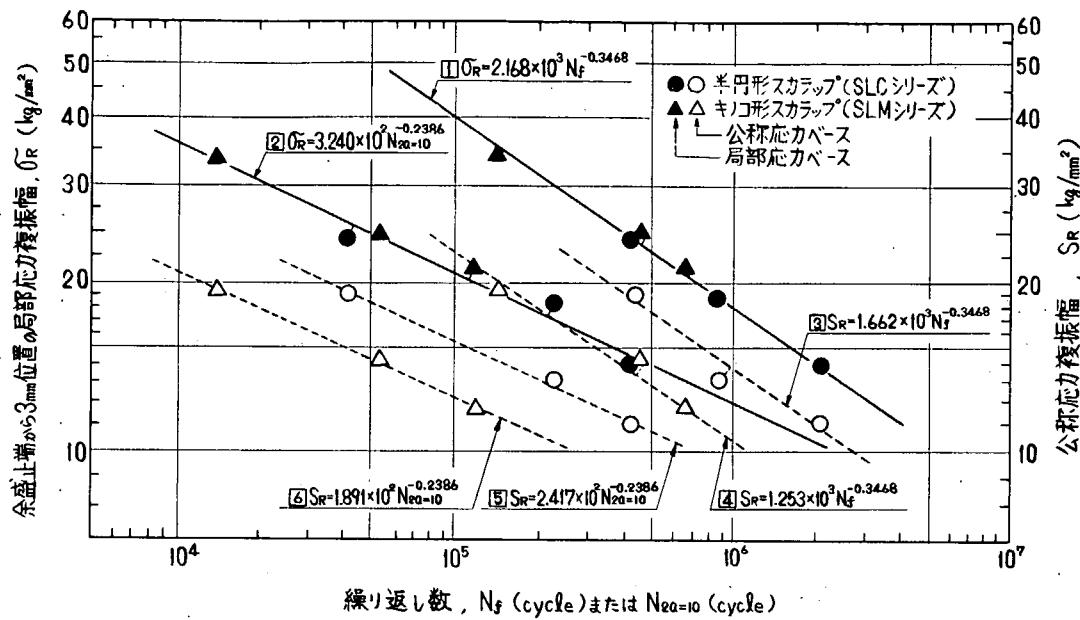


図 5.4.12 応力複振幅と寿命の関係

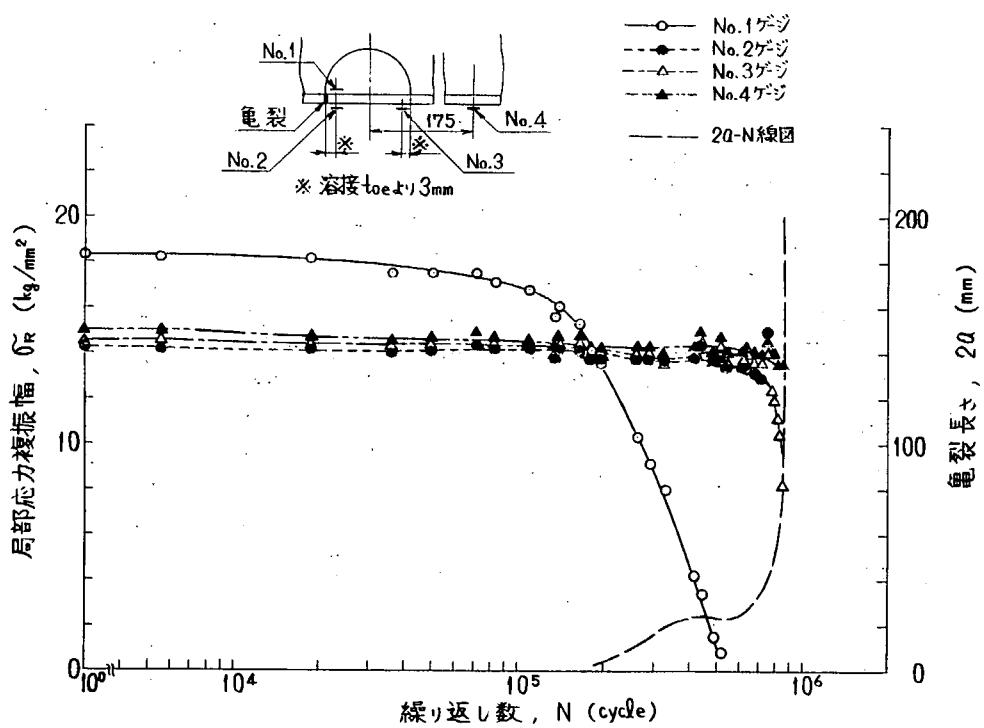


図 5.4.13 (a) 応力複振幅と繰り返し数の関係 (SLC-1)

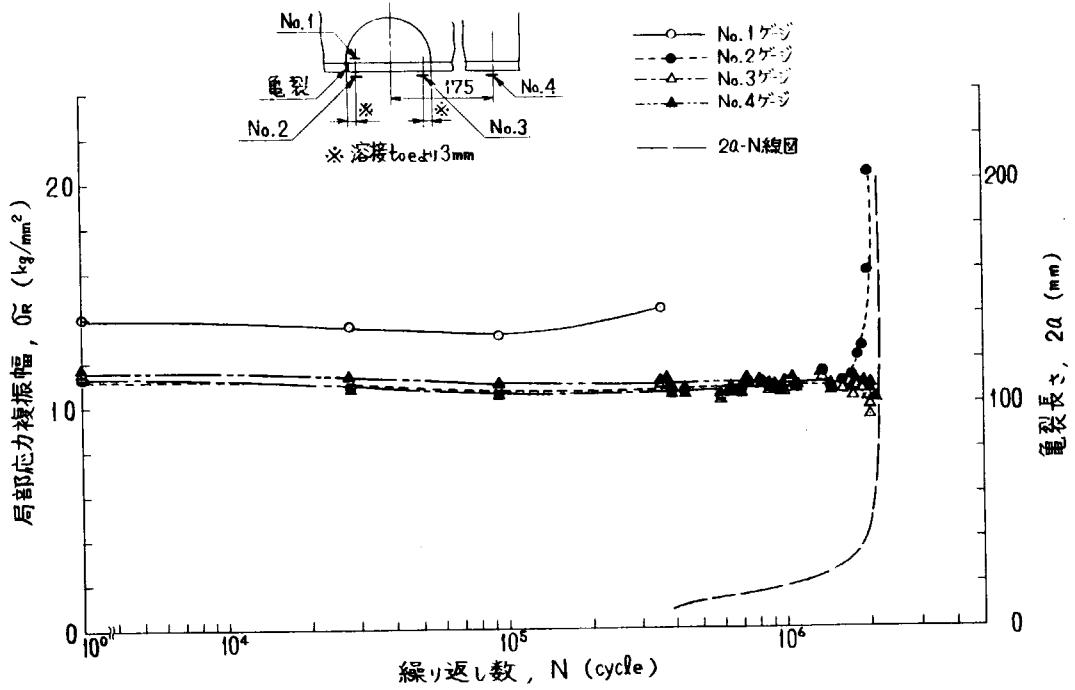


図 5.4.13 (b) 応力複振幅と繰り返し数の関係 (S L C - 2)

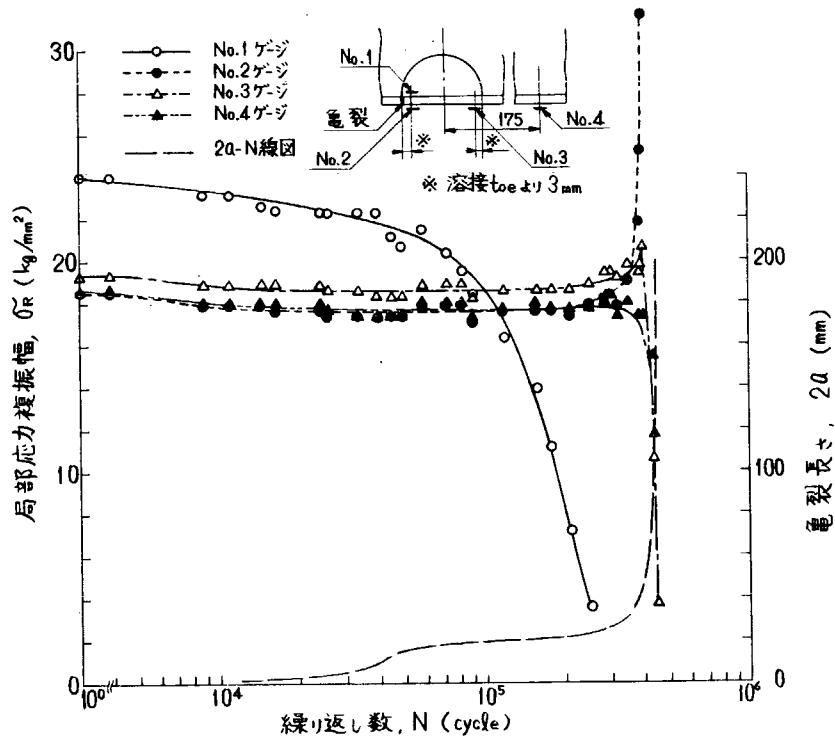


図 5.4.13 (c) 応力複振幅と繰り返し数の関係 (S L C - 3)

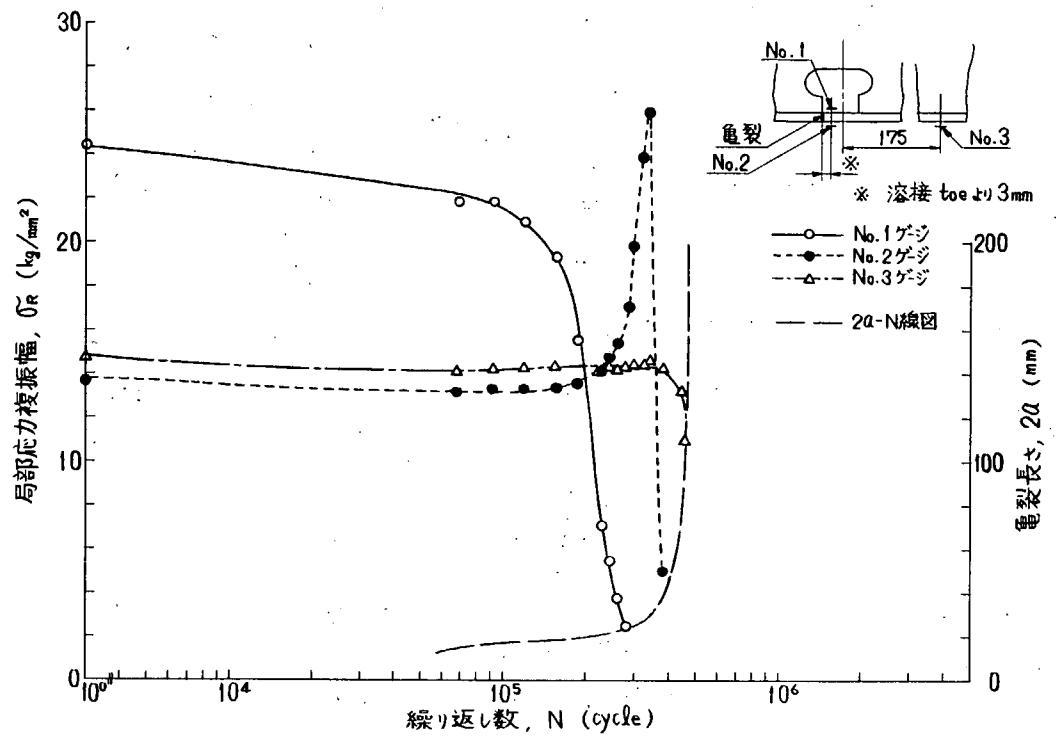


図 5.4.14 (a) 応力複振幅と繰り返し数の関係 (SLM-1)

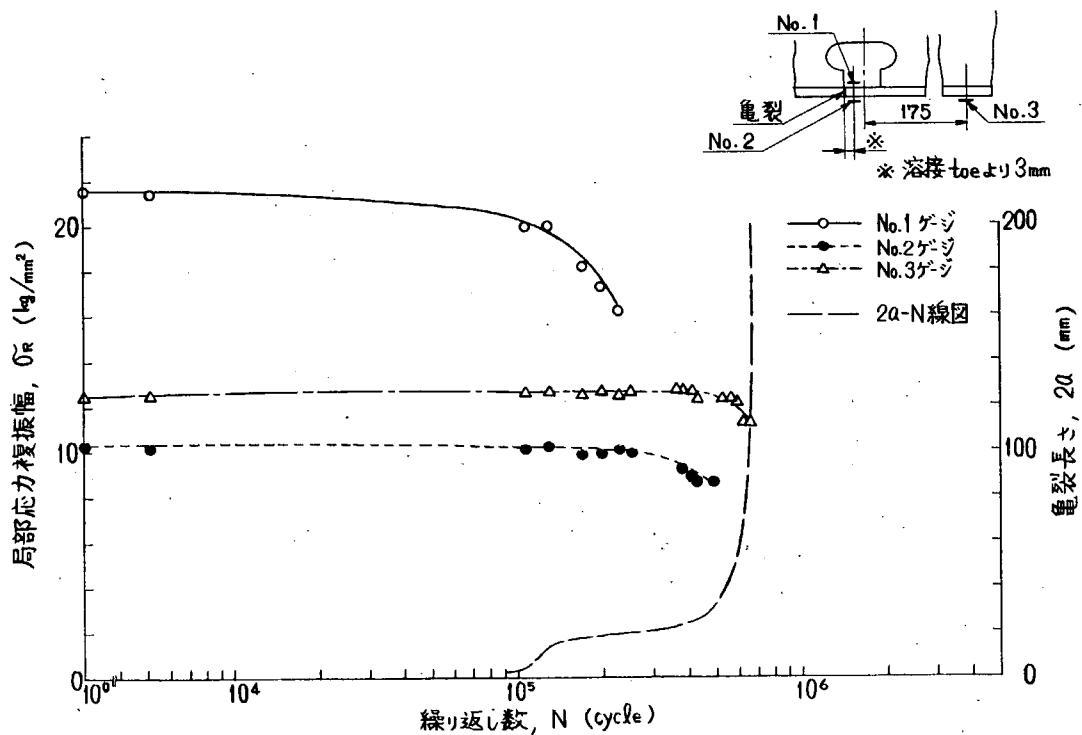


図 5.4.14 (b) 応力複振幅と繰り返し数の関係 (SLM-2)

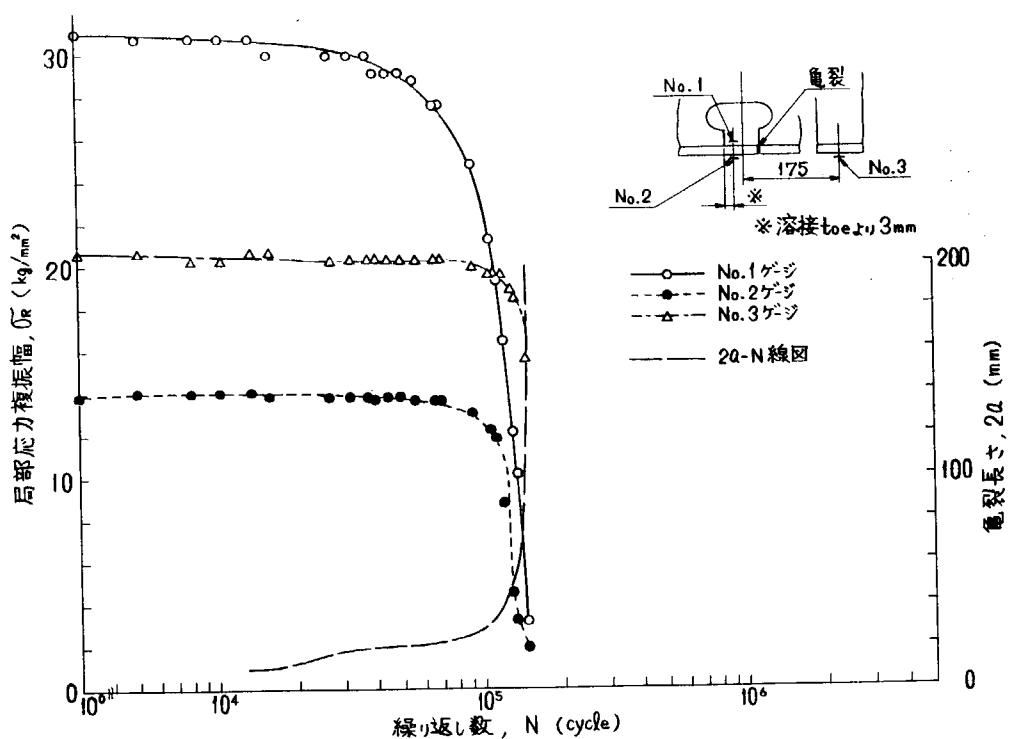


図 5.4.14 (c) 応力複振幅と繰り返し数の関係 (SLM-3)

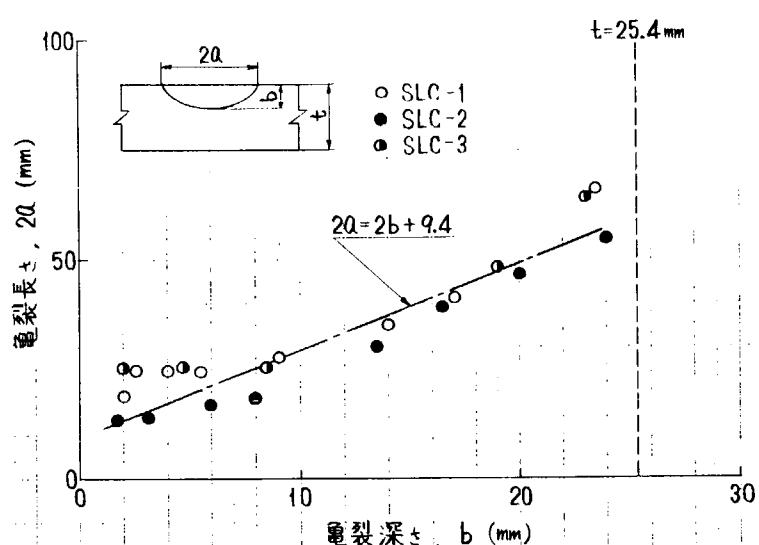


図 5.4.15 (a) 龟裂長さと龟裂深さの関係 (SLC シリーズ)

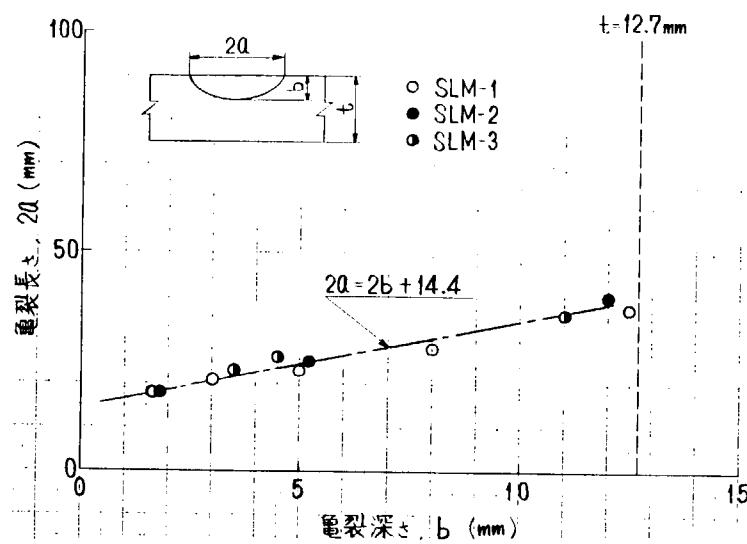


図 5.4.15 (b) 亀裂長さと亀裂深さの関係 (SLMシリーズ)

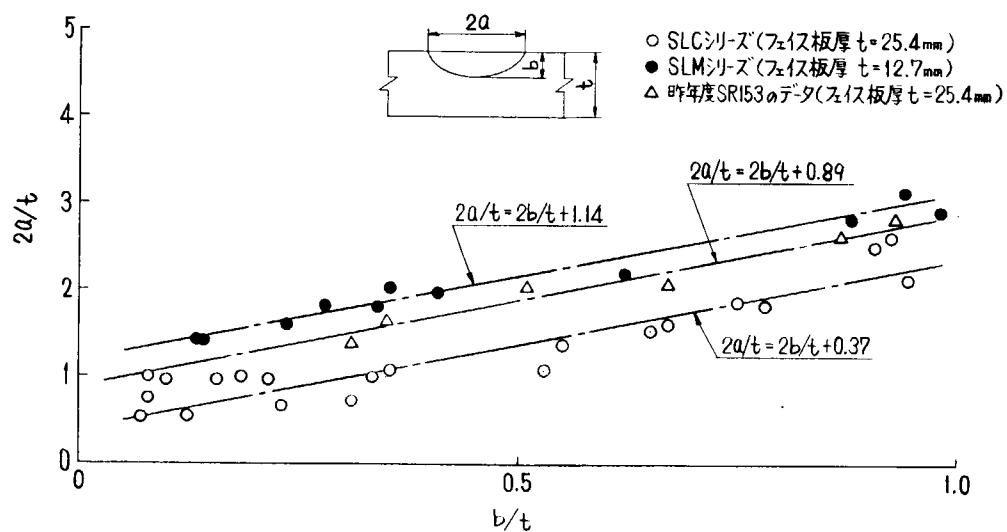


図 5.4.16 亀裂長さと亀裂深さの関係

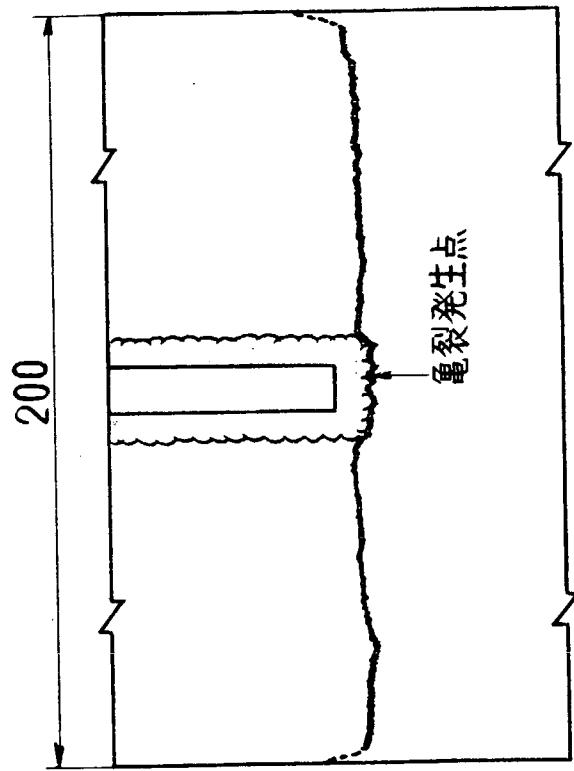
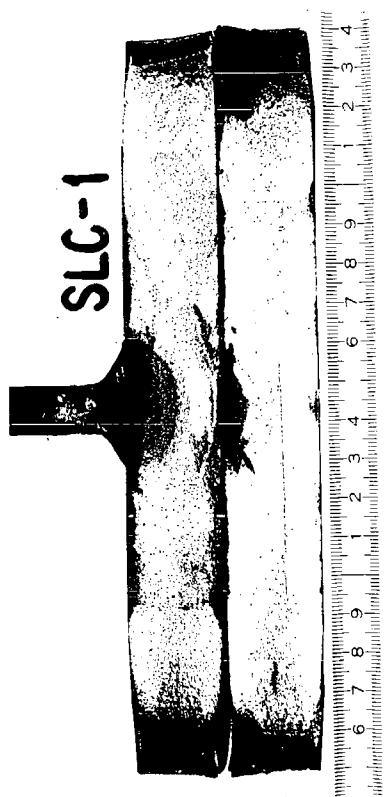


図 5.4.17 試験体破断モード概観
(S L C - 1)

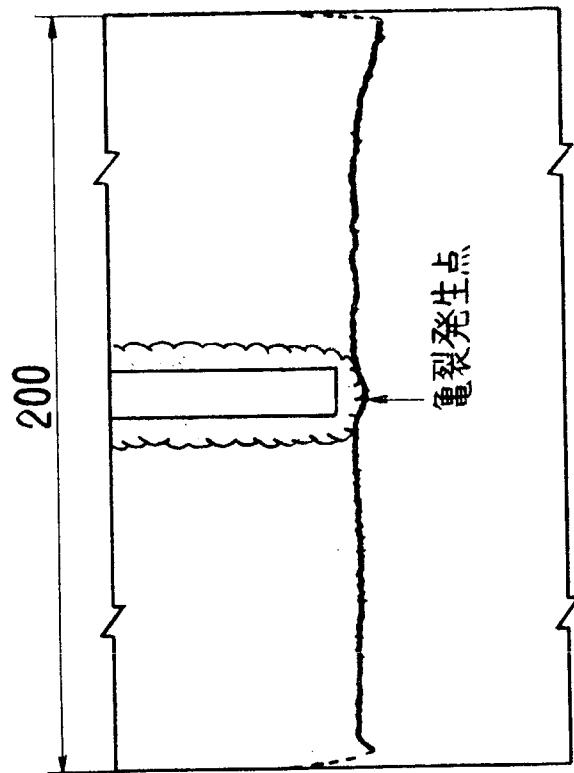
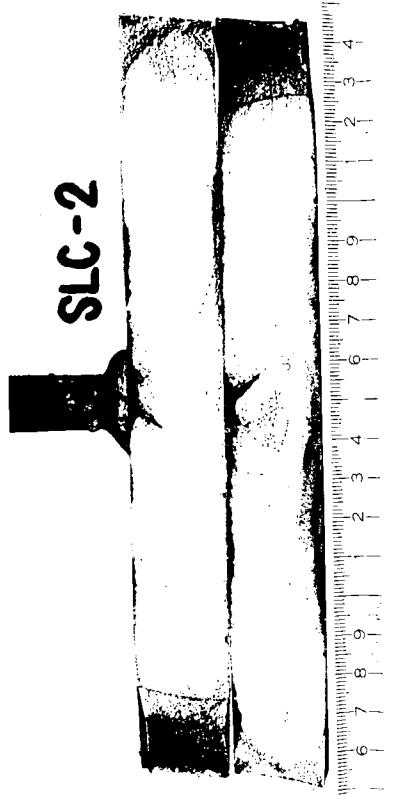
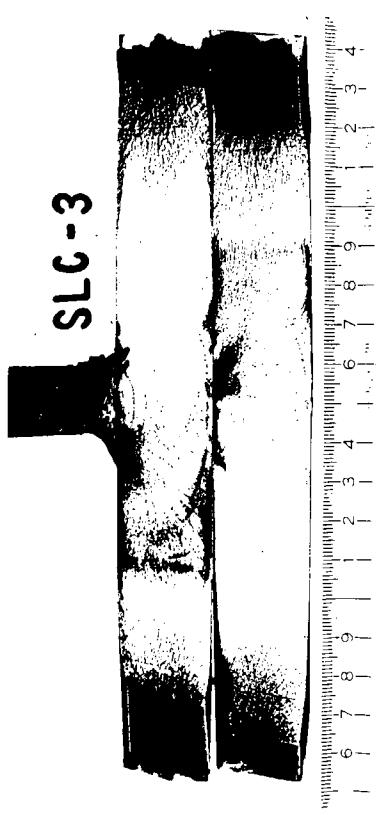
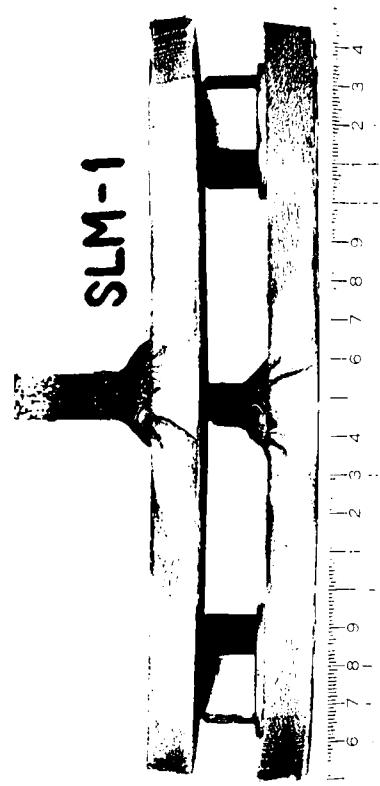


図 5.4.18 試験体破断モード概観
(S L C - 2)



SLC-3



SLM-1

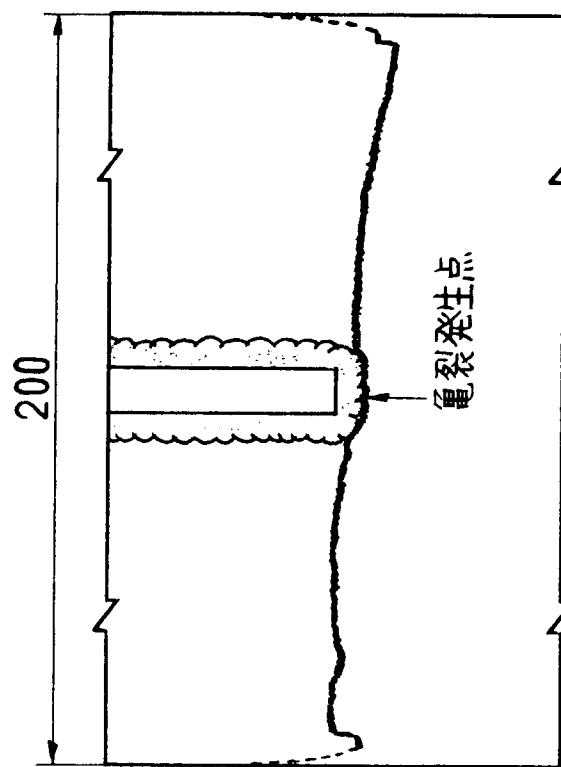


図 5.4.19 試験体破断モード概観
(SLC-3)

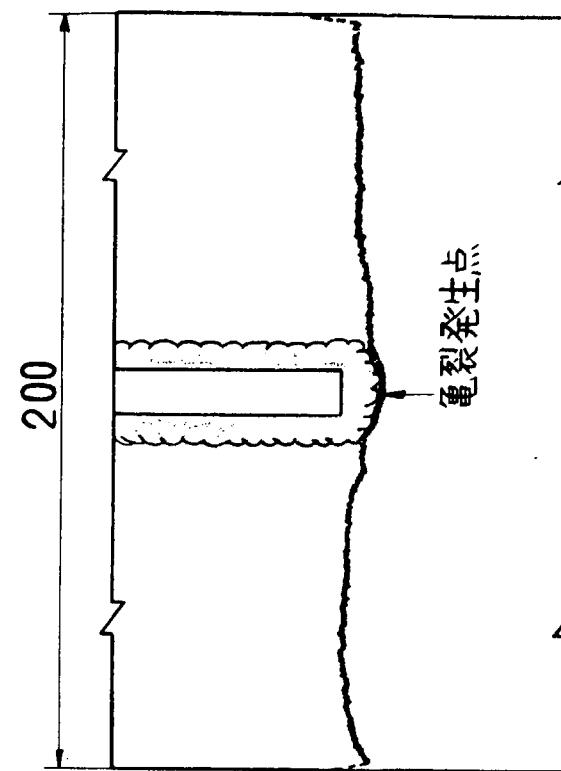


図 5.4.20 試験体破断モード概観
(SLM-1)

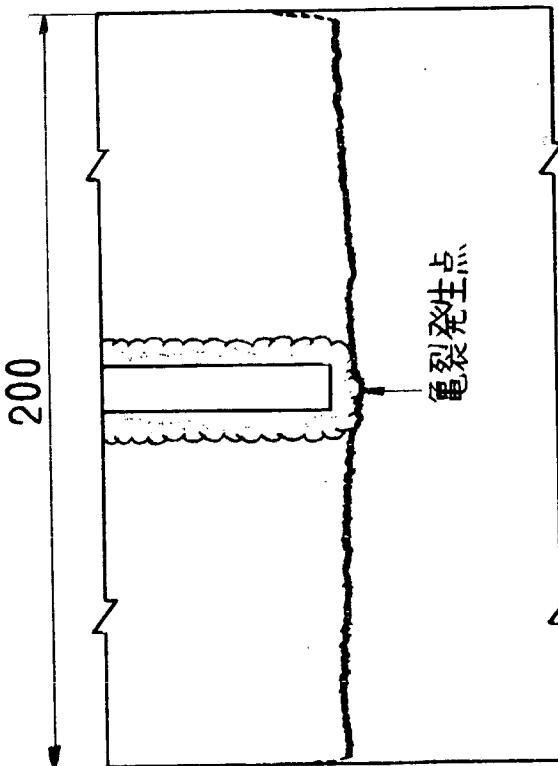
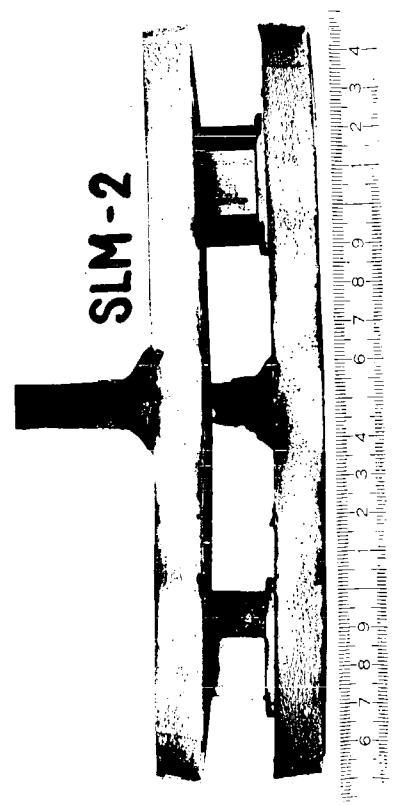


図 5.4.21 試験体破断モード概観
(SLM-2)

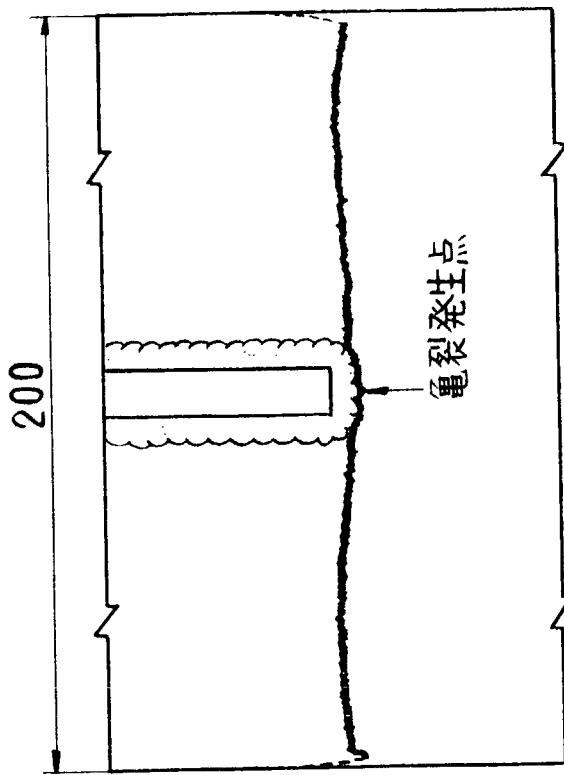
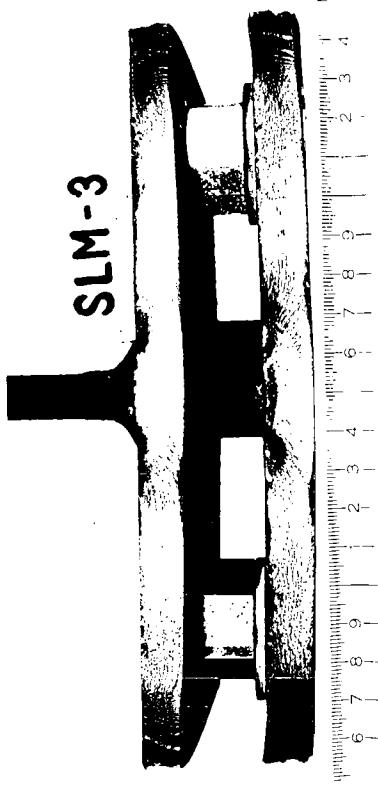


図 5.4.22 試験体破断モード概観
(SLM-3)

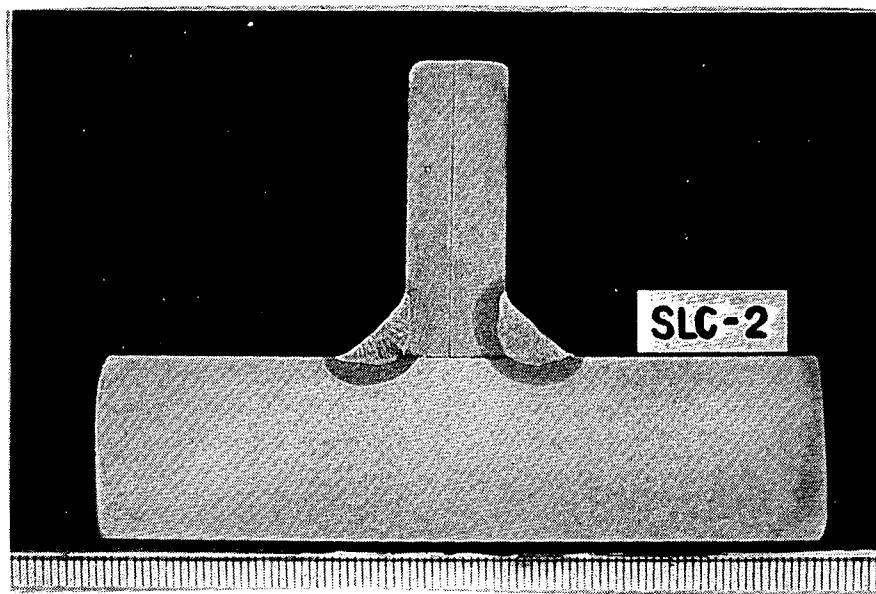
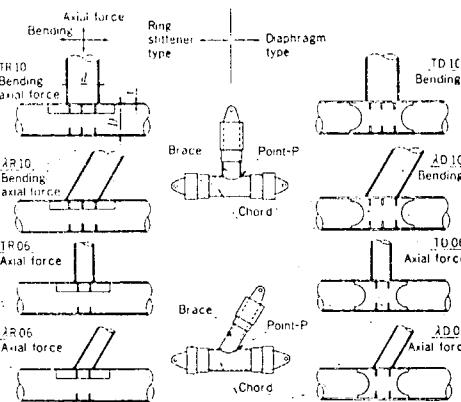


図 5.4.23 隅内溶接部の継手断面 エッチング後の概観
(S L C - 2)



Type	Model	d/D	t/D	Type of reinforcement	Intersecting angle	Number of model	
						Axial	Bend
1	TR10	1.0	1/67	Ring stiffener	90°	3	3
2	TD10	1.0	1/67	Diaphragm	90°	—	2
3	AR10	1.0	1/67	Ring stiffener	60°	2	2
4	AD10	1.0	1/67	Diaphragm	60°	—	2
5	TR06	0.6	1/67	Ring stiffener	90°	2	—
6	TD06	0.6	1/67	Diaphragm	90°	2	—
7	AR06	0.6	1/67	Ring stiffener	60°	2	—
8	AD06	0.6	1/67	Diaphragm	60°	2	—

図 5.4.24 Experiment Plan (文献 1)

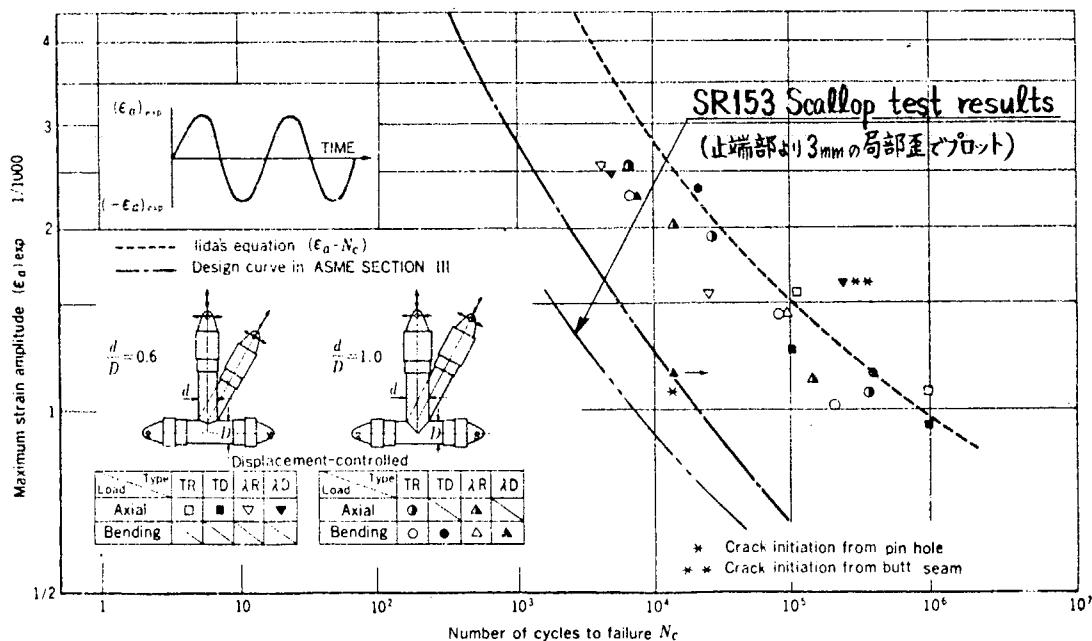


図 5.4.25 Relationship between maximum strain amplitude and N_c (文献 1)

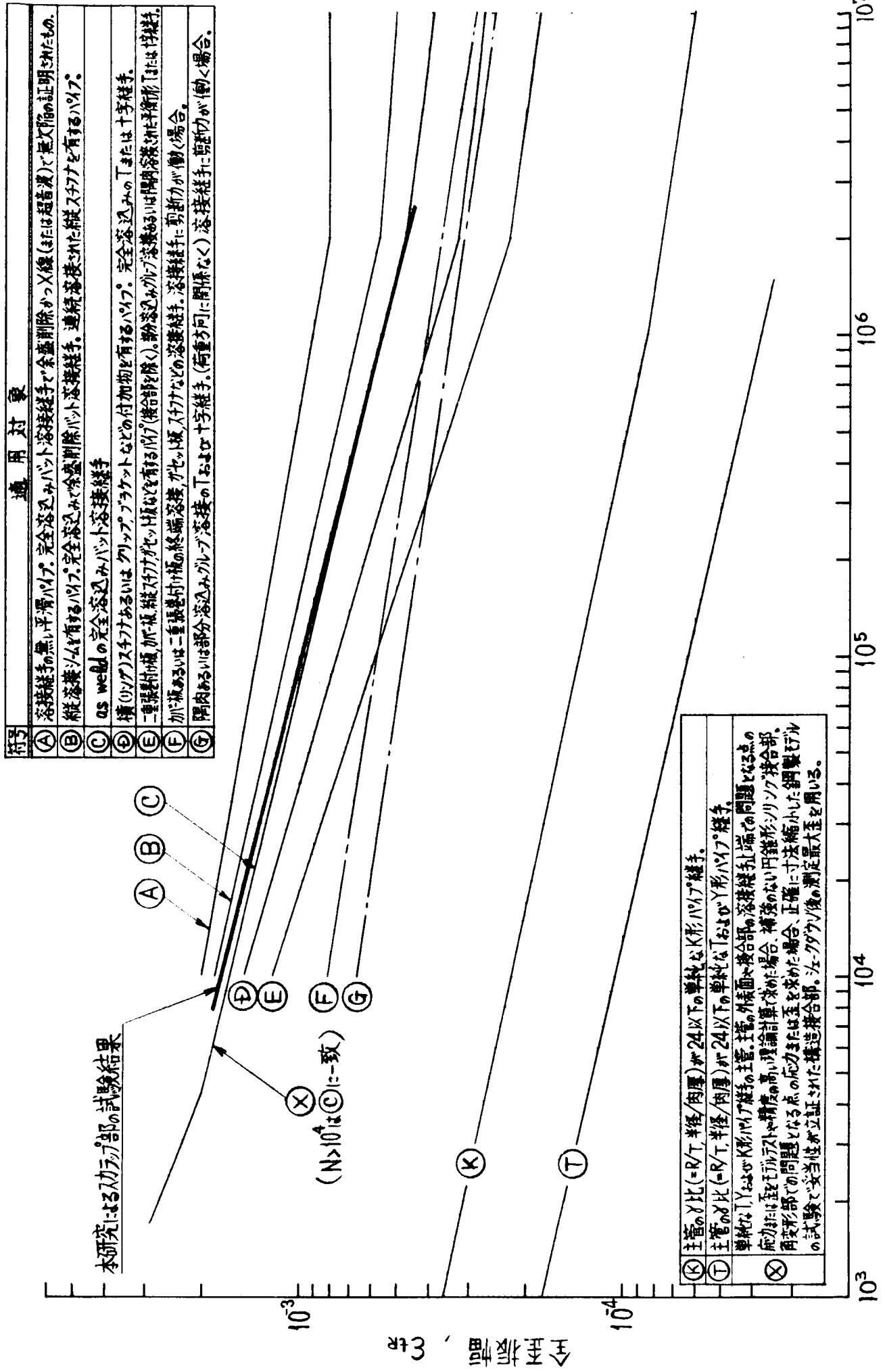


図 5.4.26 AWS (D-11-72) の各種パイプ継手設計線図との比較

5.5 内構材から外板への疲労亀裂伝播試験

5.5.1 目的

船舶構造の基本的なモデルとして、補強材が隅肉継手として主板に溶接されている部材を選び、補強材からの亀裂が主板に向う場合の疲れ亀裂伝播挙動を、亀裂の突入角度、溶接脚長をパラメータとし求める。

5.5.2 試験内容

供試材として表3.1に示すKD32^{**}(25.4mm厚さ)を用い、図5.5.1に示すようなタイプAとタイプBの2種類の試験片を製作した。タイプBはタイプAの側面の補強材および初期切欠の位置を改良したものである。各試験片とも、初期切欠の一端を丸穴とし、亀裂が一方に向かって成長するように製作した。

このようなモデル試験片の実構造物との対応を図5.5.2に示す。また試験片は中央部材の角度および設定脚長をパラメータにとり8枚製作したが、その分類を表5.5.1に示す。

用いた試験機は100トンサーボ・バルサーであり、軸力下で正弦波を負荷した。また亀裂長さの測定はクラック・ゲージにより平板部を、ピーチ・マークにより溶接部を行なった。応力の測定は試験片各部でひずみゲージにより行なった。なお実験状況を図5.5.3に示す。

5.5.3 試験結果および考察

各試験結果を表5.5.2に示す。ここでタイプAの試験片は、亀裂成長途中でタブとの溶接部で破断したため、その後、形状を改良してタイプBとした。

実験は亀裂が成長し、中央部材に至るまでを所定の期間とした。また試験各部のひずみを実験開始時に測定した。その位置および結果を表5.5.3に示す。試験片には三軸ゲージも貼付したので、それより求めた主ひずみ方向も表5.5.3に示してある。(ただし試験片の片面のみに貼付した。)

つぎに亀裂の伝播形状は、その代表的な写真を図5.5.4に示す。また部材の角度別に図5.5.5に詳細な形状を示す。なお図5.5.5においてA・Bは表裏面の区別のためにつけたもので、A側はクラック・ゲージを貼付した面に対応している。図5.5.5より、いずれの亀裂も部材の角度に関係なく、初期亀裂の方向より約15°外側にずれた方向に亀裂が成長しているのが認められる。また脚長による一般的な差はみられない。

一方、部材角度による亀裂成長様相の差としては、0°、10°ものに関しては中央部材に亀裂が突入し、45°のものは溶接部にそって亀裂が成長し、部材を剥離するよう成長する。20°のものは両者の中間的な挙動を呈し、20°が中央部材に亀裂が成長するか否かの境界値付近であると思われる。なお45°のものは部材を剥離する亀裂となるが、この様相の模式図を図5.5.6に示す。図から明らかなように亀裂は中央部材に達するまで成長すると、その後は隅内溶接の未溶着部から発生した他の亀裂にうけつかれ、溶接線方向にのど厚断面を切るよう成長する。

つぎにクラック・ゲージによるデータおよび図5.5.5を基に、平板部を伝播する亀裂の成長様相を繰り返し回数Nに対して求めた結果を図5.5.7に示す。同図において、初期切欠の先端を原点とし、初期切欠の方向をx軸、それに直交する方向をy軸にとり、疲れ亀裂の成長を図示した。また図5.5.8にはピーチ・マークによる溶接部での亀裂成長をx軸方向の亀裂成長長さと繰り返し回数Nの関係で示してある。なお図5.5.8にはピーチ・マークの読みとれる試験片のみ示しており、また同図における点線は図5.5.7の結果を示している。これらの図より明らかのように、疲れ亀裂は、平板部を伝播している場合は一般的貫通切欠と同様亀裂伝播速度が増加してゆくが、亀裂が溶接部に突入すると、亀裂伝播速度が一定もしくは減少する方向にある。この傾向は部材の角度によらず同じである。さらに中央部材部へ亀裂が突入すると亀裂は表面切欠状態となり、亀裂伝播速度は、より減少する傾向を示している。なお図5.5.8の亀裂長さとしては、亀裂が平板部にある場合は板厚中央部での値、亀裂が表面切欠状態となった場合は最大の亀裂長さとなる位置での値をとっている。亀裂の伝播様相をわかりやすくするために図5.5.9に破面のスケッチを示し

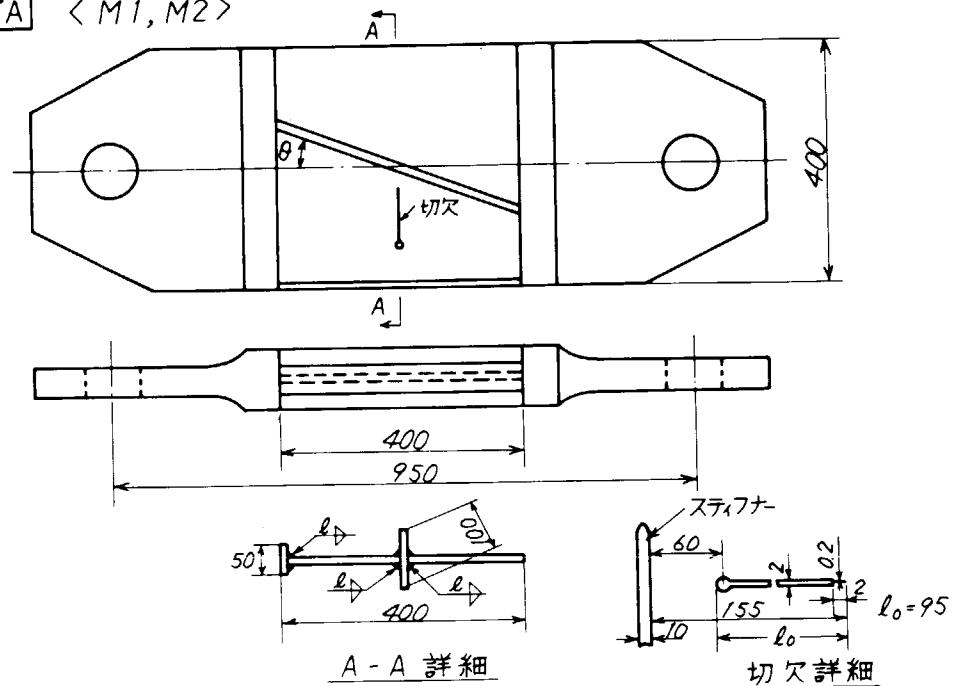
た。

5.5.4 まとめ

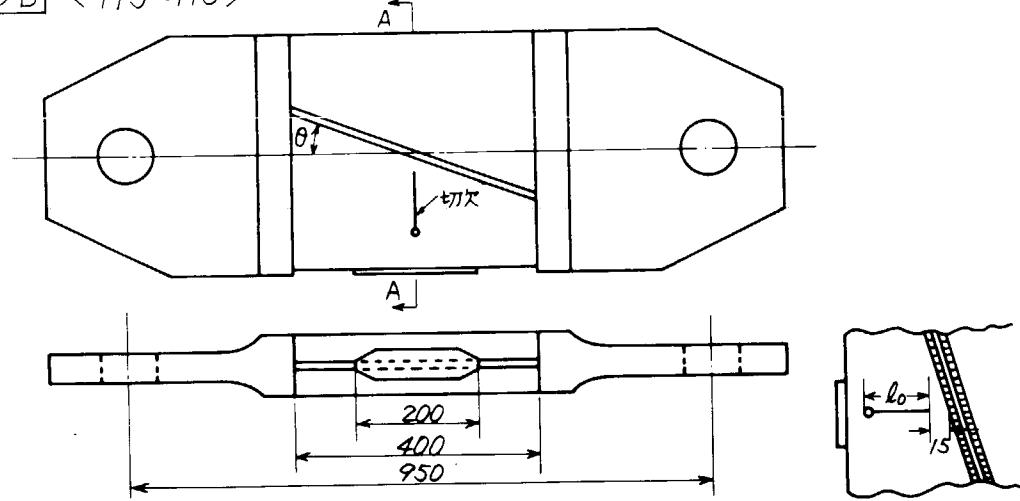
部材モデルの疲れ亀裂伝播試験を行なった結果つきのようなことがわかった。

1. 隅肉脚長の差による、亀裂伝播様相の差はみられない。
2. 亀裂の角度が 20° 以下では、亀裂は中央部材に達し、 45° では溶接部に沿い成長する。 20° のものは一部で溶接部に沿う挙動を示すことから、亀裂角度 20° 付近が溶接部に沿うか否かの境界と思われる。
3. 亀裂伝播速度は、亀裂の角度に拘わらず、平板部を伝播する時は、増加してゆくが、溶接部に達すると一定もしくは減少し、中央部材に達すると減少する。

タイプA < M1, M2 >



タイプB < M3~M8 >



注1) 試験部の板厚は10 mm (25 mmより切削)

注2) θは0°, 10°, 20°, 45°の5種とした

図 5. 5. 1 試験片形状

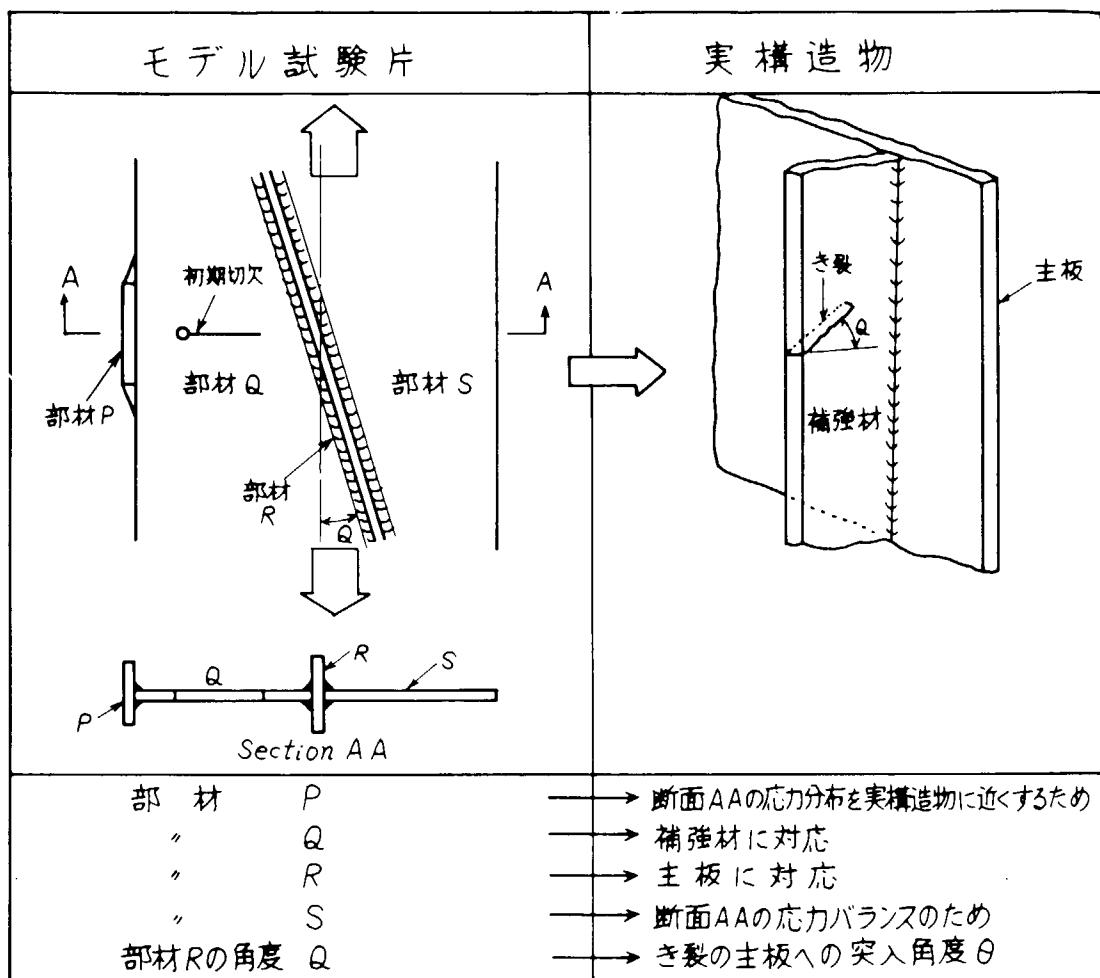


図 5.5.2 モデル試験片の説明

表 5.5.1 試験片の分類

部材 の角度(度) 設定脚長 (mm)	5	10
0	—	M1, M4
10	—	M5
20	M7	M2, M3
45	M6	M8

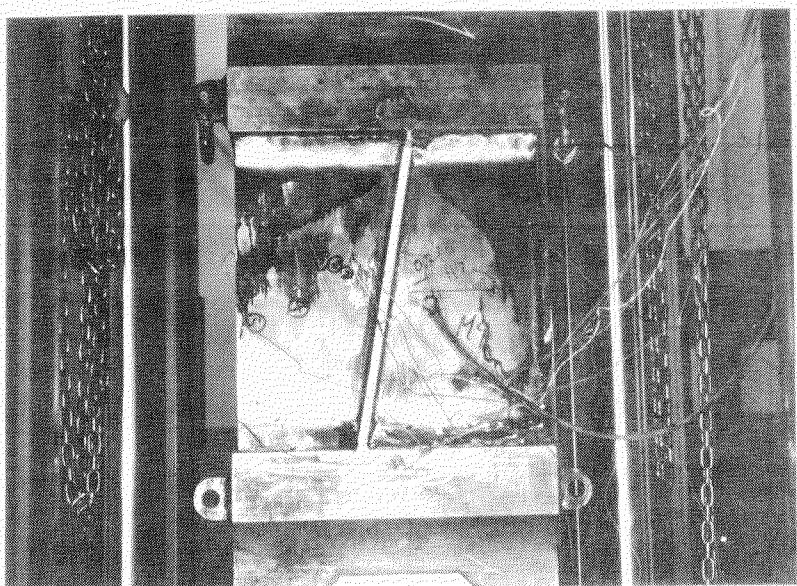


図 5.5.3 実験状況

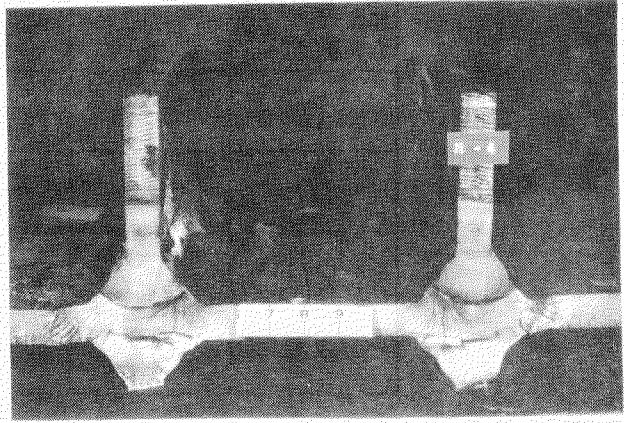
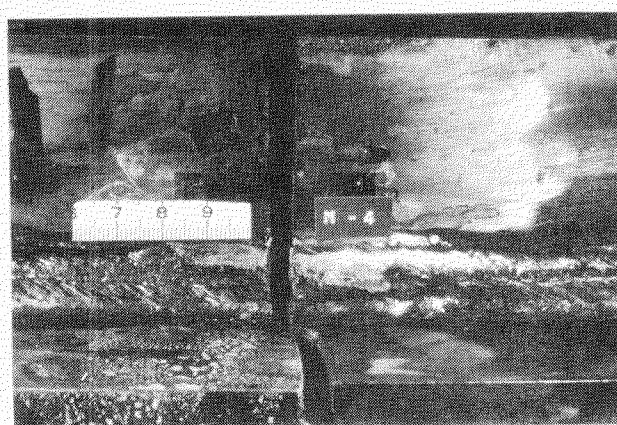
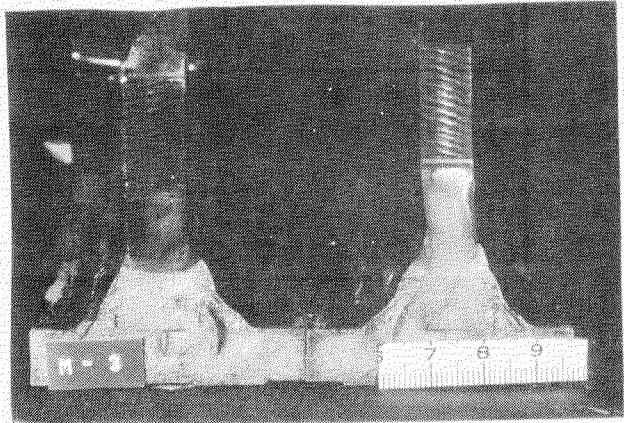
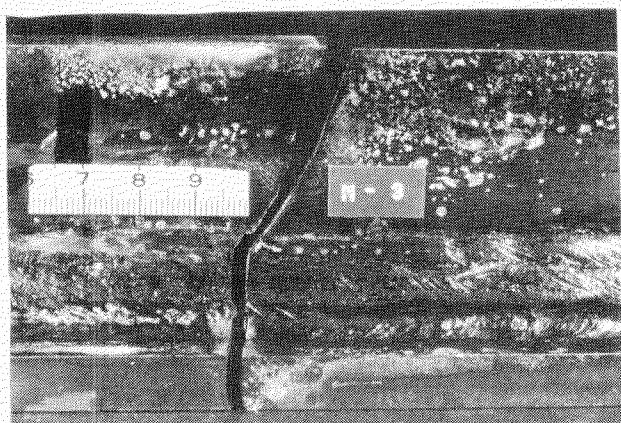


図 5.5.4 龟裂伝播状況

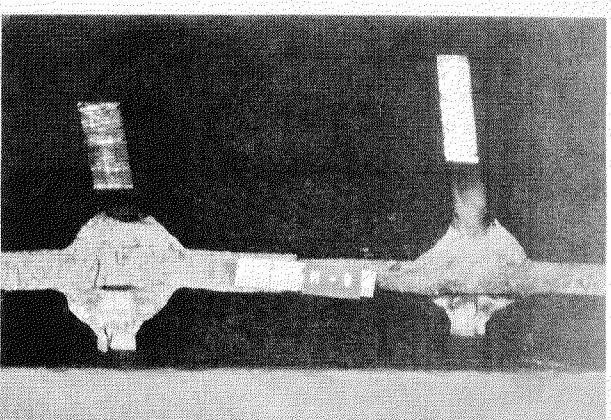
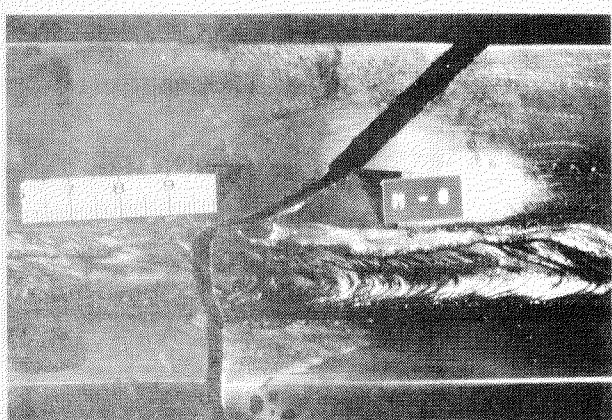
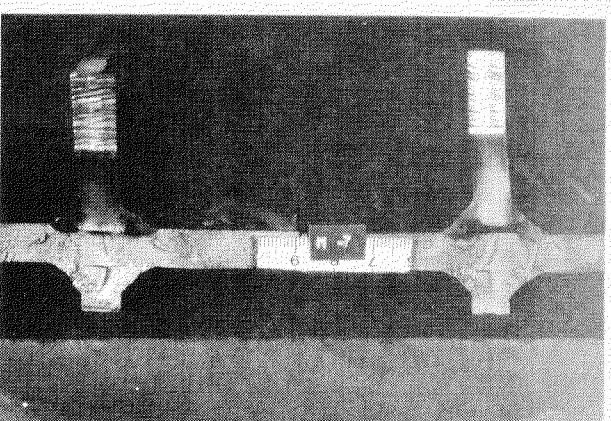
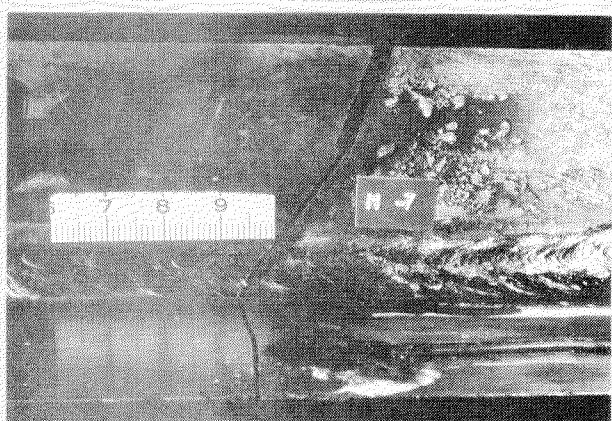
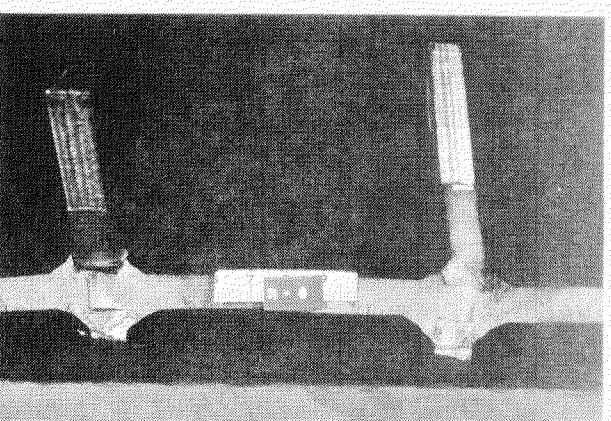
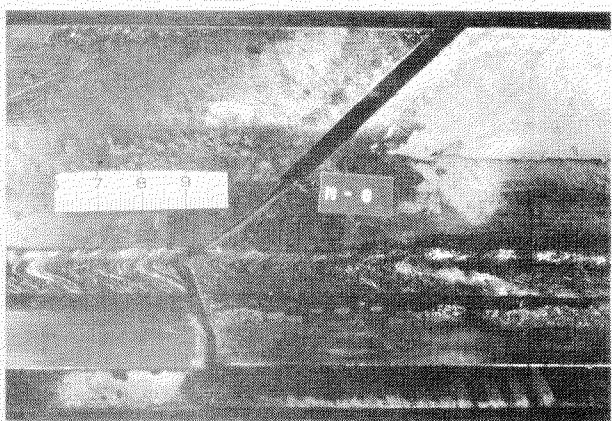
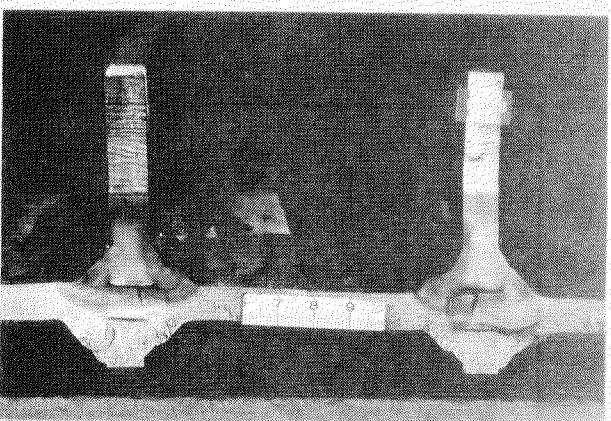
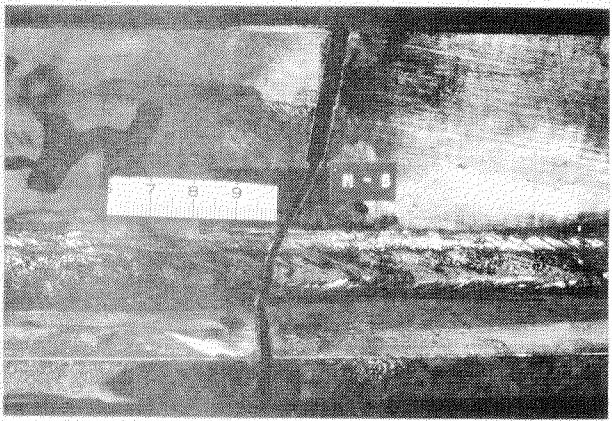
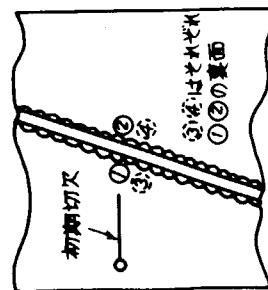


図 5.5.4 破面写真

表 5.5.2 実験結果

試験片番号	荷重(kn)	試験の回数	き裂成長回数	脚部				応力 σ_c (R)	備考
				1	2	3	4		
M 1	90	0	100,000	2mmが長さ タブで破断	10.5x104/1.8x1.0 (7.4) (7.6)	9.1x1.5 (8.2)	9.2x3.5 (8.2)	A	3 0.02 (34x10 ⁵ 回), 53ton 本荷重負荷以前に35ton(3.4x10 ⁵ 回), 70ton(3.65x10 ⁵ 回)負荷したが いざれもき裂成長は認められないと記載
M 2	66	20	463,490	10mm成長 タブで破断	11.5x100/1.3x0.6 (6.9) (7.0)	13.4x8.6 (7.0) (7.0)	11.9x8.8 (7.0)	A	4 0.02 (34x10 ⁵ 回), 70ton(3.65x10 ⁵ 回)負荷したが いざれもき裂成長は認められないと記載
M 3	58	20	149,420	溶接部までき裂 成長後 橋脚材部 で破断	13.4x15.8/12.3x15.2 (7.0) (7.2)	17.0x13.0 (8.0) (8.2)	4.8x13.5 (8.2)	B	4 0.03 本試験手順にて48ton(4.6x10 ⁵ 回)負荷
M 4	54	0	948,437	溶接部までき裂発生	15.0x12.1 (8.0) (7.0)	13.5x12.0 (8.0) (8.0)	14.0x12.1 (8.0) (8.2)	B	5 0.04 本試験手順にて48ton(4.6x10 ⁵ 回)負荷
M 5	63	10	189,500	中央の部材まで き裂成長	10.2x11.2/0.5x9.8 (6.5) (6.8)	12.5x12.0 (8.0) (8.2)	10.0x11.8 (8.2)	B	4 0.03 4.9x10 ⁴ 回で丸穴部に10mmのき裂発生, ドリル 穴をあけ試験続行
M 6	54	45	110,000	溶接部に沿い き裂成長	6.6x8.5/5.5x7.2 (4.5) (3.8)	6.5x7.4 (4.0) (4.0)	6.5x8.4 (4.5)	B	4 0.03 丸穴部にき裂発生のため実験中止
M 7	52	20	208,690	溶接ビード部まで き裂成長	7.5x6.7 (5.0) (4.3)	6.9x7.6 (4.3) (4.4)	6.3x8.2 (4.5) (4.5)	B	4 0.04 丸穴部にき裂発生のため実験中止
M 8	50	45	212,000	溶接部に沿い き裂成長	12.3x12.0/0.4x10.6 (9.0) (8.4)	12.2x11.5 (7.8) (7.2)	10.0x10.5 (7.2)	B	4 0.04



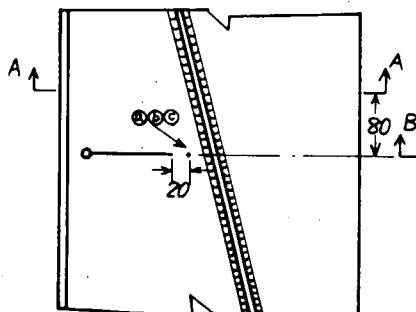
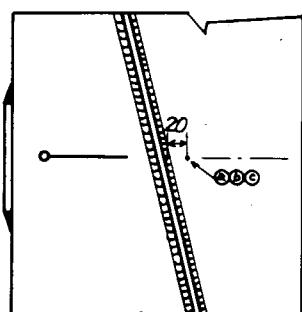
*

表 5.5.3 応力測定結果

試験片番号	公称応力	応力 (kg/mm^2)								三軸ゲージ			主ひずみ方向(度)
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	
M1	15.6	15.8	17.8	13.7	15.1	8.5	13.5	10.1	16.4	—	—	—	—
M2	11.5	11.5	10.4	4.6	6.4	12.5	11.1	13.5	13.9	0.5	6.33	12.33	2
M3	10.1	7.6	16.2	12.7	17.5	7.2	10.5	—	—	5.19	9.68	2.65	6.2
M4	9.4	8.3	8.5	6.3	6.9	3.8	9.8	—	—	—	—	—	—
M5	10.9	10.3	11.7	12.7	13.6	5.7	11.9	—	—	7.17	10.07	4.31	9.1
M6	9.7	9.9	11.3	4.0	6.9	5.3	10.8	—	—	7.34	12.12	2.67	9.1
M7	9.4	10.6	10.4	7.2	9.2	5.0	11.0	—	—	5.74	10.05	2.14	8.2
M8	8.7	10.6	9.2	3.5	4.8	5.4	13.9	—	—	2.3	8.16	2.19	18.3

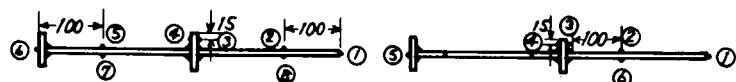
測定位置

* 荷重方向に対する角度

タイプA
(M1, M2)タイプB
(M3~8)

Section AA

Section BB



ただし三軸ゲージ(④⑤⑥)は
M-2のみ
(④) 45° (⑤) 0° (⑥) 45°

ただしM-4は
三軸ゲージなし
(④) 45° (⑤) 45° (⑥) 0°

<三軸ゲージ>

<三軸ゲージ>

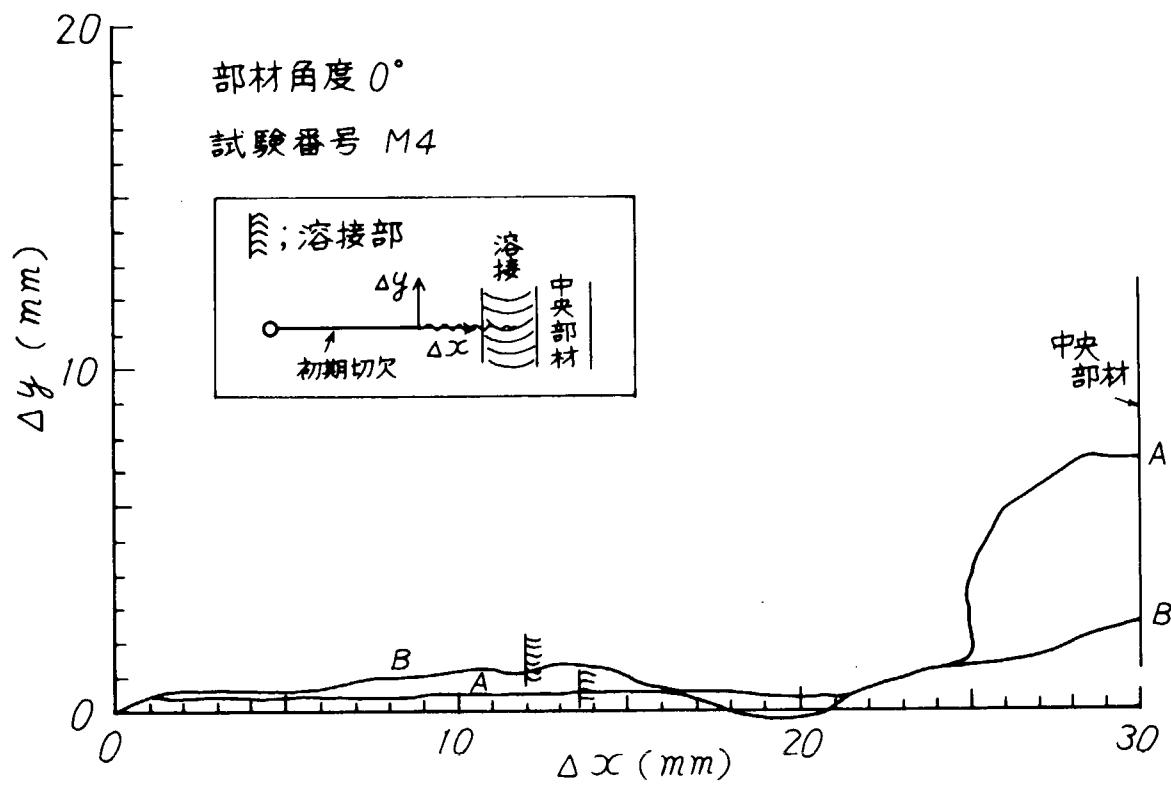


図 5.5.5 (a) 部材角度 0° の亀裂形状

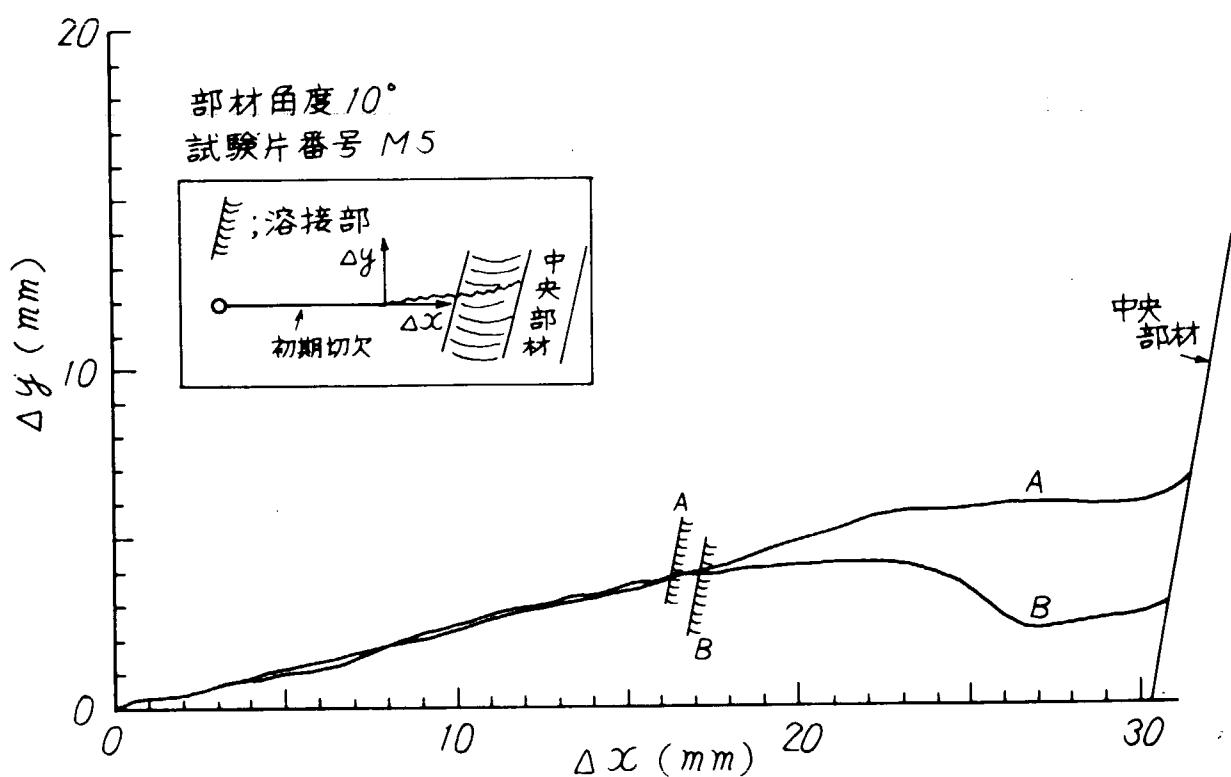


図 5.5.5 (b) 部材角度 10° の亀裂状況

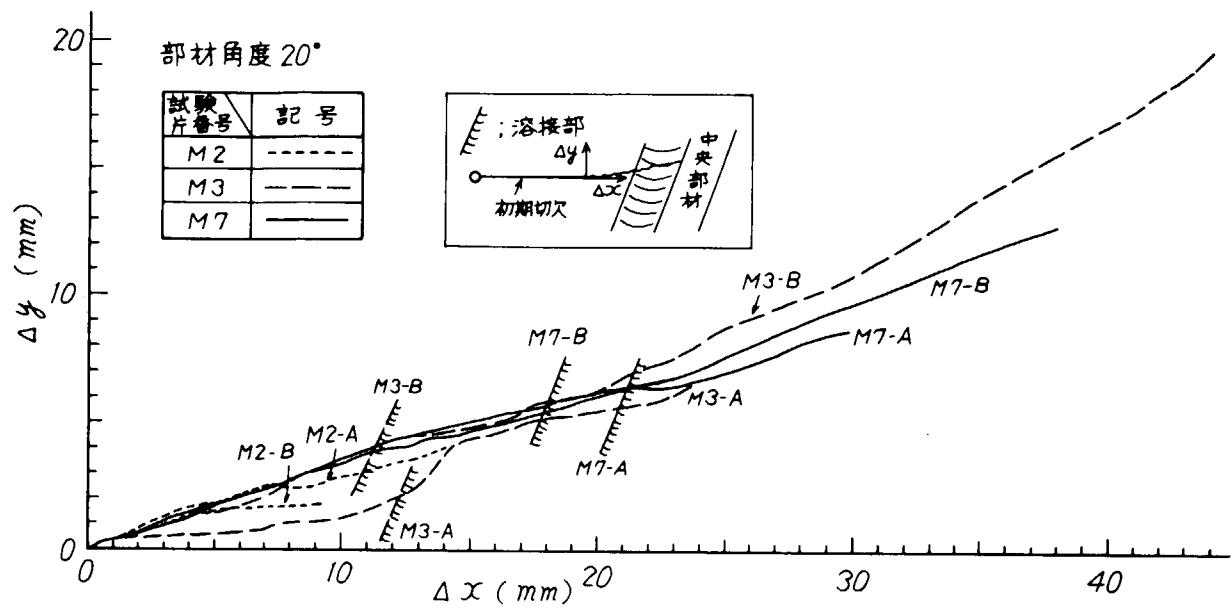


図 5.5.5 (c) 部材角度 45° の亀裂形状

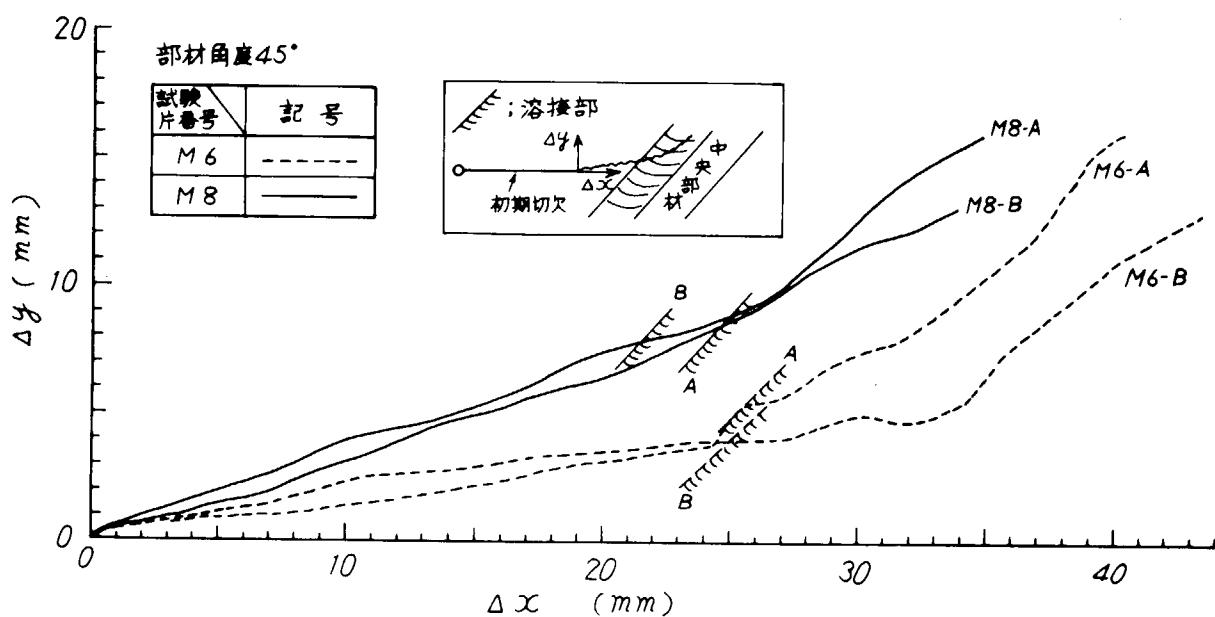


図 5.5.5 (d) 部材角度 45° の亀裂形状

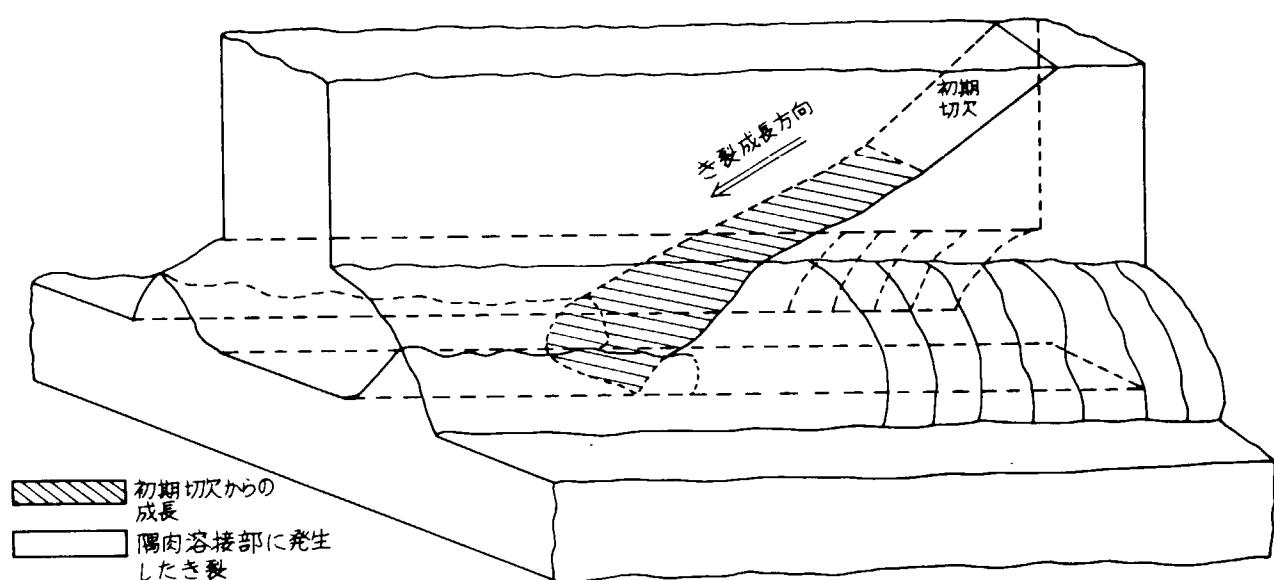


図 5. 5. 6 45° の亀裂の成長様相(模式図) M 6

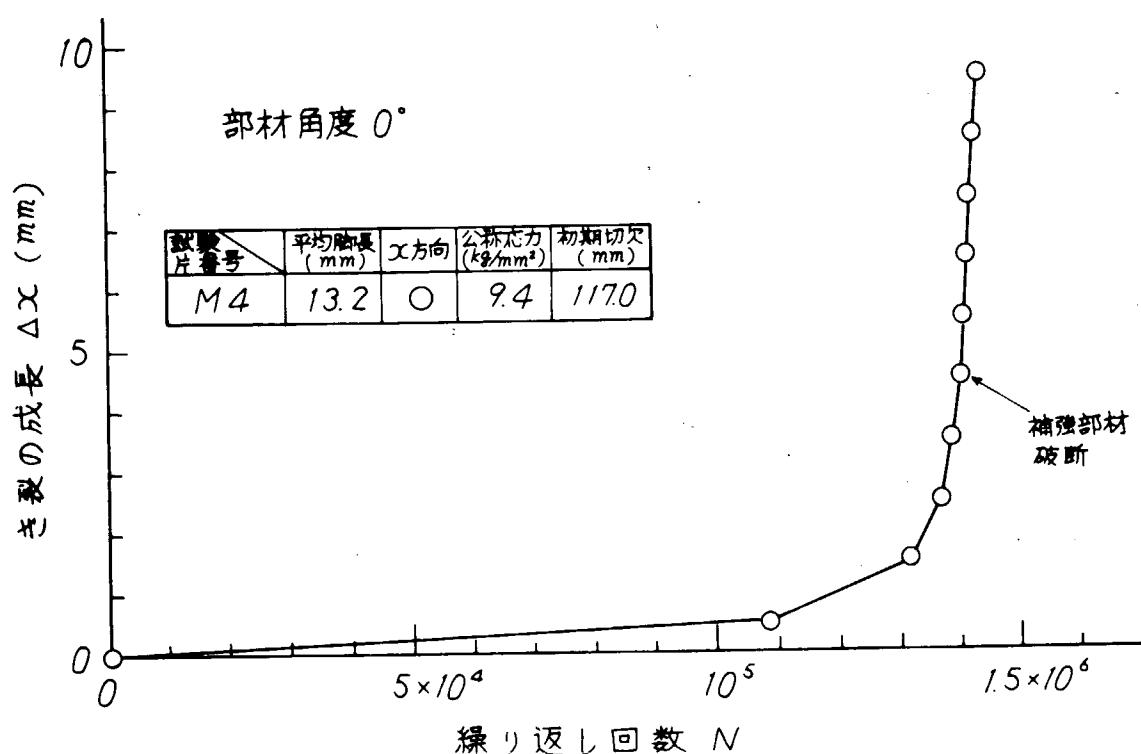


図 5. 5. 7 (a) 部材角度 0° の亀裂伝播

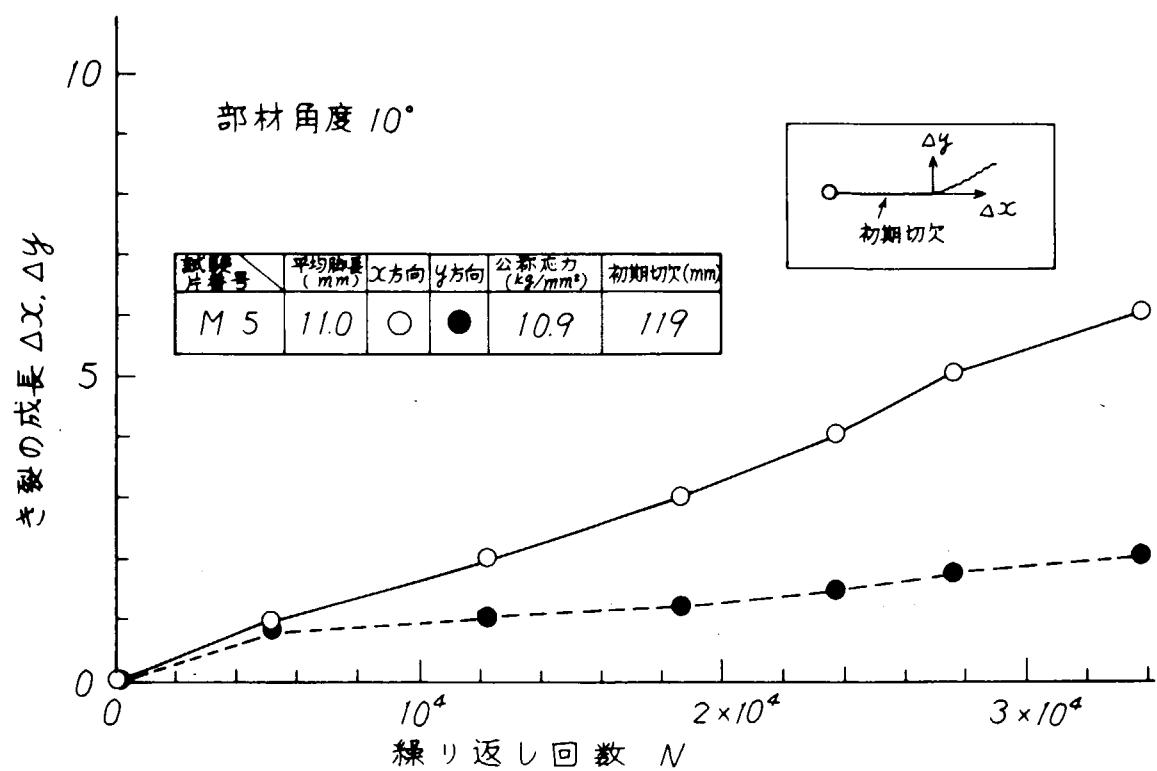


図 5.5.7 (b) 部材角度 10° の亀裂伝播

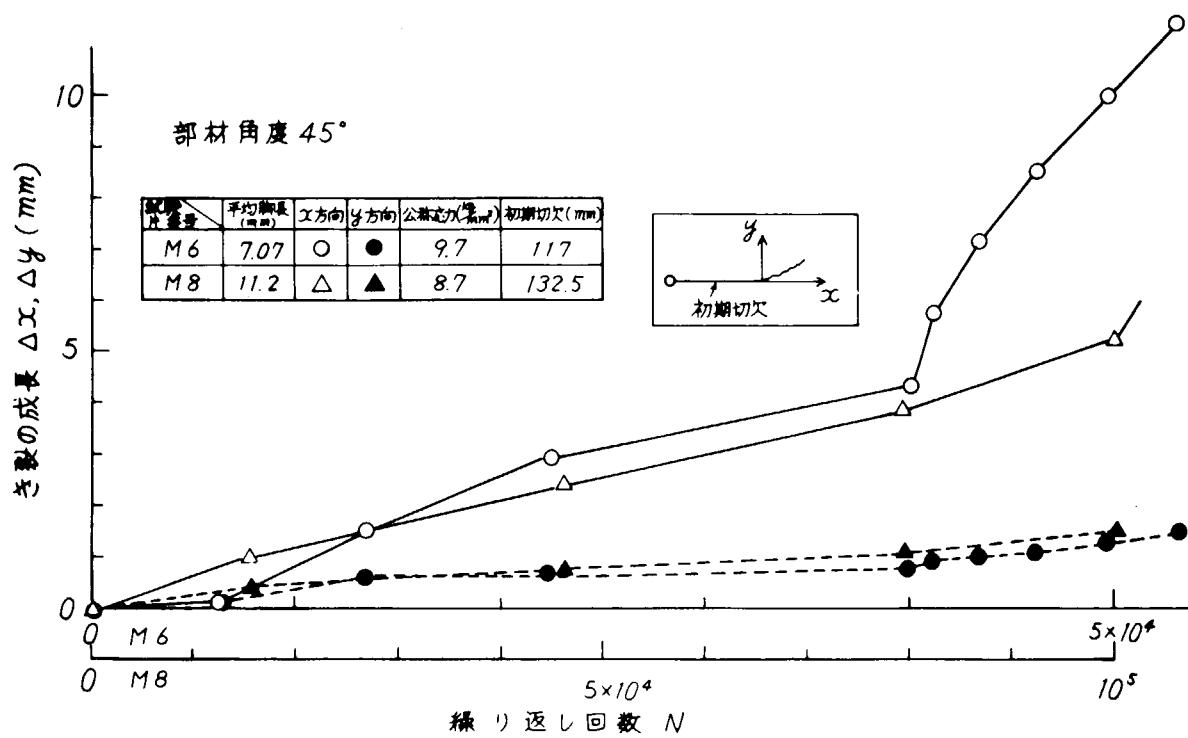


図 5.5.7 (d) 部材角度 45° の亀裂伝播

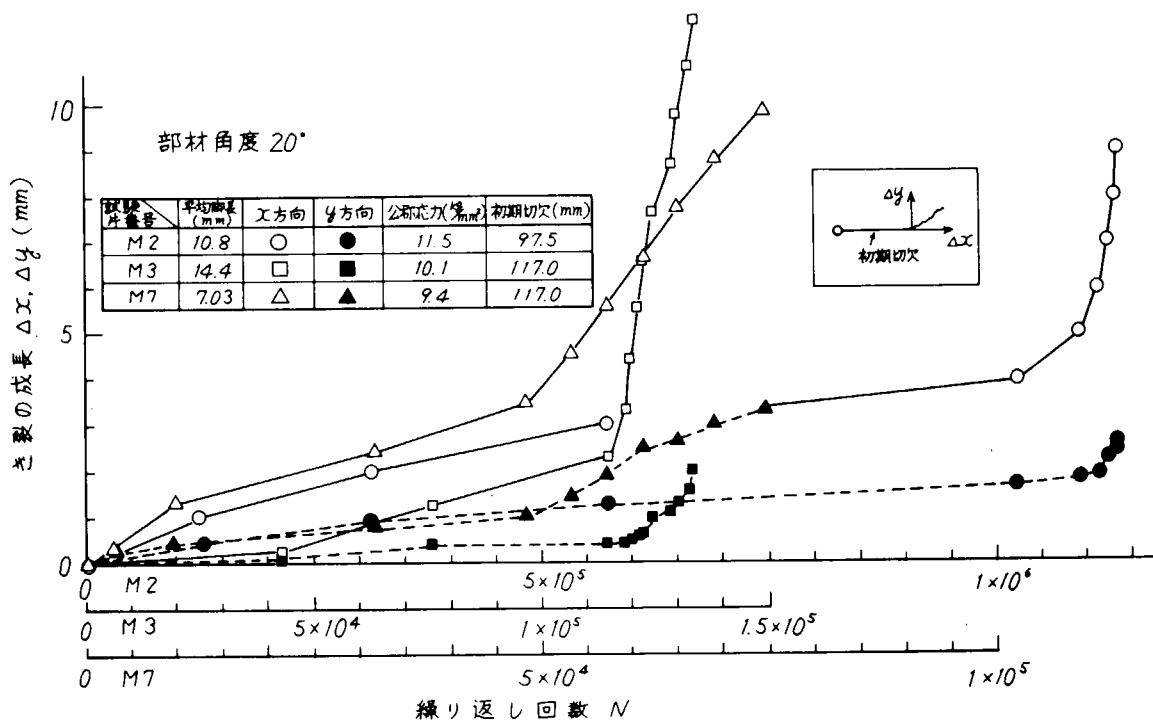


図 5.5.7 (c) 部材角度 20° の亀裂伝播

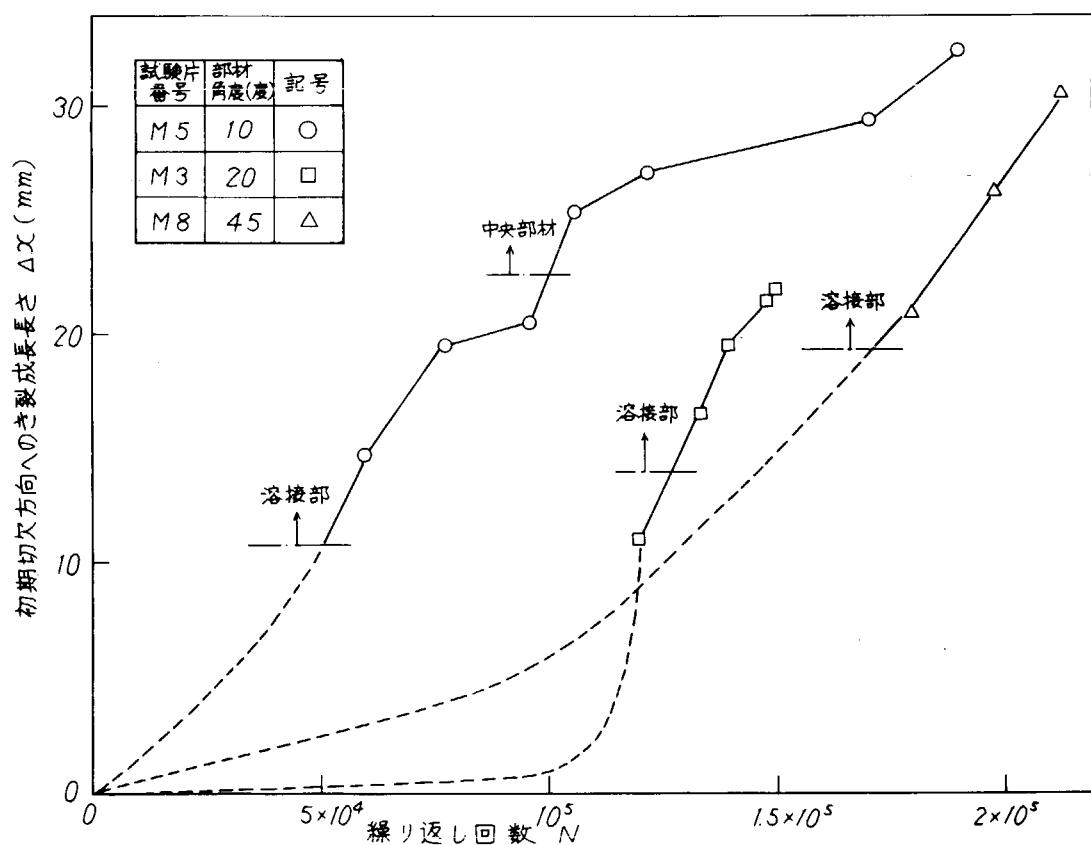


図 5.5.8 ピーチマークによる亀裂伝播様相

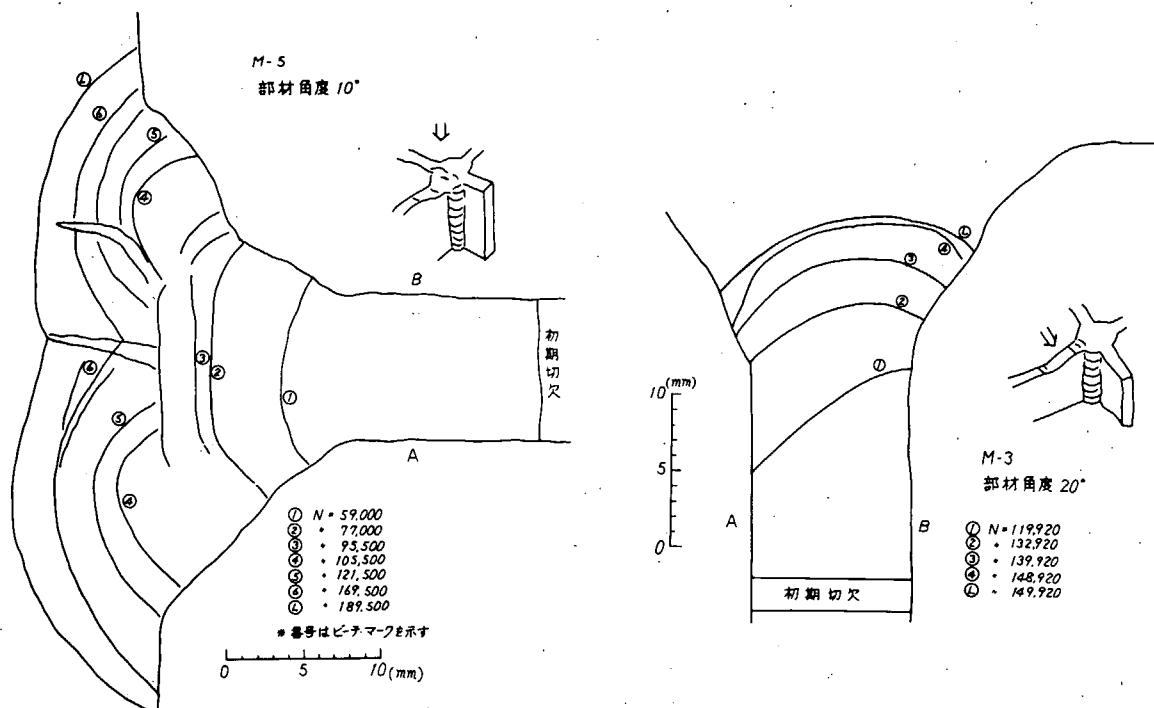


図 5.5.9(a) 破面スケッチ (M-5)

図 5.5.9(b) 破面スケッチ (M-3)

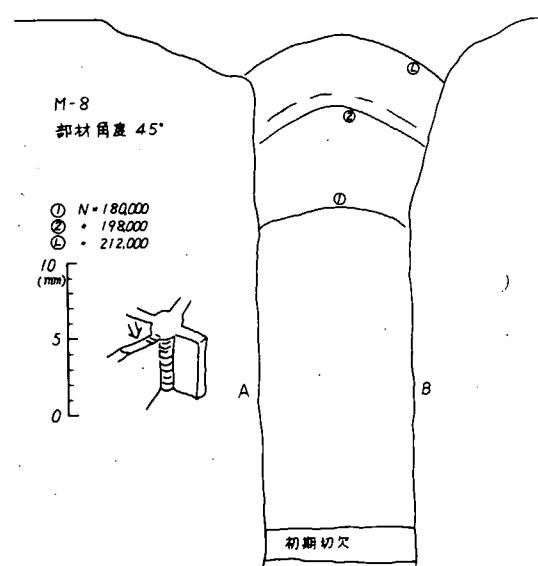


図 5.5.9(c) 破面スケッチ (M-8)

5.6 隅肉脚長に関する総合考察

隅肉溶接部の疲労破壊はその破断箇所によってトウ破断とルート破断がある。大内田・西岡¹⁾ らによれば荷重伝達型の隅肉継手の疲労破断箇所は溶接脚長の増加に伴い、ルート部からトウ部に移り、それ以上脚長を増加しても疲労強度はほとんど増加しない。このルート破壊からトウ破壊に移るときの脚長を臨界脚長と以後呼ぶことにする。この臨界脚長は溶込み量の増加に伴い減少する。大内田らの実験から Gurney²⁾、Petershagen³⁾ らが臨界脚長を曲げ疲労と軸力疲労に関して求めた結果を図 5.6.1 に示す。同図に昨年度の 5.7 隅肉溶接軸力疲労試験、5.6 隅肉溶接曲げ疲労試験の結果と本年度の 5.3 隅肉溶接曲げ疲労試験の結果をプロットしてみた。この結果、軸力に対しては十分なことは言えないが、曲げの場合の本研究の臨界脚長は Gurney らによる臨界脚長とよく一致しており、臨界脚長は曲げに対して板厚 25.4 mm の場合 12.5 mm であり、脚長／板厚比は約 0.5 である。また軸力に対しては脚長／板厚比が 0.95 である。なお本研究 5.3 節の結果によれば臨界脚長は余盛形状により異なる。また式(5.3.1) (5.3.3) によればルート破断の場合とトウ破断の場合の S-N 線図(図 5.6.2) の傾きが異なるため、臨界脚長は考える破断寿命によっても異なる。例えば、コンタクトアングル θ が 135° で余盛形状が直線形である場合、10⁶ 回破断寿命におけるトウ部の強度とルート部の強度が等しくなると厚 a を求めると $a = 9.7 \text{ mm}$ となる。このとき脚長 L は 13.6 mm となる。また 10⁶ 回破断寿命で考えると図 5.6.2 にあるように $a = 6.4 \text{ mm}$ 、 $L = 9.0 \text{ mm}$ となる。

ところで先にも述べたように脚長が臨界脚長よりも大きく疲労破壊がトウ部から起きる場合には脚長を増加しても疲労強度の増加はほとんど望めない。従って脚長の適正值はここでいう臨界脚長と等しいと考えるならば、脚長の適正值を考慮した場合、板厚 25.4 mm に対して 12.5 mm、軸荷重の場合 24 mm となる。しかしながら、各船級協会のルールによる要求脚長は腐食代を差し引けば、本研究で求めた適正值よりも小さく、軸力は勿論のこと曲げに対してもすべてルート破断が予想される寸法である。事実、破損例を見ると隅肉溶接部に加わったと考えられる曲げ荷重によりルート部より破断しているものがある。

従来、重要な部材の隅肉に関しては自主的に開先をとって完全または不完全溶け込み溶接としたり、また一方構造様式を改善して共振疲労を防止するなどの対策がとられてきたようであるが、今後はこれらの対策とともに隅肉脚長の適正值ならびに隅肉形状に関しての検討を急ぐ必要があるであろう。

参考文献

- 1) H. Ouchida, A. Nishioka, "A Study of the Fatigue Strength of Fillet Welded Joints" IIW DOC XII - 338 - 64.
- 2) T. R. Gurney, "Fatigue of Welded Structure" Cambridge University Press, 1968.
- 3) H. Petershagen, "Survey of Literature on the Fatigue Behaviour of Curciform Joints," IIW DOC XII - 750 - 74.

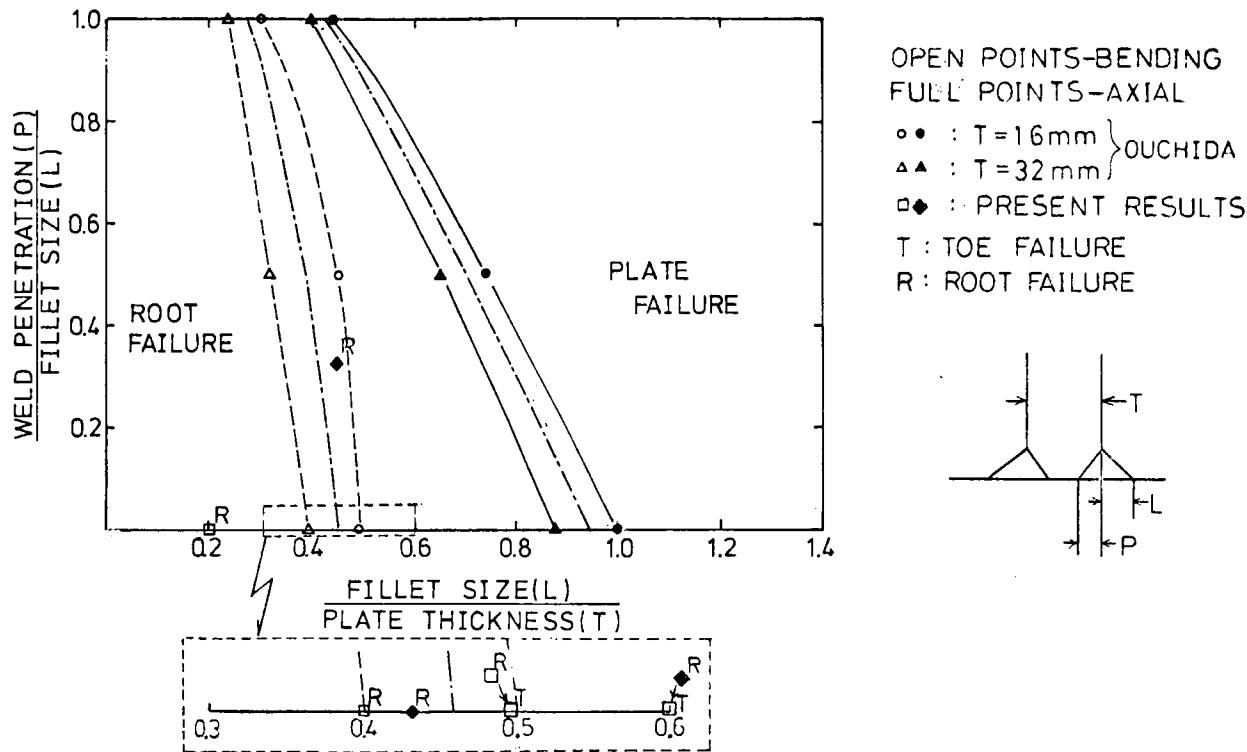


図 5. 6. 1 CRITICAL FILLET SIZE

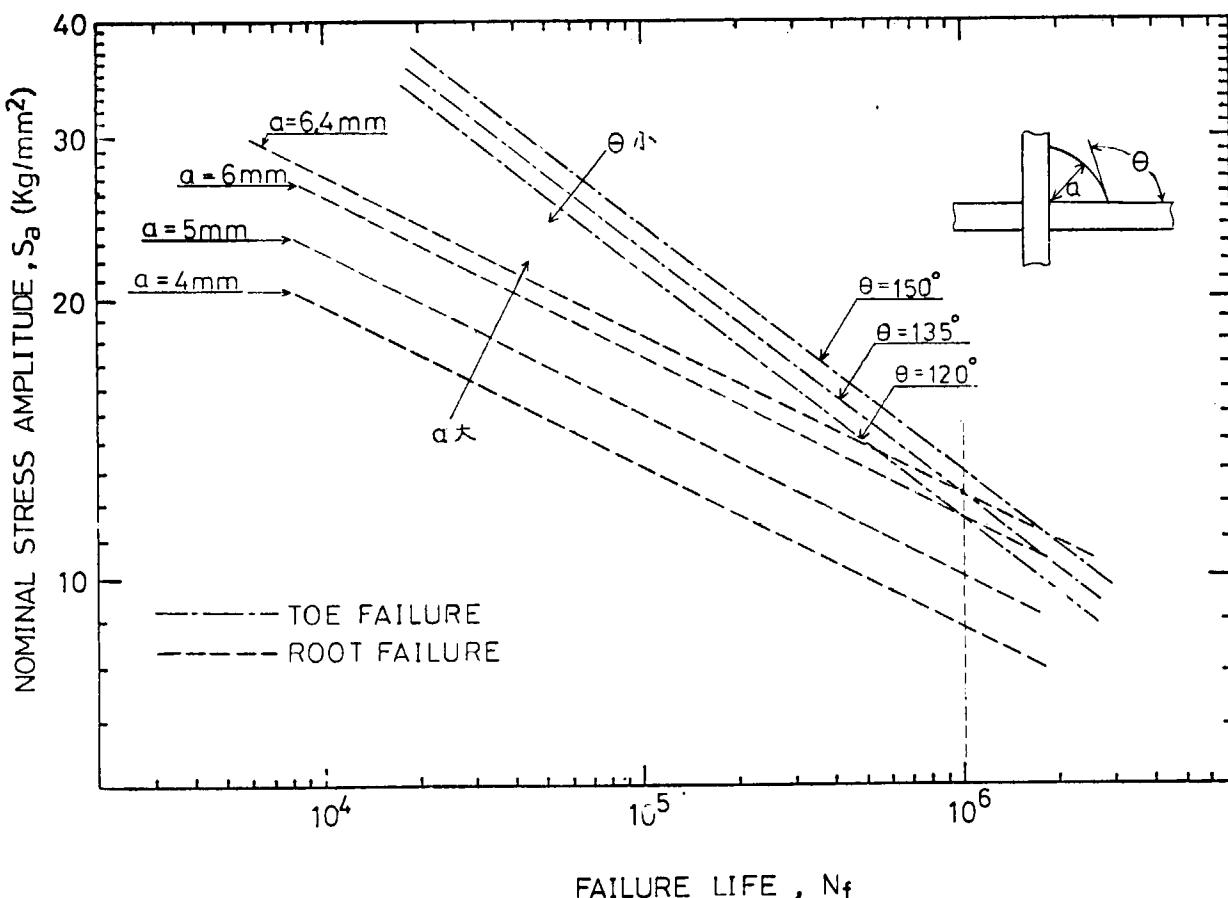


図 5. 6. 2 $s_a - N_f$ CURVES

6. むすび

本研究委員会の共同研究は、当初、巨大タンカー開発にあたり、その船体外殻材に使用されると予想される、一般船体用軟鋼板および船体用50キロ級高張力鋼板の厚板およびそれの大入熱溶接継手について、破壊靭性ならびに疲労特性を総合的に把握し、基礎設計資料を得ることを目的として、さらに、厚板化する船殻部材の隅内溶接脚長決定の基礎設計資料を得ることを目的として、昭和49年4月より3ヶ年計画で実施されることになっていた。

昭和49年度および昭和50年度、すなわち第1年度および第2年度の研究は、上述の方針の基に遂行されたが、昭和51年度すなわち第3年度の研究実施に当っては、造船不況による巨大タンカー需要減と相俟って、研究内容に、"船殻の破壊管理制御に関する基礎検討"的色彩をもたせるべく、若干の軌道修正が行なわれた。

すなわち、昭和51年度には、前章までに述べられた如く、

船体用50キロ級高張力鋼板(KD32鋼板、板厚25.4mm)のエレクトロガス溶接継手を供試しての、ボンド部破壊靭性値のバラツキに対する統計的検討

脆性亀裂伝播停止特性に及ぼすコンプライアンスの影響に関する検討

疲労強度に及ぼす隅内溶接脚長の影響に関する総合的考察

船殻破壊強度検討小委員会の設置・活動

などが実施された。

巨大船殻を始め大型溶接鋼構造物の破壊強度を把握し、基礎設計資料を得て、所謂破壊管理制御設計を確立する上で多くの重要な定量的知見が得られた。

本研究部会で実施された研究結果のうち、大入熱溶接継手の破壊靭性に関する総合的成果は、第147研究部会の成果とともに、現在鋭意とりまとめつつある"第147研究部会の総合報告書"として報告されることになっている。

さらに、

脆性亀裂伝播停止特性に及ぼすコンプライアンスの影響に関する検討

複数表面欠陥からの疲労亀裂伝播特性に関する検討

内構材から外板への疲労亀裂伝播特性に関する検討

などは、別冊として報告される船殻破壊強度検討小委員会の成果と共に、昭和52年4月より4ヶ年計画で実施される予定になっている、第169研究部会"船体構造の破壊管理制御設計に関する研究"に引き継がれていく予定である。