

日本船舶振興会昭和44年度補助事業
“大型鉱石運搬船の安全に関する研究”

研究資料 No. 121

第119研究部会

大型鉱石運搬船の船体構造材料に関する研究

報告書

昭和45年3月

社団法人

日本造船研究協会

はしがき

本報告書は、日本船舶振興会の昭和44年度補助事業「大型鉱石運搬船の安全に関する研究」の一部として日本造船研究協会第119研究部会においてとりまとめたものである。

本研究の委員は次のとおりである。

第119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）	
幹事	青木 真一（川崎製鉄）	池田 一夫（船舶技術研究所）
	井上 鑑（船舶技術研究所）	岡本 淳二郎（八幡製鉄）
	小倉 信和（横浜国大）	川内 孝（運輸省）
	越賀 房夫（日本鋼管）	鈴木 晃（日本製鋼）
	藤井 英輔（船舶技術研究所）	藤田 勇一（石川島播磨重工業）
	前中 浩（船舶技術研究所）	町田 進（東京大学）
	山口 勇男（日本海事協会）	矢島 浩（三菱重工業）
委員	宇田川 貞夫（運輸省）	大野 章（富士製鉄）
	賀来信一（日本海事協会）	笠松 裕（神戸製鋼所）
	柔山則男（住友金属工業）	小林 三蔵（石村造船所）
	酒戸恒男（住友重機械工業）	真田 良（日本船主協会）
	鈴木 宏（日本鋼管）	中井恒男（日立造船）
	中島正樹（三菱重工業）	野沢 登（函館ドック）
	藤田 譲（東京大学）	渡辺 昭二（昭和海運）
	綿屋吾郎（佐世保重工業）	

目 次

概 要	1
第1章	2
1 まえがき	2
2 研究の目的	3
第2章 脆性破壊に関する研究	3
2.1 脆性破壊の発生	3
2.1 a 素材の脆性破壊発生特性－1	3
2.1 b 素材の脆性破壊発生特性－2	5
2.1 c 溶接継手部脆性亀裂発生特性	8
2.1 d 拘束部材の脆性破壊発生特性	14
2.1 e 疲労蓄積材の脆性破壊発生特性	23
2.2 脆性破壊の伝播停止	31
2.2 a 素材の脆性破壊伝播停止特性－1	31
2.2 b 素材の脆性破壊伝播停止特性－2	33
2.2 c 素材の脆性破壊伝播停止特性－3	45
第3章 疲労破壊に関する研究	53
3.1 3次元模型による疲労クラック伝播速度	53
3.2 剪断応力による疲労クラック伝播	55
第4章 まとめ	60

概要

本事業は、大型鉱石運搬船の安全に関する研究の一環として、大型鉱石運搬船の甲板、外板等に使用する鋼板の脆性破壊、疲労破壊に関する特性を求めるため、第1.1.9研究部会において試験研究を行なつた結果をとりまとめたものである。

本報告で本年度実施した試験項目はつきのとおりである。

1. 脆性破壊に関する研究

1.1 脆性破壊の発生

a 素材の脆性破壊発生特性-1

脆性破壊発生温度領域で標準型ディープノッチ試験を実施した。また、降伏点、抗張力と温度との関係を得るために、各種について丸棒の低温引張試験も実施した。

b 素材の脆性破壊発生特性-2

脆性破壊発生に対する Scale Effect および側面切欠と中央切欠の相違を求めるため、中央切欠広巾試験(巾 1,000 mm)を実施し、脆性破壊発生特性を求めた。

c 溶接継手部脆性破壊発生特性

切欠溶接継手広巾引張試験は引張り残留応力の共存する溶接継手劣化部よりの脆性亀裂発生特性を調べる試験として広く行なわれている。しかしこの試験方法の実施にあたつては、経費その他に難点があるため、ここでは溶接性試験として古くから採用されてきたコマレル試験片程度の大きさの試験片を用い、曲げ試験によつて標記の大型試験の代用とする可能性を調べた。

d 拘束部材の脆性破壊発生特性

局部応力集中部を持つ溶接構造物の脆性破壊発生特性を調べるため、不連続構造モデルを用いて破壊試験を行なつた。また、溶接残留応力と切欠が重なる場合の発生特性を調べるため、溶接ビード付ディープノッチ試験を行なつた。

e 疲労蓄積材の脆性破壊発生特性

素材および疲労蓄積材の脆性破壊発生試験を行ない、OD 説により、脆性破壊発生特性を検討した。

1.2. 脆性破壊伝播停止特性

a 素材の脆性破壊伝播停止特性-1

5 ~ 20 kg/mm² の応力レベルで標準温度勾配型 E S C O 試験を実施し、脆性破壊伝播停止特性を求めた。

b 素材の脆性破壊伝播停止特性-2

1,300 mm 突合せ溶接型のクラックアレスター試験を実施し、D 級鋼および E 級鋼の長いクラックに対する伝播停止特性を求めた。

c 素材の脆性破壊伝播停止特性-3

5 ~ 20 kg/mm² のレベルで二重引張試験(温度勾配型、一様温度型)、引張試験、曲げ試験およびシャルピー試験を行なつて相互の関係を調べた。

2. 疲労破壊に関する研究

2.1. 3次元模型による疲労クラック伝播速度

箱型立体模型 8 個を用い、その開孔切欠部が引張応力を受けるような 4 点荷重をかける疲労試験を行ない、疲労クラックの伝播速度を求めた。

2.2. 断面応力による疲労クラック伝播

有孔パネル(立体模型 8 個)の断面応力によるクラック発生および伝播に関する実験を行なつた。

第 1 章

1. まえがき

昨年および今年1月に発生した大型散積貨物兼鉱石運搬船に生じた重大事故は今後再び繰返えされることのないよう絶対に防止しなければならない。そのためには事故の原因を追求、解明し、具体的な防止対策を講ずるべきであるが、一方これに関連して、近年の大型散積貨物兼鉱石運搬船の材料、構造、設備、運航等に関する特異な問題点を求めて検討、解明する必要がある。

本会はこれらの問題点のうち船体構造用鋼板の強度に関するものをとりあげ、その再確認とともに今後の合理的設計の資料を求める目的として、44年度事業の一つとして、第119研究部会が発足し、本委員会において審議決定した研究計画の基本方針に基づき、各種の実験試験、検討を行なつた。本報告書はその成果をとりまとめたものである。

2. 研究の目的

船舶等の構造物では疲労による材質の変化に伴ない、平時には考えられない破壊が起り、大きな問題となつている。また、部材の不連続部に生ずる応力集中や溶接による残留応力および溶接欠陥のためにしばしば脆性破壊が生じている。

理想的には、これらクラックの発生を未然に防止することが必要であるが現時点ではこのようなことは期待し難い。幸にして船舶では定期的な検査を行ない。クラックに関してもかなり入念な検査が行なわれ、発見されたクラックは補修されて大事には至っていないことが多い。これら脆性破壊の発生および伝播停止の特性や疲労破壊に関する実験データもすでに出てはいるが、これら既存のデータを直ちに設計や検査期間の適否の基準に適用するまでには、今後多くの実験が必要とされている。

このため、本研究ではこれら破壊の諸特性を調べるために、表1に示す項目により研究を行なうものである。

表1 研究項目

研究項目	研究題目および試験名	
脆性破壊に関する研究	素材の脆性破壊発生特性-1	標準型ディープノッチ試験 丸棒引張試験
	素材の脆性破壊発生特性-2	中央切欠大型ディープノッチ試験
	溶接継手部脆性亀裂発生特性	小型試験
	拘束部材の脆性破壊発生特性	素材の十字型拘束引張試験 加工材の十字型拘束引張試験 溶接ビード付ダブルディープノッチ試験A、B
	疲労蓄積材の脆性破壊発生特性	素材のダブルノッチ引張試験 疲労蓄積材のダブルノッチ試験
	素材の脆性破壊伝播停止特性-1	標準温度勾配型ESSO試験
脆性破壊の伝播停止	" -2	クラックアレスター試験
	" -3	二重引張試験(温度勾配型、一様温度型)引張試験、曲げ試験、シャルピー試験
疲労破壊に関する研究	3次元模型による疲労クラック伝播速度	疲労試験
	剪断応力による疲労クラック伝播	疲労試験 クラック発生試験、伝播試験

第2章 脆性破壊に関する研究

2.1 脆性破壊の発生

2.1.a 素材の脆性破壊発生特性－1

(1) 研究目的

素材の脆性破壊発生特性を標準型ディープノッチ試験でしらべる。

(2) 供試材および試験片

供試材として日本海事協会規格の板厚9mmのA級鋼(記号9A)、19mmのA級鋼(19A)および38mmのD級鋼(38D)をもついた。また参考資料として板厚25.4mmのE級鋼(25A)を供試した。各供試材の化学成分と機械的性質を表2.1.a.1に示す。

試験片は幅40.0mm、長さ50.0mmの標準型ディープノッチ試験片でその形状寸法を図2.1.a.1に示す。また供試材の降伏点および引張強さと温度の関係をもとめるための丸棒引張試験片の形状寸法を図2.1.a.2に示す。

表2.1.a.1 供試材の化学成分と機械的性質

鋼名	板厚 (mm)	化 学 成 分 (%)					機械的性質		
		C	Si	Mn	P	S	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)
9A*	9	0.15	0.02	1.01	0.013	0.016	29	43	29
19A	19	0.18	0.05	0.66	0.015	0.019	26.2	43.5	31.0
19D	19	0.15	0.04	1.15	0.012	0.024	30.0	45.0	27.0
38D	38	0.12	0.25	0.70	0.012	0.025	29.0	44.6	30.2
38E	38	0.16	0.27	1.05	0.017	0.013	36.0	50.0	30.0
25A**	25.4	0.21	0.04	0.77	0.018	0.027	25	46	26

* A : A級鋼(N.K.)

D : D級鋼(N.K.)

E : E級鋼(N.K.)

** : 参考資料

(3) 試験内容および方法

丸棒引張試験を数温度でおこない降伏点および引張強さと温度の関係をあらかじめもとめておく。ディープノッチ試験は切欠断面応力が降伏点以下の低応力脆性破壊温度領域内の数温度で試験をおこない、脆性破壊発生応力と温度の関係をもとめこれをもとにして無限板について、ある応力レベルでの脆性破壊発生温度と角裂長さの関係をもとめる。

試験片をタブ状溶接し、船舶技術研究所、船体構造部の300トンテストリグに取付ける。切欠断面をはさんで試験片の表面に冷却槽をとりつけ試験片を液体窒素により冷却する。試験温度の計測は試験片の切欠断面上にバーカッショング溶接した挿、コンスタンタン熱電対でおこなう。試験片を所定の温度に一様に冷却し、一定時間保持したのも、引張荷重を加え、脆性破壊発生応力をもとめる。

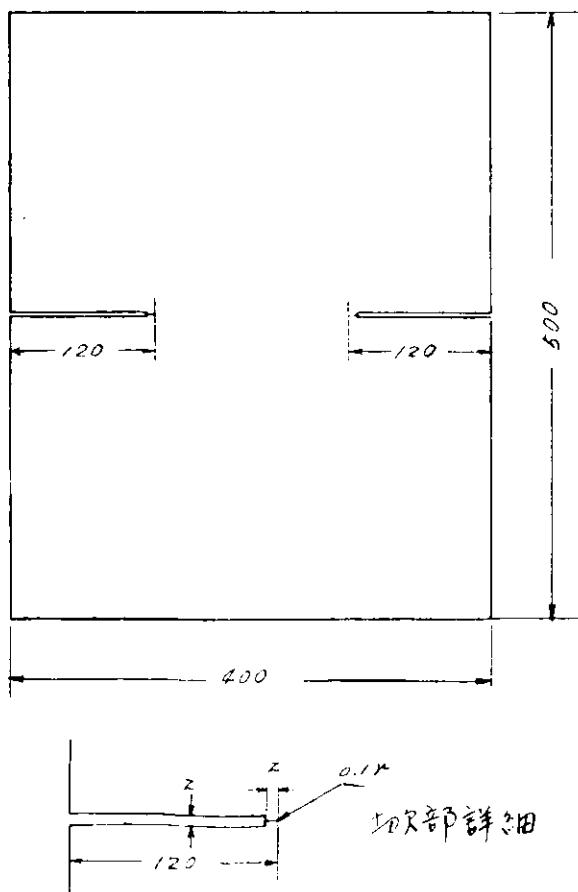


図2.1.a.1 標準型ディープノッチ試験供試寸法

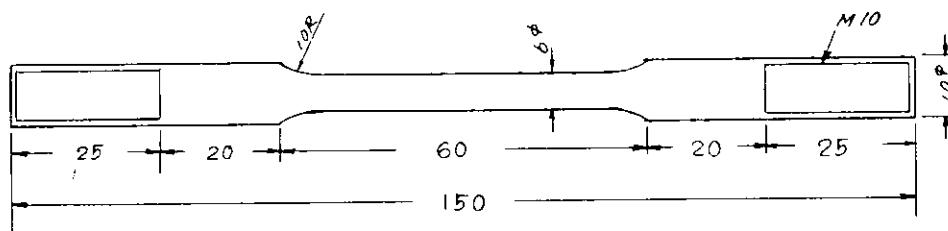


図 2.1.a.2 丸棒引張試験片形状寸法

(4) 試験結果および考察

丸棒引張試験によりもとめた降伏点 (σ_y 、 k_y/mm^2) および引張強さ (σ_u 、 k_u/mm^2) と温度 (T_k 、°K) の関係を図 2.1.a.3 に示す。図から降伏点の対数と絶対温度の逆数の間に直線関係があり次式で示される。

$$\sigma_y = \sigma_{0y} e^{-k_y/T_k} \quad \dots \quad (2.1.a.1)$$

ただし、 σ_{0y} 、 k_y は材料定数

各供試材について材料定数をもとめ表 2.1.a.2 に示す。ディープノッチ試験の破壊発生応力と温度の関係を図 2.1.a.4 に示す。図には切欠断面応力 (σ_{net}) を黒印、一様断面応力 (σ_g) を切欠長さと幅の比の関数 ($f(\gamma)$) で

修正した。修正グロス応力 ($f(\gamma) \cdot \sigma_g$) を白印で示した。また丸棒引張試験でもとめた降伏点 (σ_y) と温度の関係もあわせて示した。同図からハ級鋼 (9A、19A) は、いずれも 38mm の D 級鋼 (38D) より破壊応力が低いことがわかる。

表 2.1.a.2 供試材の材料定数

鋼名	9A	19A	19D	38D	38E	25A
σ_{0y}	19	16	—	21	—	18
k_y	113	121	—	95	—	120
S_{0i}	38	169	—	576	—	63
$2k_i$	517	740	—	740	—	644
k_o	—	—	2.29×10^8	—	3.9×10^8	1.71×10^8
k	—	—	3.77×10^3	—	3.89×10^3	1.85×10^3

ただし、

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

$$0.1 \sin \pi\gamma) \quad \dots \quad (\text{両側切欠})$$

$$f(\gamma) = \sqrt{\frac{2}{\pi\gamma}} \tan \frac{\pi\gamma}{2} \quad \dots \quad (\text{中央切欠})$$

$$\gamma = \frac{c}{b} \quad c = \text{危険長さの} \frac{1}{2} (\text{mm}) \quad b = \text{試験片半幅} (\text{mm})$$

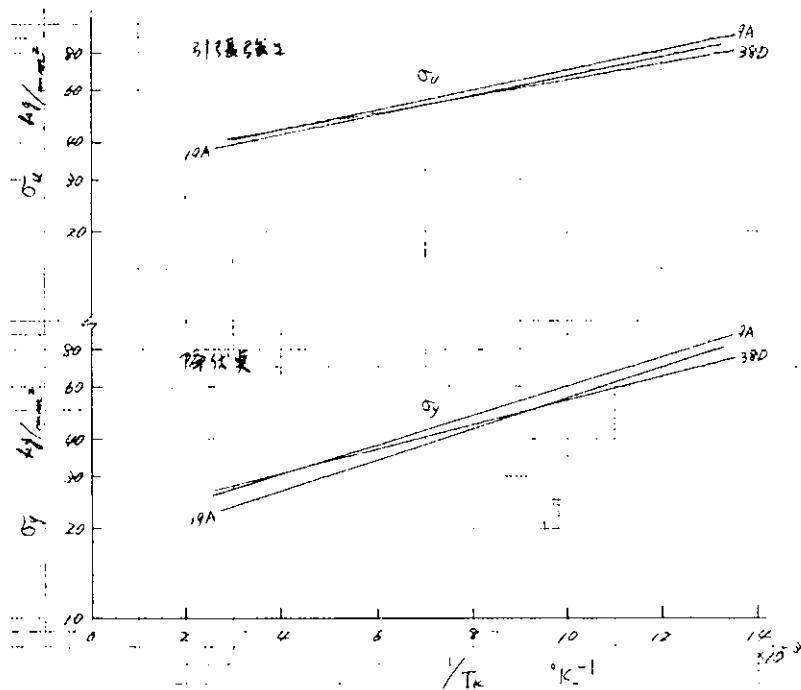


図 2.1.a.3 降伏点および引張強さと温度の関係

表 2.1.a.2 供試材の材料定数

つぎに次式をもちいて、塑性表面エネルギー ($S_i K_{\text{dyn}}/\text{mm}^2$) をもとめ絶対温度の逆数との関係を図 2.1.a.5 に示す。

$$S_i = \frac{\pi \{ f(\gamma) \cdot \sigma_g \}^{1/2} \cdot C}{2E} \quad \dots \quad (2.1.a.2)$$

ただし、 $\sigma_y = \sigma_{0y} e^{-k_y/T_k}$

$$S_i = S_{0i} e^{-2k_i/T_k}$$

$$k_o = k_o e^{-k_o/T_k}$$

同図には参考資料として、25.4mmのA級鋼(25A)の結果もあわせて示した。図から s_1 の対数と絶対温度の逆数の直線関係は次式であらわされ、それぞれの材料定数を表2.1.a.2に示す。

$$s_1 = s_{01} \left(-\frac{2k_i}{T_k} \right)$$

..... (2.1.a.3)

ただし、

s_{01} 、 $2k_i$ は材料定数、

図から25Aが最も低い値を示したが、A級

鋼は3種ともほぼ同等の特性値をもち、D級鋼より幾分劣ると考えられる。

2.1.b 素材の脆性破壊発生特性-2

(1) 研究目的

素材の脆性破壊発生特性を大型のディープノッチ試験によりもとめるとともに、前項の標準型試験との比較をおこなう。

(2) 供試材および試験片

供試材として、前項の試験と同じ材料の19Aおよび38Dをもちいた。試験片は幅および長さが100.0mmで試験片の中央に切欠をもつ中央切欠付大型ディープノッチ試験片である。切欠長さ(2c)は19A試験片は40.0mm、38Dは60.0mmで試験片の形状寸法を図2.1.b.1に示す。

(3) 試験内容および方法

試験片を低応力脆性破壊温度領域内の試験温度に冷却し、引張荷重を加えて脆性破壊発生応力をもとめる。該温度で試験して、脆性破壊発生応力と温度の関係をもとめる。

(4) 試験結果および考察

19A大型ディープノッチ試験の破壊発生応力と温度の関係を図2.1.b.2に示す。図には標準型ディープノッチ試験結果もあわせて示した。修正ダロス応力を大型試験について(○)印標準型試験について(●)印で、切欠断面応力を△印で示した。

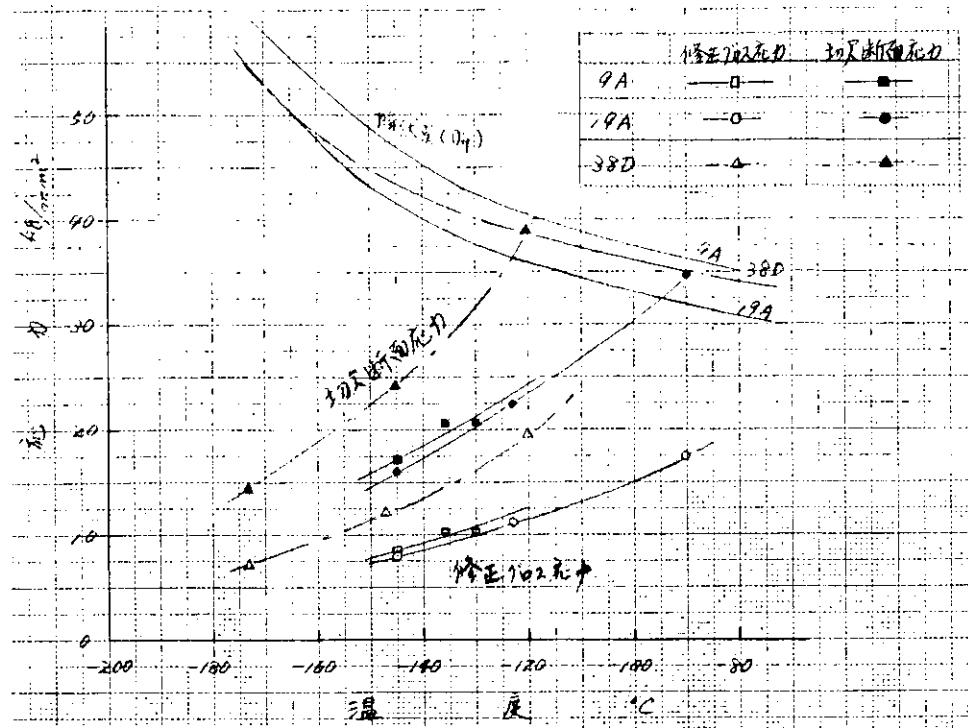


図2.1.a.4 標準型ディープノッチ試験の破壊発生応力と温度の関係

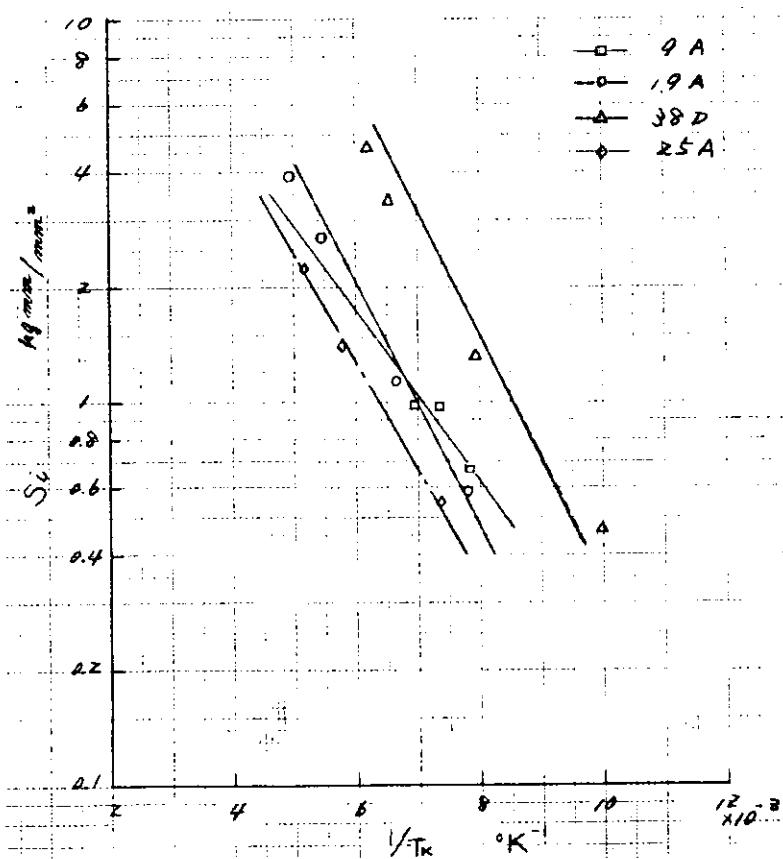


図2.1.a.5 標準型ディープノッチ試験の s_1 と絶対温度の逆数の関係

また前項の標準型ディープノッチの S_{t} の対数と絶対温度の逆数の直線関係(図2.1.a.5)をもちいて大型試験片の $c = 200 \text{ mm}$ および標準型試験片の $c = 120 \text{ mm}$ の切欠長さに対応する破壊応力と温度の関係をもとめ、それぞれ実績および破綻で示した。

38Dについての試験結果を図2.1.b.3に示す。修正グロス応力を大型試験については△印で、標準型試験については▲印で示した。また標準型試験結果から大型試験片の $c = 500 \text{ mm}$ についてもとめた破壊応力と温度の関係を実績で示した。

両図から切欠断面応力(×印)が降伏点を大きくこえるものを除くと、実験値は計算結果である実績および破綻とはほぼ一致する。このことは大型試験と標準型試験の試験結果に差がないことを示すものといえよう。

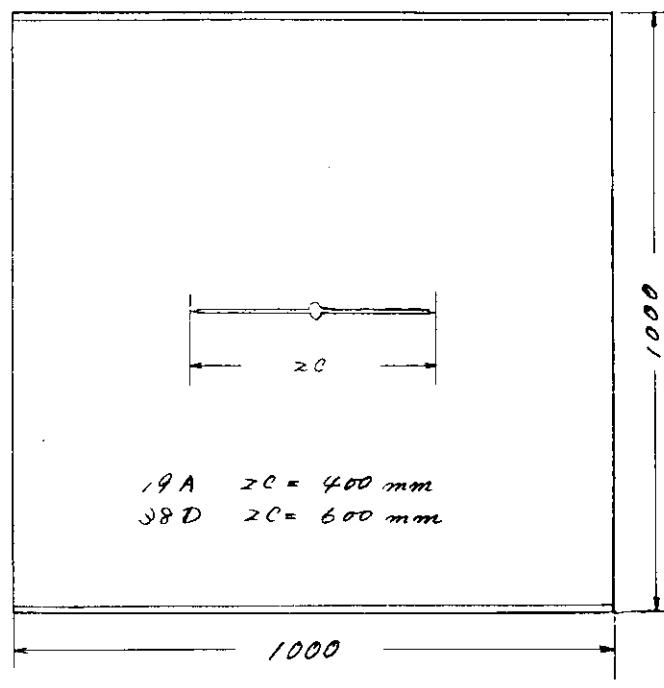


図2.1.b.1 大型ディープノッチ試験片形状寸法

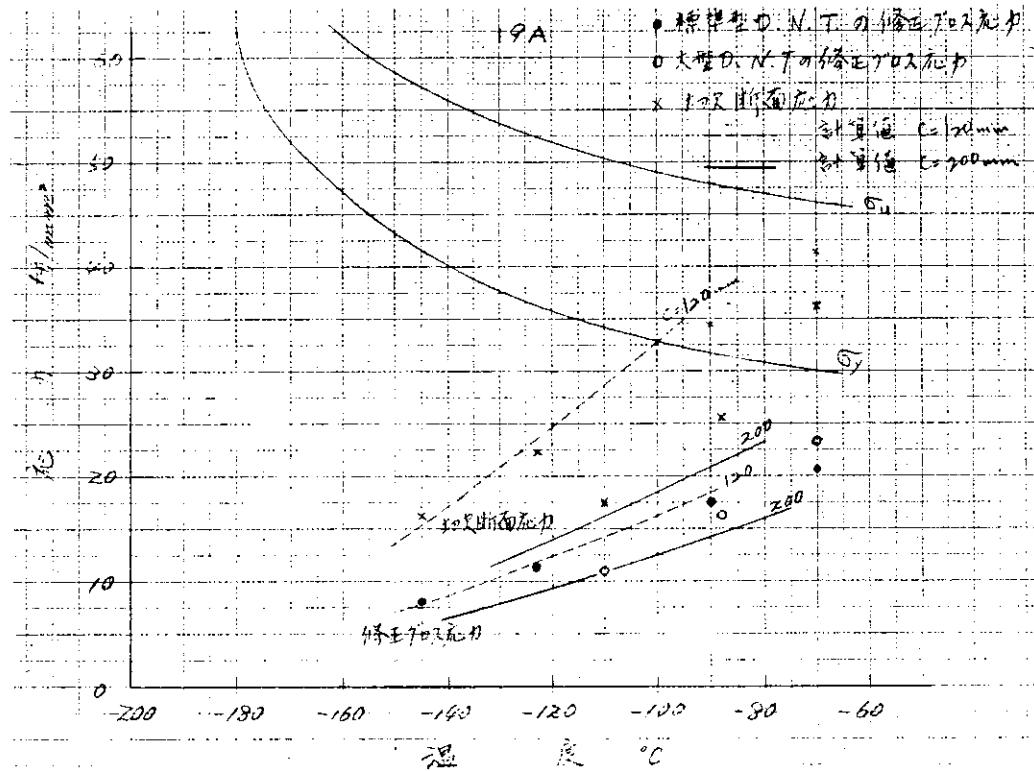


図2.1.b.2 標準型および大型ディープノッチ試験の破壊発生応力と温度の関係(19A)

次に(2.1.a.2)式と中央切欠付試験片の修正係数をもちい、塑性表面エネルギー S をもとめ絶対温度の逆数との関係を図2.1.b.4に示す。図には標準型試験の結果を黒印および実線で示したが、大型試験結果は標準型試験結果にほぼ一致している。

無限板に2°Cの亀裂が存在するときの脆性破壊発生温度は(2.1.a.2)式および(2.1.a.3)式をもちい、次の式で示される。

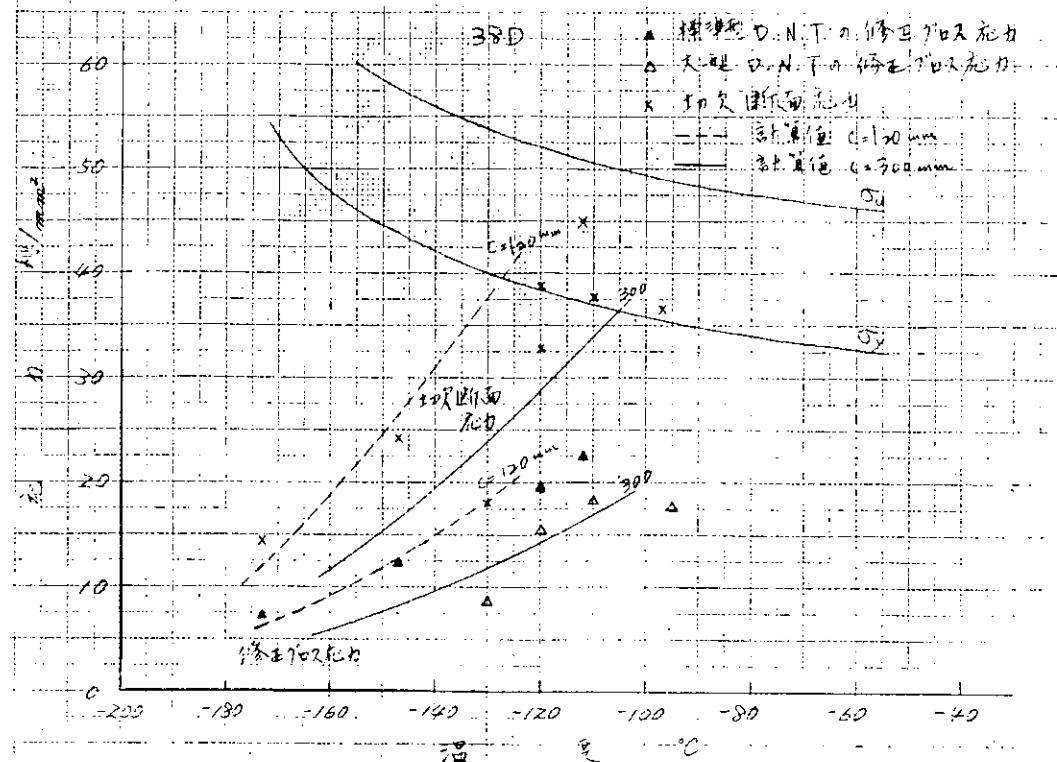


図 2.1.b 3 標準型および大型ディープノッチ試験の破壊応力と温度の関係(38D)

$$\frac{2k_i}{\Theta T_k} = \frac{2F \cdot S_{0.1}}{\pi} \cdot \frac{1}{\sigma_2} \cdot \frac{1}{c} \quad \dots \dots (2.1.b 4)$$

ただし、

T_k = 脆性破壊発生温度(°K)

σ = 応力(Kg/mm²)

c = 亀裂長さの $\frac{1}{2}$ (mm)

$S_{0.1}$, k_i = 材料定数

標準型および大型ディープノッ
チ試験結果をもじいて上式により
8, 16, 24 Kg/mm² の応力レベ
ルについて脆性破壊発生温度をも
とめ、亀裂長さとの関係を図
2.1.b 5 に示す。図から、脆性破
壊発生特性は 9A (25A と同等)
19A, 38D とよくなる。1例

として 8 Kg/mm² の応力レベルで
15°C の温度で脆性破壊の発生す
る亀裂長さを推定すると 9A で、
 $2c = 2,600$ mm, 19A で
 $5,400$ mm, 38D で $8,000$ mm 以

上となり、25A で $2,800$ mm となる。

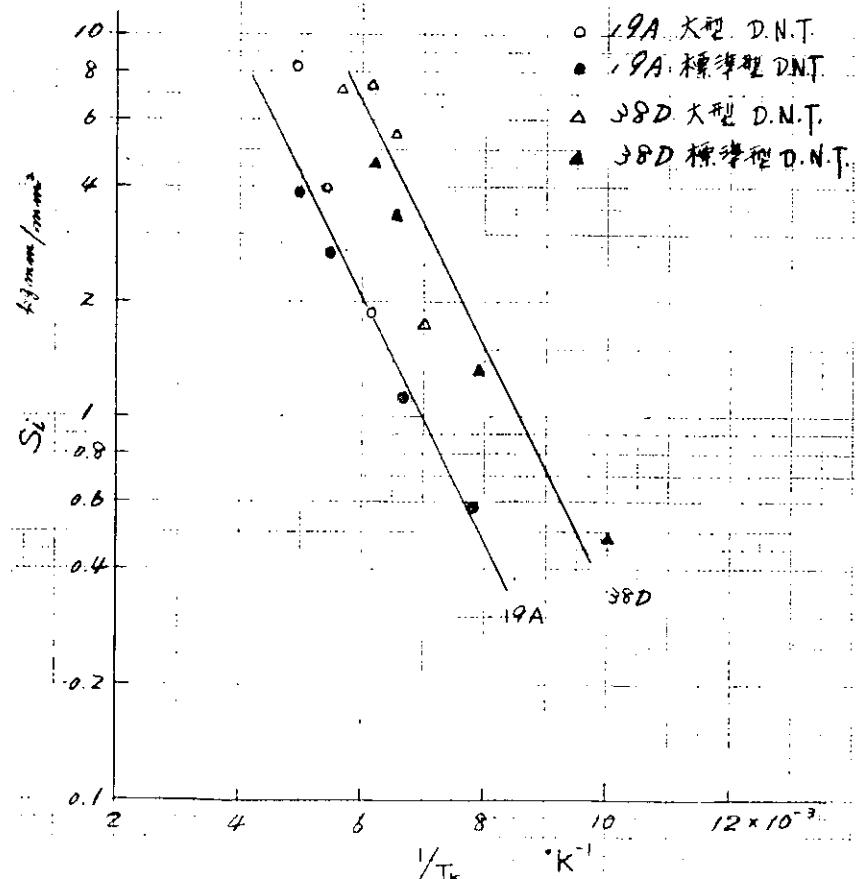


図 2.1.b 4 標準型および大型ディープノッチ試験の塑性表面エネ
ルギーと絶対温度の関係

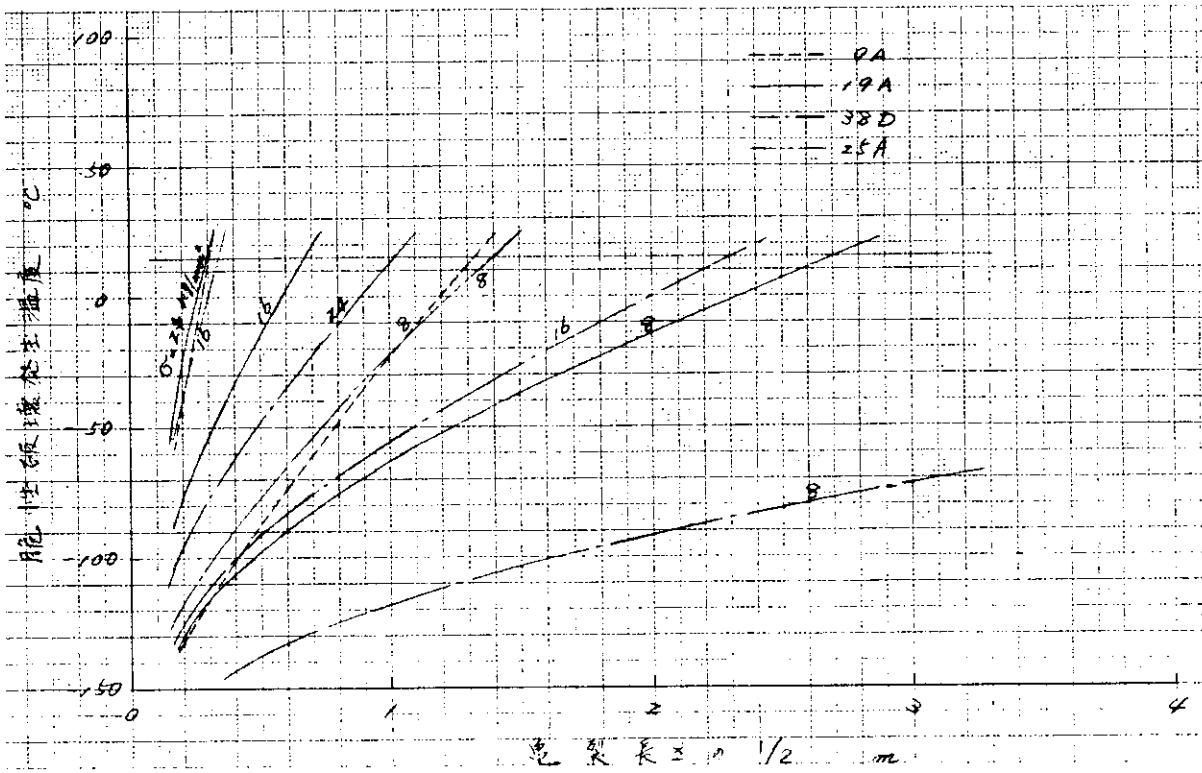


図 2.1 b 5 無限板における脆性破壊発生温度と亀裂長さの関係

2.1.C 溶接継手部脆性亀裂発生特性

(1) 研究目的

切欠付縫溶接継手広巾引張試験は引張残留応力の共存する溶接継手材質劣化部よりのせい性き裂発生特性を調べる試験方法として古くから実施されてきた。この試験には多くの利点のある反面、その実施にあたって大形試験機を必要とする。試験鋼板の必要量が多い、試験片の製作、試験の実施にかなりの費用と期日を必要とするなどの難点がある。

こゝでは従来溶接性試験として広く採用されてきたコマレル試験片程度の大きさの試験片を用い、曲げ試験によつて切欠付縫溶接継手広巾引張試験の代用とする可能性を調べた。当然残留応力の点では再現できぬであろうが、材質劣化に対しては同等な評価ができることが期待された。

(2) 供試材および試験片

供試鋼は板厚 3.0 mm の D 級銅、記号 R.D.B.3.0 と板厚 3.8 mm の D 級銅、記号 N.D.3.8 の 2 鋼種であり、これらの化学成分と機械的性質を表 2.1.C.1 と表 2.1.C.2 とに示す。なお R.D.B.3.0 鋼は S.R.1.0.1 部会において実施した切欠付縫溶接継手広巾引張試験の試験終了材より変形を受けていない部分を選び今回の試験材を採取した。

試験片の溶接に使用した溶接棒は市販の神戸製鋼製ヨーク 17 イルミサイト系 4 mm φ、5 mm φ である。

試験片の形状を図 2.1.C.1 ~ 2 に示す。R.D.B.3.0 鋼および N.D.3.8 鋼ともに溶接前切欠長さは 2 種類とし、その影響を比較した。

試験片の溶接にあたつては角変形を防ぐため試験片をその両端で拘束した。この拘束には両端に孔のある棒 4 本とボルトナット計 4 組とを使用している。拘束状態で表裏 1 パスを可能な範囲にわたり溶接した。以後は拘束治具を取り除いて溶接しており、その溶接条件を表 2.1.C.3 に示す。層間温度は 50 °C におさえているが、表溶接最終層の第 5 パスと第 6 パスとは連続しており、この間のパス間温度の調整は行なつていない。

溶接完了後溶接継手中心部に 1.0 mm φ のドリル孔をあけ、ついで試験片を 45 度の角度に支持し、シェーパによつて溶接金属を切り離した。これら切欠加工の方法は切欠付縫溶接継手広巾引張試験における Before Weld Notch 試験片の場合に準拠したものである。

表2.1.C.1 化学成分(%)

(3) 試験内容および方法

曲げ試験には 50 ton のアムスラー型万能試験機を使用した。曲げ試験の状況を図2.1.C.3 に示す。試験片はドライアイスとアルコールにより冷却し、所定の温度に 10 分以上保持した後、冷却槽よりとり出し、試験機にとりつけ直ちに荷重を加えた。 -60°C より低い温度の冷却には一部ドライアイスとともに、液体窒素を用いている。

荷重速度は降伏前は 2 ~ 3 秒で 1 ton 増加する程度、降伏後は試験機ヘッドの速度毎分 10 mm 程度で実験を行なつた。

(4) 試験結果および考察

結果の総括を表2.1.C.4、表2.1.C.5 に示す。図2.1.C.4 は破面のスケッチ、図2.1.C.5 は

伸び一荷重線図である。今回の実験結果では低温度における標準的な破壊条件は以下のとおりであつた。

1) 弹性範囲内の低荷重で 1 次き裂が発生し停止する。

2) 試験片は全断面降伏し、曲げ変形の進行とともに剪断き裂が拡大し、ついでぜい性破断する。

例外的な場合として数個の試験片に 2 次き裂が発生し停止するという例が見られた。高温度部分においては RDB 30 鋼と ND 38 鋼との間で差異が見られる。

RDB 30 鋼の場合には切欠底部にわざかのぜい性破面が発生し、ついで延性破面が拡大してゆく。この状況で曲げ角が増大し、試験を停止した。

ND 38 鋼の場合には切欠底部よりまず延性破面が発生、拡大してゆき、ついでぜい性破断するという状況を示し、板

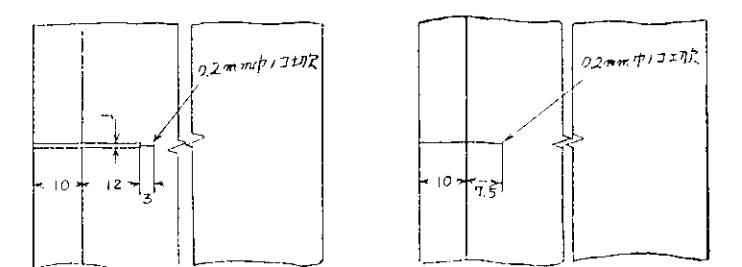
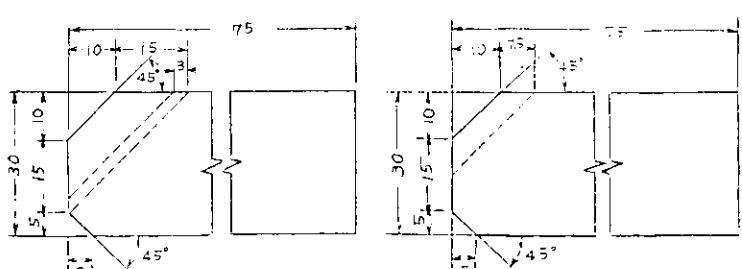
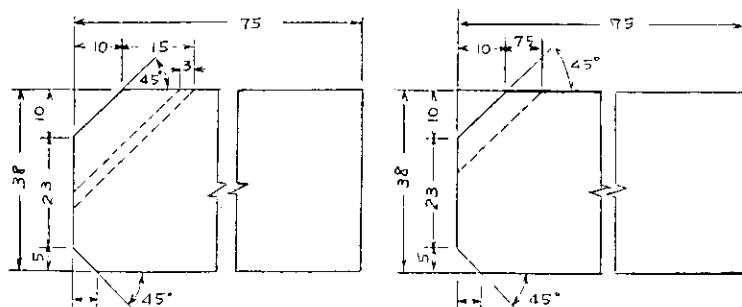
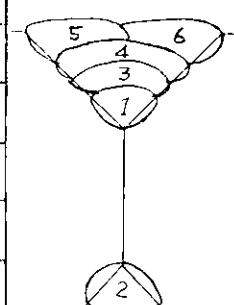
符号	板厚 mm	C	Si	Mn	P	S	Al
RDB 30	30	0.16	0.03	1.00	0.014	0.021	—
ND 38	38	0.12	0.25	0.70	0.012	0.025	—

表2.1.C.2 機械的性質

符号	方向	降伏点 kg/mm^2	引張強度 kg/mm^2	伸 δ %	E_0 kg/mm	νT_E $^{\circ}\text{C}$	νT_S $^{\circ}\text{C}$	νT_{15} $^{\circ}\text{C}$
RDB 30	L	27.2	44.2	31	10.0	-6	-10	-24
ND 38	L	29.0	44.6	30.2	10.0	-18	-20	-40

表2.1.C.3 溶接条件

層	ハス	棒径 mm	電流 Amp.	速度 cm/min	備考
表オ1	1	4	170	20	
裏オ1	2	5	200	20	
表オ2	3	5	200	20	
表オ3	4	5	200	12~17	
表オ4	5	5	200	20	
表オ4	6	5	200	20	



1次き裂 (表面) 50 mm

2次き裂 (表面) 35 mm

図2.1.C.1 試験片形状(溶接前)

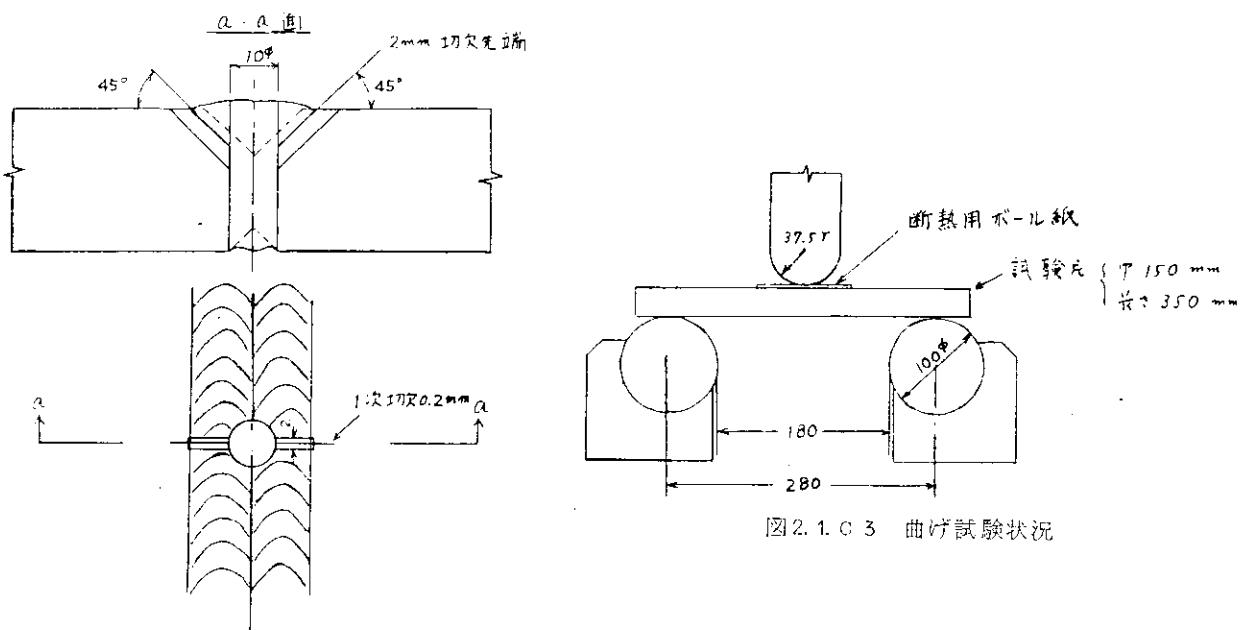


図 2.1.C.2 溶接後の切欠部詳細

図 2.1.C.3 曲げ試験状況

表 2.1.C.4 実験結果の総括 (RDB30)

切欠の表面長さ mm	試験片番号	試験温度 °C	一次き裂		二次き裂		最大荷重 Ton	破断荷重 Ton	備考
			荷重 Ton	長さ mm	荷重 Ton	長さ mm			
35	7	20	7.6?	1.5 1.5			27.7		
	6	20	?	1.5 0			27.4		
	9	10	7.8	8.0 3.0			26.0		
	2	6.5	?	4.0 4.5			27.8		
	4	0	5.6	3.0 3.5			(27.7)	27.7	
	1	0	1.4	6 6	22.2		22.2	19.5	
	10	-10	?	2.5 1.5			(28.5)	28.5	
	5	-20	4.3	6 8			(19.5)	19.5	
	3	-30	?	8 10			(19.8)	19.8	
	11	-40	2.1	10 9			(21.1)	21.1	
50	F	20					26.2		
	E	20					25.8		
	C	10	5.7	6.0 2.0			26.4		
	I	10		4.0 1.5	17.4 21.5		24.8		
	H	0		7.0 2.0			(26.0)	26.0	
	A	0	0.9	6.0 2.0			(26.0)	26.0	
	J	-10	1.2	3.5 4.5			(21.7)	21.7	
	B	-20	3.0	6.0 5.0	17.6		(19.9)	19.9	
	D	-30	4.8	8 9			(20.5)	20.5	
	G	-40	2.4	11 8			(17.6)	17.6	

表2.1.○5・実験結果の総括(No.33)

切欠の表面長さ mm	試験片番号	試験温度 °C	一次き裂		二次き裂		最大荷重 Ton	破断荷重 Ton	備考
			荷重 Ton	長さ mm	荷重 Ton	長さ mm			
55	A	-20		0			45.7		
	B	-20	?	0 3.5			43.2	21.5	
	I	-30		0 0			44.7	41.2	
	A	-30		0 0			44.5		
	J	-40		0 0			(44.7)	44.7	
	D	-50	3.9	11 12			40.7	40.0	
	H	-60	5.2	13 13			34.2	34.2	
	C	-70	3.4	12 13			(40.5)	40.5	
	G	-85	5.9	12 10			(32.5)	32.5	
50	4	-20		0 0			40.3	24	
	3	-30		0 0			41.5	40.5	
	8	-30		0 0			42.0	38.0	
	2	-40	22.4	(80)			(32.2)	32.2	
	7	-50	9.0	8 8.5			(36.2)	36.2	
	5	-60	6.4	9.5 9.0			(30.5)	30.5	
	9	-70	5.4	8.5 7			(36.4)	36.5	
	10	-85	4.0	7 7			(31.4)	31.4	

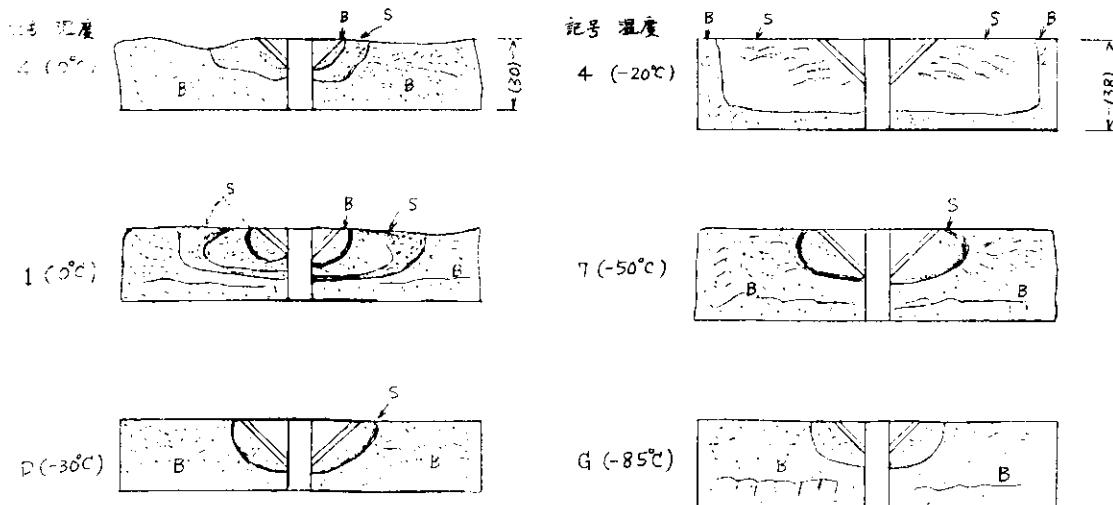


図2.1.○4 破面スケッチ

とんどの試験片が破断している。この状況は S R 1 0 1 部会における供試鋼 R D 5 0 A、N D 5 0 B の場合と類似であるが、今回の場合は低温度部分において既に D 5 0 の破面様式も R D 5 0 の場合と同一であつた。

図2.1.○6は、R D B 3 0 および N D B 3 0 鋼についての試験結果を横軸温度の軸として示したものである。上部の図では絶対に一次き裂発生荷重および破断荷重（または最大荷重）をとつてある。下部の図は横軸に1次きれつの深さをとつたものである。深さは初次底面の作用線に対し直角な線上で計測し、左右の深さの平均値を軸にプロットした。

図 2.1.c 6 の縦軸荷重の

図は S E 1 0 1 部会において実施した切欠付縫接手広巾引張試験の結果図とほとんど同一のものとなつてゐる。相違点としては広巾引張試験においては 2 次破壊が残存断面部分のほど降伏荷重において発生したのに

対し、曲げ試験の場合には曲げ変形がかなり進んで後に 2 次破壊が発生している点があげられる。

曲げ試験の欠点としては 1 次き裂発生の瞬間が広巾引張試験の場合よりさらにキャッチしにくい点があげられる。この点では R D B 3 0 鋼、切欠長さ（表面）3 5 mm の場合がもつともとらえがたく、N D 3 8 鋼の場合には、1 次き裂の発生

をいずれの試験片において

も明瞭な音として聞くことができた。

R D B 3 0 鋼切欠長さ（表面）3 5 mm の場合には、また後の破面検査において + 2 0 °C の試験片においてもなお切欠底部にわずかのへき開破面らしき部分が認められた。これの取扱いについて問題はあるが、図 2.1.c 6 の荷重一温度図の立上がり温度の決定にはこれを無視している。

立上がり温度の決定は R D B 3 0 鋼、N D 3 8 鋼とも切欠き長さの長い場合が、より容易であつた。これらの場合はこの温度においてかなり高い弾性域荷重で 1 次き裂を発生させていることによる（図 2.1.c 6 参照）。以上のこととを総合して R D B 3 0 鋼の本試験による立上がり温度はほど + 1 0 °C 、N D 3 8 鋼の場合は - 4 0 °C ~ - 5 0 °C と推定される。

本試験において 1 次き裂が発生し停止するという現象が一般的に見られたことより、これは残留応力の影響ではないかとも考えられた。1 次き裂が低荷重で発生するという現象には残留応力が寄与していることが考えられる。しかしながらき裂が停止するということと、破面に見られる停止き裂の形状については 2 次き裂も類似の傾向を示す事実よりみて、曲げ試験片に見られる特徴と考えることが妥当であろう。

以上の考察をまとめればおよそ以下のとくとなる。

- 1) 今回実施した切欠付溶接継手曲げ試験は切欠付縫接継手引張試験とはほど類似の試験結果を与えるものとして期待できる。
- 2) R D B 3 0 鋼の立上がり遷移温度は 1 0 °C であつて、これは同鋼について求められた切欠付縫接継手広巾引張試験における立上がり遷移温度 0 °C ~ + 1 0 °C と良く一致している。
- 3) N D 3 8 鋼の立上がり遷移温度は - 4 0 °C ~ - 5 0 °C であつて、同鋼は溶接熱影響部よりのぜい性破壊の発生現象に対して十分な安全性を持つものと推定される。

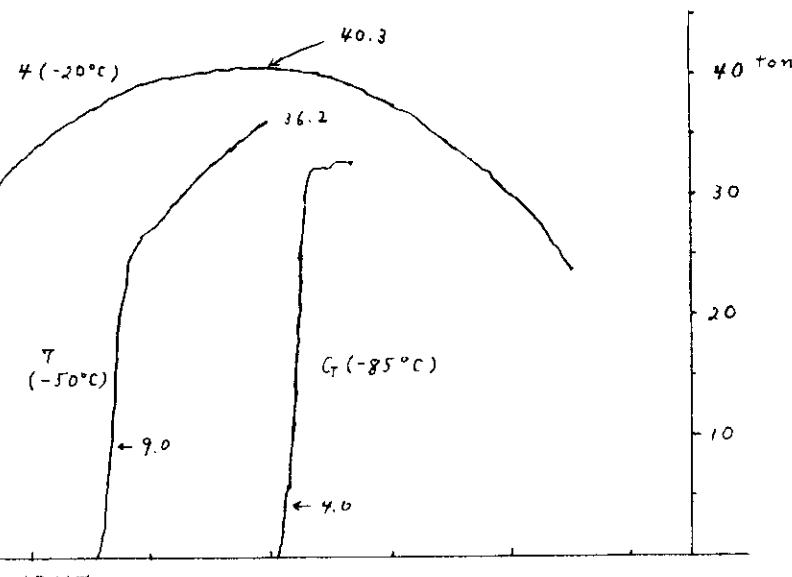
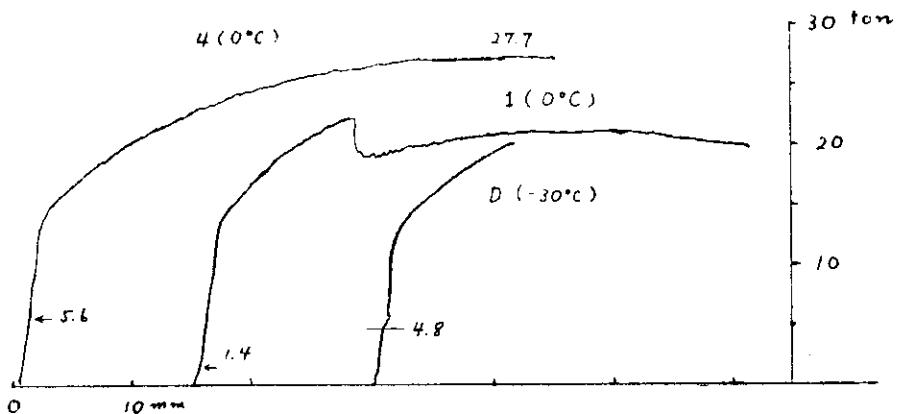


図 2.1.c 5 荷重一変位線図の例

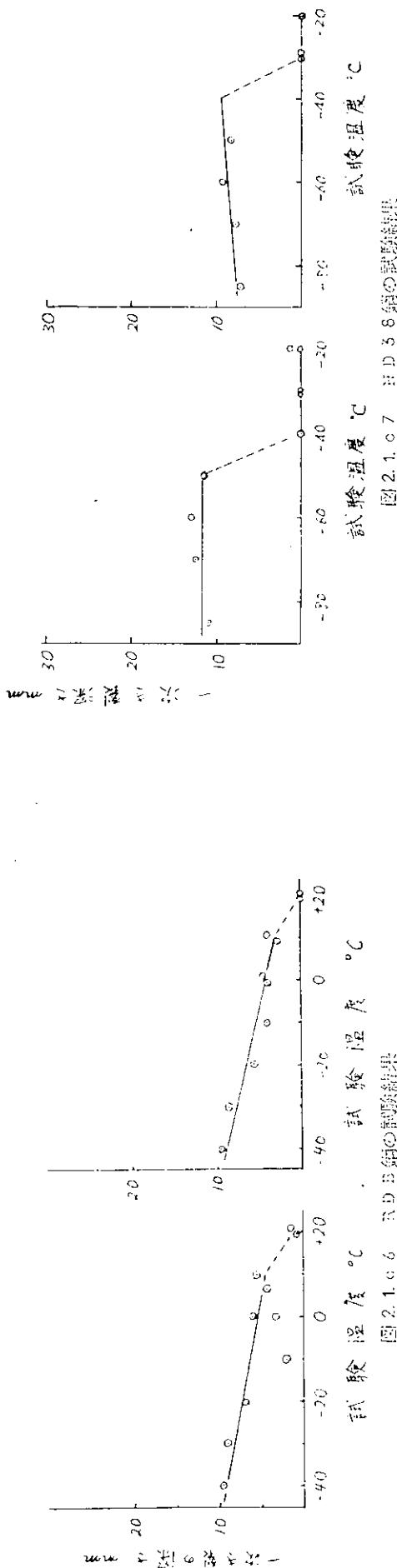
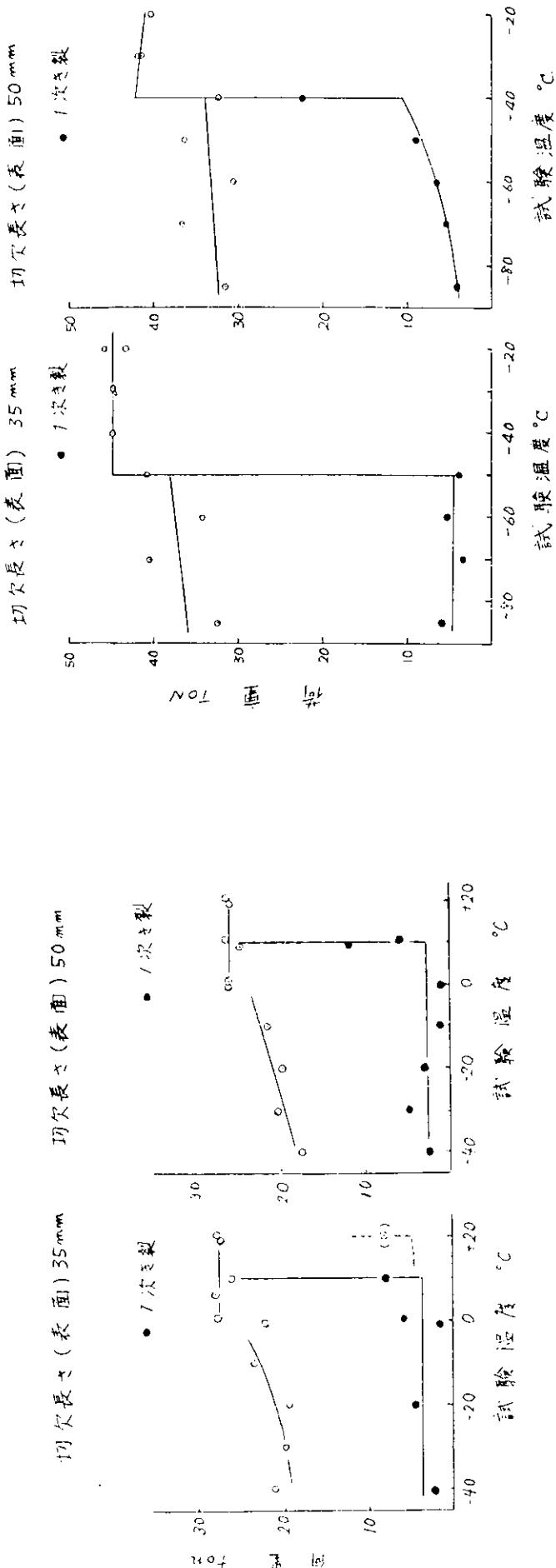


図 2.1.c.6 ND3鋼の試験結果

図 2.1.c.7 ND3鋼の試験結果

2.1.d 拘束部材の脆性破壊発生特性

d.1 拘束引張試験

d.2 溶接ビード付ディープノッチ試験

(注) 拘束部材の脆性破壊発生特性を研究する上で d.1, d.2 の試験は密接な関係があると思われる所以 d.1, d.2 の結果をまとめて報告する。

(1) 研究目的

局部的応力集中部を持つ溶接構造物の脆性破壊発生特性および予荷重、繰返し荷重の影響を調べるために、不連続構造モデルを用いて拘束引張試験を行なう。また溶接残留応力と切欠の重畠が脆性破壊の発生に及ぼす影響を基本的な形で調べるために溶接ビード付ディープノッチ試験を行ない素材のディープノッチ試験と比較する。

(2) 供試材および試験片

供試材として日本海事協会規格の造船用軟鋼 A 級第 1 9 mm 厚、D 級鋼 3 8 mm 厚、E 級鋼 3 8 mm 厚（材料符号 A-19, D-3-8, E-3-8）を用いる。供試材のミルシートによる化学成分および機械的性質を表 2.1.d.1 に示す。ここで D 級鋼に関しては拘束引張試験と溶接ビード付ディープノッチ試験に供した材料が異なつてあり、表中 D-3-8-1 が拘束

表 2.1.d.1 供試材の化学成分および機械的性質

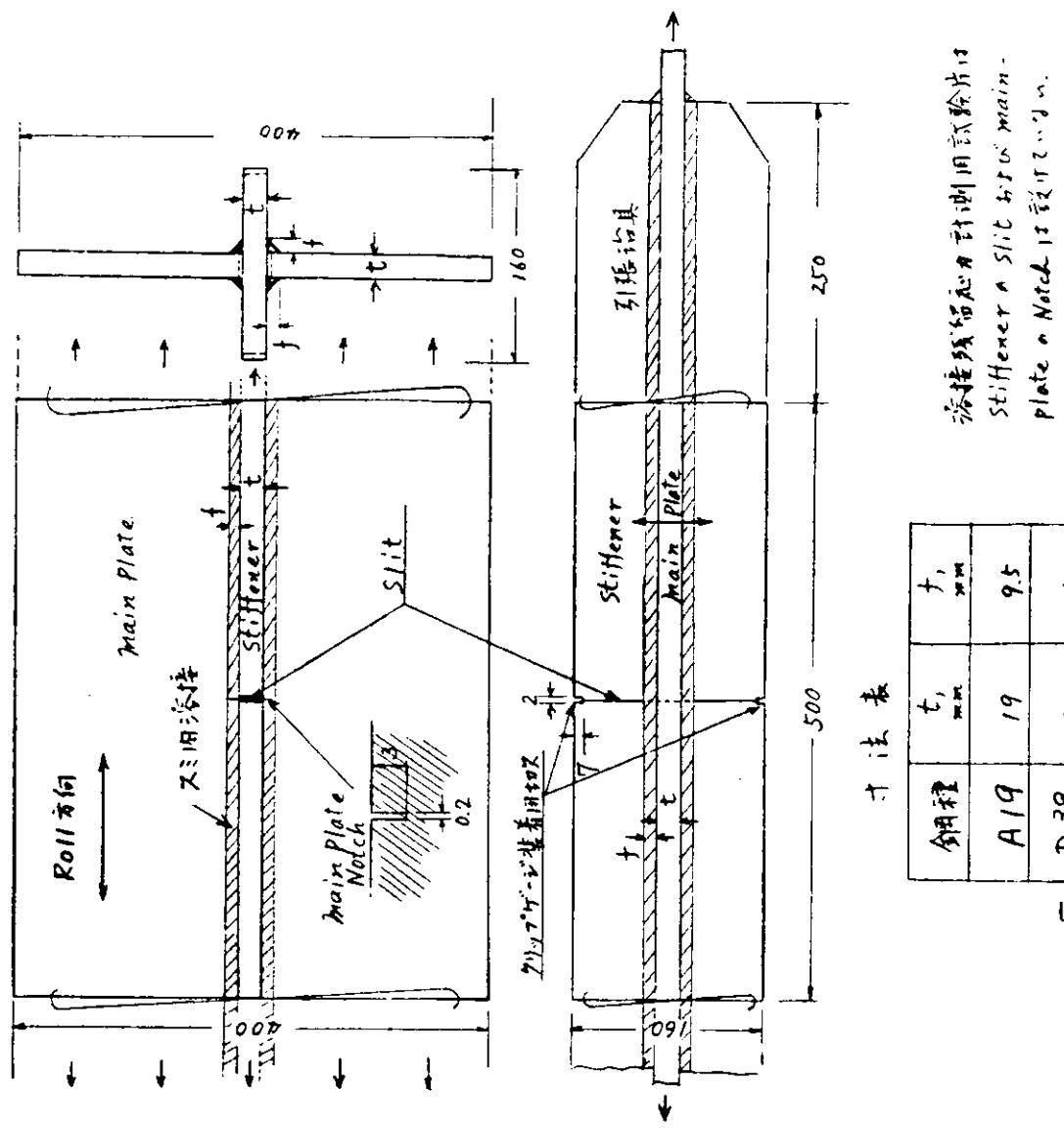
符 号	鋼 種	板 厚 (mm)	化 学 成 分 (%)					機 械 的 性 質	
			C	Si	Mn	P	S	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)
A-19	A 級	19	0.18	0.04	0.76	0.012	0.021	28.0	43.0
D-3-8-1	D 級	3.8	0.12	0.20	0.70	0.028	0.025	28.3	45.4
D-3-8-2		3.8	0.12	0.26	0.70	0.021	0.026	28.5	43.9
E-3-8	E 級	3.8	0.16	0.27	1.05	0.017	0.015	32.5	45.0
									35.1

引張に D-3-8-2 を溶接ビード付ディープノッチに供した材料である。またシャルビ遷移曲線を図 2.1.d.1 に示す。

拘束引張試験の試験片形状寸法は図 2.1.d.2 に示すとおりである。溶接施工の関係上防撃部材に相当する不連続板に両側から主板を溶接した形をとつている。また不連続部の溶接ビードの破断が破壊発生の起因となることを防ぐ目的で防撃材の不連続部に合わせて両側の主板に 0.2 mm × 5.0 mm の切欠を入れてある。各供試材とも単純引張試験、予荷重および疲労蓄積を与えた破壊試験用とする。また不連続部を設けない試験片で残留応力を測定する。

溶接ビード付ディープノッチ試験の試験片形状寸法は図 2.1.d.3 に示すとおりである。各供試材ともディープノッチ試験片を 12 個製作しその半数の各 6 個は溶接用溝および残留応力付加ビードを置かず、素材のまゝディープノッチ試験を行なう。他の 6 個は溶接ビード付ディープノッチ試験片とする。D 級鋼 3 8 mm 厚、E 級鋼 3 8 mm 厚については溶接ビード付試験片のうち各 1 個を溶接残留応力測定にあたり向ける。そのものについては、ディープノッチを設けない。

拘束引張および溶接ビード付ディープノッチ試験片の溶接条件をそれぞれ表 2.1.d.2、表 2.1.d.3 に示す。拘束引張試験片においては防撃材と主板との溶接はすべて隅内溶接である。このため不連続部の溶接第一層に溶接ワレを生じたもののが多かつた。溶接ビード付ディープノッチ試験片の溶接条件は供試材類似の材料について予備試験を行ない、図 2.1.d.3 に示すとおり適当な溶込交差が得られるようにより決めたものである。ところが、実際の供試材には若干の形状不整（波打ち）があつて、個々の試験片では計画どおりの溶込交差が得られないことが多かつた。図 2.1.d.4 にその代表的な例を示す。またビード幅も不揃いであつたため、ビード付の各試験片は、それぞれの表裏左右 4 ビードのうち幅が最大のものを選び出し、それの内側止端と試験片端の間を 5 mm 切欠の寸法としたので、0.2 mm × 5 mm の切欠先端部を含む切欠全寸法は目標の 12.5 mm に対し個々の試験片ごとに若干の違いが生じた。



寸法表		
鋼種	t_1 mm	t_2 mm
A19	19	9.5
D38	38	14
E38	38	14

図2.1.2 拘束引張試験片形状寸法

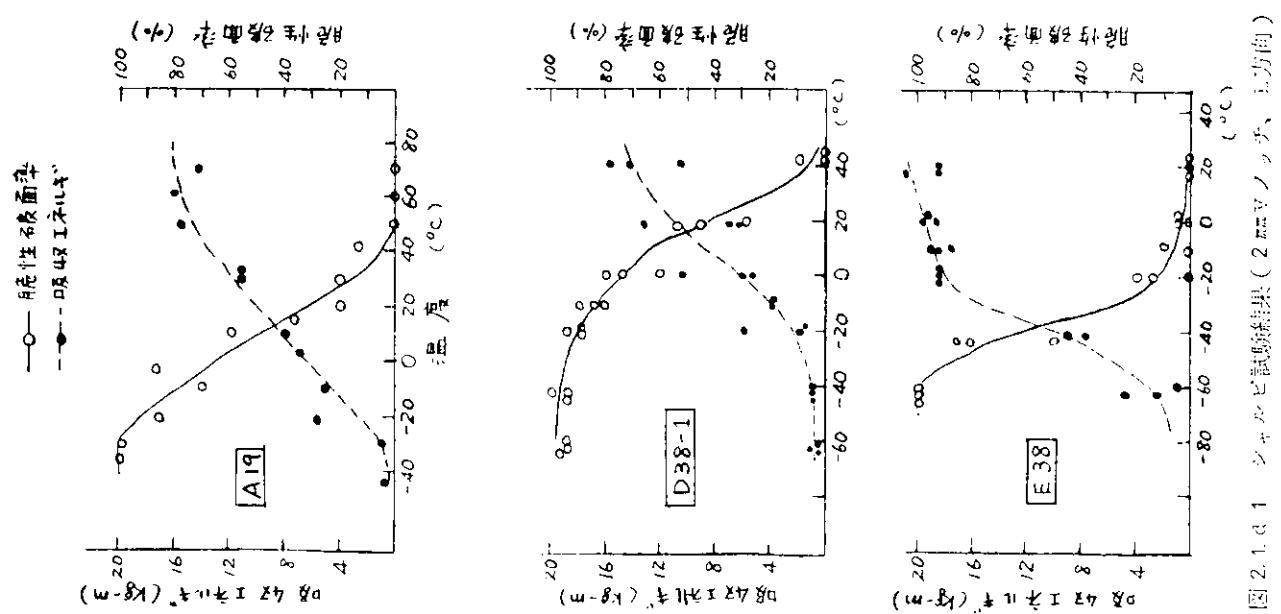


図2.1.1 シヤルク試験結果 (2 mmノッチ、引張方向)

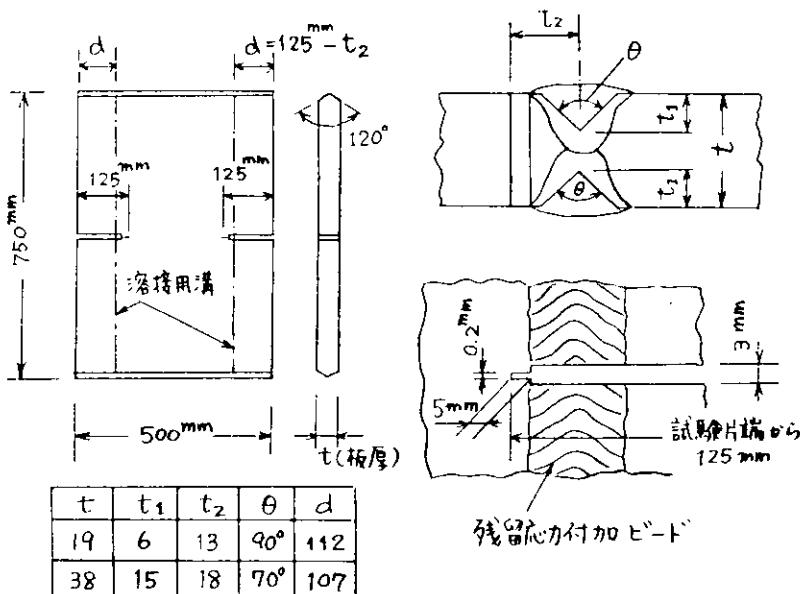


図 2.1.d.3 溶接ビード付ディープノッチ試験片形状寸法

表 2.1.d.2 拘束引張試験片溶接条件

銅種	脚長 (mm)	幅 (mm)	溶接棒径 (mm)	電流 (Amp)	電圧 (Volt)	溶接速度 (mm/min)
A 19	9.5	1	6	290	33	200
		2	5.5	240	33	255
D 38	14	1	6	280	39	230
		2	6	290	38	240
		3	6	270	38	190
E 38	14	1	6	280	39	230
		2	6	290	38	230
		3	5	270	38	190

注) 溶接棒は A 19 第 2 層を除きイルミナイト系

A 19 第 2 層は鉄粉酸化鉄系

溶接姿勢は全 2 水平スミ内溶接

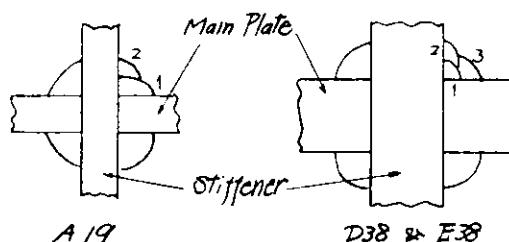


表 2.1.d.3 溶接ビード付ディープノッチ試験片の溶接条件

銅種	層	電流 (Amp)	電圧 (Volt)	速度 (mm/min)	銅種	層	電流 (Amp)	電圧 (Volt)	速度 (mm/min)
A 19	1(表)	850	32	230	D 38 E 38	1(表)	830	35	230
	2(裏)	910	33	500		2(裏)	950	36	250
	3(表)	780	36	260		3(裏)	780	36	250
	4(裏)	780	36	250					

注) 溶接材料 U S 36 - 6.4 mm ϕ × M F 38 - 20 D

(3) 試験内容および方法

拘束引張試験ではまず試験温度をいろいろ選んで単純な引張りによる破壊遷移曲線を求め、残りの試験片で室温疲労引張試験を行なつた。D 3-8、E 3-8 では単純引張試験のばらつきが大きく十分な資料を得るために多くの試験片を費した。室温疲労低温引張試験は各供試材について 1~2 個の試験片を用いて行ない、A 1-9、E 3-8 では繰返し荷重と同じ予荷重を加え、同一温度で破壊させて疲労蓄積のある場合と比較した。予荷重試験として他にネット応力が降伏点に近いような高い予荷重を加えた後低温で破壊させたものが各供試材に 2~3 個ある。

溶接ビード付ディープノッチおよび素材のディープノッチ試験において試験温度は、結晶状破面率が原則的に 100%となるように選び、その上限は破壊発生に先立つて切欠先端部に若干の横取締が生ずるような温度とする。

計測は破壊発生応力および C.O.D (亀裂開口変位) を対象とする。C.O.D の計測には図 2.1.c.5 のクリップゲージを用いる。

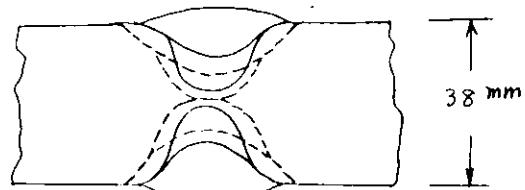


図 2.1.c.4 残留応力付加ビードの代表例

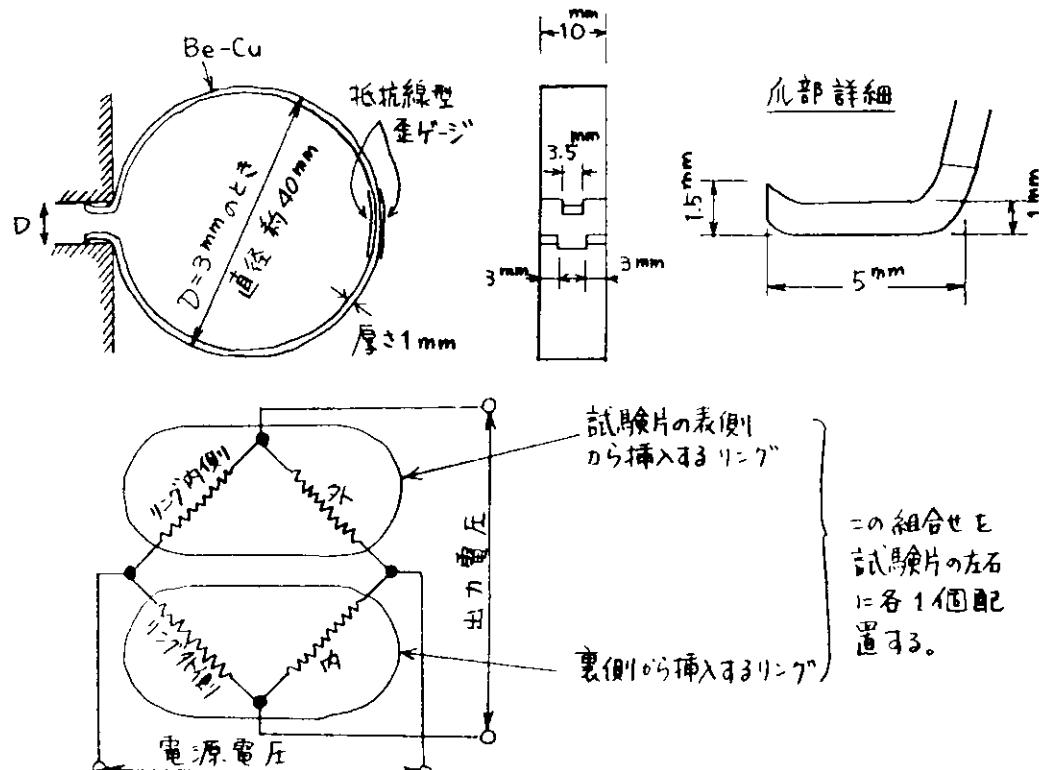


図 2.1.c.5 クリップゲージ

(4) 試験結果および考察

表 2.1.d.4 ~ 6 に拘束引張試験結果を、表 2.1.d.7 に溶接ビード付ディープノッチ試験結果を一括して示す。表 2.1.d.7 で供試材符号のままで素材のディープノッチ試験であり、供試材符号のあとに C のついているものは残留応力付加ビード付試験片による結果である。

拘束引張試験結果を圖示すれば破壊応力については図 2.1.d.6 ~ 8、破壊時の C.O.D については図 2.1.d.9 の通りである。

溶接ビード付および素材ディープノッチ試験結果は破壊応力については図 2.1.d.10 ~ 12、C.O.D については図 2.1.d.13 に示すところである。

拘束引張試験と溶接ビード付ディープノッチ試験の破壊挙動を比較するため図 2.1.d.14 ~ 16 に各供試材毎に商

表 2.1.d.4 捕縫引張試験結果(A - 1.9)

試験片 No.	試験内容	予荷重加工				破壊試験				備考		
		温度 (°C)	荷重 (トン)	応力		COD ₁ (mm)	温度 (°C)	荷重 (トン)	応力			
				gross (kg/mm ²)	net (kg/mm ²)				gross (kg/mm ²)	net (kg/mm ²)		
1	引張試験	—	—	—	—	—8 (-5) (230.5)	64 (224)	6.2 (318)	8.8 —	0.324	脆性亀裂発生→停止 最終破断(延性)	
2	"	—	—	—	—	-35 (-25)	78.6 (16.5)	7.7 (30.2)	10.9 (>30)	—	脆性亀裂発生→停止 最終破断→脆性	
3	"	—	—	—	—	-40	73	7.1	10.1	0.133		
4	"	—	—	—	—	-65	89	8.7	12.3	0.156		
5	"	—	—	—	—	-90	485	4.7	6.7	0.081		
6	"	—	—	—	—	-196	26	2.5	3.6	0.080		
7	予荷重	15	150	14.6	20.7	0.07	-62	170	17.1	24.3	0.430	
8	"	20	150	14.6	20.7	0.207	-120	175	17.3	24.6	0.432	
9	"	18	150	14.6	20.7	0.101	-196	81	7.9	11.2	0.137	
10	"	18	80	7.9	11.3	—	-60	110	10.8	15.5	—	
11	疲労	15	82	80-0.9	11.3-1.1	—	-58	104	10.1	14.4	0.287	繰返し回数 6×10^3 疲労亀裂約 1.0 mm
12						—	—	—	—	—	—	

(注) COD₁: 除荷状態での残留 COD, COD₂: 破壊発生時の COD (予荷重をかけた場合は再負荷による COD)

表 2.1.d.5 捕縫引張試験結果(D-3.8)

試験片 No.	試験内容	予荷重加工				破壊試験				備考		
		温度 (°C)	荷重 (トン)	応力		COD ₁ (mm)	温度 (°C)	荷重 (トン)	応力			
				gross (kg/mm ²)	Net (kg/mm ²)				gross (kg/mm ²)	Net (kg/mm ²)		
1	引張試験	—	—	—	—	-196	445	2.24	3.24	0.23		
2	"	—	—	—	—	-120	695	3.50	5.05	0.43		
3	"	—	—	—	—	-90	297	4.54	6.54	0.22		
4	"	—	—	—	—	-74	112	1.50	2.16	1.04	脆性きれつ停止	
5	"	—	—	—	—	-36	393	5.5	8.1	0.11	"	
6	"	—	—	—	—	-2	440	1.97	2.84	0.80		
7	"	—	—	—	—	18	162	2.22	3.20	—	脆性きれつ停止	
8	予荷重	18	318	16.0	23.1	0.21	-196	275	8.16	11.8	0.12	
9	"	"	318	16.0	23.1	0.09	-95	435	1.38	2.00	0.18	
10	疲労	18	159	80-0.8	11.6-1.16	0.08	-35	160	2.19	3.16	1.03	くり返し回数 9.4×10^3 疲労きれつ 約 3 mm
11	引張試験	—	—	—	—	-60	—	8.1	11.6	0.11		
12						—	—	—	—	—		

表2.1.d.6 捕束引張試験結果(No.38)

試験片 No.	試験内容	予荷重加工				破壊試験				備考	
		温度 (°C)	荷重 (トン) (kg/mm²)	応力 gross Net (kg/mm²)	COD ₁ (mm)	温度 (°C)	荷重 (トン) (kg/mm²)	応力 gross Net (kg/mm²)	COD ₂ (mm)		
1	引張試験	—	—	—	—	—196	38	19.2	27.5	0.07	
2	"	—	—	—	—	—75	290	14.6	21.1	1.11 脆性きれつ停止	
3	"	—	—	—	—	—124	63	3.16	4.56	0.42	
4	"	—	—	—	—	—12	417	21.0	30.5	1.57	
5	"	—	—	—	—	—32	490	24.7	35.6	1.58	
6	"	—	—	—	—	0	476	24.0	34.6	約3.クリップゲージ測定不完全 脆性きれつ停止→延性破壊	
7	"	—	—	—	—	18	610 ^{以上}	30.7 ^{以上}	44.5 ^{以上}	10 ^{以上} 延性破壊	
8	予荷重	18	463	23.3	53.6	0.97	—76	517	26.0	37.6	0.82
9	"	20	159	8.0	11.6	0.11	—52	505	25.4	36.7	1.26
10	疲労	18	159→159	8.0→0.8	11.6→1.6	0.39	—52	347	17.5	25.2	0.51
11	"	16	159→159	8.0→0.8	11.6→1.6	0.20	—15	425	21.4	30.9	0.62
12	残留応力	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

表2.1.d.7 ディープノッチ試験結果

試験片	試験温度 (°C)	切欠深さ (mm)	破壊発生応力 (kg/mm²)		破壊発生時 COD (mm)		
			σ_{gross}	σ_{net}	大きい方	小さい方	平均
A19	—30	1.25	16.5	33.0	2.85	1.48	2.17
	—60	"	18.2	36.4	1.211	0.375	0.793
	—89	"	16.4	32.8	0.307	0.257	0.282
	—110	"	11.3	22.6	0.146	0.113	0.130
	—160	"	7.2	14.4	0.09	0.06	0.075
	—196	"	6.6	13.2	0.083	0.083	0.083
A19W	—33	1.29	15.6	32.2	1.188	0.785	0.987
	—63	1.28	13.0	26.6	0.434	0.370	0.402
	—90	"	12.6	25.9	0.534	0.517	0.425
	—133	"	5.5	11.3	0.069	0.062	0.066
D58	—22	1.25	17.1	34.2	1.65	1.40	1.53
	—51	"	18.2	36.4	1.28	1.00	1.14
	—72	"	19.9	39.8	0.66	0.47	0.57
	—101	"	15.5	31.0	0.24	0.125	0.183
	—132	"	8.48	17.0	0.090	0.055	0.073
	—196	"	4.58	9.16	0.060	0.025	0.043

試験片	試験温度 (°C)	切欠深さ (mm)	破壊発生応力 (kg/mm²)		破壊発生時 COD (mm)		
			σ_{gross}	σ_{net}	大きい方	小さい方	平均
D 38 W	-25	127	11.2	2.27	0.62	0.138	0.379
	-73	128	12.2	2.52	0.322	0.180	0.251
	-112	127	4.4	8.9	0.028	0.027	0.028
	-153	128	3.7	7.5	0.028	0.0053	0.0167
	-196	"	2.3	4.8	0.0076	0.0025	0.0051
E 38	-44	125	2.24	4.48	3.80	3.50	3.65
	-71	"	2.34	4.68	1.36	1.00	1.18
	-102	"	2.46	4.92	0.545	0.335	0.44
	-137	"	1.13	2.26	0.20	0.10	0.15
	-160	"	4.58	9.16	0.044	0.021	0.053
	-196	"	6.30	12.6	0.040	0.040	0.04
E 38 W	-43	128	2.29	4.69	4.80	4.80	4.80
	-72	"	2.26	4.62	1.49	0.53	1.01
	-113	129	1.47	3.05	0.342	0.173	0.258
	-156	"	5.79	11.9	0.070	0.059	0.065
	-196	130	6.20	12.4	0.073	0.062	0.068

(注) 試験片幅はすべて 500 mm

破面はすべて結晶状破面

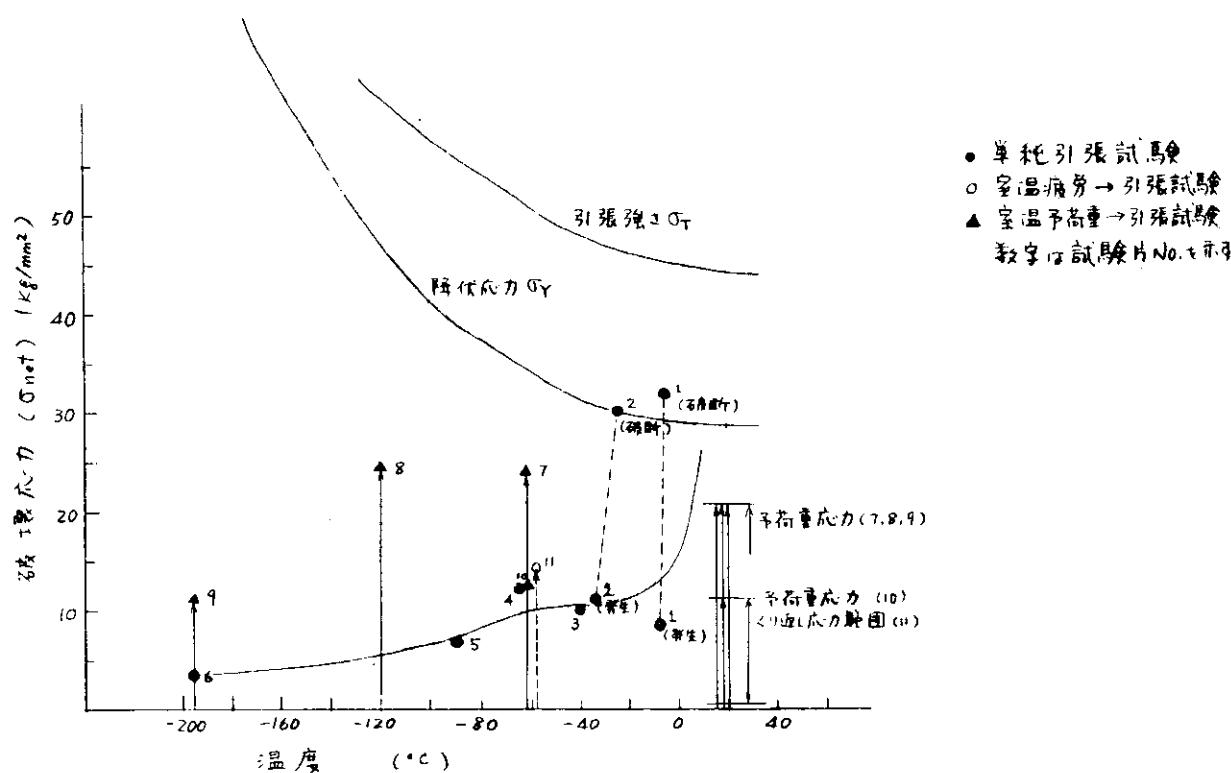


図 2.1-d 6 拘束引張試験 (A19)

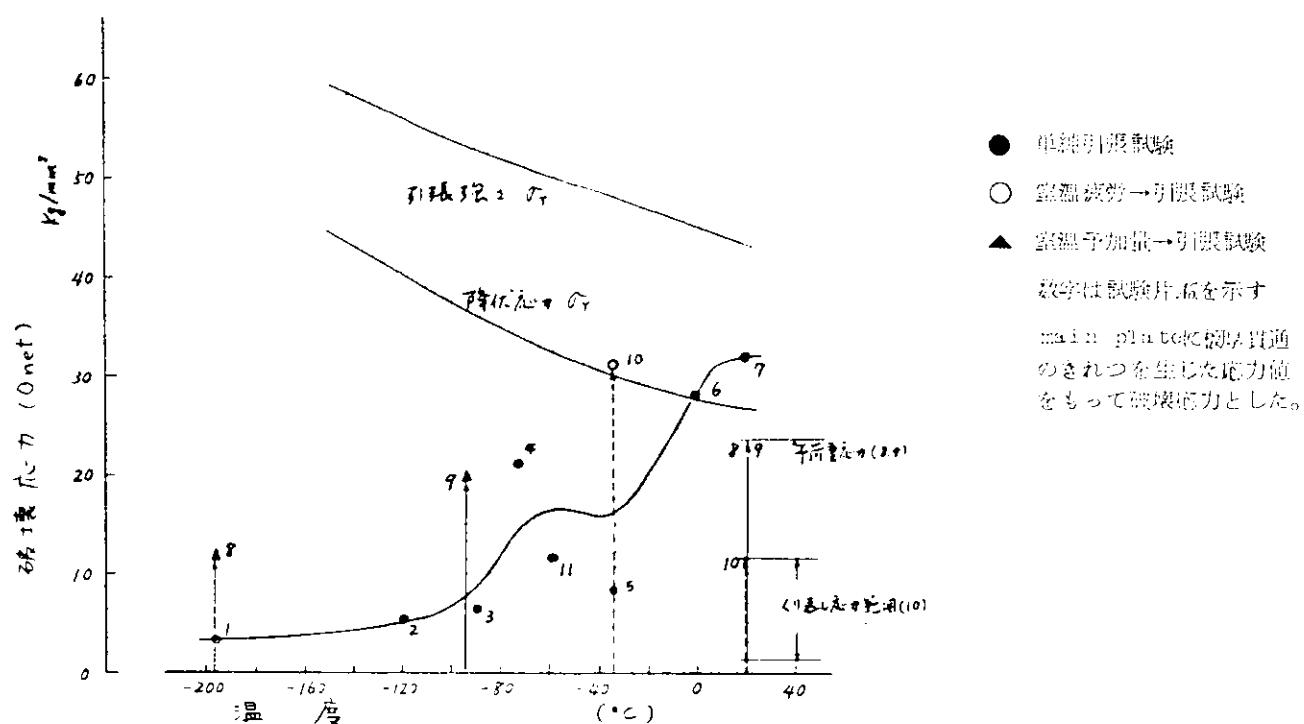


図 2.1. d 7 拘束引張試験 (B 3.8)

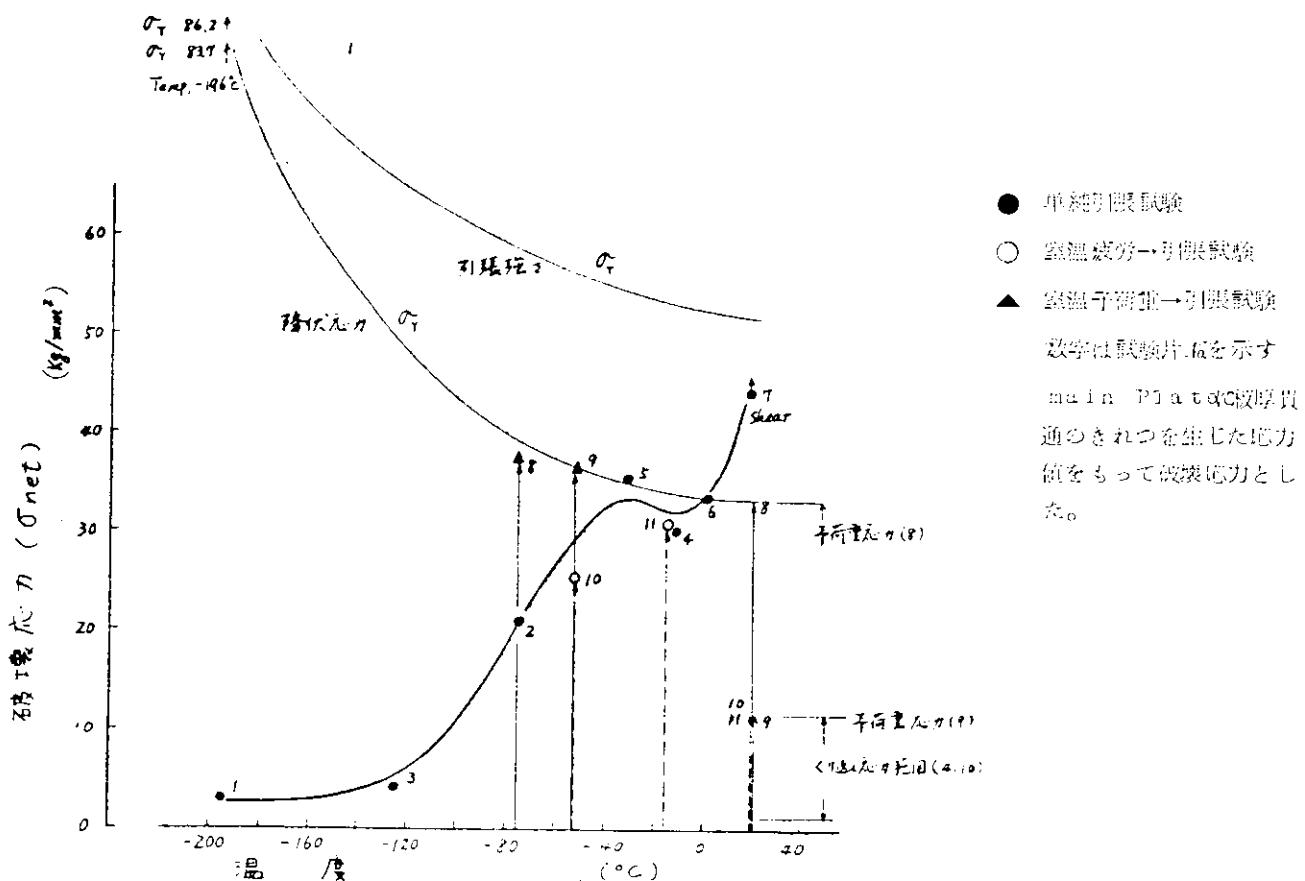


図 2.1. d 8 拘束引張試験 (B 3.6)

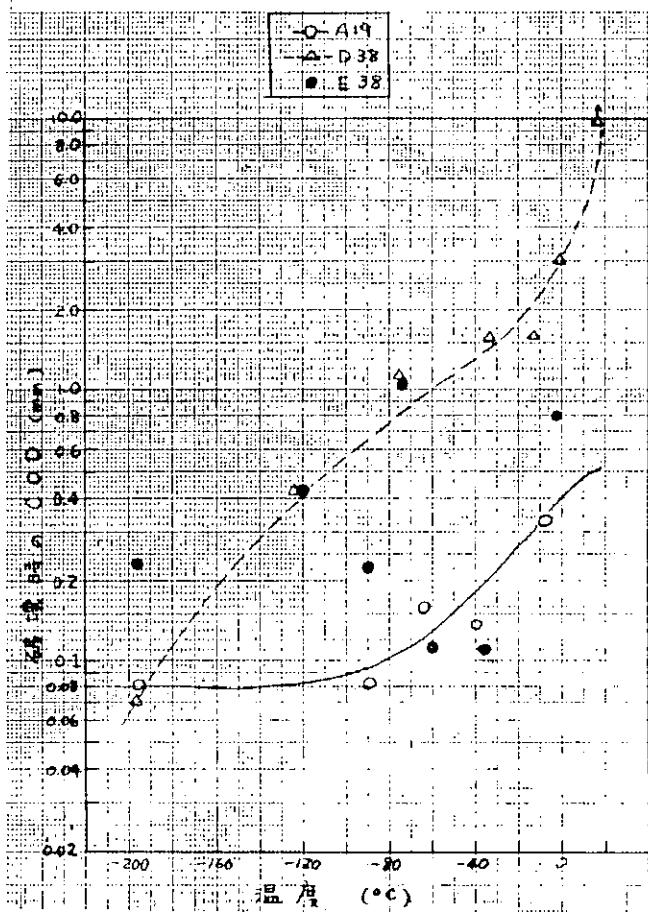


図 2.1.d.9 拘束引張試験破壊時の C.O.R の温度依存性

者の破壊応力の温度依存性をまとめて示す。

破壊応力をみると各供試材とも拘束引張試験の方がディープノッチに比べてはるかに低い応力で破壊している。溶接構造物モデルとしての拘束引張試験片の構造的不連続と溶接残留応力の重畳を溶接ビード付ディープノッチ試験片が構造的には表わしているはずであるが、拘束引張の低応力破壊がこれらの影響だけではないことを両者の差が示している。おそらく三次元的効果すなわち拘束度の影響であろうと思われる。また拘束引張の単純破壊試験のはらつきが大きいが、これは試験片自体の溶接施工組立ての段階でのはらつきと特にり 38、E 38においては溶接ビードから亀裂が発生し素材に伝播していく形跡があることから溶接ビードの発生特性が試験結果に含まれてしまっているためとも考えられる。(いずれにせよ拘束引張試験のように極端に厳しい条件下では脆性破壊の遷移温度がかなり上昇することがわかる)。

室温で疲労荷載を与えた場合と一回の継返し荷重という意味で予荷重を加えた場合とでは実験が少ないあまり差はないようである。

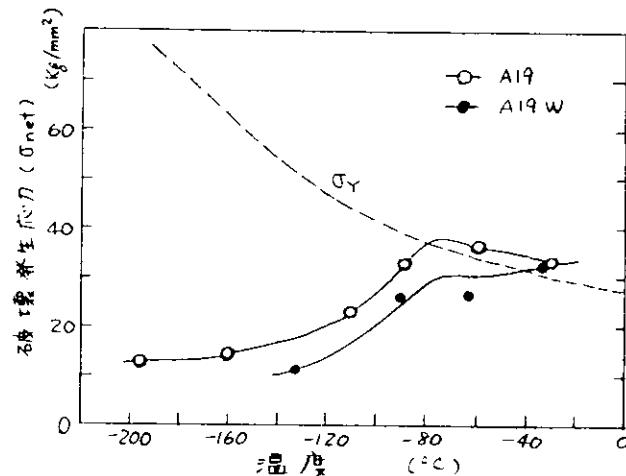


図 2.1.d.10 破壊発生応力の温度依存性
(ディープノッチ試験 A19)

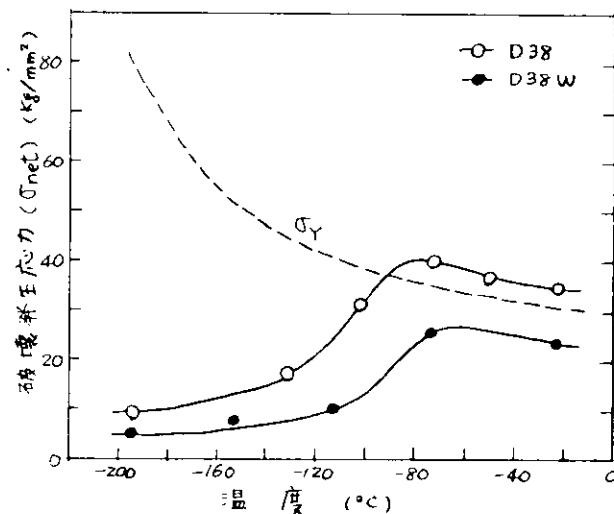


図 2.1.d.11 破壊発生応力の温度依存性
(ディープノッチ試験 D38)

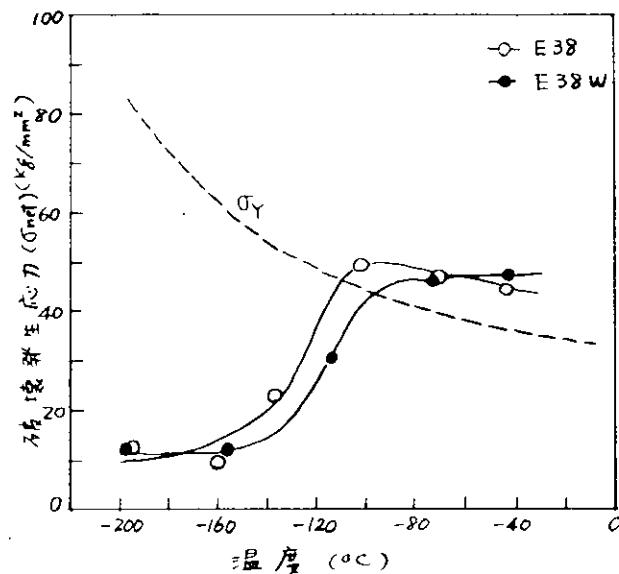


図 2.1.d.12 破壊発生応力の温度依存性
(ディープノッチ試験 E38)

平衡重試験において -19.6°C では平衡重のレベルまでもたずに破壊した例がある (A 19, D 38) が、この事実は注目に値しよう。

2.1.e 疲労蓄積材の脆性破壊発生特性

(1) 研究目的

疲労蓄積が脆性破壊発生特性に与える影響を C O D 説の立場から調べるために疲労蓄積材のダブルノッチ試験を行ない、素材のダブルノッチ試験と比較する。

(2) 供試材および試験片

供試材としては日本海事協会規格の造船用軟鋼 D 級鋼 3.8 mm 厚 (材質符号を D 3.8 とする) を用いる。供試材のミルシートによる化学成分および機械的性質は表 2.1.e.1 に示すとおりである。

ダブルノッチ試験片の形状寸法は図 2.1.e.1 に示すとおりである。疲労蓄積材についてはまず図 2.1.e.2 に示す形状寸法の試験片で所定の疲労蓄積をした後、その試験片から図 2.1.e.1 のダブルノッチ試験片を 2 本切出し脆性破壊試験を行なつた。

(3) 試験内容および方法

・疲労蓄積

疲労蓄積は繰返し数 $n = 1$ およびそれに対応するひずみを所定の応力で何回か繰返して与えた。 $n = 1$ の

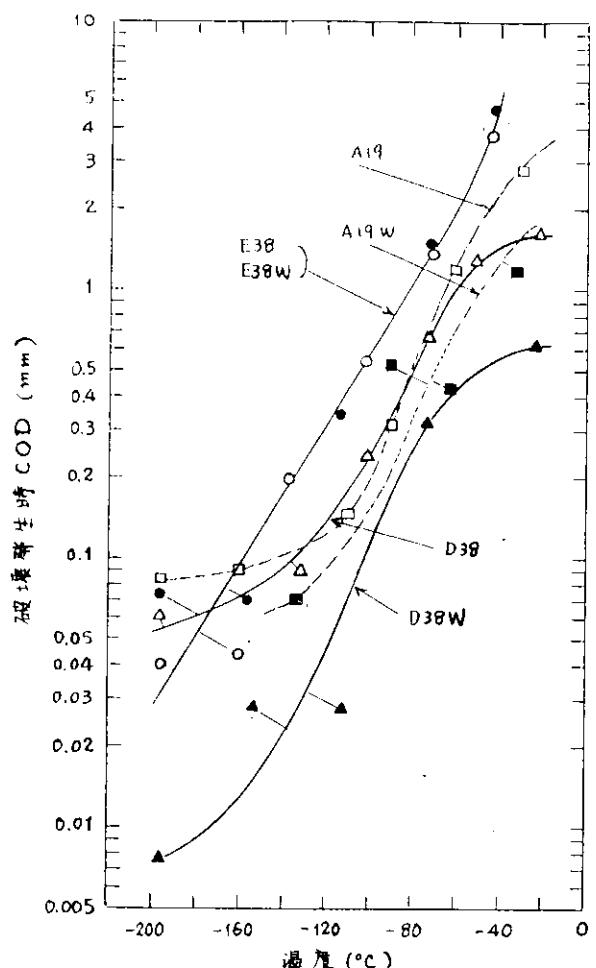


図 2.1.e.1.3 破壊発生時 C O D の温度依存性
(ディーゼルノッチ試験)

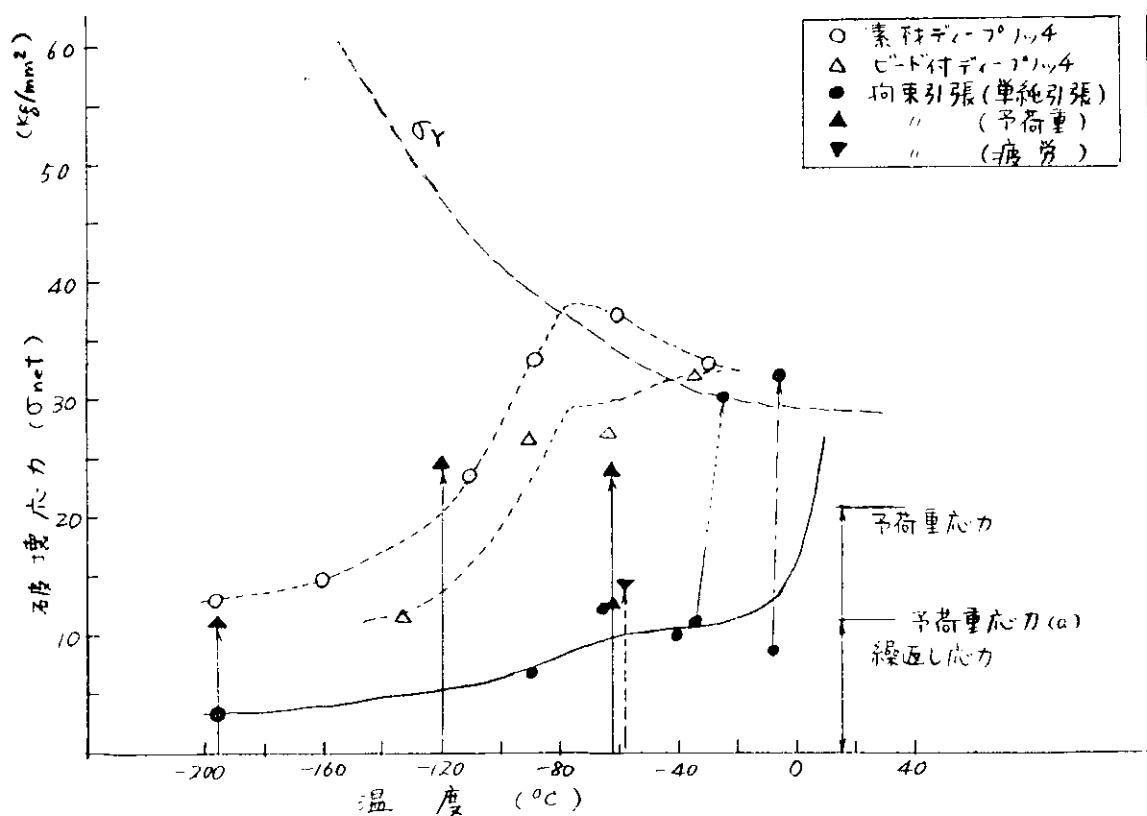


図 2.1.e.1.4 破壊応力の温度依存性 (A 19)

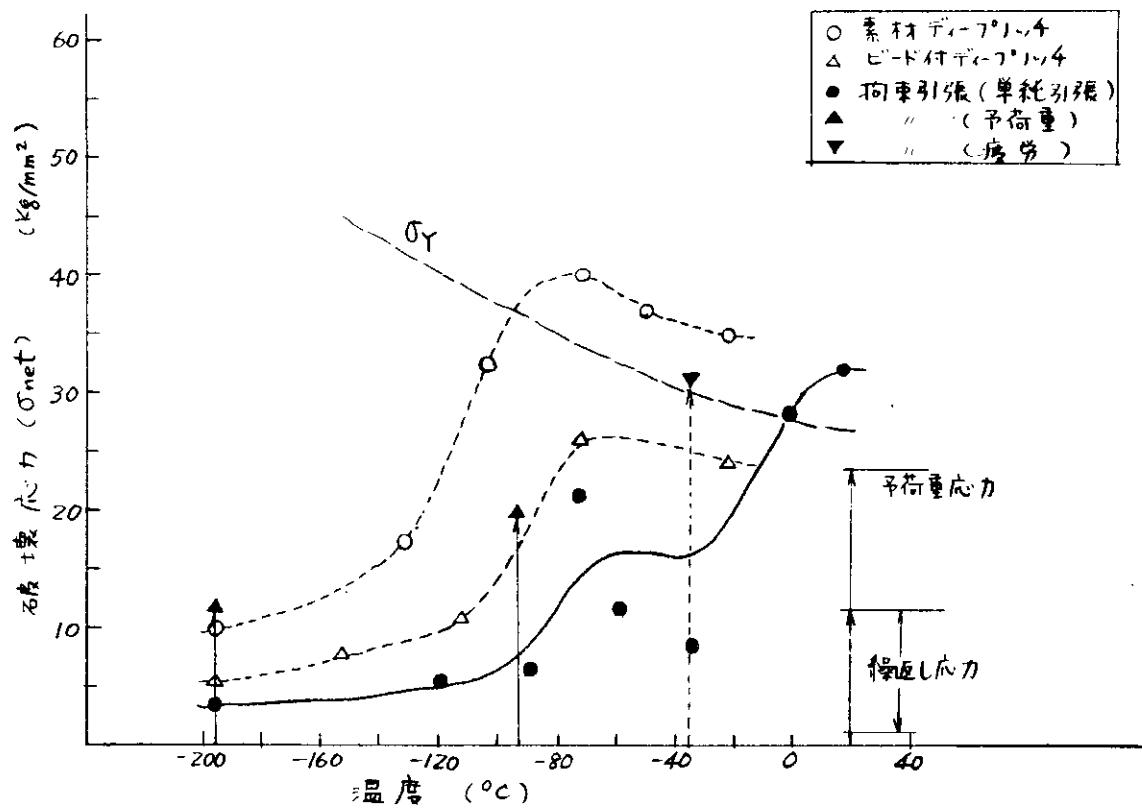


図 2.1.d 1.5 破壊応力の温度依存性 (D 3.8)

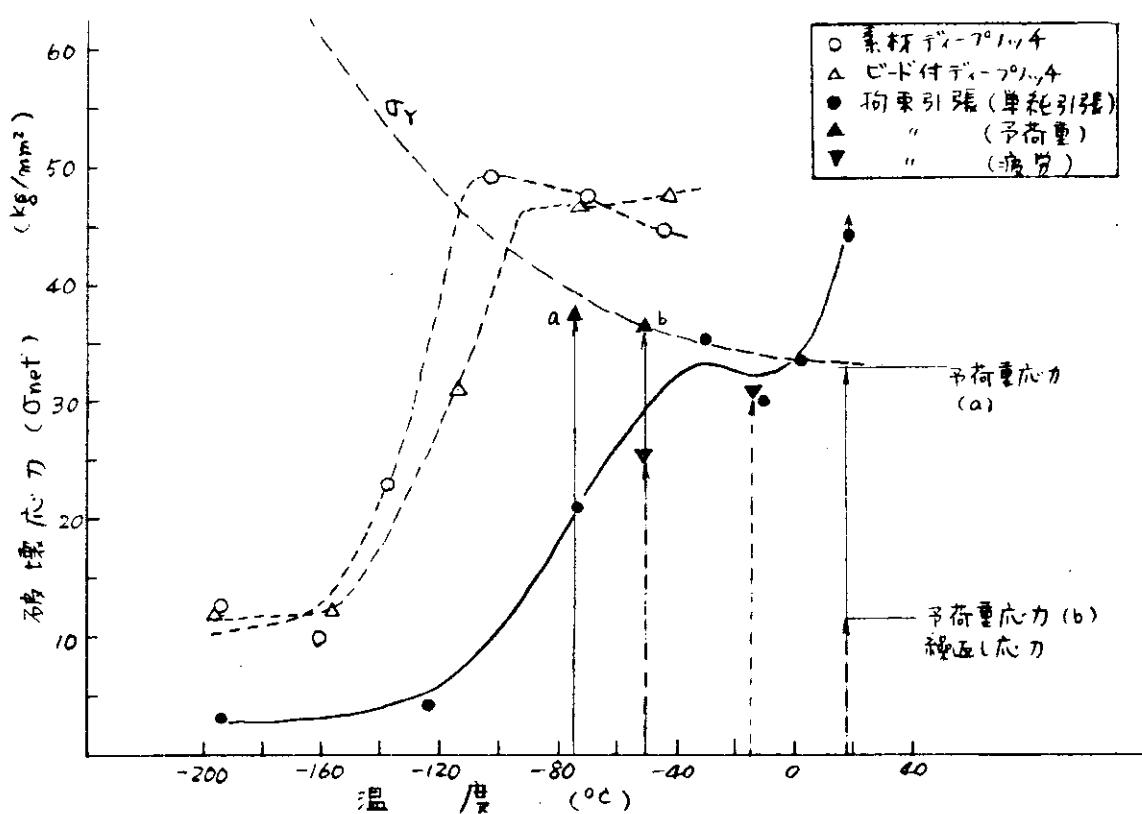


図 2.1.d 1.6 破壊応力の温度依存性 (E 3.8)

表2.1.e.1 供試材の化学成分および機械的性質

符号	銅種	板厚 (mm)	化 学 成 分 (%)					機 械 的 性 質		
			C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1,000	S ×1,000	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%) G.L.=200mm
D38	D級	3.8	1.5	1.5	6.2	1.4	0.8	3.0	4.4	3.3

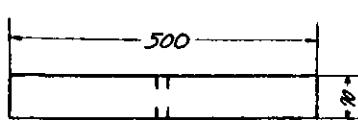


図2.1.e.1 ダブルノッチ試験片

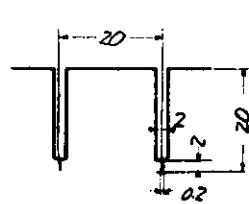


図2.1.e.2 疲労蓄積用試験片

ときの応力レベルはミルシートによる降伏点と引張強さの中間の応力として3.5 kg/mm²、3.7.2 kg/mm²および4.3 kg/mm²とした。応力レベル3.5 kg/mm²、3.7.2 kg/mm²のものについては図2.1.e.1に示すダブルノッチ試験片と同形状の短冊で予ひずみを与え、その後のノッチ加工を施した。また応力レベル4.3 kg/mm²については図2.1.e.2に示す試験片で疲労蓄積した。

疲労材は応力レベルを3.5 kg/mm²および4.0 kg/mm²とし、繰返し数はそれぞれn=1の場合の3.7.5 kg/mm²、4.3 kg/mm²によるひずみを最終的に与えるまでの回数とした。なお1回目繰返しによるひずみはそれぞれ約4.4%、8.0%であつた。

表2.1.e.2 応力レベル、繰返数、試験片に蓄積したひずみを示す。

表2.1.e.2 疲労蓄積条件

試験片	応力 (kg/mm ²)	繰返数	ひずみ (%)	試験片	応力 (kg/mm ²)	繰返数	ひずみ (%)
D38F1-1	3.5.0	1	4.5	D38F3-1.2	4.3.0	1	10.5
	"	"	4.4		3.4	"	12.4
	"	"	4.3				
	"	"	4.4	D38F4-1.2	4.3.0	1	13.0
	"	"	4.2				
	"	"	4.4		3.5.0	30	5.5
	"	"	4.4		3.4	"	"
	"	"	4.2		5.6	"	"
D38F2-1	3.7.2	1	6.0	D38F6-1.2	4.0.0	40	11.8
	"	"	5.7		3.4	15	11.0
	"	"	6.0		5.6	"	20
	"	"	5.9				
	"	"	5.8				
	"	"	5.7				
	"	"	5.5				
	"	"	5.4				

○ダブルノッチ試験

ダブルノッチ法により、切欠先端の COD を直接測定した。試験温度は切欠底部に " thumb nail " が認められる温度から低応力破壊を起こす温度までの間とした。

疲労蓄積のために疲労材のダブルノッチ試験片の板厚および試験片幅は素材のものより若干小さくなっている。

(4) 試験結果および考察

素材および $n = 1$ の疲労材の丸棒引張試験結果を図 2.1.e.3 に温度と降伏点の関係として示す。

表 2.1.e.3 に試験結果を一括して示す。破壊発生応力と試験温度の関係を素材および $n = 1$ の疲労材を一括して図 2.1.e.4 に示す。また繰返し応力によりひずみを与えたものについては最終ひずみ約 5.6 % の場合を図 2.1.e.5 に約 11.0 % のものを図 2.1.e.6 にそれぞれ素材および $n = 1$ を比較して示す。

破壊発生時 COD と温度の関係は図 2.1.e.7 に素材および $n = 1$ の疲労材をまとめて示す。また繰返し応力で最終ひずみ 5.6 % を与えた場合を図 2.1.e.8 に、約 11.0 % の場合を図 2.1.e.9 に素材および $n = 1$ のものを比較して示す。

表 2.1.e.3(a) 試験結果(その1)

試験片	温 度 °C	試験片幅 mm	板 厚 mm	応 力 kg/mm^2		破壊発生時 COD mm	破 面
				グロス	ネット		
D38-1	-30	7.0	3.8	22.7	53.1	1.420	S → B
	-2	"	"	23.4	54.6	0.959	"
	-3	"	"	22.7	53.1	0.701	"
	-4	"	"	21.3	49.7	0.195	B
	-5	"	"	22.1	51.7	0.129	"
	-6	"	"	23.6	55.1	0.051	"
	-7	"	"	24.7	57.5	(0.062) 0.092	"
	-8	"	"	22.8	53.2	(0.041) 0.065	"
	-9	"	"	4.8	11.1	(0.00103)	"
D38#-1	-30	6.85	3.69	25.2	60.7	1.494	S → B
	-2	"	3.70	25.9	62.3	1.251	"
	-3	"	"	25.8	61.9	0.332	B
	-4	6.86	3.72	26.3	63.2	0.063	"
	-5	6.83	3.70	26.5	64.1	0.057	"
	-6	6.85	"	28.0	67.3	"	"
	-7	6.88	"	19.8	47.4	(0.032)	"
	-8	"	"	15.8	37.6	(0.016)	"
D38F2-1	-30	6.79	3.67	25.5	62.1	1.177	S → B
	-2	6.80	3.66	26.3	63.9	0.694	B
	-3	6.79	3.67	27.3	66.5	0.363	"
	-4	6.83	"	28.1	67.9	0.069	"
	-5	6.85	3.68	27.6	66.4	0.033	"
	-6	6.84	3.67	21.4	51.4	(0.036)	"
	-7	6.86	3.67	17.4	41.9	(0.021)	"
	-8	"	3.69	24.3	58.3	(0.046)	"

COD () 内は計算値

表2.1.e.3(b) 試験結果(その2)

試験片	温度 °C	試験片幅 mm	板厚 mm	応力 kg/mm ²		破壊発生時 COD 級	破面
				クロス	ネット		
D38F3-1	-30	68.5	3.6.0	27.8	67.3	0.698	B
	-2	69.0	3.7.5	28.0	67.9	0.290	"
	-3	68.5	3.6.0	21.2	51.4	(0.032)	"
	-4	69.0	3.7.5	13.0	31.4	(0.010)	"
D38F4-1	-47	67.2	3.5.5	28.3	67.9	0.116	B
	-2	"	"	9.4	23.1	(0.0057)	"
D38F5-1	-40	70.2	3.6.6	26.2	61.0	0.828	B
	-2	69.9	3.6.7	26.9	62.8	0.299	"
	-3	70.2	"	27.1	62.9	0.079	"
	-4	70.2	3.6.6	27.2	63.1	0.085	"
	-5	70.1	3.6.7	26.5	61.6	(0.063) 0.042	"
	-6	70.0	3.6.9	10.8	25.2	(0.0073)	"
D38F6-1	-30	68.4	3.5.6	27.1	65.3	0.757	B
	-2	"	3.5.5	27.8	67.0	0.558	"
	-3	68.2	3.5.6	13.5	52.6	(0.013)	"
	-4	"	3.5.8	21.2	51.2	(0.033)	"
	-5	68.5	3.5.6	16.5	39.7	(0.018)	"
	-6	68.4	3.5.8	16.4	37.1	(0.015)	"

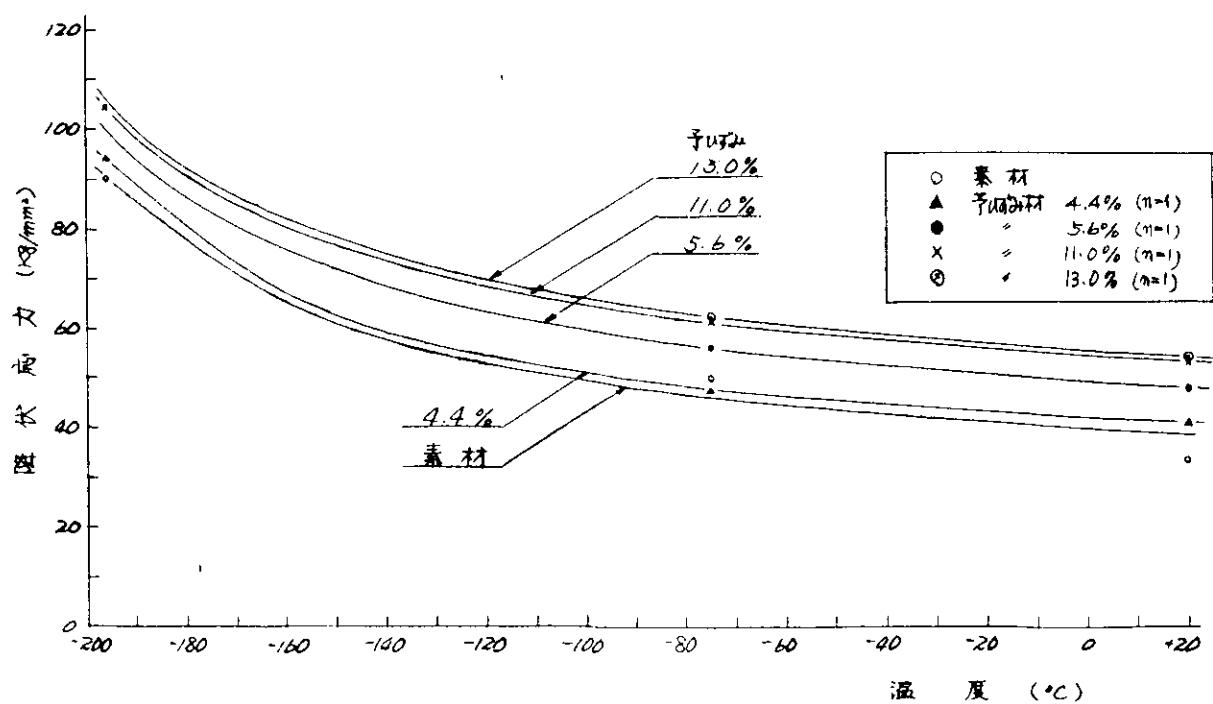


図2.1.e.3 素材および予ひずみ材の降伏応力の温度依存性

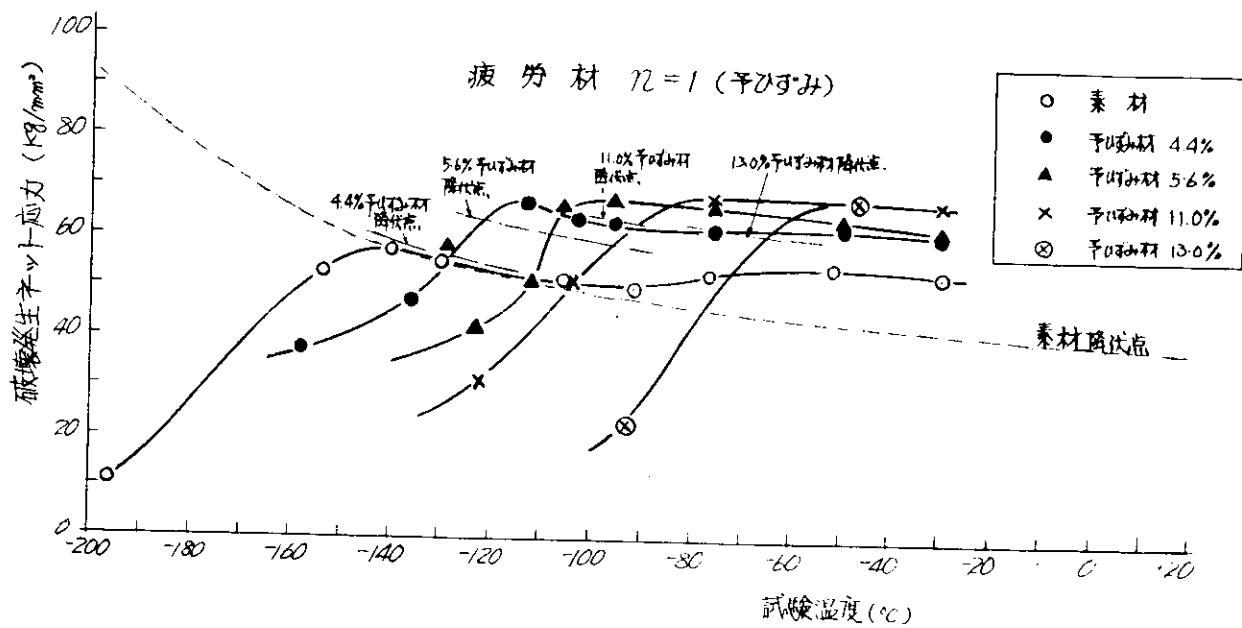


図 2.1.e 4 破壊発生ネット応力の温度依存性(疲労材 $n=1$)

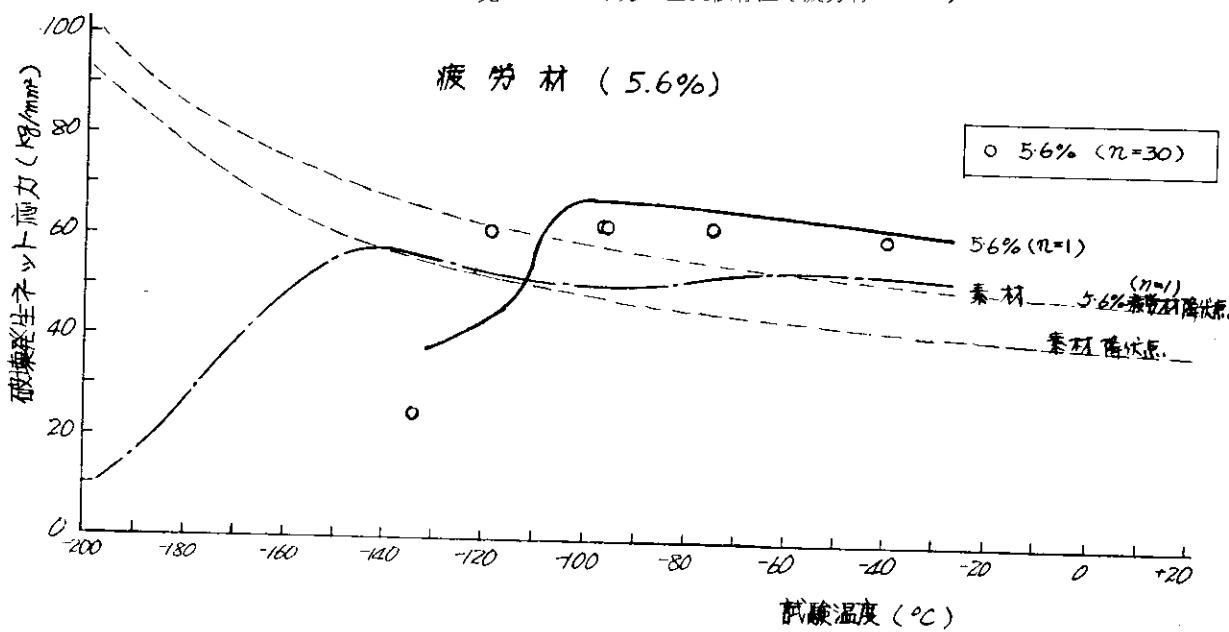


図 2.1.e 5 破壊発生ネット応力の温度依存性(疲労材 5.6 %)

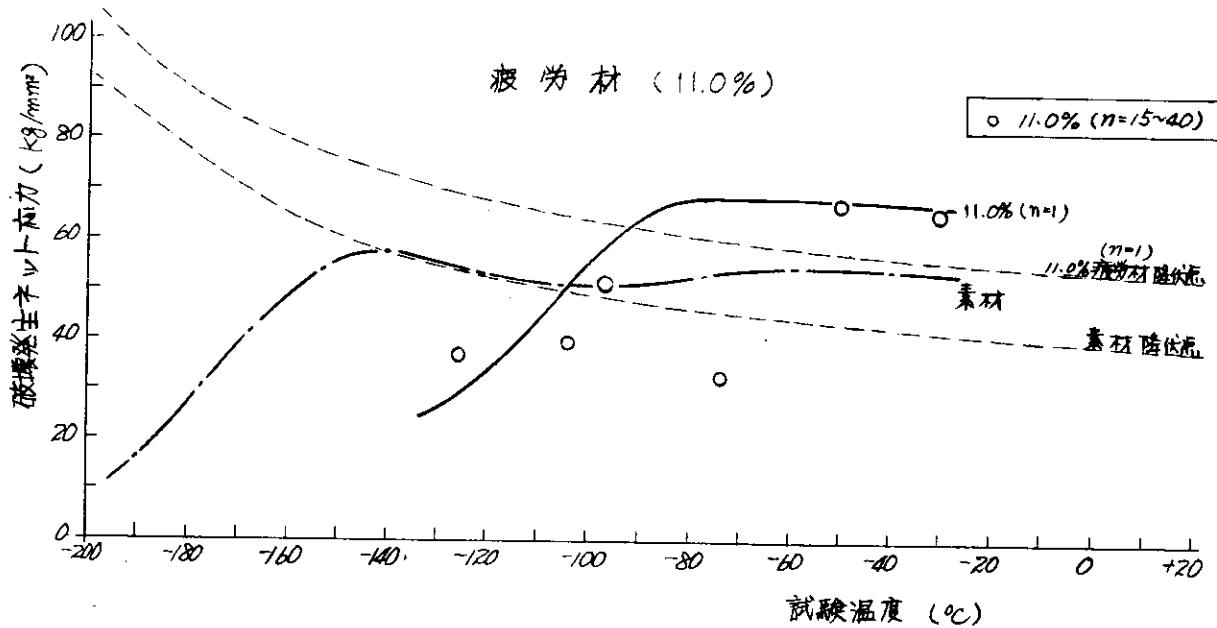


図 2.1.e 6 破壊発生ネット応力の温度依存性(疲労材 11.0 %)

破壊発生応力が全温度降伏を起こす場合は、素材より疲労材の方が高くなっているが、低応力破壊を起こすと逆に素材の破壊強度が大きくなる。また低応力破壊になる温度性蓄積されるひずみが大きくなるにつれ高温側に移り、素材の場合 -140°Cあたりで低応力破壊が発生するのに對し、約1±5%のひずみが蓄積されると温度は -70°C位まで上昇する。

$n = 1$ の場合と繰返し応力による場合を比較すると、繰返し応力による場合の方がわずかに破壊強度は小さくなる傾向にあるが、両者の差はほとんどない。すなわち繰返し応力の最初の一回目による応力でダメージが大部分かせがれてしまうようと思われる。

また一般に破壊発生時 COD は素材の方が疲労材より大きい。確かに充分低温側では図 2.1.e.4 より疲労材の強度は素材より弱くなつてゐる。しかし、疲労材(予ひずみ材)による降伏点の上界を考慮すれば、一般に疲労材は全温度領域にわたつて破壊発生応力が小さくなるとはいえない。

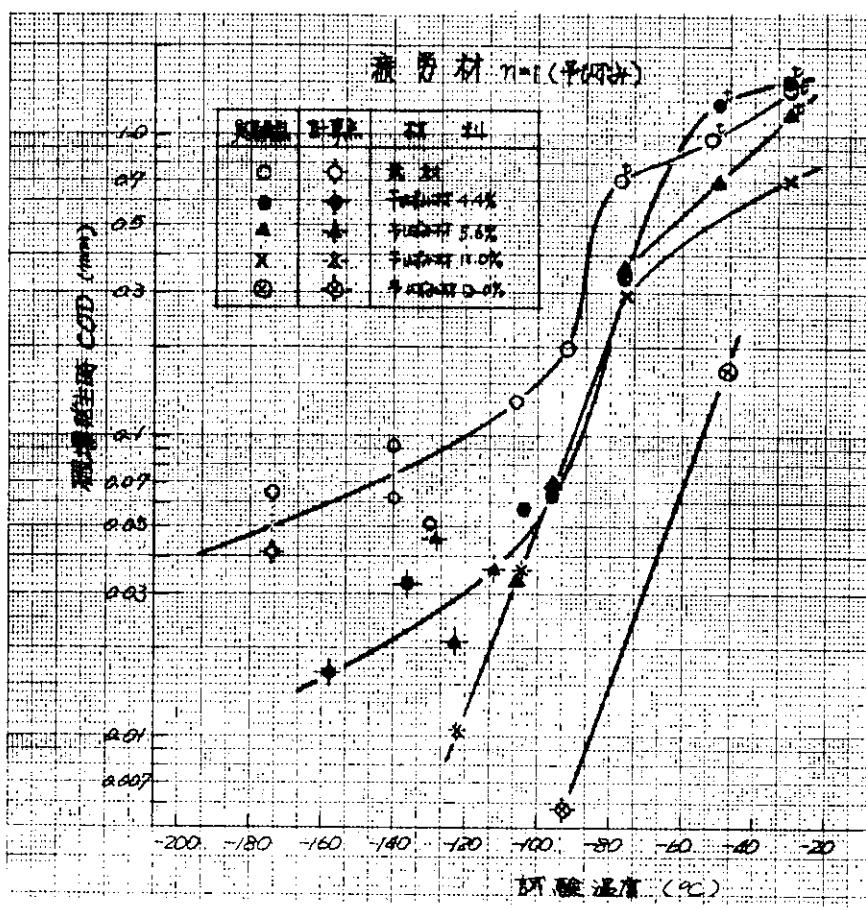


図 2.1.e.7 破壊発生時 COD の温度依存性(予ひずみ材 $n = 1$)

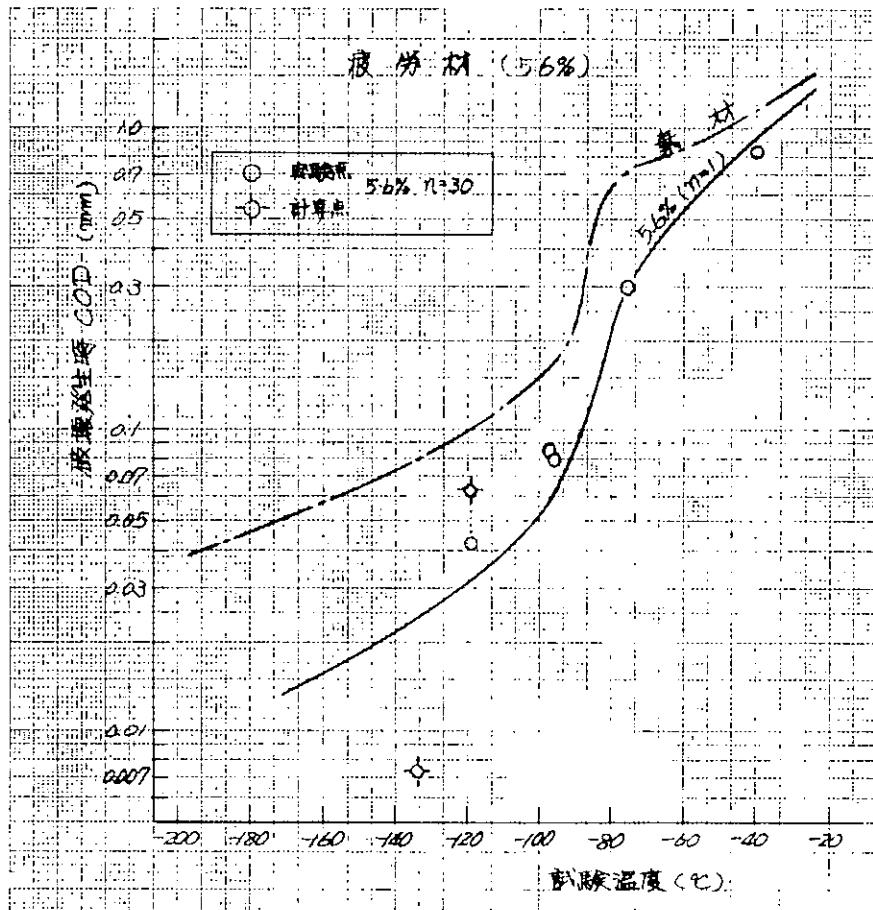


図 2.1.e.8 破壊発生時 COD の温度依存性 (疲労材 5.6 %)

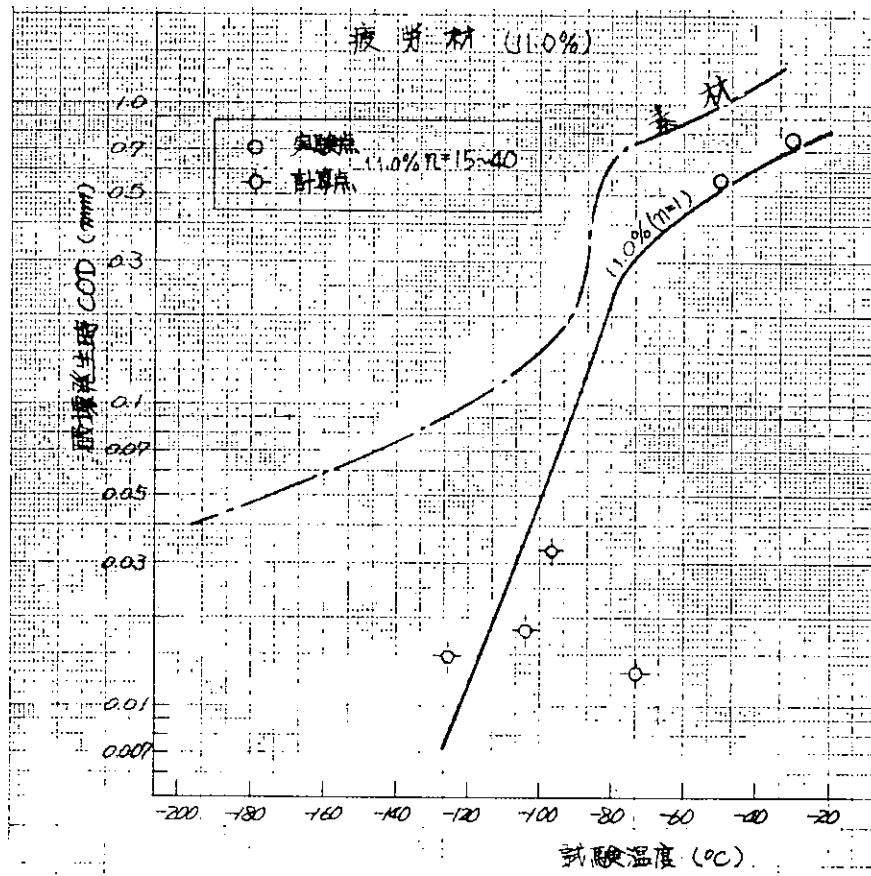


図 2.1.e.9 破壊発生時 COD の温度依存性 (疲労材 11.0 %)

2.2 脆性破壊の伝播停止

2.2.a 素材の脆性破壊伝播停止特性-1

(1) 研究目的

素材の脆性破壊伝播停止特性を標準温度勾配型 E S S O 試験でしらべる。

(2) 供試材および試験片

供試材として日本海事協会規格の板厚 1.9 mm の D 級鋼 (記号 1.9 D) やよび 3.8 mm の E 級鋼 (3.8 E) をもついた。

供試材の化学成分と機械的性質を表 2.1.a.1 に示す。

試験片は幅 40.0 mm 、長さ 50.0 mm の標準型 E S S O 試験片で、図 2.2.a.1 に形状寸法を示す。

(3) 試験内容および方法

試験片の亀裂発生側（切欠部）を低温に冷却し、反対側を高温にして試験片に温度勾配をつける。所定の温度分布にて一定時間保持したのち試験片に所定の引張応力を加え、切欠に打撃装置により楔を打込み脆性亀裂を発生伝播させる。亀裂が高温側に伝播し、限界停止温度の位置にたつると亀裂は停止する。このときの停止までの亀裂伝播距離（停止亀裂長さ）と限界停止温度を計測し、作用応力との関係をもとめる。

(4) 試験結果および考察

温度勾配型 E S S O 試験の試験結果を表 2.2.a.1 に示す。応力と停止温度の関係を図 2.2.a.2 に示す。1.9 D を○印、3.8 E を●印、参考資料の 2.5 A を△印で示した。1.9 D と 3.8 E はほとんど差がない。

次に次式をもち、 K_c 値をもとめ絶対温度の逆数との関係を図 2.2.a.3 に示す。

$$K_c = f(\gamma) \sigma_g \sqrt{\pi \cdot C_a} \quad \dots \dots \dots \quad (2.2.a.1)$$

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

表 2.2.a.1 標準温度勾配型 E S S O 試験結果

試験片名	1.9 D-1	1.9 D-2	1.9 D-3	
荷重 (ton)	1.08	5.8	15.4	
応力 (σ_g 、kg/mm ²)	1.5	7.6	20.2	
停止亀裂長さ (C _a 、mm)	232	227	227	
$f(\gamma)$	1.19	1.18	1.18	
$f(\gamma) \cdot \sigma_g$ (kg/mm ²)	17.8	9.0	23.8	
停止温度 (T_a 、°C)	16.5	-1	20	
$1/T_a$ (°C ⁻¹)	3.45×10^{-3}	3.67×10^{-3}	3.41×10^{-3}	
K_c ($\frac{kg\sqrt{m}}{mm^2}$)	48.2	24.0	63.6	
試験片名	3.8 E-1	3.8 E-2	3.8 E-3	3.8 E-4
荷重 (ton)	2.78	12.3	23.1	32.0
応力 (σ_g 、kg/mm ²)	1.83	8.1	15.2	21
停止亀裂長さ (C _a 、mm)	272	267	228	236
$f(\gamma)$	1.52	1.16	1.18	1.2
$f(\gamma) \cdot \sigma_g$ (kg/mm ²)	23.2	9.0	17.9	25.2
停止温度 (T_a 、°C)	3.6	-2	1.3	1.9
$1/T_a$ (°C ⁻¹)	3.5×10^{-3}	3.69×10^{-3}	3.49×10^{-3}	3.42×10^{-3}
K_c ($\frac{kg\sqrt{m}}{mm^2}$)	71.7	25.0	47.6	63.6

$$r = \frac{C_a}{2b}$$

C_a = 停止亀裂長さ (mm)

$2b$ = 試験片幅 (mm)

両図から、 K_c の対数と絶対温度の逆数の直線関係を次式からもとめ、それぞれの材料定数を表2.1.a 2に示す。

$$K_c = K_0 e^{-k/T_K} \dots\dots (2.2.a 2)$$

ただし、 K_0 、 k は材料定数

次に(2.2.a 1)式および(2.2.a 2)式をもちいて
 $C = 1.0 \text{ mm}$ と $C = 1.00 \text{ mm}$ の場合の応力と停止温度の関係をもとめると図2.2.a 4に示すようになる。1.9
 リは降伏点の $\frac{1}{2}$ の応力レベル (1.5 Kg/mm^2) での停止
 温度は $C = 1.0 \text{ mm}$ (WES規格のG種) で -1.9°C 、
 $C = 1.00 \text{ mm}$ (WES-A種) で $+4^\circ\text{C}$ となり、3.8
 Eは降伏点の $\frac{1}{2}$ (1.8 Kg/mm^2) で $C = 1.0 \text{ mm}$ の場合、
 -1.7°C 、 $C = 1.00 \text{ mm}$ で $+7^\circ\text{C}$ である。

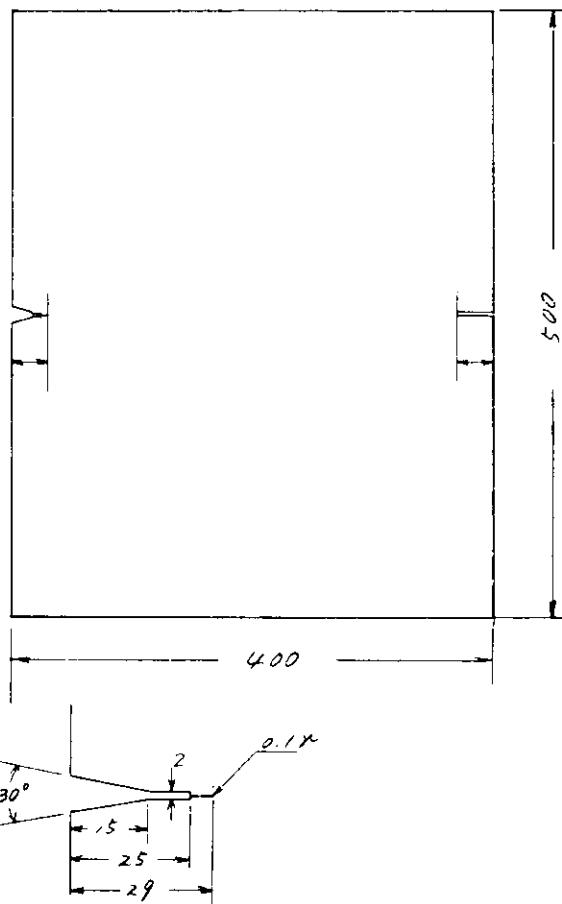


図2.2.a 1 標準温度勾配型ESSO試験片形状寸法

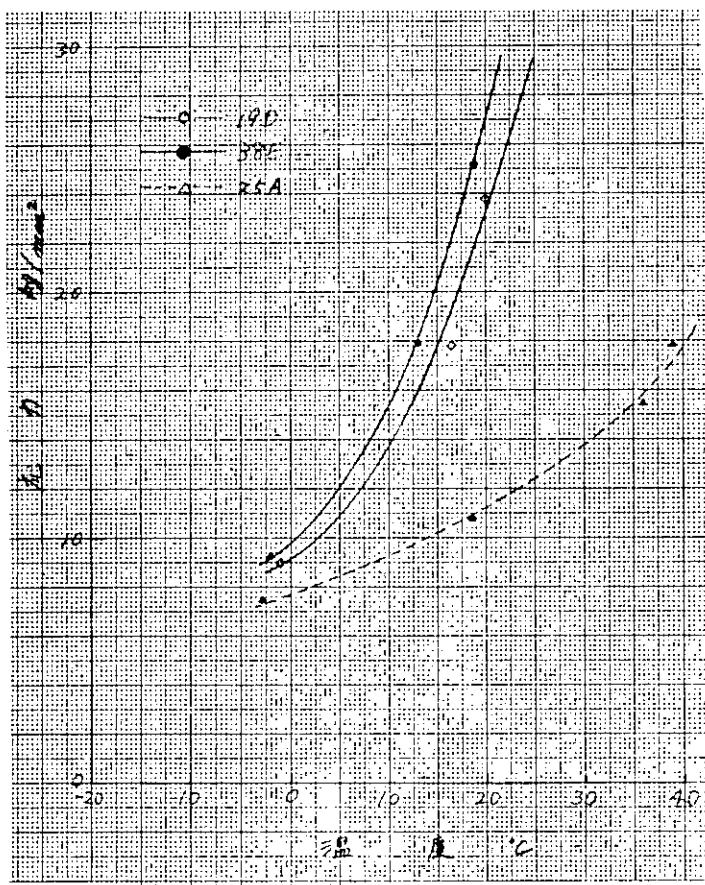


図2.2.a 2 標準温度勾配型ESSO試験の応力と停止温度の関係

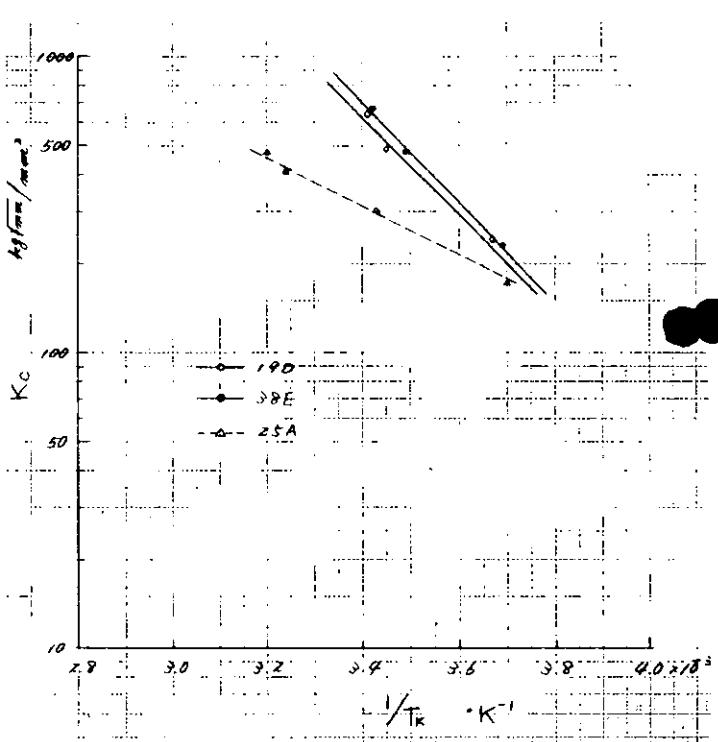


図2.2.a 3 標準温度勾配型ESSO試験の K_c 値と絶対温度の逆数の関係

2.2.b 素材の脆性破壊伝播停止特性-2

(1) 研究目的

突合せ溶接型クラックアレスターの脆性破壊伝播停止特性を大型クラックアレスター試験片でしらべる。

(2) 供試材および試験片

供試材にスタート板として19Aおよび38Dをアレスター板として19Dおよび38Eをもちいた。

試験片は幅および長さが1,300mmで、スタート板の幅が700mm、アレスター板の幅が600mmである。試験片は2種類準備し、19型はスタート板に19A、アレスター板に19Dをもちい38型はスタート板に38D、アレスター板に38Eをもちいた。試験片の形状寸法を図2.2.b.1に示す。スタート板とアレスター板の突合せ溶接は表2.2.b.1に示す開先形状と溶接条件をもつ、サブマージ溶接である。

(3) 試験内容および方法

試験片を一様に試験温度に冷却し、スタート板の亀裂発生側の切欠部を局部的に-60~-80°Cまで冷却する。試験片に引張応力を加えたのち、切欠に落重装置により楔を打込み脆性亀裂を発生伝播させる。発生した脆性亀裂はスタート板で充分に加速されアレスター板に突入する。試験温度がアレスター板の限界停止温度より高温であれば脆性亀裂はアレスター板にはいり、まもなく停止する。限界停止温度より低温であれば脆性亀裂はアレスター板を貫通する。試験温度を数種変化させ限界停止温度をもとめる。

(4) 試験結果および考察

大型クラックアレスター試験の試験結果を表2.2.b.2に示す。19型については(19-1)および(19-4)試験片は発生伝播した脆性亀裂がアレスター板人口あるいはアレ

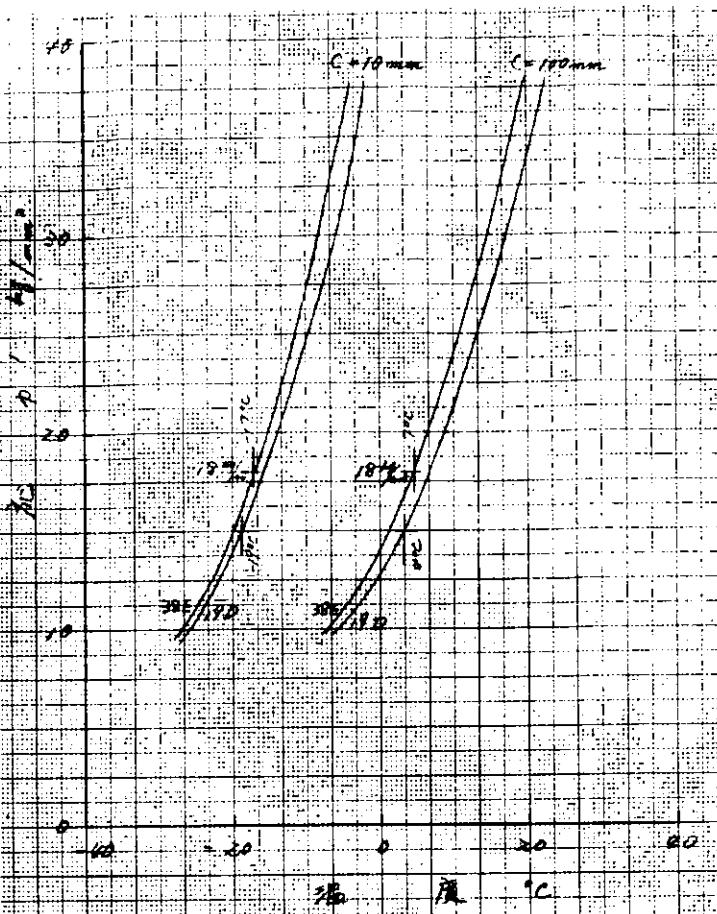


図2.2.a.4 応力と停止温度の関係

- (1) 19型(板厚19mm) A級鋼→D級鋼
- (2) 38型(板厚38mm) D級鋼→E級鋼

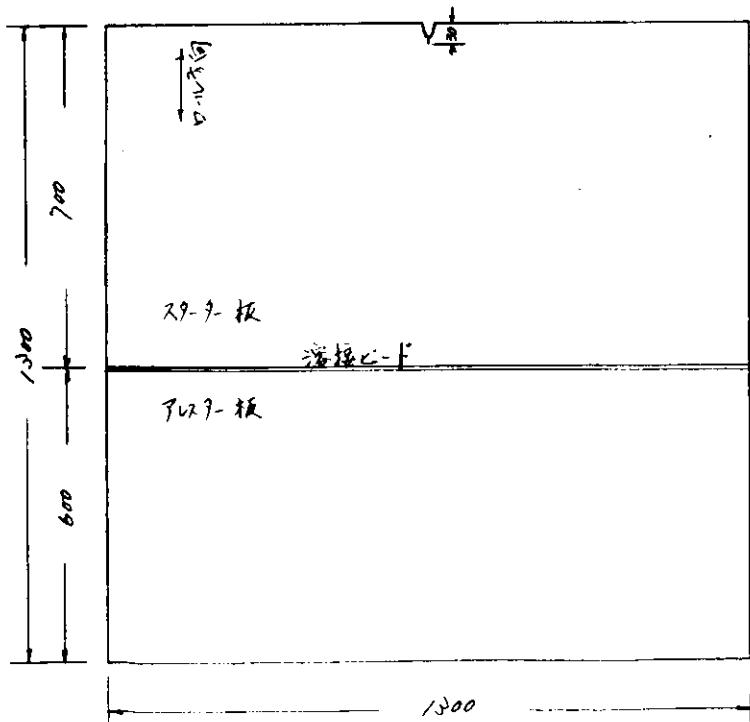


図2.2.b.1 大型クラックアレスター試験片形状寸法

スター板内で停止したが(19-2)試験片は1回目の試験で亀裂が3.93mm伝播してスタート板内で停止したので、再度亀裂端近傍を冷却し再試験したところ亀裂が1.042mm伝播して停止した。この場合停止亀裂長さが比較的長いことおよびこの近傍に突合せ溶接による強度残留能力がいちばん大きいところに耐熱残留応力による応力を集中する

あつた可能性があることの 2 点から破断したものと同等にあつかう。

3.8 型については、スタータ板の 3.8 型とアレスター板の 3.8 型の特性値に差がないためかアレスター材の停止温度に近いところで試験するとスタータ板内で停止して、再試験しても亀裂が再発生しなかつた（（3.8-2）および（3.8-3））。（3.8-4）試験片はスタータ板全体を低くし、アレスター板だけを -5 °C の一定温度に保つたところ、アレスター板内をかなり長い距離伝播して停止した。（3.8-1）および（3.8-4）試験片も 1.9 型についてのべたと同様の理由で破断したものとみなす。

図 2.2.b.2 に試験速度と修正クロス応力の関係をアレスター板入口で停止したもの、アレスター板内で停止したものお

表 2.2.b.2 クラックアレスター試験結果

試験片名	温 度 °C	一様断面応力 kg/mm ²	停止亀裂長さ mm	備 考
1.9-1	9	1.6	710	アレスター入口で停止
1.9-2	-10	8	C.F.	完全破断
1.9-3	-1	8	393	スタータ板内で停止
	-5	6.1 (8.7)	1042	切欠断面応力を初期条件にあわせ再試験、アレスター板内で停止（破断とみなす）
1.9-4	0	8	943	アレスター板内で停止
	0	8	185	スタータ板内で停止
3.8-1	-5 (9.3)			荷重は初期条件のままで再試験、亀裂進行せず
	-10	8 (9.3)	1105	同上再試験、アレスター板内で停止（破断とみなす）
3.8-2	0	8	374	スタータ板内で停止
	-4	7.7 (10.8)		再試験、亀裂進行せず
3.8-3	-10	8	400	スタータ板内で停止
	-15	5.7 (8.6)		再試験、亀裂進行せず
3.8-4	-5	9.1 (9.3)	1137	アレスター板内で停止（破断とみなす）

() : 切欠断面応力

より完全破断したと見なされるものに区別して示した。また図にはアレスター材の温度勾配型 E.S.S.O 試験結果から、（2.2.a.2）式と次式をもじいて停止亀裂長さ 700 mm (アレスター板入口) でのクラックアレスターの限界停止温度と応力の関係をもとめ実線で示した。

$$K_C = \sigma \sqrt{C_{eff}} \quad \dots \dots \dots \quad (2.2.b.1)$$

$$C_{eff} = 0.1 C + 1.90 \quad (mm)$$

$C = \text{クラックアレスターの停止危険長さ}$
(アレスター板入口、700 mm)

クラックアレスター試験でアレスター板入口で停止したものは19型の1点だけであるが、計算値との差は8°C程度である。

有効な実験点が少ないとよび計算値が安全側にあることから、クラックアレスターの限界停止温度を温度勾配型ESSO試験結果からの計算により推定すると8 kg/mm²の圧力レベルでは19型が0°C、38型が-2°Cになる。

図2.2.b3からクラックアレスター試験の温度分布、亀裂伝播経路および亀裂伝播速度の計測結果を示す。

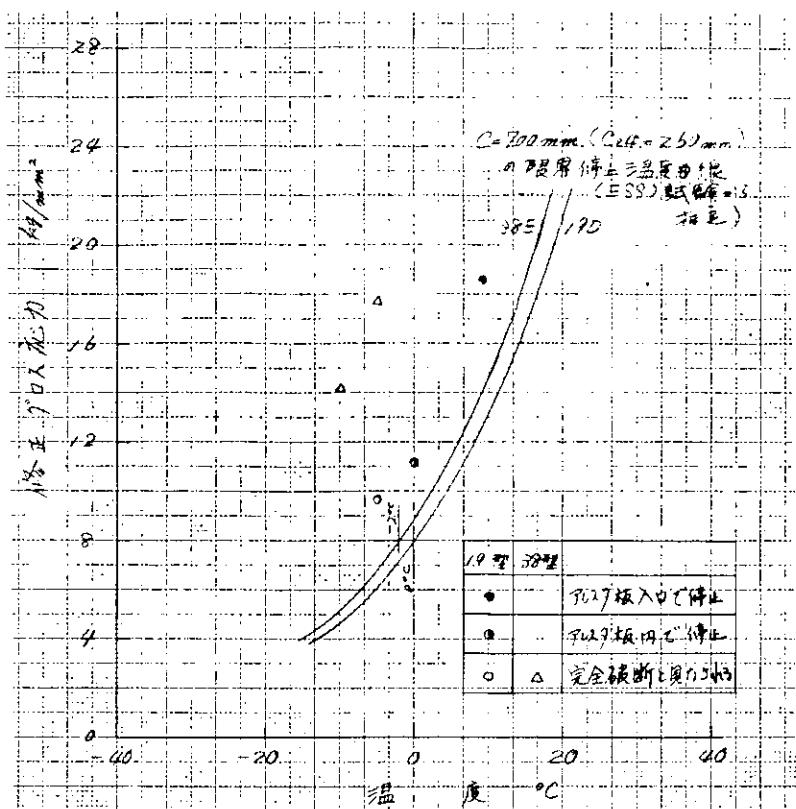


図2.2.b2 大型クラックアレスター試験試験結果

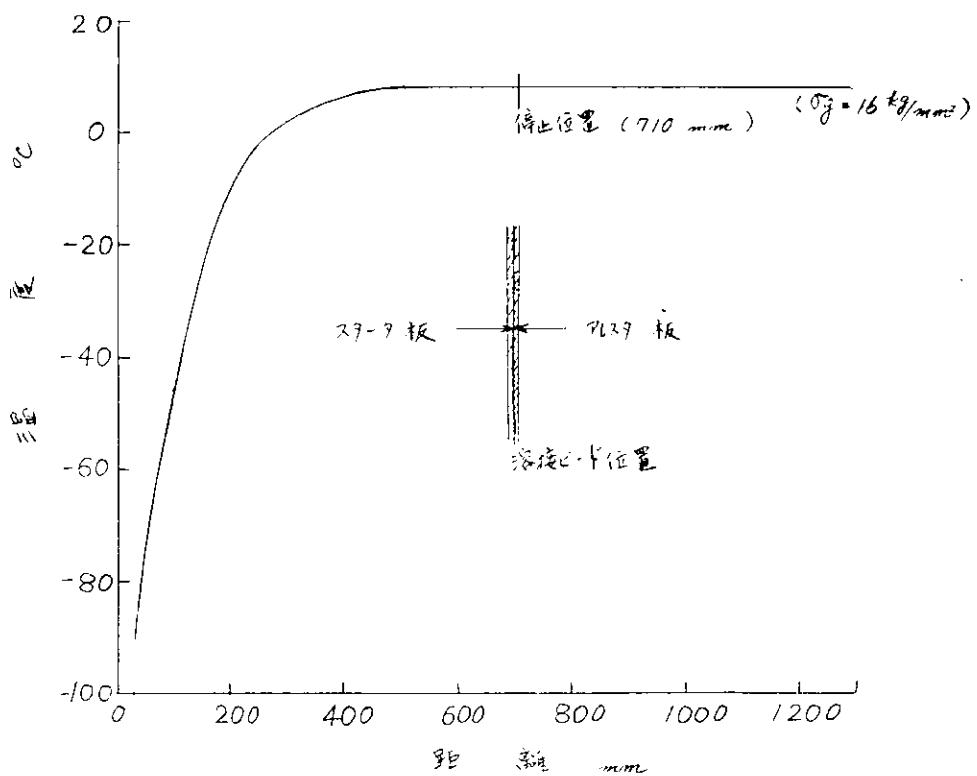


図2.2.b3 大型クラックアレスター試験温度分布(19-1)

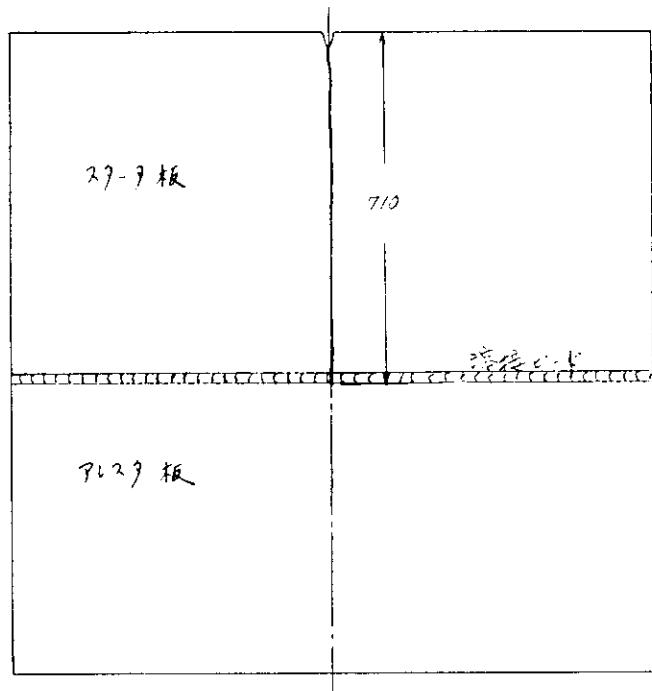


図 2.2.b 4 大型クラック アレスター亀裂伝播経路(19-1)

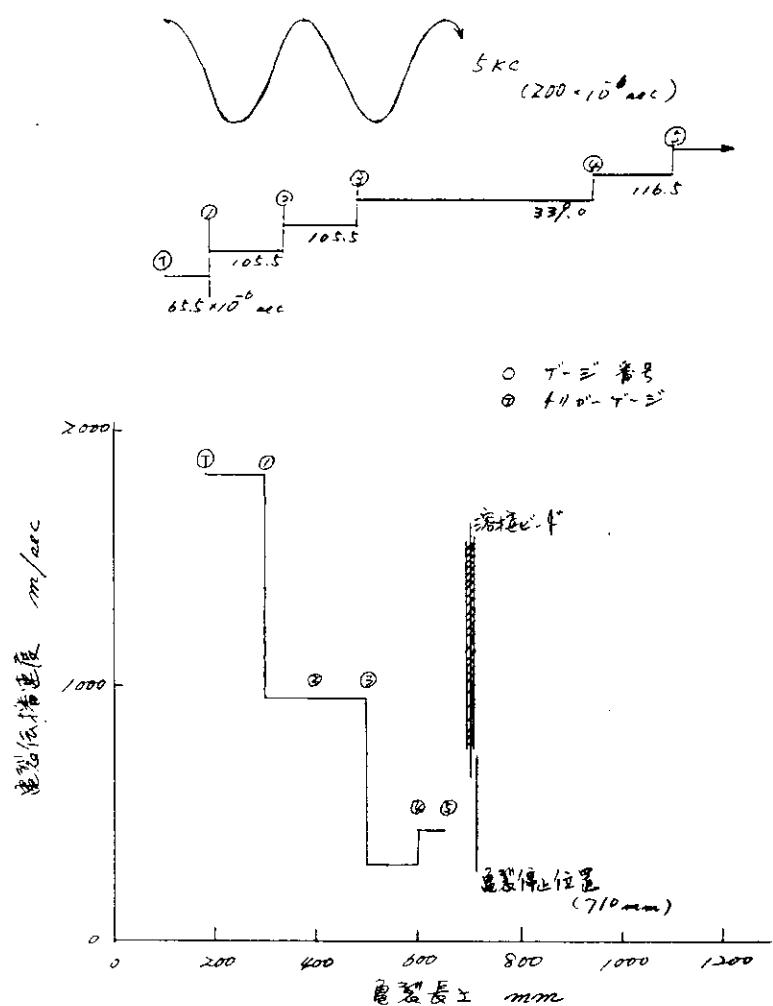


図 2.2.b 5 亀裂伝播速度測定結果(19-1)

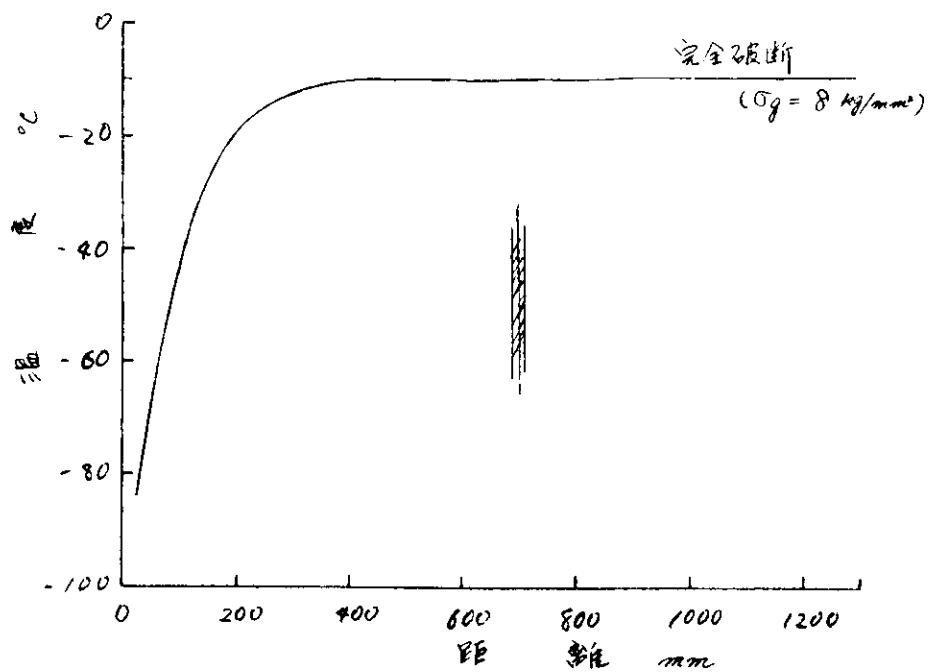


図 2.2.b 6 大型クラック アレスター試験温度分布(19--2)

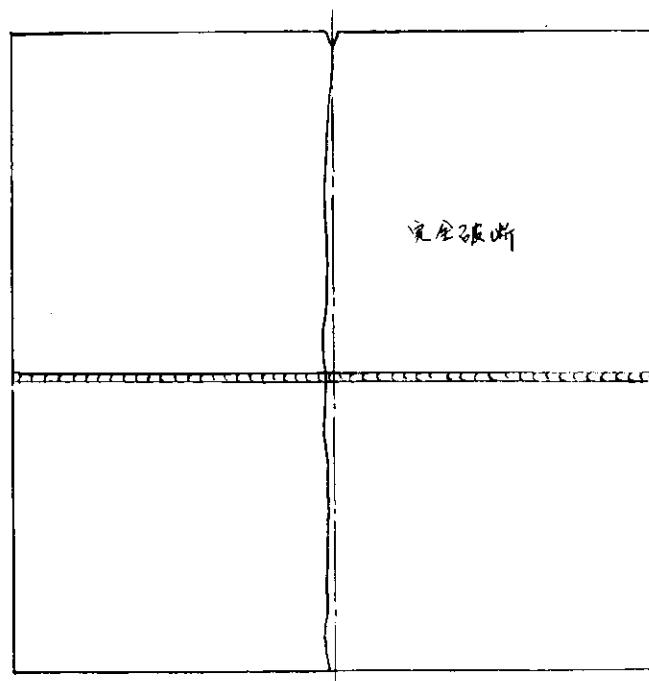


図 2.2.b 7 大型クラック アレスター亀裂伝播経路(19--2)

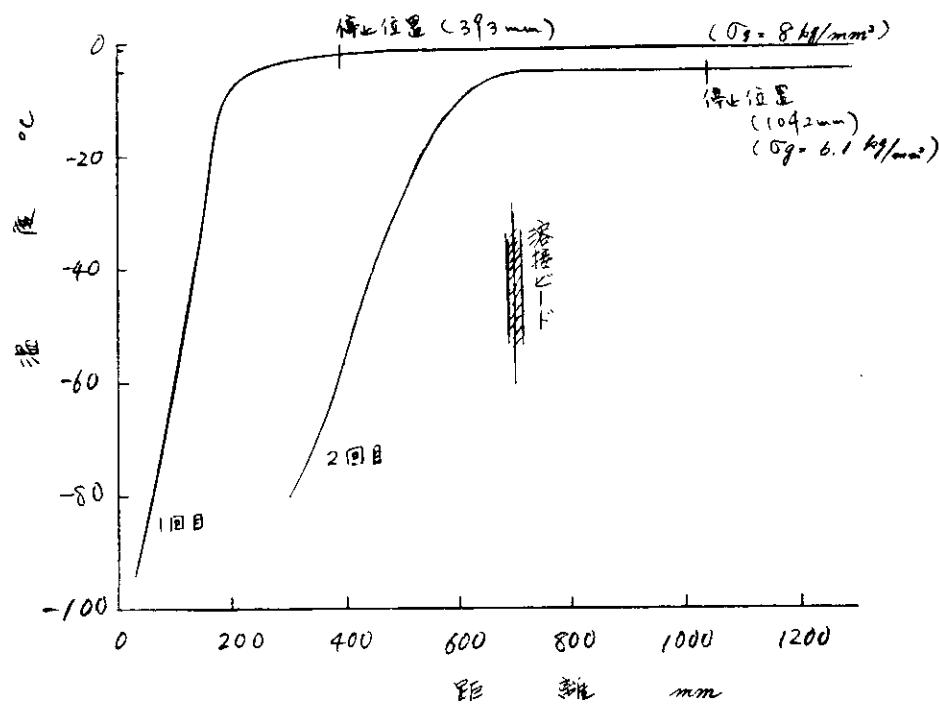


図 2.2.b 8 大型クラック アレスター試験温度分布(19-3)

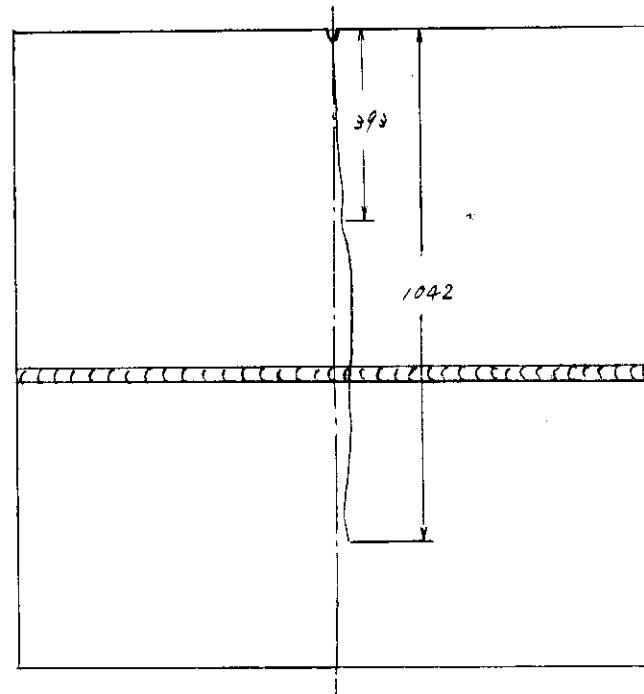


図 2.2.b 9 大型クラック アレスター亀裂伝播径路(19-3)

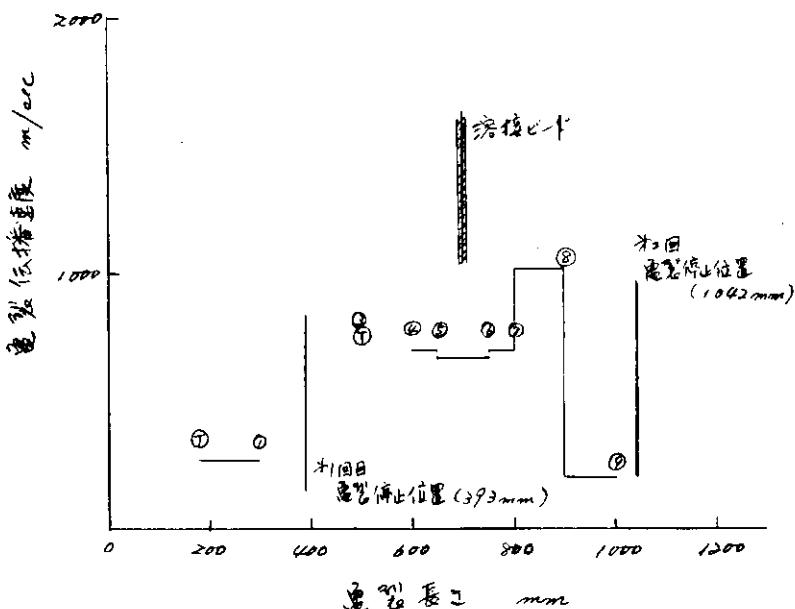
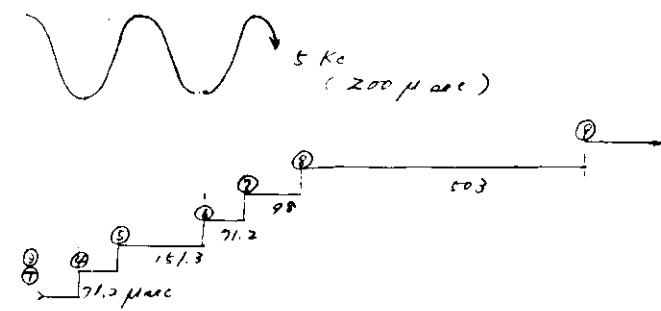


図 2.2. b 1 0 電気伝播速度測定結果(19-3)

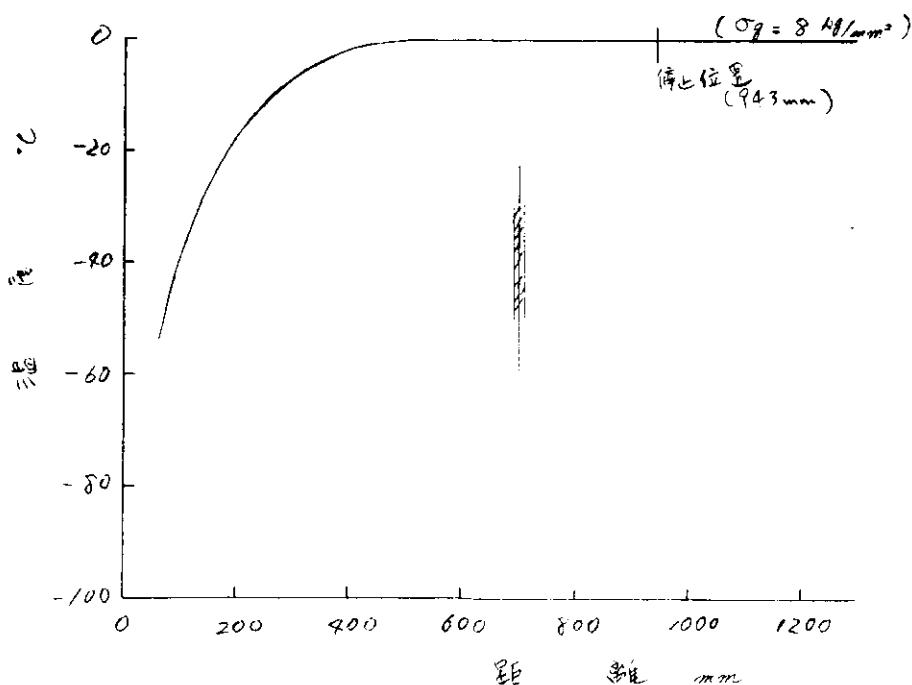


図 2.2. b 1 1 大型クラック アレスター試験温度分布(19-4)

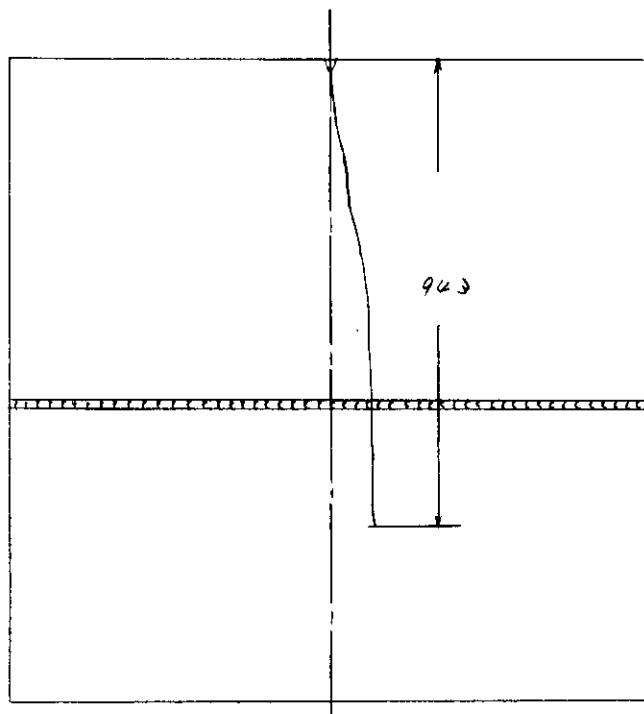


図 2.2.b 1.2 大型クラック アレスター伝播径路(19-4)

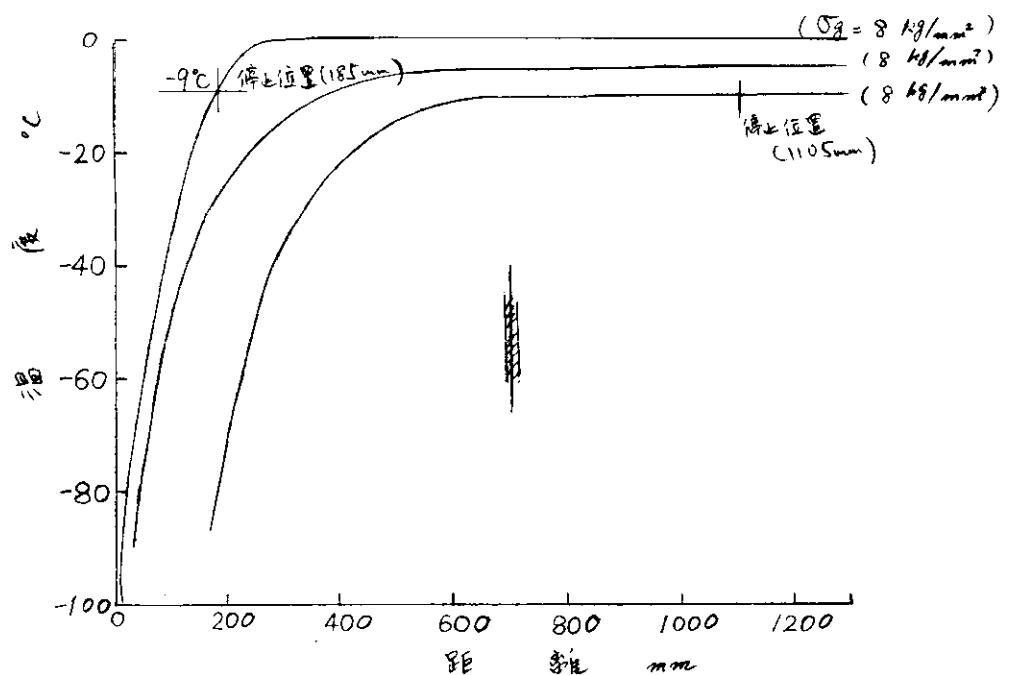


図 2.2.b 1.3 大型クラック アレスター試験温度分布(38-1)

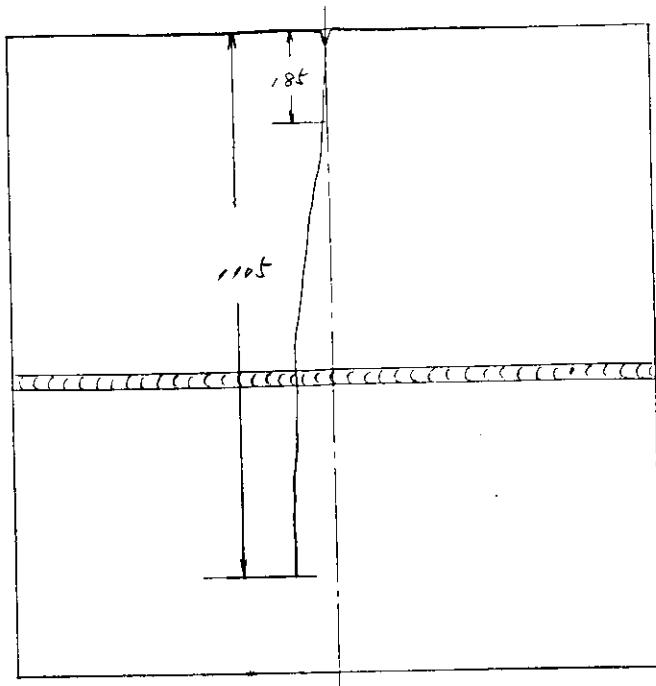


図2.2.b 1 4 大型クラック アレスラー伝播経路(38-1)

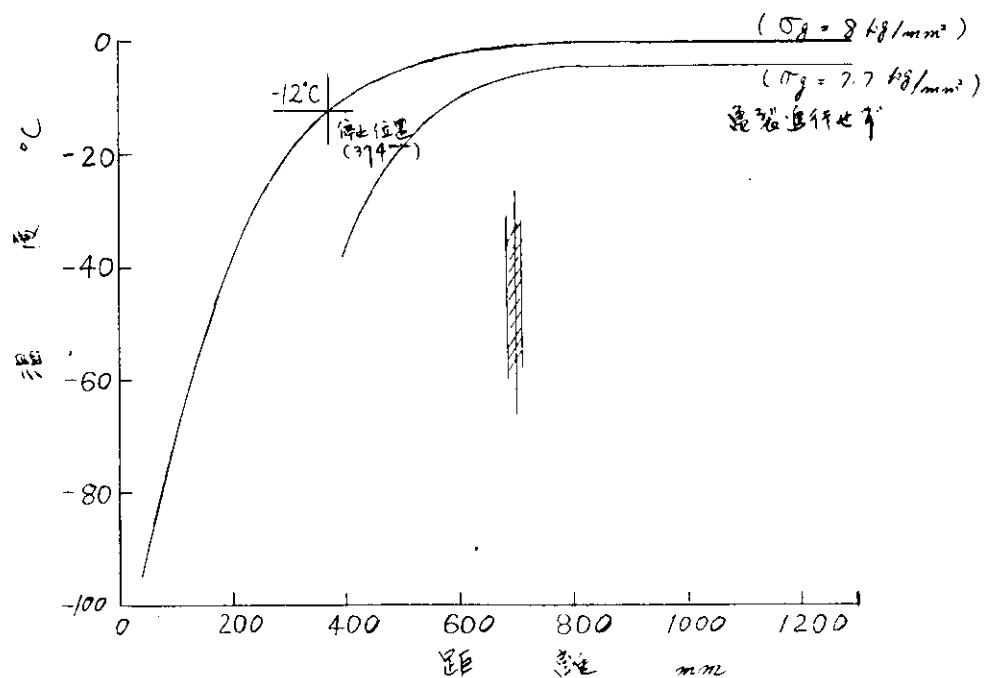


図2.2.b 1 5 大型クラック アレスラー試験温度分布(38-2)

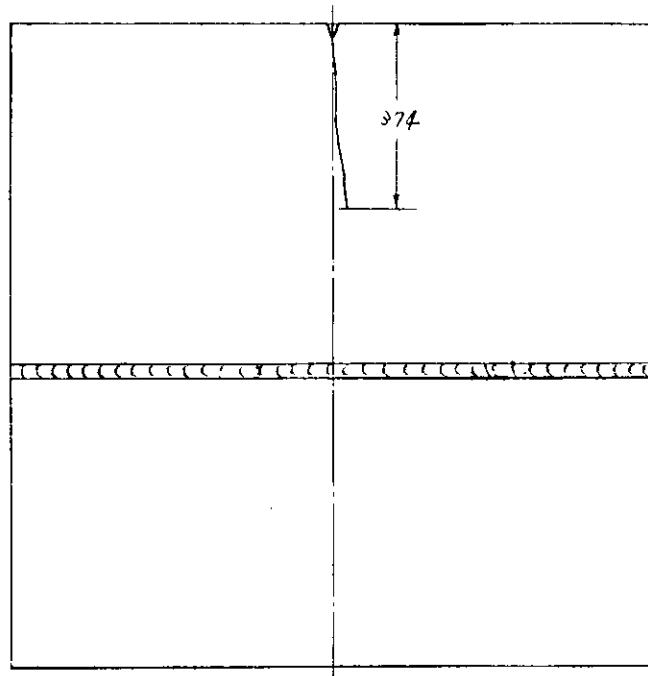


図 2.2.b 1 6 大型クラック アレスター伝播経路 (38-2)

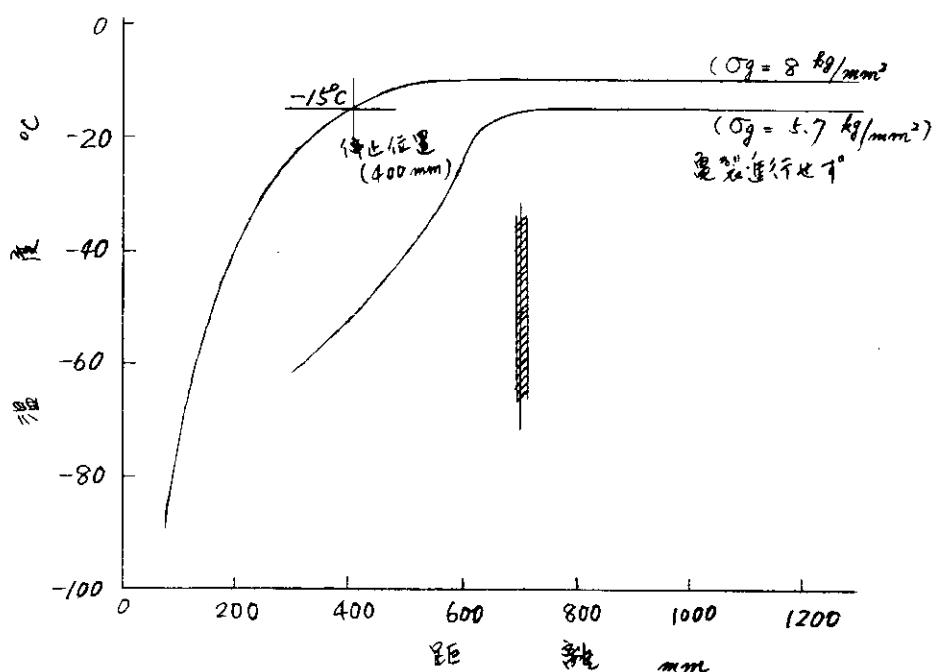


図 2.2.b 1 7 大型クラック アレスター試験片温度分布 (38-3)

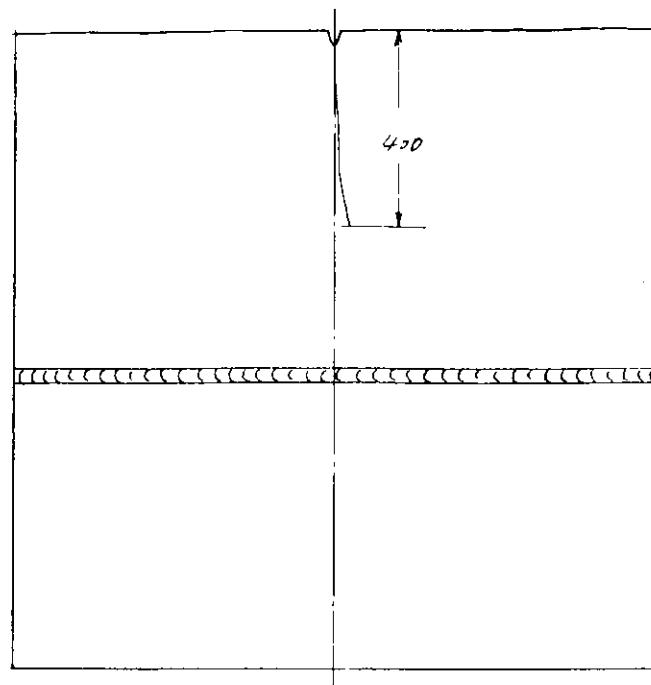


図 2.2. b 1.8 大型クラック アレスター伝播経路(38-3)

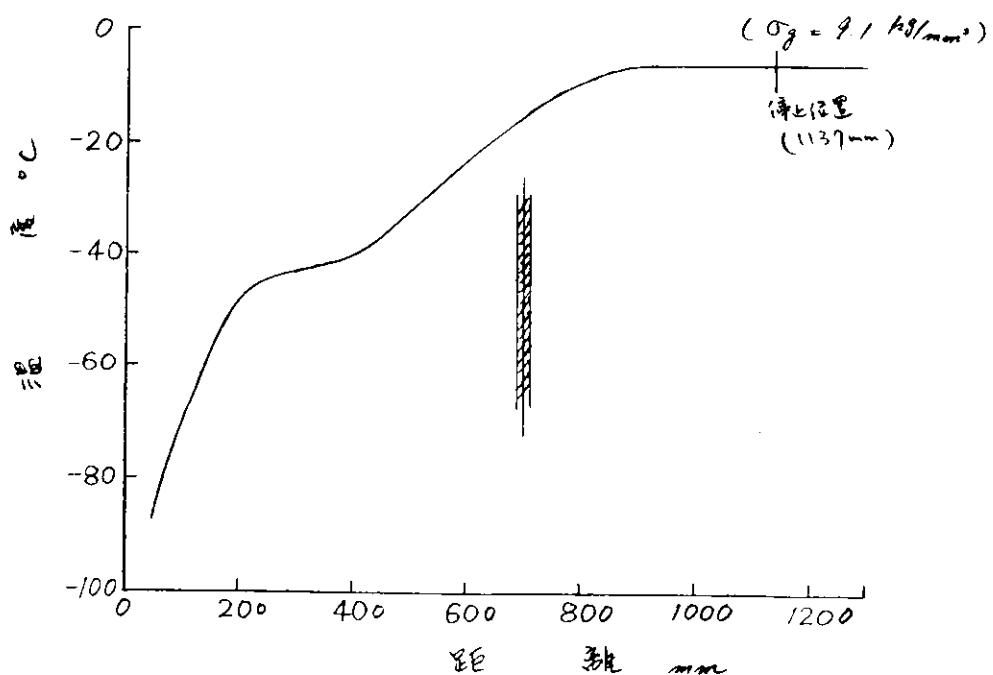


図 2.2. b 1.9 大型クラック アレスター試験温度分布(38-4)

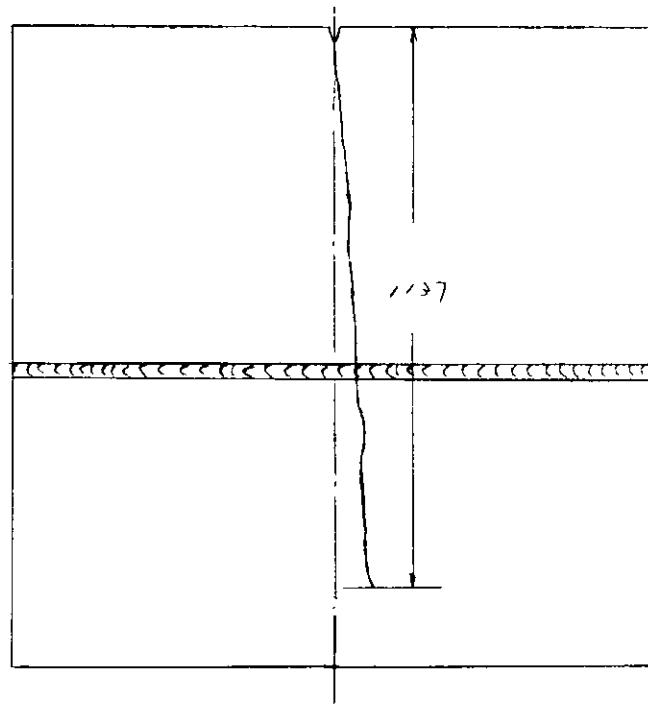


図 2.2. b 2 0 大型クラック アレスター伝播経路 (38-4)

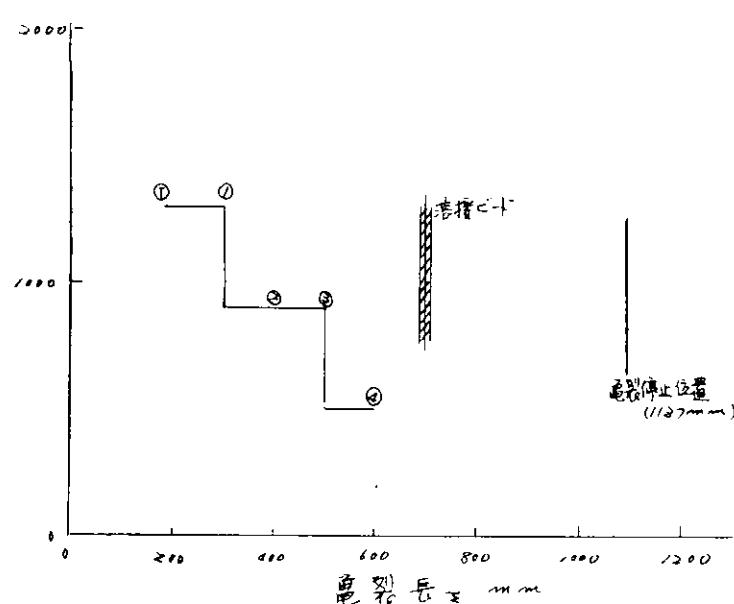
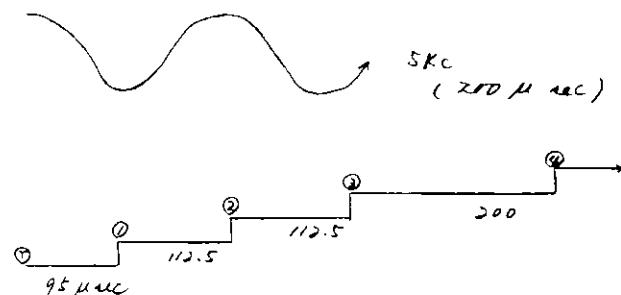


図 2.2. b 2 1 龟裂伝播速度測定結果 (38-4)

2.2.c 素材の脆性破壊伝播停止特性-3

(1) 試験の目的

本試験は現在大型鉱石運搬船に使用されている板厚19mmのA級鋼とD級鋼および板厚38mmのD級鋼とE級鋼についてシャルピー試験や二重引張試験を行ない、これらの鋼板の脆性破壊伝播停止特性などを調査したものである。

(2) 供試材および試験片

供試材として19mm A級鋼（以下19Aと呼ぶ）。19A、19mm D級鋼（以下19Dと呼ぶ）19D、38mm D級鋼（以下38Dと呼ぶ）38D、38mm E級鋼（以下38Eと呼ぶ）38Eの4種類の鋼材を用いた。これらの鋼材の化学成分は表2.2.c.1に示すとおりである。

各試験片の形状および寸法は図2.2.c.1に示すとおりである。

(3) 試験の内容および試験方法

1) 引張試験

各供試材から図2.2.c.1に示すような試験片をL方向2箇（試験片の長さ方向が圧延方向に平行なもの）、C方向2箇（試験片の長さ方向が鋼板の圧延方向に直角なもの）の合せて4箇ずつ採取し、19A材と19D材についてはアムスラー式油圧型50ton試験機（昭和44年6月21日検定済）を用いて、38D材と38E材についてはアムスラー式油圧型300ton試験機（昭和44年6月21日検定済）を用いて試験を行なつた。

2) 曲げ試験

各供試材から図2.2.c.1に示すような試験片をL方向2箇、C方向2箇の合せて4箇ずつ採取し、アムスラー式油圧型50ton試験機を用いて曲げ半径が板厚の1.5倍で曲げ角度180°の試験を行ない割れ発生の有無、きずの有無を調べた。

表2.2.c.1 供試材の化学成分

鋼名*	板厚mm	C %	Si %	Mn %	P %	S %
19A	19	0.18	0.05	0.66	0.015	0.019
19D	19	0.15	0.04	1.15	0.012	0.024
38D	38	0.12	0.25	0.70	0.025	0.025
38E	38	0.16	0.27	1.05	0.013	0.013

* A : A級鋼、D : D級鋼、E : E級鋼

3) シャルピー衝撃試験

各供試材から図2.2.c.1に示すようなVシャルピー試験片をL方向ならびにC方向のものそれぞれ25本ずつ採取し、シャルピー式30Kg-mの衝撃試験機（昭和44年6月21日検定済）を用いて試験を行なつた。なお欠けきはいずれも板厚面に、かつ圧延面に対して垂直方向に入れた。試験温度は-60°Cから+60°Cまでの範囲で20°Cおきに1試験温度につき3箇ずつ試験を行なつた。試験片の冷却にはドライアイスとメチルアルコールを用い、試験片が所定の温度になつてから30分間その温度を保持させたのちすみやかに試験を行なつた。

4) 二重引張試験

各供試材から図2.2.c.1に示すような試験片をそれぞれ10枚ずつ採取し、温度勾配型と温度一様型の試験を5枚ずつ行なつた。試験にはアムスラー式油圧型300ton試験機を用いた。試験温度管理は試験片の表面に10組の熱電対を点溶接し、一定の温度に達してから1時間その温度を保持させた後試験を行なつた。

(4) 試験結果および考察

引張試験ならびに曲げ試験結果は表2.2.c.2に示すとおりである。

Vシャルピー衝撃試験結果は図2.2.c.2から図2.2.c.9に示すとおりである。

二重引張試験結果は表2.2.c.3(温度勾配型)および表2.2.c.4(温度一様型)に示すとおりである。表2.2.c.3の

Fracture Toughness すなわち K_c 値とき裂停止温度の逆数との関係を図示すると図 2.2.c 10 から図 2.2.c 13 のようになり、これらの図において、き裂長さを 100 mm と仮定した場合の応力（この応力値は有限巾の試験片を無限継の板と考えた場合の応力を修正した値である）と、き裂停止温度との関係は図 2.2.c 14 のようになる。

以上、A 級鋼、D 級鋼、E 級鋼について、二重引張試験、その他の試験を行なつたが、これらの鋼材は現在使用されている他の鋼材とほぼ同程度のものであることがわかつた。

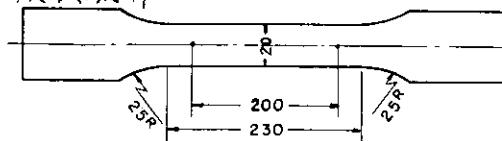
表 2.2.c 2 引張試験および曲げ試験結果

鋼名	板厚 (mm)	*方 向	番 号	引張試験			曲げ試験 $\theta=180^\circ$ $\tau=1.5 \text{ t}$
				Y.P. (kg/mm ²)	T.S. (kg/mm ²)	E.L L=200 (%)	
19A	19	L	1	25.6	42.1	30.0	良
			2	25.1	42.5	27.5	良
		C	1	26.5	42.0	29.5	良
			2	25.7	41.7	31.5	良
19D	19	L	1	29.7	43.9	30.5	良
			2	28.7	43.8	30.0	良
		C	1	29.3	43.9	28.5	良
			2	26.4	43.7	30.0	良
38D	38	L	1	29.8	44.0	34.0	良
			2	27.8	42.7	34.0	良
		C	1	29.2	43.5	29.0	良
			2	26.2	42.6	28.0	良
38E	38	L	1	31.6	49.3	31.0	良
			2	30.2	48.2	33.0	良
		C	1	30.8	48.2	32.0	良
			2	30.8	48.5	30.0	良

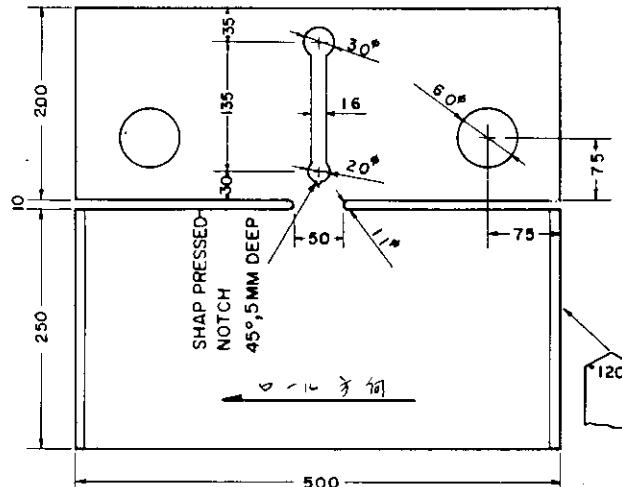
* L は試験片の長さ方向が圧延方向に平行

C は ノ ノ ノ ノ に直角

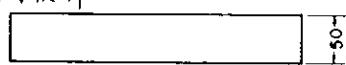
1. 引張試験片



4. 二重引張試験片



2. 曲げ試験片



3. シルビー衝撃試験片

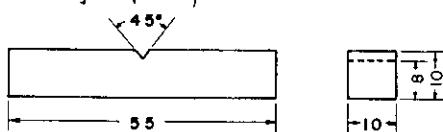


図 2.2.c 1 各試験片の形状および寸法

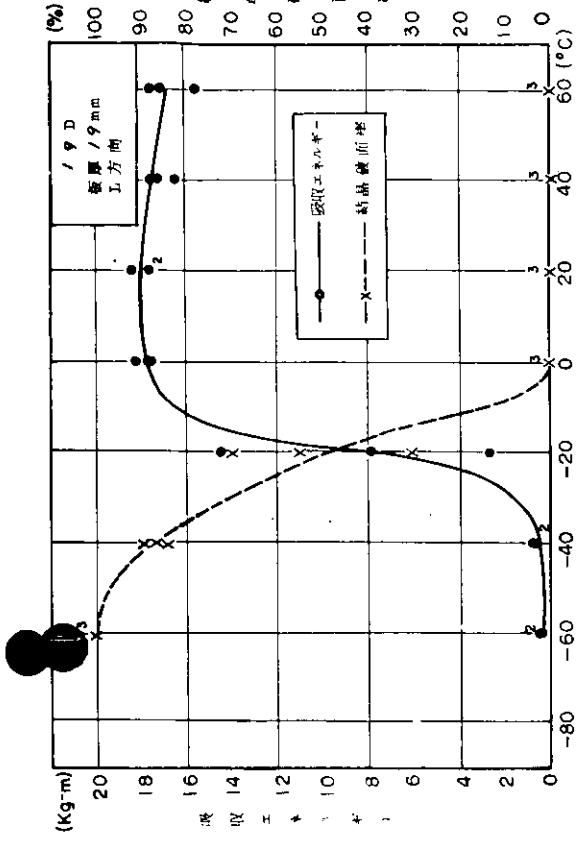


図 2.2.c.1 シャルビー試験結果(19D—L)

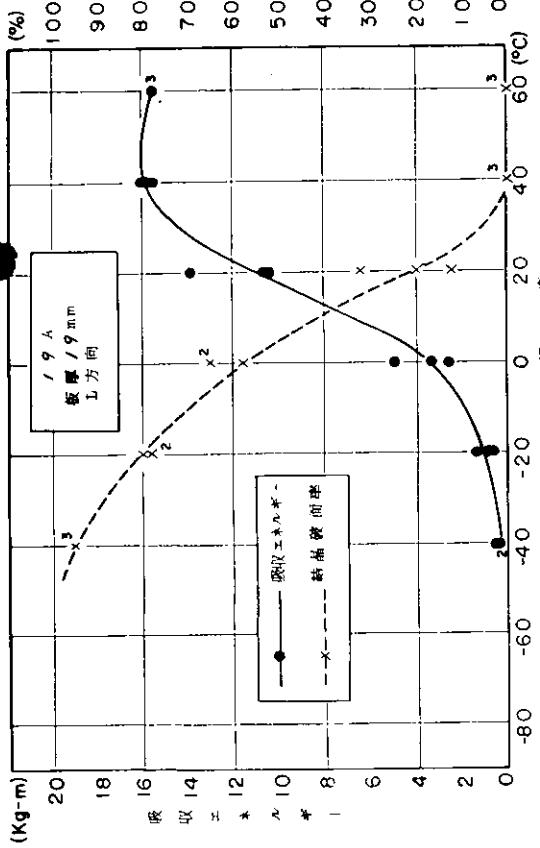


図 2.2.c.2 シャルビー試験結果(19A—L)

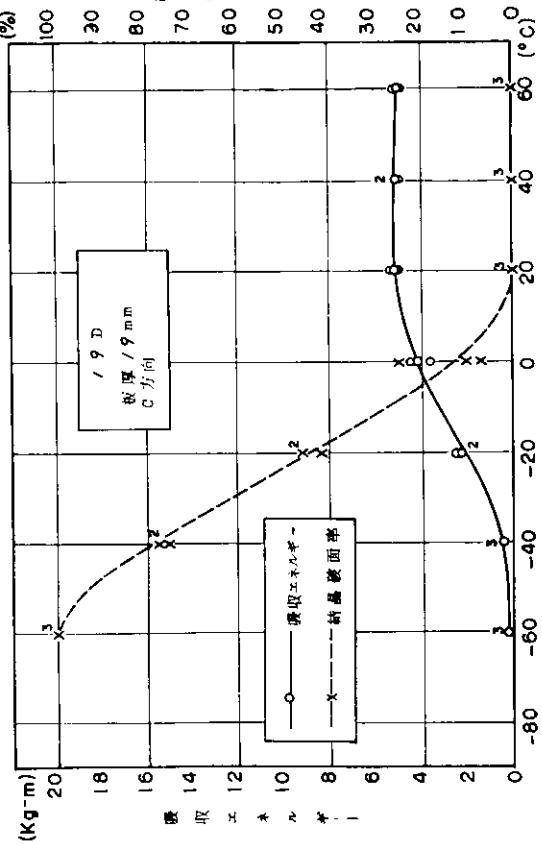


図 2.2.c.3 シャルビー試験結果(19A—C)

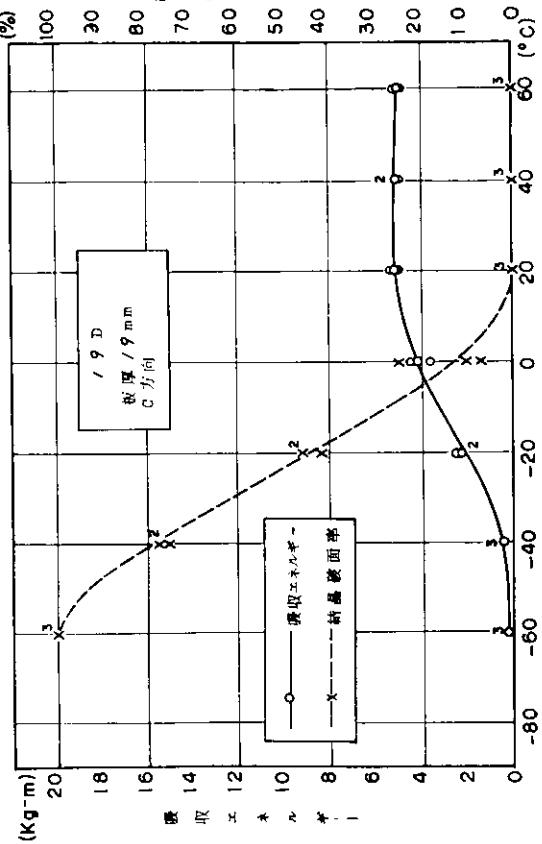


図 2.2.c.4 シャルビー試験結果(19D—C)

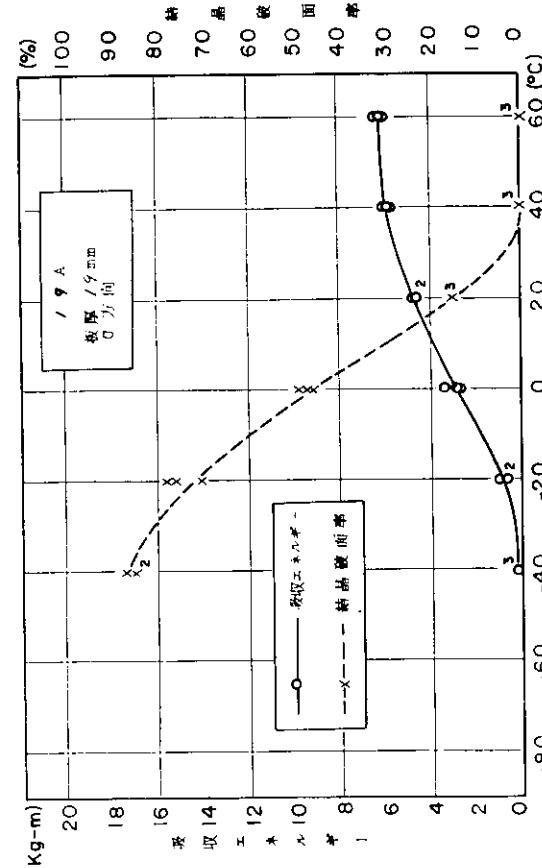


図 2.2.c.5 シャルビー試験結果(19D—C)

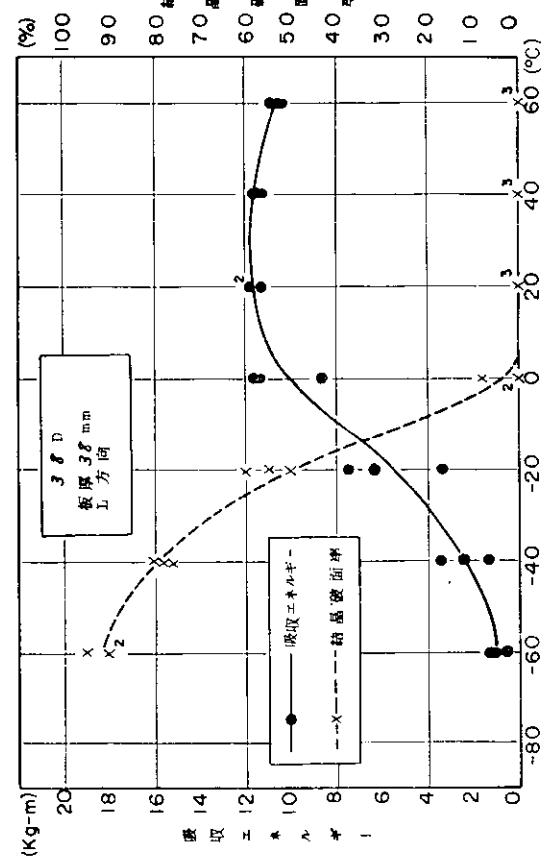


図 2.2.c 6 シャルピー試験結果(38D-L)

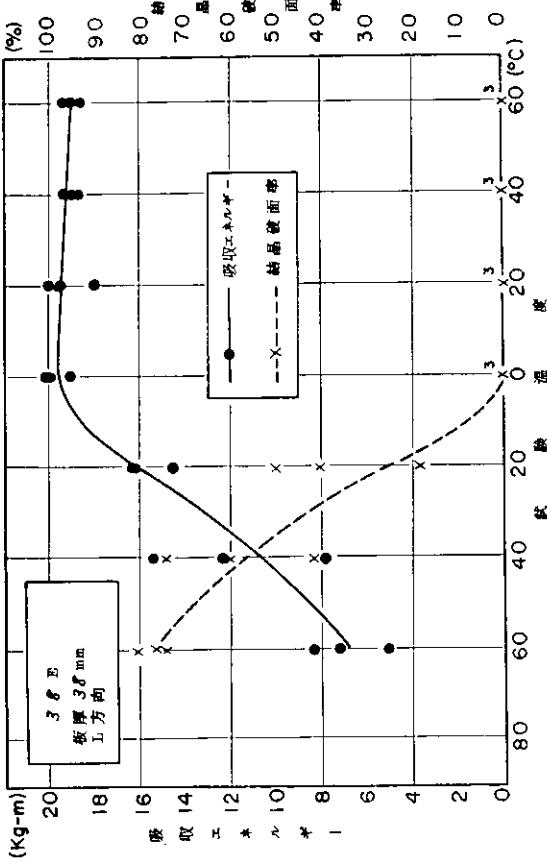


図 2.2.c 7 シャルピー試験結果(38D-C)

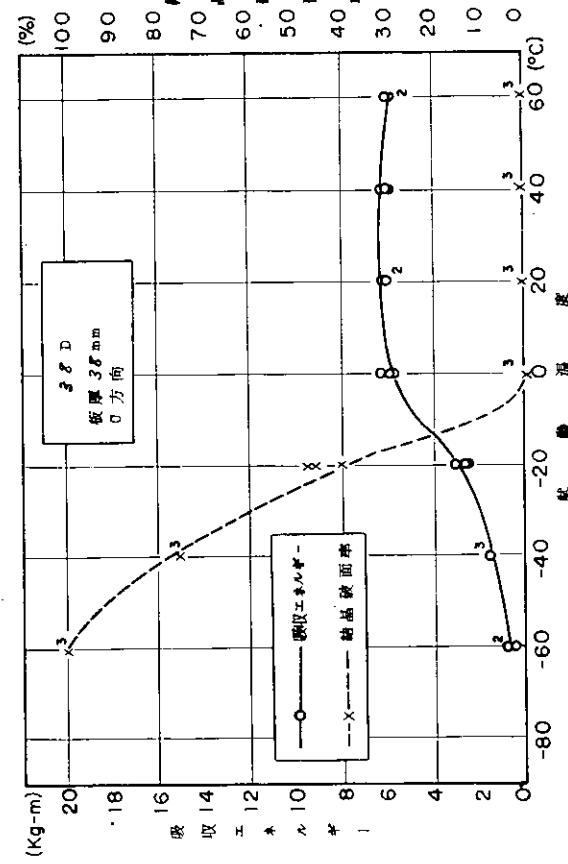


図 2.2.c 8 シャルピー試験結果(38E-L)

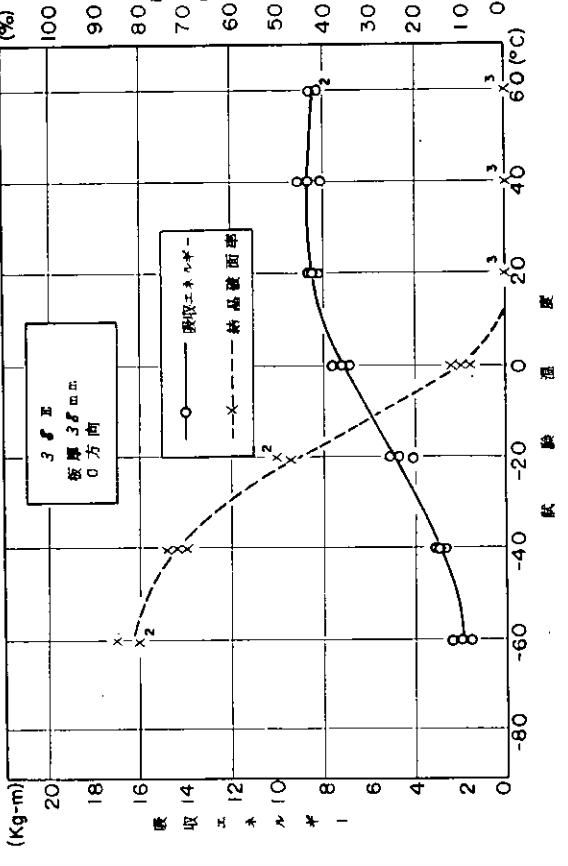


図 2.2.c 9 シャルピー試験結果(38E-C)

図 2.2.c 9 シャルピー試験結果(38E-C)

表2.2.c.3 二重引張試験結果(温度勾配型)

鋼名	板厚 (mm)	番号	応力 (Kg/mm²)	き裂長さ c (mm)	き裂停止 絶対温度 T °K	* K_c (Kg/mm/mm²)	1000/ %K
19A	19	1	5.1	179	283	168.4	3.53
	19	2	10.0	191	292	357.1	3.42
	19	3	2.5	62	237	35.8	4.22
	19	4	7.6	169	278	228.1	3.60
	19	5	4.6	179	283	129.1	3.53
19B	19	1	15.8	189	278	561.0	3.60
	19	2	5.0	152	272	136.8	3.68
	19	3	10.0	76	247	160.4	4.05
	19	4	10.2	150	266	276.9	3.76
	19	5	**	—	—	—	—
38D	38	1	4.9	134	258	115.9	3.88
	38	2	14.9	187	284	520.9	3.52
	38	3	19.6	195	292	710.0	3.42
	38	4	9.8	142	280	243.9	3.57
	38	5	2.9	107	257	57.3	3.89
38E	38	1	15.0	192	285	484.4	3.51
	38	2	12.9	171	279	404.3	3.58
	38	3	20.2	227	299	1459.8	3.34
	38	4	9.9	164	267	294.2	3.75
	38	5	4.9	67	240	73.4	4.17

* $K_c = \sigma \sqrt{\frac{2B}{C} \tan \frac{\pi c}{2B}} \sqrt{C}$ B : 試験片巾

** き裂が応力場に進入せずに横方向にそれた。

表2.2.c.4 二重引張試験結果(温度一様型)

鋼名 *	板厚 mm	番号	応力 (Kg/mm²)	温 度 (°C)	き裂長さ (mm)	備 考*
19A	19	6	8.2	0	58	伝播せず
		7	9.9	-10	250	完全伝播
		8	15.0	0	68	伝播せず
		9	7.0	-15	250	完全伝播
		10	15.0	-10	250	完全伝播
19B	19	6	10.2	-15	154	中途停止
		7	15.1	-2	65	伝播せず
		8	5.1	-20	48	伝播せず
		9	14.9	-10	53	伝播せず
		10	5.0	-30	35	伝播せず
38D	38	6	10.7	-10	81	中途停止
		7	14.8	10	84	中途停止
		8	16.9	0	250	完全伝播
		9	8.9	-50	250	完全伝播
		10	13.9	-10	250	完全伝播
38E	38	6	14.0	-20	250	完全伝播
		7	15.3	0	250	完全伝播
		8	9.3	-15	250	完全伝播
		9	13.0	0	78	伝播せず
		10	17.1	10	77	伝播せず

* 試験片に冷却槽を取付けて、一様温度で冷却しても、き裂発生端部を-7.0°Cに冷却しているので、その影響が温度一様端におけるより、実際の試験片の温度が一様になるのはき裂発生端から8.0mmぐらい離れたところ以降となる。そこでき裂長さが8.0mm未溝の場合、伝播しなかつたものと判定し、き裂が伝播したものを完全伝播、その他のは中途停止と判定した。

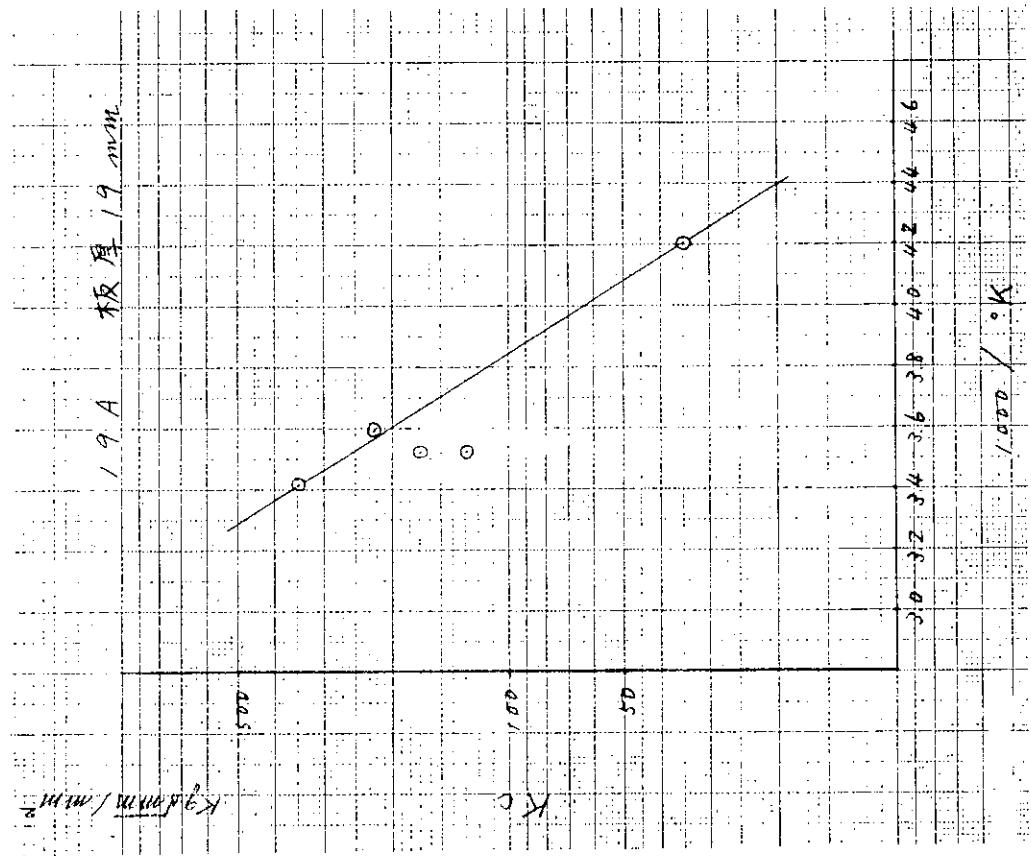


圖 2.2.c 10 二重引張試驗結果 (19 A)

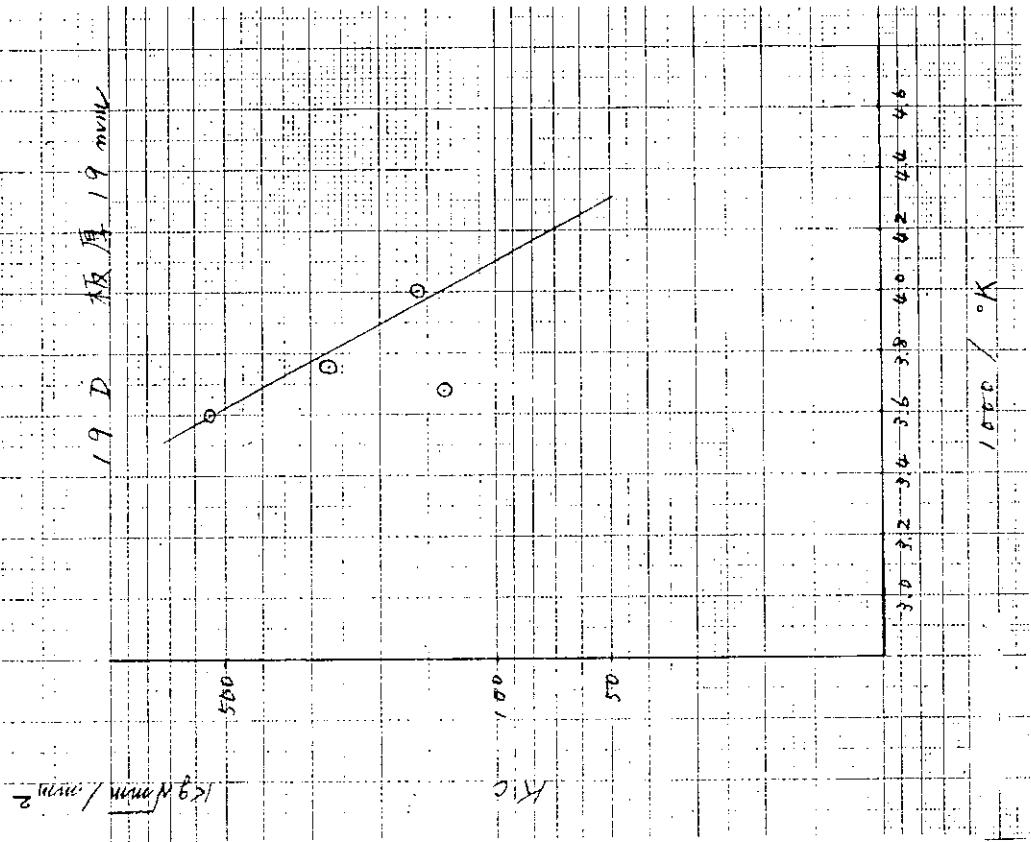


圖 2.2.c 11 二重引張試驗結果 (19 D)

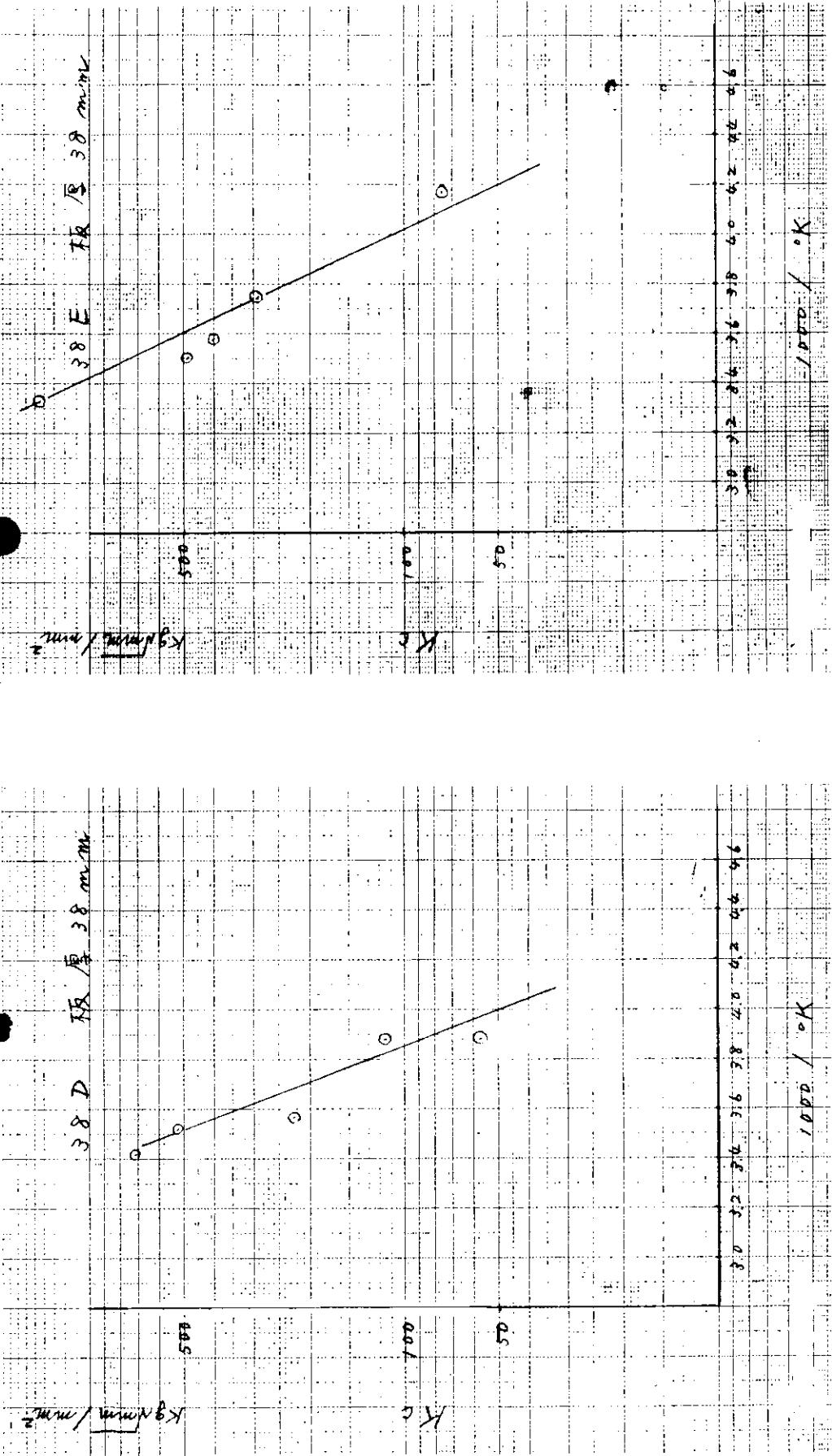


图 2.2.c 12 二重引張試験結果(38D)

图 2.2.c 13 二重引張試験結果(38E)

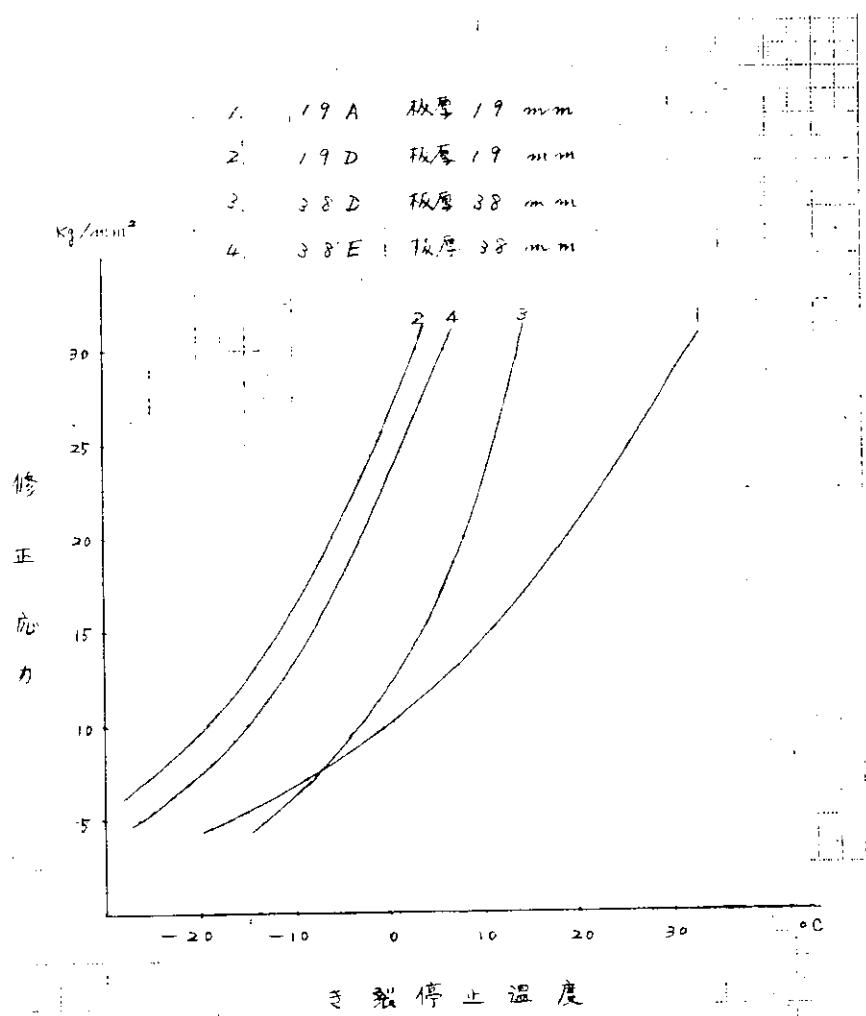


図 2.2.c 14 応力—き裂停止温度曲線
(き裂長さが 100mm のとき)

第3章 疲労破壊に関する研究

3.1 3次元模型による疲労クラック伝播速度

(1) 試験の目的

船体構造においては、構造上あるいは工作上の応力集中部が多く存在し、これらの箇所から、疲労によると思われるクラックが発生している。しかし、これらのクラックの大半は定期検査などの諸検査で発見され、補修されていて、大事故には到つていない場合が多い。

本質的には、これらのクラック発生を未然に防ぐことが重要であるが、発生したクラックの伝播速度を正確に把握することは、船体の安全上からも重要なことである。

一般に、疲労クラックの伝播速度は、脆性破壊などに比べると、きわめておそいと云われており、疲労クラック伝播に関して、最近、実験データーも発表されはじめた。これらの実験データーは平板の繰返し引張りに関するものであつて、船体構造のような箱型の構造物の疲労クラック伝播に関する研究結果は見当らない。

本実験は、箱型構造物が曲げの繰返しを受けたときの疲労クラックの伝播速度に関する基礎的資料を得るために行なつたものである。

(2) 試験模型および供試材

図3.1.1に示すように、試験模型は、長さ1,260mm、幅340mm、高さ180mm、板厚5mmのものであつて、箱の上面に260mm×30mmの長円形の開孔があり、この開孔部の中央に深さ5mmのソーカットによる鋭い切欠があり、これから疲労クラックが発生するようになつていている。また、支持点および荷重点のところは、10mmの板で仕切られている。

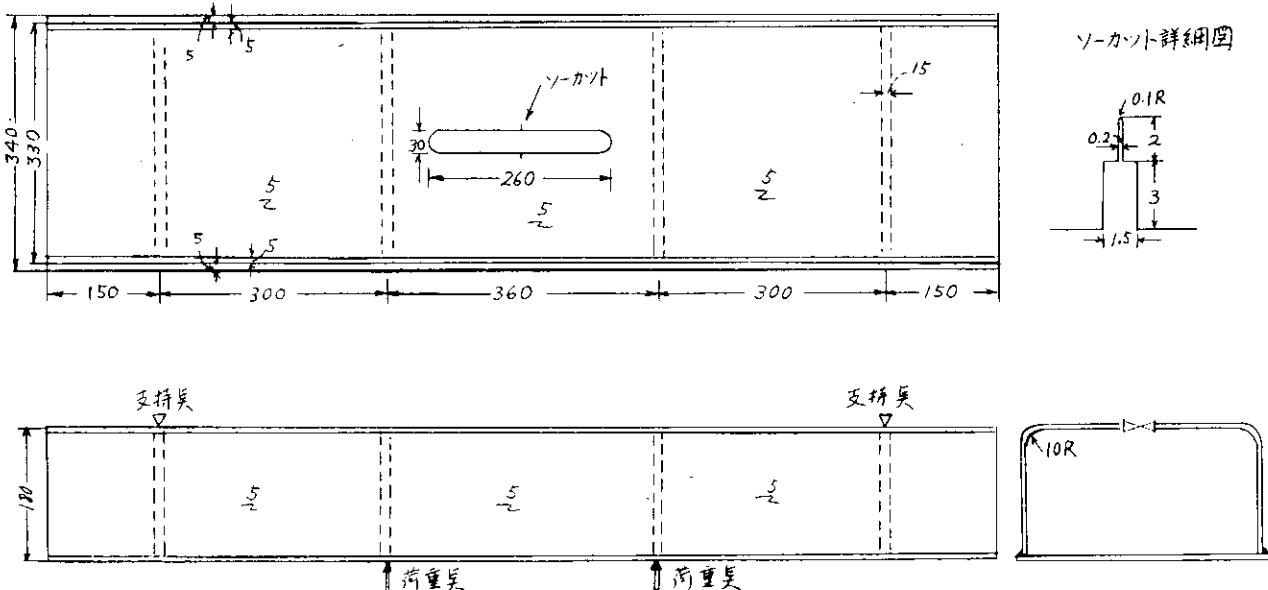


図3.1.1 箱型模型の形状

本模型製作に使用した板厚5mmの銅板は、普通の構造用軟鋼であつて、その化学成分および機械的諸性質をミルシートから引用して表3.1.1に示した。

表3.1.1 化学成分および機械的諸性質

化学成分(%)					機械的諸性質				
C	Si	Mn	P	S	強度 (kg/mm²)	引張り強さ (kg/mm²)	伸び (%)	曲げ試験	
0.14	0.01	0.63	0.016	0.022	33.2	45.4	38.0	Good	

なお、試験に供した模型の数は8ヶである。

(3) 試験内容および試験方法

上述の試験模型により下記の実験を行なつた。

1) 静的試験による開孔部附近の応力測定

2) 繰返し荷重による疲労クラック伝播試験

2) の試験では下記のような系列の実験を行なつた。

a) 上限荷重を変えたときの疲労クラックの伝播速度(下限荷重一定)

b) 上限荷重を一定にして、下限荷重を変えたときの疲労クラックの伝播速度

c) 繰返し速度を変えたときの疲労クラックの伝播速度。静的試験および疲労試験ともに、外側の仕切り板のところを支持し、内側の仕切り板のところに荷重を加え、開孔部のところが一様な引張りをうけるようにした。

実験に使用した試験機はアムスラー社製バルセータと東京衡機KK製低繰返し装置である。疲労試験は片振り繰返しとし、上述のa) b) の系列の試験の場合はバルセータを毎分260回の繰返数で使用し、c) の場合は毎分520回、260回(以上バルセータ)、6回(低繰返し装置)の3通りの繰返し速度で実験を行なつた。

(4) 試験結果および考察

静的試験による開孔部および底面端部の応力分布を図3.1.2に示す。また、単純梁理論による計算値も記入した。切欠部を除き、計測値と計算値とはよく一致している。切欠部は、ソーカットによる応力集中のため、計算値よりかなり高い応力となつている。

次に、疲労試験によるクラック伝播速度と繰返し数との関係を図3.1.3に示した。疲労クラックは、切欠きが2つあるため、両方から発生するが、両方のクラックの伝播速度は必ずしも等しくないので、図3.1.3(a)の方は最大クラック長さと繰返し数との関係を示し、(b)の方は両方のクラック長さと繰返し数との関係を示してある。また、このような箱型模型では、クラック進展に伴ない、模型の断面係数は減少し、そのため、模型に加わる公称応力は大きくなるので、クラック長さ0の状態と、クラックの長さがある程度の長さに達した場合との公称応力の比、すなわち、断面係数の逆比の値を図の縦軸に記入した。図3.1.3

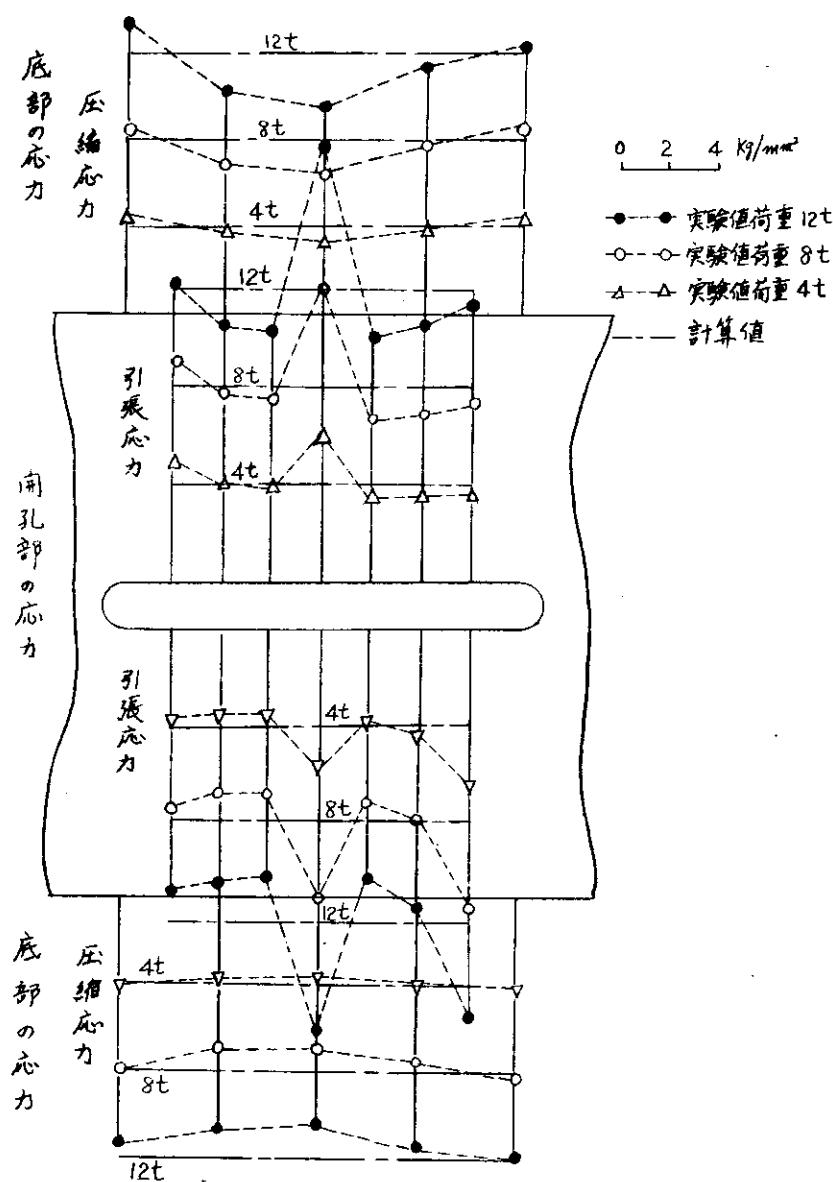


図3.1.2 応力分布(計算結果と測定値)

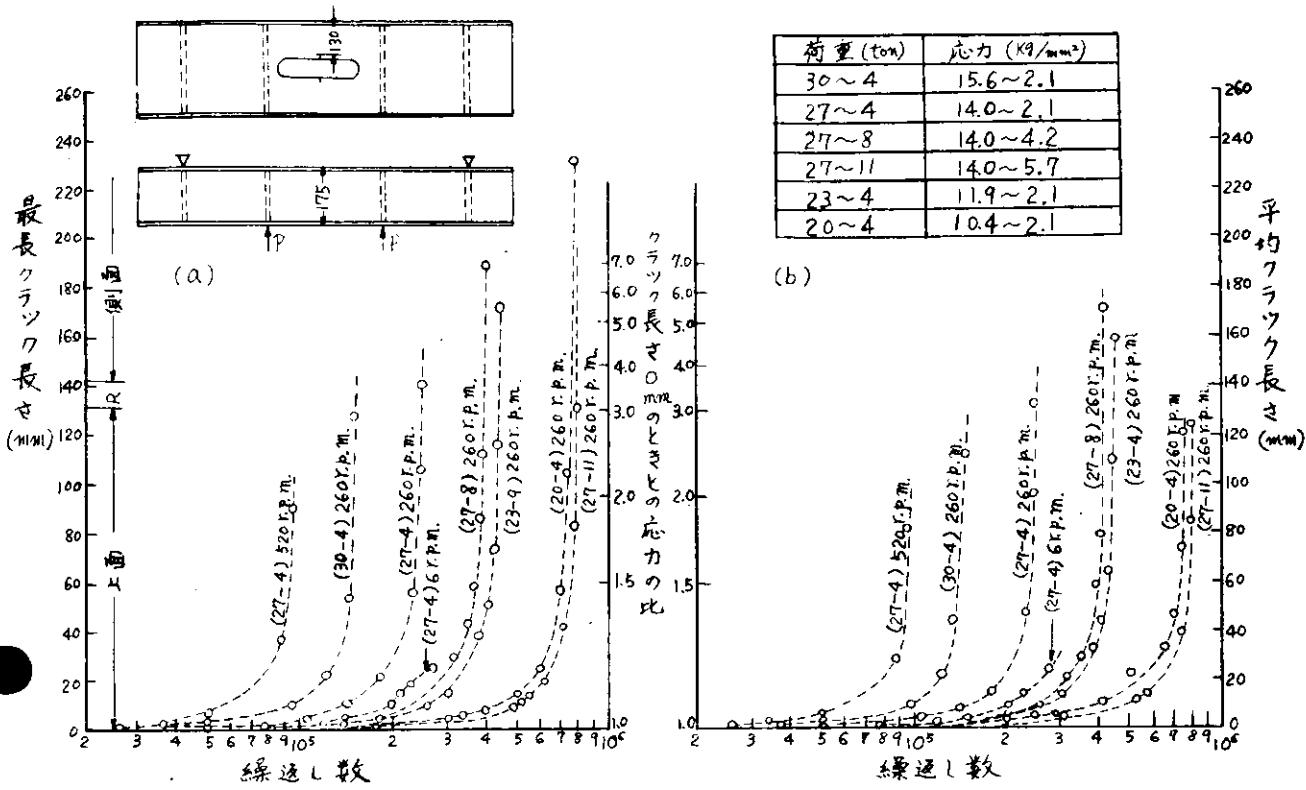


図 3.1.3 クラック長さと繰返し数との関係

で、クラック長さがある程度長くなると、その伝播速度は急激に増加しているように思われるが、図の横軸は対数目盛りであることや公称応力が大きくなっていることを考えると、そんなに早い速度ではない。しかし、クラックが側壁まで進展しある程度まで達すると、クラックの伝播速度は急激に増加し、試験中止直前では、1回の繰返しで5mm程度の早さであった。この原因については現時点では不明である。

また、繰返し速度を変えたシリーズでは、予想に反し、繰返し速度の早い方がクラックの伝播速度が早かつた。試験模型の数が少なかつたので、上述の結論が正しいか否かを確認するには、今後、系統的な研究が必要であろう。

しかし、全般的に、クラックの伝播速度はかなりおそく、本実験では、クラック長さが小さい場合、最大公称応力が $10 \text{ kg/mm}^2 \sim 15 \text{ kg/mm}^2$ のとき、約10mmのクラックが進展するには5万～50万回の繰返しが必要であった。これを実船と波との繰返しに換算すると、クラックの伝播速度はかなりおそいと思われる。

しかし、本実験は小型模型であるため、この結果をそのまま実船のクラック伝播速度と結びつけるためには多くの問題点があり、今後大型模型による数多くの研究結果が必要であろう。

3.2 剪断応力による疲労クラック伝播

(1) 試験の目的

3.1で述べたように疲労クラックの伝播に関するデータは少なく、とくに、剪断応力によるものは見当らない。本実験は、剪断応力によるクラック発生と伝播速度とを実験的に求め、今後の船体疲労強度に関する基礎資料を得るために行なつたものである。

(2) 試験模型および供試材

試験模型は、図3.2.1に示すように、長さ600mm、高さ400mm、幅300mm、200mmのI型梁で、ウェブの板厚は5mmである。切断をうける2つのパネルの大きさは182mm×380mmであつて、その中心に直径30mmの円孔が設けられている。

本模型のウェブに使用した板厚5mmの鋼板は、3.2の模型に使用した鋼板と同じ鋼板であつて、その化学成分および

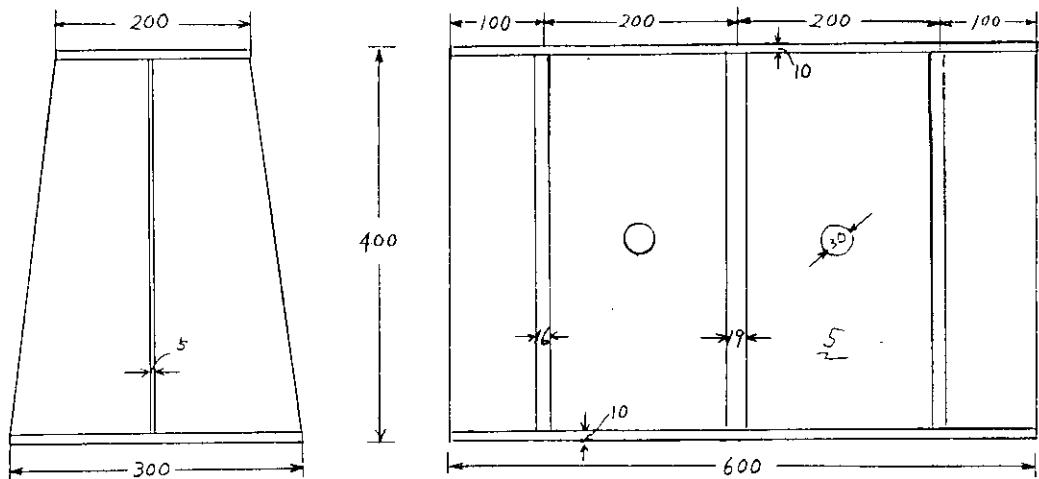


図 3.2.1 試験模型の寸法と形状

機械的諸性質は、さきに、表 3.1.1 で示した。

なお、試験に供した模型の数は 8 ケである。

(3) 試験内容および試験方法

上述の試験模型により下記の実験を行なつた。

- 1) 静的試験によるパネルおよび開孔部附近の応力測定
- 2) 繰返し荷重による疲労クラックの発生および伝播試験
- 2) の実験では下記のような 2 つの系列の実験を行なつた。
 - a) 下限荷重を一定にして、上限荷重を変えたときの疲労クラック発生および伝播試験
 - b) 上限荷重を一定にして、下限荷重を変えたときの疲労クラック発生および伝播試験

疲労試験に使用した試験機はアムスラー社製パルセータで、その繰返し速度は毎分 260 回である。

(4) 試験結果および考察

静的試験によるパネルの剪断応力の分布を図 3.2.2 に示す。また、計算による平均剪断応力（荷重をウェブの断面積

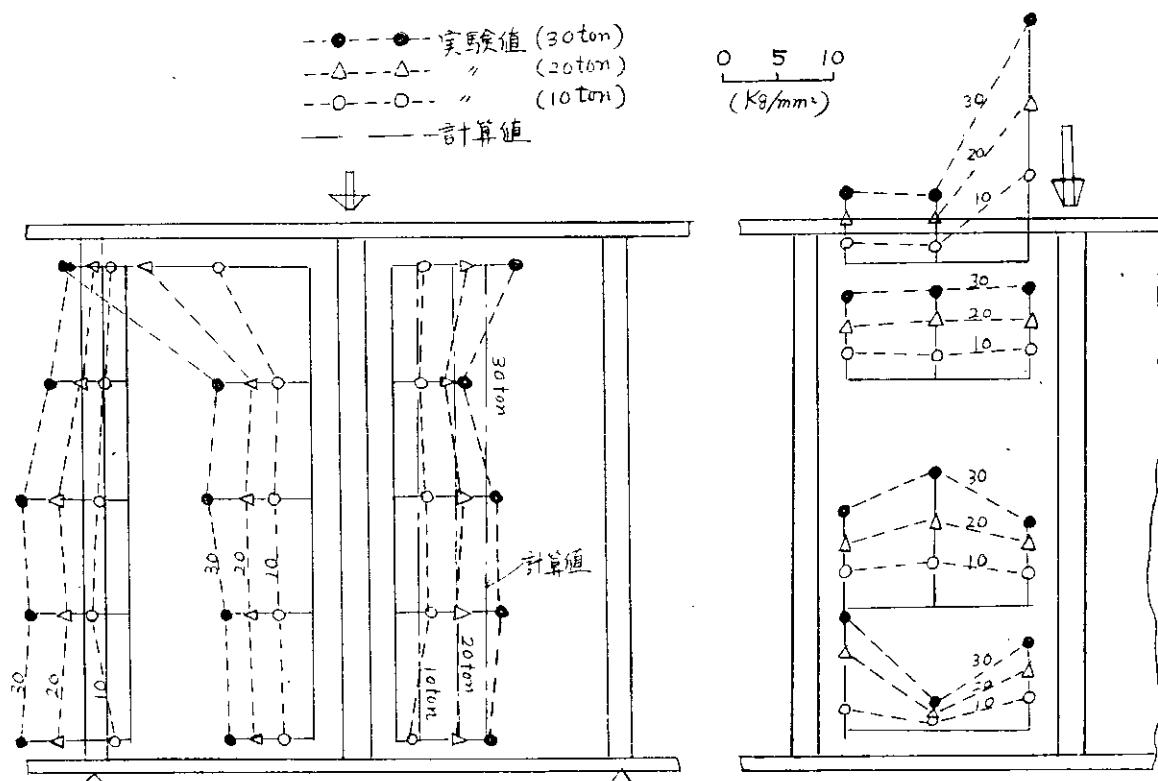


図 3.2.2 パネルの応力分布

でわづた値)も示した。計測値と計算値とは、荷重点近傍を除いてよく一致していて、この模型では、荷重点および開孔部附近を除いて、ほぼ一様剪断の状態に近いと考えられる。

次に開孔部附近の応力分布を図3.2.3に示す。図に示すように、開孔部附近はかなり応力集中が大きく、その値は約4程度である。無限板に円孔があるときの剪断による応力集中係数は4.0であるので、今回計測された上述の値は理論的にも妥当な値と考えられる。

次に疲労試験によるクラック発生の一例を図3.2.4に示す。クラックは4箇所から発生し、伝播するが、これら4

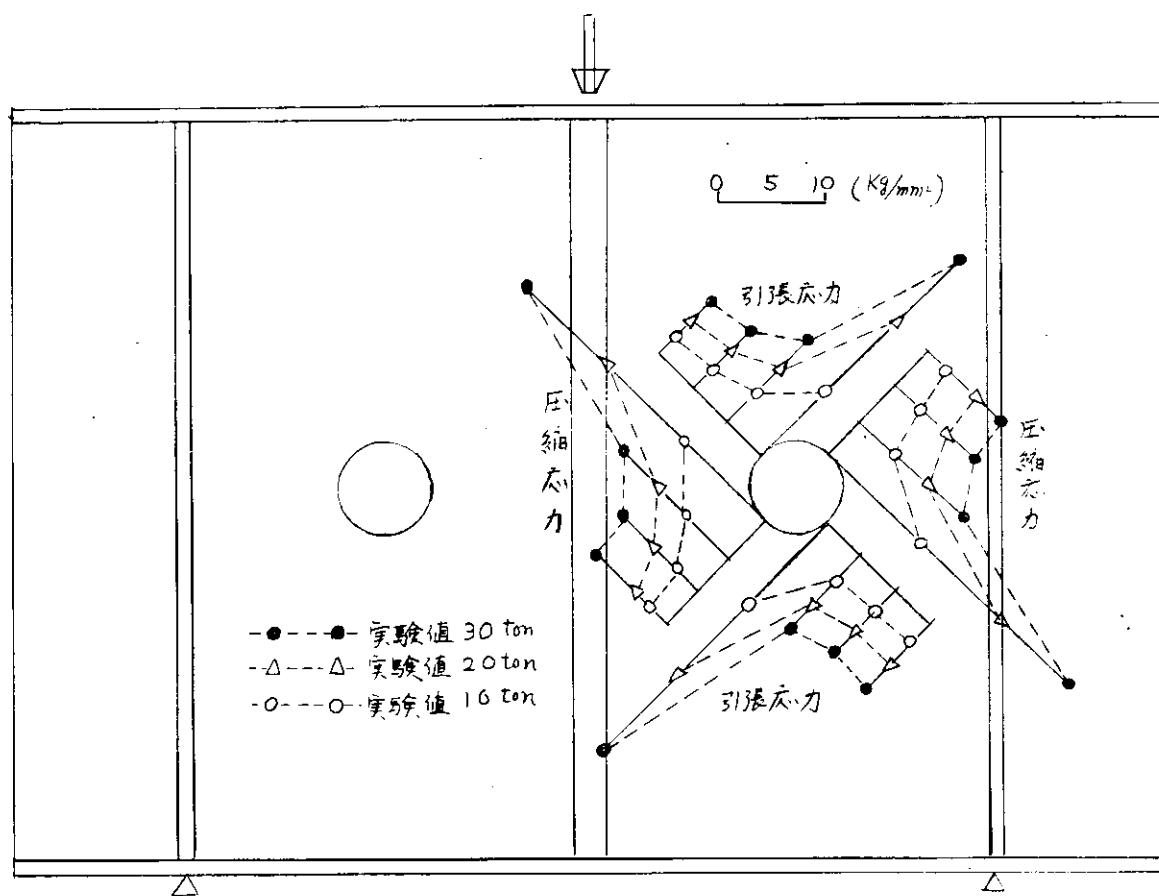
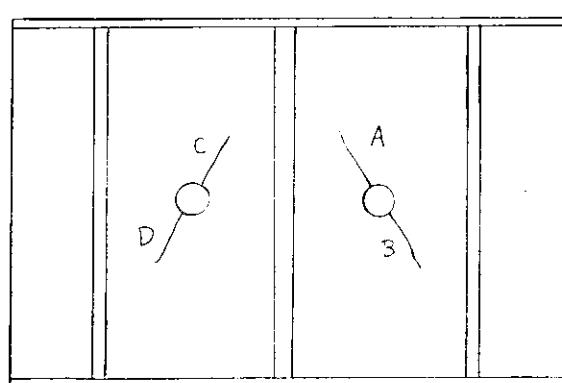


図3.2.3 円孔附近の応力分布



繰返数 (万回)	クラック長さ (mm)				
	A	B	C	D	平均
32.18	1.5	0	0	0	0.4
34.17	2.5	0	0	0	0.6
36.00	3.0	0	0	0	1.3
38.00	7.0	0	0	0	2.3
42.28	14	0	0	0	3.5
45.50	17	0	0	0	4.3
47.02	21	0	0.5	3	6.1
49.16	25	0	3	7	8.8
50.45	25	0	9	12	11.5
51.86	28	0	13	15	14.0
53.05	30.5	5.5	15	20	17.8
55.00	35	17	20	25	22.8
56.33	40	19	24	30	28.3
60.00	53	40	38	45	44.0

図3.2.4 クラックの一例

つのクラックの発生および伝播は必ずしも同じではないので、もつとも早く発生したクラックと4つのクラックを平均した場合との二通りの整理を行なつた。

荷重振幅と最初にクラックが発生するまでの繰返数との関係を図3.2.5に示す。●印は最低荷重を4tとし、最高荷

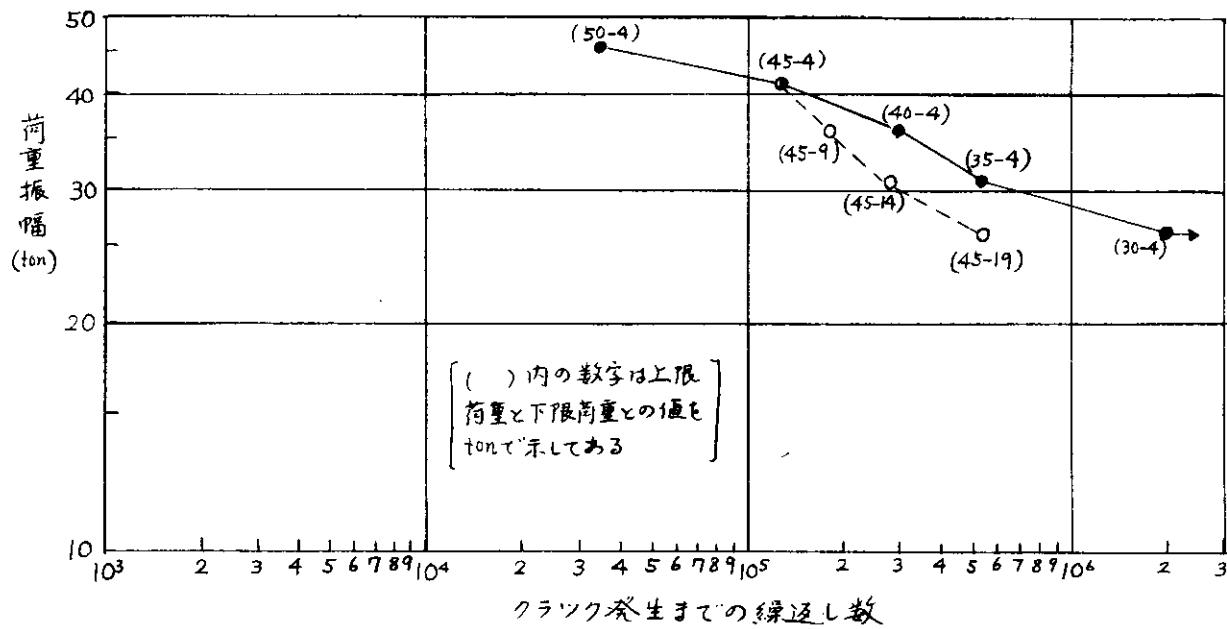


図3.2.5 クラック発生までの繰返し数
荷重振幅との関係

重をそれぞれ50t、45t、40t、35tと変えた場合、○印は最高荷重を45tとし、最低荷重をそれぞれ4t、9t、14t、19tを変えた場合の結果を示し、縦軸は荷重振幅（最高荷重から最低荷重を引いた値）横軸はクラック発生までの繰返数をそれぞれ対数目盛りで示してある。ここで、横軸のクラック発生までの繰返数はクラック長さと繰返し数との実測値からクラック長さが0のときを推定したものである。

次に、クラック長さと繰返数との関係を図3.2.6に示す。1)は最大クラックと繰返数との関係、2)は4つのクラ

荷重(ton)	平均剪断応力(kg/mm^2)	引ひき応力(kg/mm^2)
50-4	13.2-1.1	52.8-4.4
45-4	11.8-1.1	47.2-4.4
45-9	11.8-2.4	47.2-9.6
45-14	11.8-3.7	47.2-14.8
45-19	11.8-5.0	47.2-20.0
40-4	10.5-1.1	42.0-4.4
35-4	9.2-1.1	36.8-4.4

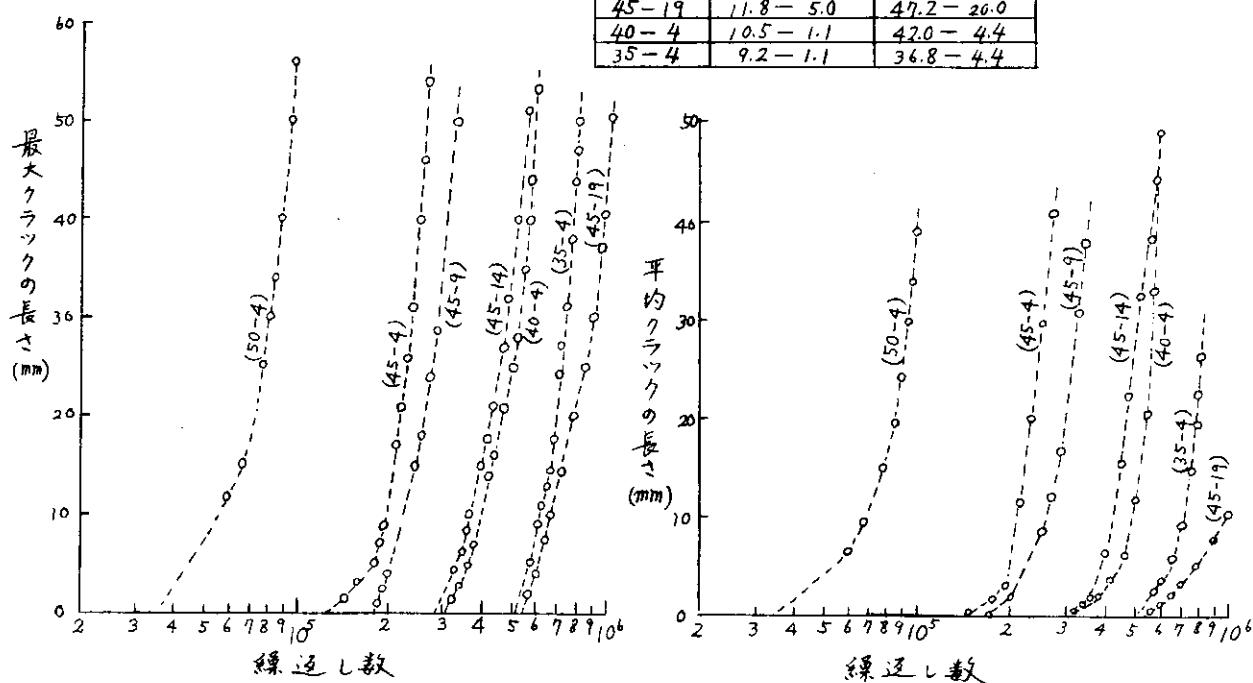


図3.2.6 クラック長さと繰返し数との関係

ックの平均値と繰返数との関係を示す。この図からわかるように、クラック長さが小さい場合、平均剪断応力が $10\text{ kg}/\text{mm}^2$ 前後のとき、約10mmのクラックが進展するには2万～20万回の繰返しが必要である。この値は3.1で行なつた箱型模型の伝播速度より多少早い程度で、オーダーは変わらない。また、本実験では、クラックの長さがかなり長くなつても、一回の繰返しでクラックが数mmも進展する現象はみられなかつた。

第4章 まとめ

以上本研究部会で実施した諸研究の結果を述べたがこれらの研究は第1章でも述べたように、造船構造用軟鋼（A級鋼、D級鋼およびE級鋼）について、その脆性破壊発生特性を求める研究、脆性破壊伝播停止特性を求める研究および疲労破壊に関する研究の3つに大別することができる。以下、各研究項目別に結果および将来の問題点について述べることとする。

(1) 脆性破壊発生特性に関する研究

板厚9mmおよび19mmのA級鋼と38mmのD級鋼について素材のディープ・ノッチ試験を行なつた結果は、D級鋼はA級鋼に比してすぐれた特性を示し、素材自体には特に問題となる点がないことが明らかになつた。溶接継手部よりの発生特性については板厚30mmの圧延のままのD級鋼および板厚38mmの焼処理したD級鋼についてコニカル型の溶接継手曲げ試験を実施した結果、前者の遷移温度は10°C、後者の遷移温度は-40°C～-50°Cであつた。なお、板厚30mmのものについての結果は従来この種の特性を求める試験法として用いられている広幅溶接継手引張試験結果ともよい一致を示し、この種の小型試験の有用性が確認された。この種の試験は溶接部欠陥からの脆性破壊発生特性を苛酷な条件のもとで評価するものと考えられているので、焼処理されたD級鋼について得られた-40°C～-50°Cの遷移温度については実用上、問題はないが、圧延のままのD級鋼について求められた10°Cの遷移温度の評価については、将来さらに検討をする必要があろう。

さて、実船の脆性破壊発生は、欠陥の外に溶接残留応力あるいは構造上の拘束が重要な影響を及ぼすことが考えられるので、板厚19mmのA級鋼、38mmのD級鋼およびE級鋼について拘束引張試験と溶接ビード付ディープ・ノッチ試験を行なつた。その結果、拘束引張試験は溶接ビード付ディープ・ノッチ試験に比して低応力脆性破壊発生温度が高く、拘束の影響が非常に大きいことが明らかになつた。試験結果はE、D、A級鋼の順に劣っていることが明らかになつたが、特にA級鋼では0°Cでも低応力脆性破壊が発生しており、この点については将来、さらに研究を要する重要な問題であると考えられる。

なお、疲労が脆性破壊発生特性に及ぼす影響については疲労による予歪量が大きくなると低応力発生特性に悪い影響を及ぼすことが明らかにされた。

(2) 脆性破壊伝播停止特性

板厚19mmのA級鋼およびD級鋼、板厚38mmのDおよびE級鋼について伝播停止特性を求めるためのESSO試験あるいは二重引張試験を行なつた。その結果、応力15kg/mm²でクラック長さ100mmの亀裂を停止させる温度は板厚19mmのA級鋼で10°C前後、D級鋼は板厚19mmで-10°C前後、38mmでは5°C前後、板厚38mmのE級鋼では-5°C～+5°Cであつた。DおよびE級鋼の脆性破壊伝播停止特性については本協会第101研究部会の報告に詳細に記載されているので参考されたい。

(3) 疲労破壊に関する研究

3次元模型による疲労クラック伝播速度と剪断応力による疲労クラック伝播についての研究を行なつたが、この種の研究は従来あまり例がないので、模型の寸法効果その他の関連について将来の研究を待たねば明確な結論を引出すことはできないと考えられる。しかし重要な研究課題であると思われる所以引続いて研究が行なわれることが期待される。