

第101研究部会
巨大船の脆性破壊防止対策に
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「巨大船に関する調査研究」の一部として日本造船研究協会第101研究部会においてとりまとめたものである。

第101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)	小倉	信和(横浜国立大学)
幹事	池田	一夫(船舶技術研究所)	越賀	房夫(日本钢管)
	岡本	淳二郎(八幡製鉄)		
	町田	進(東京大学)		
委員	今井	保穂(防衛庁)	宇田川	貞夫(運輸省)
	尾川	宣之(日本钢管)	大野	章(富士製鉄)
	香川	卓一(佐世保重工業)	笠原	讓(日本造船工業会)
	上藤	道雄(大阪造船所)	木原	博(東京大学)
	桑山	則男(住友金属工業)	酒井	啓一(石川島播磨重工業)
	阿部	喜代三(日本製鋼所)	真田	良(日本船主協会)
	田代	新吉(日本海事協会)	竹脇	喬(石川島播磨重工業)
	塚本	周吉(函館ドック)	塚本	睦世(川崎製鉄)
	土屋	九一(三井造船)	寺井	清(川崎重工業)
	中井	恒男(日立造船)	中村	昭和(川崎重工業)
	新村	豊(東京大学)	羽鳥	幸男(日本钢管)
	服部	堅一(住友重機械工業)	林	登(神戸製鋼所)
	三波	建市(富士製鉄)	矢島	浩(三菱重工業)
	吉識	雅夫(日本学術振興会)		
討議参加者	青木	真一(川崎製鉄)	青木	満(東京大学)
	大西	毅(三井造船)	岡田	陽雄(大阪造船所)
	片山	昌(富士製鉄)	川口	喜昭(住友金属工業)
	高野	正義(神戸製鋼所)	筒井	康治(日本海事協会)
	永井	明(日立造船)	日野	隆博(三菱重工業)
	深江	達郎(三菱重工業)	松村	裕之(川崎重工業)
	宮	健三(富士製鉄)		

目 次

概 要	1
1. まえがき	2
2. 研究の目的	3
3. 試験項目および供試材	4
4. 広幅試験片によるクラックアレスターの研究	6
4.1 標準サイズ温度勾配型二重引張試験	6
4.2 広幅温度勾配型破壊停止試験	14
4.3 広幅混成温度平坦型破壊停止試験	38
4.4 厚板広幅温度勾配型破壊停止試験	48
4.5 シャルピー試験	54
5. 厚板溶接部の脆性破壊発生特性の研究	59
5.1 Before Weld Notch および After Weld Notch の 縦溶接継手切欠広幅引張試験	59
5.2 V シャルピー試験	78
6. まとめ	95

概 要

本事業は巨大船に関する調査研究の一環として巨大船に使用される超厚板の脆性亀裂発生特性を調べるため、一昨年および昨年度に引き続き第101研究部会が試験研究を行なったものである。

本研究部会で実施した試験項目は次のとおりである。

(1) 広巾試験片によるクラックアレスターの研究

(i) 標準サイズ温度勾配型二重引張試験 (A-1)

供試材の標準サイズ温度勾配型二重引張試験による脆性破壊伝播特性値(K_c 値)を求め、広巾温度勾配型破壊停止試験に対する比較資料とした。

(ii) 広巾温度勾配型破壊停止試験 (A-2)

東京大学工学部大型構造物試験所の2,000トン構造物試験機と脆性クラック発生用高圧打撃装置を使用し、応力と温度勾配型を与えた試験片中にクラックを伝播させ、クラック伝播停止試験を行ない、前記(i)項の試験結果と比較した。

なお、試験片の大きさは $2,400\text{mm} \times 2,400\text{mm} \times 30\text{mm}$ で、この種試験では後述の(iii)項の試験片と共にわが国では前例のない大きさである。

(iii) 広巾混成温度平坦型破壊停止試験 (A-3)

品質の異なる2種の鋼材を溶接して作製した、いわゆる混成型の広巾試験片($2,400\text{mm} \times 2,400\text{mm} \times 30\text{mm}$)を用い、一様温度分布下での供試材の K_c 値を求め、前記(i)項および(ii)項の試験結果と比較した。

(iv) 厚板広巾温度勾配型破壊停止試験 (A-4)

広巾試験片($1,000\text{mm} \times 1,000\text{mm}$)により原厚 50mm から各種板厚まで機械的に切削したものについて二重引張試験を行なって K_c 値を求め、広巾試験片における板厚の力学的效果を調べた。

また、数例を選んで脆性亀裂伝播速度を実測した。

(v) シャルピー試験 (A-5)

前記(i)～(iv)項の供試材からVノッチ、プレスノッチの2種類の切欠のシャルピー試験片をそれぞれ採取し、シャルピー試験を行なってシャルピー特性を求め、前記広巾試験片による試験結果との関連を調べた。

(2) 厚板溶接部の脆性破壊発生特性の研究

(i) Before Weld Notch の縦溶接継手切欠広巾引張試験 (B-1)

一般に超厚鋼板の溶接は拘束度および冷却速度の大きい多層溶接となるので割れ等の欠陥を生じやすく、また、板厚方向の拘束が大となるため、わずかな欠陥からも脆性亀裂が発生する危険が大きい。このため2種の厚板広巾試験片($1,000\text{mm} \times 1,000\text{mm} \times 30\text{mm}$ および 50mm)について溶接前に切欠加工した。いわゆるWells-木原試験によって供試材の溶接部からの脆性破壊発生特性を求めた。

(ii) After Weld Notch の縦溶接継手切欠広巾引張試験 (B-2)

上記と同様な試験片で溶接後に切欠加工したものについて脆性破壊発生特性を求め、前記(i)項の試験結果と比較した。

(iii) シャルピー試験 (B-3)

前記(i)項および(ii)項の供試材およびその溶接部近傍数箇所からVノッチ、シャルピー試験片について試験を行なってシャルピー特性を求め、前記(i)項および(ii)項の試験結果との関連を調べた。

1. まえがき

日本造船研究協会第101研究部会は運輸省の巨大船総合研究委員会による調査結果にもとづいて「巨大船の脆性破壊防止対策に関する研究」をテーマとして昭和42年に発足したものである。

すなわち、巨大船総合研究委員会による「巨大船に関する技術資料」には鋼材の脆性破壊の問題に関し、次のように述べられており、これが本研究部会の設立の目的を端的にいい表わしている。

「一般にD級鋼は脆性破壊の発生、E級鋼は脆性亀裂の伝播を阻止する性能をもつものとされているが、はたしてE級鋼の性能でクラックアレスターの機能を発揮できるものかどうかは疑わしい。特に巨大船の場合に生ずると思われる。十分長い亀裂でも阻止するかどうかはE級鋼の配置とも関連して早急に解決しなければならない問題である。」

また、「厚板を溶接する場合にとくに拘束の強い溶接を考えると板厚方向の拘束や溶接残留応力の三軸応力性が増大し、かなり大きな内部クラックや表面クラックが生ずる場合も考えられる。このようなクラックが存在するとき、それから脆性破壊の伝播を開始する場合の強度についてははっきりしたことはわかっていない。」

本委員会において審議決定した研究計画の基本方針にもとづき実験担当委員を中心とした幹事会をたびたび開催し、詳細の技術的検討その他を行なった。

2. 研究の目的

脆性破壊の現象は板厚が厚いものほど発生しやすいので巨大船においては危険がきわめて大きく、また、万一発生した場合の災害は甚大なものがあり、巨大船建造上欠くべからざる研究課題である。

現在の船級協会規定では脆性破壊防止のためリベットシームをE級鋼を用いることにより溶接シームに置換えることを決めているが、E級鋼のクラックアレスターとしての定量的な性能評価はまだ明らかでない。本研究ではこのため、どの程度良質でどのくらいの寸法の鋼材をどのように使用すれば脆性破壊による大クラックを阻止しうるかを明らかにすることを第一の目的としている。

また、巨大船では40～50mmの超厚板が使用されるので溶接部の多層溶接や板厚方向の拘束が大きいため、わずかな欠陥でも薄板に比べ、はるかに脆性破壊が発生しやすいと予想されるので厚板溶接部より脆性破壊発生特性を究明することも本研究の重要な目的である。

3. 試験項目および供試材

上記の目的を達成するために表3.1に示す試験項目について研究を行なった。

表 3.1

研究項目符号	研究題目	研究小項目符号	試験名	供試材		試験担当場所
				*符号	脱酸	
A	広幅試験片によるクラック アレスターの研究	A-1	標準サイズ温度勾配 型二重引張試験	D-30 E-30	セミキルド キルド	東京大学
		A-2	広幅温度勾配型破壊 停止試験	D-30 E-30	セミキルド キルド	東京大学
		A-3	広幅混成温度平坦型 破壊停止試験	A-30 D-30 E-30	セミキルド セミキルド キルド	東京大学
		A-4	厚板広幅温度勾配型 破壊停止試験	E-50	キルド	富士製鉄 日本钢管
		A-5	シャルビ試験	A-30 D-30 E-30	セミキルド セミキルド キルド	東京大学
B	厚板溶接部の脆性破壊発生 特性の研究	B-1	Before Weld notch および After Weld notch の縫溶 接継手切欠広幅引張試 験	D-30 D-50	セミキルド キルド	船舶技研 富士製鉄
		B-2	シャルビ試験	D-30 D-50	セミキルド キルド	船舶技研

* 供試材符号

A : A級鋼 E : E級鋼

D : D級鋼 数字 : 板厚(mm)

また、供試材は表3.1に示すように板厚30mmおよび50mmのA級鋼、D級鋼およびE級鋼であるが、これらの化学成分および機械的性質を表3.2に示す。

表 3.2 供試材の化学成分および機械的性質

符 号	鋼 種	熱處理	板厚 (mm)	化 学 成 分 (%)						機 械 的 性 質									
				分 析 法	C	Si	Mn	P	S	Cu	A1	方 向	降伏点 (% $\delta_{0.02}$)	引張強度 (kg/mm ²)	伸び (%)	E _o	vT _e	vT _s	vT ₁₅
R E 3 0	E 級	焼準	30	レードル	0.12	0.21	1.00	0.016	0.019			L	28.6	44.6	30.0	27	-3.2	-3.4	-6.2
N E 3 0	E 級	焼準	30	レードル	0.13	0.23	0.80	0.011	0.020			L	30.0	44.0	32.0	24	-3.8	-3.8	-6.6
N E 5 0	E 級	焼準	50	レードル	0.11	0.20	0.91	0.024	0.021	0.08		L	29.7	44.0	37.5	(1.2)(-3.3)(-3.5)(-5.5)			
R D 3 0	D 級	H延D ままで	30	レードル	0.14	0.07	1.14	0.015	0.017			L	26.0	44.0	32.0	14	-3	-4	-27
N D 3 0	D 級	焼準	30	レードル	0.17	0.02	0.97	0.019	0.025	0.05		L	29.6	48.2	37.5	6	3	-4	-24
R D B 3 0	D 級	H延D ままで	30	レードル	0.16	0.03	1.00	0.014	0.021			L	27.2	44.2	31.0	10	-6	-10	-24
N D 5 0 A	D 級	焼準	50	チエック	0.18	0.02	1.10	0.014	0.024		0.003	C	27.1	44.6	28.0	4	-2	-2	-20
N D 5 0 B	D 級	焼準	50	レードル	0.11	0.26	0.92	0.014	0.022			L	27.4	43.0	35.3	21	-1.5	-8	-3.8
												L	33.1	47.9	30.4	21	-4.8	-3.0	-7.7

() : 1 / 2 サブサイズ試験片から求めた値

4. 広幅試験片によるクラックアレスターの研究

4.1 標準サイズ温度勾配型二重引張試験 (A-1)

4.1.1 研究目的

供試材の標準サイズ温度勾配型二重引張試験による脆性破壊伝播停止特性値(K_c 値)を求め、広幅温度勾配型破壊停止試験に対する比較資料とする。

4.1.2 供試材および試験片

供試材として船級協会規格の E 級鋼 R E 3 0 および N E 3 0 (キルド鋼, 板厚 3 0 mm), D 級鋼 N D 3 0 および R D 3 0 (セミキルド, 板厚 3 0 mm), A 級鋼 R A 3 0 (セミキルド鋼, 板厚 3 0 mm) を用いる。

標準サイズ二重引張試験の試験片形状寸法は図 4.1.1 に示すとおりである。

4.1.3 試験内容および方法

供試鋼板から図 4.1.1 に示す二重引張試験片を採取し、脆性クラック伝播停止特性を調査する試験として、温度勾配型二重引張試験を実施した。使用した試験機は東京大学工学部船舶工学科の 400 トン構造物試験機である。

試験方法は試験片の脆性クラック発生部(以下発生部といふ) の機械加工で作った切欠の先端に脆性クラックの発生を容易にするため高速度鋼で製作したプレスノッチ用ナイフ(刃角度 45°) を 50 トンアムスラ型万能試験機で圧入し、深さ約 2 mm のプレスノッチを入れる。次に試験片の脆性クラック伝播部(以下伝播部といふ) を試験機取付用タブプレートに溶接したのち、試験機に取付け、所定の引張荷重(引張応力) を伝播部にあたえる。一方、発生部は別に設置した 100 トン引張荷重装置で引張荷重を加え脆性クラックを発生させる。

温度調整は図 4.1.2 に示すように発生部と伝播部を仕切った木製冷却槽をクラック伝播径路を直接冷却するよう、試験片の表裏面 2 ケ所に取付けたのち、発生部は脆性クラックの発生を容易にするため液体窒素で冷却し、また、伝播部は所定の温度分布になるようさらに冷却槽を 6 区画に仕切り、各区画に注入したエチルアコールの温度をドライアイスで調整した。20 °C 以上の温度調整が必要な時は区画に温水を注入し水中用ヒータで温度を調整した。

温度測定は銅-コンスタンタン熱電対をクラック伝播予想線上(切欠線上) 6 ケ所にスポット溶接し、自記多打点熱電記録計で測定した。熱電対は直接エチルアルコールや温水に触れないようにした。

クラック伝播速度ならびにクラック伝播に伴う荷重の変化を一部の試験片について測定したが、その測定法は後述の 4.2.3 に記載されている方法によった。

なお、試験要領は図 4.1.2 に示す通りである。

4.1.4 試験結果および考察

標準サイズ温度勾配型二重引張試験結果を表 4.1.1 に示す。

脆性クラック伝播停止位置と伝播部温度分布の関係を求め、次式より求まる供試材の脆性破壊伝播停止特性値(K_c 値) と温度の関係を求めると図 4.1.3 (1)~(5) となる。

$$K_c = \sigma f(r) \sqrt{\pi c}$$

ここで

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

$$\sigma = \frac{C}{B}$$

σ = グロス応力(%)

C = 停止クラック長さ(mm)

B = 試験片幅(mm) (本試験では 500 mm)

船級協会統一規格では D 級鋼および E 級鋼に対して V シャルビ衝撃値として、それぞれ 0 ℃ で 4.8 kg - m 以上および - 10 ℃ で 6.2 kg - m 以上の値が要求されている。これらの値を日本溶接協会規格 (WES) 「低温構造用鋼材質判定基準」で採用されている線型破壊力学を応用した思想を適用すると、最低使用温度 0 ℃、使用応力 13%_{ud}、標準板厚 30 mm とした場合設定クラック長さ C をそれぞれ D 級鋼の場合には C = 60 mm、E 級鋼の場合には C = 240 mm としたことにに対応することが明らかにされている。⁽¹⁾

図 4.1.3(1)～(4)の結果からクラック停止温度とクラック伝播限界応力の関係を、クラック長さ C をパラメータとして C = 60 mm および C = 240 mm について示すと図 4.1.4(1)～(4)のようになる。なお、上述の日本溶接協会規格 (WES) で規定されている A 種および B 種に対応する C の値、100 mm および 10 mm としたときの限界応力 - 温度曲線も参考として併せ示した。

図 4.1.5(1)～(6)はクラック伝播速度およびクラック伝播にともなう荷重変化を測定したものである。測定例は少ないがこれから言えることはクラック伝播中荷重が低下する傾向を示し、伝播停止附近で初めの荷重の 70%～80% になることがわかる。これは試験機の剛性、試験片長さその他にも関係するが、伝播中の荷重状態が荷重一定 (fixed load condition, P/P₀ (初期荷重) = 1) というよりも、むしろ変位一定 (fixed grip condition) の状態に近いことを示しているように思われる。図中 “最終荷重” とはクラック伝播停止後、試験機荷重目盛板より読んだものである。

このような現象は次節以下で述べる伝播停止試験でも生じているので、今後この影響をも考えに入れた解析をして停止試験の結果を整理する必要があると考えられる。

(1) 町田 進 : 日本高圧力 Vol.2 No.1 1964

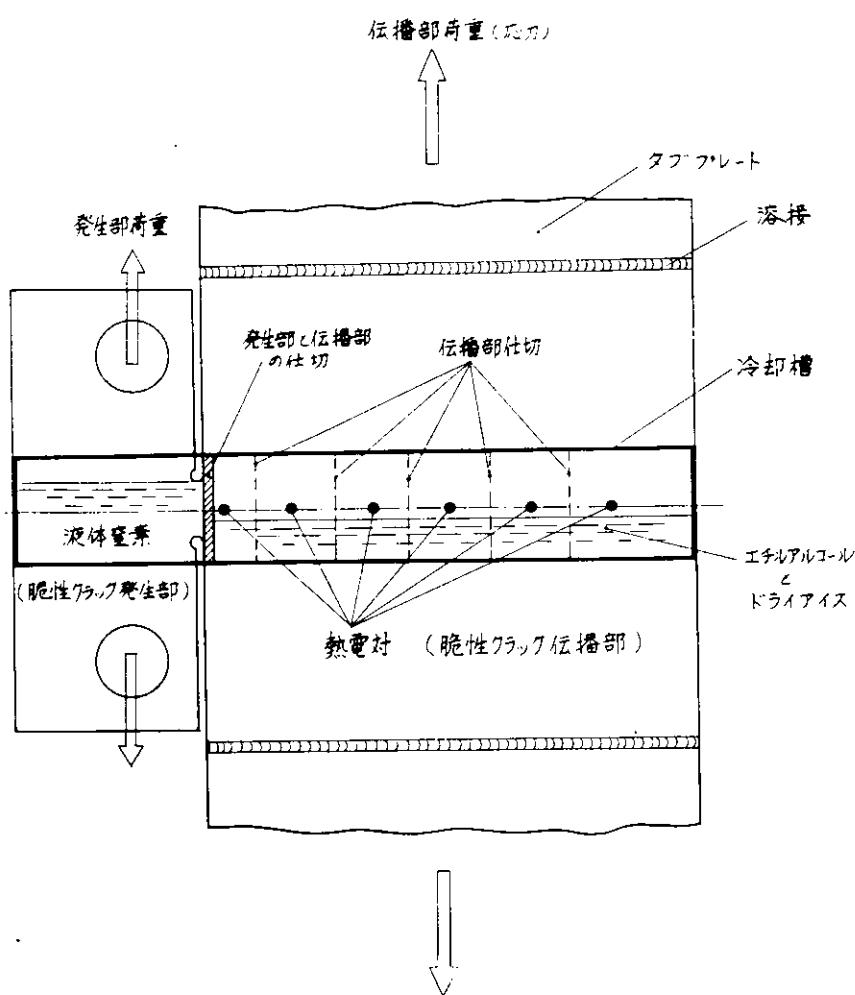
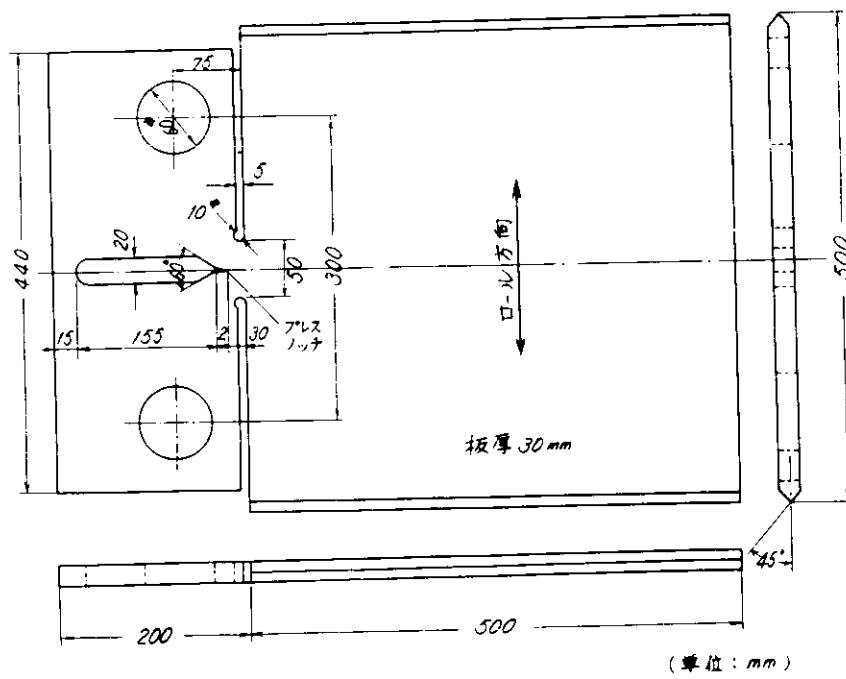


表 4.1.1 標準サイズ温度勾配型二重引張試験結果(A-1)

鋼種	試験片符号	グロス応力 (kg/mm ²)	クラック停止温度		停止クラック長さ (mm)	修正グロス応力 (kg/mm ²)	Kc値 (kg \sqrt{mm} /mm)
			(°C)	10 ³ /(°K)			
D級	N D 3 0 - 1	7	15	3.47	275	8.1	240
	N D 3 0 - 2	7	15	3.47	212	7.6	195
	N D 3 0 - 3	10	20	3.41	245	11.2	310
	N D 3 0 - 4	12	31	3.29	330	15.4	505
	N D 3 0 - 5	15	37	3.23	375	21.6	740
	N D 3 0 - 6	17	42	3.17	370	24.1	820
	N D 3 0 - 7	20	41	3.18	360	27.6	930
	R D 3 0 - 1	7	12	3.51	305	8.4	260
	R D 3 0 - 2	9	19	3.42	298	10.8	330
	R D 3 0 - 3	10	20	3.41	335	13.0	420
E級	R D 3 0 - 4	12	25	3.36	270	13.9	405
	R D 3 0 - 5	17	35	3.25	350	23.0	760
	R E 3 0 - 1	9	-17	3.91	170	9.4	222
	R E 3 0 - 2	10	8	3.56	300	12.1	375
	R E 3 0 - 3	12	10	3.53	295	14.4	440
	R E 3 0 - 4	15	10	3.53	240	16.7	466
	R E 3 0 - 5	16	19	3.42	290	19.1	575
	R E 3 0 - 6	17	20	3.41	300	20.6	630
	R E 3 0 - 7	20	24	3.37	290	23.8	720
	R E 3 0 - 8	22	24	3.37	290	26.2	790
A級	R E 3 0 - 9	9	0	3.66	265	10.3	300
	N E 3 0 - 3	12	12	3.51	280	14.0	415
	N E 3 0 - 7	17	15	3.47	290	20.3	610
	N E 3 0 - 6	9	1	3.65	265	10.4	300
	N E 3 0 - 4	15	25	3.36	360	20.7	695
	N E 3 0 - 5	10	-10	3.80	165	10.4	236
	R A 3 0 - 1	12	35	3.25	340	15.8	515
	R A 3 0 - 2	9	17	3.45	285	10.6	315
	R A 3 0 - 3	10	23	3.38	320	12.6	400

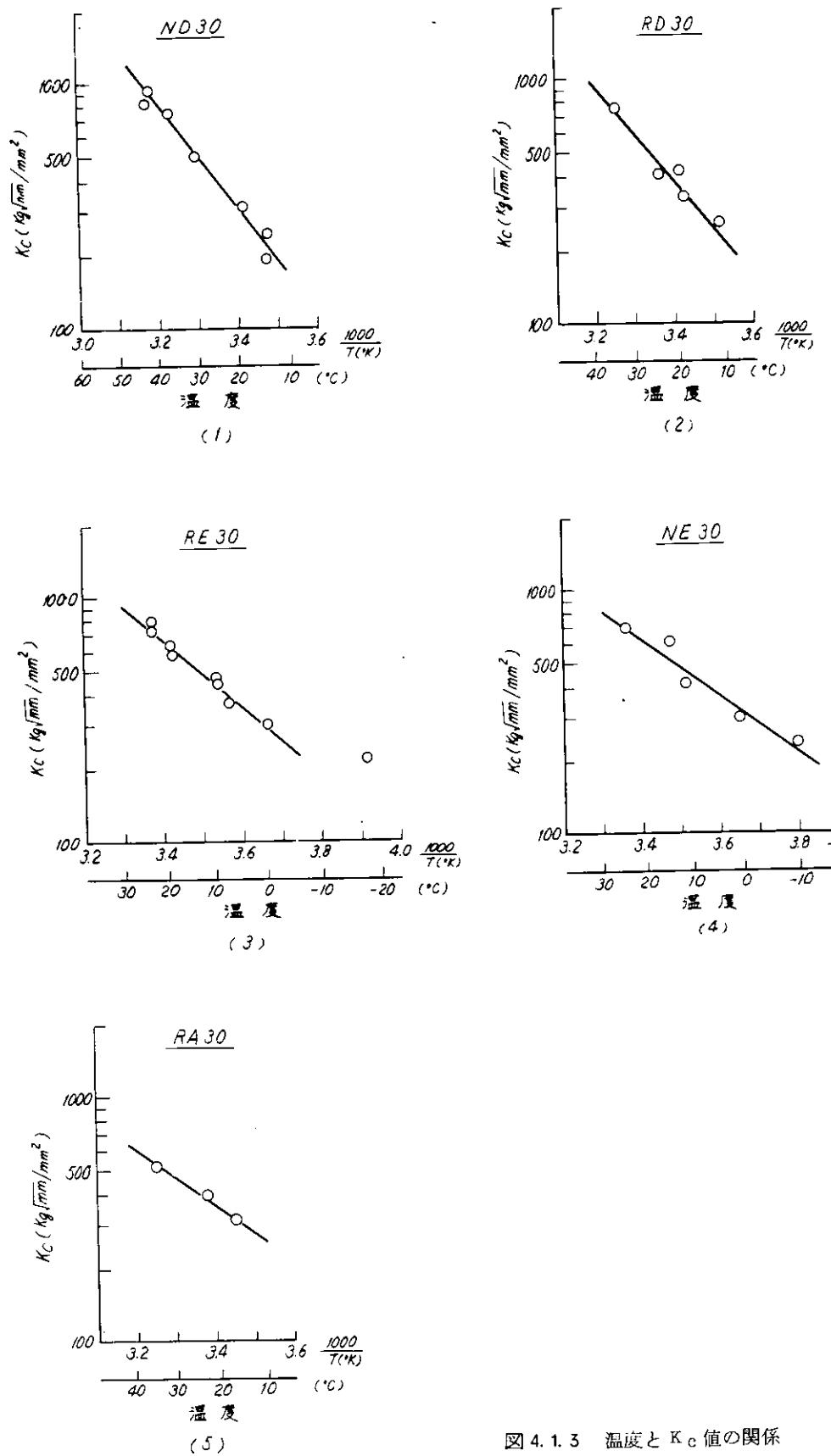
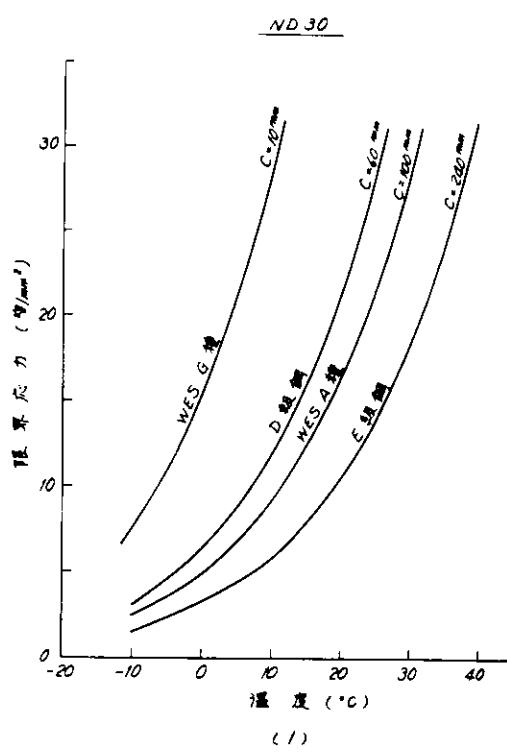
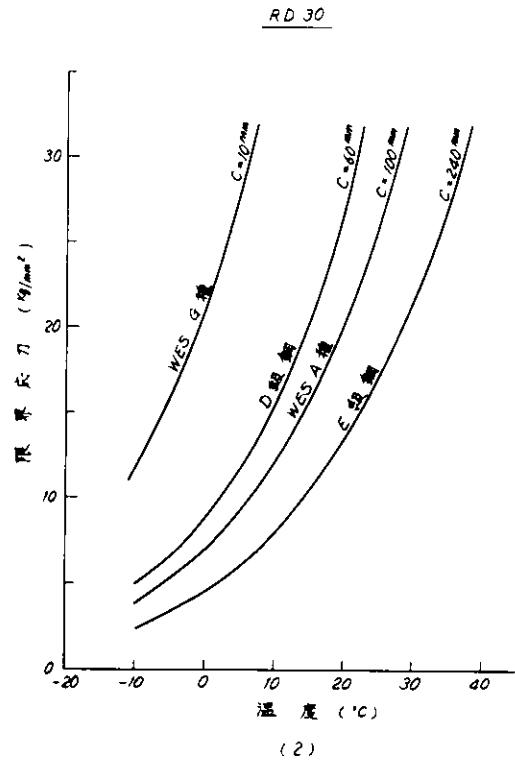


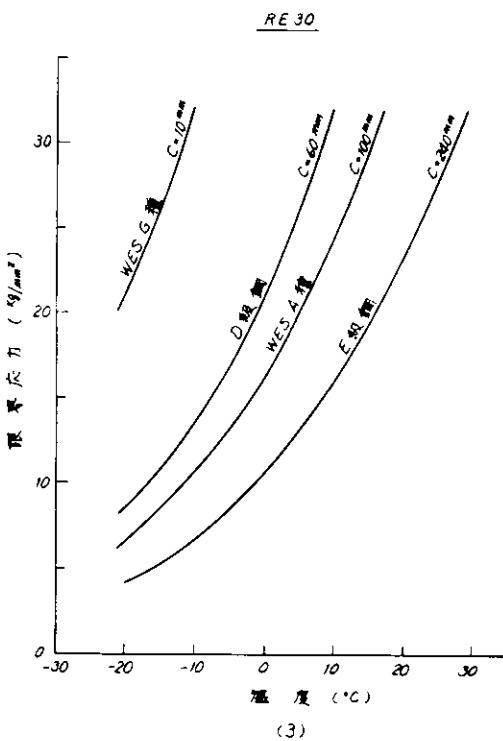
図 4.1.3 温度と K_c 値の関係



(1)



(2)



(3)

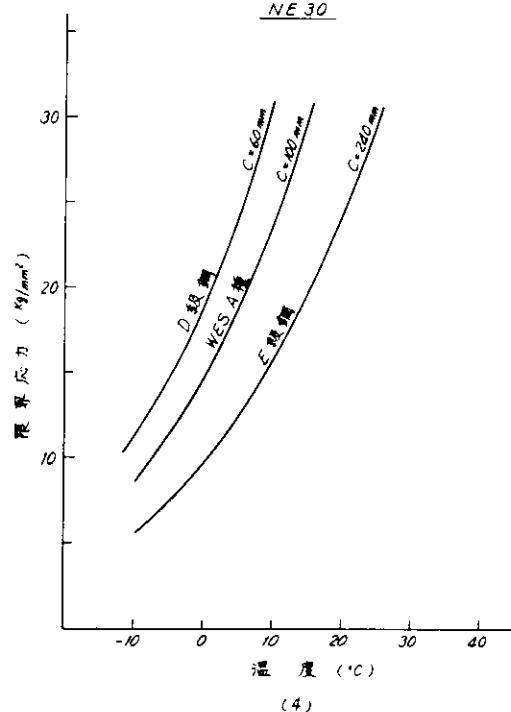


図 4.1.4 クラック停止温度と限界応力の関係

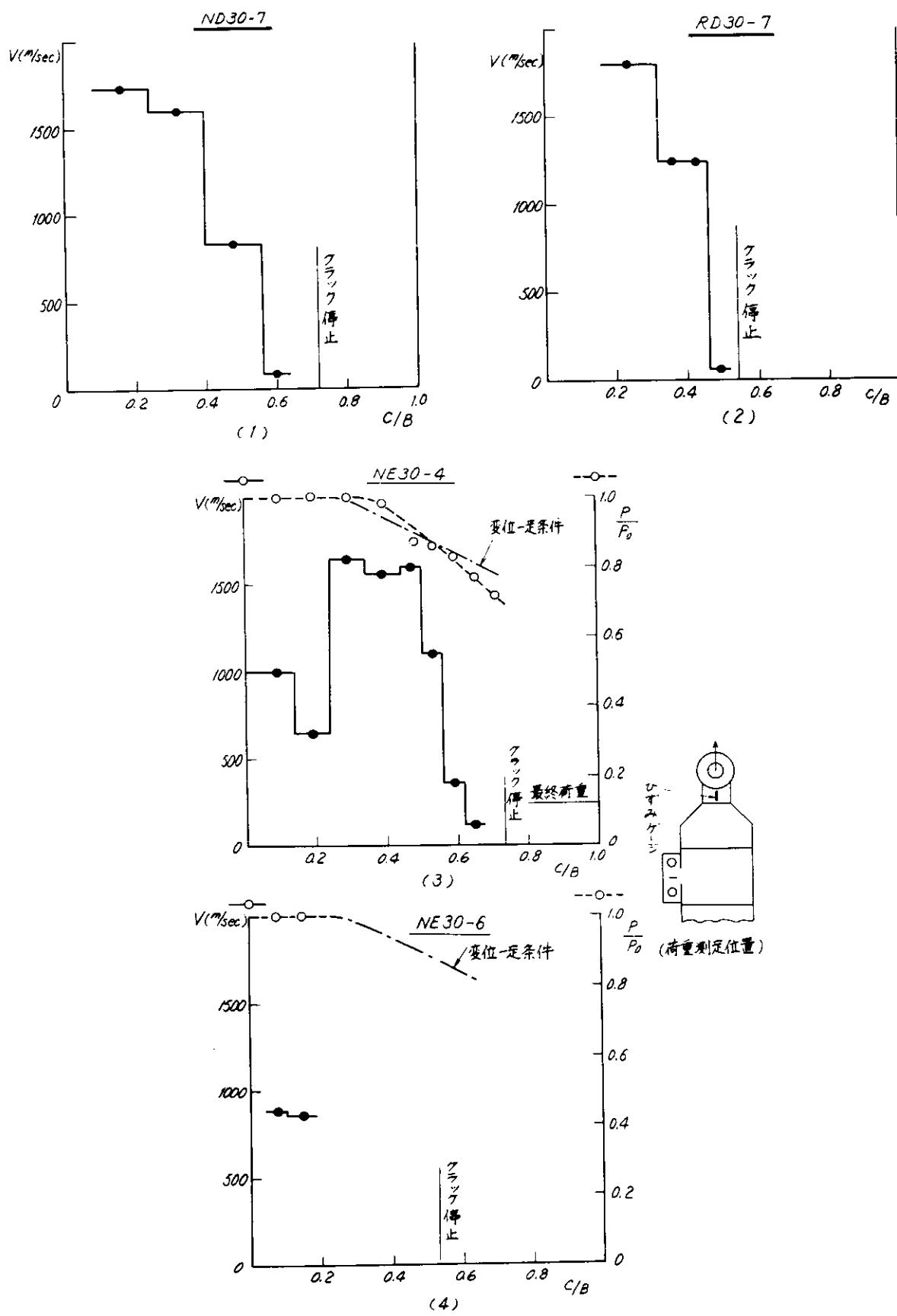


図 4.1.5 クラック伝播速度および荷重変化

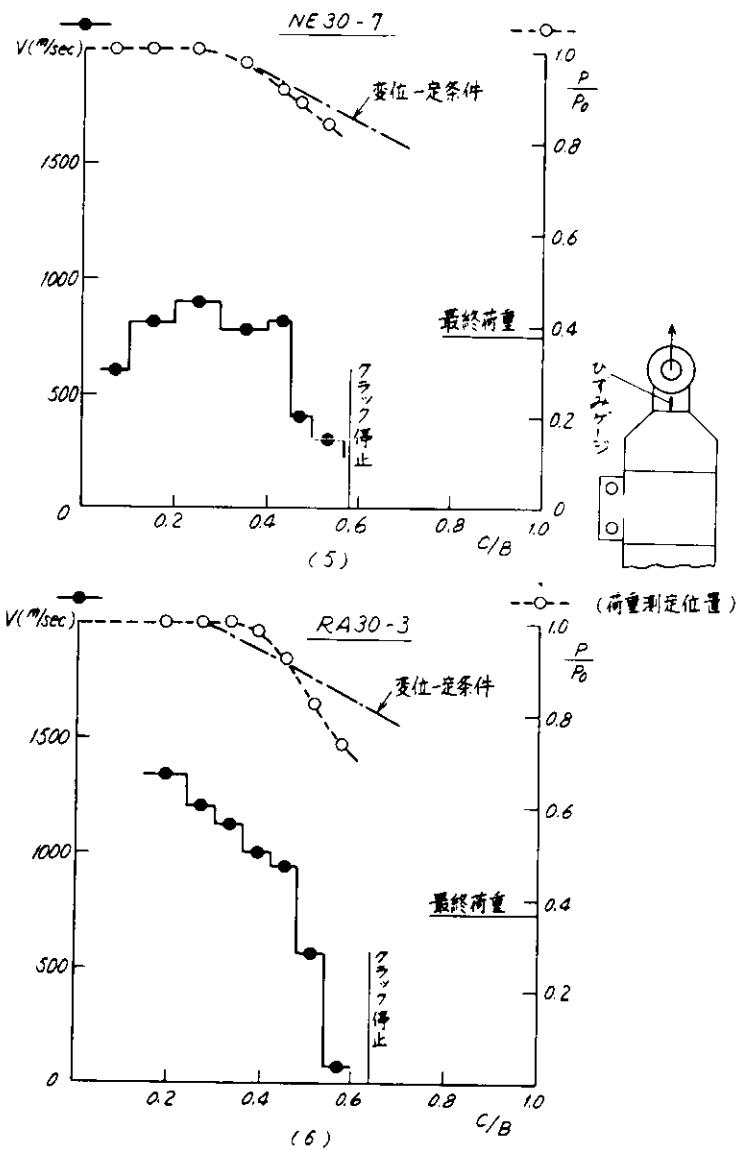


図 4.1.5 クラック伝播速度および荷重変化(続き)

4.2 広幅温度勾配型破壊停止試験（A-2）

4.2.1 研究目的

幅2,400mmの広幅試験片を用い、供試材の長大クラックに対する脆性破壊伝播停止特性値（Kc値）を求め、標準サインズ温度勾配型二重引張試験より得られたKc値と比較検討する。

4.2.2 供試材および試験片

供試材としては、船級協会規格のE級鋼N E 3 0およびR E 3 0（キルド鋼、板厚30mm）とおよびD級鋼N DおよびR D 3 0（セミキルド鋼、板厚30mm）を用いる。

試験片形状は、図4.2.1に示す通りである。

4.2.3 試験内容および方法

東京大学工学部大型構造物試験所の2000トン構造物試験機と脆性クラック（以下クラックといふ）発生用高圧打撃装置を使用し、応力と温度勾配を与えた試験片中にクラックを伝播させ、クラック伝播停止試験を行なった。

また、クラック伝播速度ならびにクラック伝播に伴う応力変化・荷重変化を記録した。

温度分布の調整は、11区画に仕切った冷却槽をクラック伝播経路をはさんで試験片表裏4ヶ所に取付け、試験条件に応じ、各区画に入れたエチルアルコールの温度をドライアイスで加減することにより調整した。20℃以上の温度調整のときはその近くの冷却槽区画に温水を注入し、水中用ヒータを用い行なった。切欠部近傍はクラックの発生を容易にするため局部的に液体窒素で冷却した。

温度測定は切欠伝播線上12ヶ所に銅-コンスタンタン熱電対をスポット溶接し、自記多打点式熱電対記録計により行なった。

動的な応力変化は抵抗線ひずみゲージを試験片表裏面に、荷重変化はひずみゲージを試験機のシヤックルに貼布し、ひずみ計平衡装置とシンクロスコープにより、ひずみの時間的変化として記録した。

クラック伝播速度の測定は次の方法によって行なった。伝播線上に適当な間隔でクラック・ディテクター（クラック伝播速度測定用に作った特殊ゲージで長さ120mmのアドバンス線をポリエチルベースに接着してある）を貼布し、各クラック・ディテクターを別に組んだクラック伝播速度測定装置を介しシンクロスコープに接続する。クラックの伝播によりクラック・ディテクターが切断されるごとにシンクロスコープへの入力電圧が変化しステップ状の記録がえられ各ステップ間の時間から2枚のクラック・ディテクター間の平均速度が求まる。

試験終了後、試験片をガス切断し、破面様相の観察によりクラック長さを測定した。

試験要領を図4.2.2に、試験片取付状態を図4.2.3に示す。

なお、試験片負荷状態での試験片クラック伝播線上の応力が均一であるかをチェックするために応力分布を抵抗線ひずみゲージにより静的に計測した。

4.2.4 試験結果および考察

広幅温度勾配型破壊停止結果を表4.2.1に示す。クラック停止位置の温度とKc値（算出式はA-1項目参照）の関係

を求めるとき図4.2.4(1)～(4)となる。

標準サイズ温度勾配型二重引張試験より求まった結果と比較すると、広幅試験より求まる K_c 値が大きくなっている。図4.2.4(4)は、実験点が一部に集中しているが、これは低応力で予定したクラックが発生せず負荷応力を広い範囲に変えることができなかったためである。

なお、前節で述べたようにD級鋼に対しては設定クラック長さ $C = 60\text{ mm}$ 、E級鋼に対しては、 $C = 240\text{ mm}$ として、限界応力と温度の関係を広幅と標準サイズとの結果について示すと図4.2.5(1)～(3)が得られる。この結果によると限界応力曲線は広幅の場合の方が低温側にあることが知れる。

そこで標準サイズ温度勾配型二重引張結果と一致するためには広幅試験片における停止クラックをどの程度の長さに換算すればよいかという、クラック長さ C に有効性を持たせた有効クラック長さ C_{eff} (Effective Crack Length)を求め、図4.2.6に示した。図中の式は池田、矢島らが温度勾配型ESSO試験による脆性破壊停止試験の結果から求めたクラック長さ C と有効クラック長さ C_{eff} との関係式である。

一方、クラック進展力に有効性を持たせるとの考え方立脚して、広幅温度勾配型試験結果が標準サイズ温度勾配型二重引張試験結果と一致するための有効 K 値(Effective K -value)を求め図4.2.7に示した。これによると有効 K 値による整理の方がややばらつきが少くなるようである。

図4.2.8(1)～(5)は、クラック伝播速度、クラックの伝播に伴う応力変化および荷重変化の測定結果を示したものである。クラック伝播速度は測定誤差がかなり入っていると考えられるが、打撃エネルギーおよび温度勾配の影響で、一般にクラック発生側で高く、停止点に近づくにつれて急激に低下している。しかし、クラックが発生後すぐに枝分れした場合にはやや複雑な様相を示している。クラック伝播速度は打撃エネルギー、温度の外に作用応力および材料によって決まるものと考えられるが、表4.2.1に示すように打撃エネルギーには、 $350\text{ kg}\cdot\text{m}$ のものもあるがその他は $200\text{ kg}\cdot\text{m}$ あるいは $250\text{ kg}\cdot\text{m}$ であり、図4.2.10に示すように $C/B = 0.2$ (ノッチよりの距離 480 mm)での温度はND30-4を除しては -40°C 前後でノッチ部は液体窒素で冷却しているので $C/B = 0.2$ 以下の温度分布はいずれもあまり大きな差はないと考えられるので、 $C/B = 0.2$ 以下で測定されたクラック伝播速度の最高値(一般に最高クラック伝播速度)と作用応力 σ の関係を求めると図4.2.9のようになり供試鋼材の場合にはクラックの最高伝播速度は作用応力にはあまりよらない。

クラック伝播にともなう荷重の動的変化の測定結果によると、クラック長さが試験片幅の約40%前後から荷重の下降が認められた。このような現象は今回の研究ではじめて明らかにされたことであり、上述した有効クラック長さ、有効 K 値とも関連して試験片寸法の影響あるいは試験機剛性の問題と同時に将来検討しなければならない重要な点である。

図4.2.8(1)は、クラック伝播線上のクラック伝播にともなう動的応力変化の測定値をBroberg⁽²⁾による理論計算と比較したものであるが、測定値はクラック伝播速度と横波の速さの比 $m = \frac{V}{C_r} = 0.4 \sim 0.8$ の間にあるがこれは同図に示したクラック伝播速度と少し開きがあるよう見える。これはひずみおよびクラック伝播速度測定の誤差や、ひずみゲージの動的追従性によっていると思われる。

各試験の温度分布とクラック伝播経路は図4.2.10(1)～(4)に示してある。クラックが枝分れを起しているものもあるが、この現象は一般に高応力の場合に多いようである。そこでこの現象に対する打撃エネルギーの影響も考慮し、それらの関係を図4.2.11に示した。この図中には次節で述べる広幅混成伝播試験の結果も同時に記入してあるが、傾向としては高圧力、高打撃エネルギーの場合に枝分れが生じやすいことが知れる。

なお、枝分れした場合の K_c 値はもっとも長いクラック長さについて探ったものであることを付記する。

なお、参考までに試験片のクラック伝播線上の応力分布の均一性をチェックした結果を図 4.2.1.2 に示してあるがこれよりほぼ均一な応力分布をしていることが明らかであろう。

(2) Broberg : Arkiv För Fysik 18-10, 1960

表 4.2.1 広幅温度勾配型破壊停止試験結果 (A-2)

鋼種 級	試験片符号	クロス応力 (kg/mm ²)	打撃エネルギー (kg-m)	クラック停止温度		停止クラックさ 長(mm)	修正クロス応力 (%)	Kc値 (kg/mm ² /mm ^{0.5})	有效クラック 長さ Ceff (mm)	有効Kc値 KCeff (kg/mm ² /mm ^{0.5})	備考
				℃	10 ³ /°K)						
D	ND30-1	2.0	2.50	3.5	3.25	1.680	27.0	1.960	18.0	6.50	枝分れ C=2.00
	ND30-2	1.7	2.50	3.2	3.28	1.480	20.9	1.425	22.5	5.60	
	ND30-3	2.0	2.00	3.6	3.24	1.800	28.8	2.150	17.5	6.90	枝分れ C=1.70
	ND30-4	9	2.50	2.2	3.39	1.600	11.7	8.30	23.5	3.30	
	ND30-5	1.5	2.00	1.9	3.42	1.410	17.9	1.180	7.5	2.74	
E	RD30-1	1.3	2.50	3.5	3.25	1.740	18.1	1.340	5.60	7.60	
	RD30-2	1.7	2.00	1.4	3.48	1.225	19.2	1.190	6.1	2.70	枝分れ C=2.00
	RD30-3	9	2.50	2.2	3.39	1.460	11.0	7.45	4.20	4.00	
	RD30-4	1.1	2.00	2.5	3.36	1.480	13.5	9.20	4.00	4.78	
	RE30-1	1.3	—	1.5	3.47	1.500	16.1	1.110	3.50	5.30	
F	RE30-2	9	—	7	3.57	1.400	10.7	7.10	4.05	3.90	
	RE30-3	7	3.50	1	3.65	6.50	7.1	3.25	5.70	3.00	
	RE30-4	1.7	2.50	1.7	3.45	1.410	20.4	1.360	2.45	5.70	枝分れ C=1.000
	RE30-5	7	2.00	5	3.60	1.350	8.3	5.36	5.87	3.54	
	NE30-1	1.3	2.50	2.1	3.40	1.840	19.1	1.445	4.17	6.90	枝分れ C=1.160
G	NE30-2	1.7	2.50	1.4	3.48	1.560	21.6	1.510	17.4	5.05	
	NE30-3	1.5	2.50	2.3	3.38	1.880	22.9	1.720	3.36	7.44	枝分れ C=1.280
	NE30-4	1.6	3.50	1.8	3.44	1.610	20.8	1.480	2.67	6.02	
	NE30-5	1.4	3.50	1.9	3.42	1.570	17.9	1.255	4.04	6.37	

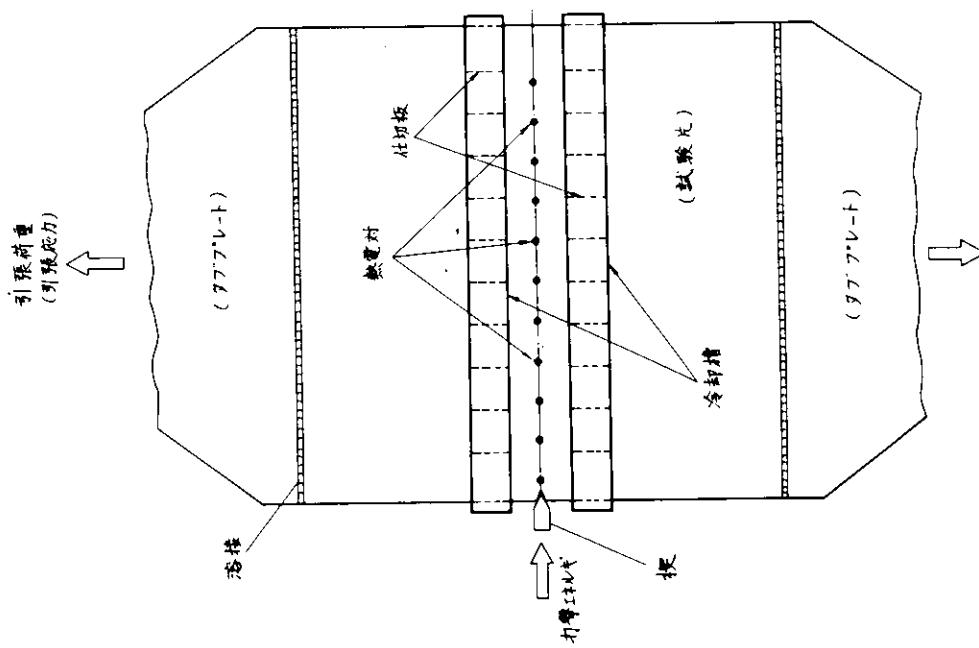


図 4.2.2 試験要領(A-2)

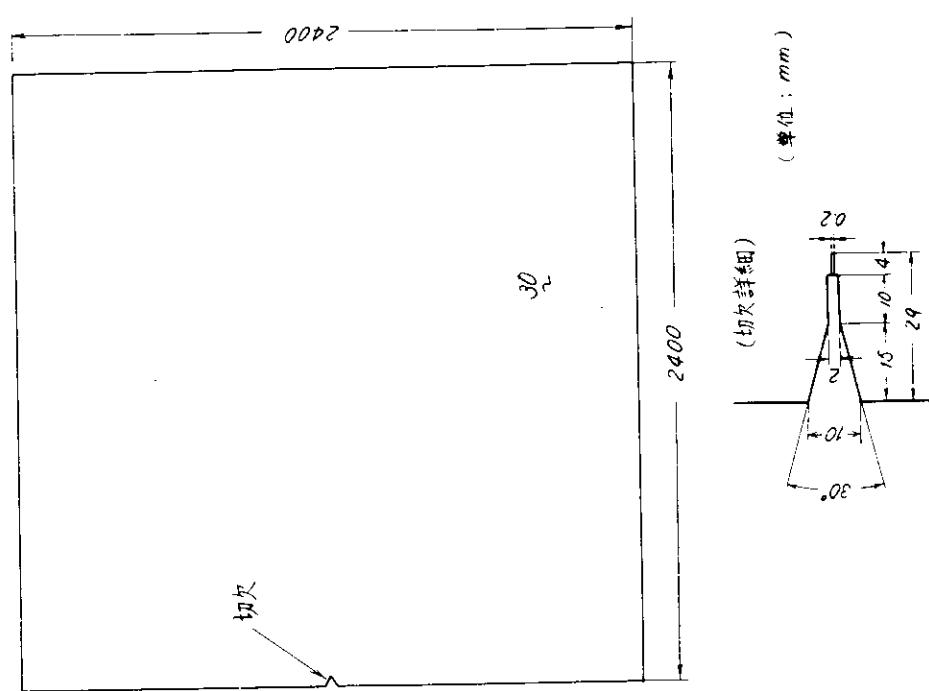


図 4.2.1 試験片形状寸法(A-2)

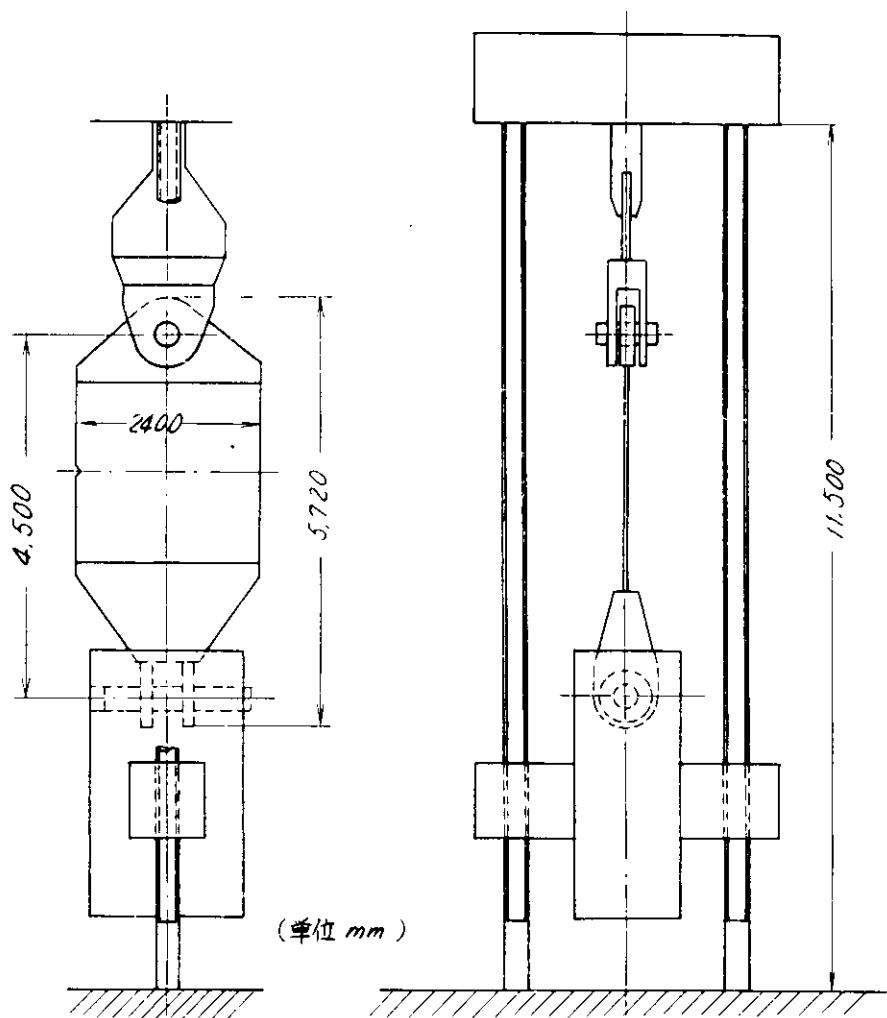


図 4.2.3 試験片取付状態

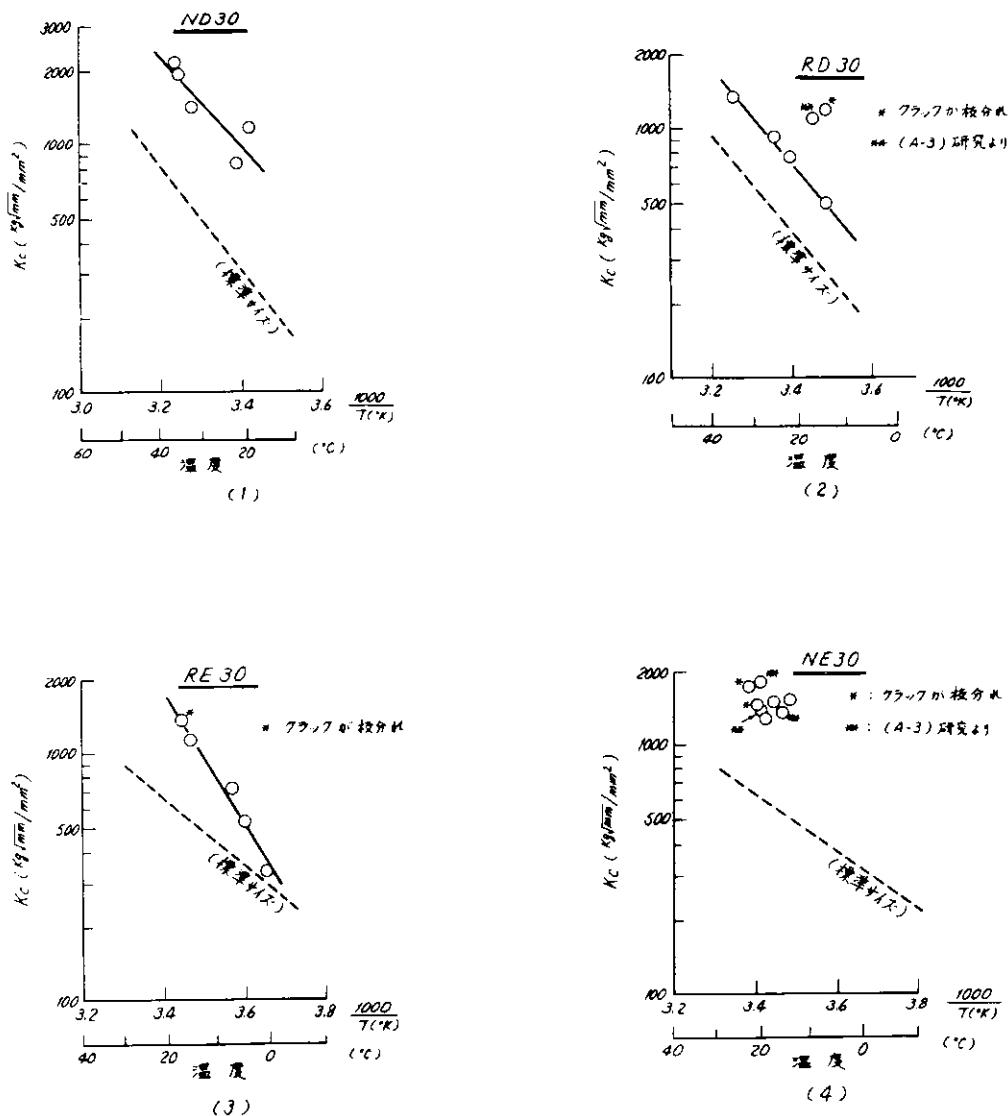


図 4.2.4 温度と K_c 値の関係

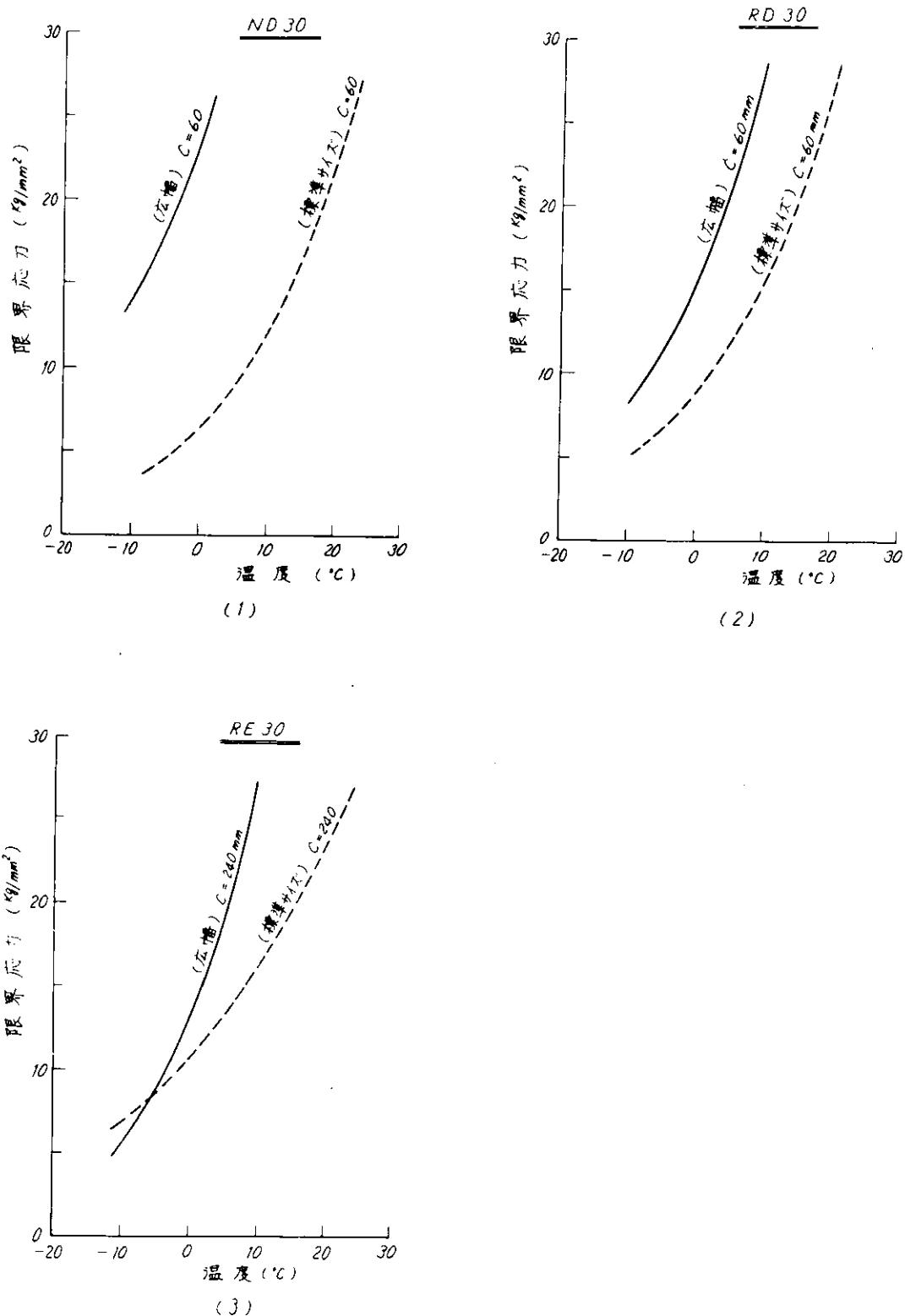


図 4.2.5 クラック停止温度と限界応力の関係

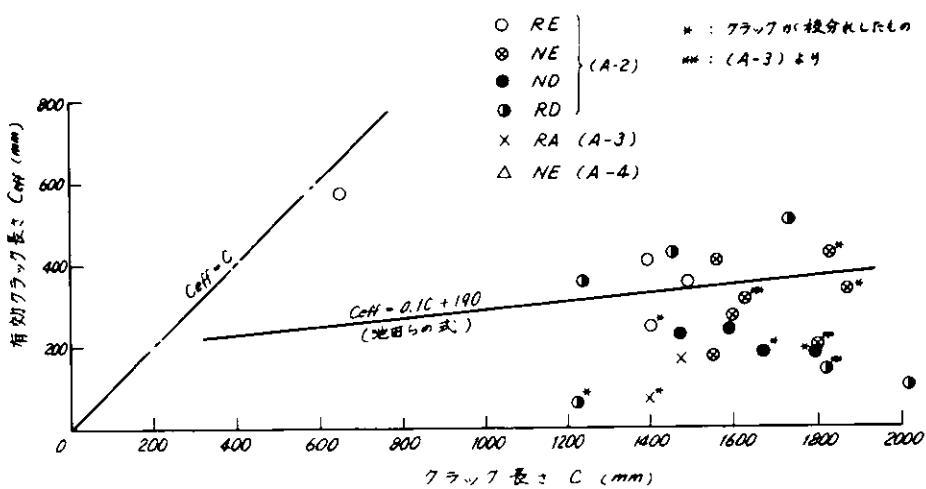


図 4.2.6 クラック長さと有効クラック長さの関係

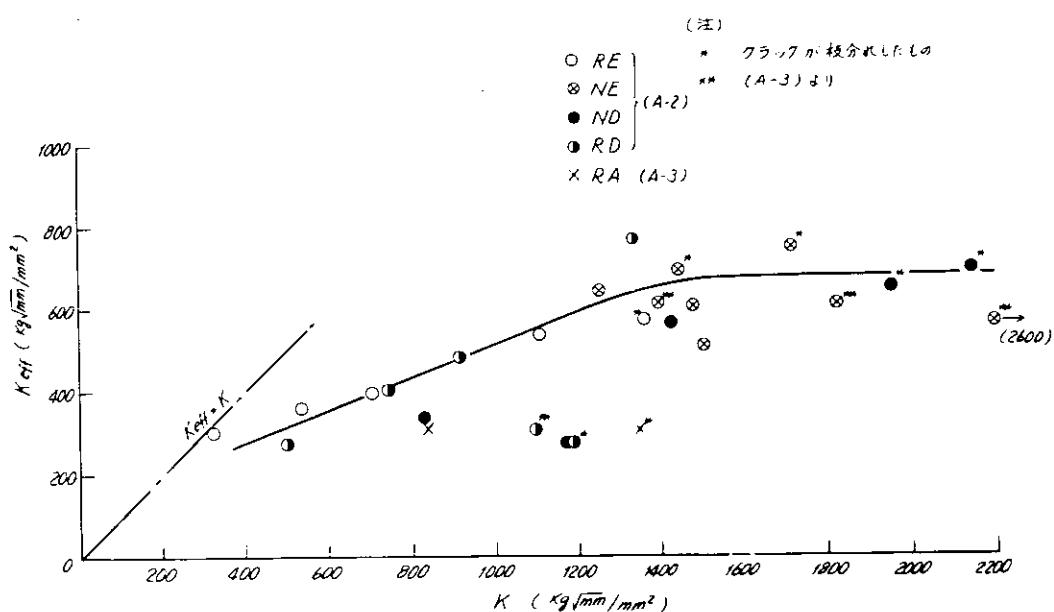


図 4.2.7 K と K_{eff} の関係

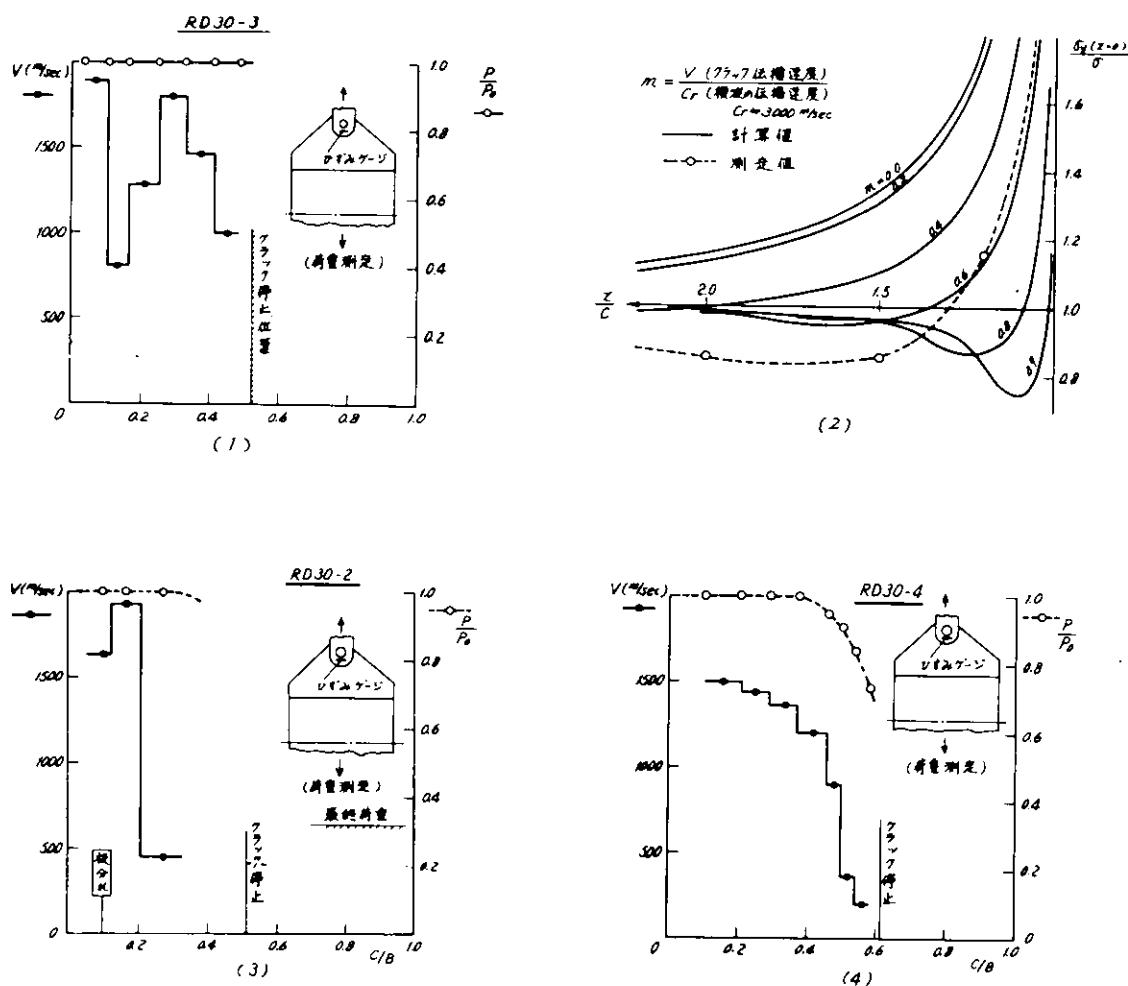


図 4.2.8 クラック伝播速度および応力・荷重の動的変化

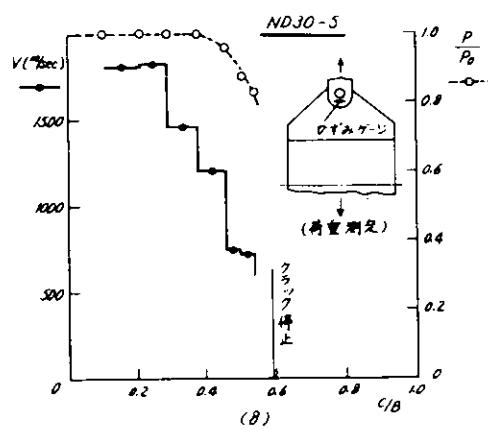
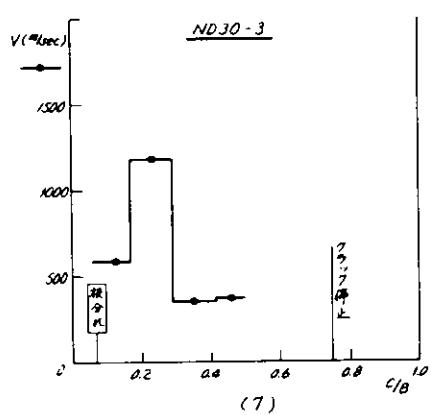
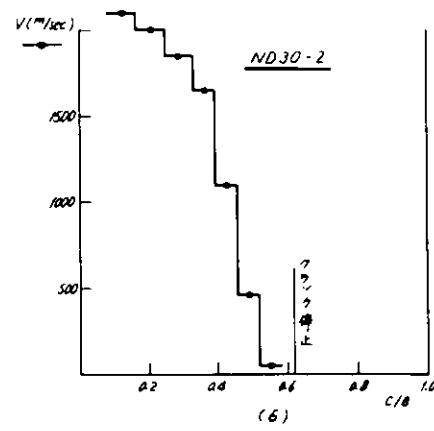
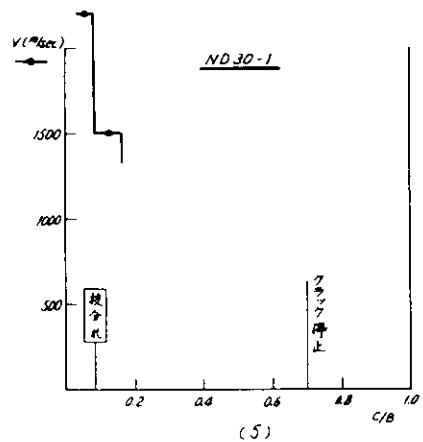


図 4.2.8 クラック伝播速度および応力・荷重の動的変化(続き)

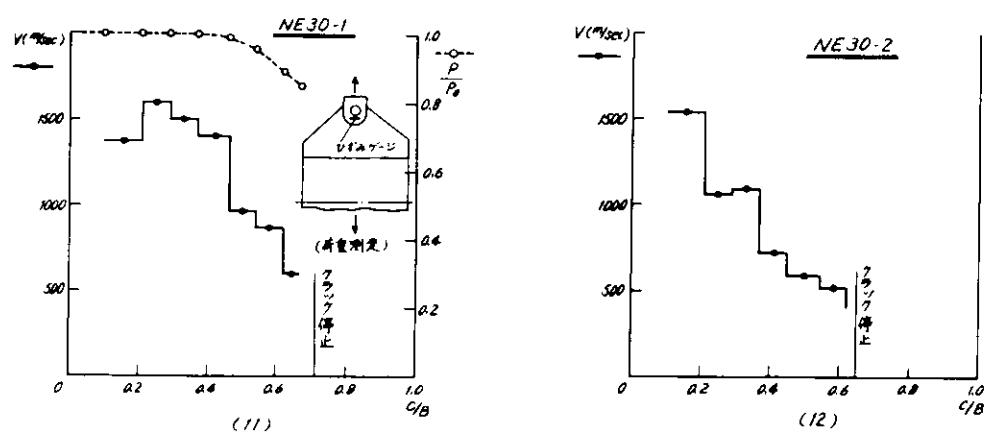
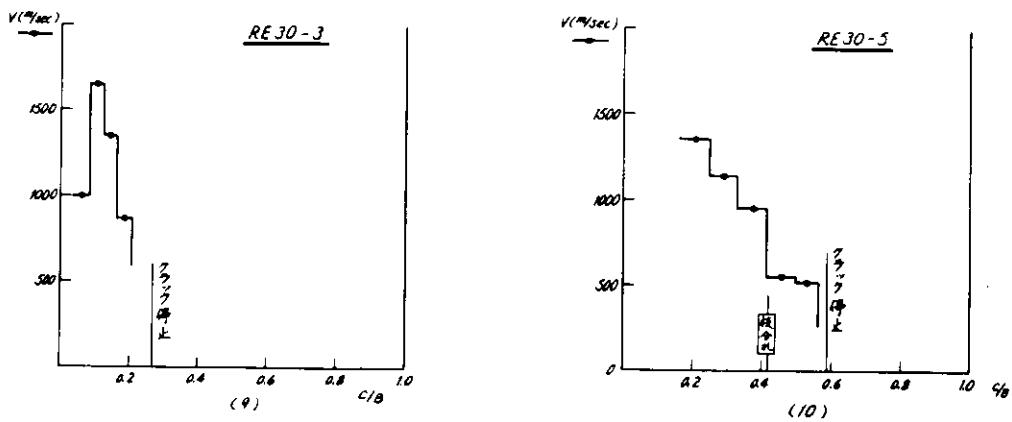


図 4.2.8 クラック伝播速度および応力・荷重の動的変化(続き)

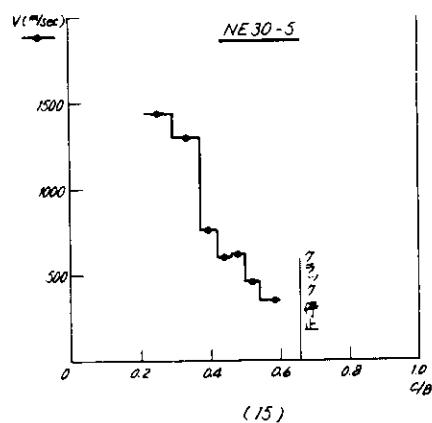
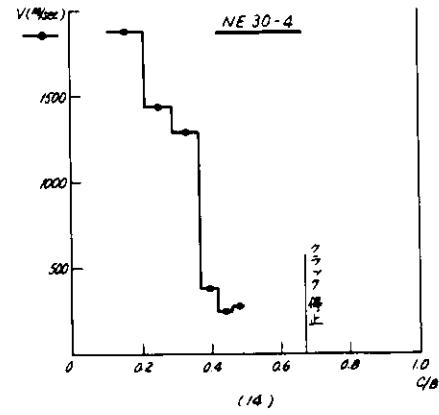
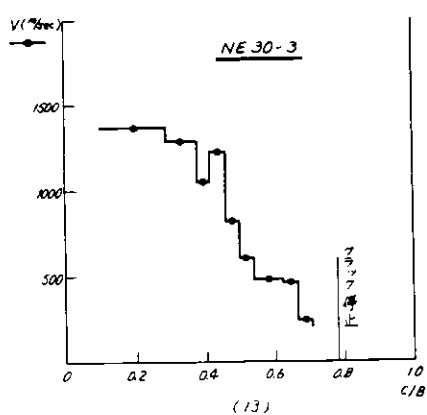


図 4.2.8 クラック伝播速度および応力・荷重の動的変化(続き)

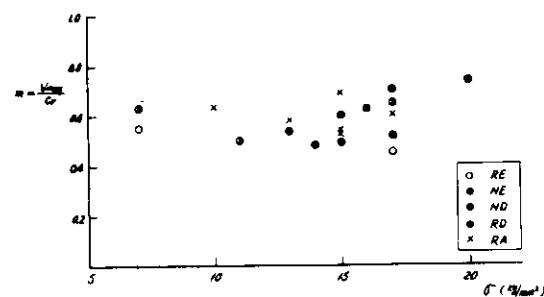


図 4.2.9 最高クラック伝播速度と作用応力

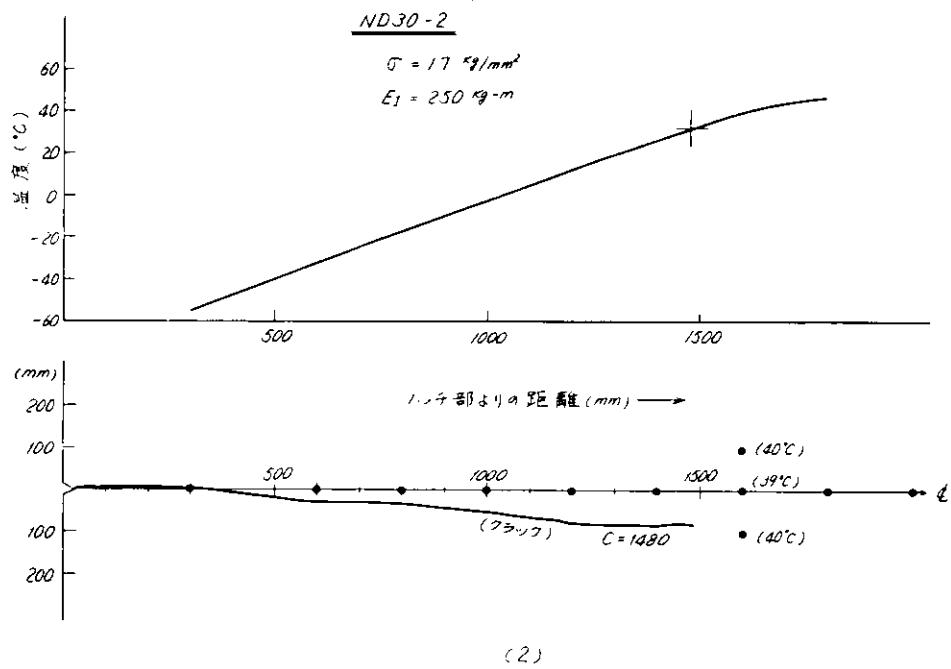
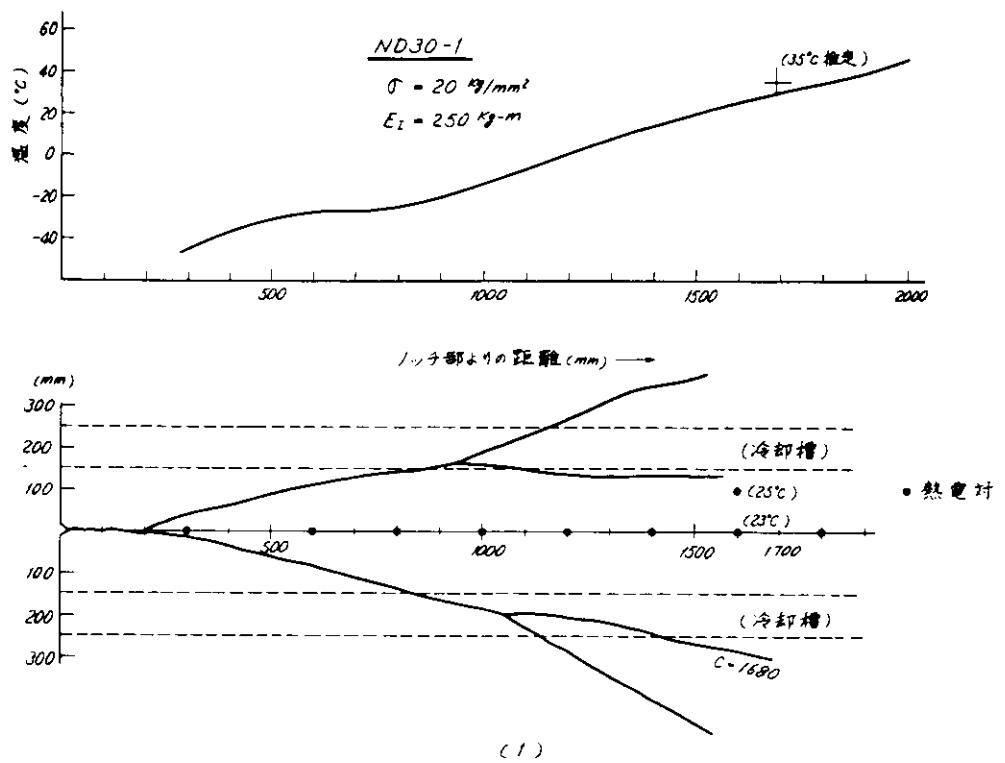


図 4.2.1.0 溫度分布とクラック伝播経路

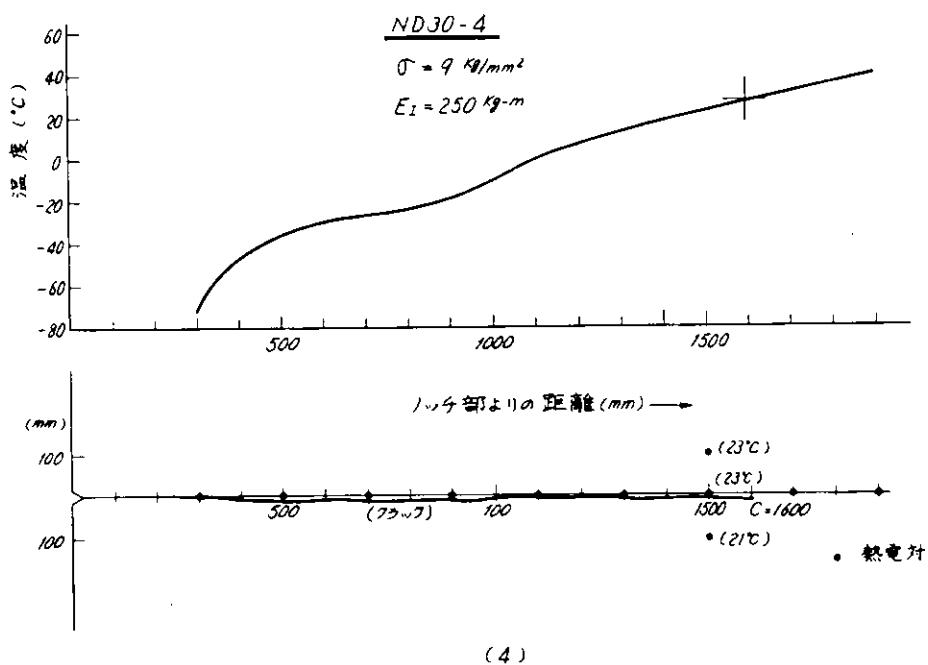
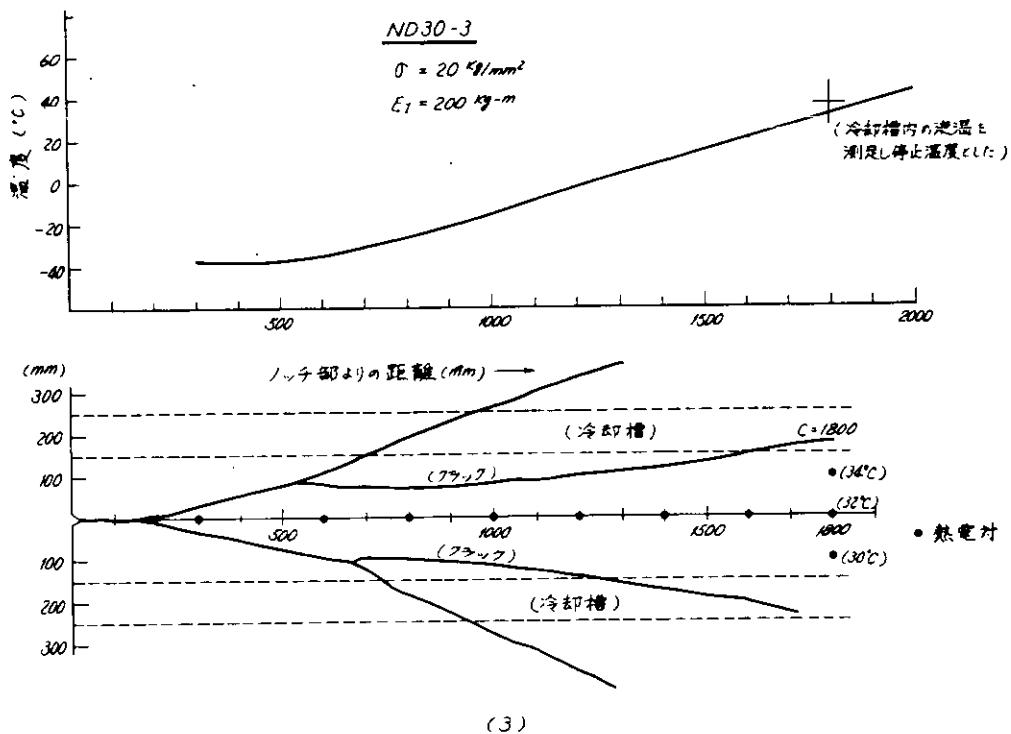


図 4.2.10 温度分布とクラック伝播経路(続き)

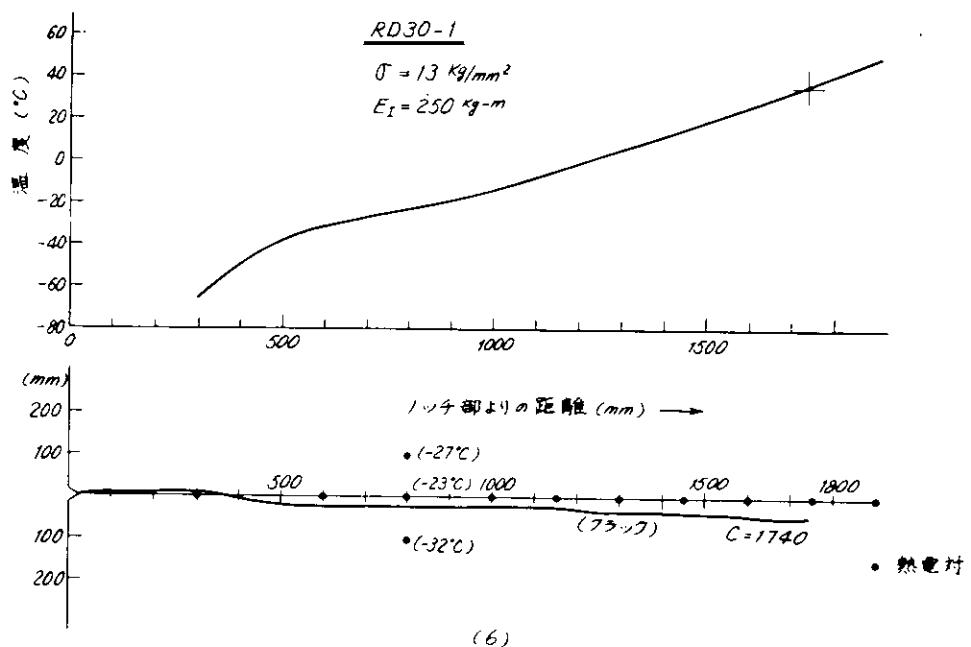
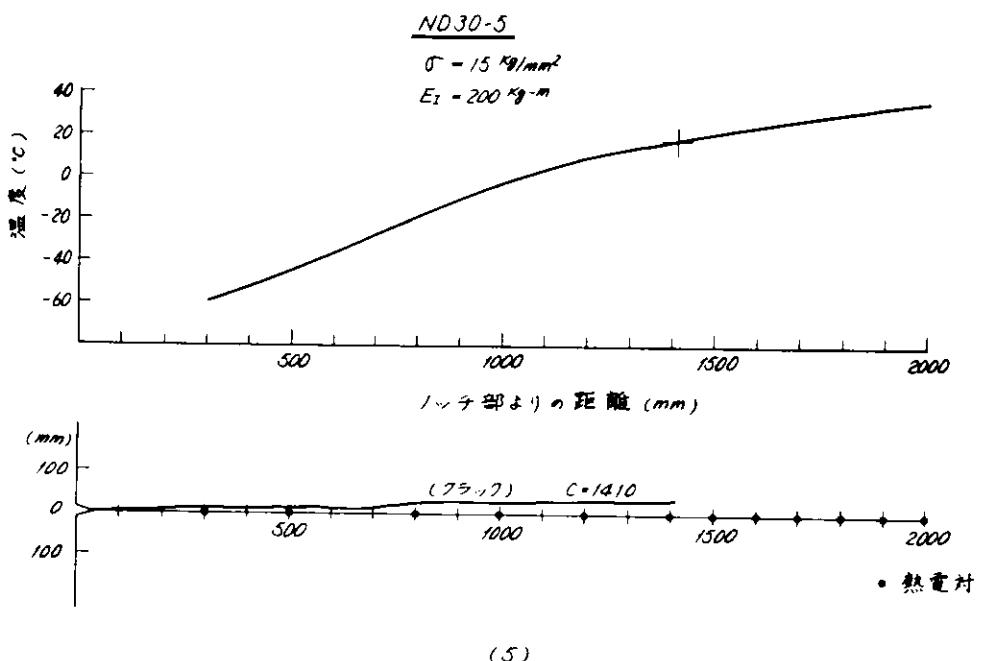


図 4.2.10 温度分布とクラック伝播径路(続き)

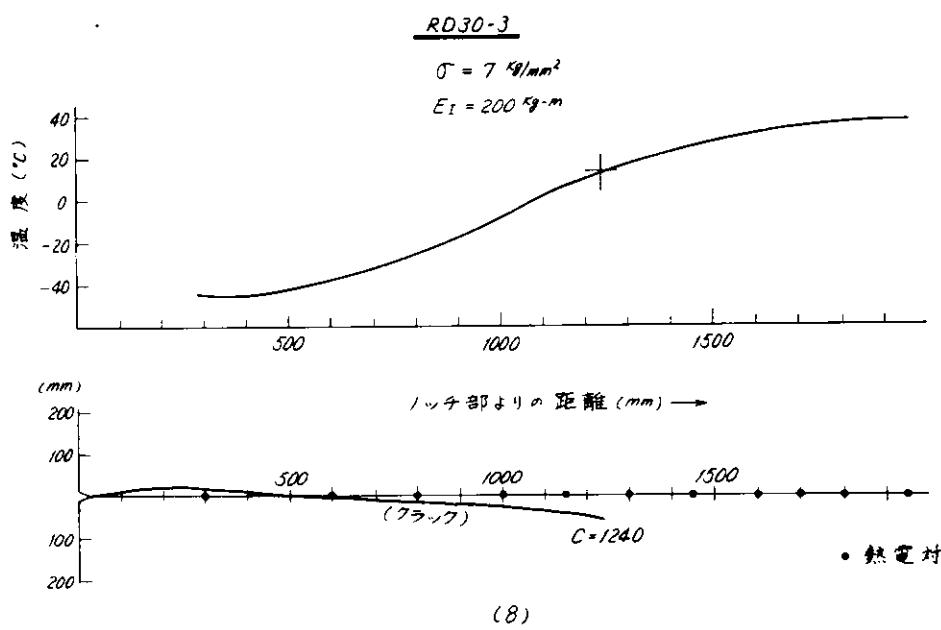
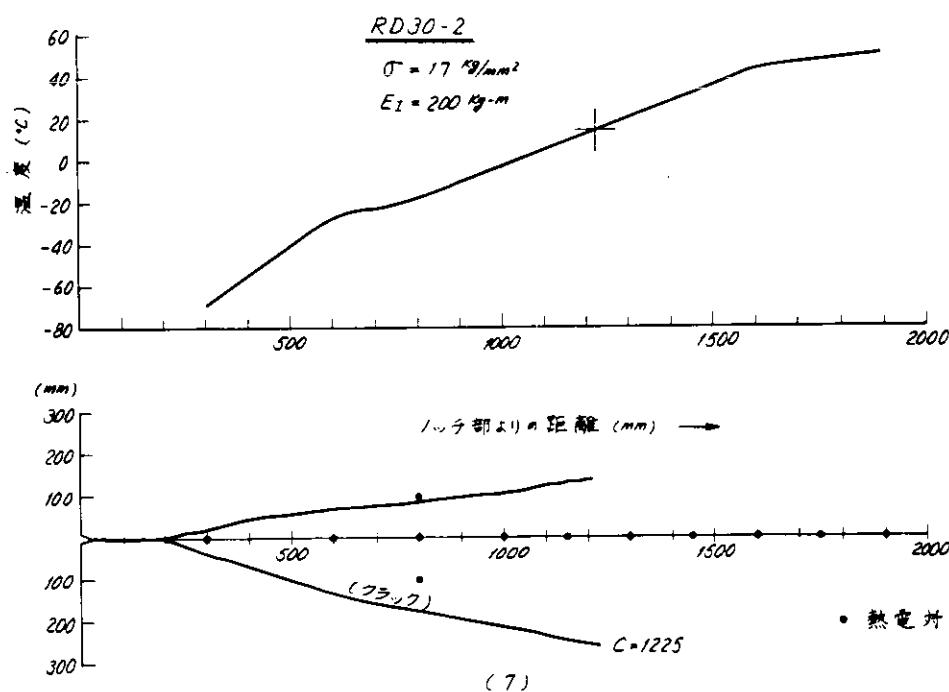


図4.2.10 温度分布とクラック伝播経路(続き)

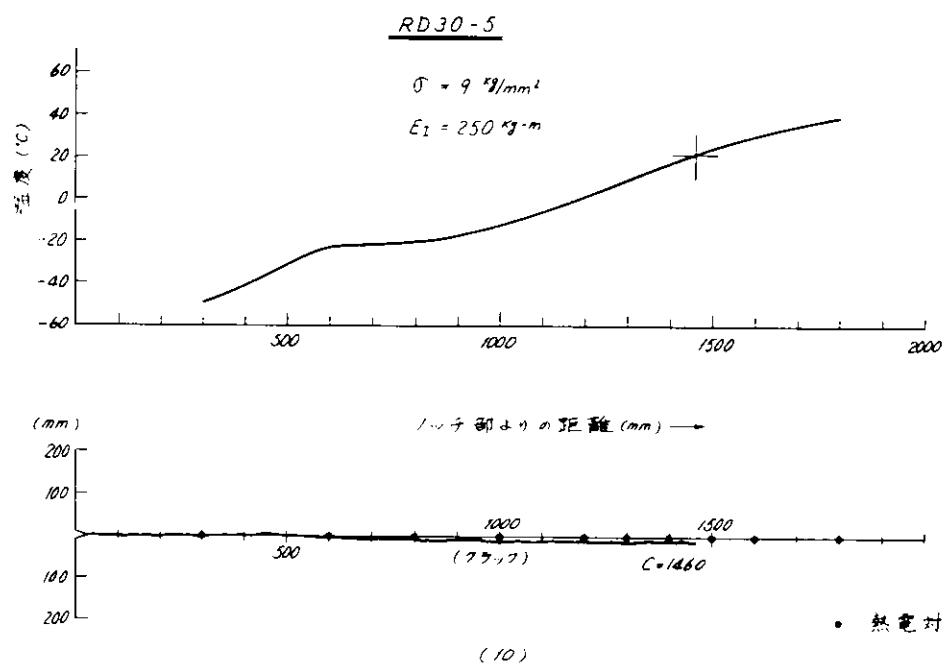
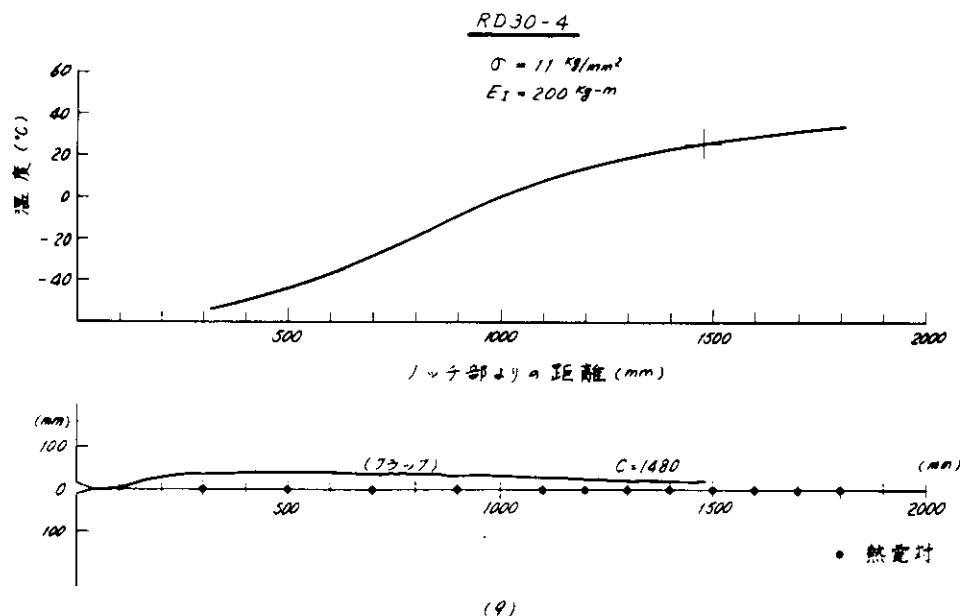
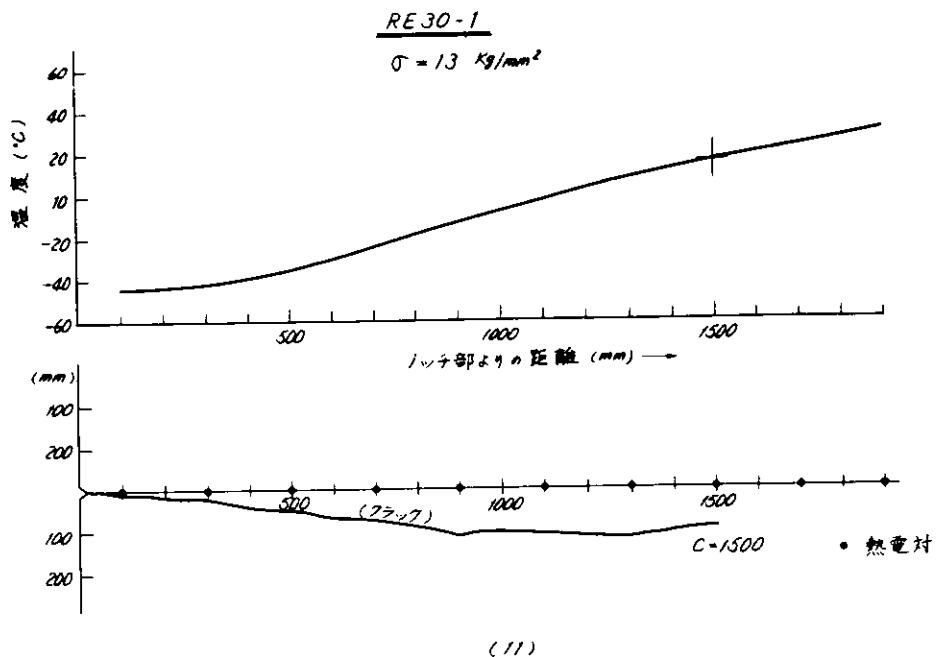
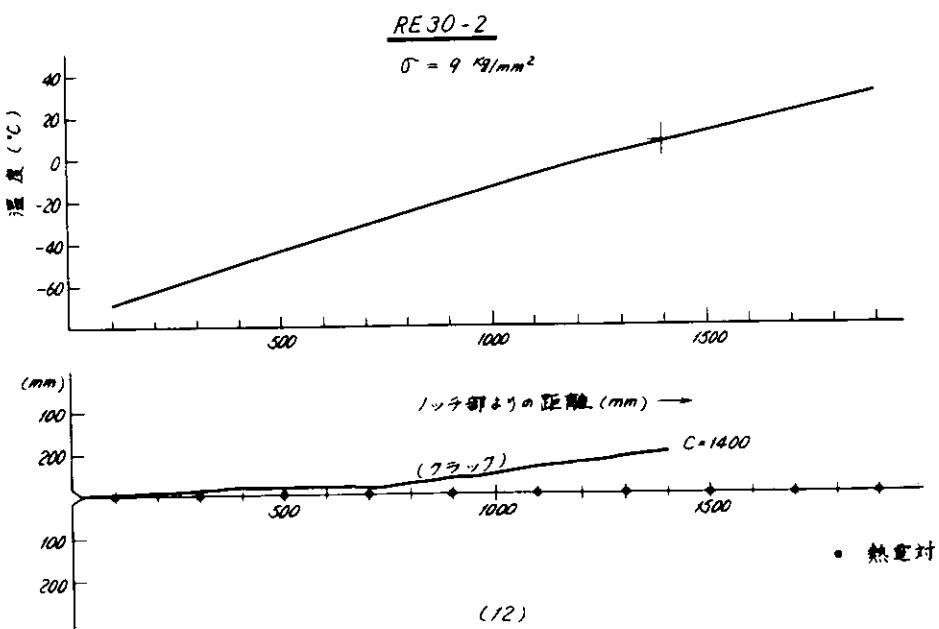


図 4.2.10 温度分布とクラック伝播経路(続き)



(11)



(12)

図 4.2.10 温度分布とクラック伝播径路(続き)

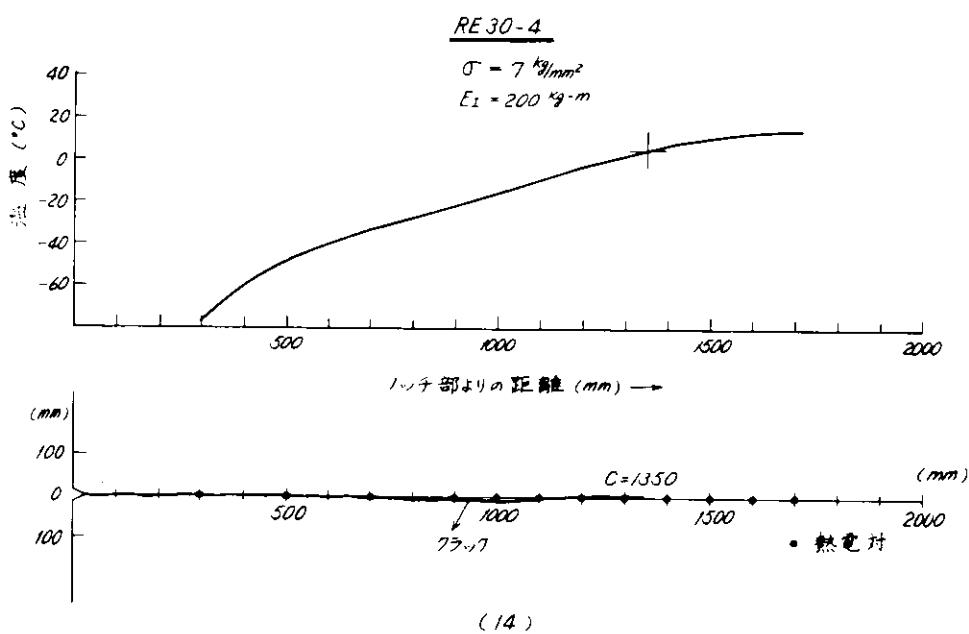
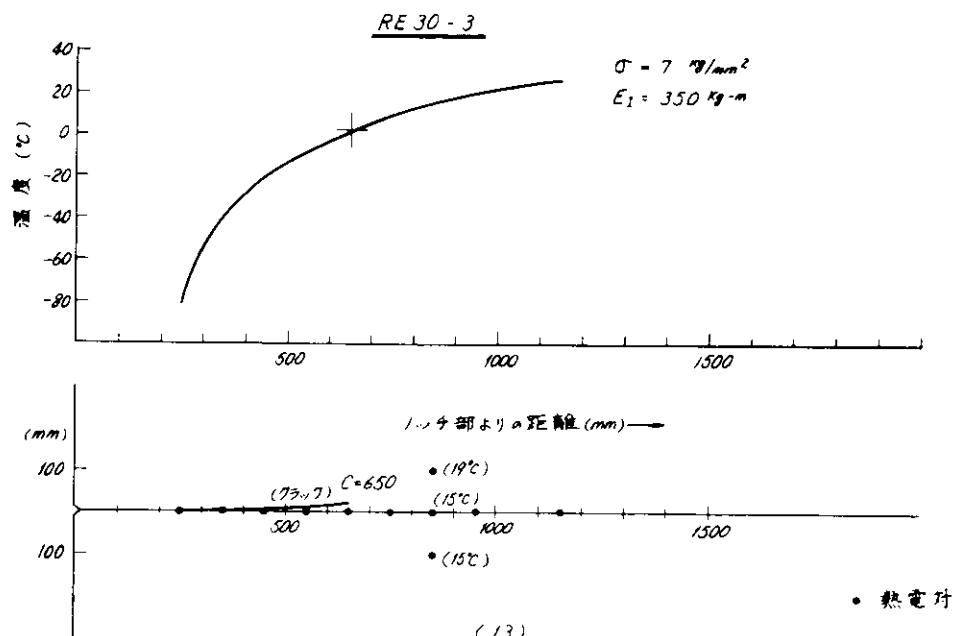


図 4.2.1.0 温度分布とクラック伝播経路(続き)

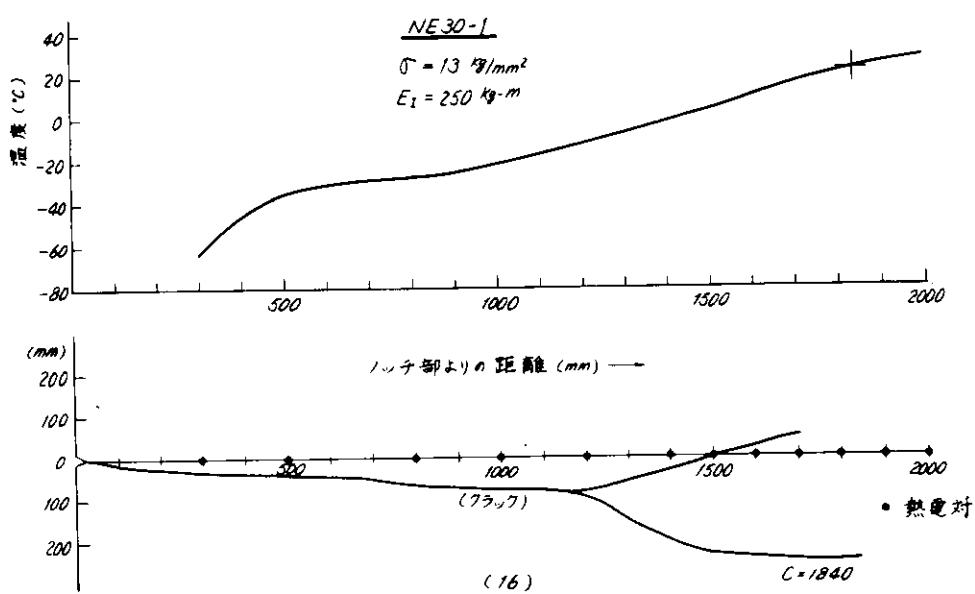
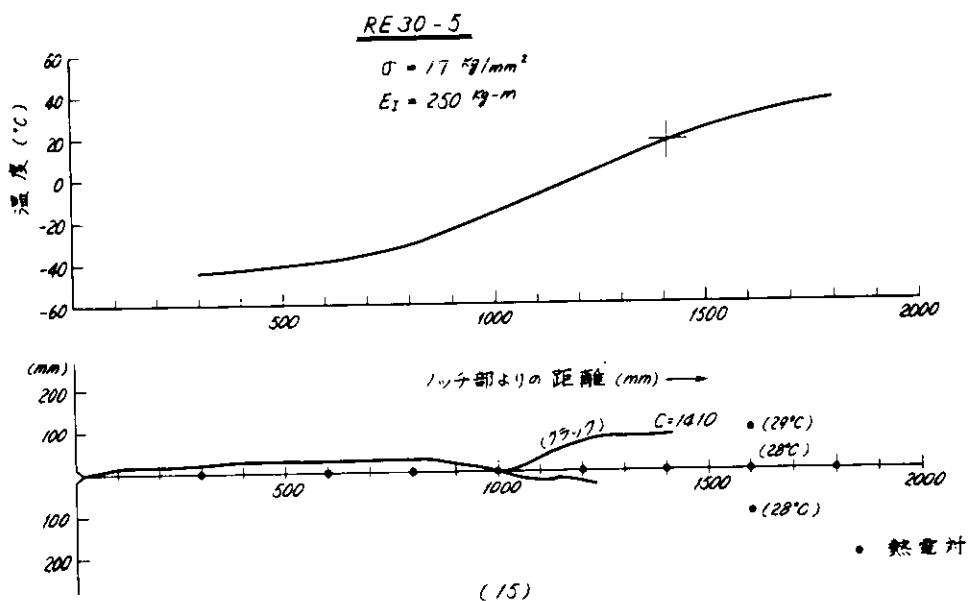


図 4.2.1.0 温度分布とクラック伝播経路(続き)

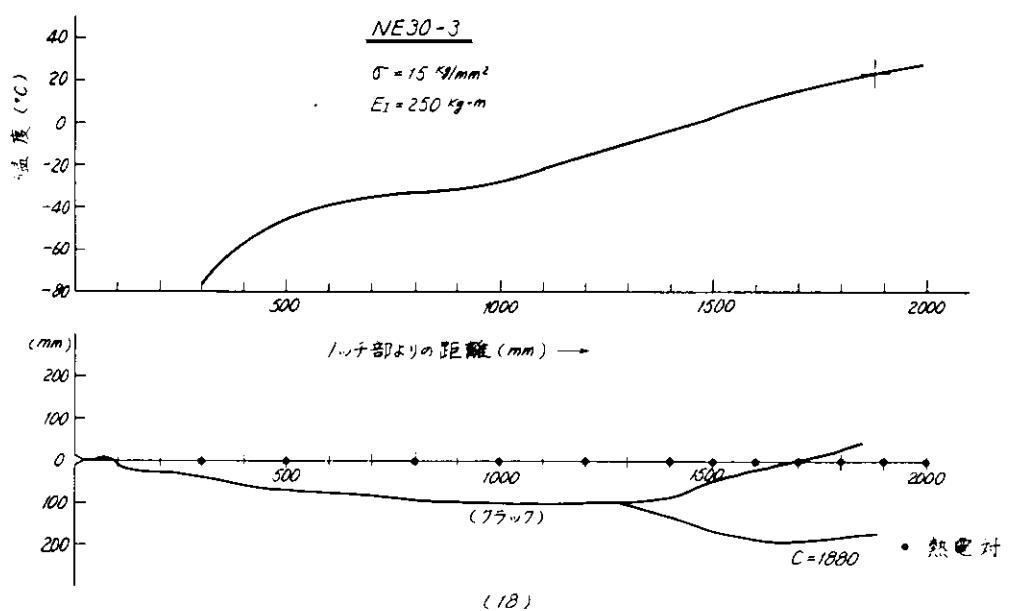
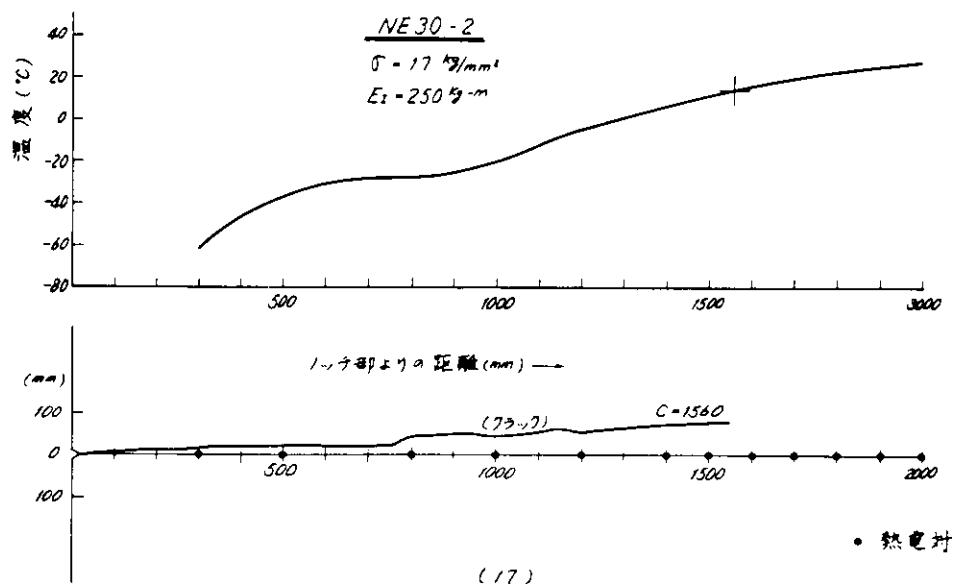


図 4.2.10 温度分布とクラック伝播経路(続き)

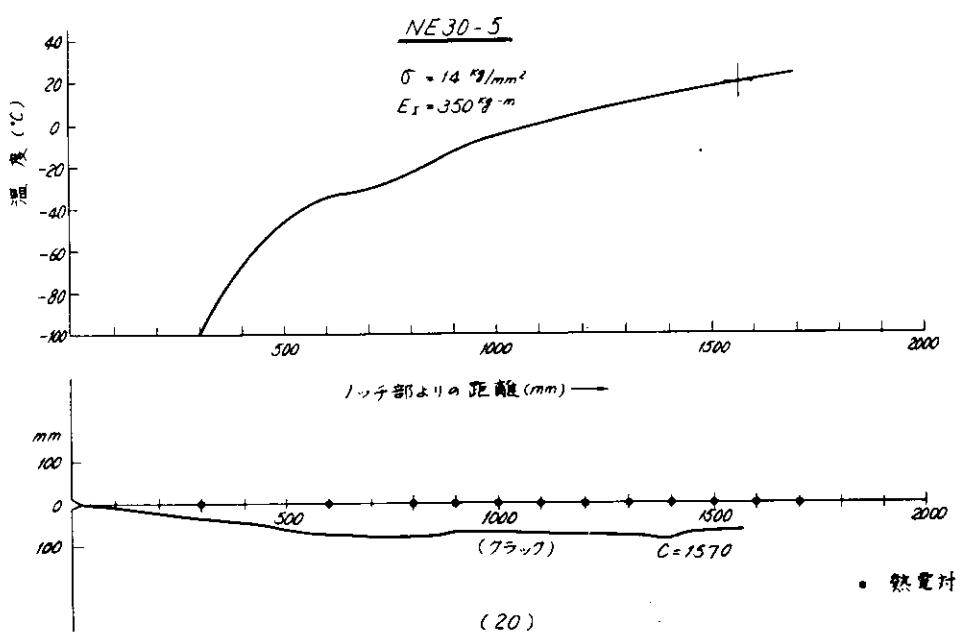
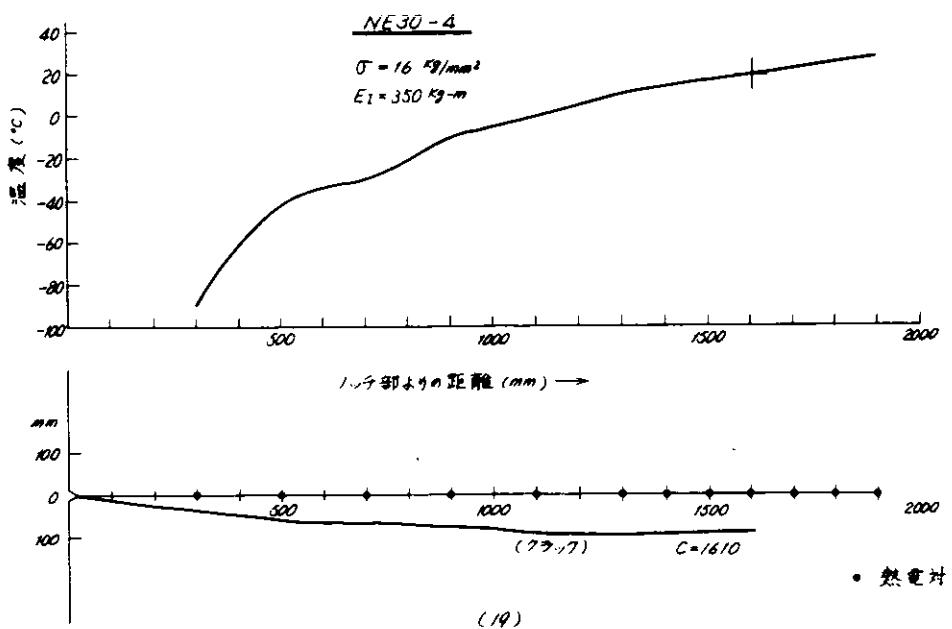


図 4.2.10 温度分布とクラック伝播経路(続き)

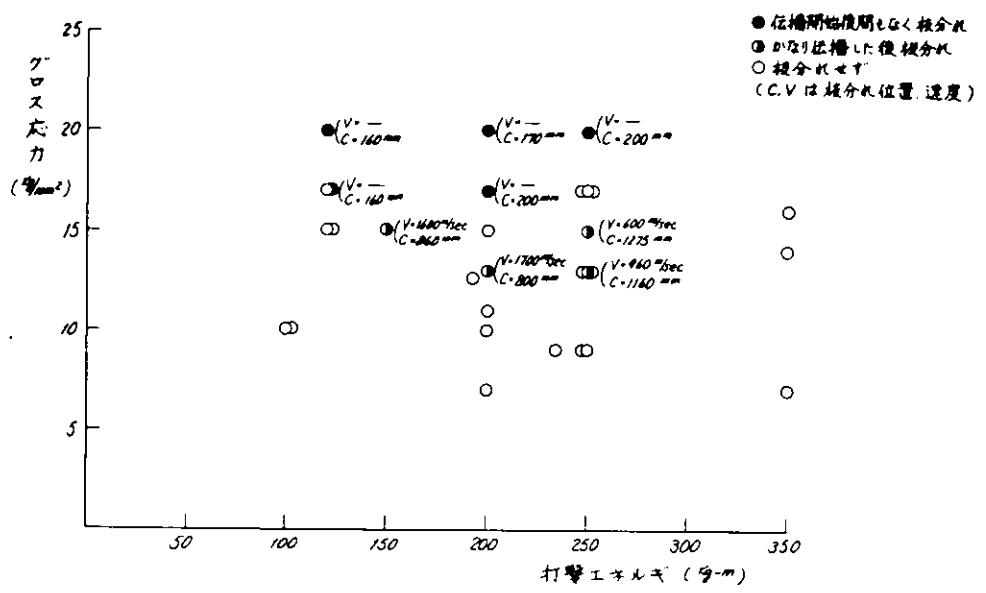


図 4.2.1-1 クラックの枝分れに関する打撃エネルギーとクロス応力の関係

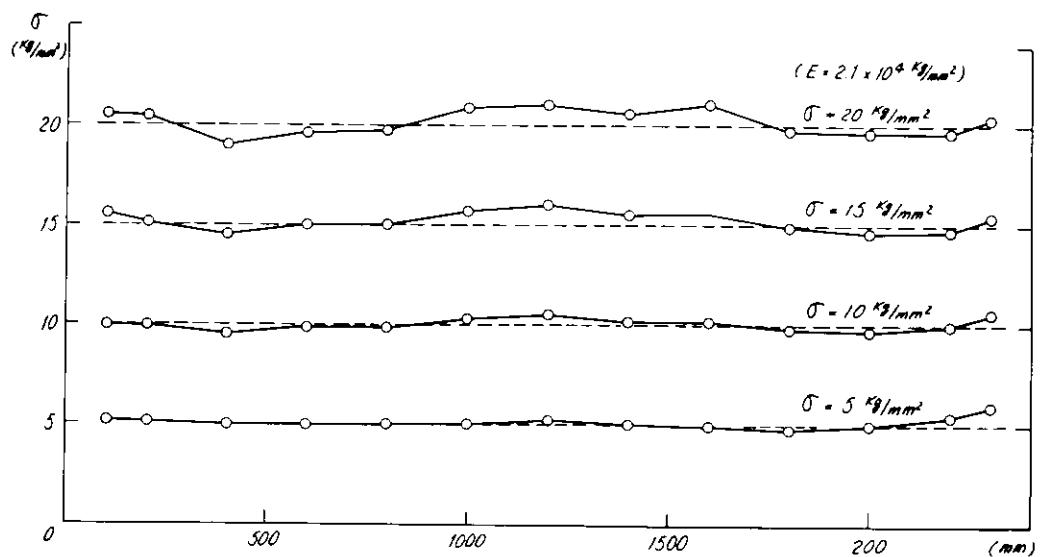


図 4.2.1-2 伝播線上応力分布

4.3 広幅混成型破壊停止試験 (A-3)

4.3.1 研究目的

クラック・スタータ板とクラック・アレスター板とを溶接継手でつなぎあわせた、いわゆる混成型の広幅試験片 ($B = 2,400\text{mm}$) を用い、一様温度分布下での、供試材の破壊停止特性値 (K_c 値) を求め、標準サイズ温度勾配型二重引張試験や広幅温度勾配型破壊停止試験より得られた結果と比較検討する。

4.3.2 供試材および試験片

供試材としてはクラック・スタータ材に船級協会規格の A 級鋼 (RA 30, セミキルド鋼, 板厚 30mm) をクラック・アレスター材に DあるいはE 級鋼 (RD 30あるいはNE 30, キルド鋼, 板厚 30mm) を用いる。試験片形状および寸法は、図 4.3.1 に示す通りであるが、試験片の全幅は $2,400\text{mm}$ とし、スタータ板の幅を $1,200$, $1,500$ および $1,700\text{mm}$ にかえている。

4.3.3 試験内容および方法

試験内容および方法はアレスター板部の温度分布をなるべく平坦にするようにし、4.2.3 項で述べると同じ方法で試験を行なった。

4.3.4 試験結果および考察

広幅混成型破壊停止試験の結果を表 4.3.1 に示す。

表 4.3.1 から有効クラック長さ、有効 K 値を計算し、図示したものがそれぞれ図 4.3.2 および図 4.3.3 である。図中上向きの矢印は、実際の有効クラック長さあるいは有効 K 値が、アレスター板側ボンドにおけるそれ以上であったことを示し、表 4.3.1 の下に示した試験結果の "GO" に対応し、下向きの矢印は、有効 K 値がアレスター板側ボンドにおけるそれ以下であったことを示し、試験結果の "NO, GO" に対応する。

これらの図に示した線は、先に図 4.2.6 および図 4.2.7 に示したものと同一のものであるが、混成型の C と C_{eff} および K と K_{eff} の関係は温度勾配型のそれよりも、少し低目に出ていると言えそうである。

図 4.3.4(1)～(6)は、クラック伝播速度、クラックの伝播に伴う応力変化および荷重変化の測定結果を示したものである。クラック伝播にともなう荷重の動的変化の測定結果は 4.2.4 項に述べたと同様な荷重降下の傾向を示している。

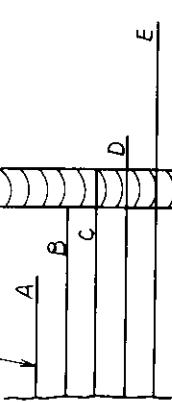
図 4.3.4(3)は、クラック伝播線上の、クラック伝播にともなう動的応力変化の測定値を Broberg による理論計算と比較したものであるが、両者の間には少し開きがあるよう見える。これは 4.2.4 項に述べたと同様に、ひずみおよびクラック伝播速度測定の誤差や、ひずみゲージの動的追従性によっていると思われる。

各試験の温度分布とクラック伝播経路は図 4.3.5(1)～(6)に示してある。

表 4.3.1 広幅混成型破壊停止試験結果 (A-3)

試験片符号	スタータ板 (mm)	丸バスター 板 (mm)	打撲エネルギー (kg-m)	グロス応力 (kg/mm ²)	修正クロス ス応力 (kg/mm ²)		ビード部温度 (°C)	ビード部 におけるK値 (kg/mm ² /°K)	クラック停止温度 (°C)	停止クラック 長さ (mm)	修正クロス ス応力 (kg/mm ²)	Kc値 (kg/mm ² /°K)	破壊 様相	備考
					(°C)	(10 ³ /°K)								
R D 3 0-1	1700	700	200	10	—	—	—	—	16	3.46	1480	12.3	8.37	A
R D 3 0-2	1700	700	200	13	17.8	30	3.30	1295	—	—	1700	—	—	B C=790 枝分れ
R D 3 0-3	1700	700	150	15	20.5	27	3.33	1490	—	—	1700	—	—	B C=860 枝分れ
R D 3 0-4	1200	1200	100	10	12.5	19	3.42	692	—	—	1200	—	—	C
R D 3 0-5	1200	1200	100	10	12.5	12	3.51	692	17	3.45	1820	14.7	11.00	E
N E 3 0-1	1500	900	120	15	18.6	14	3.48	1275	18	3.44	2150	31.5	26.00	E
N E 3 0-2	1500	900	120	15	18.6	19	3.42	1275	20	3.41	1630	19.7	14.00	D
N E 3 0-3	1700	700	120	17	23.2	19	3.42	1690	20	3.41	1800	24.5	18.30	D
N E 3 0-4	1700	700	120	20	27.3	20	3.41	1990	—	—	1700	—	—	B C=170 枝分れ
N E 3 0-5	1500	900	120	17	—	—	—	—	16	3.46	1400	20.4	13.50	A C=160 枝分れ

(注) *) クラック ビード (GOとNO GOの区別)



(スタート板) (アレスター板)

B, C-NO GO
D, E-GO

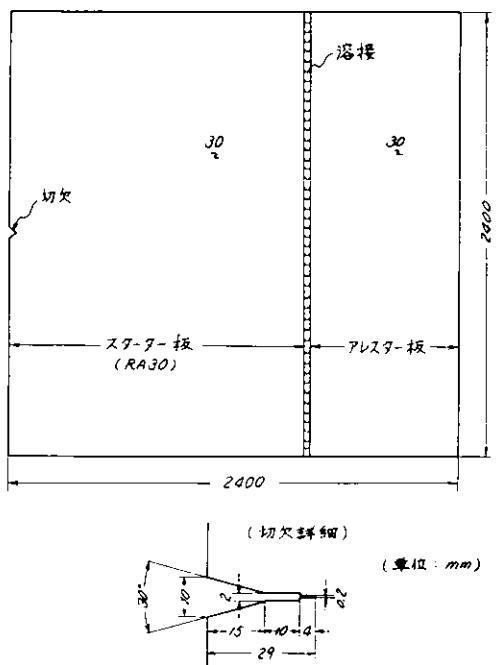


図 4.3.1 試験片形状寸法(A - 3)

↑ NO GO	◎ NE	□ E 級鋼	池田, 大島らの データ
↓ GO	● RD	■ 調質アルミ チルド	

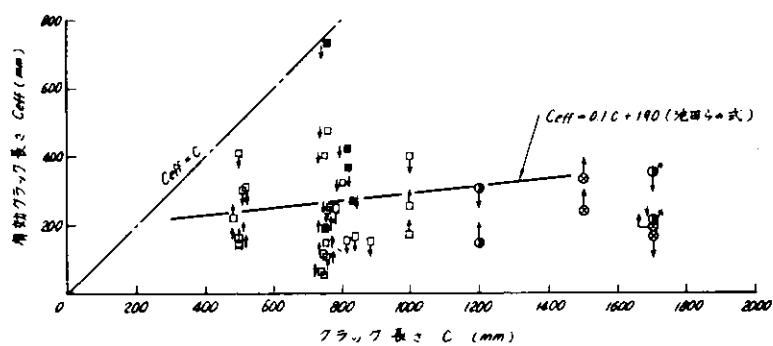


図 4.3.2 クラック長さと有効クラック長さの関係

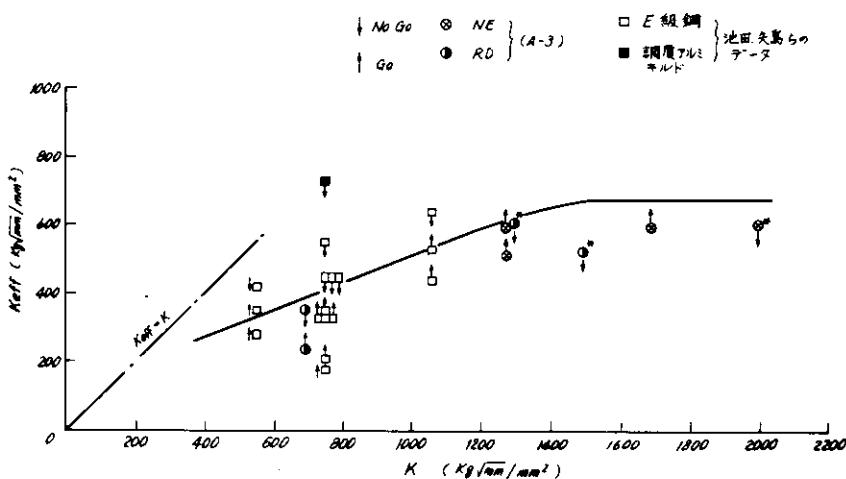


図 4.3.3 K と Keff の関係

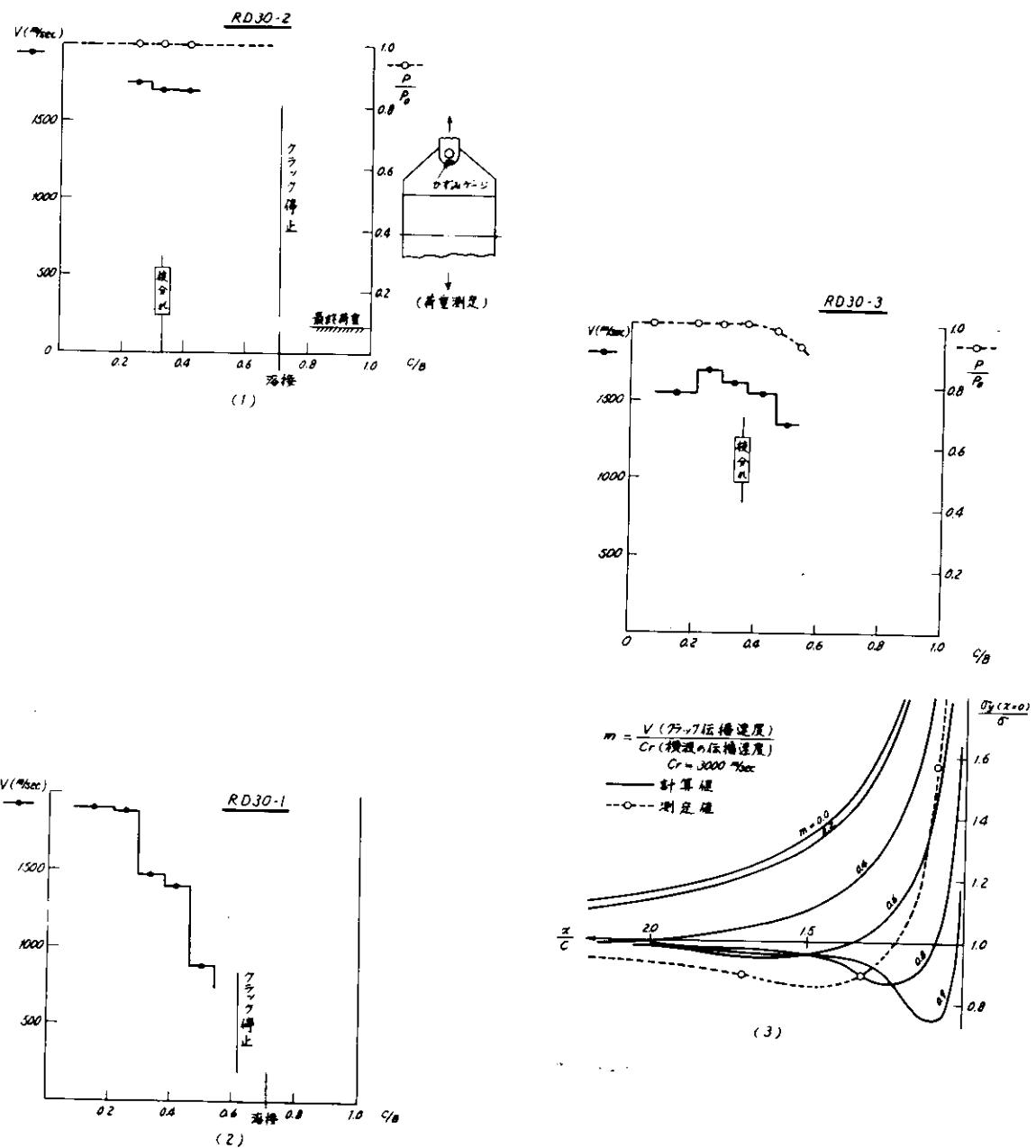


図 4.3.4 クラック伝播速度および荷重の動的変化

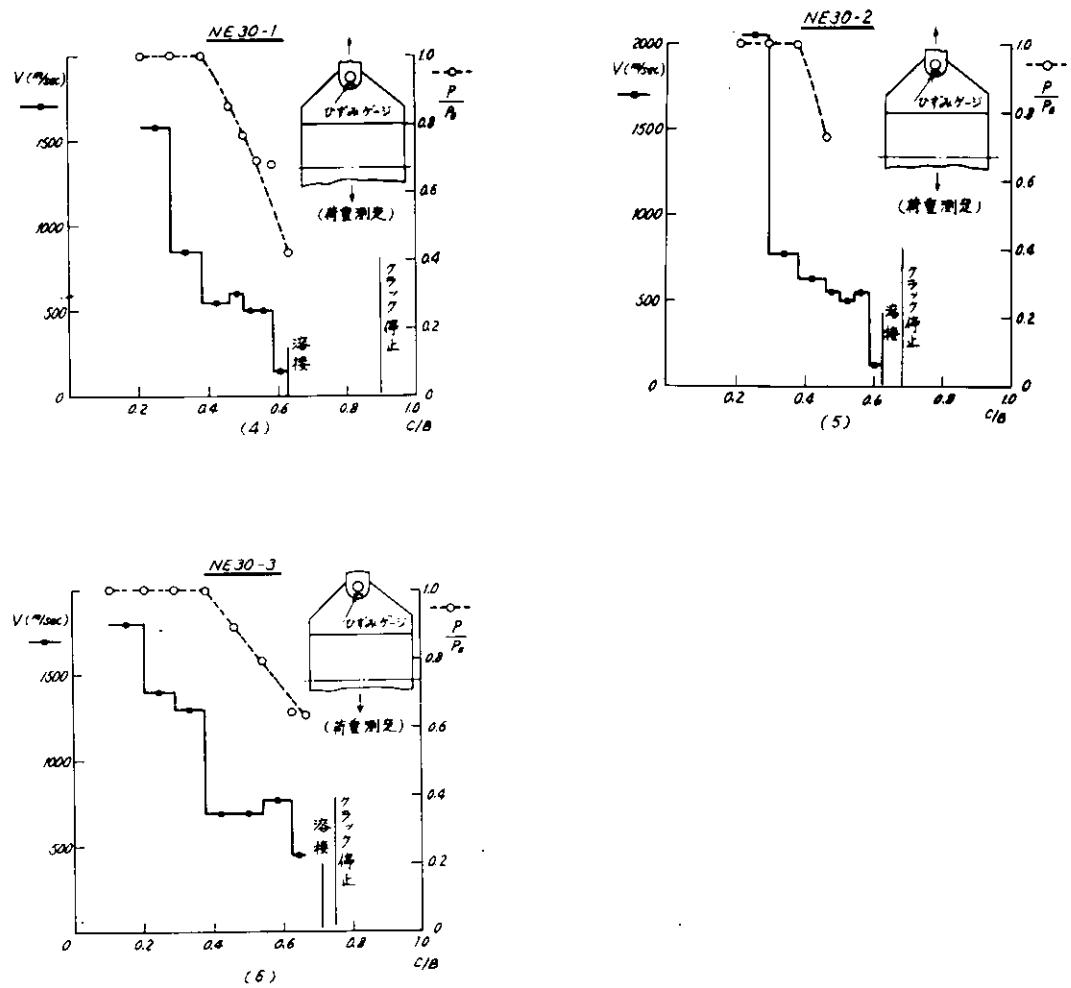
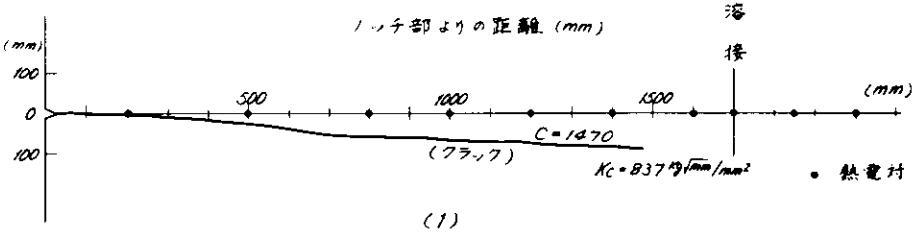
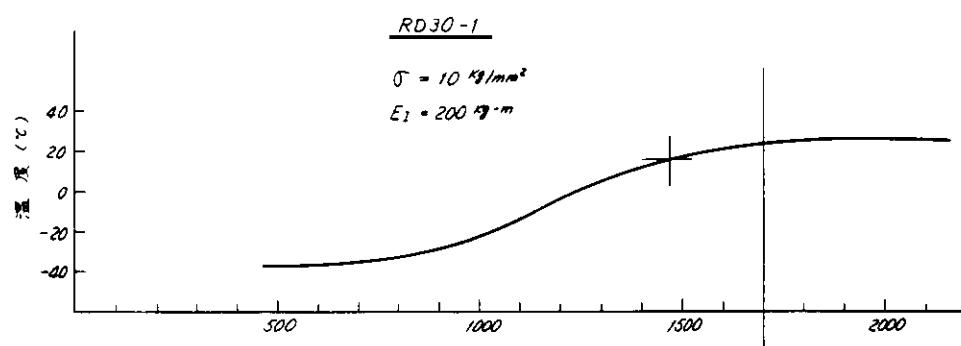


図 4.3.4 クラック伝播速度および荷重の動的変化(続き)



RD30-2

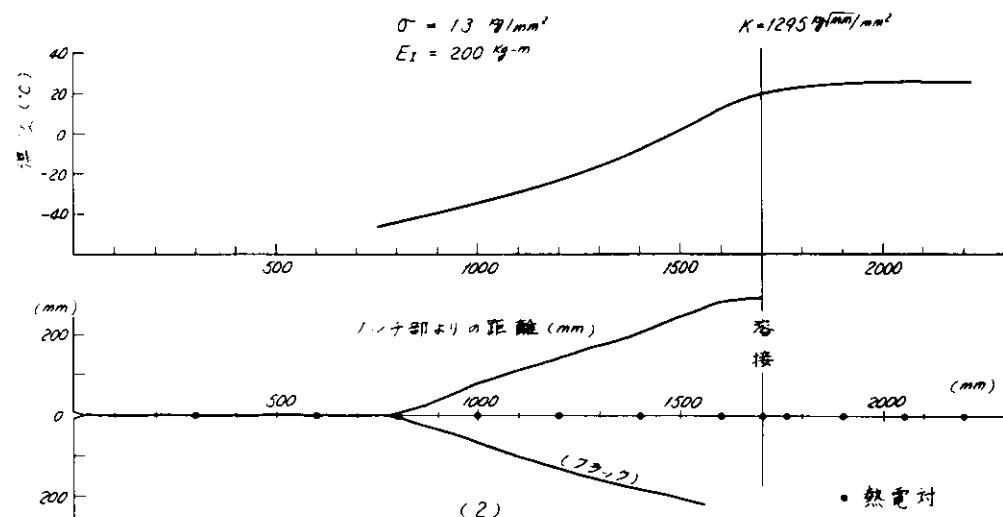


図 4.3.5 温度分布とクラック伝播径路

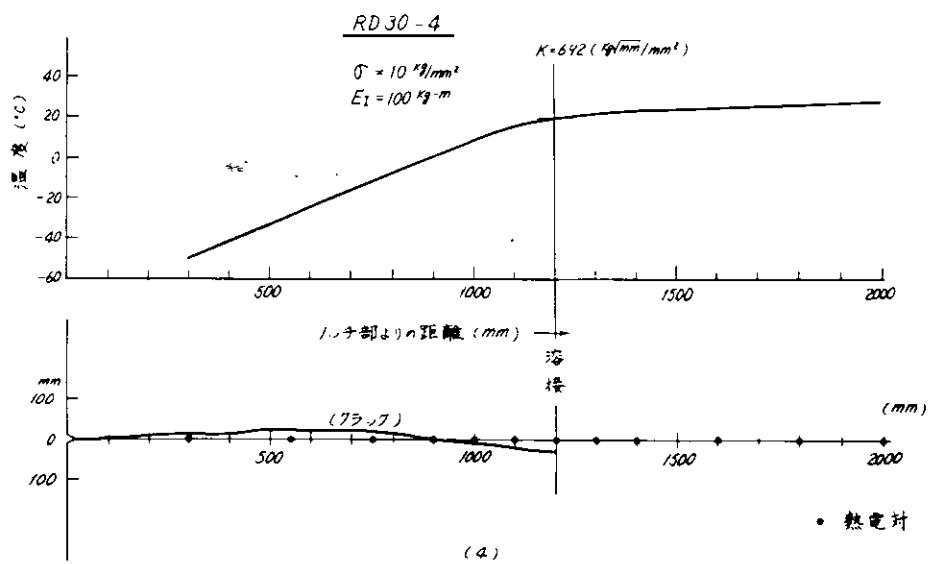
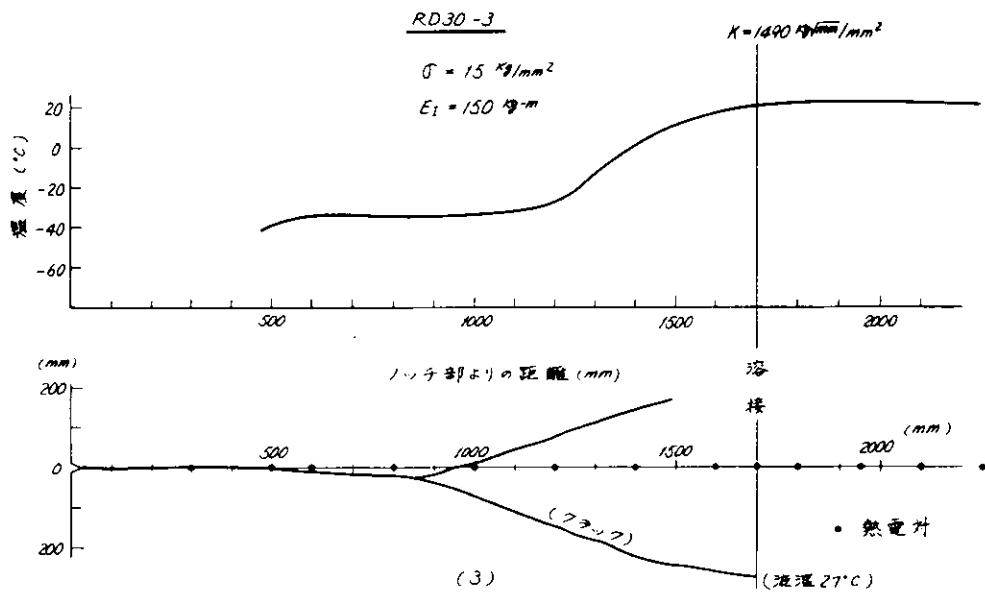


図 4.3.5 温度分布とクラック伝播経路(続き)

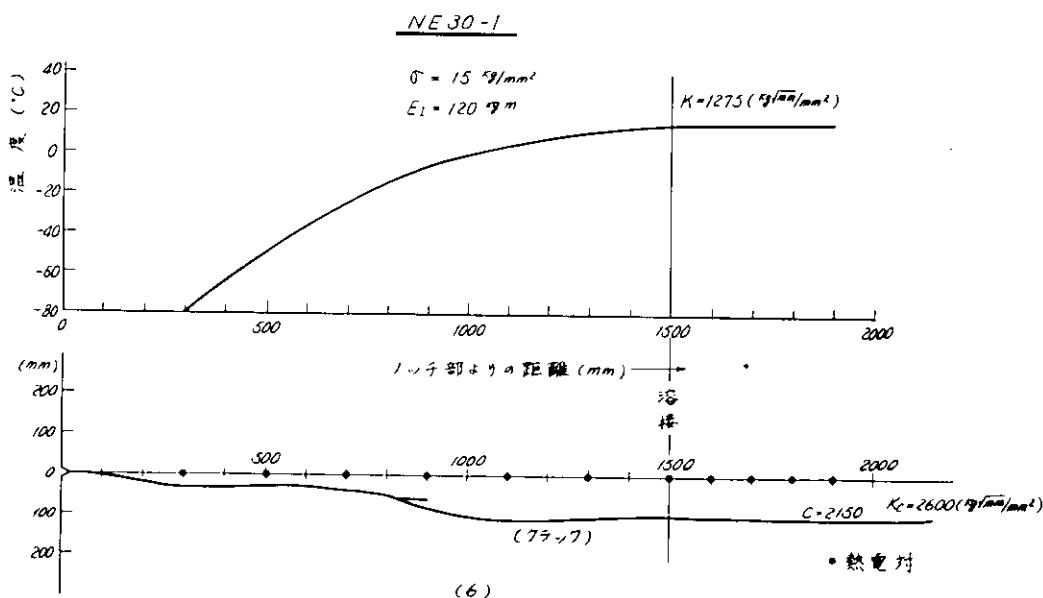
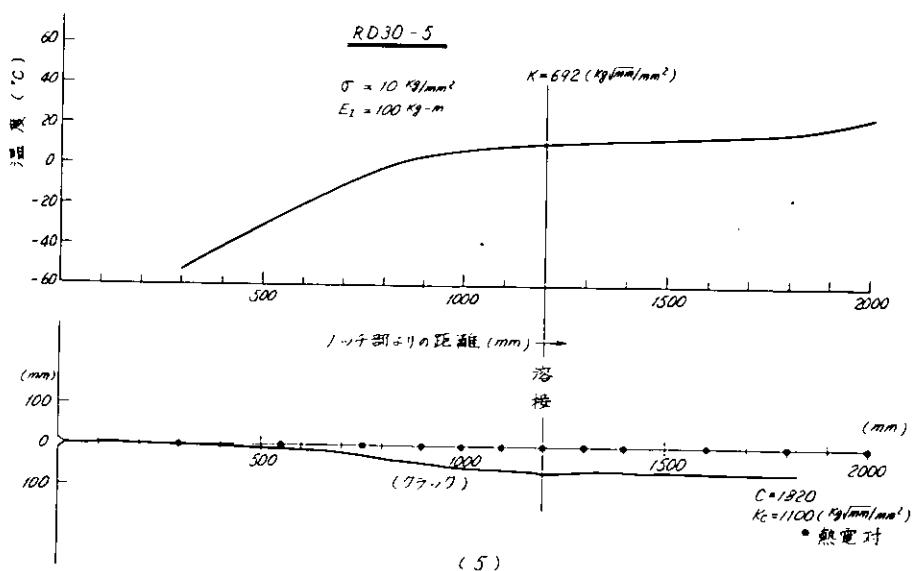


図 4.3.5 温度分布とクラック伝播経路(続き)

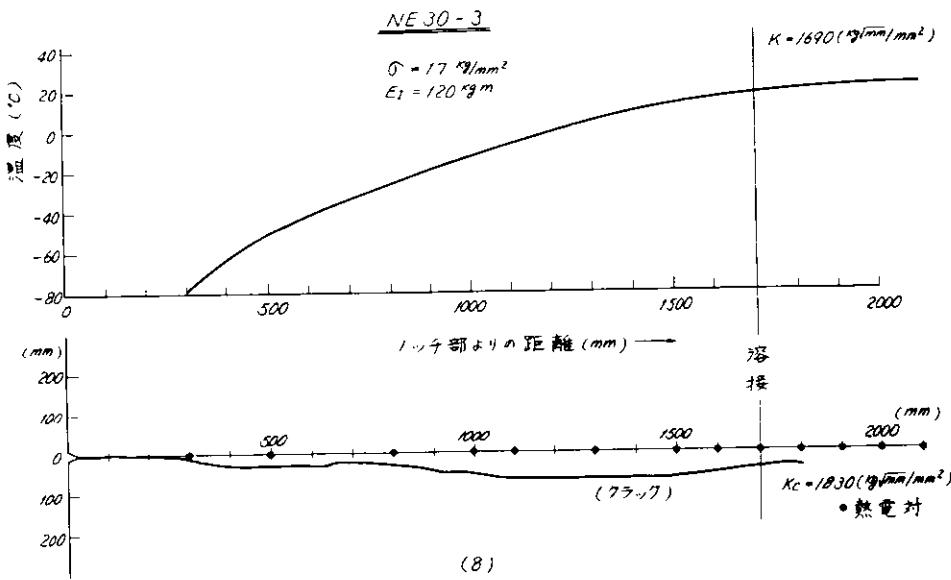
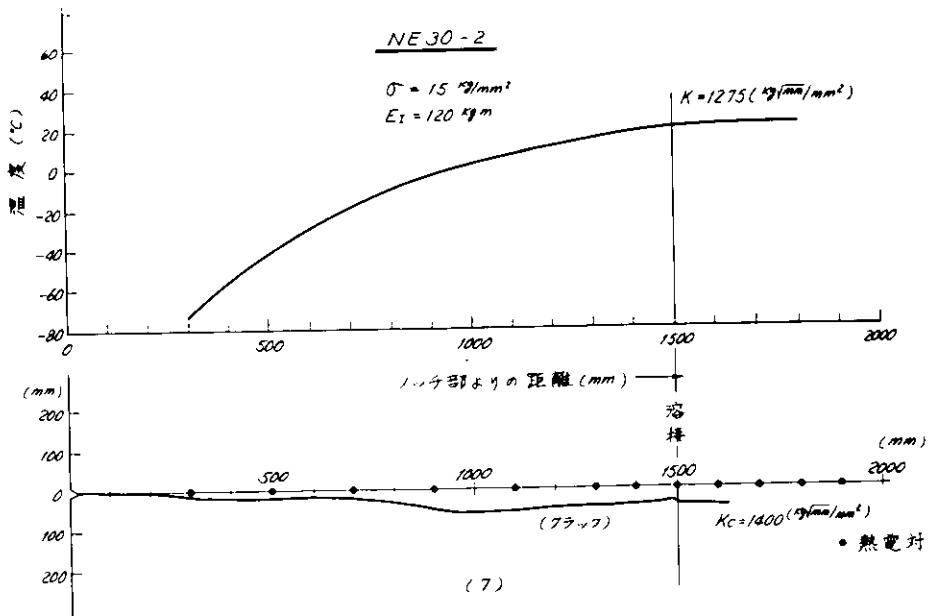


図 4.3.5 温度分布とクラック伝播経路(続き)

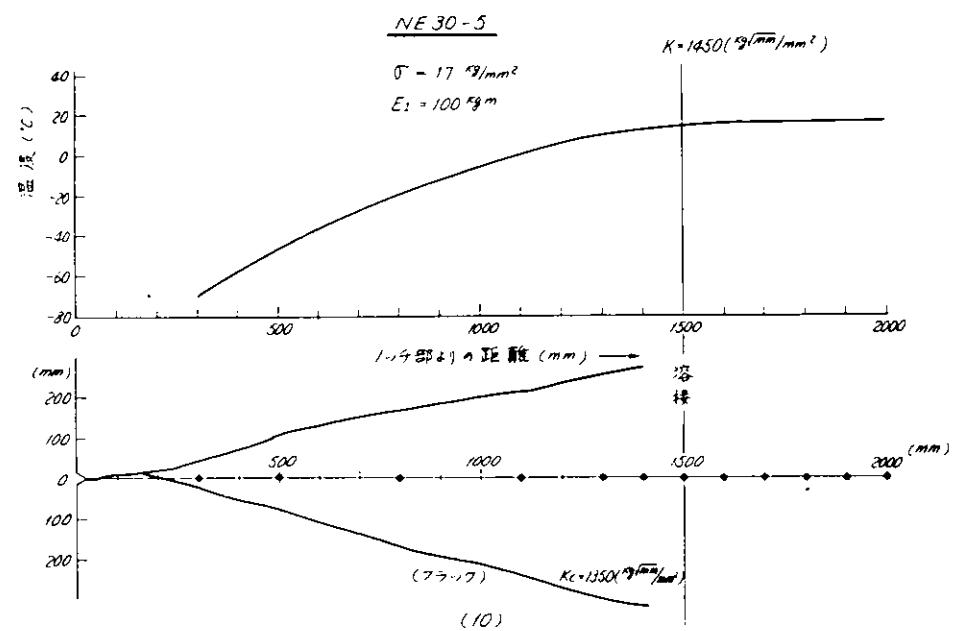
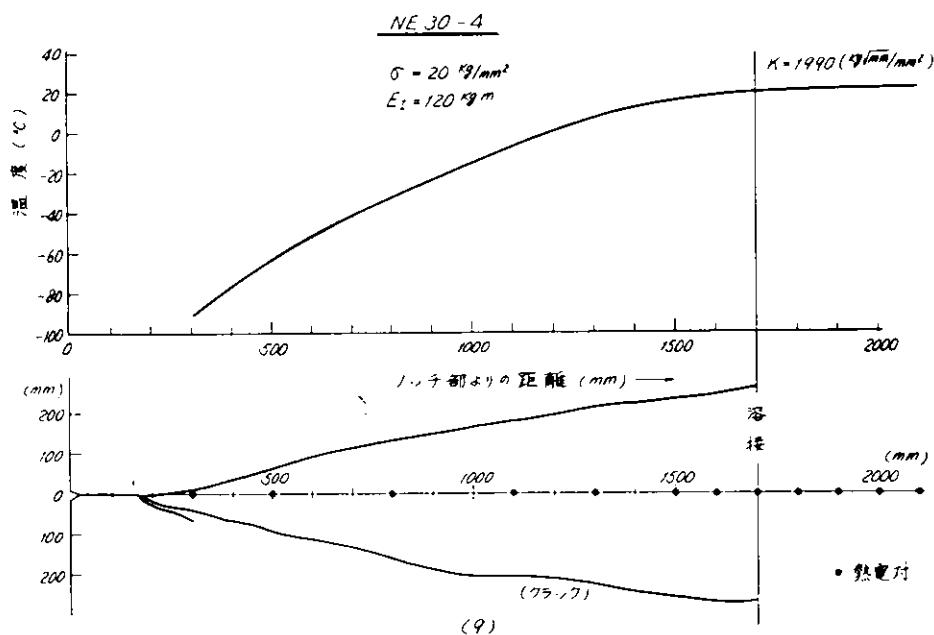


図 4.3.5 温度分布とクラック伝播径路(続き)

4.4 厚板広幅温度勾配型破壊停止試験 (A-4)

4.4.1 研究目的

幅1000mmの広幅二重引張試験片により、原厚50mmから各種板厚まで機械的に切削したものについて、脆性破壊伝播停止特性値(K_c 値)を温度の関数として求め広幅試験における板厚の力学的效果を調べる。また数例をえらんで脆性クラックの伝播速度と伝播継続中の荷重変化を実測する。

4.4.2 供試材および試験片

供試材は船級協会規格のE級鋼、NE50(焼準ギルド鋼)で圧延板厚は50mmである。試験は600トン引張試験機と2000トン引張試験機を使用したが、図4.4.1～2000トン横型引張装置を示す。また2000トン引張試験機を使用した場合の試験片形状と試験要領を図4.4.2に示す。

4.4.3 試験内容および方法

原厚50mmのほか、機械切削により、試験片板厚を40mm、30mmおよび20mmに変え、それについて温度勾配の二重引張試験を行なった。クラック長さと、クラック停止点の温度とから K_c と温度の関係を求めた。また、数例をえらんでクラック伝播予想経路に約50mmの間隔をおいてクラックディテクターを10枚貼布してクラックの伝播速度を実測した。同時にタブプレートにストレングージを貼布してクラック伝播継続中の荷重変化も実測した。

なお、試験符号NE-a-bのaは板厚を、bは番号を表わす。

4.4.4 試験結果および考察

広幅温度勾配型二重引張試験結果を表4.4.1に示す。脆性クラック停止位置の温度と K_c 値の関係を図4.4.3から図4.4.6までに示す。 K_c 値は

$$K_c = \sigma \sqrt{2B \tan(\pi c / 2B)}$$

ただし σ = 伝播部応力

B = 伝播部幅(500mm)

c = 停止クラック長さ

より求めた。

板厚30mmのものについては先に標準サイズの試験結果を示したが、それと本試験結果とを比較してみると、広幅試験片の方が K_c 値は大きくなっていることがわかる。

板厚効果を図示すると図4.4.7のようになる。図によると $t = 20\text{mm}$ と 30mm のものにくらべて $t = 40\text{mm}$ や 50mm のものは K_c 値が低く板厚効果が生じていることが明らかである。板厚効果は約40mm前後で飽和するものであるとされているが、本研究結果により将来さらにこの点について検討する必要があると考えられる。

図4.4.8(1)～(6)には脆性クラック伝播速度とクラック伝播中の荷重変化を示す。図よりクラック進展とともに荷重が低下することがわかる。この点については先にも述べたようにクラック停止特性にも影響があると考えられるのでさらに研究をすすめなければならない重要な問題であろう。

なお、図4.4.9に温度勾配の例を板厚40mmについて示す。

型式 機型4連ジャッキ

能力

容量 500 TON 4基

ストローク 400 mm

圧力 約440 kg/cm²

引張ビン間隔 3,200 mm 最大

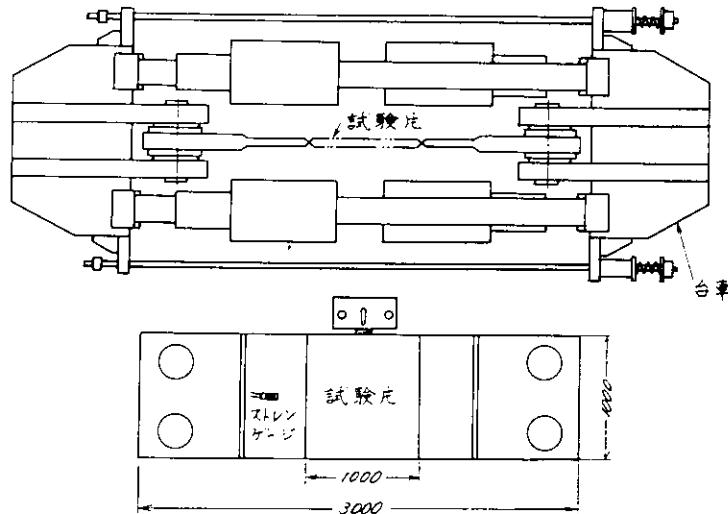


図 4.4.1 2000トン横型引張試験装置と試験片取付要領

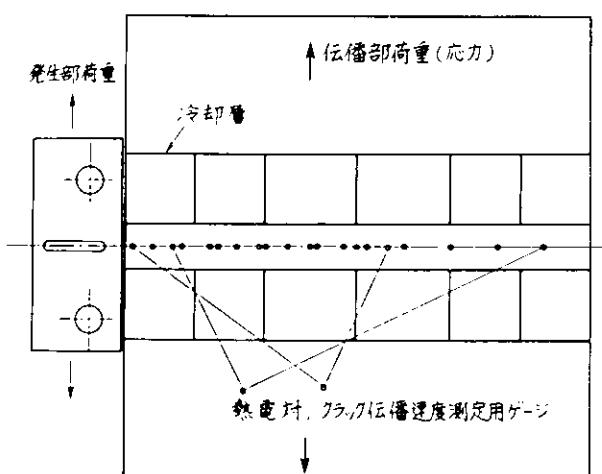
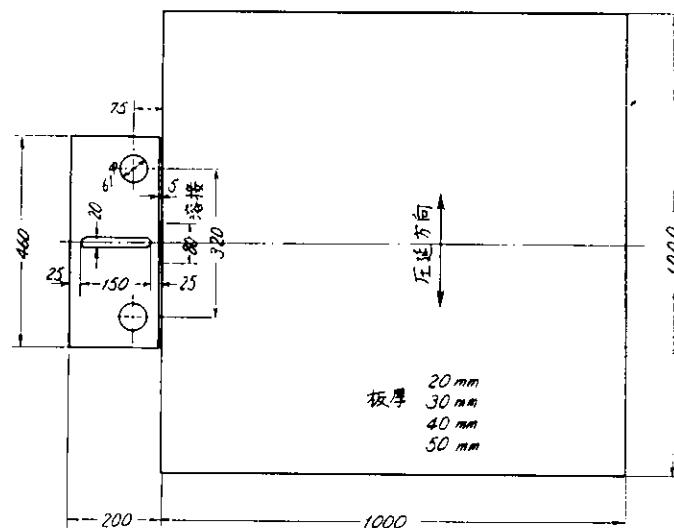


図 4.4.2 試験片形状寸法および試験要領

表 4.4.1 厚板広幅温度勾配型破壊停止試験

試験片符号	グロス応力 (kg/mm ²)	クラック停止温度		停止クラック長 (mm)	修正グロス応力 (kg/mm ²)	Kc値 (kg/mm ² /mm)
		T(°C)	10 ³ /TK			
NE 20-1	7.0	-22	3.98	338	7.35	240
NE 20-2	25	-1	3.68	364	26.5	897
NE 20-3	20	-1	3.68	460	22.1	840
NE 20-4	10	-26	4.05	261	10.3	295
NE 20-5	10	-4	3.72	507	11.3	452
NE 20-6	5	-82	5.23	153	5.1	110.5
NE 30-1	15.7	9	3.55	541	18.2	754
NE 30-2	15.0	8	3.56	423	16.3	595
NE 30-3	8.0	-22	3.98	406	8.6	309
NE 30-4	15	11.5	3.52	523	17.1	695
NE 30-5	10	-125	6.75	65	10.0	143
NE 30-6	5	-26	4.05	405	5.4	192
NE 30-7	10	9	3.55	545	11.6	480
NE 40-1	8.0	17	3.45	300	8.3	255
NE 40-2	10.0	22	3.39	298	10.4	306
NE 40-3	7.0	4	3.61	310	7.3	228
NE 40-4	6.0	14	3.48	280	6.2	184
NE 40-5	10	19	3.42	611	12.2	535
NE 40-6	5	-127	6.85	77	5.0	78.0
NE 50-1	15.0	17	3.45	410	16.2	582
NE 50-2	10.0	8	3.56	534	11.5	471
NE 50-3	8.0	5	3.60	287	8.3	313
NE 50-4	10.0	12	3.50	394	10.8	379
NE 50-5	10	20	3.42	597	12.0	520
NE 50-6	5	-79	5.15	107	5.0	92.4

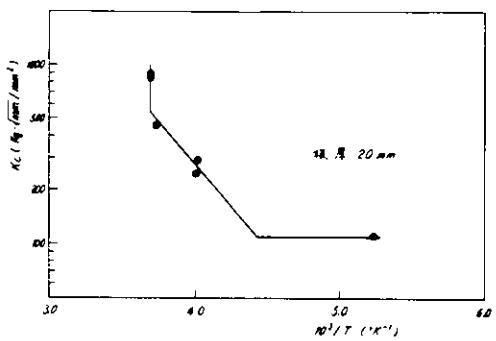


図 4.4.3 溫度と K_c 値との関係

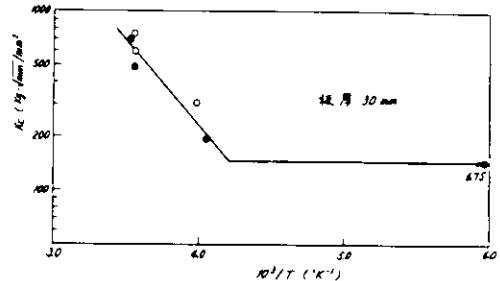


図 4.4.4 溫度と K_c 値との関係

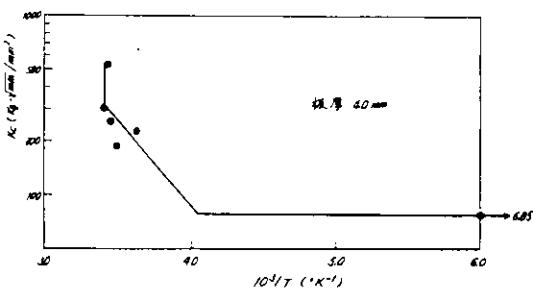


図 4.4.5 溫度と K_c 値との関係

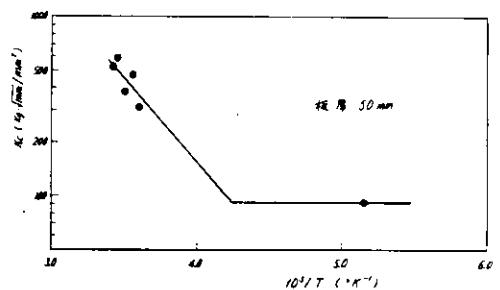


図 4.4.6 溫度と K_c 値との関係

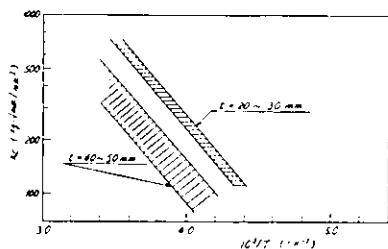


図 4.4.7 溫度と K_c 値との関係 -- 板厚効果

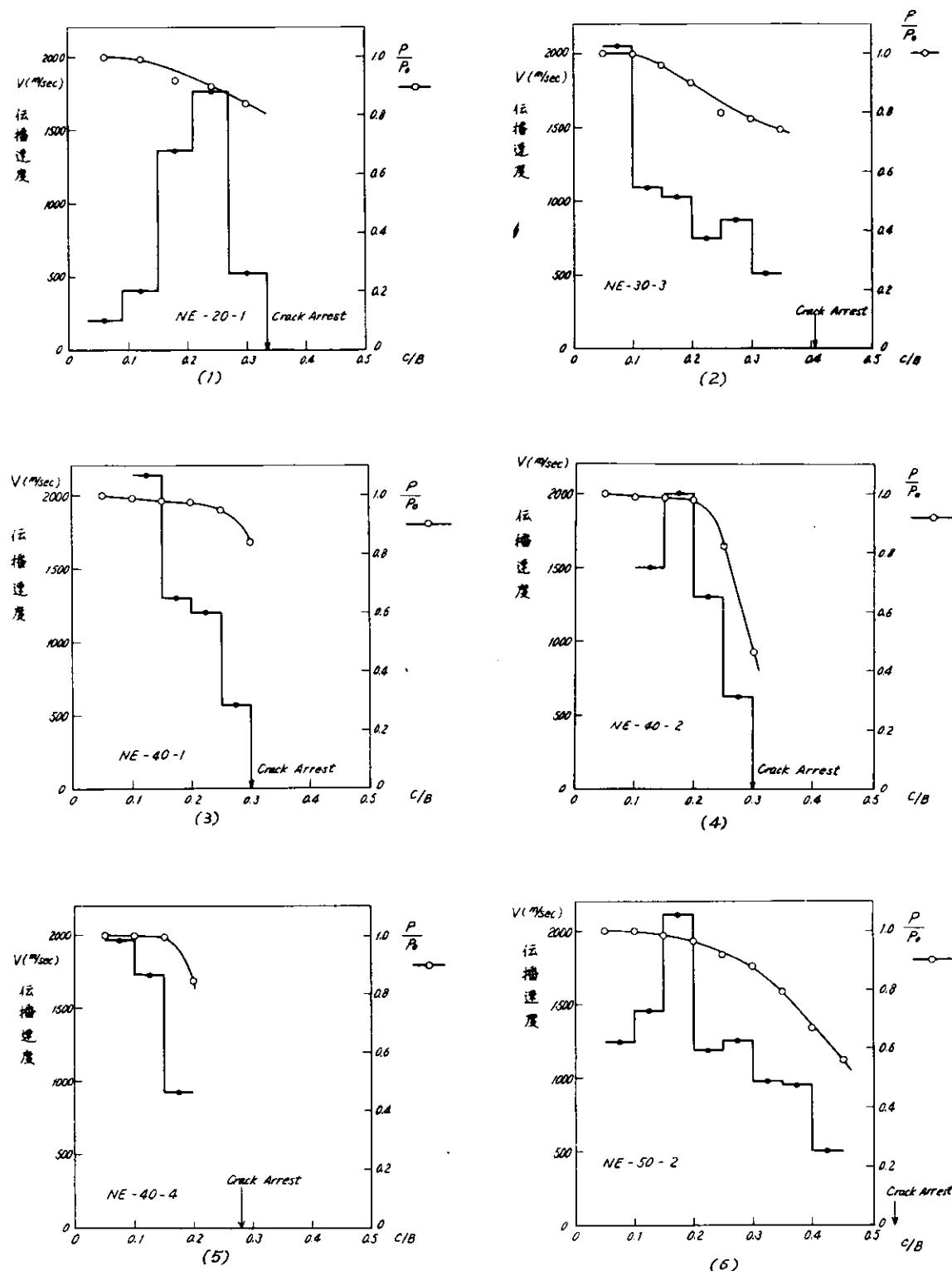


図 4.4.8 クラック伝播速度と荷重変化

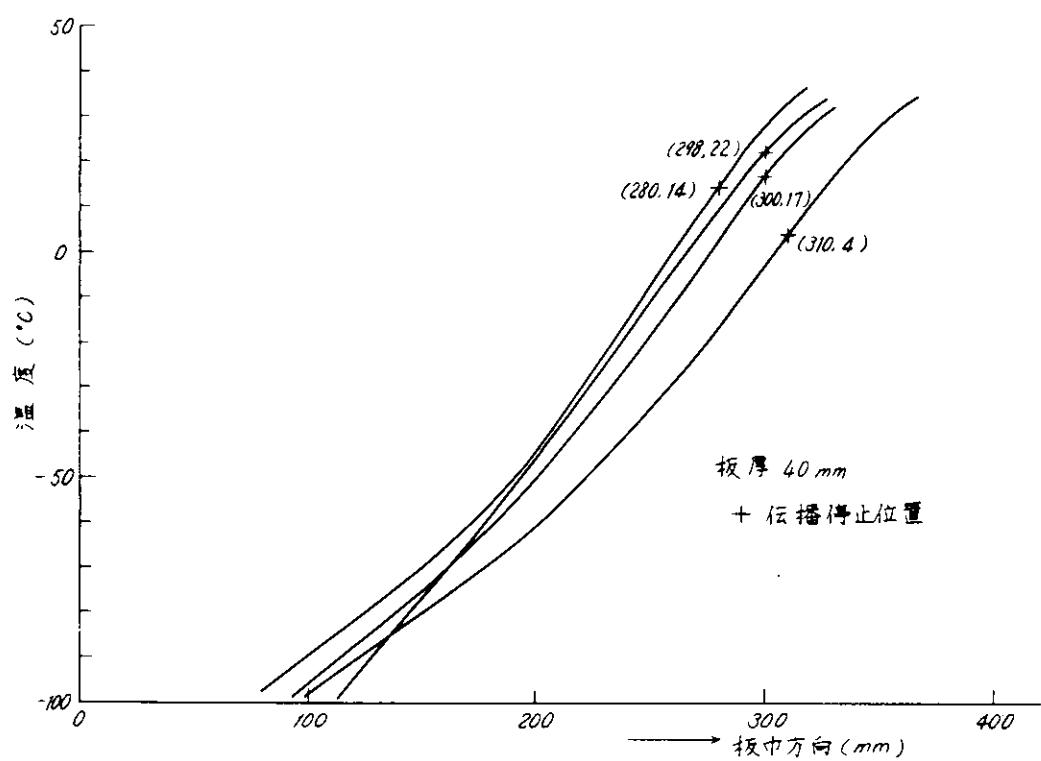


图 4.4.9 温度匀配

4.5 シャルピー試験

4.5.1 研究目的

供試材のシャルピー試験特性を求め、研究項目(A-1)および(A-2)の試験結果との関連を調べる。

4.5.2 供試材および試験片

供試材は船級協会規格のE級鋼(キルド鋼、板厚30mm)、D級鋼(セミキルド鋼板厚30mm)およびA級鋼(セミキルド鋼、板厚30mm)である。

試験片形状寸法を、図4.5.1に示す。

4.5.3 試験内容および方法

図4.5.1の試験片を板厚30mmの供試鋼板より機械切削により作り通常のシャルピー試験を行ない、温度一吸収エネルギー曲線、温度一脆性破面率曲線等を求めた。

試験は所定の試験温度に保たれたエチルアルコールまたは温水の中に試験片を5分間以上浸漬したのちすみやかに取り出し、30kg-m容量のシャルピー試験で試験した。温度調整はエチルアルコールはドライアイスで、温水は水中用ヒーターで行なった。

4.5.4 試験結果および考察

Vシャルピー(Vノッチ シャルピー)およびプレス・シャルピー(プレスノッチシャルピー)の温度一吸収エネルギー曲線および温度一脆性破面率曲線を図4.5.2(1)~(5)に示す。また、これより求めた vT_{re} (Vシャルピー吸収エネルギー遷移温度)、 vTr_s (Vシャルピー脆性破面遷移温度)および pTc (プレスシャルピー脆性破面遷移温度)さらに鋼材の船級協会規格に関連して E_0 (Vシャルピーの0°Cにおける吸収エネルギー)および E_{-10} (Vシャルピーの-10°Cにおける吸収エネルギー)などの諸量を一括して表3.5.1に示した。

これらの結果から各供試鋼とも船級協会規格は十分に満足していることがわかる。

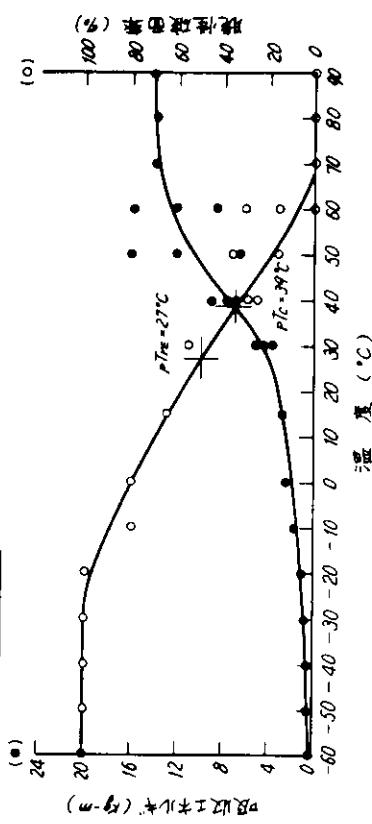
試験結果を日本溶接協会規格(WES)「低温構造用材質判定基準」の T_0 と pTc および K_c (30, pTc)と pTc の設定線と比較して図4.5.3および図4.5.4に示す。多少ばらつきはあるが設定線をはさんでいる。

表4.5.1 シャルピー試験結果(A-5)

鋼種	供試材 符 号	Vシャルピー				プレスシャルピー	
		vT_{re} (°C)	vTr_s (°C)	E_0 (kg-m)	E_{-10} (kg-m)	pT_{re} (°C)	pTc (°C)
A級	R A-30	2	14	8	5	27	39
D級	N D-30	3	-4	6	4	20	12
	R D-30	-3	-4	14	9	22	15
E級	R E-30	-32	-34	27	26	-5	-12
	N E-30	-38	-38	24	24	-1	-9

RA 30

アーチカルヒー



V-シャルヒー

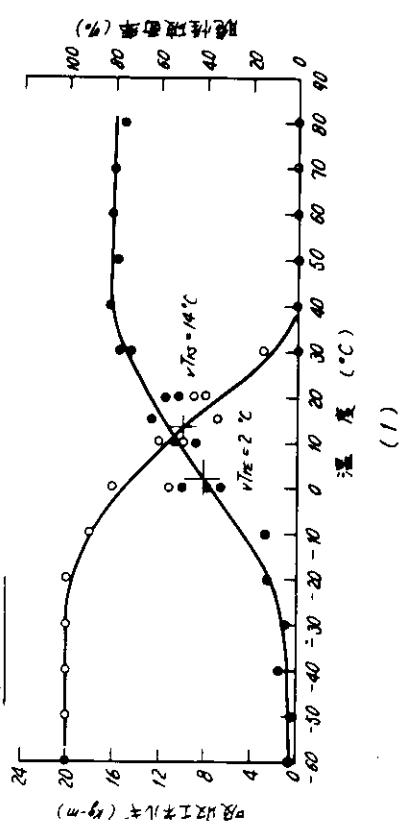
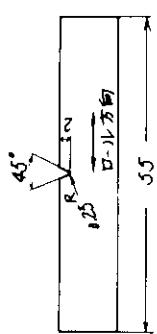


図 4.5.2 溫度と吸収エネルギーおよび脆性破壊率の関係

(f)

アーチカルヒー



(試験片採取位置)

アーチカルヒー

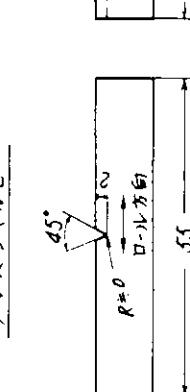
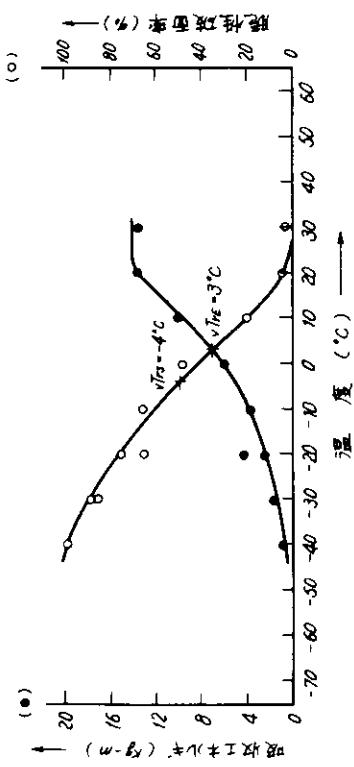


図 4.5.1 シャルヒー試験片形状・寸法

[ND 30]

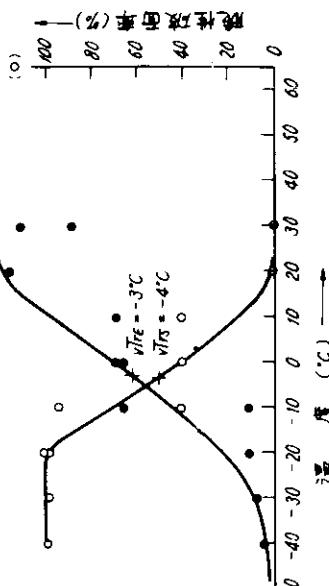
V-シリカルビ-



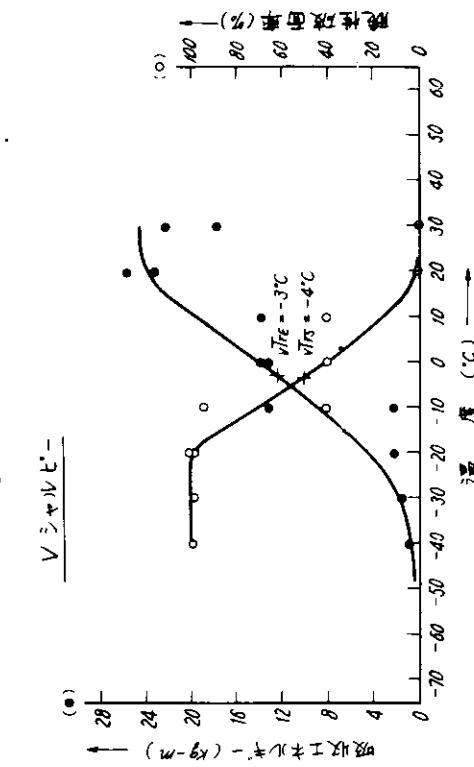
V-シリカルビ-

(●)

吸収エネルギー率 (kg/m^2)



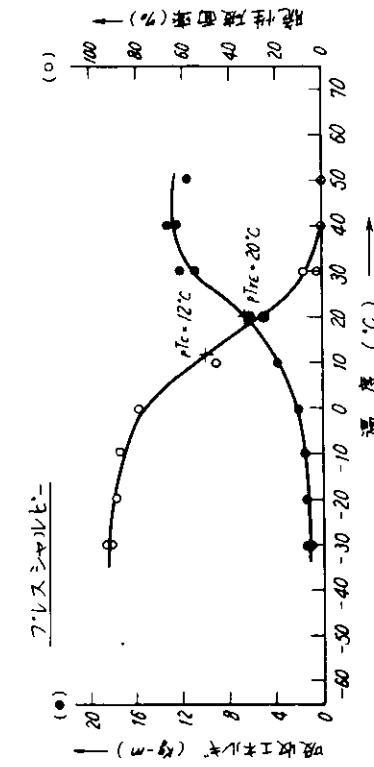
[RD 30]



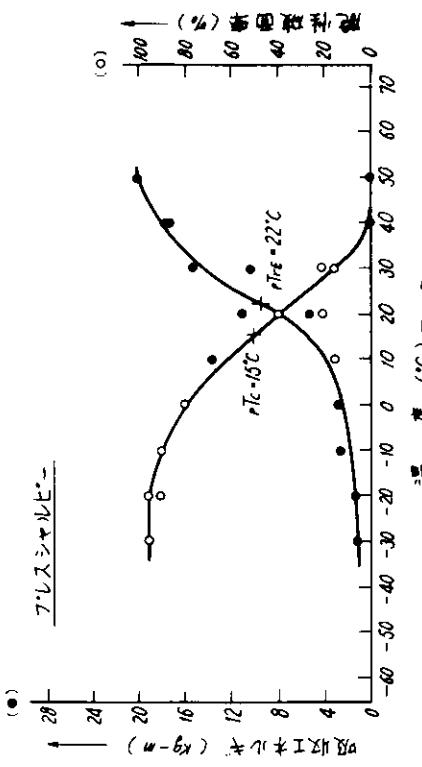
シリカルシナイト

(●)

吸収エネルギー率 (kg/m^2)



アラスカルシナイト



(2)

(3)

図 4.5.2 溫度と吸収エネルギー率および脆性破面率の関係（焼き）

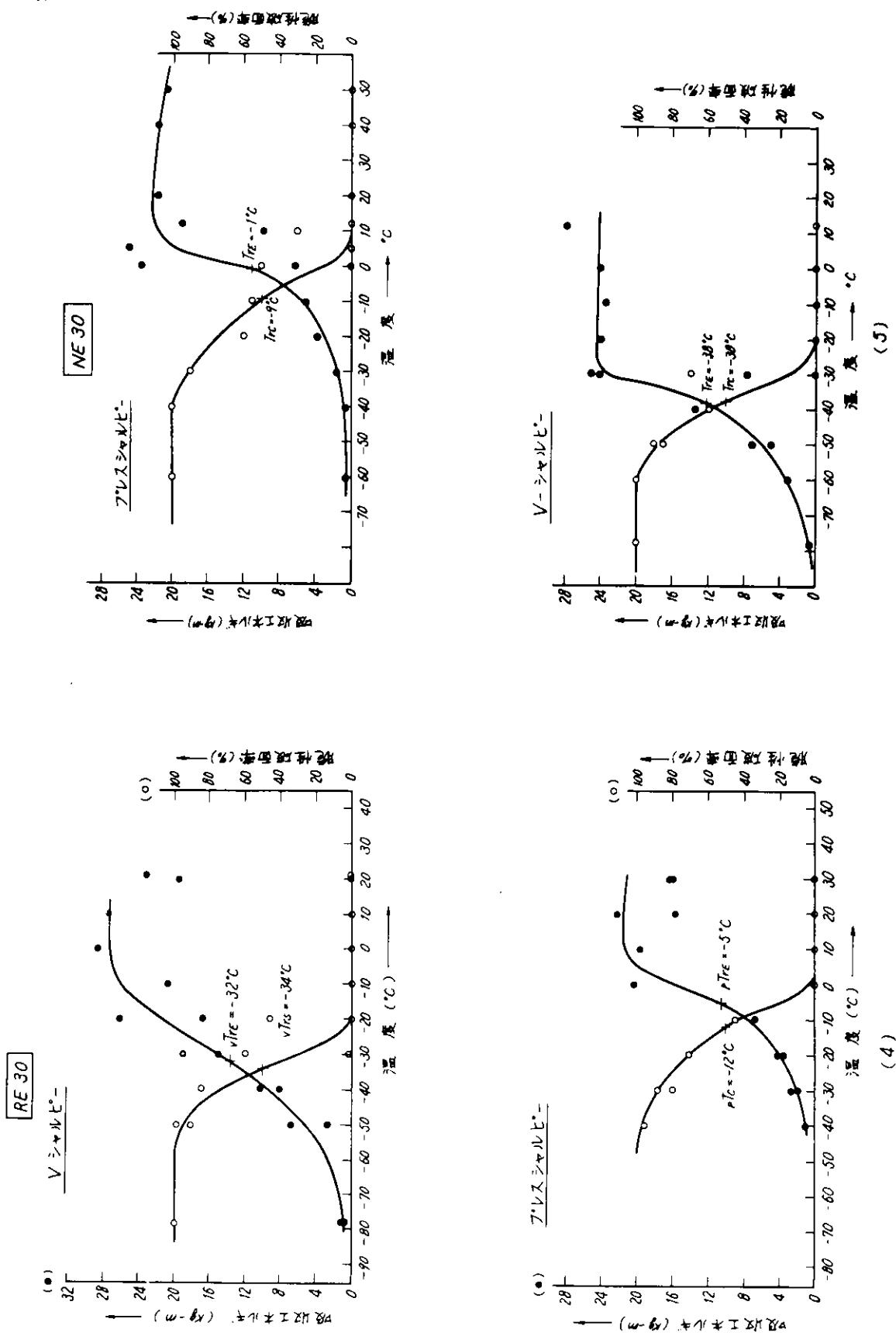


図 4.5.2 溫度と吸収エネルギーおよび脆性破面率の関係(続き)

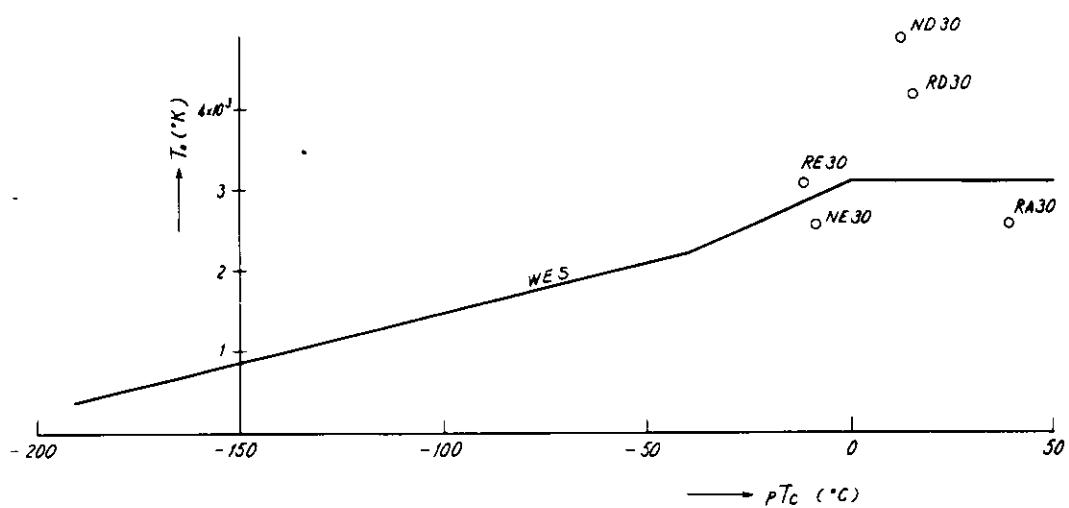


図 4.5.3 T_0 と pT_c の関係

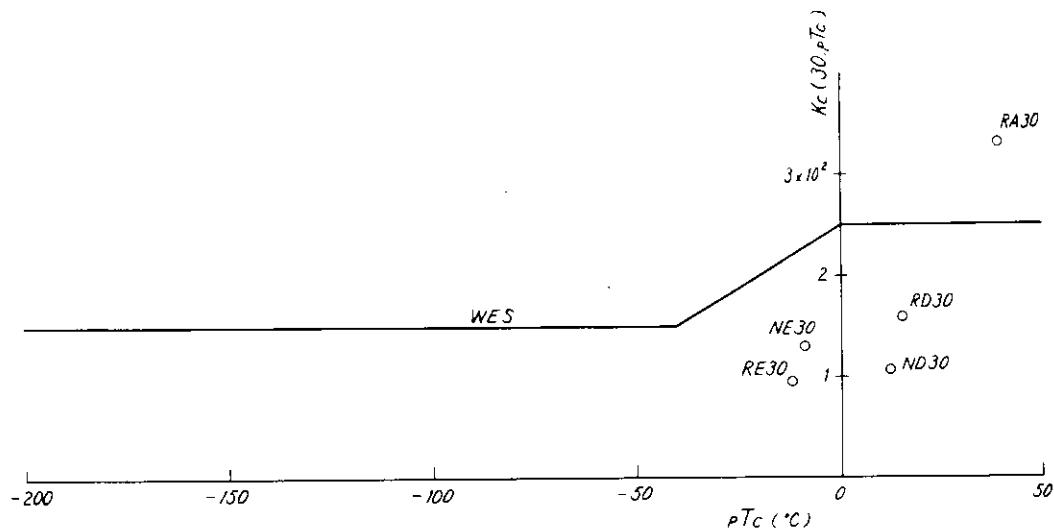


図 4.5.4 $K_c (J0, pT_c)$ と pT_c の関係

5. 厚板溶接部の脆性破壊発生特性の研究

5.1 Before Weld Notch および After Weld Notch の 縦溶接継手切欠広幅引張試験 (B-1) (B-2)

5.1.1 研究目的

船舶の巨大化に伴って、板厚40～50mmの超厚鋼板の使用が考えられている。超厚鋼板の溶接は拘束度および冷却速度の大きい多層溶接となるので割れ等の欠陥を発生させやすい。また、板厚方向の拘束が大となるためわずかな欠陥からも脆性亀裂が発生する危険が大きい。このため使用鋼板の脆性亀裂阻止特性とともに溶接継手部や構造上の不連続部よりの脆性亀裂発生特性を研究することが重要となる。

脆性亀裂発生試験は実際構造物の事故条件を再現しようとする観点からみると、伝播試験と比較して一層困難なものといえる。これは実際構造物における脆性亀裂の発生条件がきわめて多様複雑なものであることに起因する。このため、脆性亀裂発生試験としては以下のような多くの試験方法が研究されてきた。

切欠付縦継手広幅引張試験

切欠付十字継手広幅引張試験

ディープノッチ試験

不連続部付広幅引張試験

角変形付広幅引張試験

ESSO試験

各種圧力容器模型内圧破壊試験

NRL爆破ふくらまし試験、落重試験

等これらの試験法はそれぞれ想定した発生条件を再現することを試みて研究されたものということができる。

縦溶接継手切欠広幅引張試験は高い溶接残留応力が存在し、材質的にも劣化した位置よりの脆性亀裂発生条件を調べるための試験法であって、最近ではISO関係の基準において鋼板に対する要求衝撃値を決定する基準試験法として重要視されている。Wellsにより始められ、木原外によって数多くの供試鋼について適用され、また、試験条件についての検討がなされてきた。ここではこの試験方法を板厚50mmおよび30mmの巨大船用鋼板に適用し、これら鋼板の脆性破壊発生特性について検討を加えることを目的とした。

5.1.2 供試鋼材および試験片

供試材としては船級協会規格のD級鋼板厚30mm1鋼種および50mm2鋼種、計3鋼種を用いた。

縦継手の溶接前の試験片形状を図5.5.1に示す。これらの図に示したごとく、Before Weld Notch試験片においては脆性亀裂の発生する切欠は溶接前に加工しており、その先端半径は0.1mmであって完成後の切欠全長さは30mm 40mm、50mmの3種となることを目標とした。図5.1.2に示すように溶接完了後溶接継手中央にドリル孔をあけ、このドリル孔に溶接前に加工した切欠との間の溶接金属を2mm幅の鎌によって切断している。これらの手段によって本試験に採用した切欠はその先端部は溶接による熱およびひずみサイクルを受け、また、残留応力および外荷重による応力が切欠先端部に集中しやすいものとなっている。また、比較のためRDB30鋼についてAfter Weld Notch試験片1条件についての実験を実施し、切欠加工時期の影響を調べた。

この場合溶接前試験片の形状は切欠の加工を行なわぬ以外は Before Weld Notch 試験片の形状と全く同一である。

また、溶接後加工した切欠の形状も Before Weld Notch 試験片と同一形状となるよう配慮した。

従来の溶接前加工の切欠は X 型の溶接開先面に加工し、その先端はやはり X 型になっている場合がほとんどである。本試験の場合、図 5.1.2 に示されたごとく切欠先端は鋼板表面に垂直な 2 つの直線となっている。これは切欠の加工を容易にすること、試験結果に対して Fracture mechanics 的な取り扱いが容易となること、板厚の影響を検討しやすくなることを考えて行なったものである。

板厚が薄い場合、今回採用した切欠形状は従来の X 型切欠と比較して脆性亀裂を発生させにくい形状となっている恐れがある。板厚 30 mm の場合にはあるいはこれは該当しているかも知れない。しかしながら板厚が増大した場合には破壊の発生箇所は鋼板表面近くとなることが Wells により確かめられている。これにより厚さ 50 mm の鋼板の場合、今回採用した切欠によって試験条件があまくなっているとは考えられない。

図 5.1.2 に見られるごとく、板厚 30 mm の鋼板においては溶接開先の形状は通常施工の場合の溶接開先とかなり異なったものである。これは切欠長さを板厚 50 mm の場合と同一とし、また、切欠先端部の材質劣化の程度も同一に近くすることを考えたからである。

継手の溶接に使用した溶接棒は市販の神鋼 B・17 であり、その化学成分および機械的性質を表 5.1.1 に示した。初層は 4 mm, 他は 5 mm を使用し、裏はつりはグラインダで行なった。表裏の溶接順序はとくに定めず、角変形を最少に止めることを第一として溶接を行なった。

実験を行なう際の試験片最終形状を図 5.1.3 に示した。

5.1.3 試験内容および方法

本研究の実験は板厚 50 mm の試験片の場合は船舶技術研究所の 4,000 トン引張試験機、厚さ 30 mm の試験片は富士製鉄(株)中央研究所の 2,000 トン引張試験機を使用して実施した。

試験片の冷却にはドライアイスとアルコールを使用し、冷却槽は計 4 個を使用した。亀裂伝播予定線上に数個の熱電対をとりつけ、多点の自動打点式記録計によって温度計測を行なった。

伸びの計測は標点距離約 1 m で実施し、荷重の上昇に伴う伸量の計測を行なった。

5.1.4 試験結果および考察

供試鋼 RDB30, ND50A および ND50B について切欠付縫溶接継手引張試験の結果を表 5.1.2 ~ 表 5.1.5 に示す。これらの結果を横軸温度、縦軸応力の図上に示したもののが図 5.1.4 ~ 図 5.1.7 である。

図 5.1.4 に見られるごとく RDB30 鋼 Before Weld Notch 試験片においては +10 °C 以下の温度において低荷重における 1 次脆性亀裂の発生を見ており、これらの温度、応力条件をぬりつぶした記号で示した。また、これら各記号の横の数字は 1 次亀裂全長を mm で表わしたものである。

1 次亀裂発生の後かなり高い荷重を加えて後 2 次亀裂が発生しており、これらの温度、応力条件(応力は Net)を白ぬきの記号で示した。これらにつけた S および B は 2 次破壊が延性破壊であるか脆性破壊であるかを示したものである。なお、今回の実験では脆性亀裂が発生、停止を繰返すという多段破壊の様相は見られず、いずれも 2 次破壊が

最終破壊となっている。

図 5.1.4 および図 5.1.5 に見られるごとく一次亀裂の発生荷重は切欠長さの長い場合が低くなっている。とくに切欠長さ 50 mm の試験片においては 6 枚中 3 枚が 2 次切欠の加工中に切欠先端部より脆性亀裂を発生させている。これらの切欠長さは表 5.1.3 に併せて示している。これに対して立上りの温度は逆の実験結果となり、温度 +10 °C では切欠長さ 30 mm の短い切欠の場合のみが低荷重の一次亀裂を発生させた。この理由として切欠長さ 30 mm の場合の方が切欠先端部の材質的劣化の程度が大きいためとも推測されるが、今回の程度の試験片数を考えれば立上りの温度は一括して 0 °C から 10 °C の範囲にあるものと考える方が妥当であろう。

2 次破壊における破面遷移は図 5.1.4 よりみて -10 °C 程度と考えられる。従来の試験結果では立上りの温度は 2 次破壊の破面遷移温度より低温度側にくるのが普通であるが、今回の RDB30 鋼はさらに高温度においても低応力で 1 次脆性亀裂を発生させており、この点で特異な性質を持つものといえよう。

図 5.1.6 および図 5.1.7 に示した N D 50 A および N D 50 B の試験結果は全く対称的なものであった。RDB30 鋼のごとく 1 次亀裂の発生と急激な立上りの現象は見られず破断応力は温度の上昇とともにゆるやかに上昇している。比較的高温度の試験で破面に延性破面部分脆性破面部分がともに表われる際には切欠底部よりまず延性破壊が発生し、延性破壊がある距離進展して後、脆性破壊が発生するという様相を示した。これは RDB30 鋼の場合と逆であった。

図 5.1.6 よりみて N D 50 A 鋼が完全に脆性破面を示すようになる温度は -30 °C ～ -40 °C 程度と思われる。

図 5.1.7 の N D 50 B 鋼の場合には切欠長さ 50 mm の一枚が -24 °C で完全な脆性破面を示しており、切欠長さ 40 mm の場合 50 mm の場合との共通な破面遷移温度を決定し難い。なお、N D 50 B 材切欠長さ 50 mm の場合においては延性破面が脆性破面へ転移する破面形式は見られなかった。

図 5.1.6 および図 5.1.7 を総合して切欠長さが長くなるほど破壊強度は低下し、遷移温度は高温側へ移動するものと考えてよいようである。

表 5.1.6 および図 5.1.8 ～図 5.1.9 において従来実施された試験の結果と今回の試験結果との比較を試みた。図 5.1.8 および図 5.1.9 の横軸 $1/\sigma_y T_r$ は切欠付縫継手広幅引張試験における立上りの遷移曲線を室温における降伏点の $1/2$ の応力で切った点の温度である。

図 5.1.8 および図 5.1.9 よりみて N D 50 A 鋼および N D 50 B 鋼の結果、また、RDB30 鋼の溶接後切欠加工試験片についての結果はほぼ従来の同種実験結果の平均値と一致している。これに対して RDB30 鋼溶接前切欠加工試験の結果のみはシャルピー試験からの推定値に対してかなり危険側の値を示した。

RDB30 鋼の場合ミルシートに記載された L 方向衝撃値は 0 °C において 10 kg-m であるがこれが 0 °C ～ +10 °C で低応力破壊を起している事実は検討を要する。

この種の鋼が 0 °C において低応力破壊を起きぬためには $vT_{rs} = 20 °C$ 以下、 $vT_{r15} = 40 °C$ 以下程度の要求値が必要と思われる。

5.1.5 結論

- 1) 縫溶接継手広幅引張試験において RDB30 鋼の示した実験結果は N D 50 A 鋼および N D 50 B 鋼における実験結果と比較してその性状を異なるものであった。
- 2) RDB30 鋼においては低荷重において脆性亀裂が発生し停止するという 1 次破壊の現象が認められた。これに

対して N D 5 0 A 鋼, N D 5 0 B 鋼は 1 次破壊の現象を示さず遷移温度域においてはまずせん断亀裂が発生し、これが脆性亀裂へ転移するという様相を示した。

3) R D B 3 0 鋼は急激な応力遷移現象を示したのに對し、N D 5 0 A 鋼, N D 5 0 B 鋼はゆるやかな応力遷移の現象を示した。

4) R D B 3 0 鋼のミルシートによるシャルピー衝撃値は 0 °Cにおいて 1 0 kg-m (L 方向) であったが、大形試験の結果においては 0 °C ~ + 1 0 °C の温度においてなお一次亀裂を発生させている。

5) シャルピー試験の結果から大形試験の結果を推定しようとする場合、N D 5 0 A, N D 5 0 B 鋼と比較して R D B 3 0 鋼はかなり危険側にくることが示された。

6) R D B 3 0 鋼についての実験結果においては Before Weld Notch 試験片と After Weld Notch 試験片との間で約 4 0 °C の立上がり温度における差異が認められた。

7) 今回実験した範囲においては切欠長さを長くするほど亀裂発生荷重が低下する傾向が示された。とくに N D 5 0 A 鋼においては立上がりの遷移温度にも影響を与えていたが、R D B 3 0 鋼においては立上りの遷移温度には全く影響を与えていない。

添付資料

荷重一伸び曲線を図 5.1.1 0 ~ 5.1.1 2 に、破断面を図 5.1.1 3 ~ 5.1.2 1 に示した。

写真 5.1.1 は 4 0 0 0 mm テストリグで実験中のものであり、写真 5.1.2 は、N D 5 0 A 鋼の一部を示した。

表 5.1.1 使用溶接棒溶着金属の化学成分と機械的性質

銘柄	規格	化 学 成 分 (%)					機 械 的 性 質			
		C	S	M	P	S	降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	衝撃値 0 °C kg-m/cm
B 1 7	J IS D 4 3 0 1	0.08	0.08	0.44	0.014	0.011	42	46	31	13

表 5.1.2 切欠広幅引張試験結果 (RDB30鋼)

試験片 No.	切欠長さ mm	試験温度 ℃	1次発生荷重 (脆性破壊) Ton	破断荷重 (2次発生荷重) Ton	最高荷重 Ton	1次発生応力 kg/mm ²		破断応力 kg/mm ²	破断力 Net	伸び率 %
						Gross	Net			
1	32.0	-41	150	690	—	6.3	6.5	34.9	(28.8)	—
2	31.0	-0.5	300	—	975	12.5	13.0	—	40.6	43.0
3	31.6	-20	160	490	—	6.6	6.9	34.0	20.3	—
4	32.6	20	—	—	880	—	—	—	36.0	37.6
5	31.2	-60	300	—	—	12.3	12.4	—	12.3	—
6	31.9	10	100	—	865	4.0	4.2	—	34.9	37.6
7	40.0	-20.5	110	530	—	4.5	4.7	34.1	21.7	—
8	39.4	-40	80	520	—	3.3	3.5	34.4	21.3	—
9	41.5	-60	45	300	—	1.8	2.0	38.9	12.3	—
10	40.3	19.5	—	—	890	—	—	—	36.4	38.4
11	41.0	0	100	—	890	4.1	4.3	—	36.6	39.3
12	42.4	10	—	—	910	—	—	—	37.6	39.6
										11.8

表 5.1.3 切欠広幅引張試験結果 (RDB 30鋼)

試験片 <i>M</i>	切欠長さ mm	試験温度 ℃	1次発生荷重 (脆性破壊) Ton	最高荷重 Ton	1次発生応力 kg/mm ²		破断応力 kg/mm ² (Net)	破壊応力 kg/mm ² (GL 700)	伸び率 %
					Gross	Net			
AN 1	43.0	0	—	9.20	—	—	—	3.7.8	3.9.9
2	45.0	-19	7.30	—	—	30.0	31.8	(30.0)	—
3	46.0	-13	7.30	—	—	30.0	31.8	(30.0)	—
4	47.0	-60	7.70	—	—	31.6	33.5	33.5	—
5	45.0	-39	5.0	5.60	—	2.0	2.2	3.6.0	(22.9)
BN 1	52.0	0	2.60	—	5.10	10.8	11.5	—	45.5
	54.0 ※(90)	20.5	—	—	8.30	—	—	34.1	(38.4)
3	55.0	-22	1.00	6.00	—	4.1	4.4	33.5	(24.6)
4	55.0 ※(104)	-39	7.30	—	—	30.3	32.5 (34.8)	(30.3)	—
5	55.0 ※(86)	-60	6.70	—	—	27.5	29.5 (30.8)	(27.5)	—
6	54.0	10.5	—	—	8.65	—	—	35.4	37.9

※ 加工中にノッチ先端部にき裂の入った試験片 数字は切欠部を含むき裂全長

表 5.1.4 切欠広幅引張試験結果 (ND50A鋼)

試験番号	試験片形状		切欠長さ mm	試験温度 °C	破断荷重 Ton	最高荷重 Ton	破壊応力 %GL	伸び率 %
	板厚 mm	板幅 mm						
B 1	5 0.5	8 0 0.5	4 0.4 1 3	3 3.0	- 4 3	1,0 2 0	2 5.2	2 6.3
2	5 0.4	8 0 4.7	4 0.5 3 4	3 1.0	0	1,3 3 0	3 2.9	3 4.2
3	5 0.9	8 0 9.0	4 1.1 7 8	3 0.8	- 6 5.5	6 7 0	1 6.4	1 6.9
4	5 0.8	8 0 5.0	4 0.8 9 4	3 0.4	- 2 0	1,3 4 0	3 2.7	3 4.1
5	5 0.6	8 0 6.0	4 0.7 8 4	3 0.3	- 3 0	1,2 7 0	3 1.2	3 2.4
6	5 0.8	8 0 5.0	4 0.8 9 4	3 3.3	- 7 2	8 6 0	2 0.9	2 1.9
7	5 0.5	8 0 1.8	4 0.4 9 1	4 0.9	- 2 6	1,0 0 0	2 4.3	2 6.1
8	5 1.0	8 0 2.0	4 0.9 0 2	4 3.0	- 4	1,0 0 0	2 4.5	2 5.8
9	5 1.0	8 0 5.0	4 1.0 5 5	4 1.5	1 3	1,3 0 0	3 1.6	3 3.4
1 0	5 0.7	8 0 0.0	4 0.5 6 0	4 3.0	- 5 2	3 8 0	9.4	9.9
1 1	5 0.8	8 0 6.0	4 0.9 4 5	4 2.1	- 3 7		1 0.9	1 1.6

表 5.1.5 切欠広幅引張試験結果 (ND50B鋼)

試験片 <i>N</i>	試験片形状		切欠面積 mm ²	切欠長さ mm	試験温度 °C	破断荷重 Ton	最高荷重 Ton	破壊応力 kg/mm ²	伸ひき率 %
	板厚 mm	板幅 mm							
B-1.2	51.0	801.0	408.51	53.2	16	1,460	35.7	38.3	12.5
1.3	50.9	802.5	408.47	52.8	-47	1,260		30.8	33.0
1.4	50.7	802.5	406.87	52.5	-70	560		13.7	14.8
1.5	50.9	794.0	404.78	52.9	-24	1,090		26.9	29.8
1.6	51.3	804.0	412.05	51.7	-55	1,350		29.8	31.8
1.7	50.9	796.0	405.16	42.5	-27	1,460		36.0	38.1
1.8	50.6	801.3	401.43	44.5	-42	1,480		36.9	39.1
1.9	50.4	796.0	401.18	39.5	-69	910		22.7	23.8
2.0	50.9	804.0	409.24	40.3	-55	1,280		31.3	32.9
2.1	51.4	803.0	413.14	39.9	-90	660		15.8	16.7
2.2	50.9	804.0	408.83	39.0	-38.7	1,300		31.8	33.5
2.3	51.0	801.5	408.77	43.5	27	1,500	36.7	38.7	11.3

表 5.1.6 各鋼種における $1/2 \sigma_y$ Tr および vT_{rs} vT_{r15} の関係

No.	記号	シャルピー(℃)		大型試験(℃) $\sigma_y/2$ Tr	No.	記号	シャルピー(℃)		大型試験(℃) $\sigma_y/2$ Tr
		vT_{rs}	vT_{r15}				vT_{rs}	vT_{r15}	
1	A	50	22	20	17	N	-60	-106	-157
2	B	55	24	20	18	K	-100	-116	-168
3	C	32	8	0	19	ND50A b=30	-8	-38	
4	A-2			0	20	ND50A b=40	-8	-38	-34
5	SS	48	29	43	21	ND50B b=40	-30	-77	-89
6	P	26	17	10	22	ND50B b=50	-30	-77	-70
7	Q	-6	-18	-5	23	RDB30B b=30	-10	-24	10
8	R	-31	-72	-	24	RDB30B b=40	-10	-24	0
9	S	-27	-43	-23	25	RDB30B D=50	-10	-24	0
10	T	-59	-68	-	26	RDB30A D=40	-10	-24	-35
11	XA	-60	-101	-150					
12	XB	-46	-89	-120					
13	YA	-46	-115	-126					
14	YB	-81	-108	-119					
15	ZA	-80	-109	-134					
16	ZB	47	2	40					

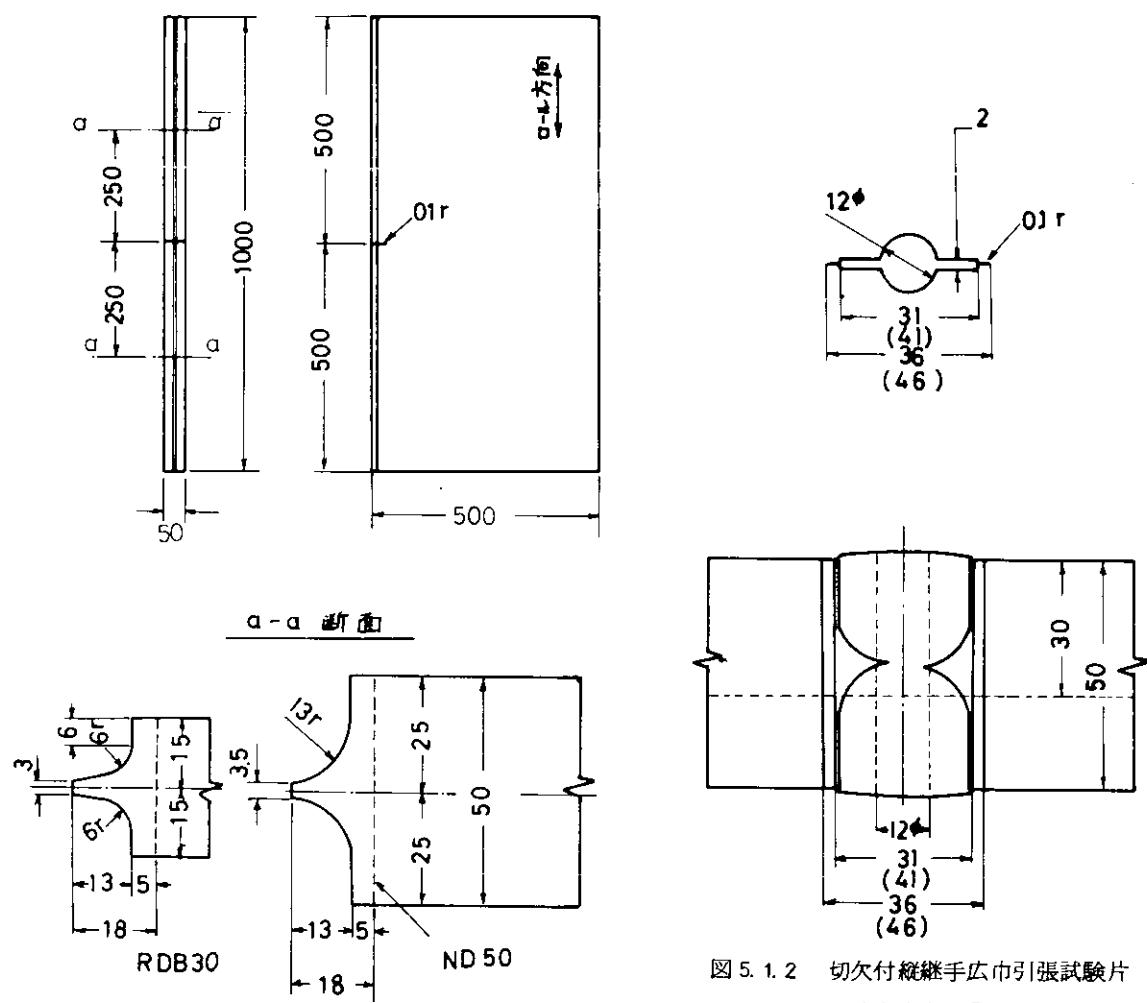


図 5.1.1 縦溶接継手切欠広巾引張試験片

図 5.1.2 切欠付縦溶接継手広巾引張試験片
2 次切欠加工図

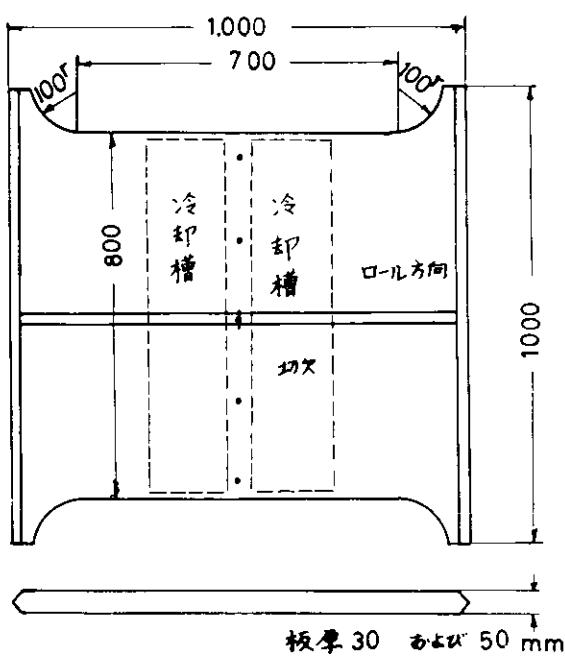


図 5.1.3 切欠付縦溶接継手広巾引張試験片

R D B 30 鋼

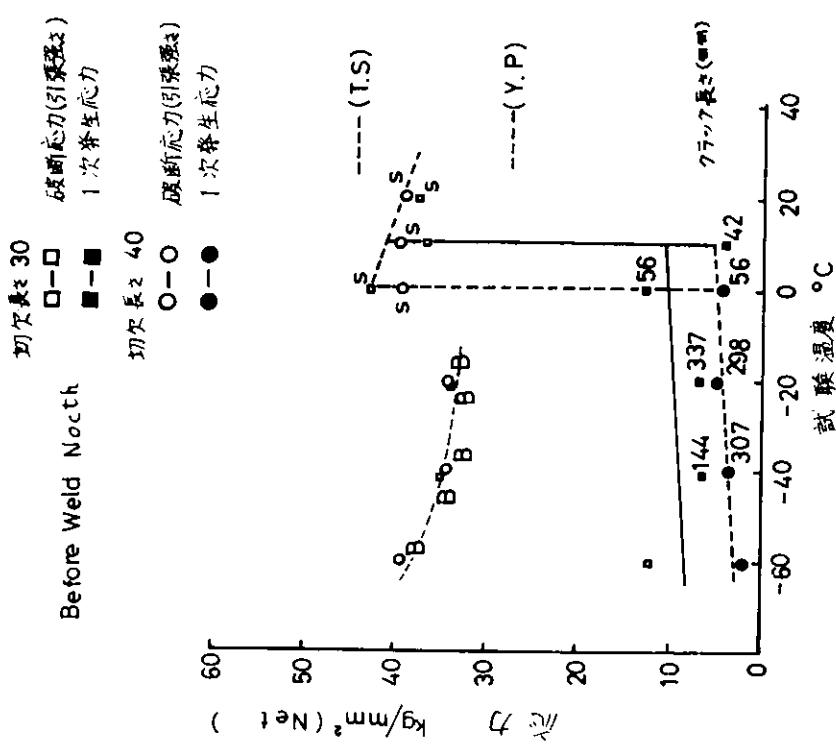


図 5.1.4 応力-温度曲線

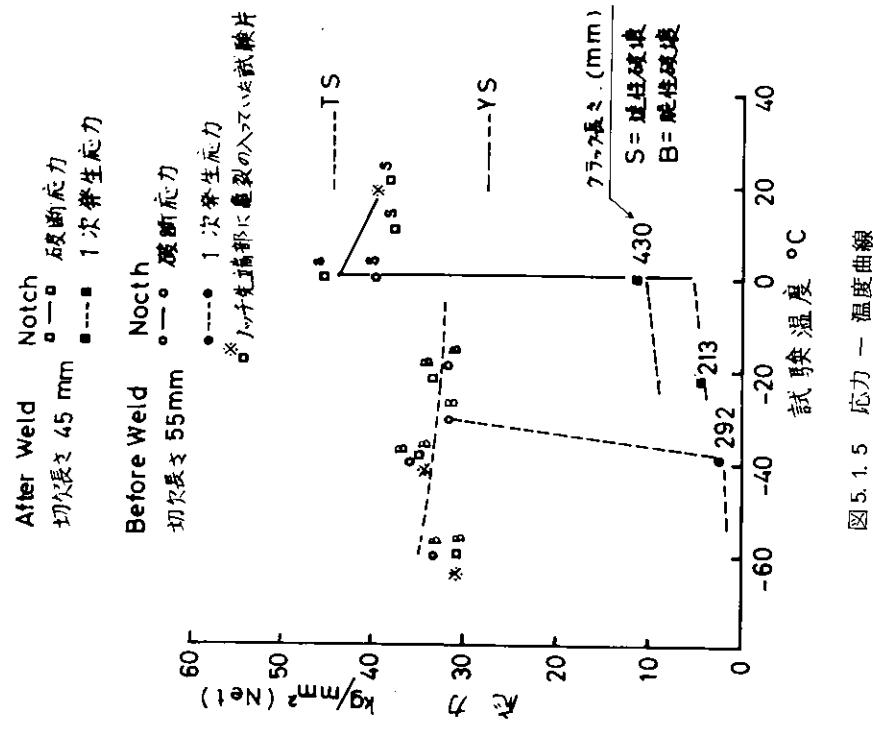


図 5.1.5 応力-温度曲線

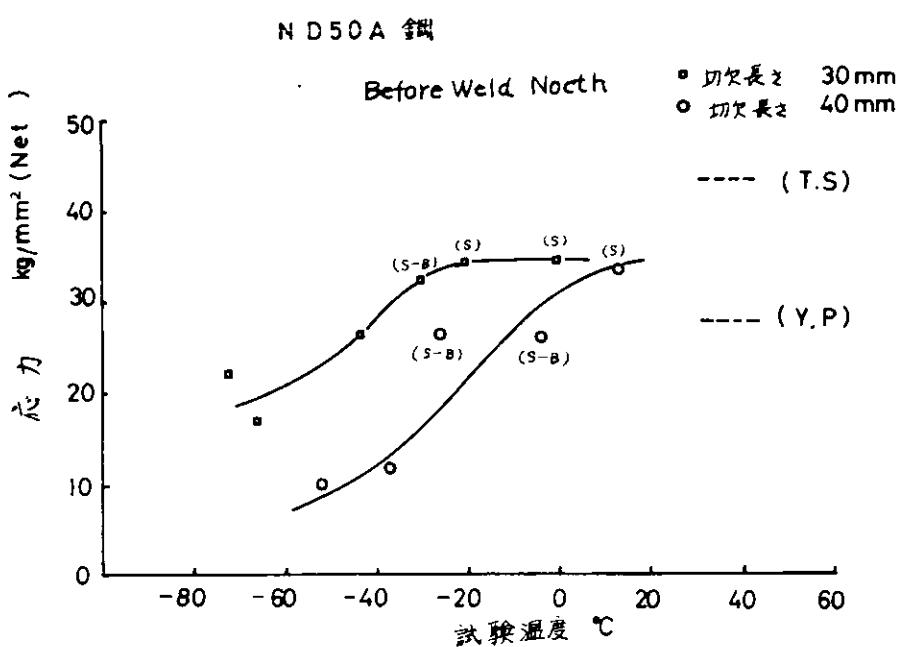


図 5.1.6 応力 — 温度曲線

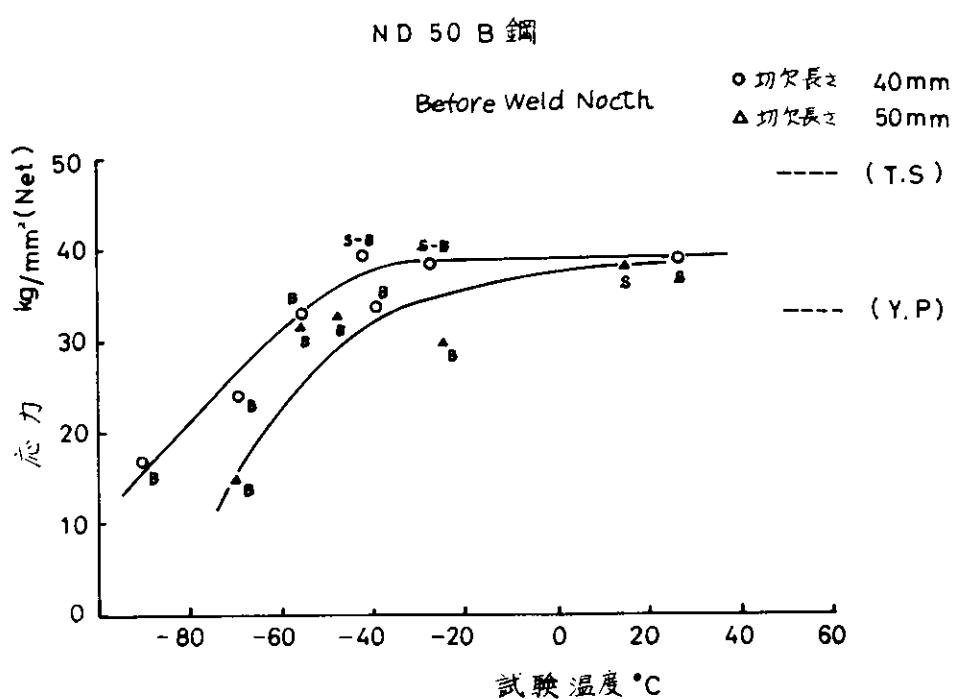
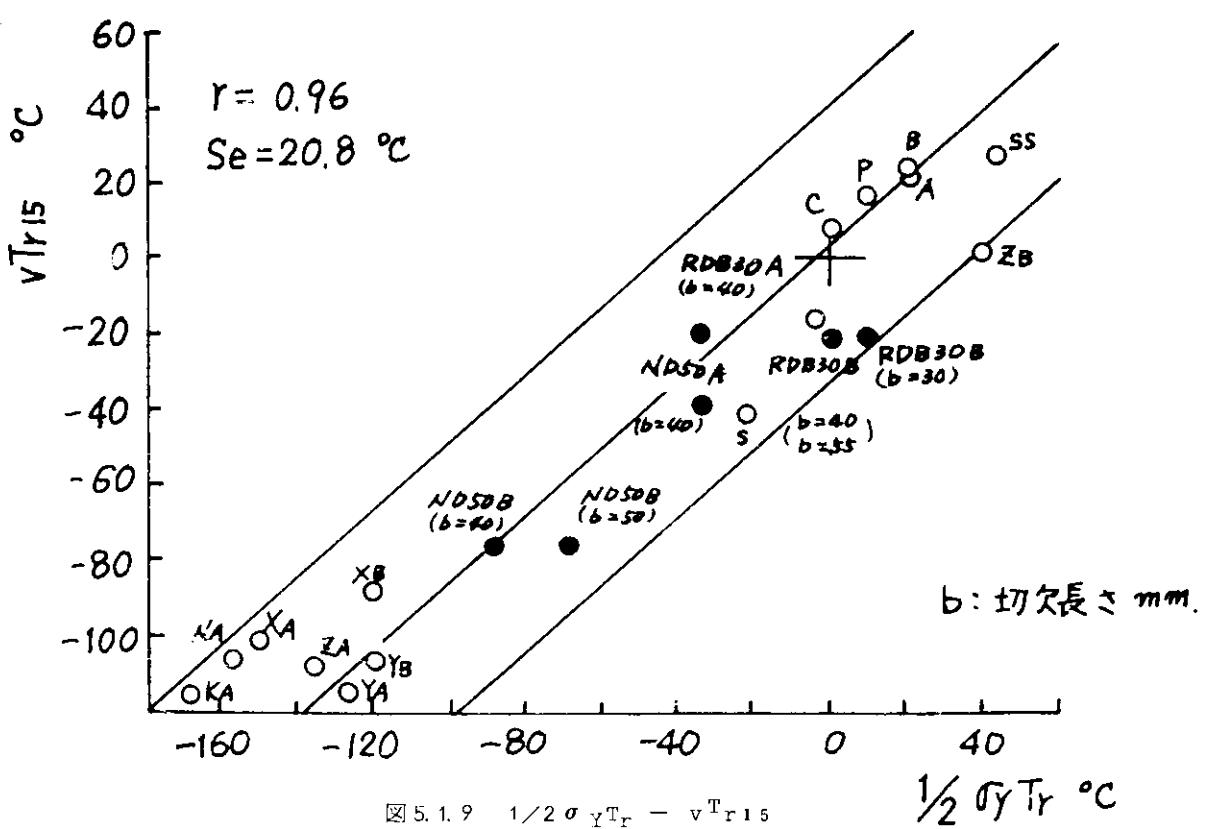
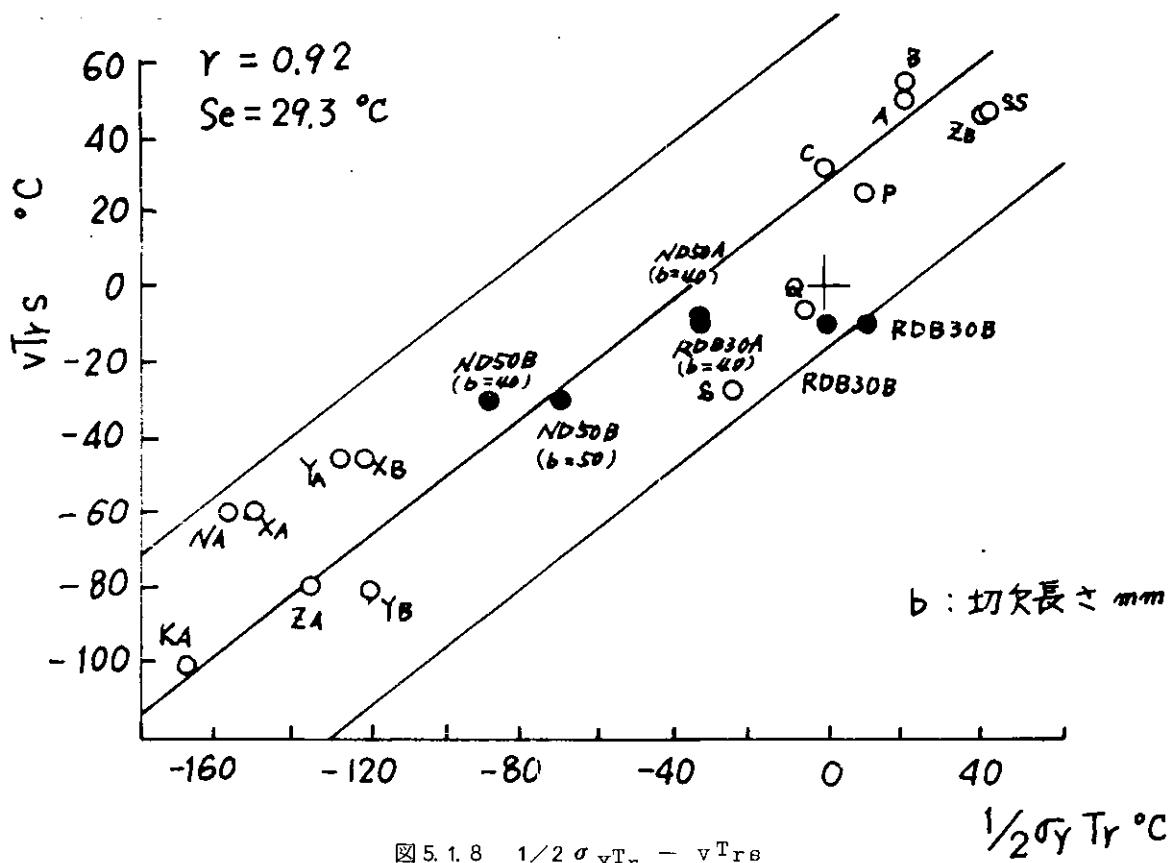


図 5.1.7 応力 — 温度曲線



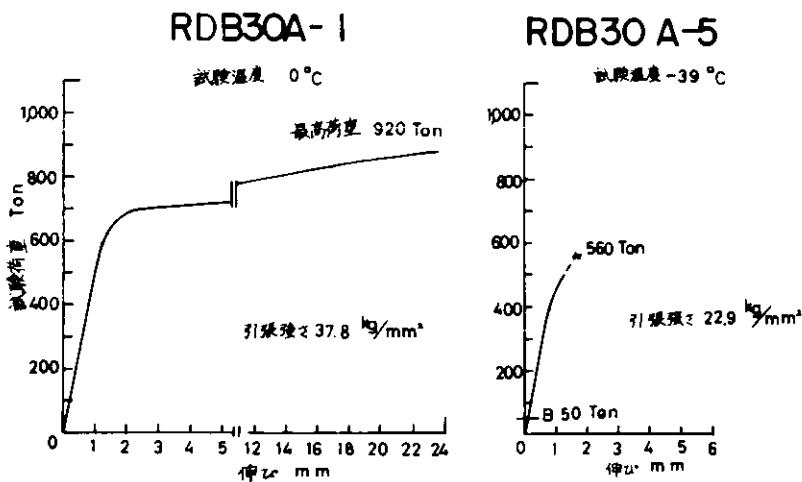


図 5.1.1.0 試験荷重 — 伸び曲線

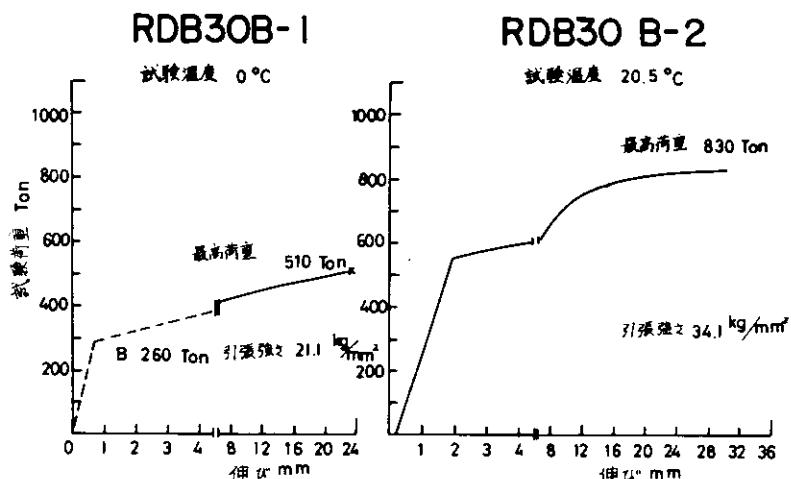


図 5.1.1.1 試験荷重 — 伸び曲線

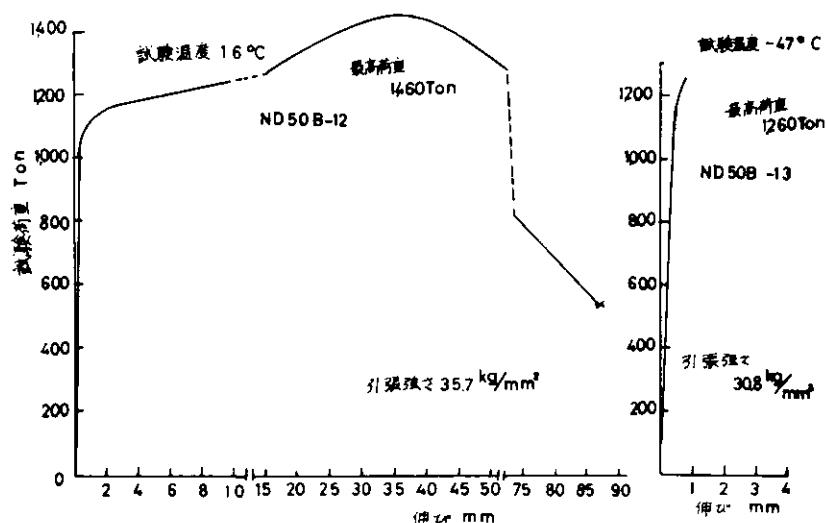


図 5.1.1.2 試験荷重 — 伸び曲線

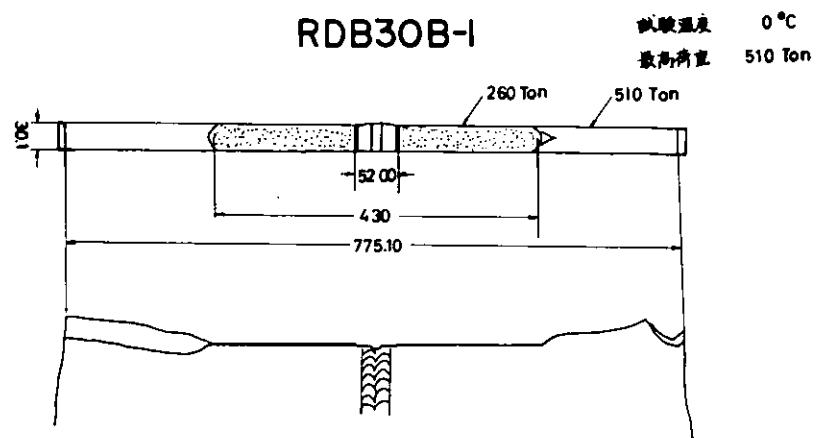


図 5.1.1.3

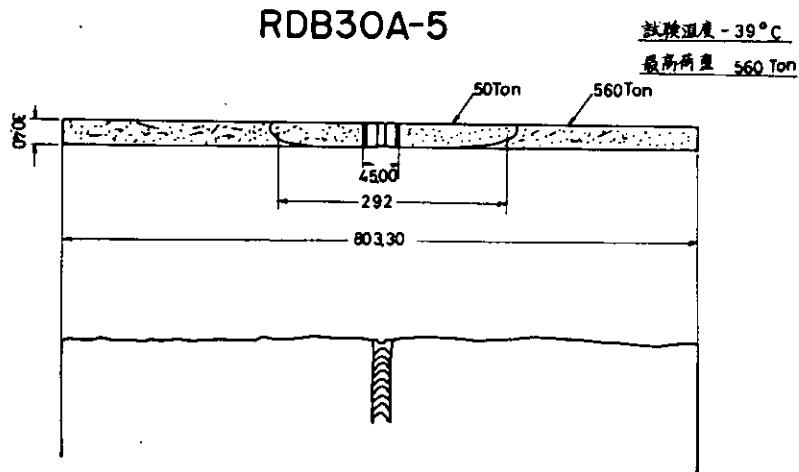


図 5.1.1.4

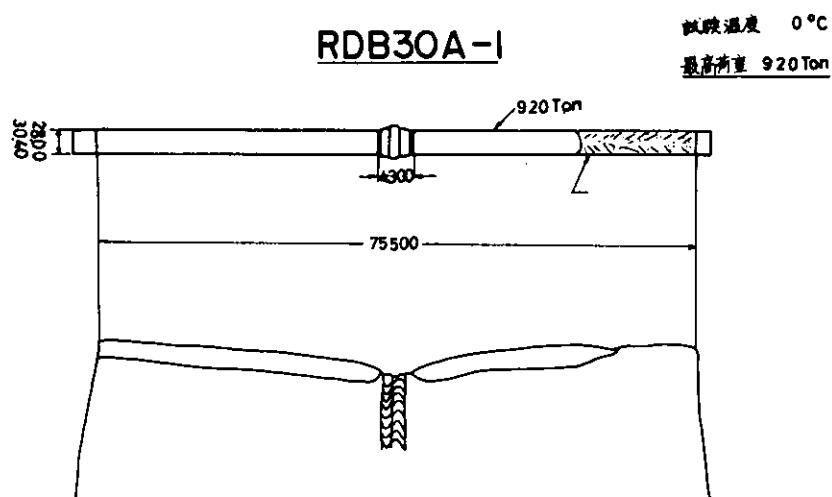


図 5.1.1.5

RDB30 B-2

試験温度 205°C
最高荷重 830 Ton

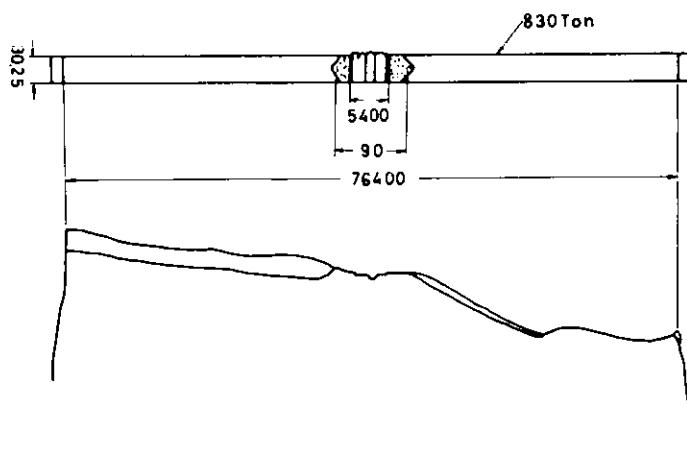


図 5.1.1.6

RDB30B - 3

試験温度 20°C
最高荷重 490 Ton

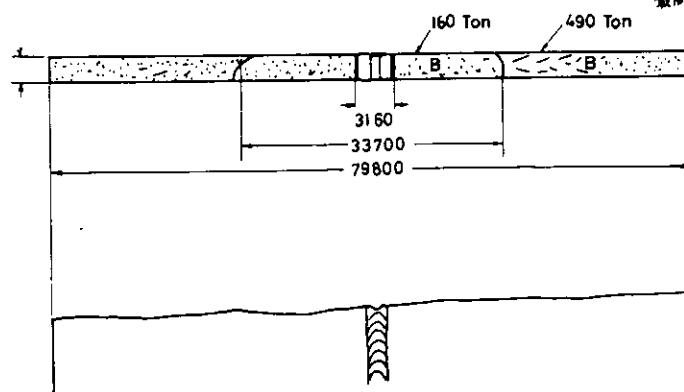


図 5.1.1.7

RDB30 B - 4

試験温度 20°C
最高荷重 880 Ton

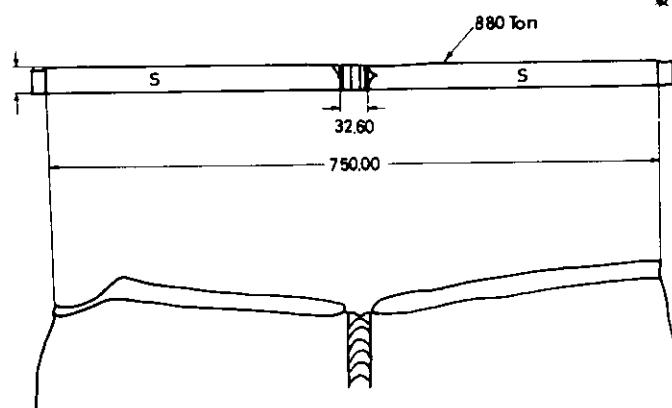


図 5.1.1.8

ND50A NO.7

試験温度 -26 °C
最高荷重 1000 Ton

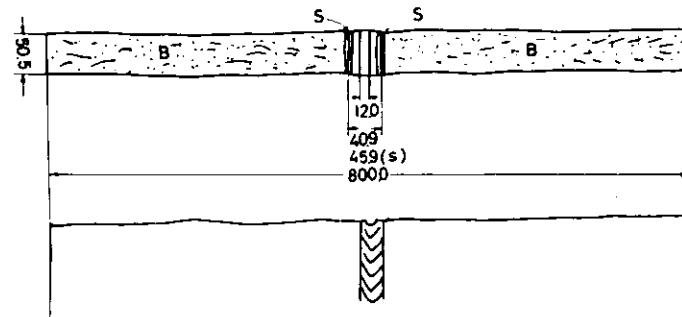


図 5.1.19

ND50 B NO.12

試験温度 16 °C
最高荷重 1460 Ton

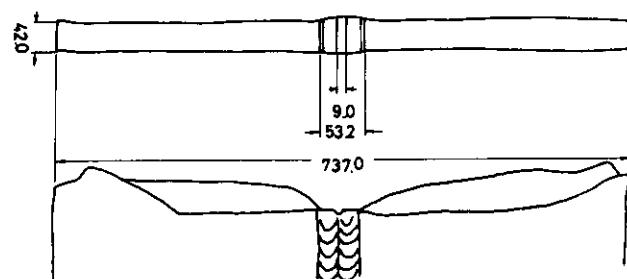


図 5.1.20

ND50 B NO.13

試験温度 -47 °C
最高荷重 1260 Ton

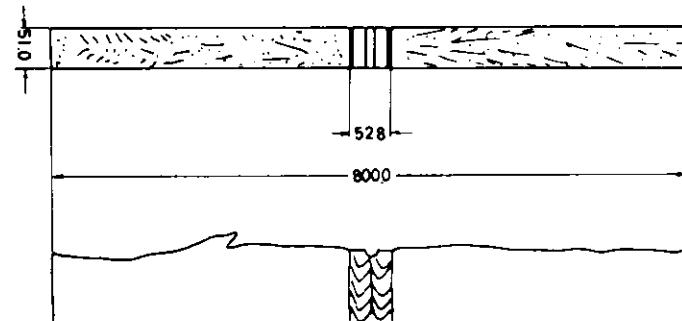


図 5.1.21

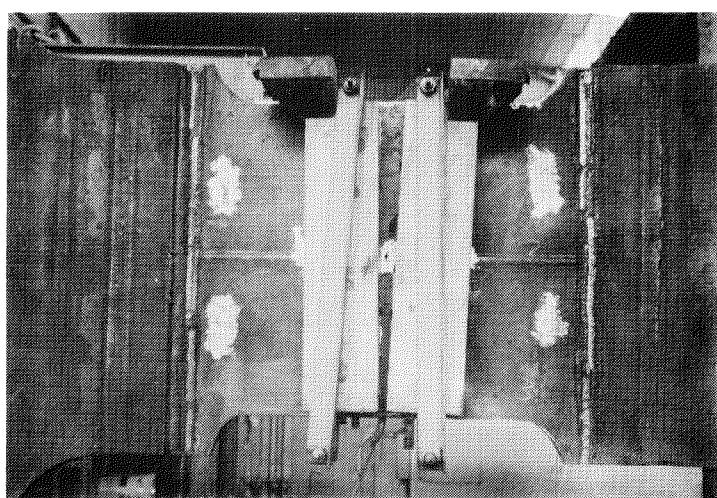
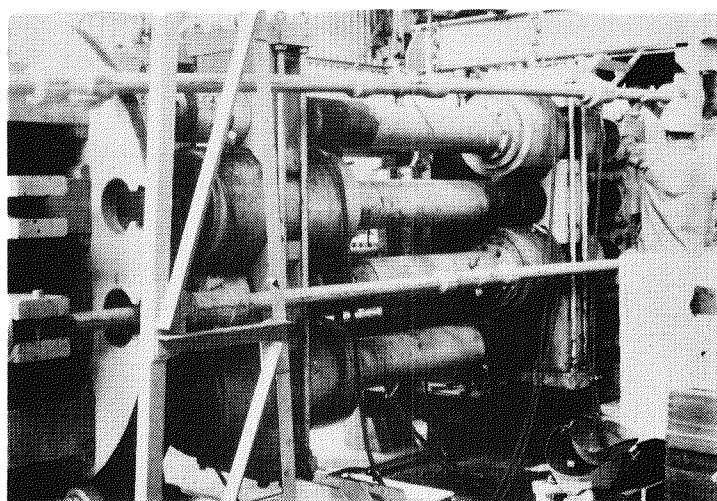
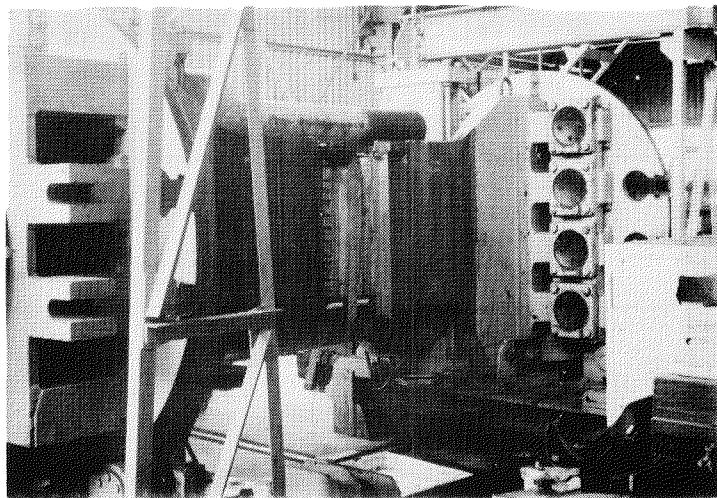
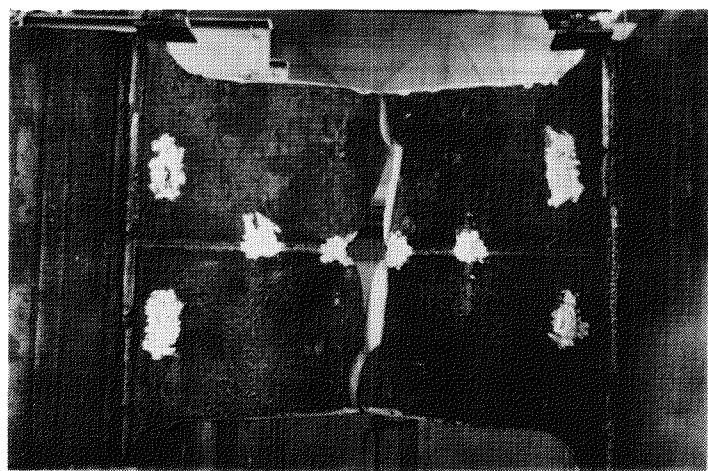
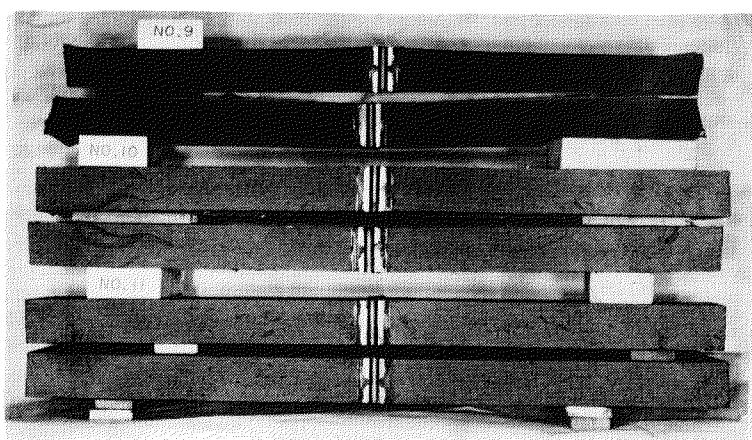


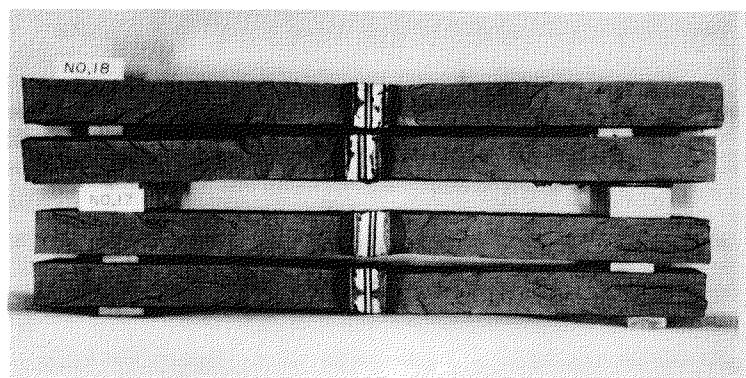
写真 5.1.1 試験状況



破断面



破面



破面

写真 5. 1. 2

5.2 V シャルピー 試験 (B-3)

5.2.1 研究目的

B-1 の切欠長さの決定のために溶接継手部の切欠じん性の分布をしらべる。すなわち、溶接金属、ボンドおよびその近傍の種々の位置に切欠先端が位置するシャルピー試験片について吸収エネルギーと温度の関係をもとめて脆化の最も著しい位置をしらべる。

5.2.2 供試材および試験片

供試材はD級鋼(セミキルド鋼、キルド鋼)の板厚30mmおよび50mmのRDB30, ND50A, ND50Bである。

試験片形状は図5.2.1に示す通りである。

5.2.3 試験内容および方法

供試材に図5.2.2に示す開先をつけ、神戸製鋼所製の被覆アーク溶接棒、B-17(4, 5mmØ)をもちいて第1層を4mmØ第2層から5mmØの溶接棒で溶接し溶接継手を作製する。

溶接電流は4mmØの溶接棒の時120~180アンペア、5mmØのとき170~250アンペアである。溶接棒の化学成分および機械的性質を表5.2.1に示す。

表5.2.1 使用溶接棒溶着金属の化学成分と機械的性質

銘柄	規格	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 %	衝撃値 °C kg/mm ²
B17	JIS D4301	0.08	0.08	0.44	0.014	0.011	42	46	31	13

ノッチ先端が図5.2.3に示すように溶接金属、圧延面でのボンド、それより4.5mm間隔の位置(記号①~⑥)にくるようにVシャルピー試験片を25本ずつ採取する。試験片の長さ方向が鋼板のロール方向に直角になるようにし、ノッチは板厚方向にいれる。母材についてはロール方向およびロール方向に直角方向の2種類についても実験を行なった。

試験には容量30kg/mのシャルピー衝撃試験機をもちいた。試験片を所定の温度に保たれた恒温槽内にいれ、10分以上浸漬したのち、すみやかに試験片をとりだして試験をおこなった。なお、冷剤としてドライアイスとエチルアルコールをもちいた。

5.2.4 試験結果および考察

RDB30およびND50A, ND50Bについて所定の位置より採取した6種類の試験片について種々の温度(60°C~-100°C)でVシャルピー試験をした。

その結果について、吸収エネルギー、脆性破面率、そして横収縮率をもとめ、RDB30については図5.2.4から図5.2.9に、ND50Aについては図5.2.11から図5.2.18に、また、ND50Bについては図5.2.20から図5.2.27に示す。なお、母材および試験片採取位置①から⑥の各吸収エネルギー温度曲線をまとめて、RDB30については図5.2.10に、ND50Aについては図5.2.19に、ND50Bについては図5.2.28に示す。また、各位置の 15_{ft-1b} 遷移温度 vTr_{15} 、エネルギー遷移曲線 $vTre$ 、破面率遷移温度 vTr_s 、横収縮率 $vTr\phi_2, 0^\circ C$ における吸収エネルギー $vE_{o,-10^\circ C}$ を表5.2.2に示す。図より溶接熱サイクルにより最も脆化するのはRDB30およびND50Aも同様にボンド附近の位置②および③が最も著しく遷移温度曲線は他の位置(④, ⑤, ⑥)より $10^\circ C$ 以上高温側に移行している。なお、ボンドから $10mm$ 以上はなれないとあまり影響がないようである。ND50Bについては溶接金属が最も脆化して他の位置(②, ③, ④, ⑤, ⑥)20℃以上高温側に移行している。

結論として本供試材で図5.2.2に示す。開先形状の場合には溶接熱サイクルによる最脆化部はRDB30およびND50Aについては余盛跡端および余盛跡端から $4.5mm$ はなれた位置であることがわかった。ND50Bについては溶接金属が最も脆化することがわかった。

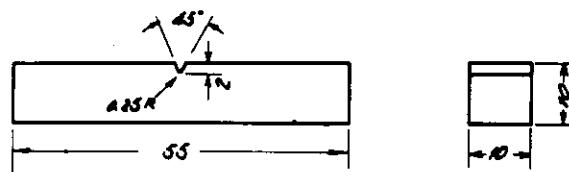


図 5.2.1 V シヤルピー 試験片形状

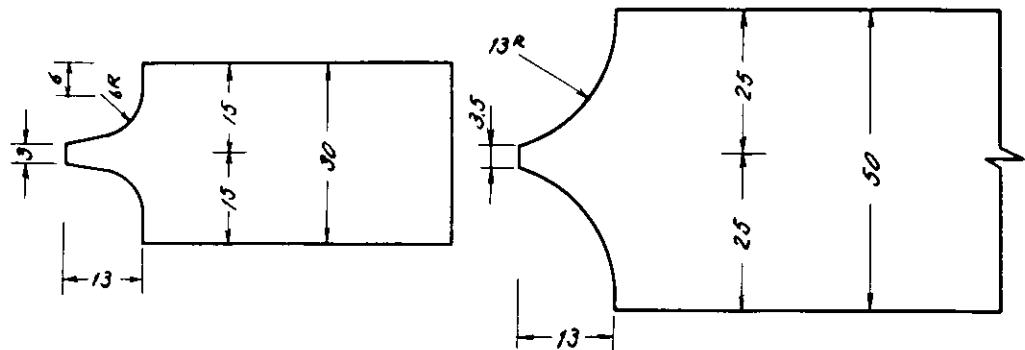


図 5.2.2 RDB 30 および ND 50 の開先形状

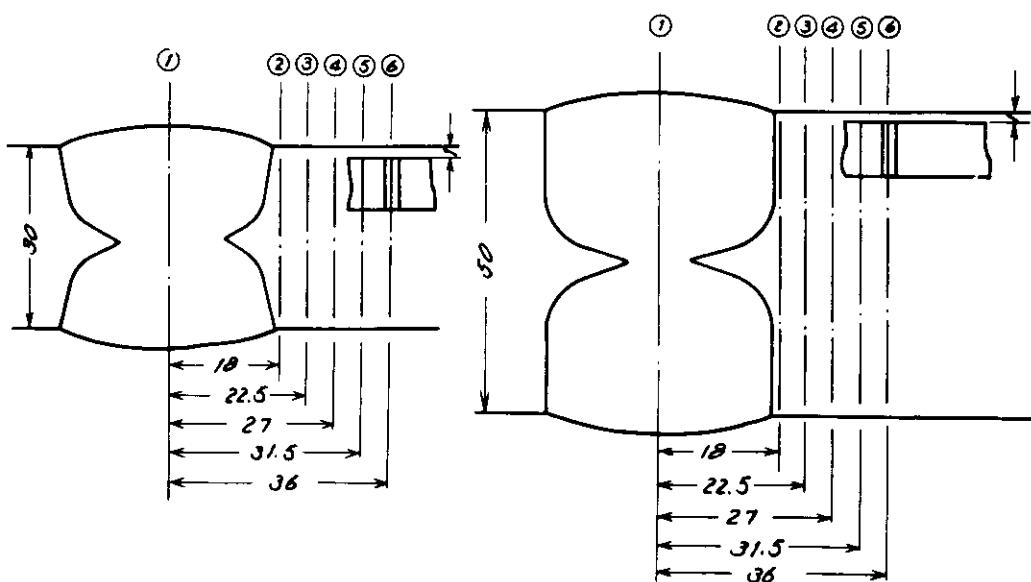


図 5.2.3 RDB 30 および ND 50 の V シヤルピー 試験片採取位置

表 5.2.2 各位置での各種遷移温度一覧表

位 置 種 別	R C B 3 0				N D 5 0 A				N D 5 0 B			
	vTr ₁₅	vTre	vTrs	vTrø2	vE ₀	vE ₋₁₀	vTr ₁₅	vTre	vTrs	vTrø2	vE ₀	vE ₋₁₀
	°C	°C	kg-m	kg-m	°C	°C	°C	°C	kg-m	kg-m	kg-m	kg-m
母 材 Length-Wise					-39	-15	-8		11.5	9.0	-77	-48
母 材 Cross-Wise					-36	-5	-2		5.4	4.3	-7.5	-3.1
溶接金属 ①	-6.4	-2.5	-1.4	-4.6	7.6	6.0	-5.9	-2.6	-4.2	7.9	6.8	-3.7
ボンド ②	-4	1.9	2.1	-4	2.3	1.8	6	2.3	4.0	1.4	1.7	1.1
溶接金属の中心より 22.5mmはなれた位置 ③	-6	1.3	1.7	-1.0	2.5	1.7	2	1.9	3.5	9	1.9	1.2
溶接金属の中心より 27.0mmはなれた位置 ④	-1.0	3	1.1	-9	3.0	2.1	-1.2	9	2.3	-1	3.2	2.3
溶接金属の中心より 31.5mmはなれた位置 ⑤	-1.9	-4	4	-2.2	3.8	2.9	-1.3	8	3.3	-9	3.3	2.3
溶接金属の中心より 36mmはなれた位置 ⑥	-2.1	-7	2	-2.5	4.2	3.1	-1.2	-2	1.7	-1.6	3.8	2.4

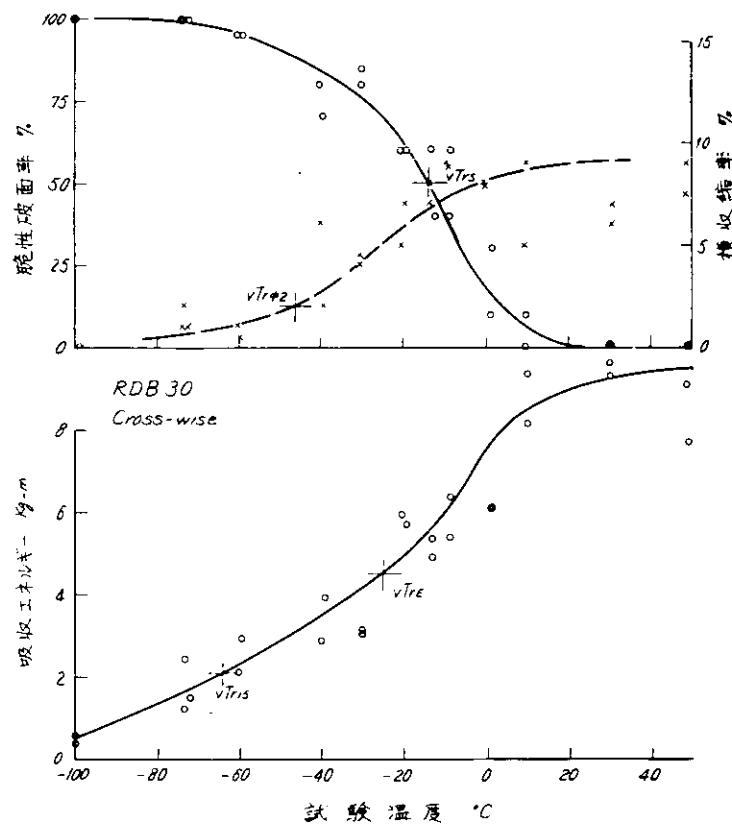


図 5.2.4 溶接金属①の遷移曲線

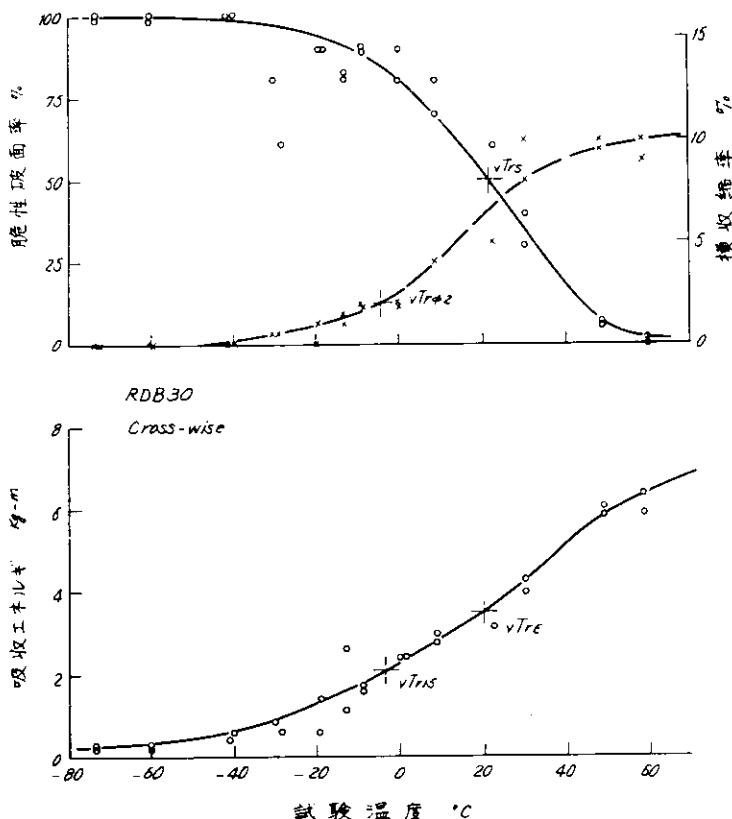


図 5.2.5 ボンド②の遷移曲線

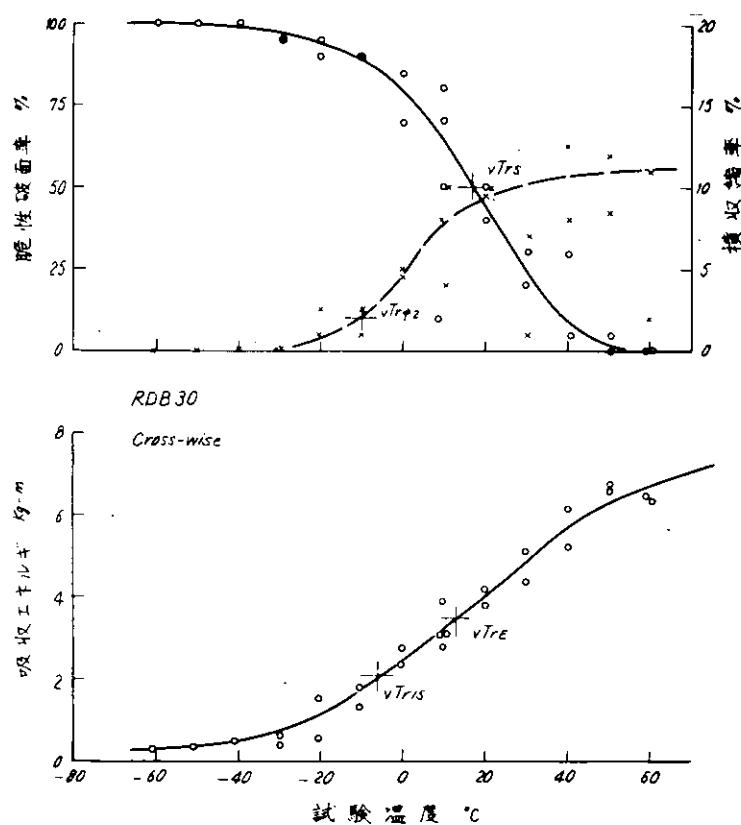


図 5.2.6 溶接金属の中心より 2.5 mm はなれた位置③の遷移曲線

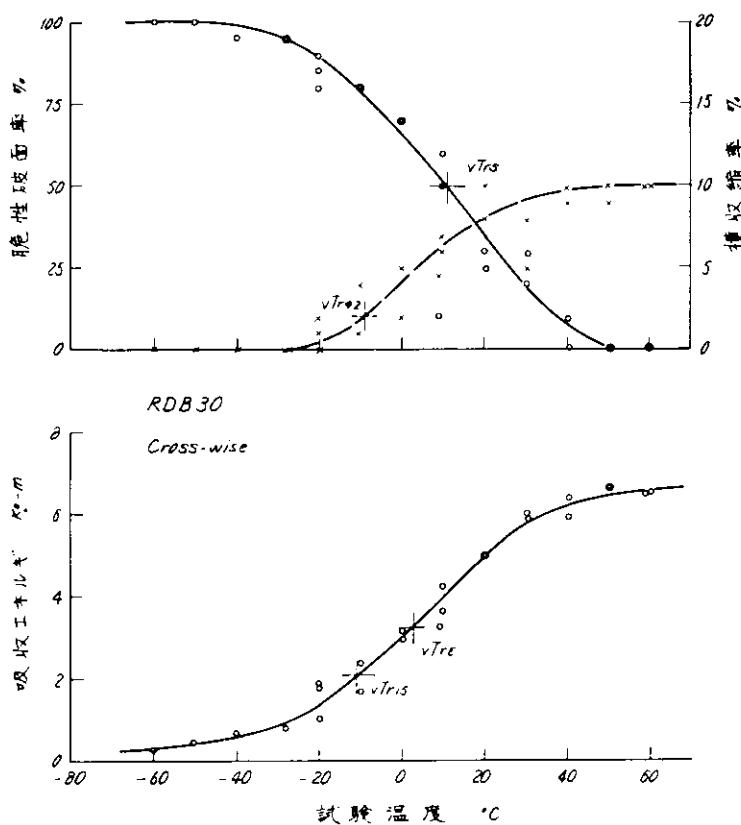


図 5.2.7 溶接金属の中心より 2.7 mm はなれた位置④の遷移曲線

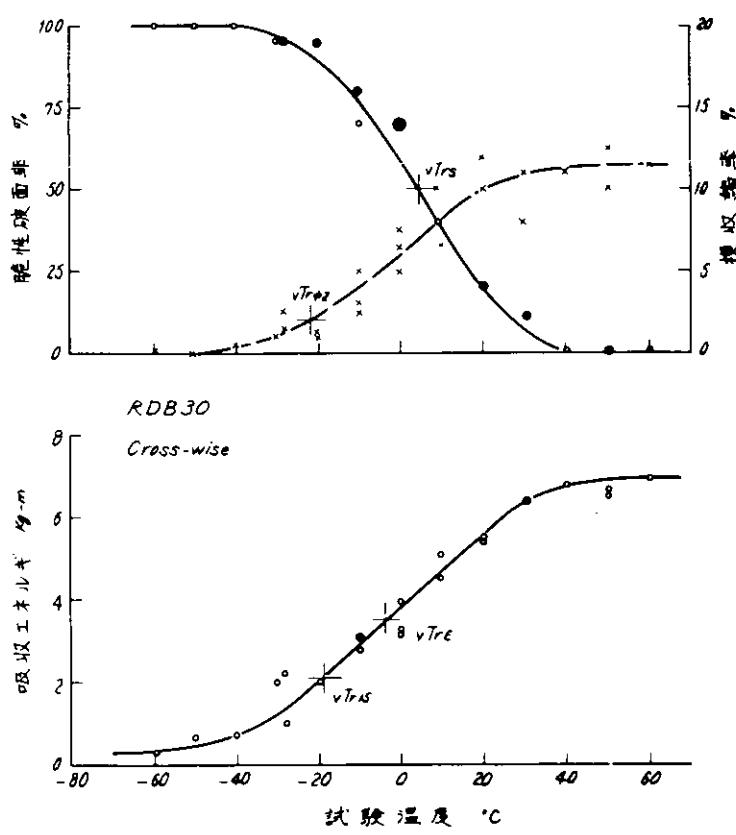


図 5.2.8 溶接金属の中心より 3.1.5 mm はなれた位置⑤の遷移曲線

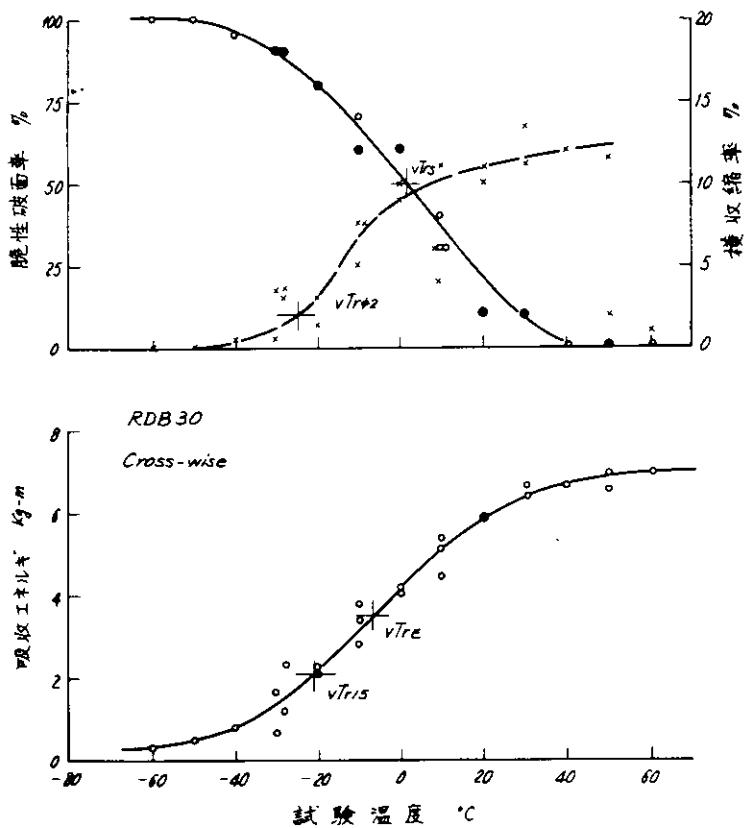


図 5.2.9 溶接金属の中心より 3.6 mm はなれた位置⑥の遷移曲線

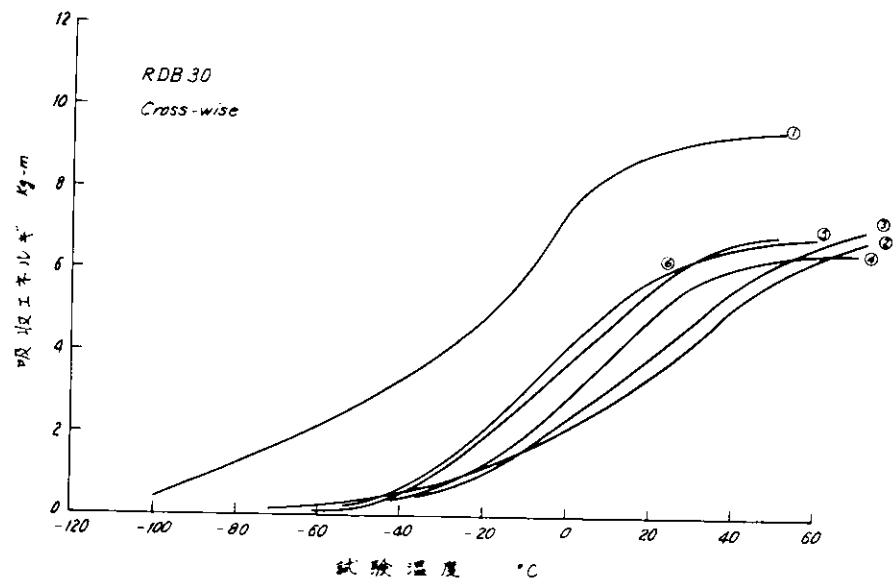


図 5.2.1 0 各位置での吸収エネルギー温度曲線の比較

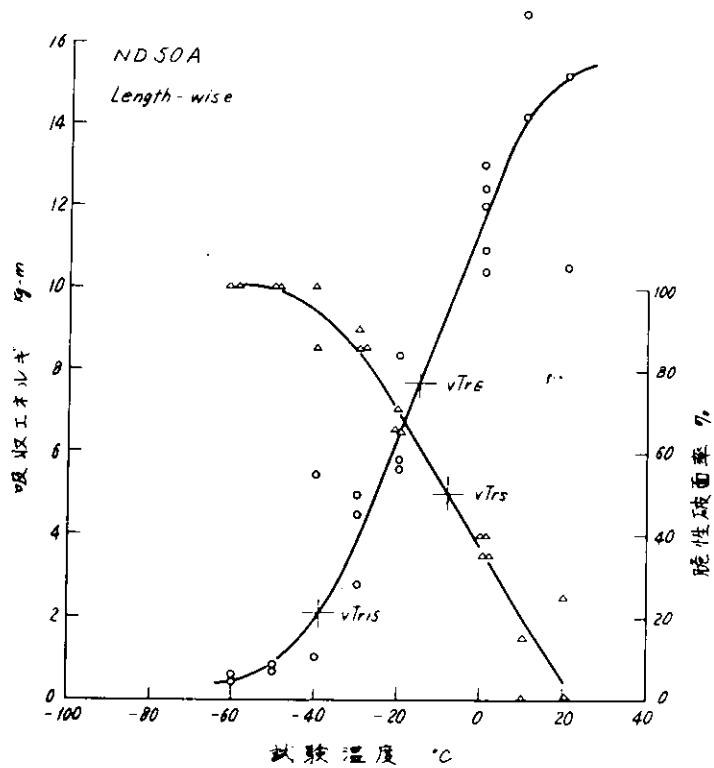


図 5.2.1 1 母材の遷移曲線

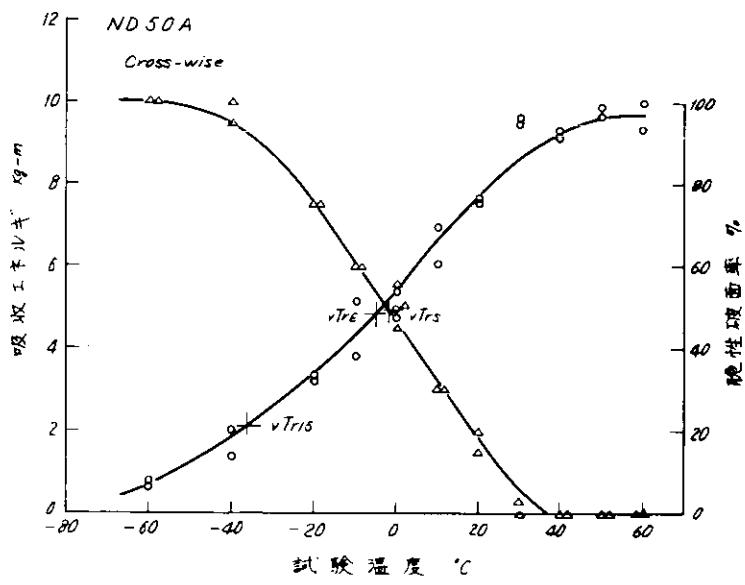


図 5.2.1.2 母材の遷移曲線

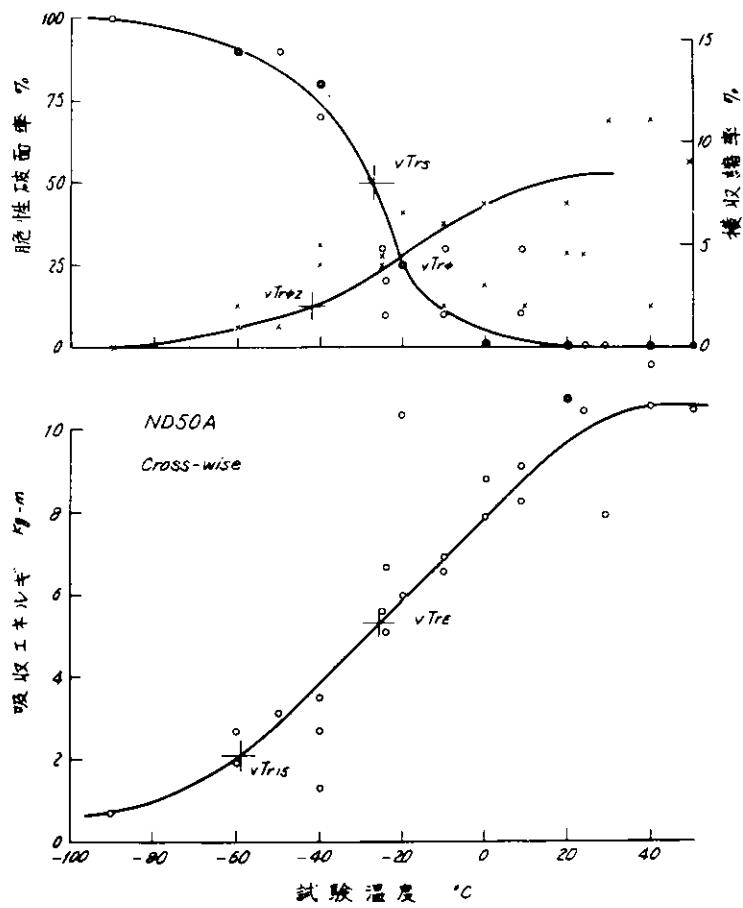


図 5.2.1.3 溶接金属①の遷移曲線

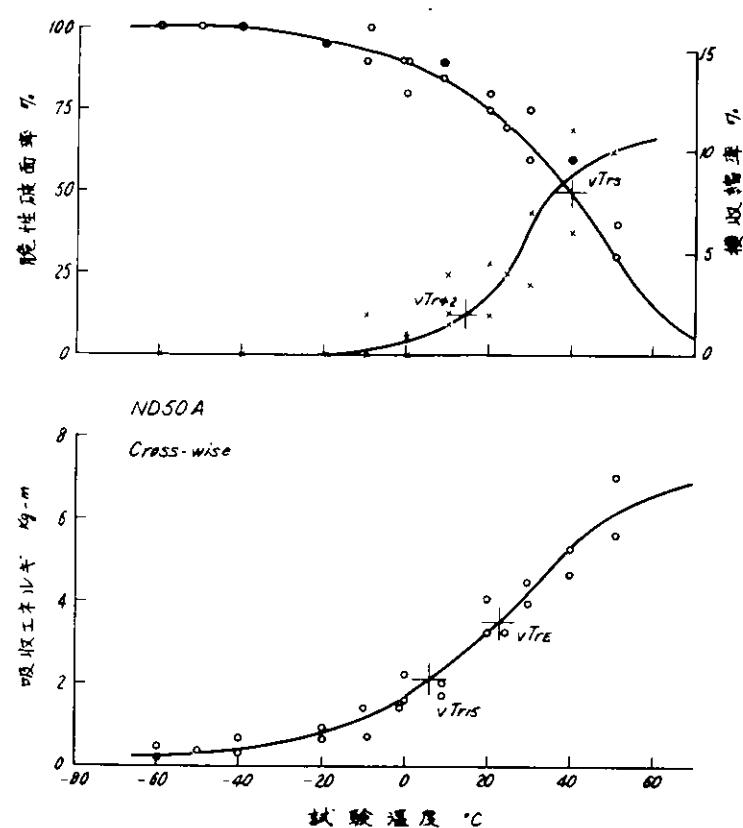


図 5.2.1.4 ボンド②の遷移曲線

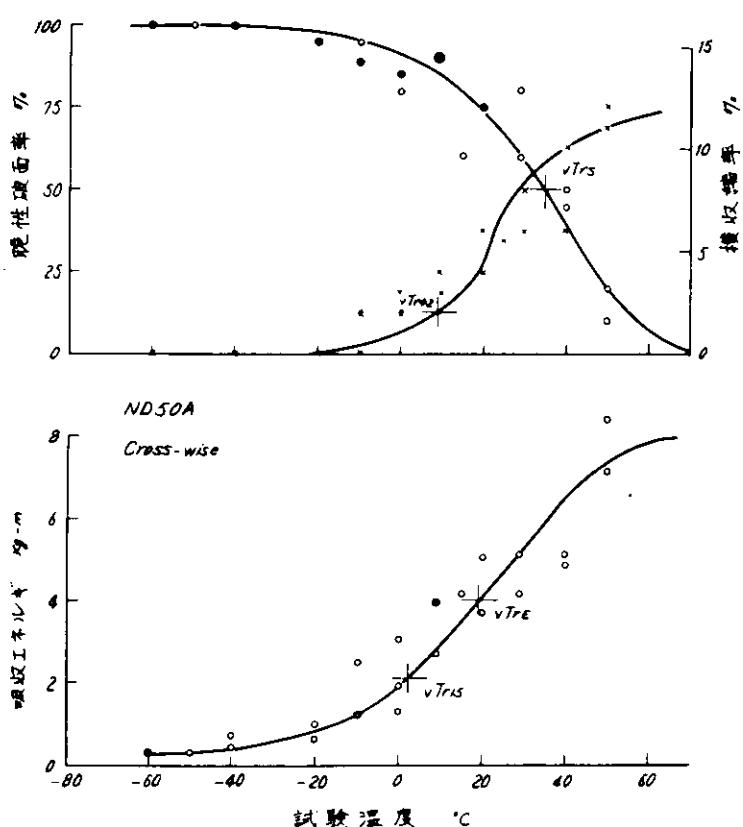


図 5.2.1.5 溶接金属の中心より 2.5 mm はなれた位置③の遷移曲線

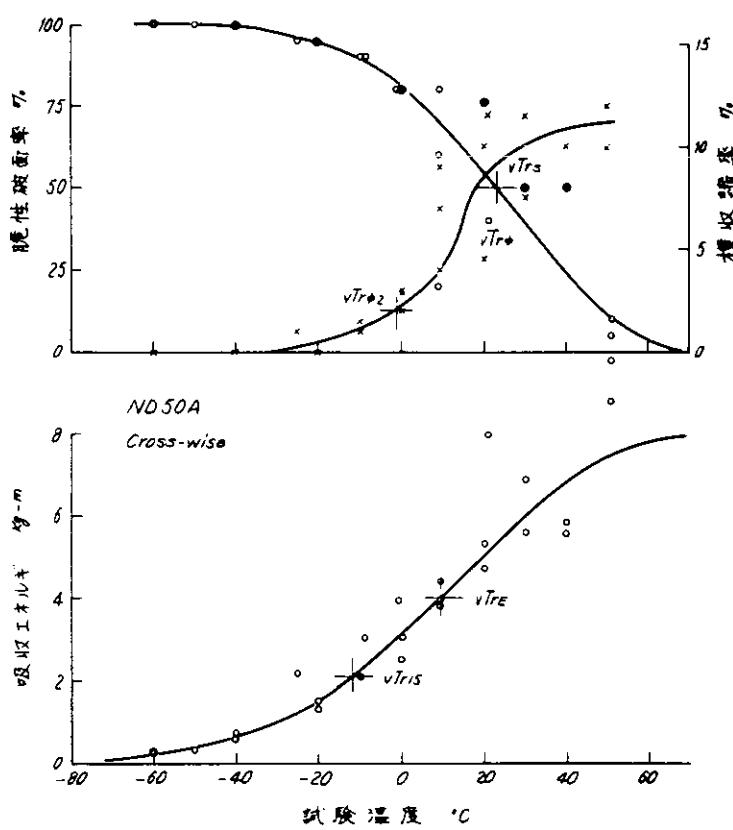


図 5.2.1.6 溶接金属の中心より 27 mm はなれた位置④の遷移曲線

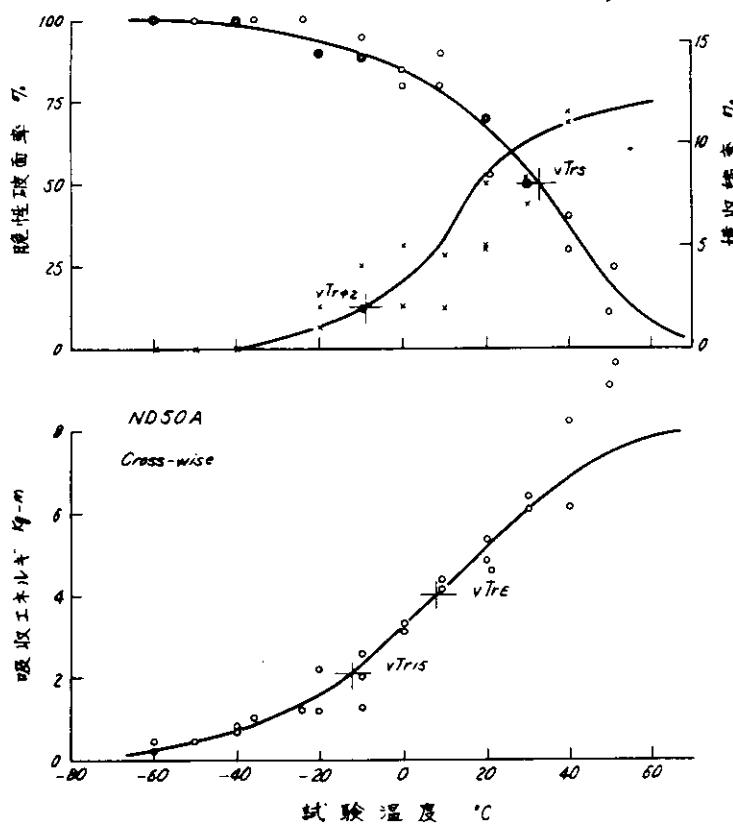


図 5.2.1.7 溶接金属の中心より 31.5 mm はなれた位置⑤の遷移曲線

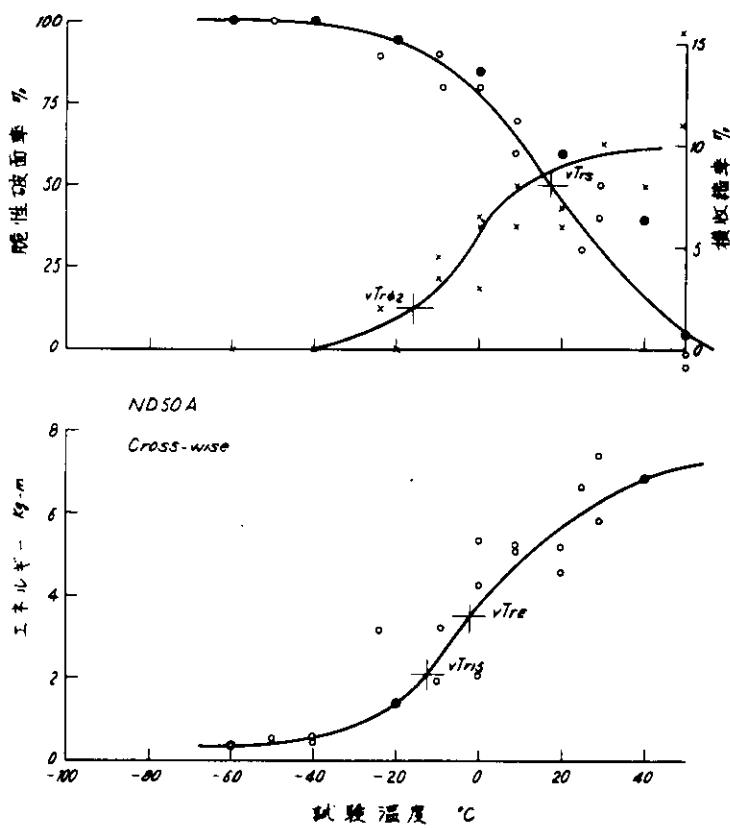


図 5.2.18 溶接金属の中心より 36 mm はなれた位置⑥の遷移曲線

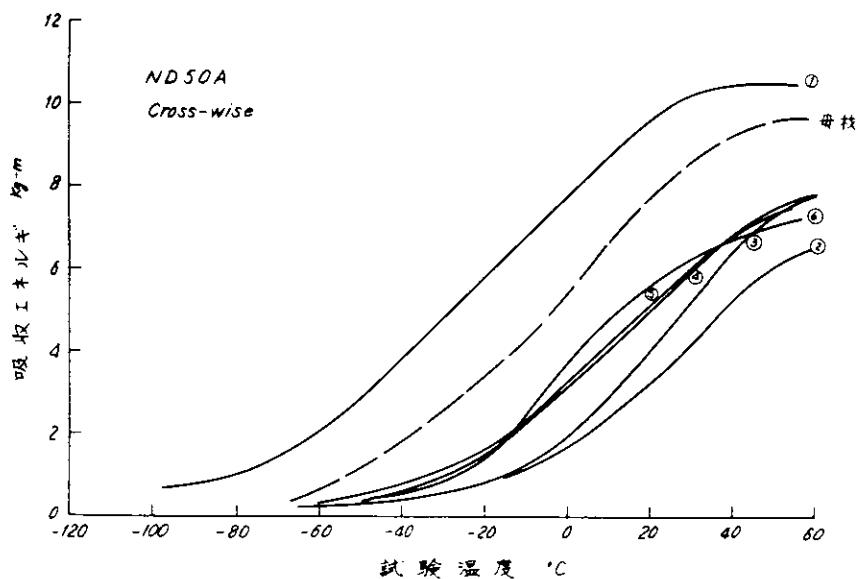


図 5.2.19 各位置での吸収エネルギー-温度曲線の比較

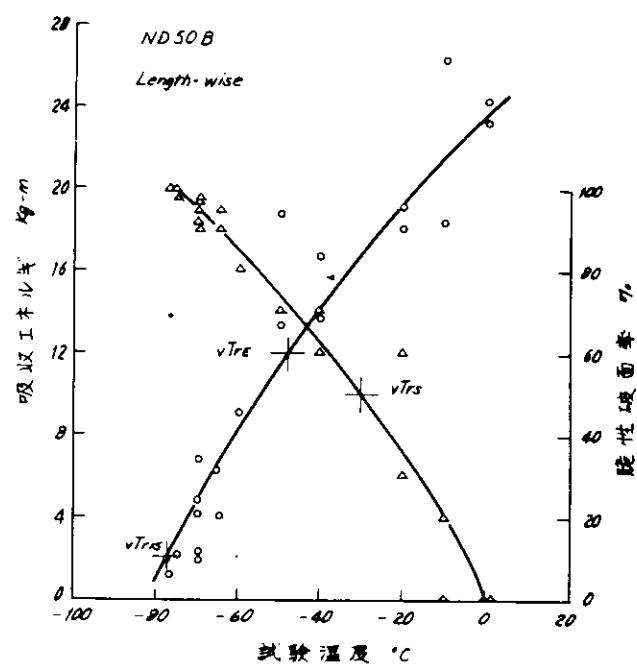


図 5.2.20 母材の遷移曲線

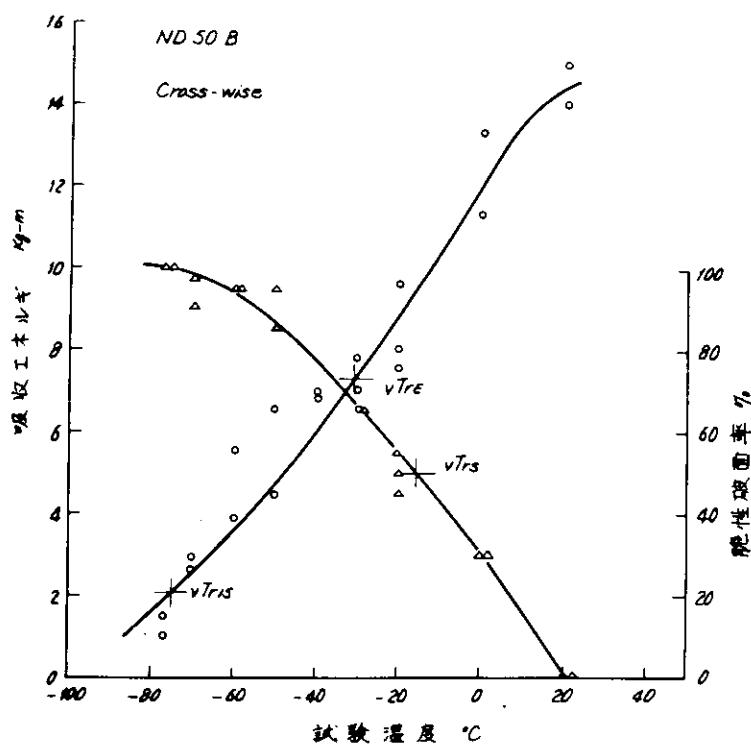


図 5.2.21 母材の遷移曲線

図 5.2.2.3 ポンド②の遷移曲線

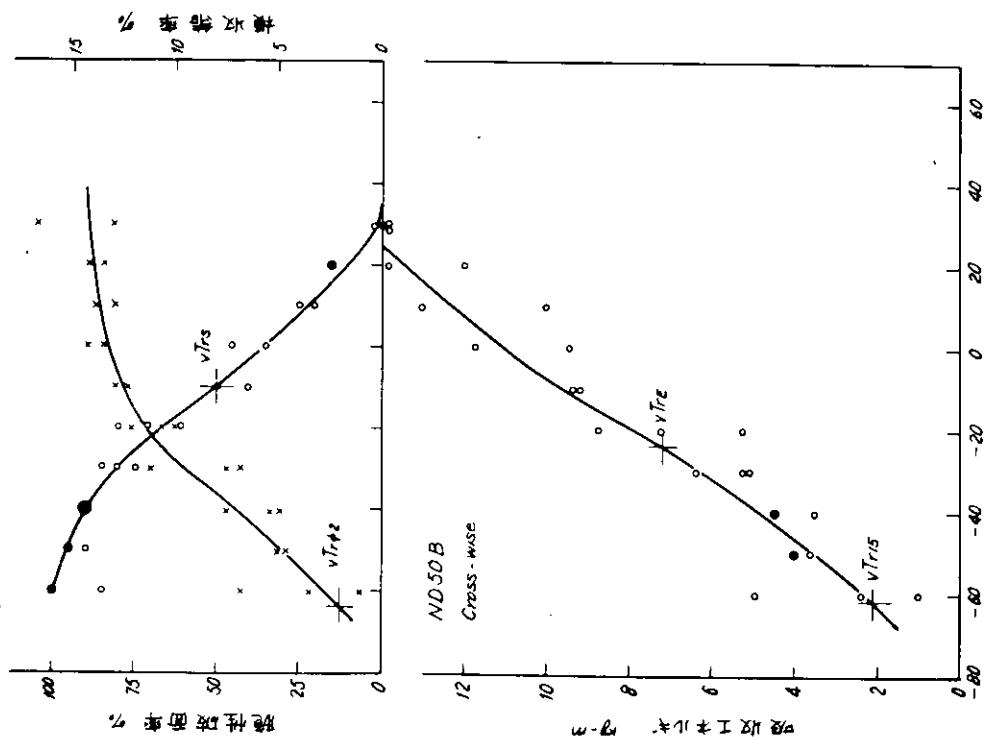
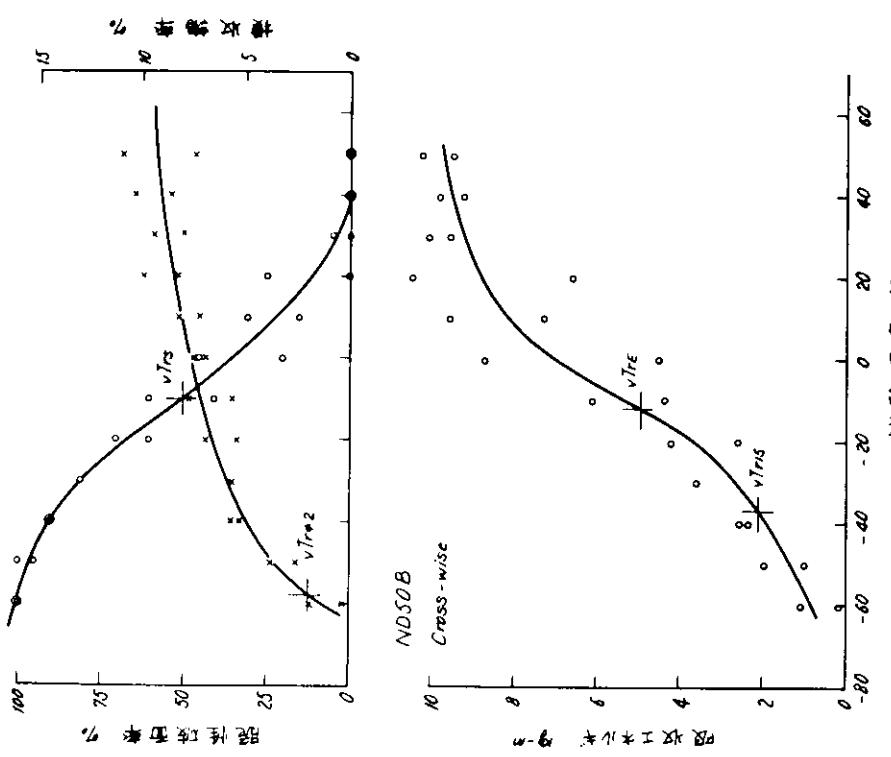
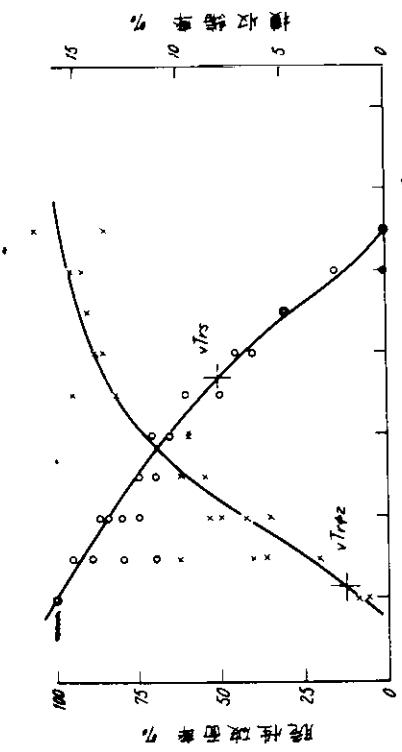


図 5.2.2.2 溶接金属①の遷移温度曲線





ND50B

ND50B

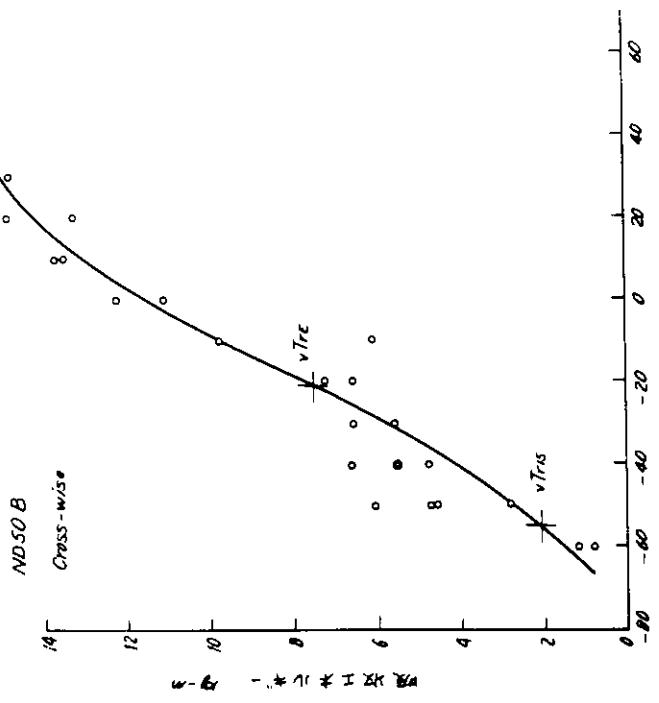


図 5.2.25 溶接金属の中心より 27mm はなれた位置④の遷移曲線

図 5.2.24 溶接金属の中心より 2.25mm はなれた位置③の遷移曲線

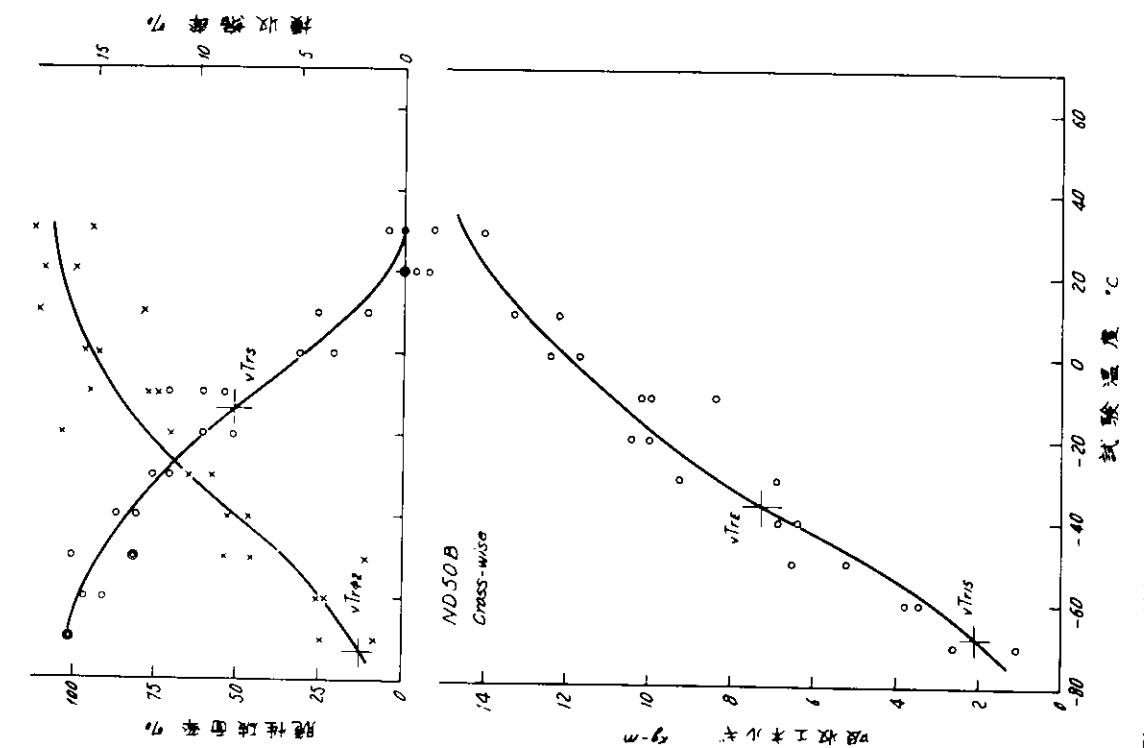


図 5.2.27 溶接金属の中心より 3 1.5 mm はなれた位置⑥の遷移曲線

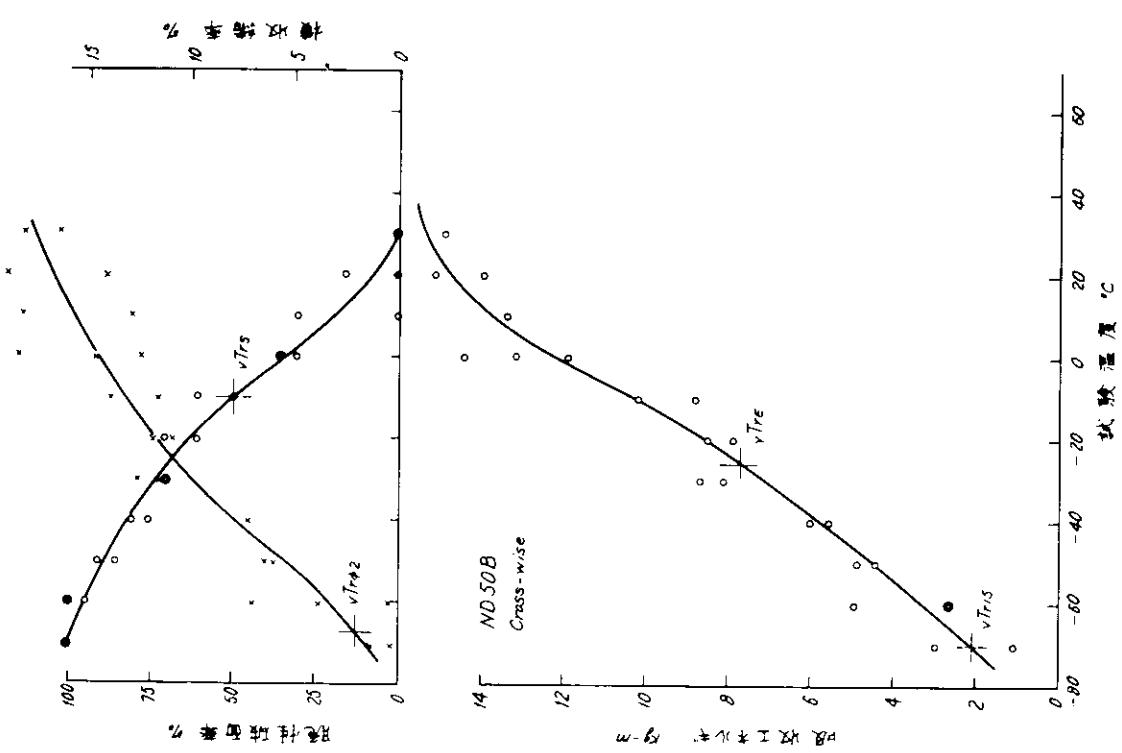


図 5.2.26 溶接金属の中心より 3 1.5 mm はなれた位置⑥の遷移曲線

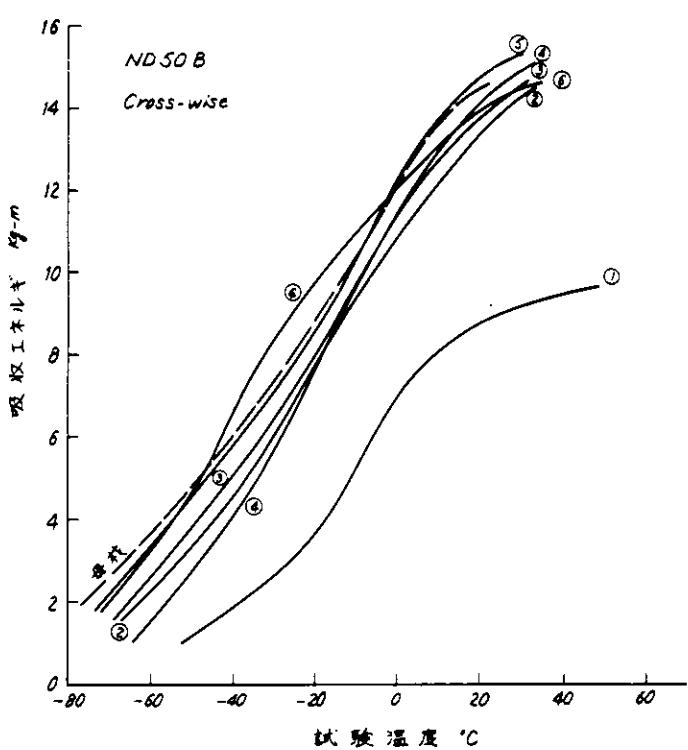


図 5.2.2.8 各位置での吸収エネルギー-温度曲線の比較

6. ま と め

以上は昭和42年から3年度に至って本研究部会で行なった研究をとりまとめたものである。本研究は「脆性破壊の伝播停止特性」と「脆性破壊発生特性」の二つに大別することができる。

まず、「脆性破壊の伝播停止特性」に関する研究では現在クラックアレスターとして使用されているE級鋼の性能を評価する目的で幅240mmの超広幅試験片による長大クラックの伝播試験を行ない、従来行なわれていた標準サイズ（幅500mm）の二重引張試験結果と比較した。その結果脆性破壊の伝播阻止性能を示すとされているKc値は標準サイズ試験片（停止クラック長さ約250mm前後）によって得られる値よりも超広幅試験片（停止クラック長さ約1200mm前後）による方が値が大きくなり、長大クラックに対しては線型破壊力学によるK値のかわりに、いわゆる有効K値 K_{eff} を考えなければならないことが明らかにされた。また、これに関連してクラック伝播中の荷重の動的降下の現象が本研究によってはじめて明らかにされた。この問題は脆性破壊停止性能の評価にも大きな影響をあたえるものと考えられるのでさらに研究しなければならない重要な問題であり、今後の研究の必要性が痛感される。

つぎに、脆性破壊伝播停止性能に及ぼす力学的板厚効果を広幅試験片（幅1000mm）を用いて検討した結果、従来より知られているように板厚が増大するほどKc値が低下することが明らかになったが、板厚増大によるKc値の低下の程度が今まで他の試験で求められているものとは異なった。この点に関しては別途資料の蓄積が必要であろう。

「脆性破壊の発生特性」に関する研究では板厚30mmおよび50mmのD級鋼について縦溶接継手切欠広幅引張試験を行なった。Before Weld NotchはAfter Weld Notchにくらべて脆性破壊発生限界温度は高く、板厚30mmのD級鋼では0°C～+10°Cの値が得られた。

また、板厚50mmの鋼材は30mmのものに比して限界温度が低く、母材性能と同時に溶接の影響が大きいことがうかがえる。本試験をA級鋼に適用すればさらに発生限界温度が上昇するものと思われる。

以上の結果を総合するに船体用鋼板の脆性破壊特性を明らかにするためには本研究で行なった種類の各種大型試験をA級鋼を含めて広範囲に実施して資料の蓄積を計る必要があろう。