

マイクロフィルム用資料

I S S N 0386-5878

土木研究所資料第3690号

土木研究所資料

次世代鋼材の脆性破壊挙動に関する試験報告書

平成12年1月

建設省土木研究所
材料施工部化学研究室

Copyright©(2000)by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

次世代鋼材の脆性破壊挙動に関する試験報告書

化学研究室 室 長 明嵐 政司
主任研究員 守屋 進

要 旨

阪神淡路大震災では、土木建築構造物に多くの脆性的破壊挙動が認められた。脆性的破壊の原因として、用いられた鋼材の材料的特性である脆性破壊特性と地震による動的荷重の作用とが考えられる。

そこで現在用いられている代表的な鋼材として、一般的な溶接構造用圧延鋼材SM400A、高強度材として溶接構造用圧延鋼材SM490A、高靱性材としてSM490C、近年JIS化された降伏応力の範囲を規制した建築構造用圧延鋼材SM490Cを選んだ。次世代鋼材として、更に高強度、高靱性材である3種類のSM570Q及び極低温用鋼板として知られる9%Ni鋼材を用いて、母材及び溶接部の動的破壊試験を行い、これら鋼材の脆性的破壊挙動について検討した。

キーワード：次世代鋼材、脆性破壊、破壊靱性試験、シャルピー試験、溶接材

目 次

1. はじめに.....	1
2. 研究方法.....	2
2. 1 供試材.....	2
2. 2 試験材.....	4
2. 3 試験方法.....	9
2. 3. 1 化学成分.....	9
2. 3. 2 引張試験.....	9
2. 3. 3 シャルピー衝撃試験.....	12
2. 3. 4 破壊靱性試験.....	15
3. 試験結果と考察.....	18
3. 1 化学成分及び機械的性質.....	18
3. 2 引張試験.....	18
3. 2. 1 母材及び溶接部の静的引張試験.....	18
3. 2. 2 母材の動的引張試験.....	21
3. 3 シャルピー衝撃試験.....	38
3. 4 破壊靱性 (K_{IC}) 試験.....	87
3. 5 欠陥評価.....	113
4. まとめ.....	118
参考文献	118

1 はじめに

今回の阪神淡路大震災では土木、建築構造物に多くの脆性的破壊挙動が認められた。脆性的破壊の原因として、用いられた鋼材の材料的特性である脆性破壊特性と地震による動的荷重の作用とが考えられる。

鋼材の脆性破壊については従来から多くの研究が行われ^{1)~3)}、わが国では日本溶接協会にてWES2805「溶接継手の脆性破壊に対する欠陥の評価方法」が昭和51年に制定され⁴⁾、平成9年には「溶接継手の脆性破壊発生及び疲労亀裂進展に対する欠陥の評価方法」として改定された。⁵⁾

従来、脆性破壊の研究で扱われた材料は主に造船用鋼材あるいは低温貯槽用鋼材が多い。土木、建築構造物用鋼材では低温貯槽用鋼材に比較して使用温度範囲が高く、事故例も報告されていないことから注目されなかったものと考えられる。

また動的荷重の脆性破壊に及ぼす影響については研究段階にあり^{6)~8)}、十分に解明されているとは言い難い。

そこで現在用いられている代表的な鋼材として、一般的な溶接構造用圧延鋼材SM400A、高強度材として溶接構造用圧延鋼材SM490A、高靱性材としてSM490C、近年 JIS化された降伏応力の範囲を規制した建築構造用圧延鋼材SN490Cを選んだ。次世代鋼材として、更に高強度、高靱性材である、3種類のSM570Q及び極低温用鋼板として知られる9%Ni鋼板を用いて、母材及び溶接部の動的破壊試験を行い、これら鋼材の脆性的破壊挙動について検討した。

2 研究方法

2. 1 供試材

供試材一覧を表2.1に示す。

板厚25mmのSM400Aは市販材、板厚32mmのSM490A、SN490C、板厚35mmのSM490C及び板厚32mmの9%Ni鋼は住友金属工業(株)製であり、3種類のSM570Qは新日本製鐵(株)製である。SM570Qは板厚25mmの大入熱溶接を考慮した鋼材（エレガス溶接）、50mmの予熱低減鋼、板厚80mmの冷間曲げ加工に配慮した鋼材である。

表2. 1 試験材一覧

試験材	規格	板厚(mm)	メーカー	備考
SM400A	JIS G3106	25	市販材	
SM490A	JIS G3106	32	住友金属工業(株)	
SM490C	JIS G3106	35	住友金属工業(株)	TMCP鋼
SN490C	JIS G3136	32	住友金属工業(株)	
SM570Q	JIS G3106	80	新日本製鐵(株)	冷間曲げ加工特性に留意
SM570Q	JIS G3106	50	新日本製鐵(株)	予熱低減鋼
SM570Q	JIS G3106	25	新日本製鐵(株)	大入熱溶接考慮
SL9N590	JIS G3127	32	住友金属工業(株)	

2. 2 試験材

試験は供試材の母材と溶接部とについて行った。母材試験は圧延方向を主とし、一部圧延直角方向についても試験した。

溶接部の試験は溶接方法が多岐にわたり、かつ溶接条件も変化することから、橋梁、橋脚等の施工例を参照し、溶接方法として、手溶接(SMAW)、ガスシールドアーク溶接(MAG) (但し9%Ni鋼は TIG溶接とした)、サブマージアーク溶接(SAW)の3種類を選び、溶接条件は各溶接法の溶接しやすい入熱量を選んで決めた。開先形状は試験片の採取を容易するため、原則としてK開先とした。

溶接条件の一覧を表 2.2に示す。

写真2.1.1～写真2.1.3にSM570Q、板厚80mmの3種類の溶接方法のマクロ写真を例として示す。

表2.2 溶接条件一覧

試験材	板厚 (mm)	溶接方法	開先形状	溶接材料	積層数	入熱 (kJ/cm)	備考
SM490 A	32	SMAW	K	LF52	17	20	
		MAG	K	MG50	16	11	
		SAW	K	BL-55/W49	8	50	
SM490 C	35	SMAW	K	LF52	18	20	TMCP鋼
		MAG	K	MG50	21	11	
		SAW	K	BL-55/W49	9	50	
SN490 C	32	SMAW	K	LF52	17	20	
		MAG	K	MG50	16	11	
		SAW	K	BL-55/W49	8	50	
SM570 Q	80	SMAW	K	LB-62	73	22	冷間曲げ加工 特性に留意
		MAG	K	MG-60	90	11	
		SAW	K	100/W49	33	48	
SM570 Q	50	SMAW	K	LB-62	30	22	予熱低減鋼
		MAG	K	MG-60	39	11	
		SAW	K	100/W49	15	48	
SM570 Q	25	SMAW	K	LB-62	15	22	大入熱溶接 考慮
		MAG	K	MG-60	18	11	
		SAW	K	100/W49	6	48	
SL9N590	32	SMAW	K	NIC-70S	18	18	9%Ni鋼
		TIG	K	TGS-709S	54	13	
		SAW	K	US-709S/PFN-3	14	19	

注) SMAW : Shielded Metal Arc Welding
MAG : Metal Active Gas Arc Welding
SAW : Sabmerged Arc Welding
TIG : Tungsten Inert Gas Welding

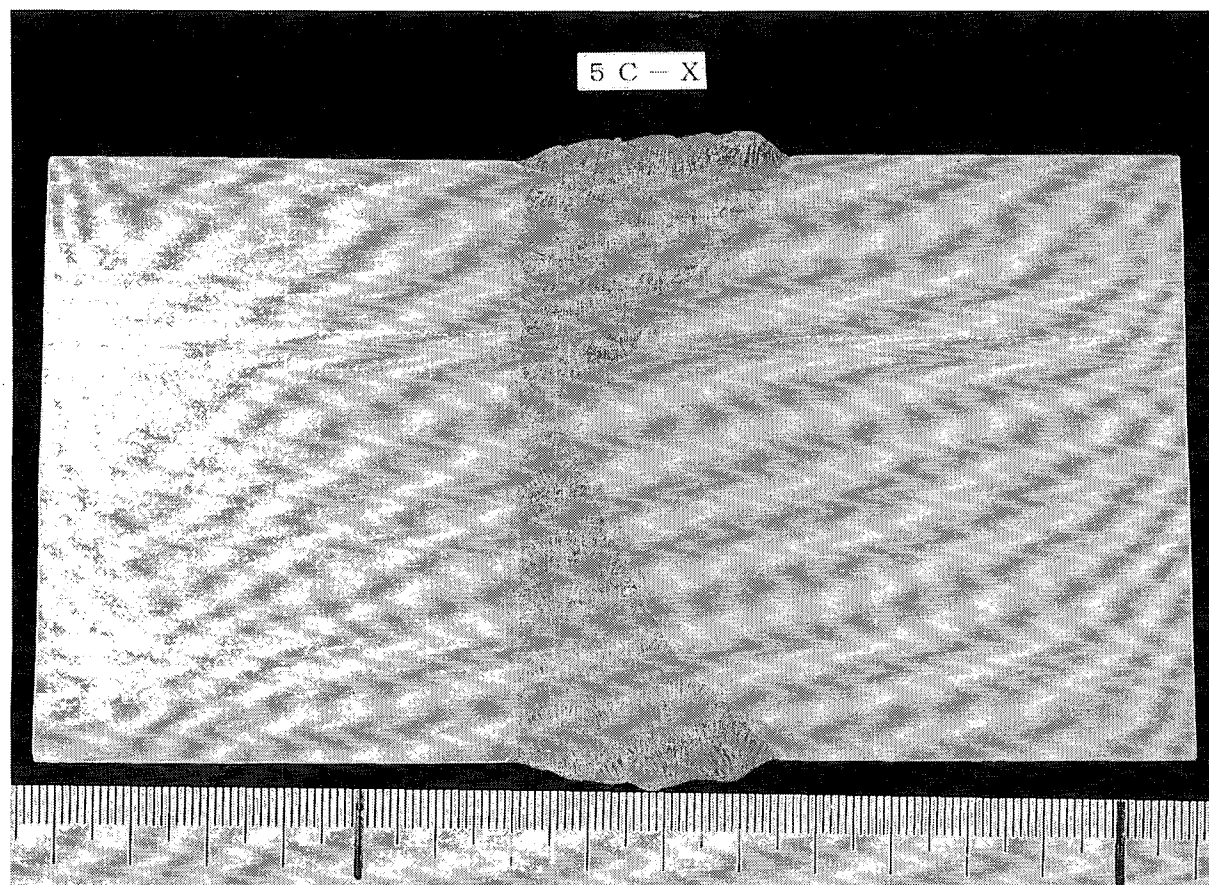


写真2. 1. 1 溶接部のマクロ組織 (SM570Q [80mm]、SMAW)

5 C S

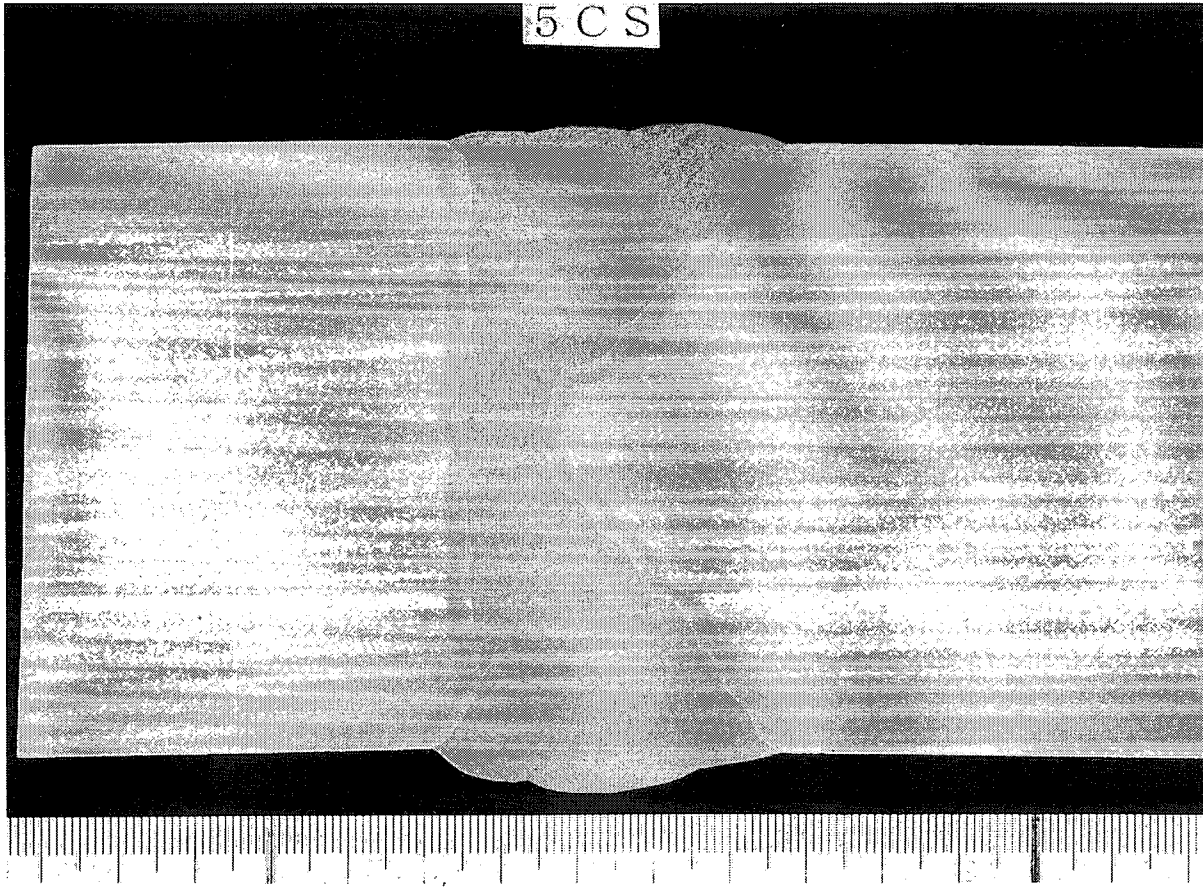


写真2. 1. 2 溶接部のマクロ組織 (SM570Q [80mm]、SAW)

5 C M

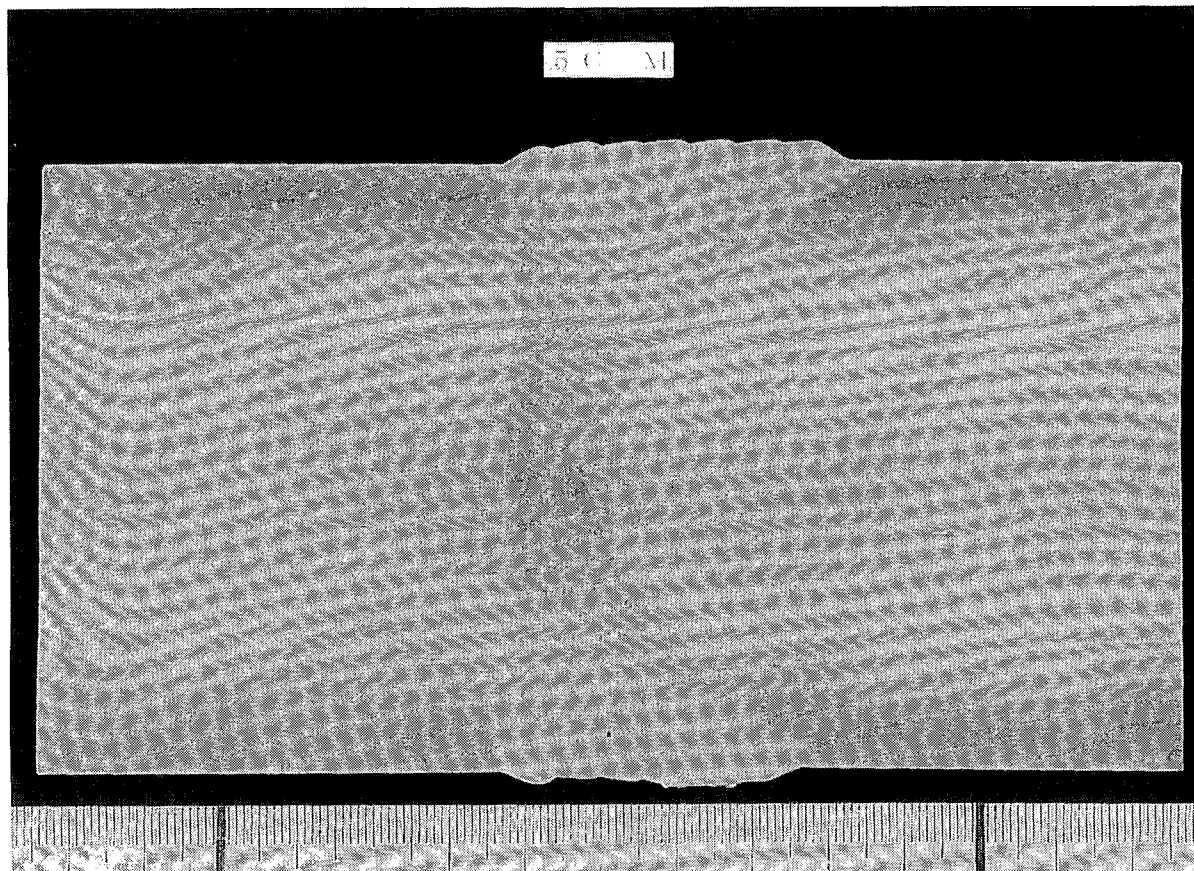


写真2. 1. 3 溶接部のマクロ組織 (SM570Q [80mm]、MAG)

2. 3 試験方法

試験は化学成分、静的及び動的引張試験、シャルピー衝撃試験、静的及び動的破壊靱性試験及び破断後のマクロ組織観察、ミクロ組織観察、SEM観察を行った。

引張試験、シャルピー衝撃試験及び破壊靱性試験の試験片採取方向は一般に鋼板の機械的性質を表わす時に用いられる、圧延方向（L方向）から採取した。ただしシャルピー衝撃試験については試験方法が簡便であるため、圧延直角方向（C方向）の試験をも追加し、破壊特性の概要を類推する資料とした。

2. 3. 1 化学成分

化学成分はJIS G 3106（溶接構造用圧延鋼材）及びJIS G 3136（建築構造用圧延鋼材）に規定されたC、Si、Mn、P、Sの5元素について分析した。

2. 3. 2 引張試験

引張試験は鋼材の基本的性能を知るため、母材及び溶接部の静的引張試験と、震災を考慮し、母材の動的引張試験とを行った。動的引張試験は阪神淡路大震災で観測されたとされる、0.5m/sec、1m/secを目標に、一部は試験機の最大速度である4m/secで試験した。

試験片の形状寸法を図2.1に示す。平行部60mm位置の突起は、伸び計を取り付けるためのものである。この突起は動的に荷重が作用した時の衝撃で伸び計が外れないため及び試験片が破断するまでの荷重－伸び曲線を得たいためのものであり、高温引張試験あるいはクリープ試験で一般的に用いられるものである。試験には動的破壊試験機を用いた。試験機の概要を図2.2に示す。最大荷重1.5MN時に2m/secの载荷速度を、0.5MN時に4m/secの能力を持つ試験機である。また試験片の掴みを工夫し、クロスヘッドが所定の速度に達した後試験片を掴み、できるだけ短時間で試験片が所定の速度となる様にした。

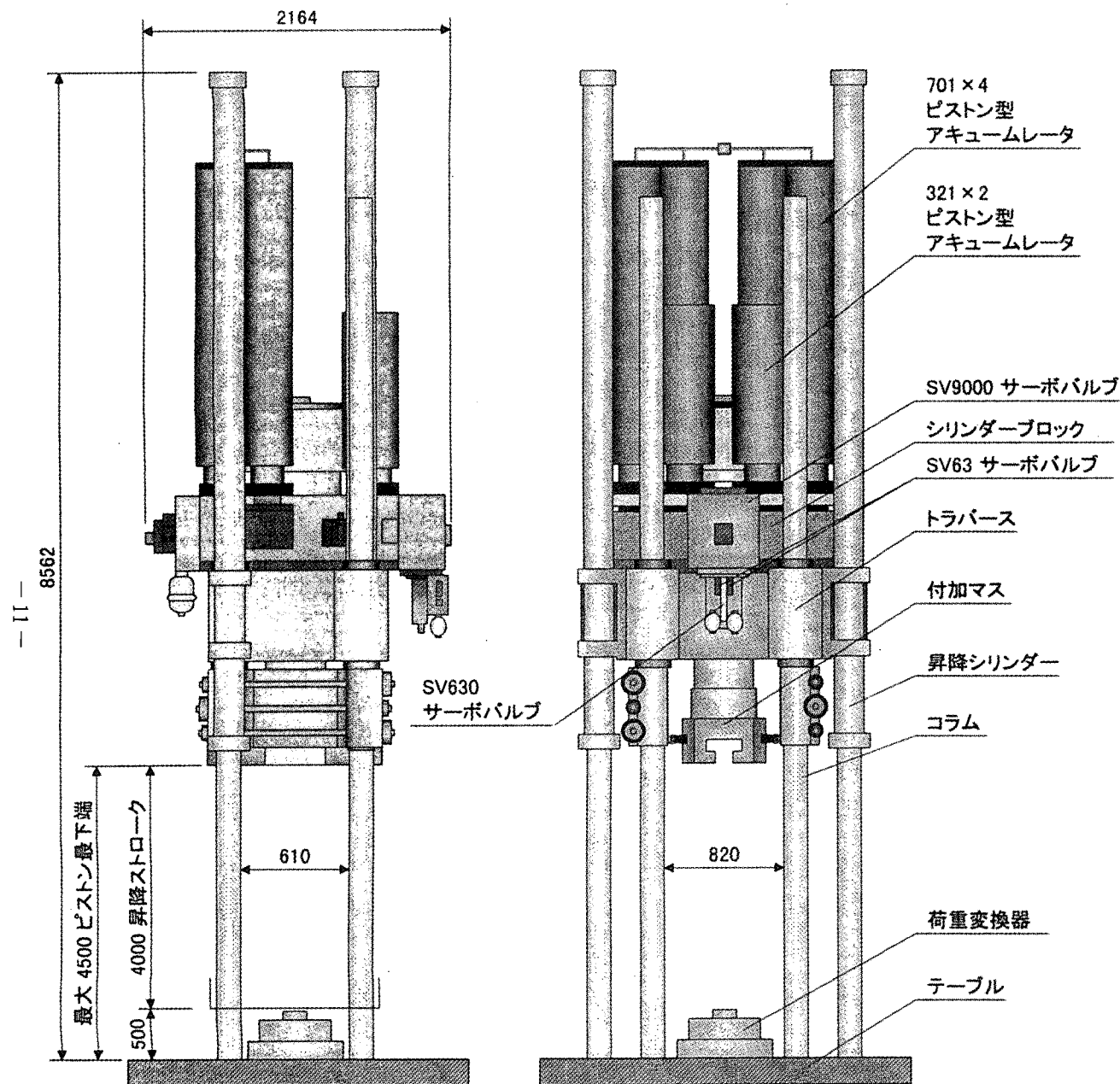
荷重の測定は、試験片掴み部の、突起から70mm離れた位置に貼った歪ゲージ（㈱共和電業製 KFG-2-120-C1-11、対辺2Act.）を較正して測定した。掴み部の歪出力は弾性範囲内である事を利用し、静的試験で求めた弾性係数を用い荷重を求めた。これは動的試験の場合、通常の荷重変換器では応答が遅れること及び衝撃のノイズが重畳し、荷重の測定が困難となるためである。

変位の測定は光学式の非接触変位計（Zimmer社製 Model 200X 応答周波数 100kHz）を用いた。この変位計は試験片突起部に取り付けた白と黒に色分けされたターゲットの移動に伴う反射光量の変化を変位の変化に換算するものである。

試験片平行部中央には歪ゲージ（㈱共和電業製 KFG-2-120-C1-11、対辺2Act.）を貼り、降伏応力を求めた。

試験温度は20℃で行い、動的試験では一部－20℃でも試験し、温度の影響を調査した。試験は冷却槽の中で行い、冷媒には液体窒素を用いた。

図2. 1 引張試験片の形状寸法



仕様

1) 定格荷重	150tonf
2) アクチュエータストローク	250mm
3) 試験速度範囲	0.01~4000mm/sec
150tonf負荷	100~2000mm/sec
50tonf負荷	100~4000mm/sec
4) 制御モード	
荷重, 変位制御	(クローズドループ)
バルブ開度制御	(オープンループ)
荷重制御	(疲労試験)
5) 試験片	
丸棒試験片	JIS4号
CT試験片	t = 25, 50, 75mm
COD試験片	t = 20~80mm
6) パワーバック	
定格圧力	280kgf/cm ²
流量	Max = 165ℓ/min

機器仕様

1) アクチュエータ型式	PLZ2, 0X
荷重容量	引張側 静的 200tonf, 動的 150tonf
	圧縮側 静的 125tonf, 動的 100tonf
ストローク	250mm
2) 付属サーボバルブ	
(1) 型式	SV630/9, 5 (3ステージ), 630ℓ/min
(2) 型式	SV63×2, 126ℓ/min
(3) 型式	SV9000, 9000ℓ/min

図2. 2動的破壊試験機の概要

2. 3. 3 シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験片の形状寸法を図2.3に示す。試験片は工業的試験方法として最も一般的に用いられている、JIS Z 2202の4号試験片（2mmVノッチ）である。

シャルピー衝撃試験は容量300Jのシャルピー衝撃試験機を用いた。試験機の概要を図2.4に示す。この試験機は重量255Nのハンマーを持上げ角約145° から振り下ろし、最下点の支持台にスパン40mmで置かれた試験片切欠部背面を打撃し、破断した後のハンマーの振り上がり角を測定して、位置エネルギーの差から破断に要した衝撃吸収エネルギーを求めるものである。

試験温度範囲は100%脆性破面が観察される温度から、100%延性破面が観察される温度まで約20℃間隔で試験した。

冷媒にはアルコールとドライアイスとを用いた。

結果の整理は、それぞれの材料について得られたデータを用いて、延性破面率（試験片の破面の全面積に対する延性破面の面積の百分率）と温度との関係を示す破面遷移曲線及び吸収エネルギーと温度との関係を示す吸収エネルギー遷移曲線とを求めた。

破面遷移曲線及び吸収エネルギー遷移曲線は野方らの例にならい⁸⁾、式（1）及び式（2）の曲線でそれぞれ近似できると考え、試験材ごとに式を求めた。

$$C_v = D / \{1 + F \exp(E t)\} \quad \text{----- (1)}$$

$$S A = G / \{1 + J \exp(H t)\} \quad \text{----- (2)}$$

ここに C_v : シャルピー吸収エネルギー

t : 温度

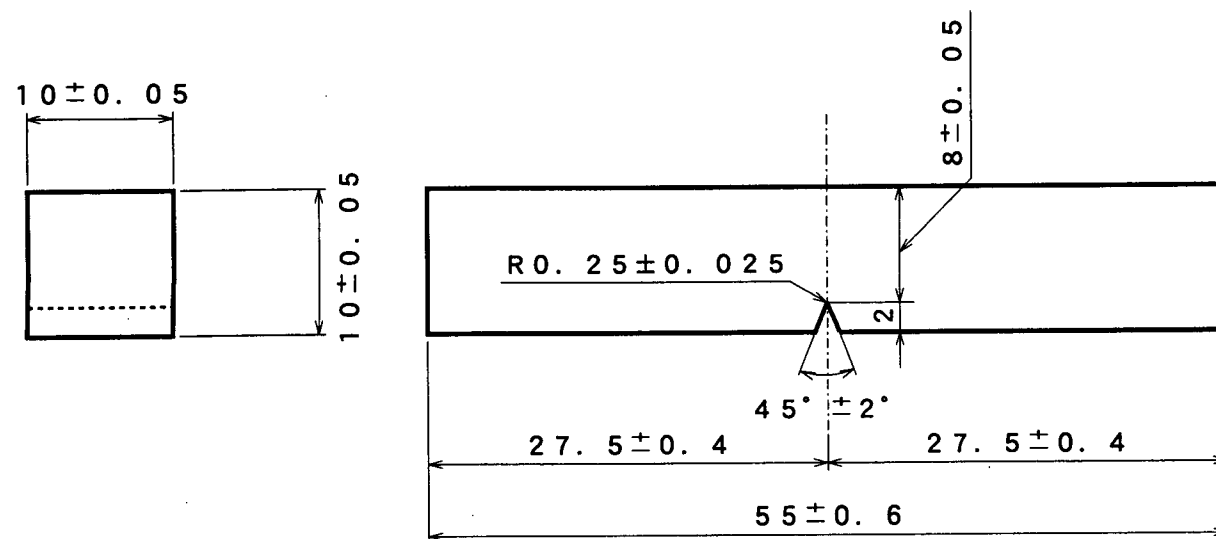
D : 上部棚吸収エネルギー

$S A$: 延性破面率

G : 100% $S A$

F 、 E 、 H 、 J : それぞれの曲線形状を決定する係数

得られた式から延性破面率が 50%となる温度である破面遷移温度 ($v T_s$) を求めた。さらに延性破面率が100%となる最低温度における吸収エネルギーの1/2の値に対応する温度である、吸収エネルギー遷移温度 ($v T_E$) を求めた。 $v T_s$ 及び $v T_E$ は鋼材の破壊特性を表す工業的指標として最も一般的に用いられるものの一つである。



切欠き部詳細

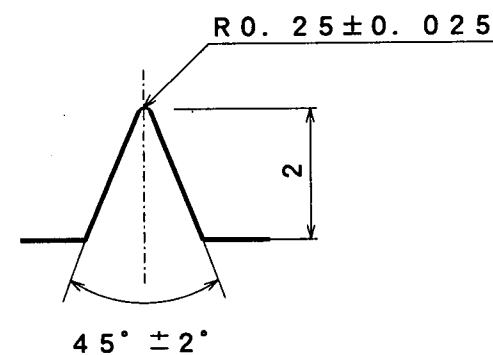
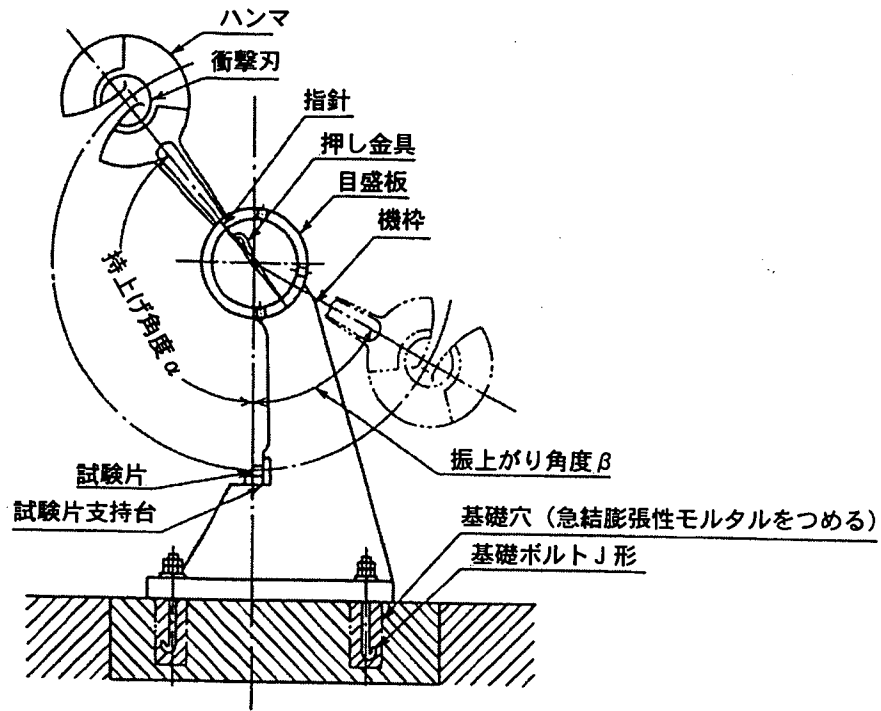
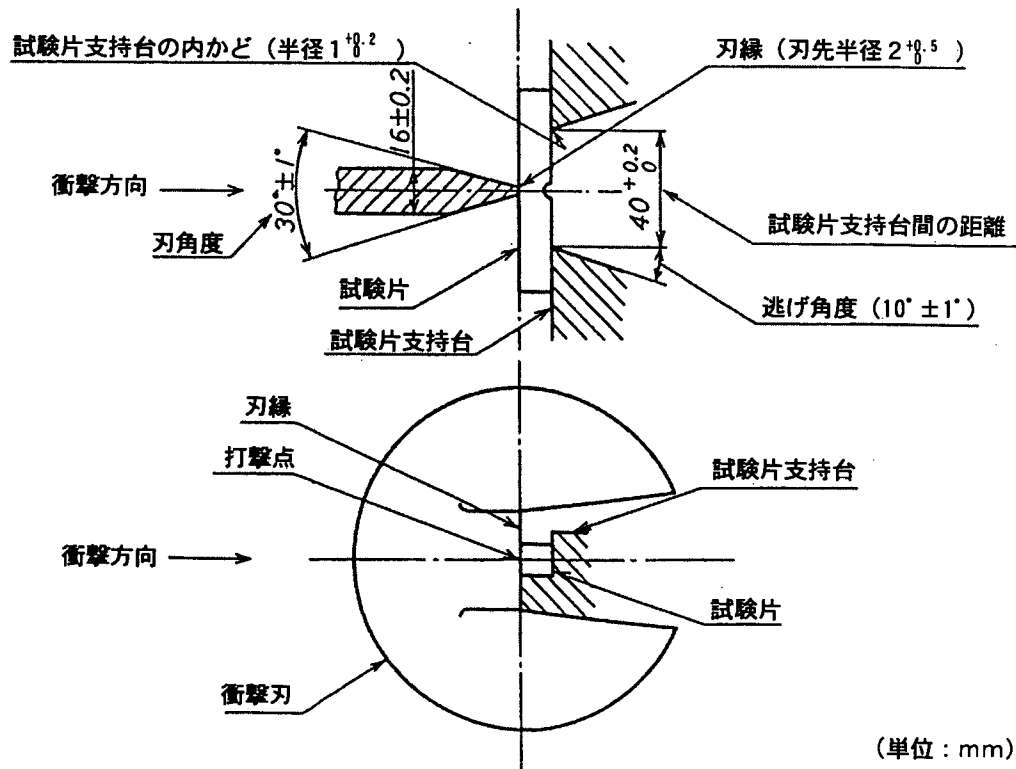


図 2. 3 シャルピー衝撃試験片の形状寸法 (J I S 4 号)



(1) シャルピー衝撃試験機の構造



(2) ハンマ、試験片及び試験片支持台間の関係

図2.4 シャルピー衝撃試験機の概要

2. 3. 4 破壊靱性試験⁶⁾

破壊靱性試験は米国で規格化され日本に於ても一般的に用いられているASTM E399-90に準拠した方法により行つた。試験では試験片の荷重-変位曲線を記録し、破壊発生荷重より完全弾性破壊靱性値である K_{IC} を算出した。ただし、ASTM E399-90の有効条件を満たさない場合はJ積分値を求め、J値よりK値に換算した。具体的な方法は次の様である。

各試験の荷重-開口変位曲線から破壊発生荷重 P_Q を求め、式(3)により K_Q を計算する。

$$K_Q = P_Q / \{B \cdot W^{1/2}\} \cdot f(X) \quad \text{----- (3)}$$

ここに P_Q : 破壊発生荷重

B : 試験片の厚さ

W : 試験片の幅

a : 初期亀裂長さ

$$f(X) = (2+X) / (1-X)^{2/3} \{0.886 + 4.64X - 13.23X^2 + 14.72X^3 - 5.6X^4\}$$

$$X = a / W$$

式(3)から求めた K_Q が式(4)、式(5)で表される有効条件を満たすとき、 K_{IC} として評価する。

$$P_{max} / P_Q < 1.1 \quad \text{----- (4)}$$

$$a, B \geq 2.5 (K_Q / \sigma_Y)^2 \quad \text{----- (5)}$$

ここに P_{max} : 最大荷重

σ_Y : 降伏強さ

延性亀裂が発生する以前に脆性亀裂が発生している場合で、この時の荷重-開口変位曲線が線形でない場合は、荷重-荷重線変位曲線下の面積(エネルギー) A_{PL} を求め、式(6)により破壊靱性 $K(J)$ を求める。

$$K(J) = \{E \cdot J / (1 - \nu^2)\}^{1/2} \quad \text{---- (6)}$$

ここに $J = J_{eL} + J_{PL}$

J_{eL} : J の弾性成分

J_{PL} : J の塑性成分

E : ヤング率

ν : ポアソン比

荷重-荷重線変位曲線上の P_{max} 点におけるJ値は式(7)で与えられる。

$$J = K^2 \cdot (1 - \nu^2) / E + J_{PL} \quad \text{----- (7)}$$

Kは式(3)で $P_Q = P_{max}$ として求められ、 J_{PL} は式(8)から求められる。

$$J_{PL} = \eta \cdot A_{PL} / b_0 \quad \text{-----} \quad (8)$$

ここに A_{PL} : 荷重－荷重線変位曲線下面積 A

b_0 : 初期のリガメント

$$\eta = 2 + 0.552 \cdot b_0 / W$$

動的破壊靱性試験は動的引張試験同様、0.5m/sec、1m/secを目標とし、一部は試験機の最大速度である4m/secで試験した。

試験片の形状寸法は図 2.5に示す様に25mm厚のコンパクト試験片（1TCT試験片）と称されるものであり、ASTM E 399-90にて規格化され、この試験片及び試験方法は破壊靱性の測定に最も一般的に用いられているものの一つである。

荷重の測定は、試験片の荷重線から25mm離れた位置に貼った歪ゲージ（㈱共和電業製 KFG-2-120-C1-11）を較正して測定した。即ち比較的遅い0.5m/sec試験の歪出力と荷重変換器出力との対応から、4m/sec試験の歪出力を荷重へ変換した。載荷速度の速い領域での荷重計測は、載荷ジグがピン支持のため、動的引張試験より更に困難となるためこのような方法を用いたものである。

変位の測定は動的引張試験同様光学式の非接触変位計を用い、荷重線から12.5mm離れた予亀裂表面（クラックマウス）で測定し、亀裂開口変位を求めた。

荷重－亀裂開口変位曲線から破壊靱性値を求めた。

試験温度は－40℃及び0℃であり、試験は冷却槽の中で行い、冷媒は液体窒素を用いた。

図 2. 5 破壊靱性試験片の形状寸法

3 試験結果と考察

3. 1 化学成分及び機械的性質

各供試材の化学成分を表3.1に示す。いずれも規格値を満足している。但し規格値は母材に対するものである。

3. 2 引張試験

3. 2. 1 母材及び溶接部の静的引張試験

各供試材の母材の引張試験結果は表3.1に化学成分と共に示した。いずれも規格値を満足している。

溶接部の静的引張試験結果を表3.2.1に示す。表には母材の引張強さを参考値として示した。9%Ni鋼板のSAW溶接部で溶接金属から破断した以外は全て母材で破断し、引張強さは全て母材以上である。また溶接法による差も認められない。いずれも試験片平行部中央の溶接部を外れて母材破断したため、伸びの領域が狭く、破断伸びは母材より小さく、絞りも若干小さい。

表3. 1 試験材の化学成分及び機械的性質

試験材	記号	区 分	化 学 成 分(%)					機 械 的 性 質					備 考
			C	Si	Mn	P	S	YP (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	EL (%)	シャルビ°-吸収 エネルギー-(J)	
SM400A	A	母 材	0.15	0.38	1.40	0.010	0.003	283	442	64.0	38.9	270	シャルビ°-衝撃試験 温度は0°C
	母材規格値		≤0.23	----	≥0.575	≤0.035	≤0.035	≥235	400~510	----	≥22	---	
SM490A	C	母 材	0.18	0.42	1.41	0.007	0.003	375	510	73.5	30.6	232	シャルビ°-衝撃試験 温度は0°C
	母材規格値		≤0.20	≤0.55	≤1.60	≤0.035	≤0.035	≥315	490~610	----	≥21	---	
SM490C	E	母 材	0.13	0.30	1.31	0.008	0.002	344	499	68.9	38.9	293	シャルビ°-衝撃試験 温度は0°C、TMCP
	母材規格値		≤0.18	≤0.55	≥1.60	≤0.035	≤0.035	≥315	490~610	----	≥21	(≥47)	
SN490C	B	母 材	0.15	0.38	1.40	0.010	0.003	366	517	70.8	35.2	198	シャルビ°-衝撃試験 温度は0°C
	母材規格値		≤0.18	≤0.55	≤1.60	≤0.020	≤0.008	325~445	490~610	≤80	≥21	≥27	
SM570Q	5C	母 材	0.07	0.23	1.24	0.008	0.001	564	630	90.0	24.0	262	80mm厚
	母材規格値		≤0.18	≤0.55	≤1.60	≤0.035	≤0.035	≥420	570~720	----	≥20	≥47	
SM570Q	EX	母 材	0.07	0.19	1.19	0.008	0.001	581	641	91.0	24.0	281	50mm厚
	母材規格値		≤0.18	≤0.55	≤1.60	≤0.035	≤0.035	≥430	570~720	----	≥20	≥47	
SM570Q	EG	母 材	0.10	0.26	1.54	0.006	0.001	519	597	87.0	28.0	282	25mm厚
	母材規格値		≤0.18	≤0.55	≤1.60	≤0.035	≤0.035	≥450	570~720	----	≥20	≥47	
SL9N590	9N	母 材	0.053	0.20	0.55	0.001	0.001	629	705	89.0	31.0	294	Ni:8.5~9.50
	母材規格値		≤0.12	≤0.30	≤0.90	≤0.025	≤0.025	≥590	690~830	----	≥21	≥41	

表3.2.1 引張試験結果(溶接部)

試験材	溶接方法	記号	試験片形状		試験結果				備考
			外径 (mm)	標点 距離 (mm)	引張強さ (MPa)	破断伸び (%)	絞り (%)	破断位置	
SM490A	SMAW	CX	14.00	50	539	23.4	68.1	母材	板厚25mm
	MAG	CM	14.00	50	531	24.2	69.8	母材	
	SAW	CS	13.98	50	543	23.0	70.6	母材	
	母材	C	14.00	50	510	30.6	74.8	母材	
SM490C	SMAW	EX	14.00	50	510	25.3	73.7	母材	板厚35mm
	MAG	EM	13.99	50	504	26.0	75.2	母材	
	SAW	ES	13.98	50	511	25.3	74.8	母材	
	母材	E	14.00	50	499	38.9	73.4	母材	
SN490C	SMAW	BX	13.99	50	526	24.4	72.2	母材	板厚32mm
	MAG	BM	13.99	50	523	25.0	71.4	母材	
	SAW	BS	14.00	50	527	23.5	72.8	母材	
	母材	B	14.00	50	517	35.2	75.3	母材	
SM570Q	SMAW	5CX	14.02	50	663	21.8	76.0	母材	板厚80mm
	MAG	5CM	14.01	50	661	19.4	75.9	母材	
	SAW	5CS	14.01	50	649	21.3	60.6	母材	
	母材	5C	14.00	50	630	24.0	77.0	母材	
SM570Q	SMAW	EXX	14.01	50	659	23.9	78.5	母材	板厚50mm
	MAG	EXM	14.02	50	666	21.2	77.8	母材	
	SAW	EXS	14.00	50	641	20.1	66.1	母材	
	母材	EX	14.00	50	641	24.0	77.0	母材	
SM570Q	SMAW	EGX	14.01	50	606	25.7	79.6	母材	板厚25mm
	MAG	EGM	14.01	50	605	24.9	79.9	母材	
	SAW	EGS	14.00	50	601	28.3	79.6	母材	
	母材	EG	14.00	50	597	28.0	78.0	母材	
SL9N590	SMAW	9NX	14.01	50	710	30.1	81.0	母材	板厚32mm
	TIG	9NT	13.99	50	719	27.5	80.6	母材	
	SAW	9NS	13.97	50	714	16.8	43.8	溶接金属	
	母材	9N	14.00	50	705	31.0	82.0	母材	

3. 2. 2 母材の動的引張試験

動的引張試験結果を表3.2.2に示す。試験は圧延方向(L方向)で行った。

図3.1.1～図3.1.4に動的引張試験の応力-伸び曲線の例を静的引張試験結果と比較して示す。最大応力を過ぎるまで見られるノイズは動的载荷によるものと考えられる。動的载荷の影響により降伏応力、引張強さとも上昇していることが分かる。

今回試験した供試材はいずれも明瞭な降伏現象を示した(高強度鋼では上、下の降伏現象を示さない場合がある)。上降伏点近傍の複雑な挙動は動的载荷によるノイズあるいは歪ゲージを貼った位置の近くが降伏した事による除荷等が考えられるが、最初に除荷を始めた位置の値とした。下伏点は比較的安定した値を示す1%歪時の値とした。歪は試験片平行部の中央に貼った歪ゲージ出力から求めた。

表3.2.3は表3.2.2から温度及び速度による引張強さ及び降伏点の静的な値からの上昇の割合を示したものである。

図3.1.5～図3.1.10に下伏点、上降伏点及び引張強さの载荷速度依存性及び载荷速度と温度が重畳した場合の影響を示す。

これらの図、表から下降伏点、上降伏点に及ぼす载荷速度の影響は試験材により異なり、SM400では下降伏点が65%、上降伏点が87%高くなり、SM490、SN490ではそれぞれ56%、53%、SM570ではそれぞれ20%、24%、SL9N590ではそれぞれ10%、18%上昇した。

引張強さの上昇はいずれも同程度であり、载荷速度の影響によりSM400で17%、SM490、SN490で約18%、SM570で14%、SL9N590で11%上昇した。载荷速度と温度とが重畳した場合更に5%程度上昇した。

以上の結果、载荷速度あるいは载荷速度及び温度の効果は引張強さに比較して降伏点に著しく、更に高強度材と比較し低強度材に著しい事が分かる。

伸び及び絞り、若干バラツキがあるものの、静的試験結果と比較して、動的試験結果はほぼ同程度かそれ以上の値を示した。

写真3.1.1に試験前の試験片の例を示す。試験片形状寸法は静的引張試験と動的引張試験とは同一のものをを用いた。

写真3.1.2に母材試験後の破断状況及び破断面の例を示す。静的引張試験結果及び動的引張試験結果のいずれも十分な破断伸び及び絞りを生じている事が分かる。

写真3.1.3に溶接部試験後の破断状況及び破断面の例を示す。溶接部試験は静的引張試験結果のみ行った。いずれも試験片中央部の溶接部を外れて破断し、伸び領域が狭いことが分かる。破断面は十分な破断伸び及び絞りを生じている事が分かる。

表3. 2. 2 引張試験結果(母材)-1/2

試験材	記号	温度 (℃)	載荷 速度 (mm/sec)	試験片形状		試験結果									備考
				外径 (mm)	標点 距離 (mm)	*1) 下降伏点 (MPa)	上 降 伏 点 (MPa)	引張強さ (MPa)	*2) 降伏比 (%)	一様伸び (%)	*3) 破断伸び (%)	*3) 絞り (%)	破断 位置 *4)		
SM400A	A-L3	20	0.01	14.00	60	278	283	442	64.0	---	38.9	73.2	A		
	A-L1	-20	4092	14.00	60	500	547	543	100.7	20.7	41.3	72.6	A		
	A-L2	-20	4174	14.01	60	501	554	538	103.0	20.8	38.9	70.9	A		
	A-L5	20	4073	14.00	60	454	545	518	105.2	14.3	41.0	73.4	A		
	A-L6	20	4226	14.00	60	465	511	520	98.3	15.1	39.2	73.4	A		
SM490A	C-L4	20	0.01	14.00	60	334	375	510	73.5	---	30.6	74.8	A		
	C-L1	-20	4190	14.00	60	593	556	633	87.8	14.3	29.0	73.8	A		
	C-L2	-20	4228	14.00	60	574	590	643	91.8	19.4	36.6	73.5	A		
	C-L5	20	4209	13.97	60	529	579	625	92.6	19.2	35.9	73.1	A		
	C-L6	20	4170	13.92	60	529	543	598	90.8	15.6	31.7	73.6	A		
SM490C	E-1	20	0.01	14.00	50	339	341	499	68.3	17.7	38.4	74.1	A		
	E-2	20	0.01	13.99	50	332	346	499	69.3	18.4	39.3	72.7	A		
SN490C	B-L3	20	0.01	14.00	60	342	366	517	70.8	---	35.2	75.3	A		
	B-L1	-20	4144	14.00	60	556	560	630	88.9	19.7	39.6	75.2	A		
	B-L2	-20	4184	14.00	60	553	594	628	94.6	20.1	37.6	68.9	A		
	B-L5	20	4180	13.97	60	518	576	605	95.2	18.8	39.6	76.1	A		
	B-L6	20	4179	13.97	60	530	565	598	94.5	20.3	39.1	76.6	A		

*1) 下降伏点は1%歪位置の値。

*2) 降伏比は上降伏点と引張強さとの比。

*3) 破断伸び及び絞りは試験片を実測。

*4) 標点間を4等分し、中央の2区間がA、外側の2区間がB。

表3. 2. 2 引張試験結果(母材)-2/2

試験材	記号	温度 (°C)	载荷 速度 (mm/sec)	試験片形状		試験結果								備考
				外径 (mm)	標点 距離 (mm)	*1) 下降伏点 (MPa)	上降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	*2) 降伏比 (%)	一様伸び (%)	*3) 破断伸び (%)	*3) 絞り (%)	破断 位置 *4)	
SM570Q	5C-L1	20	0.01	14.01	60	562	562	629	89.3	7.1	23.7	77.7	A	板厚80mm
	5C-L2	20	0.01	14.01	60	567	567	631	89.9	6.6	23.8	76.4	A	
	5C-L3	20	4106	14.00	60	624	665	705	94.3	9.5	27.9	75.8	A	
	5C-L4	20	4185	14.01	60	720	725	755	96.0	10.0	26.1	75.4	B	
SM570Q	EX-L1	20	0.01	14.01	60	578	578	639	90.5	6.7	23.9	76.8	A	板厚50mm
	EX-L2	20	0.01	14.01	60	583	583	642	90.8	6.5	24.8	78.4	A	
	EX-L3	20	4116	14.02	60	671	704	722	97.5	9.6	30.4	77.4	A	
	EX-L4	20	4102	14.01	60	701	682	705	96.7	10.0	29.9	76.0	A	
SM570Q	EG-L1	20	0.01	14.01	60	507	512	596	85.9	9.2	28.2	79.6	A	板厚25mm
	EG-L2	20	0.01	14.01	60	511	525	598	87.8	9.3	28.6	79.7	A	
	EG-L3	20	3978	14.00	60	621	660	682	96.8	9.2	33.4	79.1	A	
	EG-L4	20	4154	14.02	60	623	675	682	99.0	9.6	33.4	79.0	A	
SL9N590	9N-L1	20	0.01	14.01	60	617	630	706	89.2	11.2	31.1	81.7	A	板厚32mm
	9N-L2	20	0.01	14.01	60	617	628	704	89.2	11.1	30.8	81.4	A	
	9N-L3	20	4149	14.01	60	699	741	782	94.8	9.1	33.8	79.2	A	
	9N-L4	20	4143	14.01	60	660	748	790	94.7	9.4	33.0	77.7	A	

*1) 下降伏点は1%歪位置の値。

*4) 標点間を4等分し、中央の2区間がA、外側の2区間がB。

*2) 降伏比は上降伏点と引張強さとの比。

*3) 破断伸び及び絞りは試験片を実測。

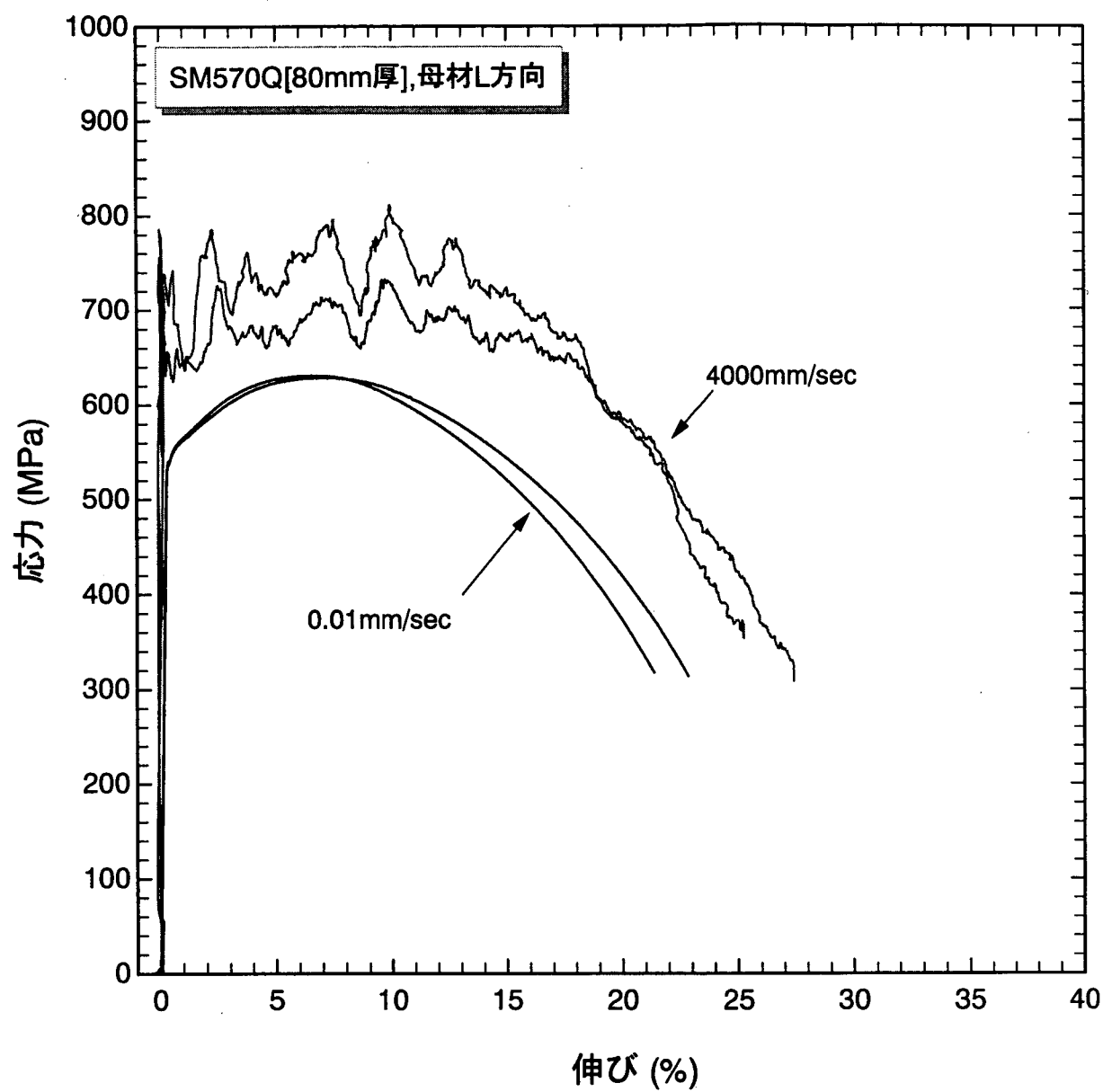


図3. 1. 1 応力－伸び曲線 (SM570Q[80mm厚],母材L方向)

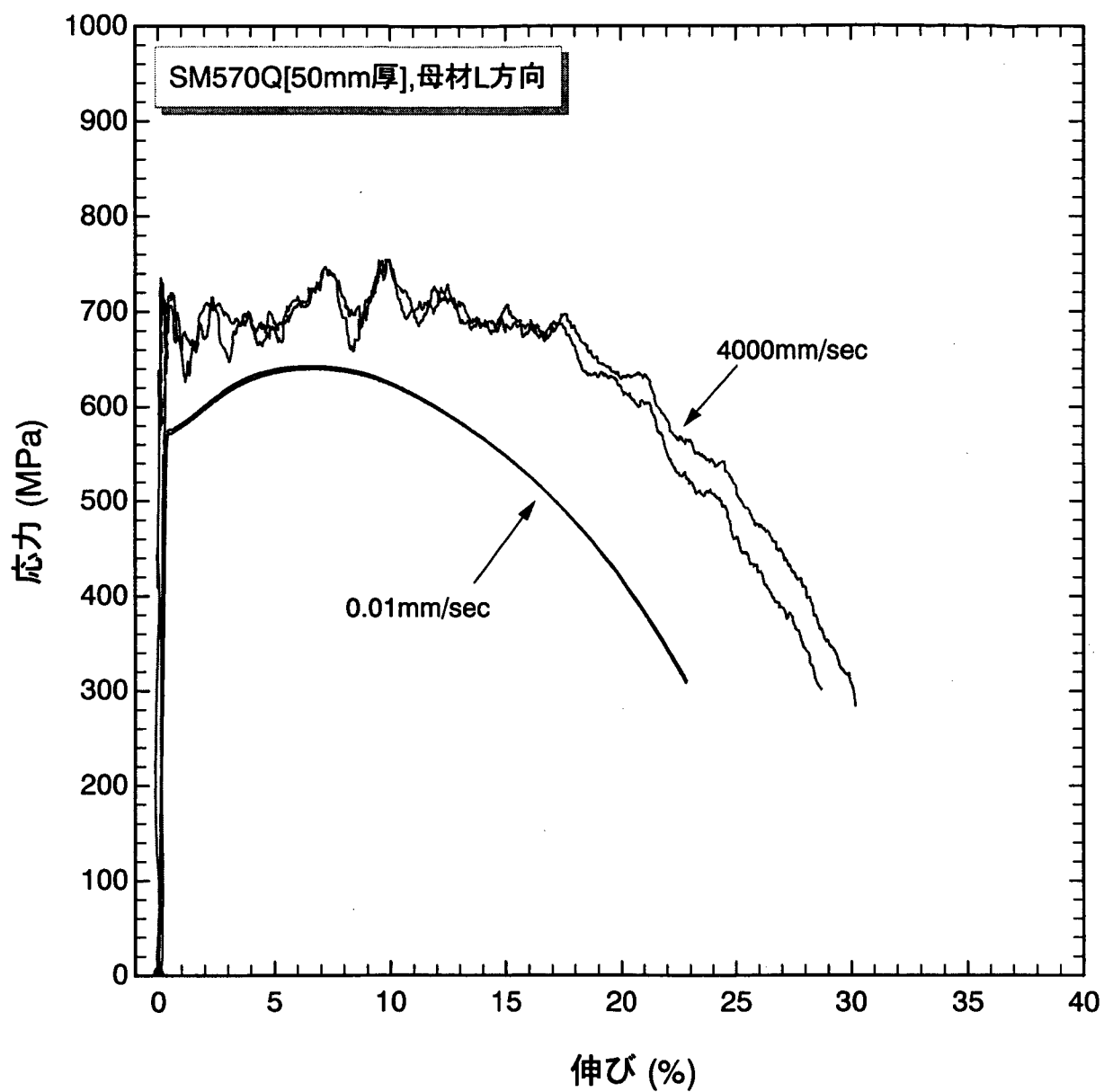


図3. 1. 2 応力－伸び曲線 (SM570Q[50mm厚],母材L方向)

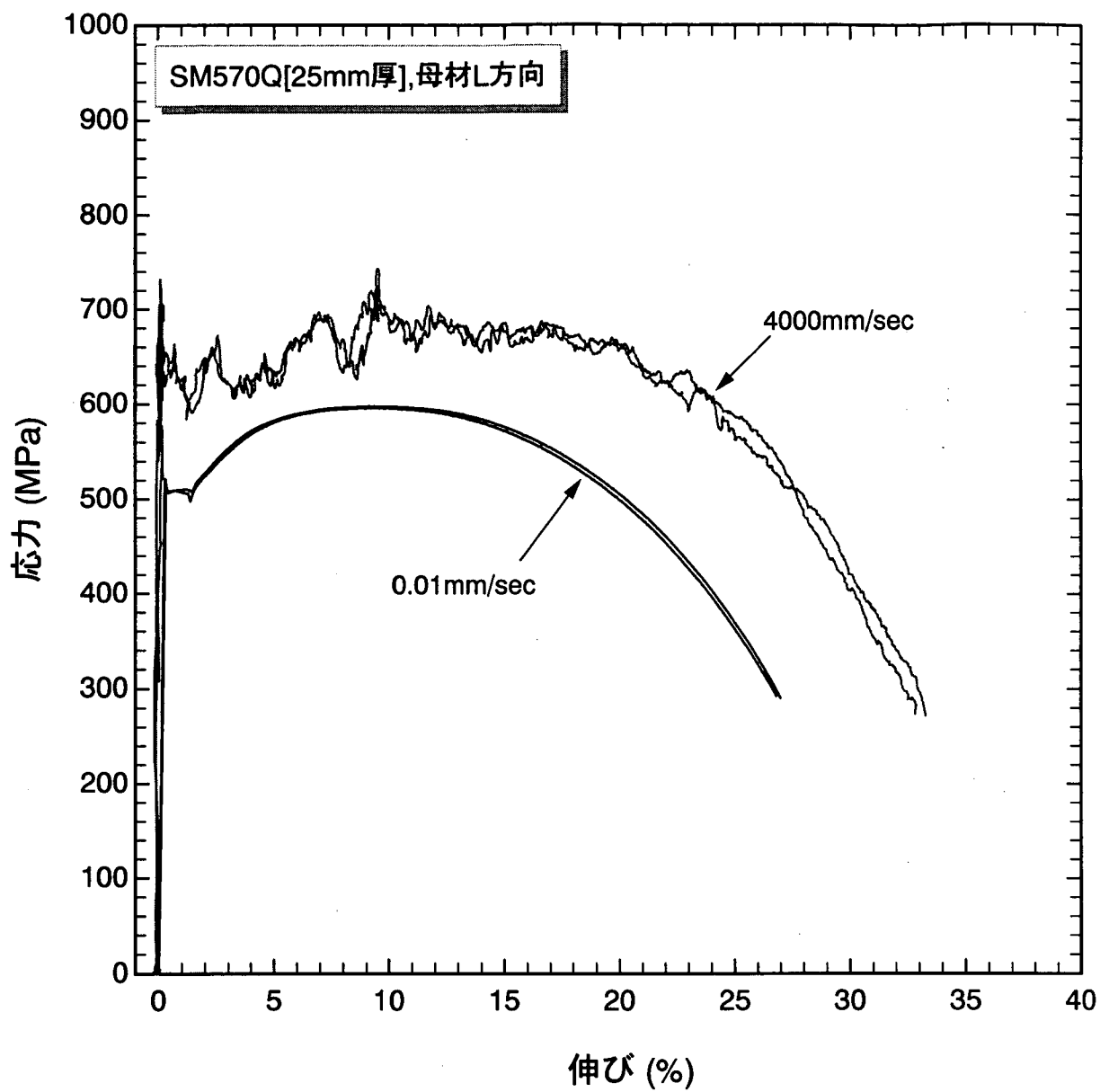


図3. 1. 3 応力－伸び曲線 (SM570Q[25mm厚],母材L方向)

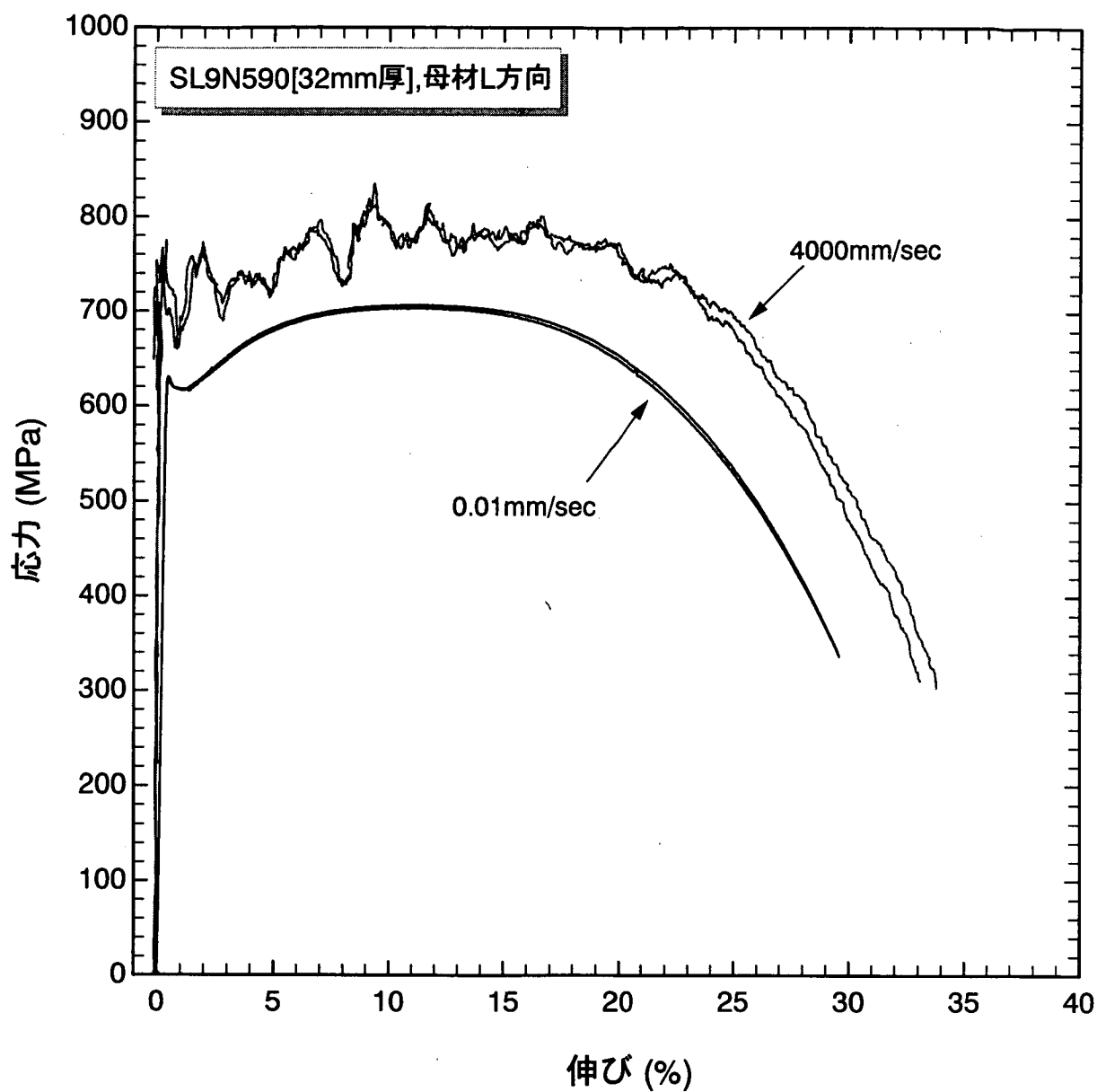


図3. 1. 4 応力－伸び曲線 (SL9N590[32mm厚],母材L方向)

表3. 2. 3 載荷速度及び温度による強度上昇率

試験材	記号	引張試験結果(母材)									強度上昇率(動的／静的)					
		載荷速度:0.01mm/sec 試験温度:20℃			載荷速度:4000mm/sec 試験温度:-20℃			載荷速度:4000mm/sec 試験温度:20℃			載荷速度の影響			載荷速度, 温度の影響		
		下降伏点 (MPa)	上降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	下降伏点 (MPa)	上降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	下降伏点 (MPa)	上降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	下降伏点	上降伏点	引張強さ	下降伏点	上降伏点	引張強さ
SM400A	A	278	283	442	501	551	541	460	528	519	1.65	1.87	1.17	1.80	1.95	1.22
SM490A	C	334	375	510	584	573	638	529	561	612	1.58	1.50	1.20	1.75	1.53	1.25
SN490C	B	342	366	517	555	577	629	524	571	602	1.53	1.56	1.16	1.62	1.58	1.22
SM570Q	5C	565	565	630	---	---	---	672	695	730	1.19	1.23	1.16	---	---	---
SM570Q	EX	581	581	641	---	---	---	686	693	714	1.18	1.19	1.11	---	---	---
SM570Q	EG	509	519	597	---	---	---	622	668	682	1.22	1.29	1.14	---	---	---
SL9N590	9N	617	629	705	---	---	---	680	745	786	1.10	1.18	1.11	---	---	---

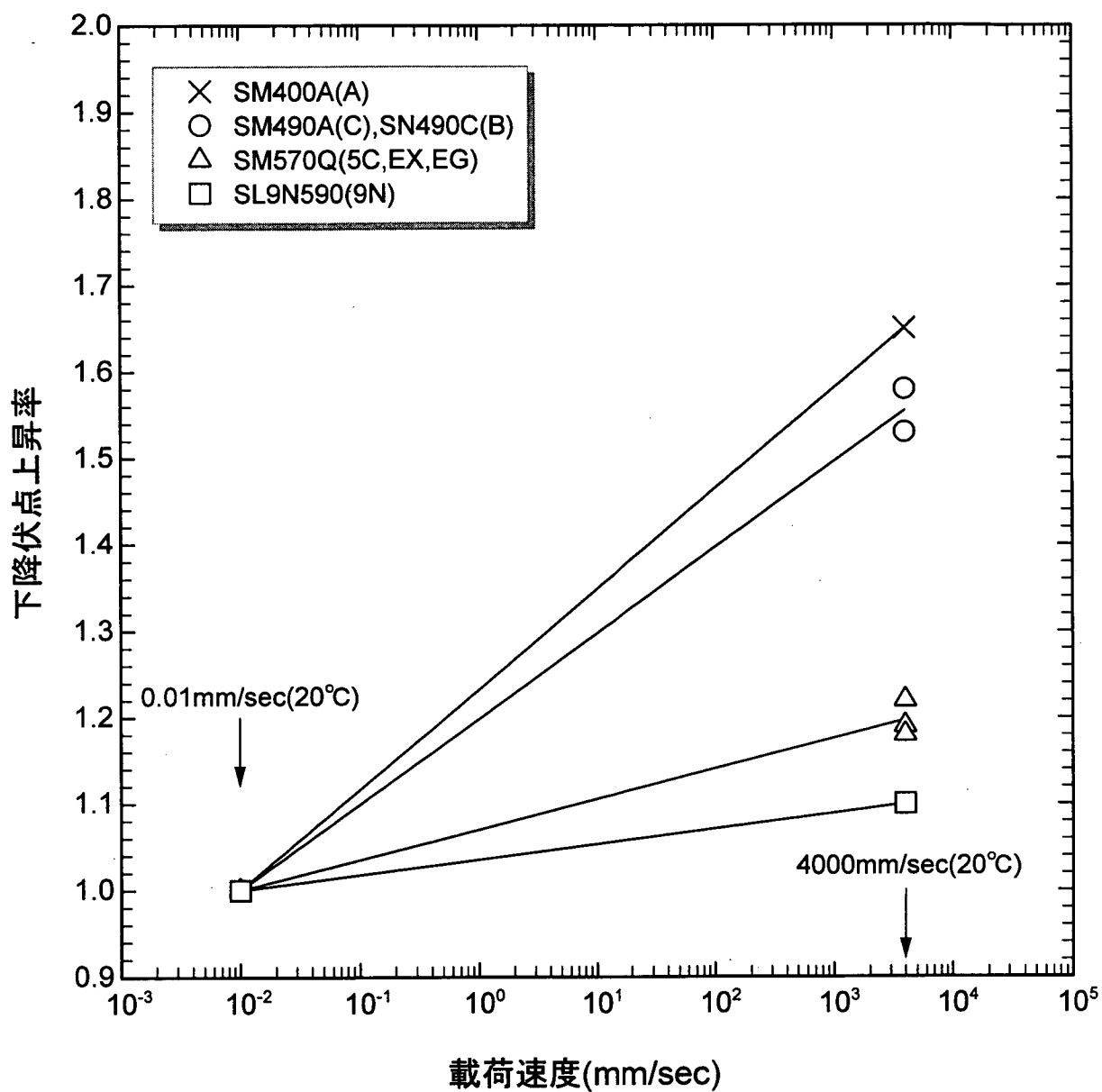


図3. 1. 5 載荷速度による下降伏点の上昇率

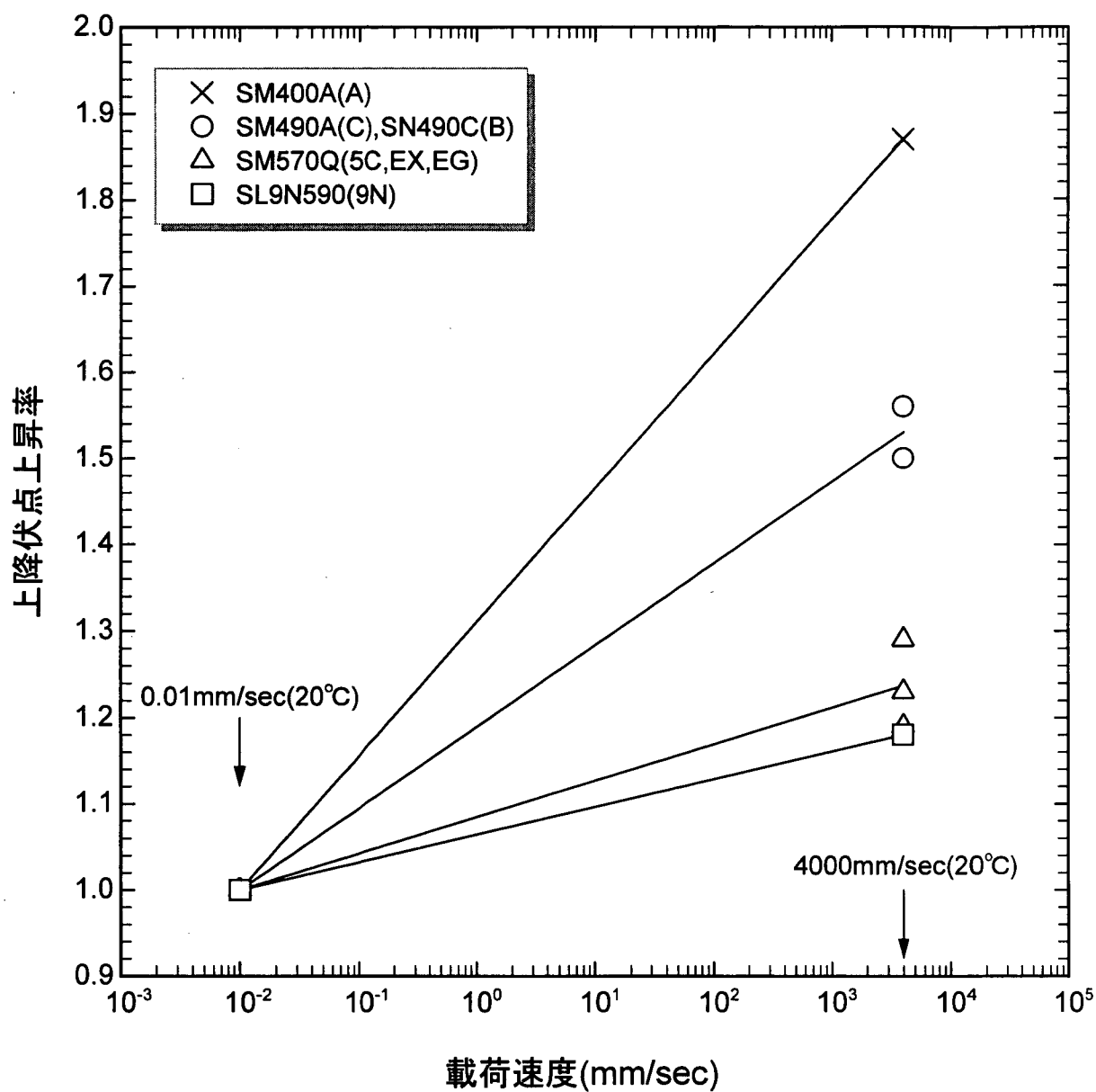


図3. 1. 6 載荷速度による上降伏点の上昇率

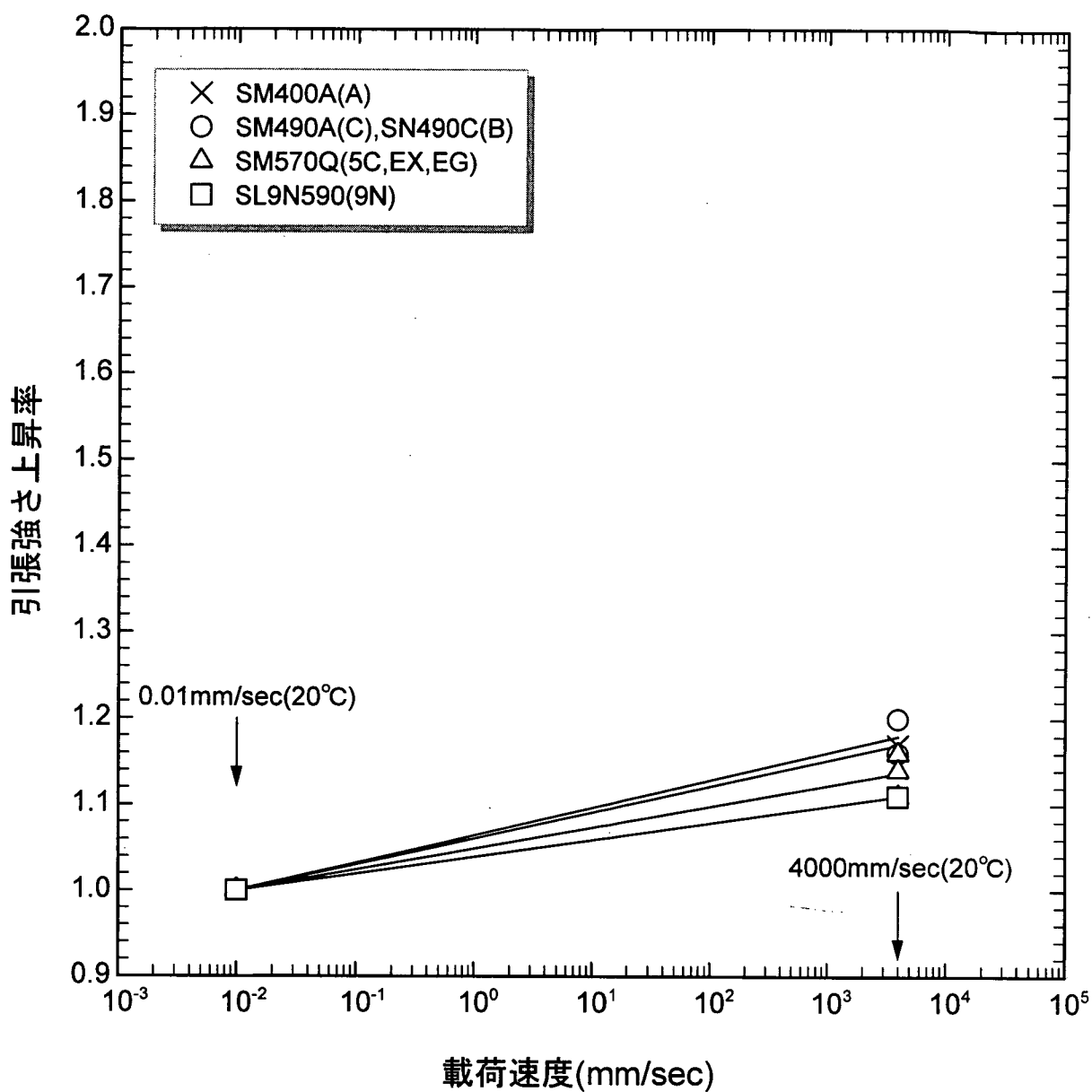


図3. 1. 7 載荷速度による引張強さの上昇率

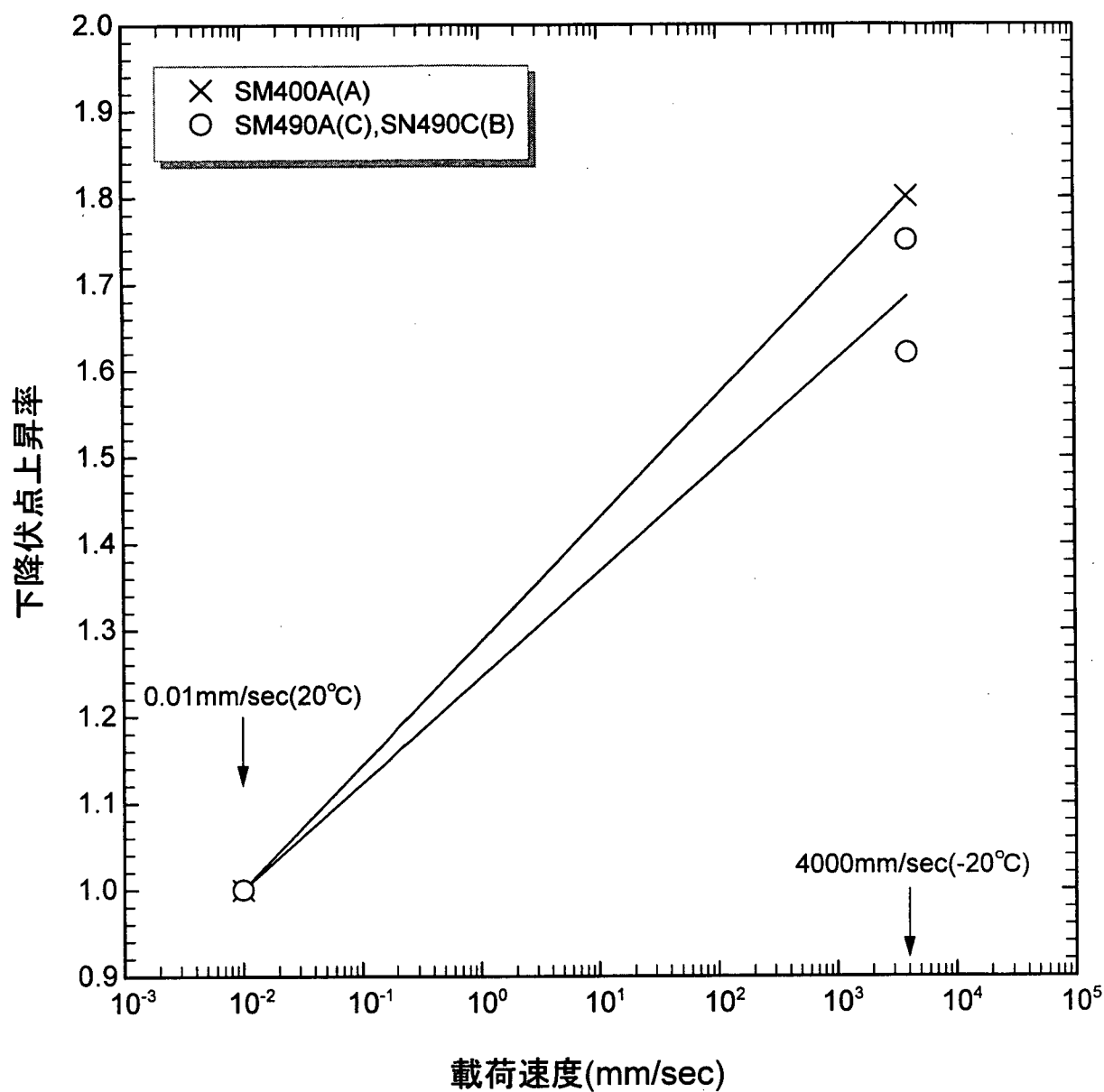


図3. 1. 8 載荷速度及び温度による下降伏点の上昇率

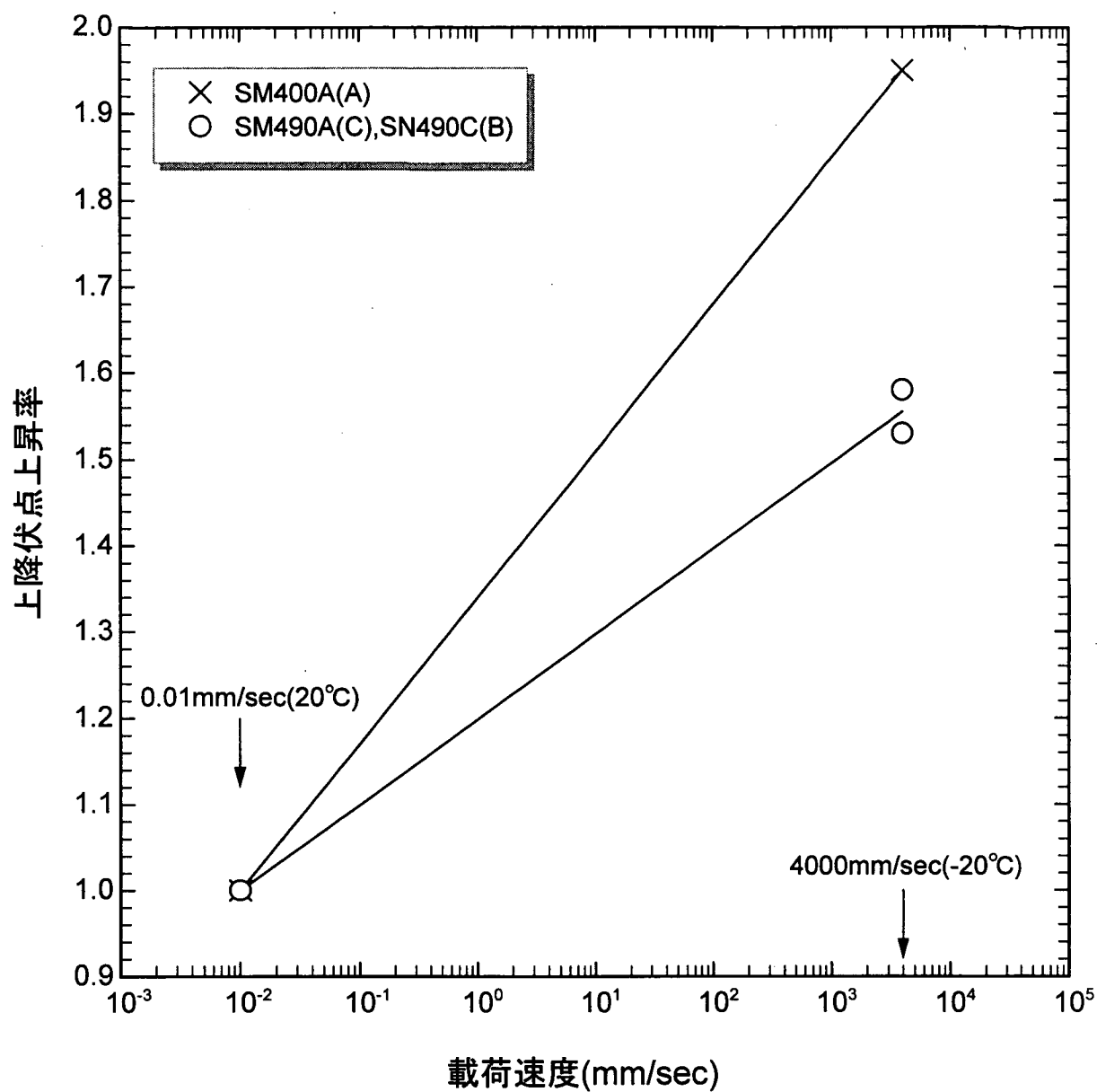


図3. 1. 9 載荷速度及び温度による上降伏点の上昇率

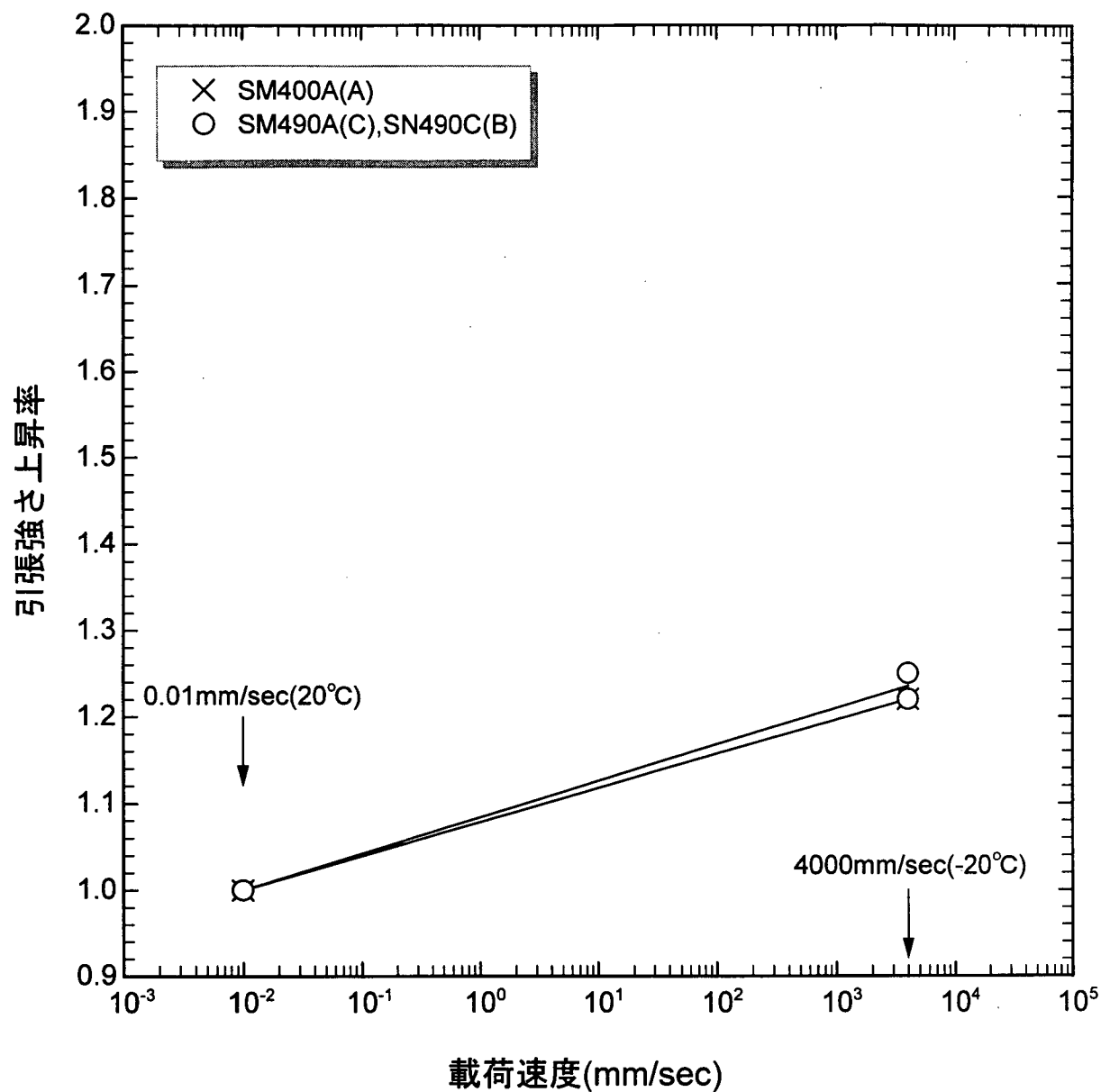
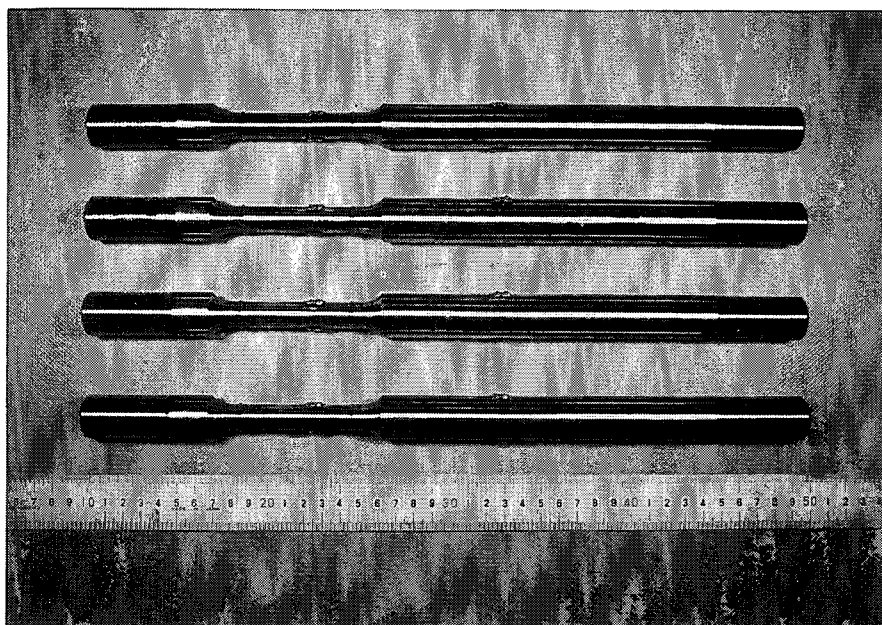
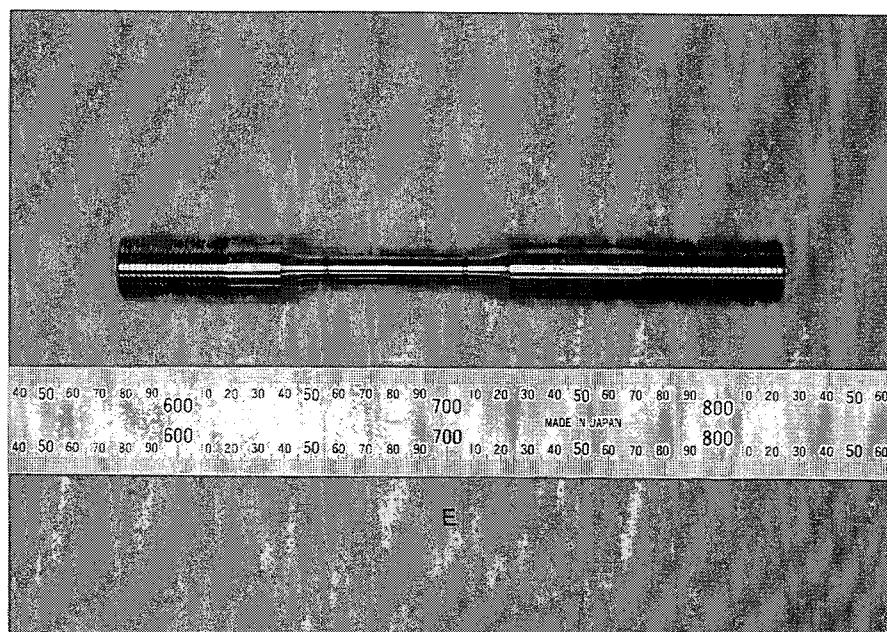


図3. 1. 10 载荷速度及び温度による引張強さの上昇率

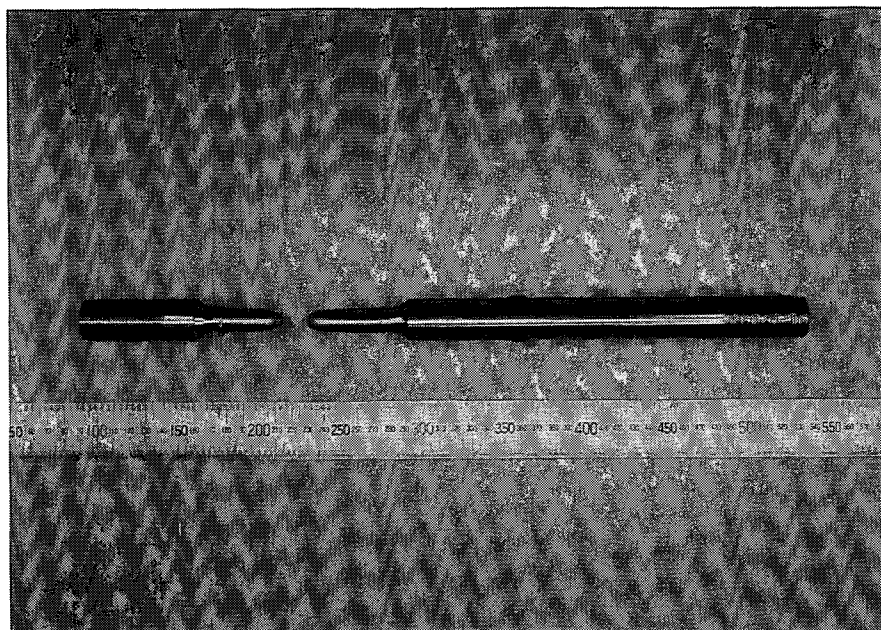


母材

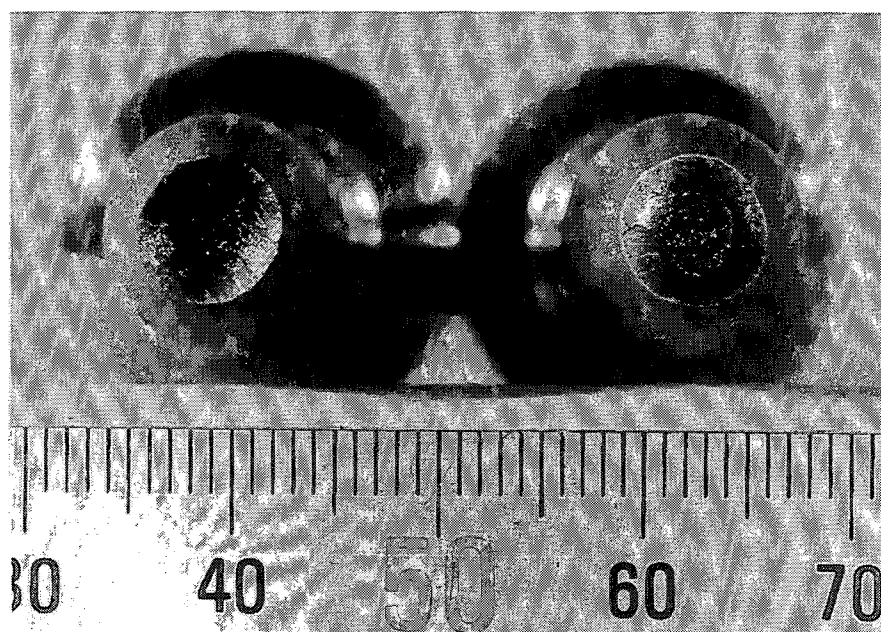


溶接部

写真 3. 1. 1 引張試験片（試験前）

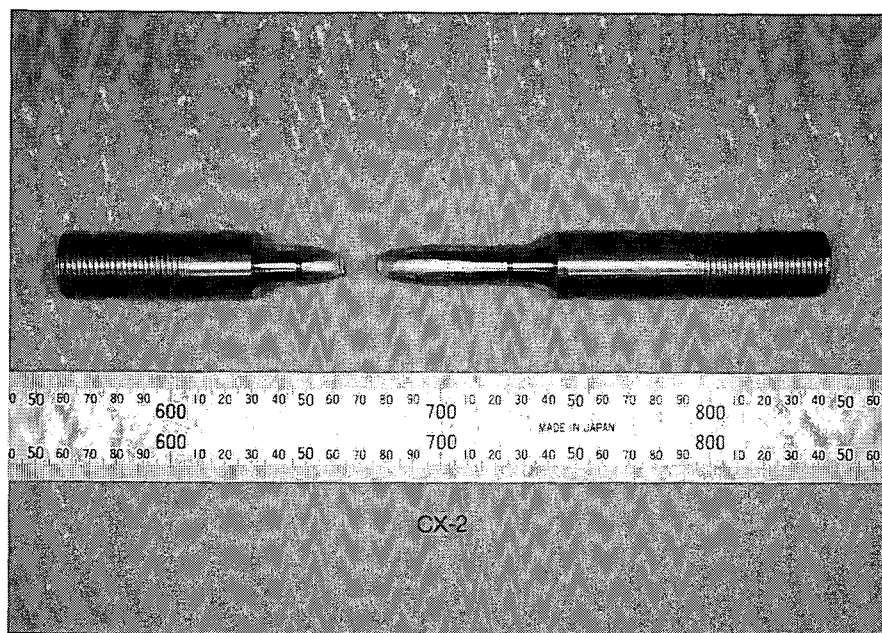


破断状況

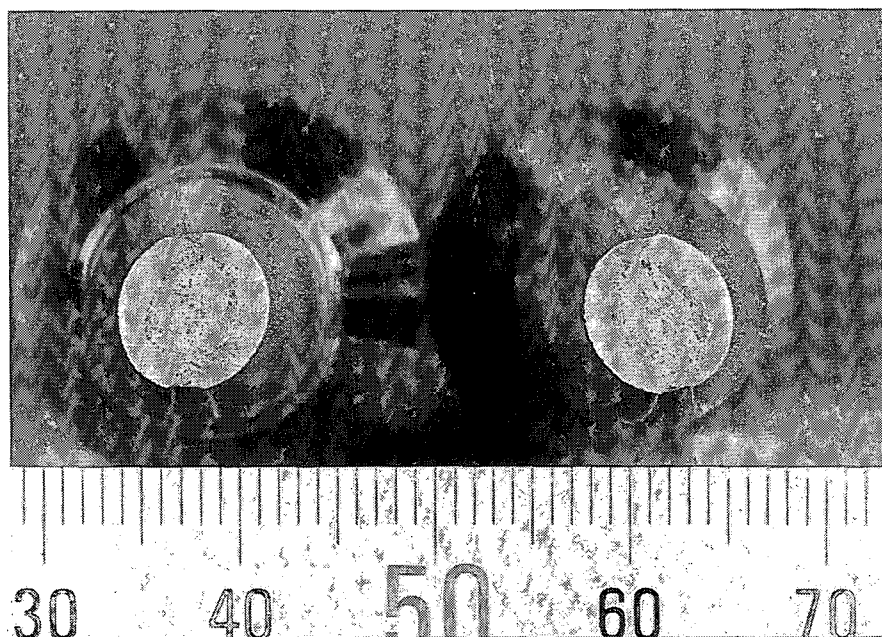


破断面

写真 3. 1. 2 破断状況及び破断面（母材の例、EX-L3）



破断状況



破断面

写真 3. 1. 3 破断状況及び破断面（溶接部の例、CX-2）

3. 3 シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験結果を表3.3.1～表3.3.36に示す。試験は母材では圧延方向(L方向)と圧延直角方向(C方向)について、溶接部では溶接金属、Fusion Line、HAZのうち最脆弱部について行った。それぞれの材料について表のデータを用いて、破面遷移曲線及び吸収エネルギー遷移曲線を求めた。

図3.2.1～図3.2.4に今回試験した鋼材を、現在の代表的鋼材と見做したSM400～SN490C、次世代鋼材としてのSM570Q及びこれらの溶接部とにまとめて示す。但し9%Ni鋼は液体窒素温度でも脆性破壊を生じないため、図から省略した。図には個々のデータは省き、遷移曲線のみを示したが、多層溶接部では複雑な熱履歴を受けているため、溶接部のデータのバラツキは大きい。

「次世代母材」は「現行母材」と比較し、同じかより低温側にあり、「現行母材」は上部棚エネルギーも低いものがある。「次世代溶接部」の破面遷移曲線は「現行溶接部」を挟んでより広くばらついており、「次世代溶接部」のエネルギー遷移曲線は「現行溶接部」とほぼ同じであるが上部棚エネルギーは極端に低いものがあり、溶接条件が適切でなかったものと考えられる。

これらの図から破面遷移温度(vT_s)及び吸収エネルギー遷移温度(vT_E)を求めた。 vT_s 、 vT_E 及び規格に定める0℃での吸収エネルギーをまとめて表3.3.37に示す。

vT_s 、 vT_E で母材L方向と溶接部とを比較すると、SM570Qの25mm厚鋼板のSMAW、MAG、SAW及びSM570Qの80mm厚鋼板のSMAW、SAWを除いて、溶接部のシャルピー衝撃値は改善されている。0℃での吸収エネルギーで比較すると、SM490AのSMAW、MAG、SAW、SM490CのMAG、SAW、3種類のSM570QのSMAW、MAG、SAW、9%Ni鋼のSMAW、SAWの吸収エネルギーが低下している。特にSM570Q、9%Ni鋼で溶接方法により吸収エネルギーの低下が著しいものがあるのは溶接方法が適切でなかったものと考えられる。

写真3.2.1に試験前の試験片の代表例3本を向きを変えて示す。なお試験は1温度3本繰返しを原則とし、溶接部の試験で試験材が不足する時は1温度2本繰返しとした。

写真3.2.2に試験後の破断面の例を温度毎に示した。

写真3.2.3に母材破面のSEM写真の例を示す。写真は試験片幅中央の切欠底の破壊発生部近傍のものであり。典型的な破面として、温度の高い試験で得られた延性破面、延性－脆性遷移領域の破面及び低温での完全脆性破面を示した。延性－脆性遷移領域の写真では劈開破面中に若干のディンプルが含まれているにすぎないが、撮影位置が脆性破面の多い試験片幅中央部であることと、SEMの視野が狭いためである。

表3. 3. 1 シャルピー衝撃試験結果

(SM400A[25mm厚],母材L方向)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _S (℃)	v T _E (℃)
AL-19	-80	8	10	0	-34	-34
AL-20	-80	5	6	0		
AL-21	-80	6	8	0		
AL-13	-60	13	16	0		
AL-14	-60	9	11	0		
AL-15	-60	19	24	0		
AL-10	-40	170	213	65		
AL-11	-40	134	168	35		
AL-12	-40	88	110	25		
AL-7	-20	167	209	60		
AL-8	-20	224	280	85		
AL-9	-20	221	276	80		
AL-4	0	290	363	100		
AL-5	0	250	313	85		
AL-6	0	269	336	100		
AL-1	20	294	368	100		
AL-2	20	294	368	100		
AL-3	20	294	368	100		
AL-16	40	294	368	100		
AL-17	40	293	366	100		
AL-18	40	294	368	100		

表3. 3. 2 シャルピー衝撃試験結果

(SM400A[25mm厚],母材C方向)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _S (℃)	v T _E (℃)
AC-19	-80	7	9	0	-21	-23
AC-20	-80	15	19	0		
AC-21	-80	3	4	0		
AC-13	-60	9	11	0		
AC-14	-60	10	13	0		
AC-15	-60	12	15	0		
AC-10	-40	54	68	20		
AC-11	-40	144	180	50		
AC-12	-40	165	206	55		
AC-7	-20	95	119	35		
AC-8	-20	142	178	50		
AC-9	-20	180	225	60		
AC-4	0	232	290	85		
AC-5	0	204	265	80		
AC-6	0	178	223	70		
AC-1	20	264	330	100		
AC-2	20	230	288	25		
AC-3	20	294	368	100		
AC-16	40	272	340	100		
AC-17	40	263	329	100		
AC-18	40	258	323	100		

表3. 3. 3 シャルピー衝撃試験結果

(SM490A[32mm厚],母材L方向)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _S (℃)	v T _E (℃)
CL-19	-80	5	6	0	-27	-36
CL-20	-80	5	6	5		
CL-21	-80	8	10	0		
CL-13	-60	8	10	0		
CL-14	-60	166	208	40		
CL-15	-60	158	198	35		
CL-10	-40	148	185	35		
CL-11	-40	142	178	35		
CL-12	-40	135	169	35		
CL-7	-20	201	251	70		
CL-8	-20	168	210	50		
CL-9	-20	155	194	45		
CL-4	0	216	270	80		
CL-5	0	205	256	70		
CL-6	0	276	345	100		
CL-1	20	197	246	80		
CL-2	20	207	259	80		
CL-3	20	222	278	85		
CL-16	40	288	360	100		
CL-17	40	254	318	100		
CL-18	40	278	318	100		

表3.3.4 シャルピー衝撃試験結果

(SM490A[32mm厚],母材C方向)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _S (℃)	v T _E (℃)
CC-19	-80	8	10	0	-11	-32
CC-20	-80	4	5	0		
CC-21	-80	53	66	5		
CC-13	-60	21	25	0		
CC-14	-60	56	70	10		
CC-15	-60	61	76	10		
CC-10	-40	68	85	20		
CC-11	-40	59	74	20		
CC-12	-40	103	129	30		
CC-7	-20	142	178	40		
CC-8	-20	140	175	45		
CC-9	-20	128	160	35		
CC-4	0	150	188	65		
CC-5	0	104	130	40		
CC-6	0	160	200	65		
CC-1	20	203	254	80		
CC-2	20	162	203	85		
CC-3	20	250	313	100		
CC-16	40	213	266	95		
CC-17	40	176	220	95		
CC-18	40	190	238	95		

表3. 3. 5 シャルピー衝撃試験結果
(SM490C[35mm厚],母材L方向)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _S (℃)	v T _E (℃)
E1	-80	27	34	0	-37	-43
E2	-80	12	15	0		
E3	-80	16	20	0		
E4	-60	19	24	5		
E5	-60	116	145	20		
E6	-60	22	28	5		
E7	-40	203	254	55		
E8	-40	109	136	15		
E9	-40	207	259	60		
E10	-20	234	293	80		
E11	-20	242	303	80		
E12	-20	271	339	85		
E13	0	291	364	100		
E14	0	294	368	100		
E15	0	294	368	100		
E16	20	294	368	100		
E17	20	294	368	100		
E18	20	294	368	100		

表3. 3. 6 シャルピー衝撃試験結果

(SN490C[32mm厚],母材L方向)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	vT_s (℃)	vT_E (℃)
BL-22	-80	5	6	0	-24	-27
BL-23	-80	4	5	0		
BL-24	-80	3	4	0		
BL-13	-60	55	69	5		
BL-14	-60	9	11	0		
BL-15	-60	10	13	0		
BL-10	-40	62	78	15		
BL-11	-40	150	188	30		
BL-12	-40	56	70	15		
BL-7	-20	203	254	80		
BL-8	-20	206	258	80		
BL-9	-20	164	205	45		
BL-4	0	231	289	80		
BL-5	0	196	245	80		
BL-6	0	166	208	60		
BL-1	20	247	309	95		
BL-2	20	271	339	80		
BL-3	20	294	368	100		
BL-16	40	294	368	100		
BL-17	40	284	355	100		
BL-18	40	288	360	100		
BL-19	60	249	311	100		
BL-20	60	265	331	100		
BL-21	60	269	336	100		

表3. 3. 7 シャルピー衝撃試験結果

(SN490C[32mm厚],母材C方向)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _S (℃)	v T _E (℃)
BC-22	-80	6	8	0	-7	-24
BC-23	-80	4	5	0		
BC-24	-80	6	8	0		
BC-13	-60	12	15	0		
BC-14	-60	6	8	0		
BC-15	-60	11	14	0		
BC-10	-40	54	68	20		
BC-11	-40	34	43	20		
BC-12	-40	48	60	20		
BC-7	-20	120	150	40		
BC-8	-20	123	154	40		
BC-9	-20	90	113	30		
BC-4	0	118	148	40		
BC-5	0	140	175	45		
BC-6	0	155	194	65		
BC-1	20	163	204	85		
BC-2	20	173	216	85		
BC-3	20	155	194	85		
BC-16	40	149	186	95		
BC-17	40	196	245	95		
BC-18	40	191	239	95		
BC-19	60	184	230	100		
BC-20	60	160	200	100		
BC-21	60	174	218	100		

表3. 3. 8 シャルピー衝撃試験結果

(SM570Q[80mm厚],母材L方向)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _s (℃)	v T _E (℃)
5CL-19	-120	4	5	0	-42	-62
5CL-20	-120	9	11	0		
5CL-21	-120	7	9	0		
5CL-16	-100	2	3	0		
5CL-17	-100	11	14	0		
5CL-18	-100	32	40	0		
5CL-13	-80	104	130	15		
5CL-14	-80	157	196	30		
5CL-15	-80	17	21	0		
5CL-10	-60	178	223	40		
5CL-11	-60	183	229	40		
5CL-12	-60	187	234	50		
5CL-7	-40	181	226	50		
5CL-8	-40	167	209	45		
5CL-9	-40	172	215	45		
5CL-4	-20	199	249	65		
5CL-5	-20	217	271	70		
5CL-6	-20	185	231	55		
5CL-1	0	264	330	100		
5CL-2	0	261	326	100		
5CL-3	0	261	326	100		

表3. 3. 9 シャルピー衝撃試験結果
(SM570Q[80mm厚],母材C方向)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _s (℃)	v T _E (℃)
5CC-22	-100	14	18	0	-24	-40
5CC-23	-100	25	31	0		
5CC-24	-100	9	11	0		
5CC-19	-80	99	124	10		
5CC-20	-80	38	48	5		
5CC-21	-80	15	19	0		
5CC-10	-60	113	141	15		
5CC-11	-60	24	30	0		
5CC-12	-60	154	193	30		
5CC-7	-40	166	208	40		
5CC-8	-40	28	35	5		
5CC-9	-40	182	228	50		
5CC-4	-20	170	213	45		
5CC-5	-20	175	219	45		
5CC-6	-20	189	236	50		
5CC-1	0	255	319	100		
5CC-2	0	247	309	100		
5CC-3	0	187	234	60		
5CC-13	20	258	323	100		
5CC-14	20	226	283	85		
5CC-15	20	254	318	100		
5CC-16	40	257	344	100		
5CC-17	40	268	335	100		
5CC-18	40	270	338	100		

表3. 3. 10 シャルピー衝撃試験結果

(SM570Q[50mm厚],母材L方向)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _S (℃)	v T _E (℃)
EXL-16	-100	4	5	0	-40	-42
EXL-17	-100	3	4	0		
EXL-18	-100	5	6	0		
EXL-13	-80	13	16	5		
EXL-14	-80	7	9	5		
EXL-15	-80	10	13	5		
EXL-10	-60	15	19	10		
EXL-11	-60	158	198	30		
EXL-12	-60	16	20	10		
EXL-7	-40	18	23	15		
EXL-8	-40	197	246	60		
EXL-9	-40	197	246	60		
EXL-4	-20	282	353	100		
EXL-5	-20	221	276	75		
EXL-6	-20	283	354	100		
EXL-1	0	280	350	100		
EXL-2	0	270	338	100		
EXL-3	0	292	365	100		

表3. 3. 11 シャルピー衝撃試験結果

(SM570Q[50mm厚],母材C方向)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	$v T_s$ (℃)	$v T_E$ (℃)
EXC-22	-100	4	5	0	-29	-28
EXC-23	-100	3	4	0		
EXC-24	-100	4	5	0		
EXC-19	-80	5	6	5		
EXC-20	-80	6	8	5		
EXC-21	-80	6	8	5		
EXC-10	-60	12	16	10		
EXC-11	-60	11	14	10		
EXC-12	-60	16	20	10		
EXC-7	-40	12	15	5		
EXC-8	-40	21	26	10		
EXC-9	-40	30	38	15		
EXC-4	-20	234	293	85		
EXC-5	-20	276	345	100		
EXC-6	-20	204	255	70		
EXC-1	0	264	330	100		
EXC-2	0	268	335	100		
EXC-3	0	203	254	70		
EXC-13	20	241	301	85		
EXC-14	20	270	338	100		
EXC-15	20	284	355	100		
EXC-16	40	277	346	100		
EXC-17	40	289	361	100		
EXC-18	40	289	361	100		

表3. 3. 12 シャルピー衝撃試験結果

(SM570Q[25mm厚],母材L方向)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _s (℃)	v T _E (℃)
EGL-22	-140	4	5	0	-87	-90
EGL-23	-140	5	6	0		
EGL-24	-140	7	9	0		
EGL-19	-120	4	5	0		
EGL-20	-120	4	5	0		
EGL-21	-120	4	5	0		
EGL-16	-100	20	25	5		
EGL-17	-100	107	134	20		
EGL-18	-100	71	89	10		
EGL-13	-80	236	295	80		
EGL-14	-80	188	235	70		
EGL-15	-80	227	284	75		
EGL-10	-60	224	280	85		
EGL-11	-60	235	294	85		
EGL-12	-60	236	295	85		
EGL-7	-40	247	309	90		
EGL-8	-40	274	343	100		
EGL-9	-40	266	333	100		
EGL-4	-20	280	350	100		
EGL-5	-20	288	360	100		
EGL-6	-20	246	308	90		
EGL-1	0	285	356	100		
EGL-2	0	280	350	100		
EGL-3	0	282	353	100		

表3. 3. 13 シャルピー衝撃試験結果

(SM570Q[25mm厚],母材C方向)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	$v T_s$ (℃)	$v T_E$ (℃)
EGC-22	-140	7	9	0	-79	-81
EGC-23	-140	7	9	0		
EGC-24	-140	5	6	0		
EGC-19	-120	10	12	0		
EGC-20	-120	13	16	0		
EGC-21	-120	7	9	0		
EGC-16	-100	90	113	20		
EGC-17	-100	86	108	15		
EGC-18	-100	22	28	5		
EGC-13	-80	138	173	35		
EGC-14	-80	191	239	65		
EGC-15	-80	159	199	55		
EGC-10	-60	196	245	80		
EGC-11	-60	206	258	80		
EGC-12	-60	234	293	90		
EGC-7	-40	222	278	85		
EGC-8	-40	212	265	85		
EGC-9	-40	239	299	90		
EGC-4	-20	275	344	100		
EGC-5	-20	287	359	100		
EGC-6	-20	277	346	100		
EGC-1	0	265	331	100		
EGC-2	0	272	340	100		
EGC-3	0	273	341	100		

表3. 3. 14 シャルピー衝撃試験結果

(SL9N590[32mm厚],母材L方向)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J /cm ²)	延性 破 面 率 (%)	$v T_s$ (℃)	$v T_E$ (℃)
9NL-4	-196	251	314	100	----	----
9NL-5	-196	236	295	100		
9NL-6	-196	234	293	100		
9NL-1	0	293	366	100		
9NL-2	0	294	368	100		
9NL-3	0	294	368	100		

表3. 3. 15 シャルピー衝撃試験結果

(SL9N590[32mm厚],母材C方向)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _s (℃)	v T _E (℃)
9NC-4	-196	249	311	100	-----	-----
9NC-5	-196	247	309	100		
9NC-6	-196	234	293	100		
9NC-1	0	269	336	100		
9NC-2	0	279	349	100		
9NC-3	0	276	345	100		

表3. 3. 16 シャルピー衝撃試験結果
(SM490A[32mm厚],SMAW)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	vT_s (℃)	vT_E (℃)
CX-13	-100	6	8	0	-44	-48
CX-14	-100	8	10	0		
CX-11	-80	6	8	5		
CX-12	-80	68	85	10		
CX-1	-60	41	51	15		
CX-2	-60	8	10	10		
CX-15	-50	27	34	15		
CX-16	-50	178	223	65		
CX-3	-40	115	144	50		
CX-4	-40	207	259	80		
CX-17	-40	196	245	80		
CX-18	-40	145	181	55		
CX-19	-30	174	218	65		
CX-20	-30	141	176	65		
CX-5	-20	187	234	70		
CX-6	-20	199	249	85		
CX-7	0	222	278	100		
CX-8	0	217	271	95		
CX-9	20	221	276	100		
CX-10	20	209	261	100		

表3. 3. 17 シャルピー衝撃試験結果

(SM490A[32mm厚],MAG)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	$v T_s$ (℃)	$v T_E$ (℃)
CM-13	-100	48	60	0	-35	-37
CM-14	-100	18	23	5		
CM-11	-80	23	29	5		
CM-12	-80	21	26	5		
CM-1	-60	78	98	20		
CM-2	-60	42	53	15		
CM-17	-50	191	239	65		
CM-18	-50	164	205	60		
CM-3	-40	70	88	25		
CM-4	-40	120	150	35		
CM-19	-30	200	250	70		
CM-20	-30	95	119	45		
CM-5	-20	167	209	70		
CM-6	-20	167	209	65		
CM-7	0	213	266	85		
CM-8	0	89	111	65		
CM-9	20	200	250	90		
CM-10	20	215	265	90		
CM-15	40	241	301	100		
CM-16	40	263	329	100		

表3. 3. 18 シャルピー衝撃試験結果

(SM490A[32mm厚],SAW)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _S (℃)	v T _E (℃)
CS-13	-100	8	10	0	-33	-46
CS-14	-100	9	11	0		
CS-11	-80	30	38	0		
CS-12	-80	11	14	0		
CS-1	-60	35	44	10		
CS-2	-60	53	66	10		
CS-15	-50	126	158	40		
CS-16	-50	35	44	85		
CS-3	-40	165	206	60		
CS-4	-40	50	63	15		
CS-19	-30	151	189	55		
CS-20	-30	159	199	60		
CS-5	-20	171	214	60		
CS-6	-20	156	195	55		
CS-17	-10	170	213	60		
CS-18	-10	171	214	65		
CS-7	0	215	269	90		
CS-8	0	191	239	80		
CS-9	20	199	249	100		
CS-10	20	181	226	100		

表3. 3. 19 シャルピー衝撃試験結果

(SM490C[35mm厚],SMAW)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	$v T_s$ (℃)	$v T_E$ (℃)
EX-13	-100	9	11	0	-76	-76
EX-14	-100	9	11	0		
EX-11	-80	146	183	40		
EX-12	-80	15	19	10		
EX-15	-70	281	351	100		
EX-16	-70	294	368	100		
EX-1	-60	50	63	15		
EX-2	-60	274	343	85		
EX-17	-50	246	308	95		
EX-18	-50	266	333	100		
EX-3	-40	212	265	80		
EX-4	-40	277	346	100		
EX-19	-30	276	345	100		
EX-20	-30	293	366	100		
EX-5	-20	294	368	100		
EX-6	-20	214	268	85		
EX-7	0	294	368	100		
EX-8	0	294	368	100		
EX-9	20	294	368	100		
EX-10	20	294	368	100		

表3. 3. 20 シャルピー衝撃試験結果
(SM490C[35mm厚],MAG)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	vT_s (℃)	vT_E (℃)
EM-15	-120	13	16	0	-62	-68
EM-16	-120	4	5	0		
EM-13	-100	8	10	0		
EM-14	-100	9	11	5		
EM-11	-80	133	166	25		
EM-12	-80	11	14	15		
EM-19	-70	20	25	15		
EM-20	-70	205	256	45		
EM-1	-60	229	286	60		
EM-2	-60	242	303	70		
EM-17	-50	219	274	70		
EM-18	-50	221	276	65		
EM-3	-40	250	313	85		
EM-4	-40	245	306	80		
EM-5	-20	240	300	80		
EM-6	-20	271	339	100		
EM-7	0	275	344	100		
EM-8	0	292	365	100		
EM-9	20	286	358	100		
EM-10	20	282	353	100		

表3. 3. 21 シャルピー衝撃試験結果

(SM490C[35mm厚],SAW)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	$V T_S$ (℃)	$V T_E$ (℃)
ES-13	-100	6	8	5	-48	-47
ES-14	-100	11	14	0		
ES-11	-80	17	21	10		
ES-12	-80	8	10	5		
ES-19	-70	28	35	25		
ES-20	-70	13	16	20		
ES-1	-60	150	188	45		
ES-2	-60	28	35	35		
ES-17	-50	103	129	40		
ES-18	-50	83	104	45		
ES-3	-40	181	226	65		
ES-4	-40	138	173	60		
ES-15	-30	222	278	80		
ES-16	-30	188	235	65		
ES-5	-20	218	273	85		
ES-6	-20	243	304	100		
ES-7	0	201	251	90		
ES-8	0	220	275	90		
ES-9	20	255	319	100		
ES-10	20	245	306	100		

表3. 3. 22 シャルピー衝撃試験結果

(SN490C[32mm厚],SMAW)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _S (℃)	v T _E (℃)
BX-15	-120	5	6	0	-51	-55
BX-16	-120	4	5	0		
BX-13	-100	40	50	5		
BX-14	-100	27	34	5		
BX-11	-80	5	6	5		
BX-12	-80	24	30	5		
BX-1	-60	192	240	50		
BX-2	-60	147	184	40		
BX-17	-50	17	21	15		
BX-18	-50	210	265	75		
BX-3	-40	185	231	65		
BX-4	-40	210	263	70		
BX-19	-30	213	266	85		
BX-20	-30	209	261	75		
BX-5	-20	238	298	95		
BX-6	-20	255	319	95		
BX-7	0	265	331	100		
BX-8	0	228	285	85		
BX-9	20	282	353	100		
BX-10	20	254	318	100		

表3. 3. 23 シャルピー衝撃試験結果

(SN490C[32mm厚],MAG)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _s (℃)	v T _E (℃)
BM-17	-120	25	31	0	-58	-67
BM-18	-120	23	29	0		
BM-13	-100	30	38	5		
BM-14	-100	39	49	5		
BM-11	-80	31	39	5		
BM-12	-80	180	225	40		
BM-1	-60	159	199	55		
BM-2	-60	180	225	45		
BM-19	-50	205	256	60		
BM-20	-50	139	174	50		
BM-3	-40	242	303	85		
BM-4	-40	194	243	75		
BM-5	-20	219	274	80		
BM-6	-20	278	348	100		
BM-7	0	252	315	95		
BM-8	0	188	235	85		
BM-9	20	227	284	95		
BM-10	20	273	341	100		
BM-15	40	287	359	100		
BM-16	40	287	359	100		

表3. 3. 24 シャルピー衝撃試験結果

(SN490C[32mm厚],SAW)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _S (℃)	v T _E (℃)
BS-19	-120	12	15	0	-64	-60
BS-20	-120	12	15	0		
BS-13	-100	43	54	5		
BS-14	-100	12	15	0		
BS-11	-80	15	19	5		
BS-12	-80	38	48	10		
BS-15	-70	44	55	20		
BS-16	-70	38	48	35		
BS-1	-60	171	214	80		
BS-2	-60	249	311	100		
BS-17	-50	80	100	35		
BS-18	-50	177	221	70		
BS-3	-40	141	176	85		
BS-4	-40	250	313	100		
BS-5	-20	222	278	100		
BS-6	-20	254	318	100		
BS-7	0	219	274	90		
BS-8	0	264	330	100		
BS-9	20	228	285	100		
BS-10	20	238	298	100		

表3. 3. 25 シャルピー衝撃試験結果

(SM570Q[80mm厚],SMAW)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _s (℃)	v T _E (℃)
5CX-9	-120	11	14	0	-49	-48
5CX-10	-120	12	15	5		
5CX-18	-100	18	23	10		
5CX-19	-100	17	21	10		
5CX-7	-80	42	53	20		
5CX-8	-80	23	29	15		
5CX-16	-60	72	90	30		
5CX-17	-60	74	93	35		
5CX-3	-40	143	179	75		
5CX-4	-40	111	139	50		
5CX-14	-20	203	254	85		
5CX-15	-20	194	243	90		
5CX-5	0	205	256	90		
5CX-6	0	192	240	90		
5CX-13	20	231	289	100		
5CX-11	40	223	279	100		
5CX-12	40	223	279	100		
5CX-20	60	205	256	100		

表3. 3. 26 シャルピー衝撃試験結果

(SM570Q[80mm厚],MAG)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _S (℃)	v T _E (℃)
5CM-19	-150	9	11	0	-81	-73
5CM-20	-150	9	11	0		
5CM-9	-120	28	35	20		
5CM-10	-120	15	19	15		
5CM-17	-100	42	53	20		
5CM-18	-100	35	44	20		
5CM-7	-80	53	66	35		
5CM-8	-80	70	88	50		
5CM-15	-60	204	255	100		
5CM-16	-60	205	256	90		
5CM-3	-40	137	177	90		
5CM-4	-40	150	188	90		
5CM-13	-20	232	290	100		
5CM-14	-20	219	274	100		
5CM-5	0	177	221	100		
5CM-6	0	178	223	100		
5CM-11	20	221	276	100		
5CM-12	20	221	276	100		

表3. 3. 27 シャルピー衝撃試験結果
(SM570Q[80mm厚],SAW)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _s (℃)	v T _E (℃)
5CS-16	-120	12	15	0	-13	-26
5CS-15	-120	8	10	0		
5CS-14	-100	11	14	0		
5CS-13	-100	11	14	0		
5CS-12	-80	5	6	0		
5CS-11	-80	48	60	5		
5CS-10	-60	129	161	25		
5CS-9	-60	13	16	0		
5CS-8	-40	146	183	35		
5CS-7	-40	73	91	15		
5CS-6	-20	25	31	15		
5CS-5	-20	264	330	100		
5CS-4	0	21	39	20		
5CS-3	0	205	256	80		
5CS-2	20	203	254	80		
5CS-1	20	184	230	65		
5CS-17	40	256	320	100		
5CS-18	40	245	306	100		
5CS-19	60	241	301	100		
5CS-20	60	232	290	100		

表3. 3. 28 シャルピー衝撃試験結果

(SM570Q[50mm厚],SMAW)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _s (℃)	v T _E (℃)
EXX-9	-120	6	8	0	-55	-53
EXX-10	-120	8	10	0		
EXX-19	-100	15	19	5		
EXX-20	-100	15	19	5		
EXX-7	-80	28	35	15		
EXX-8	-80	35	44	15		
EXX-17	-60	171	214	60		
EXX-18	-60	64	80	35		
EXX-3	-40	146	183	65		
EXX-4	-40	137	171	65		
EXX-15	-20	233	291	90		
EXX-16	-20	277	346	100		
EXX-5	0	204	255	90		
EXX-6	0	215	269	90		
EXX-14	20	253	316	100		
EXX-11	40	279	349	100		
EXX-12	40	293	366	100		
EXX-13	60	250	313	100		

表3. 3. 29 シャルピー衝撃試験結果

(SM570Q[50mm厚],MAG)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _S (℃)	v T _E (℃)
EXM-12	-150	8	10	0	-86	-72
EXM-19	-150	15	19	0		
EXM-9	-120	21	26	10		
EXM-10	-120	15	19	10		
EXM-17	-100	50	63	30		
EXM-18	-100	48	60	30		
EXM-7	-80	73	91	55		
EXM-8	-80	75	94	55		
EXM-3	-40	200	250	95		
EXM-4	-40	151	189	90		
EXM-15	-60	241	301	100		
EXM-16	-60	147	184	85		
EXM-13	-20	250	313	100		
EXM-14	-20	274	343	100		
EXM-5	0	178	223	100		
EXM-6	0	174	218	95		
EXM-11	40	240	300	100		

表3. 3. 30 シャルピー衝撃試験結果

(SM570Q[50mm厚],SAW)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _S (℃)	v T _E (℃)
EXS-19	-140	6	8	5	-56	-53
EXS-20	-140	5	6	5		
EXS-16	-120	9	11	15		
EXS-15	-120	7	9	10		
EXS-14	-100	8	10	20		
EXS-13	-100	23	29	25		
EXS-12	-80	21	26	30		
EXS-11	-80	15	19	30		
EXS-10	-60	47	59	35		
EXS-9	-60	43	54	35		
EXS-8	-40	49	61	60		
EXS-7	-40	71	89	60		
EXS-6	-20	83	104	95		
EXS-5	-20	85	106	95		
EXS-4	0	89	111	95		
EXS-3	0	96	120	95		
EXS-2	20	88	110	100		
EXS-1	20	101	126	100		
EXS-17	40	93	116	100		
EXS-18	40	95	119	100		

表3. 3. 31 シャルピー衝撃試験結果

(SM570Q[25mm厚],SMAW)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _s (℃)	v T _E (℃)
EGX-7	-120	20	25	0	-56	-61
EGX-8	-120	14	18	0		
EGX-17	-100	30	38	10		
EGX-18	-100	24	30	10		
EGX-5	-80	44	55	15		
EGX-6	-80	42	53	15		
EGX-15	-60	123	154	55		
EGX-16	-60	178	223	70		
EGX-3	-40	137	171	50		
EGX-4	-40	177	221	60		
EGX-13	-20	229	286	90		
EGX-14	-20	246	308	90		
EGX-1	0	203	254	90		
EGX-2	0	221	276	90		
EGX-11	20	263	329	100		
EGX-12	20	253	316	100		
EGX-9	40	280	350	100		
EGX-10	40	277	346	100		
EGX-19	60	277	346	100		
EGX-20	60	241	301	100		

表3. 3. 32 シャルピー衝撃試験結果
(SM570Q[25mm厚],MAG)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _s (℃)	v T _E (℃)
EGM-9	-150	7	9	5	-82	-77
EGM-15	-150	11	14	0		
EGM-7	-120	32	40	15		
EGM-8	-120	16	20	10		
EGM-13	-100	12	15	25		
EGM-14	-100	50	63	30		
EGM-6	-80	64	80	30		
EGM-12	-80	193	241	80		
EGM-10	-60	198	248	70		
EGM-11	-60	171	214	70		
EGM-3	-40	253	316	100		
EGM-4	-40	265	331	100		
EGM-1	0	276	345	100		
EGM-2	0	249	311	100		

表3. 3. 33 シャルピー衝撃試験結果

(SM570Q[25mm厚],SAW)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	$v T_s$ (℃)	$v T_E$ (℃)
EGS-19	-140	5	6	5	-66	-47
EGS-20	-140	4	5	5		
EGS-16	-120	6	8	5		
EGS-15	-120	10	13	10		
EGS-14	-100	21	26	25		
EGS-13	-100	13	16	20		
EGS-12	-80	30	38	35		
EGS-11	-80	27	34	35		
EGS-10	-60	51	64	55		
EGS-9	-60	45	56	50		
EGS-8	-40	59	86	85		
EGS-7	-40	64	80	80		
EGS-6	-20	85	106	90		
EGS-5	-20	98	123	95		
EGS-4	0	104	130	95		
EGS-3	0	99	124	95		
EGS-2	20	117	146	95		
EGS-1	20	102	128	95		
EGS-17	40	112	140	100		
EGS-18	40	112	140	95		

表3. 3. 34 シャルピー衝撃試験結果

(SL9N590[32mm厚],SMAW)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J /cm ²)	延性 破 面 率 (%)	$v T_s$ (℃)	$v T_E$ (℃)
9NX-3	-196	130	163	100	-----	-----
9NX-4	-196	210	263	100		
9NX-7	-150	99	124	100		
9NX-5	-120	88	110	100		
9NX-6	-120	107	134	100		
9NX-1	0	155	194	100		
9NX-2	0	126	158	100		

表3. 3. 35 シャルピー衝撃試験結果
(SL9N590[32mm厚],TIG)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	v T _S (℃)	v T _E (℃)
9NT-6	-196	207	259	100	-----	-----
9NT-5	-196	230	288	100		
9NT-4	-120	294	368	100		
9NT-3	-120	278	348	100		
9NT-2	0	294	368	100		
9NT-1	0	294	368	100		

表3. 3. 36 シャルピー衝撃試験結果

(SL9N590[32mm厚],SAW)

試験片 記 号	試 験 温 度 (℃)	吸 収 エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	延性 破 面 率 (%)	vT_s (℃)	vT_E (℃)
9NS-6	-196	114	143	100	-----	-----
9NS-5	-196	126	158	100		
9NS-4	-120	233	291	100		
9NS-3	-120	177	221	100		
9NS-2	0	130	163	100		
9NS-1	0	225	281	100		

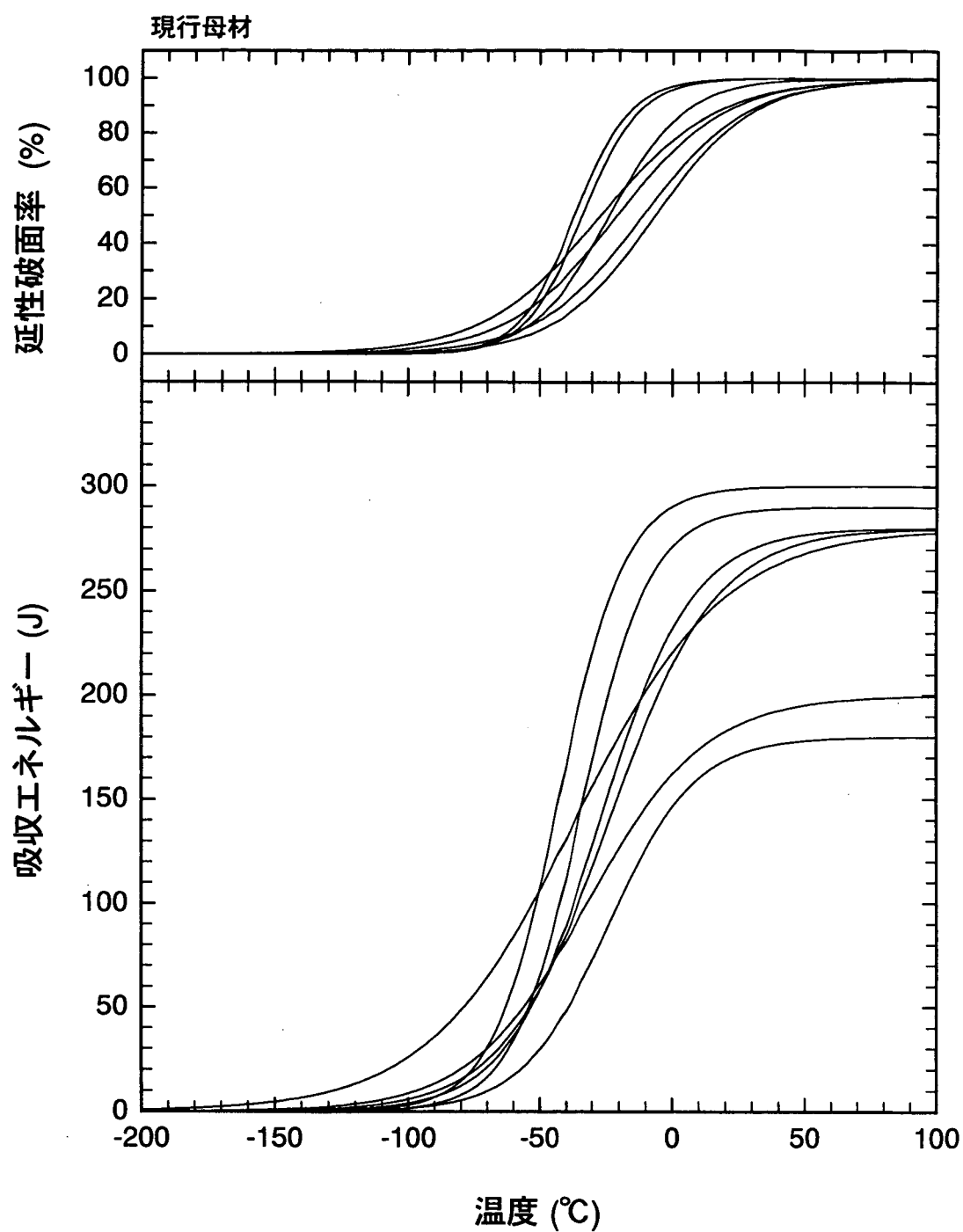


図3. 2. 1 破面遷移及び吸収エネルギー遷移曲線
(母材: SM400A, SM490A, SM490C, SN490C)

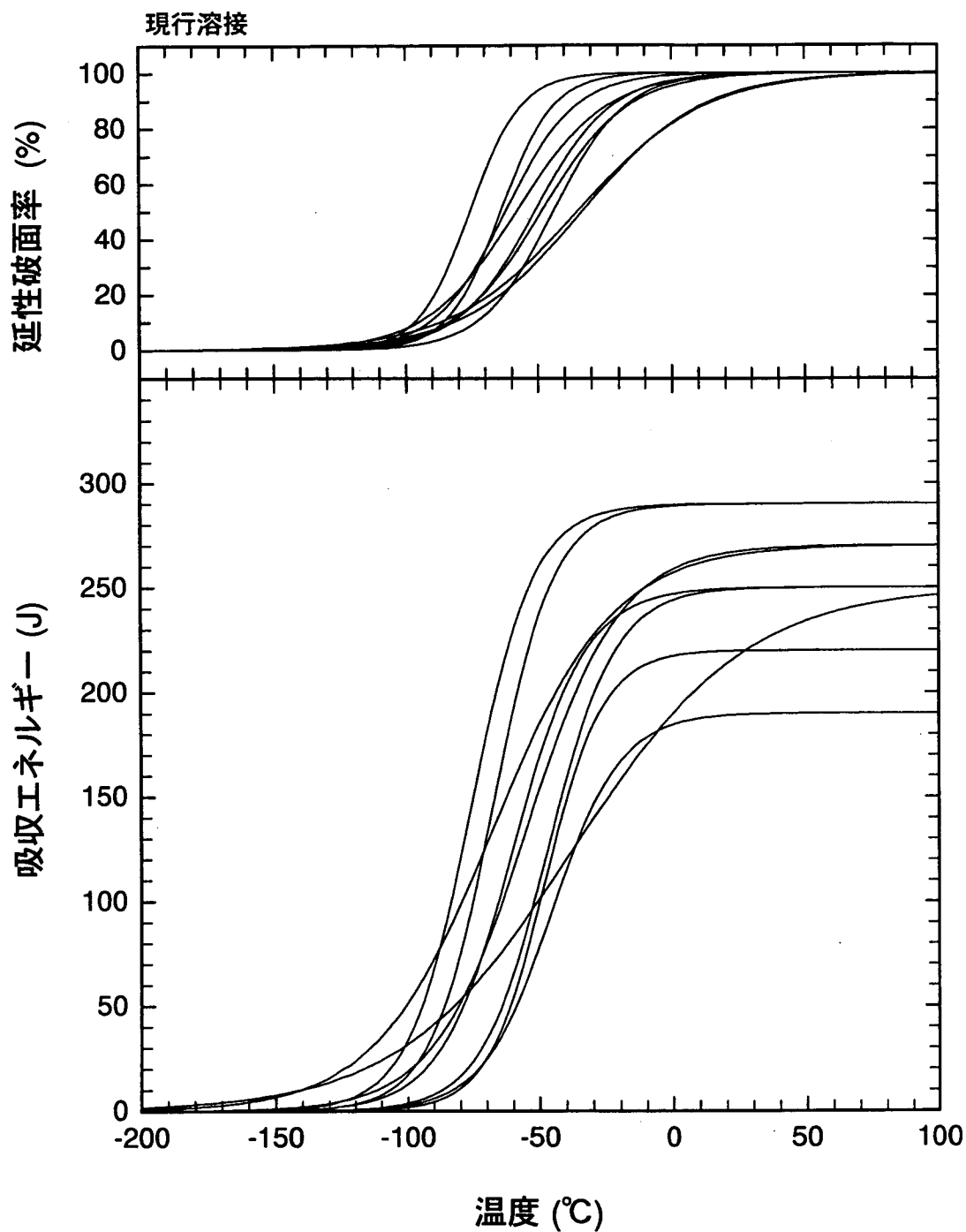


図3. 2. 2 破面遷移及び吸収エネルギー遷移曲線
(溶接部: SM490A, SM490C, SN490C)

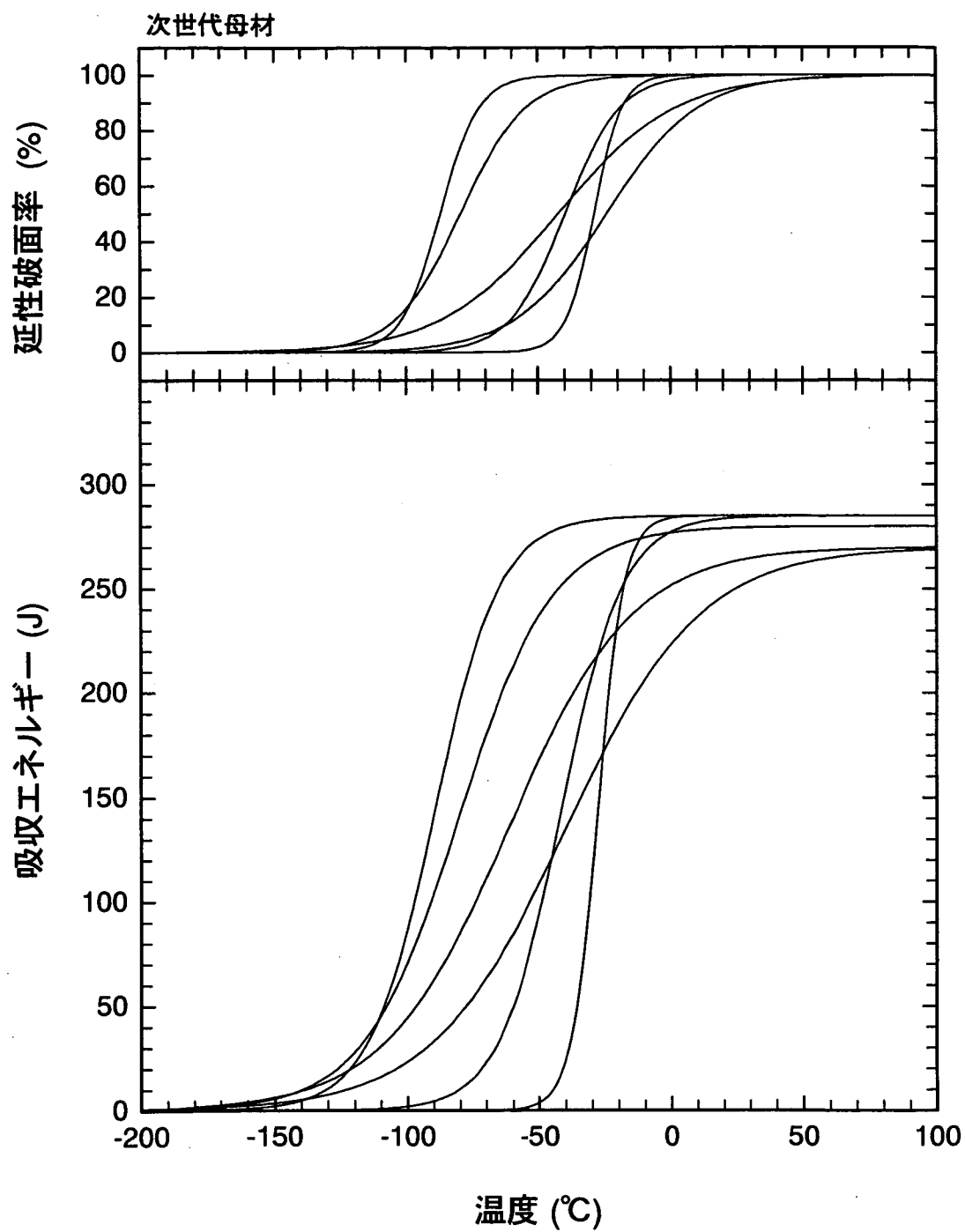


図3. 2. 3 破面遷移及び吸収エネルギー遷移曲線
(母材: SM570Q[80mm, 50mm, 25mm厚])

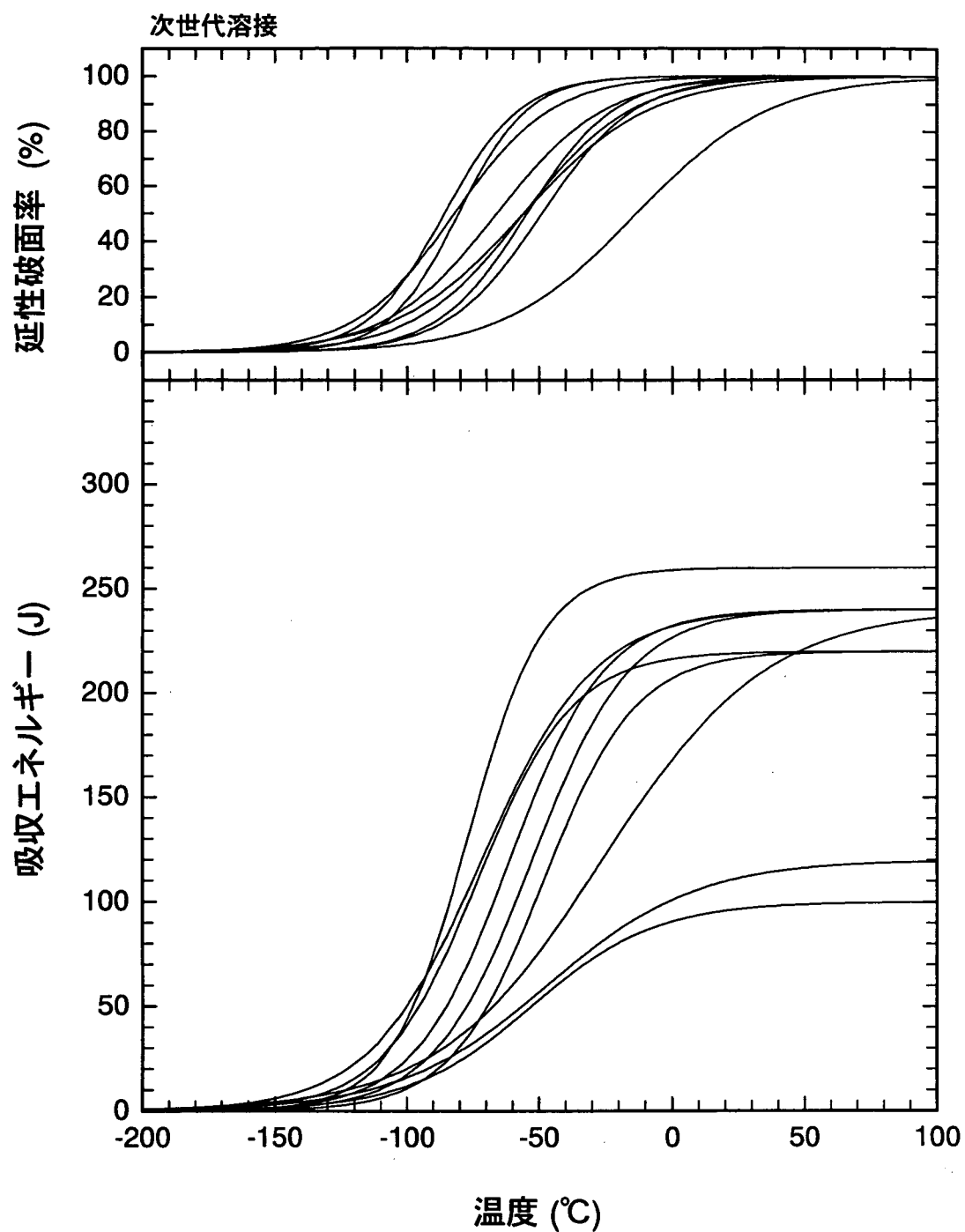


図3. 2. 4 破面遷移及び吸収エネルギー遷移曲線
(溶接部: SM570Q[80mm, 50mm, 25mm厚])

表3. 3. 37 シャルピー衝撃試験結果のまとめ

試験材	溶接方法	記号	vT_S (°C)	vT_E (°C)	0°Cでの吸収エネルギー (J)	備考
SM400A 25mm厚	母材L方向	A	-34	-34	270	
	母材C方向	A	-21	-23	205	
SM490A 32mm厚	母材L方向	C	-27	-36	232	
	母材C方向	C	-11	-32	138	
	SMAW	CX	-44	-48	220	
	MAG	CM	-35	-37	151	
	SAW	CS	-33	-46	203	
SM490C 35mm厚	母材L方向	E	-37	-43	294	
	SMAW	EX	-76	-76	294	
	MAG	EM	-62	-68	283	
	SAW	ES	-48	-47	211	
SN490C 32mm厚	母材L方向	B	-24	-27	198	
	母材C方向	B	-7	-24	138	
	SMAW	BX	-51	-55	247	
	MAG	BM	-58	-67	220	
	SAW	BS	-64	-60	242	
SM570Q 80mm厚	母材L方向	5CL	-42	-62	262	
	母材C方向	5CC	-24	-40	230	
	SMAW	5CX	-49	-48	198	
	MAG	5CM	-81	-73	178	
	SAW	5CS	-13	-26	113	
SM570Q 50mm厚	母材L方向	EXL	-40	-42	281	
	母材C方向	EXC	-29	-28	245	
	SMAW	EXX	-55	-53	209	
	MAG	EXM	-86	-72	176	
	SAW	EXS	-56	-53	93	
SM570Q 25mm厚	母材L方向	EGL	-87	-90	282	
	母材C方向	EGC	-79	-81	270	
	SMAW	EGX	-56	-61	212	
	MAG	EGM	-82	-77	263	
	SAW	EGS	-66	-47	102	
SL9N590 32mm厚	母材L方向	9NL	*1)	*1)	294	
	母材C方向	9NC	*1)	*1)	294	
	SMAW	9NX	*1)	*1)	141	
	TIG	9NT	*1)	*1)	294	
	SAW	9NS	*1)	*1)	193	

*1. 液体窒素温度まで、脆性破面は観察されなかった。

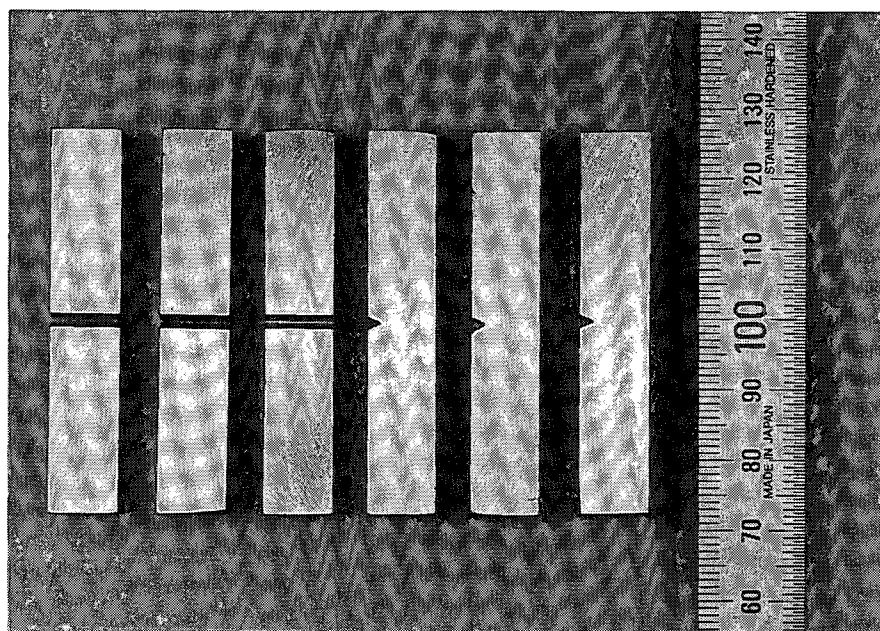
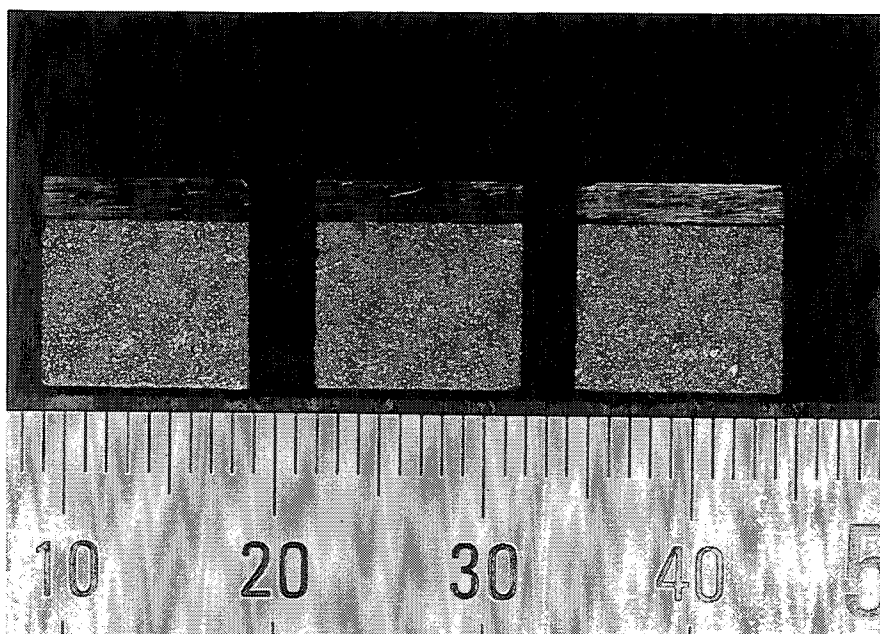
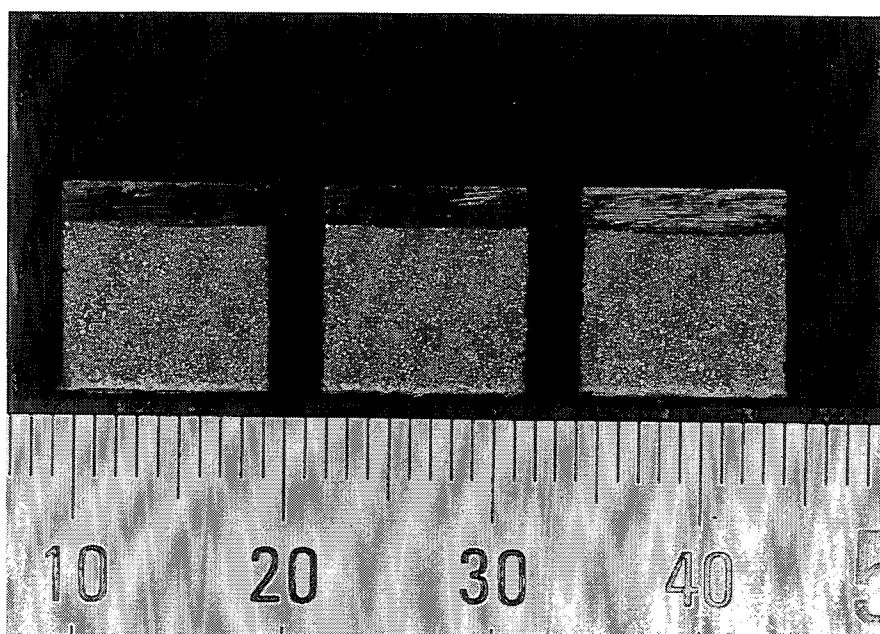


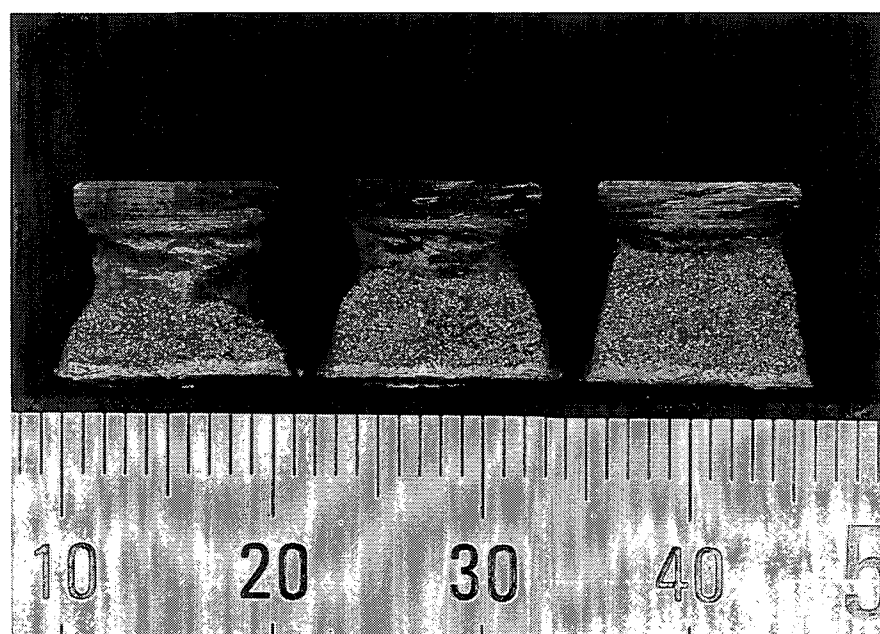
写真 3. 2. 1 シャルピー衝撃試験片



- 80℃

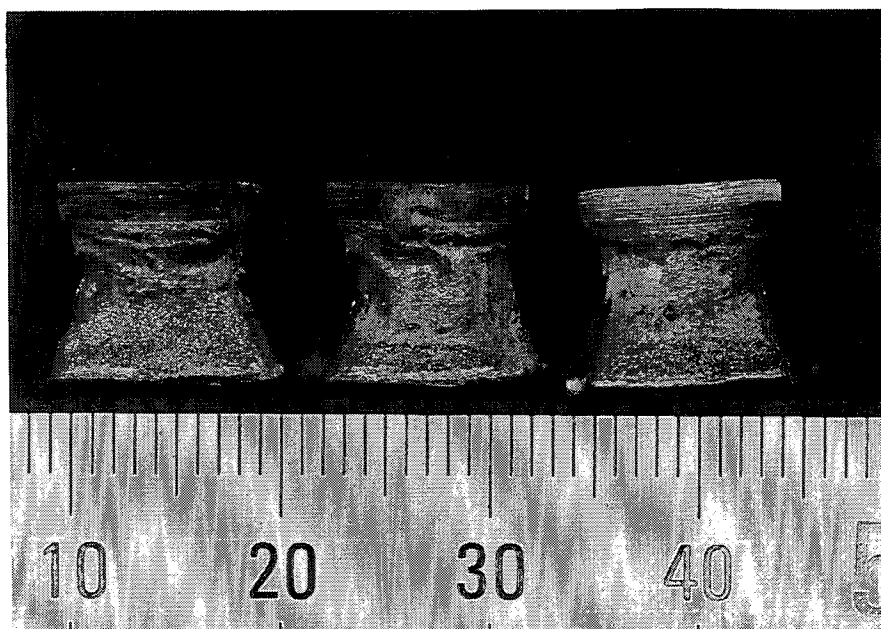


- 60℃

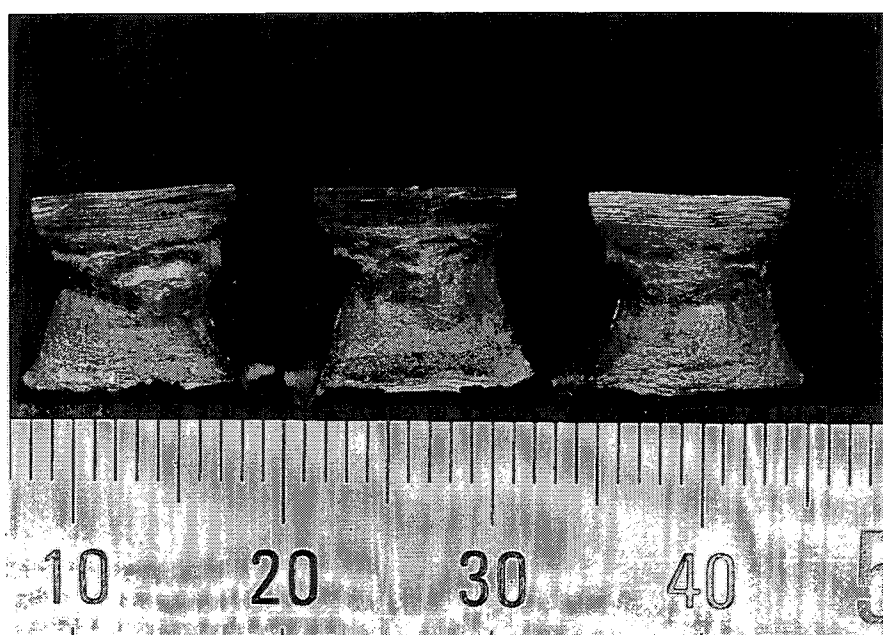


- 40℃

写真 3. 2. 2 シャルピー衝撃試験片破断面 - 1/3

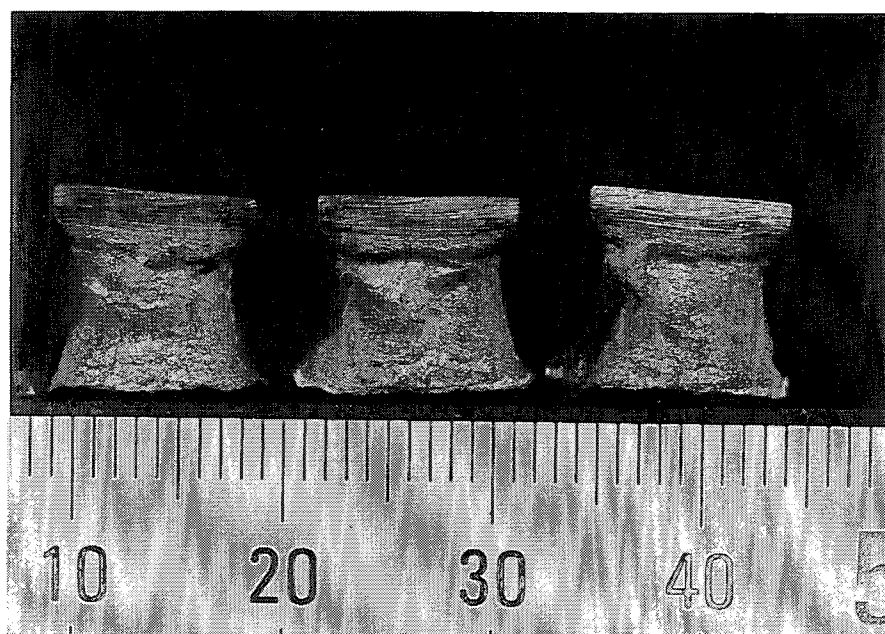


- 20℃

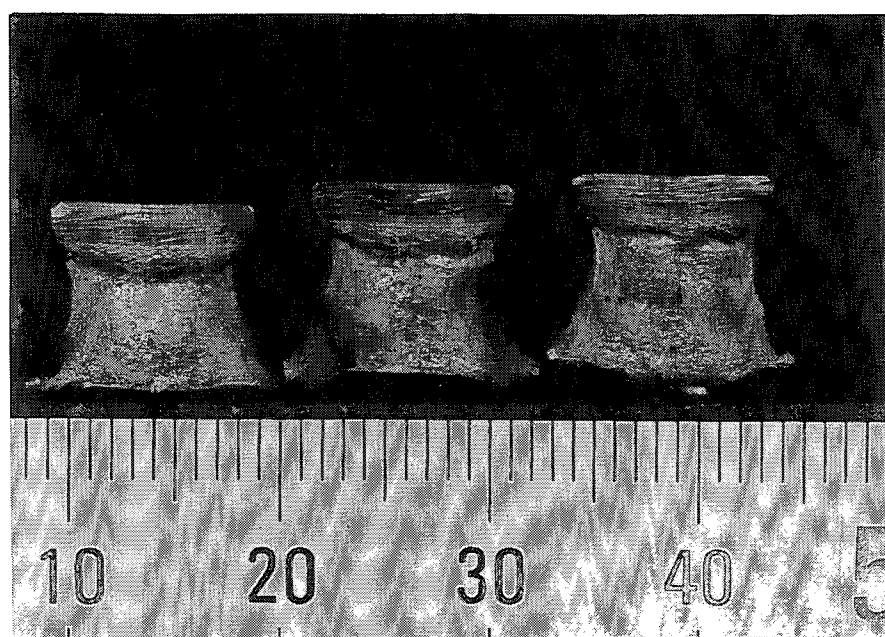


0℃

写真 3. 2. 2 シャルピー衝撃試験片破断面 - 2/3

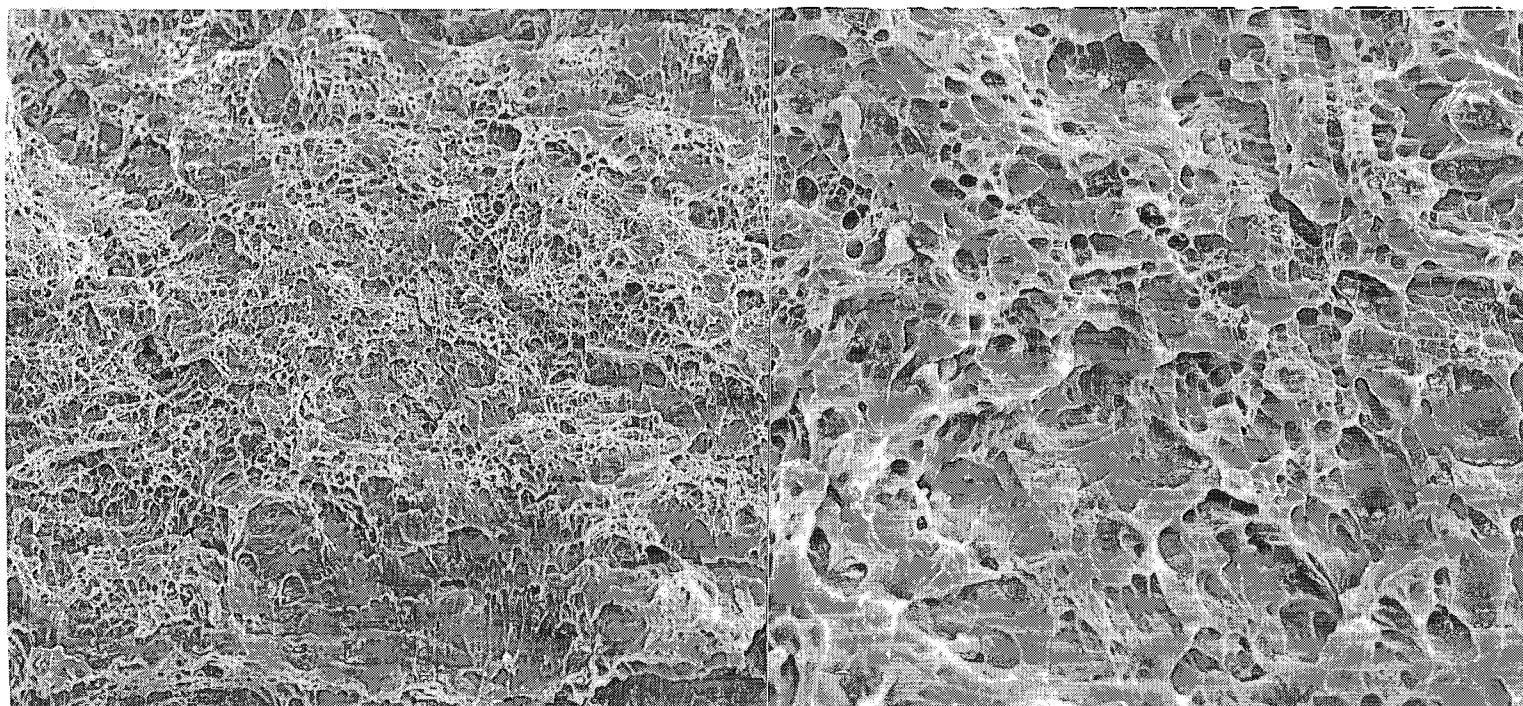


20℃



40℃

写真3.2.2 シャルピー衝撃試験片破断面－3/3



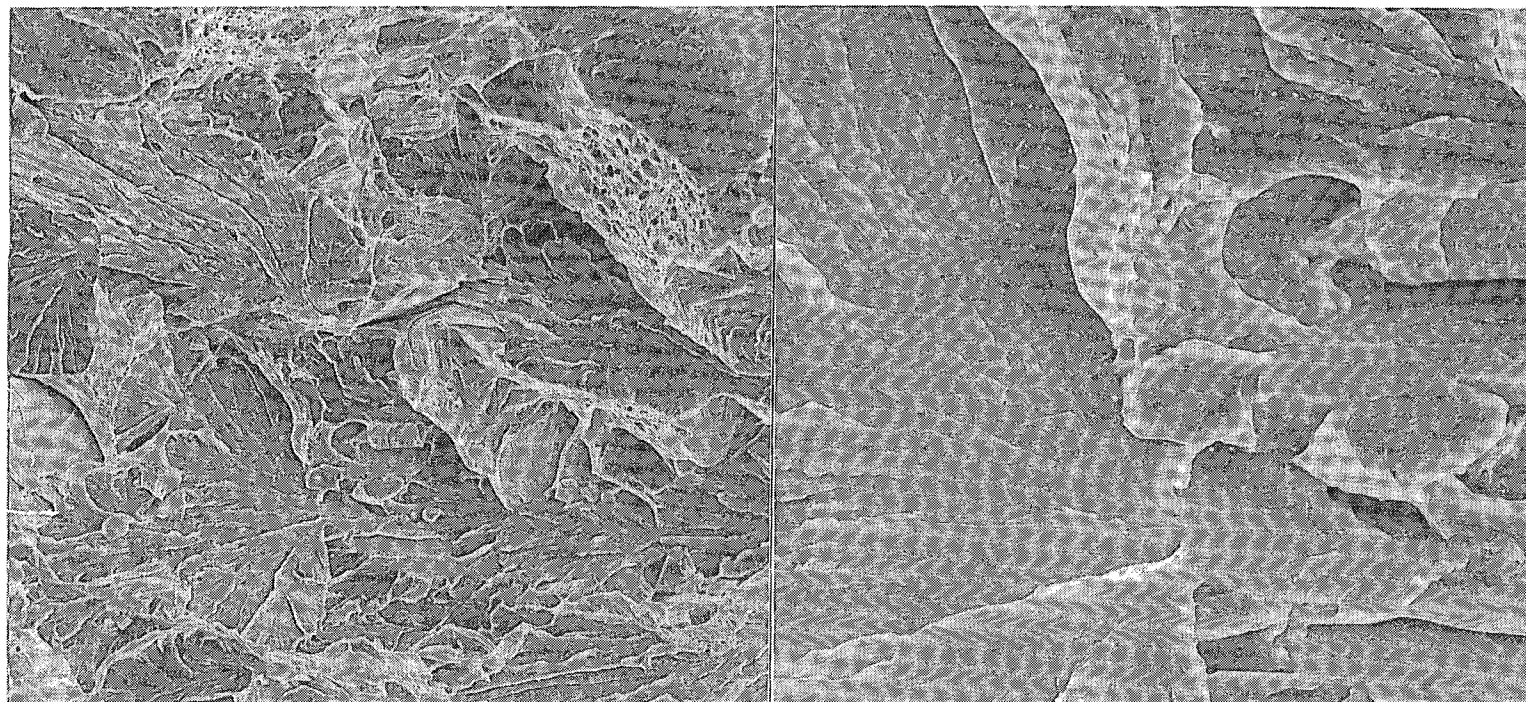
5CL-1 破壊発生位置

20 μ 5CL-1 破壊発生位置

5 μ

延性

写真3.2.3 シャルピー試験片破断面のSEM観察-1/3



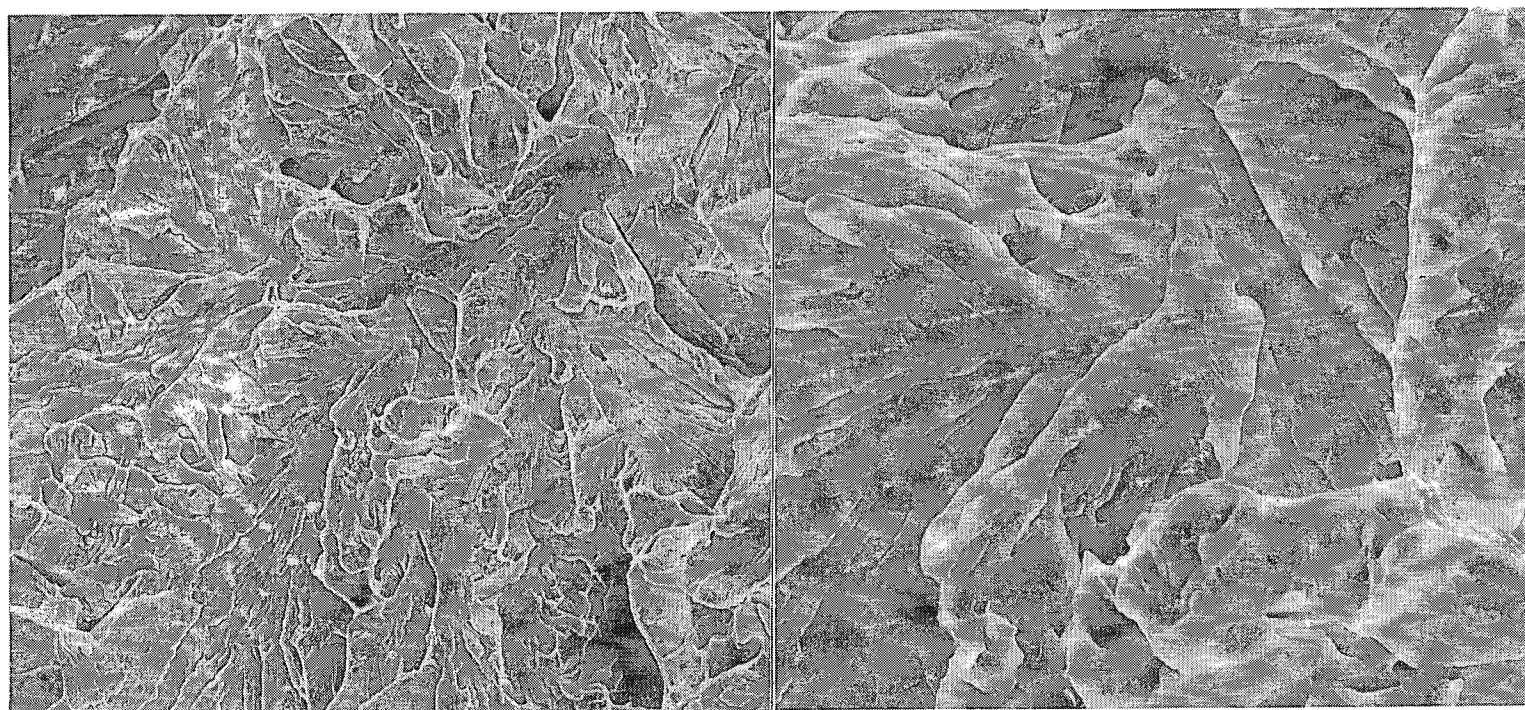
5CC-4 破壊発生位置

20 μ 5CC-4 破壊発生位置

5 μ

へき開に延性を含む

写真3.2.3 シャルピー試験片破断面のSEM観察-2/3



5CL-16破壊発生位置

20μ 5CL-16破壊発生位置

5μ

へき開

写真3.2.3 シャルピー試験片破断面のSEM観察-3/3

3. 4 破壊靱性 (K_{IC}) 試験

表3. 4. 1に母材の破壊靱性試験結果を、表3. 4. 2に溶接部の破壊靱性試験結果をそれぞれ示す。母材試験は圧延方向(L方向)について行った。

完全弾性破壊である K_{IC} が得られたのはSM400AKNであり、弾性的に破壊 ($P_{MAX}/P_Q \leq 1.1$) しても、式(5)の条件を満足しないものは表中 K_Q で示した。弾塑性破壊をした $K(J)$ のうち、最大荷重後破壊したものは備考欄に*印で示し、参考値とした。

試験温度は、今回使用した供試材が高靱性材であることを考慮し、母材は -40°C を溶接部は 0°C を基準と見なして試験した。即ち現用材の母材は -40°C と 0°C とを、次世代材は -40°C のみを試験し、現用材の溶接部は 0°C を、次世代材の溶接部は 0°C と -40°C とを試験した。

載荷速度は静的試験の結果を見て、 0.5m/sec 、 1m/sec 及び 4m/sec の載荷速度から選択した。但し9%Ni鋼は脆性破壊しないことが明らかであるので、静的試験は省略した。

表に示す試験結果から、各試験材の K_{IC} 、 K_Q 及び $K(J)$ の載荷速度及び温度依存性を図3. 3. 1～図3. 3. 14 に示す。

図3. 3. 15に荷重－荷重線変位曲線を示した。図は試験材EGを例にとり、参考のため載荷速度の効果を示したものである。静的試験では最大荷重到達後破壊し、脆性破壊を生じていない。載荷速度が 0.5m/sec になると速度効果により破壊荷重は上昇し、荷重線変位は小さく、わずかな塑性変形の後破壊している。載荷速度が 1m/sec になると破壊荷重は低下し完全弾性破壊を生じていることが分かる。

材料によりまた温度により破壊靱性の載荷速度依存性の程度は異なるが、載荷速度が速くなるに従って破壊靱性値が低下することが分かる。但し、SN490Cの 4m/sec 、 0°C 、SM570Q(80mm厚)の 4m/sec 、 -40°C 、SM570Q(80mm厚、MAG)の 1m/sec 、 0°C 、SM570Q(50mm厚、MAG)の 1m/sec 、 0°C 、の値は載荷速度の増加に従って若干大きくなっており、データのばらつきと考えられる。SM570Q(25mm厚、MAG)の値は載荷速度の増加に従って急激に大きくなっており、亀裂先端位置が最脆弱部を外れたものと考えられる。

写真3. 3. 1に試験前の試験片の例を母材、溶接部それぞれについて示す。

写真3. 3. 2に試験後の破断面を示した。

写真3. 3. 3には破壊発生部直近のSEM写真の例を示す。一部の写真には疲労予亀裂に続き破壊が発生している状況が分かる様、疲労予亀裂部と破壊発生部とが視野に入る様留意した。

表3. 4. 1 破壊靱性試験結果(母材)-1/2

試験材	溶接方法	試験片記号	载荷速度 (mm/s)	温度 (°C)	試験片形状			a/W	荷重		$P_{\max}/P_Q$	破壊靱性値			CTOD (mm)	備考
					B (mm)	W (mm)	a (mm)		P_Q (kN)	$P_{\max}$ (kN)		K_Q ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	J (kJ/m^2)	$K_{(J)}$ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)		
SM400A 25mm厚	母材	A-6	0.006	-40	25.03	50.02	27.51	0.55	25.7	>45.2	>1.76	---	>552	>353	>0.991	
		A-3	500	-40	25.02	50.01	25.74	0.52	42.5	66.9	1.57	---	118	163	0.181	
		A-2		0	25.00	50.03	26.18	0.52	42.4	61.3	1.45	---	1623	606	2.373	*
		A-5	4000	-40	25.03	50.03	25.58	0.51	29.9	29.9	1.00	53	---	---	0.020	K_{IC}
		A-4		0	25.00	50.02	25.70	0.51	57.4	76.6	1.33	---	161	191	0.233	
SM490A 32mm厚	母材	C-6	0.006	-40	24.98	49.98	24.37	0.49	32.0	56.2	1.75	---	101	151	0.173	
		C-5		0	24.99	49.99	24.24	0.49	30.7	>70.1	>2.28	---	>867	>443	>1.426	
		C-2	500	-40	25.00	50.00	24.07	0.48	38.2	72.4	1.89	---	109	157	0.160	
		C-1		0	25.00	50.00	24.70	0.49	51.5	67.6	1.31	---	130	171	0.189	
		C-4	4000	-40	25.00	50.00	25.13	0.50	35.5	35.5	1.00	62	---	---	0.021	
		C-3		0	24.99	49.99	25.30	0.51	44.8	44.8	1.00	79	---	---	0.036	
SN490C 32mm厚	母材	B-6	0.006	-40	25.00	50.02	25.14	0.50	31.9	56.2	1.76	---	265	245	0.450	
		B-5		0	25.00	50.02	23.97	0.48	30.9	56.0	1.81	---	182	203	0.344	
		B-2	500	-40	24.99	50.02	23.91	0.48	48.4	48.4	1.00	78	---	---	0.036	
		B-1		0	25.01	50.03	23.74	0.48	43.6	69.8	1.60	---	126	169	0.196	
		B-4	4000	-40	25.01	50.01	25.31	0.51	35.7	35.7	1.00	63	---	---	0.022	
		B-3		0	24.98	50.01	23.77	0.48	53.7	81.6	1.52	---	181	202	0.254	

*最大荷重到達後に破壊

表3. 4. 1 破壊靱性試験結果(母材)-2/2

試験材	溶接方法	試験片記号	载荷速度 (mm/s)	温度 (°C)	試験片形状			a/W	荷重		P_{max}/P_Q	破壊靱性値			CTOD (mm)	備考
					B (mm)	W (mm)	a (mm)		P_Q (kN)	P_{max} (kN)		K_Q ($MPa \cdot m^{1/2}$)	J (kJ/m^2)	$K_{(J)}$ ($MPa \cdot m^{1/2}$)		
SM570Q 80mm厚	母材	5C-5	0.006	-40	25.00	50.18	24.98	0.50	53.6	96.6	1.80	---	1233	528	1.170	
		5C-4	500	-40	25.02	49.98	25.02	0.50	76.9	89.2	1.16	---	148	186	0.132	
		5C-3	1000	-40	25.00	50.04	25.55	0.51	77.3	91.7	1.19	---	196	214	0.174	
SM570Q 50mm厚	母材	EX-6	0.006	-40	25.01	50.16	25.31	0.50	48.8	75.9	1.56	---	113	160	0.110	
		EX-4	500	-40	24.99	50.01	24.77	0.50	42.8	42.8	1.00	73	---	---	0.020	
		EX-3	1000	-40	25.05	50.03	26.08	0.52	36.6	37.6	1.03	69	---	---	0.022	
SM570Q 25mm厚	母材	EG-6	0.006	-40	25.00	50.16	24.82	0.49	52.4	93.8	1.79	---	1538	590	1.530	*
		EG-4	500	-40	24.98	50.11	24.84	0.50	74.7	98.6	1.32	---	357	288	0.347	
		EG-3	1000	-40	24.97	50.02	25.45	0.51	89.1	98.1	1.00	158	---	---	0.097	
SL9N590 32mm厚	母材	9N-4	500	-40	25.02	50.09	26.19	0.52	72.1	100.5	1.39	---	1336	537	1.131	*
		9N-3	1000	-40	24.99	50.14	24.60	0.49	67.0	113.4	1.69	---	1839	630	1.650	*

*最大荷重到達後に破壊

表3. 4. 2 破壊靱性試験結果(溶接部)-1/3

試験材	溶接方法	試験片記号	载荷速度 (mm/s)	温度 (°C)	試験片形状			a/W	荷重		P_{max}/P_Q	破壊靱性値			CTOD (mm)	備考
					B (mm)	W (mm)	a (mm)		P_Q (kN)	P_{max} (kN)		K_Q ($MPa \cdot m^{1/2}$)	J (kJ/m^2)	$K_{(J)}$ ($MPa \cdot m^{1/2}$)		
SM490A 32mm厚	SMAW	CX-2	0.006	0	24.83	49.98	24.57	0.49	44.4	76.4	1.72	---	538	353	0.784	
		CX-1	4000	0	24.84	50.03	24.22	0.48	89.2	89.2	1.00	148	---	---	0.148	
	MAG	CM-2	0.006	0	24.87	49.97	24.60	0.49	42.9	65.8	1.54	---	199	211	0.327	
		CM-1	4000	0	24.88	50.00	24.17	0.48	64.4	67.0	1.04	106	---	---	0.147	
	SAW	CS-2	0.006	0	24.85	49.84	24.87	0.50	45.2	76.6	1.70	---	776	423	1.058	*
		CS-1	4000	0	24.87	49.98	24.25	0.49	79.9	80.4	1.01	133	---	---	0.148	
SM490C 35mm厚	SMAW	EX-2	0.006	0	24.86	49.92	24.55	0.49	43.6	83.4	1.91	---	1935	669	2.494	*
		EX-1	4000	0	24.83	50.03	24.81	0.50	80.0	80.8	1.02	137	---	---	0.180	
	MAG	EM-2	0.006	0	24.82	49.94	24.62	0.49	44.0	77.9	1.77	---	691	395	0.984	
		EM-1	4000	0	24.83	49.98	24.48	0.49	73.9	79.6	1.08	125	---	---	0.144	
	SAW	ES-2	0.006	0	24.85	49.99	24.96	0.50	43.8	68.0	1.55	---	205	216	0.313	
		ES-1	4000	0	24.85	49.99	24.72	0.49	87.5	87.5	1.00	150	---	---	0.153	
SN490C 32mm厚	SMAW	BX-2	0.006	0	24.88	49.76	23.99	0.48	45.0	85.9	1.91	---	1354	559	1.813	
		BX-1	4000	0	24.85	50.01	24.50	0.49	81.8	82.7	1.01	138	---	---	0.227	
	MAG	BM-2	0.006	0	24.88	50.02	24.39	0.49	45.2	76.2	1.69	---	515	343	0.765	
		BM-1	4000	0	24.88	50.05	23.78	0.48	86.0	88.3	1.03	139	---	---	0.257	
	SAW	BS-2	0.006	0	24.88	49.75	24.72	0.50	45.0	79.9	1.78	---	13	539	1.683	*
		BS-1	4000	0	24.90	50.01	24.00	0.48	81.3	81.5	1.00	133	---	---	0.132	

*最大荷重到達後に破壊

表3. 4. 2 破壊靱性試験結果(溶接部)-2/3

試験材	溶接方法	試験片記号	載荷速度 (mm/s)	温度 (°C)	試験片形状			a/W	荷重		P _{max} /P _Q	破壊靱性値			CTOD (mm)	備考
					B (mm)	W (mm)	a (mm)		P _Q (kN)	P _{max} (kN)		K _Q (MPa·m ^{1/2})	J (kJ/m ²)	K _(J) (MPa·m ^{1/2})		
SM570Q 80mm厚	SMAW	5CX-1	0.006	-40	24.93	50.00	25.42	0.51	50.1	89.1	1.78	---	162	192	0.153	
		5CX-2		0	24.94	50.00	25.42	0.51	43.4	77.1	1.78	---	205	215	0.218	
		5CX-4	500	0	24.93	50.00	23.87	0.48	76.6	91.5	1.19	---	124	167	0.118	
		5CX-3	1000	0	24.94	50.00	25.16	0.50	82.4	82.4	1.00	144	---	---	0.077	
	MAG	5CM-2	0.006	-40	24.93	50.00	23.47	0.47	40.4	83.9	2.08	---	130	172	0.141	
		5CM-1		0	24.93	50.00	23.47	0.47	60.5	98.1	1.62	---	376	292	0.379	*
		5CM-4	500	0	24.93	50.00	26.11	0.52	77.6	97.7	1.26	---	200	213	0.175	
		5CM-3	1000	0	24.94	50.00	24.67	0.49	70.7	101.3	1.43	---	205	216	0.192	
	SAW	5CS-1	0.006	-40	24.99	50.00	23.48	0.47	41.1	73.3	1.78	---	85	138	0.104	
		5CS-2		0	24.92	50.00	24.60	0.49	50.3	75.4	1.50	---	116	162	0.133	
		5CS-4	500	0	24.96	50.00	24.31	0.49	69.1	69.1	1.00	113	---	---	0.049	
		5CS-3	1000	0	24.92	50.00	24.03	0.48	55.7	55.7	1.00	92	---	---	0.033	
SM570Q 50mm厚	SMAW	EXX-1	0.006	-40	24.95	50.00	24.74	0.49	55.9	84.4	1.51	---	137	176	0.137	
		EXX-2		0	24.97	50.00	24.74	0.49	32.9	85.1	2.59	---	374	291	0.404	
		EXX-4	500	0	24.94	50.00	24.71	0.49	74.0	88.9	1.20	---	132	173	0.124	
		EXX-3	1000	0	24.94	50.00	23.57	0.47	99.6	103.8	1.04	158	---	---	0.125	
	MAG	EXM-1	0.006	-40	24.96	50.00	24.59	0.49	57.3	82.4	1.44	---	121	165	0.124	
		EXM-2		0	24.97	50.00	24.59	0.49	37.5	84.4	2.25	---	385	295	0.425	*
		EXM-4	500	0	24.96	50.00	25.08	0.50	77.3	104.3	1.35	---	266	246	0.240	
		EXM-3	1000	0	24.95	50.00	23.48	0.47	87.9	121.9	1.39	---	342	278	0.309	
	SAW	EXS-1	0.006	-40	24.96	50.00	24.25	0.49	41.8	64.0	1.53	---	62	118	0.069	
		EXS-2		0	24.96	50.00	24.29	0.49	41.4	73.8	1.78	---	134	174	0.160	
		EXS-4	500	0	24.97	50.00	24.66	0.49	65.2	81.9	1.26	---	119	164	0.122	
		EXS-3	1000	0	24.96	50.00	24.88	0.50	61.2	73.8	1.21	---	89	142	0.086	

*最大荷重到達後に破壊

表3. 4. 2 破壊靱性試験結果(溶接部)-3/3

試験材	溶接方法	試験片記号	載荷速度 (mm/s)	温度 (°C)	試験片形状			a/W	荷重		P_{max}/P_Q	破壊靱性値			CTOD (mm)	備考
					B (mm)	W (mm)	a (mm)		P_Q (kN)	P_{max} (kN)		K_Q ($MPa \cdot m^{1/2}$)	J (kJ/m^2)	$K_{(J)}$ ($MPa \cdot m^{1/2}$)		
SM570Q 25mm厚	SMAW	EGX-1	0.006	-40	24.72	50.00	25.95	0.52	43.3	65.1	1.50	---	82	137	0.091	
		EGX-2		0	24.72	50.00	25.95	0.52	31.8	77.5	2.44	---	201	213	0.223	*
		EGX-4	500	0	24.71	50.00	25.07	0.50	64.2	73.2	1.14	---	99	150	0.107	
		EGX-3	1000	0	24.70	50.00	25.66	0.51	58.3	66.2	1.14	---	78	133	0.081	
	MAG	EGM-1	0.006	-40	24.96	50.00	23.70	0.47	42.4	87.9	2.07	---	139	177	0.158	
		EGM-2		0	24.69	50.00	23.70	0.47	45.0	90.2	2.00	---	407	303	0.462	
		EGM-4	500	0	24.68	50.00	24.50	0.49	83.1	89.5	1.08	141	---	---	0.135	
		EGM-3	1000	0	24.67	50.00	23.34	0.47	98.9	116.1	1.17	---	374	291	0.365	
	SAW	EGS-1	0.006	-40	24.37	50.00	24.21	0.48	32.6	80.8	2.48	---	182	203	0.221	
		EGS-2		0	24.39	50.00	24.65	0.49	44.3	77.6	1.75	---	289	256	0.337	
		EGS-4	500	0	24.38	50.00	24.72	0.49	63.2	82.2	1.30	---	204	215	0.233	
		EGS-3	1000	0	24.37	50.00	24.58	0.49	79.9	83.8	1.05	138	---	---	0.138	
SL9N590 32mm厚	SMAW	9NX-1	0.006	-40	24.96	50.00	26.33	0.53	51.2	106.6	2.08	---	484	331	0.398	*
		9NX-4		0	24.96	50.00	26.33	0.53	31.5	80.9	2.57	---	535	348	0.553	*
		9NX-3	500	0	24.95	50.00	24.04	0.48	78.2	114.8	1.47	---	772	418	0.734	
		9NX-2	1000	0	24.95	50.00	23.82	0.48	69.1	114.9	1.66	---	655	385	0.638	
	TIG	9NT-1	0.006	-40	25.00	50.00	24.75	0.50	41.4	109.3	2.64	---	1897	655	1.657	*
		9NT-4	500	0	25.00	50.00	24.71	0.49	64.7	110.7	1.71	---	918	456	0.841	
		9NT-3	1000	0	24.99	50.00	24.90	0.50	85.0	108.1	1.27	---	500	336	0.446	*
	SAW	9NS-1	0.006	-40	25.00	50.00	24.45	0.49	41.6	97.7	2.35	---	639	380	0.666	
		9NS-3	500	0	24.91	50.00	25.71	0.51	62.6	89.0	1.42	---	473	327	0.490	
		9NS-2	1000	0	25.00	50.00	24.75	0.50	67.0	104.1	1.55	---	623	375	0.642	*

*最大荷重到達後に破壊

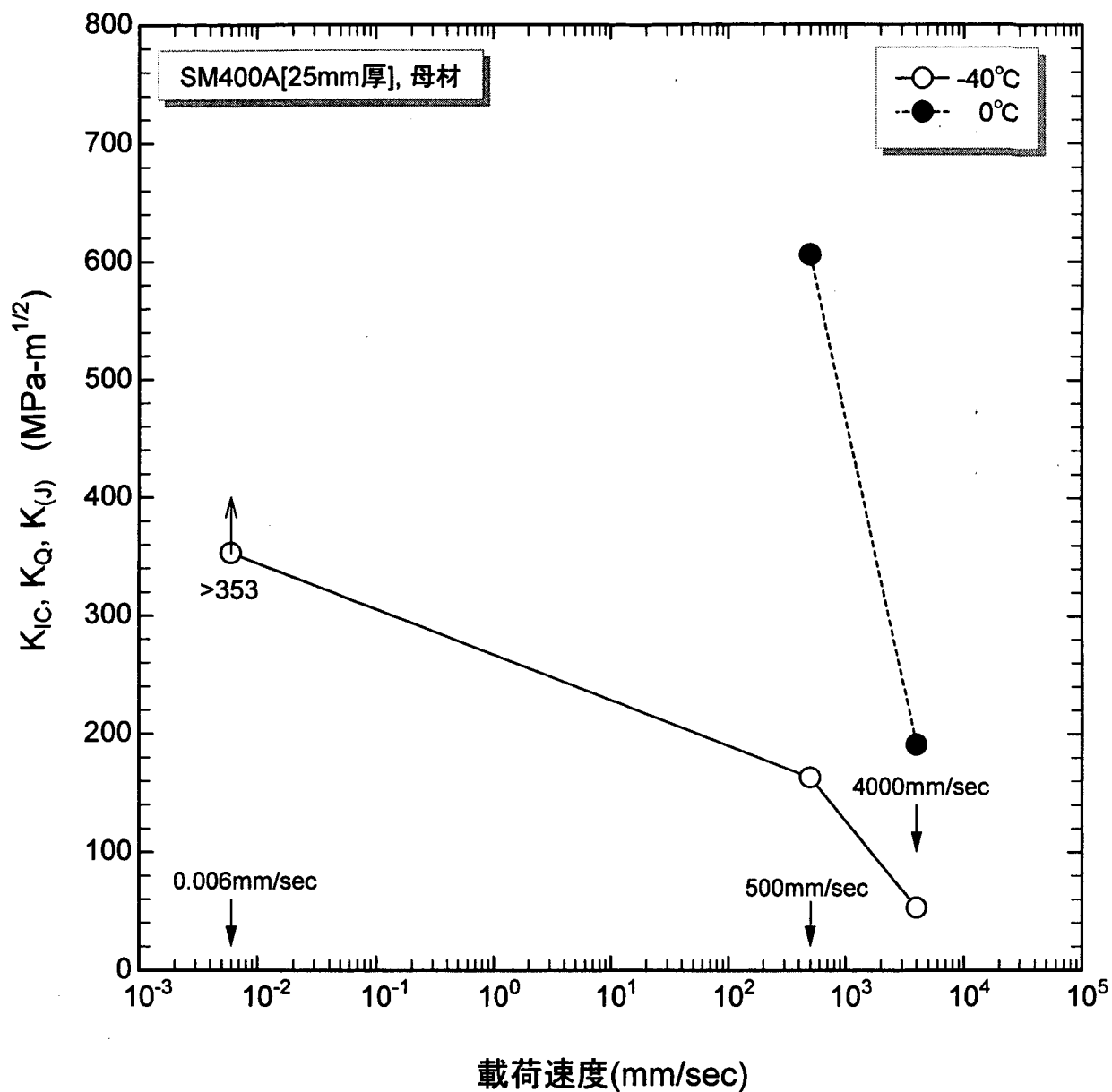


図3. 3. 1 破壊靱性値の載荷速度及び温度依存性
(SM400A[25mm厚], 母材)

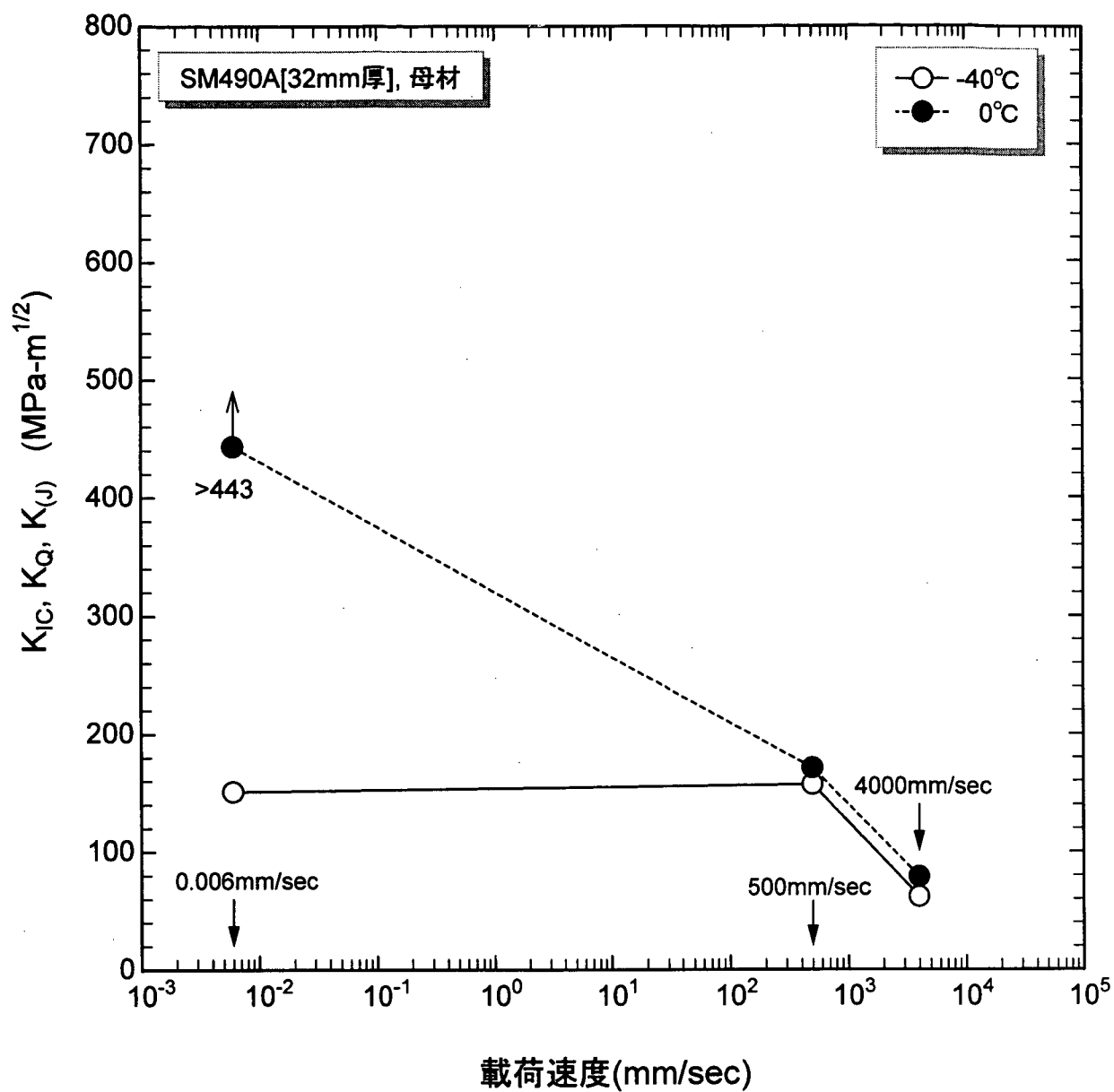


図3. 3. 2 破壊靱性値の載荷速度及び温度依存性
(SM490A[32mm厚], 母材)

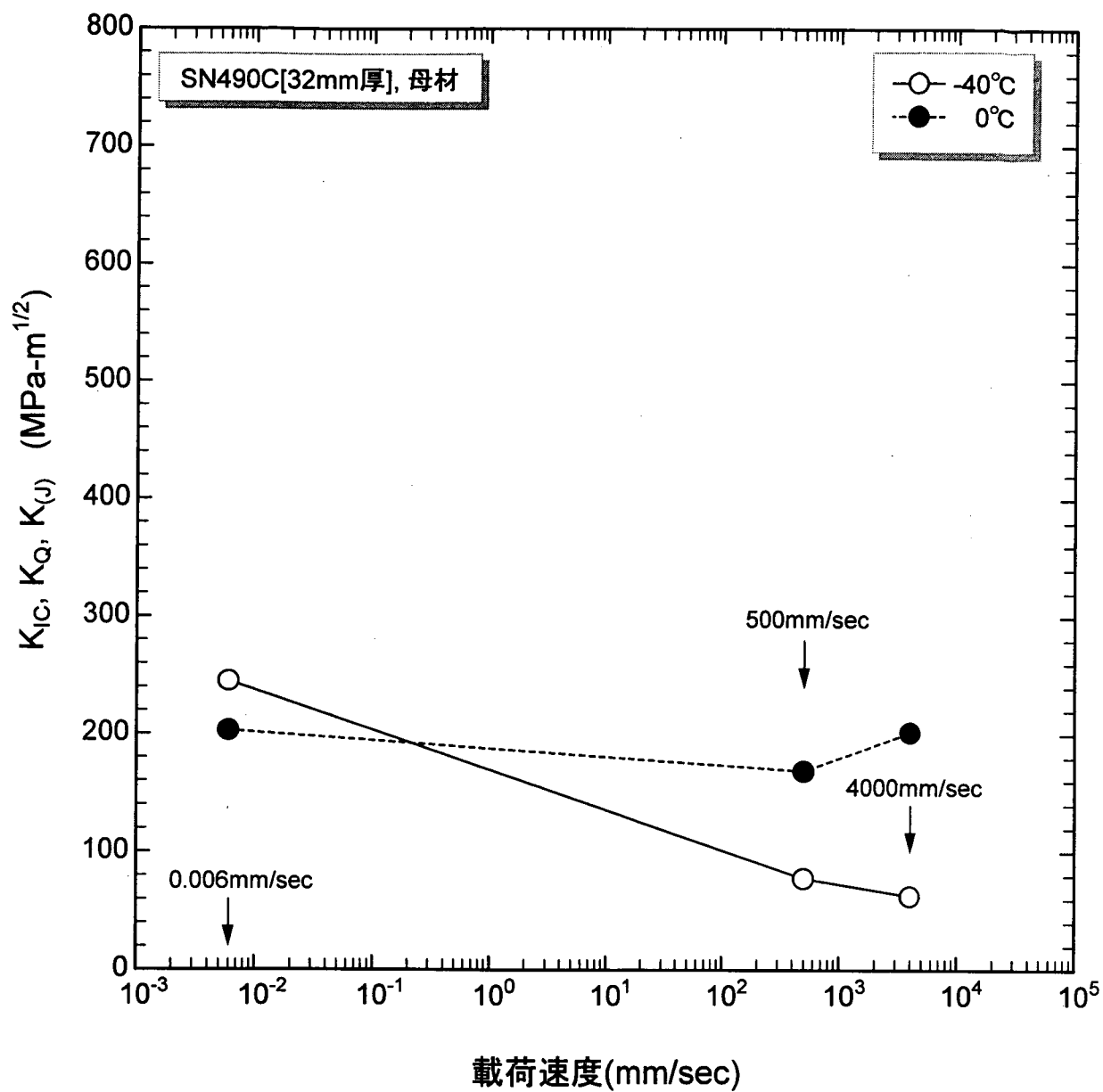


図3. 3. 3 破壊靱性値の載荷速度及び温度依存性
(SN490C[32mm厚], 母材)

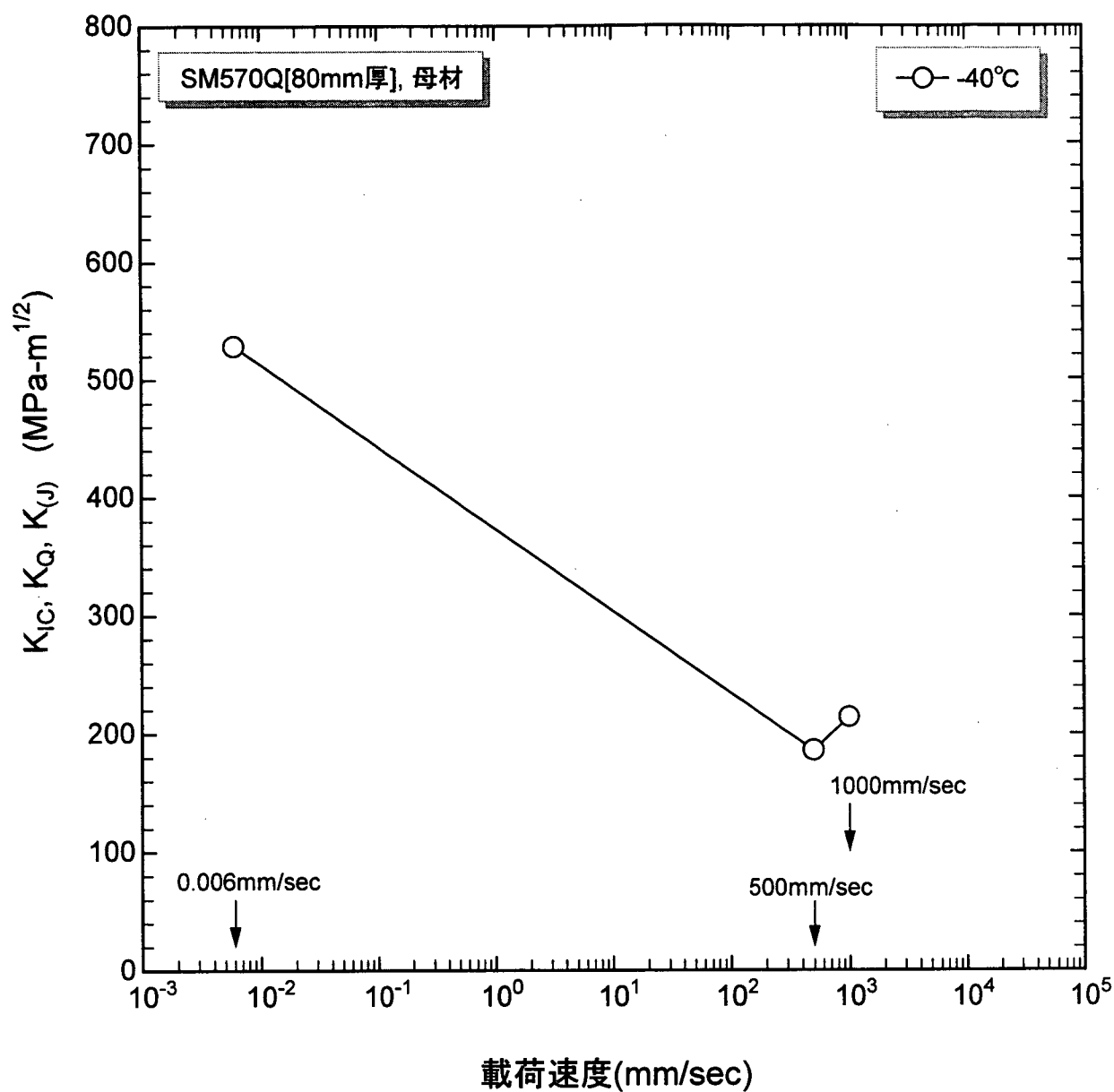


図3. 3. 4 破壊靱性値の載荷速度及び温度依存性
(SM570Q[80mm厚], 母材)

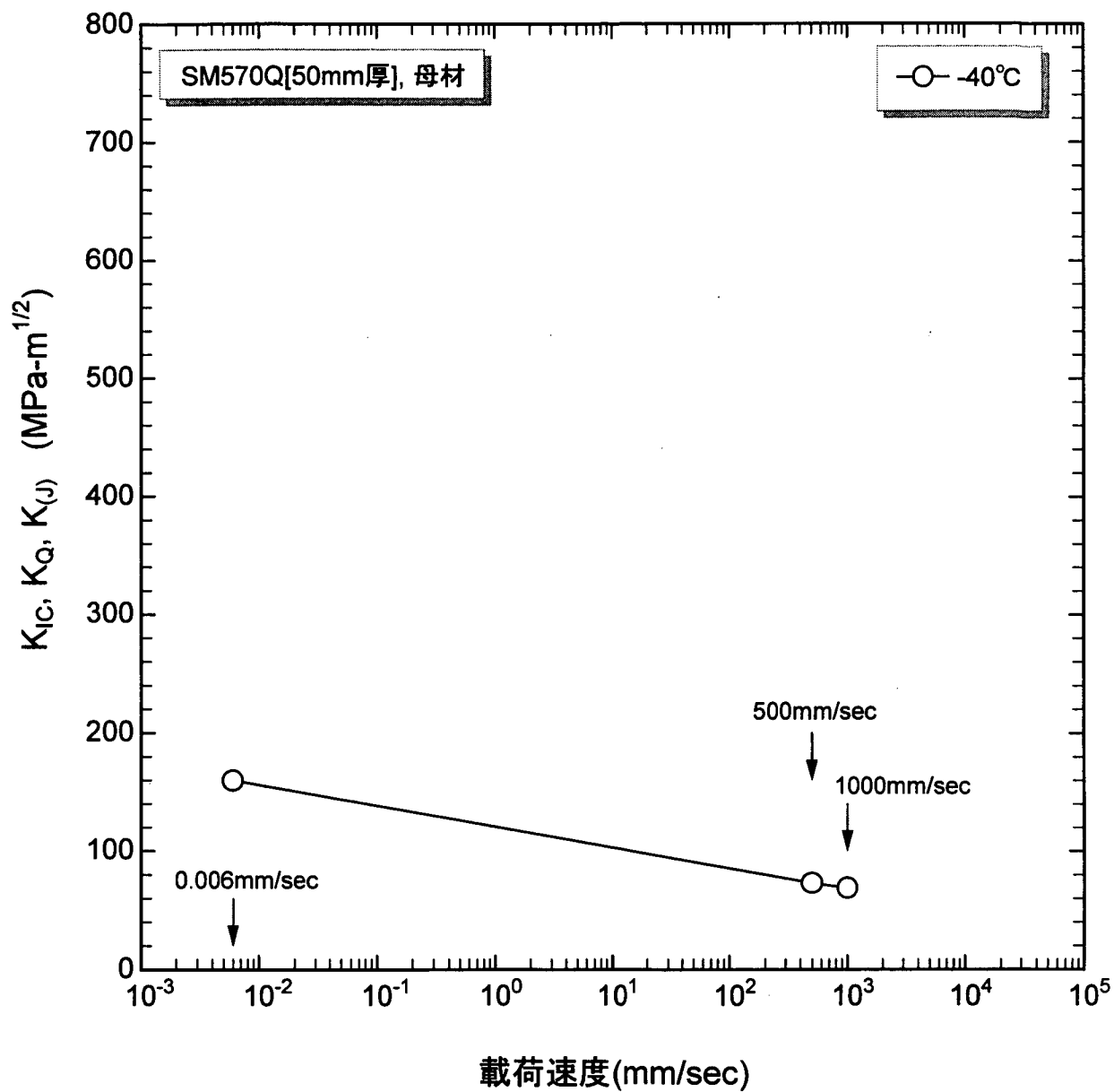


図3. 3. 5 破壊靱性値の載荷速度及び温度依存性
(SM570Q[50mm厚], 母材)

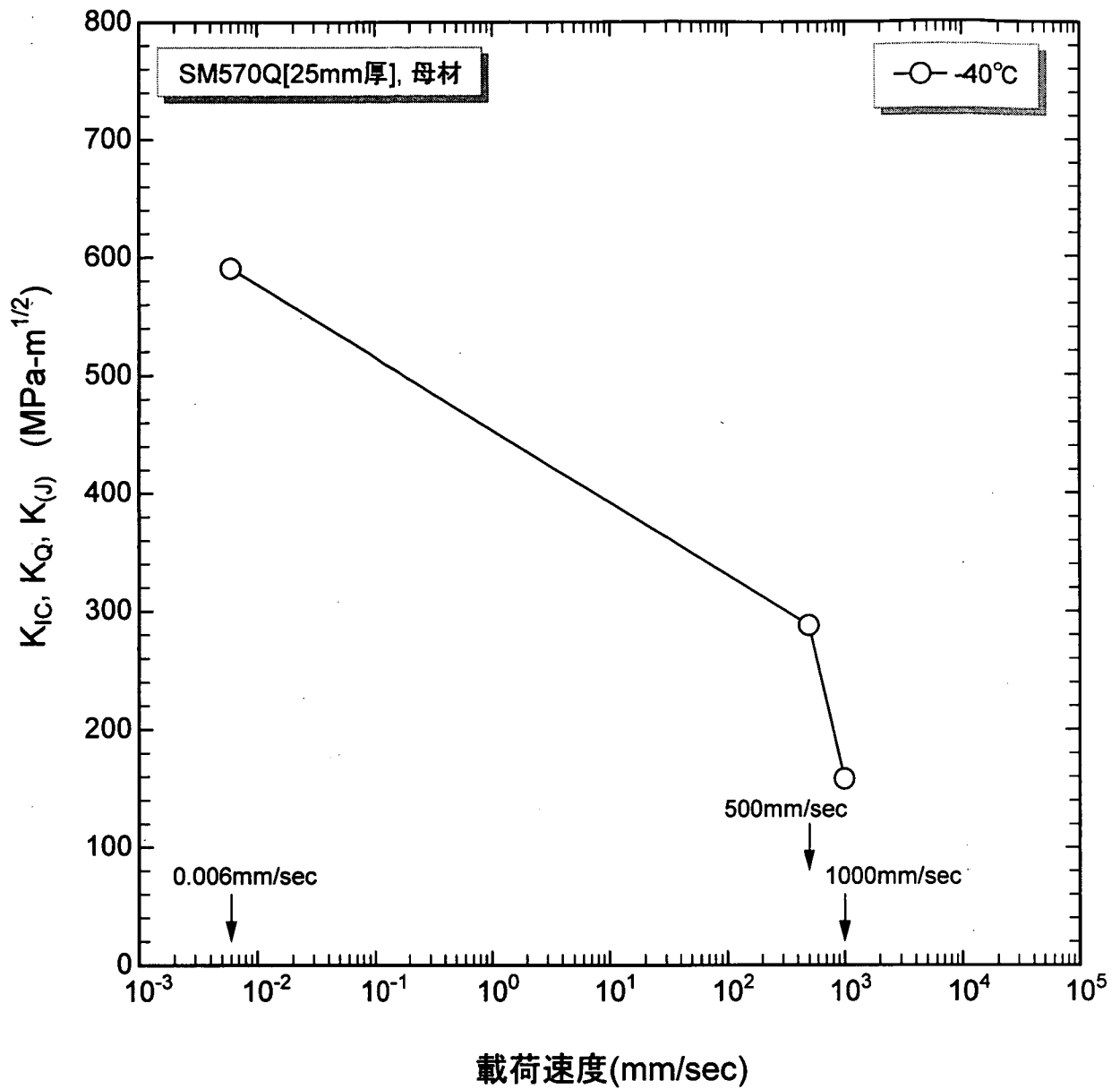


図3. 3. 6 破壊靱性値の載荷速度及び温度依存性
(SM570Q[25mm厚], 母材)

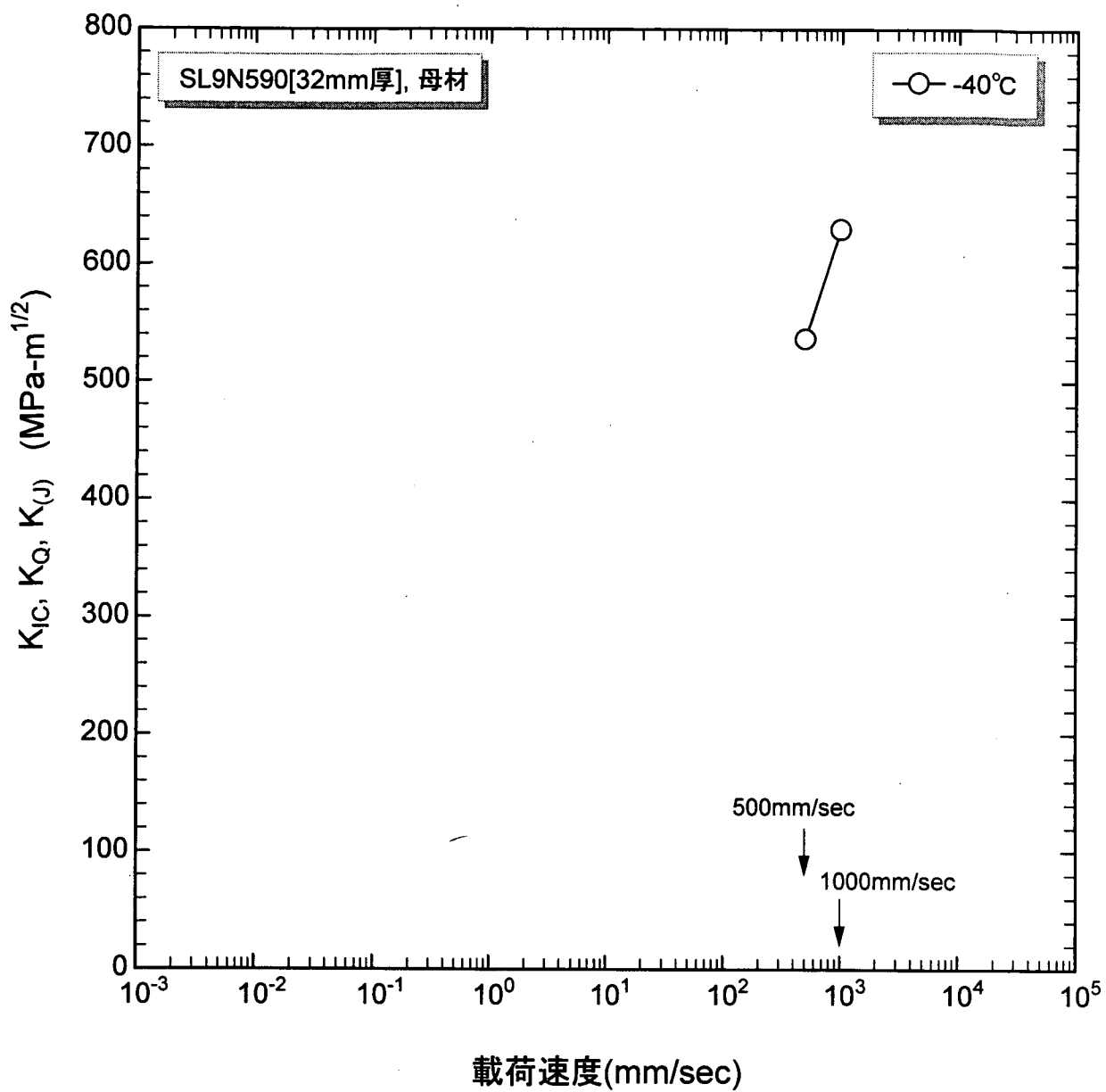


図3. 3. 7 破壊靱性値の載荷速度及び温度依存性
(SL9N590[32mm厚], 母材)

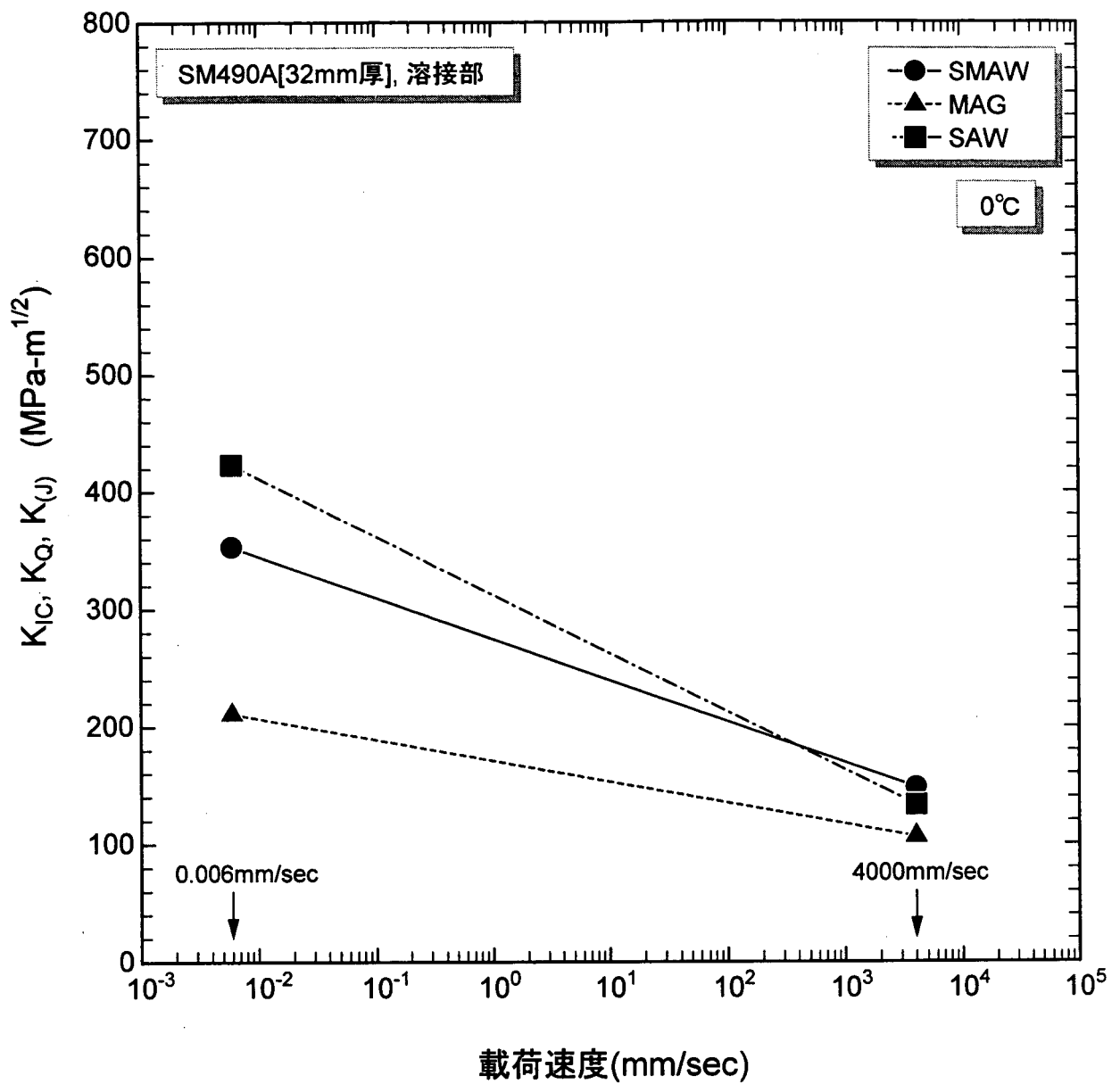


図3. 3. 8 破壊靱性値の載荷速度及び温度依存性
(SM490A[32mm厚], 溶接部)

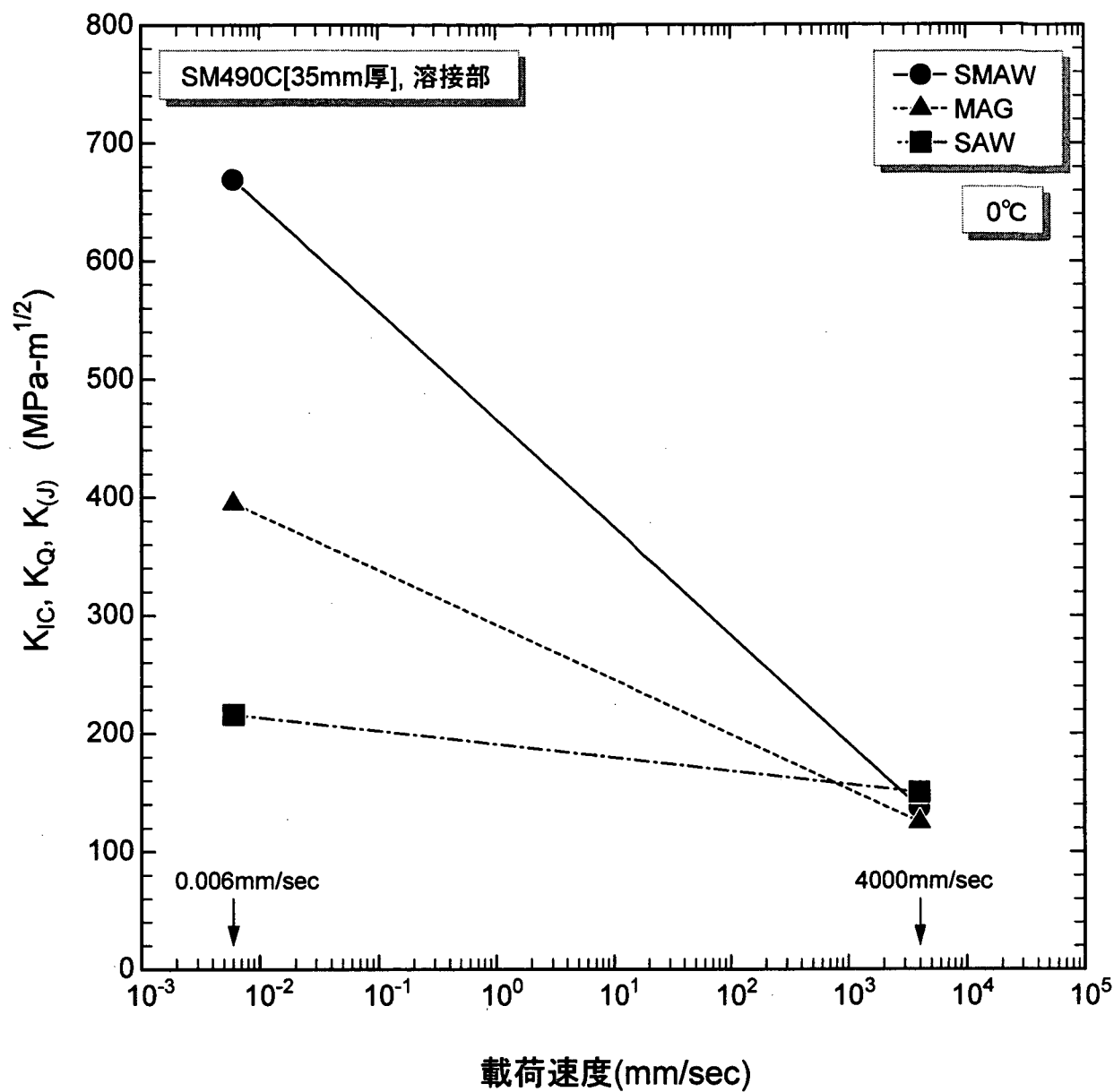


図3. 3. 9 破壊靱性値の載荷速度及び温度依存性
(SM490C[35mm厚], 溶接部)

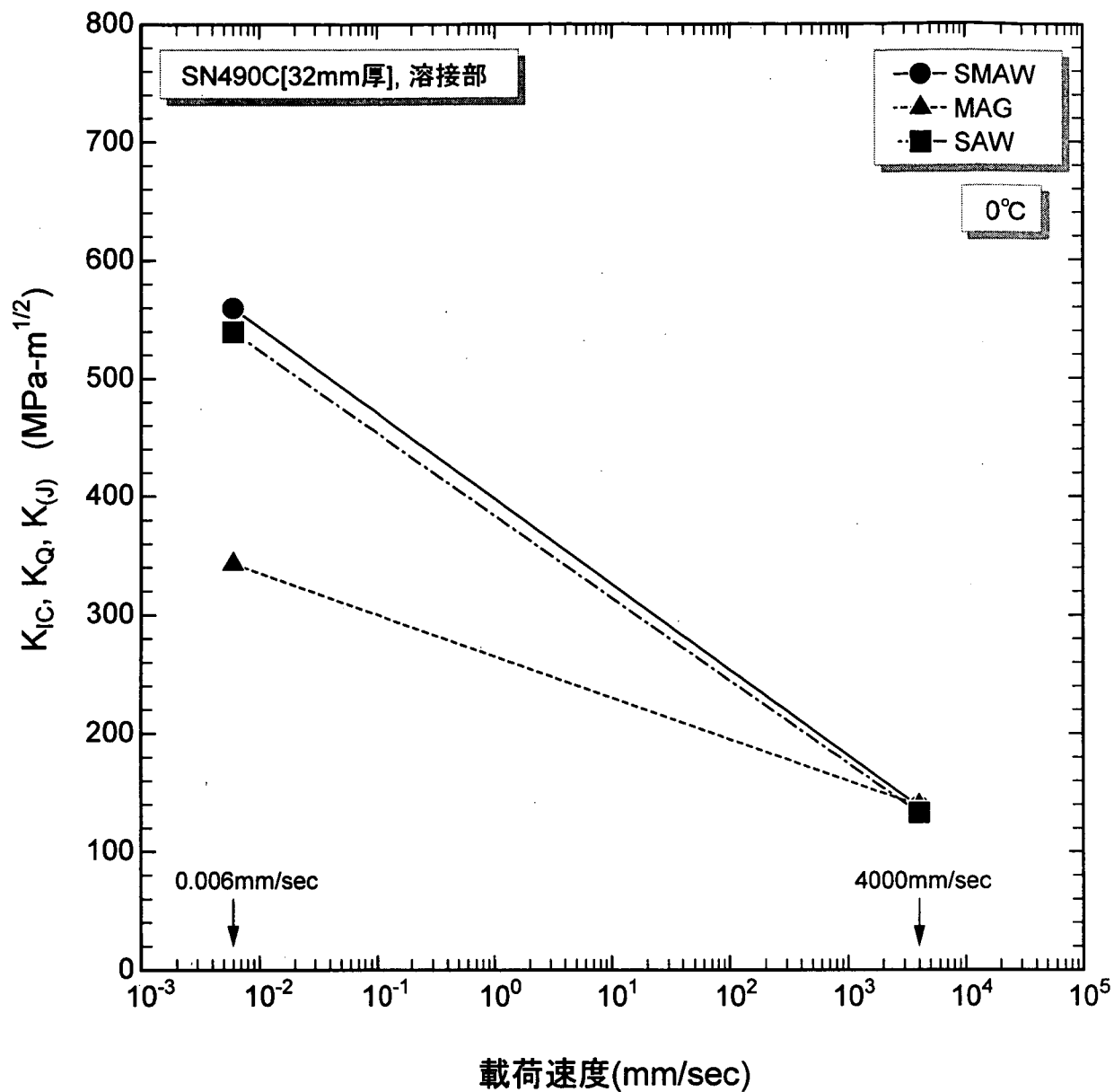


図3. 3. 10 破壊靱性値の載荷速度及び温度依存性
(SN490C[32mm厚], 溶接部)

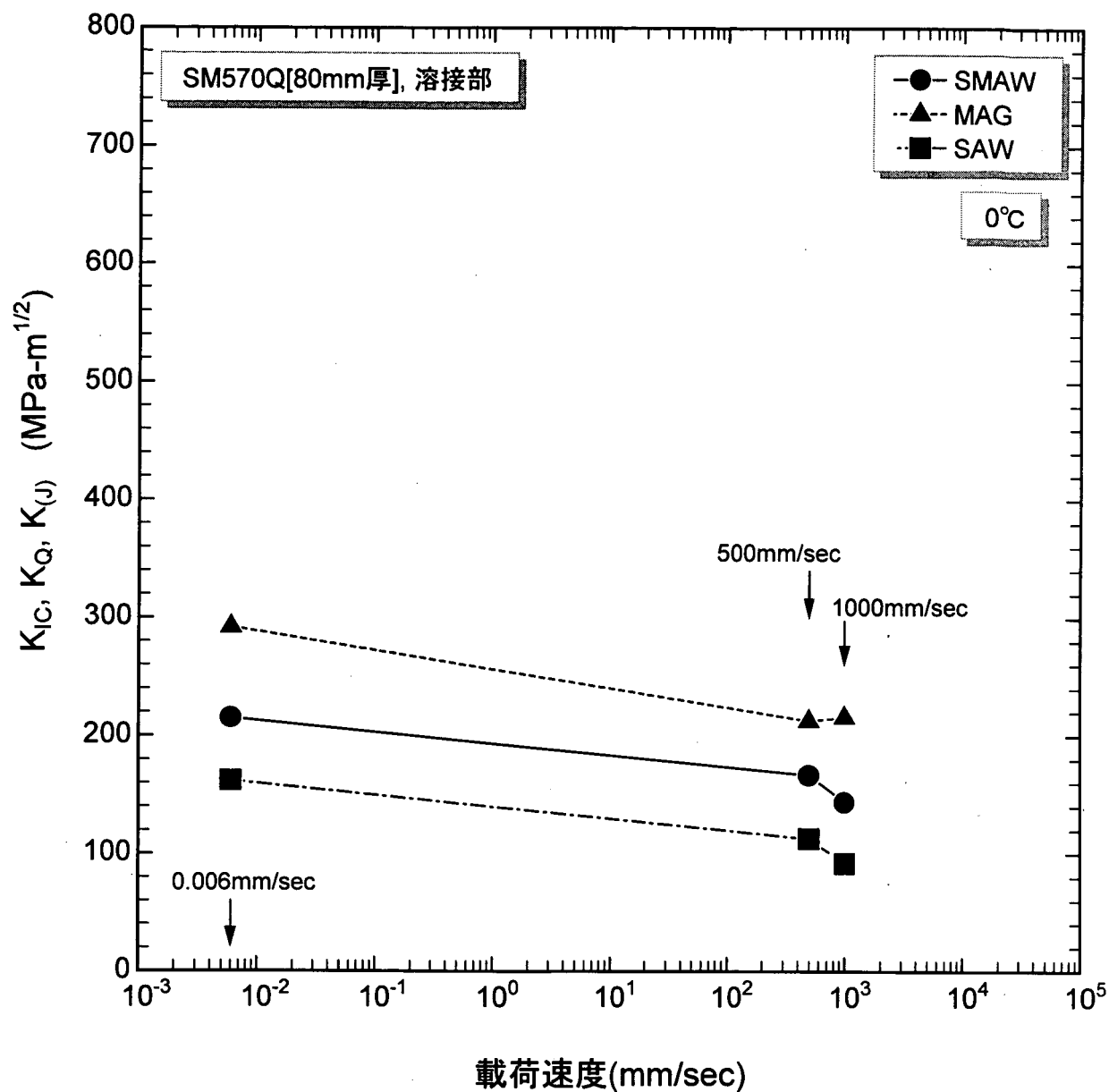


図3. 3. 11 破壊靱性値の載荷速度及び温度依存性
(SM570Q[80mm厚], 溶接部)

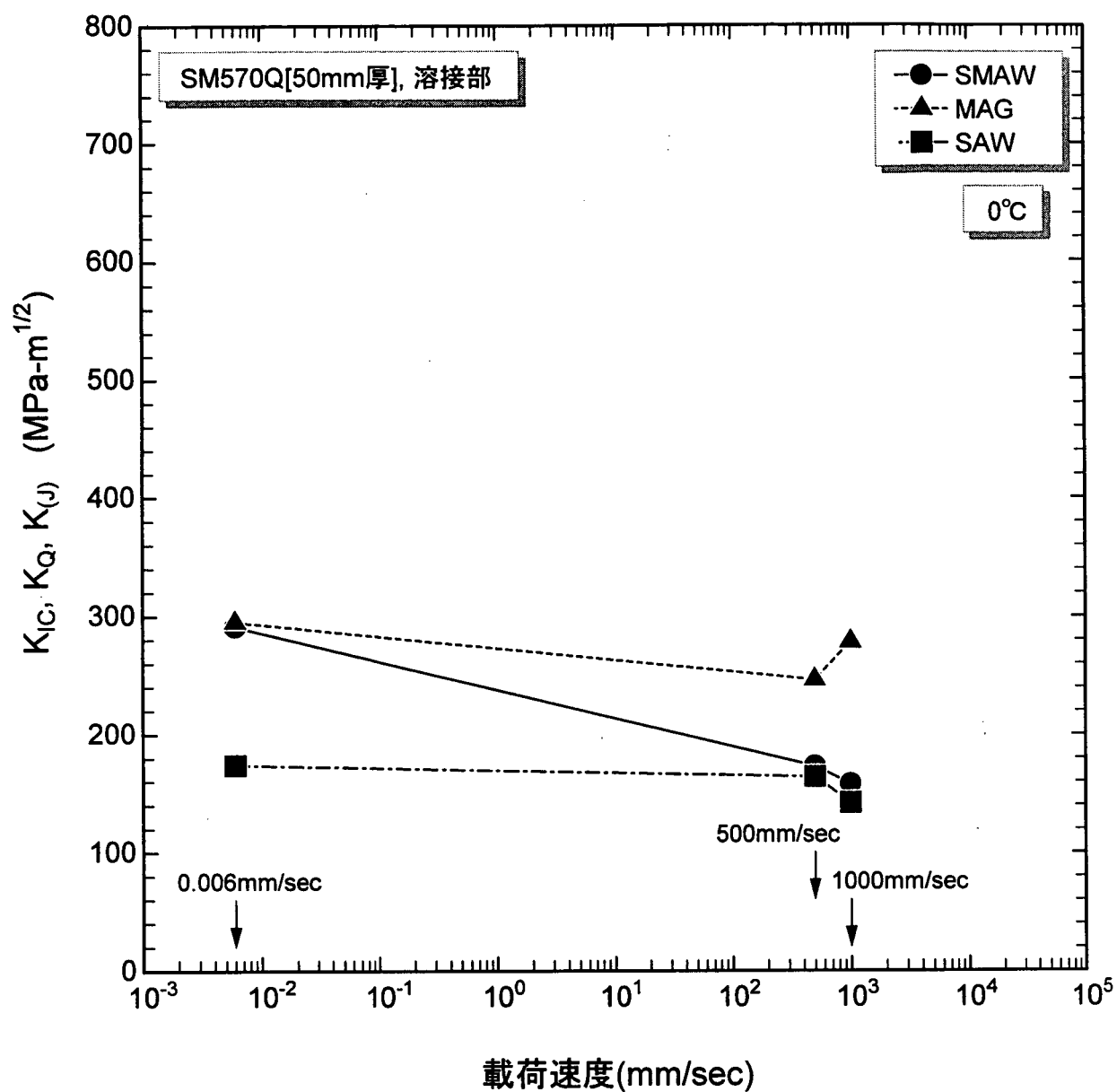


図3. 3. 12 破壊靱性値の載荷速度及び温度依存性
 (SM570Q[50mm厚], 溶接部)

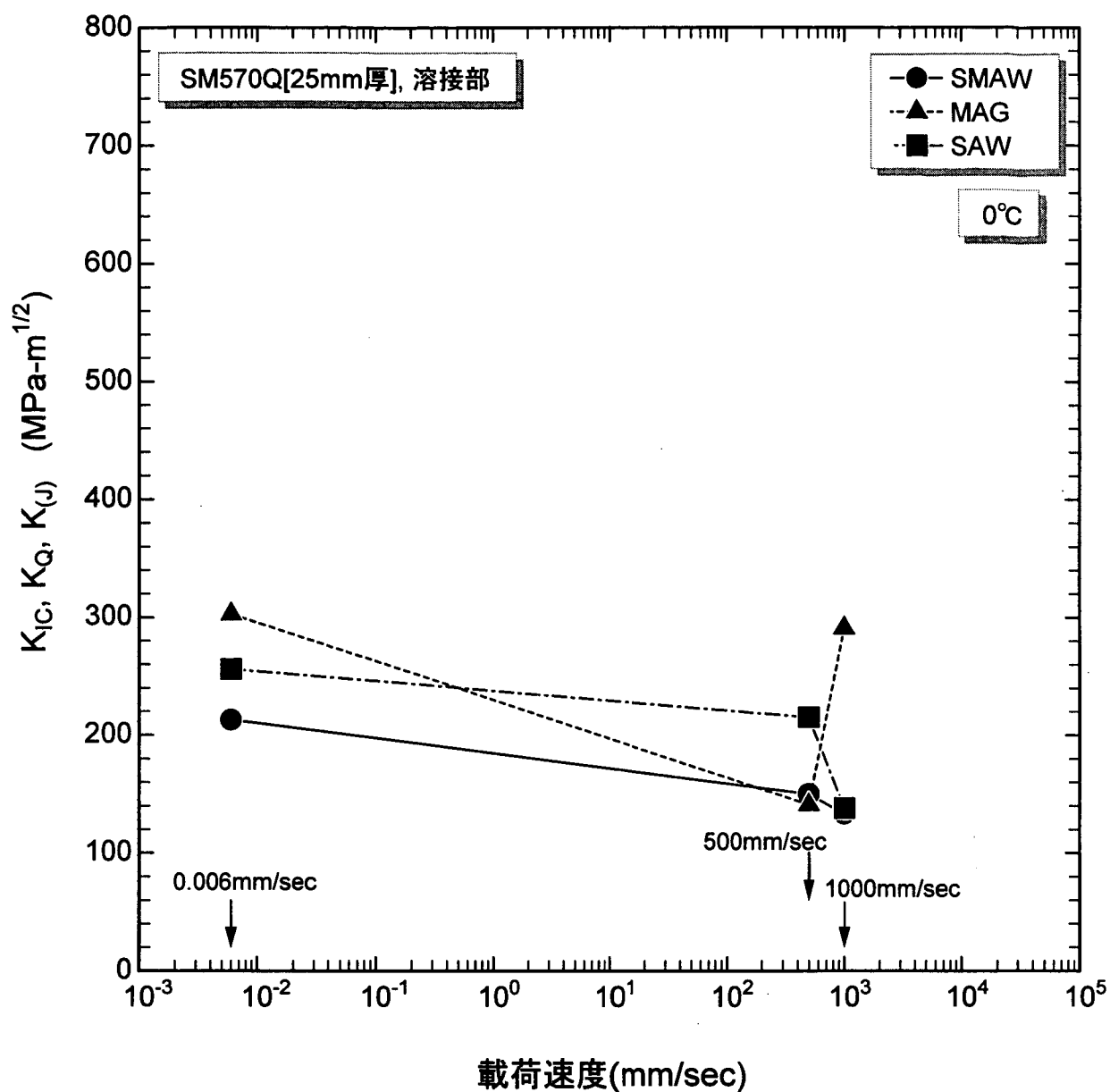


図3. 3. 13 破壊靱性値の載荷速度及び温度依存性
(SM570Q[25mm厚], 溶接部)

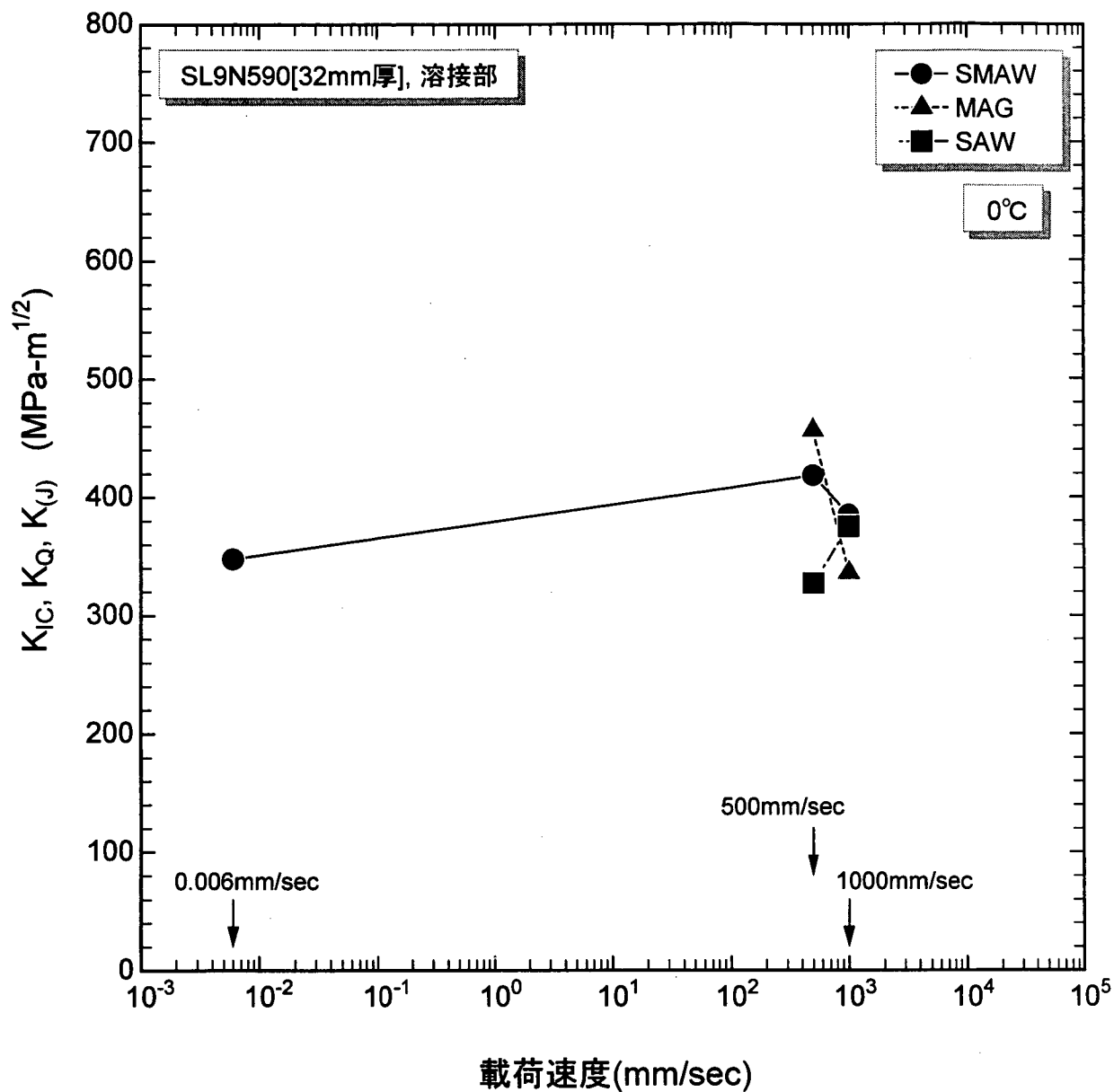


図3. 3. 14 破壊靱性値の載荷速度及び温度依存性
(SL9N590[32mm厚], 溶接部)

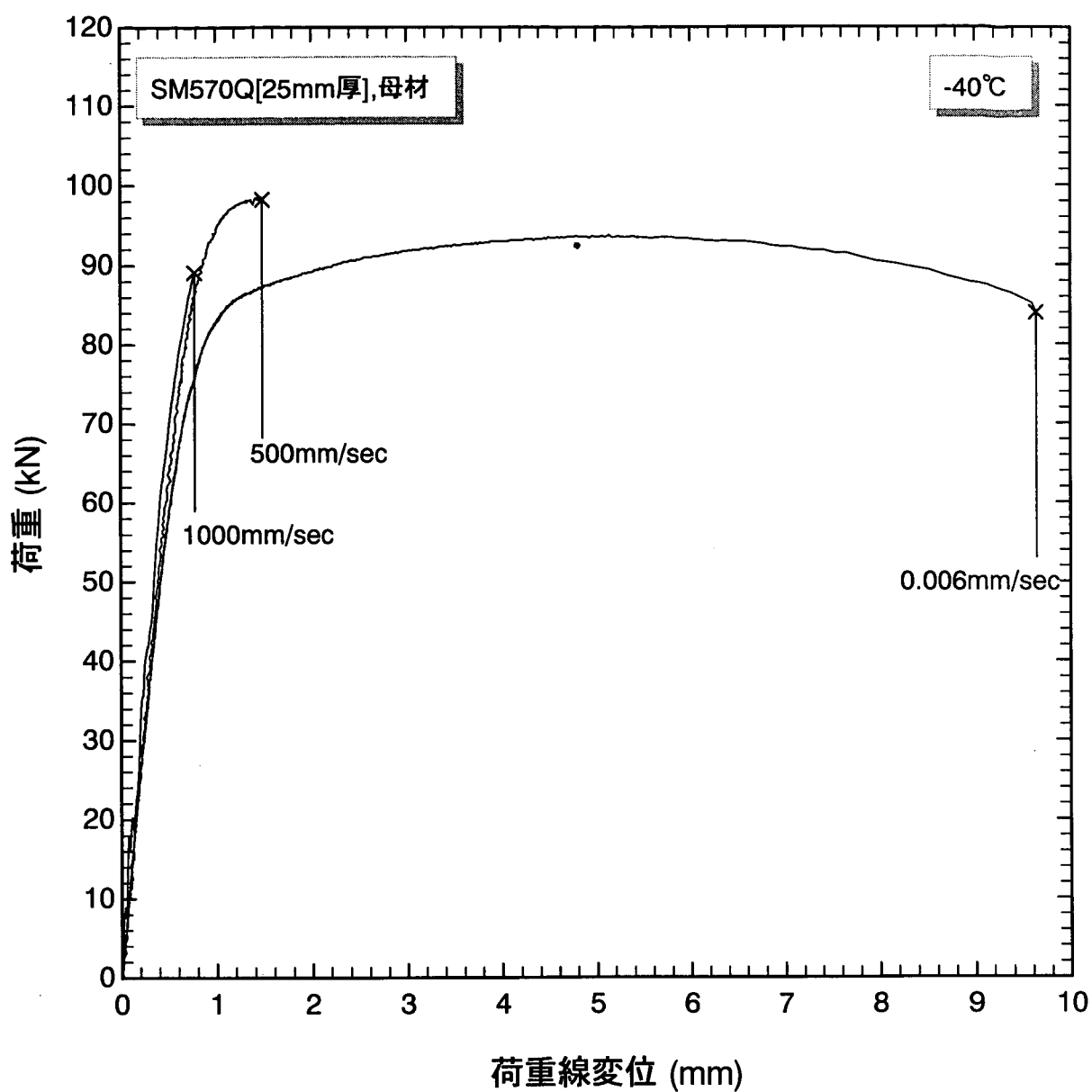


図3. 3. 15 荷重—荷重線変位曲線
(SM570Q[25mm厚],母材)

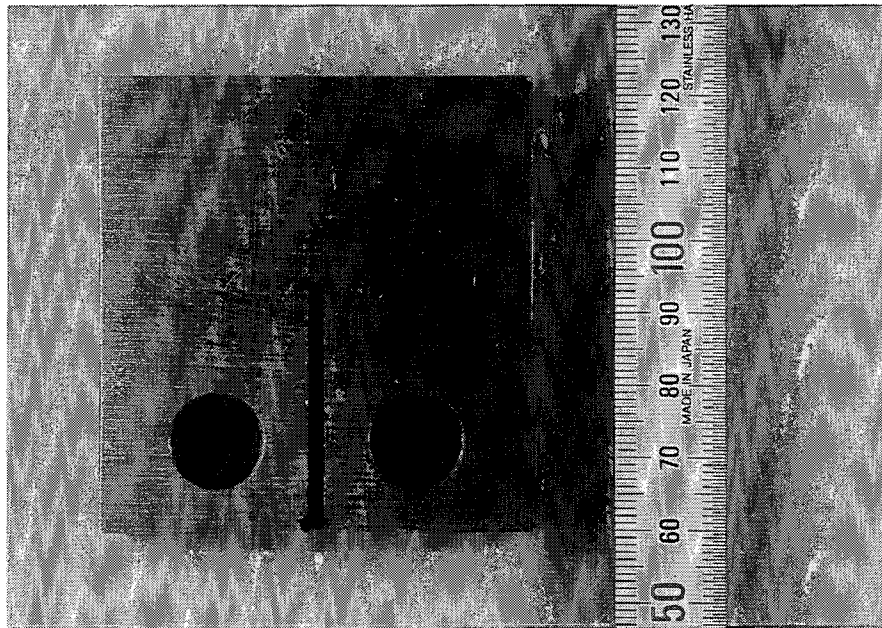
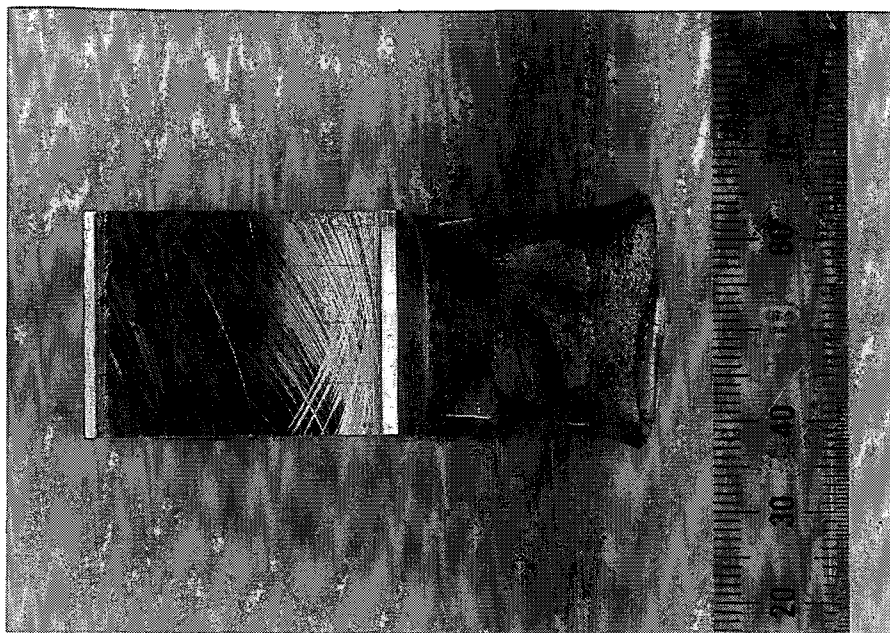
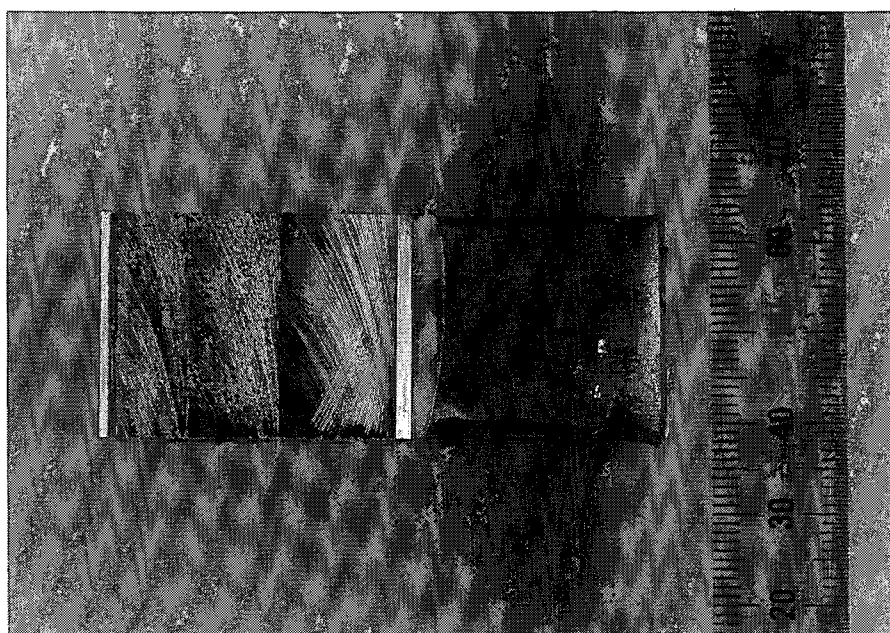


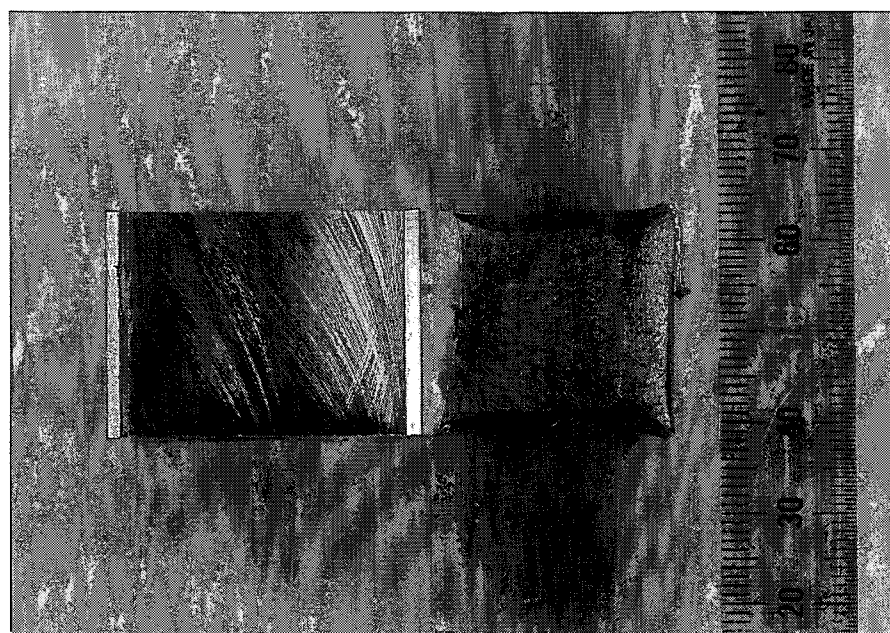
写真 3. 3. 1 破壊靱性試験片



EG6

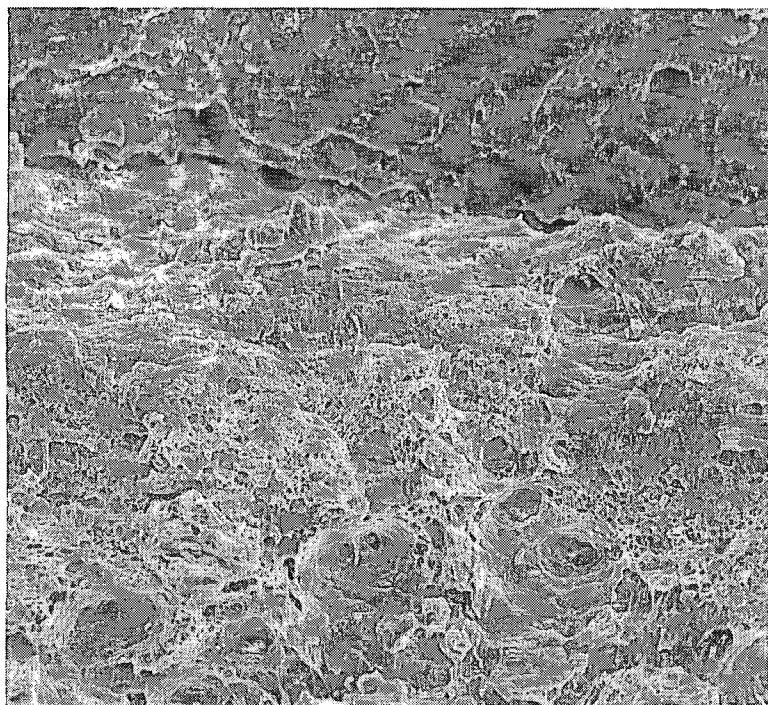


EG4



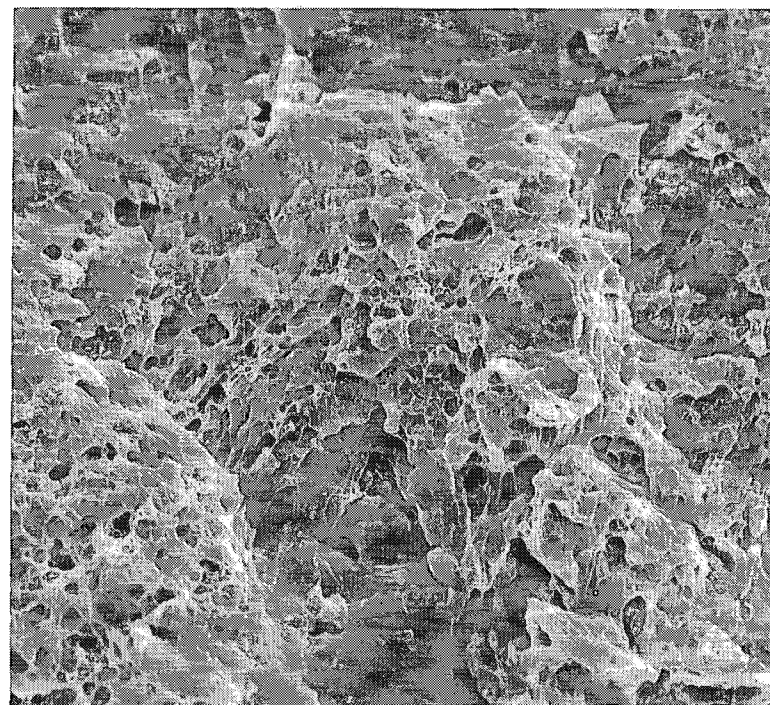
EG3

写真 3. 3. 2 破壊靱性試験後破断面



破壊発生位置

20 μ

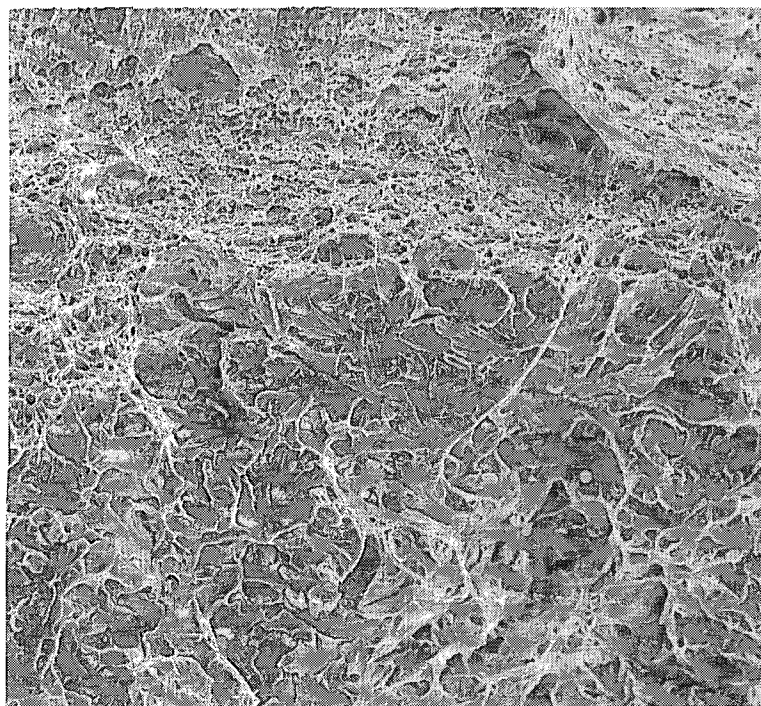


破壊発生位置

5 μ

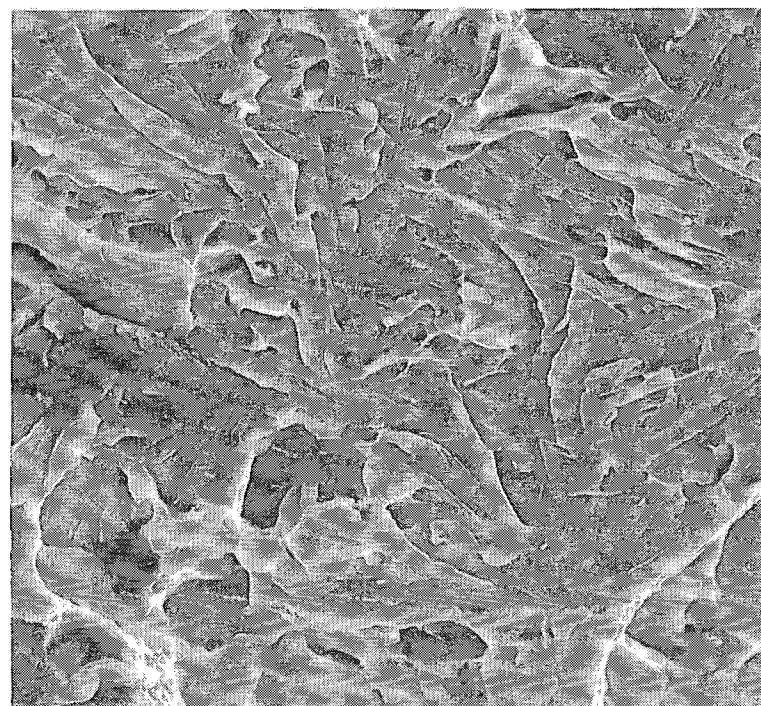
EG6 (−40°C、0.006mm/sec)

写真 3. 3. 3 破壊発生部直近のSEM観察－1/3



破壊発生位置

20 μ

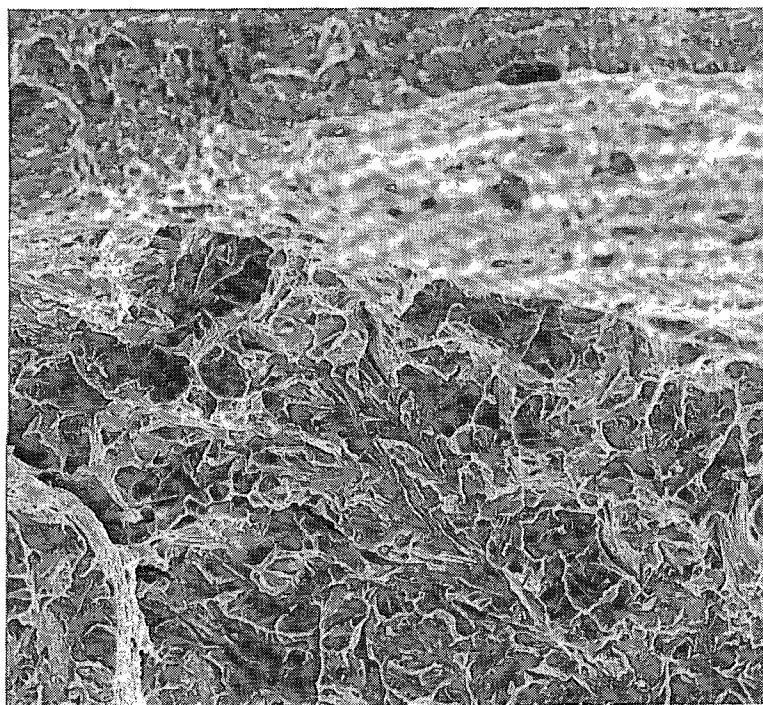


破壊発生位置

5 μ

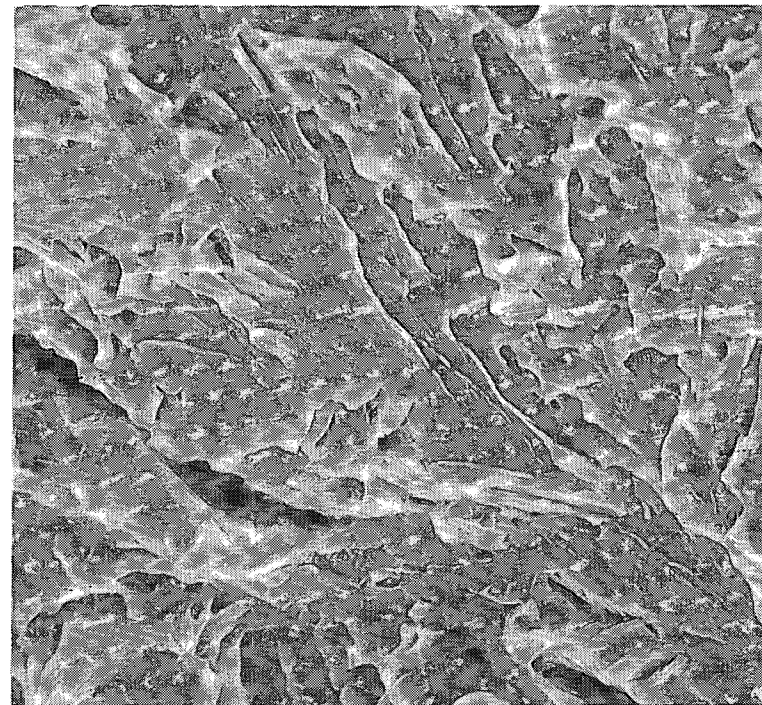
EG4 (-40°C、500mm/sec)

写真 3. 3. 3 破壊発生部直近のSEM観察 - 2/3



破壊発生位置

20 μ



破壊発生位置

5 μ

EG3 (-40°C、1000mm/sec)

写真 3. 3. 3 破壊発生部直近のSEM観察 - 3/3

3. 5 欠陥評価

鋼構造物の主要部材に発生した亀裂は、通常の状態では破壊に至ることのない大きさであっても、低温下及び地震時の高载荷速度下では材料の破壊靱性値が低下するために脆性破壊を生じることが考えられる。

そこで破壊靱性試験で得られた結果を基に実構造物に欠陥が存在した場合、どの程度の欠陥まで許容できるか試算してみる。

破壊の条件は外力である $K >$ 材料の破壊靱性値 K_{IC} 、 K_{IQ} 、 $K(J)$ と考える。

近年鋼製橋梁では、大型車の通量増加及び供用年数増加に伴い疲労亀裂が発生していることが報告されている。このうち安全性が著しく損なわれる危険性のあるものとしては次の様な位置に発生した亀裂と考えられている。¹¹⁾

- ・主桁下フランジ及びウェブ、それらの溶接継ぎ手部
- ・主桁切欠部腹板
- ・デッキプレート
- ・ソールプレート溶接部付近

これらは図3.4.1に示すように切欠部や溶接止端部などの応力集中部が発生の起点となっている。

実際の許容欠陥の評価にあたっては、亀裂及び亀裂を含む部材の大きさ、亀裂の位置、想定される負荷の大きさを個別に検討しなければならないが、代表的な例として、比較的厚い鋼板中に表面亀裂が存在する場合と薄い鋼板中に貫通亀裂が存在する場合とについて、検討する。亀裂を含む鋼板には、使用する材料の許容応力に相当する応力が一様に働いている状況を想定する。

先ず図3.4.2に示すように80mm厚鋼板の場合、板幅800mmの鋼板（ウェブ幅）中に全長は板厚の2倍(=160mm)、深さは板厚の1/2(=40mm)の半楕円形表面亀裂を考える。この時外力に相当する K 値は式(9)を用いて算出できる¹²⁾。但し80mm厚鋼板の許容応力を490MPa級鋼で206MPa、570MPa級鋼で240MPa¹³⁾ とする。

$$K = \sigma \cdot (\pi \cdot b)^{1/2} \cdot F \text{ ----- (9)}$$

$$= 7.5 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}} : 490\text{MPa級鋼の場合}$$

$$8.8 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}} : 570\text{MPa級鋼の場合}$$

ここに b : 亀裂深さ

F : 図3.4.2に示される欠陥の場合の形状係数

次に、図3.4.2に示すように32mm厚鋼板の場合、板幅300mmの鋼板中に全長は板厚の約5倍(=160mm)の貫通亀裂を想定する。この時外力に相当する K 値は式(10)を用いて算出できる¹⁴⁾。但し許容応力を490MPa級鋼で206MPa、570MPa級鋼で255MPa¹³⁾ とする。

$$K = \sigma \cdot (\pi \cdot a)^{1/2} \cdot F \text{ ----- (10)}$$

$$= 7.6 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}} : 490\text{MPa級鋼の場合}$$

$$9.4 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}} : 570\text{MPa級鋼の場合}$$

ここに a = 亀裂半長

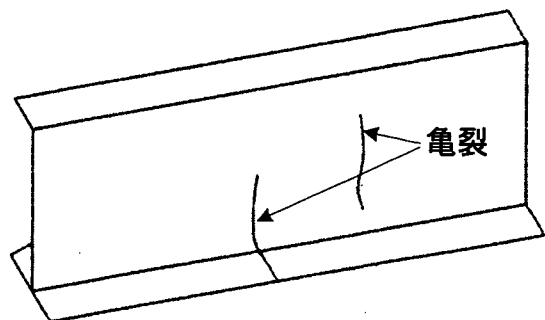
$$F = (\sec(\pi \cdot a/W))^{1/2}$$

W = 板幅

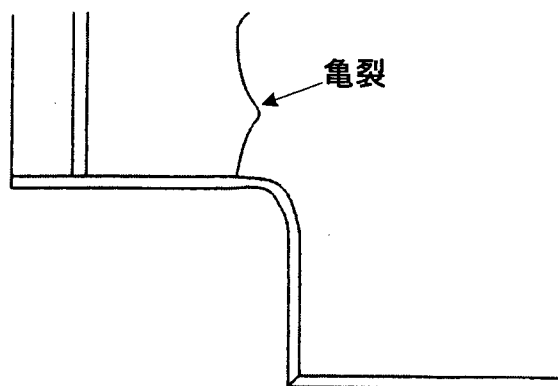
本研究で評価した鋼材では、 -40°C でも荷重が静的であるならば上のような条件で算出した K 値を下回る破壊靱性値を有するものはなかった。しかし、動的な負荷が加わった場合、破壊靱性値が低下するために破壊が生じる場合がある。

SM490A母材は、 4m/sec の载荷速度で $K_{IC}=62\text{MPa}\sqrt{\text{m}}(-40^{\circ}\text{C})$ 、 $79\text{MPa}\sqrt{\text{m}}(0^{\circ}\text{C})$ であり、実験値のばらつきも考慮すると破壊する危険があると考えられる。

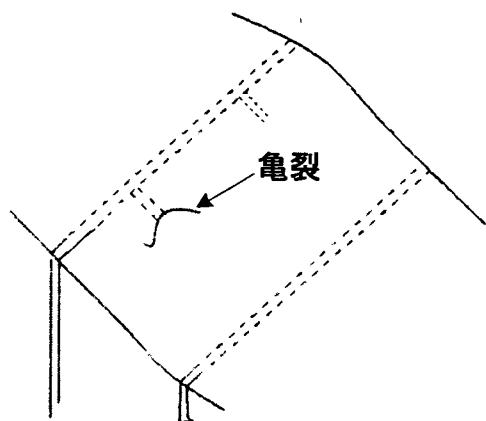
SN490C母材は、 0.5m/sec を超える载荷速度で $K_{IC}=78\text{MPa}\sqrt{\text{m}}(-40^{\circ}\text{C})$ 以下であり破壊すると考えられる。SM570Q(50mm厚)母材は、 0.5m/sec の载荷速度で $K_{IC}=73\text{MPa}\sqrt{\text{m}}(-40^{\circ}\text{C})$ 以下であり破壊すると考えられる。



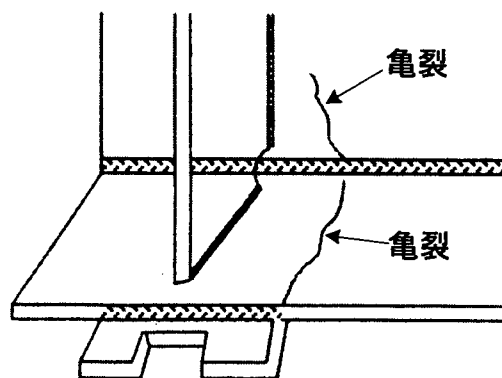
(a) 下フランジ、ウェブの亀裂及び
下フランジ、ウェブの溶接継手の破断



(b) 主桁切欠部腹板に進展した亀裂



(c) デッキプレートの亀裂



(d) ソールプレート溶接部より下フランジ
及びウェブに進展した亀裂

図3. 4. 1 鋼製橋梁に発生した亀裂

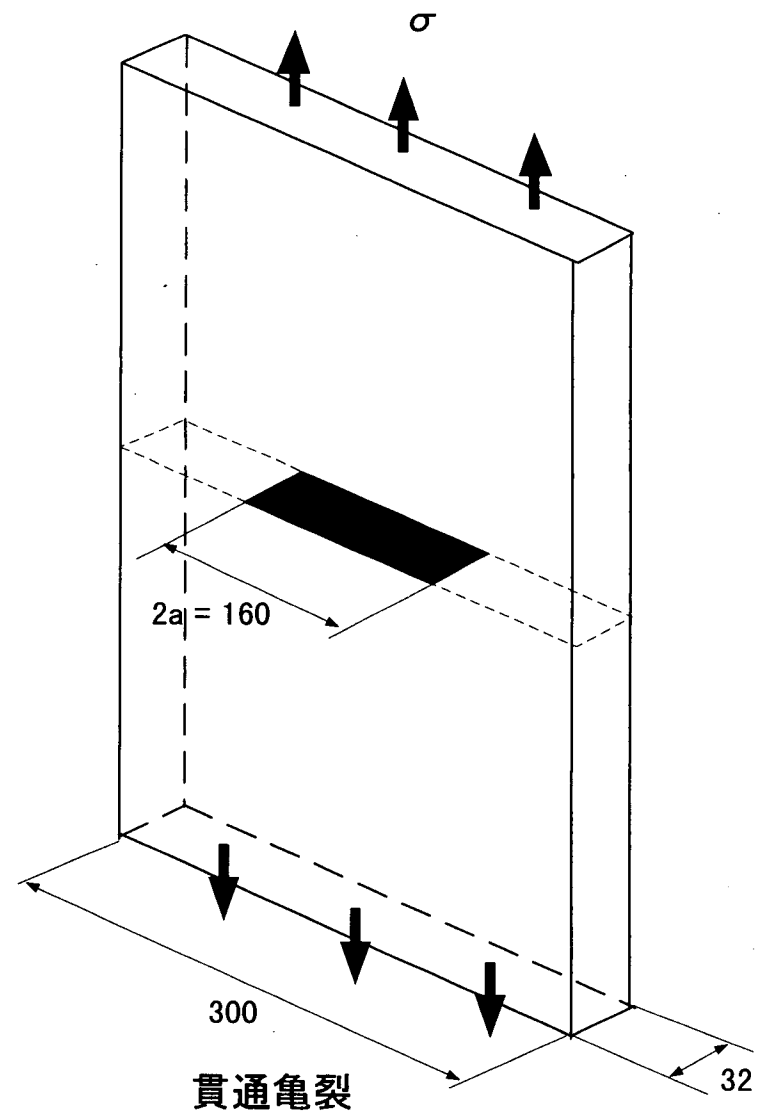
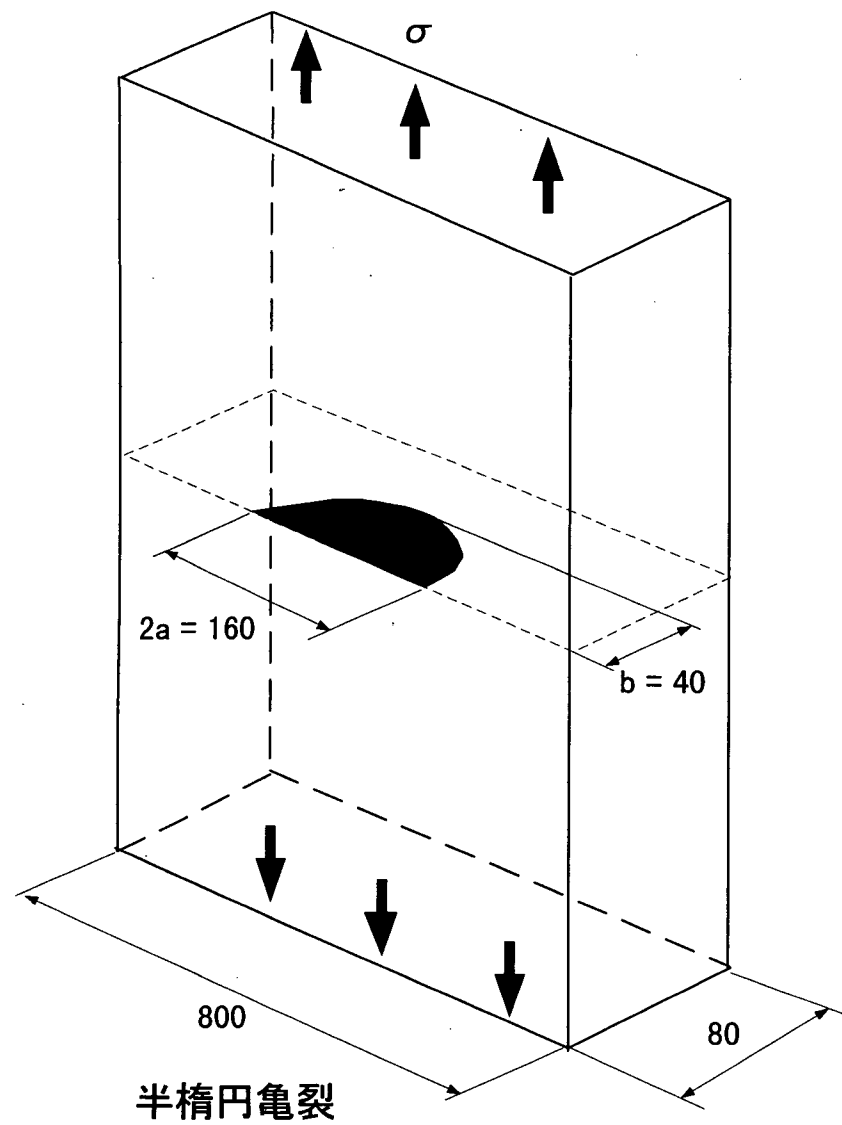
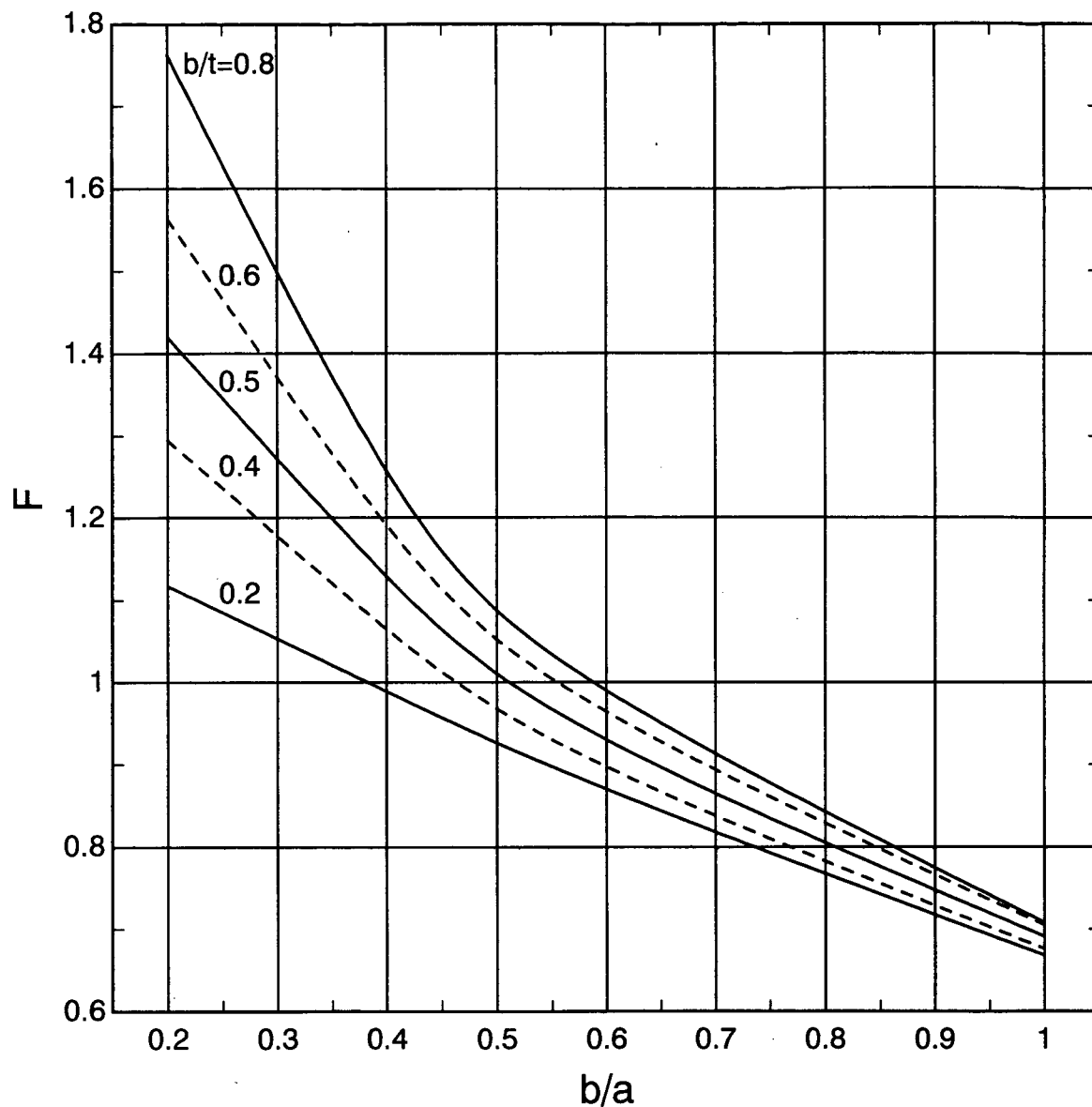


図3. 4. 2 計算に用いた亀裂の形状寸法-1/2



半楕円亀裂の形状係数

図3. 4. 2 計算に用いた亀裂の形状寸法-2/2

4. まとめ

阪神淡路大震災にみられた鋼材の脆性的破壊現象に関し、現在多く用いられている鋼材としてSM400A、SM490A、SM490C、SN490Cを、次世代鋼材としてSM570Q（板厚80mm、50mm、25mm）及び9%Ni鋼板を選び、母材及び溶接部の動的破壊試験を行い、これら鋼材の脆性的破壊挙動について検討し、以下の知見を得た。

- 1) 引張試験の結果載荷速度が速くなれば降伏点及び引張強さは高くなり、その載荷速度の影響は降伏点に著しい。
- 2) 破壊靱性試験結果には載荷速度及び温度が影響し、載荷速度が速くなれば破壊靱性値は低下し、温度が低くなれば同様に破壊靱性値は低下する。
- 1) 構造部材をモデル化して欠陥を想定し、欠陥評価を行い、静的載荷状態では破壊しない場合であっても、動的載荷の場合には脆性破壊の生じることが示された。

最後に、本研究を実施するにあたり各種鋼材をご提供いただきました新日本製鐵株式会社並びに住友金属工業株式会社に謝意を表します。

参考文献

- 1) 金沢 武：軟鋼の脆性破壊に就て（第1報）；造船協会論文集第89号，昭和26年
軟鋼の脆性破壊に就て（第2報）；造船協会論文集第91号，昭和27年
- 2) 日本造船研究協会：巨大船の脆性破壊防止に関する研究；第101研究部会，1968
- 3) 町田 進，青木 満：クラックアレスターに関する基礎的研究（第7報）－長大クラックの阻止とアレスターの設計について－；日本造船学会論文集第131号，1972
- 4) (社) 日本溶接協会：WES2805 溶接継手の脆性破壊に対する欠陥の評価方法，昭和51年
- 5) (社) 日本溶接協会：溶接継手の脆性破壊発生及び疲労亀裂進展に対する欠陥の評価方法，平成9年
- 6) 金田重裕，新村豊，渡辺左千雄，町田進：鋼材の限界CODに及ぼすひずみ速度の影響；日本造船学会論文集第154号，1983
- 7) 藤井英輔，大熊 勇，川口喜昭，塚本雅敏：鋼材の動的破壊特性における温度及び歪速度の影響の検討；日本造船学会論文集第158号，1985
- 8) 豊貞雅宏，野原和宏，川口喜昭，有持和茂，井坂和実：破壊靱性に及ぼすひずみ速度の影響；日本造船学会論文集第161号，1987
- 9) 中澤 一編：金属材料試験マニュアル；(財) 日本規格協会，1992
- 10) 野方文男，高橋秀明：原子炉圧力容器監視試験における中性子照射材のへき開平面ひずみ破壊靱性評価；日本原子力学会誌Vol. 24, No. 1, 1982
- 11) 大阪大学溶接工学研究所，日本鉄塔工業株式会社：合成I桁橋における主桁と横桁の取合部の疲労強度に関する検討；昭和60年度報告，1986
- 12) Y. MURAKAMI et al. : STRESS INTENSITY FACTORS HANDBOOK, Vol. 2, P. 692 ; Pergamon Press, 1987
- 13) (社) 日本道路協会：道路橋設計仕方書，1996
- 14) Y. MURAKAMI et al. : STRESS INTENSITY FACTORS HANDBOOK, Vol. 1, P. 3 ; Pergamon Press, 1987