

“船舶の構造・性能に関する基礎的研究”

第147研究部会

船体用高張力鋼板大入熱溶接継手の
脆性破壊強度評価に関する研究

報 告 書

研究部研究課



昭和49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48年度補助事業「船舶の構造・性能に関する基礎的研究」の一部として、日本造船研究協会が第147研究部会においてとりまとめたものである。

本研究部会の委員は次のとおりである。

第147研究部会委員名簿（敬称略五十音順）

部 会 長
幹 事

金沢 武（東京大学）

池田一夫（神戸製鋼）

印藤弘郷（三井造船）

黒川常夫（長崎大学）

酒井啓一（石川島播磨重工業）

船越督己（川崎製鉄）

松村裕之（川崎重工業）

矢島 浩（三菱重工業）

委 員

青木 満（神戸製鋼）

池田 稔（川崎製鋼）

岡野伊史（佐世保重工業）

賀来信一（日本海事協会）

木山 稔（新日本製鉄）

菅 尚史（佐世保重工業）

寺井 清（川崎重工業）

中牟田 浩（石川島播磨重工業）

前中 浩（船舶技術研究所）

吉永昭男（船舶技術研究所）

討議参加者

青木真一（川崎製鉄）

安藤 清（三菱重工業）

大熊雄二（川崎重工業）

片岡繁夫（長崎大学）

金網正夫（三井造船）

岸本宏次（三井造船）

黒沢千利（石川島播磨重工業）

阪野賢治（石川島播磨重工業）

岩永 寛（住友金属工業）

国広敏之（日立造船）

越賀房夫（日本鋼管）

藤井英輔（船舶技術研究所）

町田 進（東京大学）

三波建市（新日本製鉄）

飯塚真平（住友重工業）

石井和也（運輸省）

尾上久浩（三菱重工業）

河合弘昌（三菱重工業）

佐藤邦彦（大阪大学）

栖原二郎（九州大学）

中島正樹（三菱重工業）

新村 豊（東京大学）

松村正夫（函館 Dock）

渡辺昌建（三菱重工業）

秋山俊弥（日本鋼管）

大熊 勇（船舶技術研究所）

大谷幸三郎（新日本製鉄）

嘉田絃祐（神戸製鋼）

神戸良雄（日鉄溶接工業）

黄瀬利弘（三菱重工業）

栗原幸雄（三菱重工業）

白木良典（日立造船）

白石圭一(日本海事協会)
秦数実(日本鋼管)
鈴木宏(佐世保重工業)
田中康浩(川崎製鉄)
豊田政男(大阪大学)
中山繁(川崎重工業)
難波勝(神戸製鋼)
日野隆博(三菱重工業)
松本健男(住友重工業)
松本宏之(石川島播磨重工業)
柳沼宏治(三井造船)
渡部政幸(佐世保重工業)

白川秀夫(日立造船)
新行内雅博(川崎製鉄)
多田益男(三菱重工業)
寺沢健(新日本製鉄)
中尾信彦(日本鋼管)
永井明(日立造船)
萩原行人(新日本製鉄)
藤猪良知(神戸製鋼)
松本重人(川崎製鉄)
峰久郎治(日立造船)
山田桑太郎(川崎重工業)

目 次

1. まえがき-----	1
2. 研究の目的・内容-----	1
3. 供試材-----	4
4. 供試材の靱性に関する基礎データの把握-----	4
4.1 丸棒引張試験-----	4
4.1.1 目的-----	4
4.1.2 試験内容-----	4
4.1.3 試験結果および考察-----	5
4.1.4 まとめ-----	5
4.2 硬度分布・組織調査-----	5
4.2.1 目的-----	5
4.2.2 試験内容-----	5
4.2.3 試験結果および考察-----	6
4.2.4 まとめ-----	7
4.3 V-ノッチシャルピー試験-----	7
4.3.1 目的-----	7
4.3.2 試験内容-----	7
4.3.3 試験結果および考察-----	7
4.3.4 まとめ-----	8
4.4 小形COD曲げ試験-----	8
4.4.1 目的-----	8
4.4.2 試験内容-----	8
4.4.3 試験結果および考察-----	9
4.4.4 まとめ-----	12
5. 脆性破壊発生に関する研究-----	12
5.1 中央切欠（板厚貫通）大形引張試験-----	12
5.1.1 目的-----	12
5.1.2 試験内容-----	12
5.1.3 試験結果および考察-----	13
5.1.4 まとめ-----	15

5.2	十字型拘束引張試験	15
5.2.1	目的	15
5.2.2	試験内容	15
5.2.3	試験結果および考察	16
5.2.4	まとめ	18
6.	脆性破壊伝播に関する研究	18
6.1	中形伝播試験	18
6.1.1	目的	18
6.1.2	試験内容	18
6.1.3	試験結果および考察	19
6.1.4	まとめ	19
6.2	荷重条件の影響に関する試験	20
6.2.1	目的	20
6.2.2	試験内容	20
6.2.3	試験結果および考察	20
6.2.4	まとめ	23
6.3	大形伝播試験	23
6.3.1	目的	23
6.3.2	試験内容	23
6.3.3	試験結果および考察	24
6.3.4	まとめ	27
7.	船体残留応力分布の把握	27
7.1	基礎試験	27
7.1.1	目的	27
7.1.2	試験内容	28
7.1.3	試験結果および考察	29
7.1.4	まとめ	31
	参考文献	32
8.	むすび	32

1. まえがき

日本造船研究協会第147研究部会は、「船体用高張力鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度評価に関する研究」をテーマとして、昭和48年4月に発足したものである。

この研究の目的は、巨大船に実用されている船殻材（特に50キロ級高張力鋼板）についてのエレクトロガス溶接継手、エレクトロスラグ溶接継手およびその他の高能率大入熱溶接継手を対象に、継手の破壊靱性を把握し、船殻の致命的損傷である脆性破壊による重大損傷防止の基礎検討資料を得ることである。

なお、本研究は、委員会において審議決定した研究計画の基本方針にもとづき、実験担当委員を中心とした委員会・幹事会をたびたび開催し、詳細な技術的検討を行なって実施したものである。研究の全体計画は、後述のように3ヶ年にわたるものであるが、本報告書は、その第1年度分の経過報告書としてとりまとめたものである。

2. 研究の目的・内容

近年、船体の巨大化・短期建造体制確立と相俟って、船殻溶接工作技術の進歩は目覚ましいものであり、エレクトロガス溶接、エレクトロスラグ溶接、多電極ワンスайдサブマージアーク溶接等、種々の高能率自動溶接法が開発され、今後もますます高能率化を旨とした大入熱溶接が研究されつつある。

大入熱によるボンド部脆化の傾向は、現状船殻材においては、引張り強さの高い材料ほど敏感であると考えられ、最近の50キロ級高張力鋼使用量増大の傾向から、本問題は早急に解決する必要がある。

以上の観点から、巨大船に実用されている船殻材（一般船体用軟鋼板、船体用50キロ級高張力鋼板、船体用60キロ級高張力鋼板）についてのエレクトロガス溶接継手、エレクトロスラグ溶接継手およびその他の高能率大入熱溶接継手等を対象に継手の破壊靱性を把握し、船殻の致命的損傷である脆性破壊による重大損傷防止の基礎検討資料を得るため、昭和48年4月より3ヶ年計画で下記内容の研究に着手した。

1) 供試材の靱性に関する基礎データの把握

従来から実施されているV-ノッチシャルピー試験、小形COD試験等により把握する。

2) 脆性破壊発生に関する研究

中央切欠（板厚貫通）大形引張試験（中央切欠型ディープノッチ試験）、

十字型拘束引張試験等により脆性破壊発生特性を把握する。また、表面欠陥の発生特性試験により脆性破壊発生現象に関する基礎概念を把握する。さらに、大入熱溶接部についての大形構造要素（実船局部構造モデル）の発生特性試験により、実船殻大入熱溶接部の脆性破壊強度を推定、総合的に検討、把握する。

3) 脆性破壊伝播に関する研究

脆性亀裂伝播現象に関する基礎研究により、従来から実施されている二重引張試験、ESS0試験等実験室的試験結果から実船殻での亀裂伝播現象推定の上での問題点の解明を行なう。さらに、前記供試鋼母材および溶接継手ボソド部についての亀裂伝播特性を中形伝播試験、大形伝播試験等により把握、実船殻大入熱溶接部の脆性亀裂伝播現象を総合的に検討、把握する。

4) 船体残留応力分布の把握

前記大入熱溶接継手部についての大形伝播試験結果解析に供すべく、供試試験片での残留応力分布を基礎試験により計測する。さらに、実船殻構造でのこれら大入熱溶接部の脆性破壊強度を判断するための基礎資料に供すべく、実船殻大入熱溶接部の残留応力分布を実船試験にて把握する。

なお、昭和48年度は、その第1年次として、一般船体用軟鋼KAS鋼板（板厚25.4mm, As Rolled材）のエレクトロガス溶接継手、エレクトロスラグ溶接継手、ならびに船体用50キロ級高張力鋼K5D鋼板（板厚25.4mm, As Rolled材）のエレクトロガス溶接継手、消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接（以下CES溶接と記す）継手を対象に、下記内容の研究を実施した。

1) 供試材の靱性に関する基礎データの把握

1.1) 丸棒引張試験

(1) 供試2鋼種の母材について、室温～ -196°C の温度範囲で丸棒引張試験を実施した。

(2) 供試2鋼種について、前記4種類の溶接継手から溶接金属の丸棒引張試験片を採取し、室温～ -196°C の温度範囲で丸棒引張試験を実施した。

1.2) 硬度分布・組織調査

供試2鋼種の前記4種類の溶接継手について、 $\frac{1}{2}$ t部と表面から2mmの位置の硬度分布(Hv)を測定した。

また、顕微鏡組織を調査した。

1.3) V-ノッチシャルピー試験

(1) 供試2鋼種の母材について、 $\frac{1}{2}$ t部から採取した試験片により、遷移曲線を求めた。

(2) 供試2鋼種について、前記4種類の溶接継手の $\frac{1}{2}$ t部から採取し、溶接金属中央、ボソド、HAZ 2mm, HAZ 4mm, HAZ 8mmの各位置にノッチ

加工した試験片により遷移曲線を求めた。

1.4) 小形C0D 曲げ試験

(1) 供試2鋼種の母材について、小形試験片による3点曲げ試験を実施し、脆性破壊発生に関する特性値の一つである限界C0Dを求めた。

(2) 供試2鋼種の前記4種類の溶接継手について、溶接金属中央、ボンドの各位置にノッチ加工した試験片により、3点曲げ試験を実施し、脆性破壊発生に関する特性値の一つである限界C0Dを求めた。

2) 脆性破壊発生に関する研究

2.1) 中央切欠(板厚貫通)大形引張試験

(1) 供試2鋼種の母材について、標準中央切欠型試験片($2B = 400\text{ mm}$, $2C = 160\text{ mm}$)によるディープノッチ試験を実施し、脆性亀裂発生特性を把握した。

(2) 供試2鋼種の前記4種類の溶接継手について、溶接金属中央、ボンドの各位置にノッチ加工した標準中央切欠型試験片($2B = 400\text{ mm}$, $2C = 160\text{ mm}$)によるディープノッチ試験を実施し、脆性亀裂発生特性を把握した。

2.2) 十字型拘束引張試験

KAS鋼についてのみ、母材ならびにエレクトロガス溶接継手、エレクトロスラグ溶接継手について、幅 400 mm 、スチフナ高さ(全高) 160 mm の十字型拘束引張試験片による脆性亀裂発生試験を実施し、拘束部からの脆性亀裂発生特性を把握した。なお、供試試験片は母材およびボンド部にノッチ加工した。また、ノッチ面上に突合せたスチフナの突合せ面間隔しを、 0 mm 、 20 mm 、 70 mm および 120 mm の4段階変化させた。

3) 脆性破壊伝播に関する研究

3.1) 中形伝播試験

供試2鋼種の母材について、幅 500 mm の温度勾配型標準二重引張試験を実施し、脆性亀裂伝播停止特性を把握した。

3.2) 荷重条件の影響に関する試験

KAS鋼の母材を供試し、温度勾配型二重引張試験において、試験片端部の剛性が、脆性亀裂の伝播および停止挙動におよぼす影響を調べた。

3.3) 大形伝播試験

幅 2000 mm および 1500 mm の大型試験片を供試し、供試2鋼種の母材および前記4種類の溶接継手ボンド部について脆性亀裂伝播停止特性を把握した。

4) 船体残留応力分布の把握

4.1) 基礎試験

KAS 鋼エレクトロガス溶接継手、エレクトロスラグ溶接継手および K5D 鋼 CES 溶接継手について、先に記した大形伝播試験片とほぼ同一寸法の継手試験片を供試して、残留応力分布を測定した。

3. 供試材

今日、巨大船の船殻に多量に使用されている船体用鋼板の代表として、一般船体用軟鋼板の KAS 鋼（板厚 25.4mm, As Rolled 材）と、船体用 50 キロ級高張力鋼板の K5D 鋼（板厚 25.4mm, As Rolled 材）を各 1 チャージ供試した。

供試材の化学成分ならびに機械的性質を表 3.1 に示す。

なお、KAS 鋼は 5 個の鋼塊から各々圧延された鋼板が供試され、K5D 鋼は 3 個の鋼塊から各々圧延された鋼板が供試された。昭和 48 年度に実施された各種試験の試験片に当てられた供試材板取りを、図 3.1、図 3.2 に示す。

先にも記したが、昭和 48 年度は KAS 鋼板のエレクトロガス溶接継手、エレクトロスラグ溶接継手、ならびに K5D 鋼板のエレクトロガス溶接継手、消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接（CES 溶接）継手を研究の対象にした。各継手の溶接条件は、委員会で十分検討された後表 3.2 に示すごとく決定され、昭和 48 年度供試試験片の継手は、全て表 3.2 の溶接条件で溶接された。

4. 供試材の靱性に関する基礎データの把握

4.1 丸棒引張試験

4.1.1 目的

KAS 鋼および K5D 鋼の母材およびそれらのエレクトロガス溶接、エレクトロスラグ溶接、CES 溶接による溶接金属の基本的な強度の温度特性を得るために、低温における丸棒引張試験を実施したものである。

4.1.2 試験内容

図 4.1.1 に示す形状の丸棒引張試験片（JIS Z 2201 No. 10）を、母材および溶接金属から各系列 7～10 本ずつ採取した。母材試験片はその長さ方向を圧延方向とし、また、溶接金属試験片はその長さ方向を溶接線方向と一致させて採取した。それぞれの試片の中心は板厚の中央とした。これらの試験を室温から -196°C の範囲で液体窒素、イソペンタン、ドライアイスおよびアルコール等を冷媒として所定の温度に冷却し、降伏応力、引張強さ、伸びおよび絞り を測定した。

4.1.3 試験結果および考察

試験結果を表4.1.1および表4.1.2にまとめ、これらをまた図4.1.2～図4.1.4に示した。このうち降伏応力の温度依存性について整理し直すと、図4.1.5および図4.1.6に示すように、比較的に指数表示できるが、全温度範囲にわたっては必ずしも一つの直線で表示するには無理があるものもあり、R.T.～ -196°C のほか他の温度範囲についても最小自乗法により実験式を導いた。これらを同図および表4.1.3に示した。

これより、一般に温度範囲が低温域に広がる程指数すなわち温度依存性が小さくなること、KAS鋼とK5D鋼とを比較すると、母材、溶接金属ともKAS鋼の方が、また母材と溶接金属とを比較すると、KAS鋼、K5D鋼共母材の方が降伏応力は低目で温度依存性が大きい。エレクトロガス溶接とエレクトロスラグ溶接との差はあまりないが、K5D鋼ではCES溶接の方が、やや低目で温度依存性がやや大きい。

なおKAS鋼の母材およびエレクトロガス溶接金属の伸びおよび絞りの遷移温度がやや高目に出ているようである。

4.1.4 まとめ

KAS鋼およびK5D鋼の母材およびそれらのエレクトロガス溶接、エレクトロスラグ溶接ならびにCES溶接による溶接金属の基本的な強度の温度特性を得るために、低温丸棒引張試験を実施し、降伏応力、引張強さ、伸び、絞りを測定した。その結果KAS鋼の母材およびエレクトロガス溶接金属の伸びおよび絞りの遷移温度がやや高目であること、また降伏応力は母材、溶接金属ともKAS鋼の方が、KAS鋼、K5D鋼共溶接金属よりも母材の方が低目であり、かつ温度依存性が大きいことがわかった。

4.2 硬度分布・組織調査

4.2.1 目的

供試鋼板について、各種大入熱溶接による材質変化を把握するため、溶接継手部のビッカース硬さ分布ならびに顕微鏡組織調査を行ない、大入熱溶接継手部の靱性評価に関する参考データを得ることを目的とした。

4.2.2 試験内容

調査は、KAS鋼についてはエレクトロガス溶接継手部およびエレクトロスラグ溶接継手部について、またK5D鋼についてはエレクトロガス溶接継手部およびCES溶接継手部について行なった。

試験片は、各溶接継手とも、溶接始端部より約150 mm および終端部より約150 mm の各位置から採取した。

ビッカース硬さ計（荷重10 kg）にて、各溶接継手部の板厚中央と表裏より2mm

の位置の硬さ分布を測定した。組織調査は、光学顕微鏡により倍率 100 倍にて行ない、4.3 項に記す V-ノッチシャルピー試験片のノッチ先端部に相当する位置の組織を重点的に撮影した。ビッカース硬さ測定および顕微鏡組織撮影要領を、図 4.2.1 に示す。

4.2.3 試験結果および考察

各溶接継手のビッカース硬さ分布の測定結果を図 4.2.2～図 4.2.5 に、これらの結果を取りまとめたものを表 4.2.1 に示す。写真 4.2.1～写真 4.2.4 に各溶接継手断面のマクロおよびミクロ組織を示す。なお各溶接継手部とも、先に述べたごとく溶接始端部分と終端部分とについて測定観察したが、両者での大きな差は認められなかったので、本報告では終端部分についての結果のみを記した。

以上の結果より次のことが明らかになった。

1) 各溶接継手板厚中央部において、ボンド部および熱影響部の最高硬さは、KAS 鋼の Elektrogas 溶接，Elektroschlack 溶接の場合約 160 Hv で、母材よりも約 30 Hv 高くなっている。また、K5D 鋼の Elektrogas 溶接，CES 溶接の場合、それぞれ 186 Hv，215 Hv で、母材よりも 30～60 Hv 程度高くなっている。さらに、各溶接継手とも溶接金属の硬さは平均値で母材より 35～40 Hv 程度高くなっている。

2) KAS 鋼の Elektrogas 溶接継手，Elektroschlack 溶接継手および K5D 鋼の Elektrogas 溶接継手，CES 溶接継手等各継手共、溶接による入熱のためにボンド部およびその外側の熱影響部に過熱組織であるウィドマン組織が認められ、かつ結晶粒が異常に粗大化しており、原オーステナイト結晶粒界にはフェライトが成長している。この領域は母材に比べてかなり脆化していると予想される。これらの組織的に認められる脆化領域は、板厚中央部において、KAS 鋼 Elektrogas 溶接継手の場合ボンドから約 6 mm までの範囲であり、Elektroschlack 溶接継手の場合ボンドから約 7.5 mm までの範囲である。また、K5D 鋼 Elektrogas 溶接継手ではボンドから約 2 mm までの範囲であり、CES 溶接継手ではボンドから約 4.5 mm の範囲となっている。いずれも通常の溶接継手に比べてかなり広い範囲にわたり脆化していることが推定される。

3) 各溶接継手共に、結晶粒粗粒化領域の外側には再結晶による細粒化域が認められ、粗粒域に比べて靱性の回復が予想される。この細粒化域は、KAS 鋼の場合、Elektrogas 溶接継手ではボンドから約 7～10 mm の間に、Elektroschlack 溶接継手では約 8～13 mm の間に存在している。また、K5D 鋼の場合、Elektrogas 溶接継手ではボンドから約 4～6 mm の間に、CES 溶接継手ではボンドから約 5～10 mm の間となっている。

4.2.4 まとめ

各溶接継手とも通常の溶接継手に比べて熱影響部の硬度上昇範囲は広く、ボンドおよびその近傍における最高硬さは母材に比べて 30 Hv 程度上昇している。しかし、CES 溶接継手の場合、水冷効果がきいて熱影響部の範囲もせまく最高硬さは 215 Hv である。

組織は、通常溶接継手に比べて結晶の粗粒化域の範囲が広く、ボンドおよびその近傍の結晶粒は異常に粗大化し、組織的にも脆化していることが予想される。

4.3 V-ノッチシャルピー試験

4.3.1 目的

供試鋼板について、各種大入熱溶接継手部の V-ノッチシャルピー試験を実施し、吸収エネルギー～温度、脆性破面率～温度遷移曲線を求め、靱性に関する基礎データを得ることを目的とした。

4.3.2 試験内容

試験は、KAS 鋼についてはエレクトロガス溶接継手部およびエレクトロスラグ溶接継手部について、また K5D 鋼についてはエレクトロガス溶接継手部および CES 溶接継手部について行なった。

V-ノッチシャルピー試験片は、母材および各溶接継手部の板厚中央より採取し、溶接金属中心部、ボンド部およびボンドから 2mm, 4mm, 8mm の熱影響部各位置の板厚断面にノッチを加工した。なお各試験片を採取後、マクロエッチしボンドの位置を確認後ノッチを加工した。試験片採取要領およびノッチ加工要領を図 4.3.1 に示す。

4.3.3 試験結果および考察

各溶接継手部より採取した試験片による試験結果の吸収エネルギー～温度ならびに脆性破面率～温度遷移曲線を、図 4.3.2 ～図 4.3.23 に示す。

図 4.3.24 ～図 4.3.27 は各溶接継手毎に示したもので、図 4.3.28 ～図 4.3.30 は、溶接金属中心部、ボンド部およびボンドから 2mm の熱影響部の各位置に対する遷移曲線を、供試 4 種類の溶接継手について比較したものである。さらに各溶接継手の溶接金属中心部、ボンド部および熱影響部に対する V-ノッチシャルピー試験結果の各種遷移温度 (v_{Tr15} , v_{Tr35} , v_{TrE} , v_{Trs}) およびシエルフエネルギー値を表 4.3.1, 図 4.3.31 等 に示す。

以上の V-ノッチシャルピー試験により概略次のことが明らかになった。

1) 各溶接継手共、ボンドおよびその近傍の熱影響部は靱性劣化が著しい。その理由は、溶接入熱が大きく、冷却速度が遅くなったため、この部分の結晶粒が異常に粗大化するとともに上部ベイナイトなどの中間段階組織が現れるこ

とにより靱性劣化したものと思われる。

細粒化域では靱性の劣化は認められず、KAS鋼の場合むしろ母材よりも良くなっている。この部分では、加熱温度がボンドおよび粗粒化域に比べて低いために、一度オーステナイトに変態したのち微細化した再結晶粒が粗大化しないうちに冷却されたため、靱性が劣化しなかったものと思われる。

2) 各溶接継手共、ボンド部および粗粒化領域のV-ノッチシャルピー試験結果の遷移現象は緩やかであり、シェルフエネルギーも小さい。

3) 各溶接継手のボンド部および粗粒化領域のV-ノッチシャルピー試験の破面状態を写真4.3.1に示す。これらの部分の50%脆性破面率遷移温度 vT_{rs} は、いずれも母材よりかなり高温側に移動している。ボンド部の vT_{rs} は母材に対して、KAS鋼エレクトロガス溶接継手では約33℃、エレクトロスラグ溶接継手では約47℃、K5D鋼エレクトロガス溶接継手では約98℃、CES溶接継手では約85℃上昇している。

4.3.4 まとめ

V-ノッチシャルピー試験結果から、供試したエレクトロガス溶接継手、エレクトロスラグ溶接継手およびCES溶接継手では、ボンド部および結晶粗粒化領域において、著しく靱性が劣化していることが認められた。また、靱性が劣化している範囲は、通常の溶接に比べて広いことが明らかになった。

4.4 小形C0曲げ試験

4.4.1 目的

本研究委員会共通供試材の母材および溶接継手部の靱性に関する基礎データを得るために、小形3点曲げ試験を実施し、供試材の脆性破壊発生に関する特性値の一つである限界C0曲げ(δ_c)を求めることを目的とした。

4.4.2 試験内容

(1) 供試材、溶接継手および試験片

供試材は板厚25.4mmの一般船体用軟鋼(KAS鋼)と船体用50キロ級高張力鋼(K5D鋼)であり、また研究対象とする溶接継手はKAS鋼のエレクトロガス溶接(E.G.溶接)およびエレクトロスラグ溶接(E.S.溶接)とK5D鋼のエレクトロガス溶接およびCES溶接である。

試験片は母材および溶接継手(溶接金属、ボンド)試験片ともに供試鋼板から、そのロール方向に直角にノッチが位置するように採取し機械切削で作製した。試験片板厚は原厚のまま、高さ(深さ)50mm、長さ300mmである。ノッチは板厚面に入れ、その長さ(深さ)は25mm、先端半径は0.1mmである。なお、溶接部試験片は両端部をマクロエッチし溶接部形状を確認したのち、溶接金属試験片については溶接金属中心に、ボンド試験片については板厚中心のボンドを

通るようにノッチを挿入した。溶接余盛は削除した。また、ノッチ尖鋭度の影響を調べるため各試験片につき各1本はASTM、BS規定のもとで入れた疲労亀裂をノッチとした。試験片形状寸法、試験片種類などを図4.4.1に示す。

(2) 試験方法

50 Ton アムスラー型試験機を使用し、図4.4.1の試験片の3点曲げ破壊試験を -10°C ～ -198°C の温度で行ない、各温度における δ_c を求めた。また、クリップゲージ変位をノッチ先端のC O Dに換算するために必要な試験片のRotational Factor (r)を求める試験を室温で行なった。

破壊試験は、 -78°C まではドライアイスで所定の温度に冷却したエチルアルコール中に試験片を浸けた状態で行ない、 -78°C 以下では試験片を液体窒素で十分冷却したのち液体窒素をとりのぞき、試験片温度が所定の温度に上昇してくるのをまって行なった。温度の測定は、ノッチ下部にパーカッション溶接した鉄-コンスタンタン熱電対と自記熱電記録計を用いて行なった。

δ_c はクリップゲージ変位(V_g)をrを用いてノッチ先端のC O Dに換算する方法(r法)、および有限要素法を適用し破壊荷重から求める方法(FEM)によってそれぞれ求めた。r法では V_g と荷重の関係をX-Yレコーダーで連続的に記録して限界クリップゲージ変位(V_c)を求めた。

rは、図4.4.2に示すようにノッチをはさんで両側に一定間隔で埋め込んだコンタクトストレンゲージ用鋼球間隔を負荷状態で精度 $1/1000$ の測長器を用いて測り、そのときの試験片の変形状態から図式的に求めた。

4.4.3 試験結果および考察

小形C O D曲げ試験結果をまとめて表4.4.1(1)～表4.4.1(4)に示す。

r法による V_c の δ_c への換算は図4.4.3に示すrと次式を用いて行なった。

$$\delta = \frac{V_g}{1 + (Z + C)/r(d - C)} \quad \text{----- (4.4.1)}$$

ここで δ ; ノッチ先端のC O D

V_g ; クリップゲージ変位

C ; ノッチ長さ

d ; 試験片高さ(深さ)

Z ; 試験片上端面よりクリップゲージまでの距離

r～ V_g の関係をKAS鋼母材、K5D鋼母材、KAS鋼E.G.溶接の溶接金属などについて求めたが、それぞれの値は図4.4.3に示すようにほぼ等しいので、他の試験片についても同曲線を適用した。なお、rを求めるための試験片変形状態の一例を図4.4.4に示すが、かなりよい精度でrが求められているといえる。

FEMでは σ_n/σ_y (試験片実断面の Nominal Skin Stress と降伏応力の比) が2.0以下のもののみについて求めた。

表4.4.1 をもとにして、各種試験片ごとに δ_c と温度の関係を図4.4.5(1) ～ 図4.4.5(10) にそれぞれ示す。なお、比較のため研究項目5.1中央切欠大形引張試験で得られた δ_c と温度の関係を併記した(母材についてはDBモデルを用い(後出(4.4.2)式)破壊応力より逆算した δ_c も示す)。破壊発生条件としてCODクライテリオソをとるならば、小形COD曲げ試験と大形引張試験の δ_c と温度の関係はほぼ一致することがこれまでのいくつかの研究では示されているが、本研究ではKAS鋼母材(図4.4.5(1))のほかは、大形試験の δ_c は小形COD曲げ試験の δ_c より低応力破壊温度範囲で全般的に小さく、低温になるにしたがって相違は大きくなっている。とくに溶接部については顕著である。

本試験では、ボンド部の試験結果に一つの特徴がみられた。すなわち、 -100°C を境として δ_c の値が不連続的に変化し“とび”の現象が認められる。これについてはボンド試験片のノッチが図4.4.1に示すように母材、ボンドおよび溶接金属の各部分にまたがって挿入されており、完全なボンドの試験になっていないことから、各部分の機械的性質、靱性の温度依存性などを総合的に検討考察する必要がある。さらに実験技術上の問題として、 -100°C 以下の試験でPOP-IN現象が起ったにもかかわらず、実験過程において確認できなかったかもしれない点も検討する必要がある。

ノッチ尖鋭度の影響については -78°C ～ -100°C で疲労亀裂試験片の δ_c を求めて調べた。図4.4.5(1)～図4.4.5(10)に示すようにノッチ先端半径 P が 0.1mm より小さい疲労亀裂試験片の δ_c は $P = 0.1\text{mm}$ の試験片の δ_c よりかなり小さく、ノッチ尖鋭度の影響がすべての試験片について認められた。

図4.4.6(1)および図4.4.6(2)にKAS鋼およびK5D鋼の母材と溶接部の δ_c と温度の関係をそれぞれまとめて示す。図4.4.6(1)のKAS鋼については、溶接金属は -70°C 以下の温度で、E.G.溶接、E.S.溶接とも母材より同温度での δ_c が大きい。また、E.S.溶接金属の δ_c はE.G.溶接金属の δ_c よりわずかに大きい。ボンド部は -100°C 以上の温度ではE.G.溶接、E.S.溶接ともに母材より δ_c が小さく靱性の低下が認められるが、 -100°C 以下の温度では逆に母材の δ_c よりボンドの δ_c は大きくなっている。同図にはK5D鋼の母材の結果も示してあるが、当然のことながらKAS鋼母材に比してK5D鋼母材の同温度における δ_c はかなり大きくなっている。図4.4.6(2)に示すK5D鋼については、母材の δ_c はE.G.溶接およびCES溶接の溶接部の δ_c よりかなり大きくなっており、溶接部の靱性は母材のそれよりも低下している。溶接金属では、CES溶接はE.G.溶接に比して δ_c はわずかに大きくなっている。ボンド部は -100°C 以下の温度では溶接金属に比べ δ_c は大きくなっているが、 -100°C 以上の温度ではほぼ同程度で

ある。

脆性破壊発生条件としてC O D クライテリオンをとると、小形試験結果から大形引張試験片の破壊応力を推定することができる。ここでは、研究項目5.1の中央切欠大形引張試験の破壊応力を本研究結果からつぎの手順で推定してみた。

母材の中央貫通切欠大形引張試験片では、一様引張外応力 σ とノッチの開口変位 $\delta(x)$ との関係が、Dugdale-Barenblatt モデルから次式のように求められている。

$$\delta(x) = \frac{8B\sigma_y}{\pi^2 E} \sin\alpha \int_x^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos\chi}{\sqrt{1-\sin^2\alpha \sin^2\chi}} \ln \left| \frac{\sin(\chi+\psi)}{\sin(\chi-\psi)} \right| d\chi \quad (4.4.2)$$

ここで $\sin\alpha = \sin\left(\frac{\pi a}{2B}\right)$

$$\sin\chi = \sin\left(\frac{\pi x}{2B}\right) / \sin\alpha$$

$$\sin\psi = \sin\left(\frac{\pi c}{2B}\right) / \sin\alpha = \cos\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_y}\right)$$

p ; ノッチ先端に生じた塑性域長さ

$2c$; ノッチ長さ

$$a = p + c$$

$2B$; 試験片幅

σ ; 一様引張外応力

σ_y ; 試験温度での降伏応力

E ; ヤング率

破壊条件 δ_c = 一定 (すなわち小形C O D 曲げ試験の δ_c = 中央切欠大形引張試験の δ_c) の仮定から、(4.4.2) 式の δ に本試験で得られた δ_c 値を代入すれば、中央切欠大形引張試験片での破壊応力が計算できる。母材についての計算結果を図4.4.7(1) に示した。

溶接部の試験については(4.4.2) 式は適用できないが、ここでは参考のため、KAS 鋼のE.G. 溶接およびK5D 鋼のCES 溶接の溶接金属について(4.4.2) 式を用い同様に破壊応力を推定し、図4.4.7(2) および図4.4.7(3) に示した。

図4.4.7(1) ~ 図4.4.7(3) をみると、KAS 鋼の母材では、かなりよく小形C O D 曲げ試験から大形引張試験の破壊応力を推定することができたが、その他については、推定破壊応力曲線は実験値に比べ同温度でかなり高い値を示している。

図4.4.8(1) ~ 図4.4.8(3) に破壊荷重と温度の関係を示す。母材および各溶接部相互の関係は、傾向的に δ_c と温度の関係で示されたとはほぼ同じであり、

破壊荷重からも前述したことが指摘できる。

試験片はすべて最大荷重に達するまえに破壊し、また破面はすべて脆性破面であった。肉眼による破面観察からは POP-IN 現象が起きていたか判断することはできなかった。

4.4.4 まとめ

K5D鋼板では、エレクトロガス溶接およびCES溶接ともボンド部ならびに溶接金属部の靱性は母材に比べ低下している。

KAS鋼板では、エレクトロガス溶接およびエレクトロスラグ溶接で、ボンド部の靱性は約 -100°C 以上の温度で母材に比し低下している。溶接金属部の靱性は全般的に母材に比べよいといえる。

ボンド部の δ_c ～温度曲線で約 -100°C を境にして不連続的に低温側に遷移する現象がみられたが、この点については今後さらに検討する必要がある。

ノッチ尖鋭度の影響が認められ、疲労亀裂をノッチとした試験片では機械加工されたノッチ（先端半径 0.1mm ）の試験片に比べ δ_c は小さくなった。

本試験と中央切欠（板厚貫通）大形引張試験との同温度での δ_c 値の良好一致は、KAS鋼板の母材を除いてあまり得られず、とくに低温側では差異は大きかった。

5. 脆性破壊発生に関する研究

5.1 中央切欠（板厚貫通）大形引張試験

5.1.1 目的

本研究部会の昭和48年度研究共通供試材および溶接継手について、中央切欠付きの大形引張試験片を用いて引張破壊試験を行ない、母材、溶接ボンド部および溶接金属の脆性破壊発生特性を把握することを目的とした。

5.1.2 試験内容

(1) 試験片形状

中央切欠大形引張試験片の形状と寸法を図5.1.1に示す。試験片は母材、溶接継手ともに母材の圧延方向と引張方向が一致するように採取した。また、溶接継手部の試験片は表裏面の余盛を削除した。

試験片の切欠きは板厚貫通の機械加工切欠きで、供試鋼板と溶接方法との組合せについて、それぞれ母材、溶接金属中央およびボンド部の3種類とした。試験片幅（2B） 400mm に対し切欠き長さ（2C）は 160mm で、切欠きの先端より 3mm は 0.2mm 幅のソウカットノッチを加工した。ボンド部に切欠きを入れた試験片については、切欠き先端位置の正確を期するため、先端より 15mm の位置を

長軸端とする幅10mmの長円孔を設け、内部をエッチングし板厚の中央部におけるボソドの位置を確かめて、この位置に加工した。

(2) 試験方法

試験片の両端を引張治具に溶接取付けして引張試験機に装着し、引張破壊試験を行なった。試験に際しては、試験片の両面に装着した冷却槽により試験片を所定の温度に冷却した後引張荷重を加え、試験中の荷重変化および切欠きの開口変位量(Crack Opening Displacement)の計測を行なった。

開口変位量の計測にはクリップゲージを用い、切欠先端から7～8mmの位置の変位(V_q)と荷重との対応を計測し、破壊時の変位(V_c)などを求めた。また試験温度は試験片につけた熱電対により測定した。

5.1.3 試験結果および考察

表5.1.1にKAS鋼板およびK5D鋼板母材に関する試験結果を示す。

表5.1.2～表5.1.5にKAS鋼板とK5D鋼板の各溶接継手に関する試験結果を示す。

ここで破壊靱性値 K_{IC} は次の(5.1.1)式で計算した値である。

$$K_{IC} = \sigma_g \sqrt{\pi C} \cdot f\left(\frac{C}{B}\right) \text{-----}(5.1.1)$$

ただし
$$f\left(\frac{C}{B}\right) = \sqrt{\frac{2B}{\pi C} \cdot \tan \frac{\pi C}{2B}}$$

2B ; 試験片幅

2C ; 切欠長さ

σ_g ; 破壊時の断面平均応力 (q_{gross} 応力)

(5.1.1)式は破壊応力が全面降伏応力に近い場合、あるいはそれ以上になる場合には適用が困難であるが、これらの場合にも形式的に(5.1.1)式を適用して表5.1.1～表5.1.5中に示した。なお破壊応力が全面降伏応力以上となったものについては*印で示した。

また、切欠先端位置での限界COD値(ノッチテップCOD, δ_C)については、以下に示す(5.1.2)式を用い、CODの計測値 V_c 値を換算したものを示している。

$$\delta_C = V_{qc} \cdot \frac{I(C)}{I(X)} \text{-----}(5.1.2)$$

$$I(\psi) = \int_Y^{\pi/2} \frac{\cos \chi}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha \cdot \sin^2 \chi}} \ln \left| \frac{\sin(\chi + \psi)}{\sin(\chi - \psi)} \right| d\chi$$

ただし $\sin \gamma = \sin(\pi \psi / 2B) / \sin \alpha$

$\sin \psi = \sin(\pi C / 2B) / \sin \alpha$

$$\sin \alpha = \sin (\pi C / 2 B) / \cos (\pi \sigma_g / 2 \sigma_y)$$

α ; 限界 COD の計測位置の座標点 (切欠中心を原点とする)

C ; 切欠先端位置の座標点 (切欠中心を原点とする)

B ; 板の半幅

σ_g ; Gross 応力

σ_y ; 降伏応力

δ_c の計算には、4.1 項の丸棒引張試験において求められた降伏点の値を用いた。ボンド部切欠試験については母材の降伏点の値を用いて計算した。また、全面降伏応力をこえた応力に対応する場合については、全面降伏応力に達したときの $I(C)/I(\alpha)$ の値を用いて計算した。

図 5.1.2 (1) ~ 図 5.1.2 (4) には、供試 2 鋼種と溶接法について ネット断面破壊応力と温度との関係を示した。図中の曲線は実験点を適宜結んで破壊応力の温度依存傾向を示したものである。ボンド切欠試験片では多段の破壊を生じたものがある。図中には 1 次破壊 (POP-IN) に対応する応力値と最終破壊に対応する応力値を矢印で結んで示した。ただし、1 次亀裂の停止したときの亀裂長さが明瞭に判定できないものについては、最終破壊応力を初期ネット断面積について求めた値を () をつけて表示した。

図 5.1.3 (1) ~ 図 5.1.3 (4) には破壊発生応力に対する限界開口変位量 (ノッチテップ COD) δ_c を示した。多段の破壊を生じた試験片については、検知された 1 次破壊発生時の値を記載した。実験-換算値と温度との関係については相当のばらつきがあるが比較の便をはかるため、図中に平均的直線を記入した。

図 5.1.4 (1) および 図 5.1.4 (2) には、それぞれ KAS 鋼板および K5D 鋼板とその溶接継手について、脆性破壊の発生に関する破壊靱性値 K_c を図示した。

図 5.1.2 (1) ~ 図 5.1.2 (4) および 図 5.1.4 (1) , 図 5.1.4 (2) にみられるように、破壊発生応力あるいは破壊靱性値は、低温度域では母材、溶接金属、ボンドの順に低くなっている。ただし K5D 鋼板の CES 溶接継手では溶接金属とボンドの破壊靱性がわずかに逆転している。しかし高温側たとえば 0°C においては、破壊応力の差は小さく溶接金属の破壊強度が他のものに比べて高くなる傾向がみられる。しかしながら図 5.1.3 (1) ~ 図 5.1.3 (4) の限界開口変位 δ_c ~ 温度曲線によれば、高温域においても溶接部の靱性が母材に比べて低下していることが認められる。

限界開口変位量が母材に比べて小さいにもかかわらず、高温側で溶接金属の破壊応力が高くなるのは、溶接金属の降伏点が母材に比べて高いことおよび母材が塑性変形を生じることによって応力の緩和が行なわれるためと考えられる。これとは逆に、溶接ボンド部では溶接入熱の影響により靱性が劣化しているこ

とに加えて、溶接金属の降伏点が高いためボンド部近傍の塑性変形が拘束されて多軸応力状態となることもボンド部の靱性低下の一因になっていると考えられる。

5.1.4 まとめ

供試の KAS 鋼板および K5D 鋼板の大入熱溶接継手部の脆性破壊発生特性は、K5D 鋼板の CES 溶接継手を除き、母材、溶接金属、溶接ボンド部の順に低くなっている。溶接ボンドでは、大入熱により材質が劣化する傾向にあるとともに、強度的な不連続が生じていることが破壊特性に影響しているようである。材質不連続部の破壊靱性評価の手法については、今後の研究が待たれる。

5.2 十字型拘束引張試験

5.2.1 目的

大きな拘束と溶接による引張り残留応力が重畳する箇所に、欠陥等による応力集中部が存在すると、脆性破壊が発生し易いことは良く知られた事実である。

一般船殻においても、スチフナ端部、ブラケット端部あるいはスロット部などの隅肉溶接部では、大きな拘束あるいは3次元的な構造的な不連続による応力集中、溶接による残留応力等が重畳しているといえよう。

実際の船殻構造との対応は別問題として、中央切欠きを有した主板の両面に不連続な縦方向（荷重方向）スチフナが隅肉溶接によってついているような拘束部を有した3次元立体試験片を供試し、母材およびエレクトロガス溶接継手ボンド部、エレクトロスラグ溶接継手ボンド部からの脆性破壊発生特性を把握することを目的とした。

5.2.2 試験内容

荷重方向に不連続なスチフナを主板に隅肉溶接した3次元立体試験片を供試した。スチフナは断続しており、その間隔 L を 0 mm, 20 mm, 70 mm, 120 mm の4種に変化させてその影響を調べた。なお、スチフナ高さは全高 160 mm とした。また、スチフナ不連続部の主板には荷重直角方向に全長 36 mm の中央切欠きを隅肉溶接する前に機械加工により設けてある。

スチフナ間隔 $L = 0$ mm の試験片を A 型、 $L = 20$ mm の試験片を B 型、B' 型、 $L = 70$ mm の試験片を C 型、 $L = 120$ mm の試験片を D 型とした。これら供試試験片の形状および寸法を図 5.2.1～図 5.2.5 に示す。

図 5.2.1 に示した A 型と図 5.2.2 に示した B 型は、スチフナ不連続部も隅肉溶接を通して溶接している。図 5.2.3 に示した B' 型では隅肉溶接は通していない。また、図 5.2.4 および図 5.2.5 に示した C 型および D 型では、スチフナ端部で隅肉溶接をまわし溶接している。したがって、A 型と B 型では、主板に加工された切欠き先端部は、スチフナの隅肉溶接による入熱の影響をかなり受け

ていると思われる。

KAS鋼板母材を主板にし、A型、B型、C型およびD型試験片を各6個製作し供試した。また、エレクトロガス溶接継手を有したKAS鋼板を主板にし、溶接継手ボンド部に切欠きを加工したA型、B型、C型およびD型試験片を各6〜7個製作し供試した。さらに、エレクトロスラグ溶接継手を有したKAS鋼板を主板にし、溶接継手ボンド部に切欠きを加工した、A型、B'型およびC型試験片を各4〜6個製作し供試した。

各試験片共、供試試験片と同一断面の十字型タブ板に、主板、スチフナ共に突き合せ溶接し、タブ板を通してテストリグで引張試験した。

試験温度は、後述の如く 26°C 〜 -122°C としたが、試験片主板両面の切欠き断面の両側にそれぞれ冷却槽を取り付け、液体窒素あるいはドライアイス等で所定の試験温度に冷却、一定時間保持した後試験した。なお、切欠き断面各位置その他にパーカッション溶接により取り付けした鉄-コソスタンタン熱電対等により、試験片の温度を計測した。

各試験片について脆性亀裂発生に対する限界CODを測定した。エレクトロスラグ溶接継手ボンド部に切欠き加工したB型およびC型試験片では、切欠き中央の板厚中央部にカソチレバー型クリップゲージを取り付けて計測したが、その他の試験片では、切欠き先端より4mmおよび6mmの位置にクリップゲージを取り付けて計測した。なお、クリップゲージ装着については、先に述べた試験片形状、寸法図(図5.2.1〜図5.2.5)の中にも記してある。

5.2.3 試験結果および考察

KAS鋼板母材を主板にしたA型、B型、C型およびD型試験片についての引張試験結果を、表5.2.1に示す。また、エレクトロガス溶接継手を有したKAS鋼板を主板にし、溶接継手ボンド部に切欠きを加工した、A型、B型、C型およびD型試験片についての引張試験結果を、表5.2.2に示す。同様に、エレクトロスラグ溶接継手を有したKAS鋼板を主板にし、溶接継手ボンド部に切欠きを加工した、A型、B'型およびC型試験片についての引張試験結果を、表5.2.3に示す。

以上の引張試験結果一覧表に記した如く、切欠き先端から脆性亀裂が発生すると同時に試験片が破断した場合と、切欠き先端から発生した脆性亀裂が一時的に停止し、応力再配分して再度脆性亀裂が発生した場合とが認められた。そこで、切欠き先端からの脆性亀裂発生条件、すなわち1次亀裂発生条件のNet Stress σ_m と試験温度との関係を、母材、エレクトロガス溶接継手ボンド部およびエレクトロスラグ溶接継手ボンド部に各々切欠き加工した試験片のグループ別に図示すると、図5.2.6〜図5.2.8の如くなる。

図5.2.6〜図5.2.8に示した全ての試験結果を同一グラフに示すと、図5.2.9

の如くなる。

さらに、母材、エレクトロガス溶接継手ボンド部およびエレクトロスラグ溶接継手ボンド部に各々切欠き加工した試験片のグループ別に、1次亀裂発生に対する限界COD計測値 V_{c1} と温度との関係を図示すると、図5.2.10~図5.2.12の如くなる。

図5.2.8に示したエレクトロスラグ溶接継手ボンド部に切欠き加工したC型試験片による試験結果を見ると、4個供試した試験片の内の1個(試験片符号C-4)の試験結果が、他の3個の試験結果からかなり掛け離れている。しかしながら、エレクトロガス溶接継手ボンド部に切欠き加工した同じC型の試験結果(図5.2.7)と比較すると、この掛け離れた1個の試験結果と良く一致している。したがって、図5.2.8に示した如く、エレクトロスラグ溶接継手ボンド部に切欠き加工したC型試験片の脆性亀裂発生条件は、この掛け離れた1個(試験片符号C-4)の試験結果が代表するものとみなした。なお、このことは、図5.2.11、図5.2.12等より V_{c1} に対しても言えることである。

さらに、図5.2.6~図5.2.9等から、亀裂発生応力 $\sigma_{n1}=15\text{ kg/mm}^2$ での発生温度 $\sigma_{15}T_i$ を求め、エレクトロガス溶接継手ボンド部あるいはエレクトロスラグ溶接継手ボンド部からの発生温度 $\sigma_{15}T_i$ が、同一形状の試験片による母材での発生温度 $\sigma_{15}T_i$ からどの程度変化しているかを求め図示すると、図5.2.13の如くなる。ただし、エレクトロスラグ溶接継手ボンド部に切欠き加工したB'型試験片による発生温度 $\sigma_{15}T_i$ については、母材のB型試験片による $\sigma_{15}T_i$ と比較した。

図5.2.13から明らかな如く、エレクトロスラグ溶接継手ボンド部に切欠き加工したB'型試験片による発生温度 $\sigma_{15}T_i$ が、母材のB型試験片による $\sigma_{15}T_i$ より低温になっているのは、先に述べたごとく、B型試験片とB'型試験片とではスチフナ隅肉溶接による入熱の影響が、かなり異なるためであると考えられる。因に、エレクトロスラグ溶接継手ボンド部に切欠き加工したB'型試験片による $\sigma_{15}T_i$ と、母材のC型試験片による $\sigma_{15}T_i$ とを比較すれば、ボンド部からの発生温度は約16℃高温側に移動している。

なお、供試した全試験片の破断面スケッチを図5.2.14~図5.2.24に、破断面写真を写真5.2.1~写真5.2.13に示す。

以上の十字型拘束引張試験結果を要約すると下記の如くなる。

- 1) 母材、エレクトロガス溶接継手ボンド部共に、A型およびB型試験片による脆性亀裂発生特性に有異差は認められない。
- 2) エレクトロガス溶接継手ボンド部とエレクトロスラグ溶接継手ボンド部の、A型試験片による脆性亀裂発生特性に、有意差はないとみなせる。
- 3) 母材とボンド部の脆性亀裂発生特性の差は、A型およびB型試験片では

小さいが、D型試験片では大きく、亀裂発生応力と温度との遷移曲線で約50℃の差が認められる。

4) A型およびB型試験片程度の拘束と溶接による入熱および引張り残留応力の影響が重畳されると、KAS鋼母材では約18℃、エレクトロガス溶接継手ボンド部およびエレクトロスラグ溶接継手ボンド部では約25℃まで低応力破壊する。

5) A型およびB型試験結果とD型試験結果では、亀裂発生応力15 kg/mm²での発生温度で、母材では約100℃、エレクトロガス溶接継手ボンド部で約60℃の差が認められる。

5.2.4 まとめ

KAS鋼母材、エレクトロガス溶接継手ボンド部およびエレクトロスラグ溶接継手ボンド部のA型あるいはB型試験片による十字型拘束引張試験結果は、スチフナの隅肉溶接に起因する入熱および残留応力の影響、ならびにスチフナの拘束あるいは3次元的な構造的な不連続に起因する応力集中の影響等により、脆性破壊発生温度が著しく高温側に遷移している。仮に実際の構造物が、このような状態にある場合には、使用温度が比較的高くても、極めて低い応力で破壊に至る危険性がある。しかしながら、上述の供試試験片は非常に過酷な状態を想定したものであり、実際の船殻構造にはこのような過酷な状態はあり得ないと思われ、実際の船殻での脆性破壊発生特性を評価することは、今後更に検討する必要がある。

6. 脆性破壊伝播に関する研究

6.1 中形伝播試験

6.1.1 目的

供試船体用鋼板KAS鋼とK5D鋼の母材について、温度勾配型二重引張試験を行ない脆性破壊伝播特性を調査することを目的とした。

6.1.2 試験内容

試験片は標準の幅500mmの二重引張試験片を採用したが、一部二重引張試験に失敗したものについてはESSO試験片に再加工して試験を実施した。試験片の形状と切欠部詳細を図6.1.1に示す。これらを1200トンテストリグに取付け、ドライアイスとアルコール、温水あるいは液体窒素などによって試験片亀裂伝播部に所定の温度勾配(0.25~0.3℃/mm)を与え、一様引張応力を負荷した。そして亀裂発生部を100トン補助引張装置によって引張り、脆性亀裂を発生させ、その伝播特性を調べた。またESSO試験での亀裂の発生は落重式打撃

装置によって、あらかじめ切欠部に挿入しておいた楔を 75 kg-m の打撃エネルギーにて打込むことにより行なった。なお切欠部は脆性亀裂が発生しやすいように液体窒素で付加的に冷却した。また試験片に与えた温度勾配の計測はパークッション溶接した 12 本の CA 熱電対によって行なった。

6.1.3 試験結果および考察

試験結果を表 6.1.1 に示す。また、試験時の試験片の温度分布を KAS 鋼については図 6.1.2 に、K5D 鋼については図 6.1.3 に示し、亀裂の伝播状況をそれぞれ写真 6.1.1 と写真 6.1.2 に示す。

脆性破壊の伝播に関する K_c 値は次式によって求めた。

$$K_c = f(\gamma) \sigma \sqrt{\pi C} \quad \text{-----} \quad (6.1.1)$$

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

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

σ ; 負荷応力

C ; 伝播亀裂長さ

B ; 試験片幅

K_c 値と絶対温度の逆数 $1/T_K$ には図 6.1.4 の関係があり、KAS 鋼, K5D 鋼についてそれぞれ次式が成り立つことがわかる。

$$K_c = 2.45 \times 10^7 e^{-3323/T_K} \quad \text{-----} \quad \text{KAS 鋼}$$

$$K_c = 7.08 \times 10^{11} e^{-5580/T_K} \quad \text{-----} \quad \text{K5D 鋼}$$

この関係をもとに計算した、長さ (C) 10 mm と 100 mm の亀裂が伝播停止する限界条件を応力と温度の関係で示すと図 6.1.5 のようになる。公称降伏点の $1/2$ が負荷された状態で C が 10 mm (WES G 種) と 100 mm (WES A 種) の亀裂が停止する温度を求めると、KAS 鋼についてはそれぞれ -13°C (G), $+12^\circ\text{C}$ (A) であり、K5D 鋼についてはそれぞれ -28°C (G), -15°C (A) となる。

6.1.4 まとめ

供試した一般船体用軟鋼板 KAS 鋼と船体用 50 キロ級高張力鋼板 K5D 鋼の母材について、温度勾配型の二重引張試験と ESSO 試験を行ない、脆性破壊伝播特性を調査した。結論として、亀裂の伝播に関する K_c 値と絶対温度 T_K との関係が KAS 鋼と K5D 鋼についてそれぞれ得られ、 $K_c = 2.45 \times 10^7 e^{-3323/T_K}$, $K_c = 7.08 \times 10^{11} e^{-5580/T_K}$ の関係があることがわかった。

6.2 荷重条件の影響に関する試験

6.2.1 目的

温度勾配型二重引張試験において、試験片端部の剛性が脆性亀裂の伝播および停止挙動におよぼす影響を調べることを目的とした。

6.2.2 試験内容

(1) 試験片形状

供試材はKAS鋼である。

試験片形状は図6.2.1に示すような標準型二重引張試験片である。試験片端部の剛性の影響を調べるために、ピン間距離を一定(約3010mm)にしたままタブ板の板厚や長さを種々に変えて試験した。試験条件の一覧を表6.2.1に示す。

(2) 試験方法

実験では脆性亀裂の伝播速度および荷重低下を計測した。亀裂の伝播速度は、試験片の切欠線方向に等間隔(30mm, 一部50mm)に貼ったクラックゲージで測定した。また、荷重低下は図6.2.1に示すように、Sシリーズは試験片端部(点A)、YA~YDシリーズについては薄いタブ板の中央(点B)に貼ったひずみゲージで測定した。

試験は全て2000トソ横型テストリグで行なった。

6.2.3 試験結果および考察

試験結果を表6.2.2に示す。脆性亀裂の伝播速度および荷重の変化率の測定結果を図6.2.2(1)~図6.2.2(7)に示す。

一般に K_{Ic} 値は次式で計算される。

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi C} \left[\frac{2B}{\pi C} \tan \frac{\pi C}{2B} \right]^{1/2} \text{----- (6.2.1)}$$

ただし σ ; グロス応力

C ; 停止クラック長さ

B ; 試験片幅 (= 500mm)

(6.2.1)式を用いて求めた K_{Ic} の温度依存性を、図6.2.3に示す。同図中には参考として6.1項で行なった試験結果も示してある。

図6.2.3から明らかなように、脆性破壊伝播停止特性は端部の剛性の影響を受ける。標準タブを用いた場合(Sシリーズ)に比して薄板タブを用いた場合(YA~YDシリーズ)、 K_{Ic} 値は見掛け上低下している。また、薄板タブ同志でも、薄板タブの長さが長いほど(YC, YDシリーズ)、結果は若干さらに低下している。しかし、薄板タブの板厚の違い(13mmと19mm)は結果にはほとんど影響を及ぼさない。

試験は同一試験機で行なったものであるため、このような差はタブ板の剛性の差によるものと考えられる。

端部の剛性（荷重条件）の影響について、金沢ら⁽⁴⁾は静的な弾性計算で解析し、試験片の長さを変えた実験結果を実用上満足できる程度に説明している。そこで、ここでも金沢らの手法を使って端部剛性の影響を考慮して K_c 値を求める。

一般の荷重条件での K 値は、定荷重状態の K を K_{fl} とすると、

$$K = p(\alpha, \gamma, \lambda) K_{fl} \text{-----}(6.2.2)$$

ただし α ; タブ板を含めた試験機の剛性を表わすパラメータである
($0 \leq \alpha \leq 1$)

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{定荷重条件} \\ \alpha = 1 & \text{定変位条件} \end{cases}$$

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

$$\lambda = \frac{L}{B} \quad (2L; \text{試験片長さ})$$

また、 γ は一般の荷重条件におけるクラックの伝播に伴う荷重変化率を表わす係数で、次式で与えられる。

$$p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{1 + \frac{\pi\alpha}{2\lambda} \int_0^\gamma [K_{fl}]^2 d\gamma} \text{-----}(6.2.3)$$

$$\text{ここで } [K_{fl}] = \frac{K_{fl}}{\sigma\sqrt{\pi B}}$$

K_{fl} は有限板の場合

$$K_{fl} = \sigma\sqrt{\pi C} \cdot f(\alpha=0, \gamma, \lambda) \text{-----}(6.2.4)$$

となり、係数 f は石田⁽²⁾によって計算されている。

結局一般の荷重条件の K 値は、(6.2.2)式および(6.2.4)式より

$$K = \sigma\sqrt{\pi C} \cdot p(\alpha, \gamma, \lambda) \cdot f(\alpha=0, \gamma, \lambda) \text{-----}(6.2.5)$$

で求められる。

(6.2.5)式から K_c 値を計算する場合、各シリーズの実験に対してタブ板を含めた試験機の剛性を表わすパラメータ α の値を決めなければならない。標準タブを用いた場合、および薄板タブを用いた場合のバネモデルを図6.2.4に示す。ここでは板厚60mmのタブ板は、試験片および薄板タブに比して板厚が極端に厚いため剛体として扱う。

Sシリーズの α を α_s 、YA～YDシリーズの α を α_y とすると、

$$\alpha_s = \frac{\bar{m}}{\bar{m} + m(0)} \text{-----} (6.2.6)$$

$$\alpha_Y = \frac{\bar{m}_e}{\bar{m}_e + m(0)} \quad , \quad \bar{m}_e = \frac{m' \bar{m}}{m' + \bar{m}} \text{-----} (6.2.7)$$

ただし $m(0)$; $C = 0$ のときの試験片のバネ常数

$\bar{m}$; 試験機のバネ常数

m' ; 薄板タブのバネ常数

$\bar{m}_e$; 試験機と薄板タブを含めたときのバネ常数

α_s の値としては、従来の研究⁽⁴⁾ から一応 $\alpha_s = 0.75$ と仮定する。平板のバネ常数は

$$m = \frac{E}{\lambda} \text{-----} (6.2.8)$$

で与えられるから、 m_0 , m' を計算し (6.2.7) 式に代入すれば α_Y が求められる。

このようにして求めた α_Y は、

$$YA, YB \text{ シリーズ } \text{-----} \alpha_Y = 0.43 \approx 0.5$$

$$YC, YD \text{ シリーズ } \text{-----} \alpha_Y = 0.30 \approx 0.25$$

となる。

図 6.2.5 に $\alpha_{YAB} = 0.5$, $\alpha_{YCD} = 0.25$ としたときの荷重変化率の計算値と実験値の比較を示す。この図を見ると実験結果と計算結果は比較的良く一致している。

このことから

(1) 静的解析解で端部剛性の影響を近似することができる。

(2) 本試験機の剛性として $\alpha_s = 0.75$ (すなわち $\bar{m} = 6E$) と推定される。

$\alpha_s = 0.75$, $\alpha_{YAB} = 0.5$, $\alpha_{YCD} = 0.25$ として、本実験結果を解析したときの (6.2.5) 式で求められる K_c 値の温度依存性を図 6.2.6 に示す。この図には、6.1 項の実験結果も示してあるが、これらもタブ板を剛体として扱った上記の考えで解析したものである。

図 6.2.3 の結果と比較すると、端部剛性による K_c 値の差はほとんどなくなっている。 K_c 値は全体として (6.2.1) 式で求めるより (6.2.5) 式で計算した方が大きくなっており、その傾向は $YA \sim YD$ シリーズの方が大きい。この点をみるために (6.2.1) 式, (6.2.5) 式で計算した K 値の補正係数を図 6.2.7 に示す。(6.2.1) 式は周期クラック列の解であるのに対して、(6.2.5) 式は有限板 (幅方向および長さ方向) の解であるため、自由表面の補正が異なってくるためである。

一般の試験機剛性は $\alpha \approx 0.75$ と考えると、 $\alpha \leq 0.55$ までは (6.2.1) 式で求めた K 値と約 15% 程度の差であり、しかも (6.2.1) 式の結果は安全側にくる。

しかし $\delta > 0.6$ になると、(6.2.1)式の結果は逆に危険側の推定となってくる。したがって $\delta > 0.6$ に対しては、荷重低下を考慮して K_c 値を求める必要があると思われる。

6.2.4 まとめ

薄板タブを用いた二重引張試験を行ない、端部の剛性、荷重条件が脆性破壊伝播停止特性に影響を及ぼすことがわかった。この影響は静的なバネモデルで近似し、荷重低下の割合を推定することができるといえよう。

一般に、板幅に対しクラック長さが大きくなると荷重低下は大きくなり、 $\delta (= \frac{a}{b}) \geq 0.6$ になるとその影響を考慮して解析する必要があると思われる。

6.3 大形伝播試験

6.3.1 目的

高能率自動溶接法である、エレクトロガス溶接、エレクトロスラグ溶接およびCES溶接による、一般船体用軟鋼および船体用50キロ級高張力鋼それぞれの突合せ継手脆化部（ボンド部あるいは熱影響部に相当する）に、溶接欠陥等から発生したクラックが高速で伝播してきた場合、どのような伝播経路をとるか、またその伝播特性がどのようなものであるかを大形伝播試験片をもちいて調べることを目的とした。

6.3.2 試験内容

試験には、新たに開発された内部ノッチを有する幅1,500mm～2,000mmの大形伝播試験片が供試された。試験条件の温度分布は勾配型と平坦型が採用された。試験の対象とされた突合せ継手は、先に述べたごとく、軟鋼（KAS鋼、板厚25.4mm）のエレクトロガス溶接（EG溶接と略す）継手およびエレクトロスラグ溶接（ES溶接と略す）継手ならびに50キロ級高張力鋼（K5D鋼、板厚25.4mm）のエレクトロガス溶接継手およびCES溶接継手である。

もちいた試験片の形状および寸法を図6.3.1に示す。溶接施工の都合により、軟鋼のES溶接の場合、図6.3.1(a)に示すような1,500×1,500mmの試験片を用いているが、その他の溶接法の場合はすべて図6.3.1(b)に示すような2,000×2,000mmの試験片をもちいている。

なお、切欠の先端が継手のボンド部に位置するように機械加工してある。

また、比較のために、KAS鋼およびK5D鋼の母材について、図6.3.1(b)に示す突合せ継手つき試験片と同一形状の試験片をもちいて、脆性破壊伝播停止特性を調べた。試験片両端は、タブ板に溶接され、タブ板を通して800tonテストリグ（ピソ間距離約6m）または3,000tonテストリグ（ピソ間距離約5m）により負荷された。試験片とタブ板の溶接による、試験片中央部の脆性クラック伝播線上における拘束応力が歪ゲージにより測定された。

脆性破壊伝播試験は、適当な冷剤を用いた間接冷却により所定の温度分布に試験片を約10分間保ち、所定の荷重を負荷した後、落錘により切欠部に楔を打ち込み脆性クラックを発生伝播させた。

6.3.3 試験結果および考察

(1) タブ板溶接による拘束応力

試験片とタブ板の溶接による拘束応力の測定結果を、図6.3.2 および図6.3.3に示す。

図6.3.2は、板厚30mmのタブ板にKAS鋼のエレクトロガス溶接継手試験片を炭酸ガス半自動溶接法により溶接した場合の拘束応力を示したものである。図から明らかなように脆性クラック伝播線上における引張方向の拘束応力はせいぜい $\pm 1 \sim 2 \text{ kg/mm}^2$ であり、小さい。

一方、図6.3.3(b)は、板厚50mmのタブ板にK5D鋼の母材試験片をCES溶接法により溶接した場合の拘束応力を示したものである。この場合引張方向の拘束応力は、図6.3.2(b)に示す傾向と逆であり、またその値も少し大きい。測定例も少なくこの原因が何であるかよくわからないが、溶接法の違いなどもその一因に挙げられるのではないかと思われ、今後さらに再測定し、十分検討する必要がある。

(2) 母材の脆性破壊伝播停止特性

供試したKAS鋼母材およびK5D鋼母材の脆性破壊伝播停止特性を調べた試験の結果を、表6.3.1に示す。

表の中の K_{ca} 値は、脆性破壊伝播抵抗値であり、停止した位置における K 値として次の石田の厳密解⁽³⁾から求めたものである。

$$K = \sigma_g \cdot \sqrt{\pi C} \cdot F_A(\lambda, \varepsilon) \text{----- (6.3.1)}$$

ただし σ_g ; グロス応力

C ; 切欠を含めたクラック長さの $\frac{1}{2}$

$\lambda = \frac{C}{W_1}$ (図6.3.4参照)

$\varepsilon = \frac{e}{B}$ (図6.3.4参照)

$F_A(\lambda, \varepsilon)$; 偏心クラックに対する補正係数

なお、K5D鋼に対する K_{ca} 値には、図6.3.3(b)に示す拘束応力を考慮してある。

(6.3.1)式を用いて算出したKAS鋼およびK5D鋼それぞれの脆性破壊伝播抵抗値 K_{ca} の対数と絶対温度の逆数の関係を図6.3.5に示すが、両者の間には直線関係が存在する。また、K5D鋼の脆性破壊伝播抵抗値はKAS鋼のそれよりもかなり大きく、脆性破壊伝播停止特性が優れていることがわかる。

(3) エレクトロガス溶接継手部に沿う脆性破壊伝播

エレクトロガス溶接継手の脆化部すなわちボンド部や熱影響部に沿う脆性破壊伝播試験を行なった。試験条件の KAS 鋼および K5D 鋼の突合せ継手部における温度分布を、それぞれ図 6.3.6 および図 6.3.7 に示す。また試験結果の脆性破壊伝播経路を、それぞれ図 6.3.8, 図 6.3.9 および写真 6.3.1 に示す。

脆性クラックはボンド部に沿って直進するか、ある程度伝播して停止するか、あるいはボンド部から母材側へそれてしまうかのいずれかである。

ボンド部に沿って脆性クラックがある程度伝播した後停止する現象は、母材の場合と同様に、所定の温度分布の高温側へ伝播してきたことが主因であると考えられる。その停止部付近の破面にとくに異状は認められなかった。

また、ボンド部に沿って脆性クラックがある程度伝播した後母材側へそれる場合があるが、その付近の破面に溶接欠陥などの異状は認められず、冶金的に不均一な部分での伝播であるためと思われる。

なお、図 6.3.9 に示す試験片符号 K5D-EG-2 の場合、ボンド部に沿って伝播してきた後脆性クラックは枝分れを起こし、一方はすぐ停止したがもう一方は溶接金属を横切り反対側のボンド部に乗り移り直進している。しかしながら脆性クラックが枝分れを起こした付近の破面は、肉眼観察による異状は認められなかった。

これらの伝播現象の機構解明は、今後に残された大きな問題である。

なお、試験結果の一覧を表 6.3.2 に示すが、表中の K_{ca} 値は、脆性クラックがボンド部で停止した場合、先に示した (6.3.1) 式を用いて算出した値である。なお、この計算には溶接残留応力等の考慮は一切入っていない。また、脆性クラックが溶接ボンド部に沿って直進した場合、あるいはボンド部から母材側へ外れた場合、それぞれ平坦型温度分布の肩の位置あるいは外れた位置における K 値を同様に (6.3.1) 式から算出した。この場合、それらの位置に相当する温度では、ボンド部の脆性破壊伝播抵抗値はこの K 値以下であったと考えられる。

従来の脆性破壊伝播停止に対する考え方にしたがって求めた、エレクトロガス溶接ボンド部の脆性破壊伝播抵抗値 K_{ca} の対数と絶対温度の逆数との関係を、KAS 鋼については図 6.3.10 に、K5D 鋼については図 6.3.11 に示す。それらの図には、図 6.3.5 の母材についての結果も比較のために直線で示してある。

従来、母材についてであるが、V-ノッチシャルピー試験における 50% 脆性破面率遷移温度 $VTrs$ 、あるいはエネルギー遷移温度 $VTRE$ と、脆性破壊伝播抵抗値 K_{ca} とにはかなり良い相関関係があると言われている。

先に 4.3 項で述べたごとく、KAS 鋼、K5D 鋼共に、母材とエレクトロガス溶接継手ボンド部では、 $VTrs$ および $VTRE$ に大きな差が認められた。すなわち、ボンド部の靱性劣化は明瞭である。

しかしながら、図6.3.10および図6.3.11に示すように、脆性破壊伝播抵抗値 K_{Ic} には、KAS鋼、K5D鋼共に母材とボンド部との間にほとんど差が認められない。これは、脆性破壊伝播特性において、母材とボンド部と同等であると見なして良いのではなく、表6.3.2、図6.3.10および図6.3.11等に記したボンド部の K_{Ic} 値は、飽くまで見掛けの値であり、母材の K_{Ic} 値と対等に比較することに問題があると思われる。図6.3.8および図6.3.9に見られるように、ボンド部に沿って脆性クラックが直進している事実は、ボンド部の靱性が劣化しているからこそ起こる現象であると考えられる。

また、図6.3.8と図6.3.9とを比較すれば、エレクトロガス溶接継手においては、K5D鋼の方が、脆性クラックがボンド部に沿って直進しやすいと言えるようである。

なお、ボンド部の脆性破壊伝播現象に関しては、今後更に研究を続け、十分検討する必要がある。

(4) エレクトロスラグ溶接継手部およびCES溶接継手部に沿う脆性破壊伝播
前項で述べたエレクトロガス溶接継手部の場合と同様に、KAS鋼のエレクトロスラグ溶接継手部、およびK5D鋼のCES溶接継手部に沿う脆性破壊伝播試験を行なった。試験条件のKAS鋼およびK5D鋼の突合せ継手部における温度分布を、それぞれ図6.3.12および図6.3.13に示す。また、試験結果の脆性破壊伝播経路を、それぞれ図6.3.14、図6.3.15および写真6.3.2に示す。さらに、試験結果の一覧を表6.3.3に示す。

エレクトロガス溶接継手部の場合と同様、KAS鋼の場合はK5D鋼の場合より、脆性クラックがボンド部から母材へそれやすい傾向を有するようである。

また、エレクトロガス溶接継手部の場合と同様に、エレクトロスラグ溶接継手部あるいはCES溶接継手部の脆性破壊伝播抵抗値 K_{Ic} の対数と絶対温度の逆数との関係を、KAS鋼については図6.3.16に、K5D鋼については図6.3.17に示す。それらの図には、図6.3.5の母材についての結果も比較のために示してある。

KAS鋼のエレクトロスラグ溶接継手、あるいはK5D鋼のCES溶接継手においても、ボンド部の脆性破壊伝播特性については、先に述べたエレクトロガス溶接継手の場合とほぼ同様なことが言えるようである。

なお、脆性クラック伝播線上に貼付したCDゲージおよびタブ板のピン孔付近に貼付した歪ゲージにより、クラック伝播速度および荷重の低下率を数例について測定した。参考までにこれらを図6.3.18から図6.3.21に示す。これらの測定例から明らかなごとく、クラック伝播速度は脆化部の脆性破壊伝播であるにもかかわらず、比較的高温域での伝播のためか、これまでの測定例に比べて若干小さいように思われる。

6.3.4 まとめ

従来、一般船体用軟鋼あるいは船体用 50 キロ級高張力鋼の多層盛手溶接等による継手においては、使用荷重による溶接継手直角方向の応力がよほど大きくない限り、脆性クラックが溶接部に沿って直進するようにはあり得ないと考えられていた。しかし、継手の一部の靱性劣化がはなはだしい大入熱溶接継手においては、上述の常識論に反し、溶接継手直角方向の応力がそれほど大きくなくても、脆性クラックが溶接部に沿って直進する事もあり得ることが実験室的に認められた。

本研究においては、新たに開発された内部ノッチを有する大形伝播試験法により、KAS鋼のエレクトロガス溶接継手、エレクトロスラグ溶接継手およびK5D鋼のエレクトロガス溶接継手、CES溶接継手について、脆性クラックが比較的小さな応力条件でもボソド部に沿って直進する事実が再確認された。また、軟鋼の場合よりも 50 キロ級高張力鋼の方が、ボソド部に沿って直進しやすい傾向にあることも把握した。

しかし、靱性劣化を来しているボソド部あるいは熱影響部に沿って直進する脆性クラックの挙動を定量的に評価し、試験結果から船殻等の実構造物中での溶接部の脆性破壊強度を定量的に推定出来るようになるまでには、今後の積極的な研究努力が必要であろう。

7. 船体残留応力分布の把握

7.1 基礎試験

7.1.1 目的

近年、大型船の建造に際して極めて巨大な船殻ブロックによる建造法が採用され、高能率の大入熱による立向自動溶接法が用いられている。

大入熱溶接継手はその大入熱に加え溶接継手部の熱影響部、ボソド部等の靱性が劣化し溶接構造物の健全性を評価する上で重要な問題となる。このため前項目までに各種の大入熱溶接法を用いた溶接継手の脆性破壊試験が実施された。

しかしながら溶接継手には当然溶接による残留応力が存在しており、溶接継手部の脆性破壊発生特性あるいは亀裂伝播特性に影響をおよぼすことは良く知られた事実である。

本研究項目では、このような観点から主として 6.3 項の大形伝播試験に用いられた大形伝播試験片における脆性亀裂伝播挙動を考察するため、大入熱溶接継手の溶接残留応力分布を求めることを目的とした。

7.1.2 試験内容

(1) 試験片

残留応力分布の測定対象にした大入熱溶接継手は、次の3種類である。

溶 接 法	供試材	供試試験片寸法(mm)
a. エレクトロガス溶接	KAS	2,165 × 2,000
b. CES 溶接	K5D	2,019 × 2,027
c. エレクトロスラグ溶接	KAS	1,511 × 1,523

これら3種類の継手について、上記のように、各々1枚の溶接継手試験片を残留応力分布の計測に用いたが、溶接施工後の各試験片の板表面における溶接ビード幅、余盛高さ、および角変形は表7.1.1に示す通りであった。また各試験片の形状を図7.1.1(1)～図7.1.1(3)に示すが、それらの図には、試験片の溶接を施工する際に取付けられた変形防止用の拘束治具の位置や、銅当板用取付け治具の位置なども示してある。

(2) 計測方法

各試験片の溶接残留応力分布は、(A)溶接線全長のボソド部での分布、および(B)試験片中央部の板幅方向での分布の両者について計測した。

溶接残留応力の計測は、電気抵抗線式歪計を用い、試験片の所定の表裏面に歪計を貼付した後、分割法によって残留応力を解放して行なった。各試験片における歪計の貼付位置を、図7.1.1(1)～図7.1.1(3)に示す。用いた歪計の種類は下記の通りである。

継手試験片	歪 計 の 種 類	
	測定線(A) ボソド部	測定線(B) 中央幅方向
a. KAS鋼 エレクトロガス溶接	45度3軸ロゼット, $G.L.=5mm$	直交2軸ロゼット, $G.L.=5mm$
b. K5D鋼 CES溶接	45度3軸ロゼット, $G.L.=5mm$	直交2軸ロゼット, $G.L.=5mm$
c. KAS鋼 エレクトロスラグ溶接	45度3軸ロゼット, $G.L.=2mm$	直交2軸ロゼット, $G.L.=2mm$

本研究項目の初期の目的は、各試験片の溶接施工後の寸法形状での残留応力分布状態を求める事であったが、残留応力の解放を段階を追って行なうことにより、試験片の溶接線直角方向の幅をそのままとし、試験片の溶接線方向の長さを一定の長さで切断して形状を変化させながら各段階での残留応力分布が求まるように計測を行なった。これらの切断要領を図7.1.2(1)～図7.1.2(3)に示す。すなわち、KAS鋼エレクトロガス溶接継手(図7.1.2(1))では、溶接線直角方向の幅はそのままとし、溶接線方向の長さを溶接線の両端から

250mm づつ逐次切断して、各段階で歪変化を測定した。また、K5D鋼CES溶接継手では、最初に溶接線直角方向の幅を落として溶接線を中心に1,000mm幅(2,019mm × 1,000mm)にしてから、さらに溶接線の両端から500mmの長さで逐次切断しながら測定を行なった。さらに、KAS鋼エレクトロスラグ溶接継手では、最初に溶接ボンド部に沿って両端から長さ350mmの切欠(幅約1mm)を入れ、切欠延長上の残留応力分布を、別途に貼付した歪計により測定できるようにして、残留応力の解放を行なって求めた。なおK5D鋼CES溶接継手についても、途中の段階で1,000mm × 460mm(溶接ビード長さ460mm)の試片に切断された際に、長さ180mmのセンサーノッチ(幅約1mm)をボンド部に加えし、同様に切欠延長上の残留応力分布の計測を別途行なっている。

各試験片は、最終的には歪計を中心にしておよそ30mm × 40mmの切片までに分割し、残留応力を解放した。

7.1.3 試験結果および考察

各試験片は段階的に切断加工を行ないながら歪計の歪変化を読み取り、完全解放後の歪の読みと各段階での歪の読みの差から各段階の残留応力分布を計算により求めた。すなわち残留応力の算出は下記によって行なった。

(45度3軸ロゼットの場合)

$$\sigma_{1,2} = E \left(\frac{A}{1-\nu} \pm \frac{B}{1+\nu} \right) \text{----- (7.1.1)}$$

ここに $\sigma_{1,2}$; 主応力

$$A = \frac{1}{2} (\epsilon_a + \epsilon_c)$$

$$B = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2}$$

$\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c$; a, b, c 各方向の歪

E ; ヤング率 ($= 2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$)

ν ; ポアソン比 ($= 0.3$)

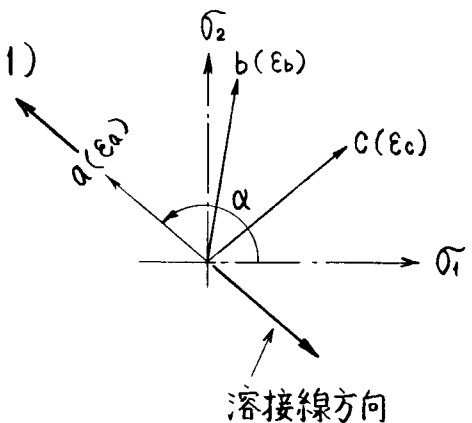
また主応力方向と a 方向(溶接方向)との成す角度 α は

$$\tan \alpha = \frac{2\epsilon_b - \epsilon_a - \epsilon_c}{\epsilon_a - \epsilon_c} \text{----- (7.1.2)}$$

である。

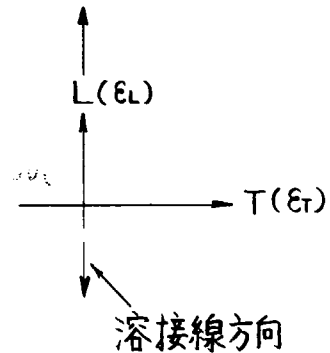
溶接線方向の残留応力 σ_{RL} (a 方向) およびこれと直角方向の残留応力 σ_{RT} は、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{RL} &= \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\alpha \\ \sigma_{RT} &= \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2(\alpha - \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \right\} \text{----- (7.1.3)}$$



(直交2軸ロゼットの場合)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{RL} &= \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_L + \nu \epsilon_T) \\ \sigma_{RT} &= \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_T + \nu \epsilon_L) \end{aligned} \right\} \text{---(7.1.4)}$$



ここに σ_{RL} ; 溶接線方向の応力
 σ_{RT} ; 溶接線に直角方向の応力
 ϵ_L ; L方向(溶接方向)の歪
 ϵ_T ; T方向(溶接線に直角方向)の歪

(1) KAS鋼エレクトロガス溶接継手の残留応力分布

KAS鋼エレクトロガス溶接継手の残留応力分布を、図7.1.3(1)～図7.1.3(6)および図7.1.4(1)～図7.1.4(5)に示す。図7.1.3(1)は溶接ボンド部に沿った溶接残留応力(試験片寸法 2,165 mm × 2,000 mm) σ_{RL} および σ_{RTL} の分布を示したものである。また、図7.1.4(1)は同じ継手の中央部における溶接線直角方向での残留応力(試験片寸法 2,165 mm × 2,000 mm) σ_{RLT} および σ_{RTT} の分布を示したものである。同試験片には溶接施工の際に約600 mmの間隔で拘束治具が取り付けられており、かなり拘束状態が強かったと考えられる。したがって図7.1.3(1)および図7.1.4(1)に見られるように、 σ_{RL} は溶接線の70%の長さにはわたっておよそ 30 kg/mm² の残留応力が分布しており、 σ_{RTL} は同じ範囲に最大約 8 kg/mm² の残留応力が分布している。そして中央部の溶接ビード中心の残留応力は、 $\sigma_{RLT} \div 39 \text{ kg/mm}^2$ 、 $\sigma_{RTT} \div 10 \text{ kg/mm}^2$ である。

図7.1.3(2)～(6)および図7.1.4(2)～(5)は、試験片を溶接線方向の両端から250 mm ずつ切断した時の、試験片形状の変化による残留応力分布の変化を示したものである。

(2) K5D鋼CES溶接継手の残留応力分布

K5D鋼CES溶接継手の残留応力分布を、図7.1.5(1)～図7.1.5(3)および図7.1.6(1)～図7.1.6(3)に示す。図7.1.5(1)および図7.1.6(1)は、溶接ボンド部での残留応力(σ_{RL} , σ_{RTL})分布および中央部溶接線直角方向での残留応力(σ_{RLT} , σ_{RTT})分布(試験片寸法 2,019 mm × 2,027 mm)を示したものである。同継手の拘束治具は、溶接始端から874 mm および1849 mm の位置に2箇所取り付けられており、比較的拘束が弱かったと考えられる。しかし図7.1.5(1)に見られるように、 σ_{RL} は溶接始端および拘束治具の中間で極大値を示し、およそ 30～35 kg/mm² の残留応力が存在している。 σ_{RTL} は溶接線の両端から150 mm ないし 200 mm の位置に12～13 kg/mm² 程度の引張残留応力の極大値が見られるが、それより内側の中央部分で測定値にバラツキがありはっきりしない。図7.1.6(1)では、試験片中央部の σ_{RTT} は幅の50%の範囲が圧縮残留応力に

っており、KAS鋼エレクトロガス溶接継手の場合と対称的である。中心における圧縮残留応力の最大値は、約 -13 kg/mm^2 程度である。この理由については、今後さらに検討する必要がある。

図7.1.5(2)～図7.1.5(3) および図7.1.6(2)～図7.1.6(3)には、各切断段階における残留応力分布を示した。

(3) KAS鋼エレクトロスラグ溶接継手の残留応力分布

図7.1.7 および図7.1.8にKAS鋼エレクトロスラグ溶接継手の溶接残留応力分布を示す。同継手は他の継手に比べ試験片の寸法が若干小さいが、拘束治具の取付けはK5D鋼CES溶接継手と同様な要領で取付けられている。

図7.1.7から分るように、ボンド部における残留応力 σ_{RL} の分布は、K5D鋼CES溶接継手の場合と同様に拘束材の中間部分に極大値が存在し、その値は $28 \sim 33 \text{ kg/mm}^2$ 程度である。また、 σ_{RL} はKAS鋼エレクトロスラグ溶接継手の場合、拘束治具のあった近くに引張の残留応力($12 \sim 13 \text{ kg/mm}^2$)が生じ、その他は数 kg/mm^2 程度の引張か圧縮の残留応力が分布し、溶接線の両端から僅か50 mm内側に約 -23 kg/mm^2 の局部的に大きな圧縮応力が存在している。試験片中央部における溶接線直角方向での残留応力分布は、図7.1.8に示すように中心に近い所で σ_{RT} が局所的に圧縮応力になっており、他の試験片の場合と異なった分布が見られる。この理由については、今後さらに検討する必要がある。

(4) 試験片の切断による残留応力の変化

図7.1.9(1)および図7.1.9(2)にKAS鋼エレクトロガス溶接継手およびK5D鋼CES溶接継手についての各段階(主に溶接を短かくした場合)における残留応力の変化の様子を示す。この場合溶接線方向応力 σ_{RL} は、溶接長が2,000 mmから1,000 mmに短くなってもそれほど減少しないが、さらに500 mmになると急激に減少していく傾向にある。溶接線直角方向の応力 σ_{RT} にはあまり変化が見られず、KAS鋼エレクトロガス溶接継手の場合、最大応力は逆に増加する傾向にある。

7.1.4 まとめ

大入熱立向自動溶接法を用いた板厚25.4 mm、溶接長1.5 mないし2 m、板幅1.5 mないし2 mの広幅継手の溶接残留応力分布を計測し、種々検討した結果を要約すると以下のごとくなる。

1) 変形拘束用治具の配置により残留応力にかなりの変化が見られる。これは拘束度の差によるためと思われる。

2) 溶接ボンド部上の溶接線方向の残留応力は、拘束材の中間で極大値を示し、その最大値は $32 \sim 35 \text{ kg/mm}^2$ 程度で継手の種類によって大きな差は認められない。

また溶接線に直角方向の残留応力は、溶接線の両端部分を除くと、引張応力

が分布する場合と圧縮応力が分布する場合とがあり、継手の条件（溶接条件あるいは拘束条件）によって異なる。さらに拘束材のあった近くで極小値をとる場合と極大値をとる場合とがあるが、これらの理由については必ずしも明らかとはいえないので、今後さらに検討する必要がある。

3) 溶接ボンド部の溶接線方向の残留応力は、溶接ビード中心での値より 5 kg/mm^2 程度低い。

4) 溶接継手の溶接線方向の長さを切断して短くした場合、溶接線方向の残留応力は継手長さが 2 m から 0.5 m になると 13 kg/mm^2 程度減少する。しかし、溶接線に直角方向の残留応力はほとんど変化しない。

参考文献

- (1) 金沢 武, 町田 進, 矢島 浩, 青木 満, “脆性破壊伝播停止特性におよぼす寸法効果および荷重条件の影響”, 日本造船学会論文集第 130 号, 昭46
- (2) 石田 誠, “内部き裂ある有限板の応力拡大係数と Dugdale 型塑性域”, 日本機械学会第 3 回シンポジウム講演論文集 No. 710-7, 昭46.6.10~11
- (3) M. Isida, “Stress-Intensity Factors for the Tension of an Eccentrically Cracked Strip”, Transactions of the ASME, Ser. E, 33-3, September 1966, 674

8. むすび

本研究委員会の共同研究は、50 キロ級高張力鋼板を中心とした船殻材の高エネルギー大入熱溶接継手についての破壊靱性を把握し、脆性破壊による重大損傷防止の基礎検討資料を得ることを目的として、昭和48年4月より3ヶ年計画で実施されることになったものである。

昭和48年度には、第1年度の研究として、上述のごとく、一般船体用軟鋼（KAS鋼）のエレクトロガス溶接継手、エレクトロスラグ溶接継手および船体用50キロ級高張力鋼（K5D鋼）のエレクトロガス溶接継手、CES溶接継手等について、種々の観点から破壊試験を実施し、脆性破壊強度を把握した。すなわち、脆性破壊による重大損傷防止の観点から有用な基礎資料が得られた。

しかしながら、溶接継手部に沿って直進伝播する脆性破壊の挙動を定量的に評価し、試験結果から船殻等の実構造物中での溶接部の脆性破壊強度を精度良く推定出来るようになるまでには、今後の積極的な研究努力が必要である。

表 3.1 供試材の化学成分ならびに機械的性質

鋼種	熱処理	板厚 (mm)	化 学 成 分 (%)									降伏点 σ_y (kg/mm ²)	引張強さ σ_b (kg/mm ²)	伸び El. (%)
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Al			
KAS	As Rolled	25.4	0.21	0.04	0.77	0.022	0.021	—	—	—	—	26~27	45~46	27~30
K5D	As Rolled	25.4	0.13	0.29	1.45	0.010	0.006	0.01	0.09	0.02	0.042	37~39	53	29

表 3.2 溶接条件

鋼種	溶接法	溶接ワイヤ	フラックス	雰囲気	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (kJ/cm)	開先形状および継手断面
KAS 25.4	ILトロガス	HS-42G 3.2 ϕ	—	CO ₂ ガス 30 1/min	640 ~670	34 ~36	5 ~7	190 ~240	
	ILトロラグ	ES-50 2.4 ϕ	MF-38 12x65mm $\frac{1}{2}$	—	450	36 ~38	3.2	315	
K5D 25.4	ILトロガス	HS-42G 3.2 ϕ	—	CO ₂ ガス 35~40 1/min	640 ~650	39 ~40	10.8 ~11.4	134 ~142	
	CES	NES-53	YF-15 SES-15	—	430	38	2.3 ~2.5	426 ~392	

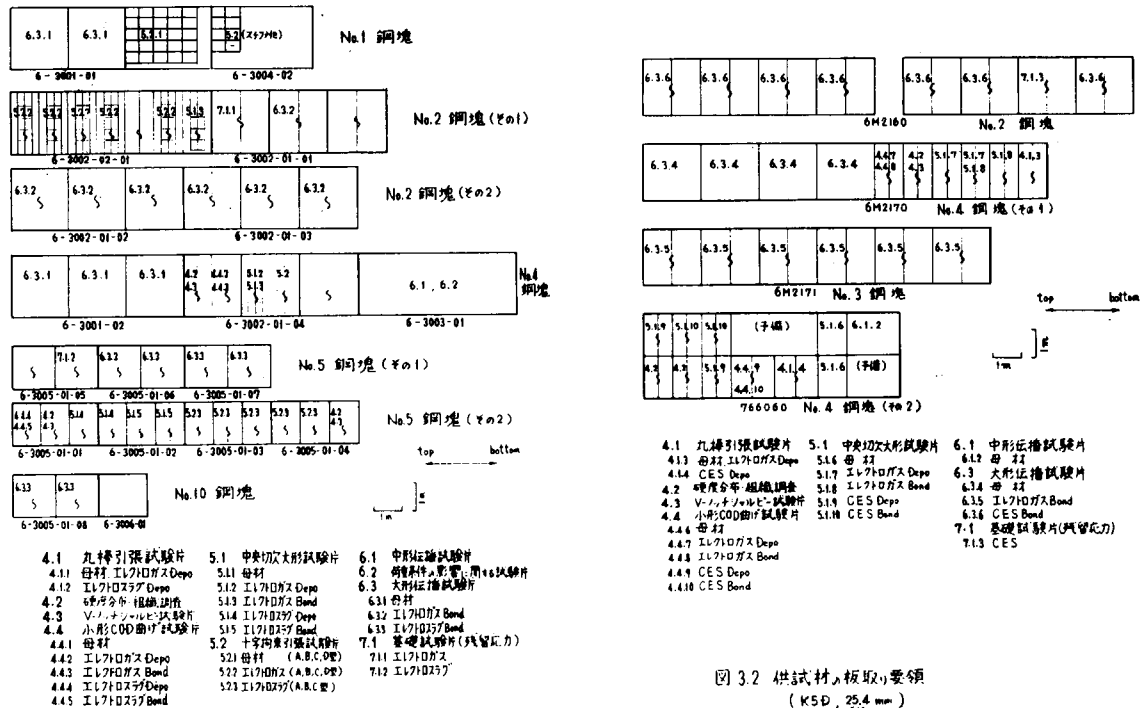


図 3.2 供試材の板取り要領
(K5D, 25.4 mm)

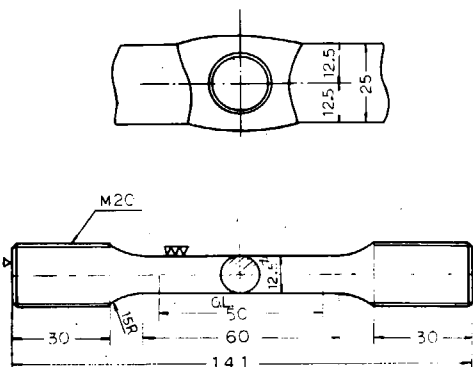


図4.1.1 丸棒引張試験片採取位置および試験片形状
(JIS Z 2201, No.10)

表4.1.1 丸棒引張試験結果 (KAS鋼)

KAS	試験温度 (°C)	降伏応力 σ_y (kg/mm ²)	引張強さ σ_b (kg/mm ²)	伸び δ , G.L.=50mm (%)	絞り (%)
母材	15	27.9	48.3	38	65
	15	29.7	48.9	38	65
	-20	30.8	51.1	38	58
	-50	31.7	54.1	46	62
	-78	37.9	56.8	44	62
	-110	42.7	60.3	29	58
	-140	52.8	65.2	8	9
	-155	58.2	71.1	6	7
	-173	66.0	70.4	3	3
	-196	84.0	87.2	6	5
エレクトロガス溶接金属	15	40.0	53.1	27	67
	10	36.3	50.6	23	66
	-20	37.8	52.8	29	66
	-50	36.2	51.3	34	77
	-78	51.4	65.0	28	66
	-80	44.6	59.9	28	63
	-115	50.9	63.0	23	64
	-150	66.6	73.5	3	1
	-196	92.3	92.3	1	1
エレクトロガス溶接金属	25	35.6	52.8	30	66
	-20	40.2	60.2	32	65
	-62	42.0	60.2	32	64
	-120	49.7	64.6	23	63
	-160	61.0	68.9	23	60
	-180	65.7	72.4	18	58
	-196	90.0	92.1	3	2

表4.1.2 丸棒引張試験結果 (K5D鋼)

K5D	試験温度 (°C)	降伏応力 σ_y (kg/mm ²)	引張強さ σ_b (kg/mm ²)	伸び δ , G.L.=50mm (%)	絞り (%)
母材	RT 9	36.7	53.3	38.2	78.5
	-36	39.5	57.2	35.3	75.8
	-72	42.0	61.1	36.1	74.6
	-113	50.1	65.7	33.8	73.5
	-135	53.8	67.8	16.1	70.0
	-165	61.1	75.3	26.8	68.2
	-196	84.0	87.2	6.9	9.4
エレクトロガス溶接金属	RT 9	50.1	62.4	28.7	61.1
	-37	51.8	66.4	24.2	57.7
	-70	53.0	71.1	24.2	58.0
	-112	53.8	69.5	13.3	58.0
	-135	58.7	78.1	17.9	54.8
	-170	67.1	83.1	17.2	49.8
CES溶接金属	25	43.6	59.8	28	72
	-20	46.0	65.4	29	71
	-62	47.7	69.2	28	66
	-120	52.2	72.5	26	70
	-160	64.2	77.4	25	67
	-180	68.4	83.4	18	64
	-196	85.4	95.6	5	7

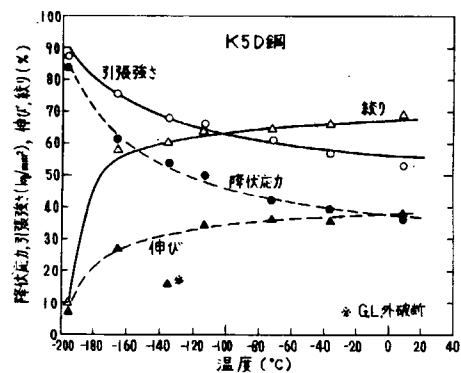
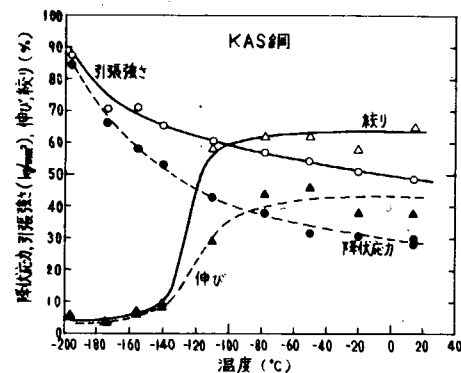


図4.1.2 丸棒引張試験結果 (母材)

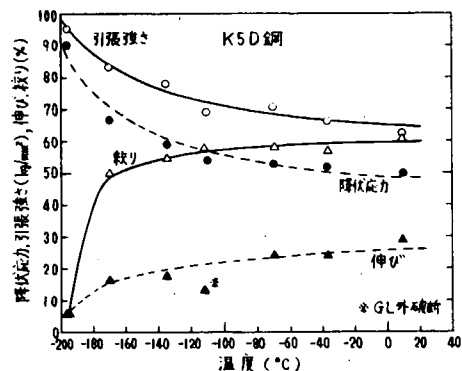
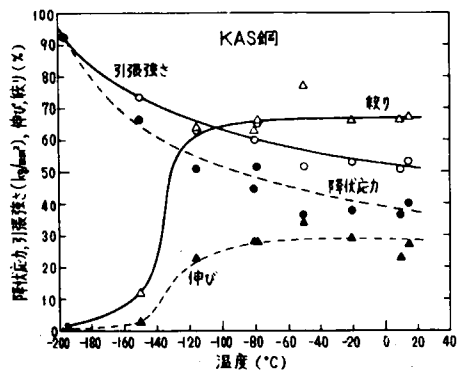


図4.1.3 丸棒引張試験結果 (IGWガス溶接金属)

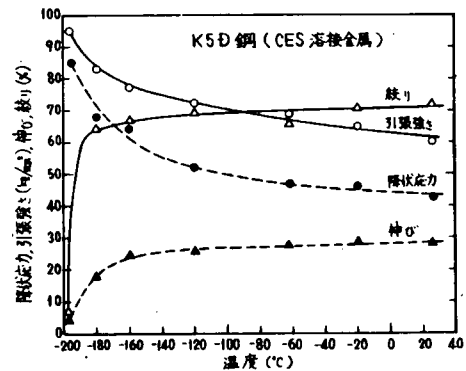
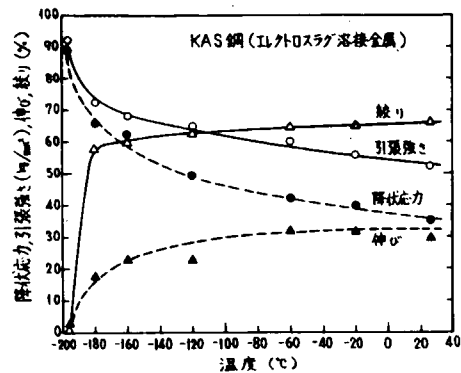


図4.1.4 丸棒引張試験結果 (IGWガス溶接金属, CES溶接金属)

	RT ~ -196°C	RT ~ -155°C
① 母材	$\sigma_y = 19.8 e^{0.3\%}$	$\sigma_y = 17.3 e^{0.3\%}$
② IGWガス溶接金属	$\sigma_y = 26.8 e^{0.3\%}$	$\sigma_y = 23.6 e^{0.3\%}$
③ IGWガス溶接金属	$\sigma_y = 27.5 e^{0.3\%}$	$\sigma_y = 26.4 e^{0.3\%}$

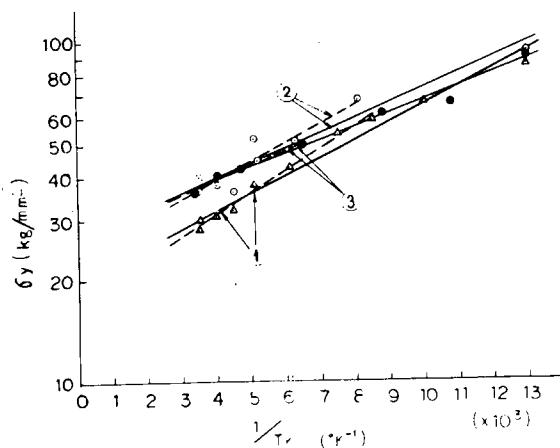


図4.1.5 降伏応力と温度との関係 (KAS鋼)

	RT ~ -196°C	RT ~ -135°C
① 母材	$\sigma_y = 27.7 e^{0.3\%}$	$\sigma_y = 25.1 e^{0.3\%}$
② IGWガス溶接金属	$\sigma_y = 38.9 e^{0.3\%}$	$\sigma_y = 43.8 e^{0.3\%}$
③ CES溶接金属	$\sigma_y = 34.7 e^{0.3\%}$	$\sigma_y = 36.7 e^{0.3\%}$

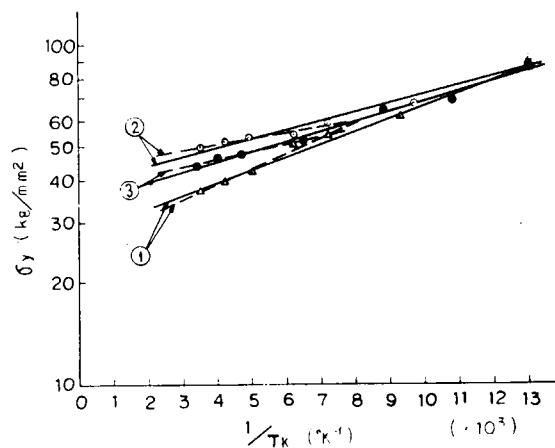
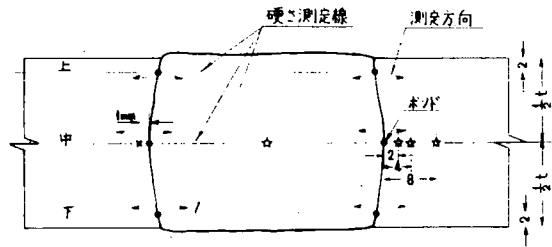


図4.1.6 降伏応力と温度との関係 (K5D鋼)

表 4.1.3 降伏応力の温度依存性実験式

鋼種	温度範囲	母材	エレクトロポラス溶接部	エレクトロポラス溶接部
KAS	R.T.~196℃	$19.8 e^{118\%T_k}$	$26.8 e^{99\%T_k}$	$27.5 e^{88\%T_k}$
	R.T.~155	$17.3 e^{145\%T_k}$	$23.6 e^{125\%T_k}$	$26.4 e^{98\%T_k}$
	R.T.~120	$16.9 e^{151\%T_k}$	$24.3 e^{119\%T_k}$	$26.4 e^{98\%T_k}$
K5D	R.T.~196	$27.7 e^{86\%T_k}$	$38.9 e^{61\%T_k}$	$34.7 e^{67\%T_k}$
	R.T.~135	$25.1 e^{106\%T_k}$	$43.8 e^{37\%T_k}$	$36.7 e^{54\%T_k}$



1. ●印は硬さ測定の基点を示す。
2. 測定間隔は1mm (ただし溶合部は両側本材より測定したので、ある箇所では1mm間隔にならない所はグラフに測定間隔を付記している。
3. 上中下はグラフの測定線順を示す。
4. ☆印顕微鏡組織撮影箇所を示す。(mm)

図 4.2.1 継手部ビッカース硬さ測定および顕微鏡組織撮影位置

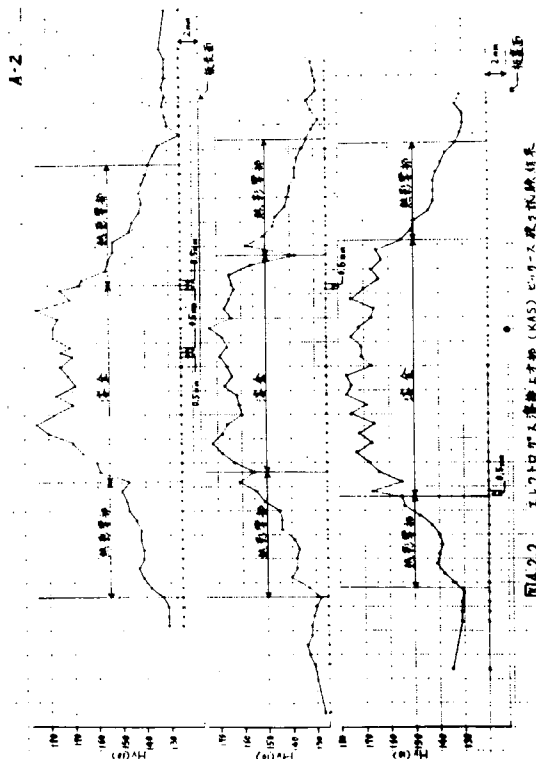


図 4.2.2 エレクトロポラス溶接部 (KAS) ビッカース硬さ試験結果

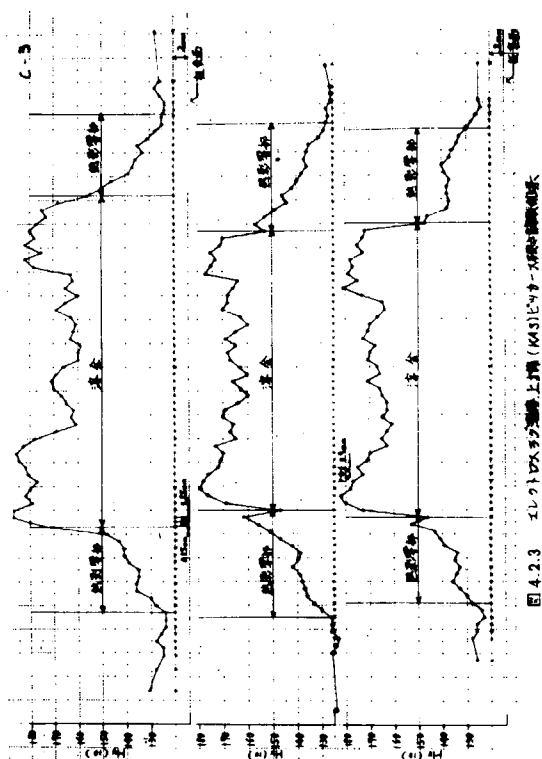


図 4.2.3 エレクトロポラス溶接部 (KAS) ビッカース硬さ試験結果

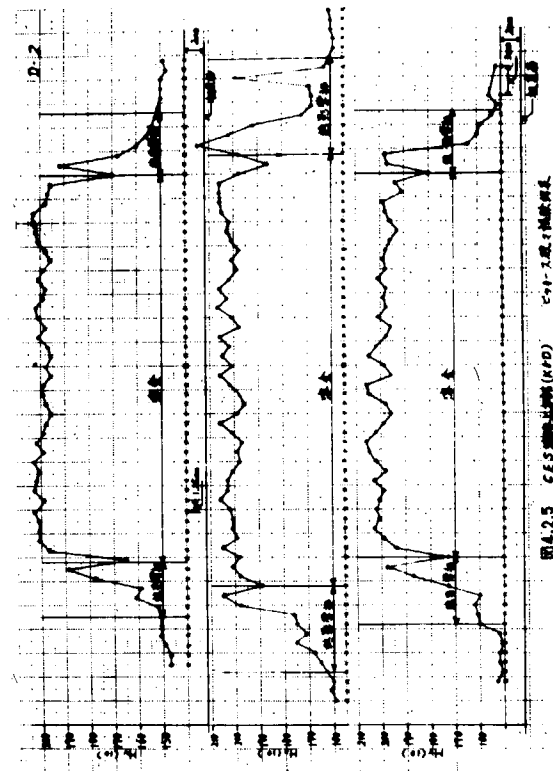
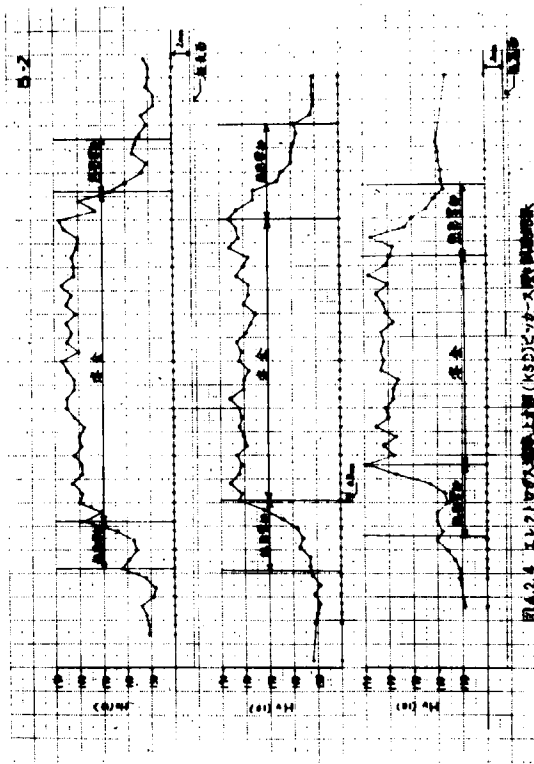


表 4.2.1 継手部のビッカース硬さ試験結果

溶接法	鉚種	測定位置	ビッカース硬さ H _V 100		
			溶接部	熱影響部	母材部
母材	KAS		* 128 ~ 133		
母材	K5D		* 148 ~ 156		
エレクトロガス溶接	KAS	板表面より 2 mm	159~185	138~166	167
		板厚中央	156~173	133~161	155
		板裏面より 2 mm	153~177	134~154	155
エレクトロスラグ溶接		板表面より 2 mm	159~187	125~150	171
		板厚中央	160~179	129~162	163
		板裏面より 2 mm	161~182	130~153	147
エレクトロガス溶接	K5D	板表面より 2 mm	171~188	151~164	179
		板厚中央	175~186	153~183	186
		板裏面より 2 mm	176~188	156~187	189
CES溶接		板表面より 2 mm	196~203	152~192	170
		板厚中央	186~207	162~215	198
		板裏面より 2 mm	191~206	154~198	180

* 18 母材硬さ

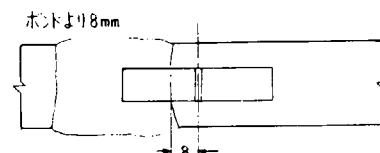
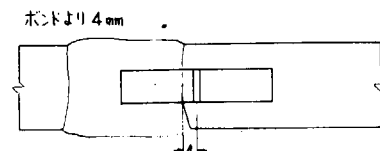
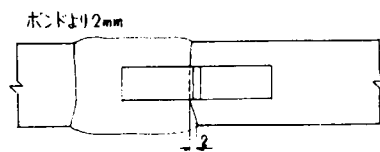
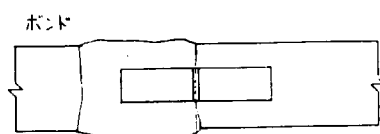
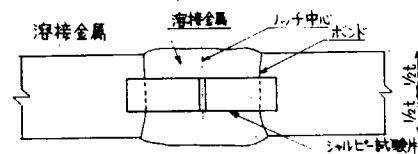
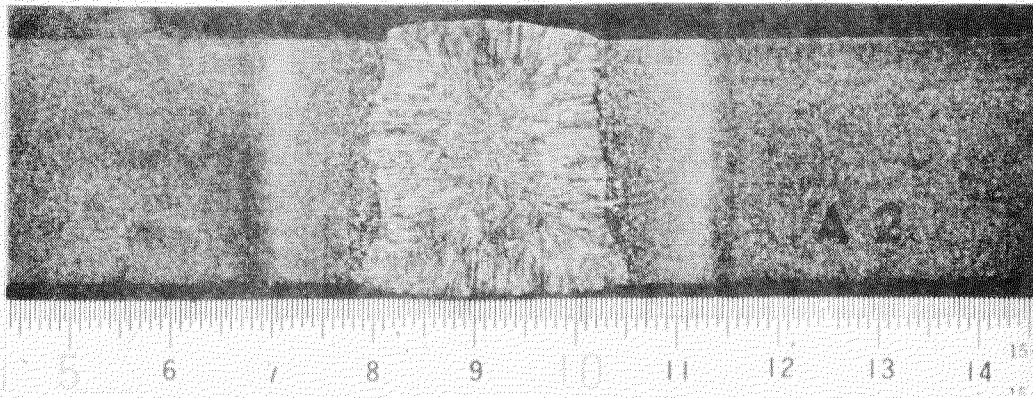
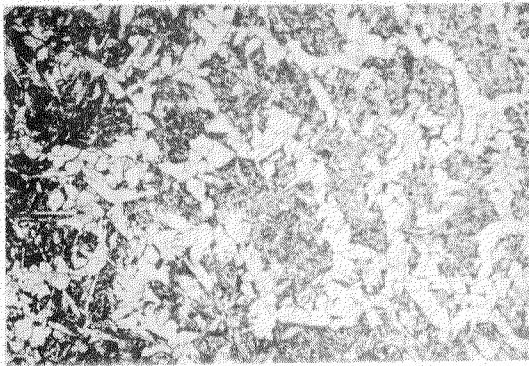


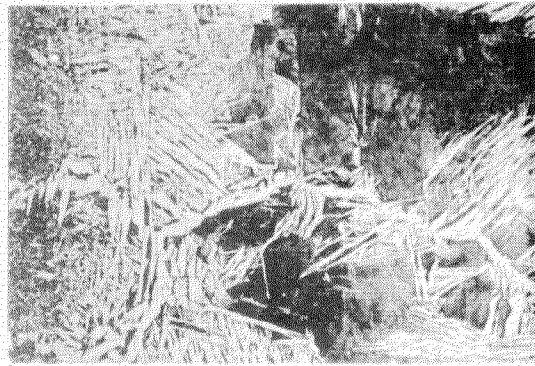
図 4.3.1 V-ノッチシャルピー試験片採取位置



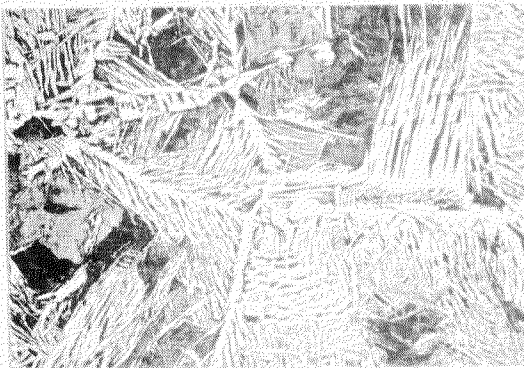
継手部 マクロ



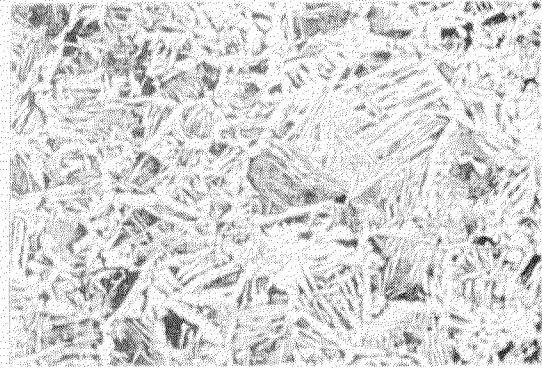
溶 金



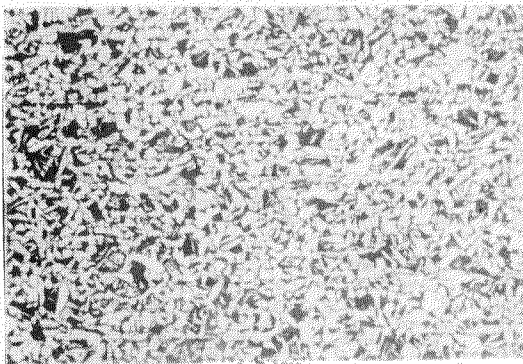
ボンド



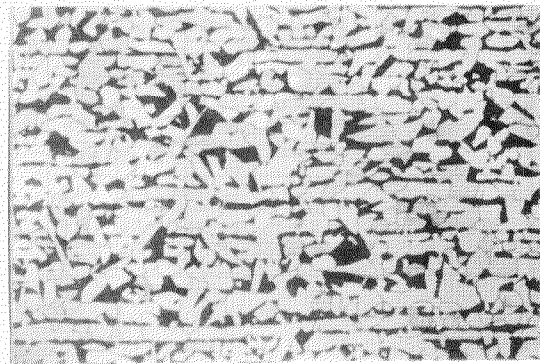
ボンドより 2mm



ボンドより 4mm

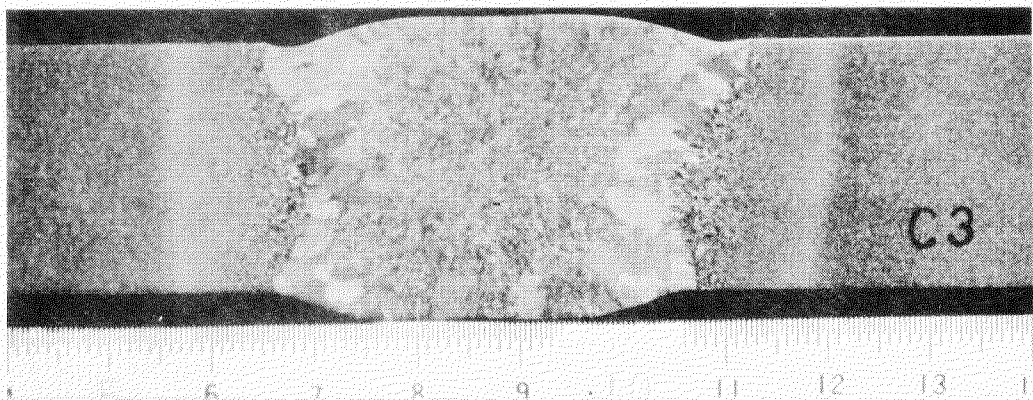


ボンドより 8mm

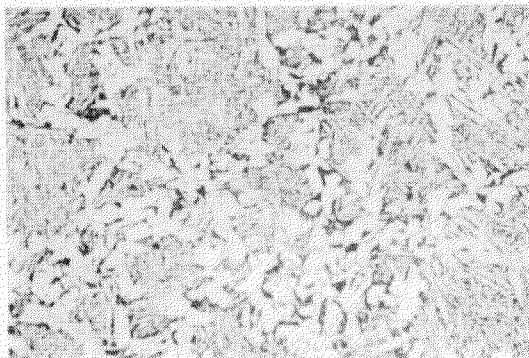


母 材 ×100

写真4.2.1 エレクトロガス溶接継手(KAS鋼) $H.I. = \frac{201,000}{235,000} \text{ J/cm}$



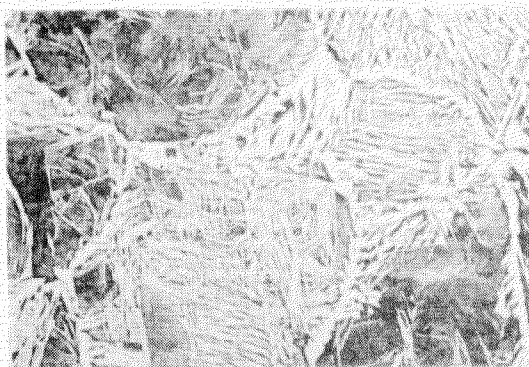
継手部 マクロ



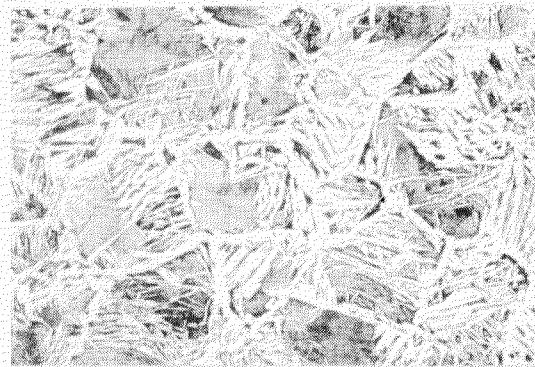
溶 金



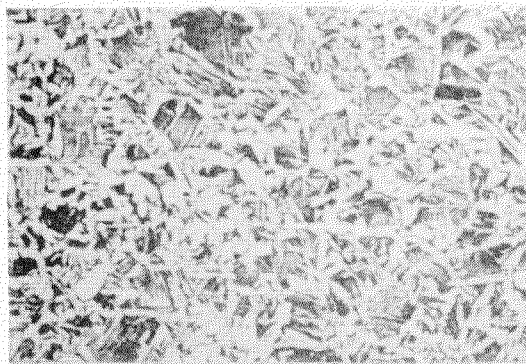
ボンド



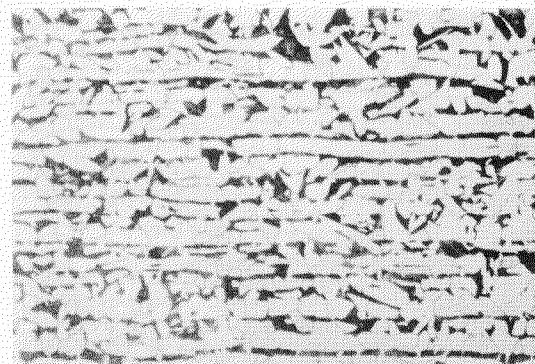
ボンドより 2 mm



ボンドより 4 mm

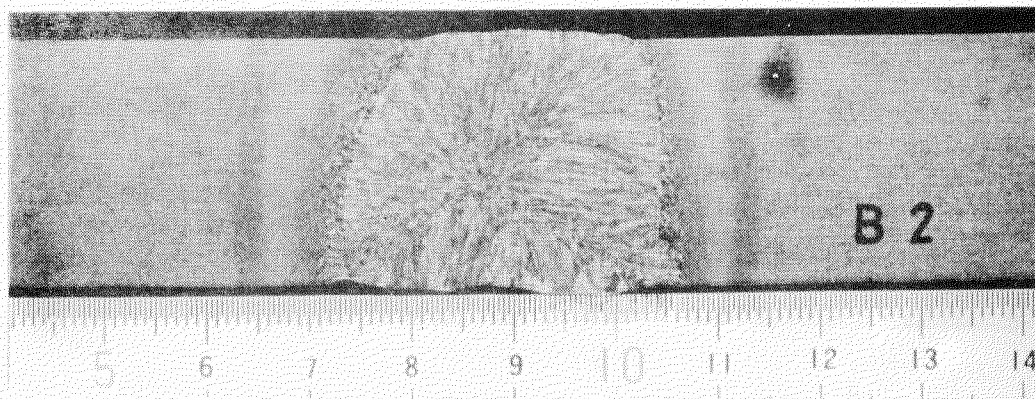


ボンドより 8 mm

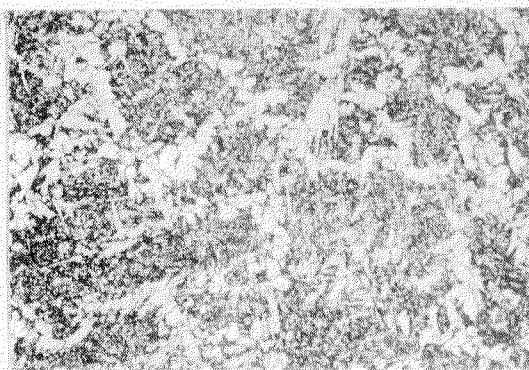


母 材 x100

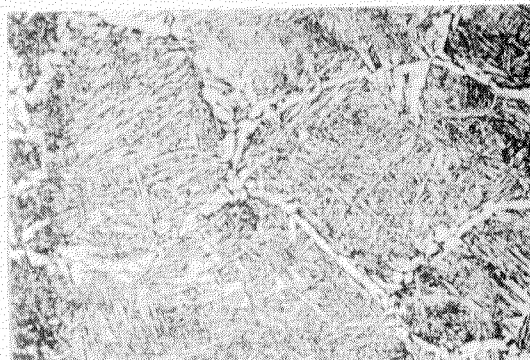
写真4.2.2 エレクトロスラッグ溶接継手(KAS鋼) H.I. = $\frac{288,000}{\sim 304,000} \text{ J/cm}$



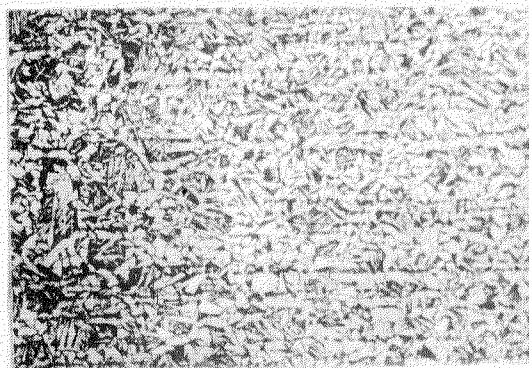
継手部 マクロ



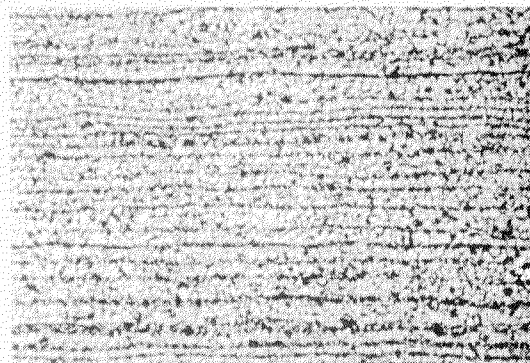
溶 金



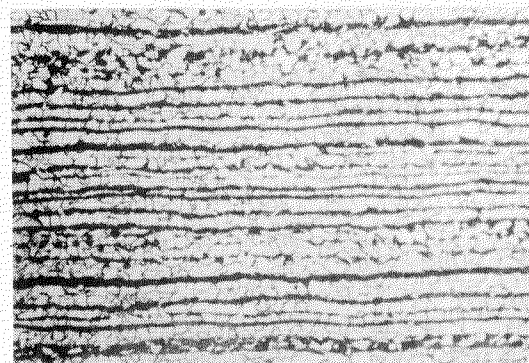
ボンド



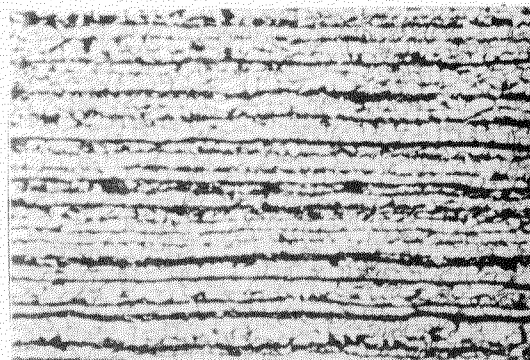
ボンドより 2mm



ボンドより 4mm



ボンドより 8mm



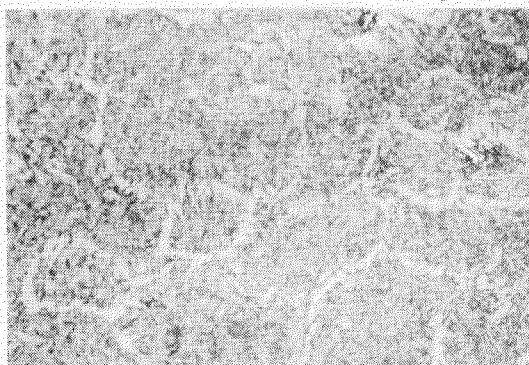
母 材 x100

写真4.2.3 エレクトロガス溶接継手(K5D鋼) $H.I. = \frac{132,000}{134,000} \text{cm}$

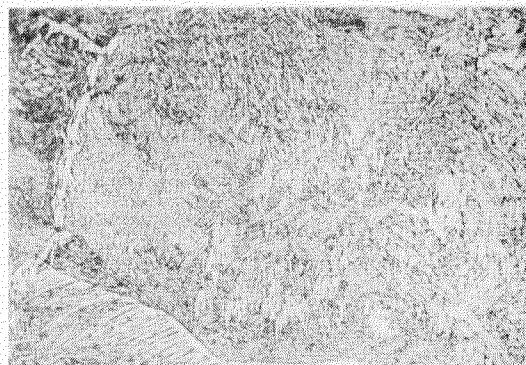


2 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13

継手部 マクロ



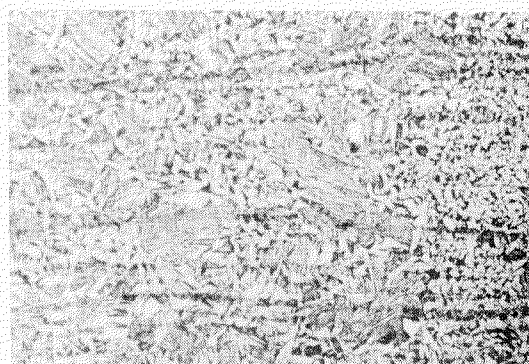
溶 金



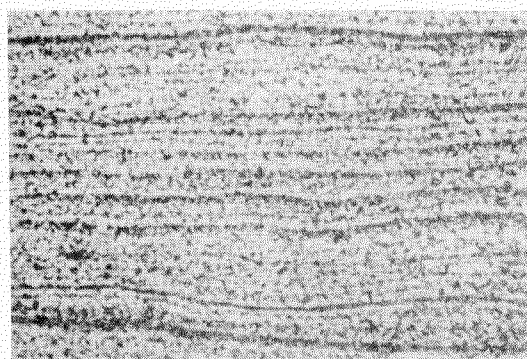
ボンド



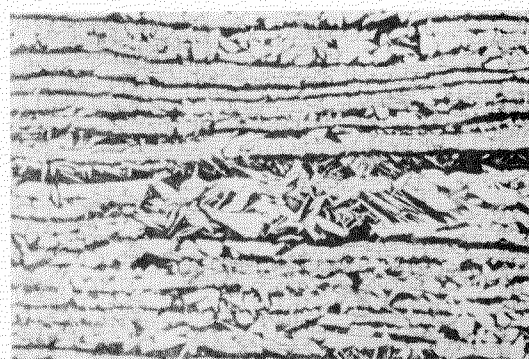
ボンドより 2 mm



ボンドより 4 mm



ボンドより 8 mm



母 材 ×100

写真 4.2.4 CES 溶接継手(K5D鋼) H.I.=392.000 $\frac{J}{cm}$

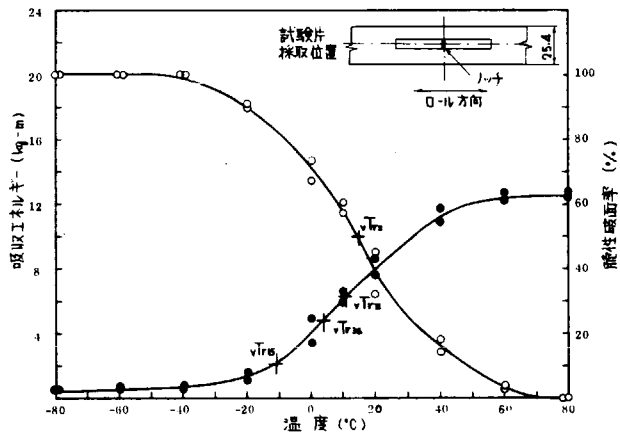


図 4.3.2 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS鋼母材)

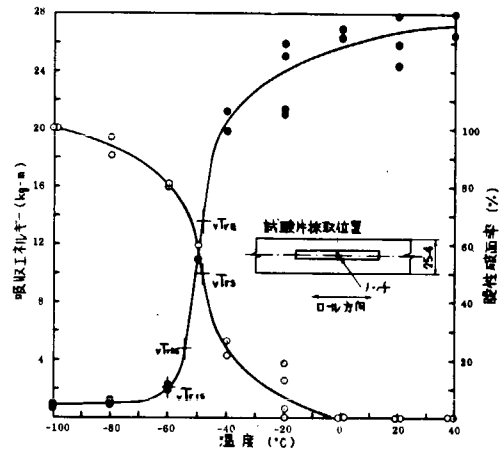


図 4.3.3 V-ノッチシャルピー試験結果 (K50鋼母材)

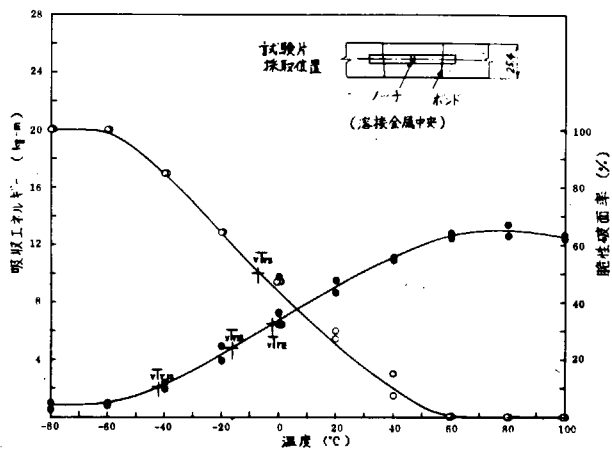


図 4.3.4 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS鋼IL外ガス溶接継手)

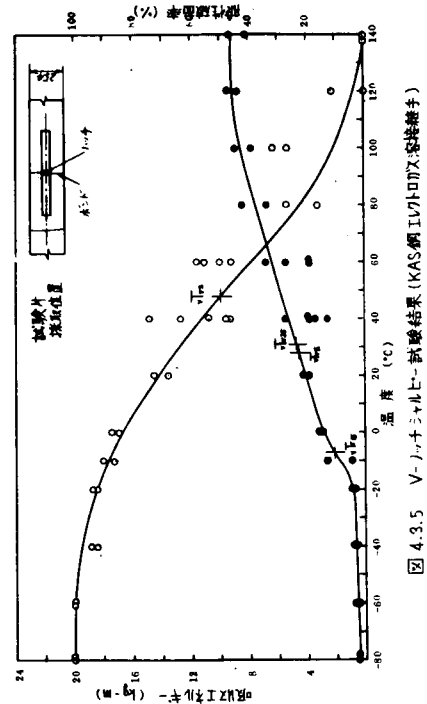


図 4.3.5 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS鋼IL外ガス溶接継手)

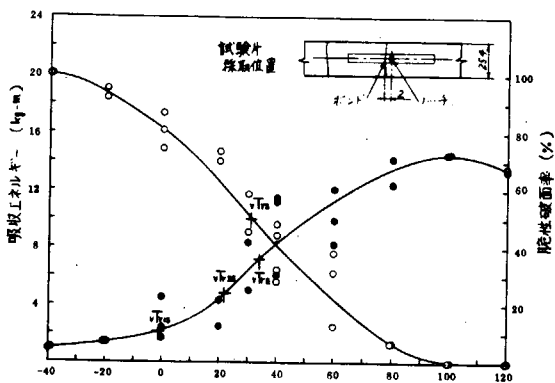


図 4.3.6 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS鋼IL外ガス溶接継手)

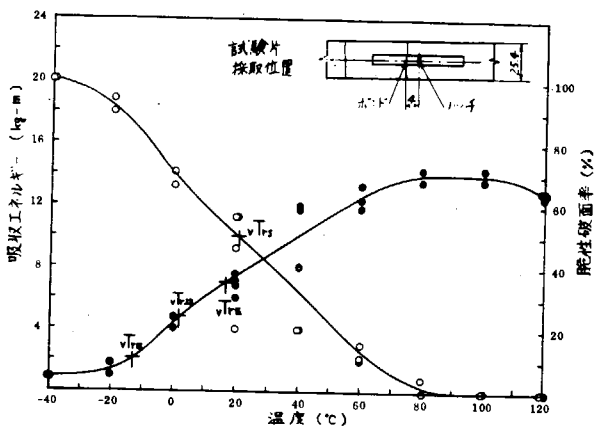


図 4.3.7 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS鋼IL外ガス溶接継手)

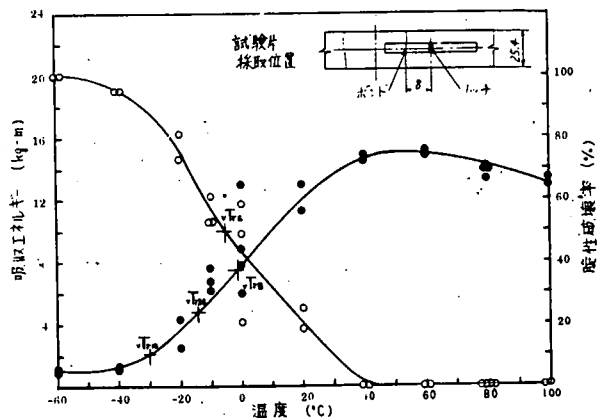


図 4.3.8 V-ノッチシャルビ試験結果 (KAS鋼エレクトロデポジット溶接継手)

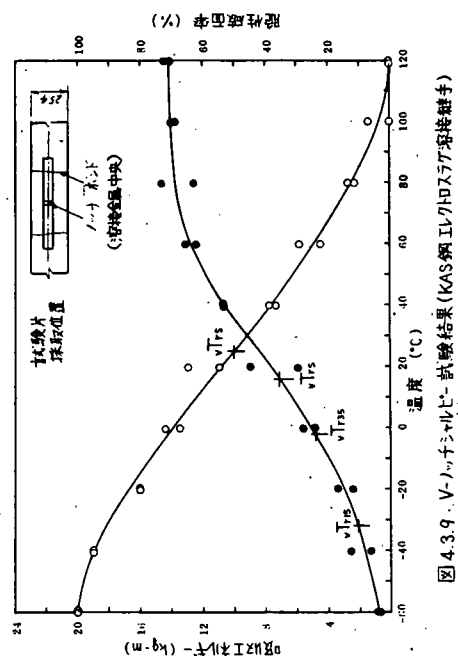


図 4.3.9 V-ノッチシャルビ試験結果 (KAS鋼エレクトロデポジット溶接継手)

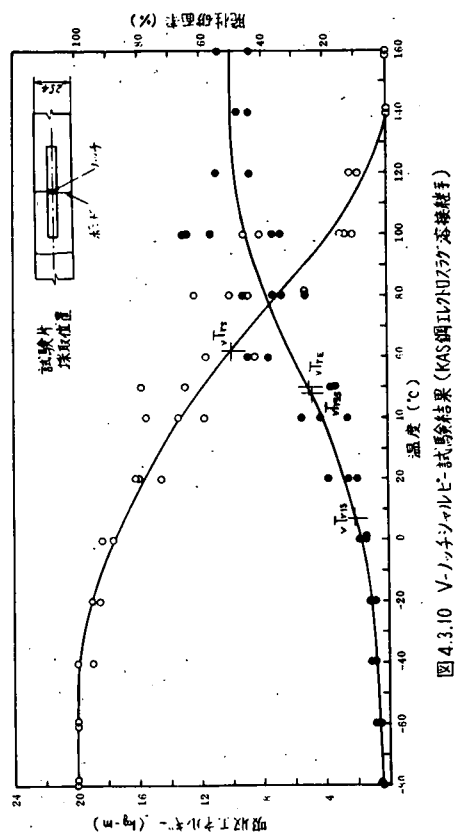


図 4.3.10 V-ノッチシャルビ試験結果 (KAS鋼エレクトロデポジット溶接継手)

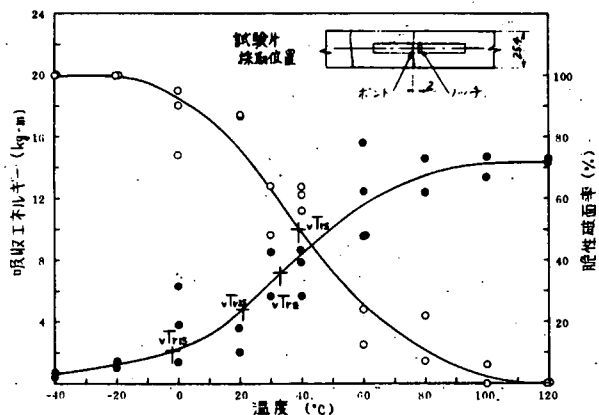


図 4.3.11 V-ノッチシャルビ試験結果 (KAS鋼エレクトロデポジット溶接継手)

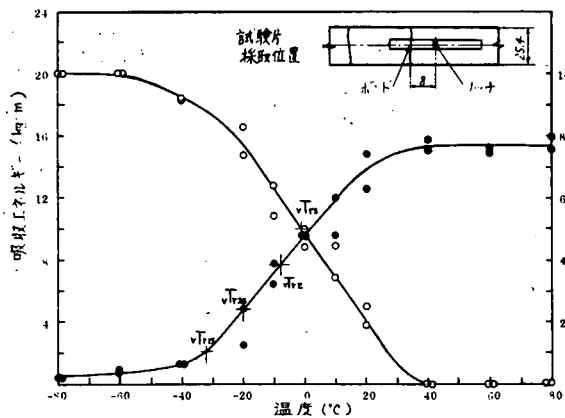


図 4.3.13 V-ノッチシャルビ試験結果 (KAS鋼エレクトロデポジット溶接継手)

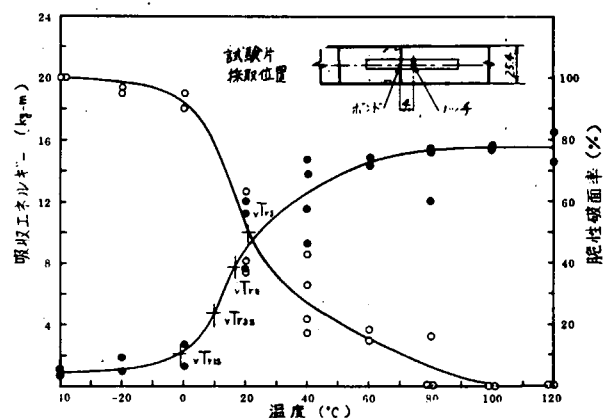


図 4.3.12 V-ノッチシャルビ試験結果 (KAS鋼エレクトロデポジット溶接継手)

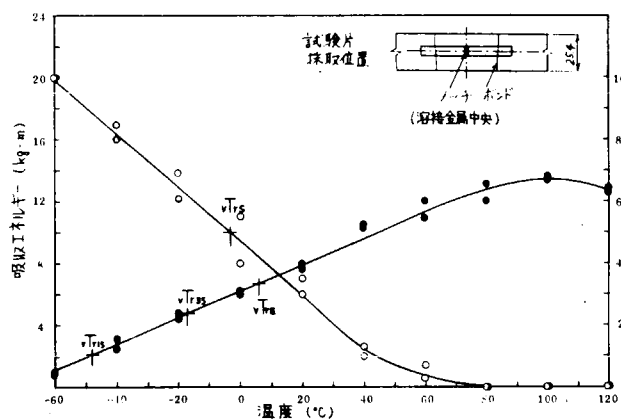


図 4.3.14 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D鋼 ILTODガス溶接継手)

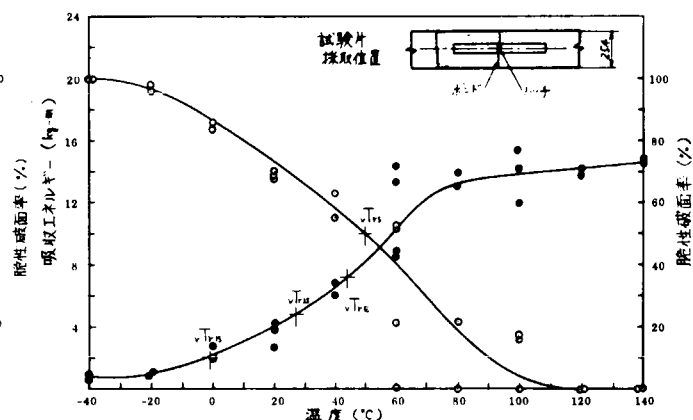


図 4.3.15 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D鋼 ILTODガス溶接継手)

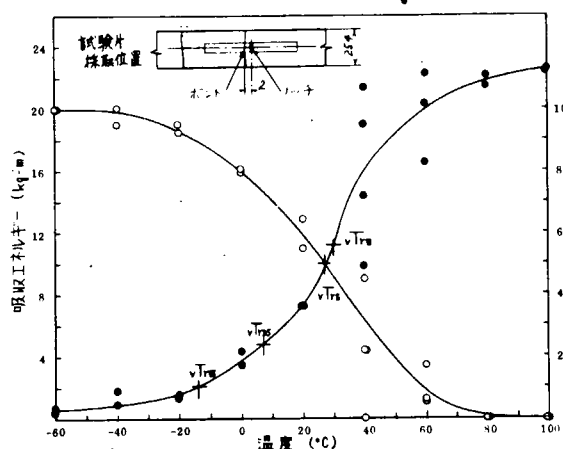


図 4.3.16 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D鋼 ILTODガス溶接継手)

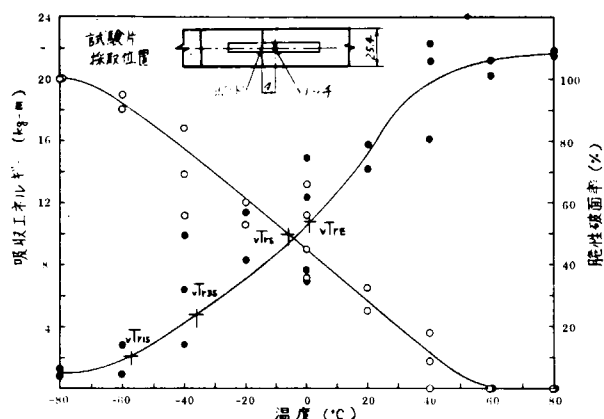


図 4.3.17 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D鋼 ILTODガス溶接継手)

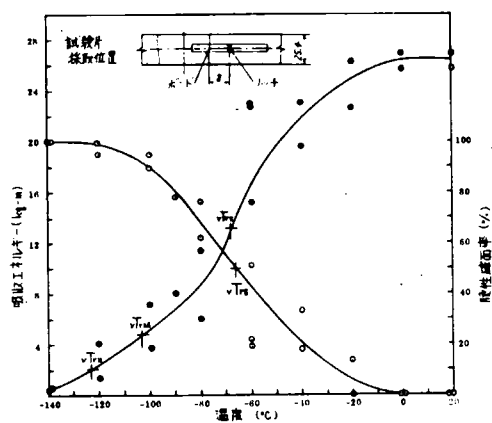


図 4.3.18 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D鋼 ILTODガス溶接継手)

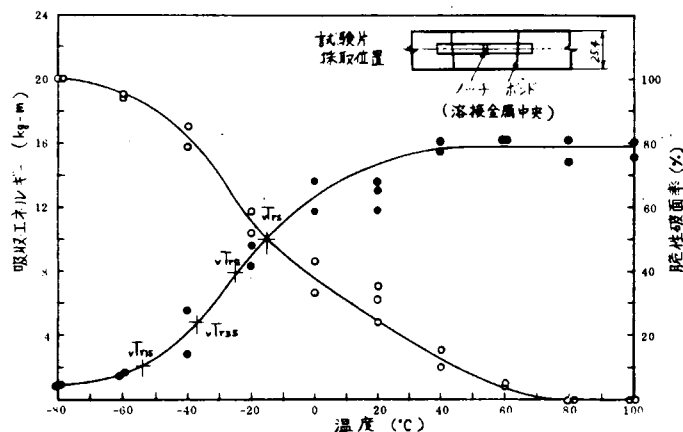


図 4.3.19 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D鋼 CES溶接継手)

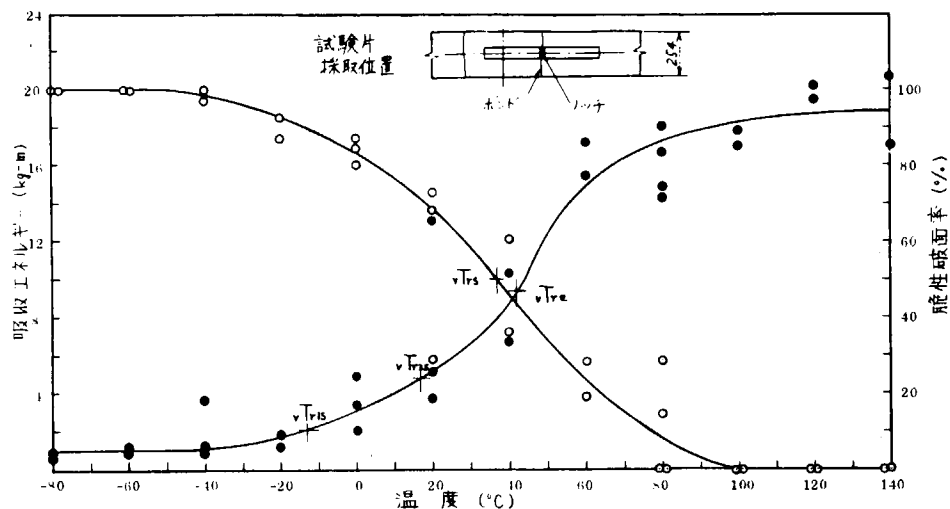


図 4.3.20 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D鋼CES溶接継手)

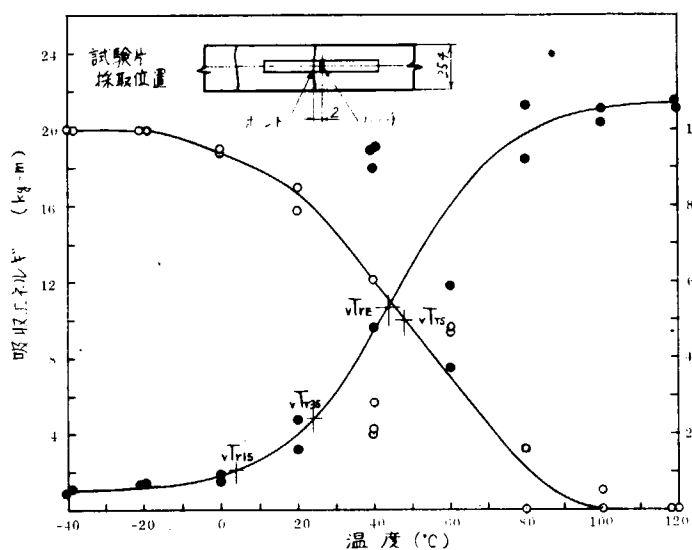


図 4.3.21 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D鋼CES溶接継手)

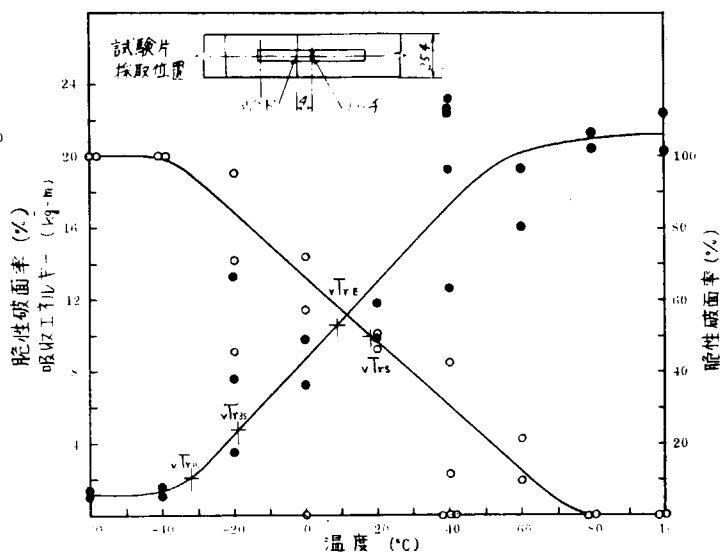


図 4.3.22 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D鋼CES溶接継手)

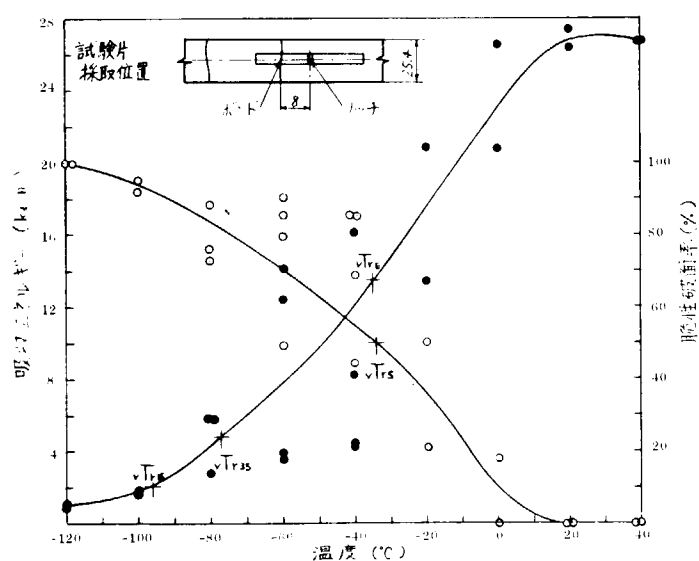


図 4.3.23 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D鋼CES溶接継手)

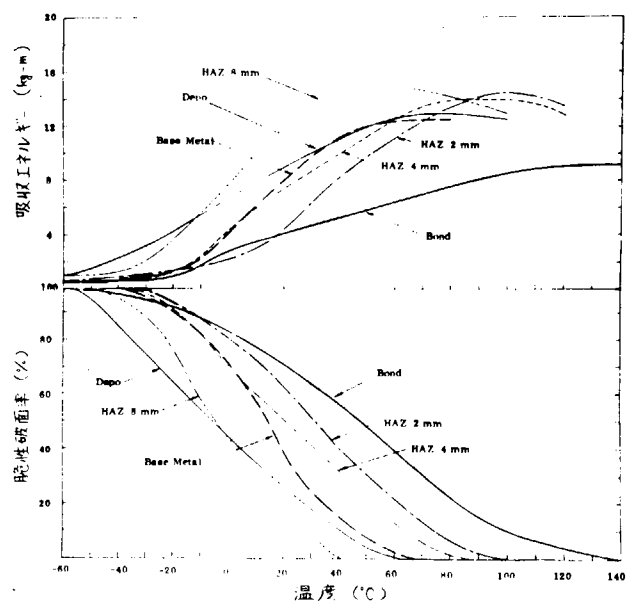


図 4.3.24 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS鋼エレクトロガス溶接継手)

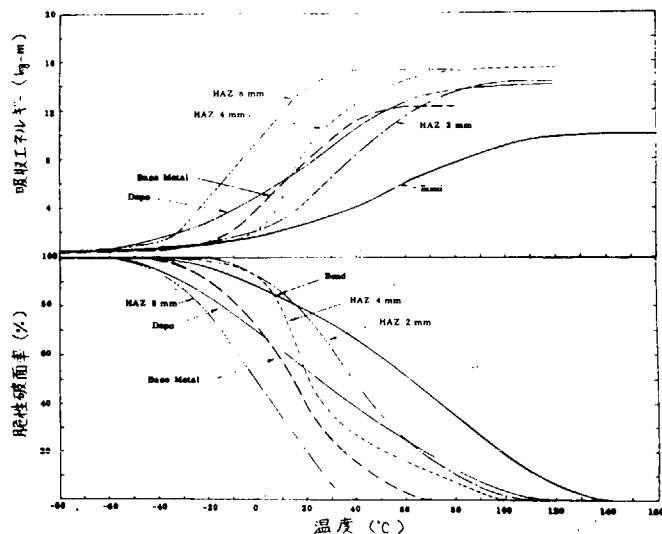


図 4.3.25 V-ノッチシャルピー試験結果 (KAS 鋼エレクトロスラグ溶接継手)

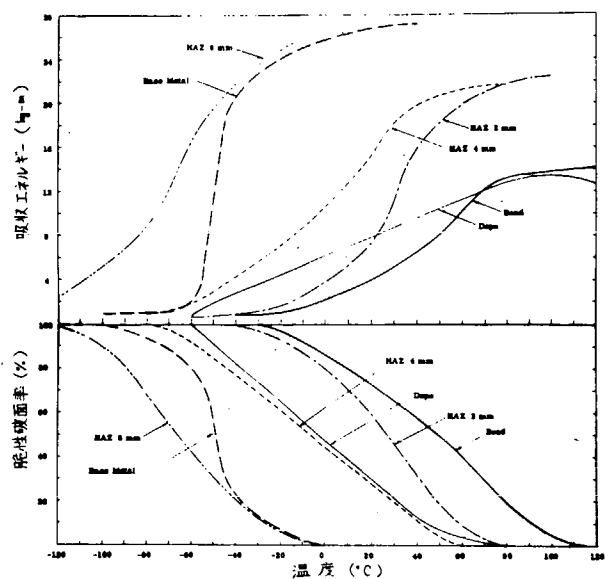


図 4.3.26 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D 鋼エレクトロガス溶接継手)

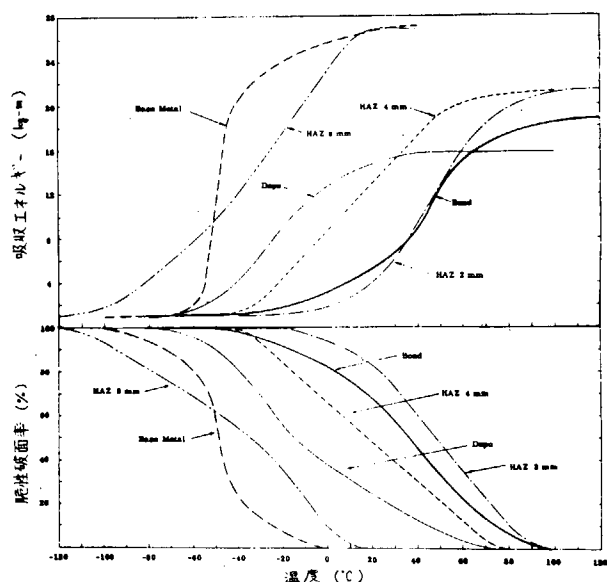


図 4.3.27 V-ノッチシャルピー試験結果 (K5D 鋼 CES 溶接継手)

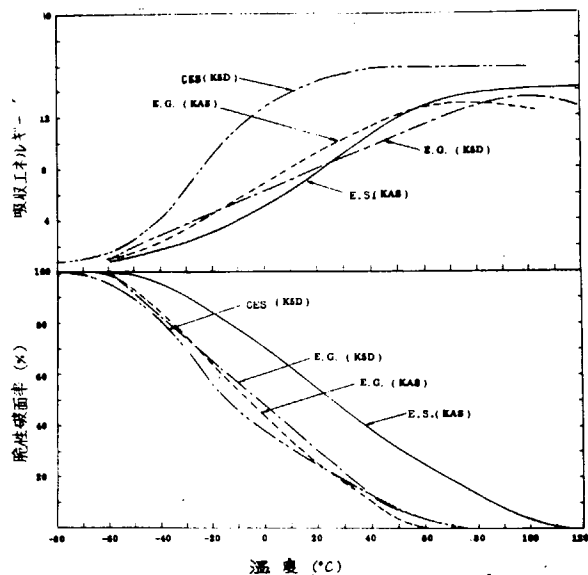


図 4.3.28 各溶接継手溶金属部の遷移曲線

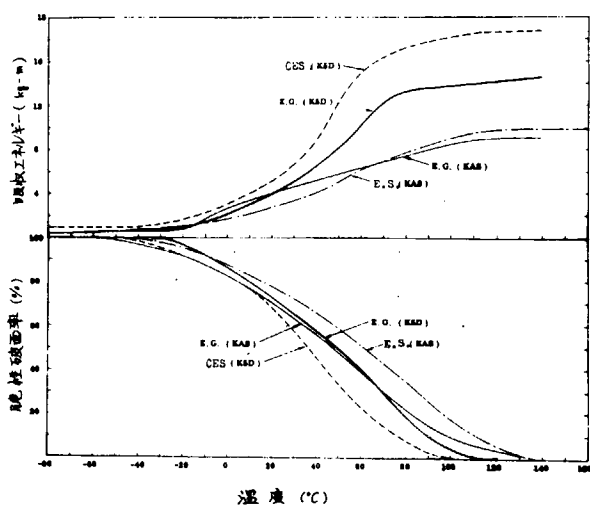


図 4.3.29 各溶接継手溶金属部の遷移曲線

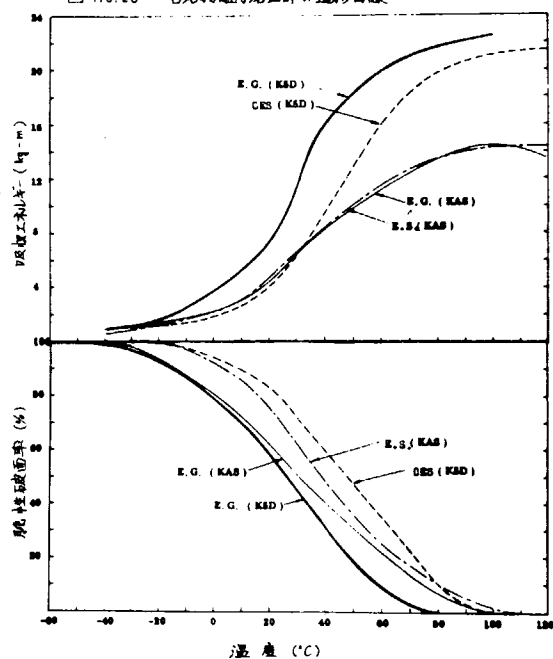


図 4.3.30 各溶接継手溶金属部の遷移曲線

表4.31 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果の各種遷移温度
およびノッチエイルビー値

溶接法	鋼種	ノッチ位置	遷移温度 (°C)				エイルビー値 (kg-m)
母材	KAS		vtr15	vtr35	vtrE	vtrS	12.4
	K5D		60	54	48	48	27.2
エレクトロガス溶接	KAS	溶接金属中央	-42	-16	-2	-7	13.0
		ボンド	-7	+31	+28	+48	9.2
		ボンドより2mm	-1	+22	+34	+31	14.4
		ボンドより4mm	-13	+2	+17	+21	14.0
		ボンドより8mm	-30	-14	-1	-5	15.2
エレクトロスラック溶接	KAS	溶接金属中央	-32	-2	+16	+25	14.2
		ボンド	-7	+48	+50	+62	10.0
		ボンドより2mm	-2	+21	+33	+39	14.4
		ボンドより4mm	-1	+10	+17	+21	15.4
		ボンドより8mm	-32	-20	-8	-1	15.4
エレクトロガス溶接	K5D	溶接金属中央	-48	-17	+6	-3	13.4
		ボンド	-1	+27	+44	+50	14.4
		ボンドより2mm	-14	+7	+30	+27	22.4
		ボンドより4mm	-57	36	+1	-6	21.6
		ボンドより8mm	-123	-103	-68	-66	26.4
CES溶接	K5D	溶接金属中央	-54	-37	-25	-15	15.8
		ボンド	-13	+17	+42	+37	19.0
		ボンドより2mm	-4	+24	+44	+48	21.2
		ボンドより4mm	-32	-19	-7	-18	21.2

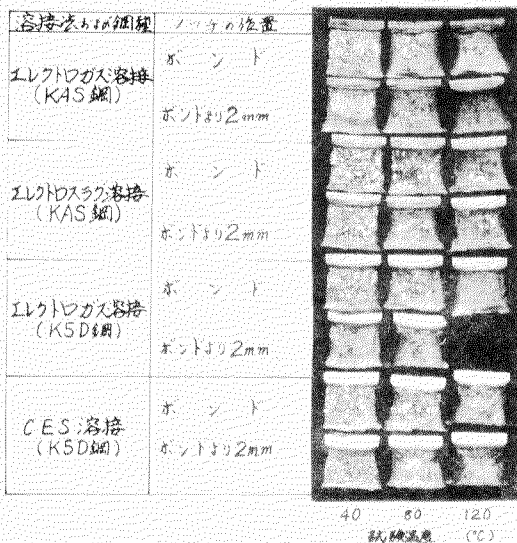
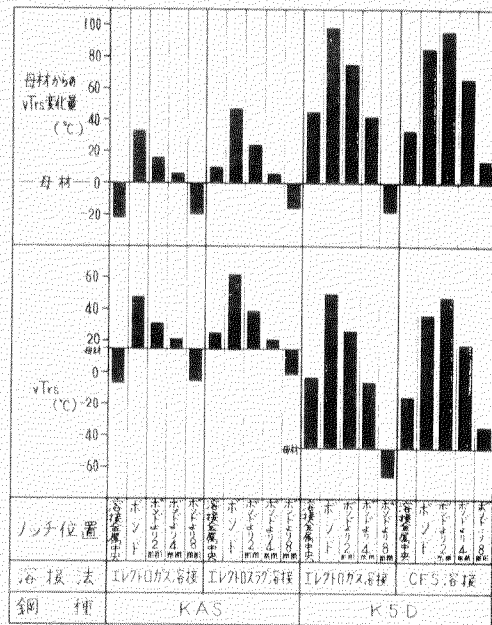


写真4.31 ボンドおよび熱影響部の溶化試験片断面の一例

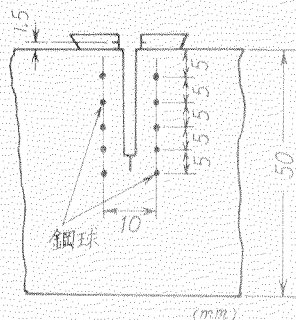
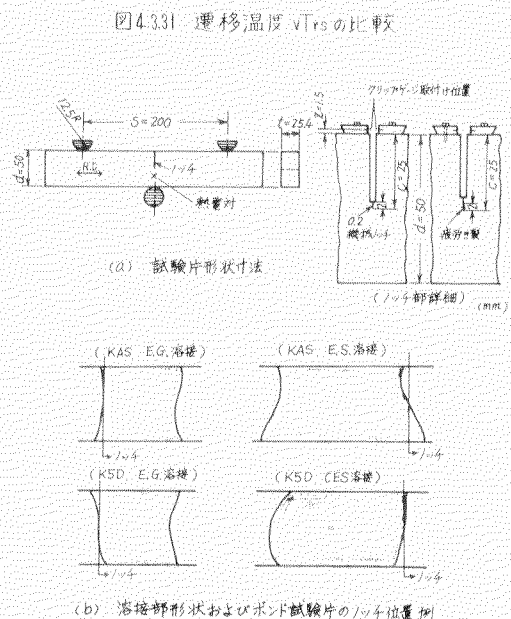


図4.4.2 Rotational Factor 測定用鋼球位置



溶接法	KAS	K5D
エレクトロガス溶接 (EG)	○	○
エレクトロスラック溶接 (ES)	○	○
CES溶接	○	○
ボンド	○	○

(c) 試験片種類

図4.4.1 試験片

表 4.4.1 (1) 小形 COD 曲げ試験結果

試験片	試験片番号	試験温度 (°C)	破壊荷重 (TON)	限界ひずみ V_L (mm)	δ_C (mm)	(δ_C) (mm)
KAS 母材	1	-40	4.40	1.837	0.489	—
	2	-78	4.26	0.624	0.160	—
	3	-140	1.98	0.105	0.012	0.007
	4	-124	3.12	0.297	0.065	0.025
	5	-196	2.07	0.059	0.004	0.006
	6	-100	3.74	0.272	0.058	0.046
	7	-140	2.00	0.118	0.015	0.008
	8*	-78	3.04	0.237	0.053	0.031
KAS エレクトロ ガス溶接 溶接金属	1	-40	5.70	1.417	0.375	—
	2	-78	5.28	0.669	0.173	—
	3	-159	2.95	0.179	0.031	0.013
	4	-180	3.58	0.100	0.011	0.017
	5	-119	4.71	0.300	0.066	0.054
	6	-100	5.25	0.411	0.100	—
	7	-140	3.21	0.203	0.040	0.018
	8*	-78	3.76	0.345	0.080	0.044
KAS エレクトロ ガス溶接 ボンド	1*	-78	2.15	0.153	0.024	0.012
	2	-75	3.73	0.258	0.053	0.045
	3	-40	4.72	0.753	0.197	—
	4	-10	5.40	>1.700	>0.452	—
	5	-139	4.32	0.289	0.063	0.038
	6	-100	5.57	0.510	0.129	—
	7	-122	4.76	0.329	0.075	0.059
	8	-160	3.57	0.228	0.044	0.020

(注) * : 疲労亀裂試験片 1) : Rotational Factorを用いて求めた限界COD
2) : FEMで求めた限界COD

表 4.4.1 (2) 小形 COD 曲げ試験結果

試験片	試験片番号	試験温度 (°C)	破壊荷重 (TON)	限界ひずみ V_L (mm)	δ_C (mm)	(δ_C) (mm)
KAS エレクトロ ガス溶接 溶接金属	1	-40	5.38	1.663	0.442	—
	2	-76	5.27	1.200	0.319	—
	3	-157	3.90	0.256	0.055	0.032
	4	-195	2.75	0.088	0.009	0.010
	5	-120	5.28	0.413	0.100	—
	6	-102	5.86	0.653	0.169	—
	7	-139	4.90	0.320	0.072	0.055
	8*	-78	4.86	0.600	0.153	—
KAS エレクトロ ガス溶接 ボンド	1*	-78	2.84	0.212	0.040	0.022
	2	-75	4.19	0.312	0.070	0.063
	3	-40	4.63	0.730	0.191	—
	4	-10	4.41	0.600	0.154	—
	5	-140	3.05	0.208	0.038	0.018
	6	-119	4.41	0.304	0.067	0.052
	7	-102	3.17	0.225	0.044	0.026
	8	-160	2.71	0.204	0.038	0.012
K5D 母材	1	-196	2.96	0.181	0.038	0.012
	2	-159	4.74	0.285	0.062	0.044
	3	-140	6.13	0.459	0.113	—
	4	-98	6.22	>1.100	>0.290	—
	5	-180	2.94	0.150	0.023	0.013
	6*	-100	4.46	0.483	0.161	0.058

(注) * : 疲労亀裂試験片 1) : Rotational Factorを用いて求めた限界COD
2) : FEMで求めた限界COD

表 4.4.1 (3) 小形 COD 曲げ試験結果

試験片	試験片番号	試験温度 (°C)	破壊荷重 (TON)	限界ひずみ V_L (mm)	δ_C (mm)	(δ_C) (mm)
K5D エレクトロ ガス溶接 溶接金属	1*	-78	3.98	0.331	0.076	0.034
	2	-196	2.41	0.130	0.018	0.008
	3	-159	2.84	0.187	0.033	0.013
	4	-104	4.27	0.303	0.067	0.037
	5	-139	3.07	0.190	0.034	0.015
	6	-120	4.72	0.342	0.079	0.046
	7	-40	6.06	0.850	0.223	—
	8	-75	5.14	0.544	0.138	0.067
K5D エレクトロ ガス溶接 ボンド	1*	-78	3.90	0.316	0.072	0.037
	2	-196	5.34	0.850	0.222	—
	3	-40	5.27	0.767	0.200	—
	4	-75	5.26	0.497	0.126	—
	5	-98	4.84	0.376	0.089	0.060
	6	-118	6.12	0.530	0.134	—
	7	-137	5.10	0.352	0.082	0.058
	8	-159	3.61	0.253	0.049	0.022
K5D SES 溶接 溶接金属	1	-40	6.06	1.074	0.283	—
	2	-73	6.33	0.939	0.248	—
	3	-159	3.26	0.239	0.048	0.018
	4	-193	2.65	0.082	0.008	0.010
	5	-122	3.75	0.245	0.069	0.030
	6	-100	4.90	0.378	0.090	0.066
	7	-139	4.05	0.259	0.054	0.033
	8*	-78	5.12	0.478	0.119	—

(注) * : 疲労亀裂試験片 1) : Rotational Factorを用いて求めた限界COD
2) : FEMで求めた限界COD

表 4.4.1 (4) 小形 COD 曲げ試験結果

試験片	試験片番号	試験温度 (°C)	破壊荷重 (TON)	限界ひずみ V_L (mm)	δ_C (mm)	(δ_C) (mm)
K5D CES 溶接 ボンド	1*	-78	3.15	0.242	0.049	0.024
	2	-75	4.62	0.372	0.088	0.064
	3	-40	5.45	0.834	0.218	—
	4	-10	5.51	1.095	0.289	—
	5	-135	5.52	0.384	0.092	0.081
	6	-104	4.81	0.345	0.080	0.060
	7	-120	5.95	0.457	0.113	0.118
	8	-161	3.64	0.223	0.043	0.023

(注) * : 疲労亀裂試験片
1) : Rotational Factorを用いて求めた限界COD
2) : FEMで求めた限界COD

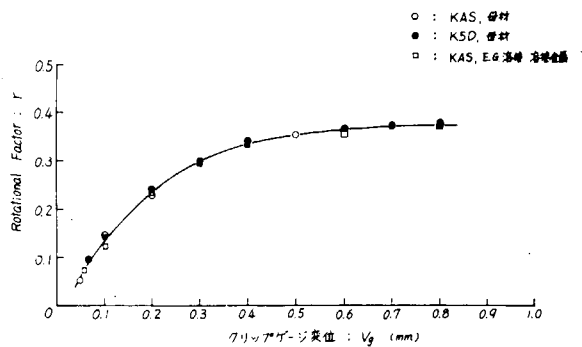


図4.4.3 Rotational Factor

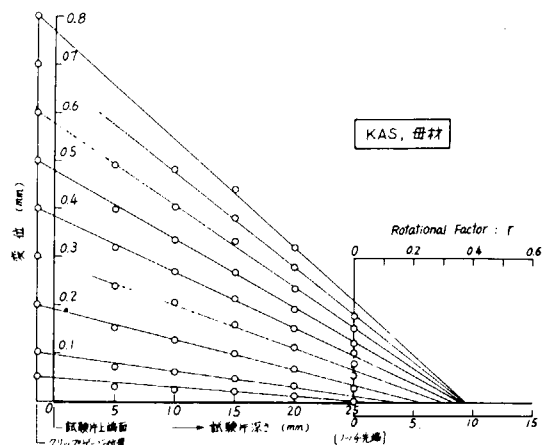


図4.4.4 試験片の形状状況

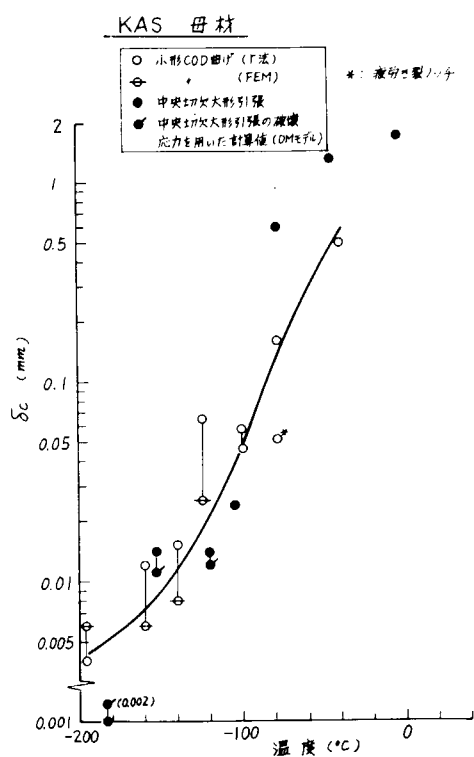


図4.4.5(1) δ_c と温度の関係

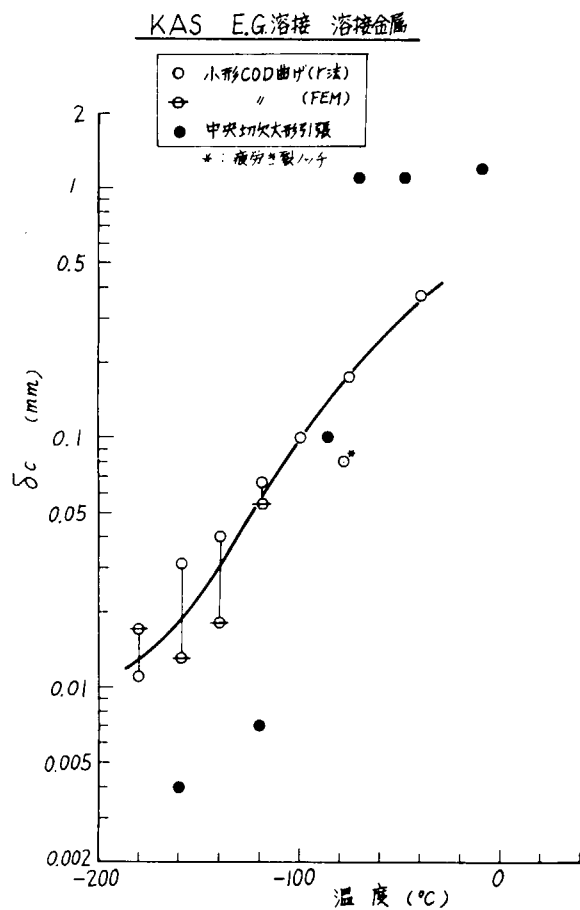


図4.4.5(2) δ_c と温度の関係

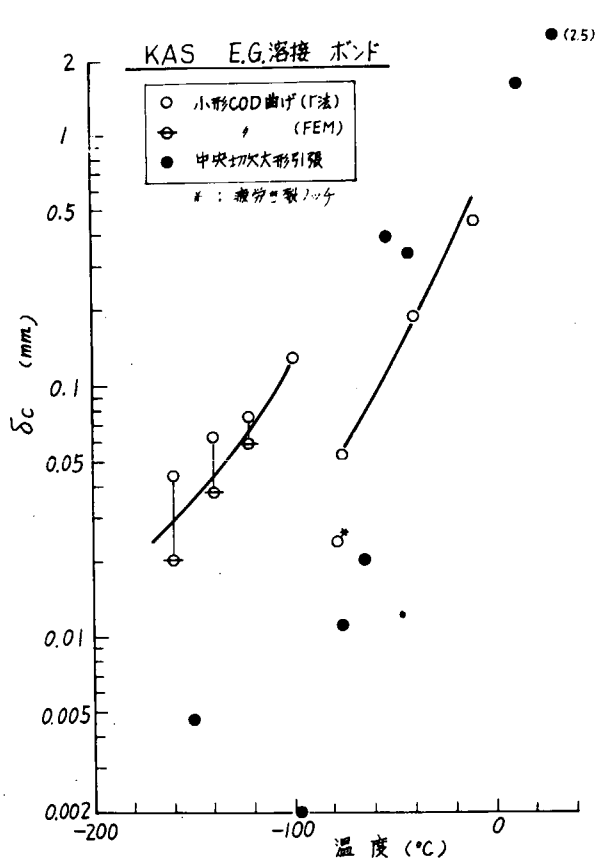


図4.4.5(3) δ_c と温度の関係

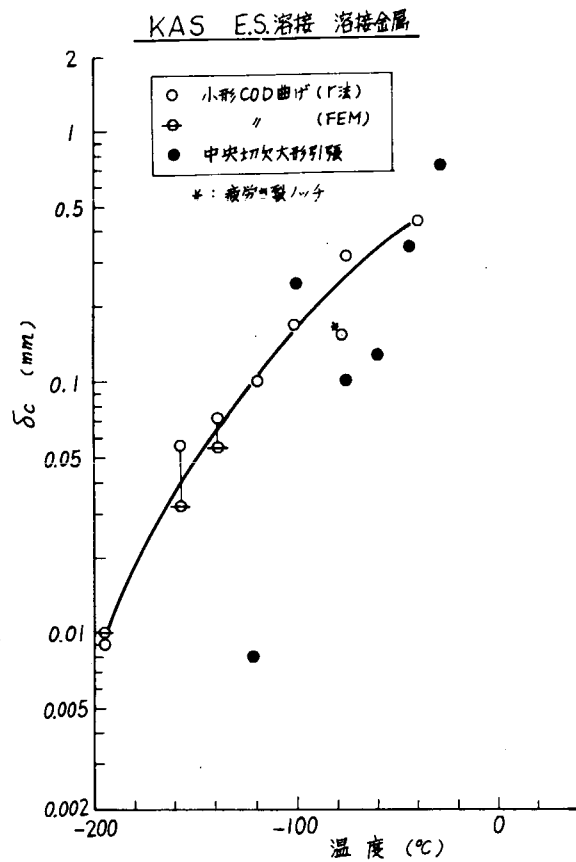


図4.4.5(4) δ_c と温度の関係

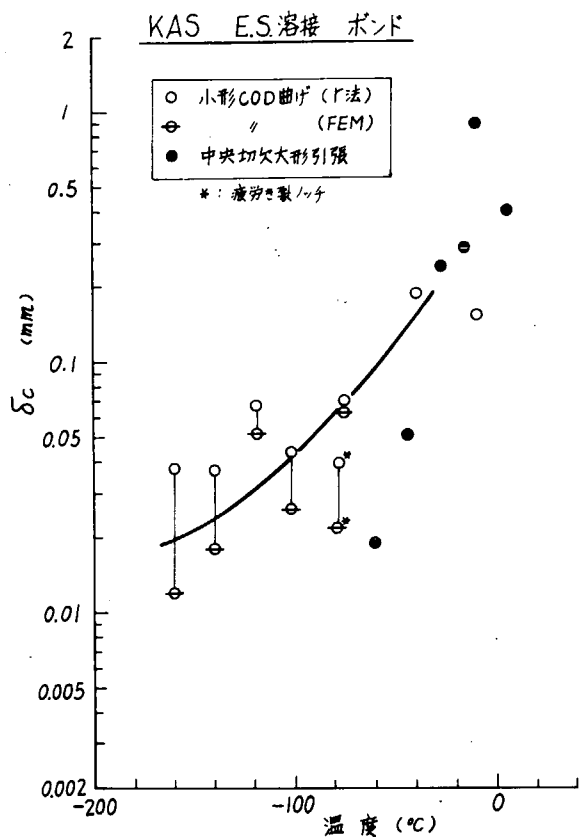


図4.4.5(5) δ_c と温度の関係

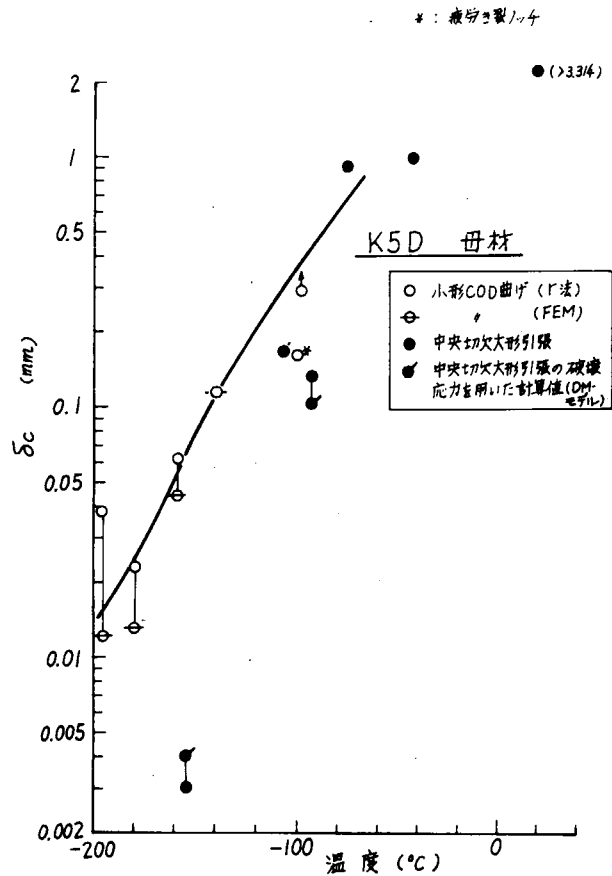


図4.4.5(6) δ_c と温度の関係

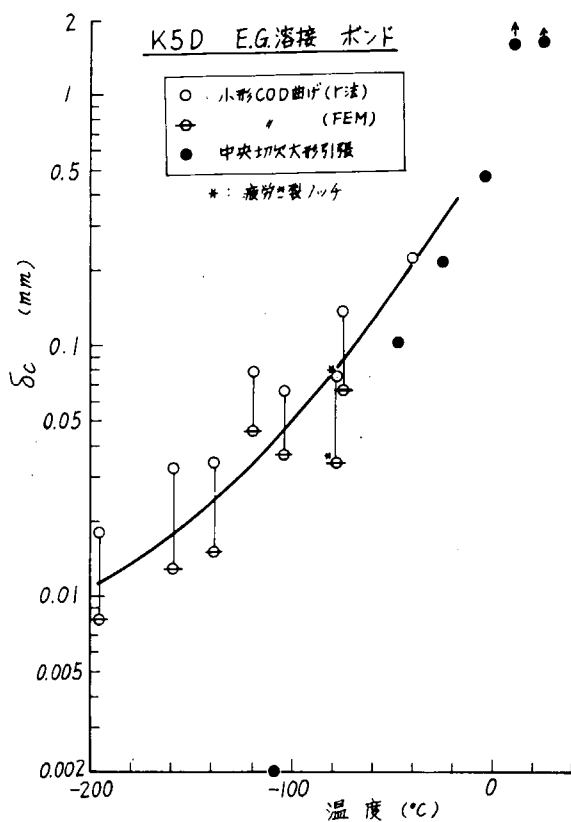


図4.4.5 (7) δ_c と温度の関係

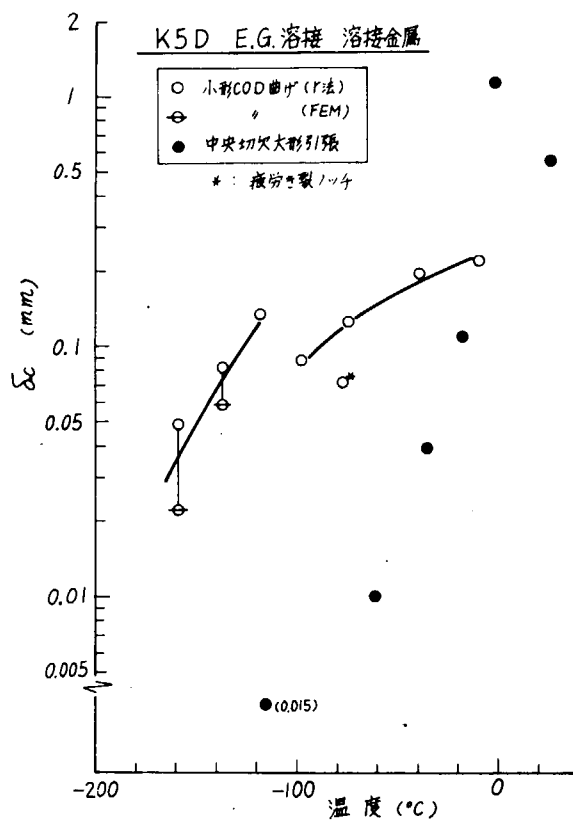


図4.4.5 (8) δ_c と温度の関係

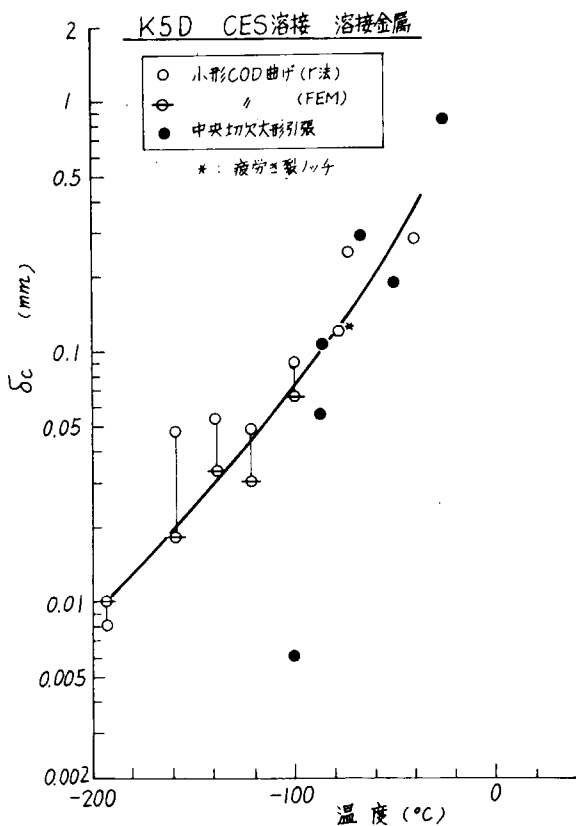


図4.4.5 (9) δ_c と温度の関係

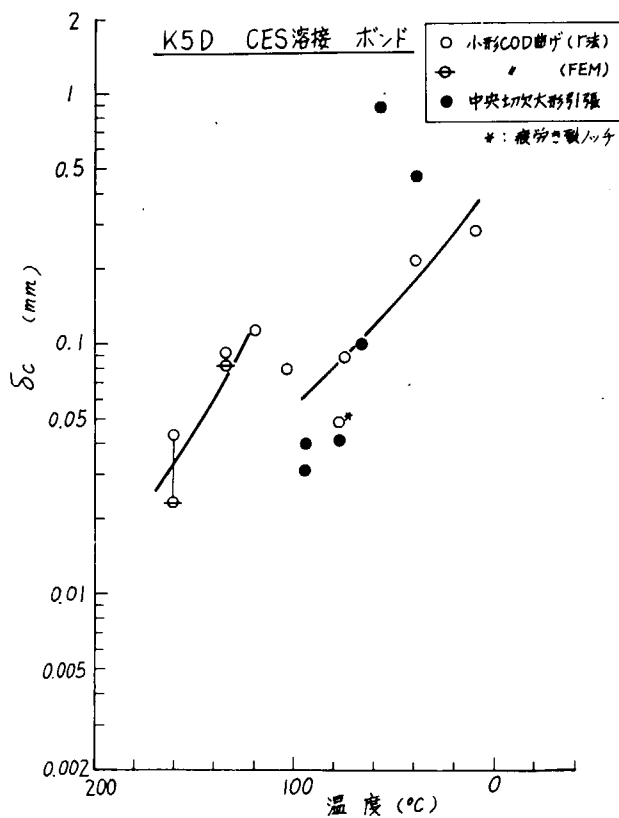


図4.4.5 (10) δ_c と温度の関係

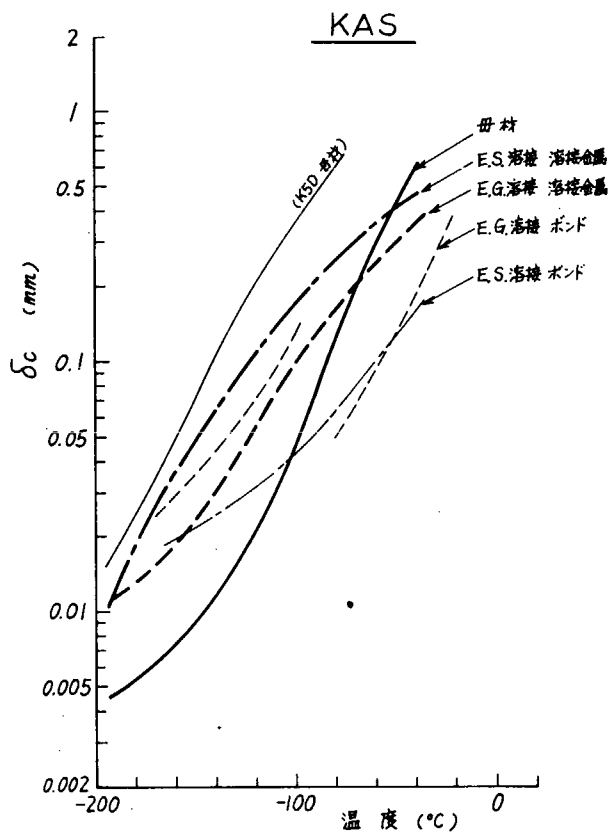


図 4.4.6 (1) δ_c と温度の関係

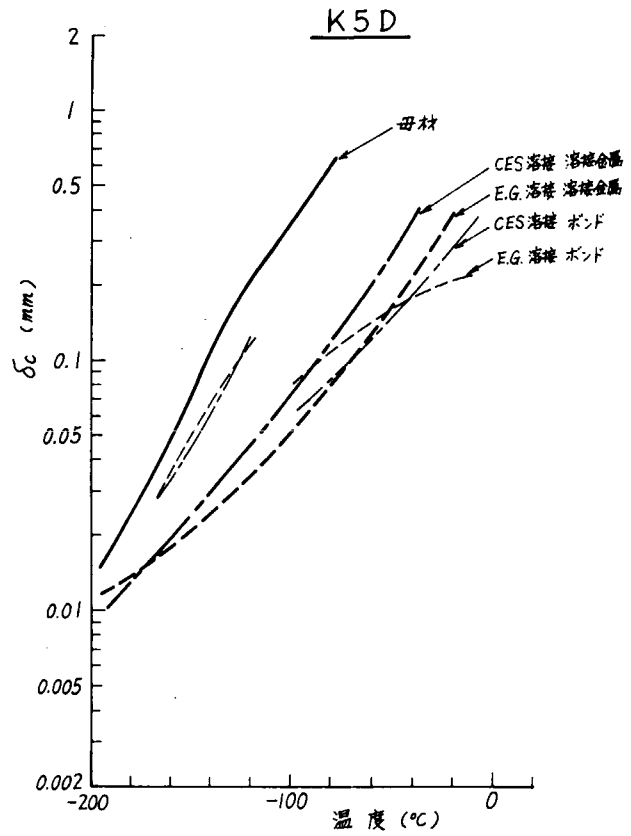


図 4.4.6 (2) δ_c と温度の関係

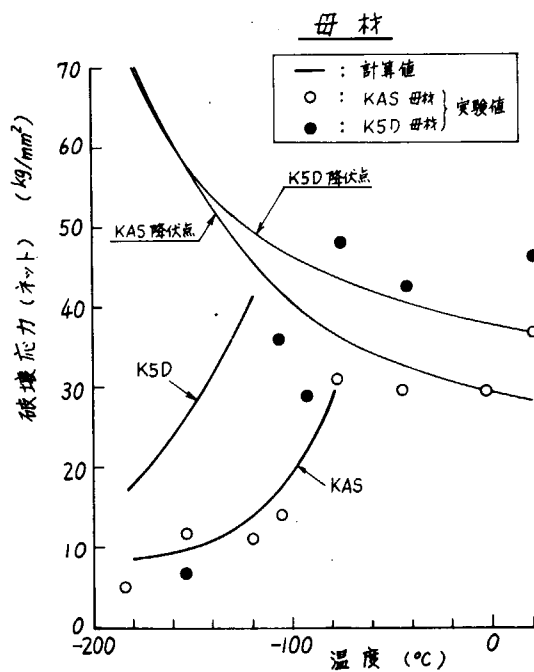


図 4.4.7 (1) 中央切欠大形引張試験の破壊応力の推定

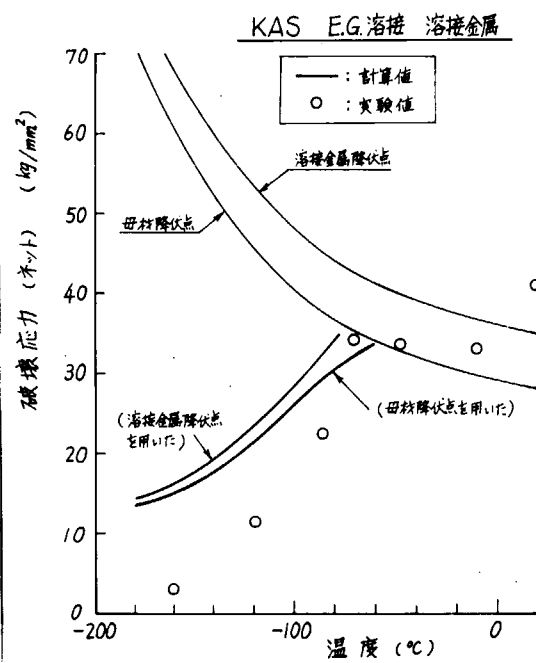


図 4.4.7 (2) 中央切欠大形引張試験の破壊応力の推定

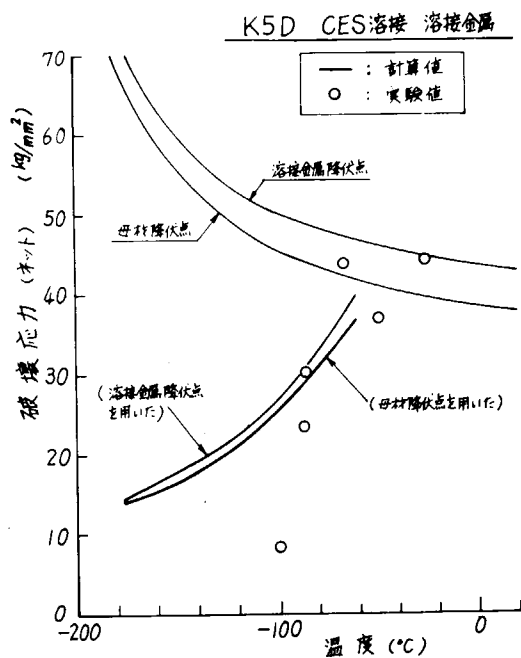


図4.4.7(3) 中央切欠大形引張試験の破壊応力の推定

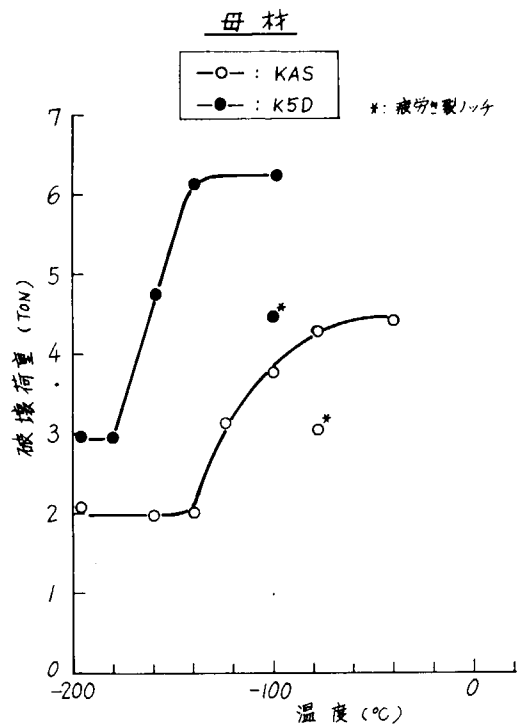


図4.4.8(1) 破壊荷重と温度の関係

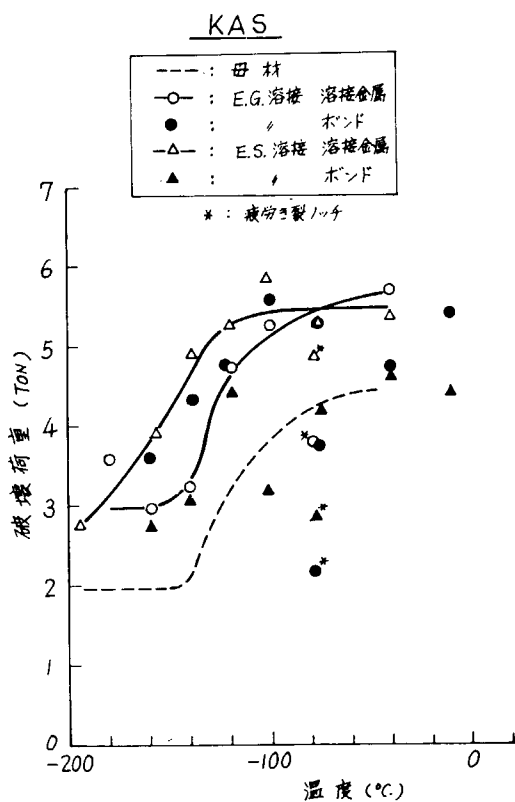


図4.4.8(2) 破壊荷重と温度の関係

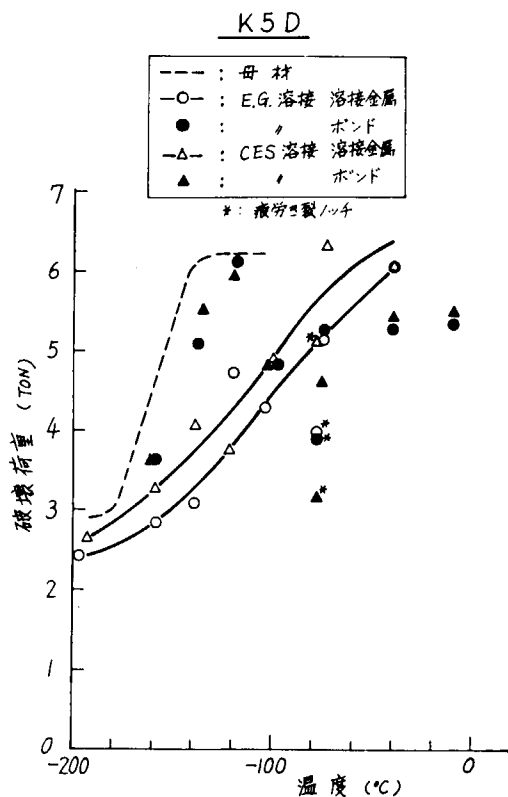


図4.4.8(3) 破壊荷重と温度の関係

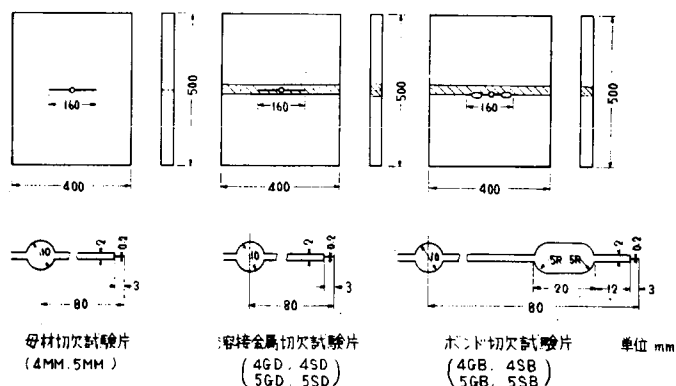


図 5.1.1 中央切欠大形引張試験片の形状と寸法

表 5.1.2 中央切欠大形引張試験結果一覧 (KAS 鋼板外口ガス溶接継手)

[illegible]

* 全面降伏応力以上の応力に対するみかすのKc値

(1) 初期断面寸法に関する値であることを示す

表 5.1.4 中央切欠大形引張試験結果一覧 (K5D鋼ILW外口ガス溶接継手)

材料	試験 位置	試験管片形状 板厚 備 試験 位置	試験 位置	破壊力 直接荷重 G ₁	破壊 Net 荷重 G ₂	限界力之 変位 V _c			限界力之 変位 V _{lim}			備考			
						大 変位	小 変位	平均 変位	大 変位	小 変位	平均 変位				
K5D	17H 試験 位置	56B-2	15.5 400.0	159.8	-116	72.5	2.2	3.7	3.8	0.018	0.009	0.002	0.001	0.002	2段破壊
			25.5 399.8	158.8	-62	50.0	4.0	8.2	84	0.045	0.013	0.010	0.009	0.010	
			25.5 399.8	159.8	-62	89.0	6.0	14.4	-	0.739	0.114	-	-	-	
			25.4 399.8	158.8	-36	96.0	9.5	15.8	162	0.096	0.092	0.041	0.039	0.040	
			25.3 400.5	159.7	-18	142.8	14.1	22.4	240	0.209	0.170	0.121	0.099	0.110	
	17H 試験 位置	56B-5	25.5 399.4	159.7	-3	752.3	24.8	41.3	4.22	1.871	1.377	1.205	1.083	0.144	2段破壊
			25.3 400.0	159.8	+220	729.0	22.9	38.2	3.90	0.709	0.645	0.546	0.543	0.598	
			25.4 399.1	159.8	-72	734.0	23.1	38.5	-	1.455	1.183	-	-	-	
			25.5 400.2	159.6	-109	74.0	2.4	3.4	41	0.029	0.019	0.009	0.007	0.002	
			25.9 400.4	160.0	-47	162.2	15.6	26.0	266	0.191	-	0.102	-	0.102	
17H 試験 位置	56D-4	25.4 400.1	159.9	-75	194.3	19.1	31.6	3.393	0.326	0.238	0.198	0.218	2段破壊		
		25.6 399.9	160.1	-4	244.0	21.8	39.7	4.06	0.647	0.545	0.446	0.459			
		25.6 399.9	160.1	-4	244.0	23.8	39.7	-	1.207	0.229	-	-		-	
		25.4 400.2	160.0	+11	782.0	78.0	46.3	747	2.027	2.027	1.577	1.577		1.659	
		25.6 399.9	160.0	+26	970.0	78.0	46.3	777	2.277	2.027	1.616	1.616		1.616	

* 全面降伏応力以上の応力に対するみかけの K_c 値。

(1) 初期断面寸法に関する値であることを示す

表 5.1.1 中央切欠大形引張試驗結果一覽 (KAS鋼, K5D鋼 母材)

鋼種	材質 仕様	試験片形状 寸法	試験温度 (℃)	破壊速度 (mm/min)	破壊応力 Gross Net	破壊伸び 伸び率 変位	破壊時間 秒 分	破面形状 ヤテップ 変位	備考			
		長さ mm	幅 mm	厚さ mm	mm ² mm ²	mm %	mm 分	大 小 平均	Gc			
KAS 母材	AT11-25.4	400	160	20	2715	21.8 36.2	373	>10	>10	>8	>8	>8
	AT11-25.4	400	160	-4	180.0	17.7 29.4	363	2.30	1.85	1.40	1.50	1.70
	AT11-25.4	400	160	-45	180.0	17.7 29.4	303	1.70	1.40	1.40	1.10	1.25
	AT11-25.4	400	160	-78	180.0	18.5 30.7	317	1.70	1.63	0.65	0.52	0.59
	AT11-25.4	400	160	-105	85.5	8.4 14.0	144	0.045	0.060	0.026	0.022	0.024
	AT11-25.4	400	160	-170	64.0	6.3 10.5	108	0.050	0.045	0.015	0.012	0.014
x50 母材	AT11-25.4	400	160	-153	72.0	7.1 11.8	121	0.060	0.040	0.017	0.010	0.014
	AT11-25.4	400	160	-184	30.0	3.0 4.9	51	0.015	0.012	0.001	0.001	0.001
	5MM11-25.4	399.7	160.0	-154	41.0	4.0 6.7	68	0.021	0.020	0.003	0.003	0.003
	5MM11-25.3	400.3	160.1	-107	218.2	21.5 35.9	367	0.259	0.235	0.176	0.160	0.168
	5MM11-25.4	400.0	160.3	-93	175.2	17.2 28.8	294	0.234	0.197	0.147	0.131	0.131
	5MM11-25.3	400.1	160.2	-76	291.0	28.8 48.0	491	1.147	1.122	0.920	0.909	0.919
5MM11-25.3	400.3	160.2	-43	258.0	25.5 42.5	435	1.225	1.131	0.992	0.916	0.946	
	5MM11-25.4	400.0	160.0	20	283.7	27.8 46.3	474	1.091	1.041	0.846	0.836	0.834

* 全面降伏応力以上の応力に対するみか竹の K_c 値

表 5.1.3 中央切欠大形引張試験結果一覧 (KAS 鋼板外周スラグ溶接継手)

材料 鋼種	材種 仕立 位置	試験片 位置	試験片形状			試験温度 F (°C)	破断力 F _{max} (kg)	破断力 Net (kg)	破断伸び率 % 大	破断伸び率 % 小	破断率 %		備考			
			幅 (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)						破断率 (mm)	破断率 (mm)				
JIS鋼 70鋼 (60鋼)	70鋼 70鋼 (60鋼)	45B-1	45B-1	25.3	400	160 + 6	158 183	15.6 18.1	26.0 30.9	26.7 30.9	0.61 0.55	2.42	2.25	2.335 2.26	2倍破断	
			45B-2	25.6	400	159	-10	185	18.1	30.7	27.9	0.416	1.00	0.80	0.90	
			45B-3	25.7	400	158	-16	170	16.5	27.3	27.9	0.417	0.328	0.33	0.26	0.295
			45B-4	25.4	400	160	-78	133	13.1	21.8	22.9	0.52	0.20	0.354	0.136	0.245
			45B-5	25.5	400	159	-44	193	13.0	21.6	22.1	0.687	0.074	0.053	0.048	0.051
KAS	70鋼 70鋼 (60鋼)	45B-6	45B-6	25.4	400	159	-60	65	6.4	10.6	10.9	0.050	0.047	0.019	0.018	0.019
			45B-7	26.2	399	160	-29	215	20.6	34.3	35.1	1.10	0.920	0.815	0.68	0.748
			45B-8	26.3	400	159	-45	205	19.5	32.3	33.1	0.50	0.460	0.360	0.333	0.347
JIS鋼 70鋼 (60鋼)	70鋼 70鋼 (60鋼)	45B-9	45B-9	26.2	400	160	-60	174	16.6	27.7	28.3	0.221	0.181	0.144	0.118	0.131
			45B-10	26.0	400	156	-76	156	15.0	24.6	25.7	0.18	0.174	0.106	0.103	0.105
			45B-11	26.0	400	157	-101	228	21.9	36.1	36.9	0.374	0.304	0.275	0.226	0.251
JIS鋼 70鋼 (60鋼)	70鋼 70鋼 (60鋼)	45B-12	45B-12	25.8	400	160	-122	56	5.4	9.0	9.7	0.038	0.028	0.004	0.006	0.008
			45B-13	25.8	400	160	-122	56	5.4	9.0	9.7	0.038	0.028	0.004	0.006	0.008

* 全面降伏応力以上の応力に対するみかけの K_c 値

() 初期前面寸法に関する値であることを示す

表 5.1.5 中央切欠大形引張試驗結果一覽 (K5D鋼CES溶接継手)

鋼材 種類	材質 JIS 鋼材 JIS 鋼材	試験片形状			試験成績		50℃耐力		破壊荷重及び寸法			限界引張り力			備考
		板厚 t (mm)	寸法 φ (mm)	寸法 φ (mm)	温度 T (°C)	破断 P (t)	Gross Net Weight (g)	破断 K ₁ (t)	破断 K ₂ (t)	破断 W (mm)	破断 D (mm)	破断 D ₁ (mm)	破断 D ₂ (mm)		
CES 海神 工業	S58-B	25.0	400	160	-95	116	11.6/19.3	198	0.089	0.055	0.041	0.017	0.029		
		25.4	400	160	-78	118	11.6/19.4	198	0.102	0.080	0.057	0.035	0.044		
		25.2	400	160	-58	289	28.7/47.8	489	1.059	1.092	0.81	0.302	0.407		
		25.3	400	160	-40	279	27.6/45.9	470	0.586	0.565	0.484	0.467	0.476		
		25.5	400	160	-67	153	15.0/25.0	256	0.197	0.165	0.197	0.107	0.122		
K5D	S58-B	25.2	400	160	-95	118	11.7/19.5	199	0.098	0.086	0.047	0.037	0.042		
25.4		400	160	-50	224	22.0/36.7	375	0.276	0.248	0.199	0.173	0.186			
25.4		400	160	-100	51	5.0/8.4	85	0.030	0.029	0.004	0.004	0.004			
25.9		400	160	-67	271	26.1/43.6	445	0.348	0.321	0.241	0.226	0.234			
25.5		400	160	-86	184	18.0/30.1	307	0.208	0.148	0.132	0.092	0.107			
CES 海神 工業	S50-B	25.9	400	160	-26	274	26.4/44.1	450	1.267	0.869	1.046	0.716	0.881		
		26.1	400	160	-87	146	14.0/23.3	239	0.116	0.104	0.057	0.048	0.054		

* 全面降伏以上の応力に対するみかけの K_c 値

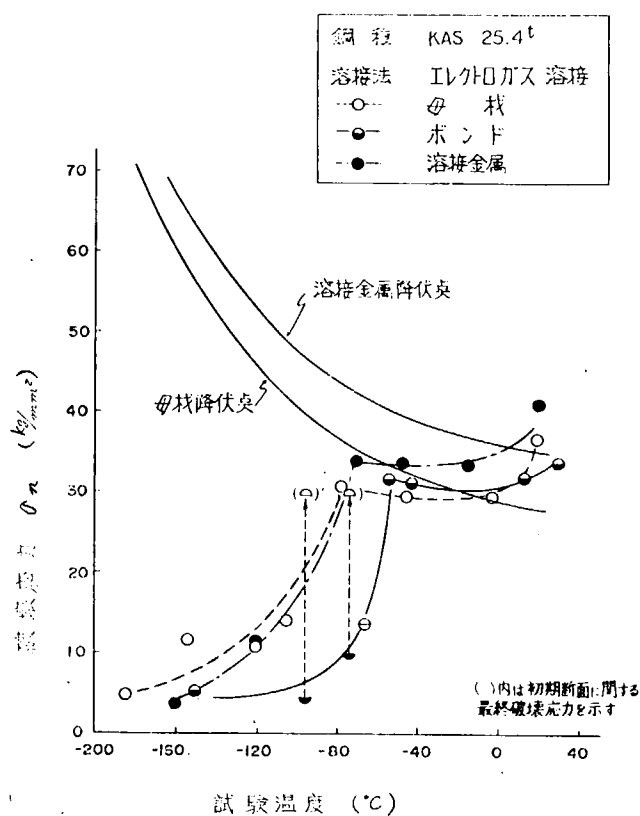


図5.1.2 (1) 中央切欠大形引張試験結果(KAS鋼エレクトロガス溶接継手)
(破壊応力と温度との関係)

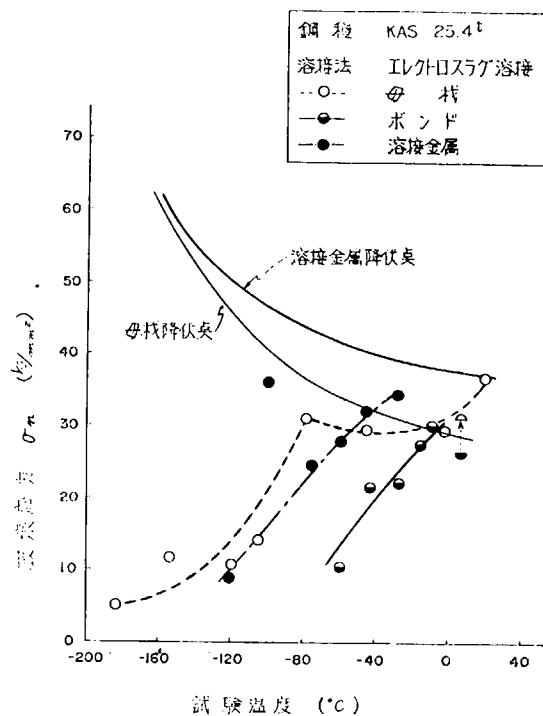


図5.1.2 (2) 中央切欠大形引張試験結果(KAS鋼エレクトロスラグ溶接継手)
(破壊応力と温度との関係)

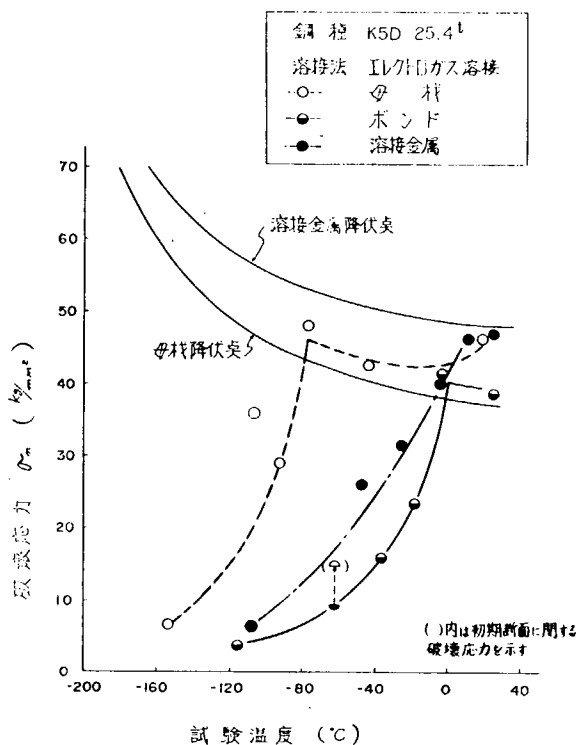


図5.1.2 (3) 中央切欠大形引張試験結果(K5D鋼エレクトロガス溶接継手)
(破壊応力と温度との関係)

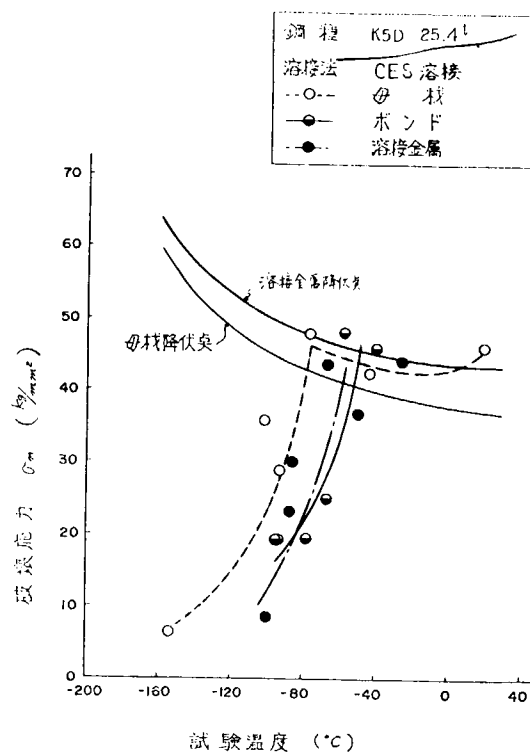


図5.1.2 (4) 中央切欠大形引張試験結果(K5D鋼CES溶接継手)
(破壊応力と温度との関係)

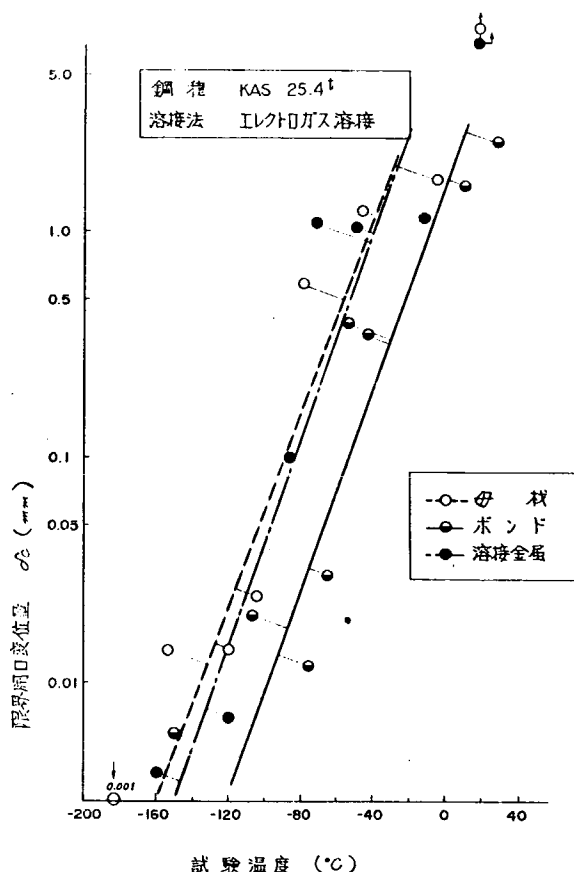


図5.1.3 (1) 中央切欠大形引張試験結果(KAS鋼エレクトロガス溶接継手)
(限界開口変位量と温度との関係)

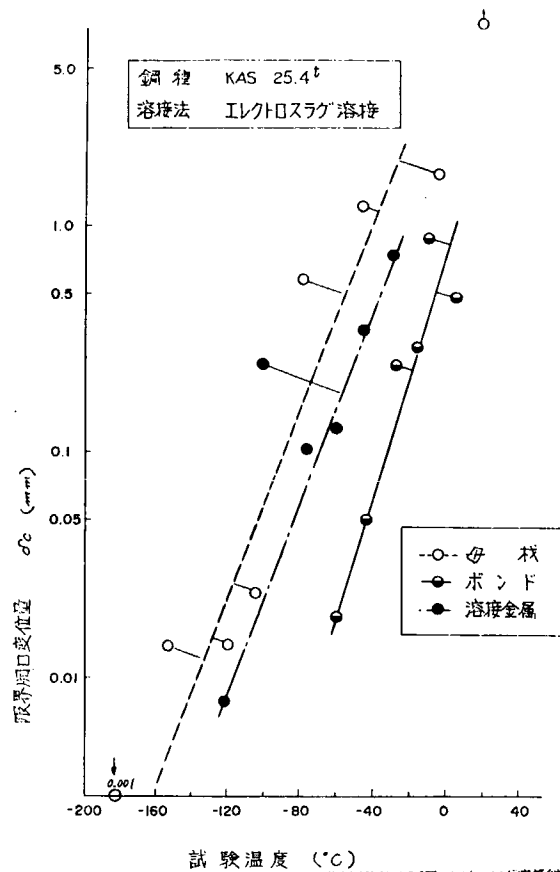


図5.1.3 (2) 中央切欠大形引張試験結果(KAS鋼エレクトロスラグ溶接継手)
(限界開口変位量と温度との関係)

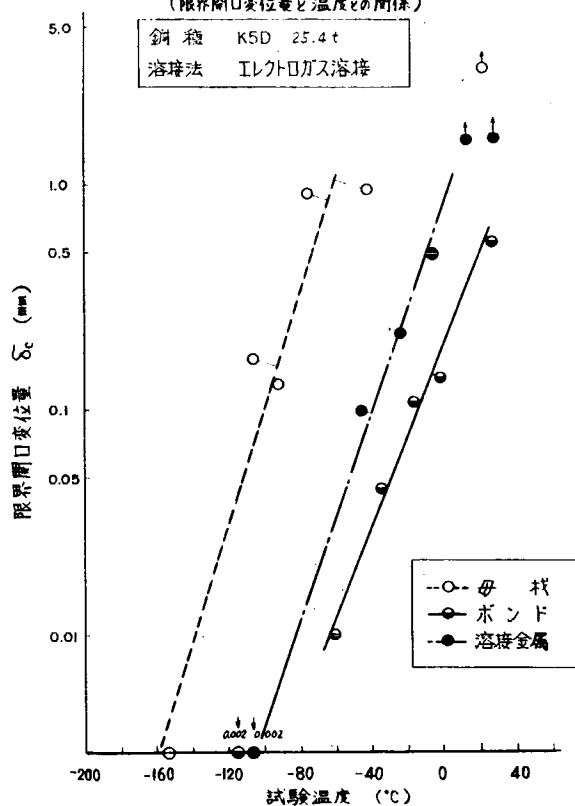


図5.1.3 (3) 中央切欠大形引張試験結果(K5D鋼エレクトロガス溶接継手)
(限界開口変位量と温度との関係)

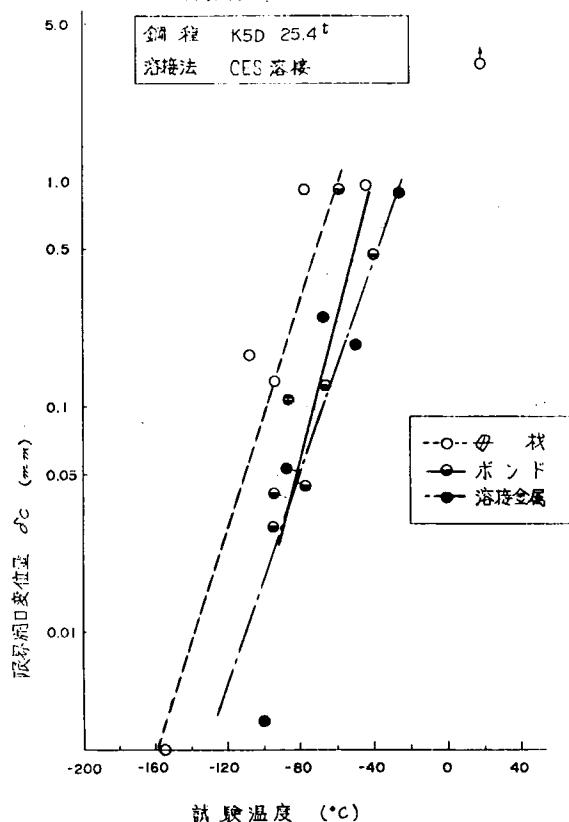


図5.1.3 (4) 中央切欠大形引張試験結果(K5D鋼CES溶接継手)
(限界開口変位量と温度との関係)

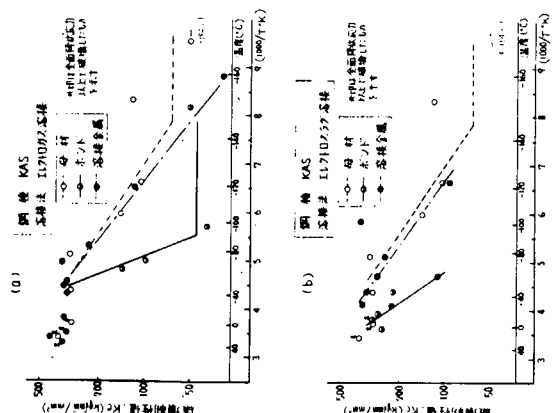


図 5.1.4 (1) 鋼種 KAS の KIC と温度との関係 (KAS 鋼 LT710/27 溶接)

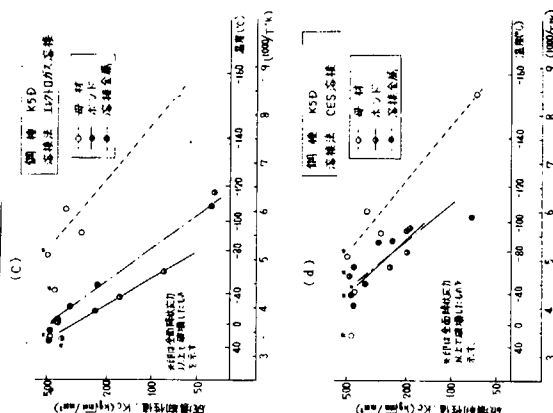


図 5.1.4 (2) 鋼種 KSD の KIC と温度との関係 (KSD 鋼 LT710/27 溶接)

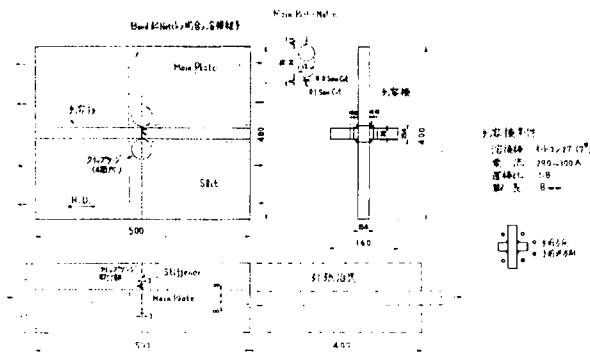


図 5.2.1 十字型拘束引張試験片形状 (A 型)

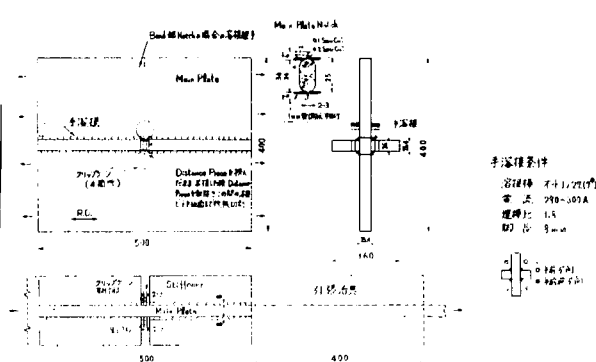


図 5.2.2 十字型拘束引張試験片形状 (B 型)

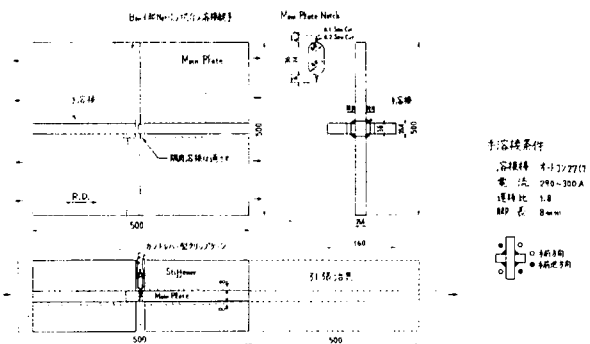


図 5.2.3 十字型拘束引張試験片形状 (C 型)

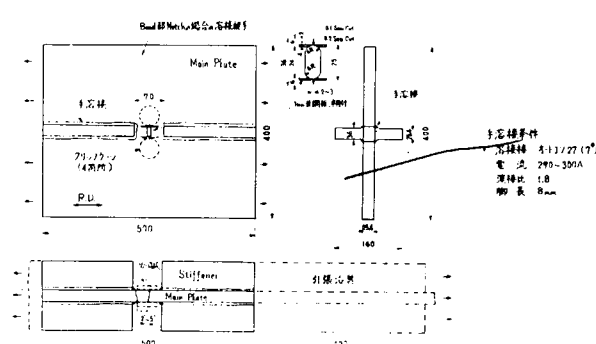


図 5.2.4 十字型拘束引張試験片形状 (D 型)

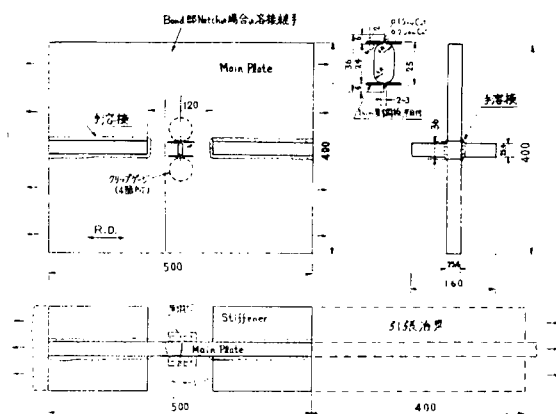


図 5.2.5 十字型拘束引張試験片形状 (D 型)

表5.2.1 十字型拘束引張試験結果一覧 (その1)

鋼種/州道	試験片試験 形状符号 (°C)	一次亀裂発生条件				二次亀裂発生条件				三次亀裂発生条件				
		温度 (°C)	P ₁ (ton)	σ _n (kg/cm ²)	σ _g (kg/cm ²)	COD (V ₀) (mm)	左右	P ₂ (ton)	σ _n (kg/cm ²)	σ _g (kg/cm ²)	COD (V ₀) (mm)	左右	P ₃ (ton)	σ _g (kg/cm ²)
KAS 25.4 母材	A型	Q-1-41	50	5.4	4.9	0.034	0.027	238	23.4	—	—	—	—	—
		Q-2-1	49	5.3	4.8	0.047	0.040	229	22.5	—	—	—	—	—
		Q-3-18	321	34.7	31.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		Q-4-11	64	6.9	6.3	0.077	0.043	127	12.5	0.226	0.174	324	31.8	—
		Q-5-18	259	28.0	25.5	—	—	238	23.4	—	—	297	29.2	—
		Q-6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	B型	B-1-42	63	6.8	6.2	0.048	0.050	162	16.0	—	—	—	—	—
		B-2-0	14	1.5	1.4	0.002	0.011	106	10.4	0.120	0.145	247	24.3	—
		B-3-10	100	10.8	9.8	0.093	0.108	272	26.8	—	—	—	—	—
		B-4-18	238	25.8	23.4	0.507	0.508	270	26.6	—	—	256	25.2	—
		B-5-1	152	16.4	15.0	—	—	276	27.2	—	—	—	—	—
		B-6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	C型	C-1-16	241	26.0	23.7	1.45	1.50	266	26.2	—	—	—	—	—
		C-2-0	233	25.1	23.0	0.52	0.56	240	23.6	—	—	—	—	—
		C-3-18	244	26.3	24.0	0.56	0.70	—	—	—	—	—	—	—
		C-4-28	145	15.6	14.3	0.99	0.06	257	25.3	—	—	—	—	—
		C-5-44	78	8.4	7.7	0.01	0.01	—	—	—	—	—	—	—
		C-6-78	37	4.0	3.6	0.01	0.01	83	8.2	—	—	—	—	—
	D型	D-1-21	258	27.9	25.4	0.950	0.790	—	—	—	—	—	—	—
		D-2-58	191	20.7	18.8	0.230	0.185	265	25.9	0.51	0.49	—	—	—
		D-3-41	282	30.5	27.8	0.703	0.690	—	—	—	—	—	—	—
		D-4-82	160	17.3	15.8	0.213	0.185	—	—	—	—	—	—	—
		D-5-122	40	4.3	3.9	0.024	0.013	50	4.9	0.28	0.23	52	5.1	—
		D-6-51	251	27.2	24.7	0.470	0.310	—	—	—	—	—	—	—

P₁, P₂, P₃: 脆性亀裂発生荷重
 σ_n: 脆性亀裂発生応力 (Net Stress)
 σ_g, σ_g: 脆性亀裂発生応力 (Gross Stress)
 V₀, V₀: COD計測値
 A型: B型D型は1/2位置
 6mm位置で計測
 C型は1/4位置で計測
 D型は1/2位置で計測

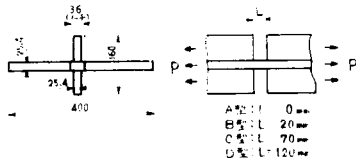


表5.2.2 十字型拘束引張試験結果一覧 (その2)

鋼種/州道	試験片試験 形状符号	試験 温度 (℃)	一次亀裂発生条件					二次亀裂発生条件					三次亀裂発生条件				
			P ₁ (ton)	σ _n (kg/cm ²)	σ _g (kg/cm ²)	COD (V ₀) (mm)	左右	P ₂ (ton)	σ _n (kg/cm ²)	σ _g (kg/cm ²)	COD (V ₀) (mm)	左右	P ₃ (ton)	σ _g (kg/cm ²)			
KAS 25.4	A型	A-1	0	97	10.5	9.5	0.114	0.109	194	19.1	1.19	1.26	—	—	—		
		A-2	26	182	19.7	17.9	0.254	0.262	236	23.2	0.42	0.47	266	26.2	—		
		A-3	20	205	22.2	20.2	0.270	0.300	280	27.6	2.80	3.05	—	—	—		
		A-4	10	111	12.0	10.9	—	0.036	160	15.7	—	0.06	258	25.4	—		
		A-5	19	107	11.6	10.5	0.136	0.152	169	16.6	1.12	1.26	—	—	—		
		A-6	12	245	26.5	24.1	—	—	260	25.6	—	—	—	—	—		
		A-7	17	102	11.0	10.0	0.062	0.012	175	17.2	0.20	0.09	—	—	—		
	B型	B-1-59	9	1.0	0.9	0.006	0.005	60	5.8	0.46	0.44	—	—	—	—		
		B-2-34	8	0.9	0.8	0.005	0.002	113.5	11.0	0.37	0.35	—	—	—	—		
		B-3-18	26	2.8	2.5	0.020	0.004	226	21.9	0.72	0.71	—	—	—	—		
		B-4	8	126	13.4	12.2	0.17	0.16	—	—	—	—	—	—	—		
		B-5	0	115	12.2	11.1	0.12	0.12	210	20.3	0.43	0.35	273.5	26.5	—		
		B-6	22	96	10.2	9.3	0.09	0.09	170	16.5	0.29	0.26	278.5	27.0	—		
	C型	C-1	15	260	28.2	25.6	0.65	0.62	268	26.4	—	—	—	—	—		
		C-2	8	84	9.1	8.3	0.03	0.03	165	16.3	—	—	—	—	—		
		C-3	10	152	16.5	15.0	0.17	0.11	—	—	—	—	—	—	—		
		C-4	30	183	19.8	18.0	0.17	0.17	—	—	—	—	—	—	—		
		C-5	57	235	25.4	23.1	0.19	—	—	—	—	—	—	—	—		
		C-6	86	45	4.9	4.4	0.02	0	164	16.2	—	—	—	—	—		
	D型	D-1	79	40	4.3	3.9	0.022	0.034	72	7.1	0.35	0.45	—	—	—		
		D-2	2	241	26.0	23.7	0.385	0.440	248	24.4	1.06	0.78	—	—	—		
		D-3	41	170	18.4	16.7	0.150	0.160	—	—	—	—	—	—	—		
		D-4	20	250	27.0	24.6	0.218	0.310	—	—	—	—	—	—	—		
		D-5	21	188	20.3	18.5	0.164	0.140	—	—	—	—	—	—	—		
		D-6	51	200	21.6	19.7	0.163	0.203	320	31.5	1.04	0.84	—	—	—		

P₁, P₂, P₃: 脆性亀裂発生荷重
 σ_n: 脆性亀裂発生応力 (Net Stress)
 σ_g, σ_g: 脆性亀裂発生応力 (Gross Stress)
 V₀, V₀: COD計測値
 A型: B型D型は1/2位置
 6mm位置で計測
 C型は1/4位置で計測
 D型は1/2位置で計測

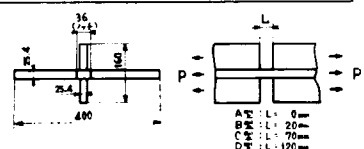
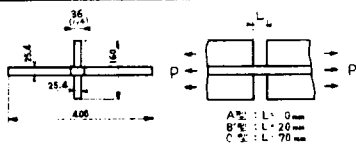


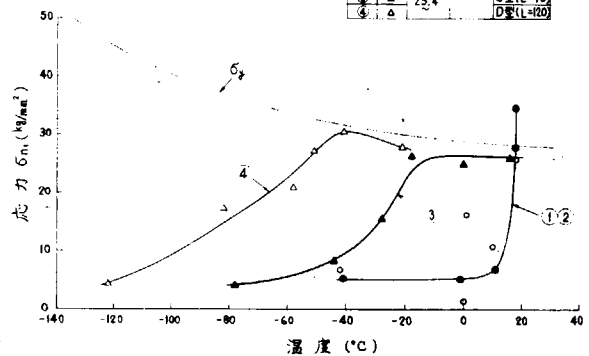
表5.2.3 十字型拘束引張試験結果一覧 (その3)

鋼種/州道	試験片試験 形状符号	温度 (°C)	一次亀裂発生条件					二次亀裂発生条件					三次亀裂発生条件		
			P ₁ (ton)	σ _n (kg/cm ²)	σ _g (kg/cm ²)	COD (V ₀) (mm)	左右	P ₂ (ton)	σ _n (kg/cm ²)	σ _g (kg/cm ²)	COD (V ₀) (mm)	左右	P ₃ (ton)	σ _g (kg/cm ²)	
KAS 25.4	A型	A-1-1	164	17.7	16.2	0.12	0.09	—	—	—	—	—	—	—	—
		A-2-40	51	5.5	5.1	0.05	0.05	122	12.0	0.355	0.375	—	—	—	
		A-3-22	170	18.4	16.7	0.147	—	378	37.2	—	—	—	—	—	
		A-4-22	14	1.5	1.4	0.014	0.037	213	20.9	0.405	1.74	—	—	—	
		A-5-18	34	3.7	3.3	0	0.09	222	21.8	0.48	1.97	—	—	—	
		A-6-10	101	10.9	9.9	0.34	0.39	111.8	11.6	0.47	0.48	129.1	12.1	—	
B型	B-1-39	110	11.9	10.8	0.11	—	—	—	—	—	—	—	—		
	B-2-61	56	6.1	5.5	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—		
	B-3-20	105	11.4	10.3	0.11	—	—	—	—	—	—	—	—		
	B-4-0	222	24.1	21.9	1.38	—	—	—	—	—	—	—	—		
	B-5-11	264	28.6	26.0	1.88	—	—	—	—	—	—	—	—		
	C-1-62	142	15.3	13.9	0.16	—	—	—	—	—	—	—	—		
C型	C-2-21	253	27.4	24.9	0.40	—	—	—	—	—	—	—	—		
	C-3-42	211	22.8	20.8	0.24	—	—	—	—	—	—	—	—		
	C-4-42	61	6.5	5.9	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—		

P₁, P₂, P₃: 脆性亀裂発生荷重
 σ_n: 脆性亀裂発生応力 (Net Stress)
 σ_g, σ_g: 脆性亀裂発生応力 (Gross Stress)
 V₀, V₀: COD計測値
 A型: B型D型は1/2位置
 6mm位置で計測
 C型は1/4位置で計測
 D型は1/2位置で計測



番号	記号	鋼種	母材	試験片形状
①	●	KAS	母材	A型(L=0)
②	○	KAS	母材	B型(L=20)
③	△	25.4	母材	C型(L=70)
④	◇	25.4	母材	D型(L=120)

図5.2.6 十字型拘束引張試験結果(応力-温度の関係)
(KAS, 25.4mm 母材)

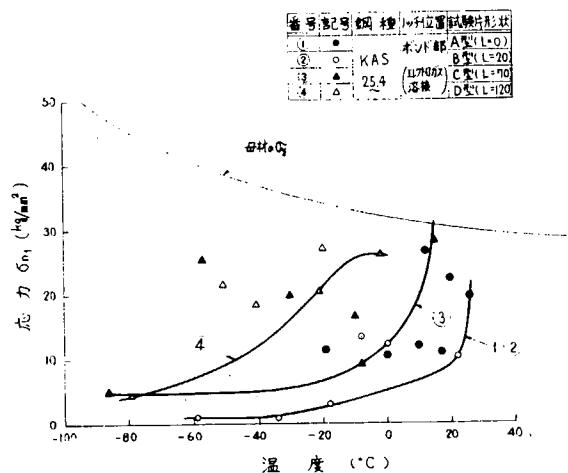


図5.2.7 十字型拘束引張試験結果(応力-温度の関係)
(KAS 25.4mm, エレクトロガス溶接継手)

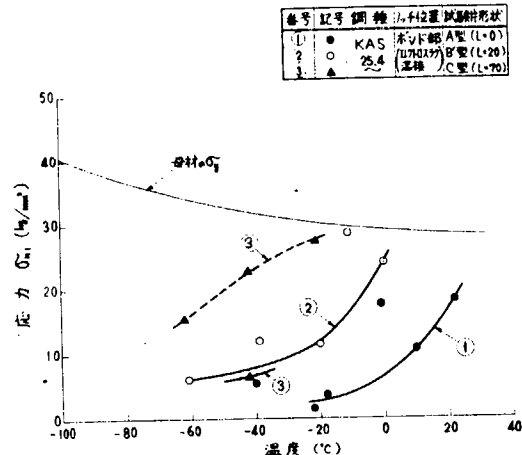


図5.2.8 十字型拘束引張試験結果(応力-温度の関係)
(KAS 25.4mm, エレクトロslag溶接継手)

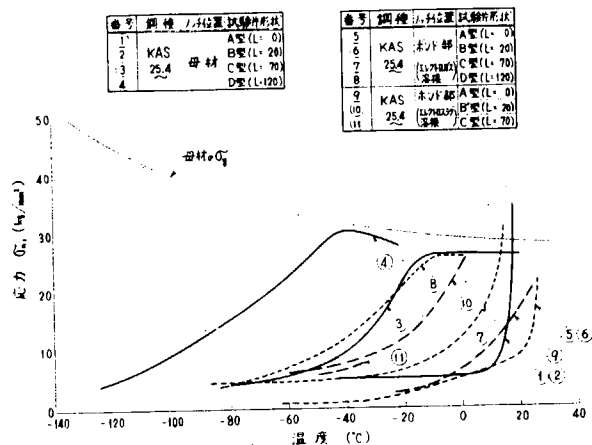


図5.2.9 十字型拘束引張試験結果(応力-温度の関係)

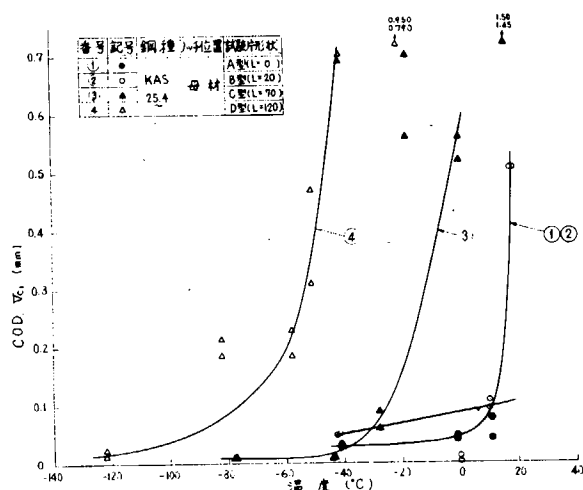


図5.2.10 十字型拘束引張試験結果(COD-温度の関係)
(KAS 25.4mm, 母材)

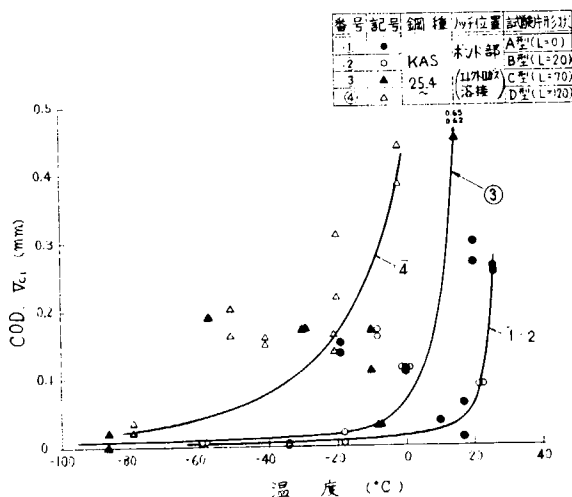


図5.2.11 十字型拘束引張試験結果(COD-温度の関係)
(KAS 25.4mm, エレクトロガス溶接継手)

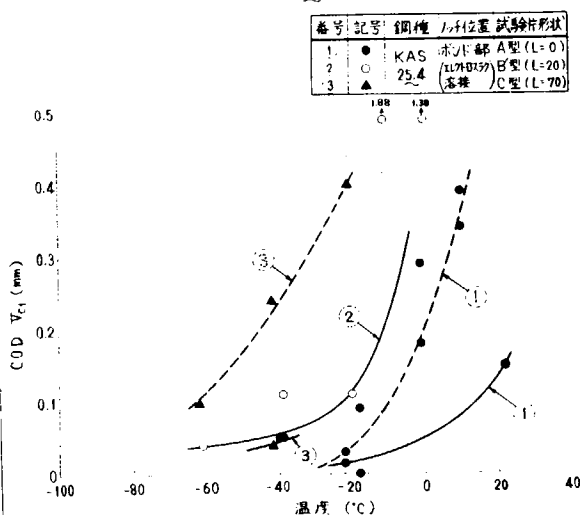


図5.2.12 十字型拘束引張試験結果(COD-温度の関係)
(KAS 25.4mm, エレクトロslag溶接継手)

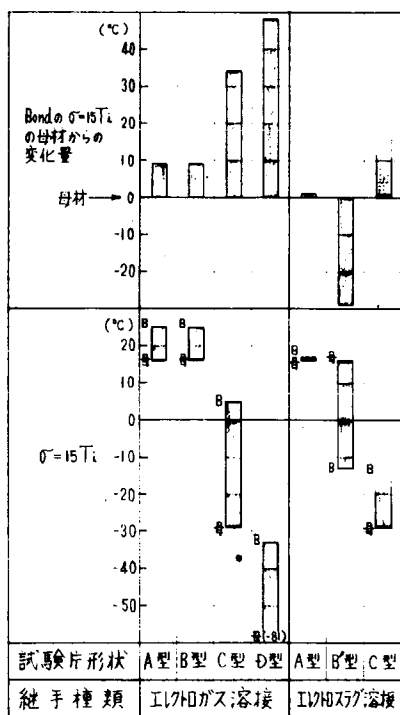


図5.2.13 十字型拘束引張試験結果
(Bond of $\sigma=15\text{Ti}$ の母材からの変化)

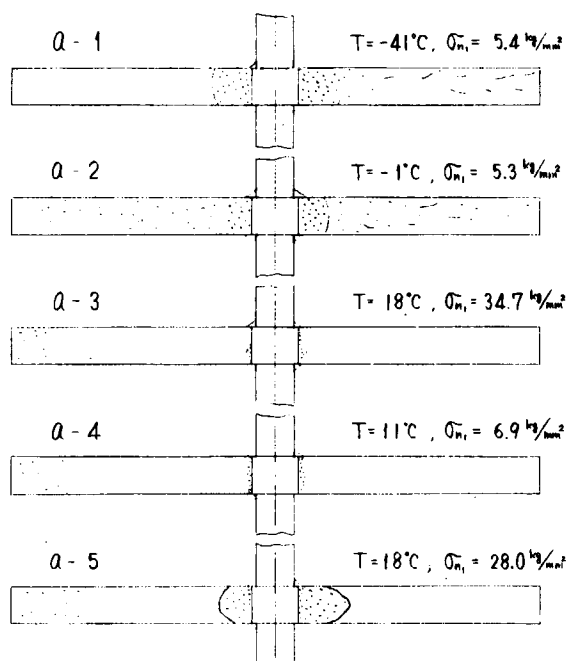


図5.2.14 十字型拘束引張試験片破面様相
(KAS, 25.4 mm, 母材)

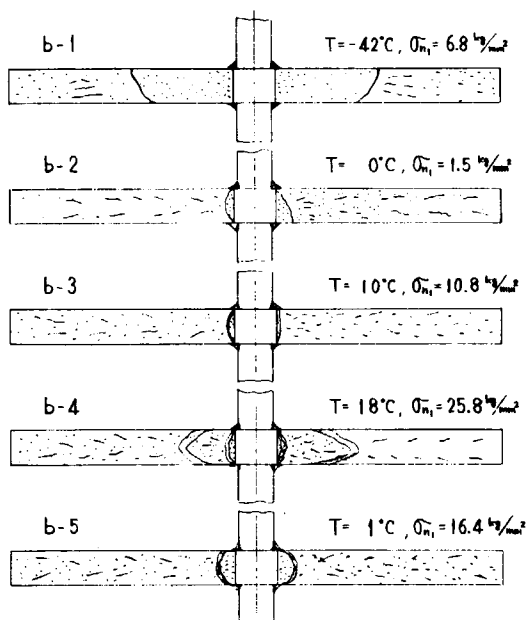


図5.2.15 十字型拘束引張試験片破面様相
(KAS, 25.4 mm, 母材)

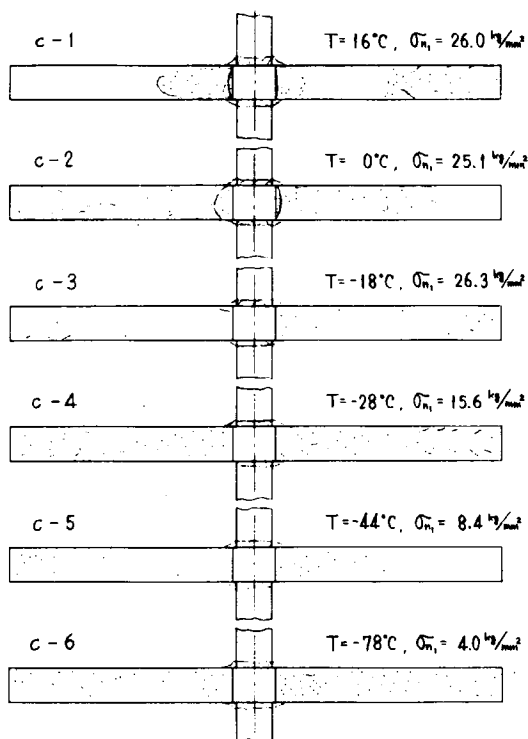


図5.2.16 十字型拘束引張試験片破面様相
(KAS 25.4 mm, 母材)

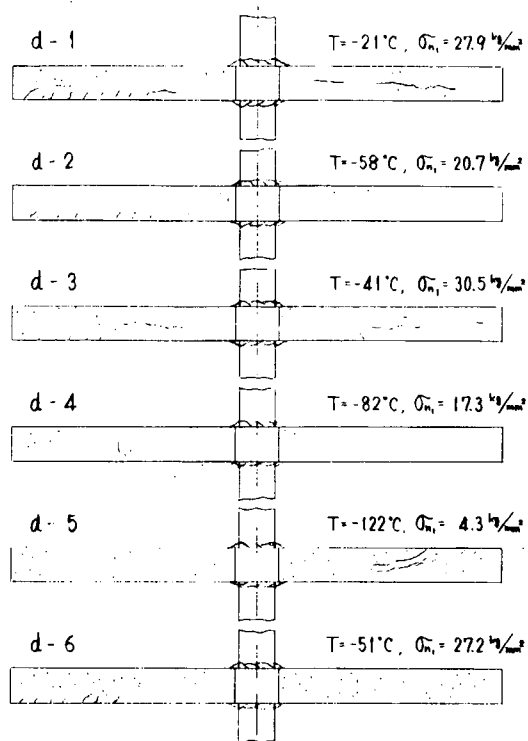


図5.2.17 十字型拘束引張試験片破面様相
(KAS 25.4 mm, 母材)

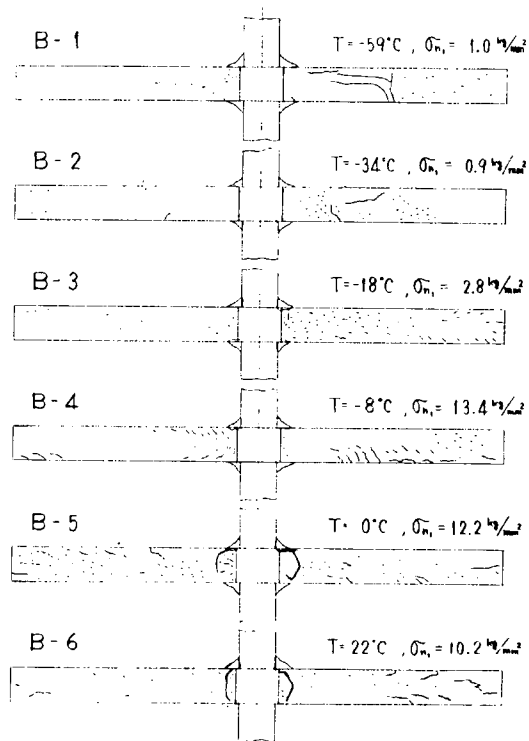


図5.2.19 十字型拘束引張試験片破面様相
(KAS 25.4 mm, エレクトロガス溶接継手)

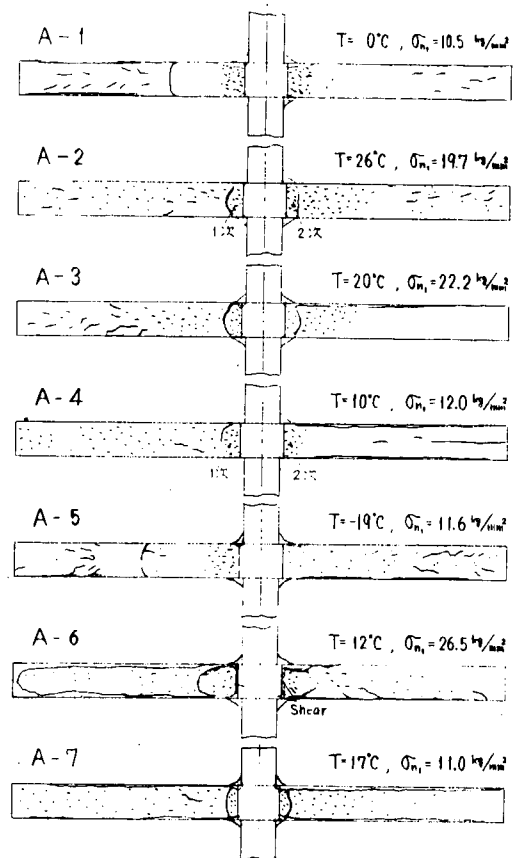


図5.2.18 十字型拘束引張試験片破面様相
(KAS 25.4 mm, エレクトロガス溶接継手)

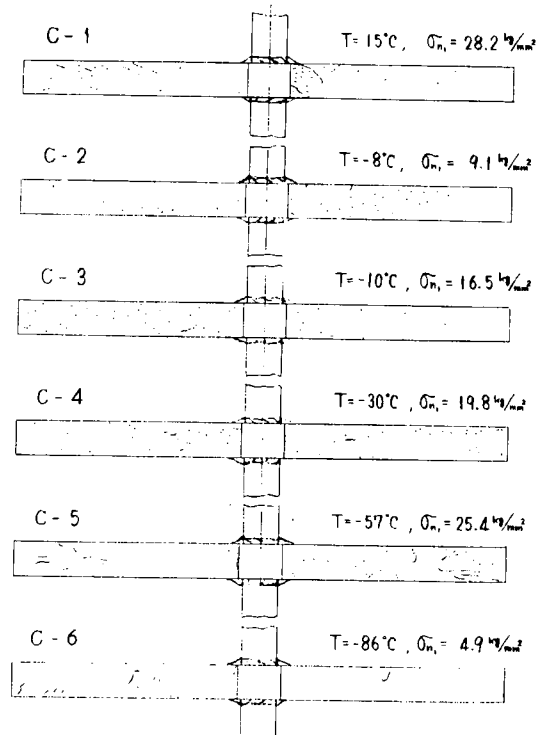


図5.2.20 十字型拘束引張試験片破面様相
(KAS 25.4 mm, エレクトロガス溶接継手)

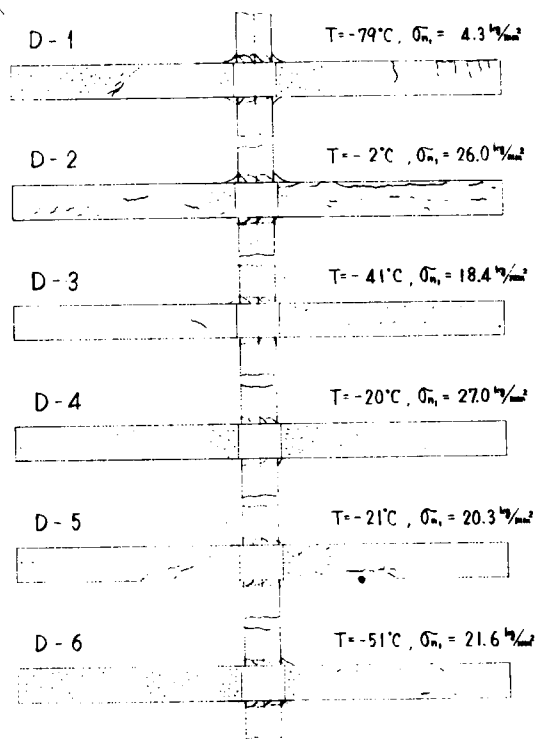


図5.2.21 十字型拘束引張試験片破面様相
(KAS, 25.4 mm, エレクトロslag溶接継手)

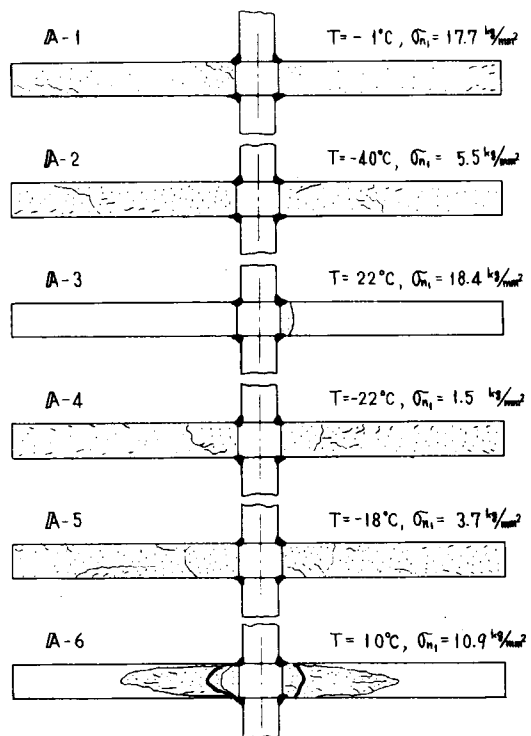


図5.2.22 十字型拘束引張試験片破面様相
(KAS, 25.4 mm, エレクトロslag溶接継手)

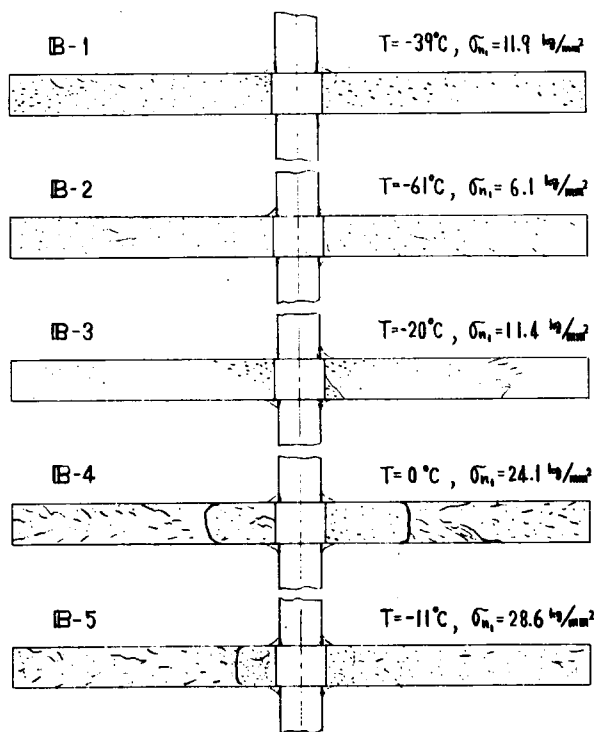


図5.2.23 十字型拘束引張試験片破面様相
(KAS, 25.4 mm, エレクトロslag溶接継手)

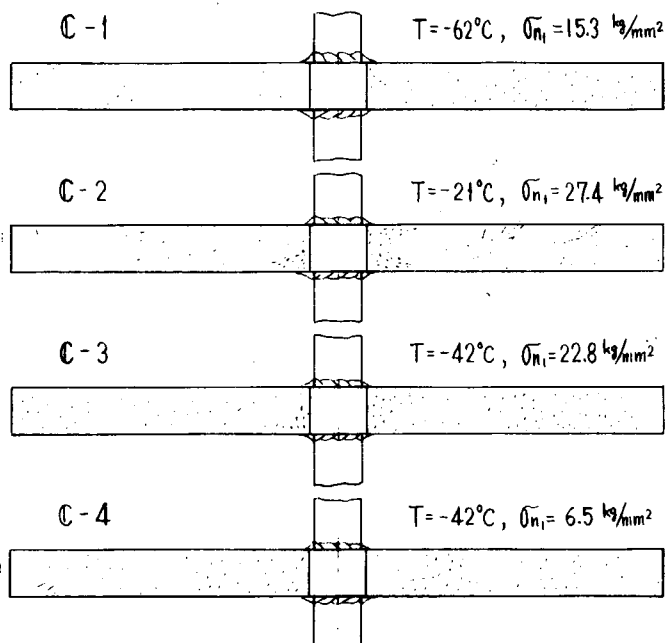


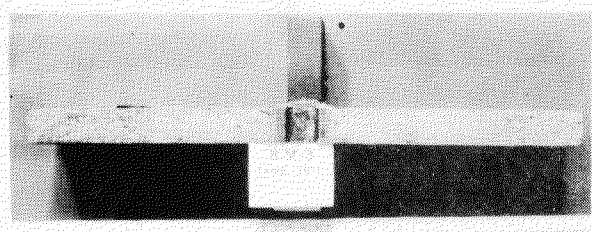
図5.2.24 十字型拘束引張試験片破面様相
(KAS, 25.4 mm, エレクトロslag溶接継手)



C-1. $T=16^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 26.0 \text{ kg/mm}^2$



C-2. $T=0^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 25.1 \text{ kg/mm}^2$



C-3. $T=-18^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 26.3 \text{ kg/mm}^2$



C-4. $T=-28^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 15.6 \text{ kg/mm}^2$

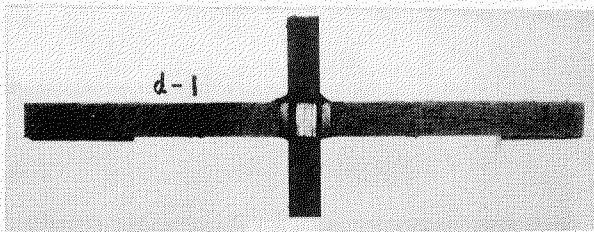


C-5. $T=-44^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 8.4 \text{ kg/mm}^2$

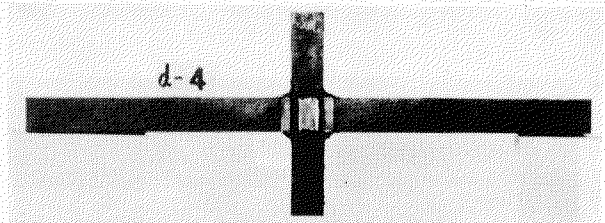


C-6. $T=-78^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 4.0 \text{ kg/mm}^2$

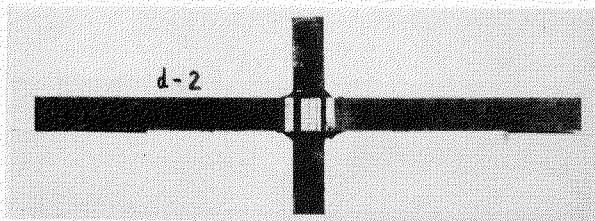
写真 5.2.1 十字型拘束引張試験による破面状況
(KAS, 25.4mm, 母材)



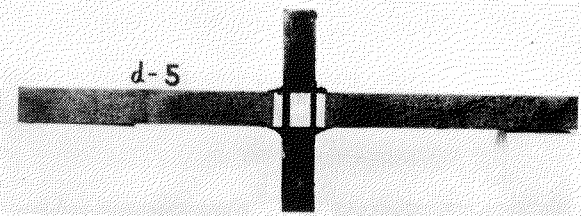
$T = -21^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{\text{H}} = 27.9 \text{ kg/mm}^2$



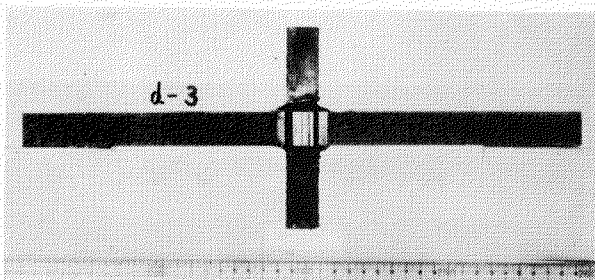
$T = -82^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{\text{H}} = 17.3 \text{ kg/mm}^2$



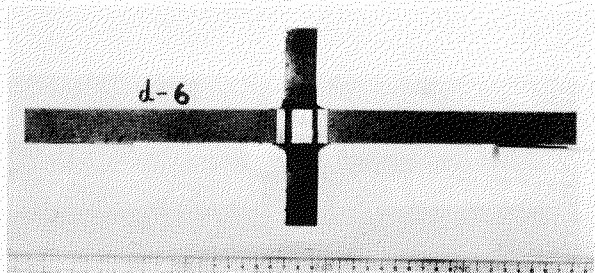
$T = -58^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{\text{H}} = 20.7 \text{ kg/mm}^2$



$T = -122^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{\text{H}} = 4.3 \text{ kg/mm}^2$



$T = -41^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{\text{H}} = 30.5 \text{ kg/mm}^2$

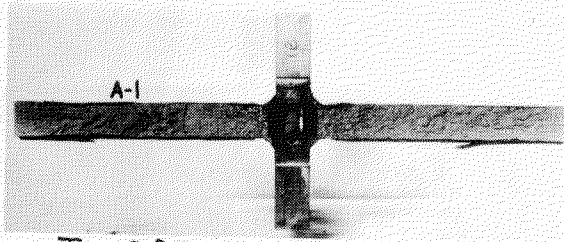


$T = -51^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{\text{H}} = 27.2 \text{ kg/mm}^2$

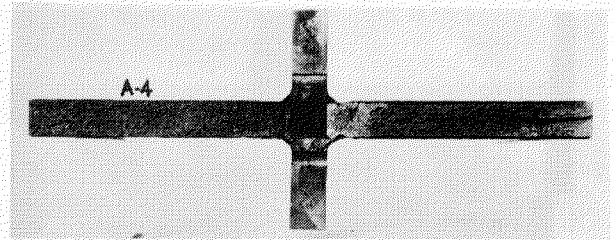
写真 5.2.2

写真 5.2.3

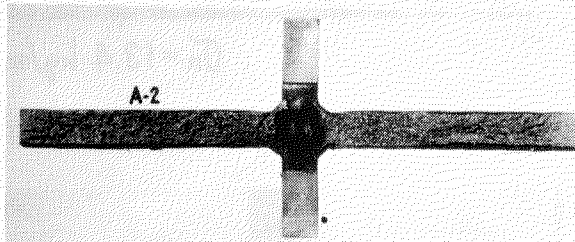
十字型拘束引張試験による破面状況
(KAS, 25.4 mm, 母材)



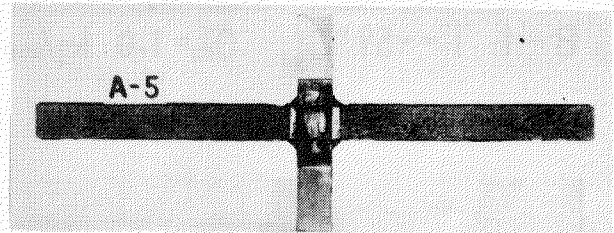
$T = 0^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 10.5 \text{ kg/mm}^2$



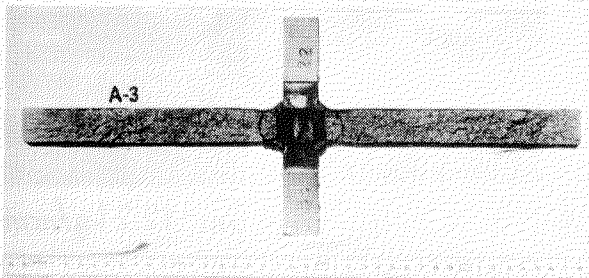
$T = 10^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 12.0 \text{ kg/mm}^2$



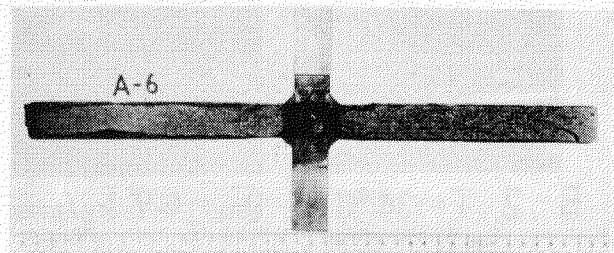
$T = 26^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 19.7 \text{ kg/mm}^2$



$T = -19^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 11.6 \text{ kg/mm}^2$



$T = 20^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 22.2 \text{ kg/mm}^2$

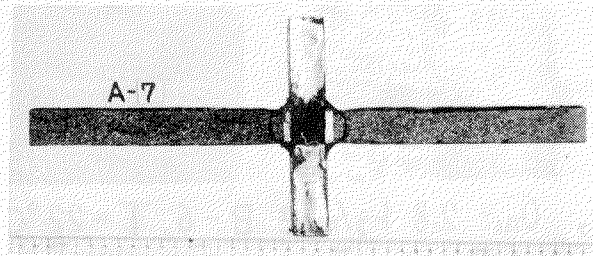


$T = 12^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 26.5 \text{ kg/mm}^2$

写真5.2.4

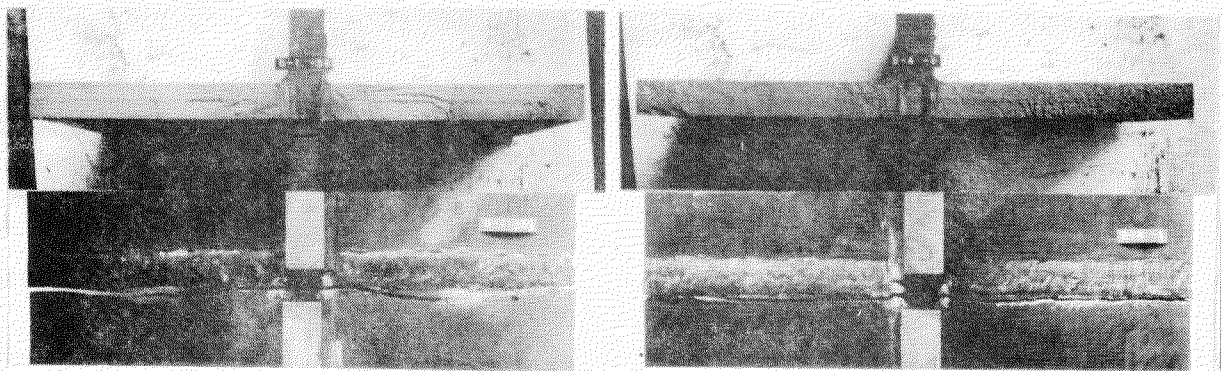
写真5.2.5

十字型拘束引張試験による破面状況
(KAS, 25.4mm, イレトロガス溶接継手)

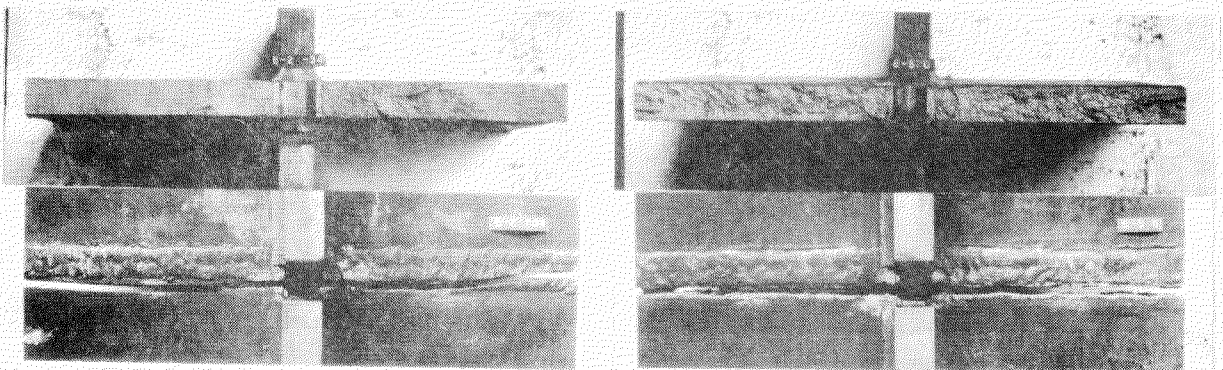


$T = 17^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 11.0 \text{ kg/mm}^2$

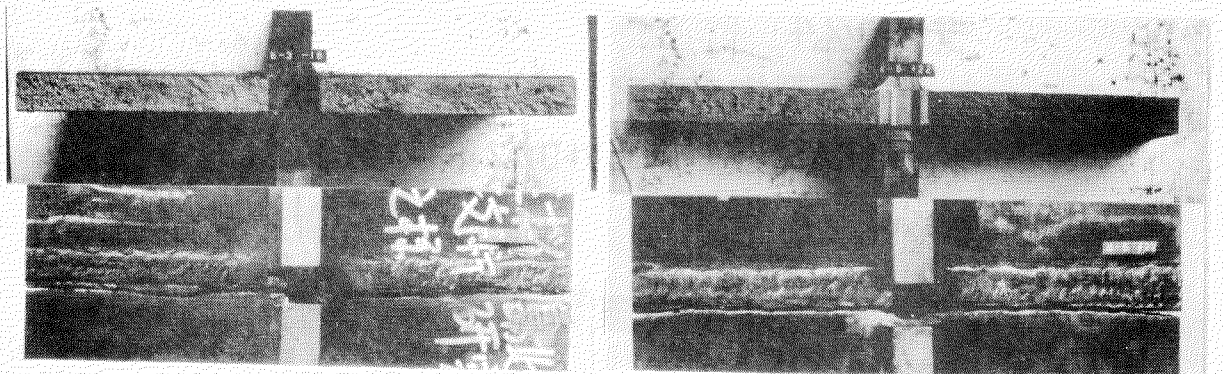
写真5.2.6 十字型拘束引張試験による破面状況
(KAS, 25.4mm, イレトロガス溶接継手)



B-1. $T = -59^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 1.0 \text{ kg/mm}^2$ B-4. $T = -8^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 13.4 \text{ kg/mm}^2$



B-2. $T = -34^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 0.9 \text{ kg/mm}^2$ B-5. $T = 0^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 12.2 \text{ kg/mm}^2$

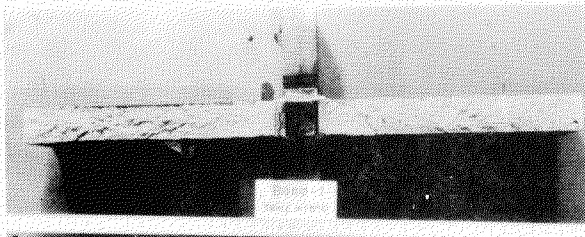


B-3. $T = -18^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 2.8 \text{ kg/mm}^2$ B-6. $T = 22^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 10.2 \text{ kg/mm}^2$

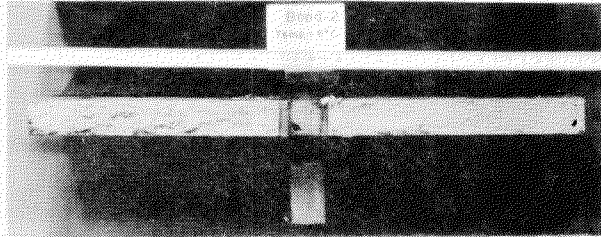
写真5.2.7

写真5.2.8

十字型拘束引張試験による破面状況
(KAS, 25.4 mm, エレクトロガス溶接継手)



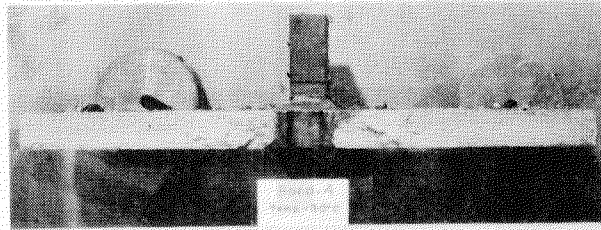
C-1. $T=15^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1}=28.2 \text{ kg/mm}^2$



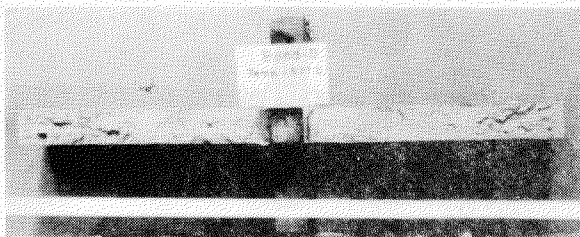
C-2. $T=-8^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1}=9.1 \text{ kg/mm}^2$



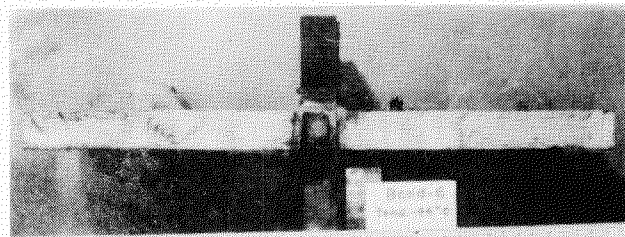
C-3. $T=-10^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1}=16.5 \text{ kg/mm}^2$



C-4. $T=-30^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1}=19.8 \text{ kg/mm}^2$

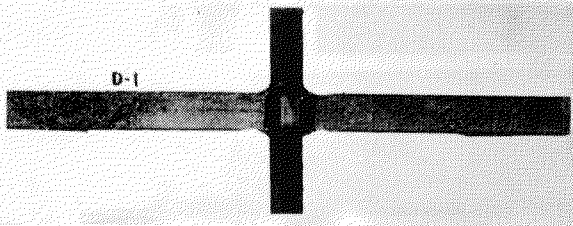


C-5. $T=-57^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1}=25.4 \text{ kg/mm}^2$

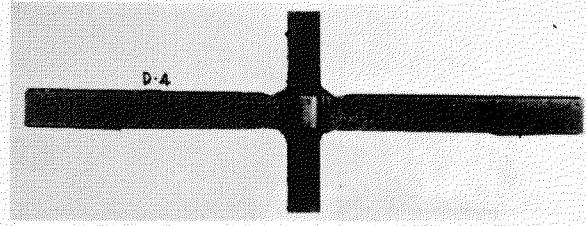


C-6. $T=-86^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1}=4.9 \text{ kg/mm}^2$

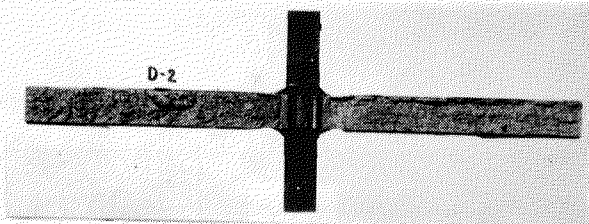
写真5.2.9 十字型拘束引張試験による破面状況
(KAS, 25.4mm, エルクロガス溶接継手)



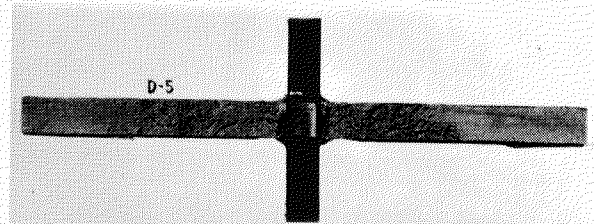
$T = -79^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 4.3 \text{ kg/mm}^2$



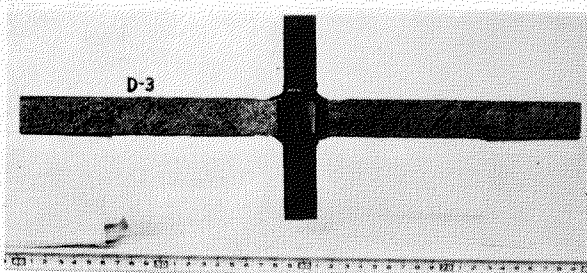
$T = -20^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 27.0 \text{ kg/mm}^2$



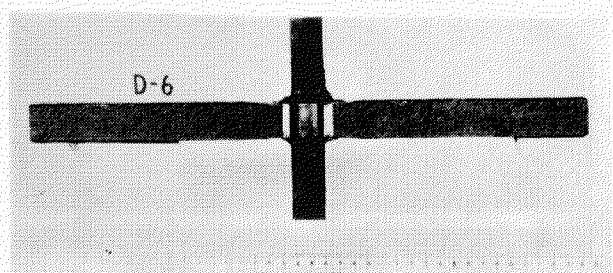
$T = -2^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 26.0 \text{ kg/mm}^2$



$T = -21^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 20.3 \text{ kg/mm}^2$



$T = -41^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 18.4 \text{ kg/mm}^2$

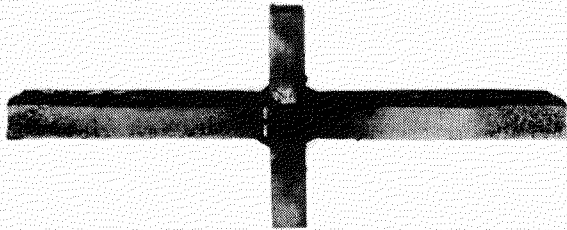


$T = -51^{\circ}\text{C}$, $\bar{\sigma}_{n1} = 21.6 \text{ kg/mm}^2$

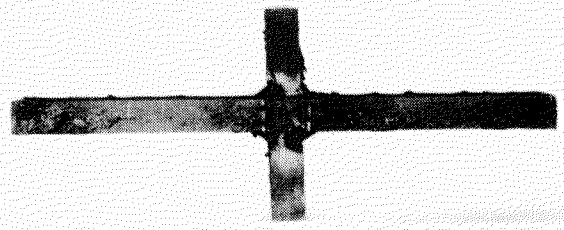
写真 5.2.10

写真 5.2.11

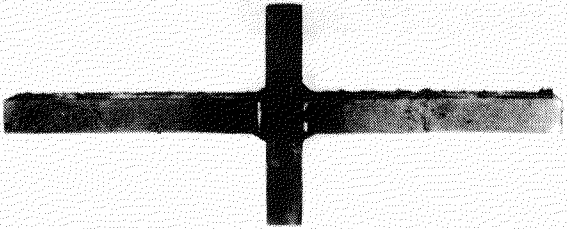
十字型拘束引張試験による破面状況
(KAS, 25.4 mm, イレトロガス溶接継手)



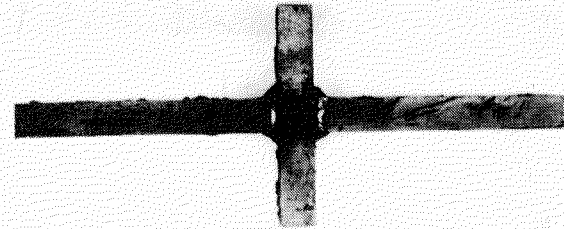
A-1. $T = -1^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 17.7 \text{ kg/mm}^2$



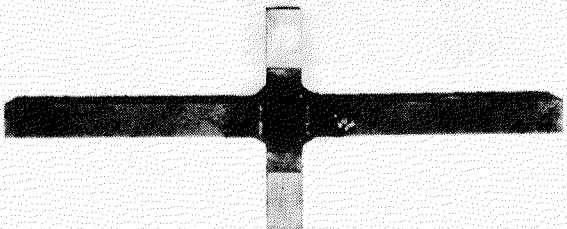
B-1. $T = -39^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 11.9 \text{ kg/mm}^2$



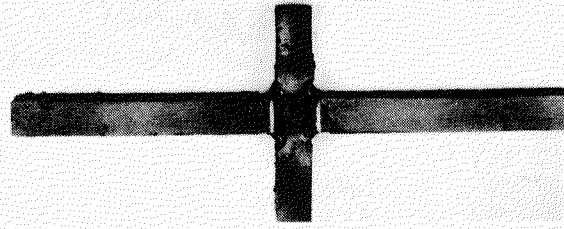
A-2. $T = -40^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 5.5 \text{ kg/mm}^2$



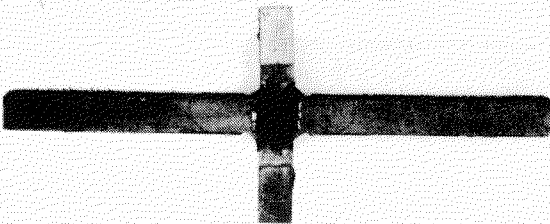
B-2. $T = -61^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 6.1 \text{ kg/mm}^2$



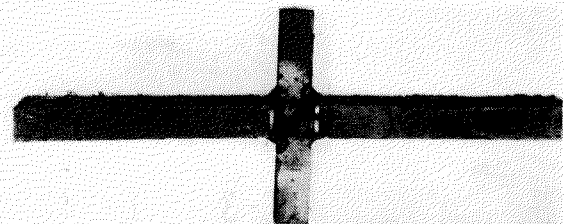
A-4. $T = -22^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 1.5 \text{ kg/mm}^2$



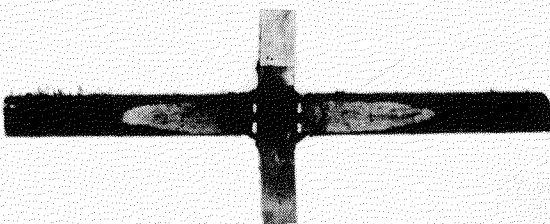
B-3. $T = -20^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 11.4 \text{ kg/mm}^2$



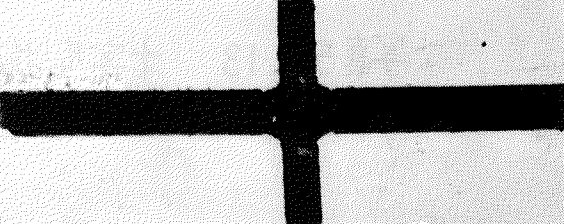
A-5. $T = -18^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 3.7 \text{ kg/mm}^2$



B-4. $T = 0^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 24.1 \text{ kg/mm}^2$



A-6. $T = 10^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 10.9 \text{ kg/mm}^2$



B-5. $T = -11^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 28.6 \text{ kg/mm}^2$

写真5.2.12 十字型拘束引張試験による破面状況
(KAS, 25.4 mm, イレトロスラグ溶接継手)



C-1. $T = -62^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 15.3 \text{ kg/mm}^2$

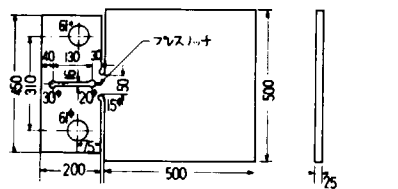


C-2. $T = -21^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 27.4 \text{ kg/mm}^2$

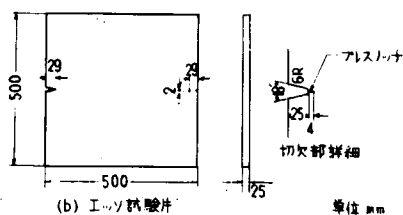


C-3. $T = -42^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n_1} = 22.8 \text{ kg/mm}^2$

写真5.2.13 十字型拘束引張試験による破面状況
(KAS, 25.4mm, エクロスラグ溶接継手)



(a) 二重引張試験片



(b) I型試験片

図 6.1.1 中形伝播試験片形状

表 6.1.1 中形伝播試験結果

試験片 番号	鋼種	板厚 (mm)	幅 B (mm)	断面積 (mm ²)	荷重 (kg)	応力 σ (kg/mm ²)	正 応力 σ _{0.2} (kg/mm ²)	引 力 F _{0.2} (kg)	K _{IC} (kg/m ^{3/2})	温度 T _a (°C)	伝播長さ L _{IC} (mm)	備考
1	KAS	25.55	500	12775	217	17.0	25.8	392	907	+49	3.10	
2		25.48	500	12740	153	12.0	16.0	345	525	+32	3.28	
3b		25.51	498	12704	108	8.5	8.8	149	191	+9	3.55	I-V試験
4		25.54	500	12700	153	12.0	15.0	320	475	+35	3.25	
5		25.50	500	12750	306	24.0	26.4	724	699	+45	3.14	
6		25.54	500	12770	153	12.0	14.1	280	417	+33	3.27	
1	KSD	25.41	500	12705	226	17.8	19.5	222	515	-8	3.77	
2		25.42	500	12710	341	26.8	29.7	231	799	-4	3.72	
3b		25.40	487	12370	396	32.0	39.7	313	1244	0	3.66	I-V試験
4		25.40	500	12700	400	31.5	33.2	170	766	+1	3.65	
5		25.38	500	12680	152	12.0	12.0	44	141	-66	4.83	
6		25.36	500	12680	203	16.0	17.8	235	483	-6	3.75	
7		26.65	500	12825	100	7.8	8.1	141	170	-21	3.97	I-V試験

$$K_{IC} = f(\sigma) \sqrt{a}$$

$$f(\sigma) = \frac{1}{\sigma} \tan^{-1} \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

$$\sigma_0 = \frac{C}{B} \quad B: \text{試験片幅}$$

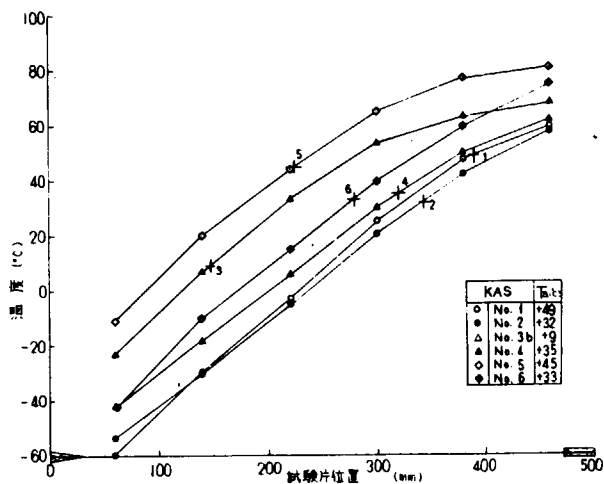


図 6.1.2 KAS鋼中形伝播試験片の温度勾配

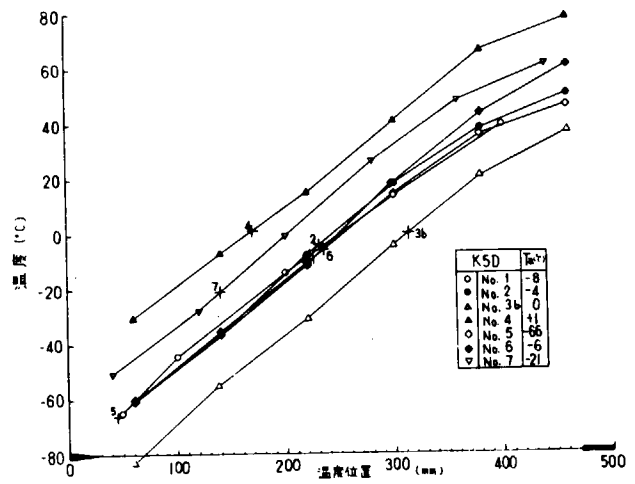
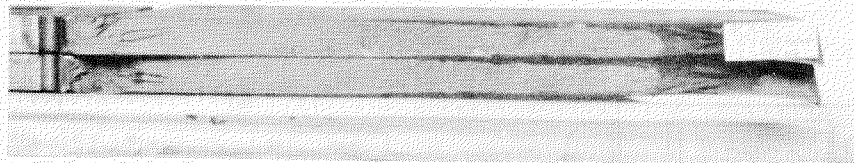
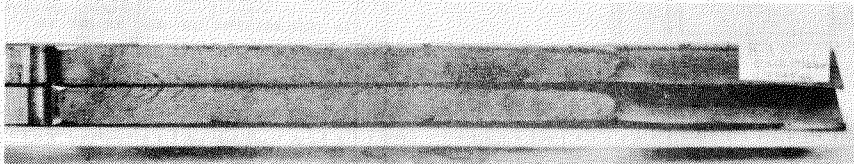


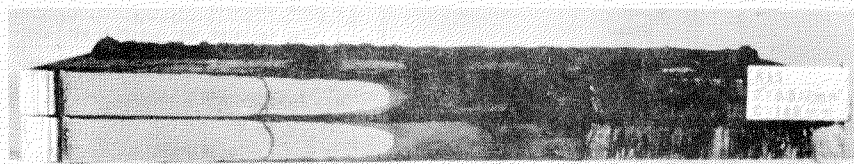
図 6.1.3 KSD鋼中形伝播試験片の温度勾配



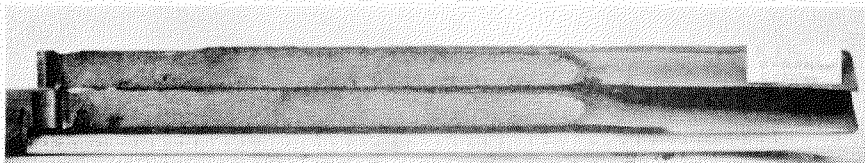
No. 1



No. 2



No. 3b



No. 4

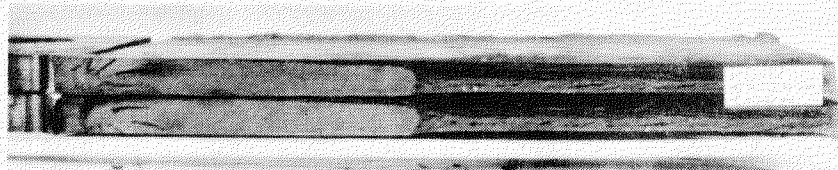


No. 5



No. 6

写真 6.1.1 KAS鋼中形伝播試験片の亀裂伝播状況



No. 1



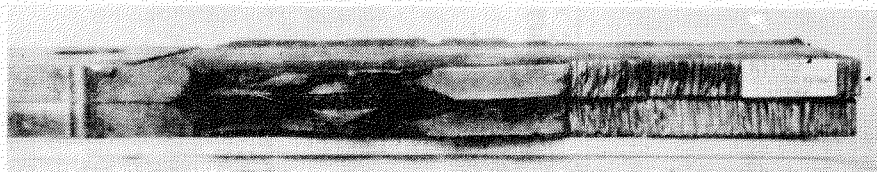
No. 2



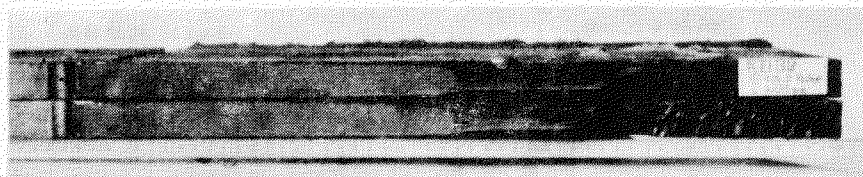
No. 3b



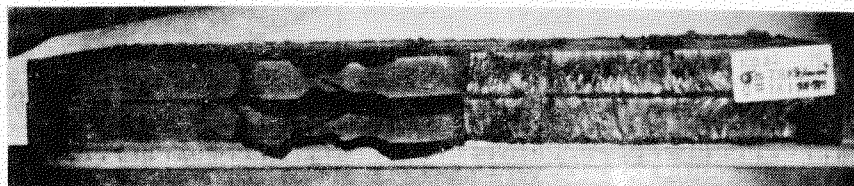
No. 4



No. 5



No. 6



No. 7

写真6.1.2 K5D鋼中形伝播試験片の亀裂伝播状況

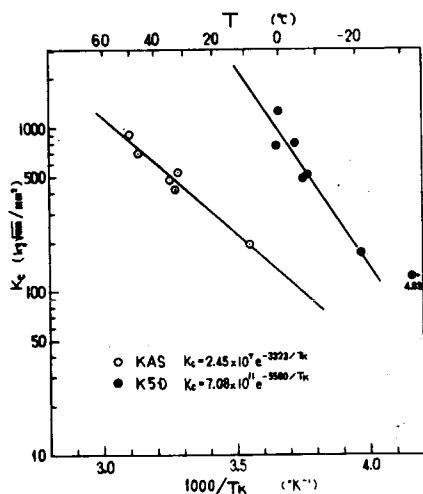


図 6.1.4 KAS鋼とK5D鋼母材の K_c 値と温度との関係

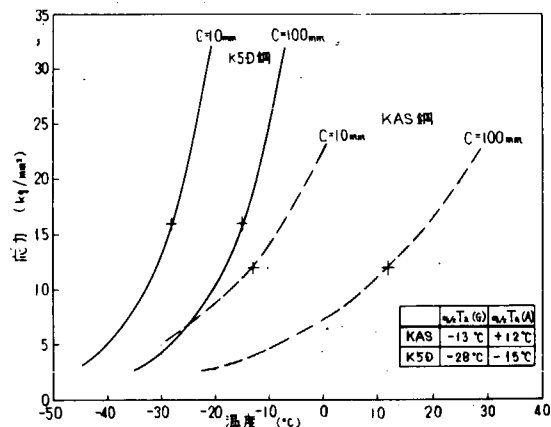


図 6.1.5 KAS鋼とK5D鋼母材の亀裂伝播限界曲線

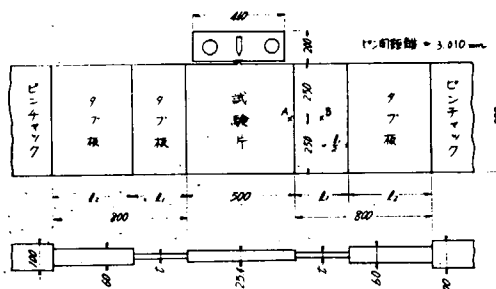


図 6.2.1 二重引張試験片形状

表 6.2.1 試験条件

試片記号	t mm	L_1 mm	L_2 mm
S	—	—	800
YA	13	250	550
YB	19	250	550
YC	13	500	300
YD	19	500	300

表 6.2.2 試験結果

試片記号	P_c (kg/mm)	停止温度 (°C)	$1000/T$ (K ⁻¹)	K_c (kg/mm ^{3/2})	$K_{c0.05}$ (kg/mm ^{3/2})
S-1	13.5	223	+28	3.32	393
2	19.0	226	+33	3.27	556
3	8.1	22	-51	4.50	67
4	8.1	282	+29	3.31	283
YA-1	13.5	250	+34	3.26	426
2	18.9	270	+46	3.13	636
3	8.1	275	+32	3.28	277
4	12.0	245	+30	3.30	374
YB-1	13.5	270	+40	3.19	414
2	19.0	280	+50	3.10	661
3	8.1	265	+29	3.31	268
4	12.0	250	+35	3.25	379
YC-1	12.0	265	+38	3.21	398
2	10.0	281	+35	3.25	349
3	8.1	272	+36	3.26	275
4	13.5	281	+49	3.11	471
YD-1	13.5	270	+42	3.17	455
2	8.1	228	+17	3.45	239
3	18.9	270	+44	3.15	639
4	12.0	270	+42	3.17	404

* 二重引張試験片 1/2 試験片は切端と切端

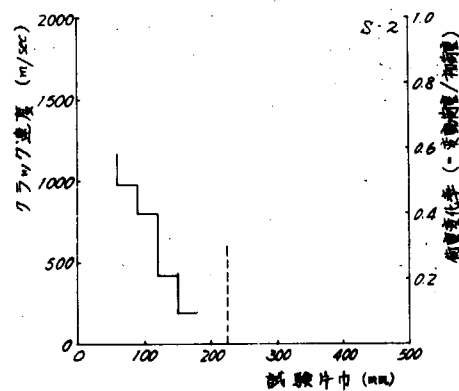
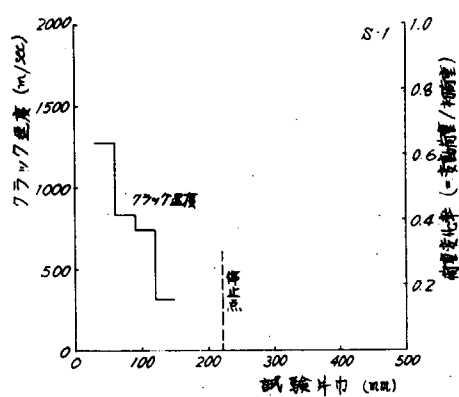


図 6.2.2 (I) クラック速度と荷重変化率 (その1)

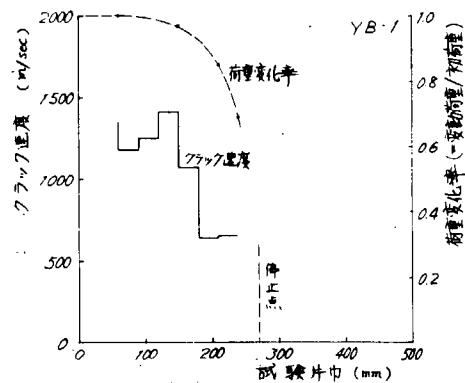
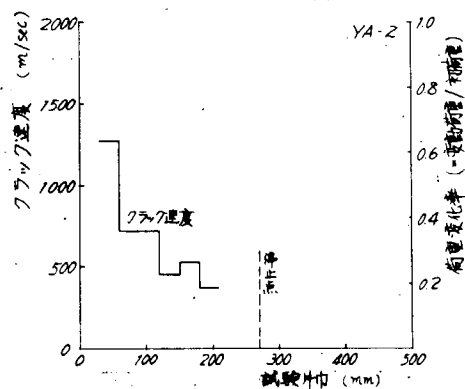
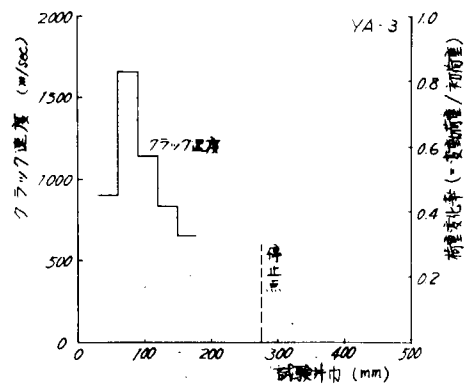
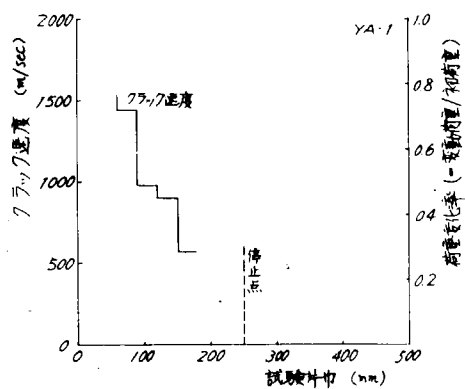


図6.2.2(2) クラック速度と荷重変化率(その2)

図6.2.2(3) クラック速度と荷重変化率(その3)

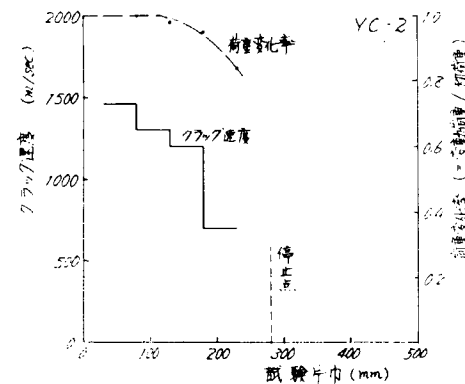
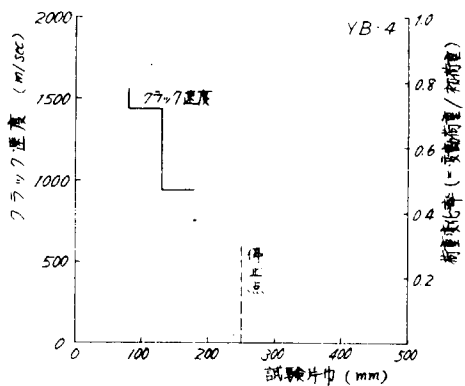
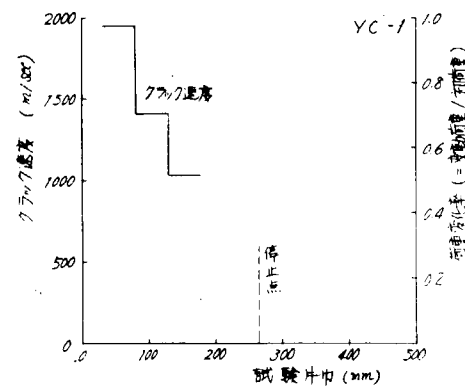
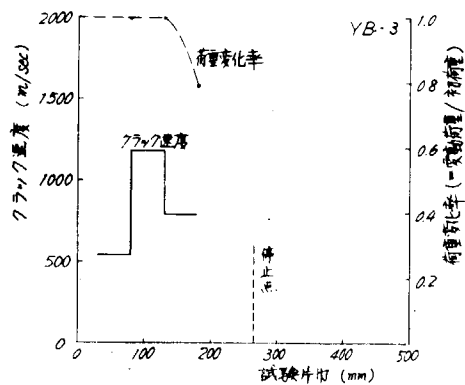


図6.2.2(4) クラック速度と荷重変化率(その4)

図6.2.2(5) クラック速度と荷重変化率(その5)

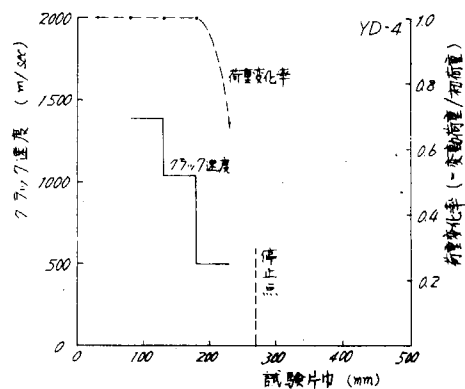
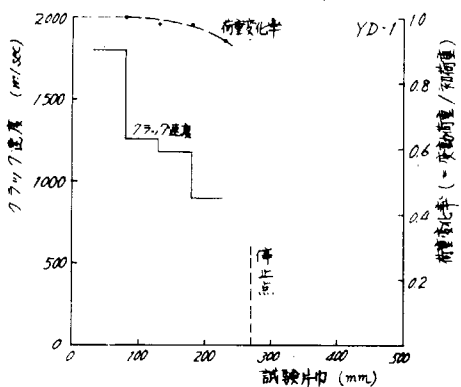
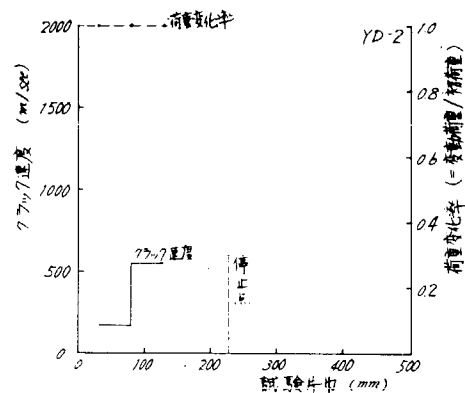
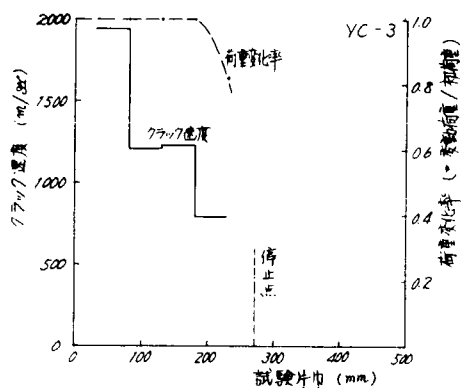


図6.2.2 (6) クラック速度と荷重変化率(その6)

図6.2.2 (7) クラック速度と荷重変化率(その7)

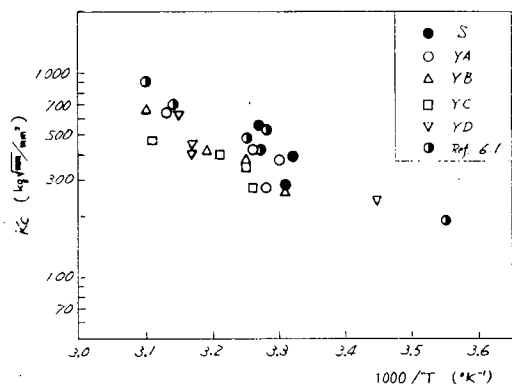


図6.2.3 端部剛性の補正をしない場合の K_c の温度依存性

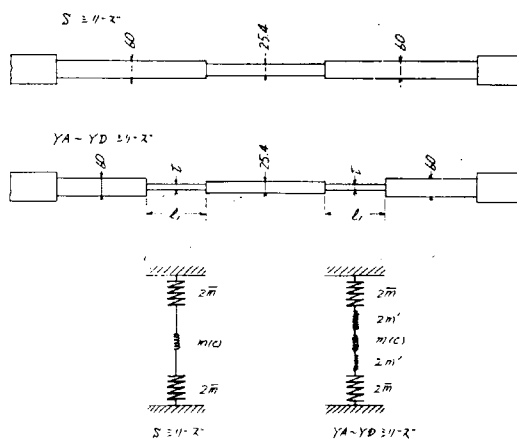


図6.2.4 バネモデル

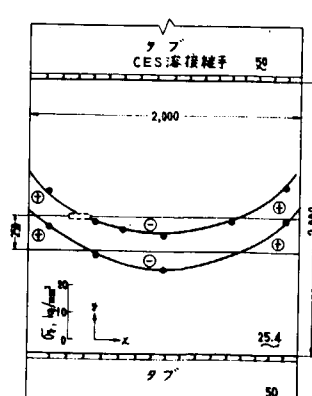
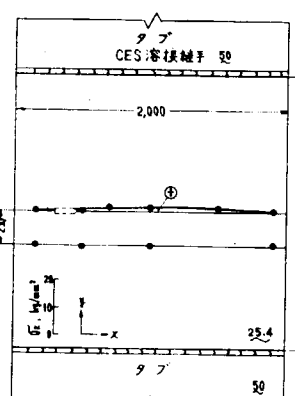
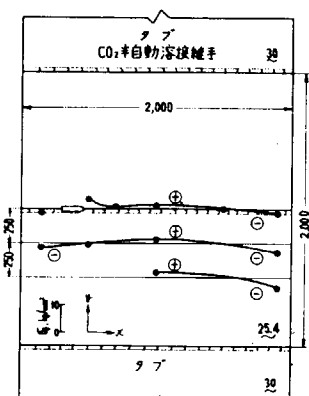
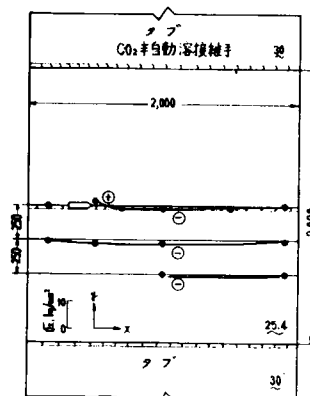
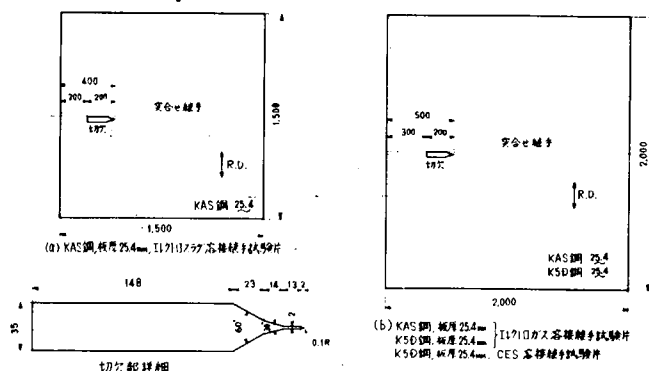
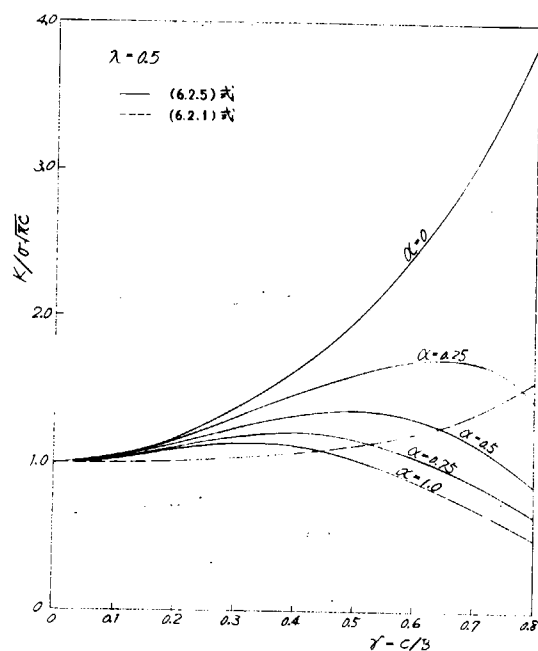
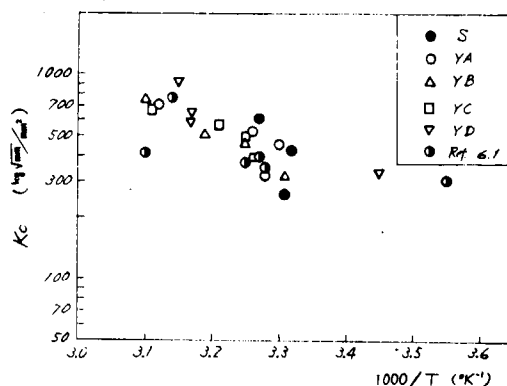
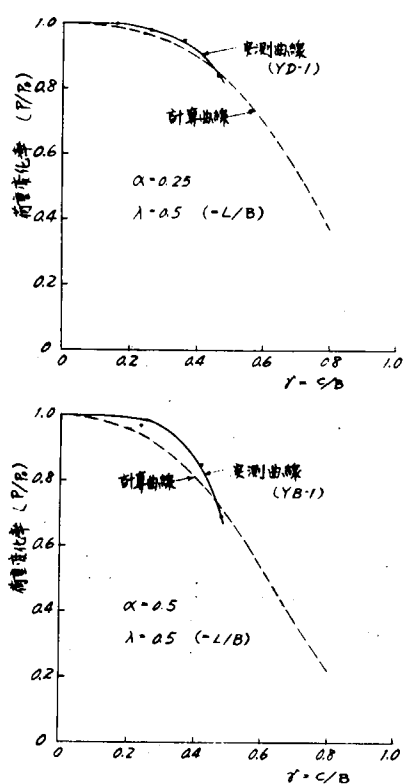


表 6.3.1 母材についての大形伝播試験結果一覧

鋼種	試験符号	試験温度 分布形式	衝撃エネルギー E_1 (kg-m)	最大応力 σ_g (kg/mm ²)	停止位置 C_0 (mm)	停止温度 T_s (°C)	脆性破壊 伝播長さ K_{cp} (mm)
KAS (25.4)	KAS-1	均面型	235	8	540	17	308
	KAS-2			13	657	32	549
	KAS-3			8	1,233	42	584
	KAS-4			10	827	26	481
K5D (25.4)	K5D-1	均面型	170	15.8	402	-5	350
	K5D-2			22.5	454	-6	596
	K5D-3			24.5	420	0	654
	K5D-4			9	504	-38	112

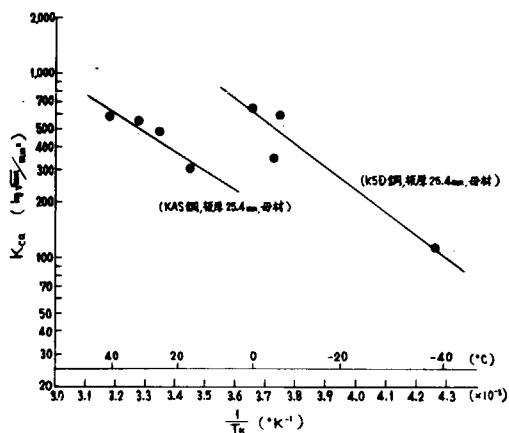


図 6.3.5 大形伝播試験によるKAS鋼、K5D鋼母材の脆性破壊伝播特性

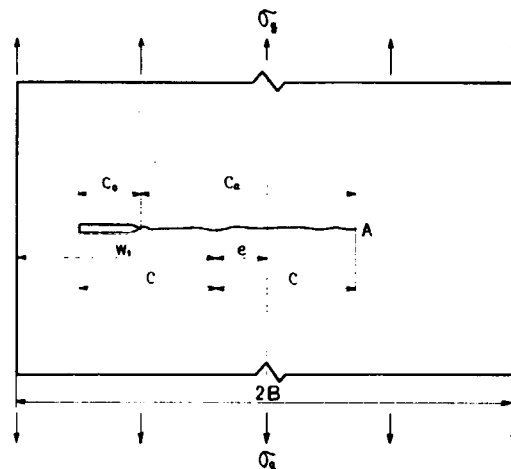


図 6.3.4 偏心クラックを有する有限板

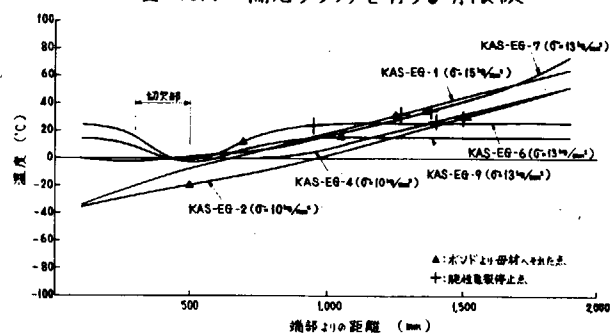


図 6.3.6 大形伝播試験における温度分布 (KAS鋼、板厚 25.4mm、エレクトロガス溶接継手)

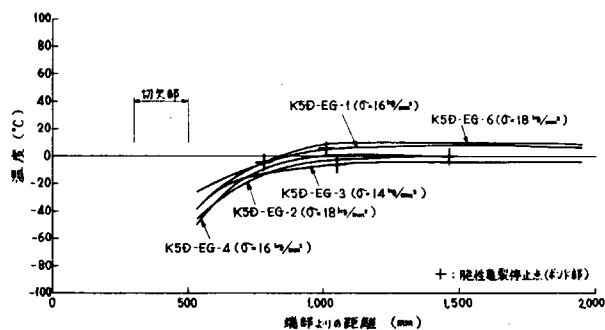


図 6.3.7 大形伝播試験における温度分布 (K5D鋼、板厚 25.4mm、エレクトロガス溶接継手)

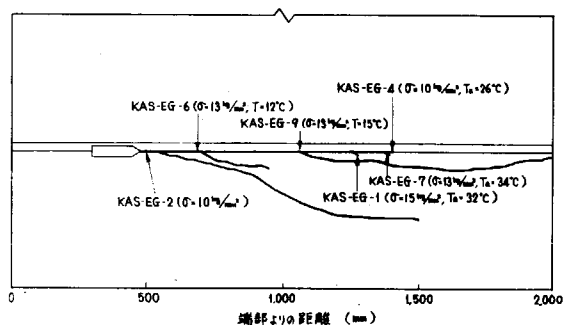


図 6.3.8 大形伝播試験による脆性電裂伝播経路 (KAS鋼、板厚 25.4mm、エレクトロガス溶接継手)

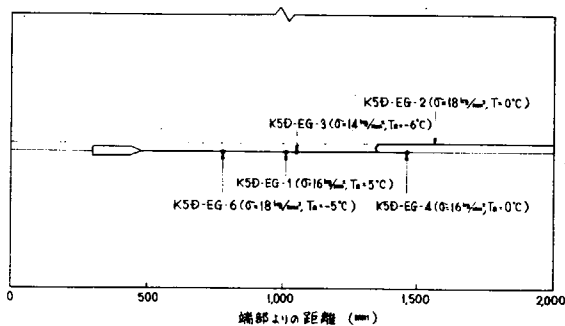


図 6.3.9 大形伝播試験による脆性電裂伝播経路 (K5D鋼、板厚 25.4mm、エレクトロガス溶接継手)

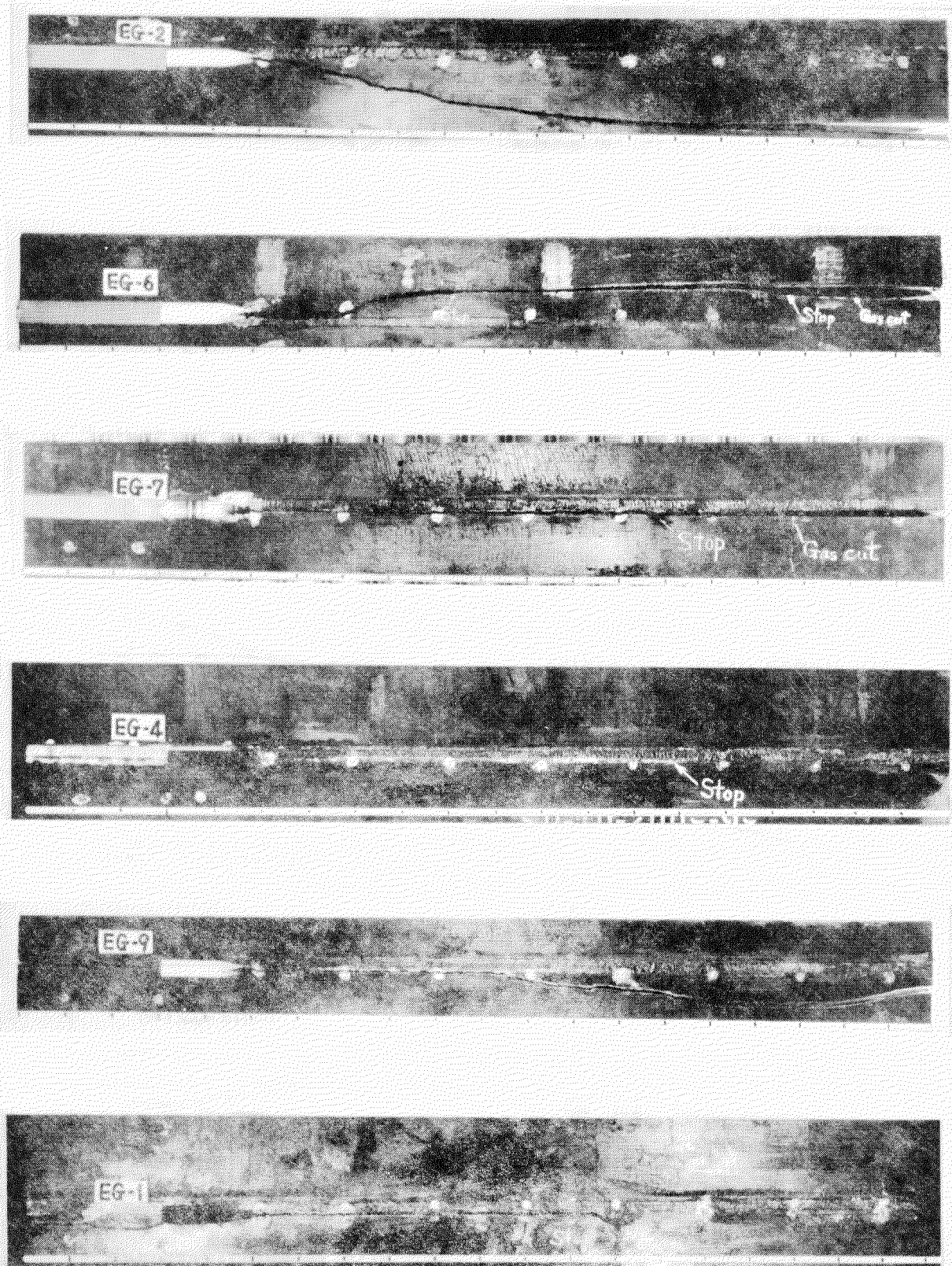


写真6.3.1 大形伝播試験による脆性亀裂伝播経路
(KAS鋼エレクトロガス溶接継手)

表 6.3.2 ELトロガス溶接継手についての大形伝播試験結果一覧

鋼種	溶接法	試験片符号	試験温度 分布形式 E _t (kg/mm)	溶接速度 C _s (mm)	停止温度 T _a (°C)	脆性破壊 伝播率 K _{cs} (%)	備考
KAS (25.4)	ELトロガス溶接	KAS-EG-1	235	1.5	770	32	688
		KAS-EG-2 勾配型		1.0			750mmより離れた母材、溶接部より離れた母材に停止
		KAS-EG-4		1.0	900	26	507
		KAS-EG-6 平坦型		1.3	> 200	> 12	< 346
		KAS-EG-7 勾配型		1.3	880	34	652
KSD (25.4)	ELトロガス溶接	KAS-EG-9 平坦型		1.3	> 550	> 15	< 503
		KSD-EG-1	170	1.6	510	5	598
		KSD-EG-2		1.8	> 780	> 0	< 835
		KSD-EG-3 平坦型		1.4	550	-6	543
		KSD-EG-4		1.6	> 500	> 0	< 593
		KSD-EG-6		1.8	280	-5	532

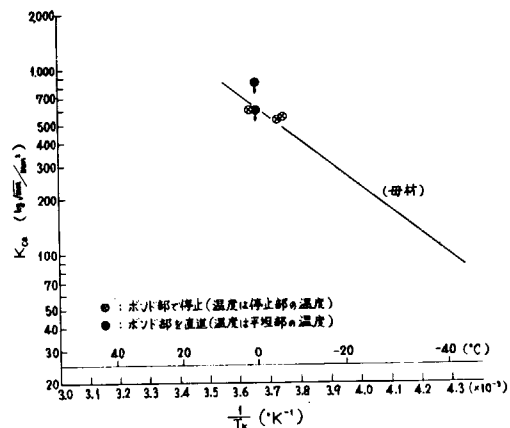


図 6.3.11 大形伝播試験によるKSD鋼ELトロガス溶接継手部の脆性破壊伝播特性

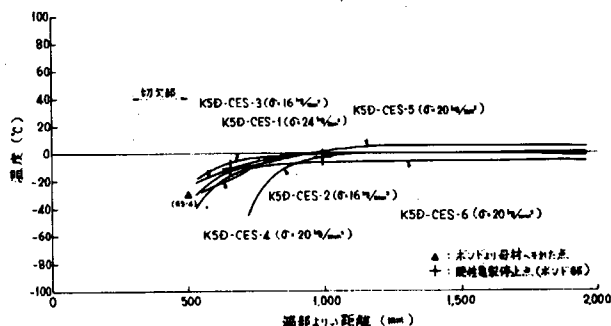


図 6.3.13 大形伝播試験における温度分布 (KSD鋼、板厚25.4mm、CES溶接継手)

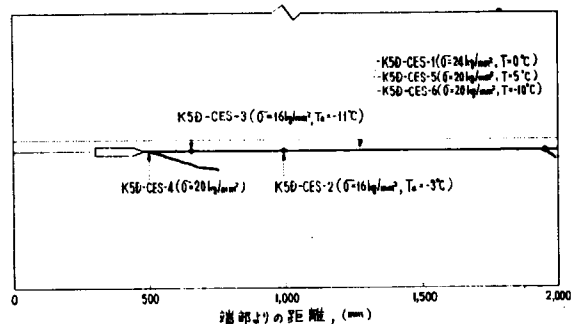


図 6.3.15 大形伝播試験による脆性亀裂伝播経路 (KSD鋼CES溶接継手)

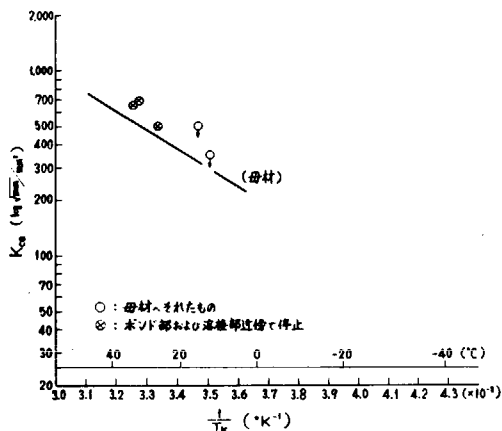


図 6.3.10 大形伝播試験によるKAS鋼ELトロガス溶接継手部の脆性破壊伝播特性

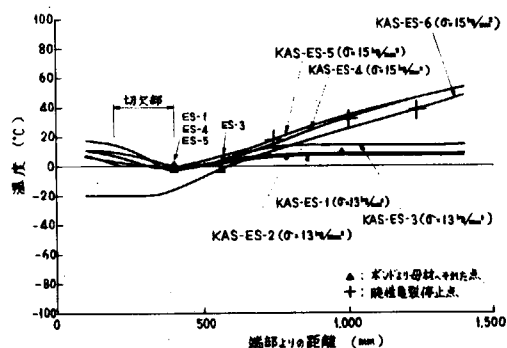


図 6.3.12 大形伝播試験における温度分布 (KAS鋼、板厚25.4mm、ELトロガス溶接継手)

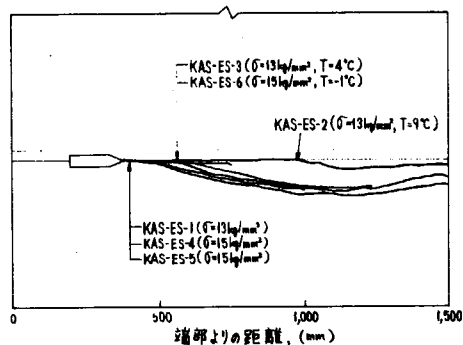


図 6.3.14 大形伝播試験による脆性亀裂伝播経路 (KAS鋼ELトロガス溶接継手)

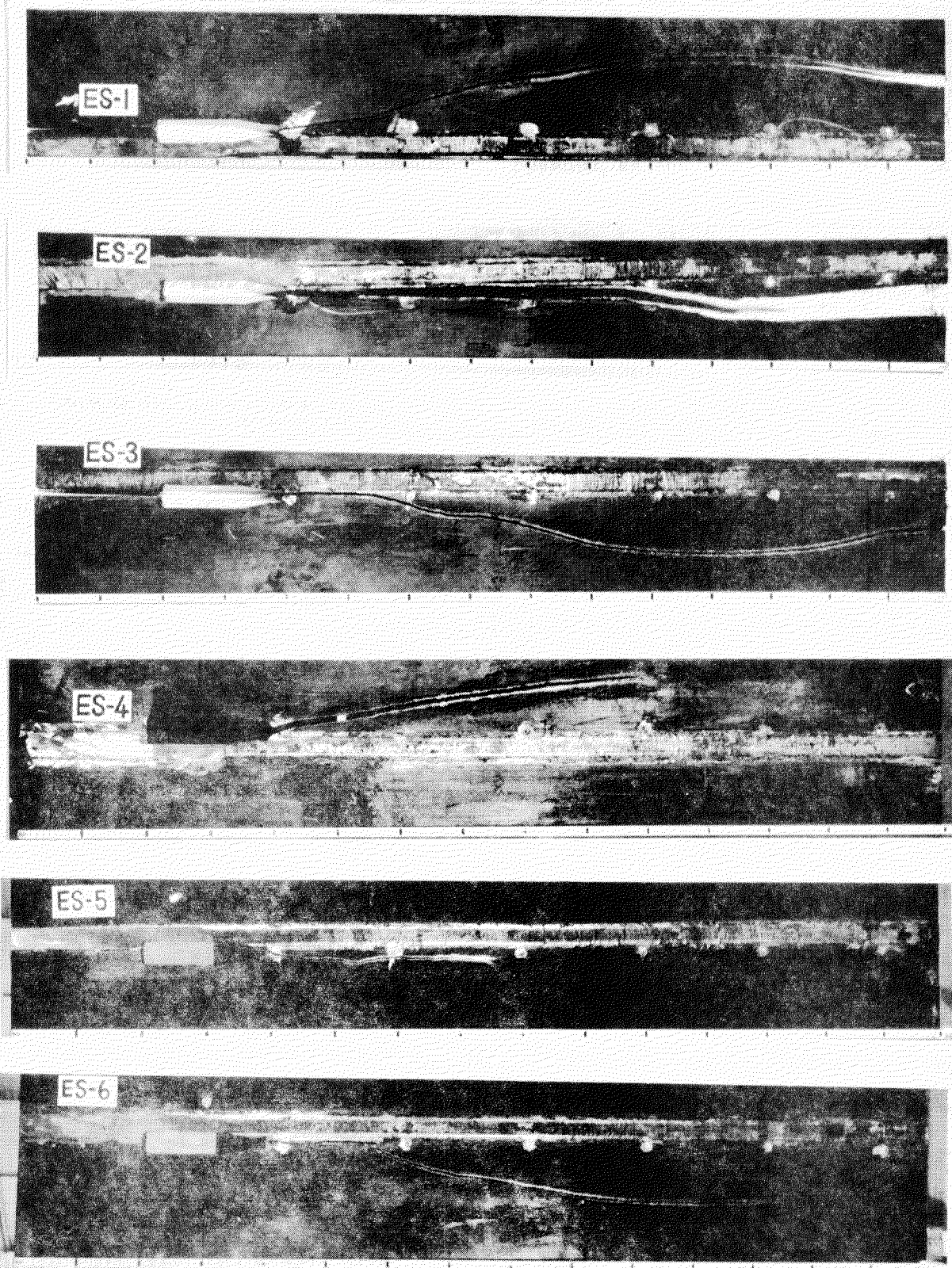


写真6.3.2 大形伝播試験による脆性亀裂伝播経路
(KAS鋼エレクトロスラグ溶接継手)

表 5.3.3 イレトロスラグ溶接継手、CES溶接継手についての大形伝播試験結果一覧

鋼種	溶接法	試験片番号	試験温度 分析形式	衝撃試験 Ei (kg-m)	圧入圧力 Qi (kg/cm ²)	圧入圧力 Ca (mm)	停止温度 Ts (°C)	脆性破壊 伝播率 Kca (%)	備 考
KAS II707スラグ (25.4)	溶接	KAS-ES-1	200	13	13	> 575	> 9	< 552	フラックは脆性破壊に寄与せず、 575mm 圧入部を通過した 後、母材へ移行。 160mm 圧入部を通過した 後、母材へ移行。 フラックは脆性破壊に寄与せず、 575mm 圧入部を通過した 後、母材へ移行。 160mm 圧入部を通過した 後、母材へ移行。
		KAS-ES-2 変形型							
		KAS-ES-3							
		KAS-ES-4							
		KAS-ES-5 勾配型							
		KAS-ES-6							
K5D CESスラグ (25.4)	溶接	K5D-CES-1	170	16	16	153	-11	397	ボンド部を通過し破断。 伝播率 100% (Ca 165mm) ボンド部へ停止。 ボンド部へ停止。 フラックは脆性破壊に寄与せず、 575mm 圧入部を通過した 後、母材へ移行。 160mm 圧入部を通過した 後、母材へ移行。
		K5D-CES-2							
		K5D-CES-3							
		K5D-CES-4							
		K5D-CES-5							
		K5D-CES-6							

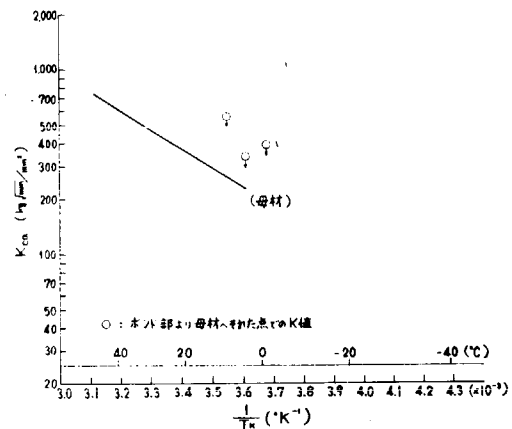


図 6.3.16 大形伝播試験による KAS 鋼スラグ溶接継手の脆性破壊伝播特性

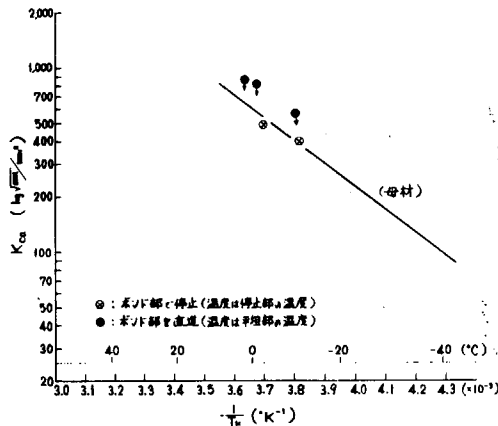


図 6.3.17 大形伝播試験による K5D 鋼 CES 溶接継手の脆性破壊伝播特性

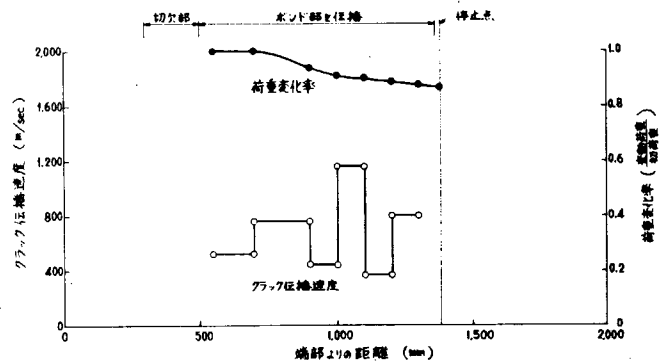


図 6.3.18 大形伝播試験におけるクラック伝播速度と荷重変化率(その1)
(試験片番号 KAS-EG-7 についての測定例)

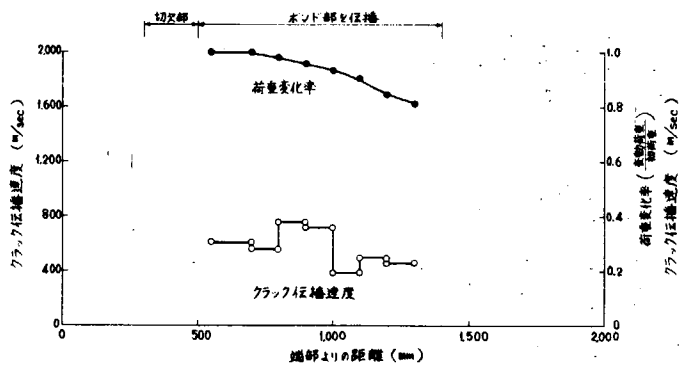


図 6.3.19 大形伝播試験におけるクラック伝播速度と荷重変化率(その2)
(試験片番号 KAS-EG-4 についての測定例)

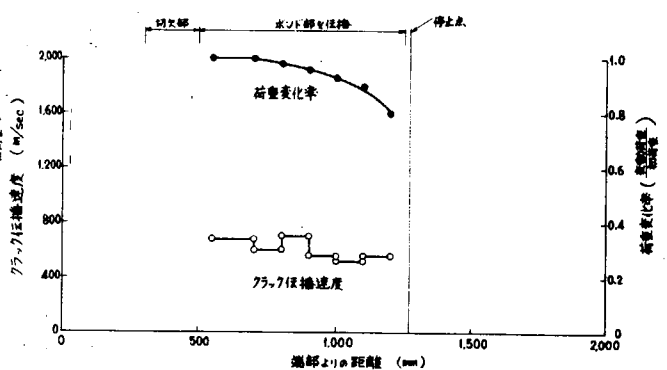


図 6.3.20 大形伝播試験におけるクラック伝播速度と荷重変化率(その3)
(試験片番号 KAS-EG-1 についての測定例)

表7.1.1 試験片の溶接ビード形状および角変形

K5D (CES 溶接)						KAS (エレクトロガス溶接)						KAS (エレクトロslag溶接)					
ビード幅 の平均値 (mm)	表面 ビード幅 (mm)	表面 ビード高さ (mm)	裏面 ビード幅 (mm)	裏面 ビード高さ (mm)	角変形 Q (mm)	ビード幅 の平均値 (mm)	表面 ビード幅 (mm)	表面 ビード高さ (mm)	裏面 ビード幅 (mm)	裏面 ビード高さ (mm)	角変形 Q (mm)	ビード幅 の平均値 (mm)	表面 ビード幅 (mm)	表面 ビード高さ (mm)	裏面 ビード幅 (mm)	裏面 ビード高さ (mm)	角変形 Q (mm)
1.0	38.7	3.3	38.7	3.2	—	0	27.6	0.9	24.0	1.7	—	20	40.2	2.4	41.6	2.7	21.0
159.5	37.0	3.8	38.0	3.7	3.0	182.5	27.7	1.3	23.6	2.0	—	175.5	48.6	2.9	42.7	2.7	—
359.5	36.4	3.8	38.4	3.4		382.5	26.9	1.3	23.9	1.9	—	375.5	44.3	2.9	42.0	2.7	—
559.5	37.4	2.9	39.2	3.3	—	582.5	29.6	1.3	24.5	1.5	—	575.5	45.2	2.7	44.5	2.9	—
759.5	37.5	3.3	38.2	3.5	5.5	782.5	29.7	1.3	24.8	1.9	—	775.5	45.7	2.4	42.1	2.8	12.5
959.5	37.3	3.2	38.2	3.6	—	982.5	28.0	1.0	25.3	2.2	—	975.5	45.5	2.8	40.7	2.7	—
1,059.5	36.7	3.6	38.4	3.4	—	1,082.5	30.5	1.1	25.5	2.1	—	1,175.5	47.7	3.2	42.9	2.5	—
1,259.5	36.6	3.0	38.2	3.5	17.0	1,282.5	25.7	1.2	28.3	2.0	—	1,375.5	44.1	2.9	40.3	2.5	—
1,459.5	37.3	3.2	38.3	3.4	—	1,482.5	25.8	1.0	27.1	2.3	—	1,531.0	46.5	3.6	41.6	2.8	14.5
1,659.5	36.5	3.7	37.9	3.4	13.0	1,682.5	25.8	1.1	26.7	2.3	—						
1,859.5	36.5	3.6	38.1	3.3		1,882.5	26.6	0.9	25.2	1.9	—						
2,018.0	37.5	2.4	38.6	2.4	—	2,065.0	26.3	1.1	24.9	1.7	—						

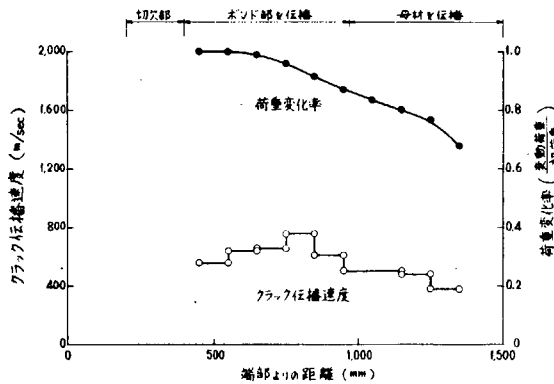
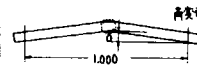


図6.3.21 大形圧縮試験におけるクラック伝播速度と荷重変化率(その4)
(試験片番号 KAS-ES-2 についての測定例)

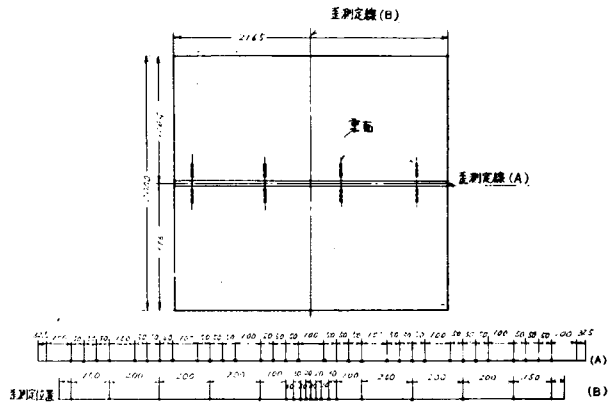


図7.1.1(1) 試験片寸法および測定位置 (KAS 鋼エレクトロslag 溶接継手)

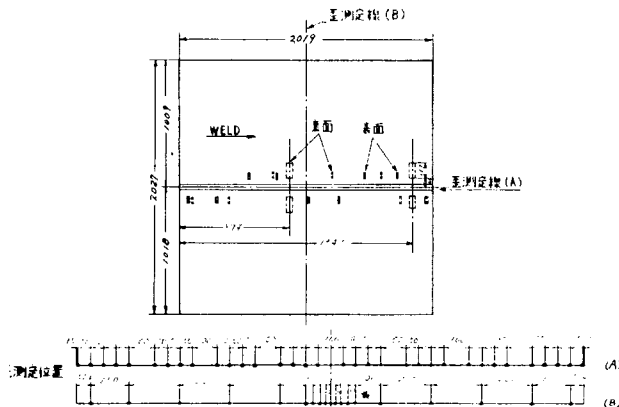


図7.1.1(2) 試験片寸法および測定位置 (K5D 鋼CES 溶接継手)

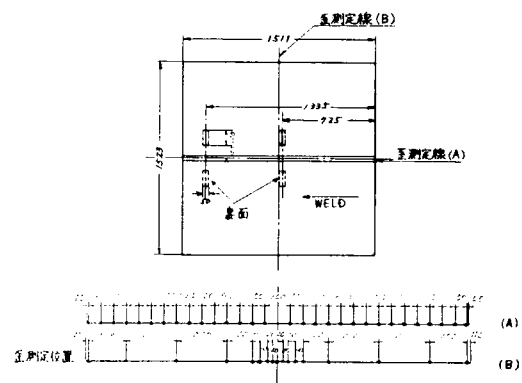


図7.1.1(3) 試験片寸法および測定位置 (KAS 鋼エレクトロslag 溶接継手)

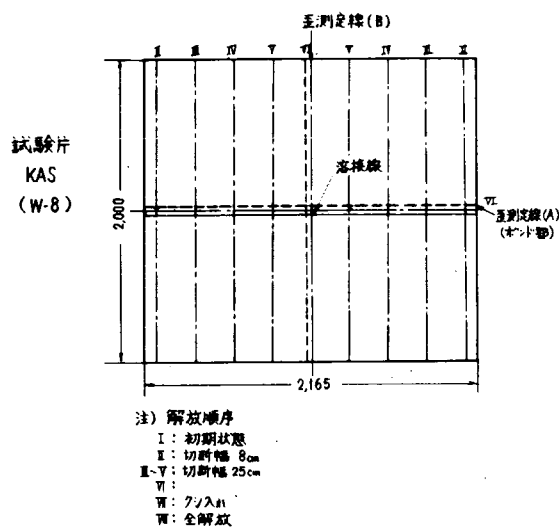


図 7.1.2 (1) 残留応力測定における解放順序 (KAS 鋼エレクトロス溶接継手)

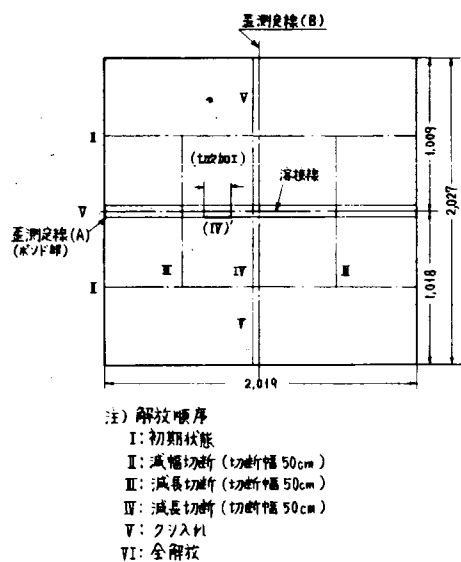


図 7.1.2 (2) 残留応力測定における解放順序 (KSD 鋼 CES 溶接継手)

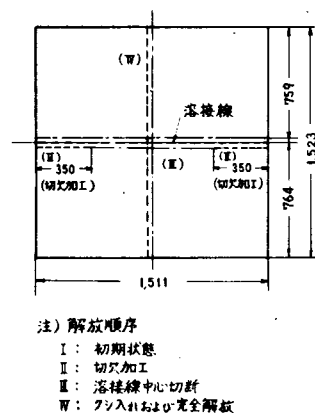


図 7.1.2 (3) 残留応力測定における解放順序 (KAS 鋼エレクトロス溶接継手)

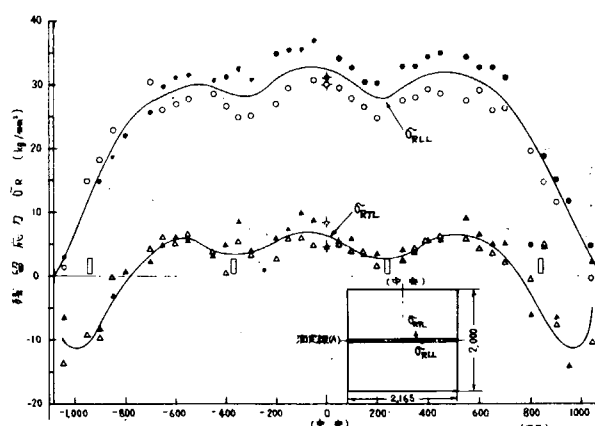


図 7.1.3 (1) 溶接ボンド部における残留応力分布 (KAS 鋼エレクトロス溶接継手, 継手長: 2165 mm)

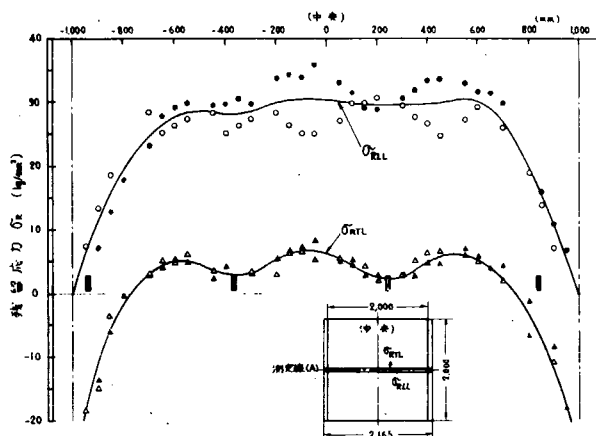


図 7.1.3 (2) 溶接ボンド部における残留応力分布 (KAS 鋼エレクトロス溶接継手, 継手長: 2000 mm)

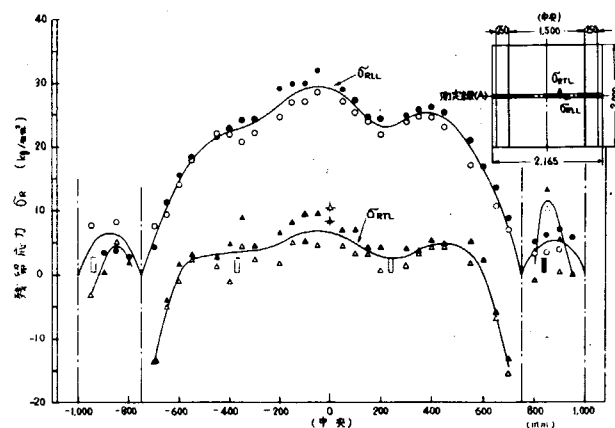


図 7.1.3 (3) 溶接ボンド部における残留応力分布 (KAS 鋼エレクトロス溶接継手, 継手長: 1500 mm)

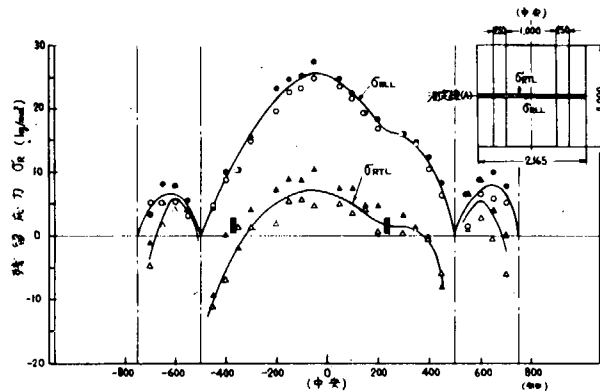


図7.1.3 (4) 溶接ボンド部における残留応力分布 (KAS鋼板ガス溶接継手、継手長: 1000mm)

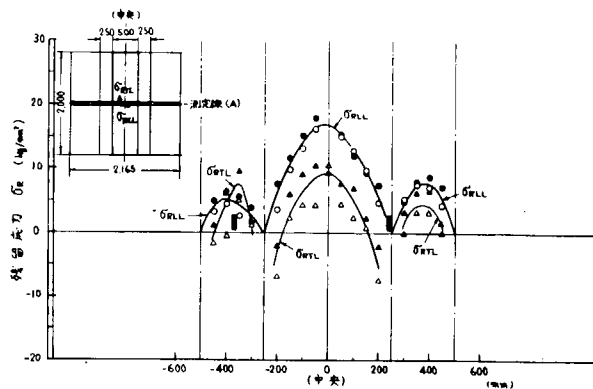


図7.1.3 (5) 溶接ボンド部における残留応力分布 (KAS鋼板ガス溶接継手、継手長: 500mm)

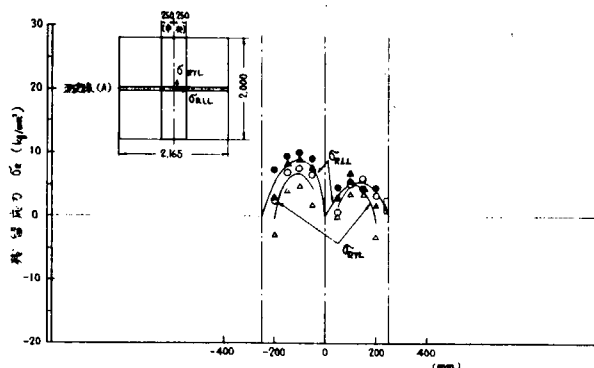


図7.1.3 (6) 溶接ボンド部における残留応力分布 (KAS鋼板ガス溶接継手、継手長: 250mm)

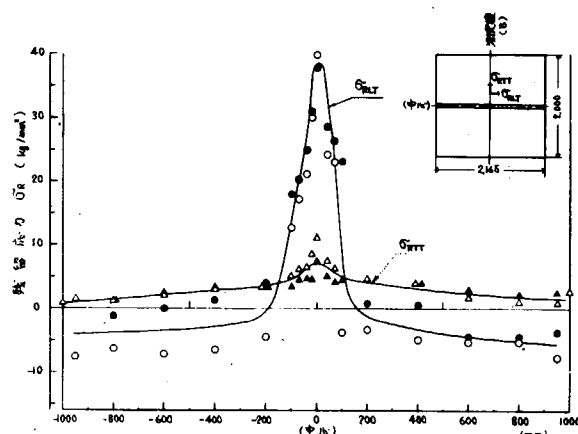


図7.1.4 (1) 試験片中央部における残留応力の溶接線直方向分布 (KAS鋼板ガス溶接継手、継手長: 2.65mm)

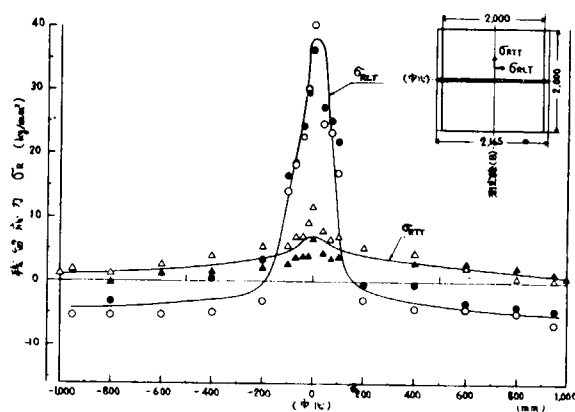


図7.1.4 (2) 試験片中央部における残留応力の溶接線直方向分布 (KAS鋼板ガス溶接継手、継手長: 2000mm)

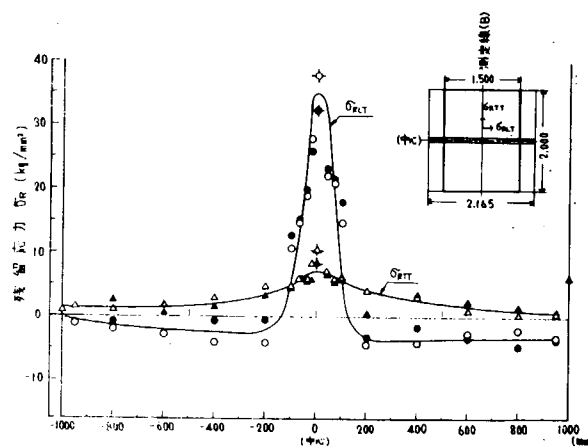


図7.1.4 (3) 試験片中央部における残留応力の溶接線直方向分布 (KAS鋼板ガス溶接継手、継手長: 1500mm)

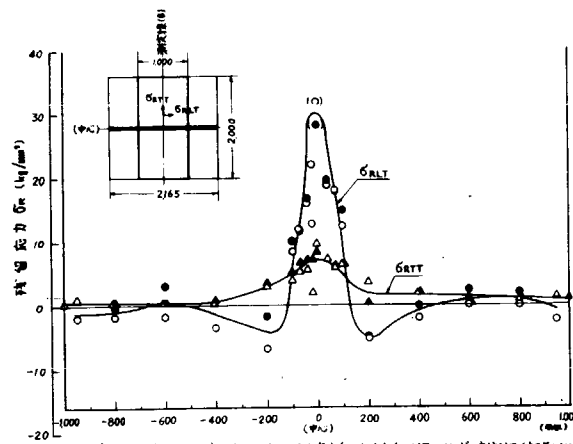


図7.1.4 (4) 試験片中央部における残留応力の溶接線直角方向での分布 (KAS鋼II炉内溶接継ぎ, 継ぎ長: 1000mm)

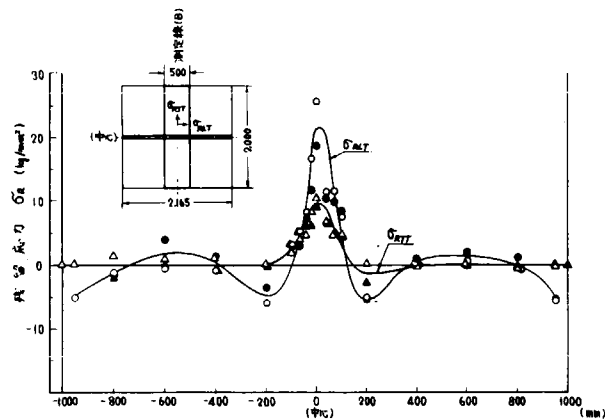


図7.1.4 (5) 試験片中央部における残留応力の溶接線直角方向での分布 (KAS鋼II炉内溶接継ぎ, 継ぎ長: 500mm)

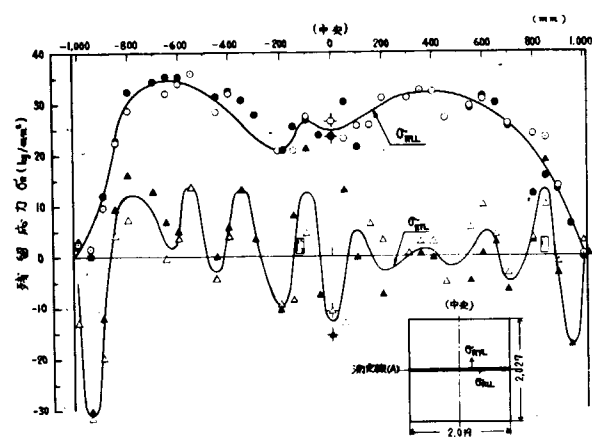


図7.1.5 (1) 溶接部V部における残留応力分布 (K5D鋼CES溶接継ぎ, 継ぎ長: 2019mm)

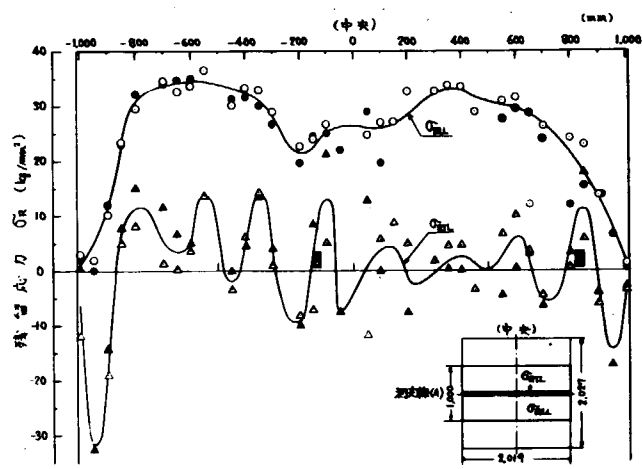


図7.1.5 (2) 溶接部V部における残留応力分布 (K5D鋼CES溶接継ぎ, 継ぎ長: 2019mm, 幅: 1000mm)

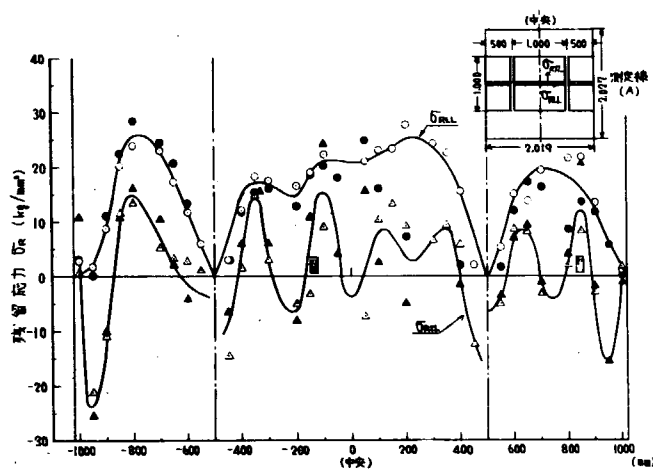


図7.1.5 (3) 溶接部V部における残留応力分布 (K5D鋼CES溶接継ぎ, 継ぎ長: 1000mmと500mm)

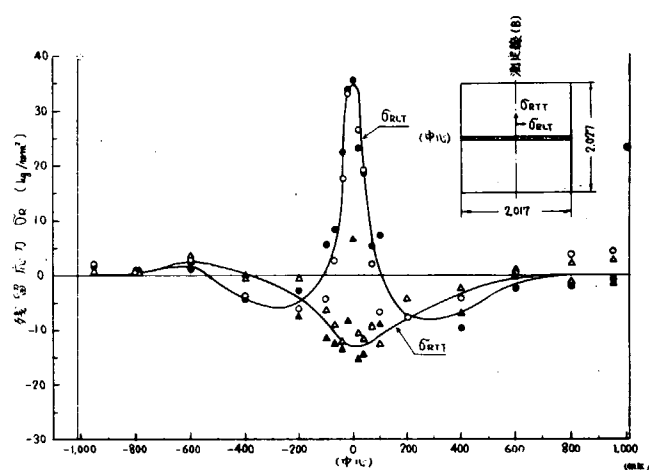


図7.1.6 (1) 試験片中央部における残留応力の溶接線直角方向での分布 (K5D鋼CES溶接継ぎ, 継ぎ長: 2017mm)

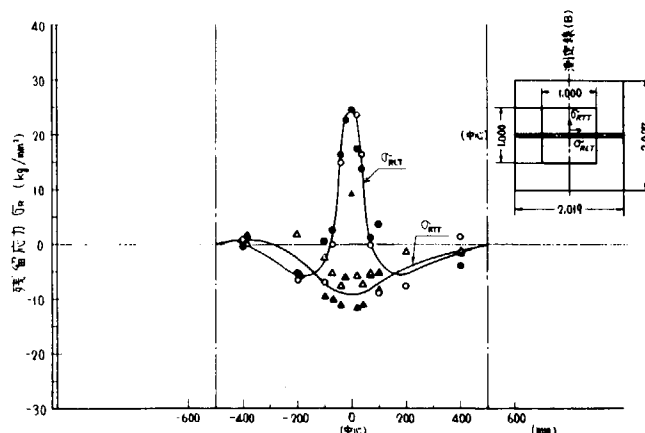
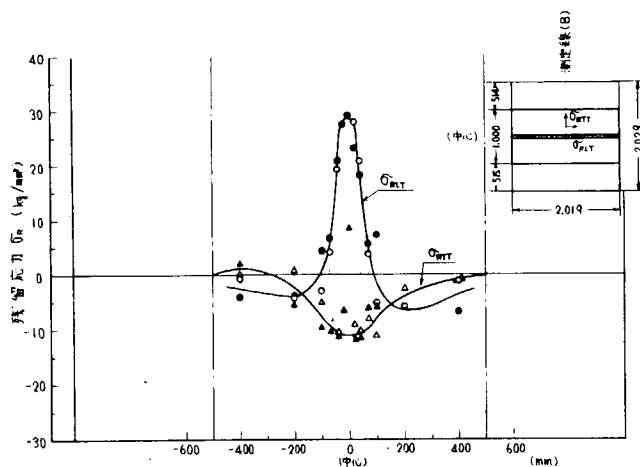


図 7.1.6 (2) 試験片中央部における残留応力の溶接線直方向への分布 (K5D鋼CES溶接継手, 継手長: 1,080mm) 図 7.1.6 (3) 試験片中央部における残留応力の溶接線直方向への分布 (K5D鋼CES溶接継手, 継手長: 1,000mm)

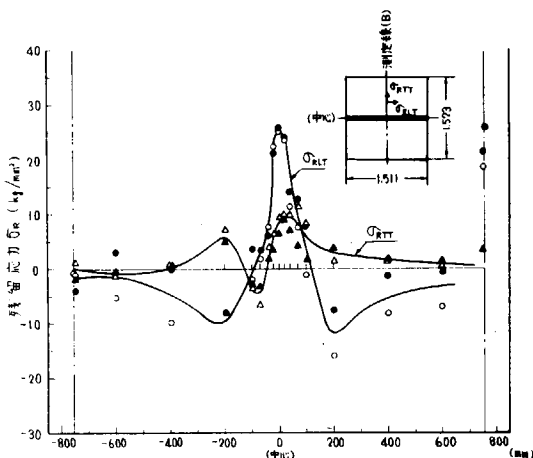
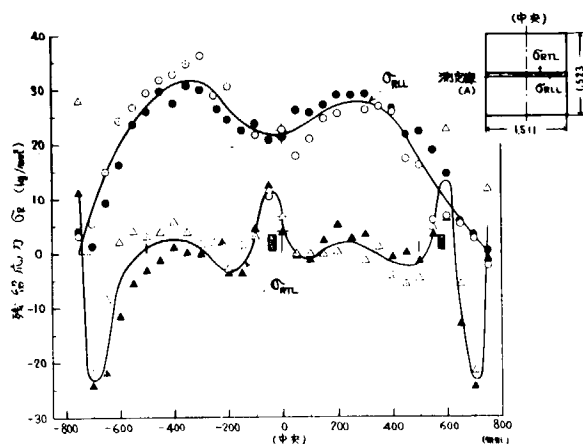


図 7.1.7 溶接ボルト部における残留応力分布 (KAS鋼IL外口スラグ溶接継手, 継手長: 1,511mm) 図 7.1.8 試験片中央部における残留応力の溶接線直方向への分布 (KAS鋼IL外口スラグ溶接継手, 継手長: 1,511mm)

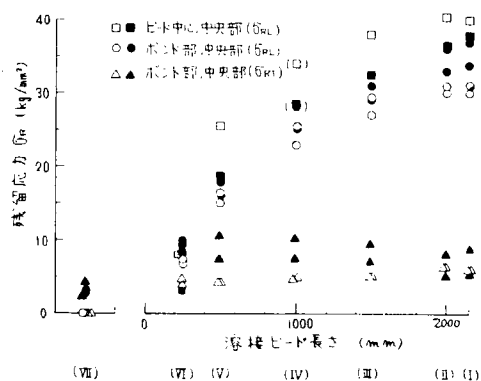


図 7.1.9 (1) 試験片中央の溶接継手部 (長さ4点) の各切段階における残留応力値 (KAS鋼エレクトロガス溶接継手)

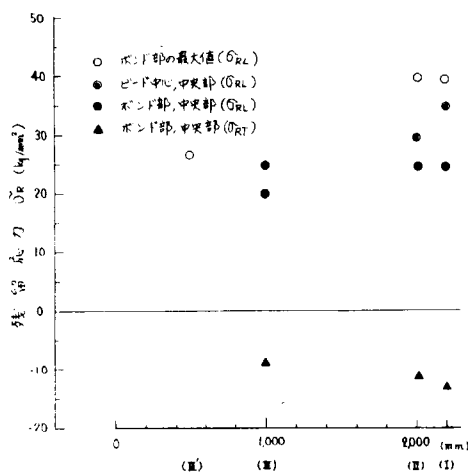


図 7.1.9 (2) 試験片中央部のボルト中心およびボルト部の各切段階における溶接残留応力 (K5D鋼CES溶接継手)