

エレクトロスラグ溶接法の特性と改善

Electro-slag Welding Characteristics and Improvements

The electro-slag welding method is frequently used for welding structuralization of large-scale heavy electro-machines, nuclear power instruments and the like, because of its high efficiency and high welding quality. However, because this method needs a much larger heat input than other welding methods, special care is necessary to prevent weld cracking and brittleness. This report discusses the prevention of hot cracking in mild steel welding and brittleness of Cr-Mo steel weld, and suggests improvements by using a narrow gap of root face.

渡辺 潔* Kiyoshi Watanabe

妹島五彦** Itsuhiko Sezima

小倉 慧*** Satoshi Kokura

滝 元司*** Genzi Taki

1 緒 言

エレクトロスラグ溶接法（以下、ESWと略す）はソ連にて1951年に⁽¹⁾⁽²⁾開発されて以来、応用範囲は著しく進展し、今日では技術的問題はほとんど解決し、安定に適用されるまでに至った。最近では厚板の溶接に適するESWの特質を生かして大形構造物⁽³⁾や造船⁽⁴⁾関係などの特殊用途に用いられるようになった。日立製作所においても、水車ランナ、圧延機スタンドフレーム、大形歯車などの大形重電機器や压力容器、ボイラなどの化学プラント、原子力機器に有効に利用されている。

ESWは一般に高品質の溶接部が得られ、厚板を高能率で溶接可能な優れた特長があるが、比溶接入熱が $10 \sim 100 \times 10^4 \text{ J/cm}^2$ （一般アーク溶接法では $1 \sim 10 \times 10^4 \text{ J/cm}^2$ ）と非常に大きく、それに伴うや金の問題も多い。

そこで本稿では大入熱に伴う代表的な問題点として(1)軟鋼の厚板溶接の高温割れ、(2)低合金鋼の脆化について述べ、更に入熱を減少させるため、(3)溶接開先を減少し溶着量を低減した場合の利点について述べる。

2 軟鋼厚板における凝固偏析

2.1 溶接割れの分類

ESWでは大入熱による母材の温度上昇のために、予熱及び後熱の効果により比較的低温割れは少ないが、過大な溶接金属を形成するため高温割れ、特に偏析割れを生じやすい。

2.2 溶接金属中の偏析割れ

図1は軟鋼S M41の厚板(100mm以上)に発生した偏析割れの一例である。

偏析割れはセルラー デンドライトにそって発展するが、セルラー デンドライトの境界には低融点のMnSが偏析していることがX線マイクロアナライザで確認されている。

このような偏析割れを防止するには母材形状及び溶接条件で決まる溶け込み状況及び溶接ワイヤと母材の溶け込み状況で決まる溶接金属の化学成分の十分な検討が必要である。

2.3 溶け込み状況と偏析割れ

図2は溶接部の溶け込み状態を模型的に示したものであるが、偏析割れに関係するのはフォームファクタで溶融金属浴の形状を示すパラメータである。この値は0.5～6.0ぐらいの範囲にあるが、小さい場合は溶融金属浴の深さが大きく結晶

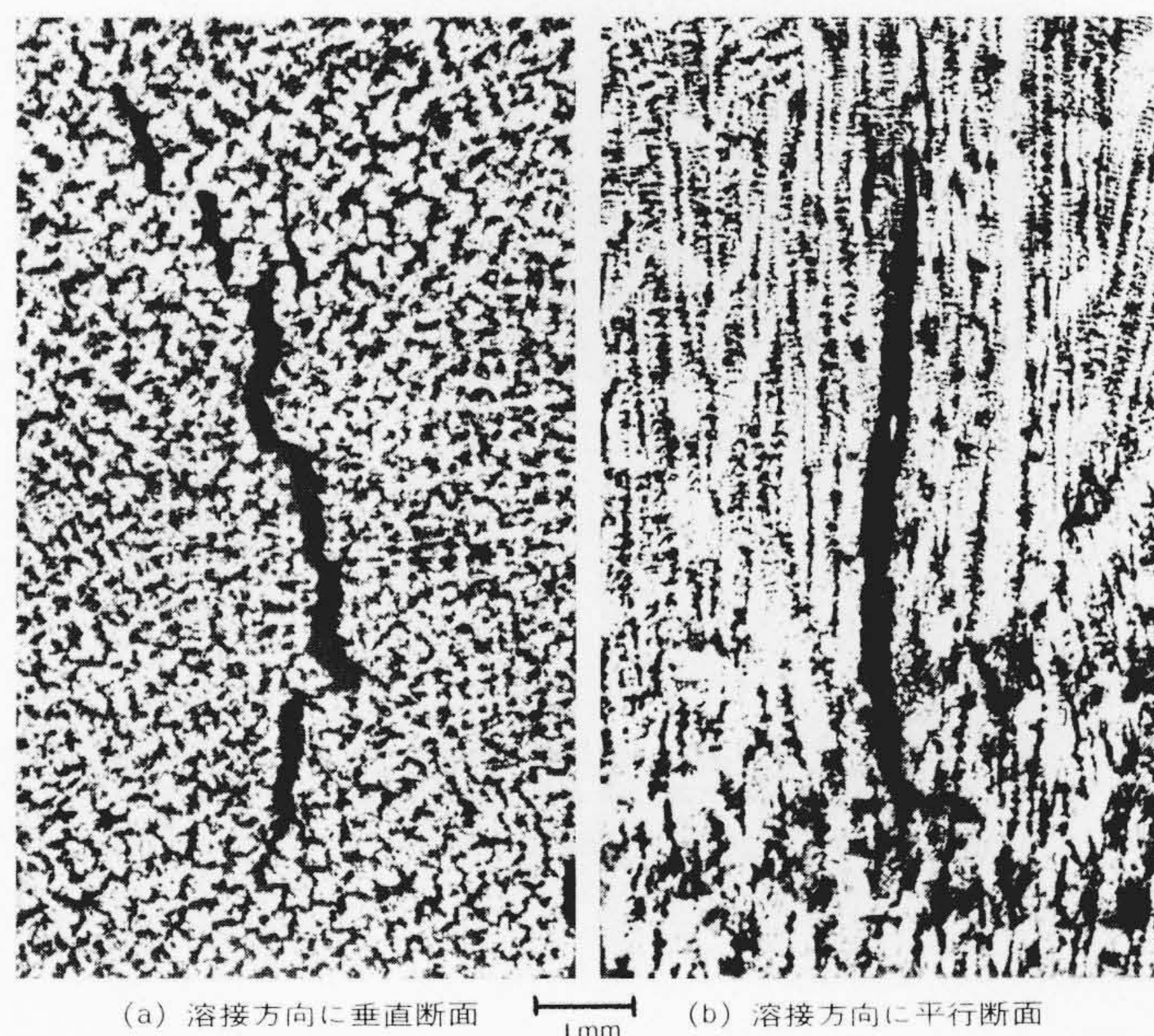


図1 溶接金属の高温割れ 溶接金属中の高温割れは凝固時に成長するセルラー デンドライトにそって発生する(×10)。

Fig. 1 Micro-structure of Hot Cracks in Weld Metal

方向が左右から向き合うように成長し偏析割れを生じやすい。

溶け込み率は溶接金属に対する母材の溶け込み比率を示すが、一般のESWでは30～50%ぐらいとなる。溶け込み率が大きいと母材の溶け込みが大きく、母材中にSなどの有害元素の含有が大きいと溶接金属中で偏析を起こし偏析割れの原因になる。

以上のように偏析割れはフォームファクタと溶け込み率に関係し、割れ率は溶接長に対する割れ長さの総和で示される。

2.4 偏析割れ感受性評価方法

厚板構造物で偏析割れの対策を考える場合、実製品の板厚で、高ひずみ応力下での再現実験を行なうことは不可能に近く、溶接金属の割れ感受性を評価することができない。

* 日立製作所日立研究所 工学博士

** 日立製作所日立工場

*** 日立製作所日立研究所

そこで完全拘束状態で実際にESWを行なって偏析割れを再現できる試験方法を開発した。

図3はその試験方法を示すものである。すなわち、約200×200×100tの試験片の中心にESWの開先形状を想定した長方形の穴を空け、その内部を溶接条件を一定としESWを行った。

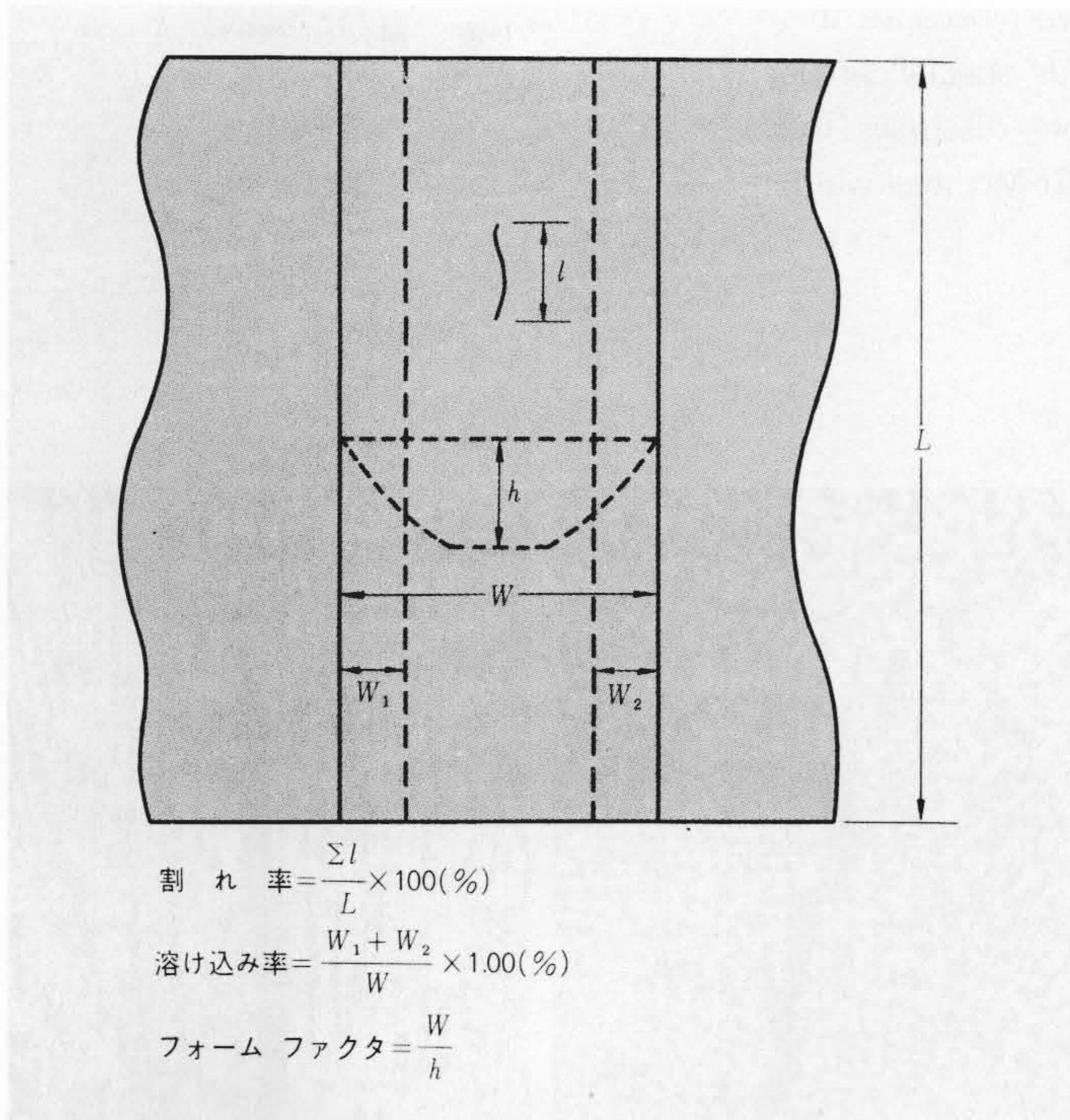


図2 溶接金属の凝固状況 溶接部の溶け込み状態は溶け込み率とフォームファクタで表わされ、割れ率はこれらに關係する。
Fig. 2 Schematic Diagram of Solidification

この試験方法により実際の溶接条件で、実際のESWの溶け込み状態と同様な凝固形態で偏析割れを再現できる。

図4は、上記割れ試験法による各種溶接ワイヤの割れ感受性結果である。同図はMn含有量の異なる溶接金属の割れ感受性を示したものであるが、1.で述べたように、割れ感受性に関係する溶け込み率30~40%、フォームファクタは約3で、通常のESWの値であるが、ワイヤCのようにMn含有量が2%近くなると偏析割れが発生しやすい。

ESW用溶接ワイヤでは一般に溶接金属の引張強度を増加するため、Mn含有量を2%以上に増す傾向があるが、ESWでは母材の溶け込み率が大きく、母材のSが溶接金属中に移動して、MnSを形成しやすく、偏析割れの点からはMn含有量を極力低減したほうがよい。

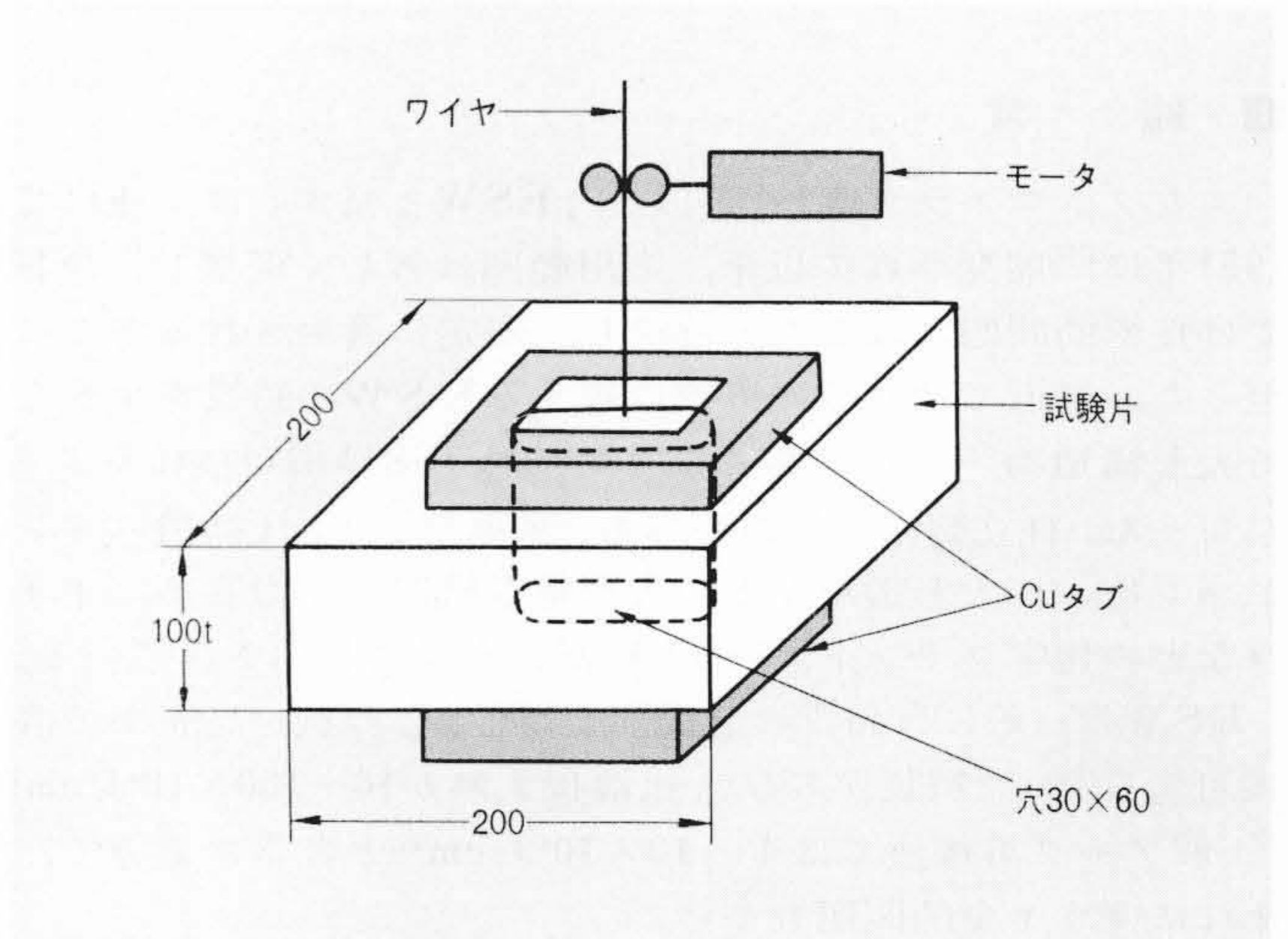


図3 溶接金属の高温割れ試験法 厚板の高温割れを本試験法で再現させ適正な成分のワイヤの選定ができる。
Fig. 3 Testing Method of Hot Cracking in Weld Metal

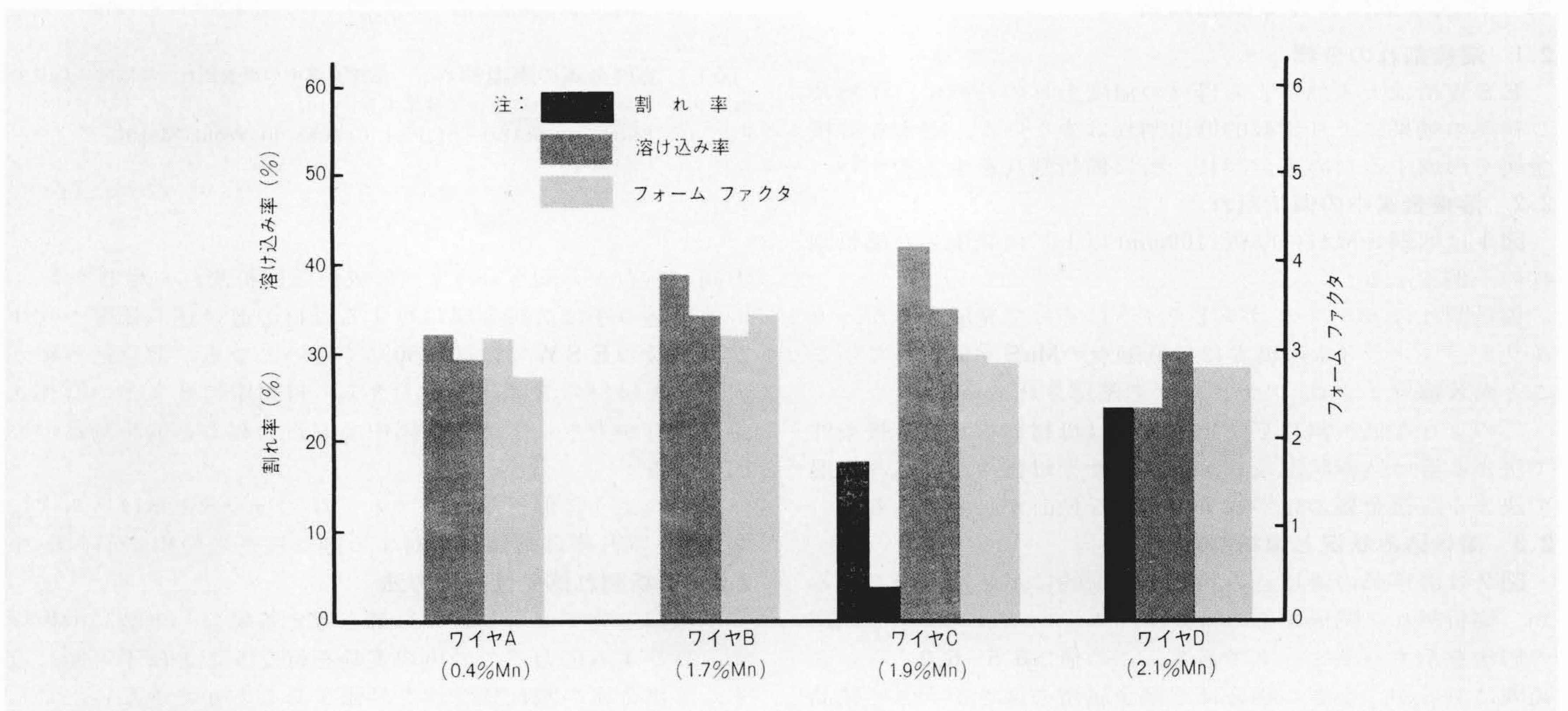


図4 溶接金属の高温割れ感受性 各種ワイヤの高温割れ感受性の比較を示す。一般に溶接金属中にMn含有量が高いと高温割れが発生しやすい。

Fig. 4 Hot Cracking Sensitivity of Weld Metal

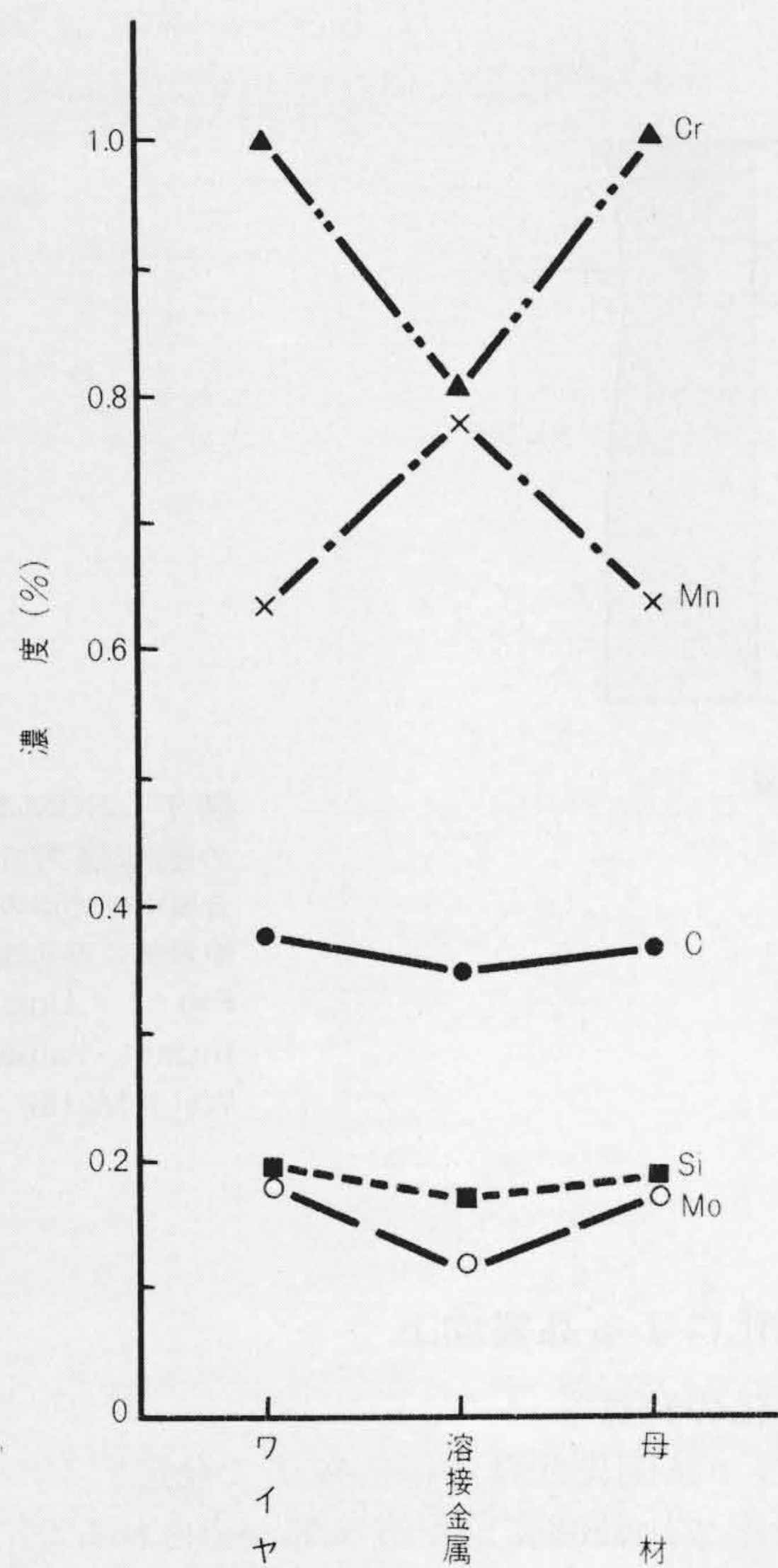


図5 SCM4 溶接金属の成分変化 フラックスとの反応により溶接金属ではCrが減少してMnが増加する傾向がある。

Fig. 5 Change of Composition in SCM4 Weld Metal

3 低合金鋼の大入熱に伴う脆化

3.1 溶接金属の成分変動

E S Wは溶融スラグを介して溶接が進行するために、溶接ワイヤと溶融スラグの化学反応を生じ、溶接金属の成分が変動する。従って、軟鋼では特に問題はないが、低合金鋼では成分変動に注意が必要である。

例えば図5は、Cr-Mo鋼のSCM-4についてE S W後の溶接金属の成分濃度を溶接ワイヤ及び母材と比較して示したものである。C, Si, Moは特に溶接金属での変動はみられないが、Mnは増加し、逆にCrは減少する傾向がある。Mnはスラグ中のMnO(使用フラックスでは約20%)のFeによる還元により増加し、Crはスラグ中のOにより酸化されるために減少するものと推定される。

従って、低合金鋼ではCr, Mnの変動を考慮した溶接ワイヤの選択が必要である。

3.2 溶接部の機械的性質

表1は、低合金鋼のE S W適用例である母材及び溶接金属の化学組成を、表2は、表1に示した成分の全溶接金属の引張試験結果を示すものである。溶接のままだでは約87kg/mm²の引張応力で、850°C油中焼入れ及び630°Cの焼もどしでは約74kg/mm²、伸び、絞りも十分な値を示している。図6は溶接部のかたさ分布で、溶接のままだでは熱影響部から溶接金属側にかけてしだいにかたさの上昇がみられるが、焼入れ、焼もどしによって母材、熱影響部、溶接金属ともにHv250で均一なかたさ分布を示している。

以上述べたように、適正な焼入れ、焼もどしによって溶接部の引張強度及びかたさ分布などは問題はないが、靱性については検討を要する。

図7は溶接金属の各位置における衝撃値を示すものである。溶接方向と試験片の位置を図のようにL, Z方向とすると、溶接のままだではZ方向, L方向とも、各位置についてvEo 1kg-m/cm²以下の低い値である。焼入れ、焼もどしの熱処理後で

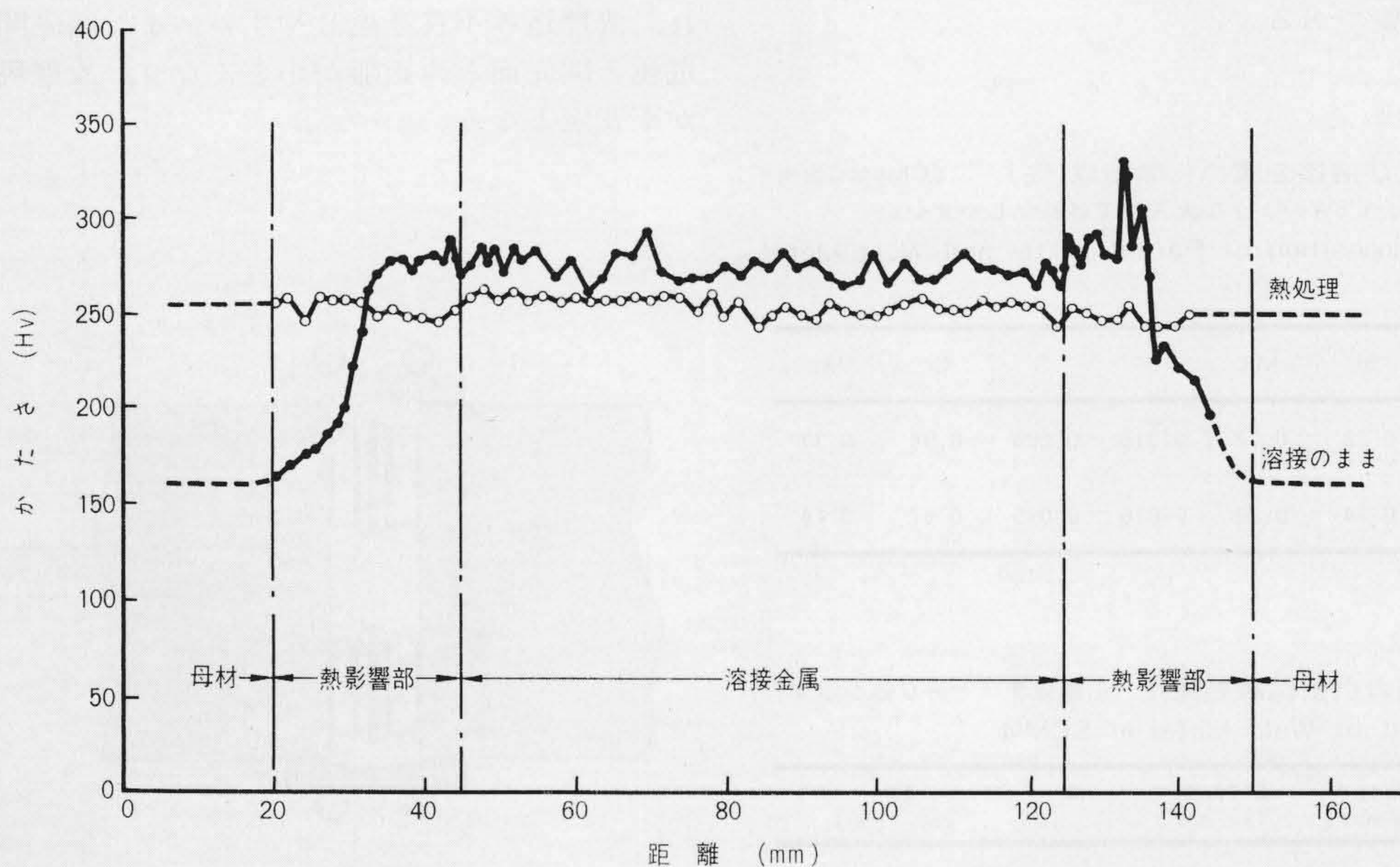


図6 SCM4 溶接金属のかたさ分布 SCM4 溶接部のかたさ分布は、熱処理によって均一になる。

Fig. 6 Hardness Distribution in SCM4 Weld Metal

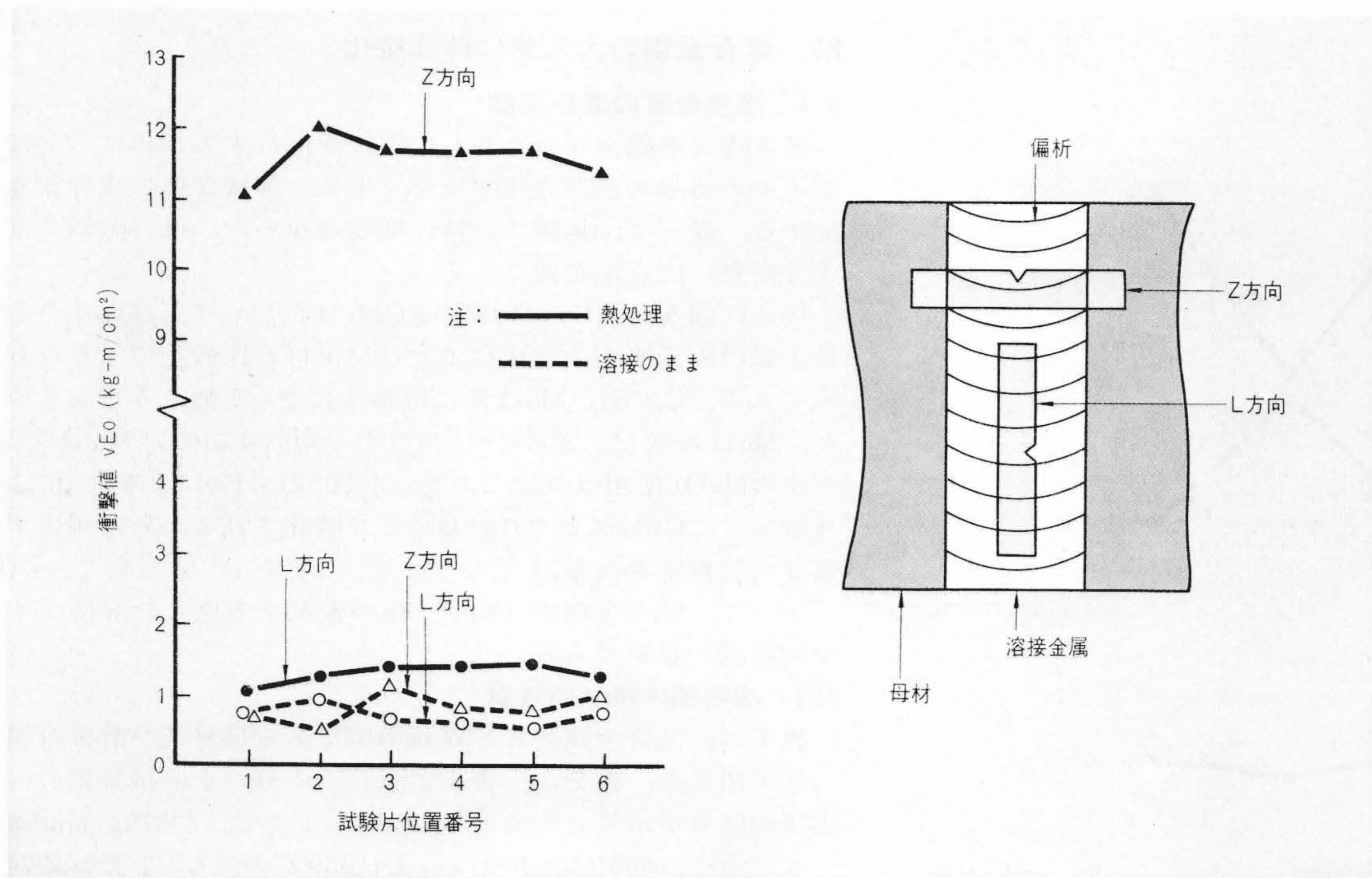


図7 SCM4 溶接金属の衝撃値方向性 溶接金属中のMnSの分布によって衝撃値に方向性が現われる。
Fig. 7 Uni-directional Impact Value of SCM4 Weld Metal

は、Z方向の値は 11kg-m/cm^2 以上で著しく回復するが、L方向は $1 \sim 2\text{kg-m/cm}^2$ の低い値である。このように低合金鋼にESWを適用した場合、溶接金属の靱性が方向性を示す場合がある。

この原因については、ESWでは大入熱での過大溶け込みのために、母材の溶け込み率が大きく、母材からのSの混入が多く、硫化物の偏析によるものである。すなわち、図7の溶接部の模型図に示すように、溶接ワイヤの溶滴移向が不連続なため、溶融金属の凝固速度が不連続となり、凝固面にそって帯状に硫化物の偏析を生ずる。従って、偏析帯にそった方向への衝撃値は低い値を示すことになる。使用上このような靱性の低下を改善する必要がある場合には、溶接後 $800 \sim 1,000^\circ\text{C}$ の高温で十分な拡散処理を行ない、その後適正な熱処理を行なうことが必要である。

表1 SCM4の母材及び溶接金属の化学組成(%) SCM4はC含有量が多く溶接性が悪いので、ESWのような大入熱では脆化しやすい。

Table 1 Chemical Composition of Parent Metal and Weld Metal in SCM4 (%)

成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
種別							
母材 (180mm)	0.40	0.23	0.72	0.010	0.008	0.98	0.37
溶接金属	0.34	0.14	0.77	0.016	0.015	0.67	0.14

表2 SCM4 溶接金属の引張試験結果 引張強度は十分な値を示す。
Table 2 Tensile Test of Weld Metal in SCM4

熱処理	引張強さ (kg/mm²)	0.2%耐力 (kg/mm²)	伸び (%)	絞り (%)
溶接のまま	87.3	66.4	14.9	36.2
850°C 油冷 630°C 空冷	74.1	57.7	24.0	51.5

4 狭開先化による品質向上

4.1 狭開先化の利点

アーク溶接の狭開先化は各種溶接法で発達⁽⁶⁾しつつある。ESWは高能率で比較的安定な溶接部が得られるが、大入熱のために3.で述べたように偏析割れや脆化の問題を生じやすい。そこでESWの場合もアーク溶接と同様に狭開先化による入熱の制限が種々な面で利点となると考えられる。

4.2 狭開先ESWの施工法

ESWは溶融スラグ中に溶接ワイヤを通し通電し、溶融スラグのジュール熱によって溶接を行なうため、溶融スラグ量が多く、開先内に十分に熱を分布させないと安定な溶接ができない。従って狭開先化する場合は、溶融スラグ量が制限され、溶け込み不良を生じやすい。また開先間隙が狭くなると電極と開先面との距離が小さくなり、放電現象を起こし溶接が不安定となる。

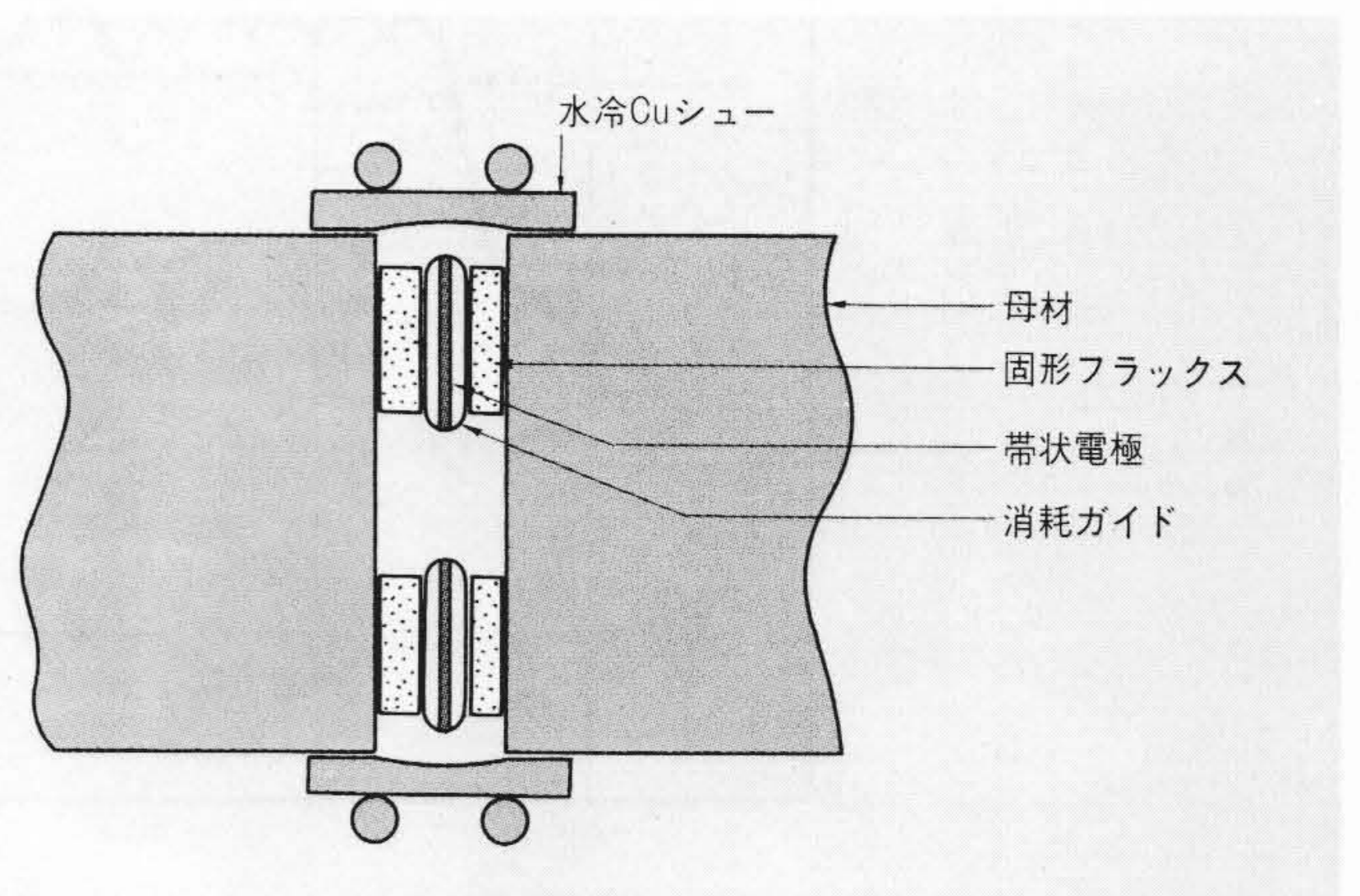
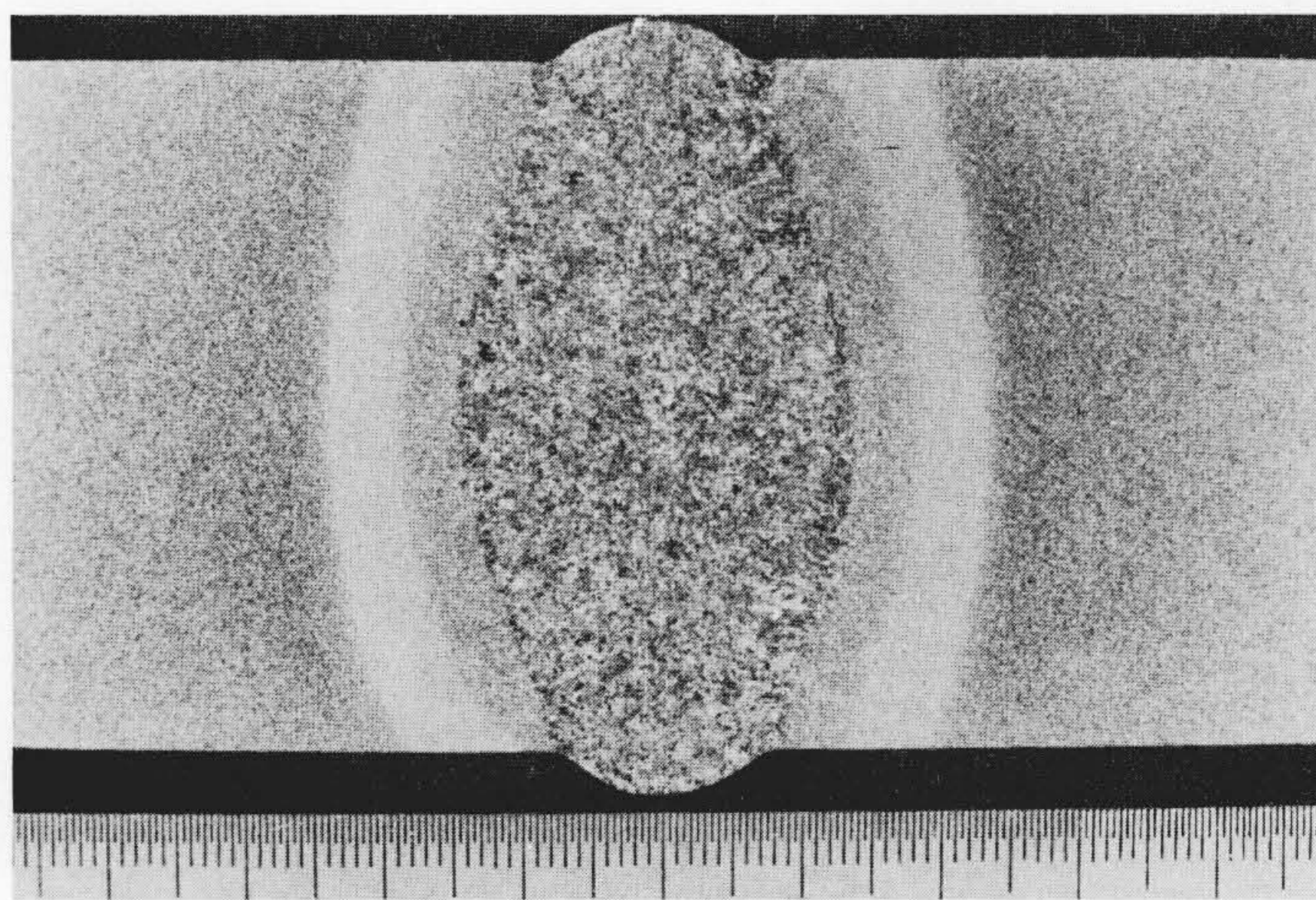
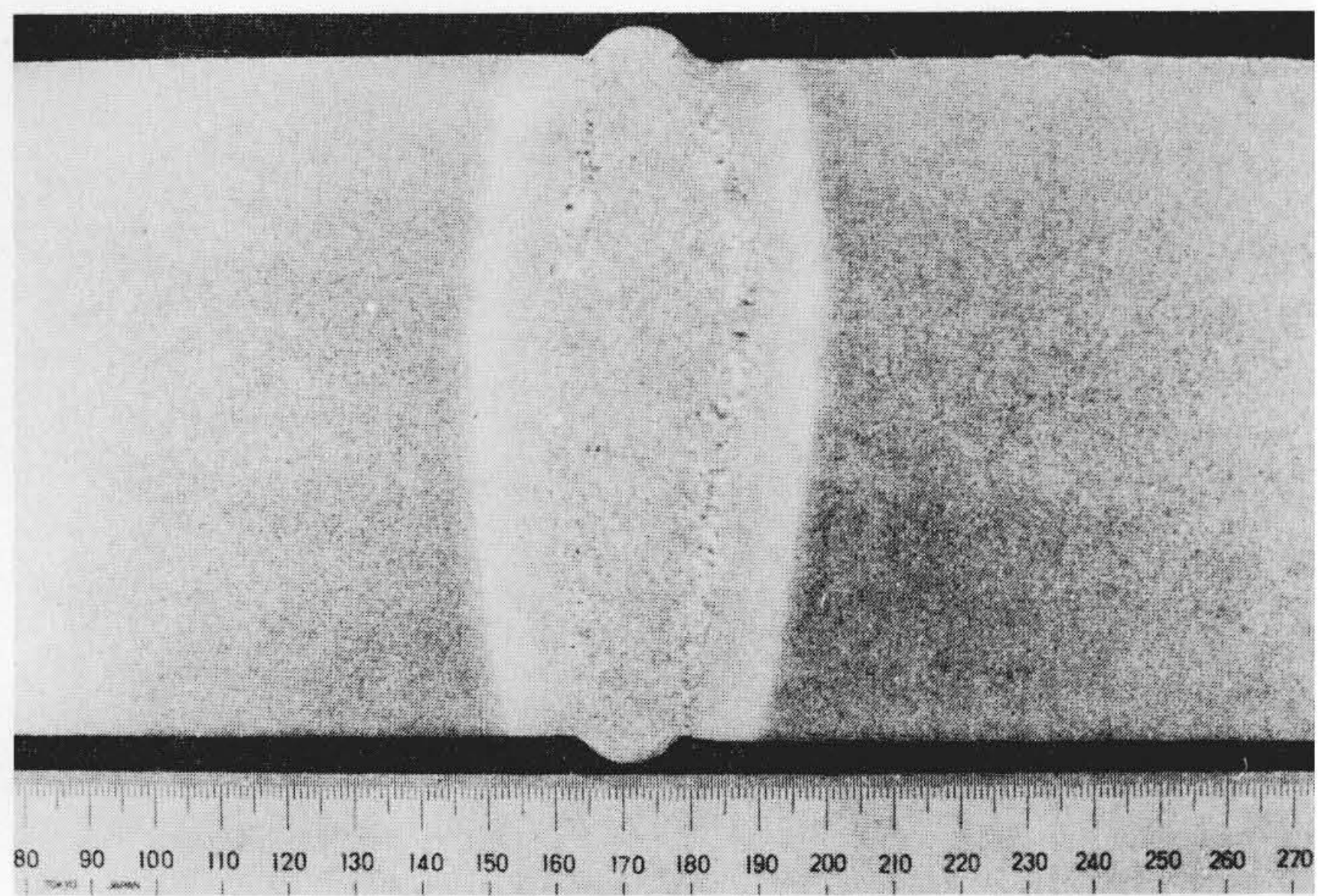


図8 狭開先ESWの設置状況 開先間隙を狭くして安定に溶接するには、带状電極を消耗ガイドに通して送給する。

Fig. 8 Schematic Diagram of Narrow Gap ESW



(a)板厚50mm(1電極)



(b)板厚100mm(2電極)

図9 狭開先で溶接された試験片の断面 溶け込みが少なく、良好な溶接部が得られる。
Fig. 9 Macro-Structures of Narrow Gap ESW

図8は上記の観点から、安定に溶接を行なうための施工法を模型的に図示したものである。まず、電極と開先面との放電を防止するため帯状電極が好ましく、また連続的に電極を送給するために薄く、フープ状に巻いた電極を用いる。更に電極を安定供給するために、固形フラックスで固定された消

耗ガイド中を通して帯状電極を送給する。

本方式で開先間隙13~15mmで溶接が可能で、板厚60mmぐらいまでは1電極、100mmぐらいまでは2電極で溶接される。

図9は、以上の方法で溶接された断面マクロ写真を示すものである。同図(a)は軟鋼50mmで1電極での溶接部、同図(b)は100mmを2電極で溶接を行なった結果を示すものである。いずれの板厚でも溶け込み幅は約30mm以下で良好な溶け込みを示している。

4.3 狭開先化による諸特性

図10は開先間隙と諸特性の関係を示すものであるが、開先間隙が小さくなるに従って、当然、溶け込み幅と熱影響部幅は減少し、比溶接入熱(単位板厚に対する熱量)も著しく減少する。更に溶接速度が従来法に比較して約2倍以上の上昇を示し、高能率化することが分かる。

またESWでは溶接方向にセルラーデンドライトが成長するが、この径が凝固時の結晶粒の大きさに相当する。図10に示したように、狭開先化した場合このセルラーデンドライトの径が従来法の約1/2以下に小さくなる。このことは凝固偏析の程度が減少することで、先に述べた偏析割れの防止に効果的となり、脆性の低下も防止できることになる。

4.4 軟鋼の狭開先化による機械的性質

図11は軟鋼SM41について溶接後、900°Cの焼ならし、続いて625°Cの焼もどしを行なった場合で、開先間隙10mm、13mm、15mmの溶接金属の衝撃値を示すものである。溶接のままで0°Cで $vEo 5 \text{ kg-m/cm}^2$ 以上あり、熱処理後では約 25 kg-m/cm^2 以上の高い値を示している。開先間隙が狭くなるほど、デンドライトの微細化により衝撃値は上昇する傾向にある。

焼ならし、焼もどしの適正な熱処理で良好な衝撃値特性が得られることが分かったが、更に溶接後、応力除去焼鈍のみでの検討を行なった。図12は、溶接後600°Cで焼鈍を行なった場合の溶接金属、熱影響部及び母材における衝撃値を示すものである。焼鈍のみでは溶接金属の衝撃値の回復は母材ほど大きくないが、約 10 kg-m/cm^2 の値を示し、十分な値と考えられる。

以上のように、従来ESWでは大入熱のため溶接金属の結晶粒粗大化による靱性の低下が問題とされていたが、このような狭開先化による入熱の制限によって熱処理の省略が考えられる。

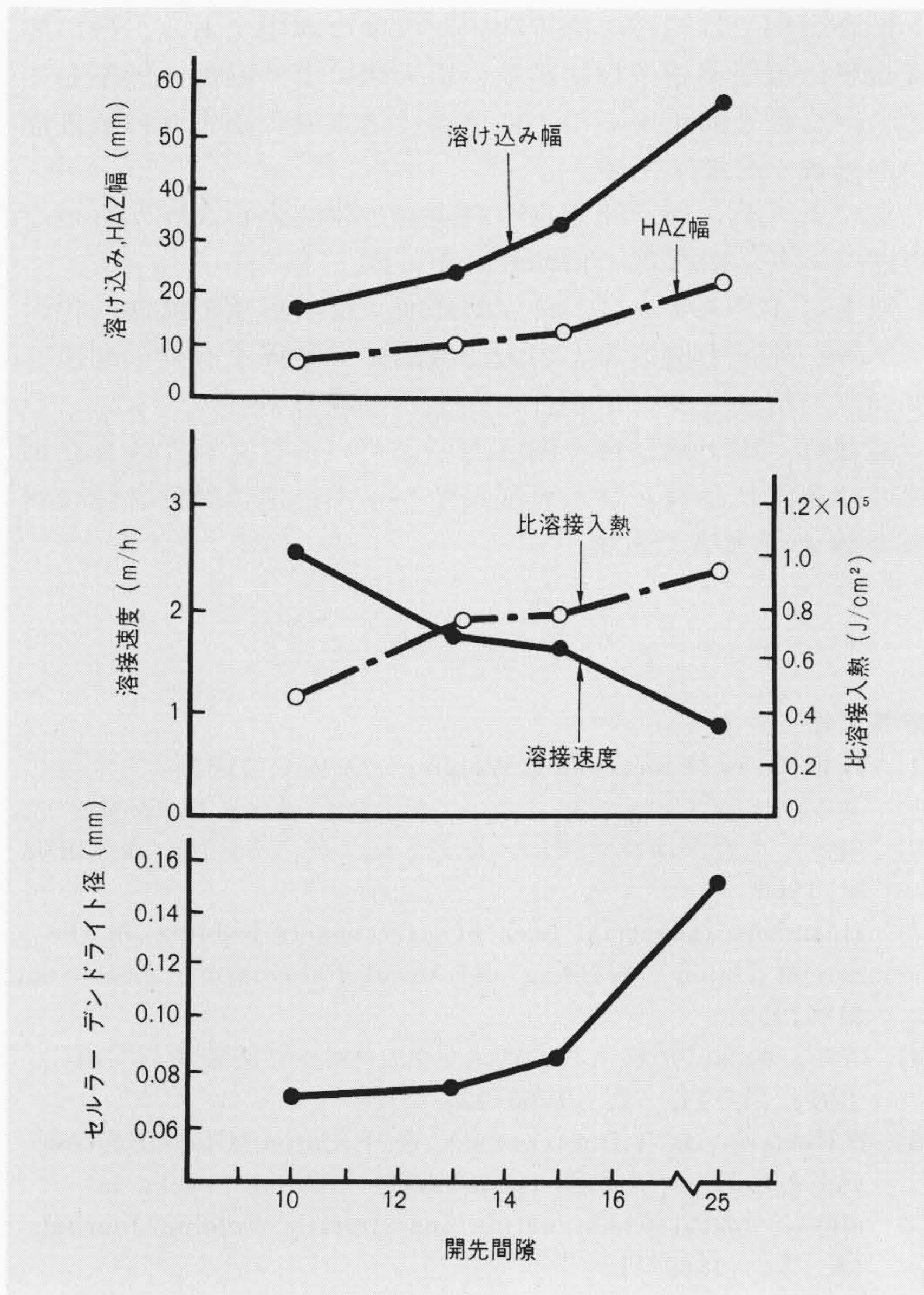


図10 開先間隙と溶接金属の諸特性 狭開先化するほど、能率向上、入熱低減、更には結晶粒の微細化が認められる。
Fig. 10 Properties of Weld Metal vs. Gap of Root Face

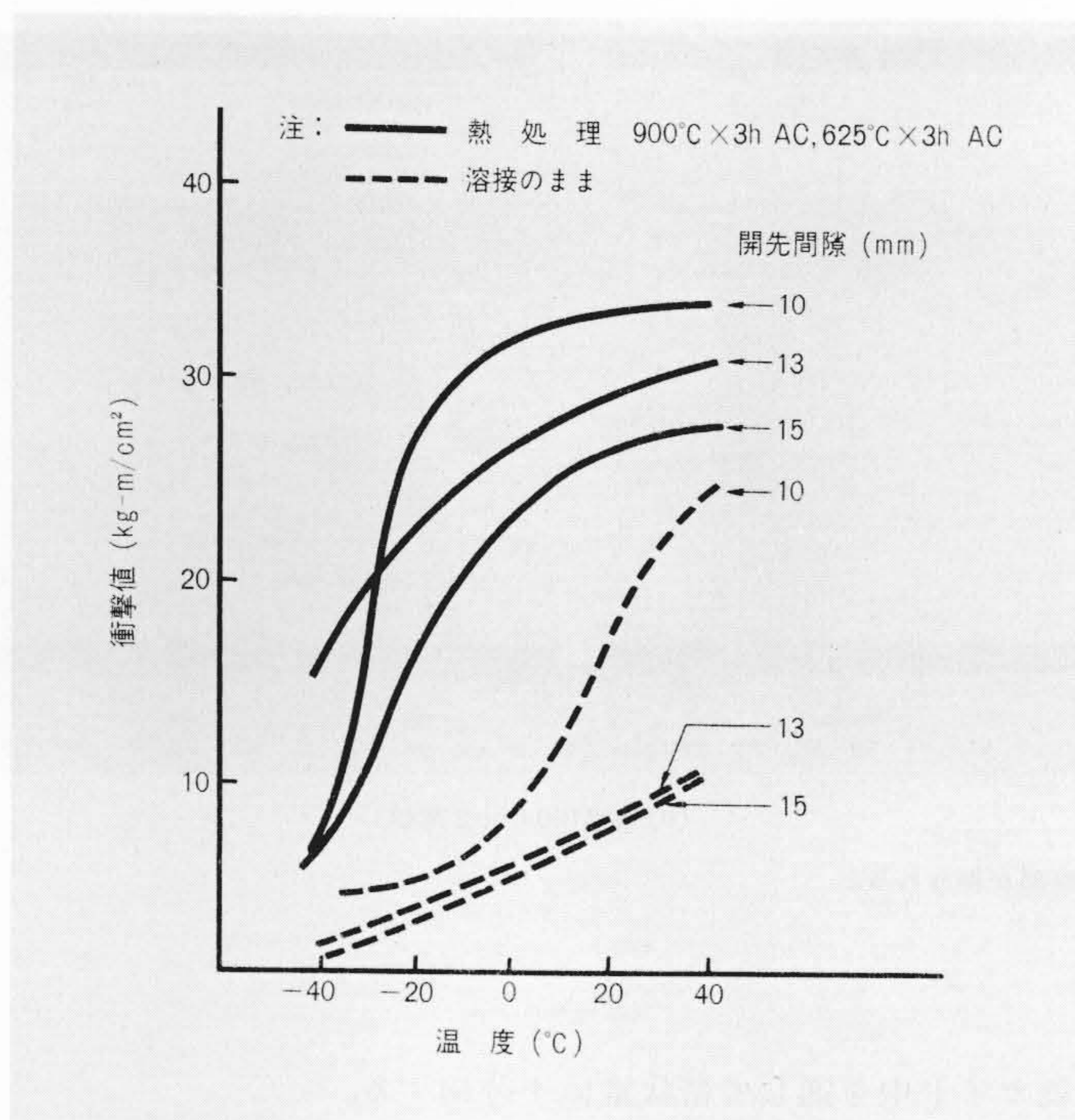


図11 狭開先溶接によるSM41溶接金属の衝撃値 熱処理によって著しく回復する。間隙が小さいほど更に高くなる。

Fig. 11 Impact Value of SM41 Narrow Gapped Weld Metal

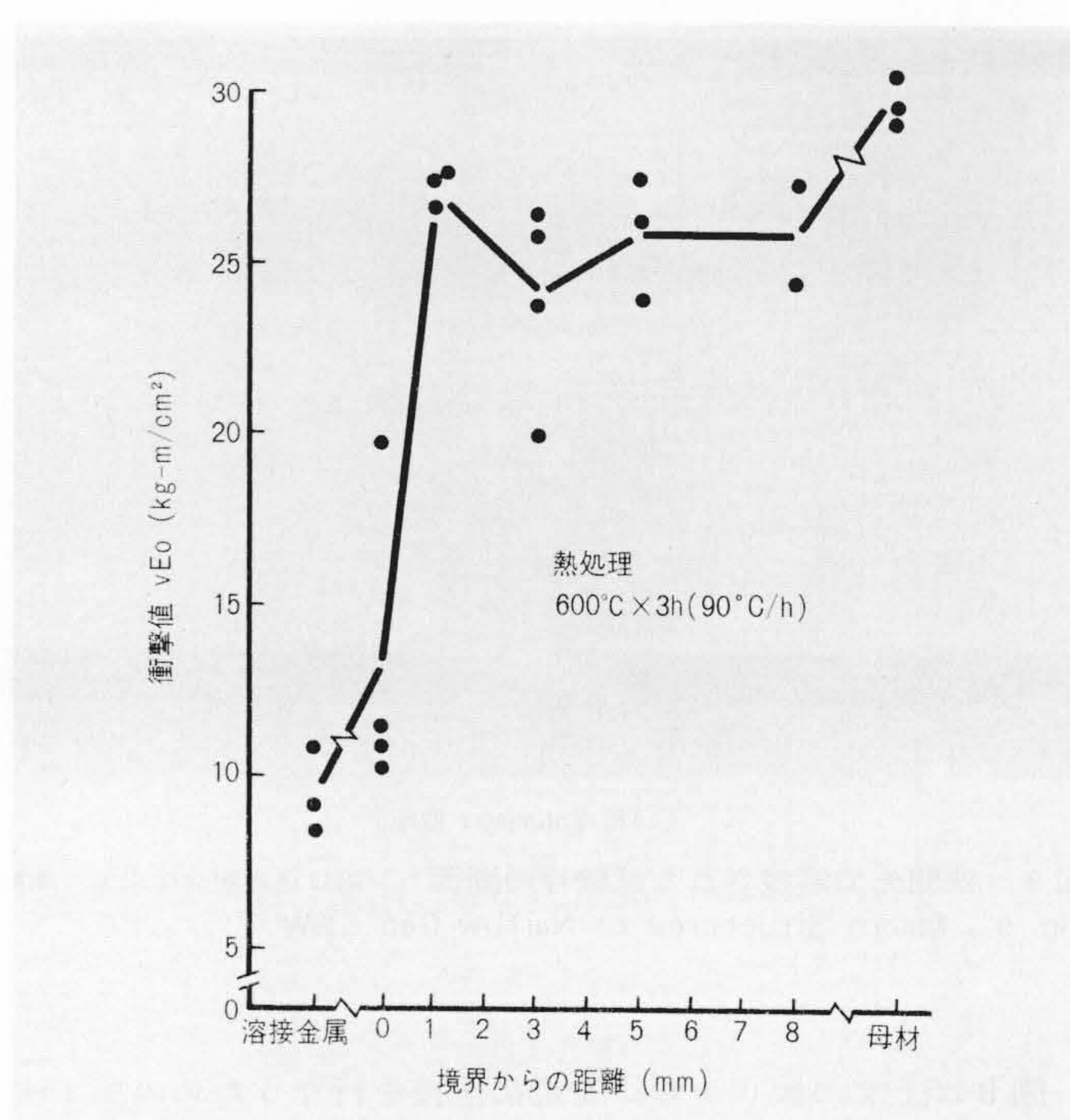


図12 SM41の溶接金属、熱影響部の衝撃値 焼鈍のみでも特に脆化部分はみられない。

Fig. 12 Impact Value in Weld Metal and HAZ of SM41

5 エレクトロスラグ溶接の製品への適用例

5.1 超大形水車ランナ

軟鋼を主体にしたフランシス型水車ランナで 300t を越えるため一体鋳造では限界があるので、クラウン及びシュラウドリングとペーンの溶接、更に 2 分割された場合のフランジの溶接に有効に適用され高品質を保障し高能率化している。

5.2 圧延機スタンドフレーム

大形圧延機のフレームの溶接部は板厚 800mm を越え、E S W 以外の溶接法は考えられない。この場合、溶接部の溶け込み不良、偏析割れを防止するためのワイヤの選択及び溶接条件が重要である。

5.3 大形歯車

圧延機関係の大形歯車も従来の一体鍛造から鋼板による溶接構造化が図られている。材質は高く、Cr-Mo 鋼などで、溶接性が悪いいため、溶接ワイヤの選択、溶接後の適正熱処理が必要である。

5.4 円筒形状物

圧力容器、大形モータ・ヨークなどの鋼板化で、長手溶接に狭開先化し従来より 2 倍以上の高能率化が可能で、更に溶接部の機械的性質が向上する。

6 結 言

大形構造物に E S W を適用し溶接構造化する過程において特に E S W で特徴的な問題点及びその解決方法について述べた。すなわち、軟鋼超厚板に適用する場合は偏析割れが大きな問題点となる。偏析割れは大入熱による過大な溶け込みによって MnS の偏析を生じ、凝固時の応力によって発生する。偏析割れを防止するために、拘束の高い割れ試験法によって適正な溶接ワイヤの選択を行なう必要がある。溶接ワイヤ中には Mn 含有量の少ないほうが好ましい。

低合金鋼では靱性の低下防止が重要な課題である。特に溶接金属は凝固偏析及び結晶粒の粗大化により靱性が低下しやすい。これを防止するためには溶け込み過大防止と拡散処理の熱処理が必要である。

更に大入熱に伴う問題点の解決には狭開先 E S W が有効な方法であり、溶接部の信頼性は更に向上する。

以上に述べたように、日立製作所では大形重電機器、化学プラント、原子力機器などの大形部品に E S W を有効に利用し、問題点の解決並びに信頼性の向上に鋭意努力している。

最後に、本実験に種々御協力いただいた日立製作所日立工場の伊藤副技師長及び三好部長並びにその他の関係各位に対し深謝する次第である。

参考文献

- (1) B.E.Paton, "Electroslag Welding", A.W.S (1962)
エレクトロスラグ溶接について総合的に述べられている。
- (2) 有安, 上野, 「消耗ノズルエレクトロスラグ溶接法」, 森北出版社 (1968)
- (3) E.Bishop, "Industrial uses of electroslag welding in the Soviet Union", Welding and Metal Fabrication, Aug.-Sept., 318 (1959)
- (4) 谷垣, 飯塚, 「消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接法の実用化」, 溶接技術, 14, 71, (1966-12)
- (5) B.Hemsworth, T.Boniszewski, & F.Eaton, "Classification and definition of high temperature welding cracks in alloys" Metal Construction and British Welding Journal, 16, 5, (1969-11)
溶接部の割れについて明確に定義されている。
- (6) 飯塚, 「狭開先溶接の造船への実用化」, 溶接技術, 19, 61, (1971-1)
狭開先溶接の分類及び適用例などについて述べられている。