

電子ビーム溶接における品質保証

Quality Assurance in Electron Beam Welding

この論文は、電子ビーム溶接部の品質保証に対する基本的な考え方を紹介するとともに、その中の重要項目である、溶接条件の管理と溶接技能者の教育について説明した。すなわち、電子ビーム溶接の品質保証における事前準備と管理の重要性とを強調したものである。

妹島五彦* Itsuhiko Sejima

志田朝彦** Tomohiko Shida

1 緒 言

電子ビーム溶接(以下、EB溶接と略す)には周知のように幾つかの著しい特長があるので、装置が非常に高価であるという欠点にもかかわらず、開発以来わずか十数年という短期間に非常な普及を見るに至った。昭和48年現在、全世界で約2,000台の装置が稼動しており、更に将来その台数は著しく増加するものと公式に推定されている⁽¹⁾。日立製作所においても、現在既に数台の装置が研究所及び工場で稼動中であり(図1)、更にその普及と利用を促進するため、鋭意研究・開発を進めている。

開発後比較的歴史の浅いEB溶接を製品に実用化するには、なんといっても溶接部の品質保証が重要である。以下、EB溶接部の品質保証に対する基本的な考え方を紹介するとともに、その中の重要項目である溶接条件の管理と溶接技能者の教育について、併せて述べる。

2 EB溶接部の品質保証に対する考え方

EB溶接は通常のアーク溶接に比べて結果の再現性が非常に良く、安定した結果を得ることができる。これは溶接装置の各部分が高精度に製作され、且つ電氣的安定化回路、フィードバック回路が各所に採用されていることと、アークに比べ電子ビームのほうが熱源として発生及び入熱化の安定度が高いことによるものである。しかし一方、アーク溶接に比べ(1)EB溶接は、制御あるいは設定しなければならない条件因子が多い(後出図10 EB溶接作業記録用紙を参照)。(2)電子ビームは細くシャープであるため、電界、磁界などの影響により開先からの目外れを起こすことがある。(3)主に母材を溶融するので、母材材質や表面汚染の影響を受ける。といった欠点がある。

このような欠点を克服してEB溶接の長所を発揮させ、安定、且つ良好な品質を得るには、表1に示す各項目につき十分検討して一貫した品質保証の体系を確立し、これを守っていかなくてはならない。

同表で分かるように、EB溶接部の品質はほとんど100%が準備段階で決定されるものであり、いわゆる検査(非破壊検査、抜取り破壊検査など)は、この準備と管理とが確実に実行され遵守されていることの確認としての意義が大きい。すなわち、EB溶接においては他のどの溶接法にもまして高品質を作り込むという考え方に徹することが必要であり、これを確実に実行すればEB溶接の特長が生かされ、大きな効果を生むものである。

同表に示した品質保証の各項目は、相互に関連し合っている。



図1 電子ビーム溶接装置 日立製作所内に設置されたEB溶接装置の一例で、作業中の状況を示す。装置の保守管理と作業環境の維持には十分な注意を払っている。

る。例えば、溶接装置の特性と材料の性質は溶接条件の選定を大きく左右する。これらの相互関係を詳しく説明するのはこの論文の目的ではないので、以下に同表中の若干の項目につき詳細に説明し、EB溶接における品質保証という問題の全容の大略について理解を得たい。

3 溶接条件の選定と管理

溶接部の品質安定性を高めるためには、まず第一に溶接欠陥の発生を最小限度にとどめることが重要である。EB溶接でまず問題となり、対策を要する溶接欠陥の主なものについて、スケッチ的に図2に示す。これらの欠陥の生成の要因は必ずしも一様ではないが、EB溶接に特有の深いせん孔作用、溶融金属の湯流れ、急熱・急冷作用などと深くかかわりがあると見なされるものが多い。個々の欠陥生成の正確なメカニズムは、目下学界レベルで鋭意研究中であり^{(2)~(4)} まだ完全に解明されていないが、日立製作所においてもEB溶接の利用者として欠陥の生成メカニズムの理解と、防止のための研究を推進している^{(5)~(7)}。

通常、被溶接材料の材質選定は、強度靱性など設計的要求で大きく支配され、また溶接装置は非常に高価なため、数少

* 日立製作所エンジニアリング推進センタ ** 日立製作所日立研究所

表1 EB溶接の品質保証のための実施項目 EB溶接の品質保証体系を確立するため、あらかじめ検討しなければならない項目、及び実施しなければならない項目を示す。溶接作業開始前に検討を完了しておかなければならないことが多い。

段 階	項 目
研究開発 設計 試作	(1) 溶接装置の仕様決定
	(2) 溶接装置の特性（安定性、再現性を含む）及び能力の確認、把握
	(3) 部品材料の選定、仕様の決定
	(4) 部品形状寸法、加工洗浄方法、及び加工精度の決定
	(5) 溶接継手の強度、靱性、変形、残留応力、耐食性などの評価
	(6) 溶接治工具の設計開発
	(7) 溶接作業条件、作業基準の確立
	(8) 溶接装置オペレータの訓練
	(9) 検査方法と判定評価方法の決定
	(10) 溶接製造ライン、及び人的ラインの確立
	(11) 試作とその評価
生産	(1) 装置の保守管理（日、週、月、年）
	(2) 材料の管理確認
	(3) 部品の形状、寸法精度、脱磁、洗浄状況の確認
	(4) 治工具の保守管理、確認
	(5) 溶接作業条件の確認と記録
	(6) 開先線合せ、水平・垂直度出しなどの確実な実施
	(7) オペレータによる溶接状況の監視（異常あればメモ）と外観目視検査
検査	(1) 諸記録の確認及び基準との照合
	(2) 非破壊検査（X線、超音波、全数外観目視など）
	(3) ロットごと抜取破壊検査
	(4) 全数、又は抜取性能検査

ない装置を広く活用することが考えられるので、一応、所与と考えれば、欠陥発生傾向を最も大きく支配しているのは装置にセットするパラメータ、すなわち溶接条件の選定である。以下に、厚板の深溶込みEB溶接において特に注意を要する縦割れとスパイクについて、Cr—Mo鋼を例にとり説明する⁽⁷⁾。

3.1 溶接条件と溶込み深さ及びビード形状との関係

一応、材質は与えられているものとすれば、縦割れ発生傾向に最も大きく影響するのは、ビード形状、溶接速度及び溶込み深さである。いま、電子ビームのパワーを一定とし、ビームの焦点位置と速度とを変えて溶接し、その溶込み深さとビード幅とを測定するとおおむね図3に示すようになる。また、ビードの横断面は同図中にスケッチで示すような形状となる。

3.2 ビード形状及び速度と縦割れ発生傾向との関係

ビード横断面の形状を、直接定量化して表現することは図形のパターン認識の問題となり極めて困難なので、ビード形状を大きく支配する焦点位置と速度とをパラメータとして、縦割れ発生傾向を求めた(図4)。同図で明らかなように、縦割れの発生しにくい条件範囲は、下焦点くさび形ビード側で広く、上焦点側では非常に狭い。同図から、2¼Cr—1Mo鋼について縦割れの無い品質の安定したEB溶接を行なうには、下焦点側くさび形ビードで低速度で溶接しなければならないことが分かる。但し、溶接速度を下げることは欠陥防止上技術的には好ましいことであるが、コストの面で明らかに不利なため、速度を更に増加しても欠陥の出ない溶接方法を確立するよう更に研究を重ねつつある。

3.3 ビード断面金属組織と縦割れ発生傾向との関係

3.1、及び3.2で述べた溶接条件と縦割れ発生傾向との関係を金属学的に説明するため、ビード縦断面及び水平断面の凝固組織の調査を行なった。図5に縦断面及び水平断面の凝固線のスケッチを示す。図6は、ビームの焦点位置及び縦断面に見られる等凝固面の位置を示す線の、溶接進行方向に対する遅れ量と縦割れ及び大形ボイドの発生傾向との関係を示す。

これらの図から明らかなように、EB溶接進行中のある時点で、電子ビームの入射位置より等凝固面の位置が後方に遅

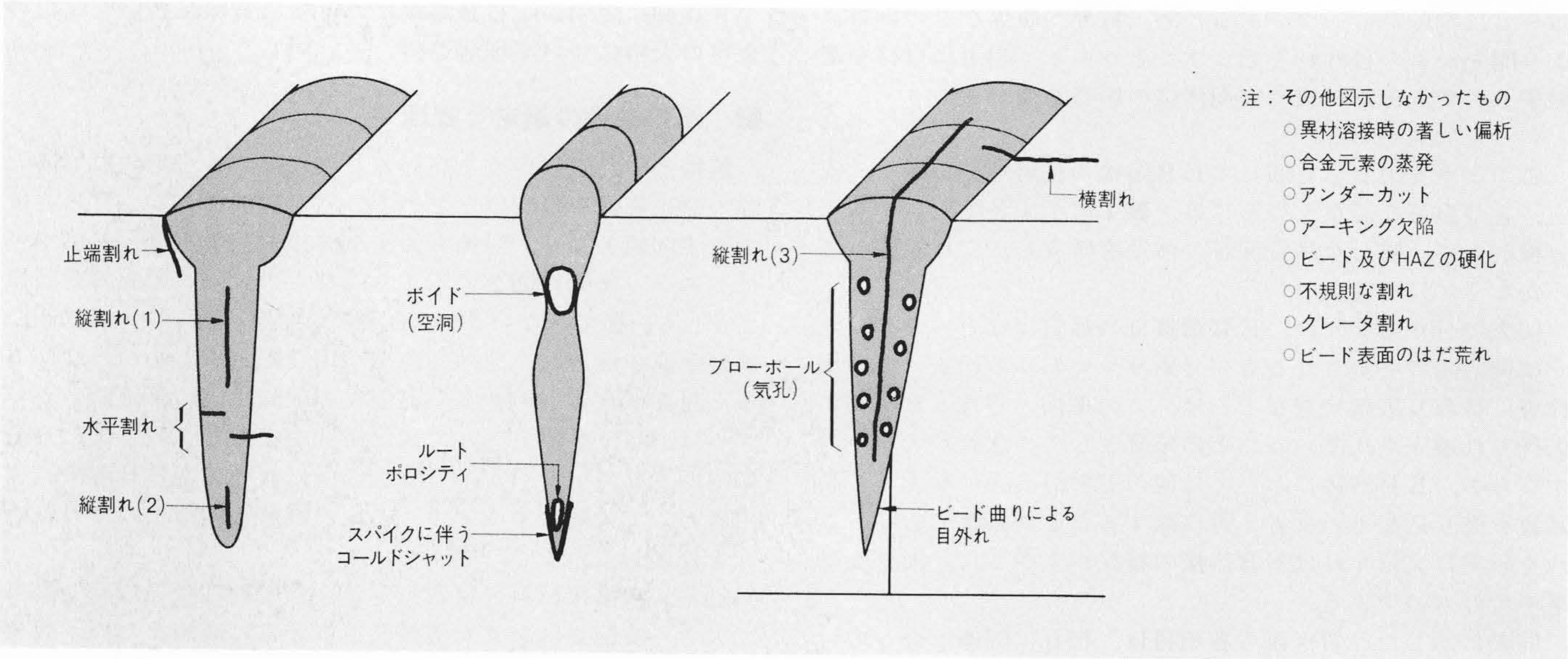


図2 EB溶接において対策を要する溶接欠陥 電子ビーム溶接において問題とされている欠陥を模式的に示す。これらの欠陥が常に、あるいは同時に生ずるのではないが、事前検討の重要性を示すものである。

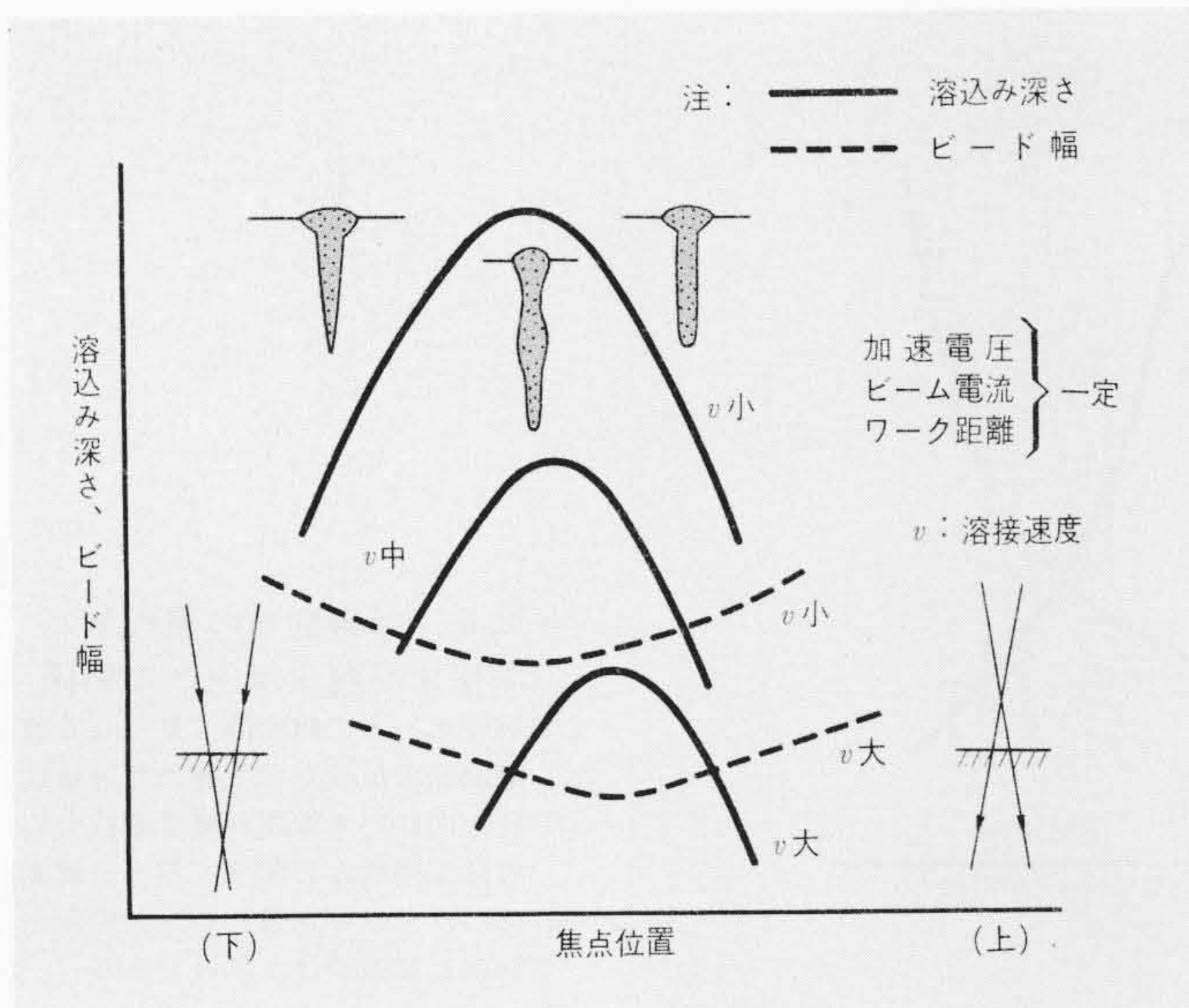


図3 ビーム焦点位置と溶込み深さ及びビード幅との関係 電子ビームの焦点位置及び速度が、溶込み深さ、ビード幅、及び溶込み形状に及ぼす影響を模式的に示す。一般のアーカ溶接にない焦点位置の大きな影響が分かる。

れる程度が大きいほど、大きな欠陥が生ずる。すなわち、最も凝固が遅れたものは大きなボイドとなり、その次のものは水平断面においてあたかもスポット溶接のナゲットのような凝固形態を示し、ここに縦割れが生ずること、この傾向がビームの焦点位置で大きく左右されるビードの形状と速度とによって支配されていることが分かる。

なお縦割れの先端部付近をElectron Probe Micro Analyzer (EPMA) によって調査したところ、多くの場合Cr, Mn, Sが検出された。このほかにも多くの事例から、割れなどの溶接欠陥の発生には溶接条件のほかに材料の合金成分、及び不純物元素が密接に関与していることが分かっている。従って、溶接材料(主材料及び副材料)の成分の規定と一様性

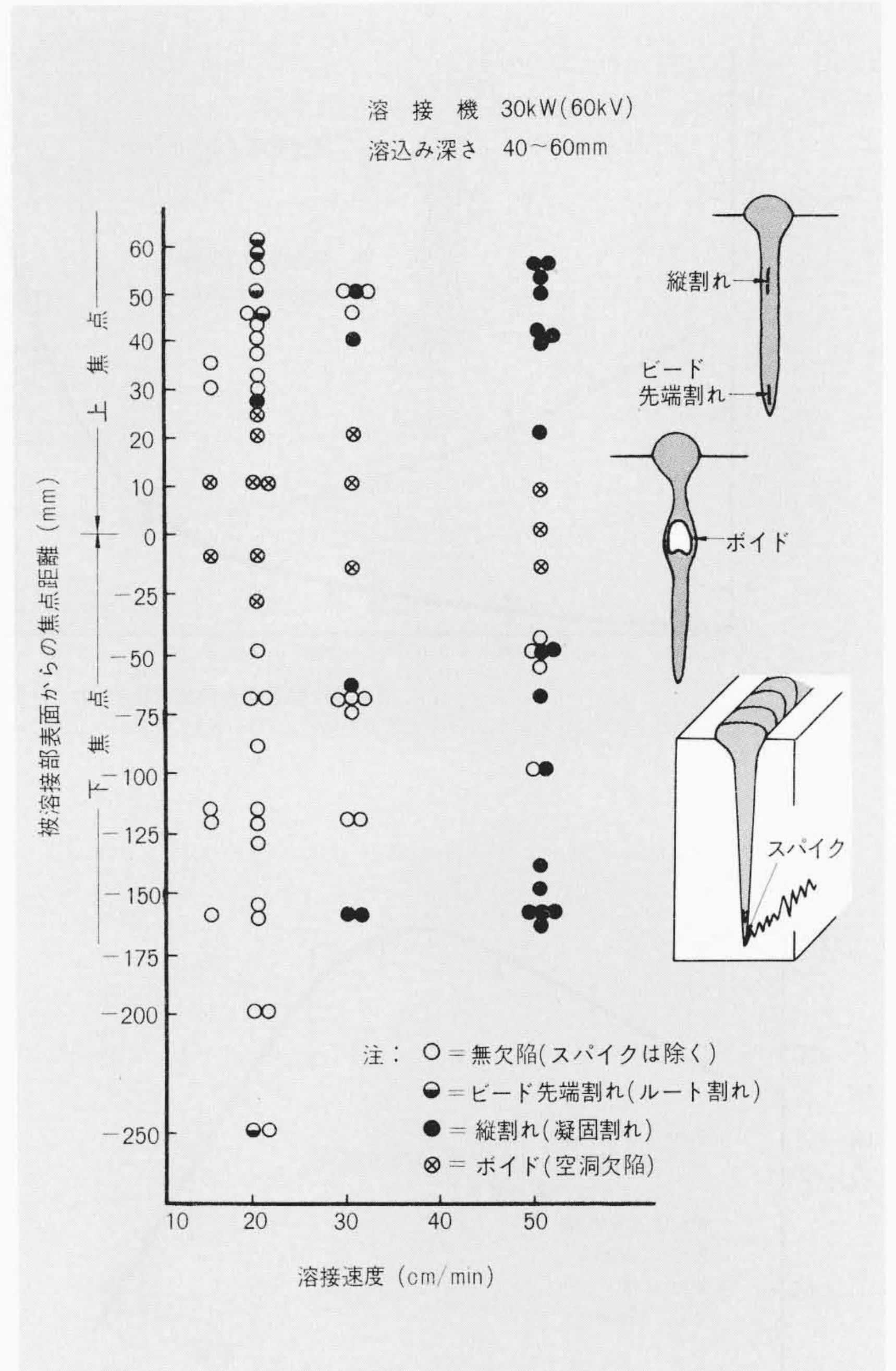
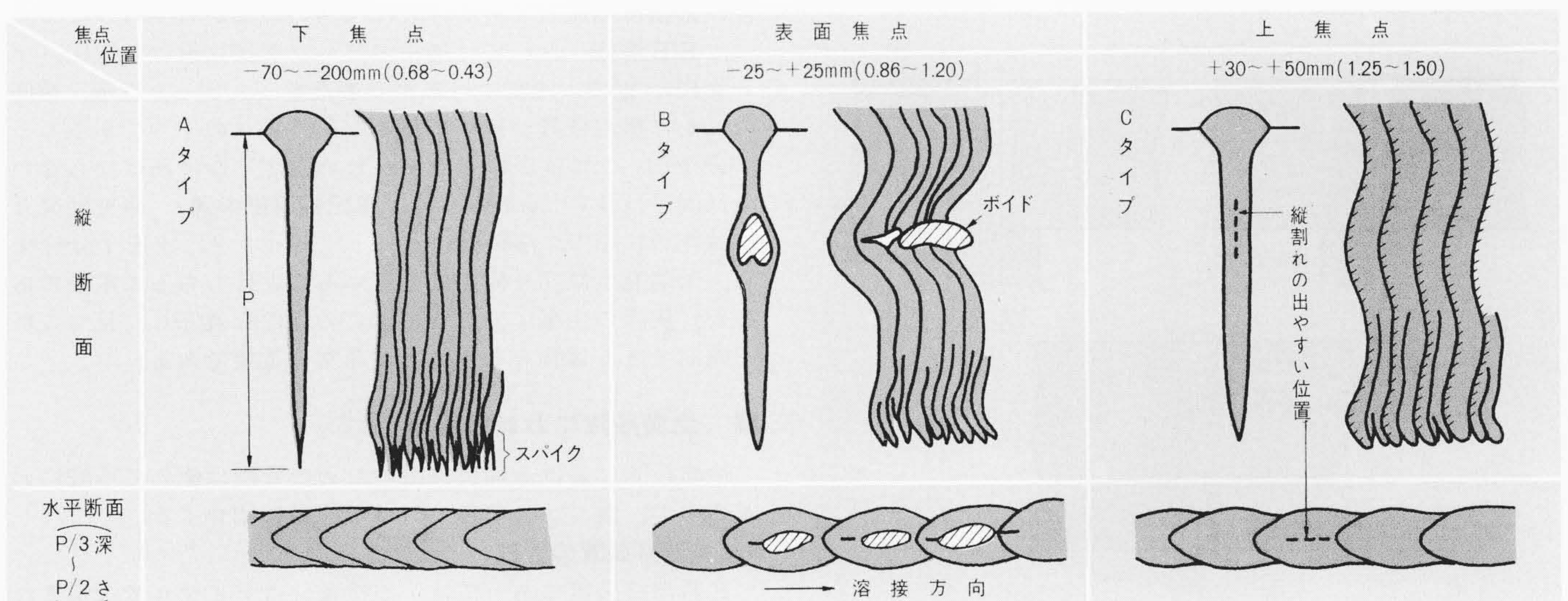


図4 ビーム焦点位置及び溶接速度と縦割れ発生傾向との関係 Cr—Mo鋼の深溶込み溶接において電子ビームの焦点位置、及び溶接速度が縦割れなどの欠陥発生に与える影響を示す。低溶接速度下焦点側で縦割れは出にくい。



注：()内は荒田らの提案した a_b 値⁽⁴⁾

図5 焦点位置と凝固パターンとの関係(溶接速度=20cm/min) 溶接ビードの縦断面及び水平断面に見られる凝固のパターンと電子ビームの焦点位置との関係を示す。焦点の位置により凝固の進展と欠陥の発生状況に大きな変化を生ずる様子が分かる。

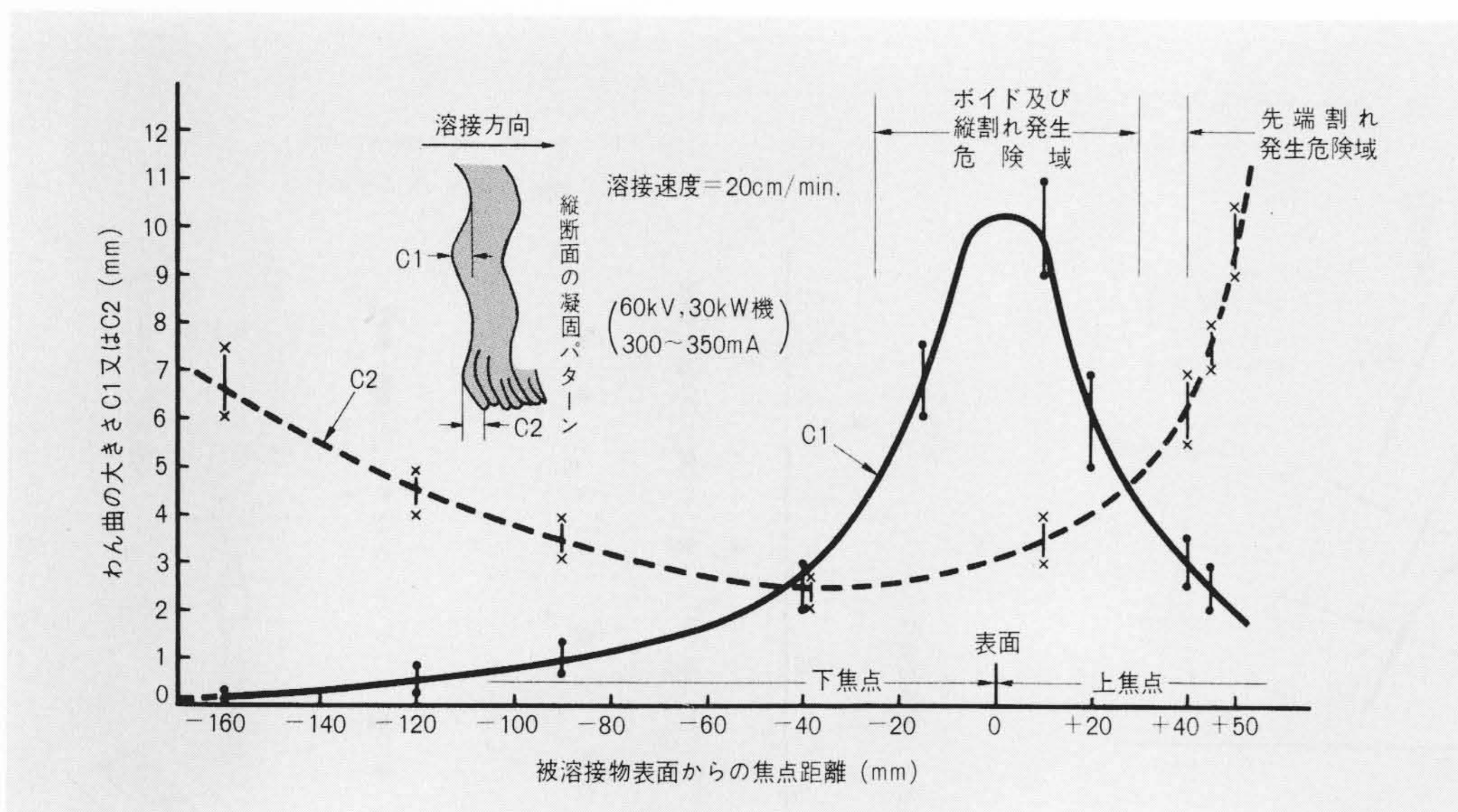


図6 等凝固面の遅れ量と溶接欠陥発生傾向との関係
溶接ビードの縦断面に見られる等凝固面の位置を示す線の、溶接進行方向に対する遅れ量と溶接欠陥の発生傾向との関係を示す。凝固のパターンを定量化し、欠陥発生傾向と関連づける試みである。

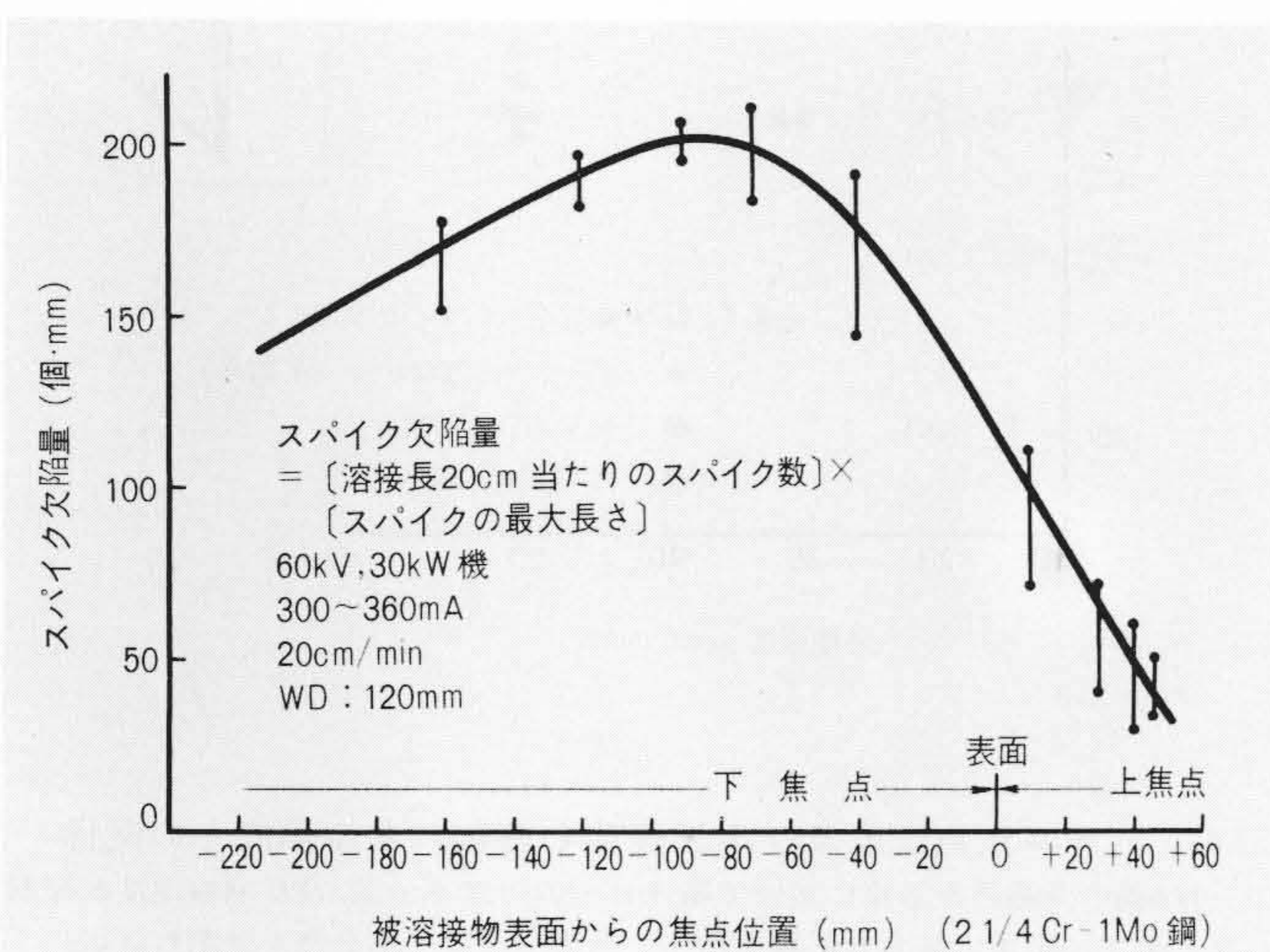


図7 ビーム焦点位置とスパイク発生傾向との関係 スパイク欠陥の定量化の試みの一例を示す。この表現によれば、くさび形ビードの所が最もスパイクが多いという実用上の問題を生ずる。

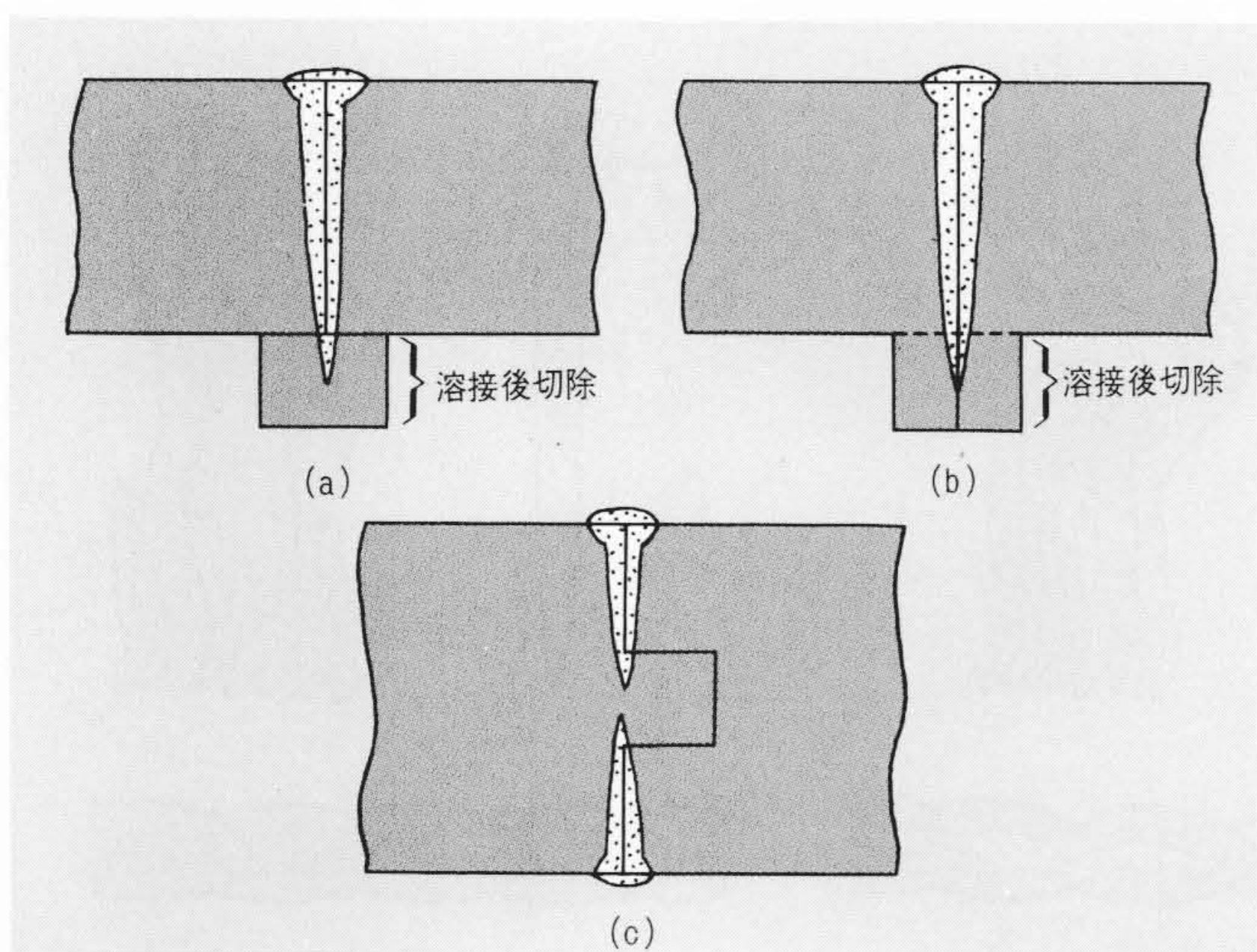


図8 構造及び強度設計によるスパイク対策の例 スパイク欠陥の残留防止、あるいは影響軽減のため採用されている対策例を示す。(a), (b)はスパイク部の完全除去、(c)はスパイク発生部に応力を受け持たせない対策である。

の管理も品質保証上非常に重要である。

3.4 ビード形状とスパイク発生傾向との関係

スパイクを量的に表現するため、その深さと回数との積を一つの尺度とし、これとビード形状を支配する因子であるビームの焦点位置とを対比した。図7にその結果を示す。同図を前出のデータと比較することにより明らかなように、溶込みが深くビード幅の狭い条件においてスパイクは顕著であり、下焦点、すなわち、くさび形ビードではスパイクはかえって増加している。従って、溶接条件によるスパイク防止と縦割れ防止とはある程度相反する関係にある。この対策については逐次検討する予定であるが、学界において目下盛んに研究されているスパイク生成現象と結び付く、かなり高レベルの問題である⁽²⁾⁽⁸⁾。さしあたり日立製作所では、割れ発生防止に重点をおき、スパイクには構造設計・強度設計的に対処する方法を採用している。図8にEB溶接の業界において採用されている対策の一例を示す。

3.5 溶接条件の管理

上記したように、溶接条件はEB溶接欠陥の発生傾向と非常に密接に関連している。3.1～3.4の説明から明らかなように、EB溶接においては通常のアーク溶接における電圧（アーク長）、電流、速度に対応する加速電圧、ビーム電流、速度のほかに焦点位置が極めて重要な条件因子の一つであることが分かる。このほかにもあらかじめ設定しなければならない条件因子は多い（後出の溶接作業記録用紙参照）。研究開発及び試作の段階で、溶接機にセットするパラメータを十分吟味し、欠陥発生傾向を極小にとどめることはもちろん重要であるが、実際の生産に当たってはこの条件を遵守し、且つこれを確認できる体制をとることが非常に重要である。

4 生産段階における管理

生産段階における品質保証のための管理は極めて多岐にわたるので、幾つかの項目について簡単に紹介する。

4.1 溶接装置の管理

EB溶接装置にあっては、溶接条件はダイヤルで設定されるのが普通であるが、このダイヤル設定値と真の値との関係が、常に一定に保たれていることが重要である。装置が安定に稼動し、EB溶接の長所である再現性の高い溶接部を得るためには、管理点検項目を定め日・週・月及び年ごとの点検

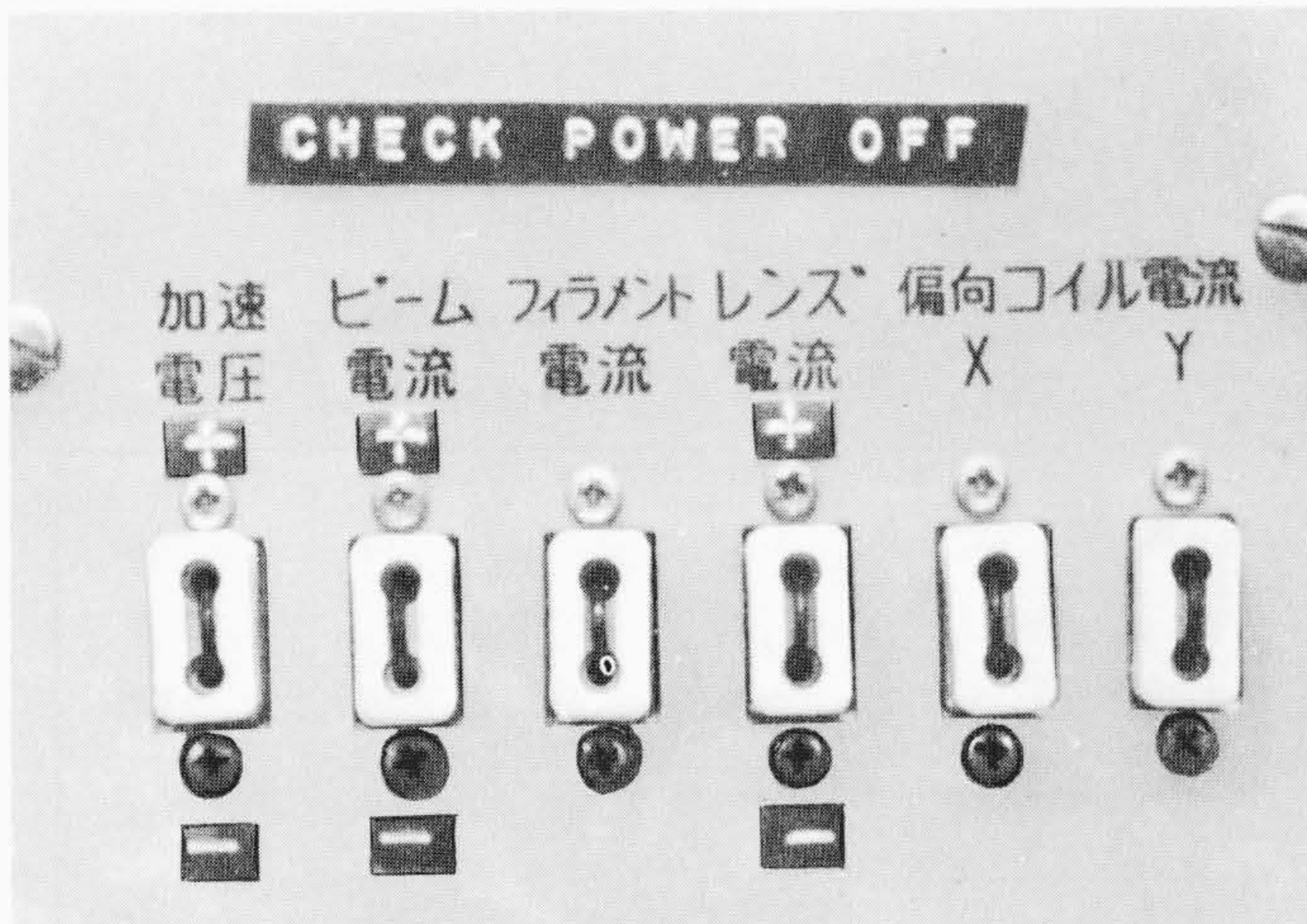


図9 メータ更正用端子の実例 電子ビーム溶接装置に設けられたメータ更正用端子の実例を示す。装置の定期的保守管理を容易にするので設置しておくことが望ましい。この端子を溶接条件記録用レコーダに接続してもよい。

を確実にしない、不良箇所は直ちに修復する必要がある。装置の管理を容易にするために、メータなどの更正用端子を作っておくことが望ましい。図9にその実例を示す。なお、この端子を利用して溶接条件をレコーダなどに記録することもできる。更に装置の異常を早期に発見し、ダウンタイムを最小限度に抑えるには、日常の溶接技能者(オペレータ)の訓練が重要である。オペレータにストップウォッチを七つ道具の一つとして常に携帯させ、製品、あるいは電子銃の移動速度を習慣的に確認させることもその一項目である。

4.2 作業条件の確認と記録

量産品にあっては、装置の作動状況をすべて自動的に点検監視し、又は記録することも経済的に可能であるが、一品生産の体制においては、作業条件を確実に確認し記録する(必要があればその都度、重要製品においては溶接作業ごとにレコーダなどに記録する)ことが重要である。図10に日立製作所で実用している作業記録用紙の一例を示す。(a)は作業の全容を見る記録用紙で、(b)はビード1本ごとの記録用紙であり、(a)の後に(b)を添付して1セットの記録となる。

溶接諸条件を決定し、作業規格を作り上げることは、溶接エンジニアの仕事であるが、条件を確認し、作業記録を正確に記入作成することはオペレータの大切な仕事であり、これを確認し訓練のうえ習慣づけさせることは現場監督者の重要な責務である。

4.3 材料の確認

あらかじめ決定された規格内の一様な材料が、確実に流れるようにするのは溶接エンジニア、及び工程品質管理担当者の当然、且つ重要な仕事であるが、オペレータを十分訓練して、前工程などにおける万一のミスをも未然に発見することも忘れてはならない。準備側で、規格に従って十分洗浄脱磁した規定寸法材質の被溶接材を渡すことは当然のことであるが、受入れ側(E B溶接実施側)においても表面状態、寸法精度、着磁の有無などを再確認し、疑わしいものはE B溶接を施工してはならない。

4.4 オペレータの教育

溶接エンジニアについては、全社的レベルの教育計画の一環として組織的な教育を行なっているが、オペレータについては装置の稼働台数の関係もあり、ケースバイケースのトレーニングを行なってきた(将来、日立技能研修所において組織

的教育育成計画が実施に移される予定である)。通常のアーク溶接に比べ、E B溶接におけるオペレータの訓練は、ややニュアンスが異なる。E B溶接においては、研究開発、試作などの段階で決定された条件を自動化された装置にセットして溶接するので、アーク溶接におけるような訓練を要しないと思われるが、しかし、一般にE B溶接は速度が速く、溶込みが深く、ビード幅は細く、更に溶接現象が複雑でしかも観察しにくい。従って、一度溶接がスタートすれば途中で修正を施すことはなかなか困難である。また、フィラメントの取付け及び電子銃の保守点検程度などが溶接結果に影響する。更に忘れてならないことは、E B溶接機は通常のアーク溶接とは比較にならぬ高電圧発生装置であり、溶接時にはX線の発生を伴うという安全上の問題がある。また、真空装置としての機能をもっていることも忘れてはならない。このようにアーク溶接に比べ、複雑でデリケートな装置を駆使し、高品質を作り込んでいく体系の中で仕事を進めるには、オペレータに対して次のような資質、又はトレーニングが要求される。

- (1) 基本動作を正確に覚え込み、忠実に実行する能力
- (2) E B溶接の基本原理、長所・短所、装置各部の構造、動作などを理解する能力
- (3) 綿密で、再確認を忘れない注意力
- (4) 装置の動作に常に注意し、小さな異常でも敏感にキャッチする能力
- (5) 被溶接物の小さな異常やミスでも敏感にキャッチする能力
- (6) 被溶接物の水平出し、垂直(角度)出し、ビームの開先線合せ、フィラメント取付状況確認など細かい測定調整作業を速く正確に行なう能力
- (7) 溶接状況を注意深く観察し、小さな異常をも見のがさない観察力
- (8) ビード外観を観察し、不良を早期に発見する能力
- (9) データを正確に記録し、要点を正しく記憶する能力
- (10) 補助者、見習者に対する的確な指示を与えられる能力

我々の経験によれば、ある程度以上のレベルの素質をもっているE B溶接の新人を教育し、装置の原理と操作を一通りマスターさせるには約3ヶ月、おおむね一人前のオペレータになるには約2年を要する。更に忘れてならないことは、オペレータの安全教育であり、教育期間中に高電圧、X線及び真空に関する安全について基本を確実に体得させておかねばならない。なお現在のところ、E B溶接オペレータの公的格付けは種々の問題があるため、実施されておらず、各社各職場の判断に任されているが、将来、装置の普及とともにまず社内的に、次いで公的格付けを検討する気運が盛り上がってくるものと思われる。

5 結 言

以上説明した代表例のほかに、管理あるいは実施しなければならない項目は少なくない。またE B溶接の現象については、研究中のものが多く学問的にすべて解明されているわけではない。しかし、実際の生産においては高品質を作り込む精神に徹し、上述したような事前準備対策と管理とを確実にに行なうことによりE B溶接部の品質を保証することができる。そして、いわゆる検査の段階で行なわれる非破壊検査、抜取り破壊検査は、これら事前の準備対策と管理とが確実にに行なわれているかどうか、万一の予測しにくい欠陥が生じていないかどうかを確認することにその意味がある。将来は

データシート番号

()

製品名	材 質	
形 状		
寸 法		
溶接箇所		
履 歴		
組 成		
溶接上のポイント		
前・後処理	クリーニング 予熱 後熱	
溶接条件	溶 接 機	フィラメントの形状
	電 子 銃	バービアンス [(−)(+)の間隔]
	加 速 電 圧	治 具
	ビーム電流	
	溶 接 速 度	
	ワーク距離	
	焦点位置 (レンズ電流)	備 考
	バイアス電圧 (フィラメント電流)	
	排 気 時 間	Torrまで 分
	溶接ふんい気	高真空,低真空,大気 その他 ()
偏 向	波形: 振 幅: 天候: 気温: °C,湿度: % 方向: サイクル: 溶接日時: オペレータ:	
パルス	波形: サイクル: 溶接日時: オペレータ:	
溶接結果, その他		

ビード番号				
加 速 電 圧	(kV)			
ビーム電流	(mA)			
フィラメント電流	(A)			
フィラメント時間	(min)			
溶 接 速 度	(m/min)			
	(ダイヤル)			
	(s/mm)	/	/	/
集束ダイヤル				
ワーク距離 (mm)				
電子銃タイプ				
フィラメント突出し量 (mm)				
他の条件:				
(ex)				
ビーム偏向(波形,位相角,Hz,出力,振幅,DC偏向など)				
材質メモ				
記 事:				
(ex)				
溶接の状況				
ビード幅				
溶込み深さ				

データシート番号: 作業者名: p. /

図10 電子ビーム溶接作業記録用紙(a), (b) 日立製作所で実用化している電子ビーム溶接作業記録用紙の例を示す。(a), (b)2つのフォームで一式となる。品質保証体系の重要な一環である。

Acoustic Emission (AE) が有力な非破壊検査手段の一つになり得る可能性が予測されるが、当面はX線検査、超音波検査及び外観検査が重要である。溶接部からの反射電子ビーム電流、あるいは貫通ビーム電流を測定し、これを品質管理にフィードバックする装置も考案されている⁽⁹⁾が、まだテストの段階で広く普及しているとは言えないようである。

終わりに、日立製作所のEB溶接技術の発展に多くの有益な御教示をいただいた大阪大学溶接工学研究所荒田吉明教授及び松田福久助教授、並びに御協力いただいた関係各社に対し感謝の意を表わす次第である。

参考文献

(1) 国際溶接学会(IIW)1973年年次大会におけるB.E.バトン教授講演“Prospects of welding development”予稿より

(2) G.L.Mara et al: “Penetration mechanisms of electron beam welding and the spiking phenomenon”, Weld. J. 53, 6, 246s (1974) X線ピンホールカメラによりスパイク生成現象を観察した。

(3) 荒田ほか: 「電子ビーム溶接部における溶融金属の動的挙動に関する二, 三の研究」溶接学会電子ビーム溶接研究委員会資料 EBW-83-73 (1973)

(4) 荒田ほか: 「電子ビーム溶接におけるポーロシティの治金的考察について」溶接学会電子ビーム溶接研究委員会資料 EBW-97-73 (1973)

(5) 渡辺ほか: 「電子ビーム溶接の欠陥発生および防止に関する研究(第1報)」溶接学会誌 43, 7, 678 (昭49-7) 炭素鋼のEB溶接部に発生するブローホールの発生傾向と防止対策について述べた。

(6) 渡辺ほか: 「電子ビーム溶接の欠陥発生および防止に関する研究(第2報)」溶接学会誌 44, 2, 121 (昭50-2) 異種金属の電子ビーム溶接におけるビームの曲りの原因を究明した。

(7) 渡辺ほか: 「厚板電子ビーム溶接部の欠陥発生に及ぼす溶接因子の影響」溶接学会電子ビーム溶接研究委員会資料 EBW-121-74 (1974) 縦割れ発生傾向と溶接因子との関係につき述べ、原因説明のため仮説を提案した。

(8) T.P.O'brien et al: “Suppression of spiking in partial penetration EB Welding with feedback control”, Weld. J. 53, 8, 332s (1974) 高電圧回路に溶込みの信号をフィードバックし、スパイクの生成を抑制した。

(9) M.Boncoeur: “Use of secondary, thermal, and backscattered electrons in the electron beam welding process”, Record of 10th Symposium on Electron, Ion, and Laser Beam Technology, (L. Marton, ed.) IEEE (1969)

84