

氏 名	なが い ひろ よし 永 井 裕 善
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和51年10月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最 終 学 歴	昭和43年3月 東北大学工学部金属材料工学科卒業
学 位 論 文 題 目	電子ビーム溶接における適正溶接条件に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 小林 卓郎 東北大学教授 金子 秀夫 東北大学教授 大平 五郎 東北大学助教授 桑名 武

論 文 内 容 要 旨

電子ビーム溶接は1957年仏国のJ. A. ストール (Stohr) によって電子ビーム溶接技術についての最初の発表がなされて以来、その熱源としての優位性と高い可能性が認識されるにつれ、原子力、航空機、自動車工業などを中心に一般業界にも浸透してきた。しかしその実用化の現状をみるに電子ビーム溶接を実製品に適用する際の溶込み深さ、ビート幅、ビートの溶込み形状および溶接欠陥等を考慮した基本的な溶接条件の選定ひとつを例にとってみても装置を運転する溶接技術者の経験的要素に基づいている面が多く、これといて定められた方法は未だ確立されていない。これは電子ビーム溶接の場合、従来の溶接法にない焦点位置(ビームの焦点を結ばせる位置: 収束コイルの中心から焦点までの距離)および対物距離(収束コイルの中心から被溶接物までの距離)という溶接入力に関係なく、それでいて溶込み挙動に大きな影響を与える因子が含

まれていることが多分に原因しており、これら因子の取扱いのむづかしさが電子ビーム溶接技術
を発展させてゆく上でのひとつの障害物にもなっていた。

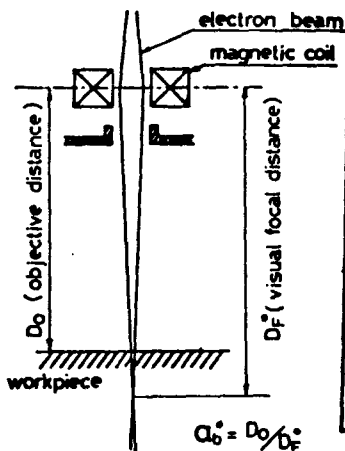
そこで著者はこれらの問題点を解決し、本溶接法の実用化を促進すべく、上述の因子をまとめ
た α_b 値 (Active Beam Parameter : 対物距離 / 焦点距離) という概念とそれを用いた溶接
条件の設定に関する種々の提案をおこない、その有用性を確かめることによって適正溶接条件設
定法の一般化とそれに基づく電子ビーム溶接適用技術の確立を図った。本論文はこれらの結果を
とりまとめたものである。以下にその概略を述べる。

第 1 章 緒 論

まず第 1 章では電子ビーム溶接の現状を述べ、将来の方向としてデルファイ (Delphi) 法と
いう未来予測の 1 手法を用いて本溶接法の今後の発展傾向ならびに動向をさぐり、今後さらにそ
の必要性が高まることを予測すると同時にその実用化段階での問題点に対処しての本研究の位置
づけをおこなった。

第 2 章 電子ビーム溶接の溶込み深さにおよぼす溶接因子の影響

本章では従来おこなわれているタングステンターゲットの輝度観察による焦点位置の設定法を
用いて電子ビーム溶接の溶込み深さにおよぼす溶接因子の影響を確認した。その結果溶込み深さ
は加速電圧およびビーム電流の増加、溶接速度の減少にともない増加し、真空度の減少 (特に
 10^{-2} Torr から 10^{-1} Torr にかけて) にともない減少する。同一溶接入力では加速電圧およ
び溶接速度が大きい程効果的な深溶込み溶接が可能であった。また焦点位置と対物距離は溶込み
深さに大きな影響を与えるが、その影響は図 1 に示すように α_b^* 値 (対物距離 / 視焦点距離) と
いう因子で整理され、 $\alpha_b^* = 0.7 \sim 0.8$ で最大の溶込み深さを示し、この値から外れるに従って
溶込み深さも減ることがわかった。



welding condition	objective distance
accelerating voltage : 150Kv	○ : 125 mm
	● : 175 mm
beam current : 30 mA	◇ : 225 mm
	◆ : 275 mm
welding speed : 500 mm/min	△ : 325 mm
	▲ : 375 mm

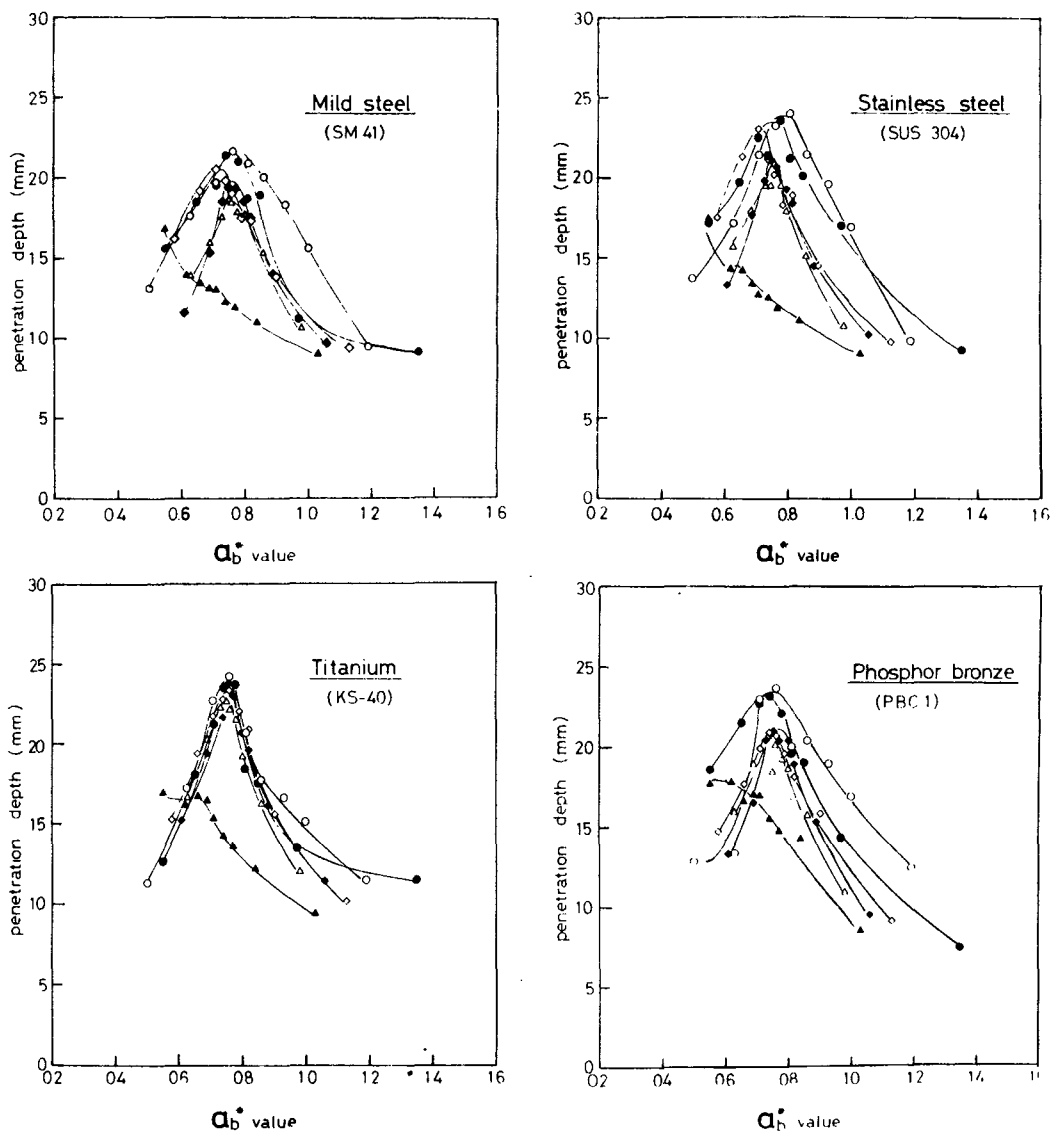


図1 溶込み深さと α_b^* 値 (対物距離: D_o / 視焦点距離: D_F^*) の関係

第3章 電子ビーム溶接用高出力密度ビーム形状の決定について

本章では実際の溶接に使用される高出力密度ビームの形状（ビーム径の連続的変化およびビーム焦点の位置）を求める方法として図2で示すような“エッジ効果”を利用したビーム形状測定法を提案し、その有用性を確かめることにより従来問題になっていた小出力ビームを用いた計測方法による欠点を補なうと同時に第2章で述べた今までの焦点位置の設定法では図3にみられるように焦点位置が実際のものとは異なってくることを明らかにし、溶接に有効な高出力ビームでの真の焦点位置の設定を可能にした。これにより従来のタングステンターゲットの輝度観察による焦点位置設定法には問題があり、電子ビーム溶接前のビーム形状の点検には本提案方法が適当であることが明らかになった。すなわち本実験結果より実際の溶接で使われる高出力ビームの形状、焦点位置および出力密度を明確に測定することができ、これによって第2章で述べた溶込み深さは $\alpha_b^* = 0.7 \sim 0.8$ で最大を示すという現象も真の焦点位置を用いた α_b 値（対物距離／

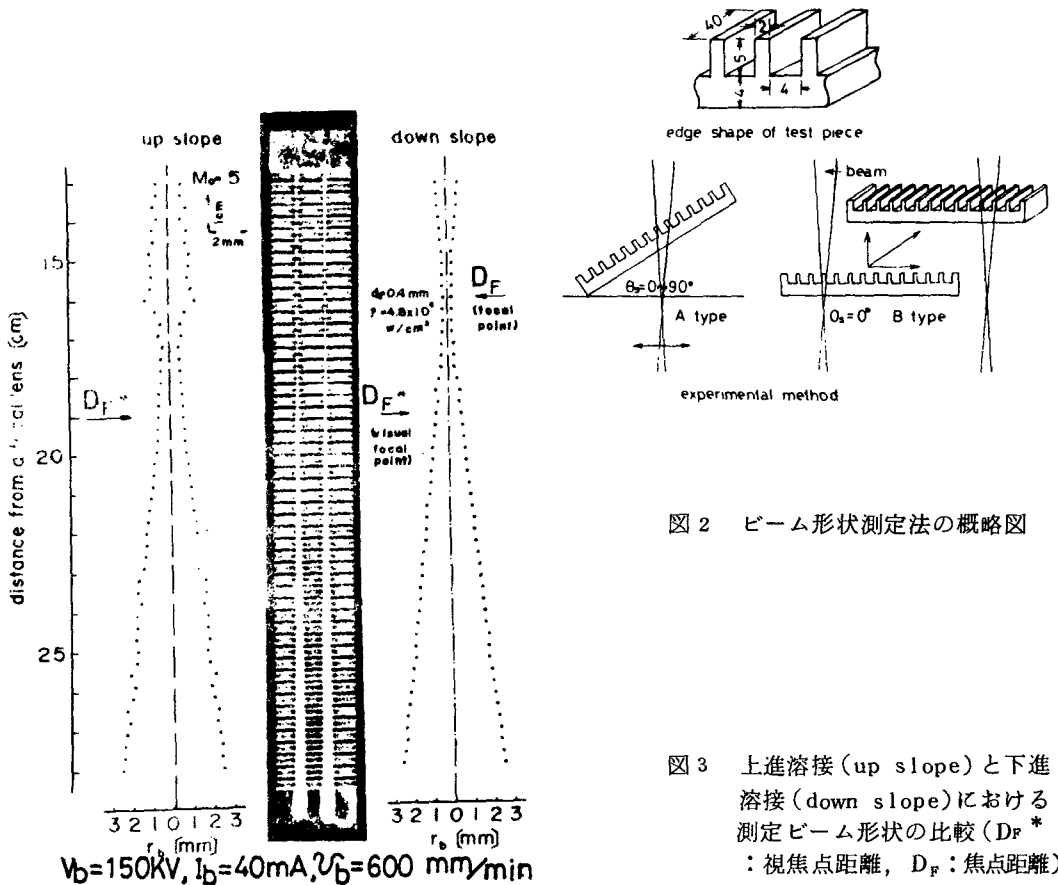


図2 ビーム形状測定法の概略図

図3 上進溶接 (up slope) と下進溶接 (down slope) における測定ビーム形状の比較 (D_F^* : 視焦点距離, D_F : 焦点距離)

焦点距離)であらわすと、 $\alpha_b = 0.9 \sim 1.0$ となり、そのビーム径と出力密度の関係から最大溶込みの現象は容易に説明でき、さらに従来実測されながら説明のつかなかった真空度と溶込み深さの関係も適確に説明できた。また、そのビーム形状測定用試験片としては、オーステナイト系ステンレス鋼のような熱伝導度が悪く、湯流れのよいものが適当であり、銅、アルミニウムのような熱伝導度のよいもの、あるいは7075 Al合金のような蒸気圧の高い元素を多量に含んだ蒸発現象の著しい材料の場合は適正なビーム形状を得るための溶接条件範囲が狭まることがわかった。各種材料における実効ビーム形状の測定結果を図4に示す。

第4章 電子ビーム溶接における適正溶接条件の選定法について

本章では適正溶接条件の選定について斜面溶接法を提案し、本方法を使うことにより焦点位置と対物距離の変化(すなわち α_b 値の変化)を連続的に捕えることが可能であるのみならず、数少ない試験片で溶込み深さ、ビード幅、溶込み形状および溶接欠陥など、総合的な判断に基づく

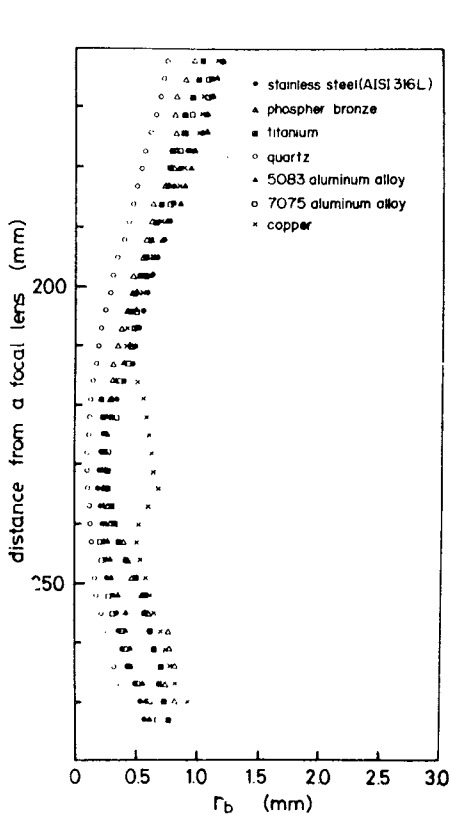


図4 各種材料における実効ビーム形状の測定結果 ($D_p^* = 300mm$)

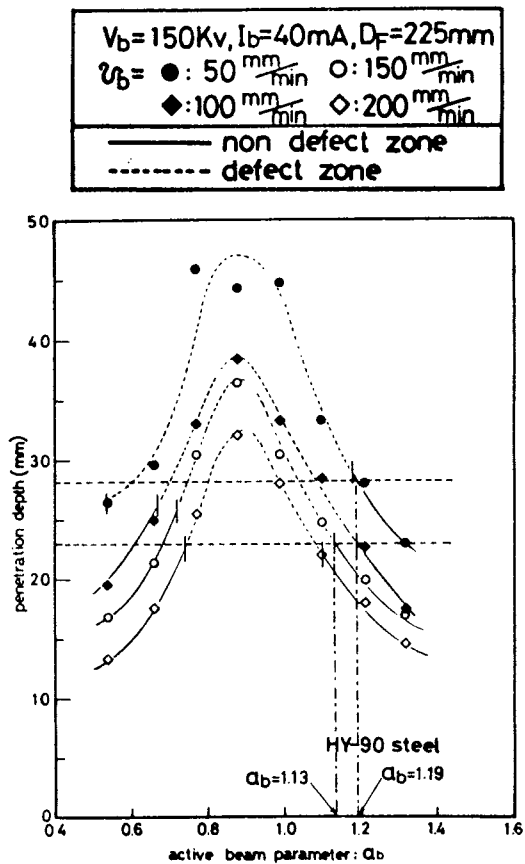


図5 適正 α_b 値の選定

適正溶接条件の選定を可能にした。本実験結果より溶接欠陥は $a_b = 1$ を中心に発生し、その頻度も大きくなることがわかった。また適正溶接条件の範囲は図5でみられるように目的とする溶込み深さに対し、 $a_b > 1$ と $a_b < 1$ の2領域に存在するが、溶込みビード先端の形状をみるに $a_b > 1$ の井戸形 (well 形) の方が $a_b < 1$ のくさび形 (wedge) に比較し、先端欠陥の誘発および目違いの可能性を考えた場合 $a_b > 1$ で溶接欠陥領域外の範囲が勧められる。本方法により選定した適正溶接条件による平たん突合せ溶接結果を写真1に示す。再現性のある非常に良好な溶接部が得られた。

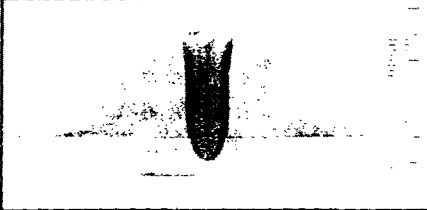
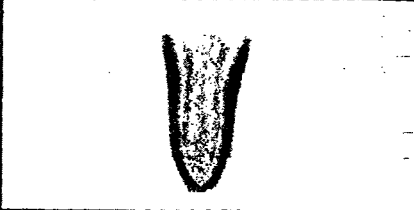
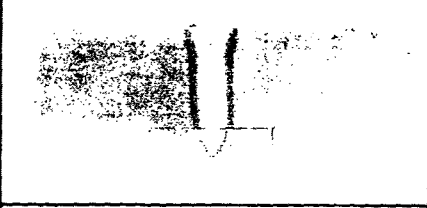
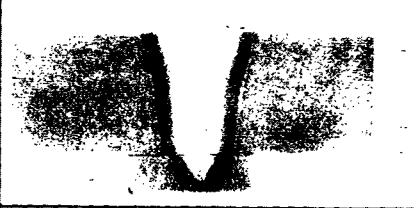
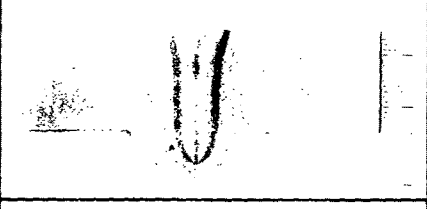

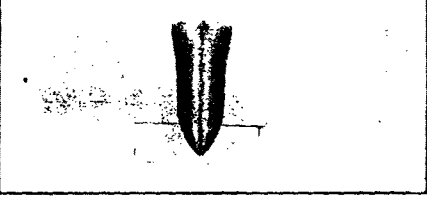
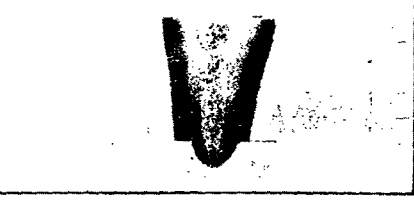
material	plate thickness	
	20 mm	25 mm
HY-90 steel		
HY-130 steel		
HY-180 steel		
9% Ni steel		

写真1 適正条件による溶接継手の断面マクロ写真

第 5 章 電子ビーム溶接における溶込み深さと出力密度の関係

本章では第 3 章で提案したエッチ効果を利用したビーム形状測定法と第 4 章で提案した斜面溶接法を用いて溶込み深さにおよぼすビーム出力密度の影響を求めている。この結果図 6 および図 7 に示すように溶込み深さは出力密度によって整理され、指数函数的関係を示すが、同一出力密度においては加速電圧およびビーム電流の増加に従って増加し、溶接速度には影響されないことがわかった。また溶込み深さは出力密度のみならず試験片表面に作用するビームの形状にも大きく影響されることがわかった。すなわち図 8 に示すように、焦点位置を試験片板表面より下方に設定した under focus の方が試験片板表面より上方に設定した upper focus の場合より同一出力密度においてより効果的な深溶込み溶接が可能であることがわかった。

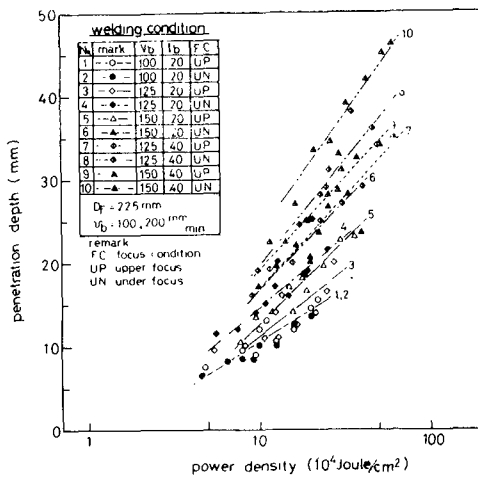


図 6 溶込み深さと出力密度の関係におよぼす加速電圧およびビーム電流の影響 (D_F = 225 mm)

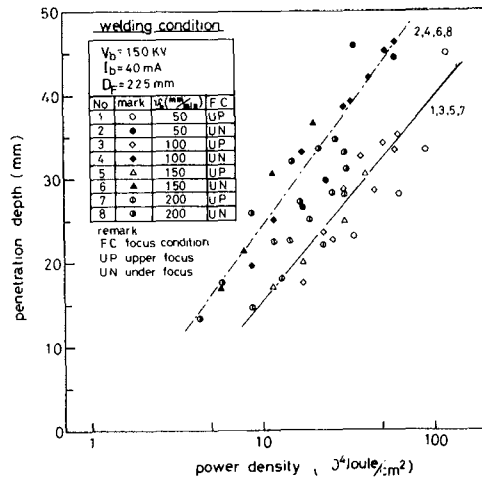


図 7 溶込み深さと出力密度の関係におよぼす溶接速度の影響

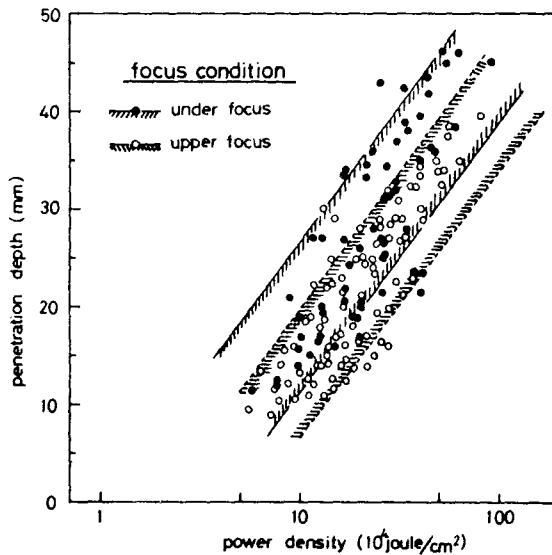


図8 溶込み深さと出力密度の関係
 におよぼす焦点 (upper focus
 または under focus) の影響

第6章 電子ビーム溶接における適正裏波溶接条件範囲の設定

本章では階段状試験片を用いた適正裏波溶接条件の設定法を提案し、適正裏波溶接条件範囲は a_b 値に大きく依存することを明らかにすると同時に本提案の有用性について検討をおこなっている。その結果図9に示すように表面および裏面ともに、良好なビートを持つ裏波溶接範囲は a_b 値に依存し、 a_b 値が $a_b < 1$ から $a_b = 1$ に近づくにつれ大となり $a_b = 1$ から $a_b > 1$ にゆくに従いが減少する。しかしその範囲は表面ビートが主に溶接速度 600 mm/min 以上の領域で得られていたのに対し、裏面ビートは溶接速度 200 mm/min から $1,500 \text{ mm/min}$ の全域にわたって得られた。本方法によって求めた適正裏波溶接条件範囲 (図9の両図を重ねた範囲) を用いて平坦な突合せ溶接をおこなった結果、再現性のある良好な裏波溶接部が得られ、また各種材料についても検討し、同様な結果が得られたところから本提案が電子ビーム溶接の裏波溶接施工に対し、非常に有効な溶接条件設定法になることが確かめられた。

第7章 総括

本章は本研究で得られた知見を総括したものであり、これまでの各章で論考してきた電子ビーム溶接における適正溶接条件設定に関する種々の提案とその有用性の証明ならびにその実験によって明らかにされた諸点を取りまとめたものである。この結果著者の提案した a_b 値があらゆる溶接現象に対し、非常に重要な因子となることが確かめられた。と同時に a_b 値との関係の上に立った種々の適正溶接条件設定に関する提案の有用性が証明され、実用化に際しての基本的な適用技術の確立がなされた。

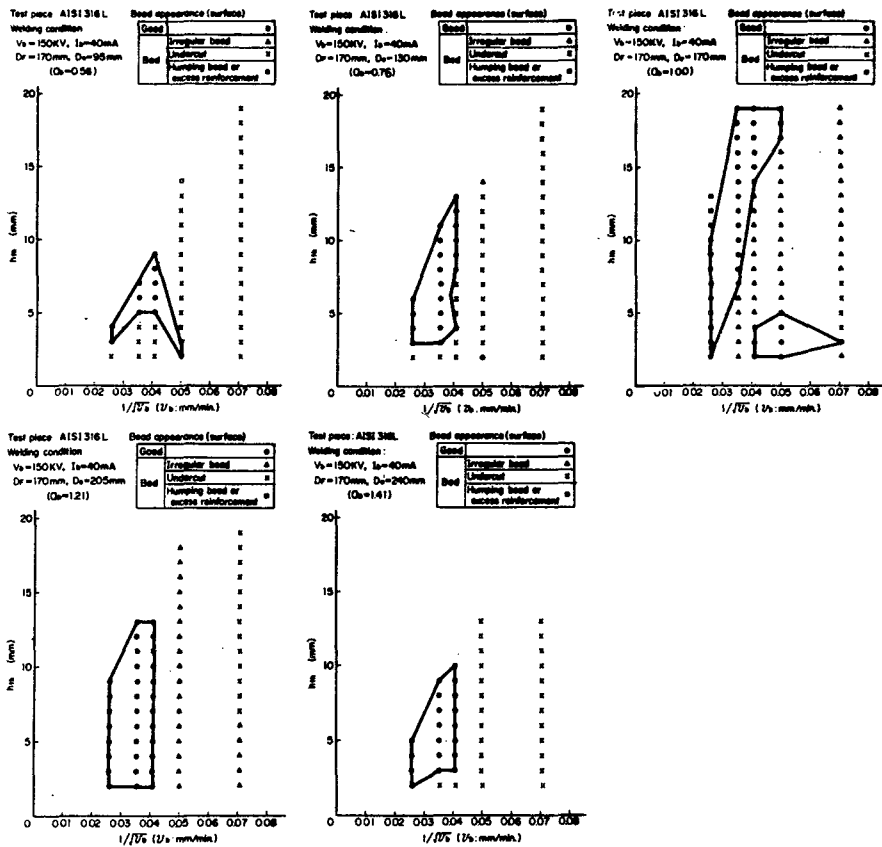


図 9-1 良好な表面ビードを得るための適正溶接条件範囲

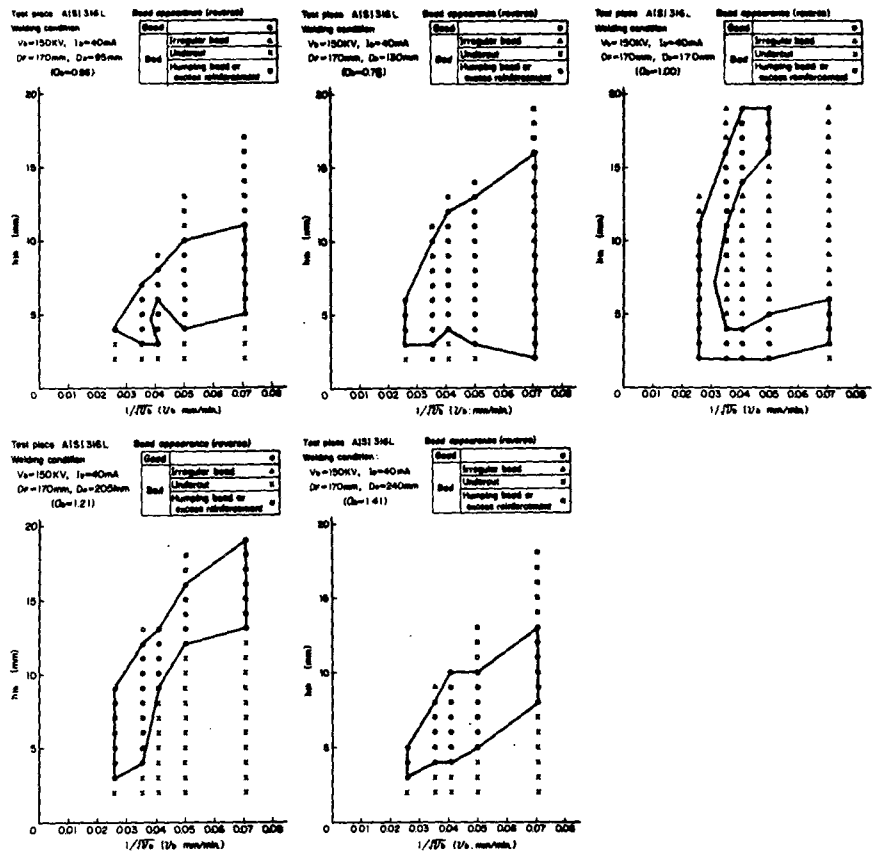


図 9-2 良好な裏面ビードを得るための適正溶接条件範囲

審査結果の要旨

電子ビーム溶接は比較的新しい技術であるが、高い出力密度が得られることなどの特徴が認識され、多くの工業分野に徐々に導入されている。しかし、アーク溶接法、電気抵抗溶接法などに比べると未解決の問題が多く、実際に適用する場合の溶接条件の選定方法を例にとっても未だ確立されているとはいえない。著者はこれらの問題を解決し、本溶接法の実用化を促進するために、溶接に有効な電子ビーム形状の測定方法を提案し、その有用性を確かめると同時にこれを用いて適正条件設定方法の確立を意図した一連の研究を行った。本論文はこれをまとめたもので全篇7章からなる。

第1章は緒論で、電子ビーム溶接技術の発展方向の予測から本研究の位置づけを明確にしている。

第2章では、従来の視焦点位置設定方法を用いて、溶込み深さにおよぼす溶接諸因子の影響を調べ、著者の提案する α_b^* 値（対物距離／視焦点距離）によって溶込み深さが一応よく整理できることを初めて明らかにしている。

第3章は実際の溶接に用いられている高出力密度電子ビームの形状を求めるため、“エッジ”効果をもつ試験片を用いた斜面溶接法を提案したもので、従来の視焦点位置設定方法には問題があり、本提案により求められる真の焦点距離を用いた α_b 値（対物距離／焦点距離）を使用すると、溶込み挙動をよく整理できるし、また明確に説明できることを述べている。

第4章では、溶込み深さ、溶込み形状、溶接欠陥などの総合的な判断に基づいて、部分溶込み溶接の適正条件選定方法を確立し、同時に溶接欠陥発生範囲も α_b 値と密接な関連があることを示している。

第5章では、ビーム形状から出力密度を求め、溶込み深さにおよぼす出力密度の影響を調べ、溶込み深さは出力密度との間に指数函数的関係をもつが、入射ビーム形状にも影響されることなどの興味ある知見を得ている。

第6章では、完全溶込み溶接のための適正溶接条件選定方法を確立し、この場合の適正条件範囲も α_b 値に大きく依存することを明らかにしている。

第7章は総括である。

以上要するに、本論文は、電子ビーム溶接における有効ビーム形状の簡易測定法を提案し、溶込み挙動がすべて α_b 値でよく整理できることを明らかにするとともに、これを用いて適正溶接条件選定方法を確立し、電子ビーム溶接技術に対する明確な指針を与えたもので、金属工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。