

# 電子ビーム溶接における溶接冶金現象

川崎製鉄(株) 技術研究所 安田 功一、矢埜 浩史  
川崎重工業(株) 生産技術開発センター 古賀 信次、犬塚 雅之

Welding Metallurgical Phenomena in Electron Beam Welding

by Koichi Yasuda, Koji Yano, Shinji Koga, Masayuki Inuzuka

キーワード : 電子ビーム溶接、高エネルギー密度、キーホール、溶接欠陥、靱性

Keywords : electron beam welding, high energy density, key hole, weld defect, toughness

## 1. はじめに

電子ビーム溶接法は1957年に仏国のJ.A.Stohrによって開発されて以来、さまざまな産業分野で応用、実用化されてきた。我が国でも、1970年頃から電子ビーム溶接に関わる積極的な研究活動が行われ<sup>1)</sup>、高エネルギー密度深溶け込み溶接、高真空溶接の特徴を活かした品質を要求される産業分野に定着した。

本稿ではこのような電子ビーム溶接の特徴的な溶融、凝固、冷却現象に関わるさまざまな溶接冶金現象を材料科学的な観点から整理し、最近の新たな課題について紹介する。

## 2. 電子ビーム溶接現象

電子ビーム溶接は図1<sup>2)</sup>に示すように、陰極フィラメントから取り出された熱電子を陽極間に印加された数十kVから数百kVの高電圧で加速し、さらに電磁レンズによって収束して被溶接物に照射する。電子ビームは収束位置、すなわち焦点位置では1mmφ程度に絞り込むことが可能であり、そこでのエネルギー密度は $10^8 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$ にも達し、通常のアーク溶接の1万倍以上となる。

このような高エネルギー密度の電子ビームが照射された金属は極めて短時間の溶融、蒸発し、これを繰り返すことによってビーム照射方向にいわゆるキーホールが深く穿孔される。キーホールの周囲では溶融金属が蒸発時の反発力や金属蒸気圧によって保持され、薄い円筒状、あるいは中空円錐状に溶融金属が形成される。したがって、電子ビーム溶接ではこのようなキーホールを溶接線方向に移動させることによって溶接が進行し、図2<sup>3)</sup>に示すように、キーホール前面の溶融金属は孔の側面を通して後方へ移動して溶接金属を形成する。このように電子ビーム溶接はキーホールの形成とその周りの溶融金属の湯流れによって溶接金属が形成される点で熱伝導を主体とするアーク熱源とは大いに異なり、深くて狭い溶融断面形状をもつ独特の溶け込み形状を有することが大きな特徴となる。

電子ビーム溶接のもうひとつの大きな特徴は溶接が真空中で行われることであり、電子ビーム溶接の大きな長所でもあり、同時に最大の短所でもある。これは電子ビームが気体分子に衝突し、散乱することを防止するための必須条件であり、電子銃内では $10^{-2} \text{ Pa}$ 以下、溶接部でも数Pa以下の真空圧力に保つ必要がある。したがって、溶接金属は大気やシールドガスによって汚染、干渉されることなく、高い清浄度を保つことができる一方、被溶接物

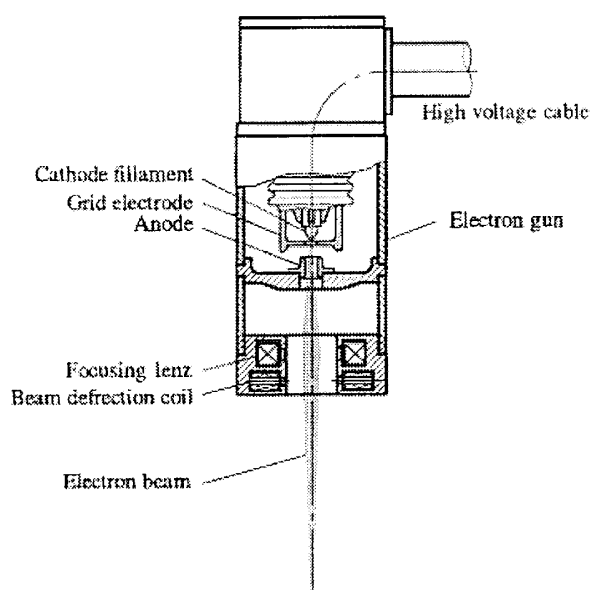


図1 電子ビーム溶接ガンの構造

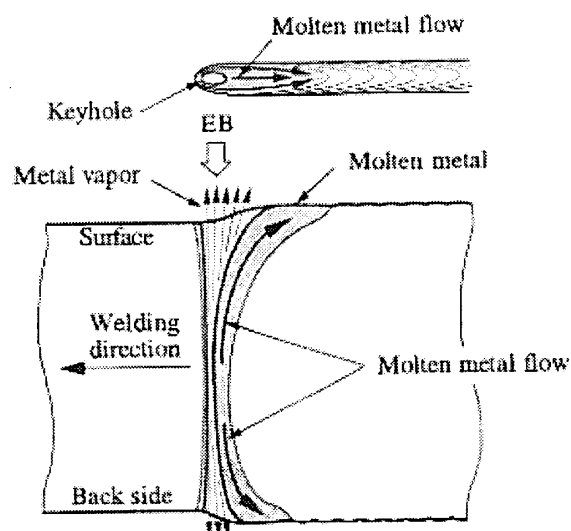


図2 電子ビーム溶接における代表的なキーホール形状と溶融金属の湯流れ

は真空チャンバー内に収めて溶接するため、大掛かりな設備や排気ポンプが必要な上に溶接物の大きさに制限が加わる。

### 3. 電子ビーム溶接における諸欠陥

電子ビーム溶接現象に関連した特徴的な溶接欠陥を図3に模式的に示す。

#### 1) 気孔(ポロシティ)

電子ビーム溶接は真空雰囲気中で溶接されるため、気泡が発生しやすく、また凝固速度が大きいと生成した気泡は外部に逸出する時間的余裕がないため、気孔として残留しやすい。これらの気孔を形成するガスとしては溶融金属内で化学反応

によって生成したガス、たとえばリンド鋼の場合のCOガスや金属蒸気などが挙げられる。特に蒸気圧の高い合金元素を多く含有する場合や $[C] \times [O]$ が大きい場合には注意する必要があるが、COガス起因の場合はフィラーワイヤから脱酸剤を供給するのが有効である。

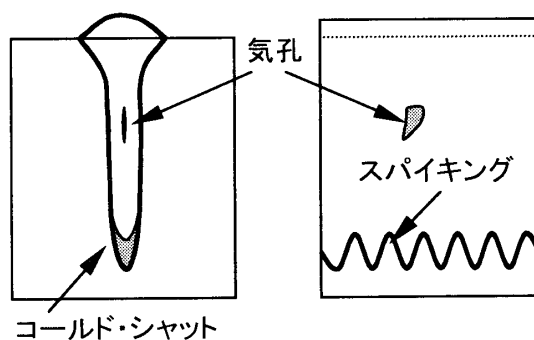


図3 電子ビーム溶接における代表的な溶接欠陥

#### 2) コールド・シャット

キーホールの底部では穿孔と凝固がほぼ同時に進行し、高い蒸気圧のため溶融金属が流れ込めず溶融金属が不足しやすい。したがって穿孔壁は凝固によって渴き、壁面を濡らすことなく溶接が進行することによって、一種の融合不良を形成する。これがコールド・シャットであり、電子ビーム溶接特有の欠陥である。この欠陥は溶接速度を低減して溶融金属を十分に供給することによって回避できる。

### 3)スパイキング

電子ビーム溶接による部分溶け込み溶接では溶け込み底部の形状はスパイク状となる。これが著しい場合には溶け込みが不均一になり、スパイキングと呼ばれる一種の欠陥とみなされる。このスパイク現象はビームのエネルギー密度と密接な関係があり、エネルギー密度の増大により著しくなり、溶接速度とは無関係に毎秒8～10サイクルの頻度で発生する。この欠陥を低減するにはエネルギー密度を低減する以外にビーム孔を広げて安定化させることが重要である。

### 4)凝固割れ

電子ビーム溶接時の凝固界面は常に一定形状ではなく、周期をもった凝固の遅れ現象が板厚方向に進展して溶接金属の凝固が進行する<sup>4)</sup>。したがって、溶融池後方の板厚内部で生じる凝固の遅れ現象が引け巣を生成し、縦割れ状の凝固割れが生じる<sup>5)～8)</sup>。割れは図4に示すように溶接金属中央部の柱状晶会合部であり、その破面は図5に示すように典型的な液化割れの様相を呈している<sup>9)</sup>。

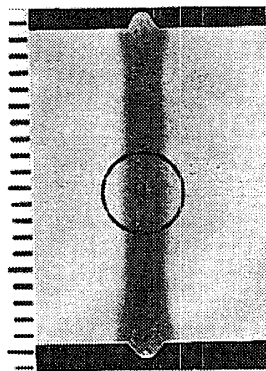


図4 電子ビーム溶接金属に発生した凝固割れ

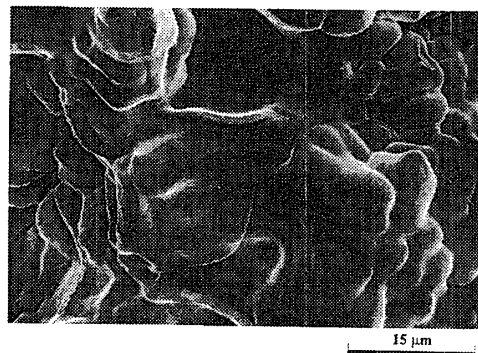


図5 電子ビーム溶接金属の凝固割れ破面

図6にX65 UOE鋼管の電子ビーム溶接における凝固割れ率に及ぼす溶接条件と鋼板のS含有量の影響<sup>9)</sup>を示す。割れ感受性は溶接速度やab値(ビーム活性変数:  $ab = \text{対物距離} / \text{焦点距離}$ )によって影響され、高速溶接、高ab値条件、すなわちアップフォーカス化により割れ感受性は増大する。また、溶接金属中のS含有量の増大も従来のアーク溶接の場合と同様に、電子ビーム溶接においても凝固割れ感受性を著しく高める。逆にSiは溶融金属の粘性や表面張力を低下させ、引け巣防止効果によって割れ発生を抑制する。

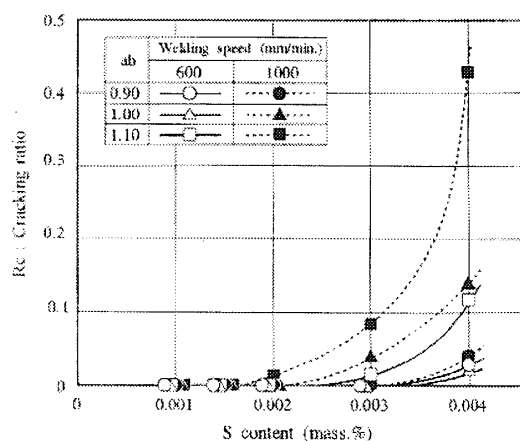


図6 鋼板のS含有量と高温割れ率の関係  
割れ率 = 溶接線方向の割れ長さ/溶接長さ

#### 4. 電子ビーム溶接金属の材質

##### 1) 電子ビーム溶接金属の冷却速度と組織

溶接金属の材質などに関して材料科学的アプローチをする場合、冷却挙動の把握は必須となる。しかしながら、電子ビーム溶接金属では従来のアーク溶接に比べて設備・環境の面で実測が困難である。そのため、板厚中央部での溶接金属の溶け込み幅による推定方法が提案されてきた<sup>10)</sup>が、近年、熱電対による実測が試みられ、図7に示す貫通溶接における冷却熱サイクルが報告されている<sup>3)</sup>。これによると冷却速度は溶接速度の増大によって多少大きくなっているが、その差違はアーク溶接ほどではない。これは高エネルギービームによる貫通溶接特有の現象であり、低速溶接ほどキーホールの開口が安定するために入射ビームのうち孔を素通りして熱に変換されないエネルギーの割合が増加することに起因した現象である。何れにせよ板厚20mmの炭素鋼の貫通溶接では800～500℃までの冷却時間は約5秒であり、例えば図8に示すX70鋼の溶接金属組織は溶接用CCT図<sup>11)</sup>からベイナイト組織を主体としたマルテンサイト組織との混合組織であることが推定できる。

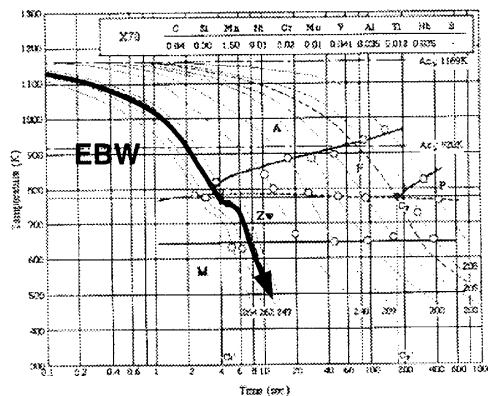
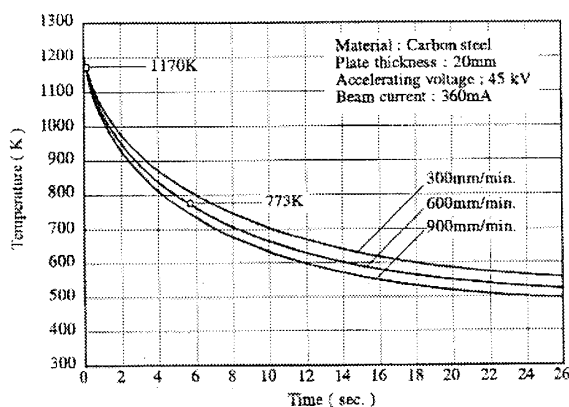


図7 電子ビーム溶接金属の冷却熱サイクル 図8 X70鋼の溶接用CCT図における板厚20mm電子ビーム貫通溶接の推定冷却曲線

このように電子ビーム溶接では従来のアーク溶接に比べて大きいため、焼入れ組織となり硬化する。一般構造用鋼の電子ビーム溶接部硬さの推定式として入熱、溶け込み深さ、炭素当量ファクターを取り込んだ次式が提案されており、図9に示すようにその実用性が確認されている<sup>12)</sup>。

$$H_v (10 \text{ kg}) = \left( \frac{840}{\tau^{0.22}} \cdot C_{eq} + 58 \right) \pm 66$$

$$\tau \approx 3.8 \times 10^{-2} \left( \frac{V_b \cdot I_b}{v_b \cdot h_p} \right)^2 \left[ \frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(800 - T_0)^2} \right]$$

$$C_{eq} = C + \frac{\text{Mn}}{2.4} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Ni}}{14} + \frac{\text{Cr}}{16} + \frac{\text{Mo}}{60} (\%)$$

$\tau$ : 800℃ から 500℃ までの冷却時間 (s)  
 $V_b$ : 加速電圧 (kV)  
 $I_b$ : ビーム電流 (mA)  
 $v_b$ : 溶接速度 (cm/s)  
 $h_p$ : 溶込み深さ、ただし完全溶込み溶接の場合板厚とする (cm)  
 $T_0$ : 予熱温度 (℃)

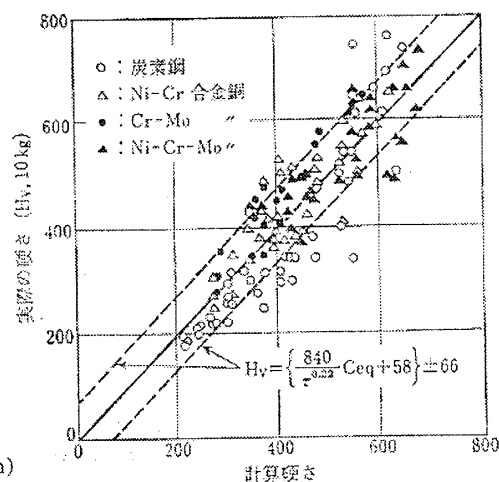


図9 各種構造用鋼の電子ビーム溶接部の硬さ推定値と実測値の対応

## 2) 電子ビーム溶接金属の靱性

電子ビーム溶接を構造物に適用する場合はとりわけ溶接継手部の靱性確保は重要な課題となる。近年、電子ビーム溶接の最大の利点である深溶け込み、高速溶接性をラインパイプの円周溶接に応用した部分真空電子ビーム溶接プロセスが開発され<sup>3)</sup>、パイプラインの新しい画期的な溶接施工技術として注目されているが、ラインパイプ材の電子ビーム溶接金属の靱性において電子ビーム溶接特有の興味深い現象が確認され、新しい材料科学分野の課題として検討されている。以下にその現象の概要を紹介する。

図10に同一温度(-60℃)で破断させたX65鋼管電子ビーム溶接金属のシャルピー衝撃試験片破断断面組織を示す。高靱性を示した溶接金属では亀裂は大きな塑性変形をともないながら溶接金属を伝播し、試験片は分断されることなく衝撃エネルギーを吸収している。一方、低靱性を示した溶接金属では亀裂は同様に溶接金属を伝播しているにもかかわらず、ほとんどエネルギーを吸収することなく壁開破面を呈して脆性破断している。このように電子ビーム溶接金属の靱性はその組成、組織によって特徴的な遷移現象を示す場合があり、延性温度領域では母材同等以上の著しく高い靱性を安定的に示すが、遷移領域ではこの優れた靱性と極度に低い靱性とが同一温度で混在する。図11は同じくX65鋼管電子ビーム溶接金属のミクロ組織の例であるが、ベイナイト主体の組織である。

現在、このような電子ビーム溶接金属靱性の挙動メカニズムについて鋭意検討中であるが、不活性ガスシールドによるレーザ溶接金属においても同様の問題が生じるものと考えられる。しかしながら、上述したように延性温度領域では非常に優れた靱性を安定して期待できるため、遷移温度が低い場合には実用上何ら問題なく、むしろ品質の安定した溶接方法として応用、実用化できる。

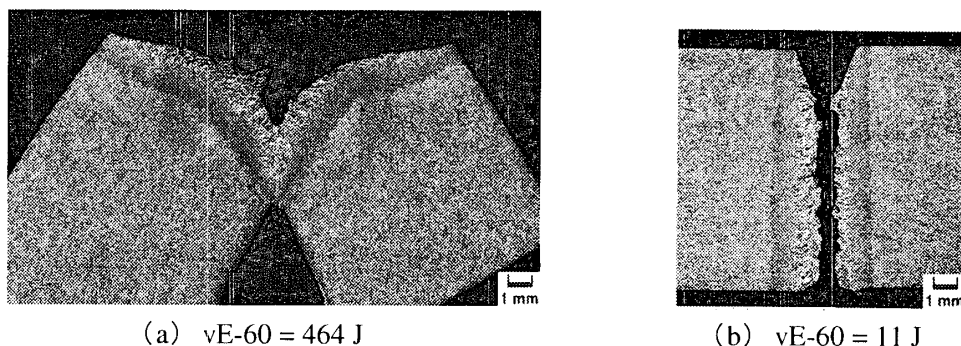


図10 X65鋼管電子ビーム溶接金属の破断後のマクロ組織(試験温度:-60℃)

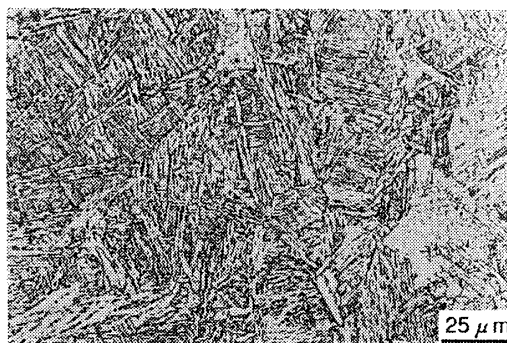


図11 X65鋼管電子ビーム溶接金属のミクロ組織の例

## 5. おわりに

電子ビーム溶接はレーザビームの開発とほぼ時期を同じくして開発された溶接方法であるが、大出力化や産業分野への応用・実用化がレーザ溶接よりも急速に進んだ結果、その研究開発も一段落している。そのため、電子ビーム溶接はレーザ溶接ほど新しい溶接方法とは認識されていないのが現状である。しかしながら、最近では大掛かりな真空チャンバーをなくした電子ビーム溶接プロセスが開発され、次世代の新しい溶接方法として注目されている。このような背景のもとで、本稿は古くて新しい溶接方法である電子ビーム溶接に関んして、その材料科学的見地から溶接冶金学的現象を紹介し、新しい課題を提起した。今後の研究開発に微力ながらも参考になれば幸いである。

## 参考文献

- (1) A.H.Meleka ; 電子ビーム溶接 ー原理と実際ー、産報 (1972)
- (2) 阿部信行 ; 高エネルギービーム加工研究委員会 ー研究委員会活動史ー、溶接学会誌、70(2001)1、149
- (3) 古賀信次 ; 天然ガス幹線パイプライン用鋼管の全姿勢電子ビーム溶接に関する基礎的研究、大阪大学学位論文 (2000)、16
- (4) 荒田吉明、松田福久、田村広治 ; 厚板鋼板の深溶込みにおける溶接現象と欠陥について、溶接学会、電子ビーム溶接研究委員会資料、EBW-93-73 (1973)
- (5) 田村広治、佐藤鞆彦 ; 厚板の電子ビーム溶接部の欠陥に及ぼす溶接速度と焦点位置の影響、溶接学会、電子ビーム溶接研究委員会資料、EBW-120-74 (1974)
- (6) 志田朝彦、岡村久宣、鈴木宗伸、喜多久直 ; 電子ビーム溶接の欠陥発生および防止に関する研究 (第3報)ー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ー、溶接学会誌、46 (1977) 12、46
- (7) 志田朝彦、岡村久宣、喜多久直、中崎隆光 ; 電子ビーム溶接の欠陥発生および防止に関する研究 (第4報)ー厚板の下向深溶込み溶接における縦割れ欠陥の防止ー、溶接学会誌、48 (1979) 7、38
- (8) 田中甚吉、小菅茂義 ; 厚鋼板の電子ビーム溶接 (第1報)ービーム特性と炭素鋼板の溶接条件の選定ー、溶接学会誌、49 (1980) 9、44
- (9) 古賀信次、犬塚雅之、長谷浩志、岩瀬敏典、柘田 浩 ; 大径パイプライン継手の全姿勢電子ビーム溶接に関する研究 (第3報)ーパイプライン用鋼管の電子ビーム溶接における凝固割れに及ぼす不純物元素の影響ー、溶接学会論文集、18 (2000) 3、397
- (10) 小菅茂義、国定泰信、仲田清和、田中甚吉、 ; 電子ビーム溶接部の冷却過程規定因子の検討ー電子ビーム溶接部の靱性 (第1報)ー、溶接学会論文集、3 (1985) 2、48
- (11) T.Kasugai and M.Fujita ; Atlas of CCT Diagrams for Welding (I)、National Research Institute of Metals, NRIM-special report No.99-02 (1999)、343
- (12) 荒田吉明、松田福久、中田一博、柴田信治、白川正昭 ; 炭素鋼および低合金鋼の電子ビーム溶接における硬化度の予測と溶接割れの検討、溶接学会、電子ビーム溶接研究委員会資料、EBW-65-72 (1972)