

## 論文審査の結果の要旨

氏名：関 口 信 一

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：球状黒鉛鋳鉄と軟鋼の電子ビーム溶接に関する研究

審査委員：（主査） 教授 柴 田 文 男

（副査） 教授 内 木 場 文 男 名誉教授 小 野 沢 元 久

東京工業大学教授 熊 井 真 次

本論文は、電子ビーム溶接による球状黒鉛鋳鉄と軟鋼の異材溶接の可能性について究明したものである。使用した球状黒鉛鋳鉄は、黒鉛を球状化した比較的新しい鋳鉄铸件であり、その強度は鋼材に匹敵する優れた機械的性質を有している。球状黒鉛鋳鉄は、産業機械、自動車部品及び鋳鉄管などに広く利用されているが、炭素含有量が著しく多く、そのため難溶接性材料として扱われており、溶接継手の強度が要求される組立溶接への適用が困難である。

そこで申請者は、球状黒鉛鋳鉄と軟鋼の電子ビーム溶接性について検討しており、その成果は工学的、技術的に有効であることを示している。すなわち、申請者が実験的に検証した結果から、球状黒鉛鋳鉄と軟鋼溶接部の欠陥生成と成因、防止法ならびに溶接部の冶金的及び機械的性質などについて解明している。

本論文の内容は全6章から構成されており、各章の概要を以下に述べる。

第1章では、「緒論」として、本研究の背景ならびに本研究の目的と論文構成について述べている。球状黒鉛鋳鉄の特性、生産量及び応用例について述べており、球状黒鉛鋳鉄の溶接困難な理由について言及している。さらに、球状黒鉛鋳鉄と軟鋼の健全な電子ビーム溶接継手の可能性などについて述べている。

第2章では、供試材料及び電子ビーム溶接装置について詳細に述べている。球状黒鉛鋳鉄は、球状の黒鉛が基地組織中に独立して点在している材料であり、球状黒鉛鋳鉄の機械的性質は黒鉛形状と基地組織に著しい影響を受けている。また、JIS規格では、球状黒鉛鋳鉄の黒鉛球状化率は80%以上であり、機械的性質は引張強さ350～800MPaの7種類に限定している。そして、基地組織がパーライト鋳鉄は引張強さが大きく、伸びや靱性が低い。さらに、基地組織がフェライトとパーライトとの混合組織であるブルスアイ組織の鋳鉄は、両者のほぼ中間の特性を有している。一方、軟鋼はC量0.3%以下の低炭素鋼であり、C量に比例して機械的性質は変化する。鋼種は引張強さ330～540MPaの範囲で4種類に分類されている。

一方、溶接欠陥の防止法として、両材のI形突合せ面に、インサート材（純Ni及びSUS304）を挿入することを試み、特にNi系インサート材に着目している。なお、電子ビーム溶接は、高エネルギー密度溶接で溶接入熱の少ない溶接法である。この溶接装置の特徴及び性能について紹介している。

第3章では、球状黒鉛鋳鉄と軟鋼の直接電子ビーム溶接を行った場合の、溶接部の組織と機械的性質などについて述べている。溶融凝固部の組織は、1パス溶接では針状マルテンサイトを呈し、その場合の硬さは800HVほどに著しく硬化し、溶接割れやポロシティの発生が著しいことを示している。

次に、2パス溶接では、粗大化した針状マルテンサイトを呈し、その場合の硬さは500HVほどを示し、1パス溶接に比して300HVほど硬度が低下している。2パス溶接では、1パス溶接に比して溶接割れやポロシティは減少している。なお、球状黒鉛鋳鉄熱影響部は、1パス及び2パス溶接にかかわらずいずれも針状マルテンサイトを呈し、また黒鉛周囲にはマルテンサイトとレデブライトの混合組織の様相を呈し、溶融凝固部よりさらに硬度が上昇している。

溶接継手の引張強さは、1パス及び2パス溶接継手とも両母材の引張強さ以下であり、2パス溶接継手は、1パス溶接継手に対して溶接割れやポロシティの発生が減少し、かつ軟鋼母材の降伏以上の値を示している。また、1パス及び2パス溶接継手の軟鋼母材に対する継手効率、55%及び72%と著しく低い。溶接継手の衝撃値は、1パス及び2パス溶接継手とも試験温度77～373Kの場合に6J/cm<sup>2</sup>以下を示しており、この場合遷移温度は認められない。なお、2パス溶接継手の疲労特性は、軟鋼母材と

ほぼ同等の値を示している。

第4章では、第3章の直接電子ビーム溶接を行った場合の、溶接欠陥（溶接割れ及びポロシティ）の防止を目的に、球状黒鉛鋳鉄と軟鋼のI形突合せ面にインサート材（純Ni及びSUS304）を用いてインサート型電子ビーム溶接を行い、溶接部の冶金的及び機械的性質などについて述べている。純Ni及びSUS304インサート型電子ビーム溶接の場合、溶接欠陥の防止及び溶融凝固部の硬化を防止することが可能であることを示している。純Niインサート材を用いた溶融凝固部は、シェフラー組織図よりオーステナイトを示し、平均硬さは235HVと低下している。一方、SUS304インサート材を用いた溶融凝固部は、CrとNi含有の影響によってオーステナイトとマルテンサイトの混在した領域を示し、その平均硬さは393HVと純Niインサート材を用いた場合より硬化している。しかし、直接溶接に比して溶融凝固部の硬さの低下は、溶接割れを阻止しており、十分にインサート材の効果が示されている。なお、球状黒鉛鋳鉄熱影響部には、純Ni及びSUS304インサート材の効果は認められない。この場合、直接溶接と同様に針状マルテンサイト及び黒鉛周囲にはレデブライトが生成し、硬度が上昇している。

純Ni及びSUS304インサート材を用いた溶接継手では、継手効率81%及び84%を示し、直接溶接の継手効率72%に比して継手性能の向上を示している。純Ni及びSUS304インサート材を用いた溶融凝固部は、インサート材を用いることで組織改善によって静的強度が増大したことが示されている。

純Ni及びSUS304インサート材を用いた溶接継手の衝撃値は、直接溶接継手の場合と同様に低い。なお、純Ni及びSUS304インサート材を用いた溶接継手の疲労限度は、いずれも球状黒鉛鋳鉄母材とほぼ同等の値を示している。

これより、純Ni及びSUS304インサート材による効果は、溶接欠陥の防止及び溶融凝固部の硬化防止、溶接継手の静的及び動的強度の向上などによって示されており、工学的に有効な知見が得られている。

第5章では、SUS304インサート材を用いて電子ビーム溶接を行った場合の、溶接部の衝撃値の向上に対して主として球状黒鉛鋳鉄熱影響部の靱性改善を図るため、溶接継手材に電子ビームを照射して予熱及び後熱を行っている。予熱及び後熱を施した場合、球状黒鉛鋳鉄熱影響部の組織に及ぼす影響及び衝撃値の向上に対する効果などについて述べている。本実験の予熱及び後熱した温度範囲では、球状黒鉛鋳鉄熱影響部の組織にいずれもレデブライトが生成し、特に予熱923Kの場合にその傾向は大きい。また、球状黒鉛鋳鉄熱影響部のレデブライト中に生成したパーライトは、予熱723K、923K及び後熱973Kの場合にわずかに増加している。しかし、レデブライトの周囲に生成したマルテンサイトは、予熱923K及び後熱973Kの場合に消失し、パーライトの様相を示している。なお、SUS304インサート材を用いた溶接継手の軟鋼母材に対する継手効率は、いずれの予熱及び後熱温度においても94%以上の高い継手効率を示している。また、溶接継手の衝撃値は、後熱973Kの場合に平均で5.4J/cm<sup>2</sup>と最大値を示している。この原因として、球状黒鉛鋳鉄熱影響部に生成したレデブライトの減少と、その熱影響部の硬化域が後熱によって若干緩和されたことを示している。衝撃破断経路は、破面観察から球状黒鉛鋳鉄熱影響部から生じており、レデブライトの生成による硬化や脆化が衝撃値の低下の要因であることを明らかにしている。

第6章では、「総括」として、本論文の各章ごとの研究成果を要約し、総括的結論を述べている。

以上本論文では、球状黒鉛鋳鉄と軟鋼の電子ビーム溶接における欠陥生成と成因、防止法ならびに溶接部の冶金的及び機械的性質の向上などについて検討を行い、球状黒鉛鋳鉄と軟鋼の構造溶接（異材溶接）に関する実用的な多くの知見が得られている。得られた結果より従来から極めて溶接困難である球状黒鉛鋳鉄と軟鋼のインサート型電子ビーム溶接を可能にし、しかも溶接欠陥のほぼ存在しない健全なインサート型電子ビーム溶接部を得た点が大きな進歩である。

本研究の成果は、球状黒鉛鋳鉄と軟鋼の構造溶接（異材溶接）への第1歩として、今後広く産業界に貢献するところが大きい。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するために必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成27年5月21日