

## 論文の内容の要旨

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

本論文は全6章から構成されており、以降に各章の概要を述べる。

**第1章**は緒論で、本研究の背景、目的及び論文構成について述べた。

球状黒鉛鋳鉄は、基地組織中に析出する黒鉛を球状化した比較的新しい鋳鉄品であり、鋼材に匹敵する優れた機械的性質を有する。日本での生産量は、平成23年度で164万トンほどであり、産業機械部品、自動車部品及び鋳鉄管などに幅広く利用されている。例えば、球状黒鉛鋳鉄製の産業機械部品の一例として、ドライ真空ポンプのルーツ型ロータがある。このロータは、一般に回転軸とポンプロータを別部品で加工して組立てる分割型と、回転軸とポンプロータを一体素材から加工する一体型があるが、両者の利点を兼ね備えた溶接一体型ロータが要求されている。一方、球状黒鉛鋳鉄は炭素が多量に含まれている難溶接性材料であるため、強度を必要とする組立溶接への適用が困難である。このため、従来から球状黒鉛鋳鉄同士及び球状黒鉛鋳鉄と各種鋼材との熔融溶接に関する研究は、各種溶接法において幅広く行われている。しかし、球状黒鉛鋳鉄と軟鋼の電子ビーム溶接に関する研究は極めて少なく、未だ解明されていない点が多い。

そこで本研究では、高エネルギー密度を有する電子ビーム溶接法を用いて球状黒鉛鋳鉄と軟鋼の溶接を行い、組立溶接に適用可能な機械的性質の得られる溶接継手の確立を目的とした。すなわち、球状黒鉛鋳鉄の熔融溶接を行う上で問題となる、溶接欠陥の発生原因や溶接部硬化による機械的性質の劣化や防止法を明らかにするために一連の実験的研究を行った。

**第2章**では、本研究に使用した供試材料及び電子ビーム溶接装置について述べた。

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るため、その機械的性質は黒鉛形状と基地組織に大きく影響を受ける。JIS規格では、球状黒鉛鋳鉄品の黒鉛球状化率は80%以上としており、機械的性質は引張強さ350~800MPaの範囲で7種類に定めている。主要基地組織がフェライトの鋳鉄は、引張強さが低く、伸び及び靱性が高い。一方、主要基地組織がパーライトの鋳鉄は、引張強さが高く、伸び及び靱性が低い。そして、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では、両者の中間の性質を有する。

軟鋼は、C量0.3%以下の低炭素鋼の一種であり、その機械的性質はC量に比例して変化する。JIS規格では、鋼種は引張強さによって分類されており、330~540MPaの範囲で4種類に制定されている。

電子ビーム溶接はエネルギー密度の高い熱源を利用した溶接法であり、その特徴は、溶接入熱が少なく熱影響の少ない深溶込み溶接が得られ、かつ真空中での施工のため不純物ガスによる汚染が少ないなどが挙げられる。これらの特徴は、球状黒鉛鋳鉄の溶接に適している。電子ビーム溶接条件の選定方法では、 $a_0$ 値(対物距離 $D_o$ /焦点距離 $D_f$ )に対するビード横断面形状、溶込み深さ及びビード幅との関係を示し、溶接入熱が一定の場合は、 $a_0$ 値の設定条件が熔融凝固部の性質に大きな影響を及ぼすことを示した。

**第3章**では、球状黒鉛鋳鉄と軟鋼とを直接I形に突合せて電子ビーム溶接を行い、溶接部の組織及び機械的性質などについて調査した。また、溶接パス回数と溶接欠陥との影響について検討を加えた。その結果、1パスでの熔融凝固部の組織は、針状マルテンサイトを呈し、その硬さは、800HVほどに著しく硬化した。また、1パスの熔融凝固部では、溶接割れやポロシティが発生する場合があった。

次に、2パスでの熔融凝固部の組織は、粗大化した針状マルテンサイトを呈した。その硬さは、500HVほどとなり、1パスに比して若干硬度が低下した。また、溶接割れ及びポロシティの生成は、1パスに比して減少した。ポロシティは、2パス溶接を行うことにより、熔融凝固部の冷却が遅くなること、及び熔融金属を攪拌することによってガスの放出が容易になって減少したと考えられる。なお、球状黒鉛鋳鉄熱影響部は、溶接パス回数のいかにかわらず、いずれも針状マルテンサイト及び黒鉛周囲のレデブライトからなる混合組織の様相を呈し、著しく硬度が上昇した。

溶接継手の引張強さは、いずれの継手も両母材の強度以下であったが、2パス溶接継手は、1パスに比して溶接割れ及びポロシティの発生が減少したため、軟鋼母材の降伏点以上の値を示した。溶接継手の軟鋼母材に対する継手効率は、1パス及び2パス溶接継手の場合に、それぞれ55%及び72%であった。また、溶接継手の引張破断位置は、溶融凝固部と軟鋼ボンド部であり、溶接継手は十分な静的強度が得られなかった。次に、溶接継手の衝撃値は、すべての試験温度77~373Kにて6J/cm<sup>2</sup>以下であり、遷移挙動は認められなかった。このため、いずれの継手も球状黒鉛鑄鉄母材の強度より著しく低下した。また、溶接継手の衝撃破断位置は、主に溶融凝固部であった。一方、溶接継手の疲労強度は、2パス溶接継手の場合に軟鋼母材とほぼ同等の値を示し、溶融凝固部及び球状黒鉛鑄鉄熱影響部の硬化による疲労強度の低下は認められなかった。

**第4章**では、第3章で明らかとなった直接溶接における溶接割れやポロシティなどの溶接欠陥を防止するため、球状黒鉛鑄鉄と軟鋼のI形突合せ面にインサート材を挿入する、純Ni及びSUS304インサート型電子ビーム溶接を行い、溶接部の組織及び機械的性質について調査した。インサート型電子ビーム溶接では、溶接割れやポロシティなどの溶接欠陥及び溶融凝固部の硬化の防止が可能であることを示した。純Ni溶融凝固部は、インサート材に含有するNiの影響によりオースナイト領域を示し、その平均硬さは235HVであった。SUS304溶融凝固部は、インサート材に含有するNi及びCrの影響によりオーステナイトとマルテンサイトの混合領域を示し、その平均硬さは393HVであった。しかし、球状黒鉛鑄鉄熱影響部にはインサート材の効果は認められず、直接溶接の場合と同様に、針状マルテンサイトと黒鉛周囲のレデブライトからなる混合組織の様相を呈し、著しく硬度が上昇した。

純Ni及びSUS304溶接継手の軟鋼母材に対する継手効率は、試験片8本の平均で、それぞれ81%及び84%となり、直接溶接継手の継手効率72%に比して向上し、良好な継手性能を示した。これは、純Ni及びSUS304溶接継手が、直接溶接継手に比して溶融凝固部の硬化の防止及び溶接組織の改善によって強度が増したためと考えられる。また、溶接継手の破断は、いずれも球状黒鉛鑄鉄ボンド部であった。さらに、純Ni及びSUS304溶接継手の疲労限度は、いずれの継手も球状黒鉛鑄鉄母材とほぼ同等の値であった。これより、溶接継手の性能向上に対して、純Ni及びSUS304インサート材の効果は十分認められた。

しかし、純Ni及びSUS304溶接継手の衝撃値は、直接溶接継手の場合と同様に、試験温度77~373Kの範囲に遷移挙動を示さず、球状黒鉛鑄鉄熱影響部の硬化により、溶接前の球状黒鉛鑄鉄母材に比して衝撃値が著しく低かった。溶接継手の衝撃破断位置は、いずれも球状黒鉛鑄鉄ボンド部であった。

**第5章**では、SUS304溶接継手の衝撃特性の改善を図るため、電子ビームを用いた予熱または後熱を伴ったインサート型電子ビーム溶接を行い、球状黒鉛鑄鉄母材の予熱及び溶接部の後熱が球状黒鉛鑄鉄熱影響部の組織に及ぼす影響や衝撃値の向上に対する効果などについて調査した。

本研究での予熱及び後熱の範囲においては、球状黒鉛鑄鉄熱影響部の組織には、いずれもレデブライトが認められ、特に923K予熱の場合に生成範囲が最も大きかった。予熱温度の上昇に伴って、熱影響部における黒鉛周囲の溶融範囲が拡大したため、レデブライトの生成範囲が広がったと考えられる。また、レデブライト内のパーライトは、723K予熱、923K予熱及び973K後熱の場合に、若干多く認められた。なお、予熱・後熱なしの場合にレデブライトの周囲に認められたマルテンサイトは、923K予熱及び973K後熱の場合に消失しており、パーライトの様相を呈した。

SUS304溶接継手の軟鋼母材に対する継手効率は、いずれの熱処理条件においても94%以上を示し、良好な引張強度を示した。

また、SUS304溶接継手の衝撃値は、973K後熱の場合に平均で5.4J/cm<sup>2</sup>となり、最も大きかった。これは、球状黒鉛鑄鉄熱影響部におけるレデブライトが少なく、かつ硬度の上昇が若干緩和されたためと考えられる。しかし、レデブライトの消失を十分に行えなかったため、球状黒鉛鑄鉄母材の値に比して1/4ほどであった。SUS304溶接継手の衝撃破断経路は、いずれも球状黒鉛鑄鉄熱影響部であり、レデブライトの晶出による硬化が衝撃値の低下の一因であることを破断面の観察から明らかにした。

**第6章**では、本論文の総括的結論を述べた。

以上本論文では、球状黒鉛鑄鉄と軟鋼の溶接継手における溶接欠陥の発生原因、またその防止法及び継手性能の向上などについて検討を行い、インサート型電子ビーム溶接を用いた場合、各種構造強度部材の溶接・接合に十分適用できる健全な溶接継手を得た。また、本研究で得られた知見は、球状黒鉛鑄鉄と各種鋼材との異種金属材料の溶接技術の開発に波及効果があるものと考えられる。