

学位論文題名

鑄造を利用した異種部材複合化における  
接合条件に関する研究

学位論文内容の要旨

鑄造による成形と同時に異種材料の複合化を達成する鑄ぐるみ接合は、その生産性の高さにより、従来より利用されている接合法である。この手法は異種部材を心材として鑄型内に設置し、溶湯の熱を利用して接合することにより、2つの工程を一度に完了できる利点がある。一方、鑄造と接合という2つの異なるプロセスを同時に達成しなければならないため、良好な接合が得られる条件範囲が限られる。また、接合の成否は経験的なものに依るところが大きいのが現状である。このため、溶接やろう接など他の接合法と比較し、製造現場の要求が多いにもかかわらず技術的に十分に確立されているとは言い難い。本論文では、この鑄ぐるみ接合を材料複合化の手法、複合化鑄造法と位置づけ、種々の条件における実験および差分法を用いた伝熱凝固解析により、接合界面における熱的条件に着目して接合の機構およびその条件を明らかにした。また、それらの結果から、形状、寸法、材料が接合に及ぼす影響について論じ、複合化鑄造法の工業的な応用の拡大を目指した。

第1章では、鑄ぐるみ接合の複合化鑄造法としての工業的な位置づけについて述べ、この手法の特徴を他の接合法と比較した。また、鑄造を利用した複合化に関する従来の研究を概観し、いくつかの実用例を示し、まだ明らかにされていない多くの問題点を整理し、本研究の目的を述べた。

第2章では、明らかにすべき問題点の一つとして、鑄造複合化において心材が溶湯する現象を取り扱った。実験と溶融・凝固解析からその機構と溶融条件を明らかにし、溶融の防止と溶融の利用という2つの観点からこの現象を論じた。まず、心材をモデル化した球状黒鉛鑄鉄および軟鋼の棒を、一定温度に保持した片状黒鉛鑄鉄溶湯中で溶融させる実験を行い、解析の結果とあわせて溶融プロセスを考察した。鑄鉄心材の溶融がほぼ温度条件にのみ依存し、一方、軟鋼の溶融には溶湯からの炭素の拡散と心材表面における合金化が必要であり、その速度は炭素の拡散速度に依存することを示した。また、これと同じ材料の組み合わせによる注湯接合実験を行い、溶融速度の速い鑄鉄心材の溶融を体積比のみによって制御することはきわめて困難であることを示した。溶湯温度の低下を伴う鑄造接合では、軟鋼心材の溶融が、高温での速い溶融と、溶湯の融点付近における遅い溶融に分けられる。このことから、複合化鑄造における溶損を防ぐには高温溶湯との接触を避けることが有効であり、一方、溶融により接合させる場合には、溶融の制御が比較的容易な融点付近の遅い溶融の利用が有効であることを示した。さらに、心材および溶湯の炭素濃度により溶融の容易さが異なることから、温度のみならず、材料の選択によっても溶融を制御できる可能性が示された。

第3章では、複合化鑄造における形状的な制限の解消を目的として、心材を鑄造品の

表面に接合させる場合の接合条件を、球状黒鉛鑄鉄の鑄造品端面へ軟鋼を接合させる実験および凝固解析によって明らかにした。心材を鑄造品表面へ接合させることで、心材の特性を積極的に利用することが可能となる。実験によれば、鑄造を利用して、特別の表面処理をせずに軟鋼の心材を鑄造品端面に接合させるには、約30の体積比が必要であった。心材が外部に露出し、溶湯との接触面積より冷却する鑄型との接触面積が大きいため、心材の温度上昇が遅く、接合界面の凝固が鑄物全体で最も早い。その結果、界面での熱的な接合条件を満たすためには、心材が溶湯の内部に位置する従来の形態に比べて大きな体積比を必要とする。一方、心材の接合面に Ni 基合金による溶射処理を施した場合、体積比5でも接合が得られた。端面接合では接合面がほぼ平面であり、溶射や機械加工による表面処理が容易である。また、注湯時の溶湯による心材の加熱が接合状態の向上に有効である。

第4章では、WC-Co系超硬合金と球状黒鉛鑄鉄の接合に、複合化鑄造法を適用した。WC-Co合金は硬さに優れ、その特性を利用するためには鑄物表面への接合が必要である。注湯接合実験によれば、直径20mm、高さ10mmのWC-Co合金と直径80mmの鑄鉄の接合にはおよそ100の体積比が必要であった。これは軟鋼を端面で接合する場合の3倍以上であり、軟鋼の場合よりも厳しい条件である。WC-Co合金心材の複合化鑄造では、鑄鉄溶湯と心材の間の相互拡散により、心材基地組織のCoと溶湯中のSiが合金を形成して心材の融点を低下させ、心材表面が局部的に熔融して接合する。Co-Si合金の融点は最も低い場合で1200°Cであり、鑄鉄の融点よりも高い。したがって、心材が熔融しない場合でも、液相状態の溶湯と心材との長時間の接触により、拡散接合となる可能性がある。しかし、解析によれば、心材が熔融する条件を満たさない場合は150sec以上の液相溶湯との接触でも接合しなかった。これは100sec間の液相溶湯との接触で接合が得られる軟鋼の場合と異なっており、心材表面の熔融が生じない条件では、拡散接合にさらに長時間を要すると考えられる。複合化鑄造では全体的な凝固時間が鑄物の寸法と形状によって決まり、心材の冷却によりさらに短くなる傾向がある。そのため、接合は短時間で達成されることが要求され、WC-Co合金を鑄鉄で鑄造接合するには、心材表面を熔融させることが必要である。また、心材を1mm溶湯側に突き出すことで接合状態が改善された。計算によって、この位置変更により、心材の温度上昇、最高温度等の熱的条件を向上させることが明らかとなった。

第5章では、心材と溶湯の形状および寸法が界面における熱的条件に与える影響について、これまでの結果をもとに考察した。4章において、心材のわずかな位置の違いで界面の熱的条件が変わることから、同じ体積比でも、心材の形状を工夫することによって接合状態を改善できる可能性が示された。

界面の溶湯は、注湯直後の凝固、再熔融、溶湯全体の冷却に伴う凝固、という凝固挙動を示す。ここで、注湯直後の凝固は心材の形状および寸法に依存し、溶湯の形状と寸法の効果は小さい。体積比および形状を同一として寸法のみを変えた場合について3章と同様の計算を行い、寸法が過大な場合には界面の熱的条件がかえって低下する可能性を指摘した。これは寸法の拡大とともに、心材による冷却で界面の凝固層が発達するためである。この場合には凝固層の再熔融に時間を要し、溶湯の温度低下により接合条件を満たさなくなる。このように、界面における熱的条件は心材と溶湯の寸法、形状、位置関係により異なることから、これらの要因を考慮した指標の必要性を指摘した。

第6章は総括であり、本研究で得られた成果をまとめ、さらに複合化鑄造法の応用範囲の拡大について今後の展望を述べた。

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	野口	徹
副査	教授	但野	茂
副査	教授	工藤	昌行
副査	助教授	中村	孝

学位論文題名

## 鑄造を利用した異種部材複合化における 接合条件に関する研究

異なる材質特性を有する部材を複合化して一体化部材とすることは材料の効果的な利用、部材の高機能、多機能化の観点から工業的な要望が極めて高い。鑄造により成形と異種部材の複合化を同時に達成する鑄ぐるみ接合は、その生産性の高さにより従来から利用されている複合化の手法である。しかし、鑄造と接合という2つの工程を一度に完了できる利点の一方、良好な接合状態を得るための条件の把握が困難であって、経験に依るところが大きく、製造技術としての信頼性が低い。本論文ではこの鑄ぐるみ接合を複合化鑄造法と位置付け、工業技術として確立するために、種々の条件における実験と、差分法を用いた伝熱凝固解析により、界面の熱的条件に着目した接合の機構を明らかにし、またそれらの結果から、形状、寸法および材料に依存する接合の条件を論じたものである。

第1章では複合化鑄造法の工業的な位置づけと利点について述べ、従来の研究を概観して問題点を整理し、本研究の目的を述べた。

第2章では複合化鑄造における心材の溶融現象を取扱った。この問題は界面での強固な接合と、心材の溶融損傷防止の2つの観点から重要である。まず心材をモデル化した球状黒鉛鑄鉄および軟鋼の棒を鑄鉄溶湯中で溶融させる実験を行い、これを熱移動および炭素拡散を組合わせた差分法解析の結果と照合して、溶融プロセスを考察した。これにより、鑄鉄心材の溶融は温度条件のみに依存するのに対し、軟鋼心材の溶融には溶湯からの炭素供給、融点低下が必要であって、溶融速度は炭素の拡散速度に依存することを示した。また同じ心材の注湯接合実験から、鑄鉄心材の溶融の制御は極めて困難であること、これに対して軟鋼心材の溶融は、高温での速い溶融と溶湯の融点付近での遅い

溶融の2つがあることを明らかにし、溶損の防止法および溶融による接合の利用法と制御法についての示唆を与えた。

第3章では鑄造品の端面に心材を接合させる問題を取り扱った。これによって心材の特性を積極的に利用することが可能となり、工業的な応用範囲が拡大する。実験によれば、軟鋼心材を鑄鉄鑄造品端面に接合させるには、心材が鑄造品中に埋設される場合に比べて約3倍の体積比が必要である。伝熱凝固解析により、軟鋼-鑄鉄では高温の心材と液相鑄鉄が一定時間以上接触する必要がある、この熱的条件を満たすためには、心材が溶湯の内部に埋設される形態に比べて大きな体積比を必要とすることを明らかにした。一方、心材表面のNi基合金の溶射が接合性を著しく向上させることを示すとともに、その機構と、溶射層が有効に機能しない条件範囲があることを明らかにし、またその原因を考察した。これらの結果から端面接合における接合性の向上法を提案した。

第4章では、端面接合の手法をWC-Co系超硬合金と球状黒鉛鑄鉄の複合化に適用した。実験によれば、WC-Co合金と鑄鉄の接合には軟鋼の端面接合の場合のさらに3倍の体積比が必要であった。接合界面の詳細な観察と伝熱解析の結果から、心材基質部のCoと溶湯中のSiが合金化して融点が低下し、心材表面が局部的に溶融して接合するとその機構を明らかにした。また心材の設置位置のわずかな差によって接合状態が大きく改善されることを、実験と解析の双方によって示した。

第5章ではこれまでの結果ならびにモデル化した計算に基づいて、心材と溶湯の形状および寸法が界面の熱的条件に与える影響について考察した。これによって、同じ体積比であっても、心材の形状と設置法によって接合状態を改善できる可能性が示された。また同一形状で寸法を変えた計算の結果から、接合には大寸法の方が有利であるけれども、過大な場合には逆に接合条件を充たし難くなることを指摘した。さらに界面の熱的条件が心材と溶湯の寸法、形状、位置関係により異なることから、これらの要因を考慮した接合性判定指標の必要性を指摘し、その構想について述べている。第6章は総括であり、本研究で得られた成果をまとめ、さらに複合化鑄造法の今後の展望を述べた。

以上のように本論文は、従来主として経験的な手法によって行われてきた鑄ぐるみ接合法を鑄造による複合化技術として工学的に確立することを目的とし、多くの実験とその数値解析結果の照合から、接合に必要な熱的条件とそれを充たすための形状寸法条件を解明して、工業的に応用するための手法を提案したものであって、機械材料工学ならびに鑄造工学の分野に貢献するところ大である。よって著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。