

論文内容の要旨

氏名	とみ た よし ひろ 富田 義弘
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工 第 166 号
学位授与の日付	平成 18 年 3 月 22 日
学位授与の要件	学位規程第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	鋳鉄によるセラミックスの鋳ぐるみに関する研究
論文審査委員 (主査)	教授 炭 本 治 喜
(副主査)	教授 米 田 博 幸
(副主査)	教授 木 口 昭 二

鋳鉄は素形材として優れた加工性を持ち、かつ構造用材料としてバランスのとれた機械的性質を有することから、鋳造品として多くの分野で使用されている。鋳造品などの基盤となる材料にはさらなる高度化が求められており、これに応じるため、鋳鉄の材質を強化する方向での研究が主に行われてきた。しかし、材質の向上には限界があるため、近年では材料を複合化することで高機能化する研究が行われている。

鋳ぐるみ技術を用いた複合化を考える場合、耐熱性、耐食性、耐摩耗性などの性質の優れたセラミックスと加工性に優れた鋳鉄とを複合化すればより高い機能性を有する複合材料となり、各々の長所を生かして短所を補うことができると考えられる。しかし、セラミックスは熱衝撃により脆性破壊しやすいので複合化が難しいため、セラミックス部材を鋳ぐるむ研究はほとんど行われていないのが現状である。

本研究では、セラミックスを鋳鉄で鋳ぐるむための技術を開発するにあたって基礎データを収集するため、鋳ぐるみ状況の観察を行い、鋳ぐるみの問題点を特定している。その中で、特に熱衝撃によってセラミックスにクラックが生じる問題について解決するため、非定常熱伝導応力解析および非定常熱伝導方程式を用いて解析を行い、セラミックスにクラックを生じない鋳ぐるみ条件について明らかにしている。

また、鋳ぐるみ材を構造部材として用いるためには、定量的評価が必要であるが、セラミックスの鋳ぐるみでは明確な評価方法がない。そこで、鋳ぐるみ材の強度評価方法を提案している。

これらを総合的に評価し、セラミックスを鋳鉄溶湯で鋳ぐるむ条件を明らかにしている。

本論文は全 9 章で構成されており、その概要は以下の通りである。

第 1 章では、本研究の目的と研究の方針を述べている。

第 2 章では、まず始めに材料の複合化技術としての鋳ぐるみの位置付けを行っている。そして、金属とセラミックスの複合化の分類を行い、その中で汎用性に優れた接合方法として、大がかりな装置を必要としない、なおかつ接合できる形状に制限のない鋳ぐるみによる接合に注目した。

鋳鉄によるセラミックスの鋳ぐるみ条件としては、元の組織および形状をほぼ保ち、芯材と鋳ぐるみ材の間に脆弱な金属間化合物を生成しない条件が必要である。さらに、鋳鉄-セラミックス界面が良く密着しており、界面に空隙のないものが良好な鋳ぐるみであると定義している。

第 3 章では、鋳鉄によるセラミックスの鋳ぐるみ時に発生する問題点について調査を行うため、セラミックスを常温で鋳ぐるんだ場合と、予熱して鋳ぐるんだ場合について検討を行っている。セラミックスを予熱せずに常温で鋳ぐるんだ場合、セラミッ

クスにクラックが生じ、セラミックスを予熱して铸ぐるんでもセラミックス内のクラックを防止することはできなかった。しかし、セラミックスに生じたクラックに铸铁溶湯が差し込んでおり、セラミックスに発生したクラックは铸铁溶湯が凝固する前で、溶湯の熱衝撃により生じたと述べている。

第4章では、铸铁によるセラミックスの铸ぐるみにおいて、非定常熱伝導熱応力解析と非定常熱伝導方程式を用いたニューマンの解を利用することで、最適な予熱温度を求める方法について検討を行っている。非定常熱伝導熱応力解析を用いてセラミックスにクラックの発生する臨界温度差( $\Delta T_{max}$ )を求めた結果、アルミナセラミックスの $\Delta T_{max}$ は227Kであることがわかった。また、非定常熱伝導方程式を用いたニューマンの解により、铸ぐるみ時のセラミックスに発生する表面と中心の温度差を求め、非定常熱伝導熱応力解析の解と合わせることでセラミックスにクラックが発生しない臨界予熱温度を求めることができた。これらは実測においても確認することができ、本実験条件では、アルミナセラミックス表面と中心の温度差を227K以下(予熱温度1273K以上)にすることでクラックの発生を抑制することができることを明らかにしている。

第5章では、铸铁によるセラミックスの铸ぐるみにおいて、铸铁製のカバーを用いることで熱衝撃を緩和することを考え、非定常熱伝導熱応力解析および非定常熱伝導方程式を用い、カバーの厚みを求め、セラミックスを予熱せずにセラミックスにクラックの生じない铸ぐるみを行う方法について検討を行っている。铸铁製カバーを用いると、セラミックスに発生する温度差を小さくし、セラミックスを予熱せずに铸ぐるむことが可能であることがわかった。本実験条件では、アルミナセラミックスの場合、カバーの厚みは7mmである。この場合、铸込み重量2.5kg～3.0kgで良好な铸ぐるみが得られる。また、カバーには溶湯の熱を吸収して溶融し、セラミックスと密着し、セラミックスの温度上昇を緩やかにするために必要な厚みがあり、解析によって得られた値は妥当であることを明らかにしている。

第6章では、セラミックスの形状、セラミックスの材質を変化させた場合について検討を行い、また、铸型の形状、溶湯温度が铸ぐるみに及ぼす影響について検討を行っている。第4章、第5章で得られた非定常熱伝導熱応力解析および非定常熱伝導方程式を用い、セラミックスにクラックの発生しない $\Delta T_{max}$ 、本実験条件ではアルミナセラミックス $\phi$ 6mmでは294K、ムライトセラミックス $\phi$ 10mmでは294K、 $\phi$ 6mmでは360Kであった。この温度差以下にするために必要な铸铁製カバーの厚みは、アルミナセラミックス $\phi$ 6mmでは1.4mm、ムライトセラミックス $\phi$ 10mmでは7.4mm、 $\phi$ 6mmでは2.5mmとなる。この厚み以上の铸铁製カバーを用いることで、良好な铸ぐるみを得ることができる。また、設定した铸込み温度から温度が変化した場合、

±50Kであれば、铸ぐるみ結果に影響はないが、±100K以上では铸ぐるむことができないことを明らかにしている。

第7章では、铸铁でセラミックスを铸ぐるむための铸铁製カバーと溶湯の種類を片状黒鉛铸铁と球状黒鉛铸铁を組合せて用い、铸込み温度一定の条件で、それぞれの組合せで良好な铸ぐるみを得られる铸込み重量の範囲を求めている。さらに、铸込み重量による熱量について考察を行っている。本実験条件において、どの組合せにおいても良好な铸ぐるみを得ることができる。しかし、球状黒鉛铸铁を溶湯に用いた場合、溶湯の表面張力は高くなり、铸込み溶湯とカバーとの濡れ性が低下するため、铸込み溶湯とカバーの界面に隙間が生じ、铸込み溶湯とカバー間の熱伝達が低下する。これにより、セラミックスへの熱衝撃が小さくなるため、片状黒鉛铸铁溶湯を用いるよりも球状黒鉛铸铁溶湯を用いた方が、铸ぐるみ可能な铸込み重量の範囲が広がる。铸込み重量による熱量について求めると、本実験条件においては、溶湯の熱量が1948kJであれば铸铁製カバーに44kJの熱量を与えることができ、良好な铸ぐるみを得られることを明らかにしている。

第8章では、セラミックスが铸ぐるまれていた部分を輪切りに加工し試験片を作成して、アムスラー型万能試験機を用いて打ち抜き試験を行うことで铸ぐるみ材の強度評価を行う方法について検討を行っている。また、コンピュータを用いたシミュレーションにより、セラミックスを铸铁で铸ぐるむ際に生じる熱応力を求めている。セラミックスを予熱して铸ぐるんだ試料のせん断強度は、铸込み重量の増加によって高くなる。これは铸铁溶湯の増加により、セラミックスへの圧縮応力が高くなったと考えられる。この条件でシミュレーションソフトウェアを用い、セラミックスへの発生応力をシミュレーションした結果、実測値と同じ傾向であった。铸铁製カバーを用いたセラミックスの铸ぐるみでは、溶湯、カバー共に片状黒鉛铸铁を用いるよりも球状黒鉛铸铁を用いた方がせん断強度が高くなることを明らかにしている。

第9章は結論で、前章までに得られた研究結果をまとめたものである。すなわち、非定常熱伝導熱応力解析によりセラミックスにクラックの発生しない臨界温度差を求め、非定常熱伝導方程式によるニューマン線図を利用することで、セラミックスの臨界予熱温度を求めることができた。さらにこれを応用することで、セラミックスを予熱せずに铸ぐるみができる新しい複合化方法を確立することができ、学術的にも工業的にも意義のある成果が得られた。これにより、セラミックスを铸ぐるむ際の最適な条件を予め予測することができ、様々な用途への铸铁によるセラミックス铸ぐるみ部材の適用が可能になると結論している。

## 論文審査結果の要旨

鋳鉄は鋳造品として多くの分野で使用されているが、鋳造品などの基盤となる材料にはさらなる高度化が求められており、これに応じるため、鋳鉄の材質を強化する方向での研究が主に行われてきた。しかし、材質の向上には限界があるため、近年では材料を複合化することで高機能化する研究が行われている。鋳ぐるみ技術を用いた複合化を考える場合、耐熱性、耐食性、耐摩耗性などの性質の優れたセラミックスと加工性に優れた鋳鉄とを複合化すればより高い機能性を有する複合材料となり、各々の長所を生かして短所を補うことができると考えられる。しかし、セラミックスは熱衝撃により脆性破壊しやすいので複合化が難しいため、セラミックス部材を鋳ぐるむ研究はほとんど行われていないのが現状である。

このような背景から、本研究では、セラミックスを鋳鉄で鋳ぐるむための技術を開発する事を目的として、鋳ぐるみ時に熱衝撃によりセラミックスにクラックが生じる問題を解決するため、非定常熱伝導熱応力解析および非定常熱伝導方程式を用いて解析を行い、セラミックスにクラックを生じない鋳ぐるみ方法について明らかにしている。また、鋳ぐるみを構造部材として用いるための定量的評価方法として、打ち抜き試験による鋳ぐるみ材の強度評価方法を提案している。以下に本研究で得られた主な知見を示す。

(1) 鋳鉄によるセラミックスの鋳ぐるみ時に発生する問題点を明らかにするため、セラミックスを常温で鋳ぐるんだ場合と、予熱して鋳ぐるんだ場合について検討を行っている。セラミックスを 1023K に予熱して鋳ぐるんだ場合でも、セラミックスにクラックが生じ、クラックに鋳鉄溶湯が差し込んでいることから、セラミックスに発生したクラックは鋳鉄溶湯が凝固する前であり、溶湯の熱衝撃により生じることを明らかにしている。

(2) 鋳鉄によるセラミックスの鋳ぐるみにおいて、最適な予熱温度を求める方法について検討を行っており、非定常熱伝導熱応力解析を用いてセラミックスにクラックの発生する臨界温度差 ( $\Delta T_{max}$ ) を求めた結果、本実験で用いたアルミナセラミックスの  $\Delta T_{max}$  は 227K であることを明らかにしている。また、非定常熱伝導方程式を用いたニューマンの解により、鋳ぐるみ時のセラミックスに発生する表面と中心の温度差を求め、セラミックスにクラックが発生しない臨界予熱温度を求めている。これらの値は実測結果とよく近似している。

(3) 鋳鉄製のカバーを用いることで鋳ぐるみ時にセラミックスに生じる熱衝撃を緩和することを考案し、(2)の解析によりセラミックスを予熱しなくてもセラミックスにクラックを生じさせないカバーの厚みを求めている。 $\phi 10\text{mm}$  のアルミナセラミックスでは、カバーの厚みは 7mm 必要であり、カバーが溶湯の熱を吸収して溶融することで、セラミックスの温度上昇を緩やかにできることを明らかにしている。また、

解析によって得られた値は妥当であることを実測結果から述べている。

(4) セラミックスの形状、セラミックスの材質を変化させた場合、また、鋳型の形状、溶湯温度が鋳ぐるみに及ぼす影響について検討を行っている。(2)の解析により、それぞれの条件に対応した鋳鉄製カバーを作製することで良好な鋳ぐるみを得ている。また、鋳込み温度  $1653\text{K} \pm 50\text{K}$  であれば鋳ぐるみ結果に影響はないが、 $\pm 100\text{K}$  以上では良好に鋳ぐるむことができないことを明らかにしている。

(5) 鋳鉄製カバーと溶湯の種類を片状黒鉛鋳鉄と球状黒鉛鋳鉄を組合せて用いた結果、本実験条件においては、どの組合せにおいても良好な鋳ぐるみを得ることができる。しかし、球状黒鉛鋳鉄を溶湯に用いた場合、溶湯の表面張力、鋳込み溶湯とカバーとの濡れ性が影響し、鋳込み溶湯とカバーの界面に隙間が生じる。これにより、セラミックスへの熱衝撃が小さくなるため、球状黒鉛鋳鉄溶湯を用いた方が、鋳ぐるみ可能な鋳込み重量の範囲が広がる。鋳込み重量による熱量について求めると、本実験条件においては、溶湯の熱量が 1948kJ であれば鋳鉄製カバーに 44kJ の熱量を与えることができ、良好な鋳ぐるみを得られることを明らかにしている。

(6) セラミックスが鋳ぐるまれている部分を輪切りに加工し試験片を作成して、アムスラー型万能試験機を用いて打ち抜き試験を行うことで、鋳ぐるみ材の強度評価を行う方法を検討している。また、コンピュータを用いたシミュレーションにより、セラミックスを鋳鉄で鋳ぐるむ際に生じる熱応力を求めている。鋳鉄製カバーを用いた鋳ぐるみよりも、セラミックスを予熱して鋳ぐるんだ試料のせん断強度が高くなり、シミュレーションソフトウェアを用いてセラミックスへの発生応力をシミュレーションした結果、実測値と同じ傾向であることを明らかにしている。

上述したように、本研究の成果で最も特筆すべきことは、非定常熱伝導熱応力解析によりセラミックスにクラックの発生しない臨界温度差を求め、非定常熱伝導方程式によるニューマン線図を利用することで、セラミックスの臨界予熱温度を求めることができ、さらにこれを応用することで、セラミックスを予熱せずに鋳ぐるみができる新しい複合化方法を確立したことである。これにより、セラミックスを鋳ぐるむ際の最適な条件を予め予測することができ、様々な用途への鋳鉄によるセラミックス鋳ぐるみ部材の適用が可能になる。

以上、提出された論文の研究成果に対し、慎重に審査を行った結果、本研究で得られた知見は学術的にも工業的にもきわめて有意義であり、博士(工学)の学位論文として十分に価値があるものと認めた。