

氏名	ひらた なおや		
授与学位	平田 直哉 博士(工学)		
学位授与年月日	平成20年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 金属フロンティア工学専攻		
学位論文題目	粒子法による凝固・湯流れ解析に関する研究		
指導教員	東北大学教授 安齋 浩一		
論文審査委員	主査 東北大学教授	安齋 浩一	東北大学教授 川崎 亮
		東北大学教授	藤田 文夫

## 論文内容要旨

材料を変形させて形を与える素形材加工法は、母型を準備すれば複雑な形状のものでも効率よく大量生産できるため、機械部品製造の基本的手法として広く活用されている。鑄造法は素形材加工法の中でも液相からの流動成形を利用する手法で、現在最も重要な素形材加工法のひとつである。鑄造法における技術的課題は数多く存在し、主なものとして湯回り不良、湯境、引け巣、偏析の発生などが挙げられる。これらは鑄造法における代表的な欠陥であり、その克服は古代より全く変わらぬ技術課題といえる。鑄造法の歴史は8000年といわれ、その間多くの技術者や研究者および鑄造CAEの援用により上記課題への対策がなされてきたが、未だ完全に克服出来ていないという事実は、いかに鑄造欠陥の克服が困難な問題であるかを示している。

一方、近年地球環境の悪化とともに資源の枯渇が叫ばれるようになり、リサイクルの重要性が増してきている。製品を作るのに要するエネルギーは、加工に要するエネルギーよりも、金属地金を製造するためのエネルギーのほうがはるかに大きい。そのため、素材にリサイクル材を多用できるという点で、鑄造は優れた省資源・省エネルギー型の産業といえよう。しかし、現在自動車や家電品、プラスチックなどのリサイクルが行われているが、金属材料のリサイクルで問題となるのは循環再利用を行うことによる地金の純度低下が挙げられる。純度が低下すると溶存水素によるポロシティ欠陥が増加するなど、新たな課題も生じてきており、これらは今後解決すべき大きな問題といえよう。

鑄造は伝熱・凝固・流動・変形が複雑に絡み合う、非常に複雑なプロセスである。従来から鑄造CAEに採用されているオイラー系格子法では、その原理的な困難さからそれぞれの現象を独立もしくは部分

的に連成させることで解析を行ってきた。しかし、ラグランジュ系メッシュレス法のひとつである粒子法を用いることで、すべての現象を同時かつ統一的に扱うことができると考えられる。しかし、粒子法そのものがまだ新しい手法であり、流動解析ひとつをとってもまだまだ安定に解析を行うにはノウハウが必要である。そのため、現在粒子法を鋳造問題に適用した例は、SPH 法を用いた湯流れ解析の報告がある程度で、凝固解析や凝固・湯流れ連成問題に関する報告はほとんどない。そこで、本研究ではまず粒子法のなかでも MPS 法を基にし、鋳造問題に適した伝熱・凝固・湯流れ解析手法の開発及びその精度の検証を行う。そして、固体収縮や収縮流による粒子（計算点）の移動、および Al 合金内の溶存水素によるポロシティ発生の引け巣に及ぼす影響といった、従来法では困難な解析を行い本手法の有効性を確認することで、粒子法による全く新しい鋳造 CAE の基礎を確立することを目的とする。

本論文は次の 6 章からなり、第 1 章は序論、第 2 章は伝熱・凝固問題を扱う解析手法、第 3 章は湯流れ解析手法、第 4 章は湯流れ解析に凝固解析を連成させた引け巣予測解析、第 5 章は溶存水素によるポロシティ発生の解析、第 6 章は本研究の総括を記述した。各章を要約すると次のようになる。

第 1 章では鋳造における CAE の位置づけを述べると共に、現在の鋳造 CAE による鋳造欠陥予測を概観し、従来より用いられているオイラー系格子法の欠点とそれに対する粒子法の利点について述べ、本研究を行うに至った背景および目的について述べた。

第 2 章では、鋳造において最も重要な現象のひとつである伝熱・凝固問題を扱う解析手法の開発・検討を行った。鋳造において界面熱抵抗は不可欠な問題であり、これまでに粒子法で界面熱抵抗を扱った例はほとんどなかったため、その計算モデルを検討し、厳密解および市販ソフトと比較することで精度を検証した。凝固を考慮しない単純な一次元伝熱問題を解き、厳密解と比較した結果、勾配・発散モデルを用いることで界面抵抗が存在する場合も精度良く解析が可能であることがわかった。さらに、エンタルピー法を導入することで凝固を考慮し、単純な形状において凝固解析を行った結果、市販ソフトと同等の精度を確保できることが確認できた。

第 3 章では、湯流れ解析手法の開発・検討を行った。まず粒子法による流動解析プログラムを作製した。その際、新しい手法として多重緩和を導入した。また、従来の SOLA-VOF 法および粒子法の湯流れ解析に表面張力効果を導入したプログラムの開発を行った。SOLA-VOF 法では表面張力を与える方法を改善し、粒子法では改良 CSF モデルを開発した。これらのプログラムを用い、差分法および従来の MPS 法による結果と比較してその精度と鋳造問題への適用性について考察を行った。その結果、以下の結論を得た。

- ・ 2次元正方キャビティフロー問題の解析を行った結果、多重緩和を用いた本手法は従来の MPS 法

及び風上法に比べて高い精度が得られることがわかった。従来の MPS 法では粒子間相互作用の有効半径が小さい場合、粒子の反発によるランダムな動きにより計算が破綻してしまうが、本手法では風上法よりも高い精度を得ることが出来ることがわかった。また、本手法は従来の MPS 法に比べて得られる粒子分布が均一であり、非圧縮性流体解析に有効であることがわかった。

・水柱崩壊問題の解析を行った結果、従来の MPS 法では波が急速に減衰する一方で、本手法はその不自然な減衰が抑制され、自然な波を計算できることがわかった。これも上記の粒子のランダムな動きによるもので、運動エネルギーが粒子のランダムな動きに吸収されてしまうために生じていた現象であり、運動エネルギー保存スキームを用いても解決できない問題であった。しかし、多重緩和を用いた本手法により不自然な運動エネルギー吸収が抑えられ、自然な波を計算できたと考えられる。

・座標軸に対し 45 度傾けた計算要素を用いて薄肉平板鋳物の湯流れ計算を行った結果、精度の悪い差分法である風上法では座標軸に沿った計算要素を用いた場合に比べて不自然な流れが得られたが、高精度な差分法である CIP 法や粒子法では、より自然な流れが得られることがわかった。これは、座標軸に対し 45 度傾けた計算要素では、斜面が階段状近似となり、精度が悪いスキームの場合はその影響を強く受けて湯流れが不自然になる一方で、高精度なスキームを用いることでより自然な流れを解析できたと考えられる。また、本手法は低い解像度でも精度良く解析できることがわかった。

・SOLA-VOF 法にて薄肉部の流入抵抗の実験結果と比較した結果、良く一致することが確認できた。その SOLA-VOF 法および粒子法による湯流れ解析プログラムを薄肉部の分岐問題へ適用した結果、いずれのプログラムも薄肉部の流入抵抗を良く計算でき、 $We$  が小さくなるにつれ分岐路への流入が増えるという現象が再現できたことから、粒子法による表面張力を考慮した湯流れ解析プログラムも十分な精度を有すると考えられる。

第 4 章では、伝熱・凝固および湯流れ解析プログラムを連成させることで、固体収縮と温度場の移動を伴う引け巣予測解析を行った。現在市販ソフトに採用されている引け巣予測機能は、主に凝固収縮のみを考慮し、固体収縮を考慮していないものがほとんどである。よって、基本的には湯流れの影響を考慮した凝固解析といえる。そのため、収縮流による熱の移流も考慮していないことが多く、また考慮していたとしても温度場が正確に得られていないことが予想される。これらは主に従来法がオイラー系格子法を採用していることに起因すると考えられる。一方、粒子法によれば、湯流れ解析と凝固解析を完全に同時に連成して解析することができる。そこで本章では粒子法による湯流れ・凝固連成解析を行い、単純形状鋳物に生じるさまざまな引け巣の形成挙動の解析を行った。その結果、従来法では困難だったパイプ状の引け巣やブリッジングの形成を再現することができた。また、本手法は固相と液相に分けて解析する手法を採用した。その際、本来固相部には熱応力解析を採用すべきところを湯流れ解析で代用

する手法を考案したが、これは熱応力解析を開発することで容易に固相部の解析精度の向上が期待できることを示しており、粒子法の発展性を示すことができたといえる。

第5章では、ここまで開発してきた解析法を組み合わせることにより、ポロシティの解析を行った。近年、リサイクル材を用いることによるアルミニウム合金鋳物のポロシティ発生が問題になっている。ポロシティの原因は主に溶存水素であり、その含有量によっては凝固時に鋳物が膨張することもある。またポロシティが発生する時はざく巣や外引けの発生にも影響があり、その予測は極めて重要である。しかしながら、従来より用いられるオイラー系格子法では凝固収縮が考慮される程度で、固体収縮はおろか、膨張を扱うのは極めて困難である。そこで本章では粒子法によるポロシティの計算モデルを考案した。溶存ガス量を計算することによりポロシティの発生判定を行い、ポロシティ量に応じて収縮量が変化するモデルを開発し、ポロシティが発生することによる引け形態への影響を考慮した解析を行った。栗野らの実験と比較した結果、本手法を用いることでアルミニウム合金鋳物のポロシティの発生およびそれによる鋳物膨張も良く再現できることがわかった。また、KUBOらによるポロシティ予測モデルや、合金の凝固形態に合わせたざく巣やポロシティ拡大モデルを導入すれば、さらに高精度な解析が期待できることを示した。

第6章では、本研究により得られた知見を総括した。鋳造は伝熱・凝固・湯流れ・変形など多くの現象が複雑に絡み合っており、その全てを同時に解かない限り、欠陥の予測はあくまで間接的なものに過ぎなくなってしまう。現在市販されているソフトに多用されるオイラー系格子法ではこの同時に解くということが極めて困難である一方、粒子法は現在統一解法に最も近い位置にある手法であると考えられる。本研究はこれまでにほとんどなされていない、粒子法の鋳造への応用を扱った。これにより、従来法では成し得なかった、固体収縮や収縮流による計算点の移動を考慮した引け巣の直接解析、そしてポロシティ発生による鋳物の膨張といった問題を解析し、現象を良く再現した。これは鋳造 CAE の歴史の中でも極めて画期的かつ重要な功績である。

本研究で扱ったのは、伝熱・凝固および湯流れ解析のみであるが、従来法では解析が困難であったさまざまな現象を再現することができた。熱応力解析を開発・統合することで、解析の機能や精度の面でさらに一段上を目指すことができるであろう。また、本研究で扱った固体収縮や溶存ガスの他にも、破断チル相、介在物やスラグといった多相・多領域問題、偏析や輻射熱伝達、そして鋳型による鋳物の変形拘束、さらには鋳型自体の変形・割れなど、すべてを統合して解析が可能な手法が粒子法である。本研究はこの鋳造問題の統一解法の第一歩として、その基礎を築くことができた結論する。

# 論文審査結果の要旨

鋳造法は、複雑形状金属部品を安価に大量生産できる金属加工技術である。そのため、自動車機器、産業機器、家電品などで積極的に利用されている。しかし、いわゆる鋳造欠陥の発生を抑えることが困難な場合が多く、いかにして鋳造条件を最適化するかが鋳造技術者にとっての最重要課題である。近年、鋳造時に発生している物理現象をコンピュータシミュレーションし、各種の鋳造条件を設計段階で最適化する試みがなされてきた。具体的には、溶湯を鋳型に注入する際の湯流れ過程やその後の凝固過程をコンピュータシミュレーションし、湯じわや引け巣といった致命的な欠陥の発生予測を行うことで試作回数を大幅に減らすことができ、歩留まり向上・品質向上にも大いに寄与することがわかっている。しかし、鋳造技術の高度化に伴い、より高精度なシミュレーション技術が求められているにも関わらず、採用している解析手法による限界などから解析精度の向上が思うように進んでいないのが現状である。

本研究は、ラグランジュ法的一种である粒子法を用いて、鋳造時の代表的な物理現象である凝固・湯流れ問題を解析することで解析精度の向上を試みた研究結果について述べたもので全編6章より構成される。

第1章は緒論で、鋳造シミュレーション技術の現状とその問題点について述べるとともに、鋳造時に発生している物理現象をより実際に近いモデルでの解析を可能とする粒子法の可能性について述べている。

第2章では、粒子法による凝固解析を試みた。鋳造問題で特徴的な多領域問題に適用可能な粒子法モデルを提案した。熱伝導問題の厳密解や差分法による結果と比較したところ、本研究で採用した粒子法モデルは十分な解析精度を有することを示した。

第3章では、粒子法による湯流れ解析を試みた。既存の粒子法アルゴリズムでは、粒子の不自然な揺らぎが大きいことから、より揺らぎの少ない多重緩和法を考案した。典型的なベンチマーク問題に適用したところ、従来法に比較し高精度に湯流れ問題を解析できることを示した。また、湯道部における溶湯の分岐問題に対し表面張力の影響を考慮した湯流れ解析を実施した。差分法による結果との比較により今回導入した表面張力モデルの有効性を示した。

第4章は、粒子法を引け巣形成問題に適用するために、第2, 3章にて検討した凝固・湯流れモデルの拡張を行った。凝固収縮のみを考慮した従来法に比較し、固相収縮まで考慮した本法による引け巣形状予測の結果は、実験結果に良く一致した。

第5章では、第4章で述べた研究成果を発展させ、凝固時の膨張を考慮できるように粒子法モデルを拡張した。本手法を純 Bi 並びに水素が溶解しているアルミ合金の引け巣形成問題に適用したところ、予測された引け巣形状は実験結果に良く一致した。

第6章は、総括である。

以上要するに本論文は、ラグランジュ法的一种である粒子法を凝固・湯流れ解析に適用することで、従来法より高精度に鋳造時に発生している複雑な錬成問題を数値解析できることを理論と実験により検証したもので、金属フロンティア工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。