

氏名	蓮野昭人				
授与学位	博士（工学）				
学位授与年月日	平成9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）材料加工学専攻				
学位論文題目	鋳物の肉厚勾配設計に適した凝固解析法				
指導教官	東北大学教授 新山英輔				
論文審査員	主査	東北大学教授	新山英輔	東北大学教授	池田圭介
		東北大学教授	八木順一郎	東北大学助教授	安斎浩一

論 文 内 容 要 旨

鋳造過程における伝熱および凝固問題を解析しひげ巣や偏析などの鋳造欠陥の発生をすることは、健全な鋳物を得る上で非常に重要である。

鋳造プロセスにおいて凝固解析を行なう上で問題となるのが、計算領域内部に存在する鋳物-鋳型間の複雑形状境界をいかに正確に近似するかという点である。これまでに様々な手法が提案されているが、境界形状の近似精度の問題や計算コストの面で問題があった。

また、複雑形状境界を扱う際に問題となるのが計算に用いる格子の生成法である。一般的な数値解析の分野では格子生成法についての研究が盛んに行なわれているが、鋳造プロセスに適した格子生成法に関する研究はほとんど行なわれていない。

一方、実際に健全な鋳物を作成するには適切な鋳造方案を作成することが必要であり、これまで様々な方案作成基準が提案されている。なかでも鋳物に肉厚勾配をつける方法はひげ巣や偏析を防止する方法として有効である。そこで適正な肉厚勾配値がいくつか報告されている。しかし、これらの値は実験条件によって異なり、実際の鋳造に効果的に適用するには経験に基づいた適切な改良が必要になる点が問題であった。この問題を解決するためには、鋳物内部の凝固の状態を詳しく解析し、鋳物形状や冷却条件の及ぼす影響について詳しく検討する必要がある。そのためには、数値解析が有効であると考えた。

以上をふまえた上で、本研究では鋳造プロセスに適した格子生成法と凝固解析手法を確立することを第一の目的として研究を行なった。

さらに欠陥の無い方案の作成を支援することを目的として、従来から欠陥防止法として利用されている肉厚勾配の影響について本研究で提案した凝固解析法を用いて検討した。

以下に、本論文の概要を述べる。

第1章 緒言

本章では本研究の背景および目的について述べた。

第2章 鑄造プロセスに適した格子生成法

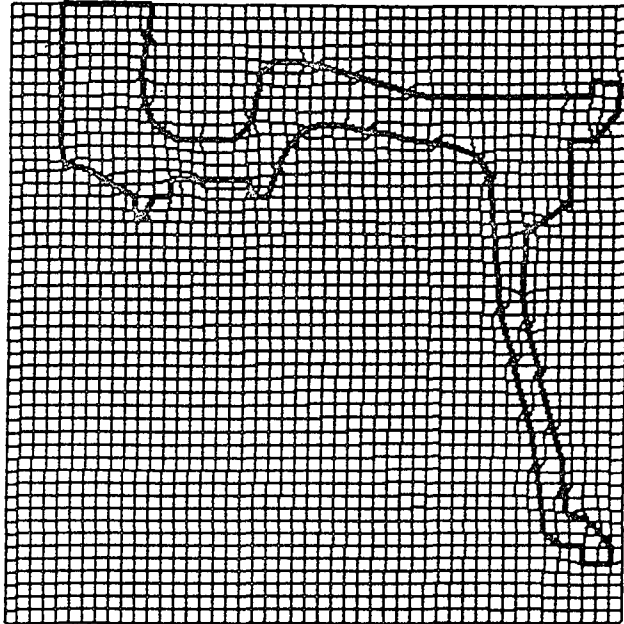


図 1: 非直交格子の例

本章では鑄造プロセスではこれまで十分な研究が行なわれていなかった、格子生成法についての研究を行なった。

ここでは境界形状を正確に近似できる非直交格子を簡単に生成する方法を提案した。本方法は、基本となる直交格子上に鑄物-鑄型の境界をオーバーラップし、その境界上に直交格子の格子点を必要最小限の範囲で移動させる事によって最終的に非直交格子を生成する方法である。また、このようにして単に格子点のみを移動させると、格子線と鑄物-鑄型の境界線が一致しない場合が生じる。その場合は、四角形要素をその対角線によって二等分される三角形として取り扱うことにした。

本法によって作成した格子の例を図1に示す。この方法で生成された格子は非直交格子でありながら、直交格子の構造的な長所をあわせもった格子である。つまり、境界へ向かって移動する格子点は境界付近の格子点に限られるので、格子全体の歪みが抑制される。これによって、数値計算の際の誤差を軽減する事が出来る。また、部分的には非構造になるが全体として構造的な長所を保っているため、数値計算の際の取り扱いが容易であるという長所がある。

第3章 非直交格子を用いた有限体積法による凝固解析

本章では非直交格子を用いた凝固解析法について検討した。ここでは、有限体積法の基礎式を各格子セル内に生成される局所斜交座標系を用いて離散化する方法を提案した。また軸対称座標系上での離散化法についても検討した。本離散化法の特徴は、非直交格子を用いるので、計算領域内部の鋳物-鋳型の境界形状の近似誤差が小さく、解析精度が高いという点が挙げられる。また、各時間ステップごとのアルゴリズムが従来の直交差分法のアルゴリズムと等しくなり計算時間が短い、という点もあげられる。

数値実験の結果から、本解析法が高い解析精度を持つことを示した。さらに実験結果との比較から、ひけ巣欠陥の予測にも十分適用が可能であることを示した。

第4章 健全鋳物作成のための適正肉厚勾配の予測

本章では鋳造欠陥の防止法の一つである肉厚勾配の付加の効果について、第2および第3章で提案した凝固解析法を用いて考察した。その結果ひけ巣欠陥発生に重要な影響を及ぼす、 G 、 $R^{1/2}$ の各パラメータを鋳物寸法と肉厚勾配を用いて定式化した。以下に平板状鋳物の中心線における G_{prop} 、 $R^{-1/2}$ の関係式を示す。

$$G_{prop} = (3888.1 - 17060t_0) \tan \theta$$

$$R^{-1/2} = 189.72(t_0 + l \tan \theta)$$

さらに、ひけ巣欠陥予測法として広く利用されている $GR^{-1/2}$ の臨界値と本章で定式化した関係を用いて、健全鋳物が得られる臨界肉厚勾配を鋳物寸法から予測する式を提案した。平板状鋳物の臨界肉厚勾配の式は以下のようになった。

$$\tan \theta = \frac{775}{189.72t_0(3888.1 - 17060t_0)}$$

この式から得られた臨界肉厚勾配と従来の実験結果と従来の実験結果を比較したものを図2に示す。この図から分かるように、本予測法が初期方案設計の有効な指針となることを示した。

第5章 有限体積法によるマクロ偏析の予測

本章ではマクロ偏析に着目し、その予測を行なうための数値解析法について検討した。マクロ偏析は、凝固によって濃化された液相の凝固収縮流による移動によって生じる。そこで本章では従来から提案されていた液相流動モデルを拡張し、固相移動を液相との相対速度で表現する簡易モデルを提案した。さらに本モデルを用いた数値解析から、各種凝固条件がマクロ偏析の発生傾向に及ぼす影響について検討した。このモデルで数値解析を行なったところ実験結果と良い一致を示し、偏析の予測法として有効である事を確認した。しかし、解析結果からは固相移動の影響はほとんど見られず、さらに検討が必要であることが明らかになった。

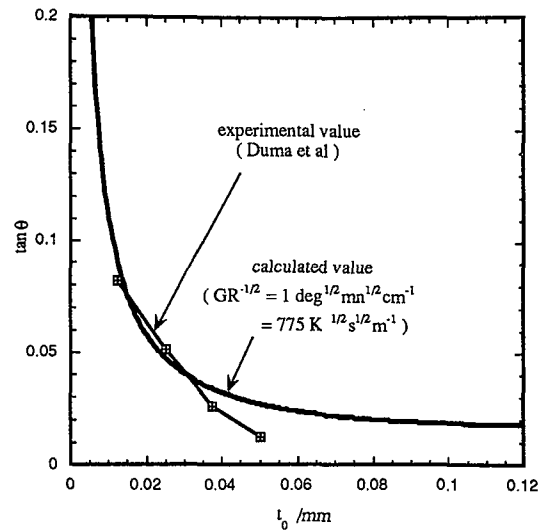


図 2: 数値解析による臨界肉厚勾配値と実験結果の比較

また第 2 章で提案した離散化法を用いることによって非直交格子上での解析を可能にし、偏析の発生傾向に及ぼす肉厚勾配の影響について数値解析を行なった。解析結果を図 3 に示す。図 3-1 で鋳物の外周部の溶質濃度が中心部の溶質濃度よりも高い逆偏析を示している。しかし、鋳物と鋳型の熱伝達係数を変化させた図 3-2 を見ると、中心部の濃度が外周部よりも高くなる中心偏析の傾向を示している事が分かる。この傾向は、スクイズ・キャストイングの際に生じる現象と類似している。従来スクイズ・キャストイングに生じる中心偏析は、加圧による固相の移動によるとされていたが、今回の解析結果は冷却条件のみでも中心偏析が生じるという点で興味深い結果である。さらに、図 3-3 に示す様に鋳物に肉厚勾配をつけると、中心部の偏析の程度が図 3-2 に比べ減少している事が分かる。この結果は従来の報告と定性的に一致しており、本モデルがマクロ偏析解析に有効であることを示唆している。

以上、本研究では鋳造プロセスに適した凝固解析法と格子生成法を提案した。さらにこの解析法を用いることにより、肉厚勾配のひけ菓および偏析に及ぼす影響について考察し、新たな知見を得ることができた。

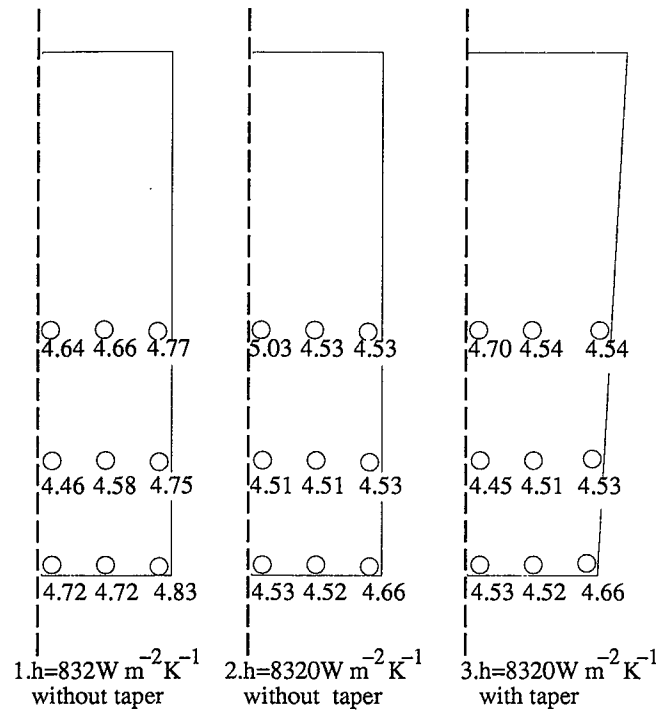


図 3: マクロ偏析に及ぼす肉厚勾配の影響

審査結果の要旨

鋳物の引け巣および中心マクロ偏析の対策として肉厚勾配が有効であることが知られているが、従来の凝固解析法はかならずしもその解析に適していないために肉厚勾配の合理的設計法が確立していない。本研究はその目的に適した凝固解析法の開発を図ったものである。

第1章は序論である。第2章は鋳造問題に適した新しい非直交格子生成法に関するものである。従来の直交格子法は鋳造という多領域問題に基本的には適しているが、微小な肉厚勾配の問題に関しては弱点がある。そこで直交格子を基本としながら微調整によって格子と領域境界を一致させ、さらに必要な個所で対角線を付加する方式を開発している。

第3章では上記の格子を用いた凝固解析法を開発している。各格子セル内部に局所斜交座標系を設定し、この上で有限体積法によって伝熱方程式を離散化する。数値実験により精度を確認し、また鋳造実験と比較して引け巣欠陥の予測に応用できることを確かめている。

第4章では第2、3章で開発した凝固解析法を鋳鋼の引け巣対策に適用し、肉厚勾配の効果を調べている。凝固時の温度勾配 G 及び冷却速度 R はそれぞれ端部からの距離とともに変化するが、パラメータ $GR^{1/2}$ は距離によってあまり変化せず、主として肉厚勾配と肉厚の関数になることを明らかにし、このパラメータの臨界値から必要な肉厚勾配を算出する式を提案している。この結果は従来の実験値と一致し、有効な設計指針になると判断される。

第5章では有限体積法で凝固時の熱及び物質移動を求めるマクロ偏析計算法を開発している。凝固収縮による濃化液相の流れを計算するに当たり、これに伴う固相の流れを考慮することを可能にしたが、結果としては固相流動の効果は大きくない。一方向凝固問題や肉厚勾配付き鋳物の凝固問題に開発手法を適用し、いわゆる逆偏析や中心偏析の発生が予測できることを確認した。また、偏析の発生形態は伝熱条件に大きく依存し、鋳物鋳型間の熱抵抗が減少するにつれて逆偏析から中心偏析へと移行すること、また、肉厚勾配を付けると中心偏析が減少することを明らかにした。計算で得られたこれらの結果は従来の知見に良く一致している。スクイーズ鋳造法における中心偏析の多発はこの事実で説明できるが、このことは中心偏析の発生が高圧力による流動にあるという従来の見解が実態に即していないことを示唆するもので注目に値する。

第6章は総括である。

以上要するに本研究は鋳物の肉厚勾配の効果を検討する目的に適した伝熱・流れ解析法を開発し、いくつかの問題に応用して懸案を解いたもので、材料加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。