

氏 名	天 谷 賢 児		
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )		
学位授与年月日	平成 4 年 3 月 27 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 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) 機械工学専攻		
学 位 論 文 題 目	高温融体の流動特性に関する研究		
指 導 教 官	東北大学教授 橋本 弘之		
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 橋本 弘之	東北大学教授 大場利三郎	
	東北大学教授 太田 照和	東北大学教授 徳田 昌則	
	東北大学助教授 庵原 昭夫		

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

本論文は融体工学の進展に寄与することを目的として、高温融体の流動特性に関して特に重要な流体工学上の問題について基礎的研究を試みたものである。第 1 章では、本研究の目的、研究方針、研究の背景など本論文の全内容を概説している。

溶融塩や溶融金属などの高温融体は、常温で固体の無機物が高温で融解して液体状態を呈したものであり、その液体としての優れた機能性を活かして金属精錬、半導体製造やエネルギー変換技術などの先端的工業分野で活発に利用されている。しかし、作動温度が高く輸送過程が促進され一般に活性な場を形成するほか、その利用にあたっては常に固液相変化を伴うために、水などの常温液体に比べて複雑な流動状態を呈することが多い。このためその流動特性に関する高い信頼性と普遍性のある基礎資料が不足しており、理論および実験の両面からの詳細な解析が強く望まれている。高温融体の流動特性をより正確に予測することができれば、高温融体の有する機能性をさらに効果的に抽出でき高温融体技術の進展を促進できるばかりでなく、融体工学（すなわち高温融体の流動学）の学術的体系化にも寄与するところが少なくない。

そこで、本研究では融体工学の分野で解明が強く望まれている相変化を伴う高温融体の流動特性に対する理論を混相流動論の立場から展開するとともに、未だ明確にされていない高温融体の流動試験法や流体計測法の確立を図ることによって高温融体の流動特性を実験的に究明した。また、工

業的にも有用な液体材料である熔融塩を高温融体の代表例として取り上げた。特に、熔融塩が有する適当な組成を任意に混合することによって種々の流動試験の目的に合った試験融体を作れる（成分設計可能）という機能性を追求するとともに、実際にこれをいくつかの流動試験に適用してその有用性を確認した。すなわち、本論文では熔融塩の有する優れた機能性を有効に利用することによって、これを種々の高温融体に対する流動試験用母材として活用することの有用性についてもはじめに言及した。

## 第2章 相変化を伴う混相流動場理論

一般に、高温融体は熱や物質の移動、腐食、化学反応などの複雑な輸送過程が生じやすくなる。また、多くの高温融体は数種の化学組成が混合しているので、融体から固体材料を作り出す場合には固液の混相状態となり、複合的な流動場を形成する。例えば、潜熱蓄熱における多成分熔融塩の相変化過程や部分熔融した鋼の連続鋳造、さらには、溶岩流や地球内部でのマグマ・マンツルの流動機構などにもこのような混相流動が密接に関係している。

第2章ではこのような高温融体の流動特性を理論的に考察する上で最も基本的なものとして、図1に示すような二種類の化学成分が混合した融体中にその凝固粒子が分散した複合流動場を取り上げ、混相流動論の立場からその熱流動場を支配する混相流動モデルを構築した。またこれをもとに、流動特性に関与する熱・流体力学的な支配因子を理論的に究明した。すなわち、物理現象をできるだけ一般性を損なわずにしかも正確に記述するために、平均化手法を用いて混相流動場の質量、運動量、エネルギーの近似保存方程式を導出した。さらに、これらをもとに微細な凝固粒子の懸濁融体に対して有効な二流体モデルや一流体モデルの保存方程式を誘導した。また、一流体モデルに対して不可逆過程の熱力学理論を適用して混相流動場内の輸送過程を記述する構成方程式を体系的に決定し、実際の混相流動場が具体的に解析できる基礎方程式を提示した。以上の理論展開の手順は図2に示したとおりである。

さらに、ここで得られた理論モデルの物理的意義を詳細に検討し、流動場内に生じる熱物質輸送過程を定量的に解析するとともに、その妥当性と限界を明確にした。例えば、これまでほとんど考慮されていなかった凝固粒子の移動に伴うエネルギー流束や相変化に伴う潜熱の授受が混相流動場の特性に大きく影響する可能性があることなどを明らかにした。他方、次章で得られる精度の高い実験手法をもとに、熔融塩を試験融体とした微細凝固粒子の懸濁融体の混相噴流実験を行い、ここに展開した理論モデルの簡易解析結果と比較した。その結果、これまで理論的に予測し得なかった混相流動場内の相変化特性に対する支配因子が理論的に求められ、実験結果がよく整理できることを明らかにした。したがって、ここに得られた理論モデルは高温融体の流動特性の理論あるいはその数値解析に極めて有用であると考えられる。

## 第3章 高温融体の流動特性試験法

第3章では、第2章の理論的な取り組みに対して、高温融体の流動特性の実験的究明に必要な不可欠な流動試験法を確立することを試みた。すなわち、種々の流動試験が容易に行える汎用性の高い

高温融体回流装置の設計製作、高温融体の新しい輸送装置の開発ならびに精度の高い熱流体量の計測法の確立を図った。図3は、ここで製作した高温融体回流装置図である。図に示すとおり、高温融体回流装置の設計製作には、第2章で得られた知見をもとに溶融体の凝固による管路閉塞や破損防止のために精密な温度制御システムを備え付けたほか、縮流ノズルを有する試験部や圧力制御タンクの導入、正確な流量検定システムの併設、安全な高温融体輸送装置の設置などの熱・流体工学的な配慮を十分に施した。また、水などを作動流体とする常温の回流装置と異なり溶融体の漏洩防止、装置の熱膨張による破壊防止、装置材料の耐熱耐食性や溶融体純度の管理などの特に安全性を重視した設計を行った。試験融体としては作動温度範囲が150～450℃である硝酸塩系溶融塩を用い、この回流装置の性能を流体工学的に評価した。その結果、本回流装置は操作性が良好でかつ安全性が高いことを確認した。また、本回流装置を用いて容積式、タービン式、オリフィス式、熱式の各流量計の高温融体への適用性を詳細に比較検討して各流量計の特徴と問題点をはじめて明確にし、高温融体の流量計測技術に有用な資料を提示した。さらに、防爆に有効なエア・アクチュエータを駆動源とする新方式の高温融体輸送装置を開発し、この回流装置の流量計測システムを用いてそのポンプ性能試験を行い、温度範囲約200～400℃の溶融塩を安定に輸送させることに成功した。

高温融体の流動試験を目的とした汎用性の高い回流装置はこれまでに製作された例がなく、ここで用いられた設計手法や高温環境下において行われた各流動試験結果および長期にわたる運転実績は高温融体の流動試験装置に対する貴重な基礎設計資料となるばかりでなく、融体工学の進展に直接寄与するものである。また、これまで比較的困難であった高温領域（200～400℃）の流動試験や複合融体の複雑な流動に対する実験的シミュレーションが容易に行えることを実際の試験によって実証し、溶融塩が高温流動用試験母材として優れた機能性を有することを具体的に確認するとともに、高温融体の流動特性に関する基礎資料を多数提示した。

## 第4章 結 論

第4章では、第2章および第3章の結果をまとめて本論文の総括を行っている。

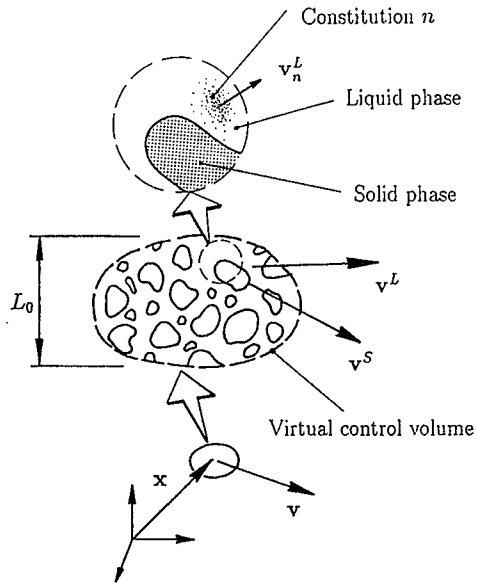


図1 二成分，凝固粒子-溶融体の混相流動場の物理モデル

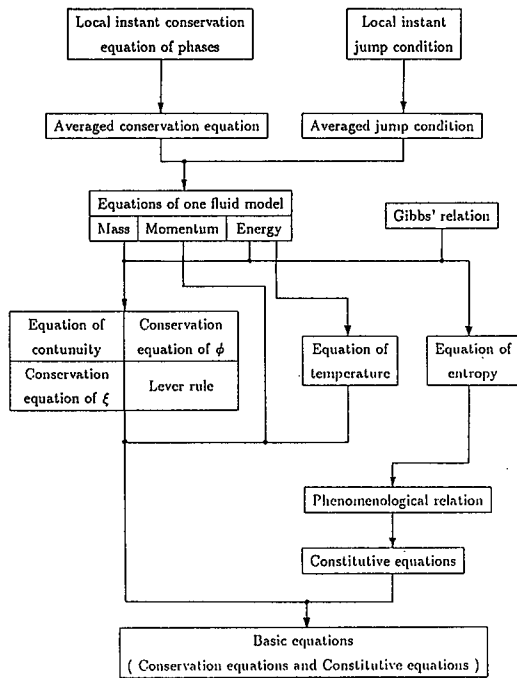


図2 混相流動モデルの導出手順

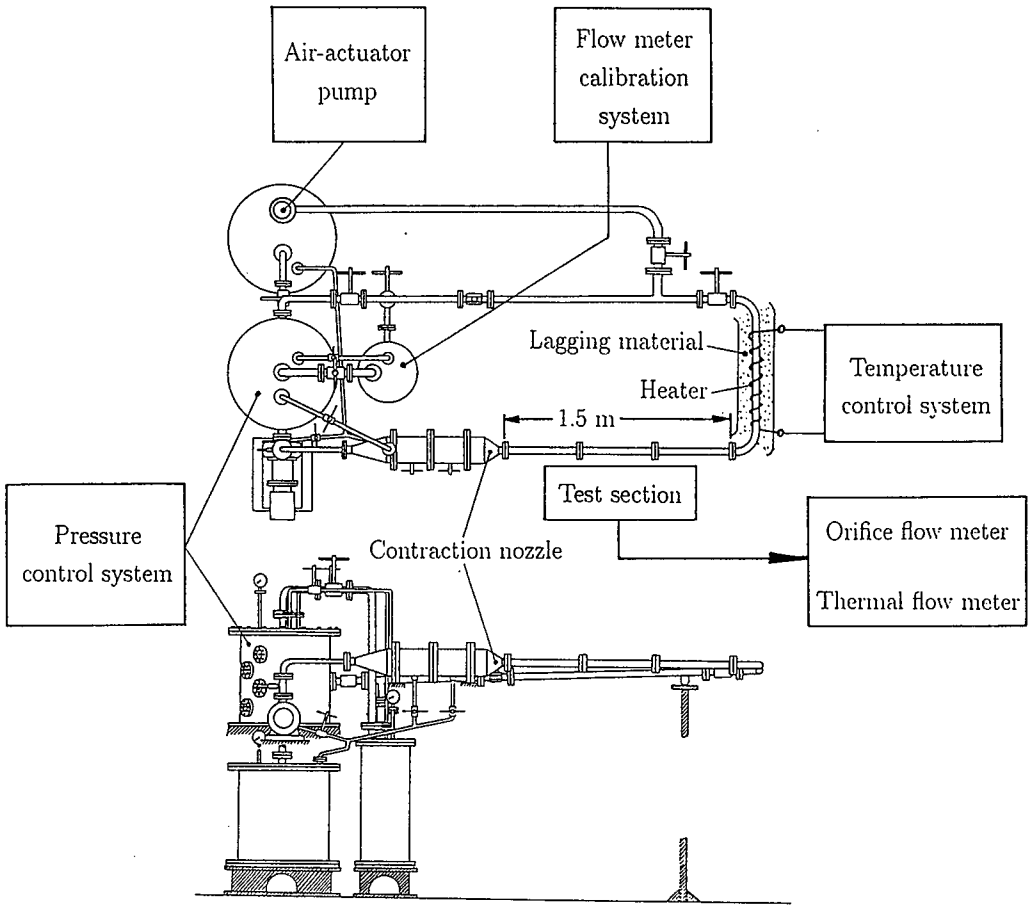


图3 高温融体回流装置

## 審 査 結 果 の 要 旨

高温融体の機能を有効に活用した種々の先端技術が注目されている。しかし、高温融体はその作動温度が高いうえに多くの場合相変化を含む複雑な流動現象を伴うので、信頼性の高い熱流動特性に対する知識の蓄積が要望されている。

本論文はこのような高温融体の流動特性を理論および実験の両面から流体力学的に究明したもので、全編4章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、二種類の化学成分が混合した熔融体中に凝固粒子が分散している混相流動場を複合流体の代表例として取り上げ、非可逆過程を考慮した混相方程式を導出することによって、従来の理論モデルを新たに体系化している。また、混相流動場に平均化手法を適用することによって、相変化や拡散などの熱流体力学的効果を具体的に算出し得る基礎方程式を提案している。これらは新しい試みである。他方、化学的に安定な熔融塩を試験融体とした固液混相体の噴流実験を行い、理論解析結果と対比してこの理論の妥当性とその適用範囲を明確にしている。さらに、エネルギー流束と潜熱の効果が混相流動特性に極めて重要な役割を果たすことを現象論的立場から定量的に示している。これらの成果は、高温融体の工業的有用性について流体力学的観点から理論的に評価したもので、極めて重要な知見である。

第3章では、高温融体の流動特性を実験的に究明するために、熔融塩を用いた汎用性の高い高温融体回流装置を設計製作し、高温融体の試験装置として必要な熱流動特性を流体力学の立場から具体的に評価している。特に、独特に考案した流動制御機構によって、高温融体に対する精度の高い試験を可能にし、流体物性の変化が流動特性に及ぼす影響を明らかにしている。また、この試験装置を用いて融体の流量計測装置や輸送装置の高温適用性を詳細に評価し、相変化を伴う高温融体の計測や輸送装置の開発に必要な基礎資料を提示している。さらに、以上の結果を総合的に吟味して、熔融塩が種々の高温融体の流動シミュレーション用母材として優れていることを明らかにしている。これらの成果は融体工業技術の進展に寄与している。

第4章は結論である。

以上要するに本論文は、高温融体の流動特性について理論および実験の両面からいくつかの重要な知見を加えたもので、流体力学の進展に寄与するところが少なくない。

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。