

Title	Study on the Modeling of Narrow Gap Flow between Moving Boundaries based on an Advanced Lubrication Theory
Author(s)	谷, 京晨
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/70752">https://hdl.handle.net/11094/70752</a>
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉</a> 大阪大学の博士論文について <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈/a〉</a> をご参照ください。

***Osaka University Knowledge Archive : OUKA***

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

## 論文内容の要旨

氏名 ( 谷 京 農 )

論文題名

Study on the Modeling of Narrow Gap Flow between Moving Boundaries  
based on an Advanced Lubrication Theory

(拡張潤滑理論に基づく移動境界間の狭隘流路の流れのモデリングに関する研究)

## 論文内容の要旨

固体粒子を含む流れは工業装置や自然界に多様に観察される。特に固体体積率が高い場合、流体や粒子の挙動を測定することは困難である。したがって、固体と流体から成る混相系の流動現象の解明や予測には数値シミュレーションが有用である。その計算手法として、流体にはオイラー法、粒子にはラグランジュ法を用い、双方向にカップリングさせる方法が従来から盛んに研究されており、特に粒子運動に対する離散要素法 (DEM) を流体の数値解析とカップリングするDEM-CFD法は産業界でも広く普及している。粒子と流体の密度比が大きい固気二相流に比べて、固液二相流においては、相対運動する固体境界間の狭い領域にある流体の影響すなわち潤滑効果やスクイズ効果が顕著になる。しかし、粒子周りの流れを直接計算しない従来のDEM-CFD法では、任意の形状の固体境界を扱うことができる普遍的な潤滑モデルは確立されていない。一方、近年では、粒子群の移動にともなう流れの計算格子を再生成する必要のない直交固定格子法を用いて、有限サイズの粒子を流れの計算格子に埋め込み、粒子周りの流れも直接計算する試みが注目されている。しかし、直交固定格子では近接する固体間の狭隘部の流れに対する解像度を確保することができない。これまで、低解像度となる領域の圧力を薄層近似に基づくレイノルズの潤滑方程式の理論解で与える潤滑モデルが検討されてきた。レイノルズの潤滑理論は、流体軸受の液膜流れに代表されるように、壁面に対して垂直方向の速度成分を無視できることを前提とし、狭隘部と外部との接続を必要としない場合に有効である。そのため、狭隘流路のネットワークが形成されるような高濃度粒子流を直交固定格子で解析する手法に組み込むには限界がある。本論文は、以上のような背景の下、固体粒子を含む流れの解析の高精度化・高効率化のため、潤滑理論を拡張するとともに、直交固定格子による数値解に組み込む方法を開発した結果を取りまとめたものであり、構成は以下のとおりである。

第1章では、固体粒子を含む流れ場の解析について、特に本研究が対象とする埋め込み境界法と潤滑モデルの現状を詳述し、本研究の背景と目的を明らかにした。

第2章では、狭隘部を検知して固体境界までの距離を算出する方法を開発し、これを用いて潤滑方程式の解を独自の埋め込み境界法に組み込む手法を構築するとともに、レイノルズの潤滑理論の適用限界を検討した結果を示した。まず、偏心二重円筒で表されるジャーナル軸受の流れでは、レイノルズの潤滑理論を組み込むことにより、狭隘部にわずかな計算格子が確保されれば十分な精度で圧力分布を表現でき、狭隘部にも十分な格子を配置する場合に対して計算の容量と時間を大幅に削減できることを実証した。次に、2球の正面衝突問題では、レイノルズの潤滑方程式により流路幅が格子幅より小さくなるまでスクイズ効果を表現できるが、粒子の運動を的確に再現するには周囲の流体運動とスムーズに接続できるように潤滑理論を拡張する必要があることを明らかにした。

第3章では、固体壁間の流路垂直方向への相対速度が大きい場合には幅方向の流れと圧力の分布が無視できないことを考慮し、幅方向の圧力勾配を採り入れた拡張潤滑理論を提案した。さらに、拡張潤滑理論がレイノルズ潤滑理論に比べて適用範囲が広いことを示した。

第4章では、第3章で提案した拡張潤滑モデルを埋め込み境界法に組み込む方法を新たに開発し、波状流路内の流れおよび粒子と平板の接近問題に対して、本手法の適用範囲を定量的に検討した。その結果、高解像度でナビエ・ストークス方程式を直接計算して得られた流れ場に対して、従来のレイノルズ潤滑理論の適用条件よりも広範な設定条件において、拡張潤滑理論は狭隘流路の流れ場をよく再現できることを漸近展開法により確認した。

第5章では、平行平板間のクエット流れ、接近する平行平板間の流れ、水平移動および垂直移動する傾斜板と水平板の間の流れという典型例に対して、解放端断面の圧力が一様であるというレイノルズ潤滑理論の条件を用いても、拡張潤滑理論による狭隘部の解析解はレイノルズ方程式の解とは違うふるまいを示し、それぞれの潤滑理論の特徴と拡張潤滑理論の優位性を明らかにした。

第6章では、本研究の成果を総括し、今後の展望を述べた。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 谷 京 農 )	
論文審査担当者	(職) 氏 名
	主 査 教 授 梶 島 岳 夫
	副 査 教 授 田 中 敏 嗣
	副 査 教 授 矢 野 猛
	副 査 教 授 杉 山 和 靖 (基礎工学研究科)
副 査 准教授 竹 内 伸太郎	

## 論文審査の結果の要旨

物質輸送機能を有する粒子群が流体と相互作用しながら運動する固体・流体の混相流は広範に観察される。有用な粒子としては赤血球、有害な粒子としては大気中の粒子状物質がそれぞれ代表的である。工業用装置においても、熱や物質の伝達特性が作動流体とは異なる粒子群を混入させることによって、システムを高機能化・高効率化する技術が研究されている。しかし、混相媒体の流動や相間の熱または物質の移動を把握することは容易ではない。高濃度粒子系の場合、粒子間の衝突や接触が全体の流動に対して大きな影響を及ぼす。その際、特に固液二相流では固体壁間のスクイズ流れの効果が重要になる。局所的な現象が全体の挙動に直結する混相流動では、単相流に比べてパラメーターが非常に多い問題もあって、理論的なモデルは確立されていない。実験では測定機器の挿入や画像の取得が困難となる。一方、数値計算では、個々の粒子の周りの境界層だけでなく、固体間の狭い領域に対する解像度を確保するための計算負荷が増す。そのため、機能性粒子を高濃度で含有する混相媒体の挙動を理解し、予測する方法の進展が求められている。近年では、有限サイズの粒子の流れの固定直交格子に埋め込み、多数の粒子の周りの流れも直接計算する試みがなされている。しかし、固定直交格子では近接する固体壁間に十分な格子分割数を確保することができないため、この領域の圧力場を表すことのできる理論的な近似解が必要とされている。

本論文は、高濃度固液混相媒体による熱流動を扱う数値計算手法を確立することを目的として、移動境界間の狭隘な流路の流れに対する新たな潤滑理論モデルを提案し、固定直交格子による直接数値計算に適用することによって有効性を示した結果を取りまとめたものである。その成果は以下のように要約される。

1. 固液二相流内で狭隘流路を検知して潤滑方程式の解を埋め込み境界法に用いる手法を開発し、ジャーナル軸受の流れや2球の正面衝突問題に適用した結果、近似理論の解を組み込む効率の向上を実現すると同時に、混相流解析に対しては潤滑理論そのものを拡張する必要があることを指摘している。
2. 流路幅方向の流れと圧力分布を考慮した拡張潤滑理論を新たに提案し、波状流路内の流れおよび粒子と平板の接近問題を対象として数値計算した結果を定量的に評価するとともに、特に相対速度が大きい一對の対向壁を扱う場合にはレイノルズ潤滑理論よりも広い適用範囲を実現する根拠を漸近展開法により示している。
3. 平行平板間や傾斜平板間における典型的な狭隘流れ条件での数値計算において、従来のレイノルズ潤滑理論と拡張潤滑理論の結果を定量的に比較し、圧力分布の再現性における後者の優位性を明らかにしている。

以上のように、本論文で提案された拡張潤滑理論および固定直交格子への埋め込み法は高濃度で固体粒子を含む混相流動場の解析手法の適用範囲を著しく拡大し、混相流動の理解と応用に寄与するものである。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。