



Title	Continuum modeling and implementation of non-local granular fluidity rheology for steady-state dense granular flows
Author(s)	Dorian, Faroux
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/89479
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、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name (FAROUX DORIAN)

Title

Continuum modeling and implementation of non-local granular fluidity rheology for steady-state dense granular flows
(定常濃厚粉体流を対象とした非局所粉体流動度レオロジーの連続体モデリングと実装)

Abstract of Thesis

Dense granular flow modeling is a field of interest faced with various challenges and constraints, e.g., high computational costs, lack of clear scale separation, changing behavior, and granular-fluid interactions. In recent years, drastic improvements have been made to address such issues. Specifically, the development of non-local models has brought the finding of a unified granular rheology one step closer. Despite unprecedented performances in reference problems, such models are still limited. One may think, for instance, of flows involving interfaces or cohesive particles.

In order to enhance the versatility of current non-local rheologies, an original systematic framework for dense granular flow modeling has been proposed. The framework is based on the steady-state Non-local Granular Fluidity (NGF) rheology and an Eulerian implementation consisting in a finite volume discretization and a regularization loop compatible with common Navier-Stokes solvers. In addition, the NGF rheology has been coupled for the first time with the Volume-of-Fluid (VOF) interface capturing method to expand its range of application to interfacial problems.

The new framework has been successfully validated against literature for a wide range of geometries ranging from simple two-dimensional single-phase flows to three-dimensional two-phase flows. The complex case of a plate dragging in a granular bed, for the first time, has been modeled using a non-local continuum model and has shown a good agreement with predictions from discrete particle simulations.

In addition, various shortcomings and limits of the current implementation have been highlighted and discussed in detail, such as high-pressure sensitivity or the inability to model fully non-local dense flows.

Finally, a possible extension of the NGF rheology to cohesive flows has been investigated. After analysis, it appeared that the coarse-grained granular fluidity can be expressed using the granular temperature and presented an exponential-type dependency on the cohesion-characterizing Bond number, which could eventually be used for explaining non-localities within cohesive systems.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (FAROUX DORIAN)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査 准教授	辻 拓也
	副 査 教授	澁谷 陽二
	副 査 教授	田中 敏嗣
	副 査 教授	矢野 猛

論文審査の結果の要旨

粉粒体は様々な工業装置内や自然界に広く存在し、その挙動を予測することは重要である。現在、個々の粒子の運動を直接考慮することにより高い精度を実現する離散要素法（以下 DEM）を用いた数値シミュレーションが行われているが、その大きな計算コストが課題であり、大幅な低減が期待できる連続体としてのモデル化が望まれる。粒子濃度が高い濃厚域や慣性域においては、近接した粒子の間に生じる接触や衝突などの相互作用の影響が、粒子群のネットワーク構造を介して周囲へ伝達され、新たな相互作用を“協調的に”生じさせると考えられる。また、一般的な粉粒体の問題では、マクロな連続体スケールがミクロな粒子スケールに対して十分に大きくないため、粒子スケールで生じる協調的な振る舞いの影響が、連続体スケールにおいても有意な形で現れると考えられる。これは、連続体としての状態が局所的に定まらず、周囲の状態にも依存することを意味し、粉粒体の“非局所性”と呼ばれる。粉粒体を対象とした非局所モデルの提案が行われているが、その数値実装や精度検証は限定的な形でしか行われておらず、多様な工学問題を対象とする汎用的な数値シミュレーションを実現可能とするには、新たな枠組みの構築が必要である。本研究は、秩序変数として粉体流動度を導入することにより粉粒体の非局所性を考慮した定常 Non-Local Granular Fluidity（以下 NGF）モデルに注目し、その数値実装および精度検証を行うものである。また、今後の定常 NGF モデルの拡張に向けて、付着性を伴う粉粒体問題を対象とした基礎的な検討を行うものである。主な成果は以下の通りである。

1. 多様な粉粒体問題に対して非局所モデルによる数値シミュレーションを可能とするため、非圧縮性 Navier-Stokes 式に基づく汎用流体ソルバーを基盤として、定常 NGF モデルの数値実装を行っている。また、この際生じる数値不安定性の問題を、正則化ループを新たに導入することにより解決している。実際の粉粒体問題は自由界面を伴う場合がほとんどである。不混和二相流解析手法の一つである Volume of Fluid 法の導入を行うことにより、自由界面を伴う粉粒体の表現を可能としている。
2. 提案モデルの有効性の検証を目的として、自由界面を伴うクエットセルやボトムクエットセル内の流れ、傾斜平板上で起こる重力流れや平板による掘削時に生じる複雑な流れなどを対象とした数値シミュレーションを行い、これらの問題の定量的な予測が可能であることを示している。特に、 $\mu(I)$ レオロジーモデルに代表される従来の局所モデルでは表すことが困難な、急峻かつ連続的な速度分布を伴うせん断帯の形成や、せん断帯幅の粒子サイズ依存性などの特徴を表すことが可能であることを示している。また、これらの検証計算を通し、強い圧力依存性や完全に非局所的となる均一な流れ場に対する不適合性など、定常 NGF モデルが有する問題点を明らかにしている。
3. 工業的な問題の多くにおいて、粉粒体は近接粒子間に生じるファンデルワールス力や液架橋力などの付着力の影響を強く受ける。付着力の影響は周囲の粒子に伝播するため、非局所性に対しても影響を与えと考えられるが、これまでほとんど検討が行われていない。今後の定常 NGF モデルの拡張を目的とし、付着性を有する粉粒体問題に対する基礎的な検討を行っている。ボトムクエットセルを対象として、連続体モデルでは直接考えることができない近接二粒子間の液架橋形成を考慮した DEM 計算を行い、これから得られた粒子データ群に対して粗視化を行うことにより、歪み率、応力、充填率や粉体流動度などの連続量の算出を行いつついる。表面張力を広範囲に変化

させることにより、液架橋の形成により生じる付着力がせん断帯形成などの粉粒体のマクロ挙動に与える影響を調べている。最大付着力により特徴づけられるボンド数と、非局所性を司る粉体流動度を粉体温度により無次元化した無次元粉体流動度との間に一般的な関係があることを明らかにし、関係式の提案を行っている。これは、今後定常 NGF モデルの拡張を行う上で重要な知見である。

以上より、本研究は非局所性の影響を考慮した定常 NGF モデルを汎用流体ソルバー上に数値実装し、自由界面を伴う多様な粉粒体問題の数値シミュレーションを可能とするものである。今後の粉粒体の理解促進、非局所モデルの発展や粉粒体に関する工業装置の設計や運用の高度化に資するものであり、博士論文として価値あるものと認める。