

氏 名	くに なか ひろ と 國 仲 寛 人
学 位 の 種 類	博 士 (人間・環境学)
学 位 記 番 号	人 博 第 242 号
学位授与の日付	平成 16 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	人 間 ・ 環 境 学 研 究 科 人間・環境学 専 攻
学位論文題目	Theoretical and Numerical Studies of Inelastic Impacts of Elastic Materials (弾性体の非弾性衝突に関する理論的及び数値的研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 富田博之 教 授 宮本嘉久 助教授 早川尚男 助教授 阪上雅昭

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、巨視的物体の衝突におけるはねかえり係数がどのように決まるかを、主として2次元質点-バネ系モデルの数値シミュレーションに基づき解析したものである。

1章では、本研究に至る以下のような歴史と背景を詳細に述べている。はねかえり係数はニュートンによって導入され、今日でも初等物理学においては衝突速度に依存しない物質定数であると教えられている。しかしながら、17世紀当時の実験ならいざ知らず、ある程度の精度をもった実験を行えば、正面衝突においてもはねかえり係数は衝突速度に依存し、同じ物質でも形状によって大きく異なったのはねかえり方をすることはよく知られている。近年、粉体の物理の研究が盛んになるにつれて、従来機械工学の分野で行われてきたこの研究に物理学からのスポットが当たるようになってきた。さらにこの衝突現象は、巨視的物体の内部でエネルギーが多数の自由度に分散し散逸が生じる機構を考察する思考実験のためのケーススタディとして捉えることも可能である。

こうした背景に基づき、申請者は2次元円盤の衝突を主として数値的手段により調べている。申請者のモデルはバネと質点から構成された単純な格子力学系であり、単にはねかえり係数の計算のみならず、エネルギー散逸の機構を明らかにすることを目的としている。まず2章において、円盤と内部構造をもたない壁との正面衝突をシミュレーションで調べ、その結果を既存の理論や、振動モードに分解した解析と比較することを試みている。その結果、当初の予測に反して、はねかえり係数は内部散逸パラメータに大きく依存し、衝突に伴う格子振動の励起だけでは不十分であることを明らかにしている。さらに3章では、壁もバネと質点から構成される内部構造のある規則格子系とし、垂直はねかえり係数に対する壁の厚さの影響を調べている。

4章では、円盤と内部構造のある壁との間の斜め衝突の数値解析を行っている。その結果、表面のラフネスが衝突に伴う回転において重要であること、実験に近い結果を有限サイズの系のシミュレーションで得るには規則格子では無理であり、ランダム格子を用いる必要があることなどを明らかにしている。さらに、斜め衝突のはねかえり係数をMaw等の現象論に基づいて解析し、シミュレーションの結果を説明することに成功している。

5章では、本論文の最も重要な内容として、最近の実験で報告されたはねかえり係数が1を越える現象を数値計算によって再現し、さらにその物理的機構を明らかにしたことを報告している。この特異な現象は、壁と衝突円盤の硬度が異なる斜め衝突の際に普遍的に現れる現象であると考えられる。申請者は、円盤より壁の方が硬い場合と、逆に壁の方が極端に軟らかい場合のいずれかにおいても、はねかえり係数が1を越えることをシミュレーションにより示している。特に壁が軟らかい場合は、円盤の衝突によって円盤が壁にめりこみ、衝突後の円盤の軌道が変わることによってはねかえり係数が1を越えることを、詳細な数値計算と部分的に弾性論を援用した現象論によって説明することに成功している。一方で、最近の実験では調べられていなかった、ある衝突角度を越えるとはねかえり係数が低下する事実をも発見している。この現象を解析する上で鍵となるのは、摩擦係数の見積もりである。数値シミュレーションにおける衝撃から計算された摩擦係数はある角度

でピークをもち、さらに小さい角度で表面に沿うように入射すると摩擦係数が低下する。シミュレーションでは、表面に沿うように入射すると壁のへこみを作らずに表面の突起を潰しながら滑るようにはねかえることが観測されている。摩擦係数の低下によってはねかえり係数が低下することは直観に訴えるものであり、この観測事実に基づいた現象論を立て、観測事実を再現することが可能と考えられる。申請者はこの手続きに基づき、数値計算の結果を再現することに成功している。

6章では板の厚さにはねかえり係数がどのように依存するのか、粘性散逸の効果はどの程度重要であるのか、このモデルで弾性論の標準的な理論であるHertzの接触理論は再現できるのか等の問題についても、慎重に検討を加えている。例えば粘性散逸がある場合にはHertzの接触理論は回復し、衝突の準静的理論の予言通りに振る舞うことなども確認している。

このように本論文は、2次元弾性円盤と壁の衝突について多角的に解析を行い、いくつかの重要な成果を得たものである。

論文審査の結果の要旨

本研究は、高等学校をはじめ初等物理学の教科書で必ず取り上げられている、巨視的物体の非弾性衝突に関するものである。殆ど全ての教科書において、ニュートンの観察に基づき非弾性衝突のはねかえり係数は単純に一定として扱われているが、近年、この問題はより奥深い物理を含むことが認識されるようになってきている。特に、一見したところエネルギー保存則があたかも破られているかのように見える、はねかえり係数が1を越える実験事実が報告されるに及んで、この基本的な問題を再吟味することが必要になってきている。

申請者は既に、バネと質点による古典力学的な内部自由度を持つ弾性円盤を構成し、その衝突を数値的に調べることによって、従来知られていなかった結果を次々と報告している。特に、数値シミュレーションにより上記のはねかえり係数が1を越える斜め衝突現象を再現するとともに、弾性論を援用した現象論によりその機構を半定量的に明らかにしたことは大いに注目される成果であり、既にプレプリントの段階でレビュー論文にも引用されている。弾性体の内部自由度が巨視的物体の応答現象にどのように影響を与えるのかは応用上も重要であり、申請者の今後の研究の進展が期待される。本申請論文は、申請者による以上の結果をまとめたものである。

斜め衝突においてはねかえり係数が1を越える現象を実現する上で鍵となるのは、まず軟らかな壁を用いることであり、さらに衝突円盤のエネルギーを固定して、衝突させることである。また解析の上では摩擦係数の大きさの見積もりも重要である。申請者は、数値シミュレーションにおける衝撃から計算された摩擦係数がある衝突角度でピークを持ち、さらに表面に沿うように小さい角度で入射すると摩擦係数が低下することを見出した。シミュレーションでは、表面に沿うように入射すると壁のへこみを作らずに突起を潰しながら滑るようにはねかえることが観測された。摩擦係数の低下によってはねかえり係数が低下することは直感的に理解しやすい事実であることから、この観測事実に基づいた現象論を組み立て、観測事実を再現することが可能となる。申請者は部分的に弾性論を採用すると同時に、この現象論的な手続きに基づき、みごとに数値計算の結果を再現することに成功している。

その他にも、内部構造のある壁と円盤の斜め衝突において、表面のラフネスが衝突に伴う回転にとって重要であること、有限サイズのシミュレーションにおいては規則格子に質点を配置させた系では実験に合致する結果を得るには限界があり、ランダム格子を用いる必要があることなどを明らかにした。さらに斜め衝突のはねかえり係数をMaw等の現象論に基づき解析し、シミュレーションの結果をほぼ説明することに成功した。これらの成果も投稿論文のレフェリーにより、今後この分野における標準的な結果になると評価されたことに象徴されるように、大いに意義のあるものである。

申請者の以上の研究成果は、既に第1著者の論文として国際誌に掲載またはプレプリントとして公表されている。本論文はその成果を総括的にまとめた形になっており、学位論文としてふさわしいレベルに達したものである。

さらに公聴会に先立ち調査委員全員の出席のもとで、予備審査を行った結果、申請者は本論文の背景、目的から計算の詳細、解析における問題点、今後の課題や展望等についての質疑および幾つかの勧告に対して、正確な応答を行うとともに的確に対処した上で公聴会に望み、物理学の範囲にとどまらない広い学識を披露した。以上により、本学位申請論文は、学問的研究をめざして創設された人間・環境学専攻分子・生命環境論講座にふさわしい内容を備えたものと判断される。

よって本論文は博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また平成16年1月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。