

# 論文審査の結果の要旨

氏名 和田 浩二

本研究は天体衝突によるクレーター形成過程、特に掘削段階とよばれる過程の素過程を明らかにするための手法として、Distinct Element Method (離散要素法、以下では DEM と省略する)による衝突の数値シミュレーションコードを開発し、粉体層への垂直衝突のシミュレーションを行ない、その結果について検討したものである。DEMによる衝突のシミュレーションは本研究によってはじめて行われたものである。

第1章では、クレーター形成、特に掘削段階の理解について過去の研究成果のレビューを行いその問題点が指摘されている。衝突クレーターの形成過程は天体の衝突・衝撃波の伝播(圧縮段階)から始まり、孔の掘削(掘削段階)を経てトランジェントクレーターの崩壊(緩和段階)に至る。このうち掘削段階とそれに伴うイジェクタの放出は、衝突クレーター形成の最も主要な過程ともいえる。これまで、イジェクタの放出過程を理解するために、粉体層(砂粒やガラス粒)への衝突実験が行われてきた。また、その実験結果を基にイジェクタ速度分布に関する幾つかのスケーリング則が得られている。しかしながら、室内実験においては、高速度で飛散する微小なイジェクタ粒子を精度良く観測することが難しく、不十分な点が多い。一方で、衝突の数値シミュレーションも近年盛んに行われるようになってきた。数値計算を行なう利点としては、例えば、実験では測定不可能な時空間分解能でデータが得られる、などがある。しかしながら、従来の計算手法は、いずれも媒体を流体(連続体)近似するものである。このことから、第1章では、個々のイジェクタ粒子の放出過程の解析のためには、連続体ではなく個々の離散的粒子の運動を扱うことが必要であることが述べられる。最後に、DEMは個々の粉体粒子の運動を離散的に取り扱うため、粉体層への衝突及びイジェクタの運動を的確にシミュレートし得ると期待できることが述べられる。

第2章では、本研究で用いられる DEM が解説される。DEM は主に粉体工学や土木工学の分野で開発・応用されてきた手法である。DEM においては、各時間ステップごとに接触粒子による粒子間相互作用(弾性力・摩擦力)を着目粒子について求め運動方程式を解くことで個々の粒子の運動を計算していく。本研究では粒子間相互作用のモデルとしては、バネとダッシュポットが並行に繋がったフォークトモデルを用い、接線方向には摩擦スライダーも導入されている。バネは弾性力を、ダッシュポットはエネルギー散逸を実現し、反発係数に応じた力を与える。また、摩擦スラ

イダーは摩擦係数に応じた適切な摩擦力を実現する。なお計算法の詳細は Appendix A-E でも述べられている。

第3章は本論文の主要部分である。この章では、粉体層への衝突の数値シミュレーション実験の詳細とその結果が述べられる。半径1mmの同径球(石英の物性値を使用)約38万個をターゲットとして直方体の箱(20cm×20cm×7cm)の中に堆積させる。これにターゲット粒子の2~4倍の大きさの粒子(アルミの物性値を使用)を様々な衝突速度(100~900m/s)で衝突させる。粒子間には固着力・転がり抵抗は考えない。また、壁での反射波の発生を極力抑えるために、壁の反発係数は0に設定する。衝突粒子の大きさや衝突速度の他に、粒子間の反発係数や摩擦係数をパラメータとして振って計算している。粉体層モデルの生成は Appendix F で詳述される。DEM の不利な点として、多くの粒子を扱うためには高性能の計算機が要求されるが、本研究では並列化して計算を行なっている。それでも計算には時間がかかるため、トランジェントクレーターがほぼ形成された段階で計算を終了させている。

次に、イジェクタ速度分布などの結果を、従来の砂への衝突実験の結果と直接的に比較し、DEM による数値計算の妥当性の検証を行っている。ここでは、1)イジェクタ放出位置と放出速度の関係、2)イジェクタ放出位置と放出角度の関係、3)イジェクタ放出速度と放出量の関係、について各々実験結果と比較を行なった。これらの数値計算の結果は、実験結果と概ね調和的であることが示されている。

従来の実験結果では、イジェクタ放出速度と放出量の関係は、低速の領域、高速の領域で結果が連続的につながらないことが知られていた。低速のイジェクタの計測と高速のイジェクタの計測を同時に行うことの困難もあり、中間領域がどのようにつながるかはよく分かっていなかった。本研究では連続分布としてイジェクタ放出速度と放出量の関係が得られ、その結果は、低速領域・高速領域ともに、実験結果と調和的であり、中間領域がどのようにつながるかについての示唆が得られた。また、高速領域における大きな傾きから、放出速度にカットオフがあることが示唆された。このカットオフは室内実験では観察が困難な衝突点付近での現象に起因すると考えられる。原理的には DEM は衝突点付近の現象を明らかにすることができるため、シミュレーション結果が室内実験の結果と整合的であることも相まって、DEM シミュレーションが掘削流やイジェクタ放出過程を明らかにする上で有効な手段となり得ることが示された。

なお、DEM 実験のモデルパラメータとして導入された、粒子間の反発係数や摩擦係数は結果に大きな影響を与えていないことが示された。弾性定数が大きくなるほどトランジェントクレーターの半径は大きくなる傾向は見いだされたが、これもあまり大きな影響ではない。このように個々の粒子の物性が大きな影響をもたないことは、掘削流が隣接粒子間の相対速度が小さい「粒子群」として振舞うことを示唆している。

第4章ではMaxwell らによって提唱されたZ-モデルとシミュレーションの結果が

比較された。Z-モデルは、衝突クレータ形成時の掘削流を解析的に表現するモデルである。定常非圧縮流であることや粒子速度の動径成分が距離の $-Z$ 乗で減衰するという簡単な仮定から、ある点(流源)からの流線が与えられ、掘削領域の推定などに用いられる。非常に単純なモデルでありながら、その結果は室内実験をよく説明することが知られている。しかしながら、現実のクレータリングは非定常であるなど、Z-モデルが掘削流を適切に表現できているか疑問である。これまで実験や数値計算においてこのZ-モデルの妥当性が検証されてきたが、実験においてはターゲット内の運動を直接観察することは困難であり、数値計算においても有限差分による連続体近似計算のためにターゲット内粒子の運動追跡が困難である。したがって、これまでのところ、実際にターゲット内の粒子がZ-モデルで予想される流線に沿って運動しているか否か、ということは不明確であった。本研究のDEMによる衝突シミュレーションによって得られた粒子の流跡線とZ-モデルの流線を比較してみた結果、両者は良く一致していることが示された。このことは、ターゲット粒子がZ-モデルで予想された流線に沿って運動していることを示唆している。この場合の非定常性は流線に沿った速度が一定ではないことだけに現れていることが示唆される。また、単位体積あたりの粒子数から求めた密度も、誤差の範囲内で一定とみなせることが示された。これらの結果は、ある程度空隙のある粉体層においても、非圧縮流を仮定するZ-モデルが掘削流の簡便かつ良い近似であることを示している。これは、粒子に変形がなく、「粒子群」として運動するため、おおよそ非圧縮媒体として振舞う結果であると考えられる。

本研究は衝突クレータリング、特にイジェクタ放出過程解明のために、はじめてDEMによる数値シミュレーションコードを開発し、粉体層への垂直衝突のシミュレーションを行なったものである。イジェクタ速度分布などに関して実験結果と比較して、DEMによる衝突シミュレーションは、実験結果と調和的であることを示し、DEMの計算結果の妥当性を示すことに成功した。さらに、室内実験では困難な、掘削流やイジェクタ放出過程の解析に有用であることを示した。また、掘削流は、概ねZ-モデル的流線に沿うことが確かめられた。今後、この手法は斜め衝突など様々な問題への適用が期待される。将来的な応用が広く、発展性が高く、価値が高い研究であるといえる。

本論文は全体として松井孝典博士、千秋博紀博士との共同研究であるが、論文提出者が主体となって数値計算コードの開発、計算および結果の解析を行ったものであって、論文提出者の寄与が充分であると判断する。

したがって、博士(理学)を授与できると認める。