

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26560188

研究課題名(和文) 10kmの大気を通する10mの極超音速隕石のシミュレーション

研究課題名(英文) Simulation of the entry of an asteroid of ten meters into atmosphere of ten kilometers

研究代表者

孫 明宇 (Sun, Mingyu)

東北大学・流体科学研究所・准教授

研究者番号：00311556

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では現実的な計算コストで小隕石落下時の被害範囲を予測するために、小隕石に対して大きなセルを用いても解析可能な小隕石近似解析モデルを構築した。衝撃波の2次元及び3次元の構造を確認できた。さらに、より実現象に即した解析を行うために鉛直方向の大気モデルを構築、導入した。その結果、大気分布の有無により圧力値が大きく異なることが分かり、大気分布の必要性が高いことが示された。この解析手法を用いて、小隕石の速度・角度を変えながら様々な条件下で解析を行い、地表面の加圧範囲について調査した。小隕石落下点の周辺50km範囲内の1500Pa以上の加圧分布を約1時間程度で解析可能にした。

研究成果の概要(英文)：In February 2013, a meteorite dropped in Chelyabinsk, Russia, similar to the Tunguska event in 1908. In this work, we try to calculate the pressure using the technique of computational fluid dynamics (CFD). Our idea is to construct a numerical analysis model that can work more effectively even if the grid is much larger than the meteorite. We treat the small meteorite as a subgrid-scale particle with a finite volume. The Subgrid Closure Model (SCM) was used to handle the movement of subgrid-scale particle while maintaining the entropy condition. We calculate the far-field pressure and evaluate the validity of SCM method. The vertical structure of the atmosphere is also modelled, and it is found that the vertical structure has a significant impact on the over pressure on ground. We succeeded in predicting the overpressure distribution in a region of 50km near the meteorite falling location in one hour using a supercomputer with 128 processors.

研究分野：流体工学

キーワード：衝撃波 隕石突入 大気層 災害 CFD

1. 研究開始当初の背景

(1) 2013年2月、質量約10kt、大きさ約17-20mの隕石が速度約19km/sで地球大気圏に突入し、ロシア南部のウラル地域、チェリャビンスク州に落下した。この隕石による自然災害は、落下運動および爆発に伴う衝撃波で市街地の建造物に大規模な被害をもたらしたことで知られている。また、NASA(National Aeronautics and Space Administration)の調査では、大気圏で消滅したものを含め、地球への天体衝突が1994年-2013年の間に556件起こったとされている。

(2) NASAは2016年1月にPDCO (Planetary Defense Coordination Office) と呼ばれる部署の設立を発表した。このPDCOは地球に接近するNEOを素早く発見、分析することを目的としており、天体衝突に伴う自然災害への意識は高まりつつある。また、チェリャビンスクに日本の研究機関のチームが赴き現地調査報告を行うなど、日本国内においても隕石災害に対する関心が広がっている。このような現状の中、天体衝突による被害を最小限に抑えるための研究や対策が数多くなされている。その一つとして、危機管理・防災対策の観点から隕石落下時に生じる衝撃波が地表に与える影響を事前に把握する技術が必要であると考えられる。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、小隕石落下時の被害範囲を予測できる技術を構築し、その結果について考察することで、危機管理・防災対策に寄与することを目的とした。

(2) 具体的には、現実的な計算コストで被害範囲を予測するため、小隕石に対して大きなセルを用いても解析可能な小隕石モデルを構築した。これは、小隕石の大きさ(数十m)と解析領域(数十kmから数百km)のスケールが大きく異なり、従来手法では計算時間・計算メモリ等の観点から解析を実行することが難しいためである。さらに過去の研究で詳し

く考慮されてこなかった、鉛直方向の大気構造(密度・圧力・温度)を3次元計算領域に組み込み、より実現象に即した解析を行った。この大気構造の必要性を評価するとともに、小隕石の速度・角度を変えながら様々な条件下で解析を行い、地表面の加圧範囲について調査した。

3. 研究の方法

(1) 本研究では主に圧縮性気液二相流現象の解析において、Lagrange-Remap Methodに基づく圧縮性流体プログラムが用いられてきた。この解析プログラムは格子間の相互作用をLagrange-Remap Methodで、格子内の相間相互作用をSubgrid Closure Modelで計算するものである。格子間の相互作用と格子内の相間相互作用を分けて処理することで、大小さまざまなスケールが混在する現象を解析できる、すなわちスケールの多重性という問題を解決できることが本解析プログラムの長所である。過去の実例を挙げると、これまでClark-Y翼型を始め、NACA0015翼型、液体ジェットメス、水中放電誘起による単一気泡の崩壊、インデューサ周りのキャピテーション流れなどを解析対象に利用されてきた実績がある。本研究では、この解析プログラムを小隕石の運動解析に適する形に再構築することで、セルより小さな物体を扱うと同時に遠距離場の衝撃波を解析することに対処した。

(2) 小隕石突入現象とともに遠距離場の衝撃波を従来の技術で解析することは、計算コストの観点から困難である。なぜなら小隕石は数十mのオーダーであるのに対し、解析領域は数十kmから数百kmにも及ぶためである。これに対処するため、過去の研究では粒子解析コードを用いて、小隕石の突入現象をシミュレーションした結果が報告されている。これに対し、本研究では混相流解析手法であるSubgrid Closure Modelにおいて、固相を小隕石、気相を大気とみなして小隕石モデルを構築し、解析を試みる。本モデルを用いること

により、小隕石よりも大きい格子で計算ができることに加えて、粒子解析では考慮されてこなかった小隕石の体積を加味することができる。したがって、計算コストを抑えたうえで、より実現象に近い解析結果が得られることが予想できる。

(3) 小隕石は宇宙空間より飛来し、大気圏を極超音速で通過する。大気圏を構成する地球大気は空間分布を持っており、特に高度100kmまでの鉛直方向に対しては密度・圧力・温度が大きく変化する。これら密度・圧力・温度は、小隕石が受ける抗力や発生した衝撃波の伝播などに影響を与えるものと考えられる。したがって、小隕石突入に伴う衝撃波伝播の数値シミュレーションを行う際には、実際の大気の鉛直構造を計算条件として考慮することが望ましい。鉛直方向の大気分布を近似するモデルは、観測ロケットの黎明期である1940年代末より数多くのものが提案されてきた。代表的な大気モデルとして、等温大気モデル(isothermal model)が挙げられる。等温大気モデルは大気が分子量一定の理想気体かつ、鉛直方向の温度分布が一定であると仮定するもので、密度・圧力の分布をそれぞれ1つの式で与える事ができる。この時、密度・圧力の高度分布は指数関数によって近似できる。M.J.Aftosmisらの研究では、この等温大気モデルを用いてチェリャビンスク隕石を数値シミュレーションしている。しかし衝撃波の伝播に関するパラメータの一つである音速は、温度に依存する。したがって上空から地表に伝播する衝撃波の解析においては、鉛直方向の温度分布をより正しく与えることによって、比較的正確な数値解析結果が得られるものと考えられる。温度分布を考慮した代表的な大気モデルに米国標準大気(The 1976 U.S. Standard Atmosphere)が挙げられる。この大気モデルは、ラジオゾンデ、観測ロケットおよび衛星を用いた温度測定に基づき標準化されたものである。高度86km以下においては乾

燥大気、分子量一定および理想気体であることが仮定されており、高度86km以上においては分子の拡散分離を考慮したデータが示されている。本研究では、この米国標準大気データを基に、密度・圧力・温度の近似式を算出し、計算条件として与えた。また、本モデルが正しく導入されていることを確認するため、静止状態での鉛直方向の分布と地表面の圧力値が時間経過後も安定的に維持できることを確認した。

4. 研究成果

(1) 本研究では、密度の高度変化を以下に示す5次多項式と指数関数の積であると仮定し、参考値に対してフィッティングを行った。圧力の近似式は、静水圧平衡の関係式を解くことによって求める。最後に温度分布を理想気体の状態方程式により算出する。これらの結果から明らかなように、近似式は高度100kmまでの値を良く近似できていることがわかる。中でも、音速に関わる温度分布を良く近似できていることから、衝撃波の伝播を比較的正確にシミュレーションできるものと考えられる。また、密度・圧力・温度全てにおいて参考値との誤差は大きくても5%程度である。

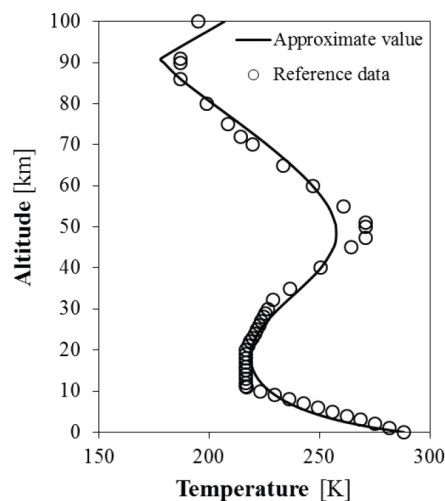
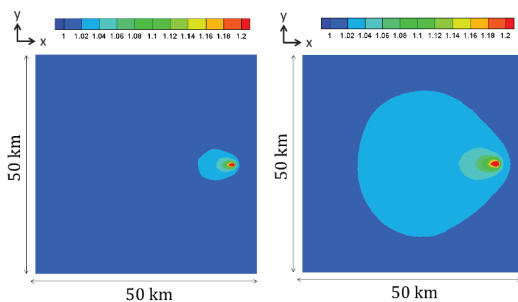


図1. 大気鉛直温度分布の近似式

(2) 図2 a大気分布を一様とした場合の地表面最大圧力値分布を、図2 bに鉛直方向の大気分布を考慮した場合の地表面最大圧力値分布を示す。加圧範囲の形状に着目すると、大気分布の有無による違いはほとんど見られない。一方、圧力値は大気分布の有無によって大きく異なる。結果より、大気分布を考慮した場合の地表面圧力は一様大気分布の場合より高圧になることが分かった。このことから、地表面加圧範囲の予測における大気分布の必要性は高いものと言える。



(a) 一様大気分布 (b) 実際の大気分布

図2 地表での最大加圧

(3) 隕石の初期速度を10kmから30km、射入角度を0°から60°までの圧力時間変化を調べた。様々な初期条件下において、小隕石突入時に伴う衝撃波の3次元的構造とその時間変化を捉えられていることが確認できた。また、広範囲領域の地表面圧力分布が計算可能であることも示されている。地表面では、垂直衝突(射入角度0°)で同心円状に、その他の角度で弧状に衝撃波が伝播しており、定性的にも正しい解析結果が得られていると考えられる。地表面の最大圧力値分布、すなわち地表面加圧範囲の結果を示す。結果より、 $\rho=\rho_0=1:02$ となる加圧範囲は角度の増加に伴って同心円状から釣鐘型に変化することが分かる。さらに初期速度の上昇、すなわち運動エネルギーの増加に伴い、加圧範囲が拡大することも確認できる。またこれらの結果は、鉛直方向の大気分布を考慮した解析結果である。そのため、得られた地表面加圧範囲は実現象に即した結果であると考えられる。

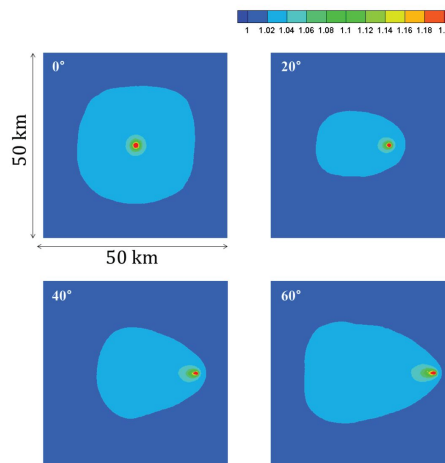


図2 射入角度による地表での最大加圧分布の変化(秒速15km)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計6件)

丸山諒、孫明宇、地球大気への小隕石突入に伴う遠距離場衝撃波圧の数値解析、日本混相流学会混相流シンポジウム、2016.8.8、京都市上京区・同志社大学

丸山諒、孫明宇、小隕石突入時における誘起衝撃波圧の3次元数値解析、平成27年度衝撃波シンポジウム、2016.3.8、熊本県熊本市中央区・熊本大学

丸山諒、孫明宇、小隕石突入時に誘起される遠距離場衝撃波圧の予測、混相流シンポジウム2015、2015.8.4、高知県香美市土佐山田町・高知工科大学

Ryo Maruyama, Mingyu Sun, Toward the Prediction of Far-Field Pressure induced by the Atmospheric Entry of a Small Meteorite, 30th International Symposium on Shock Waves (ISSW30)、2015.7.19、Tel Aviv、Israel

孫明宇、ロシア隕石突入に伴う衝撃波の数値解析：第2報、混相流シンポジウム2014、2014.7.31、北海道札幌市中央区・道民センター

6. 研究組織

(1)研究代表者

孫明宇 (Sun Mingyu)
 東北大学・流体科学研究所・准教授
 研究者番号：00311556