

平成 22 年 6 月 11 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19510175

研究課題名（和文） 爆風により飛散するフライングデブリの軌道予測と危険度評価

研究課題名（英文） Trajectory prediction and risk assessment of a flying debris generated by blast wave loading

研究代表者

坂村 芳孝（SAKAMURA YOSHITAKA）

富山県立大学・工学部機械システム工学科・准教授

研究者番号：00264680

研究成果の概要（和文）：爆風によって飛散するフライングデブリの軌道を予測し、その危険度評価を行うための数値シミュレーションコードを開発した。また、衝撃波管を用いた実験を行い、衝撃波とその背後の気流によって誘起される物体の軌道を計算結果と比較することで、計算コードの検証を行った。その結果、本計算コードによって、高い精度で物体の軌跡および姿勢の変化を再現できることが示された。

研究成果の概要（英文）：In order to assess the risk of flying debris generated by blast wave loading, we have developed a class of numerical simulation codes for predicting their trajectories and impact conditions. A two-dimensional version of our code has been successfully validated by the results from a series of shock tube experiments, in which the shock-induced motion of a solid object was visualized using a high-speed video camera. We have obtained the satisfactory agreement between the simulated and observed trajectories and angular displacement of the object.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学 ・ 社会システム工学・安全システム

キーワード：安全工学、シミュレーション工学、流体工学、爆風、フライングデブリ、数値流体力学、衝撃波管、カットセル法

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会的背景

近年、社会の安全・安心を脅かす事件や事故、災害が頻発している。米国同時多発テロに代表される国際的テロ活動は衰える気配

を見せず多くの犠牲者を生み出しており、化学プラントや原子力発電所等における重大事故も続発している。このような社会情勢を受け、現在、安全で安心な社会の構築に向けた積極的な取り組みが様々な科学技術分野において進められている（文部科学省「安全・安心な社会の構築に資する科学技術政策に関する懇談会」報告書、2004年4月）。

(2) 学術的背景

本研究は上述した取組みの一環として計画されたもので、爆風によって飛散する物体の運動を精度良く予測する数値シミュレータを開発し、爆発事故・災害によって生じたフライングデブリ(flying debris、飛散物)の危険度評価を試みることを目的としている。ここでいう爆風とは、流体力学的には「爆発生成ガスの急激な膨張による誘起される、衝撃波を伴った高速流動」と定義されるもので、非線形波の一つである衝撃波が重要な役割を果たしている。

爆風に伴うフライングデブリの危険性は以前から広く認識されており、その評価も試みられている（例えば、Baker, W. E., *et al.*, *Explosion Hazards and Evaluation*, Elsevier, 1983）。フライングデブリの危険度を評価するためには、まず爆風中でのデブリの運動を予測する必要があり、通常運動方程式に基づいた解析が行われている。デブリに作用し、その運動に影響を与える力には、重力と流体力(周囲の空気から受ける力)があるが、このうち流体力はデブリの形状・速度・姿勢、周囲の空気の速度や密度などにより大きく変化する。

従来の軌道解析では、デブリに作用する流体力を「抗力」と「揚力」とに分解し、経験的に決定される抗力係数と揚力係数を用いて表現していた。任意の形状の物体に対してこれらの係数を予め与えることはできないため、実際の解析では、対象とするデブリに比較的近い形状の物体(球、円柱、円盤など)に対する値を採用していた。また、高速で運動するデブリは少なからず流れ場に影響を与えるはずであるが、従来の方法では、その影響が小さいと仮定し、無視していた。以上のように、従来の軌道解析やそれに基づいた危険度評価は大雑把なものであり、精度の向上が求められている。

近年飛躍的に性能が向上したコンピュータと新しい高精度計算スキームとに支えられた数値シミュレーション技術は、上述した課題を解決しようとする際に、極めて有効なツールとなり得る。実際、衝撃波を伴う流れの数値シミュレーションは現在実用的な段

階にあり、例えば、伝播する衝撃波と空間に固定された物体との干渉現象に対して、本研究代表者らのグループは、実験と定量的に一致する結果を得ている。また、本研究で対象とするような移動境界を含む流れ場に対するシミュレーションについても、本研究代表者らは、抗力係数等の経験パラメータを一切導入せずに、衝撃波により誘起される物体の数値シミュレーションに成功している。

2. 研究の目的

以上のことがらを背景として、本研究は、爆風によって飛散する物体の運動を精度良く予測する数値シミュレータを開発し、爆発事故・災害によって生じたフライングデブリの危険度評価を試みることを目的とする。本研究では、デブリに作用する瞬間的な流体力を流れ場の数値シミュレーションにより求め、厳密に運動方程式に基づいてデブリの軌道を計算すると同時に、デブリ表面で与える境界条件によってその運動の影響を流れ場にフィードバックし、デブリと流れ場との連成を正確に取り扱う。

3. 研究の方法

数値シミュレーションは圧縮性流れに対する支配方程式(質量、運動量、エネルギーの各保存則)に基づいて行われた。支配方程式を有限体積法により離散化し、有限の大きさの微小体積要素(計算セル)内の物理量の平均値の時間変化を逐次計算していく。解の空間精度を高めるため、各計算セルの周囲の情報からセル内の物理量の勾配を再構築して計算を行った。ただし、物理量が急激に変化する衝撃波面近傍で生じる数値的不安定を抑えるため、物理量の勾配の評価に制限関数を導入した。

物体の軌道を予測する数値シミュレーションにおいて、空間的な離散化は直交座標系上の等間隔計算格子、いわゆる直交格子で行った。これは、格子生成の手間が必要ないことに加えて、移動する物体境界の取り扱いが容易であることによる。直交格子上において移動する物体境界はカットセル法によって取り扱った。これは、物体境界によって切断されたセル(カットセル)をそのまま計算で用いるもので、物体の移動の影響はカットセルとその近傍の計算セルに及ぶのみで、その他の計算セルへの影響はない。なお、移動物体境界を取り扱う他の方法として、空間に固定された格子と、移動する物体まわりに固定された別の格子系とを重ね合わせて計算する重合格子法があるが、格子系間でのデータの受け渡しが煩雑になることや物体の個

数が増えた場合多くの記憶容量が必要となることから、本研究ではカットセル法を採用した。

フライングデブリの運動は、流れ場を計算することによって得られた物体表面での圧力に基づいて流体力を計算し、運動方程式を数値的に積分することで、求めることができる。物体の変位および速度は、物体表面上の境界条件を通して、次の段階での流れ場の計算に影響を与えることになり、物体と流れ場との連成現象が計算上で反映される。

開発した数値シミュレーションコードの検証のため、衝撃波管を用いた実験を行った。具体的には、衝撃波管床面に置かれた模擬デブリに衝撃波が衝突した際の運動を実験的に解析し、それと同条件で行った数値シミュレーション結果とを比較することで、計算モデルの妥当性を検証した。主要設備である衝撃波管は30 mm(幅)×100 mm(高さ)の矩形断面を有するもので、試験部には2枚の観測窓が側壁に面一になるように取り付けられており、模擬デブリの運動および流れ場の観測が可能となっている。試験気体には、大気中での爆発現象を想定して、空気を用いた。

4. 研究成果

(1) フライングデブリの軌道計算コード開発

まず、任意形状のフライングデブリの運動を取り扱うことができるよう現有の数値シミュレーションコードを修正した。物体形状の情報はIGESあるいはSTL形式で取り込めるよう数値シミュレーションコード内のデータ管理方法を変更した結果、離散点の集合で表現された任意形状のフライングデブリを取り扱うことが可能となった。

また、計算領域境界で生じる擾乱がフライングデブリの運動に大きな影響を与えることが明らかになったため、マルチグリッド法を新たに採用し、数値シミュレータの改良を行った。その結果、過度に計算資源を費やすことなく、大規模な計算が可能となった。

さらに、既存の2次元コードを3次元に拡張し、より現実的な問題に対応できるように整備を進めた。また、大規模な3次元問題を扱う際に問題となる計算時間の増大およびメモリー空間の枯渇を解決するため、解適合格子法の導入の可能性について検討した。具体的には、衝撃波を伴う非定常流の特徴の検出法を吟味し、統計量に基づいた閾値の決定法の有効性を確かめた。

(2) 検証実験

衝撃波管内で発生させた衝撃波と衝撃波

管床面上に設置した、デブリを想定した物体とが干渉した後に起こる物体の運動を高速ビデオカメラ(毎秒10000フレーム)によって撮影し、軌跡や速度を解析した。その後、この実験と同様の条件で数値シミュレーションを行い、その結果を実験と比較することで数値シミュレータの検証を行った。その結果、実験可能な衝突後6ms間において、高い精度で軌跡および姿勢の変化を再現できることが明らかになった。

(3) 爆風により飛散する物体の運動の数値シミュレーション

物体の飛散に及ぼす諸因子(床面からの距離や初期姿勢)の効果の内訳を、その物理的要因毎に分離し、吟味した。その結果、床面で反射した衝撃波との再衝突が物体の姿勢の変化に、さらにはその飛散軌道に大きな影響を与えること等、新たな知見を得ることができた。

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)

[雑誌論文](計1件)

① 中山勝之、坂村芳孝、不連続面を伴う非定常流に対する効率的な解適合格子細分化法に関する研究、日本航空宇宙学会誌、査読有、第56巻、2008、pp. 363-369

[学会発表](計9件)

① 西野晃史、中山勝之、坂村芳孝、舟渡裕一、直交格子を用いた移動境界を伴う流動解析コードの開発 -IGES形式による物体表現-、日本設計工学会北陸支部平成19年度研究発表会、2007年6月30日、福井大学(福井県)

② 西野晃史、中山勝之、坂村芳孝、衝撃波によって誘起されるフライングデブリの運動の数値シミュレーション、日本機械学会北陸信越支部第45期総会・講演会、2008年3月8日、福井工業大学(福井県)

③ 西野晃史、中山勝之、坂村芳孝、衝撃波により飛散する物体の軌道シミュレーション、安全工学シンポジウム2008、2008年7月10日、日本学術会議講堂・会議室(東京都)

④ 西野晃史、中山勝之、坂村芳孝、伝播する衝撃波により飛散する物体の軌道シミュレーション、日本機械学会北陸信越支部第46期総会・講演会、2009年3月7日、富山大学(富山県)

⑤ 坂村芳孝、西野晃史、中山勝之、衝撃波

により誘起される物体の運動の数値シミュレーションとその検証、平成 20 年度衝撃波シンポジウム、2009 年 3 月 17 日、名古屋大学（愛知県）

⑥ Yoshitaka Sakamura, Akifumi Nishino, Katsuyuki Nakayama, Development and validation of a simulation code for estimating fragment hazards of accidental explosions in aerospace activities, The 27th International Symposium on Space Technology and Science, 2009年 7 月 10 日、つくば国際会議場（茨城県）

⑦ Yoshitaka Sakamura, Akifumi Nishino, Katsuyuki Nakayama, Development and validation of a simulation code for predicting shock-induced motion of solid objects, The 27th International Symposium on Shock Waves, 2009 年 7 月 23 日、Pulovskaya Park Inn Hotel（ロシア）

⑧ 上杉修一、中山勝之、坂村芳孝、衝撃波により誘起される物体の運動の CFD 解析、日本機械学会第 22 回計算力学講演会、2009 年 10 月 12 日、金沢大学（石川県）

⑨ 坂村芳孝、上杉修一、中山勝之、衝撃波と衝突した平板の飛散機構、日本機械学会北陸信越支部第 47 期総会・講演会、2010 年 3 月 10 日、新潟大学（新潟県）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ：

<http://kotori.pu-toyama.ac.jp/sakalab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂村芳孝 (YOSHITAKA SAKAMURA)
富山県立大学・工学部・准教授
研究者番号：00264680

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし