

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22510181

研究課題名(和文) マルチフィジックス統合シミュレーションによる爆発飛散物の影響評価

研究課題名(英文) Assessment of effects of flying fragments generated during accidental explosions by multi-physics simulations

研究代表者

坂村 芳孝 (Yoshitaka, Sakamura)

富山県立大学・工学部・教授

研究者番号：00264680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、爆発飛散物の発生や変形その飛散を同時に解析するためのマルチフィジックス統合シミュレーションコードの開発を最終目標として行われた。飛散物の変形や破壊現象は粒子法で、爆風や飛散物周りの気流は有限体積法によって解析した。その結果、衝撃荷重を受けて変形する弾性体の動的挙動の粒子法解析コードの開発に成功するとともに、カットセル法を用いて、弾性変形によって移動する物体境界を圧縮性流れの数値解析に反映させる方法を確立した。

研究成果の概要(英文)：The final goal of the present work is to develop a multi-physics simulation code for the assessment of the effects of flying fragments generated during accidental explosions. In the present work, we have successfully developed a particle-based simulation code for simulating shock-induced motion of an elastic body, and implemented an algorithm to incorporate moving bodies into the numerical simulations of compressible flows based on the Cartesian cut cell method.

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 飛散物 数値流体力学 粒子法 カットセル法

1. 研究開始当初の背景

爆発現象において、爆発性物質から放出されたエネルギーは主に爆風、放射熱、飛散物に分配され、それぞれ特有の被害を周囲にもたらす。このうち、爆風と放射熱の被害については、これまで行われてきた数多くの実験や理論予測に基づいて、ある程度理解が得られている。一方、飛散物の場合、その発生源である容器・構造物等の破碎過程（固体力学的問題）と急激に膨脹する気体との相互作用（流体力学的問題）によって初速度と加速度が決まり、最終的な飛散距離や衝突エネルギーに大きな影響を与えるため、被害予測の定量化は極めて難しい。このように、爆発飛散物の影響評価は爆発リスクを解析・評価する際の大きな課題となっている（例えば、三宅, *Explosion*, 16-2 (2006), pp. 41-43）。

当然ながら、爆発飛散物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, *et al.*, *Explosion Hazards and Evaluation*, Elsevier, 1983）。

爆発飛散物の危険度を評価するためには、爆風中での飛散物の運動を予測しなければならず、運動方程式に基づいた解析が必要となる。しかし、初期条件である飛散物の初速度と初期位置は容器や構造物などの破碎過程に依存して決まるもので、その予測は困難を極めるため、例えば、発生エネルギーのうち特定の割合が運動エネルギーに変換されると仮定する等して初速度を推定している。さらに、飛散物に作用する流体力はその形状・速度・姿勢、周囲の気流の速度や密度などにより大きく変化するため、従前の軌道解析では、物体の姿勢があまり変化しないものと仮定した上で、飛散物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推定していた。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、対象とする飛散物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、高速で運動する飛散物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、その影響は小さいと仮定し、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手法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、研究代表者は、科学研究費による補助を受けて実施した研究により、経験パラメータを一切導入せずに、衝撃波によって飛散する物体の軌道計算に成功した。この研究では、物体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飛散物の軌道を計算するとともに、飛散物表面

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、飛散物と流れ場との連成をできるだけ正確に取り扱った。しかしながら、この研究は、爆源近傍に静止した状態で置かれた物体（二次飛散物に分類される）を想定したものであり、より大きな初速度をもつ一次飛散物（爆発物と直接接触した容器等の破片）を対象したものではなかった。一次飛散物を取り扱うためには、その初速度を決定付ける破碎（フラグメンテーション）過程をも含めたシミュレーションが必要である。

2. 研究の目的

本研究課題は、以上を背景として計画されたもので、爆発事故による飛散物の発生・変形（固体力学的問題）と飛散（流体力学的問題）をマルチフィジックス（固体物理と流体物理）統合数値シミュレーションによって予測し、爆発飛散物の影響評価を行うことを目指すものである。

3. 研究の方法

(1) 粒子法による固体の変形シミュレーションコードの開発

飛散物の発生・変形の数値シミュレーションを行うため、粒子法に基づくシミュレーションコードを新たに開発する。粒子法は、連続体を仮想粒子の集合体として離散的に表現し、粒子間の相互作用を逐次計算しながらその位置と速度の時間変化を追跡する計算法で、破壊や大規模な変更を伴う物体の動的挙動を取り扱うことができる。本研究では、MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法を採用した（例えば、越塚著「粒子法」、丸善、2005）。開発したコードの妥当性は、実験データが存在している衝撃荷重を受けた軟弾性体の動的挙動 (Mazor, *et al.*, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* (1992) **338**, 237-269) のシミュレーションを行うことで検証する。

(2) GPU を用いた粒子法計算の高速化

粒子法は上述した利点を有するものの、多大な計算時間が必要となることが予想されたため、大規模な並列計算を前提としたコード開発を行う。特に、近年その性能向上が著しい GPU (Graphic Processing Unit) を用いた並列計算は、CPU (Central Processing Unit) 上で逐次計算を実行する場合に比べて、大幅な高速化が期待できる。本研究では、粒子法シミュレーションにおける GPU による並列化の有効性を検討する。

(3) 解適合格子法による計算精度および効率の向上

爆発によって生じる衝撃波やそれに誘起される高速気流の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式）に基づいて行う。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。本研究で対象とする流れ場は衝撃波を伴う非定常圧縮性流れであるので、精度良く再現するために衝撃波や物体近傍の計算セルサイズを十分に小さくする必要がある。しかし、計算領域全体に細かな格子を配置することは、計算資源の制約から難しい。そこで、現有の計算コードに解適合格子法を実装することを試みる。

(4) マルチフィジックス統合シミュレーションによる爆発飛散物の軌道予測

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う。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比較的容易であることによる。直交格子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う。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。

爆発飛散物の運動は、流れの数値シミュレーションによって得られた情報から物体に作用する流体力を計算し、運動方程式を数値的に積分することで予測する。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時刻での流れ場の計算に影響を与えることになり、物体運動と流れとの連成現象が計算上で反映される。この境界条件の取り扱い方法について検証するため、質点-バネ-減衰器からなる1自由度系を対象とした連成シミュレーションを行う。

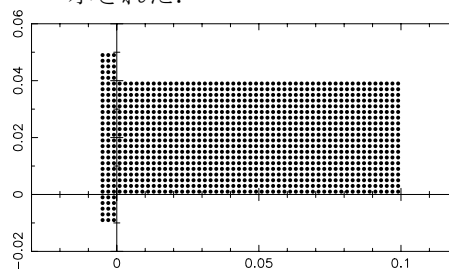
4. 研究成果

(1) 粒子法による固体の変形シミュレーションコードの開発

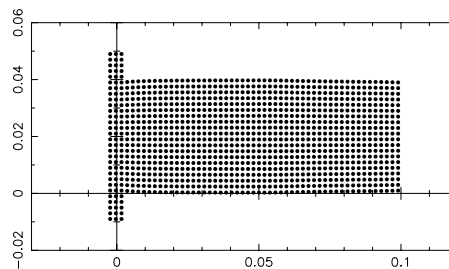
飛散物の発生・変形の数値シミュレーションを行うため、粒子法(MPS法)に基づくシミュレーションコードを新たに開発した。開発したコードの妥当性は、衝撃荷重を受けた軟弾性体の動的挙動のシミュレーションを行うことで検証した。また、開発に際して、ある条件下で計算が不安定になることが明らかになったため、数値積分法による違いや人口粘性項の導入による影響についても調べた。その結果得られた主な結論は以下のようになる。

- ・ 衝撃荷重を受けた弾性体の変形・破壊を粒子法によって定性的に模擬することができた(図1参照)。
- ・ 大きな荷重を受けた場合、数値的な不安定現象が発生し、発散することが明らかになった。この不安定性は、数値積分法の変更によっても取り除くことはできなかったが、人工粘性項を付加することによって抑制することが可能であることが

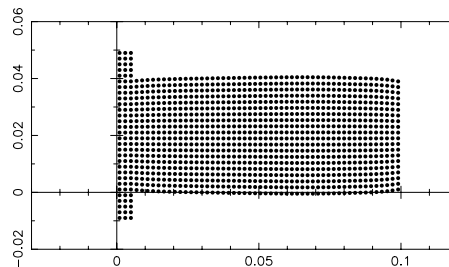
示された。



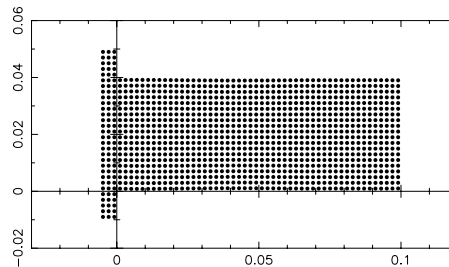
(a) $t=0.0$ ms



(b) $t=1.5$ ms



(c) $t=3.0$ ms



(d) $t=7.0$ ms

図1 MPS法による弾性体の変形シミュレーション結果の一例

(2) GPUを用いた粒子法計算の高速化

GPUによる粒子法シミュレーションの並列化の有効性を検討するため、NVIDIA社が提供するCUDA環境を用いて、多粒子系の運動方程式の時間積分を対象とした数値実験を行った。その結果、GPUへのデータ転送速度が全体の計算速度を律速するものの、GPUが有する圧倒的なコア数による並列処理によって、数十倍(最大60倍)の高速化が達成できることがわかった。

(3) 解適合格子法による計算精度および効率の向上

本研究では直交格子を用いたカットセル法を採用しているため、直交格子に適した解適合手法を検討し、既存のコードに実装した。その結果、時々刻々移動する衝撃波等の不連続面を精度良く捉えることができることに成功した(図2参照)。今後、本アルゴリズムを移動境界を含む流れ場のシミュレーションに適用できるように修正し、マルチフィジックス統合シミュレーションコードに実装する予定である。

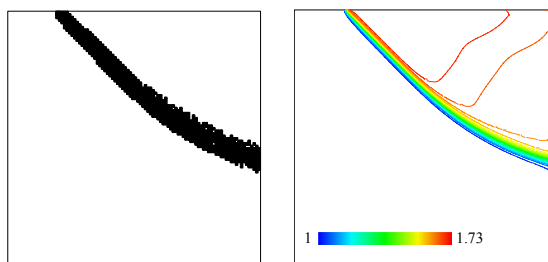


図2 解適合格子とその上で計算された流れ場の様子(等密度線図)

(4) マルチフィジックス統合シミュレーションによる爆発飛散物の軌道予測

流体から力を受けて変形する弾性体の壁面上における境界条件の取扱い方法の妥当性を検証するため、質点-バネ-減衰器からなる1自由度系を対象とした連成シミュレーションを行った。その結果、本シミュレーションコードによる境界の移動は解析的に得られるそれと高い精度で一致することが確認された。このことから、本コードの妥当性が示された。

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 13 件)

- ① Zhang, J., Sakamura, Y., and Nakayama, K., Numerical simulation of shock-induced motion of a rigid body attached to a spring and damper, 日本機械学会北陸信越支部第51期総会・講演会講演論文集, 査読無, (2014) (on USB memory)
- ② 浜崎友, 坂村芳孝, 軟弾性体の粒子法シミュレーションにおける時間積分法に関する研究, 日本機械学会北陸信越支部第51期総会・講演会講演論文集, 査読無, (2014) (on USB memory)
- ③ 垣内勇士, 坂村芳孝, 中山勝之, 解適合直交格子を用いた衝撃波を伴う流れの数値シミュレーション, 日本機械学会北陸信越支部第51期総会・講演会講演論文集, 査読無, (2014) (on USB memory)
- ④ Sakamura, Y., Sugimoto, T. and Nakayama, K., Particle-based

simulation of shock-induced deformation of elastic bodies, Proceedings of the 29th International Symposium on Shock Waves, 査読有 (2014) (in print)

- ⑤ Sakamura, Y., Sugimoto, T. and Nakayama, K., Numerical simulation of shock-induced deformation of an elastic body by a particle method, Proceedings of the 29th International Symposium on Space Technology and Science, 査読有 (2013) (on USB memory)
- ⑥ 坂村芳孝, 杉本崇典, 衝撃荷重を受けた軟弾性体の変形シミュレーション, 平成24年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 査読無, (2013), pp. 141-142
- ⑦ 杉本崇典, 坂村芳孝, 粒子法によるゴムの弾性変形シミュレーション, 日本機械学会北陸信越支部第50期総会・講演会講演論文集, 査読無, (2013) (on USB memory)
- ⑧ 坂村芳孝, 杉本崇典, 衝撃荷重を受けたゴムの弾性変形シミュレーション, 第31回数理科学講演会講演論文集, 査読無, (2012), pp. 61-62
- ⑨ 杉本崇典, 坂村芳孝, 粒子法による軟弾性体の変形シミュレーション, 日本機械学会北陸信越支部第49期総会・講演会講演論文集, 査読無, (2012) (on USB memory)
- ⑩ Sakamura, Y., Uesugi, S. and Nakayama, K., Numerical study on the mechanism of the entrainment of a rectangular solid body by a shock wave, Proceedings of the 28th International Symposium on Shock Waves, 査読有 (2011) (on USB memory)
- ⑪ Sakamura, Y., Uesugi, S. and Nakayama, K., Numerical study of shock-induced entrainment of a rectangular solid body, Proceedings of the 11th Asian Symposium of Visualization, 査読有 (2011) (on USB memory)
- ⑫ 坂村芳孝, 上杉修一, 中山勝之, 衝撃波と衝突した物体の飛散の数値シミュレーション, 日本機械学会北陸信越支部第48期総会・講演会講演論文集, 査読無, (2011), pp. 131-132
- ⑬ Sakamura, Y., Uesugi, S. and Nakayama, K., Development of a simulation code for estimating the risk of flying fragments generated during accidental explosions in aerospace activities, 日本機械学会2010年度年次大会講演論文集, Vol. 5, 査読無, (2010), pp. 405-406

[学会発表] (計 13 件)

- ① Zhang, J., Sakamura, Y., and Nakayama, K., Numerical simulation of shock-induced motion of a rigid body attached to a spring and damper, 日本

- 機械学会北陸信越支部第 51 期総会・講演会, 2014 年 3 月 8 日, 富山県立大学 (富山県)
- ② 浜崎友, 坂村芳孝, 軟弾性体の粒子法シミュレーションにおける時間積分法に関する研究, 日本機械学会北陸信越支部第 51 期総会・講演会, 2014 年 3 月 8 日, 富山県立大学 (富山県)
- ③ 垣内勇士, 坂村芳孝, 中山勝之, 解適合直交格子を用いた衝撃波を伴う流れの数値シミュレーション, 日本機械学会北陸信越支部第 51 期総会・講演会, 2014 年 3 月 8 日, 富山県立大学 (富山県)
- ④ Sakamura, Y., Sugimoto, T. and Nakayama, K., Particle-based simulation of shock-induced deformation of elastic bodies, The 29th International Symposium on Shock Waves, 2013 年 7 月 14 日~19 日, University of Wisconsin-Madison (USA)
- ⑤ Sakamura, Y., Sugimoto, T. and Nakayama, K., Numerical simulation of shock-induced deformation of an elastic body by a particle method, The 29th International Symposium on Space Technology and Science, 2013 年 6 月 2 日~9 日, 名古屋国際会議場 (愛知県)
- ⑥ 坂村芳孝, 杉本崇典, 衝撃荷重を受けた軟弾性体の変形シミュレーション, 平成 24 年度衝撃波シンポジウム, 2013 年 3 月 13 日~15 日, 北九州国際会議場 (福岡県)
- ⑦ 杉本崇典, 坂村芳孝, 粒子法によるゴムの弾性変形シミュレーション, 日本機械学会北陸信越支部第 50 期総会・講演会 2013 年 3 月 9 日, 福井大学 (福井県)
- ⑧ 坂村芳孝, 杉本崇典, 衝撃荷重を受けたゴムの弾性変形シミュレーション, 第 31 回数理科学講演会, 2012 年 8 月 25 日, 東京都立産業技術高等専門学校荒川キャンパス (東京都)
- ⑨ 杉本崇典, 坂村芳孝, 粒子法による軟弾性体の変形シミュレーション, 日本機械学会北陸信越支部第 49 期総会・講演会 2012 年 3 月 10 日, 金沢工業大学 (石川県)
- ⑩ Sakamura, Y., Uesugi, S. and Nakayama, K., Numerical study on the mechanism of the entrainment of a rectangular solid body by a shock wave, The 28th International Symposium on Shock Waves, 2011 年 7 月 17 日~22 日, University of Manchester (UK)
- ⑪ Sakamura, Y., Uesugi, S. and Nakayama, K., Numerical study of shock-induced entrainment of a rectangular solid body, Proceedings of the 11th Asian Symposium of Visualization, 2011 年 6 月 5 日~9 日, 朱鷺メッセ (新潟コンベンションセンター) (新潟県)
- ⑫ 坂村芳孝, 上杉修一, 中山勝之, 衝撃波

と衝突した物体の飛散の数値シミュレーション, 日本機械学会北陸信越支部第 48 期総会・講演会, 2011 年 3 月 5 日, 信州大学繊維学部 (長野県)

- ⑬ Sakamura, Y., Uesugi, S. and Nakayama, K., Development of a simulation code for estimating the risk of flying fragments generated during accidental explosions in aerospace activities, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 2010 年 9 月 5 日~8 日, 名古屋工業大学 (愛知県)

[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]

ホームページ等

<http://sakamurray.wordpress.com/>

本研究に関連した受賞

- ① 日本機械学会北陸信越支部支部賞 (2010 年度 優秀講演賞・一般の部)
- ② 日本機械学会若手優秀講演フェロー賞 (2013 年度)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂村 芳孝 (SAKAMURA, Yoshitaka)

富山県立大学・工学部・教授

研究者番号: 00264680

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし