

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360207
 研究課題名（和文） オイラー記述マルチスケール手法に基づく大規模固体－流体連成解析システムの構築研究
 研究課題名（英文） Development of a numerical method for large scale fluid-structure interaction problems based on multi-scale method using Eulerian description
 研究代表者
 樫山 和男 (KASHIYAMA KAZUO)
 中央大学・理工学部・教授
 研究者番号：10194721

研究成果の概要（和文）：

本研究では、大規模でかつ複雑な自由表面流れを含む固体－流体連成問題や流体力により固体が大変形する問題を精度よく解析可能な数値解析手法を構築した。具体的には、境界形状、境界条件および固体と流体の界面での連続条件を正確に考慮するために、非構造格子を用いたオイラー記述に基づく有限被覆法に基づく手法を開発した。また、複合材料の力学挙動を正確に把握するために、マルチスケール手法の導入を行った。

研究成果の概要（英文）：

A new numerical simulation method which is applicable to large-scale and complicated fluid-structure interaction problem with free surface and large deformation has been presented in this research work. In order to treat the geometry of boundary, boundary condition and continuity condition at the boundary of fluid and structure, a finite cover method using Eulerian description based on fixed unstructured grid has been developed. The multi-scale method has been introduced to solve dynamic behavior of composite materials.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2008 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	7,600,000	2,280,000	9,880,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：オイラー記述、固定メッシュ、有限被覆法、固体－流体連成解析、マルチスケール解析、大規模計算

1. 研究開始当初の背景

構造物の計画・設計において、固体と流体の相互作用の影響が重要となる問題は数多い。近年、コンピュータの飛躍的進歩によりこれらの影響評価を定量的に行う手段とし

て、数値シミュレーション手法が数多く用いられている。これらの問題を正確にシミュレーションしようとする場合には、固相・液相・気相の三相の相互作用を考慮することが重要となる。数値シミュレーション手法は一般にラ

ラグランジュ的手法とオイラー的手法の2つの手法に大別される。ラグランジュ的手法は、固体と流体（流体はさらに気相と液相の界面が存在する）の界面を直接的に表現して、移動メッシュを用いて解析を行う手法であり、オイラー的手法は、固体と流体の界面をある関数により間接的に表現して、固定メッシュを用いて解析する手法である。ラグランジュ法の特徴は、同程度のメッシュを用いた場合には、一般にオイラー法に比べて高精度であるが、ロバスト性に難点がある。一方、オイラー法はラグランジュ法に比べて細かい要素が必要になるが、ロバスト性に優れている。

本研究では、複雑な自由表面流れを含む固体-流体連成解析や流体力により固体が大変形する問題の解析が可能となる手法の構築を目的とするため、ロバスト性に富むオイラー法が有効であると考えられる。ただし、研究の開始段階では、そのような問題の解析を高精度に行うための手法は確立されていなかった。また、連成解析手法の多くが、シングルスケールの方法であり、ミクロスケールの挙動を考慮したものではなかった。

2. 研究の目的

本研究は、固相・液相・気相が混在する複雑な自由表面流れを含む固体-流体解析や流体力により固体が大変形する問題を高精度に解析可能とするため、固定メッシュを用いたオイラー記述に基づく固体-流体連成解析手法を開発することを目的とする。また、固体についてはコンクリートなどの複合材料の破壊現象を考慮した解析を行うため、マルチスケール手法に基づくミクロ・マクロ連成モデルの導入について検討する。

3. 研究の方法

2. の研究目的を実現するため、大きく以下の3項目に分けて実施した。

(1) オイラー記述に基づく固体および流体解析手法の構築

固定メッシュ上で任意の領域形状を持つ固体解析および流体解析を高精度に行う手法として、有限被覆法に基づく方法を構築する。

(2) オイラー法に基づく固体-流体連成解析手法の構築

固定メッシュ上で複雑な自由表面流れを含む固体-流体連成解析や流体力により固体が大変形する問題の解析が可能となる手法として、有限被覆法に基づく手法を構築する。

(3) 固体領域におけるマルチスケール法の導入

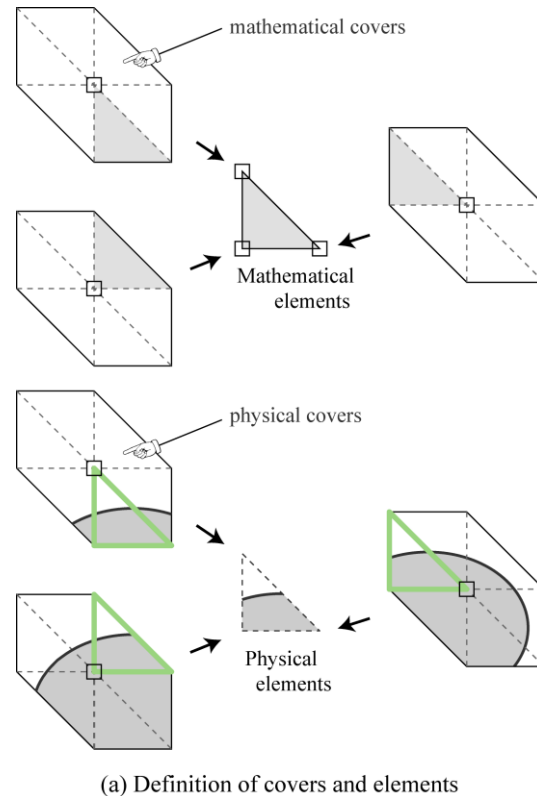
コンクリートに代表される複合材料の破壊現象を考慮に入れた応力解析を可能とすべく、有限被覆法による固体解析において、

均質化法に基づくマルチスケール解析の導入を行った。

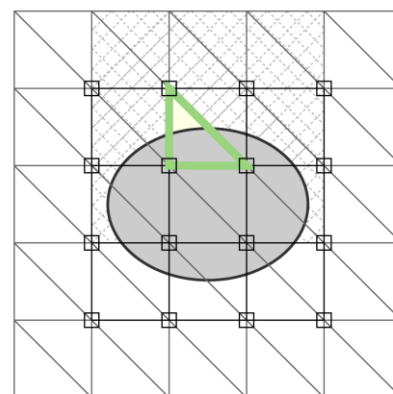
4. 研究成果

(1) 提案手法の概要

固定メッシュ上で任意形状を持つ固体および流体の解析を高精度に行う手法として、有限被覆法 (Finite Cover Method: FCM) に基づく新しい解析手法を構築した。



(a) Definition of covers and elements



(b) Triangular finite cover mesh

図1 有限被覆法における解析メッシュ

有限被覆法は、従来の有限要素法とは異なり、「近似関数が定義される数学的な部分領域 (数学領域)」と「支配方程式が満たされ

るべき物理的な部分領域（物理領域）」をそれぞれ独立に定義できることに特徴がある。有限被覆法では、解析対象とは独立に節点を単位とする単位分解の条件を満足する近似関数（重み関数）を定義する。図 1(a)のように近似関数が定義される領域を「数学被覆:mathematical cover」といい、数学被覆と物体領域の共通領域を「物理被覆:physical cover」という。そして、数学被覆同士の共通領域を「数学要素:mathematical element」、同様に物理被覆同士の共通領域を「物理要素:physical element」といふ、これが有限要素法の要素と対応する。物体領域とは独立に近似関数を定義できるので、図 1(b)のように空間固定のメッシュを用いることができる。

オイラー記述を用いるため、固体および流体共に運動方程式は次式のように与えられる。

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} \quad (1)$$

ここに、 \mathbf{v} は速度、 ρ は密度、 $\boldsymbol{\sigma}$ は応力テンソル、 \mathbf{b} は物体力ベクトルである。いま、operator split法を用いて、式(1)を2つの式に分ける。

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \right)^L = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \right)^E + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = 0 \quad (3)$$

式(2)は外力項を含んだ非移流ステップ、式(3)は移流項を含んだ移流ステップである。

空間固定の解析メッシュを用いるオイラー解法では、図 1 に示すように物体境界上に要素の境界辺や節点は存在しないのが一般的である。したがって、幾何学的境界条件や力学的境界条件を要素の境界辺上で直接課すことができなため、ペナルティ法により考慮する。なお、非移流ステップの解析には、有限被覆法を、移流ステップについてはC I V A法を用いた。

(2) 計算結果の概要

① 固体の大変形問題および流体問題における精度検証

本手法を、押出成型加工解析に適用した。図 2 に示すように、固体境界面に幾何学的境界条件（鉛直下向きに 100m/s の等速度で押し込む）を課した。計算精度と安定性を従来のラグランジュ有限要素法（Lagrangian FEM）による結果との比較にもとに検討した。なお、要素分割幅は両者で同じとした。図 3 に、相当塑性ひずみの比較を、図 4 に 15 μ s

後の固体形状の比較を示す。図より、本手法は境界形状を厳密にメッシュで表現しているラグランジュ有限要素法の結果とよい一致を示していることがわかる。また、ラグランジュ有限要素法では、40 μ においてメッシュが破綻し解析が不能になったが、本手法ではそのようなことがなく大変形問題に対して安定に計算ができることが確認された。

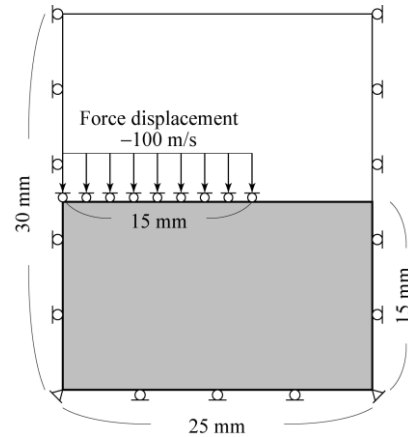


図 2 押出成型加工解析モデル

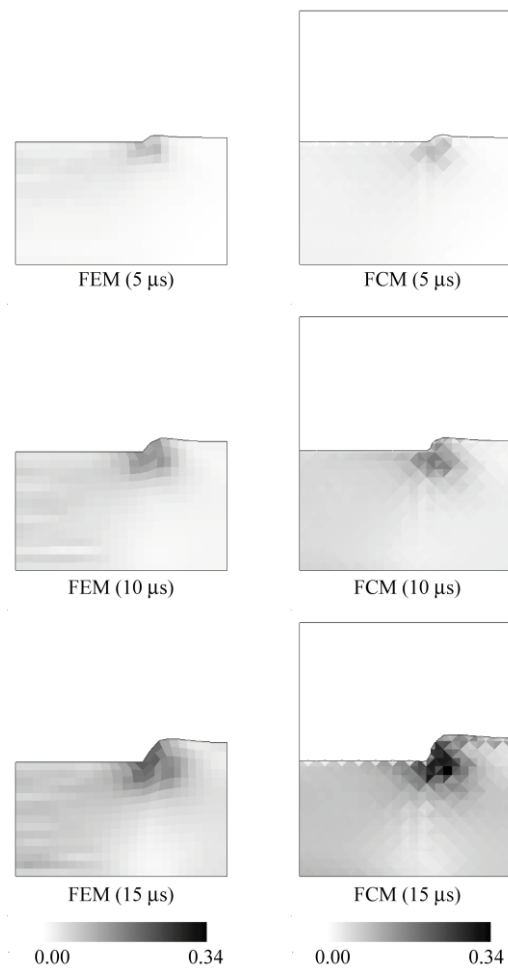


図 3 変形と相当塑性ひずみ分布図

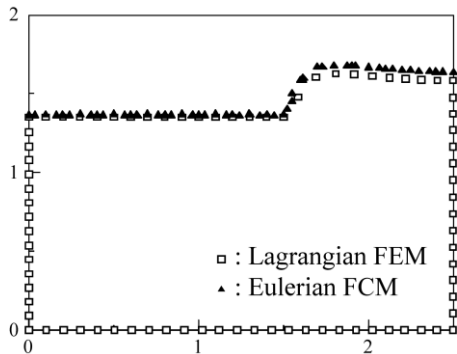


図4 固体形状の比較

次に流体問題に対して、本手法を拡張した。支配方程式は、運動方程式に加えて非圧縮流体の連続式を考慮する。本手法を、非圧縮性粘性流れ解析に適用し、ベンチマーク問題であるキャビティ流れ問題において、従来の安定化有限要素法による結果との比較を行った。

図5に使用した固定メッシュを示す。本手法の有効性を検討するために、あえて解析領域の境界(点線)は要素の境界辺とは一致しない位置に設定している。レイノルズ数は100, 1000, 5000, 10000として計算を行った。図より、本手法は安定化有限要素法(FEM)およびGhiaらによる結果と良い一致を示している。

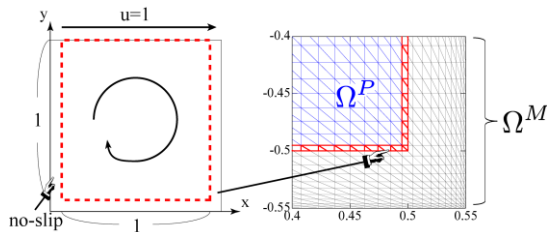


図5 キャビティ流れ問題

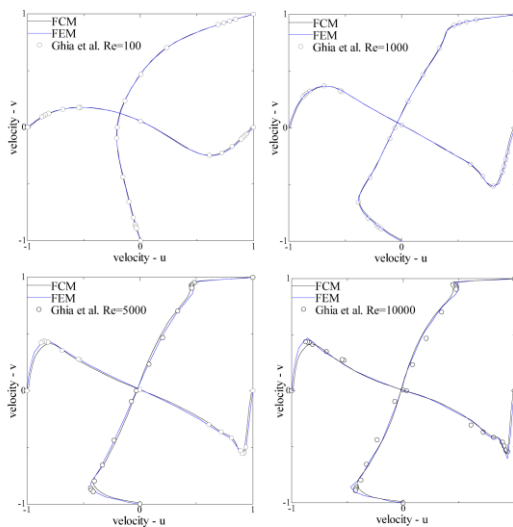


図6 縦横中心線上の流速分布の比較

以上、ペナルティ法を用いた有限被覆法の提案により、従来のオイラー型有限要素法では困難であった、任意境界上での力学的境界条件および幾何学的条件の正確な考慮が可能になった。

②固体-流体連成問題への適用

本手法を、固体-流体連成解析問題に適用した。数値解析例として、図7に示す流体中を強制運動する構造物周りの流れ問題を取り上げた。図8に、各時刻における自由表面形状を示す。図より、構造物の移動に伴う液体の越流現象を安定に解析できていることが分かる。

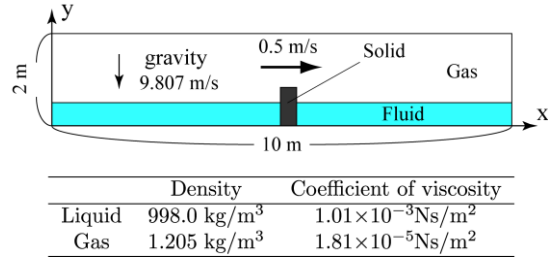


図7 運動する構造物周りの自由表面流れ

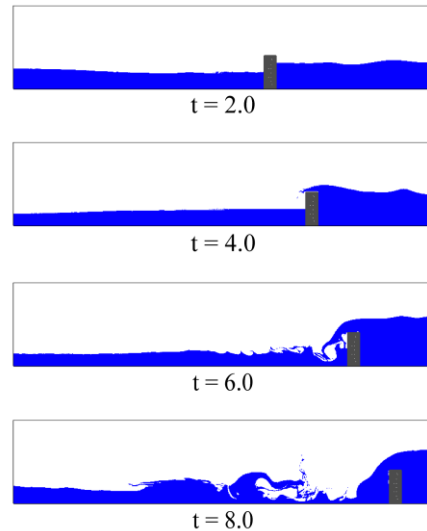


図8 時刻ごとの自由表面形状

次に、大変形する構造物を有する固体-流体連成解析に適用した。本手法の妥当性を検討するため、図9に示す構造物落下問題を取り上げる。内円の直径0.24[m]のリング型構造物を水面上に設け、構造物に初速度0.2[m/s]を与える。なお、流体は水と空気を仮定し・固体は剛性の低い材料(密度500kg/m³、ヤング率:0.05[GPa])を仮定した。なお、本手法では構造物を非圧縮性と仮定しているため、ポアソン比には0.5を用いる。図10に計算結果の一例を示す。図より、固体は流体から力を受け、徐々に楕円形に変形している様子が確認できる。

以上より、変形挙動を定性的にはあるが表現できており、本手法の妥当性が確認された。より定量的な評価が、今後の課題である。

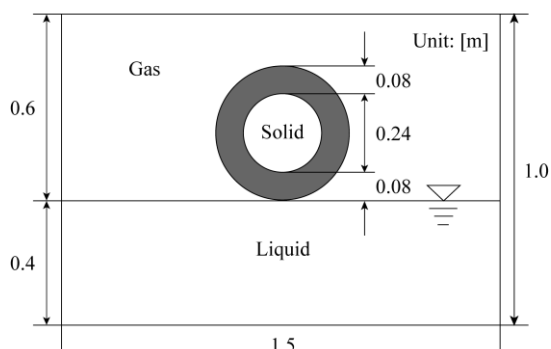


図 9 構造物落下問題

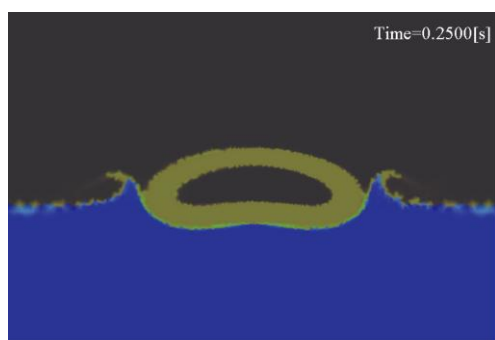


図 10 自由表面と構造物の形状

③ マルチスケール手法の導入の検討

有限被覆法による固体解析において、コンクリートの破壊解析などが可能となるように、均質化法に基づくマルチスケール解析の導入を行い、固体の変形・応力解析を行った。

解析対象は、図 11 に示すような円形の空隙を中央に有する微視構造で構成される単純な非均質体であり、1 要素のマクロ構造を変位制御試験で引張破断させる問題である。平面ひずみ状態を仮定し、材料パラメータは図中のとおりである。なお、コンクリートのひび割れ先端付近における、軟化（微細ひび割れ）を伴う破壊挙動を考慮するために、Cohesive crack モデルを用いている。

図 12 に、マクロ構造の荷重-変位関係とひび割れ進展を含むマイクロ構造の変形・最大主応力分布を示す。なお、本例題では、マクロ構造が一様状態となる条件を課しているので、マイクロ解析結果はどの評価点でも同じである。図より、マクロ荷重-変位関係はマイクロ構造におけるひび割れ進展の影響を受けて、Cohesive crack モデルによる指数関数形の軟化挙動を再現していることが分かる。また、マイクロ構造のひび割れ進展に伴い、Cohesive crack モデルの結合力により応力伝達がマクロな軟化応答に反映されており、周期境界条件下におけるマクロ構造のひび割れ進展挙動も適切に再現されている。

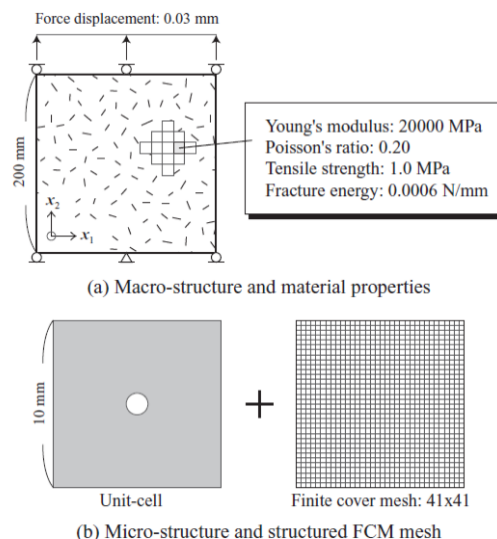


図 11 微視的ひび割れ進展を考慮する固体変形のマルチスケール解析モデル

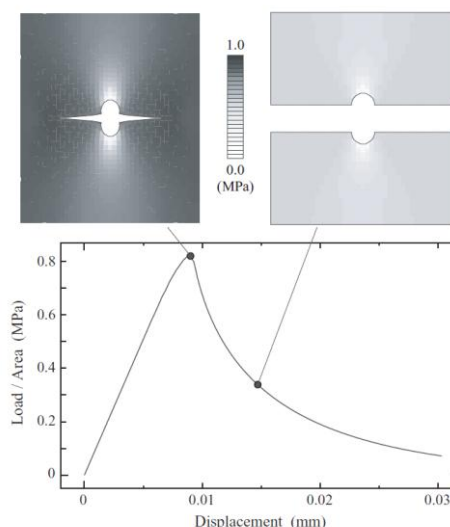


図 12 一軸引張問題におけるマクロ荷重-変位関係とマクロ変形・最大種応力分布

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 7 件)

- ① S. Okazawa, H. Terasawa, M. Kurumatani, K. Terada and K. Kashiwama, Eulerian Finite Cover Method for Solid Dynamics, Int. Journal of Computational Methods, Vol.7, No.1, pp.1-22, 2010, 査読有
- ② 岡澤重信, 車谷麻緒, 寺沢英之, 寺田賢二郎, 檜山和男, Euler 型有限被覆法による大変形固体解析に関する基礎的研

- 究、応用力学論文集，土木学会，12 卷，pp. 195-204，2010，査読有。
- ③ 岩田暁，車谷麻緒，寺田賢二郎，岡澤重信，樫山和男，高速引張載荷を受けるコンクリートのメソスケール破壊シミュレーション，応用力学論文集，土木学会，12 卷，pp. 301-310，2010，査読有。
- ④ 車谷麻緒，寺田賢二郎，グローバル・ローカル有限被覆法の開発とその塩害劣化のひび割れ進展解析への応用，土木学会論文集，64，99，16-26，2008，査読有。
- ⑤ 車谷麻緒，岩田暁，寺田賢二郎，岡澤重信，樫山和男，Cohesive crack モデルを用いた準脆性材料の動的破壊解析手法に関する研究，応用力学論文集，土木学会，11 卷，pp. 201-209，2009，査読有。
- ⑥ S. Okazawa，K. Kashiyama and Y. Kaneko，Eulerian Formulation using Stabilized Finite Element Method for Large Deformation Solid Dynamics，*Int. Journal of Numerical Methods in Engineering*，Vol. 72，pp.1544-1559，2007，査読有
- ⑦ 車谷麻緒，寺田賢二郎，複合材料の非線形解析のためのイメージベース節点積分有限要素法，応用力学論文集，土木学会，10 卷，pp. 91-100，2009，査読有。

[学会発表] (計 9 件)

- ① 中村正人，高瀬慎介，樫山和男，寺田賢二郎，有限被覆法による自由表面を有する流れ解析，第 37 回土木学会関東支部技術研究発表会，2010 年 3 月 12-13 日，東京。
- ② S. Okazawa，H. Terasawa，M. Kurumatani，K. Terada and K. Kashiyama，General Boundary Conditions with Finite Cover Method for Eulerian Solid Dynamics，15th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF09)，1 April - 3rd April，2009，Tokyo。
- ③ 寺沢英之，車谷麻緒，寺田賢二郎，岡澤重信，樫山和男，有限被覆法による Eulerian 動的変形固体解析，第 13 回計算工学講演会論文集，日本計算工学会，2008 年 5 月 19 日-21 日，仙台。
- ④ 岩田暁，車谷麻緒，寺田賢二郎，岡澤重信，樫山和男，Cohesive crack モデルを考慮した動的ひび割れ進展解析手法の構築，第 13 回計算工学講演会論文

集，日本計算工学会，2008 年 5 月 19 日-21 日，仙台。

- ⑤ 寺沢英之，樫山和男，岡澤重信，車谷麻緒，寺田賢二郎，三角形メッシュを用いた有限被覆法による大変形固体解析，第 63 回土木学会年次学術講演会，2008 年 9 月 10-12 日，仙台。
- ⑥ 岩田暁，車谷麻緒，寺田賢二郎，樫山和男，Cohesive crack モデルを用いた動的破壊有限要素解析，第 63 回土木学会年次学術講演会，2008 年 9 月 10-12 日，仙台。
- ⑦ 四谷宣之，田中聖三，樫山和男，CIVA/VOF-FEM による自由表面を有する流体-構造連成解析手法の構築研究，第 21 回数値流体力学シンポジウム，日本流体力学会，2007 年 12 月 19 日-21 日，東京。
- ⑧ 寺沢英之，山田豊，樫山和男，岡澤重信，三角形非構造格子による Eulerian 大変形固体解析，第 62 回土木学会年次学術講演会，2007 年 9 月 12-14 日，広島。
- ⑨ 山田豊，寺沢英之，樫山和男，岡澤重信，非構造格子に基づく Euler 型有限要素法による大変形固体解析，第 12 回計算工学講演会論文集，日本計算工学会，2007 年 5 月 22 日-24 日，東京。
- ⑩ 車谷麻緒，寺田賢二郎，有限被覆法による 3 次元構造部材のひび割れ進展解析，第 12 回計算工学講演会論文集，日本計算工学会，2007 年 5 月 22 日-24 日，東京。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

樫山 和男 (KASHIYAMA KAZUO)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：10194721

(2) 研究分担者

寺田 賢二郎 (TERADA KENJIRO)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40282678

岡澤 重信 (OKAZAWA SHIGENOBU)

広島大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10312620

田中 聖三 (TANAKA SEIZO)

中央大学・理工学部・助教

研究者番号：10439557

(3) 連携研究者

なし