

平成 22 年 6 月 15 日現在

研究種目： 基盤研究 (B)

研究期間： 2007 ~ 2009

課題番号： 1 9 3 4 0 0 2 7

研究課題名 (和文) 特異性を持つ連続体力学の数理研究

研究課題名 (英文) Mathematics study of the continuum mechanics focusing on singularities

研究代表者

大塚 厚二 (OHTSUKA KOHJI)

広島国際学院大学・情報デザイン学部・教授

研究者番号： 3 0 1 4 1 6 8 3

研究成果の概要 (和文): 破壊現象の数理モデルを中心に、工学と数学との研究交流の場として日本応用数学会に研究部会「特異性を持つ連続体力学」を設置し、中断していた 1995 年に始まる工学研究者とのワークショップを再開した。研究成果として、破壊過程を制御することを目的に Griffith のエネルギー平衡理論の修正、一般 J 積分理論の非線形問題への適用、形状最適問題への適用、そして数理指向有限要素計算システム FreeFem++ に関する情報を蓄えるサイトの構築等を得た。

研究成果の概要 (英文): Mainly on the mathematical modeling of fracture phenomena, we constructed the activity group CoMFoS (Continuum Mechanics Focusing on Singularities) in the Japan Society for Industrial and Applied Mathematics, and start the renewal of workshop. We get the results; The modification of Griffith's energy balance theorem for the purpose of control theory on fracture phenomena, the proof of fundamental theorem in GJ-integral theory under nonlinearity of continuum mechanics, the application of GJ-integral method to shape optimization problem with Azegami's method, the construction of the Web site that carried contents of FreeFem++.

交付決定額

(金額単位 : 円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2008 年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2009 年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
年度			
総計	11,500,000	3,450,000	14,950,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：数学・数学一般 (含確率論・統計数学)

キーワード：数理工学、応用数学、モデル化、関数方程式論、破壊現象、最適設計問題、数値計算

1. 研究開始当初の背景

(1) 破壊現象は工学分野では破壊力学とし

て研究され、工学的有効性が示されている。数理モデル構築のため、工学者との

研究交流を目的とする研究集会「破壊の数理研究とその周辺」(1995年～2000年)を開催したが、中断後、2004年度から日本応用数理学会研究部会「特異性を持つ連続体力学」として研究交流を再開した。

- (2) 代表者が3次元破壊現象を記述するために提唱した一般J積分は、偏微分方程式境界値問題での解の特異性を解析するツールとして有効である。破壊力学以外として形状感度解析・形状最適設計問題への利用があると考えていた。
- (3) 偏微分方程式で記述される連続体力学などの分野での研究を志す数学者は、数学、数理モデルの背景理解、数値解析法、そして可視化など幅広い知識を必要とする。このことが、当該分野での数学者育成を困難にしている。

2. 研究の目的

- (1) 従来の研究集会参加者を中心に、海外からの研究者を招聘する研究集会「特異性を持つ連続体研究ワークショップ」CoMFoS(Continuum Mechanics Focusing on Singularities)を開催し、日本における当該分野の研究レベルを上げ、研究者を増やす。
- (2) 一般J積分法は、亀裂先端や異なる境界条件の接合部などに生じる特異性も含んだ形状感度解析が可能であると証明していた。一般J積分法の形状最適設計への具体的計算方法を確立したい。
- (3) 代表者が1995年から関わっていたパリ第6大学 J.L.Lions 研究所の O.Pironneau 教授、F.Hecht 教授が中心となって開発している数理指向有限要素法解析システム FreeFem++を、偏微分方程式の教育研究で利用する方法を検討する。

3. 研究の方法

- (1) 破壊現象を理論研究している各分野での第一線研究者を分担者に迎えた。角洋一教授は、造船分野での亀裂解析の第一人者で、数々の亀裂解析に関する数理研究を行っている。西村直志教授は、境界要素法を用いた連続体の数学研究を行っており、最近では多重極法を用いた大規模高速計算法を研究している。廣瀬壯一教授は、超音波などを用いた非破壊検査分野での第一人者である。伊藤弘道氏は、若手研究者として参加いただいた。パリ第6大学の研究者、ロシア・ラブレチーフ研究所などから海外研究者を招聘し、海外での先端研究を紹介してもらった。研究発表の場として、日本応用数理学会年会でのオーガナイズドセッ

ション、理論応用力学講演会でのオーガナイズドセッション、科研によるワークショップ CoMFoS を設け、研究成果を発表してもらう。研究成果は研究グループの Web サイトで行う。

- (2) 一般J積分法と、畔上秀幸教授の提唱する「力法」との連携を目指した形状最適設計の数値計算法を検討する。
- (3) 代表者も共著者になっている FreeFem++ のマニュアルを日本語訳すると共に、Web を通じた情報公開を行う。

4. 研究成果

- (1) 科研の支援を受けて行った研究発表は次の通りである。

2007年スイスで行われた ICIAM07 でミニシンポジウムを開催し、代表者、伊藤、および海外研究者4名が講演した。日本応用数理学会年会でのオーガナイズドセッションでは、2007年度6件、2008年度10件、2009年度7件の講演があった。

科研によるワークショップ CoMFoS07 では、2007年度は広島国際学院大学で開催し、海外から A. Khludnev (ラブレチーフ研究所 ロシア)、F. Jouve (パリ第7大学、J.L.Lions 研究所、フランス)、J. Sokolowski (ナンシイ第1大学、フランス)、V. Kovtunenکو (ラブレチーフ研究所、ロシア; グラーツ大学 オーストリア)を招聘し、参加者19名、講演数11件だった。

2008年度の CoMFoS09(京大会館)では、海外からフランスの Jean-Claude Nédélec(エコールポリテクニク)、Jean-Baptiste Leblond(パリ第6大学)、Jean-Jacques Marigo(パリ第6大学)を招聘した特別講演と、破壊現象を研究対象とする畔上教授・成川教授以外の分担者が1時間講演を行い、分担者以外では伊東裕也氏(電気通信大学)・堀宗朗氏(東京大学)が講演をした。参加者21名だった。

2009年度の CoMFoS09(湘南国際村センター)では、1995年当時の合宿形式を採用したが、参加者は12名と減ってしまった。この年は別に研究集会を開催するため、海外研究者の招聘はしなかった。講演数は10件だった。

理論応用力学講演会オーガナイズドセッションでは、2008年度が12件、2009年度が10件の講演があった。

数学者を中心とする研究集会「変分法と領域摂動」(2010/2/11～13)では、招待講演8件を含む19件の講演があった。

また、破壊の数理モデルについては次の結果

を得た。

非線形連続体力学に対し、一般 J 積分法での基本定理「特異点を含む形状の摂動に関するエネルギーの変分が、一般 J 積分で記述される」ことを木村正人氏(九州大学)と共に証明した。

破壊力学の基礎となる Griffith のエネルギー平衡理論は負荷一定の条件でしか使えないので、亀裂進展の制御など負荷を変化させる必要がある問題に直接適用ができない。そこで、代表者は負荷の変化を考慮した Griffith 理論の拡張を考え、理論的検証を終えた。今後は、熱割断など具体的問題への適用を考えたい。

角教授による亀裂伸展経路等に関する結果、廣瀬教授による超音波による非破壊検査、そして伊東裕也氏(電気通信大学)による動的破壊現象での弱解の存在は本研究テーマにおいて重要な結果である。

- (2) 形状最適設計問題については、形状感度解析に一般 J 積分法を用い、より最適な形状を畔上法で求める計算プログラムを作成し、次の結果を得た。

畔上法については、強解より弱い弱解より強い滑らかさを仮定して数学的正当性が証明できた。

2次元ポアソン方程式で、ディリクレ及びノイマン混合境界条件に対して面積一定条件でエネルギーを最小にする形状を求めてみた。その結果、まず、特異性を減らす形状に変形していくことが分かった。

- (3) FreeFem++による偏微分方程式で記述された数理解析モデルの教育研究については、2008年2月に研究代表者が J.L.Lions 研究所を訪ね、O.Pironneau 教授及び F.Hecht 教授を訪ねて研究協力を要請し、次の結果を得た。

FreeFem++マニュアルの第3章までを日本語訳して、サイト

<https://sites.google.com/a/comfos.org/comfos/ffempp> に公開した。

2010年1月に F.Hecht 教授を招聘し、FreeFem++に関する最新結果について説明を得た。特に、3次元問題が扱えるようになったことは FreeFem++の重要な発展である。また、Hecht 教授には電気通信大学及び京都大学で講演していただいた。講演で用いたスライドはサイト <https://sites.google.com/a/comfos.org/comfos/ffempp> で得られる。

- (4) 研究代表者は大学で Web サイトについて教えており、TeX に準じた書式言語 OFM を用いて Web ページを作成する自作システム MaKR (Mathematical Knowledge Repository) を用いて研究グループのサイト

<http://www.comfos.org/>

を構築している。MaKR システムは、OFM で記述したファイルを HTML に変換する Perl によるプログラム ofm2html.pl とサイト管理をする特殊ウェブブラウザ MaKRv によって構成されている。

残念ながら、MaKR にはアクセス制限やファイル共有を制限する機能が無いので、この部分は Google Apps を使うことにした。今後は、Google Apps で研究集会のアナウンスやメンバー限定のサービスを行い、公開するウェブページは MaKR を使って作成する予定でいる。

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 33 件)

M. Wunsche, Ch. Zhang, J. Sladek, V. Sladek, S. Hirose and M. Kuna, Transient Dynamic Analysis of Interface Cracks in Layered Anisotropic Elastic Solids under Impact Loading, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 査読有, 78, 2009, pp.131-147

大塚 厚二, 一般 J 積分の最適設計問題への適用、数理解析研究所講義録、査読無、1638、2009、pp. 28-37

Y.Sumii, Crack paths in weld details under combined normal and shear loading, Engineering Fracture Mechanics, 査読有, DOI:10.1016/j, 2010, 11pages.

M. Wunsche, Ch. Zhang, M. Kuna, S. Hirose, J. Sladek and V. Sladek, A hypersingular time-domain BEM for 2D dynamic crack analysis in anisotropic solids, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 査読有, 78, 2009, pp.127-150

M.Ikehata and H.Itou, Extracting the support function of a cavity in an isotropic elastic body from a single set of boundary data, Inverse Problems, 査読有, 25, 2009,105005,(21pp)

K.Ohtsuka, Criterion for stable/unstable quasi-static crack extension by extended Griffith energy

balance theory, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 査読有, 57, 2008, pp.25 - 32

E. Katamine, Y. Kawase, H. Azegami, Shape Optimization of Thermal Forced Convection Fields, Heat Transfer Asian Research, 査読有, 37(5), 2008, pp.313-328

T. Okawa and Y. Sumi, A computational approach for fatigue crack propagation in ship structures under random sequence of clustered Loading, Journal of Marine Science and Technology, 査読有, 13-4, 2008, pp.416-427

M. Ikehata and H. Itou, An inverse problem for a linear crack in an anisotropic elastic body and the enclosure method, Inverse Problems, 査読有, 24, 2008, 025005(21pp)

志戸岡永・大谷佳広・西村直志, 3次元時間域異方性動弾性問題における高速多重境界積分方程式法について, 応用力学論文集, 査読有, 11, 2008, pp.109--116

片峯英次・河瀬賀行・畔上秀幸, 強制熱対流場の形状最適化, 日本機械学会論文集 B編, 査読有, 73, 2007, pp.1884--1891

T. Okawa, Y. Sumi and M. Mohri, Simulation-based fatigue crack management of ship structural details applied to longitudinal and transverse connections, Marine Structures, 査読有, 19, 2007, pp.217--240

吉川仁・西村直志, メッシュの規則性を用いた超音波非破壊評価のための BIEM アルゴリズムの改良, 応用力学論文集, 査読有, 10, 2007, pp.211--216

M. Wunsche, Ch. Zhang, J. Sladek, V. Sladek and S. Hirose, Interface crack in anisotropic solids under impact loading, Key Engineering Materials, 査読有, 348-349, 2007, pp.73--76

H. Itou and S. Saitoh, Analytical and Numerical Solutions of Linear Singular Integral Equations, International Journal of Applied Mathematics & Statistics, 査読有, 12, 2007, pp.76 - 89

[学会発表](計 100 件)

畔上秀幸・岩田侑太郎・片峯英次, 非常 Navier-Stokes 問題における形状最適化問題の数値解法, 日本応用数理学会 2009 年度年会, 2009 年 9 月 30 日, 大

阪大学

大塚 厚二, Griffith エネルギー平衡理論の拡張による周期荷重下での亀裂進展の理論解析, 58 回理論応用力学講演会, 2009 年 6 月 9 日, 日本学術会議

斎藤隆泰, 中畑和之, 廣瀬壮一, 接触境界条件を持つ固体-固体接合界面の改良型時間域境界要素法解析, 58 回理論応用力学講演会, 2009 年 6 月 9 日, 日本学術会議

K. Ohtsuka, Generalization Of J-integral and its applications to sensitivity analysis in mixed boundary value problems and fracture, 8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, 2009 年 6 月 2 日, LNEC Conference Centre, Lisbon, Portugal

H. Azegami, Y. Iwata and E. Katamine, Numerical solution of shape optimization problems for Navier-Stokes problems, 8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, 2009 年 6 月 2 日, LNEC Conference Centre, Lisbon, Portugal

大塚 厚二, 一般 J 積分の最適設計問題への適用, 京都大学数理解析研究所 RIMS 研究集会「数値解析における理論・手法・応用」, 2008 年 11 月 13 日, 京都大学 数理解析研究所

畔上秀幸, 境界値問題が定義された領域の形状および位相最適化問題の正則化解法, RIMS Workshop - 数値解析における理論・手法・応用, 2008 年 11 月 12 日, 京都大学 数理解析研究所

伊東裕也, 進展亀裂を内部に含む弾性体の初期境界値問題, CoMFoS08, 2008 年 10 月 27 日, 京大会館

角 洋一・井上 剛伸, ランダム荷重下の楕円形内部き裂成長シミュレーション, 日本応用数理学会, 2008 年 9 月 19 日, 東京大学柏キャンパス

西村直志, 時間域周期亀裂問題の積分方程式の数値計算法, 応用数理学会, 2008 年 9 月 19 日, 東京大学柏キャンパス

畔上秀幸・海津聡, 連続体の位相最適化問題に対する H1 勾配法, 日本応用数理学会 2008 年度年会, 2008 年 9 月 17 日, 東京大学柏キャンパス

大塚 厚二, Griffith エネルギー平衡理論の拡張による準静的亀裂進展での安定・不安定成長評価基準, 第 57 回理論応用力学講演会, 2008 年 6 月 11 日, 日本学術会議

T. Alan・廣瀬壮一, 2D time domain BEM

analysis for interface crack with contact boundary conditions, 第 57 回理論応用力学講演会, 2008 年 6 月 11 日, 日本学術会議

大塚 厚二・木村正人, 非線形問題での一般 J 積分理論, 日本数学会, 2007 年 9 月 24 日, 東北大学

西村直志, 時間域高速多重極法の超音波非破壊評価への応用, 日本応用数理学会, 2007 年 9 月 15 日, 北海道大学

木本和志・廣瀬壯一, 形状微分を用いた非線形逆散乱解析法の空洞形状再構問題への適用, 日本応用数理学会, 2007 年 9 月 15 日, 北海道大学

K. Ohtsuka, Theory of generalized J-integral, 6th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, 2007 年 7 月 20 日, Zurich University, Switzerland,

H. Itou and A. Tani, A boundary value problem for an infinite elastic strip with a semi-infinite crack, 6th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, 2007 年 7 月 20 日, Zurich University, Switzerland,

K. Ohtsuka, Mathematical modeling of stable quasi-static crack extension by extended Griffith energy-balance theory, 6th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, 2007 年 7 月 16 日, Zurich University, Switzerland,

M. Ikehata and H. Itou, On inverse crack problems in elastostatics, 6th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, 2007 年 7 月 16 日, Zurich University, Switzerland,

〔図書〕(計 5 件)

F. Hecht, O. Pironneau, J. Morice, A. Le Hyaric and K. Ohtsuka, Université Pierre et Marie Curie, Laboratoire Jacques-Louis Lions, <http://www.freefem.org/ff++/>, FreeFem++, Third Edition, Version 3.8, 2010, 336

Md. Mobasher Ahmmad and Y. Sumi, CRC Press, Taylor & Francis Group, Numerical simulation of strength and deformability of steel plates with surface pits and replicated corrosion-Surface, in Analysis and Design of Marine Structures, 2009, 223-230

Y. Kawamura, Y. Sumi and M. Nishimoto,

CRC Press, Taylor & Francis Group
A study on a method for maintenance of ship structures, considering remaining life benefit, in Analysis and Design of Marine Structures, 2009, 279-289

畔上秀幸(矢川元基・宮崎則幸編集), 朝倉書店, 計算力学ハンドブック 21 章最適化, 2007, 619--637

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: き裂進展解析方法

発明者: 角洋一、毛利雅志

権利者: 横浜国立大学・(株) IHI

種類: 特許

番号: 特願 2008-100524

出願年月日: 2008 年 04 月 08 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

日本応用数理学会研究部会「連続体力学の数理」ホームページ

<http://www.comfos.org>

J.L.Lions 研究所 FreeFem++プロジェクト

<http://www.freefem.org/ff++/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大塚 厚二 (OHTSUKA KOHJI)

広島国際学院大学・情報デザイン学部・教授
研究者番号: 30141683

(2) 研究分担者

畔上 秀幸 (AZEGAMI HIDEYUKI)

名古屋大学・情報科学研究科・教授

研究者番号: 70175876

角 洋一 (SUMI YOICHI)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 80107367

成川 公昭 (NARUKAWA KIMIYUKI)

鳴門教育大学・学校教育学部・教授

研究者番号: 60116639

(H21: 連携研究者)

西村 直志 (NISHIMURA NAOSHI)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号: 90127118

廣瀬 壯一 (HIROSE SOHICHI)

東京工業大学・情報理工学研究科・教授

研究者番号: 00156712

伊藤 弘道 (ITOU HIROMICHI)

群馬大学・工学部・助教

研究者番号: 30400790