



## 計算力学手法の動向

-メッシュフリー／一般化FEM、マルチスケール手法、  
マルチフィジックス／連成問題、...そしてV&V-

土木学会全国大会の研究討論会  
「ここまできた数値シミュレーション技術－現状と課題－」

9.2.2009  
TOHOKU  
応用力学委員会  
寺田賢二郎（東北大学）

過去3年間の計算力学に関する主要国際会議：

- USNCCM-2007**
- WCCM-2008**
- USNCCM-2009**

に見る動向



## 計算力学手法に関する主要テーマ／トレンド

- 比較的新しいテーマ
  - Meshfree methods & Generalized/Extended FEM
  - Multiscale methods
  - Multiphysics/Coupled problems
- 解析の対象を軸としたテーマ
  - Bioengineering
  - Nano-technology
- 定常的なテーマ
  - Material characterization
  - Failure/fracture
  - Flow simulations
  - Optimization and inverse problems
- 土木工学に特化したテーマ
  - Material characterization for concrete
  - Failure and fracture analysis
  - Geomechanics & Geoscience
  - Structural analyses
  - Environmental problems
- 日本での取り組みの遅れている分野
  - V&V and uncertainty

USNCCM2009,  
WCCM2008,  
USNCCM2007  
のMinisymposia  
のテーマより

## メッシュフリー法と一般化有限要素法

～開発の経緯・動機付け～

従来のFEMは以下の各項目で不備があり、(粒子法やMeshless Galerkin法の総称としての) Meshfree Particle 法開発の旗印

(a) (h法などにおけるリメッシュによる) 局所的な精度向上の限界と実装上の問題  
 (b) メッシュに依存しない破壊現象およびひずみの局所化現象の追跡と不連続変形の統一的な扱い  
 (c) 大変形に伴うメッシュのゆがみによる解析の破綻  
 (d) 板・シェル問題（およひずみ勾配に基づく構成則を用いる問題）におけるC'連続な近似の実現  
 (by, Li, S. & Liu, W.K.: Meshfree Particle Methods, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 2004.)

一般化有限要素法の開発の動機、あるいは適用分野は上記項目のうち(a)と(b)を中心としており、FEMに対しての優位点に対応する。

(1) 精度向上とアダプティブ法 (PUM, GFEM, ...)  
 (2) メッシュにとらわれない不連続面の扱い (X-FEM, PU-based failure analysis method)  
 破壊現象のシミュレーション  
 破壊の対象を限定した応用  
 形状モデルとメッシュの独立性を利用したメッシュフリー解析  
 (3) その他応用 (X-FEM with level-set method, applications to field/front-evolution problems)  
 流れ問題と流体周りの剛体の運動、凝固・相変態、その他の

Mols, N., Dolbow, J., & Belytschko, T.: A finite element method for crack growth without remeshing, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.46, pp.131-150, 1999.

Chech, I., Belytschko, T.: An enriched Finite element method and level sets for asymmetric, two-phase flow with surface tension, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.58, pp.2041-2064, 2003.



## Minisymposia for “Meshfree methods” & “Generalized/Extended FEM”

USNCCM-2007

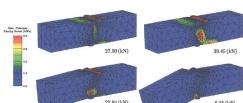
- Advances and Applications of Meshfree and Extended Finite Element Methods
- Meshfree and Generalized/Extended Finite Element Methods
- Partition of unity finite element and meshless methods: Advances and engineering applications

WCCM-2008

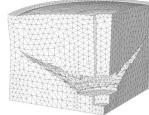
- Mathematical Analysis of Generalized Finite Element Method
- Meshfree and Generalized/Extended Finite Element Methods
- Meshless and Related Methods
- Meshfree Multiscale Methods Mini-Symposium
- Extended / Generalized Finite Element Method
- Finite Element Technology and Meshfree approaches: innovative formulation applied to metal forming
- Accuracy Assessment of the eXtended Finite Element Method: Adaptivity, Comparison with Competing Methods, Industrialization

USNCCM-2009

- Extended/Generalized FEM and Other Partition of Unity Based Methods
- Application of Meshfree Methods: Solving Practical Problems



Arias, P. M. A. & Belytschko, T.: Analysis of three-dimensional crack initiation and propagation using the extended finite element method, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.63, pp.769-788, 2005.



Thomas C. Cosser, Gerhard A. Holzapfel: Notching 3D crack propagation in unidirectional concrete using XFEM, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 194 (2005) 2859-2896.

## マルチスケール問題の分類

① 微視的領域で観察可能な非均質構造の力学挙動に何らかの平均化を施して巨視的な“材料の”特性として導く方法論(*Multi-scale modeling for materials*)

非均質体 → 物理的に等価な均質体

マイクロメカニクス 均質化理論

② 主に有限要素法の枠組みにおいて、局所的に非均質・非一様な“構造の”力学挙動評価の精度向上を目指した解析の高解像度化 (*Multi-scale modeling for structures*)

EX: 薄層メッシュ (メッシュの重ね合わせ) → ローカルメッシュ → グローバルメッシュ

スミング 技術 Global-local

③ 関数集合の階層性を利用して数理モデルとその近似解の階層化

EX: T.J.R. Hughes et al.: A Coupling Method for Local and Global Meshes, *Int. J. Numer. Meth. Engng.* 18 (1984), 1-24

「寺田賢二郎：マルチスケール解析、特集：機械工学年鑑、日本機械学会誌、Vol. 107, No.1029, p.592, 2004」

## 私見：“マルチスケール”解析の起源



- 講演会等でのオーガナイズド・セッション
  - Fourth US National Congress on Computational Mechanics (~ 1997)
    - Computational Micromechanics (Ortiz and Baskes) 18件
    - Homogenization and Multiscale** Computational Methods (Ghosh, Kikuchi and Fish) 20件
  - 第9回JSME計算力学講演会(1996)
    - 「ミクロ構造を考慮した材料物性評価」20件
    - PD「ミクロ、メゾ、マクロの**マルチレベル**現象解明の手法」
  - 第1回日本計算工学会講演会(1996)
    - 「複合材料／**均質化法**」7件
  - 第2回日本計算工学会講演会(1997)
    - 「**均質化法**」4件；材料のマイクロ・マクロメカニクス20件
  - 第3回日本計算工学会講演会(1998)
    - 「**マルチスケール** 解析」12件
  - 第11回JSME計算力学講演会(1998)
    - 「変形と破壊の計算マイクロメカニクス」(24件)
- 国際ジャーナル（計算力学, CAE関連）
  - CMAME: 1995年頃から, INMME: 1999年頃から, IJSS: 2000年頃から, ...
- 学会誌等での特集号
  - 1996: 計算工学, 小特集「**マルチレベル**現象の解析法」
  - 2001: 計算工学, 特集「**マルチスケール**法」
  - 2005: 機械学会誌, 特集「理学と工学, 科学をつなぐ**マルチスケール**モデリング」

## “マルチスケール”を冠した解析



- さまざまな“マルチスケール”的別名
  - Global-local: zooming, substructuring, superimposing mesh (s-FEM), etc.
  - Multi-level, Micro-macro: General
  - Hierarchical: mathematical or approximation-oriented, ...

1995年以前の計算力学関連の会議のOS

- Computational Micromechanics
  - Computational methods in Micromechanics
  - ...
- 1995年以後の計算力学関連の会議のOS
- Multiscale modeling and analysis
  - Multiscale computational methods
  - ...

### Multiscale

- Constitutive modeling
- Material characterization
- ... 材料のミクロ組織とマクロ強度

共通の考え方 :

$$\phi = \phi_{\text{coarse}} + \alpha \phi_{\text{fine}}$$

$$\alpha \rightarrow 0 \text{ or } \alpha \rightarrow 1$$

で整理可能(?)

## Minisymposia for “Multiscale methods”



### USNCCM-2007

- Multiple scaling and homogenization for mechanics and design optimization
- Spatial and/or Temporal Multi-scale Computational Modeling of Materials
- Multiscale Damage and Failure Mechanics**
- Multiscale Modeling of Materials
- Mathematical and Computational Aspects of Multi-scale and Multi-physics
- Multiscale computations for practical applications

一般的な方法論の構築がメイン

### WCCM-2008

個別分野への適用が始まる

- Multi-phase and Multi-scale Modelling of Concrete and Concrete Structures
- Multi-scale Damage and Failure Mechanics of Engineering Materials
- Multiscale Mechanics in Durability of Materials**
- Multiscale Mechanics of Interfaces
- Multiscale Methods in Computer Materials Science
- Multiscale Model-Based Simulation with Applications to Nano and Bio Systems
- Multiscale Modeling and Uncertainty Quantification of Heterogeneous Materials
- Multiscale Modeling of Material Behavior
- Multiscale Problems in the Life Sciences
- Multiscale Simulations for Composite Materials and Mechanical Systems
- Scale Bridging in Science and Engineering

### USNCCM-2009

- Multiscale/Multiphysics Modeling of Materials for Energetics and Shock/Blast
- Computational Contact Interface Mechanics and Multiscale Modeling
- Multiscale Simulations of Damage and Failure of Heterogeneous Materials and Systems
- Advances in Multiscale Methods and Bridging Continuum with Nano- and Bio-Mechanics**
- Multiscale Modeling and Uncertainty Quantification of Heterogeneous Materials
- Multiscale Computational Modeling of Material Phenom Behavior
- Multiscale and Multiphysics Modeling of Materials: Algorithms and Applications Advances
- Multiscale Damage and Failure Mechanics of Engineering Materials
- Recent Advances in Computational Materials Science and Multiscale Materials Modeling
- Multi-Scale Analysis of Localization and Fracture in Heterogeneous Materials
- Multi-Scale and Multi-Physics Computations in Materials
- Coarse-Grained and Multi-Scale Modeling in Molecular and Cellular Biomechanics
- Multi-Scale Computation and Modeling of Defects in Materials
- Efficient and Reliable Multiscale Modeling Techniques for Practical Applications

様々な分野へ波及  
→○○ためのマルチスケール解析  
→成熟期に突入?

← 実用化・汎用化を意識, V&Vが急務

## Multiphysics / Coupled problems



### USNCCM-2007

- Modeling and Solution Methods for Coupled Problem Simulation
- Algorithms and Implementations in Coupled Engineering Simulation
- Domain Decomposition Techniques for Coupled Problems in Science and Engineering

### WCCM-2008

### WCCM-2008

- Computational Electro-Magneto-Hydro-Dynamics (EMHD)
- Stabilized, Multiscale and Multiphysics Methods
- Multiphysics Modelling of Porous Media, Geomaterials, Biomaterials and Others
- Modelling and Optimisation Coupled Multi-Physics Processes
- Time- and Spatial Decomposition Methods for Multi-physical and Multi-field Problems
- Advances in Numerical Multiphysics Problems: From Quantum to Continuum
- Multisimulation on "Mathematical Modelling and Numerical Simulation of Coupled Multiphysics Systems in Nano- and Biotechnologies"
- Numerical Modelling of Coupled Problems in Geo- and Durability Mechanics**
- Simulation Techniques for Multiscale Problems in the Use World
- Efficient Computational Methods for Coupled Problems
- Coupled Multi-field Problems and Smart Structures

原 因	
変形	複数の物理現象を統合した構造力学 [B, C]
流れ	流れによる構造物の運動 [S]
伝熱	熱による構造物の運動 [A]
物質輸送	物質輸送による構造物の運動 [A]
化学反応	化学反応による構造物の運動 [A]
電磁気・電気	電磁気による構造物の運動 [A]

第18話：進成シミュレーションの世界へ「いまさら聞けない計算力学の常識」、土木学会応用力学委員会計算力学小委員会編、2008 進成因子の型 [A]: 流れ型, [B]: 境界条件型, [C]: 構成型, [S]: フォース型

## V&V and uncertainties



我が国では、個々の解析者に任されており、学術的な取り組みが遅れている

- 検証のための方法論の確立
- 確からしさ／不確かさの定量化
- 汎用コードの利用を前提とした解析結果の検証方法

### USNCCM-2007

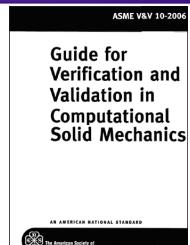
- Accomplishments and challenges in verification and validation
- Advances in Commercial Finite Element Software
- Code and Solution Verification
- Advances in Solver Technology for Industrial Finite Element Analysis
- Uncertainty Modeling and Quantification in Computational Mechanics

### WCCM-2008

- Accomplishments and Challenges in Verification & Validation
- Uncertainty Modeling and Quantification in Computational Mechanics
- Uncertainty Quantification Methods for CFD and FSI

### USNCCM-2009

- Verification And Validation: Challenges and Accomplishments
- CAE and Industrial Applications of Computational Mechanics
- Uncertainty Quantification in Computational Science and Engineering
- III-Posed Problems in Science and Engineering



Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics.

- 米国機械学会(ASME)の出版したガイドライン:
- 計算力学方法における検証と妥当性確認のための指針
- 検証と妥当性のための統一された検証方法の記述
- PTCG委員会により策定
- 研究者, 実験者, ソフト開発者, 政府, 産業から構成
- \*米国機械学会(ANSI)も含む

現段階での内容:

- 最初の教科書的実用について講義するための共通語
- 現段階での最もと思われるプロセスの枠組み
- 「規格として標準化された文書」としてはやや未完

## 主要計算手法の現状分析と今後



### メッシュフリー・メッシュレス法／一般化有限要素法

- EFGMのDLS-Dynaへの実装やX-FEMのABAQUSへの実装を経て成熟期に: 90年代中頃から続いてきた“はやり”は収束
- 破壊の解析

### マルチスケール法

- “はやり”は収束するどころか、過熱気味
- 汎用的な方法論の開発から個々の分野（バイオ、ナノテク、損傷・破壊問題）でのキーワードとして重用
- 検証および汎用化への道筋は不明
  - 特に、破壊問題でのマルチスケールモデリングが注目を集めているが、適用性の検証には要注意

### マルチフィジックス／連成問題

- 古典的なテーマもあるが、これからのトレンドの一つ
- 多様な組み合わせ
  - 物理現象の組み合わせで解くべきかどうかの見極めが必要
- 検証・汎用化はまだ

### V&Vと不確定性

- “CAEによるものづくり”の大衆化：成熟した汎用コードの利用が背景
- 日本の取り組みはかなり遅れている
  - 計算工学会およびNPO団体が取り組みを検討