



文部科学省 IT プログラム「戦略的基盤ソフトウェアの開発」  
次世代構造解析システム「NEXST」

IT program of MEXT, "Frontier Simulation Software  
for Industrial Science"  
The Next Generation Structural Analysis System

東京大学生産技術研究所 計算科学技術連携研究センター

戦略的基盤ソフトウェア次世代構造解析システムグループ 代表 矢川元基

分類	構造シミュレーション
キーワード	フリーメッシュ法、粒子法、有限要素法
開発者	矢川元基、 越塚誠一、吉村忍、吉野京太郎
作成年月	2003年3月
コード名	NEXST
使用言語	C、C++

◇ 2次元破壊力学解析コード—NEXST\_FMM\_Fracture2D—

2次元静的弾性き裂進展問題をフリーメッシュ法で解析するコードの開発を行ったので、プログラムソース、プログラム説明書、使用マニュアルなどの資料を公開する。

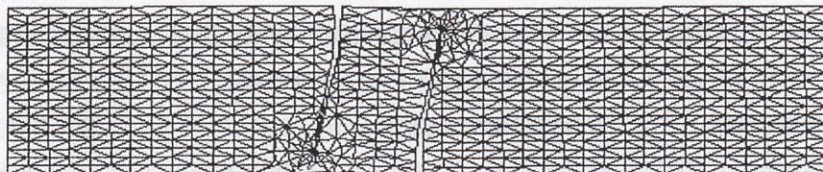
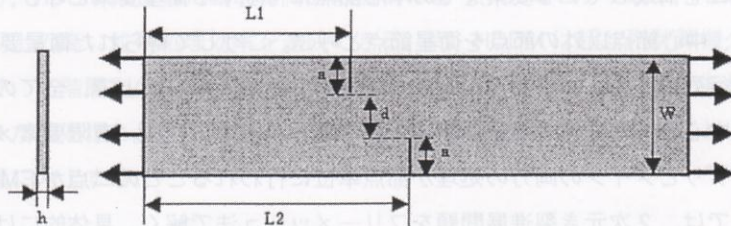


図1 き裂進展解析結果（上がモデル形状、下が解析最終ステップ）

◇ 2次元 MPS 法構造解析コード—NEXST\_MPS\_Solid2D—

2次元弾性体の動的解析コードを粒子法的一种である MPS 法で開発したので、プログラムソース等を公開する。



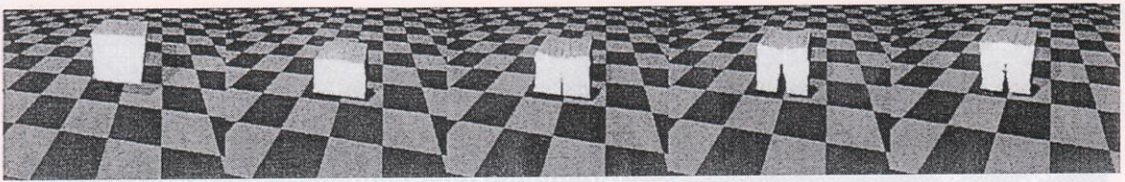


図2 豆腐の落下解析結果（2次元解析結果を3次元的にリアリスティックに表示したもの）

◇3次元有限要素法構造解析コード—NEXST\_Solid—

3次元弾性及び弾塑性の解析コードを有限要素法で開発したので、プログラムソース等を公開する。

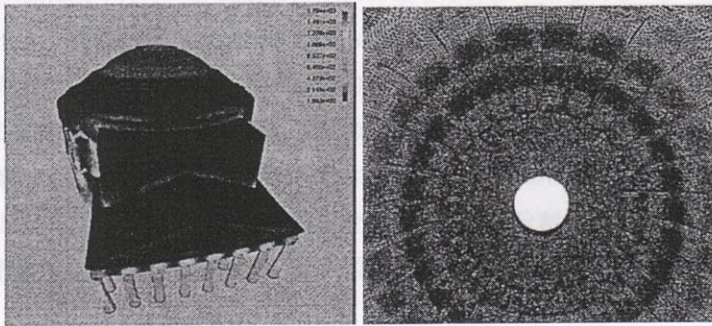


図3 ローマのパンテオンの応力解析結果

◇コードの概要

2次元破壊力学解析コード—NEXST\_FMM\_Fracture2D—

フリーメッシュ法（FMM）は、大変形問題、亀裂進展問題、アダプティブ流体解析などに対して、局所メッシュを生成しながら、有限要素解析を実行するものである。FMMでは、解析領域に分布させた節点群のうち、一つの節点を中心節点として、周囲の節点群を用いて局所的な有限要素メッシュを生成する。局所メッシュを構成している要素をその中心節点に付随する衛星要素と呼び、衛星要素を構成している節点のうち、中心節点以外の節点を衛星節点と呼ぶ。こうして得られた衛星要素について、FEMにおける要素剛性行列のうち、中心節点に対応する成分のみを計算した上で、全ての衛星要素の成分を足し合わせると、中心節点に対応する全体剛性行列の成分が求められる。有限要素メッシュを局所的に生成すること、プリとメインの両方の処理が節点単位に行われることの二点がFMMの特徴である。

本プログラムでは、2次元き裂進展問題をフリーメッシュ法で解く。具体的には、入力ファイルより解析対象の形状情報と材料情報を読み込み、節点を発生させフリーメッシュ法により有限要素解析を行なう。その結果よりき裂進展方向を求め、形状情報を更新しき裂の進展とする操作を指定されたステップ数まで繰り返す。尚、結果の出力は各節点の変位とひずみである。

2次元 MPS 法構造解析コード—NEXST\_MPS\_Solid2D—

粒子法は、連続体の運動の支配方程式を、メッシュを一切用いることなく粒子の運動方程式として離散化する。従来のメッシュを必要とする有限要素法等では、連続体の変形が著しい場合には、メッシュの変形も著しくなる。その場合、有限要素法等では、計算精度が低下するのみならず、解が得られないという問題が生じる。一方、粒子法ではメッシュを必要としないため、このような場合でも、計算を進めることができる。さらに、連続体が分裂したり、合体したりする場合にも適用できる。



また、計算力学を実際的な問題に応用するためには、大規模で複雑な3次元形状を扱う必要がある。粒子法では、計算点間の接続情報を与える必要は無く、モデル作成が簡便である。

MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法は、越塚らが非圧縮性流れの数値シミュレーションのために開発した粒子法で、これまで自由液面流れにおける砕波など、従来のメッシュを用いる方法では解けなかった問題に適用され、成果を挙げている。MPS法は、微分演算子に対応する粒子間相互作用モデルを用意して、これを支配方程式に代入することでメッシュを用いずに離散化をおこなう。微分方程式に対する一般的な離散化手法であり、固体力学の方程式に適用することもできる。これまでに、2次元弾性体の動的解析に適用され、構造物の衝突による破壊が計算されている。また、MPS法による弾性解析では、大変形に対しても仮想仕事の原理が成立していることが示され、動的問題に対してシンプレクティックスキームを適用することで、エネルギー保存に優れた解析ができる。

本プログラムでは、MPS法を用いた2次元弾性解析コードをモジュールとして開発し、入力データ作成、出力データ可視化、コンピュータグラフィックスグラフィックス(CG)作成をおこなえる。さらに、計算結果から簡便にCG作成ができる機能を加えることにより、計算力学の利用者を専門家以外にも幅広く開拓することを目指している。

### 3次元有限要素法構造解析コード—NEXST\_Solid—

本コードは1億自由度を超える規模に対応した並列固体解析モジュールであり、弾性/弾塑性/大変形応力解析が可能である。ソルバとしてはHDDM (Hierarchical Domain Decomposition Method) と前処理付き並列CG (Conjugate Gradient) 法を備えている。HDDMのDDM (領域分割法) とは、解析領域に関する連立1次方程式を解くために、領域をいくつかの部分領域に分割して計算を行う手法の総称である。HDDMは領域をPartとSubdomainという2階層の領域に分割することにより、超並列計算機環境に適用できるようにした手法である。HDDMと比べて、並列CG法はメモリ消費量が少なく2~3倍ほど計算速度が速い。一方、HDDMは優れた動的負荷分散機構により、プロセッサ数が千を超える超並列計算機においても90%以上の高い並列処理効率を達成できる。尚、HDDMは超並列計算機への並列アルゴリズム実装方式であり、2階層型の領域分割データ構造を有する並列アルゴリズムであれば、それらも容易に実装できる。また前処理としてバランシング領域分割法(BDD)を選択することにより、計算速度とロバスト性が大幅に向上する。

### ◇計算例

解析対象 I (き裂を含む長方形平板試験片の引張り試験のFMMによる解析): 解析対象は図1に示すように複数の平行き裂を含む長方形板試験片である。材料定数はヤング率:  $E=210$  [GPa]、ポアソン比:  $\nu=0.30$  とし、試験片寸法を、長さ:  $L=100$  [mm]、幅:  $W=25$  [mm]、厚さ:  $\Delta t=1.0$  [mm]、スパン長さ:  $S=70$  [mm] とした。初期き裂は、2つとも2.0 [mm] の長さで平行に入れ、荷重は静的引張り荷重を与えた。2つのき裂の位置は図において  $L_1=40$  [mm] と  $L_2=50$  [mm] の部分である。初期境界節点としては、88個の節点を配置し、き裂先端付近の節点は同心円状になるように配置した。生成された初期総節点数は861であった。図1下に、局所メッシュを合成させたものを示す。き裂は合体することなく、独立に伝播して最終破断に至る。



解析対象2 (落下する豆腐のMPSによる解析) : MPS法の特徴は、従来の手法と比較すると、大変形や破壊が解析できることである。固体の性質を、(柔らかい⇔硬い)、(粘り強い⇔もろい)を軸に考えると、従来の手法では、金属に代表されるような、硬くて粘り強い材料を主に扱ってきた。ここでは、柔らかくてもろい材料の代表として豆腐を選んで解析した。ヤング率 $1.5 \times 10^8 \text{Pa}$ 、ポアソン比0.3を設定した。実験では、ほぼ中央部において縦に割れるが計算でもこれがほぼ再現されている。計算では、粒子間距離が初期の値よりもある割合以上離れた場合に、粒子間相互作用をゼロにすることで破壊をモデル化している。また、計算では床に落下した衝撃が上部に伝わり、上部が破壊される様子が見られるが、実験では豆腐の内部で急速にエネルギーが減衰し、上部の破壊はあまり見られない。

解析対象3 (バンテオンのFEMによる解析) : ローマの古代建築物バンテオンについて弾性応力解析を行った。文献の図面より装飾部などを省略したCADモデルを作成し、四面体メッシュジェネレータにより、400万要素(10節点二次要素)、1800万自由度のメッシュを作成した。底面を完全に固定して自重を負荷した。物性値はヤング率20GPa、ポアソン比0.2を使用した。16台のPC(Alpha 21264 500MHz)により全体モデルを16個の部分領域に分割し、解析を行った。領域分割に約13分、応力解析に約10.5時間を要した(収束判定条件は相対残差ノルム $10^{-6}$ )。図3左に全体の応力分布を、同図右に天井詳細図を示す。

◇関連論文 1) Yagawa, G. et al. "Free mesh method: A new meshless finite element method" Comput. Mech., 18 (1996) pp. 383-386、2) Yagawa, G. et al. "Recent developments of free mesh method. Int. Journal for Numerical Methods in Engineering 47 (2000) pp. 1419-1443、3) 矢川ら「広義のメッシュレス法としてのフリーメッシュ法とその並列化」計算工学 7-1 (2002) pp. 415-418、4) 吉野ら「包装法を応用したフリーメッシュ法とそのき裂進展解析への適用」日本機械学会2002年度年次大会講演論文集 02-1 (2002) pp. 35、5) 越塚ら「弾性体に対する陽的な粒子計算モデルの開発」計算工学講演会論文集4 (1999) pp. 33-36、6) 越塚ら「弾性体の粒子モデルに対するシンプレクティックスキームの適用」日本機械学会第12回計算力学講演会講演論文集、pp. 725-726、(1999)、7) Koshizuka, S. et al. "Particle Method for Fluid and Solid Dynamics", Computational Fluid and Solid Mechanics 2, Proc. First MIT Conf. on Computational Fluid and Solid Mechanics (Boston, 2001) pp. 1269-1271、8) 宋「MPS法による2次元弾性体の構造解析」日本原子力学会2003年春の年会、9) 吉村「設計用大規模計算力学システムの開発—日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「計算科学」分野 ADVENTURE プロジェクト」計算工学4-4 (1999) pp. 210-218、10) 吉村「一億自由度構造解析と設計：学振未来開拓 ADVENTURE プロジェクト」、日本機械学会・平成12年度材料力学部門講演会講演論文集、00-19 (2000) pp. 27-28、11) 宮村ら「大規模並列計算力学システムにおける入力データの標準化」日本計算工学会論文集」2 (2000) pp. 219-226、12) Yoshimura, S. et al. "Advanced General-Purpose Computational Mechanics System for Large Scale Analysis and Design", Journal of Computational & Applied Mathematics, to be published、13) <http://garlic.q.t.u-tokyo.ac.jp/>