



特集記事・6

ここまで来た計算科学の鉄鋼への応用

新しい構造解析法

Structural Analysis Methods in the New Generation

矢川元基
Genki Yagawa

東洋大学 工学部 教授

1 序

コンピュータの能力がこの数十年飛躍的に増大してきており、そのことによって構造物などの力学解析は有限要素法 (Finite Element Method, FEM) などの数値解析法があらゆる産業界において定着した。FEM を用いれば、構造物の形状や荷重条件を気にせず解が得られることが最大のメリットである。しかし、数値解析法はあくまでも近似解しか得られない。言い換えれば、得られた解の精度が問題となる。その対策のために最近では数億自由度といった超大規模計算例も出現してきている。もう1つの問題は、産業界で解きたい問題は、一般の弾性解析や弾塑性解析のみならず、流体との相互作用、接触問題、き裂進展問題などのようにますます複雑化していることである。

従来、力学解析は、有限要素法 (Finite Element Method, FEM) による応力解析のように、単一現象を単一モデルにより解析してきた。この前提で、過去の研究開発によって、汎用FEM解析ソフトが多数開発され様々な人工物設計プロセスに適用され、今や現代社会の基盤技術として定着してきている。しかし、現実の現象に目を転じてみると、そこにあるのは固体の変形と熱や流れ、磁場などが複雑に連成した現象であり、さらには固体の変形においても、ニューヨークワールドトレードセンタビルのテロによる破壊のように、連続体的な変形のみならず粉々に砕け散る現象が存在する。従来の単一現象単一モデルに基づく構造解析手法では、このような現実の問題を解析することができない。言いかえると、現状の構造解析は単一現象単一モデルによって解ける問題のみをボトムアップ的に解いてきたのである。そこで、逆に何を解くかという問題 (what) を明確に宣言した上で、その解析を成功させるためにはどのような手法を組み合わせ、システムを開発すれば良いか (how) を明らかにし、必要なI/O (INPUT/OUTPUT, すなわちデータの入出力のこと) やソ

ルバ (解析部のこと) 及び可視化技術の改良または新規開発を行い、ターゲット問題を解くという目的を達成するようにそれらをインテグレートすることが必要である。このようにして開発したソフトウェアシステムは非常に強力でロバストな解析能力を持ち、構造問題を中心とするあらゆる力学現象に対して、自由自在に順解析及び逆解析 (設計を含む) を行うことができる。

本稿では、以上述べたターゲット問題の内容とそのために我々が開発している構造解析ソフトウェアの概要について紹介する。解析技術としては、大別してフリーメッシュ法 (Free Mesh Method, FMM)、粒子法などの手法を用いている。それらとMDを組み合わせた手法も用いている。また現実世界とコンピュータ世界とのI/Oを重視し、イメージデータの取り込みやコンピュータグラフィクス (CG) による解析結果のリアリスティックな可視化を可能にする技術を利用している。

2 フリーメッシュ法 (FMM)

節点処理型のFEMであるFMM (Free Mesh Method) は、筆者らが考案した手法であり、通常のFEMではメッシュ生成が解析全体のボトルネックとなってしまう問題に対して、節点単位に局所的なメッシュを生成しながら連立方程式を構成していくことによって解析を試みるものである。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 (衛星要素) について、FEMにおける要素係数行列のうち、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。こうすると、中心節点に対応する全体係数行列の非零成分が求められる。以上の操作を全節点に対して行うことによって、通常のFEMに一致する連立方程式を求め

ることができる。すなわち、FMMは、解析対象に適切に節点を配置した上で、各節点の周辺に品質のよい局所メッシュ生成して有限要素解析を進めるという、いわば、粒子法的な有限要素解析 (Particle-like finite element analysis) を実現するものである。とくに、局所的なメッシュ生成から求解までのすべてのプロセスを節点を単位として並列に処理することが可能であることから、超並列環境において、頻繁にメッシュの再生成を行う必要がある問題を取り扱う場合に極めて有効な手法となる。

FMM、分子動力学 (MD)、FEMの組み合わせでは、金属構造物の疲労解析を念頭に置いている。従来の手法では、き裂と構造物全体を同時に扱うことができないため、単純な荷重条件の下で、き裂の挙動を調べることが多い。しかし、それでは、実際の構造物にどのようなき裂が発生し、成長して行くかを正確に予測することは困難である。この予測に必要な情報として、実荷重に対する実構造物各部の力学的状態 (応力、ひずみ等)、疲労き裂先端における金属組織、さらに言えば、き裂先端での金属原子の挙動、といったマクロからミクロまでの現象がある。これらの現象は、別々に検討されているのが現状である。個々の問題の境界条件の設定には、専門的な判断が必要であり、大きな誤差が紛れ込む余地が常にある。これらの挙動を一つのシステムでシームレスに扱うことは、解析の信頼性に対して重要な貢献をするものである。本手法は要素技術としては、大規模構造物解析には、FEMを、き裂進展解析にはFMMを、金属原子の挙動にはMDを用い、これらの連携には、重合メッシュ法および均質化法を応用する。単純な組み合わせだけでは、非現実的な解析コストとなるため、解析コスト削減の工夫を行う。

3 粒子法

これまでの汎用コードと呼ばれる構造解析のためのソフトウェアは主にFEMが用いられてきた。FEMコードの解析対象は多岐に渡るが、破壊現象のそのものや構造物が崩れ去るような解析は不得意である。すなわち、現象が複雑すぎることで、モデル化やその計算が不可能もしくは極めて難しいと考えられてきた。しかし、一方で現代においては超高層ビルの倒壊や巨大構造物の地震による破損もしくは破壊など現実問題としてある。これら巨大な構造物が破壊されることにより引き起こされる事態が2次災害である。構造物の破片が周辺の構造物に衝突もしくは大量に降り注ぐことにより、周辺の構造物が破損し結果的に甚大な被害が発生する。高速道路の倒壊も同様に周りの建物に甚大な被害を及ぼす可能性が高い。土砂崩れのように自然災害も後を絶たない。粒子法は、従来の有限要素法などの手法でははたさないこのような問

題に対して有効とされている手法であり、開発の経緯から、いくつかの方法が考案されている。いずれにしても、有限要素法におけるような要素という概念はなく、連続体を粒子によって近似することが特徴である。

3.1 MPS法

MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法は、非圧縮性流れの数値シミュレーションのために越塚らによって開発された粒子法のひとつで、これまで自由液面流れにおける碎波など、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。

ここでは、粒子法 (MPS法) を用いた3次元弾性解析コードをモジュールとして開発し、他のモジュールと共通する環境下で、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) 作成をおこなえるものとする。ここで用いられるMPS法は、これまで述べたように、従来のメッシュを必要とする方法では計算できなかった問題を解くことができる。さらに特徴として、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すだけでなく、各種シミュレータへの応用やCG技術の高度化への貢献が期待できる。

3.2 SPH法

SPH法 (Smoothed Particle Hydrodynamics) は、モデル化が簡便であり、以上述べたような物体の破壊、崩落や飛散を取り扱うことが可能である。SPH法は、もともと天体物理の分野で開発された。カーネル関数とよばれる近似関数を用いてFEMのような格子を用いずに計算ができるメリットがある。このために粒子を構造物の内部に配置すればそれが解析モデルを表し極めて簡便に解析モデルを作ることが可能である。また、1粒子を構造物の最小単位として飛散させれば崩落による破片の飛び散りも模擬できる。

4 10

4.1 イメージ入力

自然物や人体などの解析では、CAD 入力によるアプローチは、形状表現など困難な面もあり、手間もかかるため、一般的な手法としては適さない。我々は、入力情報としてCT、MRI等で生成した複数枚の形状断層画像を用い、解析対象の表面形状情報を構築するためのツールを用意している。人体等の断層画像には、骨や臓器など解析対象形状の境界が鮮明でないことが多くみられるが、これに対応するための1つの手法として領域成長法をベースとした機能を備えている。境界条件や物性値などの設定は解析モデルを作成し、実際に解析を行う上で不可欠のものであるが、研究目的のシミュレーションソフトでは、その自動設定をサポートしてない場合がある。また、複数の解析手法について統一的に境界条件を取り扱うプログラムは従来、存在しなかった。解析対象としては、従来人工物のCADモデルのみが考慮されていたきらいがあるが、今後は面の境界がはっきりしないような自然物や生物モデルに対しても対応できることが求められている。

従来CGソフトはエンターテインメント、ニュース、景観

予測や製品の外観予測などに使われることがほとんどで計算力学や計算科学の解析結果を表示するための手段としては認知されていなかった。我々は解析結果それ自身をアピールするためにCGを利用すべきであると考え。また従来、力学の素人がエンターテインメントCGのリアリティ向上のためにそれらしく作成してきた現象を力学ベースのものにより代替するとより良いものができる考える。解析結果をリアリスティックに表現するための手段としてレイトレーシングを基本とするCGソフトを利用することを考えている。

4.2 大規模メッシュ生成の事例

並列メッシュ生成の事例として、古代ローマの建築であるパンテオンを取り上げる。単体のPCを用いて仮想並列処理を行い、超大規模メッシュを生成した事例を示す。従来、単体のPCで生成することのできる上限であった50万要素のメッシュをFig.1およびFig.2に示す。また、単体のPCと仮想並列処理によって生成した1億要素のメッシュをFig.3およびFig.4に示す。この巨大メッシュの生成に使用したPCのスペックや処理時間などをTable 1にまとめる。

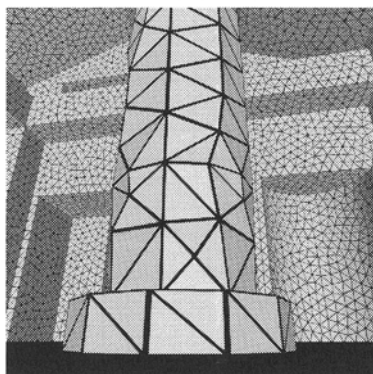


Fig.1 ローマパンテオンを50万要素で分割したときの全体図

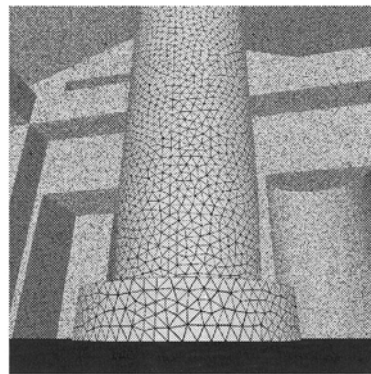


Fig.3 同様に1億要素で分割したときの全体図

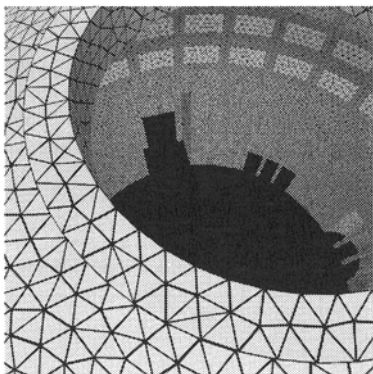


Fig.2 同様に50万要素で分割したときのドームルーフ部分を上から覗いたもの

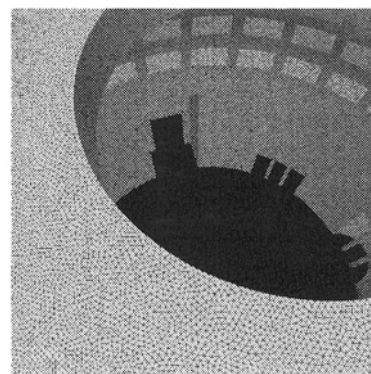


Fig.4 同様に1億要素で分割したときのドームルーフ部分を上から覗いたもの

Table 1 1億要素作成のための諸条件と要する時間

入力 CAD データの形式	IGES
節点数	約 1800 万
要素数	約 1 億
計算時間	5 時間 11 分
CPU	Pentium IV Xeon 2.66GHz
メモリー	2G byte
仮想並列数	64 PEs

5 まとめ

本稿では、我々が開発中の未来型構造解析手法についてあらましを述べた。本手法が完成するとこれまでの有限要素法では解けなかったような事例の多くが簡単に解けるようになることが期待される。最後に本稿をまとめるにあたってお世話になった（株）インサイトの三好昭生氏ほかの方々に感謝する。

(2004年8月20日受付)