

クラウドコンピューティングを用いた効率的な構造解析支援システムの開発

2015年3月修了 人間環境学専攻 47-136696 井原 遊
指導教員 奥田 洋司 教授

CAE is indispensable for developing industrial products and various types of CAE software has been recently developed and utilized. This study proposes to provide a CAE system at low cost as possible by using the cloud computing service and FrontISTR, which is a large-scale structural analysis program using the finite element method. Since the system is a web-based system, everyone can use it through any device, which has a web browser. Therefore the system is able to make user's CAE work more efficient.

Key words: CAE, Structural Analysis, Cloud Computing, Finite Element Method

1 緒言

世界のスーパーコンピュータの上位 500 位を評価付けるプロジェクトである TOP500 によると 2014 年 11 月現在の最速のスーパーコンピュータは、33.9PFLOPS である。20 年前、1994 年 11 月における最速のスーパーコンピュータは 170GFLOPS であったことから、過去 20 年間で概ね 20 万倍になっており、スーパーコンピュータの演算性能は著しく進歩している。そこで、過去において計算時間がボトルネックになっていた数値計算を主体としたシミュレーション研究は、現在においては計算時間が問題になることがなくなった一方で、演算が高速化したために、莫大なデータ処理に費やす時間が顕著になっているという現状がある。

CAE(Computer Aided Engineering, コンピュータ支援工学)は、近年のコンピュータ技術の飛躍的な進歩に従って様々な製品の設計、開発において用いられるようになってきている。それに伴って、様々な CAE ソフトウェアが開発され活用されている。従って、現在はシミュレーションを容易に行うことのできる環境が整いつつあり、大規模化・精緻化が進みつつあるが、シミュレーション研究において様々なツール開発、そのツールを活用する技術の習得、多くの分野の知識、結果の処理、パラメータの把握などが必要であり、研究者の負担となっている。また、他人の作ったツールを活用することや、結果を活用することは十分に環境が整備されているとは言い難い。これらの課題をうまく扱えない場合、現状のシミュレーションは、研究・開発業務に高度化、効率化をもたらすとは限らない。

近年では、コンピュータ資源の利用形態として、クラウドコンピューティングが提唱され注目されている。CAE の分野においても様々な形でクラウドサービスが提供されている。ソフトウェアライセンスと仮想化環境のプラットフォームを提供するなどのサービスが提供されるようになってきた。このような種類の PaaS 型クラウドサービス以外にも CAE に利用可能なクラウドサービスには、IaaS 型クラウドサービスがあげられる。特に CPU 仮想化技術の進歩によって、IaaS 型クラウドは普及しつつあり、使用時間による課金である特徴から CAE に用いることで計算機コストを低減させる可能性がある。

SaaS 型クラウドサービスとして CAE に活用した例は、ADVENTURE を Web サービス化した研究^{2,3}がある。これらの研究は、Web 上で CAE のプロセスが実行できるものであるが、サーバ処理が重いことや、対話性が悪いなどの問題点があり、境界条件設定の柔軟性が良くないなどの問題点も残された。有限要素法構造解析ソフトウェア

「FrontISTR」とエンジニアリングデータ管理システム「ASNARO」を用いてクラウドサービス化した研究⁴では、プリ処理を支援する仕組みがないこと、商用ソフトウェアと連携が必要なことなどの問題点が残された。

CAE では、解析の規模によって、高性能なコンピュータを必要とし、その設備の費用は少なくなく、一度にインシャルコストとしてかかるため、既に活用しているユーザ以外においては導入の決断がしにくい。スーパーコンピュータの使用料は年度単位や購入できる時間単位が大きく、使用可能性の検討段階においては導入を躊躇せざるを得ない場合がある。その点、IaaS 型クラウドサービスは使用料の単位が非常に細かいことから、強力な支援ツールとなりうる可能性を秘めている。

また、商用の CAE ソフトウェアはライセンス料が高額で、経済的負担が大きく導入は容易ではないことが多い。一方で、オープンソース・ソフトウェアとして提供されている CAE ソフトウェアは、機能が限定的である場合や、オープンソースであるがためにコンパイルといった計算機に関する知識を必要とし、その障壁は小さくない。

CAE を行う上で、オープンソース・ソフトウェアを利用する場合、ソフトウェアのコンパイルから必要となり、パラメータ設定など多くのソフトウェアの連携、テキストエディタでの編集など、多くの手間が必要になる。このような点から、多くの研究者や技術者は商用ソフトウェアを利用している現状があるが、その場合においても結果データを整理したり、データを管理したりする必要は当然にあり、このことは研究に直接関係しないところで労力をさくことになる。どのようなソフトウェアを利用するにしても、スーパーコンピュータで大規模または大規模とまで言わないまでも並列計算をしようとする、さらに問題は複雑かつ多くなる。商用ソフトウェアでは、クローズドソースであるが故に計算機環境によっては使えないことがあり、使える場合においても並列数によって極めて高額なライセンス料が発生する。

オープンソース・ソフトウェアでは、数値計算を実行する前までに、提供されたコンパイラ特有のエラーや結果の検証などのデバッグ作業に多くの時間を費やすことになる。これらのノウハウは共有されないこともしばしばある。

従って、これらの問題をできる限り解決させ、研究者や技術者からブラックボックス化できるシステムがあれば、より効率的な CAE を行うことができると考えられる。

本研究では、クラウドコンピューティング技術および FrontISTR を利用した、プリポストを含めた統合 CAE クラウド支援環境(図 1)の構築を行い、CAE プロセスの効率化並びに CAE の普及を促進することを目的とする。

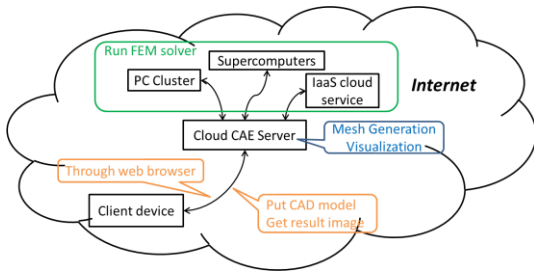


Fig.1 Cloud CAE system configuration

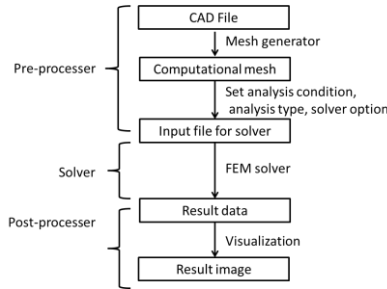


Fig.2 Workflow of structural analysis

2 構造解析の手順と手法

2.1 構造解析の手順

構造解析の手順は大きく分けると、プリプロセッシング、ソルバ、ポストプロセッシングの3つのステップに分けることができる(図2)。プリプロセッサは、物理特性を検討しモデルの選択、ソルバで解くための数値計算用のメッシュを作成、境界条件を設定など解析の準備の部分である。ソルバは、数値計算を行う部分であり、この部分が計算負荷の大部分を占める。ポストプロセッサは、ソルバから得られた計算結果をユーザが理解できる形に置き換える部分である。

2.2 有限要素法

自然界における現象は、連続体として扱われ、偏微分方程式で記述される。連続体問題の偏微分方程式は一般に厳密解を求めることが難しいため、数値計算が行われ近似解として解を求められる。近似解を求めるために、連続な物体を有限個の領域に離散化して表現する必要がある。有限要素法は、偏微分方程式を近似的に解くための離散化手法の一つであり、産業基盤分野の数値シミュレーションにおいて特に盛んに用いられている。数値解を求めることは連立一次方程式を解くことに帰着される。

2.3 連立一次方程式の解法

有限要素法解析において、最も計算コストの高い処理がこの連立一次方程式を解く部分である。連立一次方程式 $Ax = b$ の解法を大別すると、直接法と反復法の2種類がある。

直接法とは、ガウスの消去法に代表されるように、方程式から変数を消去していくことによって解を求める方法である。丸め誤差がないとき、有限回の計算で解を得ることができ、ロバスト性に優れた手法であるが、問題規模の増大に対して計算量とメモリ使用量の増加が急激である。

計算順序に依存関係があり、効率的な並列化が難しい

反復法は、適当な近似解から出発して、一定の演算を反復することで近似解の精度を高める方法である。問題規模の増大に対する計算量とメモリ使用量の増加は穏やかであり、並列計算に対する適合性は高い。

2.4 プリプロセッシング

有限要素法による構造解析で、どのような材料でどのような挙動をするか事前に検討し、計算負荷を考えながら解析の種類を決定しなければならない。

まず問題設定に対して、解くべき方程式を決定する。例として静解析や動解析があげられる。続いて大変形問題など想定される変形の程度から幾何学的な非線形性を考慮するか決定する。材料物性において弾塑性・超弾性などの非線形性を必要に応じて考慮する。境界についても接触や摩擦の考慮などを検討する。

問題の行列に対する適合性を考慮してソルバ解法を直接法、反復法から選択する。

また、FrontISTRにおいて並列解析を行う場合は、並列解析用入力ファイルを事前に生成しておく必要がある。

2.5 ソルバ

作成されたメッシュと解析条件を、数値解析のソルバに入力ファイルとして設定し、実行することで、計算が行われる。一般に高い計算能力を求められる部分は、この部分であり、メッシュファイルと解析条件から生成された剛性行列を解くための演算を行う。

2.6 ポストプロセッシング

ソルバの結果として得られた結果ファイルの内容を理解するために可視化処理が行われる。形状を図示し、変位や応力を色彩で表現したり、その変形図を作成したりすることで、その結果を技術者が検討できるものとなる。この処理をポストプロセッシングと言う。

3 連携するソフトウェア

3.1 FrontISTR

FrontISTRは東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センター⁵⁾が開発したオープンソースのソルバプログラムであり、弾性静解析・動解析、材料・幾何学的非線形静解析・動解析、接触静解析・動解析、モーダル応答解析を含む固有値解析及び熱伝導解析を行うことができる。MPIを用いた大規模並列解析に対応している。

3.2 REVOCAP_Prepost

REVOCAP_Prepostは東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センターが開発したプリ・ポストプロセッサプログラムで、FrontISTRで解析するための、メッシュの作成、解析条件の設定をするプリ処理と、FEM解析結果を可視化するポスト処理をグラフィカルインターフェース上で提供している。

3.3 ADVENTURE_Tetmesh

ADVENTURE_Tetmeshは、東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センターが開発した四面体メッシュャで、三角形表面パッチデータから四面体メッシュ

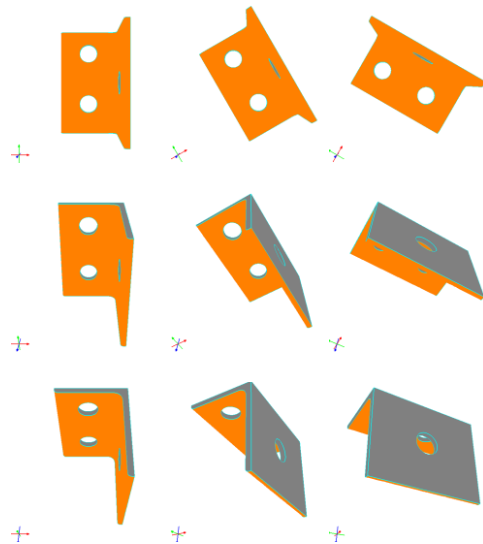


Fig. 3 Visualizing 3D model on image

を自動生成する。節点の密度制御が可能で、二次要素への変換も可能である。本研究ではメッシュとして利用する。

4 三次元モデルの画像による操作

4.1 必要性

三次元モデルを表示、操作するためにはモデルの情報を読み込み、描画を行うが、モデルサイズの増加に伴い計算処理の負荷が大きくなる。デスクトップコンピュータでリポストを行うとき、モデルサイズが大きさによっては読み込みに時間がかかり、モデルの操作がスムーズでなくなるなど対話性に難が出てくることもある。

本研究では、Web 上に 3D を展開しなければならないため、それ以上にオーバヘッドが大きくなる。

4.2 手法

モデルサイズに影響されずに三次元モデルを表示や操作するために、図 3 のように複数枚の画像を事前にサーバで生成し、ユーザ操作に応じてサーバから転送する方法を用いた。この手法では、事前にサーバ側で画像を生成する負荷はあるものの、性能の良い GPU を採用することや、並列生成でカバーすることができる。

4.3 回転

モデルについて、ある軸を基準に回転させる。続いて投影面に平行な軸でさらに回転させる。その組み合わせを複数枚作成することでモデルの回転操作を実現する。

4.4 平行移動と拡大縮小

生成する画像を画面の解像度より高いものにして生成を行う。この画像の拡大率を操作することでモデルの拡大縮小を表現でき、表示部分をずらすことで、上下左右に移動できる。

5 ライブラリとプログラムの開発

5.1 可視化系プログラム

4 章の手法を利用した可視化プログラムを CAD データの可視化、FEM メッシュの可視化、解析条件の可視化、結果の可視化それぞれについて OpenGL などの用い作成

を行う。視点移動系の処理が多いため、命令の再利用のため Displaylist を活用し描画処理の高速化を図る。同時に画像出力について OpenMP を用いた高速化を図る。

5.2 メッシュ連携

CAD モデルを FEM メッシュに変換ためのメッシュについて入力データを適切な形式に変換し節点密度制御等のパラメータを用意して入力ファイルを作成する。

5.3 ジョブ管理

システムでの同時実行数を制限し安定を図るためジョブ管理プログラムによってプログラムの実行を管理する。

6 クラウド CAE システムの構築

6.1 クラウド CAE サーバ

クラウド CAE 支援システムを動作させるためにサーバ機を用意し、データの蓄積や支援システムのフロントエンドとして動作させる。Linux ベースで作成し、Web サービスを提供するため、3 章と 5 章においてあげたプログラムを実行する。

6.2 サービススクリプト

作成したライブラリやソフトウェアを HTTP 上から呼び出せるスクリプトプログラムを作成する。要求される処理の実行予想時間に応じて、ジョブ管理システムを通して実行またはリアルタイム処理を自動的に切り分ける。

6.3 外部計算機

東京大学情報基盤センターの FX10 スーパーコンピュータシステム (Oakleaf-FX)、東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻奥田研究室の TC クラスタ、Amazon EC2 を外部計算機として FEM ソルバを実行できるように連携を行う。

6.4 リモートジョブ

外部計算機へファイルを転送し、バッチジョブを送信する仕組みを用意する。外部計算機に自動的に解析ジョブが送信され、定期的にポーリングが行われる。ポーリングの結果によって結果を本システムのローカルへ転送を行う。

6.5 データ整理・管理機能

本システム上で作成した全てのファイルを自動的に保存しデータベースに登録する。そのファイルの作成元となったデータとの関連性も同時に登録される。容易にデータの関連性が利用者に示されることになり、解析結果の整理に役立つようにする。

7 実装したシステムと解析

7.1 ログインシステム

利用者の区別と結果の整理のためにユーザ登録機能を作成し実装したことによって、ユーザごとにファイルの表示させることができ、他者によるアクセスは制限される。

7.2 モデルの登録

CAD ファイルまたはメッシュファイルをシステムに送信することができる。



Fig.4 Setting condition page

7.3 形状データリスト

アップロードしたモデルは形状データリストに登録され、一覧として表示される。選択することでデータビューに移動し、メッシュ生成を行うことができる。

7.4 形状データビュー

選択した CAD モデルを表示し、図として表示する。この図は 5.1 章のプログラムで作成され三次元的に確認が可能である。

7.5 メッシュの実行

CAD モデルを確認した後、メッシュにおいて FEM メッシュを作成する。節点密度の制御をユーザにおいて設定することが出来、粗密制御が可能である。

7.6 メッシュリスト

メッシュによって作成された FEM メッシュ、ユーザによってアップロードされた FEM メッシュが一覧に表示される。選択することで、データビューに移動し、解析条件を設定することができる。

7.7 メッシュビューと解析条件の設定

選択した FEM メッシュを表示し、図として表示する。この図は 5.1 章のプログラムで作成され三次元的に確認が可能である。図 4 のように境界条件を与えるための面を選択し、境界条件を設定することができる。

7.8 境界条件の確認

設定された境界条件を図として表示させる。この図については三次元的に確認することが可能である。解析に関する条件を設定した FEM メッシュを解析モデルとして登録し、保存することができる。

7.9 解析モデルビューと解析実行

登録した解析モデルはリストより選択することができ

る。ここでは、選択した解析モデルの図を作成し、三次元的に確認することが可能である。ここで、計算サーバを選択肢、並列数を指定する。ソルバ解法と、反復法であれば前処理を選択して解析実行することで自動的に解析が行われる。

7.10 解析結果

解析結果は計算機より取得され、登録することができる。図を作成し、三次元的に確認することが可能である。変形強調した図や応力などのコンター図を作成することで結果の比較・検証ができる。

8 評価

FrontISTRのユーザを対象に計8名から評価を取った。機能面でセキュリティ性、計算時間見積もり機能、例外処理の厳格化、インターフェースの改善などの指摘を受けた。シンプルさについての評価が高い一方、機能が少ないことについての評価が目立った。

評価を行ったユーザは CAE に十分な知識と経験を持つユーザであり、機能が少ないことに対する低評価は当然であるが、シンプルさへの評価が高いことは本研究の目的設定は適当であったと考えられる。

9 結論

本研究では、CAE の一連のプロセスを支援するクラウドサービスを作成した。プログラムのコンパイル、ジョブの送信、ファイルの転送といったシェルを中心とした操作をすべて省くことができ、プリプロセッサなどの様々なプログラムとの連携も不要となるシステムであることから、技術面での支援を行うことが出来た。また、本システムでは様々なプログラムを連携し、使用しているが、オープンソース・ソフトウェアのみで構成されており、低コストに CAE を利用できる環境も整った。さらに、データ管理の仕組みを加えることで、データは体系的に保存されるため、データの散逸を防ぐことができるようになった。このクラウド CAE システムを用いることで、今まで CAE が利用されなかった現場に CAE が用いられる可能性が広がることや、研究活動が効率化されることが期待される。

参考文献

- 1) 奥田洋司: マルチパラメータサーベイ型シミュレーションを支えるシステム化技術に関する研究, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 平成 24 年度共同研究 最終報告書, (2013).
- 2) 和田義孝: ウェブ・ベース CAE システム: CASOW の開発, 計算力学講演会講演論文集, Vol.16, (2003).
- 3) 和田義孝, 力武俊介, 菊池正紀: FEM を用いた Web ベース CAE システムにおける任意形状解析, 計算力学講演会講演論文集, Vol.18, (2005).
- 4) 奥田洋司, 早田浩平, 橋本学, 上島豊: クラウド CAE システムを用いた効率的な有限要素モデリング, 計算工学講演会論文集, Vol.17, (2013).
- 5) 東京大学革新的シミュレーション研究センター CISS, <http://www.ciiss.iis.u-tokyo.ac.jp/>, (2015/01/10 参照).