

12-MD06

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

奥田洋司（東京大学）

概要

本年度は、昨年度に引き続き、8 拠点での活動とし、実利用の展開を図った。実利用を推進するために、2011 年度で指摘された機能改善点と共に、システムの改良、運用ガイドラインを明確化し、実運用への最終準備を整えている。また、システムを使った個別研究『不確実性を考慮した構造設計』、『溶鋼温度制御における不確実性の評価』、『実生体の複雑形状を考慮した流体、構造計算』、『航空機設計システムの CFD 教育への展開』、『Octa を使った高分子系のシミュレーションシステム』の推進およびシステムを使った効果の評価を行っている。

1. 研究の目的と意義

本共同研究の背景

15～20 年前は、シミュレーションの専門家は少なく、計算機性能も現在の 100 万分の 1 程度であり、研究のボトルネックは専ら計算時間であった。そのため、大規模シミュレーションや広域パラメータサーベイシミュレーション研究のような大容量データの生成はあり得なかったし、可視化や統計処理など各種データ処理を切り離して手動的に行っても処理時間や処理プロセスの記録も問題とされない状況であった。

しかしながら、計算機の性能向上とともにシミュレーションは、大規模化、精緻化が進み、研究のボトルネックが計算時間ではなくなってきた。その結果、シミュレーションの大規模化、精緻化が実際の研究・解析業務を全体としてみた場合に、高度化、効率化をもたらしたかさえ危ういのが現状であろう。

3 次元の時系列シミュレーションを例に考えてみる。当然、昔は、時系列はおろか、1,2 次元でしか計算ができなかったので、メッシュ生成やその後の可視化処理なども X-Y plot 程度で十分であり、出力結果を紙に印刷して、それを目で読み、グラフを作っても研究の進展に大きな遅れがない状況だった。また、「紙に印刷して、それを目で読み」

など、一見して無駄な作業をしている間に、重大なミスを見つけたり、新たな発見があったりしたこともあるだろう。

しかし、3 次元の時系列シミュレーションの場合はどうだろうか？メッシュ生成は、格段に難しくなり、精緻な構造に対する計算の場合は、それこそ研究全時間の殆どを費やさなければならなくなる。また、定常問題であれば、渦のできる場所を細かく切るなど、ある程度の答えが分かっている状況において、メッシュを作成したが、時系列となると、メッシュ自体を動的に変動させる手法やその張替の誤差評価など新たな問題も出てくる。可視化処理においても、4 次元の情報をどう可視化すると、現象を正しく把握できるか？という根本的な問題に直面する。これらに伴い、メッシュを作ったり、何か知りたい情報を得るために昔と比べて、比べ物にならないぐらい、たくさんのツールや理論を使いこなさず、多段の処理を行わなければ、ならなくなってしまう。また、精緻なシミュレーションであればある程、今まで無視していた情報をシミュレーションに取り入れなければ、ならなくなってくる。例えば、初期値や境界条件、物性値、物性値のばらつきは、従来理想的な条件で計算をしていたかもしれないが、計算精度より影響度が大きくなっていくのであれば、そ

これらの情報を入手し、シミュレーションに反映させなければならなくなる。そうしなければ、結局精緻な計算をしたといっても、現実問題では他のドミナントな現象にかき消され、無意味な計算、および、結論を導き出すことになってしまうのである。そういう問題を回避しようとするれば、現場に赴き、初期値や物性値のばらつきデータをもたらってきたり、ひょっとすると計測から始めないといけないかもしれない。

ここまでの背景としての話を総括しておく。現状の大規模シミュレーション、広域パラメータサーベイシミュレーション研究では、様々なツールの開発、利用習熟、多くの分野の知識、結果の処理プロセス、パラメータ把握などの様々な課題が研究者に突き付けられている。そして、それらをよく扱えない場合、現状のシミュレーションは、研究・解析業務に高度化、効率化をもたらすとは、限らず、多くの時間を消費したあげく、誤った結論を導き出してしまふ可能性が高いのである。

一方、現在は、個人レベルを超えて、社会全体で考えると様々なコンピュータ、関連ツールや高度な開発環境が提供され、容易にプログラム開発やシミュレーションを実施できる環境が整いつつある。従来、シミュレーション研究を行う場合は、なんでもかんでも自分で作るしかなかった状況とは、明らかに異なっている。しかし、個人レベルで考えると他の人が作ったツールを使えたり、結果を参照できないのであれば、何も状況改善しておらず、結局、大規模化、精緻化した故の問題が増えただけで、個人への負担が大きく、シミュレーションの品質（ヒューマンエラーや操作方法間違い、適用限界を超えた適用など）は、かえって悪くなっていると考えられる。

大規模シミュレーション、広域パラメータサーベイシミュレーション研究を一人で遂行しようとする大きな困難が立ちはだかるが、計算科学分野の各専門領域で開発されたプログラムを活用し、各専門領域の専門家に相談をすることができれば困難性は大きく低減できる。実際、異分野連携や融合領域研究はそれを志向したものであり、多く

の研究プロジェクトが精力的に進められている。しかしながら、双方の研究者に大きな負担が生じ、当初想定していた成果が得られないまま、競争的資金の終了とともに研究自体が終了してしまう場合も多い。実際には、研究の成果自体も離散し、大きな知的財産が喪失しまっている、つまり研究結果の再現すら困難な場合が多いのである。

つまり、計算科学分野の各専門領域で開発されたプログラムと専門的知見という大きな知的財産があるにも関わらず、十分うまく活用できていない状況がある。かねてより、日本の学術会において多くのシミュレーションプログラムが開発され公開されている。それを使った研究実績も積み上げられている。しかしながら、必要とする研究者が実際にそれらのプログラムを十分利用できているかという面では疑問が残る。

こうした現状を解決するひとつの鍵は、2000 年前後から研究開発が進められ、現在、クラウドとして世間を席卷しているグリッド技術であると考ええる。

本共同研究の目的とアプローチ方法

各専門領域で開発されたプログラムと専門家との有効な連携を可能にする、つまり、「必要とする研究者が実際に十分利用できていない」のは、利用者環境へのプログラムの導入ハードルが高いことが大きな要因であることに注意しなければならない。現在、Googleをはじめ様々な IT 企業が各利用者環境にアプリケーションをセットアップする方式から、WebService により、Internet 側でアプリケーションを準備し、利用者はそれを利用する方式にシフトしている。この方式は、様々な利用者環境に対応する負担や維持コスト、アプリケーションの更新コストを大きく軽減することができる。既存の商用アプリケーションから学術会で開発されたプログラムまで、簡単に WebService 化が可能なミドルウェアもすでに存在し、運用実績もあり、本共同研究では、すでに運用実績のあるミドルウェアをベースに試行システムを開発する。

WebService 化の次に必要なことは、当該プログ

ラムで計算した結果、結果評価のために行ったポスト処理、それら一連の処理、つまり処理プロセスおよびその入出力情報等の再現計算に必要な全情報が完全な形でアーカイブされ、さらに、研究者が行おうとする計算に類似した結果を検索できる仕組みがあることである。これは、WebService を連携連動させる機構と各 WebService における設定情報および連携した WebService の情報データベース化できる仕組みがあれば実現可能である。

本共同研究は、多次元のパラメータ空間におけるマルチパラメータサーベイ型のシミュレーションにおける超大規模数値計算技術（可視化技術、数値計算アルゴリズム等）、超大規模データ処理技術（最適化技術、データマイニング技術等）、大規模情報システム関連技術（システム化技術、自動化技術、データベース化技術等）がどうあるべきかを明らかにし、その課題を解決するための機構（マルチパラメータサーベイ型シミュレーション用統合クラウドシステム）を開発、統合することを目的とする。

具体的には、上記システムを構築し、試験的運用を行うことで、上記仮説を検証するとともに、「地理的、専門的に分散した様々な分野の研究者が情報技術でスムーズにつながることで、研究の効率化と革新性が促進される」ことを確かめ、その有効性を評価することを目標とする。

本共同研究の意義

本共同研究では、不確実性を考慮した設計等の多次元のパラメータ空間におけるマルチパラメータサーベイ型のシミュレーションを実施する場合のデータハンドリングおよびそのシステム化（自動化、DB 化等）等の様々な課題を解決する機構を開発する。大学等で開発、公開されているシミュレーションプログラムおよび計算センターで導入されている市販アプリを中心にプリ、ポスト処理を含め統合的に Web ポータル化、SaaS 化を行い、これらアプリを利用する研究者が、環境設定や利用方法、利用手順を習熟しなくとも研究が遂行できる環境（マルチパラメータサーベイ型シミュレ

ーション用統合クラウドシステム）構築を目指す。

それらにより、大学等で開発、公開されているシミュレーションプログラムの普及が飛躍的に向上することが見込まれる。また、それらの結果が自動的にデータベース化される機構を開発することで、本人による過去の結果の再参照や他の人への処理手続きや結果の公開により、研究開発の信頼性と継承性を高めることも期待される。

図 1 に本研究が提唱するシミュレーション環境の概念を示す。その結果、本共同研究者の本来研究テーマである「不確実性を考慮した構造設計」、「実風洞装置と同レベルのデータ生産性、品質を有する数値風洞」、「沸騰などの発生型気液混合流の動態予測」、「実生体の複雑な形状をそのまま取り入れた構造、流体等の物理計算」のように現在、困難を極めるようなシミュレーションが実用レベルに達することが見込まれる。

また、本共同研究は、公的研究機関のシミュレーション研究のみならず、実験研究、広くは民間における研究開発全般に影響を及ぼすものであり、日本の研究開発の競争力、信頼性、継承性の向上に大きく寄与するという意義がある。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した大学名

北海道大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、大阪大学、東北大学、東京工業大学、九州大学、同志社大学、京都芸術造形大学、宇宙航空研究開発機構

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野、大規模データ処理系応用分野、大規模情報システム関連研究分野
以下、より具体的な分野
流体解析、構造解析、プラズマ物理、医工連携、並列有限要素法、並列可視化、最適化、データマイニング、DB 化、CAE システム化、IT 教育、マンガ

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など

本研究は、その目標が「地理的、専門的に分散した様々な分野の研究者が情報技術でスム

ースにつながる」ことを実現するためのシステムを開発し、従来研究者に大きな負担を強いていた「大規模シミュレーション、広域パラメータサーベイシミュレーション研究のハードルを下げ、研究の効率化と革新性を促進する」ことを実証することであり、その意味で、国内の様々な拠点の計算資源、ソフトウェア資源を利用し、国内の様々な分野の研究者との連携から生まれる新しい研究のあり方を探る、という当公募型共同研究の目的と合致している。

ど)に伴う、対応を行い、各拠点の様々な NQS (LSF, PBS, LoadLeveller 等) や batch, 対話処理などを織り交ぜ全拠点を連携させ、様々な拠点の計算機、アプリケーションをシームレスに継続利用できることを確認した。

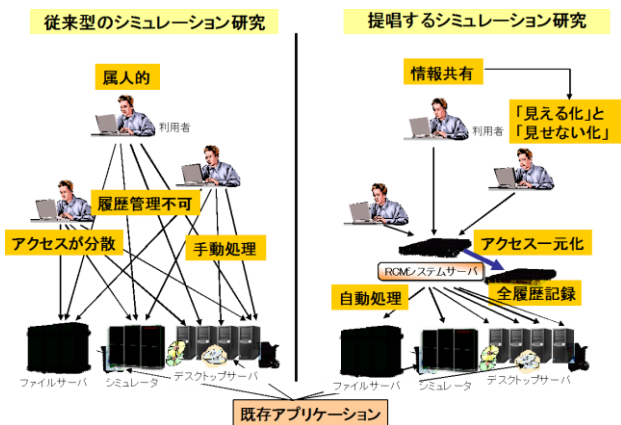


図 1 シミュレーション統合クラウド環境

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

全拠点の連携 WebService-Workflow 作成

昨年に引き続き、8 拠点でシステムを展開し、システム運用を行った。

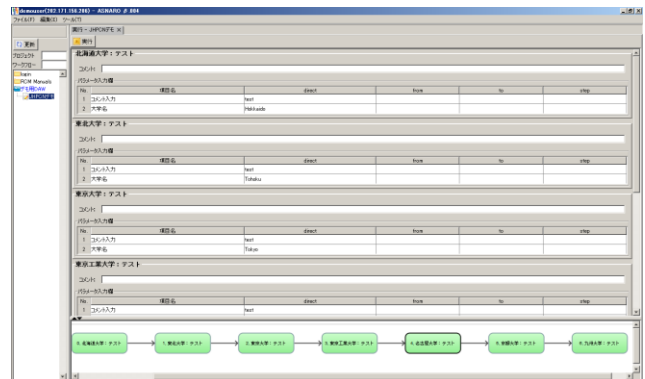


図 38 拠点をつないだ連携 WebService-Workflow

システム運用、利用用のドキュメント整備・改善

昨年度作成したシステムを運用、利用を行うためのドキュメントの整備・改善を継続して行った。

昨年度のシステムでは、管理者作業は、クライアントアプリからではなく、ブラウザから行う必要があったが、管理者負担を軽減するためにクライアントから作業を統一してできるように改善した。それらに伴い講習会資料等の改善、修正を行った。改善した部分をいくつか抜粋、提示しておく。

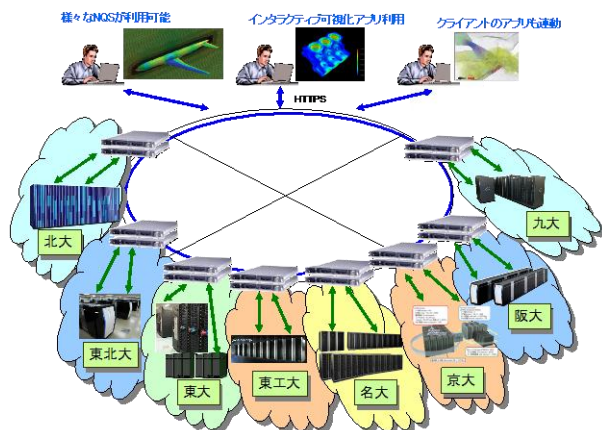


図 2 構築した運用システム

ログイン:ASNAROクライアント 1/2

- ASNARO_Softフォルダの「config.xml」をテキストエディタで開きます。
- keyが「webURL」「controllerURL」のentryに、ASNARO-FrontサーバのFQDNまたはIPアドレスを設定します。

```

<?xml version="1.0" encoding="Shift_JIS"?>
<properties version="1.0">
  ① <entry key="webURL">http://192.168.1.223:8080/RCM-Web/</entry>
  ② <entry key="controllerURL">http://199.168.1.223:8080/RCM-Controller/</entry>
  ③ <entry key="anchorTemplatePath">01t.FrontPageWebComponentSearch.1.2.8</entry>
  ④ <entry key="showDateComponent">false</entry>
  ⑤ <entry key="fileDisplimit">208</entry>
  ⑥ <entry key="maxMultiRunThreadNum">18</entry>
  ⑦ <entry key="defaultNumOfFileLimit">100</entry>
</properties>
                
```

4 2012/8/30

図 4 管理者講習会資料 1

各拠点において JHPCN の利用計算機の更新・変更 (例えば、東大 FX10、北大クラウドシステムな

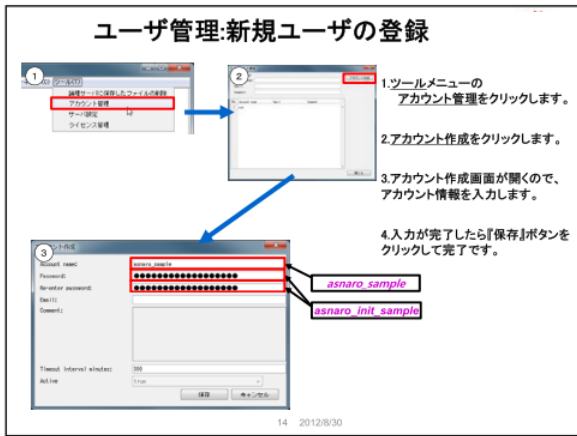


図5 管理者講習会資料2

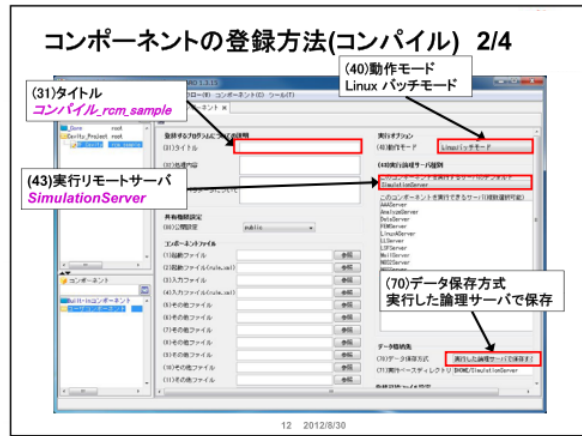


図7 利用者講習会資料1

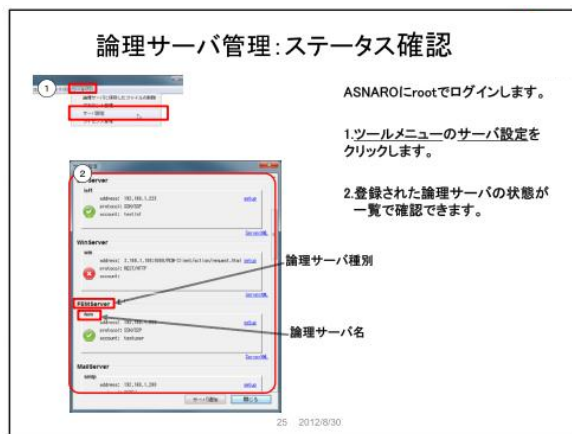


図6 管理者講習会資料3

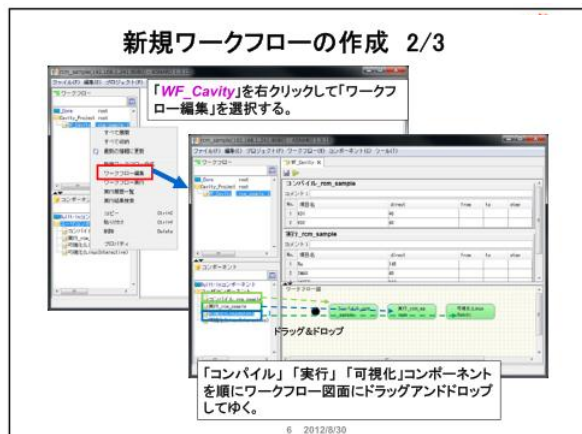


図8 利用者講習会資料2

昨年度のシステムでは、サービス（コンポーネント）のリストが別画面であったが、メイン画面から常に見えるようにし、利用者がサービスフロー（解析フロー）を作成し易くした。また、一旦登録後もサービス内容に変更がない部分（例えば、コンポーネント名など）できえ、従来変更できなかったが、変更できるようにした。コンポーネントの入力デフォルト値を解析フローごとに個別設定できるようにし、サービスフロー（解析フロー）の利便性を高めた。これらに伴い講習会資料等の改善、修正を行った。改善した部分をいくつか抜粋、提示しておく。

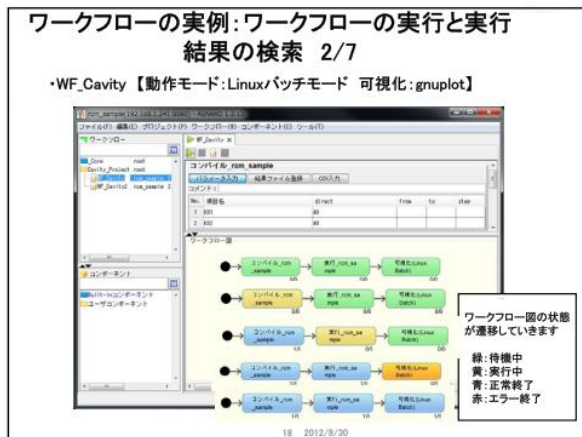


図9 利用者講習会資料3

課題と課題の解決

評価を進めていくうえで、幾つかの課題が明らかになったので、主なものを以下であげておく。

- a) 東大の FX10 などいくつかのシステムで、従来の NQS モードにおいて、システムとスパコンの NQS の連携ができないものが出てきた。
- b) 論理サーバ（システムから投入できるサーバ）で停止中のものがたくさんあるときに、論理サーバ設定画面自体のレスポンスが遅くなり、時にはタイムアウトが発生し、設定画面が表示できない状態が発生した。
- c) 遠隔でネットワーク通信状態が悪いシステムと接続している場合に、クライアントとシステム間のネットワークが切断されてしまうことがあった。

上記課題に開始し、解決方法を模索し、実際にシステムを改善し、その後、実地検証を行った。

- a) 従来の NQS モードでは、Torque の `-i option` (LSF の `-K option`) 相当の NQS システムの待機モードで JOB の実行終了判定を行っていたが、システム側で実行プロセスを監視するモードを新たに追加した。これにより、より多くの（現時点では、JHPCN で全ての）計算機への JOB 投入が確認できている。
- b) サーバの死活確認を並列化し、高速に確認ができるようにし、問題を改善した。
- c) また、クライアントとシステムサーバとの間の通信状態を定期的に確認する仕組みを導入し、通信が切れた場合は、再ログイン要求を自動的に行うようにし、問題を改善した。

実研究における適用

実研究へのシステム適用を本格化した。ここでは、「不確実性を考慮した構造設計」、「風洞シミュレータを使ったシミュレーション教育」、「OCTA を使った高分子設計シミュレーション」に関し、特筆すべき結果を報告する。

「不確実性を考慮した構造設計」

有限要素法で扱うモデルは大規模、複雑化している。そのようなモデルの精密性を生かすためには、境界条件、物性値などにも同じ精密性が求められるが、それらの情報は事実上わからないことが多い。そういった場合には、その不確実性を考慮して有限要素解析を行う必要がある。ここでは、不確実性を扱う方法として用いた確率有限要素法は、不確実性を確率変数で記述し、有限要素法の枠組みの中で離散化して解く方法である。各要素がそれぞれ確率変数を含むときに、次元数 n (= 系の自由度数) の行列方程式 $A \mathbf{x} = \mathbf{b}$ を要素数回解かなければならない。係数行列 A は共通であるため、一度 A を LU 分解すれば少ない計算コストで解くことができるが、大規模問題においては A を LU 分解することは計算量の観点からみて困難である。このため、確率有限要素法の大規模問題への適用は現実的ではないと考えられてきた。本研究では、係数行列が等しい一連の行列方程式群を効率的に解く共役勾配法的一种として、改良 Seed アルゴリズムを提案し、その非同期分散性に着目して分散並列環境での実施を進めている。従来は、ボランティアコンピューティングの基盤として開発された BOINC をデスクトップグリッドのためのフレームワークとして用い、クラウド上の資源 Amazon Elastic Computing Cloud (EC2) を用いるなどしていたが、本研究で構築したシステム上で並列有限要素解析システム FrontISTR のジョブ実行環境のカスタマイズ等を実施した。本システムにより、以下のような効果、今後の研究の発展性が得られた。

- ・複数のスパコンを用いるメタコンピューティングの領域においても本システムによって資源とジョブの管理を行い、デスクトップで解くことができるようになった。
- ・ユーザはデスクトップグリッドとしてスパコンの違いを意識することなく確率有限要素解析を行うことができる。
- ・結果的に、不確実性を有限要素解析で扱う手法の莫大な計算コストを数理的手法で軽減しつつ分

分散環境の利用で現実的な計算時間で解けるようにする手法とシステムが提案できた。

これは確率有限要素法だけではなく、数値シミュレーション一般や分散環境利用技術一般に寄与できるものであり、実際、パラメトリックに物性値や境界条件などを変更して並列構造解析をルーチンワークする個別研究テーマでの利用に供されつつある。具体的には、「溶鋼温度制御における不確実性の評価」、「大規模構造物の構造要素モデリング方法の選択による精度・コストバランス評価」などである。

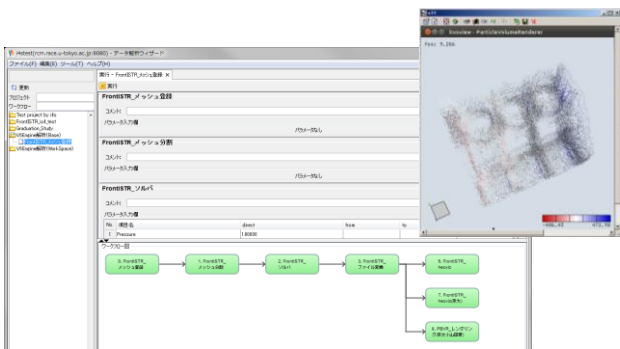


図 10 不確実性を考慮した構造設計

「数値風洞を使ったシミュレーション教育」

JAXA で開発した HexaGrid、FaSTAR を使った航空機流体シミュレーションコード群を東京大学、名古屋大学の航空工学系学科、専攻の学生の教育として使っている。本試作サービスを使うことにより、以下の特筆すべき効果があった。

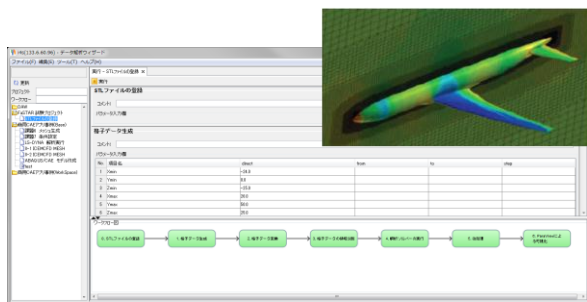


図 11 数値風洞を使ったシミュレーション教育

- 従来は、コードの使い方を毎年、新しい学生に教えるために、受け入れ先（JAXA：開発担当）が多くの労力を使う必要があったが、本システ

ムを導入後、その労力は 1/10 程度に低減し、より多くの受け入れ、および自身の研究との両立が可能となった。

- また、直接的な教育プログラムではないが、実験家からの依頼で本シミュレーションコード群を使って、解析を行うことが多かったが、本システムでは、シミュレーションに精通していない実験家にも簡単な使い方を教えるだけで、実験家自身がシミュレーションをできるようになった。結果として、コード開発担当者の労力は、従来の 1/5 程度で、実験家が行いたいシミュレーションが可能になった。

「OCTA を使った高分子設計シミュレーション」
OCTA を使った高分子設計シミュレーションが大学、企業などの共同研究で進められている。本試作サービスを使うことにより、以下の特筆すべき効果があった。

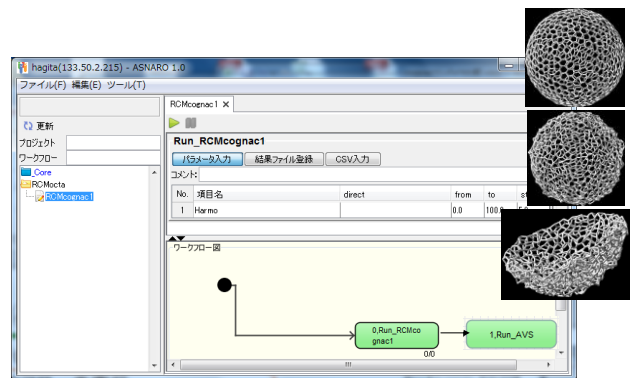


図 12 OCTA を使った高分子設計シミュレーション

- OCTA などの公的研究機関で開発された解析プログラムは、先端的研究ができるがゆえに非常に多機能となっている。しかし、その多機能性を充分支援するほどのユーザインタフェースにはなっていない。また、企業で使う場合には、企業の方が、それら状況に慣れ親しんでいないのも大きな障害である。本システムで高分子設計（今回は、ゴム設計で、柔軟かつ摩耗性の低いタイヤ用のゴムの設計をパラメータスタディで決定しようというものである）を行うことで、企業の方でも容易に OCTA でのパラメータ

スタディができる」と評価された。

- ・また、未知の構造に対して高分子の設計を行う場合、評価すべきものが明確でなく可視化は問題発見のためには、重要なプロセスである。しかしながら対話的な可視化だけでは、処理数に限界があり、膨大な量力がかかる。本システムでは、非常に高機能で多様な可視化が可能な AVS/Express を高分子設計用にカスタマイズし、それらをサービス化、OCAT と連結し解析フロー化することで、高分子設計のパラメータスタディの効率化が可能となり、企業への展開可能性がより現実的なものになった。

これらの労力削減・利用ハードル低減の主因は、解析フロー化による各アプリケーションの単機能化（設定値の少量化）と結果および入出力特性値のデータベース化である。つまり、簡単に使え、また入出力結果が完全にトレースできるレベルで記録されているので、結果を見ながら、相談、アドバイを与えるのが的確かつ容易になることが、大きな労力削減につながっている。

現在まで、ほぼ研究計画書の通りに進捗ができたと言えるが、今後は以下に述べるような課題を解決しつつ、ここで評価したクラウド援用研究以外にも本技術を展開、推進できるように支援をしていく必要がある。

4. 今後の展望

今後、本研究が展開できる意義のある形態として、公的な競争的資金などによりアプリケーションが研究開発された場合の、成果の社会還元の有効な方法となることが考えられる。従来は「ソフト公開」によって、実行モジュール、ソース、マニュアルなどの関連ドキュメントをウェブから入手可能とすることが多い。開発者側としても、公開を通じて広く普及することを望んでいる。また、シミュレーション結果の保証手段として公開に勝る手段はないとも言える。しかしながら、公開の本来の実効を果たすことは容易ではなかった。仮に有益なソフトウェアが開発されたとしても、公

開はプロジェクトの終盤に実施されるので、ユーザーを意識した利用方法の説明、質問やバグ対応、などにきめ細かく対応するサポート体制がない。その結果、ある程度のダウンロードはあるものの、普及するかどうかの検討段階に至ることなく、やがて開発者も去りソフトウェアは塩漬けにされてしまう。本研究では、スパコンクラウド上において（スパコンに限らない）計算機ハードウェア、グリッドミドルウェア、アプリ、各種のデータ、タスクフロー、が緊密に連携されているため、ユーザー間の実際的な経験的な知見共有を促進し、ソフトの自立的なメンテナンス体制を整えることに貢献することができる。

もう一点は、情報基盤センター（研究室レベルの計算機サーバーを含む）を従来の CAE 教育の場としてだけではなく、CAE 知識のリザーバとして有効に利用できることである。本研究の対象アプリには商用アプリも含めることができるため、情報基盤センター等が導入している様々な商用アプリをも対象として E ラーニング、知識共有の場が構築できる。ソフトウェアベンダによる一過性の講習会では提供されない、計算データや解析経験の充実化、それらを通じた知的サービス提供が期待される。

5. 研究成果リスト

- (1) 奥田洋司・宮地英生，視覚協創学(8)：大規模 FEM と可視化の分散データ対話協調，第 17 回計算工学講演会，2012/5.
- (2) 奥田洋司，村田伸，上島豊，広域分散計算機リソース利用による並列 FEM アプリのクラウドサービス化，第 17 回計算工学講演会，2012/5.
- (3) 奥田洋司，飯田陽一郎，小山田耕二，坂本尚久，上島豊，石原典雄，前田茂樹，犬飼貴史，広域分散計算機リソース利用の並列 FEM/可視化クラウド，第 16 回計算工学講演会，2011/5
- (2) 上島豊，前田茂樹，犬飼貴史，江口和宏，石原典雄，PaaS-CAE 基盤技術に関する研究開

- 発, 第 16 回計算工学講演会, 2011/5
- (3) 上島豊, 超高性能電卓から Simpedia へ, オープン CAE シンポジウム 2011, 2011/12
- (4) 上島豊, シミュレーションクラウドサービス, 神戸 IT フェスティバル 2011, 2011/4
- (5) 上島豊, 『RCM System Software』の実習と講演, 第 32 回関西 CAE 懇話会, 2011/5
- (6) Y. Yamamoto and T. Kunugi, Discussion on heat transfer correlation inturbulent channel flow imposed wall-normal magnetic field, FusionEngineering and Design, FUSENGDES-D-10-00759(in press)
- (7) Y. Yamamoto and T. Kunugi, Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow with Deformed Bubbles, Progress in Nuclear Science and Technology, PNST10142(in press).
- (8) Y. Yamamoto and T. Kunugi, Direct Numerical Simulation of MHD Turbulent Flows with High-Pr Heat Transfer, Progress in Nuclear Science and Technology, PNST10144(in press).
- (9) 山本義暢, 功刀資彰, 辻義之, 高プラントル数乱流熱伝達の直接数値計算における適切な空間解像度に関する考察 (Pr=5 の場合), Thermal Science and Engineering(2011), Vol.19 No. 3, pp.59-70.
- (10) Y. Yamamoto and T. Kunugi, Prandtl number effect on heat transfer degradation in MHD turbulent shear flows by means of high-resolution DNS, Heat Transfer / Book 1", ISBN 978-953-307-317-0(in press)
- (11) Y. Yamamoto and T. Kunugi, High Performance Computing for MHD Turbulent Flows with high-Pr Heat Transfer, Green Energy and Technology, Zero-Carbon Energy Kyoto 2010, pp. 222-229.