

課題名 (タイトル) :

熱流体マルチフィジックスシミュレータ技術の開発

利用者氏名 :

- 小野 謙二*
- 沖田 浩平*
- 岩田 正子*
- 俵 丈展*
- 小川 隆申*
- 橋本 学*
- 赤坂 啓*
- 森本 有紀*
- 伊東 聡**
- 瀧内 元気*
- 藤田 将洋*

所属 :

*本所 知的財産戦略センター V CADシステム研究プログラム
機能情報シミュレーションチーム
**和光研究所 次世代計算科学研究開発プログラム
次世代生命体統合シミュレーション研究推進グループ
生命体基盤ソフトウェア開発・高度化チーム

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

本研究課題では、VCAD の熱流体システムの開発を中心として、プリポスト技術、および大規模計算機の利用技術開発を実施する。本研究の成果の一部を次世代スーパーコンピュータプロジェクトに適用している。

2. 具体的な利用内容、計算方法と主な結果

今年度の研究課題として、強力集束超音波 (HIFU) による大規模シミュレーション、膜構造流体構造連成技術開発、自動車設計に向けた任意形状熱流体解析システムの開発について報告する。

2.1. 人体ボクセルデータを用いた H I F U 治療の大規模数値シミュレーション

2.1.1. はじめに

三大疾患の一つである癌の治療において、強力集束超音波 (High Intensity Focused Ultrasound : HIFU) の焦点で組織を加熱凝固によって壊死させる治療法 (HIFU 療法) が乳癌や前立腺癌等の体表に近い部位の腫瘍に用いられている。近年、脳腫瘍や肝腫瘍等の

深部の腫瘍にも適用されようとしており、実現されれば、切開手術が不要になり、治療・入院期間の短縮等による患者の負担減少が期待できる。深部の腫瘍治療の際に問題となるのが、皮膚や脂肪等の各臓器における超音波の減衰によるエネルギー不足と骨や各臓器間の界面における超音波の反射・屈折による焦点のずれである。前者の超音波のエネルギー不足に対する解決策として、超音波造影剤として用いられているマイクロバブルを援用する方法 1) が提案されている。この方法は、焦点付近に存在するマイクロバブルの体積振動による音響エネルギーから熱へのエネルギー変換効率の向上を利用するものである。一方、後者の超音波の焦点のずれに対しては、アレイ型超音波発信装置によって焦点位置を 3 次元的に制御する方法が有効であると考えられる。アレイ型超音波発信装置による焦点位置の制御はアレイを構成する各要素の位相遅延によってなされ、超音波が単一媒体中を伝播する場合には、各要素とターゲットとの距離から位相遅延を見積ることが可能である。しかし、深部の腫瘍治療のように、超音波が皮膚、脂肪、筋肉および骨等の不均質媒体中を伝播する場合には、術前に位相遅延を適切に設定することが困難であることが容易に想像できる。そこで、

CT や MRI 等から作成される生体モデルを用いた超音波伝播シミュレーションによって得られる情報を基に適切な位相遅延を算出することで、非一様な場を過ぎる超音波を高精度にターゲットに集束させる方法が考えられる。

このような背景の下、本研究では、アレイ型超音波発信装置の制御、施術前の検討および超音波発信装置の設計等の支援を目的として、超音波発信装置から治療部位までの多媒質からなる非一様な場を過ぎる超音波の非線形な伝播過程を予測し、最終的には空間および時間的な温度分布および加熱凝固領域の変化を再現するシミュレータの開発を行っている。

2.1.2. 生体内超音波伝播計算のための基礎方程式

生体内のような多媒質からなる非一様な場を伝播する超音波を記述するため、局所均質媒体に対する質量保存式および運動方程式（粘性流体のもの）を各媒質に対する状態方程式とともに解き、粘性による発熱を熱源とする熱伝導方程式によって温度上昇を算出している。また、組織の加熱凝固におけるタンパク質の熱変性を相転移と考え、金属の凝固等のシミュレーションで用いられる phase field model を応用して熱変性の疑似的な自由エネルギーをモデリングし、Allen-Cahn 式を解くことによって熱変性領域の時間発展の予測を行っている。

2.1.3. 数値計算法

直交等間隔格子において物理変数をスタガード配置し、基礎方程式を空間微分に 4 次精度中心差分、時間積分は Finite Difference Time Domain 法になって離散化を施し、空間 4 次精度、時間 2 次精度が得られている。計算領域の境界において圧力波の反射を防ぐために、Perfectly Matched Layer を用いている。また、領域分割による並列化によって、大規模計算に対応している。

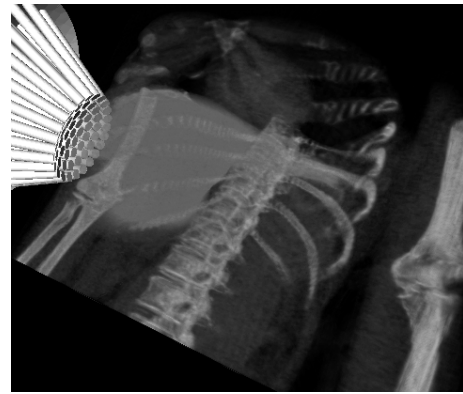


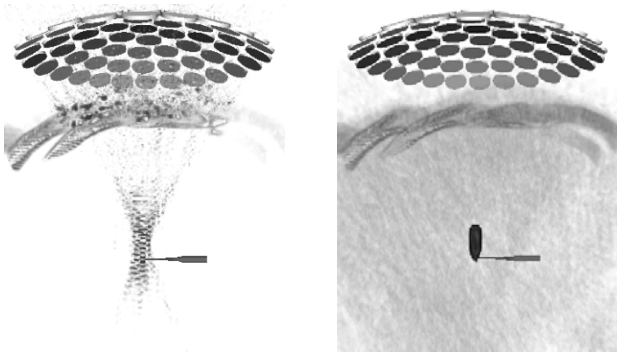
Fig.1-1 : HIFU therapy for a liver cancer with the array transducer. The human body data is provided by RIKEN Computational Biomechanics Project.

2.1.4. 肝腫瘍に対する HIFU 治療のシミュレーション

Fig.1-1 に示すような 61 チャンネルのアレイ型超音波発信装置を用いた肝腫瘍に対する HIFU 治療を想定したシミュレーションを行った。本研究で用いた生体モデルは臓器ごとにタグが振られており、それぞれの臓器ごとに物性値を設定した。これによって、発信された 1MHz の超音波が皮膚から入って、脂肪、筋肉、骨を通して肝臓に達する伝播過程をより現実的に再現できているものと考えられる。また、計算領域は 120mm x 160mm x 120 mm であり、600 x 800 x 600 格子点で解像した。

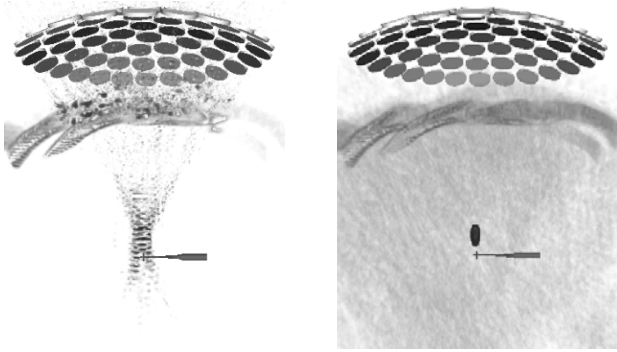
Fig.1-2 に瞬時の圧力分布と熱変性領域をボリュームレンダリング表示したものを示す。図中プローブの先端は、ターゲット点を指している。超音波はろっ骨の隙間を通して複雑に伝播し、ターゲットよりも手前に焦点を結んで熱変性領域を形成していることがわかる。次に熱変性に伴う物性の変化が音場に与える影響を調べるため、音響インピーダンスが変わるように熱変性によって音速が 20% 増加するという条件を仮定して計算を行った。Fig.1-3 に瞬時の圧力分布と熱変性領域を示す。Fig.1-2 と比べると明らかに熱変性領域が小さくなっていることがわかる。圧力分布をみれば、超音波の集束が悪くなっており、熱変性領域の界面で音が反射、屈折していると考えられる。また、瞬時の温度分布（図省略）を見ても、焦点近傍の温度上昇が音響インピーダンスの変化を考慮しない場合に比べて減少している。このように、熱変性によって音響インピーダンスが 20% でも変化すると音場が大きな影響を受けて、

熱変性領域が著しく変化することがわかった。



(a) Pressure (b) Denaturation region

Fig.1-2 Instantaneous pressure distribution and denaturation region without the change of acoustic impedance due to the denaturation.



(a) Pressure (b) Denaturation region

Fig.1-3 Instantaneous pressure distribution and denaturation region with the change of acoustic impedance due to the denaturation.

2.1.5. 並列性能測定結果

本研究で開発された HIFU シミュレータの並列性能を RICC において測定した結果について示す。計測環境は、コンパイラと MPI ライブラリを以下の組み合わせで実施した。

- (ア) Intel Compiler + OpenMPI
- (イ) Intel Compiler + Fujitsu MPI
- (ウ) Fujitsu Compiler + Fujitsu MPI

また、通信手法について、通常版と通信隠蔽版 (HIDE) の 2 種類を実施した。

計算規模を $1200 \times 1600 \times 1200 =$ 約 23 億要素と固定した場合の Strong Scaling による並列性能の測定結果を Fig.1-4 に示す。データは、1024Core 並列の結果で正規化されている。どのコンパイラと MPI ライブラリの

組合せにおいても、最大の 8000Core 利用まで並列化による高速化が得られることがわかった。

一方、コアあたりの計算規模を $75 \times 100 \times 75 =$ 約 56 万要素と固定して、Weak Scaling による並列性能の測定結果を Fig.1-5 に示す。データは、4Core 並列の結果で正規化されている。8000Core 並列利用時における、最大規模の $75 \times 100 \times 75 \times 8000 \text{core} =$ 約 45 億要素の計算においても最大 87% の並列性能が得られることがわかった。

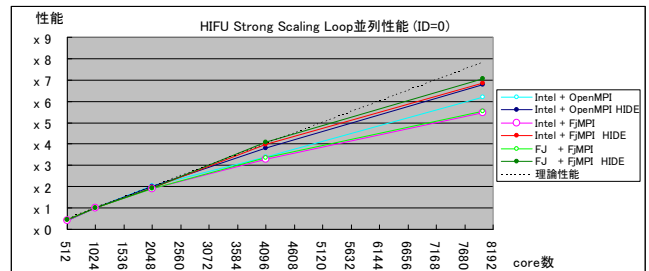


Fig.1-4 Strong Scaling による並列性能測定結果 (データサイズ: $1200 \times 1600 \times 1200 =$ 約 23 億要素)

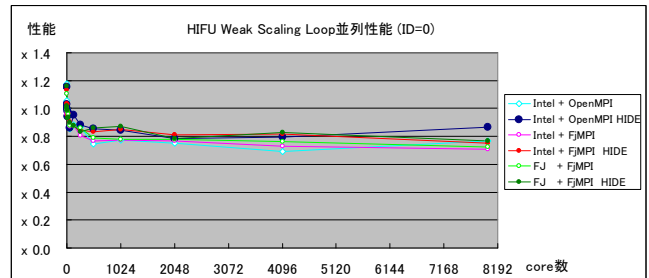


Fig.1-5 Weak Scaling による並列性能測定結果 (データサイズ: $75 \times 100 \times 75 \times 1 \text{core} =$ 約 56 万要素 ~ $75 \times 100 \times 75 \times 8000 \text{core} =$ 約 45 億要素)

2.1.6. 2-1 節のまとめ

組織の加熱凝固を一種の相転移とそれに伴う物性値の変化としてモデル化し、アレイ型超音波発振装置を用いた肝腫瘍に対する HIFU 療法を想定したシミュレーションを行った。その結果、熱変性によって音響インピーダンスが 20% でも変化すると音場が大きな影響を受けて、熱変性領域が著しく変化することがわかった。一方、本研究で開発された HIFU シミュレータが RICC の 8000Core を利用した大規模並列計算においても良好な並列性能を有していることが分かった。

2.2. ボクセル格子に基づいたエアバッグ展開の大変形 fluid-structure interaction 解析

2.2.1. はじめに

自動車のエアバッグ展開は、大変形 fluid-structure interaction (FSI) 問題の一つである。自動車が衝撃を受けると、エアバッグの内部に高圧・高密度の空気が急速に流入し、エアバッグはしわ (wrinkle) を形成しながら膨らんでいく。また、エアバッグの膨張によって周囲の圧力が変動し、乗員の鼓膜に影響を与えることも知られている。そこで、乗員への安全性を高めるために、この連成問題を解析することが可能な高精度な計算手法を開発することは重要な研究課題である。

2.2.2. 本研究課題の目的

大変形FSI解析に対して十分な精度・安定性を持つ計算手法を開発するために、我々は符号付き距離関数 (レベルセット関数) を利用した固定 Eulerian メッシュに基づくアプローチを提案し、薄い弾性構造 (シエル) の内側に流体が存在する問題で検証してきた。本課題では、エアバッグ展開を想定した空気とエアバッグの相互作用を解析することが可能なVCADデータに基づいた大規模流体構造連成シミュレーション技術を開発することを目的とする。VCADデータは空間情報をボクセルとして保持するため、データ量は必然的に膨大なものとなる。そのため、大型計算機の使用や大規模計算に適した並列計算技術の開発が必要となる。エアバッグ展開の解析では、空気の流入に伴って、エアバッグが大変形する。すると、解析対象となる領域の大きさが変化するために、CPUロードバランスについて検討することも研究の遂行上重要となる。

大規模流体構造連成シミュレーション技術のベースとなるVCADデータとは、理化学研究所のVCADシステム研究プログラムで採用されているデータ形式である。VCADシステムでは、設計から数値シミュレーション実行において統一的なVCADデータを用いるために、効率的な製品開発過程を実現することが期待できる。

2.2.3. 本研究課題の内容

エアバッグの外側での空気の圧力分布がエアバッグの展開に影響する可能性がある。本課題では、レベルセット関数の符号の正負を逆転することによって、構造を介した両側に流体領域を設定する界面処理法を提案する。そして、折りたたまれていない状態からのエア

バッグ展開の解析において、エアバッグ内側のみに流体がある場合と両側に流体がある場合を比較し、外側の空気の影響について検討する。

本課題で扱うFSI問題では流体の自由度が構造と比べて多いため、流体コードをMPI (Message Passing Interface) により並列化する。また、本課題では有限要素解析を行うために、流体メッシュの領域分割にはフリーソフトのMETISを利用する。

2.2.4. 計算方法

従来の提案手法における計算領域と計算メッシュが、図 2-1 に示される。計算領域は、物理的な流体領域 Ω_f 、構造領域 Ω_s 、ポイド (架空の流体) 領域 Ω_v から構成される。ポイド領域では、流体変数に対する Dirichlet 境界条件が、界面での運動学的条件を満足するように与えられる。計算メッシュは、構造の移動 Lagrangian メッシュと流体の固定 Eulerian メッシュに分けられる。構造は十分に薄いと仮定し、構造の中立面が界面 Γ_i に一致する。変形する中立面の幾何形状は、流体メッシュ上でレベルセット関数 $\phi(x)$ の零等値面 $\phi(x)=0$ として表わされる。

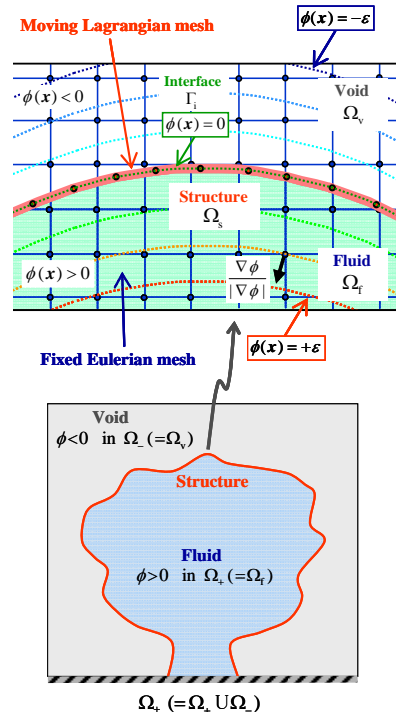


Fig. 2-1 Computational domains and meshes.

本課題では、構造の外側での圧力変化を予測するため、薄い構造の両側に流体領域がある計算モデルを考える (図 2-2 の上図参照)。流体領域の計算は、内側の流体の計算と外側の流体の計算に分けられる (図 2-2

の下図参照). まず, 従来の提案手法を用いて, 内側の流体の変数を計算する. 次に, 外側の流体変数を求めるため, 既に生成されたレベルセット関数の符号を反転し ($-\phi(x) \rightarrow \phi(x)$), 外側の流体変数に対するDirichlet境界条件を内側のポイド領域に与える. 二つのステップ (P2)' と (P3)' が従来の提案手法のステップ (P1) ~ (P4) に加えられる. partitioned-solution coupling methodのアルゴリズムは次のように示される.

(P1) 構造変数の計算

構造のNeumann境界条件となるトラクション (圧力) を境界積分し, 構造に作用する外力を計算する. 有限変位/回転増分を考慮したMITC (Mixed Interpolation Tensorial Components) シェル要素の有限要素法を用いて構造変数 (変位 \mathbf{u} , 速度 \mathbf{v} , 加速度 \mathbf{a}) を求める.

(P2) レベルセット仮想粒子による界面処理

仮想粒子を利用して, 構造メッシュの形状から流体メッシュ上のレベルセット関数 $\phi(x)$ を生成する. 生成されたレベルセット関数とそのこう配を利用して, 外側のポイド領域に内側の流体に対するDirichlet境界条件を与える.

(P3) 流体変数の計算

CIP有限要素法を用いて, 内側の流体変数 (密度 ρ , 速度 \mathbf{v} , 圧力 p) を計算する. 衝撃波近傍のように物理量が急激に変化する箇所では, 補間関数の低次化によって, 数値振動を抑えるようにする.

(P2)' レベルセット仮想粒子による界面処理

レベルセット関数の符号を反転し, 内側のポイド領域に外側の流体に対するDirichlet境界条件を与える.

(P3)' 流体変数の計算

CIP有限要素法を用いて, 外側の流体変数 (密度 ρ , 速度 \mathbf{v} , 圧力 p) を計算する.

(P4) 収束の判定

流体節点と構造節点での速度が収束していれば, 構造変数と流体変数を時間進行する. 収束していなければ, 手順 (P1) へ戻る.

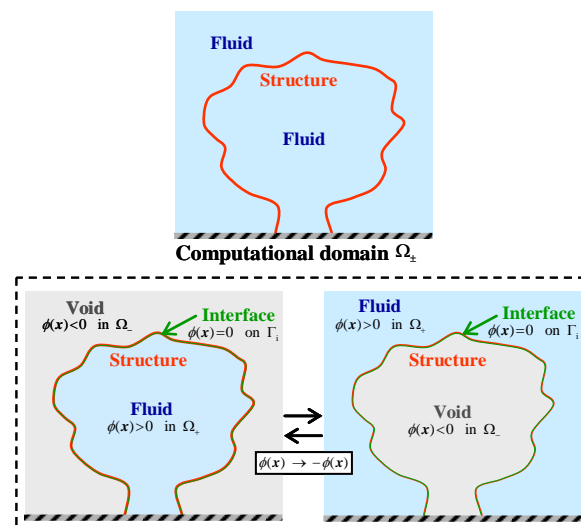


Fig. 2-2 Computational domain.

2.2.5. 計算結果

エアバッグ展開の3次元解析モデルを図2-3に示す. Case 1は内部のみに流体領域がある場合のモデルであり, Case 2は両側に流体領域がある場合のモデルである. 高密度かつ高圧の空気が底の流入口から入る. また, 図2-1と図2-2に空気とエアバッグのパラメータを示す. このモデルの形状とパラメータは, Cirak & Radovitzkyによるエアバッグ展開シミュレーションのモデルデータから設定される. 流体メッシュは直交格子約90,600個で構成され, 構造メッシュは4節点4角形シェル要素3,629個で構成される.

圧力分布をレベルセット関数の零等値面と共に図2-4に示す. 伝播してきた空気の圧力波がエアバッグ上部に到達すると, エアバッグ上部が徐々に上方向へ変形していく. また, その変形に伴って, エアバッグ側部が中央方向へ圧縮変形する. そのとき, 構造の曲げ剛性によって, 周方向へwrinkleが発生する. Case 2の場合, 膨張したエアバッグが外側の空気を計算領域の外側へ押し出すため, 外側の空気の圧力が小さくなる. その結果, エアバッグ上部の変位がCase 1より大きくなることがわかる.

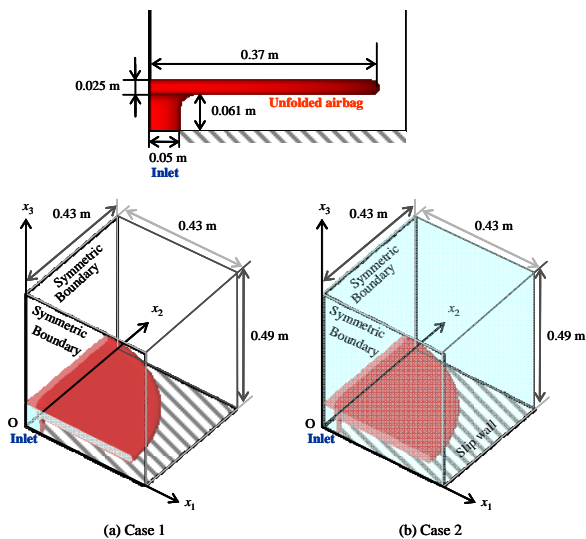


Fig. 2-3 Analysis models of unfolded airbag deployment.

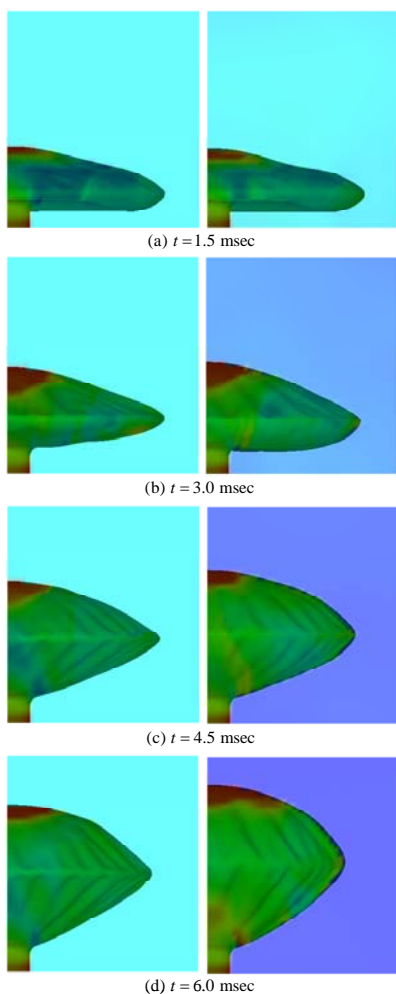


Fig. 4 Pressure contours and zero level set on the fluid mesh on $x_2 = 0$ until $t = 6.0$ msec (left figures: Case 1, right figures: Case 2).

2.2.6. 2-2 節のまとめ

本課題では、構造を介した両側に流体領域を設定する界面処理法の技術を開発した。そして、内側だけに空気がある場合と両側に空気がある場合の 3 次元エアバッグ展開の折りたたまれていない状態からのエアバッグ展開の解析を行った。そのとき、エアバッグ外側の空気の圧力が減少した影響による構造上部の変位の増加を確認した。

2.3. 自動車設計開発支援のための熱流体シミュレーションシステムの開発

2.3.1. はじめに

自動車のような複雑形状周りの流れを解析する場合、計算格子の生成に要する時間と労力が解析期間短縮の妨げとなっている。その原因として、設計現場で流通している形状データ(ポリゴンデータ)には不良なポリゴン要素が含まれており、非水密な(閉じていない)形状データとなっていることが挙げられる。市販の一般的な流体解析システムは水密化された(閉じた)状態の形状データを要求するため、ポリゴンデータを修正(水密化)する必要がある。この修正作業に多くの時間(数日から数週間)が費やされている。この形状データの修正作業を削減、または廃止できれば、解析期間の大幅な短縮が期待できる。

本研究では直交格子法を用いて、水密化された形状データを必要としない流体解析手法を開発し、解析期間を短縮することを目的としている。今年度は下記の2つのテーマについて研究を行った。

- (1) 1/5 スケール自動車周りの空力解析
- (2) エンジンルーム内の熱流れ解析

2.3.2. 計算方法

(1) 1/5 スケール自動車周りの空力解析

並列計算に未対応のため 1CPU のみ使用した。次の項目についてパラメータスタディを行い実験結果との比較検証を実施した。

- ・対流項の計算スキーム(風上差分/中心差分)
- ・LES 乱流モデルのパラメータ違い(Smagorinsky 定数)
- ・格子解像度

本研究で使用した計算手法の概要を述べる。支配方程式には非圧縮を仮定した Navier-Stokes 方程式と連続の式を用いる。計算格子は直交等間隔格子を使用。ただし、ネスティング(入れ子)型の格子細分化法を採用し物体周りの格子解像度を改善させている。物理量の配置は速度成分と圧力をセルセンタに配置するコロケ

ート配置を採用している。時間積分については対流項、粘性項ともに二次精度の Adams-Bashforth 法による陽解法を採用し、速度と圧力場のカップリングに Fractional Step 法を使用した。対流項の計算スキームは、問題に応じて三次精度風上差分または中心差分(二次精度/四次精度)を切り替えて使用している。粘性項は、二次精度中心差分により離散化している。乱流モデルは LES 乱流モデル(Smagorinsky モデル)を採用。また、本手法では直交格子法における形状近似精度を改善させるため、流体の支配方程式を離散化する際に、速度定義点から形状境界(ポリゴン)までの距離を考慮した離散化を行っている。

(2) エンジンルーム内の熱流れ解析

64 コアを用いた並列計算を行い、次の項目についてパラメータスタディを実施。実験結果との比較検証を行った。

- ・熱境界条件(熱源部品の温度、熱伝達率、基準温度)
- ・部品形状
- ・格子解像度

また、8~256 コアを用いて計算コード(C3D)のスケールビリティ評価も併せて実施した。

支配方程式には非圧縮を仮定した Navier-Stokes 方程式、連続の式およびエネルギー方程式を用いる。温度変化による浮力の効果は Boussinesq 近似モデルを用いて評価する。計算格子は直交等間隔格子(形状近似法はボクセル近似)を使用し、物理量の配置はスタガード配置を採用している。時間積分は Euler 陽解法を用いており、速度と圧力場のカップリングに Fractional Step 法を使用した。対流項は三次精度風上差分、粘性項は二次精度中心差分により離散化している。

2.3.3. 計算結果

(1) 1/5 スケール自動車周りの空力解析

計算結果を図 3-1、図 3-2 に示す。総計算格子点数は約 800 万セル。車体表面の圧力分布は実験結果と概ね一致している。また、計算時間は 1 CPU(Intel Xeon5570)を用いて 20 時間程度、計算格子も数十秒程度で作成できており、本手法を用いることで自動車周りの流れを短期間に計算できることが確認できた。

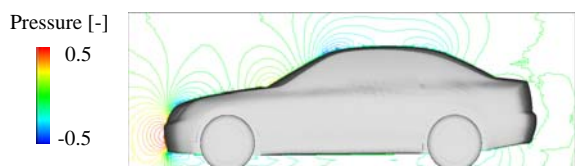


Fig. 3-1 Pressure distribution around a car body.

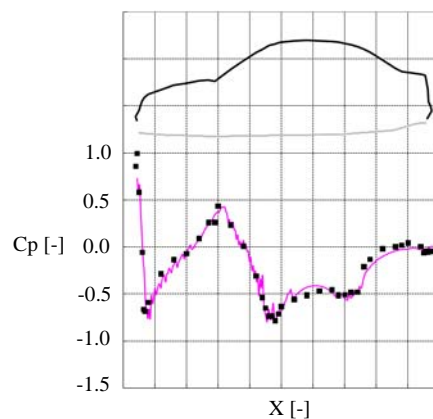


Fig. 3-2 Pressure distribution on the upper-body surface.

(2) エンジンルーム内の熱流れ解析

精度検証結果の詳細については、共同研究契約上の秘匿規定に触れるため割愛するが、エンジンルーム内の测温ポイント(11ヶ所)について実験値と計算結果を比較した結果、本手法は概ね $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 以内の精度を有することを確認できた。計算時間については物理時間 300 秒の非定常計算に約 3 時間を要した(64 コア使用)。これは実用的な計算時間といえる。また、並列計算性能の評価結果については図 3 に示す通りである。格子数は約 6600 万セル、物理時間 60 秒の非定常計算を行い評価した。

様々な境界条件を考慮した実アプリケーションにおいて、64 コアまでは約 80%の並列効率を示している。100 コア以上では効率が落ちるものの、200 コアまでなら 50%以上の効率を有していることを確認できた。

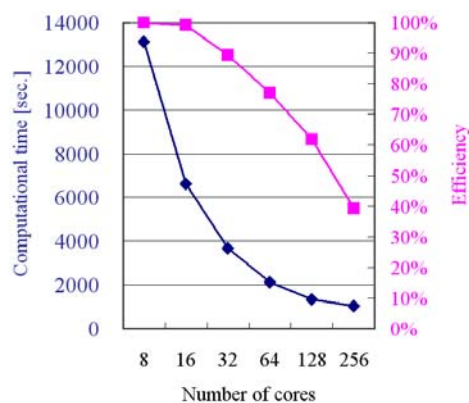


Fig. 3-3 Performance of parallel computation.

2.3.4. 2-3 節のまとめ

本手法を用いることで自動車空力および熱流れを短期間に精度良く計算できることを確認できた。

3. まとめ

本報告の 2 章で示したように、流体技術を中心として大規模、マルチフィジックス解析技術の研究開発を実施した。MPI 並列解析を実施し、8000 コアを使い切る計算規模のテスト計算とスケーラビリティの評価を行った。大規模な計算を実施するためには、相応のモデル作成と可視化技術が必須であること、また、多数のファイルのハンドリングの問題など運用・支援面で解決すべき課題があることがわかった。

4. 今後の計画・展望

エアバッグ計算は、今後、RICC を利用した予定として、より詳細な流体メッシュ（直交格子 724,808 個）を用いて、エアバッグが完全に展開される時間（10.0 msec 以上）までの計算結果を得て、実験データと比較することを考えている。

空力解析手法については今後、並列計算への対応および、より格子配置の自由度が高い格子（Octree 格子など）を採用し、実車モデルへの適用と精度検証を行っていく。エンジンルーム内の熱解析については、共同研究先の要望に応じて対応していく。

5. RICC の継続利用を希望の場合は、これまで利用した状況

今年度は、構造を介した両側に流体領域を設定する界面処理法の技術を開発に重点を置き、外側に空気がある場合とない場合の 3 次元エアバッグ展開における本手法の有効性を検討した。

流体メッシュには直交格子約 90,600 個、構造メッシュは 4 節点 4 角形シェル要素 3,608 個を用いて、内側のみに空気がある場合と両側に空気がある場合のエアバッグ展開の 3 次元流体構造連成解析を 16 台並列で計算し、6.0 msec までの計算結果を得ることができた。しかし、エアバッグが完全に展開されると考えられる時間（10.0 msec 以上）までの計算結果を得ることができなかった。

今後の計画・展望を遂行するためには、以下のような大規模並列計算を行う必要がある。

流体メッシュには直交格子約 90,600 個を用い、構造メッシュは 4 節点 4 角形シェル要素 3,608 個を用いて、内側のみに空気がある場合のエアバッグ展開の 3 次元流体構造連成解析を 16 台並列で行った場合、2.0 msec

までのシミュレーションに約 50 時間を必要とする。エアバッグが完全に展開される時間（10.0 msec）までの計算結果を得るためには、5 倍の計算時間を要する。また、流体メッシュを直交格子 724,808 個（1 方向 2 倍）に変更すると、最低 8 倍の計算時間を要する。さらに、格子幅が半分になると CFL 条件より時間刻み幅は半分に設定しなければならないので、2 倍の計算時間を要することになる。よって、直交格子 724,808 個の流体メッシュと 4 節点 4 角形シェル要素 3,608 個の構造メッシュを用いて、エアバッグが完全に展開されると考えられる時間（10.0 msec 以上）までの計算結果を得るためには、最低 $(50 \times 16) \times 5 \times 8 \times 2 = 64,00$ 時間必要となる。

さらに、実験と比較するためには、流入口での境界条件およびエアバッグの初期形状を変化させた計算を 5 パターン行う必要がある、そのため、今後 320,000 時間の計算が必要である。

空力解析については今年度、並列計算への対応が未着手であった。次年度は計算コードの並列化に取組み、大規模な計算モデルでの精度検証を行う計画である。

平成 21 年度 RICC 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

沖田浩平, “強力集束超音波による腫瘍焼灼のシミュレーション”, 計算工学, Vol.14, No.4, pp.11-12 (2009)

橋本 学・小野 謙二, "外側の空気の影響を考慮したエアバック展開シミュレーション," 第 22 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, 日本機械学会, (2009), pp.93-94.

赤坂啓, 小野謙二, 自動車周り流れの短期間シミュレーション手法の開発, 理研シンポジウム 2009 VCAD システム研究 予稿集, p.98, 2009.

【国際会議などの予稿集、proceeding】

沖田浩平, 小野謙二, 杉山和靖, 高木周, 松本洋一郎: “高密度焦点式超音波療法において組織の加熱凝固が音波に与える影響”, 計算工学講演会論文集, 第 14 巻, 第 1 号, pp.37-40 (2009)

【国際会議、学会などでの口頭発表】

Matsumoto Y., Okita K., Ono K., and Takagi S.: “Numerical Simulation of Therapeutic Ultrasound”, 15th International Conference on Finite Elements in Flow Problems, Tokyo, Apr. (2009).

Okita K., Sugiyama, K., Ono K., Takagi S., Matsumoto Y.: “Numerical Simulation of High Intensity Focused Ultrasound Therapy with Volume Model of human Body”, 9th International Symposium on Therapeutic Ultrasound, Aix-en Province, France, Sept. (2009)

沖田浩平, 小野謙二, 杉山和靖, 高木周, 松本洋一郎: “高密度焦点式超音波療法において組織の加熱凝固が音場に与える影響”, 第 14 回計算工学講演会, 東京, 5 月(2009)

沖田浩平, 小野謙二, 高木周, 松本洋一郎: ”組織の加熱凝固を考慮した HIFU 治療シミュレーション “, 日本機械学会 2009 年度年次大会, 盛岡, 9 月(2009)

橋本 学・小野 謙二, "外側の空気の影響を考慮したエアバック展開シミュレーション," 日本機械学会 第 22 回計算力学講演会, 石川県 金沢市 (金沢大学), 2009 年 10 月 10 日-12 日.

