

構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR

大家 史* 松原 聖**

Advance/FrontSTR

Fumito Ohya* and Kiyoshi Matsubara**

設計の現場では時間的・計算リソース的理由から計算機によりシミュレーションを行う場合、何らかのモデル化を行うことが多い。例えば、骨組構造解析においては梁要素でのモデル化を行い、樹脂解析においては、その物性をマクロモデルに置き換える。一方で設計精度を向上させるために、より詳細なシミュレーションを行える大規模解析に対するニーズが高まっている。大規模解析はモデル化および結果検討における省力化という点でも着目されている。この例としては、隅肉溶接個所がシンプルなモデル化では応力集中個所になってしまい別途検討が必要になるが、溶接個所もモデル化することでその手間を省くことができる。さらに、シミュレーションの活用がひろがるにつれて、複数の現象が関連する問題への要求が高まっている。流れが構造物を変形させる問題（流体構造連成）、構造物の振動により音が発生する問題（構造音響連成）などがその例である。

このようなニーズの高まり、近年の計算機能力の飛躍的向上を背景に、文部科学省の次世代 IT 基盤構築のための研究開発「イノベーション基盤シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクトで大規模解析を主眼に FrontISTR が開発された。Advance/FrontSTR はさらにこれを発展させ、ユーザーのニーズを満たすため機能追加を行っている。また、流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/ red, Advance/FrontFlow/FOCUS, 音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise との連成解析ツールを提供している。本稿では構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR [1][2][3]について紹介する。

Key word: 構造解析、大規模解析、並列計算、連成解析

1. はじめに

近年の計算機能力の飛躍的向上を背景として、産業界での製品に対する品質向上への要求から、製品全体に対する大規模構造解析シミュレーションへのニーズが高まっている。また同時に、解析対象が複数にわたるケース（連成解析）に対する要望も増えている。

並列計算機を利用した大規模解析については、計算方法はほぼ確立されており、多くの研究により成果が残されてきた。今後は、これらの研究成果を実用技術として産業界へ技術移転させな

ければならない。そのために、現在では安価となった並列計算機等での大規模構造解析を、さらに手軽に実施できるソフトウェアを普及させる時期であると考えられる。

このような時代背景のもと、シミュレーションソフトウェアを実用化するためには、①構造解析では数億自由度の大規模解析を可能にすること、および、②流体解析や構造解析、その他音響解析などを連成させて解析できることが課題となる。

まず、第 1 の課題を解決するために、構造解析において数億自由度程度の大規模解析を行う機能が必要となる。当社で販売している構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR[1][2][3]では、この課題に対し、本ソフトウェアの開発当時から大規模並列計算向けに設計され開発されてきたことと合わせ、リファイナー等の大規模な解析を実施

*アドバンスソフト株式会社 第 1 事業部

1st Computational Science and Engineering Group, AdvanceSoft Corporation

**アドバンスソフト株式会社 代表取締役社長
President, AdvanceSoft Corporation

するための幾つもの仕組みを有している[11][14][16]。

次に、第2の課題に対しては、複雑な解析対象に対するメッシュ作成の課題から始まり、原理の異なる幾つもの現象を取り扱う課題まで幅広い。この問題を解決するためのアプローチはいくつかある。当社では、Advance/FrontSTR と流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red、Advance/FrontFlow/FOCUS、音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise を組み合わせた連成解析に取り組んでいる[8][19]。

本稿では Advance/FrontSTR の概要について紹介した後、大規模解析支援ツールと並列性能について説明し、最後に連成解析の事例を示す。

2. Advance/FrontSTR の概要

2.1. Advance/FrontSTR の開発の経緯

構造解析プログラム Advance/FrontSTR のベースとなる FrontISTR は、文部科学省の次世代 IT 基盤構築のための研究開発「イノベーション基盤シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクトで開発された。このプロジェクトの中で、当社は「構造解析ソフトウェア FrontISTR における材料・幾何学的非線形機能の作成」等の業務を担当し、従来の成果に加え、幾何非線形・材料非線形・接触非線形解析機能を開発した。

開発されたソフトウェアは、上記プロジェクトのダウンロードサイトで当初公開されていたが、その後ユーザー会が発足し、今はそちらのサイトからダウンロードすることができる (FrontISTR 研究会 <http://www.multi.k.u-tokyo.ac.jp/FrontISTR/>)。

当社では、このソフトウェアをより使い易くするために、プリポストとともに独自に改良を進め、商用パッケージ Advance/FrontSTR Ver.5.0 として販売保守を行っている[1][2][3]。公開されているソフトウェアと、当社で独自に改良および開発を継続している Advance/FrontSTR との違いは次の通りである。

- ① 非線形問題および線型ソルバーの収束性の強化 (主に接触機能)。

- ② 各種要素の開発、追加および強化
- ③ 材料モデルの追加および強化
- ④ 混在自由度への対応
- ⑤ 局所座標系などの拡張機能
- ⑥ 専用プリポスト Advance/REVOCAP と一体化した解析機能を提供。特に、アセンブリ機能、リファイナー機能の実用化を中心に強化している。また、Advance/REVOCAP の 64bit 版も独自に提供している。

また、Advance/REVOCAP は流体解析、構造解析および音響解析が共通のプリポストとして利用可能なシステムであり、特に連成解析では重要である。

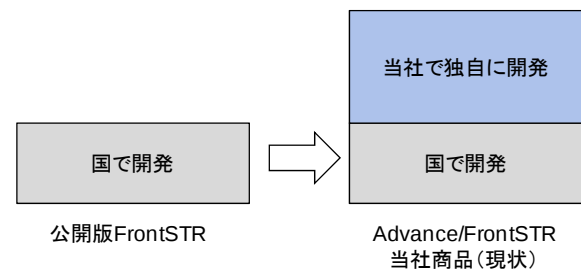


図 1 当社で販売する Advance/FrontSTR

2.2. Advance/FrontSTR の特長

Advance/FrontSTR は、大規模並列計算汎用有限要素法構造解析プログラムである。その大きな特長は次の5つである。

- ① 大規模な並列計算が可能で、並列効率が非常に高い。
- ② 多くの CPU (コア) を利用しても、追加料金がかからないシンプルな価格体系。
- ③ 低価格にもかかわらず、必要な機能を提供。
- ④ 開発者によるサポートおよびカスタマイズサービスを提供。

以下では、この特長に関して述べる。

第1の特長として、大規模並列計算における優れた並列性能がある。並列計算用に設計されているため、従来ソフトウェアに比べて非常に高い並列化効率を実現している。例えば、線形静解析 2 億自由度の問題を、1,152 コアの並列計算機を利用して、経過時間 30 分で解析した実績がある。

また、第2の特長は、並列計算実行時に多数の

CPU を利用してもライセンス料金は増加しない価格体系である。この特長により、ユーザーは所有している計算機資源を有効に利用できる。

第 3 の特長は、低価格にもかかわらず、必要な機能の提供を提供していることである。例えば、接触機能、および大規模並列計算向けの機能であるアセンブリ機能・リファイナー機能を提供している。また、汎用の非線形材料および幾何学的非線形の機能も有する。

第 4 の特長は、開発者によるサポートおよびカスタマイズサービスの提供である。当社はソフトウェアを開発した技術者を有するため、ソースコードを改良することが可能である。従って、お客さまのニーズに合わせた改良が可能である。また、このことが、連成解析を可能としている。お客さまの問題毎に Advance/FrontSTR のソースコードを改良して、流体・音響解析等のソフトウェアと連成させた解析を実施した多くの実績がある。

2.3. Advance/FrontSTR の機能

Advance/FrontSTR の解析機能を表 1～表 4 に示す。解析機能は表 1 に示す通り、静解析、動解析、固有値解析および熱解析である。動解析においても変形を扱うものは

表 2 の非線形解析機能に対応している。

変形解析においては材料非線形、幾何学非線形および境界非線形すなわち接触解析に対応している。材料非線形は表 3 に示した材料に対応し、温度依存性についても考慮できる。接触解析は Augmented Lagrange 法を利用しており、並列解析も可能である。

対応する要素タイプは表 3 に示した通りであるが、Ver. 5.0 より連続体要素と構造要素が混在したモデルの解析にも対応した。

大規模解析を手軽に行うための機能を表 4 に示した。これら大規模解析を有効に行うための機能および改良した項目について以下で述べる。

表 1 解析機能

項目	内容
静解析	熱応力解析を含む応力解析

動解析	陽解法／陰解法
・直接積分法	中央差分法／Newmark- β 法 ／HHT 法
・モード解析	過渡応答解析 周波数応答解析
固有値解析	ランチョス法／その改良法
熱解析	定常／非定常解析（陰解法）

表 2 変形解析における非線形解析機能

項目	内容
幾何学的非線形	Total Lagrange 法、 Updated Lagrange 法
境界非線形（接触）	Augmented Lagrange 法、 有限すべり、摩擦 ※接触並列解析にも対応
材料非線形	参照：材料ライブラリ

表 3 材料・要素ライブラリ

項目	内容
材料ライブラリ	温度依存性を含む材料
・弾性材料	弾性（異方性材料も可） 超弾性、粘弾性
・非弾性材料	等方／移動／複合硬化等の弾 塑性、粘塑性、熱弾塑性
要素ライブラリ	連続体要素、構造要素 ※連続体要素と構造要素が混 在したモデルの解析にも対応
・ソリッド要素	四面体／六面体／プリズム／ ピラミッド、1 次／2 次、 非適合モード、B-bar 要素など
・シェル要素	三角形／四辺形、1 次／2 次、 MITC 要素
・梁要素	1 次／2 次／3 次、MITC 要素
・トラス要素	1 次／2 次／3 次
・その他	接触要素、マス要素、 熱解析用ギャップ要素

表 4 ユーザー支援機能

項目	内容
大規模解析支援	アセンブリ構造対応、 メッシュ自動細分化（リファ イナー）
局所座標系	直交座標系、円柱座標系 球座標系

- ① リファイナー機能：自動的にメッシュを細分化する機能[11][16]
- ② アセンブリ機能：部分的に作成したメッシュを組み上げる機能[14]
- ③ 大規模解析向きソルバーの改良：並列計算向け機能の改良[17][18]

このうち、①および②は、専用プリポスト Advance/REVOCAP を利用することで、作業時間とソルバー処理時間を含めたトータルな時間短縮を実現できる。また、従来のソルバーを見直し、さらに並列性能を向上させた(③)。当社では、これらの機能の組み合わせにより、大規模構造解析を効率的に行えるパッケージを提供している。

3. 大規模解析

3.1. リファイナーを利用した超大規模解析

3.1.1. 解析の手順

メッシュ数が2億にもなると、データのハンドリングだけでも困難が伴う。リファイナーを利用すると扱うモデルは小さいものなので、別途詳細検討を行いたい場合などには有効である。ここでは、Advance/FrontSTR のリファイナー機能を利用し、まずリファインなしのケースである程度の結果の妥当性を確認し、その後にリファイナーを利用した詳細解析を実施した例を紹介する[3][4][5]。

リファイナーは、Advance/FrontSTR および Advance/REVOCAP_Refiner（ソルバーとリンクして動作する拡張機能）の機能であり、メッシュ細分化はソルバー内部で行われる。入力されるメッシュは粗いもののままで、制御データを1行変更するのみで解析できる。ただし、この場合どのような処理時間で計算が終わるか否かの情報を持っておくべきである。参考値として、1回のリファインで、おおよそそのデータの16倍の計算時間を要する。

3.1.2. 解析条件

機械部品を解析対象として、4面体2次要素を用いた弾性静解析を行った。

解析は、財団法人 計算科学振興財団様の計算

機で行った。この計算機の仕様は、ブレードサーバ「PRIMERGY BX922 S2」208 ノードによる理論ピーク性能22テラフロップスのPCクラスタ型スーパーコンピュータを中核としたシステムとなる。ノード間は高速インターコネクトである「InfiniBand（インフィニバンド）QDR」で接続され、高性能な並列計算環境を実現している。

表 5 リファインとモデル規模の関係

項目	リファインなし	リファイン1回	リファイン2回
要素数	684,807	5,478,456	43,827,648
節点数	1,008,911	7,707,758	60,089,084
自由度	3,026,733	23,123,274	180,267,252

3.1.3. 解析結果

解析結果について、リファインがない場合には応力集中が明確に現れなかったが、リファイン2回を行ったケースでは、応力集中が明確に現れた。図3と図4にその結果を示す。これは、リファイナー機能の非常に有効な利用方法の一例である。

表 6 超大規模計算の処理時間

項目	リファイン1回	リファイン2回
自由度	23,123,274	180,267,252
100 コア	22 分	345 分
1100 コア	4 分	36 分

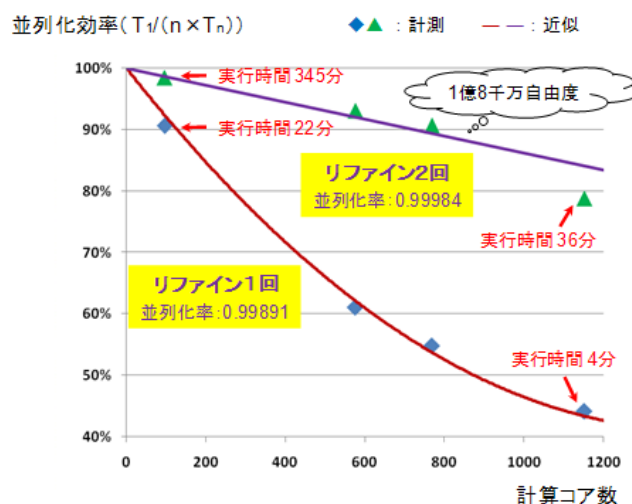


図 2 超大規模計算の並列性能

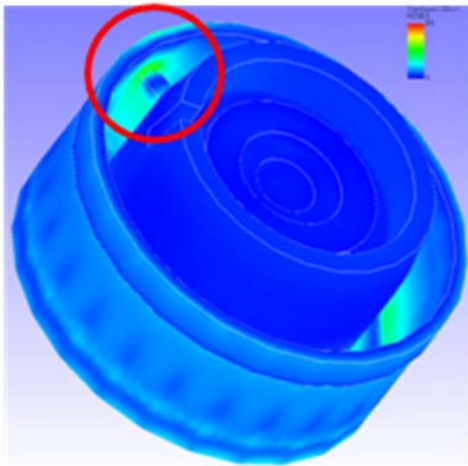


図 3 リファインなしの解析結果

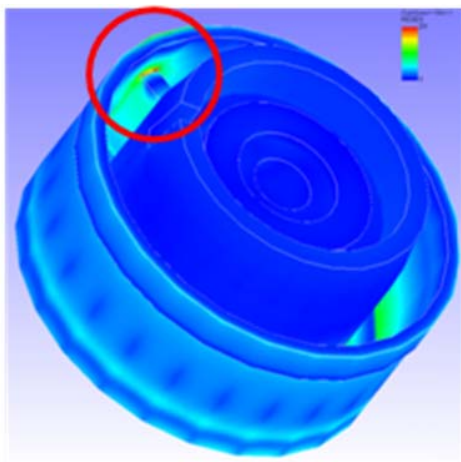


図 4 リファイン 2 回の解析結果

処理時間については表 6、並列化効率については図 2 に示す。並列化効率は 1 プロセス当たりのモデル規模が小さくなると通信負荷が相対的に大きくなり、効率は低くなる。リファイン 1 回の効率が計算コア数増加に伴い悪化するのはそのため、この場合は 100 コア当たりが最適である。リファイン 2 回では高い並列化効率を示しており、1100 コアで 80%以上となっている。処理時間をリファイン 1 回が適切な効率を発揮している 100 コアと比較すると 15.7 倍であり、最初に示した 16 倍に近いことが分かる。

3.2. アセンブリ機能を利用した解析

3.2.1. 解析モデル

解析モデルは、3 つの配管にボルトを付加したものである。ボルトは MPC で接合し、締付軸力に

相当する分布荷重をボルトヘッドの両面に負荷して解析を実施した[5][6][7]。

表 7 アセンブリモデル条件

項目	内容
解析の種類	弾性静解析
要素タイプ	4 面体 1 次要素
節点数	346162
要素数	1205239
材料物性	スチール
境界条件	下部固定、右端に上方向 5mm の強制変位、ボルト・ナットのヘッドに 1MPa の圧縮分布荷重（軸力）
アセンブリ構造	ボルトパイプ間 MPC 接続

表 8 アセンブリモデル（4 面体 1 次）

ケース	要素数	節点数	MPC 節点数
MPC 型	1,547,231	414,512	10,053

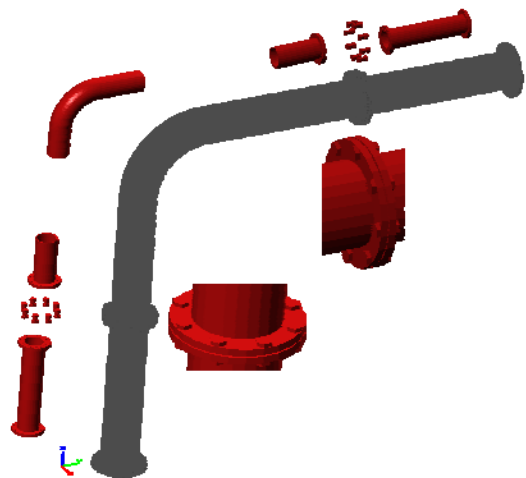


図 5 アセンブリモデル全体図

3.2.2. 解析結果

解析は、東京大学様の Altix450 を使用して、8 コア並列で実施した。結果を図 6、図 7 に示す。収束は一体モデルと比較すると悪くなるが、妥当な結果を得た。実行時間は、2,672 秒であった。

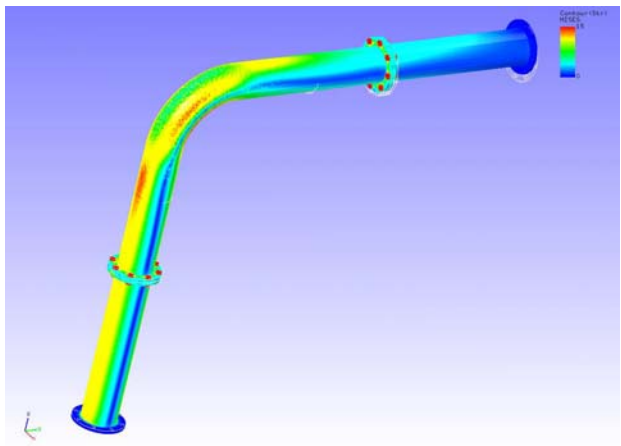


図 6 全体のミーゼス応力分布

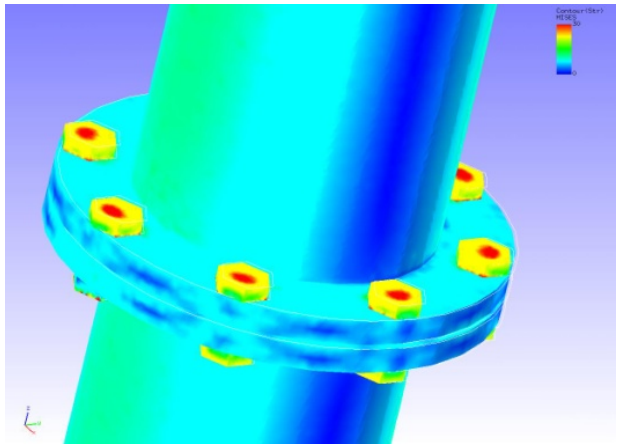


図 7 ボルト部分のミーゼス応力分布

4. 連成解析

4.1. 連成解析の種類

連成解析は大きく片方向連成、双方向連成に分類される（図 8）。Advance/FrontSTR で現在解析可能な連成解析の種類を表 9 に示す。以下では例として、構造音響連成（片方向連成）、流体構造連成（双方向連成）を示す。

表 9 解析可能な連成解析

ソルバー	連成方向
流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red	片方向（流→構） 双方向※
高速流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS	片方向（流→構） 片方向（構→流） 双方向
音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise	片方向（構→音）

※モード解析モジュール組み込みによる連成

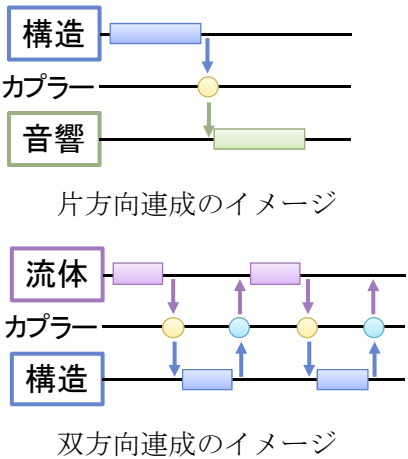


図 8 連成解析の種類

4.2. 音響構造連成の例

Advance/FrontSTR⇒Advance/FrontNoise の片方向連成解析の例として、音叉が振動した場合の音響解析について示す。音響解析では音源を定める必要があるが、この音源を振動解析より求めるものである。音響構造連成の流れを図 9 に示す。

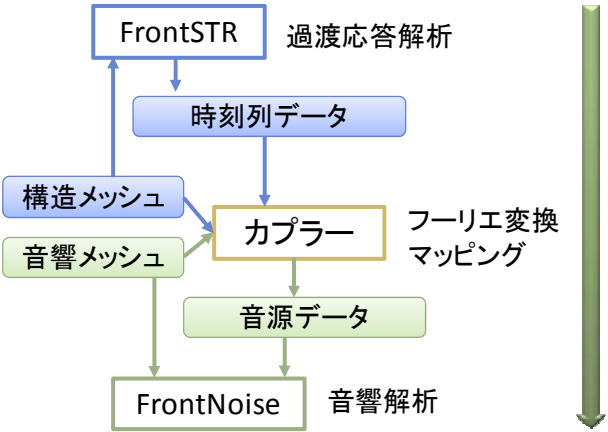


図 9 構造音響連成解析の流れ（片方向連成）

構造解析では、音叉に衝撃が与えられた場合の時刻歴過渡応答解析を行う。構造モデルは図 10 に示したように持手部分を固定、先端付近で線上に衝撃荷重を与えた。解析は Newmark- β 法で時間刻み 4.0e-4 秒で 0.0~5.0 秒間の解析を行い、連成には振動が落ち着いた 4.0~5.0 秒の結果を用いた。解析結果は図 11、図 12 のようになった。構造物表面の応答に対して高速フーリエ変換を施したもの（周波数領域に変換したもの）が、音響解析の音源となる（図 12）。

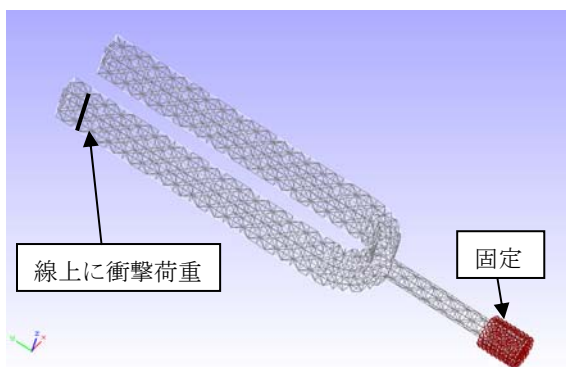


図 10 構造解析モデル

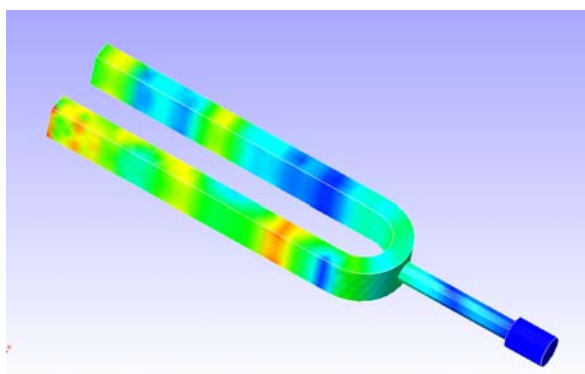


図 11 過渡応答（変形図コンター）

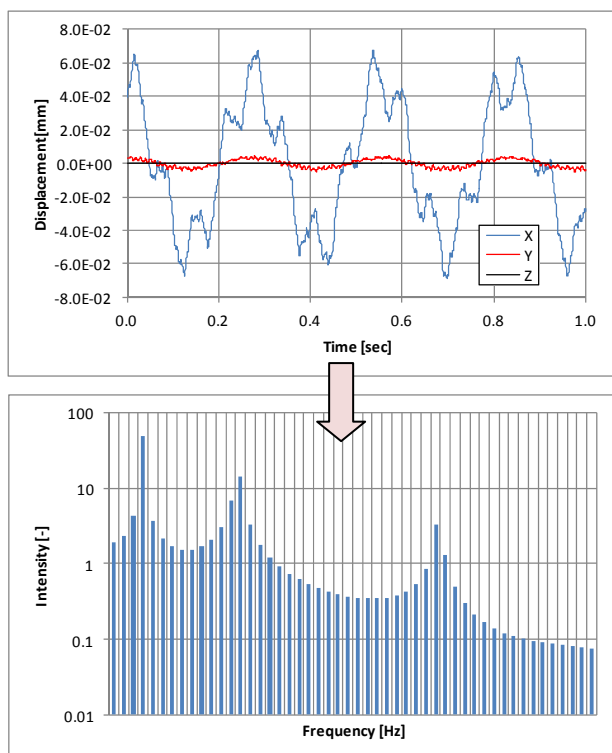


図 12 構造物表面の時刻歴応答とその高速フーリエ変換

構造解析結果を音源とする際に、構造メッシュ

と音響メッシュの相違を処理する必要がある。このようなツールはカプラーなどと呼ばれ、異なるメッシュ間のデータ通信をマッピングにより行うものである（図 9 参照。Advance/FrontNoise の構造連成オプションに含まれる）。時刻歴応答の高速フーリエ変換もこのツールで行われる。

音響解析モデルは図 13 のように音叉を囲む周辺のモデルとなる。音源は構造物との境界に設定され、境界条件は周辺球内部に無反射条件を与えた。解析結果として 1000Hz の音響速度ポテンシャルの等値面を図 14 に示す。

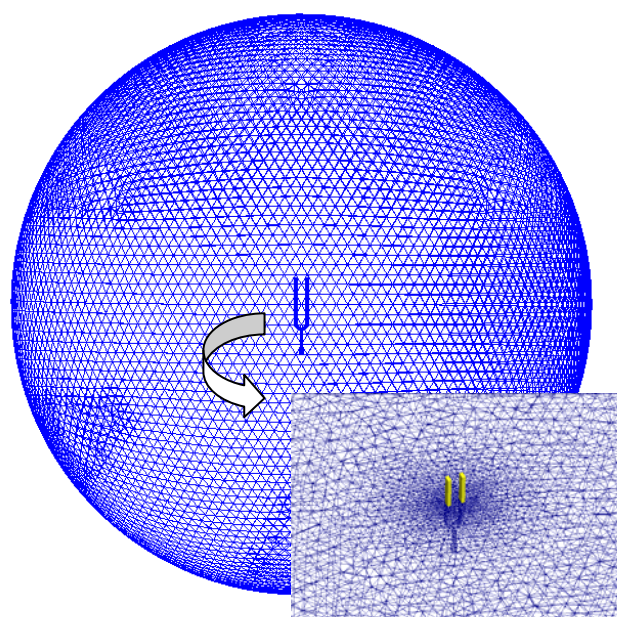


図 13 音響解析モデル

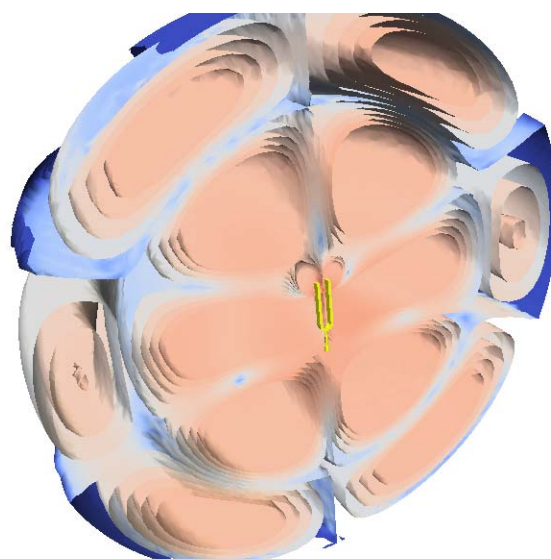


図 14 音響速度ポテンシャル（1000Hz）

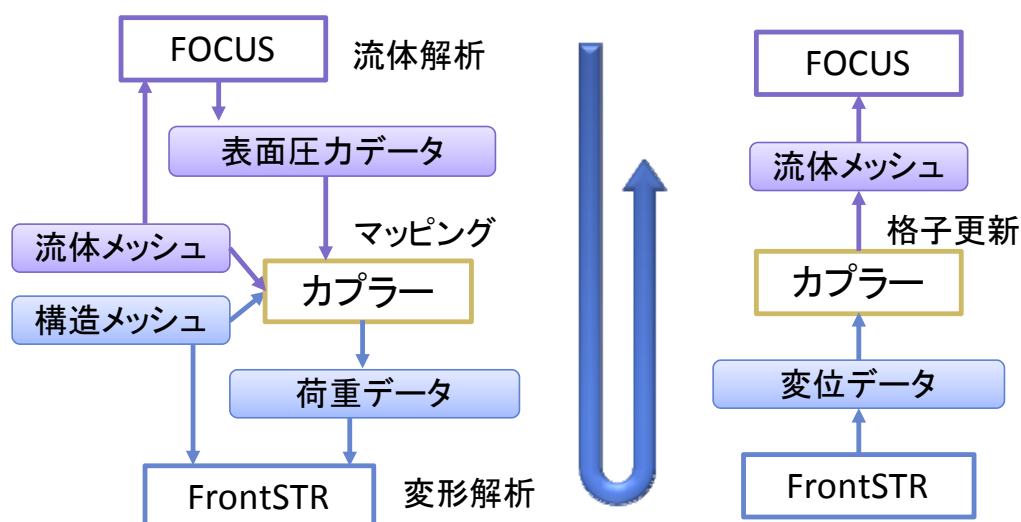


図 15 構造音響連成解析の流れ（双方向連成）

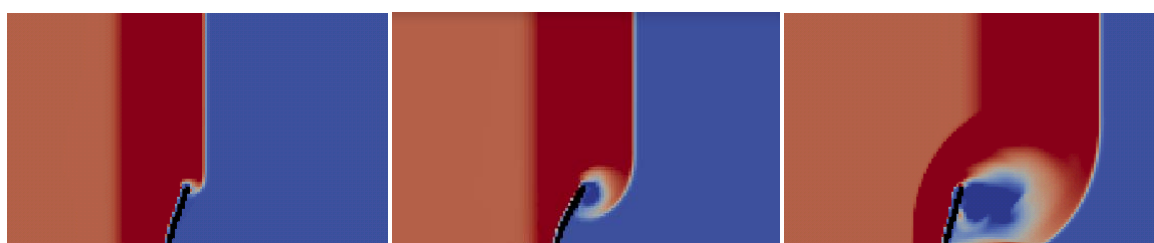


図 16 衝撃波を受ける壁の解析結果

4.3. 流体構造連成の例

Advance/FrontSTR⇔Advance/FrontFlow/ FOCUS の双方向連成解析の例として、衝撃波を受ける壁の解析を示す。

構造流体連成で片方向連成の場合は、全ステップにおいて流体解析をあらかじめ行い、構造の連成面における圧力データを時間変化する分布荷重として渡す。双方向連成の場合は、各ステップにおいて構造の連成面に圧力データを渡し、変形解析を行うため、構造物は移動し流体のメッシュが更新される（図 15）

Advance/FrontFlow/ FOCUS は格子に埋込み境界法（Immersed Boundary 法、IB 法）を用いており、構造物の変形に伴う格子更新に対応しやすい。

解析例は圧力比 10 の衝撃波が通過した際の構造物および流れの様子を示したものである（図 16）。格子数は 12 万要素で、構造物は弾性体として扱った。

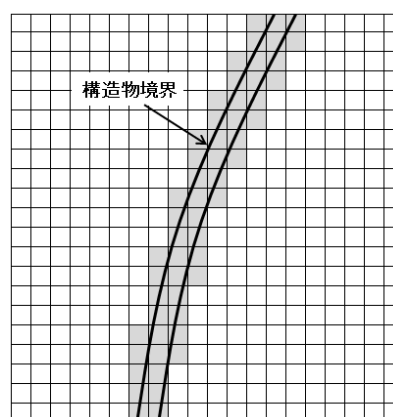


図 17 埋込み境界法（IB 法）

5. まとめ

本稿では Advance/FrontSTR の大規模解析および連成解析機能について紹介した。大規模解析ではリファイナーおよびアセンブリ機能について説明し、並列性能の高さについて言及した。連成解析ではその種類について説明し、Advance/FrontSTR 扱うことが可能な解析の中から、片方向

音響構造連成解析の例として、音叉が振動する場合の周囲の音響速度ポテンシャルを求める場合を示した。双方向流体構造連成の例としては衝撃波を受ける壁の変形について示した。

参考文献

- [1] 袁熙, “Advance/FrontSTR Ver. 3.0 の非線形解析機能について”, アドバンスシミュレーション, Vol.4 (2010)
- [2] 袁熙, “Advance/FrontSTR Ver.4.0 解析機能の拡張”, アドバンスシミュレーション, Vol.8 (2011)
- [3] 袁熙ほか, “構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR Ver. 4.1”, アドバンスシミュレーション, Vol.13 (2012)
- [4] 袁熙, “接触解析のための複合要素の開発”, Vol.8(2011.07)
- [5] 袁熙, “非線形弾性力学の現状と構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR 内の実装”, アドバンスシミュレーション, Vol.13 (2012)
- [6] 松原聖, “構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR の概要”, Vol.8(2011.07)
- [7] 松原聖, 袁熙, 末光啓二, 大家史, 徳永健一, “構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR”, Vol.10(2011.12)
- [8] 吉村忍, 徳永健一ほか, “並列連成解析システム REVOCAP を用いた流体構造連成解析”, 第 59 回理論応用力学講演会, (2010.6)
- [9] 徳永健一, “REVOCAP_PrePost と REVOCAP_Refiner”, 第 3 回統合ワークショップ (次世代ものづくり), 文部科学省次世代 IT 基盤構築のための研究開発「イノベーション基盤シミュレーションソフトウェアの研究開発」, (2011.02.25)
- [10] 徳永健一, “Advance/FrontSTR 用 汎用プリポストプロセッサ Advance/REVOCAP の紹介”, Vol.8(2011.07)
- [11] 末光啓二, 徳永健一, “Advance/FrontSTR のメッシュ細分化機能「リファイナー」”, アドバンスシミュレーション, Vol.8 (2011)
- [12] アドバンスソフト株式会社, “Advance/Front Flow/red, Advance/FrontSTR のご紹介”, 第 32 回関西 CAE 懇話会, (2011.5)
- [13] 末光啓二, “FrontISTR の機能紹介”, 第 3 回統合ワークショップ (次世代ものづくり), 文部科学省次世代 IT 基盤構築のための研究開発「イノベーション基盤シミュレーションソフトウェアの研究開発」, (2011.02.25)
- [14] 末光啓二, 徳永健一, “Advance/FrontSTR の部品アセンブリ解析機能”, アドバンスシミュレーション, Vol.8 (2011)
- [15] 末光啓二, “Advance/FrontSTR による並列接触解析”, アドバンスシミュレーション, Vol.13(2012)
- [16] 末光啓二, “Advance/FrontSTR によるリファイナーを利用した大規模解析”, アドバンスシミュレーション, Vol.13(2012)
- [17] 松原 聖, 大家 史, “Advance/FrontSTR の固有値解析機能のベンチマーク解析”, アドバンスシミュレーション, Vol.8 (2011)
- [18] 大家 史, 松原 聖, “Advance/FrontSTR の直接法ソルバーの並列性能”, アドバンスシミュレーション, Vol.9 (2011)
- [19] 松原 聖ほか, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise を利用した連成解析”, アドバンスシミュレーション, Vol.15 (2013)

※技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)