

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。

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。本稿では構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR [1][2][3]の概要を紹介するとともに、原子炉建屋等の耐震安全評価を想定し、地震力を受ける RC 構造物を例に具体的な利用法について述べる。

Key word: 構造解析、大規模解析、並列計算、RC 構造物、地震動、弾塑性解析

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

*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

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 と他のソフトウェア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、第 1 の課題である大規模解析の利用方法について、原子炉建屋等の耐震安全評価を想定した地震力が作用する場合の RC 建造物の弾塑性解析を例に説明する。

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 は流体解析と構造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。

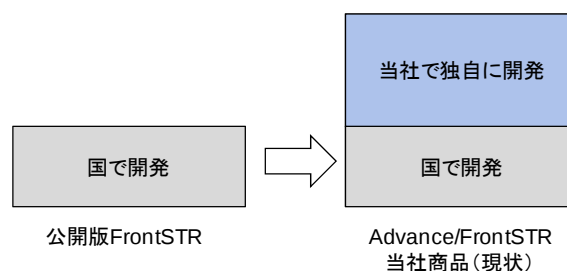


図 1 当社で販売する Advance/FrontSTR

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、連成解析をも可能としている。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。

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

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。

- 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. Advance/FrontSTR のシステム構成

3.1. 逐次処理の場合

図 2 に逐次処理の場合の流れを示す。以下では入力・出力ファイル、実行方法について説明を行う。

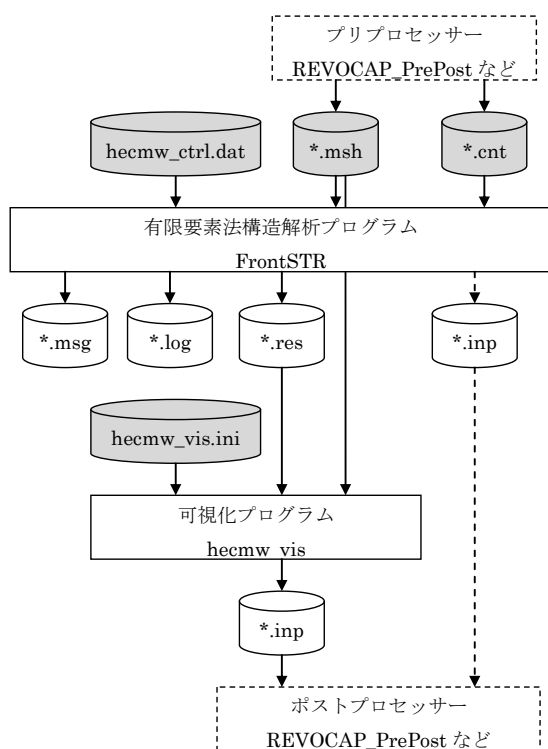


図 2 逐次処理による実行の流れ

3.1.1. 入力ファイル

① 全体制御データ (拡張子 dat)

このファイルではメッシュデータと解析制御データの入力ファイルおよび解析結果出力ファイルを指定する。ファイル名は hecmw_ctrl.dat という固定の名前を用いる。

全体制御データの例を以下に示す。ここでは、

Advance/FrontSTR は単一領域メッシュデータ model.msh と解析制御データ model.cnt を読み込み、解析結果データ model.res.0.1 を書き出す。また、hecmw_vis は単一領域メッシュデータ model.msh と解析結果データ model.0.1.res を読み込み、出力指定に対応する model_vis_psf.0000. (拡張子) を書き出す。

```

#
# for solver
#
!MESH, NAME=fstrMSH, TYPE=HECMW-ENTIRE
model.msh
!CONTROL, NAME=fstrCNT
model.cnt
!RESULT, NAME=fstrRES, IO=OUT
model.res
#
# for visualizer
#
!MESH, NAME=mesh, TYPE=HECMW-ENTIRE
model.msh
!RESULT, NAME=result, IO=IN
model.res
!RESULT, NAME=vis_out, IO=OUT
model_vis
  
```

図 3 全体制御データ (逐次処理)

② 単一領域メッシュデータ (拡張子 msh)

このファイルでは、解析対象の全体メッシュ構成、解析制御データで使用するグループデータなどを定義する。詳細は以降の例題で示す。

③ 解析制御データ (拡張子 cnt)

このファイルでは、解析タイプ、境界条件、材料物性などを定義する。また、ソルバーの制御データやビジュアライザーの制御データも指定する。詳細は以降の例題で示す。

④ 可視化制御データ (拡張子 ini)

このファイルでは、hecmw_vis の制御データを指定する。デフォルトのファイル名は hecmw_vis.ini である。可視化制御データの例を以下に示す。本例では、AVS 用の非構造格子型データ (拡張子 inp) を出力する。

```
!VISUAL, method=PSR
!surface_num = 1
!surface 1
!output_type = complete_avs
```

図 4 可視化制御データ

3.1.2. 実行方法

逐次処理の実行方法は、入力ファイルがあるディレクトリにおいて以下のコマンドで実行する。

```
$ fstr
```

3.1.3. 出力ファイル

- ① 解析結果メッセージファイル（拡張子 msg）
解析進行過程などのメッセージが出力される。1 回の実行で 1 つのファイルが作成され、ファイル名は固定の FSTR.msg である。
- ② 解析結果ログファイル（拡張子 log）
節点毎および要素毎の物理量の解析結果が出力される。また、物理量の最大/最小値や固有値解析結果も出力される。動解析の場合は、すべてのステップの解析結果が本ファイルに出力される。1 回の実行でひとつのファイルが作成され、ファイル名は固定の 0.log である。
- ③ 解析結果ファイル（拡張子 res）

Advance/FrontSTR オリジナル可視化出力フォーマットであり Advance/REVOCAP で表示する。節点毎および要素毎の物理量の解析結果が出力される。ステップ毎にファイルが生成され、ファイル名は全体制御データで指定したものとなる。

④ 可視化データファイル（拡張子 inp）

UCD 形式の可視化ファイルである。オープンソースの可視化ソフトウェア Paraview などで表示可能である。

3.2. 並列処理の場合

図 5 に並列処理の場合の流れを示す。以下では入力・出力ファイル、実行方法について説明を行う。

3.2.1. 入力ファイル

Advance/FrontSTR では並列処理を行うために

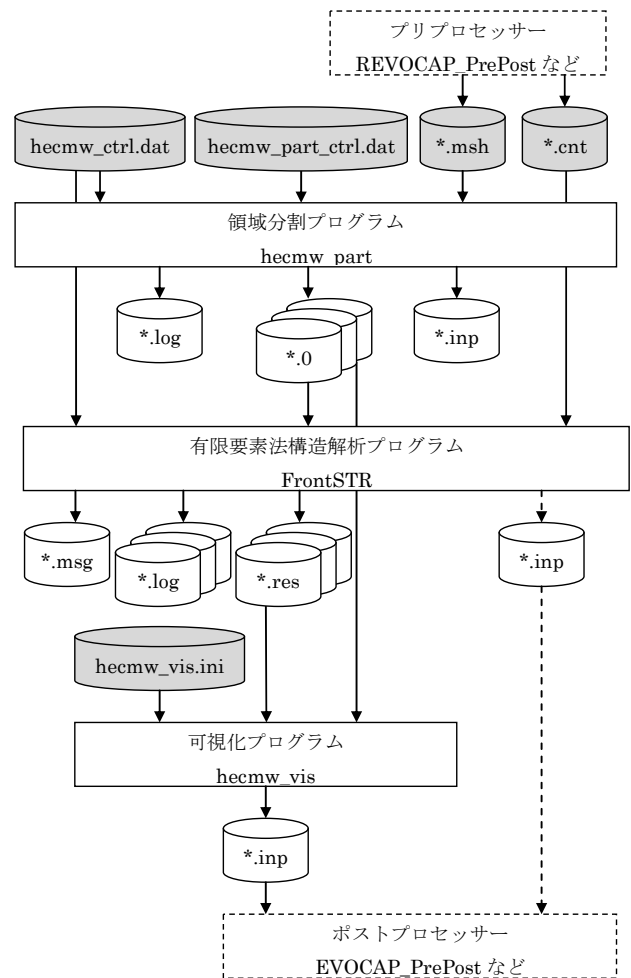


図 5 並列処理による実行の流れ

メッシュデータを分割して各プロセスに処理をさせる。そのための操作が逐次処理と異なる部分である。単一領域メッシュデータ、解析制御データおよび可視化制御データについては逐次処理と同様である。以下では異なる部分について説明を行う。

① 全体制御データ（拡張子 dat）

Advance/FrontSTR では逐次処理で利用したメッシュデータを単一領域メッシュデータ、並列処理用に領域分割したデータを分散領域メッシュデータと呼ぶ。全体制御データの記述で逐次処理と異なるのはこの部分で、領域分割プログラム (hecmw_part) が利用する情報を設定する必要がある。以下の例では、hecmw_part は単一領域メッシュデータ model.msh を読み込み、分散領域メッシュデータ model_8.0~n (番号付き複数ファイル) を書き出す。

ソルバーおよび可視化処理はメッシュデータ

が分散領域メッシュデータとなっている以外は同様である。

```
#
# for partitioner      hecmw_part の入出力
#
!MESH, NAME=part_in, TYPE=HECMW-ENTIRE
model.msh      単一領域メッシュデータ
!MESH, NAME=part_out, TYPE=HECMW-DIST
model_8        分散領域メッシュデータ
#
# for solver          ソルバーの入出力
#
!MESH, NAME=fstrMSH, TYPE=HECMW-DIST
model_8
!CONTROL, NAME=fstrCNT
model.cnt
!RESULT, NAME=fstrRES, IO=OUT
model.res
#
# for visualizer      可視化処理の入出力
#
!MESH, NAME=mesh, TYPE=HECMW-DIST
model_8
!RESULT, NAME=result, IO=IN
model.res
!RESULT, NAME=vis_out, IO=OUT
model_vis
```

図 6 全体制御データ（並列処理）

② 領域分割ユーティリティ制御データ（拡張子 dat）

hecmw_part の制御データを指定する。ファイル名は固定の hecmw_part_ctrl.dat である。領域分割ユーティリティ制御データの例を以下に示す。以下の例では、領域分割法 PMETIS により、単一領域を 8 分割し、領域分割後のメッシュを表示するためのファイル model_8.inp を出力する（実際は一行）。

```
!PARTITION,TYPE=NODE-BASED,METHOD=PMETIS,DOMAIN=8,UCD=model_8.inp
```

図 7 領域分割ユーティリティ制御データ

3.2.2. 実行方法

並列処理の実行方法は、領域分割した後に並列処理を行う形となる。入力ファイルがあるディレクトリにおいて以下のコマンドを実行すると領域分割される。

```
$ hecmw_part
```

並列処理はシステムによって異なるが一般的な MPI では以下ようになる（8 並列）。

```
$ mpirun -np 8 fstr_p
```

3.2.3. 出力ファイル

出力ファイルの種類は逐次処理と同様である。以下のファイルが領域毎に出力される点が異なる。

- ・ 解析結果ログファイル
- ・ 解析結果ファイル

4. Advance/FrontSTR の解析方法

本章では原子炉建屋やその他周辺施設の耐震安全評価での利用を想定して、地震力が作用する場合の RC 構造物の弾塑性解析を行い、それを通して Advance/FrontSTR の解析方法について説明を行う。

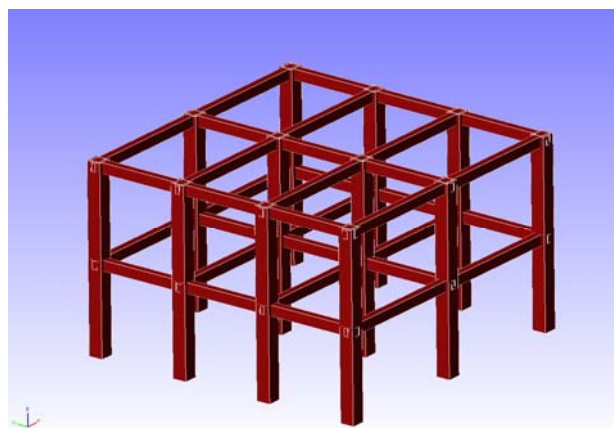


図 8 モデル形状

4.1. 設定モデル

4.1.1. モデル形状

設定モデルは壁および床を除いたラーメン構造とする（図 8）。柱および梁の断面は図 9 に示

すように層状に鉄筋部分を設定する。部材の断面性状もモデル化するとモデル規模が大きくなるため、柱および梁は梁要素でモデル化することが多いが、Advance/FrontSTR は大規模解析での性能が高いことから、このような解析に向いている。

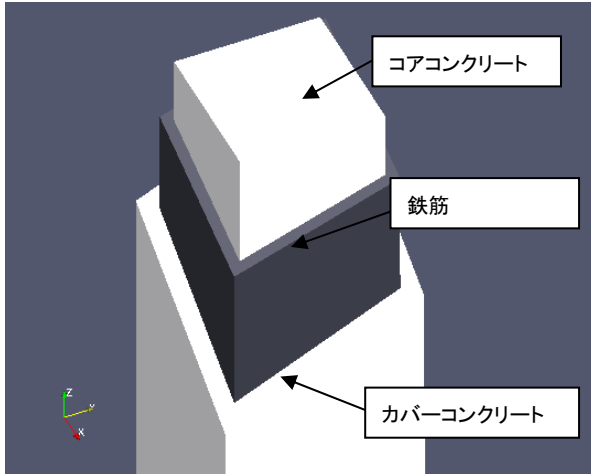


図 9 柱断面

4.1.2. 材料特性

コンクリートの材料特性は表 5 の通りとした。なおコンクリートのヤング係数は日本建築学会編『鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説』に示される式(1)で算定した。塑性域の挙動は降伏関数に Drucker-Prager モデルを適用し、硬化則は多直線近似で行う（詳細は後述する）。なおコンクリートの引張軟化およびひび割れ発生は考慮しない。

表 5 コンクリートの材料物性

コンクリート 強度 F_c	ポアソン比	単位体積重量 γ
40[N/mm ²]	0.2	23.5[kN/m ³]

$$E = 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{24}\right)^2 \times \left(\frac{F_c}{60}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

鉄筋の材料物性は SD345 を想定し、表 6 の通りとした。塑性域での挙動は降伏関数に Mises モデルを適用し、硬化則は二直線近似とし、ひずみ硬化係数は 0.01 とした。なお鉄筋とコンクリートの付着すべりは考慮せず完全付着とする。

表 6 鉄筋の材料物性

ヤング係数	ポアソン比	密度
2.06e+5[N/mm ²]	0.2	7.89[g/cm ³]

4.1.3. 拘束条件と荷重

拘束条件は各柱脚部を完全固定とする。

荷重は東北地方太平洋沖地震の福島第一原発への入力を想定した。加速度データは防災科学技術研究所の K-NET のものを利用させていただいた(<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/quake/>)。観測点は福島県大熊で、EW, NS, UD の 3 方向の加速度を与えた。

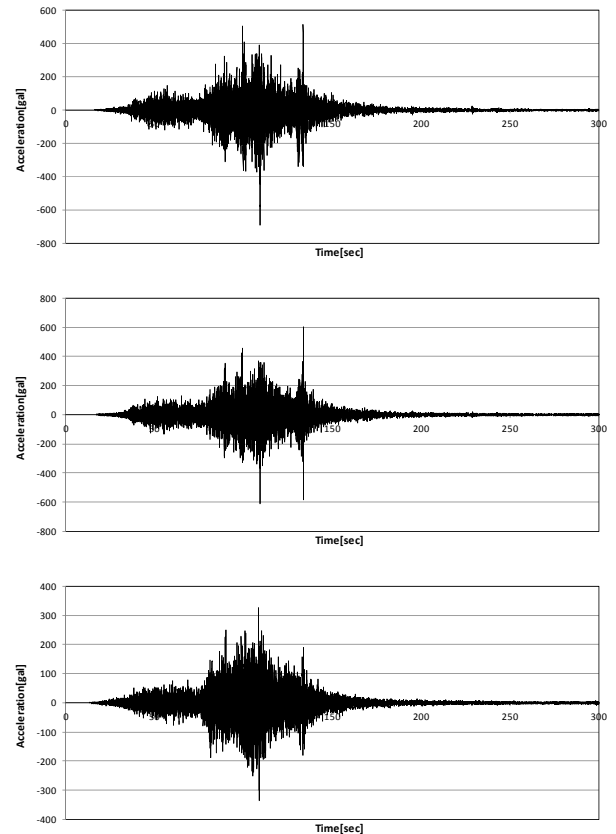


図 10 加速度データ

（上から順に東西 EW, 南北 NS, 上下 UD）

4.2. メッシュデータ

メッシュデータは専用プリポスト Advance/REVOCAP または汎用プリポストで作成する。Advance/REVOCAP は後述する制御データについても GUI 上から作成することができる。汎用プリポストを利用する場合は ABAQUS 形式で出力したものをコンバートして利用する。以下、メ

ッシュデータの概略を述べた後、本例題のモデル化について説明する。

4.2.1. メッシュデータの構成

メッシュデータの構成は図 11 の通りであり、大まかに節点情報、要素情報、グループ情報で構成される。要素情報は要素タイプ毎および異なる材料物性毎にブロックを分ける必要がある。グループ情報は節点グループ、要素グループ、面グループがあり、境界条件を与える際にグループを利用すると便利である。

データの基本書式は図 12 に示す通りで、行頭#はコメント文であり、『!』から始まる行が有効な設定行となる。『!』の直後の項目により設定できる属性が異なり、さらに続く行でも設定内容を記述する場合がある。この書式は後述の制御ファイルも同様である。

!HEADER, VER=AFSTR40	ヘッダ情報
RC-Structure	
!NODE, NGRP=GLOBAL	節点情報
3, 0.00000, 300.00000, 0.00000	
4, -110.00000, 300.00000, 0.00000	
~	
!ELEMENT, TYPE=CHXA8, EGRP=C1_CON_CORE	
6529, 1297, 884, 8552, ~	
6530, 3, 885, 884, 要素情報 1	
~	
!ELEMENT, TYPE=CHXA8, EGRP=F1_ST	
8729, 8604, 4350, 6373, ~	
~	
要素情報 2	
!NGROUP, NGRP=FIX	
3,4,212,379,882,884,885,1093,1297,1	グループ情報
!END	

図 11 メッシュデータ（～は省略を意味する）

行頭#はコメント
!項目, 属性 1=値, 属性 2=値
設定内容

図 12 データの基本書式

4.2.2. メッシュデータの作成

本例題では柱および梁断面の鉄筋をモデル化

するため、メッシュ分割前の段階で、カバーコンクリート、鉄筋、コアコンクリートにそれぞれ別ジオメトリかつ材料特性を設定しておき、要素ブロックが分かれるようにする必要がある。

グループ情報については Advance/REVOCAP を利用する場合は境界条件を設定すると自動的に付加される。汎用プリポストを利用する場合はそれぞれのグループ機能を用いる。

要素分割はすべて六面体 1 次要素とした。以上のようにして生成したメッシュは図 13 のようになり、メッシュ規模は表 7 の通りである。本例題では、そこまで大規模ではないが、同様のモデル化を実際に適用すると大きなモデルとなる。その場合でも Advance/FrontSTR では、同様の手順で解析を行える。

表 7 メッシュ規模

節点数	640496
要素数	535176

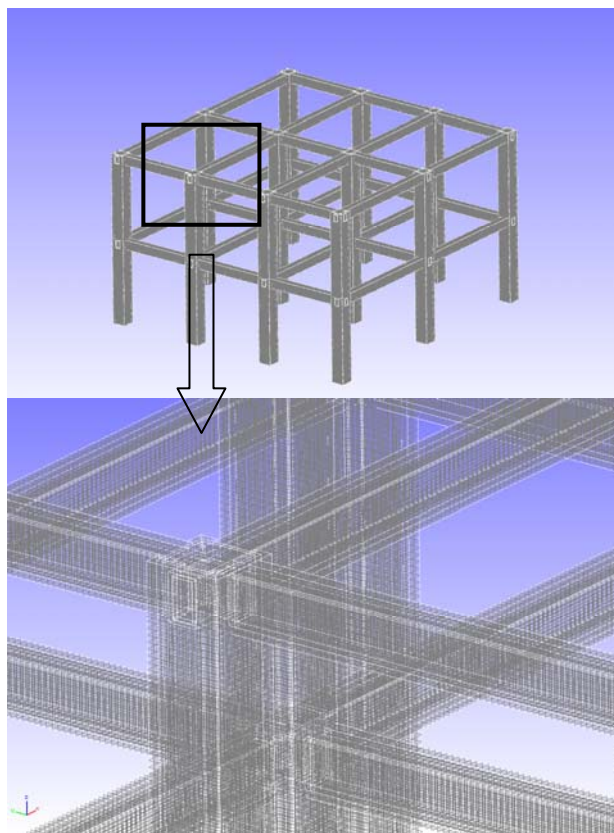


図 13 メッシュ図

4.3. 制御データ

4.3.1. 制御データの構成

制御データの構成は図 14 の通りであり、解析

タイプ、境界条件、材料物性、解析プロセス（ステップ）、解析パラメータ、出力設定などを多くの設定を行う。

専用プリポスト Advance/REVOCAP を使うと GUI 上から設定した結果が反映されて出力される。汎用プリポストでメッシュを作成した場合はエディタ等で編集する。いずれの場合も僅かな変更は直接編集する方が早い。データの基本書式は図 12 に示した通りである。

以下、各項目について説明を行う。なお、時間変化指定、材料物性および境界条件については次節以降で詳細に説明を行う。

- ・ ヘッダ情報：制御ファイルのバージョン明記
- ・ 解析タイプ：Advance/FrontSTR は以下の解析タイプをサポートする
 - STATIC：静解析
 - DYNAMIC：動解析
 - HEAT：熱伝導解析
 - EIGEN：固有値解析
 - MODAL_DYNAMIC：過渡応答解析
 - STEADY_STATE_DYNAMICS：周波数応答解析
- ・ 時間変化指定：4.3.2 参照
- ・ 境界条件：4.3.3 参照
- ・ 材料物性：4.3.4 参照
- ・ セクション情報：要素ブロックと材料物性を関連付ける。
- ・ 解析ステップ：解析プロセスの制御
- ・ ソルバー設定：収束条件などを設定。
- ・ 出力設定：可視化ファイルまたは CSV ファイルの出力設定

!VERSION 4	ヘッダ情報
!SOLUTION,TYPE=DYNAMIC	解析タイプ
!WRITE,VISUAL, FREQUENCY=1000 #	出力指定 1
!AMPLITUDE, NAME=FU_EW 0,0.18214931 0.01,0.172638996 ～(NS, UD も同様)	時間変化指定

# !BOUNDARY, GRPID=1 FIX, 1, 3, 0.0 !DLOAD, GRPID=2, AMP=FU_EW ALL, GRAV, 10.0, 1.0, 0.0, 0.0 ～(NS, UD も同様)	境界条件
# !MATERIAL, NAME=ST !ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC 206000., 0.3 !DENSITY 7.86E-9 ～(CONC も同様)	材料物性
# !SOLID_SECTION,EGRP=F1_ST, MATERIAL=ST ～(CONC も同様)	セクション情報
# !STEP BOUNDARY, 1 LOAD, 2 ～(NS, UD も同様)	解析ステップ
!DYNAMIC,METHOD=NEWMARK 0.01, 300.0	解析パラメータ
# !SOLVER,METHOD=DIRECT,ITERLOG=YES,TIMEL OG=YES	ソルバー設定
# !VISUAL, method=PSR !surface_num = 1 !surface 1 !output_type = COMPLETE_REORDER_AV5	出力指定 2
# !END	

図 14 制御データ（～は省略を意味する）

4.3.2. 時間変化指定

境界条件や荷重の時間変化の指定は、!AMPLITUDE で行う。本例題ではこれに地震加速度を設定する。!AMPLITUDE の書式は以下の通りである。

!AMPLITUDE, NAME=<name> 時刻 1, 値 1 時刻 2, 値 2 ～
--

図 15 !AMPLITUDE の書式

名前を設定し、境界条件等で参照する。2 行目以降がデータとなり、時間と値を時間順に列挙する。

K-NET から得られるデータは単純に値の列挙なっているので、 $\Delta t=0.01$ の時系列データの形に変換し、スケールファクターおよび 0 点補正をして!AMPLITUDE に設定すると以下ようになる。

```
!AMPLITUDE, NAME=FU_EW
0,0.18214931
0.01,0.172638996
~
!AMPLITUDE, NAME=FU_NS
0,-0.020981302
0.01,-0.01971326
~
!AMPLITUDE, NAME=FU_UD
0,0.00061884
0.01,0.003788945
~
```

図 16 !AMPLITUDE の設定例

4.3.3. 境界条件

境界条件では、拘束条件、荷重条件、温度などを設定する。Advance/FrontSTR がサポートする主な境界条件を以下に列挙する。

- ・ 拘束条件
 - BOUNDARY : 拘束および強制変位
 - BSPRING : ばね境界拘束
 - BDASHPOT : ダッシュポット境界拘束
- ・ 荷重条件
 - CLOAD : 集中荷重
 - DLOAD : 分布荷重
- ・ 熱解析のための条件
 - FIXTEMP : 設定温度境界
 - CFLUX : 集中熱流束
 - DFLUX : 分布熱流束
 - FILM : 熱伝達境界
- ・ 動解析のため条件
 - ACCELERATION : 設定加速度 (節点)
 - VELOCITY : 設定速度 (節点)
- ・ 接触解析のための条件
 - CONTACT : 接触面の設定

本例題では要素が加速度を受け物体力が作用するので!DLOAD を用いる。!DLOAD は分布荷重を設定するためのもので、主に面グループとともに圧力などを設定するために用いる。荷重タイプに GRAV を指定することで、地震加速度を表現することができる。図 17 にこの時の設定書式を示す。

```
!DLOAD, GRPID=<grpид>, AMP=<amp>
要素グループ, GRAV, 加速度値, 方向余弦(3 成分)
```

図 17 !DLOAD で GRAV を指定する際の書式

GRPID 属性で id を設定する。これは!STEP で指定される解析ステップへの登録の際の参照 id となる。本例題では柱脚固定と地震加速度作用を同時に作用させているが、境界条件の作用を、段階を踏んで行いたい場合は!STEP でそのまゝを設定する。AMP 属性で既に設定した!AMPLITUDE と!DLOAD を関連付ける。

加速度は全体に作用するものであるが、このような要素グループを表すものとして ALL が予め用意されている。実際に解析に用いられる加速度はここで設定した『加速度値』×『AMPLITUDE の値』となる。本例題では AMPLITUDE の値は [gal]=[cm/sec²]であるため、単位系を [mm/sec²]に合わせるために 10.0 を設定する。

加速度の作用方向は方向余弦で設定する。ここでは EW=X 方向、SN=Y 方向、UD=Z 方向した。以上より!DLOAD の設定は以下ようになる。

```
!DLOAD, GRPID=2, AMP=FU_EW
ALL, GRAV, 10.0, 1.0, 0.0, 0.0
!DLOAD, GRPID=3, AMP=FU_NS
ALL, GRAV, 10.0, 0.0, 1.0, 0.0
!DLOAD, GRPID=4, AMP=FU_UD
ALL, GRAV, 10.0, 0.0, 0.0, 1.0
```

図 18 !DLOAD の設定例

4.3.4. 材料物性

材料特性の設定は、設定したい特性のカードを!MATERIAL 以下に並べる形で行う。

Advance/FrontSTR がサポートする材料は表 3 に示した通りで、主なものを以下に列挙する。

- ・ 材料モデル
 - ELASTIC：弾性材料
 - PLASTIC：塑性材料
 - HYPERELASTIC：超弾性材料
 - VISCOELASTIC：粘弾性材料
 - VISCOPLASTIC：粘塑性材料
- ・ 熱特性
 - SPECIFIC_HEAT：比熱
 - CONDUCTIVITY：熱伝導率
 - EXPANSION：熱膨張係数
- ・ その他
 - DENSITY：密度

ここでは弾塑性材料の指定方法について詳しく説明する。弾塑性材料の設定は!ELASTIC カードで弾性特性、!PLASTIC カードで塑性特性を設定する。

!ELASTIC の書式は図 19 に示した通りである。TYPE 属性では等方性・異方性の指定を行い、DEPENDENCISE 属性では温度依存性の有無を指定する。これらの属性の指定に従い、2 行目の指定方法は異なるが、等方性+温度依存性無の場合は、ヤング係数、ポアソン比を指定する。異方性がある場合は複数の異方性パラメータを 2 行目で指定し、温度依存性有の場合は指定温度を設定する。

!ELASITC, TYPE=<異方性>, DEPENDENCIES=<温度依存>
ヤング係数, ポアソン比

図 19 !ELASTIC の書式
(等方性+温度依存性無の場合)

!PLASTIC の書式は、適用する降伏関数、硬化則などで異なる。Advance/FrontSTR がサポートする降伏関数(表 8) および硬化則(表 9)を以下に示す。

表 8 降伏関数(YIELD)

パラメータ値	内容
MISES	Mises モデル 硬化則はすべてに対応

MOHR-COULO MB	Mohr-Coulomb モデル 硬化則は二直線近似と多直線近似に対応
DRUCKER-PRA GER	Drucker-Prager モデル 硬化則は二直線近似と多直線近似に対応

表 9 硬化則(HARDEN)

パラメータ値	内容
BILINEAR,	等方硬化／二直線近似(デフォルト)
MULTILINEAR	等方硬化／多直線近似
SWIFT	等方硬化／Swift の式
RAMBERG-OS GOOD	等方硬化／Ramberg-Osgood の式
KINEMATIC	移動硬化／線形
COMBINED	複合硬化／二直線近似+線形

(1) 鉄筋材料特性の設定例

降伏関数が Mises モデル、硬化則が二直線近似の場合の設定は以下の書式になる。

!PLASTIC, TYPE=MISES, HARDEN=BILINEAR
降伏応力, 硬化係数

図 20 !PLASTIC の書式(Mises, 二直線近似)

以上より鉄筋の材料特性の設定は、SD345 から降伏応力 345[N/mm²]、ひずみ硬化係数は 0.01 であるため以下ようになる。なお密度は[N], [mm], [sec]の単位系としているので[ton/mm³]となる。

!MATERIAL, NAME=STEEL
!ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
206000., 0.3
!DENSITY
7.86E-9
!PLASTIC, YIELD=MISES, HARDEN=BILINEAR
345.0, 0.01

図 21 鉄筋材料特性の設定例

(2) コンクリート材料特性の設定例

降伏関数が Drucker-Prager モデル、硬化則が多直線近似の場合の設定は以下の書式になる。

```
!PLASTIC, TYPE=DRUCKER-PRAGER, HARDEN=
MULTILINEAR
内部摩擦角
塑性ひずみ 1, 粘着 1
塑性ひずみ 2, 粘着 2
~
```

図 22 !PLASTIC の書式 (~は省略を意味する)
(Drucker-Prager, 多直線近似)

コンクリートの内部摩擦角は 20 度とし、塑性歪みおよび粘着力の関係を入力すると以下のようになる。

```
!MATERIAL, NAME=CONC
!ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
30500., 0.2
!DENSITY
2.3E-9
!PLASTIC, TYPE=DRUCKER-PRAGER, HARDEN=
MULTILINEAR
20.0
0.0, 1.2
7.0e-6, 2.2
~
```

図 23 コンクリート材料特性の設定例

4.4. 解析実行

解析実行については 3.『Advance/FrontSTR のシステム構成』で説明を行った。本例題についても並列処理を行い、直接法線形ソルバーを用いて 1 ノード 12 並列で解析を行った。領域分割を行うと例題モデルは図 24 のように分割された。

次に、逐次処理と並列処理との 1 ステップあたりの解析時間の比較を表 10 に示す。理想的な 12 並列は実行速度が 12 倍になるはずだが、実際は並列化されていない部分、IO 処理、同期待ち、通信によるオーバーヘッドなどによりそうならない。本例題において約 7.4 倍であるが、かなり

の時間短縮になる。参考までに解析に用いた PC クラスタの構成を表 11 示す。

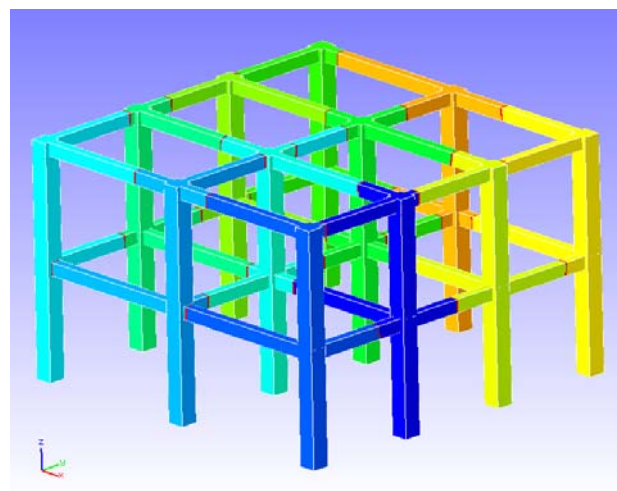


図 24 領域分割

表 10 解析時間の比較

実行方法	1 ステップ実行時間
逐次処理	412.6(sec)
12 並列	55.7(sec) ⇒約 7.4 倍

表 11 解析に利用した計算機構成

項目	内容
OS	CentOS 5.7
CPU	Xeon X5660(2.8GHz)×2 (/node)
メモリ	8GB DDR3×12=96GB (/node)
Ethernet	1Gbps×4 (/node)
構成	上記 node が 20 台

4.5. 解析結果

解析結果としては、3.『Advance/FrontSTR のシステム構成』で説明を行ったように、解析結果ログファイル(拡張子 log)、解析結果ファイル(拡張子 res)、可視化データファイル(拡張子 inp)が出力される。

解析結果ログファイル(拡張子 log)からは各種最大値・最小値、解析時間など解析の概要を読みとることができる。可視化処理は解析結果ファイル(拡張子 res)は Advance/REVOCAP により操作する。可視化データファイル(拡張子 inp)は Advance/REVOCAP またはオープンソースの

Paraview (<http://www.paraview.org/>) などにより可視化を行う。以下に可視化例を示す。

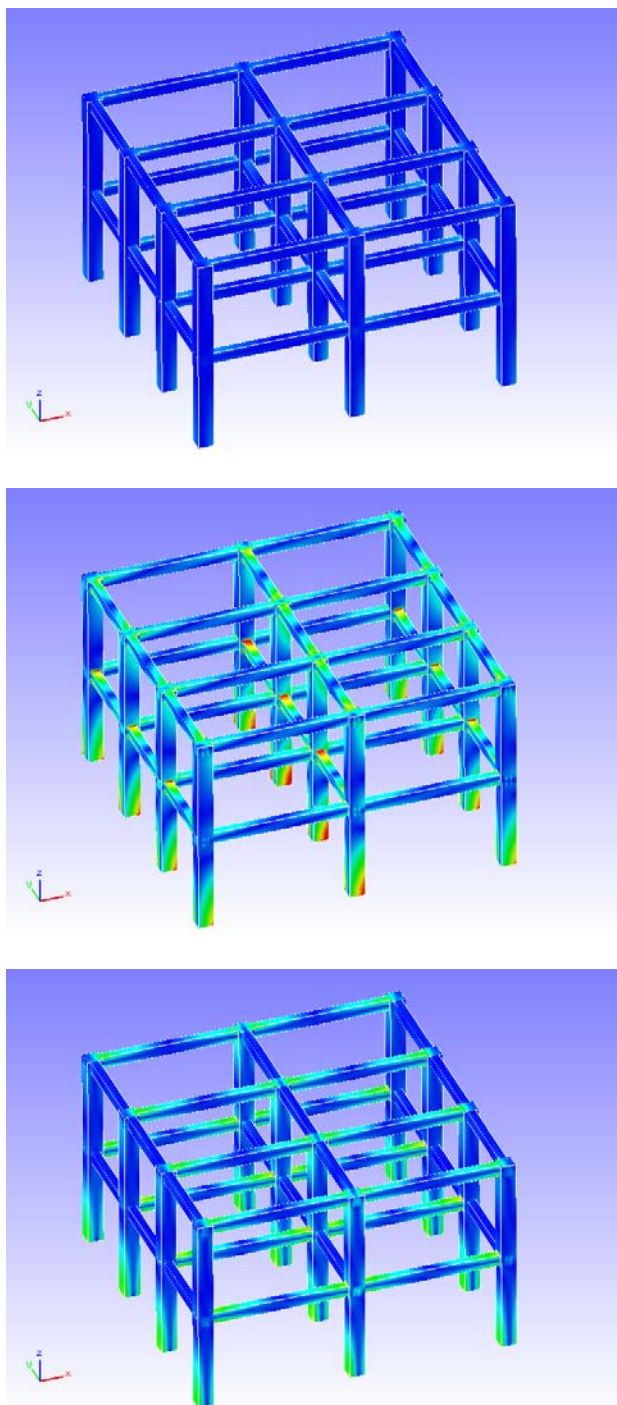


図 25 可視化結果（ミーゼス応力）
（上から 85sec, 125sec, 145sec）

5. まとめ

本稿では大規模解析のニーズの高まりに対応することが可能な Advance/FrontSTR の概要、システム構成および解析方法について説明を行った。特に解析方法については、原子炉建屋やその

他周辺施設の耐震安全評価での利用を想定して、地震力が作用する場合の RC 構造物の弾塑性解析を行い、具体的な入力方法について詳細に説明を行った。

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。)