

構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR Ver. 4.1

袁 熙* 松原 聖* 大家 史*

Latest Release : Advance/FrontSTR Ver. 4.1

Xi Yuan *, Kiyoshi Matsubara * and Fumito Ohya *

国のプロジェクトで開発された構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR に関し、当社では、新規機能の開発を継続的に実施し、ソフトウェアの販売・保守を行っている。構造解析分野では多くの汎用ソフトウェアが商用パッケージとして市販されている中、当社では、お客さまからの要望に基づき、従来では困難であった大規模解析や解析機能を中心とし、それらの課題を解決するための機能を開発し、本構造解析ソフトウェアを利用されている。また、当社では、流体解析ソフトウェア・音響解析ソフトウェアの開発・販売を行っており、それらのソフトウェアと構造解析ソフトウェアとの連成解析への期待も大きい。

今回、新しくリリースするバージョンでは、お客さまからの特に要望の多い接触解析の並列化に対応した。また、その他、局所座標系や異方性に関する機能を追加した。本稿では、新しくリリースした Advance/FrontSTR Ver.4.1 の概要について述べる。

Key word: 構造解析、大規模解析、接触解析、局所座標系、異方性

1. はじめに

1.1. 開発経緯と当社での開発

構造解析ソフトウェア 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、アドバンスソフト株式会社は「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[11]。

アドバンスソフト株式会社では、このソフトウェアを実用化するために、プリポストとともに独自に改良を進め、商用パッケージソフトウェア Advance/FrontSTR Ver.4.1 として販売保守を行っている。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、大きく 2 つある。第 1 は、非線形問題および線型ソルバーの収束性の強化、および、各種要素の開発および追加および強化を図っていることである。第 2 は、プリポスト Advance/REVOCAP と一体化した解析機能を提供していることである。

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、このことは特に連成解析では重要である。

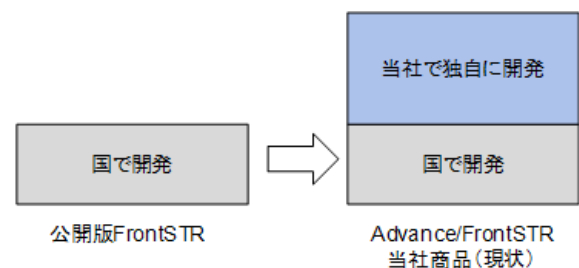


図 1 当社で販売する Advance/FrontSTR

*アドバンスソフト株式会社 第 1 事業部

Computational Science and Engineering Division I,
AdvanceSoft Corporation

1.2. これまでの当社の取り組み

これまでの当社の取り組みについては、本技術情報誌においても紹介してきた。

まず、ソルバーについては、[1][2][3][4][5]において示してきた。ここでは、当社で独自に開発した内容を中心に、それぞれのリリースのバージョンの機能を示した。また、接触等については、独自の工夫について[5]にまとめた。また、防災分野等に対する応用事例については、[9][10][11]に示した。

次にプリポストについては、[6][7][8]に示している。また、Advance/FrontSTR は、ソルバーとプリポストを合わせた大規模解析が特徴である。プリポストと合わせた大規模計算事例を[12][13][14][15][16]に示している。その中で特に、[12][13]では、大規模解析を行うための支援機能として、アセンブリ機能（部品を組み合わせることで全体のモデルを作成する機能）、リファイナー機能（メッシュ細分化機能）およびその応用事例についても示している。

表 1.1 Advance/FrontSTR の紹介記事

項目	文献	内容
ソルバー	[1]	Ver.3.0 の紹介
	[2]	Ver.4.0 の紹介
	[3]	Ver.4.0 の新しい機能
	[4]	ソルバー全体の紹介
	[5]	接触のための要素開発
プリポスト	[6]	プリポスト REVOCAP 紹介
	[7]	要素分割に関するノート
	[8]	連成ツール
応用事例	[9]	地震断層解析
	[10]	地盤モデル
	[11]	造船への適用可能性
大規模計算	[12]	アセンブリ機能
	[13]	メッシュ細分化機能
	[14]	大規模固有値計算
	[15]	固有値計算ベンチマーク
	[16]	直接法ソルバーベンチマーク

また、これ以外にも、国のプロジェクトに関連

する、[17][18][19][20]は、これらの機能について発表した内容である。

2. Advance/FrontSTR Ver.4.1 の機能

2.1. 概要および機能一覧

Advance/FrontSTR の解析機能の計算手法は、幾何学的／材料非線形／境界非線形静解析においては Total Lagrange 法および Updated Lagrange を、固有値解析にはランチョス法を、線形動解析の過渡応答問題には直接積分法を採用している。また、非線形問題では、ニュートン・ラフソン法による繰り返し計算手法を用いている。

また、Ver.4.1 では、従来(Ver.4.0)からの解析機能に加え、並列計算による接触機能、局所座標系機能、および、異方性解析機能を追加した。これらの内容につき、本節で引き続き解説する。また、接触機能については、本誌の記事の「並列接触機能」で詳細に述べる。

ライセンスに関しては、従来と同じく、1 ユーザーのライセンスでの CPU 利用数は無制限である。並列計算機をお持ちのお客さまは、すぐにも処理時間の短縮が可能となる。

表 1 に、Advance/FrontSTR Ver.4.0 の解析機能一覧を示す。

表 1 変形解析機能

項目	内容
静解析	熱応力解析を含む応力解析
動解析	陽・陰解法
・直接積分法	中央差分法／Newmark- β 法
・モード解析	時刻歴応答解析

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
材料非線形	各種材料ライブラリ

表 3 その他の解析機能

項目	内容
熱解析	定常／非定常解析（陰解法）
固有値解析	ランチョス法／その改良法
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）

表 4 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、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
・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

2.2. 並列接触解析

Advance/FrontSTR における接触解析は、これまでシングルプロセッサでの静的変形解析に限定していた。このたび新しいリリースする Advance/FrontSTR Ver.4.1 は、接触解析における静的・動的解析、および、それらの並列計算が可能になった。これらの機能はお客さまからの要望に応じ、プログラムを改良し、実現したものである。接触機能を使った事例として、独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 情報・計算工学センター様から[1][2]等で Advance/FrontSTR を適用した事例が発表されている。

2.2.1. 動的接触解析機能

摩擦を考慮する時、動的問題の運動方程式は以下である。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(t+\Delta t) + \mathbf{Q}(t+\Delta t) = \mathbf{F} + \mathbf{F}_c \quad (1)$$

ここで減衰マトリクスを無視した。または $\mathbf{F}_c$ は接触力を示している。

Advance/FrontSTR では時間積分方法には、中央積分法や Newmark- β や HHT 法を採用しているが[3]、中央差分法の場合では、式(1)は以下のようなになる。

$$\mathbf{M}\left(\frac{\mathbf{u}^{n+1} - 2\mathbf{u}^n + \mathbf{u}^{n-1}}{\Delta t^2}\right) + \mathbf{K}\mathbf{u}^n = \mathbf{F}^n + \mathbf{F}_c^{n+1} \quad (2)$$

または、Newmark- β 法や HHT 法の場合では

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}^{n+1} + \mathbf{K}\mathbf{u}^{n+1-\alpha} = \mathbf{F}^{n+1-\alpha} + \mathbf{F}_c^{n+1} \quad (3)$$

$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^n + \Delta t \dot{\mathbf{u}}^n + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{\mathbf{u}}^{n+2\beta} \quad (4)$$

$$\dot{\mathbf{u}}^{n+1} = \dot{\mathbf{u}}^n + \Delta t \ddot{\mathbf{u}}^n \quad (5)$$

ここでは上付き記号は計算ステップ番号と示し、 $\square^{n+\alpha} = (1-\alpha)\square^n + \alpha\square^{n+1}$ のようにステップ $n \sim n+1$ の間の状態を示している。

上記の実装方法は文献[23]に示したように非現実的な数値的な振動やエネルギー保存則を満足していないという指摘があったが、しかしこれらの問題をすべて対応できるアルゴリズムがないのは現状である。

これらに実現した機能に関するテスト計算は文献[21][22]から参照できる。

2.2.2. 接触解析の並列化

Advance/FrontSTR の今までは、接触の slave-master 面ペアは同じ CPU 内に置く必要があった。しかし、slave-master 面ペアは同じ CPU 内に置く条件は解析上に厳しい条件であり、または有限すべり接触問題では、接触面位置が大きく変わることもある[24]ため、この条件を満足させるのは事実上不可能であり、接触解析の並列計算はできない状況であった。新しくリリースした Advance/FrontSTR は上記の問題を解決し、その実装の有効性はいくつかのテスト計算[21][22][24]から確認した。

2.3. 局所座標系や異方性材質の導入

異方性のある材料や局所座標系方向にかかる拘束などはよく使われる解析機能なので、新しい

リリースした Advance/FrontSTR は以下の機能を追加した。

2.3.1. 局所座標系の種類

図 1~3 に示したように、直交 Cartesian 座標系、円柱座標系と球座標系の局所座標系を定義できる。

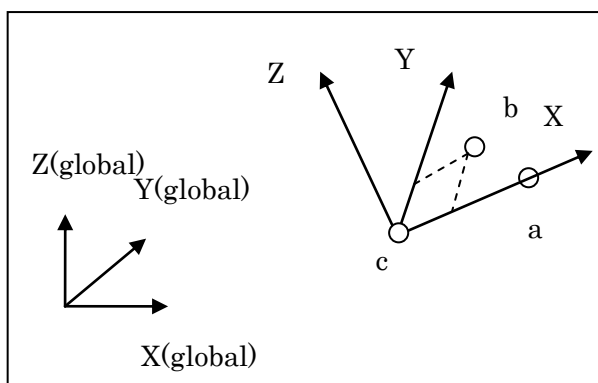


図 2 直交 Cartesian 座標系

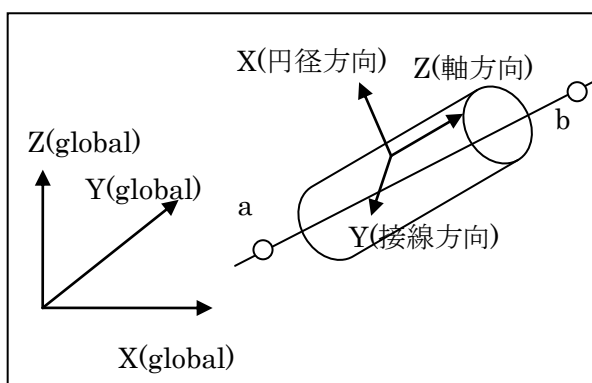


図 3 円柱座標系

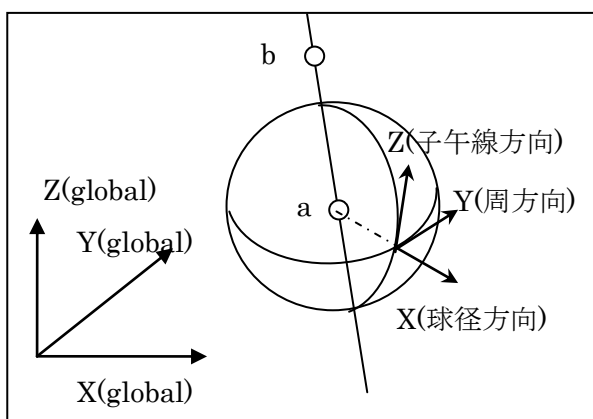


図 4 球座標系

2.3.2. 局所座標系を利用した解析

(1) 拘束条件や外力条件は局所座標系に定義することができる。

その定義方法は以下である。

```
!TRANSFORM, NGRP = NG1, TYPE = R
0.8, 0.2, 0.1, 0.1, -0.2, 0.9
```

この例では、節点グループ NG1 にかかるすべての拘束や外力はここで定義した円柱座標系 (TYPE = R で指定) にかかることになる。

(2) 異方性材質

異方性材質の定義では、まず入力ファイル中！ORIENTATION を利用することより局所座標系を定義し、各要素グループにこの局所座標系に対応することを指定する必要がある。今回リリースしたバージョンでは以下の異方性材質を定義できる。

- ・ 直交異方性の持つ熱膨張係数
- ・ 直交異方性を持つ弾性材料

以下の弾性構成式を持つ弾性材料を利用できる。

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_2 & -\nu_{13}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ & & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ & 対称 & & & 1/G_{23} & 0 \\ & & & & & 1/G_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{bmatrix}$$

3. おわりに

当社では、国のプロジェクトで開発されたソフトウェアをベースに、改良を重ねた構造解析ソフトウェアとして Advance/FrontSTR Ver. 4.1 を販売しており、本稿ではその概要について述べた。

安価なマルチコアの計算機の普及により、数千万自由度を超える大規模計算が身近なものとなってきた。Advance/FrontSTR は、当初から大規模解析の設計に基づき開発されてきた。今後は、大規模計算を身近なものと感じていただき、その解析を実現するソフトウェアとして Advance/FrontSTR を、ひとりでも多くのお客さまのツ

ルとして利用していただくことをわれわれの喜びとしている

参考文献

- [1] 袁熙, “Advance/FrontSTR Ver. 3.0 の非線形解析機能について” ,Vol.4(2010.11)
- [2] 松原聖, “構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR の概要” ,Vol.8(2011.07)
- [3] 袁熙, “Advance/FrontSTR Ver.4.0 解析機能の拡張” ,Vol.8(2011.07)
- [4] 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)
- [5] 袁熙, “接触解析のための複合要素の開発” ,Vol.8(2011.07)
- [6] 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)
- [7] 徳永健一, “要素分割に関する技術ノート” ,Vol.8(2011.07)
- [8] 菊池愛子, 戸田 則雄, “連成解析のためのデータ連携ツール Advance/ MPLink Ver.1.7” ,Vol.4(2010.11)
- [9] 菊池愛子, 董勤喜, “有限要素法による地震断層解析(概要)” ,Vol.4(2010.11)
- [10] 戸田則雄, “断層面の地盤モデルへの組み込み” ,Vol.4(2010.11)
- [11] 加藤国男, “Advance/FrontSTR 大規模解析の適用可能性 ―造船業界の船体設計の革新―” ,Vol.8(2011.07)
- [12] 末光啓二, 徳永健一, “Advance/FrontSTR の部品アセンブリ解析機能” ,Vol.8(2011.07)
- [13] 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」” ,Vol.8 (2011.07)
- [14] 松原聖, 桑原匠史, “大規模固有値計算プログラム Advance/NextNVH” ,Vol.4(2010.11)
- [15] 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” ,Vol.8(2011.07)
- [16] 大家史, 松原聖, “構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR の直接法ソルバーの並列性能” ,Vol.9(2011.10)
- [17] アドバンスソフト, “Advance/FrontFlow/red, Advance/FrontSTR のご紹介”, 第 32 回関西 CAE 懇話会(2011.5)
- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] 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)
- [21] 篠原主勲, 高木亮治, 秋田剛, “ヒンジ・ジョイント部の接触・摩擦有限要素解析”, 第 44 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2012
- [22] 篠原主勲, 高木亮治, 秋田剛, “人工衛星接合部を対象とした接触・摩擦有限要素解析”, 計算工学講演会論文集, vol.17(2012)
- [23] D.Doyen, A.Ern, S.Piperno, “Time integration schemes for the finite element dynamic Signorini problem”, SIAM Journal on Scientific Computing, 33(2011), pp.223-249
- [24] 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)