

## 大規模有限要素法構造解析プログラム

FrontISTR Ver. 4.3

Large-scale structural analysis program with finite element method

FrontISTR Ver. 4.3

東京大学生産技術研究所 革新的シミュレーション研究センター

分類	構造解析
キーワード	有限要素法、材料非線形、 幾何学的非線形、境界非線形
開発者	奥田洋司 (代表)
作成年月	2014年4月
コード名	FrontISTR
使用言語	Fortran90、C

### ◇FrontISTR Ver. 4.3の概要

FrontISTR (フロントアイスター) は、Windows やLinux のPC クラスタはもとより「京」などの超並列スパコンにも対応可能な、有限要素法によるオープンソースの大規模構造解析プログラムである。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」プロジェクトで開発され、2013年3月にFrontISTR Ver. 4.2が公開された。研究開発プロジェクト終了後は、FrontISTR 研究会(\*)を中心に、引き続きFrontISTR システム (プリ・ポスト REVOCAP\_PrePost を含む) の利用促進、産業応用、ソフトウェア資産や解析データの維持管理、機能改良、等が進められている。 (\*) FrontISTR 研究会 <http://www.multi.k.u-tokyo.ac.jp/FrontISTR>

### ◇FrontISTR Ver. 4.3の機能

本ソフトウェアの全体機能を以下に示す。下線印は、本バージョンにおける拡充機能である。

#### (1) 解析種別

静解析：線形、幾何学的非線形、材料非線形、境界非線形(接触)

動解析：線形、幾何学的非線形、材料非線形、境界非線形 (接触)

固有値解析：線形、変形後解析機能、モーダル応答解析機能

熱伝導解析：定常、非定常

#### (2) 材料特性

弾性(線形)：等方性、異方性

超弾性：Neo-Hooke モデル、Mooney-Rivlin モデル、Arruda-Boyce モデル

弾塑性：降伏関数/Mises モデル、Mohr-Coulomb モデル、Drucker-Prager モデル

硬化則／等方硬化則（二直線近似、多直線近似、Swift の式、Ramberg-Osgood の式）、  
移動硬化則（線形）、複合硬化則（二直線近似等方硬化則＋線形移動硬化則）

熱弾塑性：材料特性の温度依存性を考慮した弾塑性

粘弾性：一般化 Maxwell モデル、温度依存性

クリープ：Norton 則

(3) 接触特性

微小すべり／有限すべり、摩擦なし／摩擦あり

(4) 非線形解法

Total Lagrange 法（材料非線形）、Updated Lagrange 法（材料非線形）

Lagrange 乗数法（境界非線形）、Augmented Lagrange 法（境界非線形）

(5) 線形ソルバー

前処理付反復法（領域分割並列）：前処理におけるマルチカラー処理およびハイブリッド並列対応（MPI+OpenMP）、ベクトル計算機向けオーダリング、自由度3の問題で、全ての前処理と反復解法の組み合わせが利用可能（以下）

反復解法／ CG, BiCGSTAB, GPBiCG, GMRES

前処理／ SSOR, 対角スケーリング, BILU(0), BILU(1), BILU(2)

直接法（行列分割並列、領域分割並列(MUMPS へのインターフェイス)）

行列データのダンプ機能

(6) 要素ライブラリ 注：\*印は、メッシュ細分化に対応

2次元：三角形要素（1次、2次）、四角形要素（1次、2次）

3次元：\*四面体要素（1次、2次）、\*五面体要素（1次、2次）

\*六面体要素（1次、2次）、三角形シェル要素、四角形シェル要素

シェル・梁要素とソリッド要素の混在解析対応、シェル要素における直交異方性材料対応、積層シェル対応

(7) その他の詳細機能

境界条件指定：大変形解析の際の荷重 FOLLOW 機能、連成解析における入力流体力へのウィンドウ関数の適用

パーティショナ：大幅な高速化、Metis Ver. 5 への対応

リファイン：要素タイプ混在モデルのリファイン対応（ただし、節点自由度の異なる要素タイプの混在は不可）、平面モデルおよびシェル・梁モデルのリファイン対応、入力温度データのリファイン情報に基づく補間に対応（例えば、リファインなし、あるいは、リファイン1回で熱伝導解析を行い、その結果を入力として、リファイン2回で熱応力解析を実施、など）

その他：動解析におけるモニタリング機能向上、

(8) 稼働確認環境

OS：Windows XP (32bit、64bit)、Linux (32bit、64bit)

C コンパイラ : gcc、Intel、PGI

Fortran コンパイラ : gfortran、Intel、PGI

スパコン : 東大 FX10、九大 / FOCUS PRIMERGY、地球シミュレータ、スーパーコンピュータ「京」

#### ◇FrontISTR による解析例、産業応用事例

スーパーコンピュータ（東京大学 FX10, 23,040 コア使用）を用いて実施した、プリント配線基板の熱反りシミュレーション結果（深さ方向変位）を図 1 に示す。微細な配線パターンと非線形材料特性を考慮した高精細な予測により、リフロー工程で加熱された際の基板反りに起因する半田未着やショートなどの実装不良を防ぐことを目的としている。モデル規模は、41,044,244 節点、38,689,706 要素（六面体 1 次要素）、最小メッシュサイズは  $30\mu\text{m}$  である。並列 CG 法ソルバは、4,096 並列まで理想値に近い加速率、23,040 並列でも 12,000 倍以上の加速率が確認された。

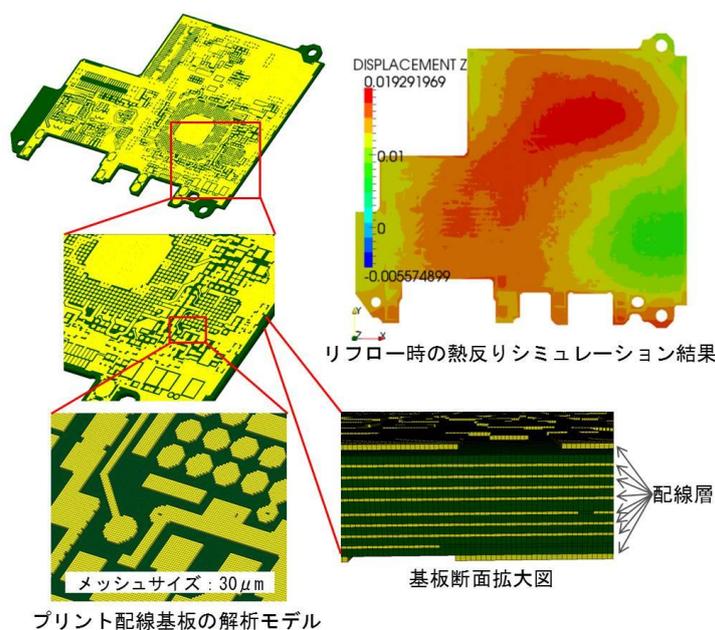


図 1 プリント配線基板の熱反り解析例

さらに、「京」コンピュータ（最大で 65,536 コア使用）において、リファイン機能を併用して本モデルを詳細化し（2 回リファイン、2,513,793,437 節点、2,476,141,184 要素（六面体 1 次要素）、最小メッシュサイズは  $7.5\mu\text{m}$ ）、表 1 に示す並列性能が得られた。この計算は線形解析であるが、モデルの詳細化による解の収束傾向が明らかとなった。

表1 「京」における大規模ハイブリッド並列解析

Refine 回数	ノード数	コア数	並列方式	計算時間	Work ratio	対ピーク性能
0	128	1,024	FlatMPI	3.8 h	74.7 %	4.7 %
			Hybrid	4.5 h	57.6 %	3.3 %
1	1,024	8,192	FlatMPI	5.7 h	88.0 %	5.0 %
			Hybrid	8.6 h	60.3 %	3.3 %
2	8,192	65,536	FlatMPI	13.7 h	82.6 %	4.2 %
			Hybrid	21.7 h	50.3 %	—

また、企業との共同研究などの枠組みを通じて、以下のような課題に FrontISTR が適用されている。

- ・ 高速鉄道のレール・車輪間の動的接触挙動評価
- ・ 船体ブロック溶接やキャスクなど大規模構造物の残留応力評価
- ・ 複合材料伝動ベルトの接触挙動評価
- ・ 接触荷重・熱荷重下における電子機器の構造信頼性評価
- ・ 発電用大型蒸気タービン動翼の流体・構造連成
- ・ 充填ゴムのひずみ評価
- ・ 脳動脈瘤などの生体系非定常流体・構造連成
- ・ 地震時における地盤・原子力建屋の動的挙動評価
- ・ 広域地盤領域の周波数応答、断層破壊挙動評価
- ・ 複雑構造押し出し成型の効率化

#### ◇謝辞

本研究の一部は、文部科学省高性能汎用計算機高度利用事業「HPCI 戦略プログラム」分野4 次世代ものづくりの補助および理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたものです (課題番号: hp120289?, hp130018?)。関連各位に謝意を表す。

(執筆責任者：奥田洋司)