



分類	流体シミュレーション
キーワード	LES、有限要素法、流体機械、流体音解析
開発者	加藤千幸、郭 陽、山出吉伸、吉村英人、高山 務
作成年月	2013年3月
コード名	FrontFlow/blue version 8.1、FrontFlow/blue-ACOUSTICS version 2.3
使用言語	Fortran77、Fortran90、C

#### ◇汎用流体解析コード FrontFlow/blue version 8.1

FrontFlow/blue (FFB) は非圧縮流体の非定常流動を高精度に予測可能な Large Eddy Simulation (LES) に基づいた汎用流体解析コードである。本ソフトウェアは文部科学省次世代 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」プロジェクトのもとで開発された。本ソフトウェアの特長は乱流の高精度予測であり、これを支える基礎技術として、数値粘性フリーの高精度スキームおよび最大 1000 億グリッドまで対応可能な大規模解析技術が実装されている。本バージョンでは、スーパーコンピュータ「京」用の高速動作技術が実装され、本ソフトウェアを用いて「京」において 300 億グリッドを用いた実用計算の動作が確認されている。また、VOF 法に基づく混相流解析機能、回転系における回転系を扱う入れ子回転機能、オーバーセットの自動生成機能、ボクセルメッシュによる解析機能等が新たに実装された。

#### ◇汎用音響解析コード FrontFlow/blue-ACOUSTICS version 2.3

FrontFlow/blue-ACOUSTICS (FFB-A) は音響場を周波数領域で計算する汎用音響解析コードである。本ソフトウェアは FFB と同様に文部科学省次世代 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」プロジェクトのもとで開発された。FFB および FFB-A を用いることにより流体音響連成を行い、空力騒音を予測することが可能である。本ソフトウェアの特長は最大 1 億点規模の大規模解析が可能であることにあり、従来のソフトウェアでは計算が困難であった、高周波領域の音場や複雑形状まわりの音場を大規模のメッシュを用いて解析することができる。

## ◇コードの主な特徴

- 基礎方程式：【FFB】 3次元非定常非圧縮性 Navier-Stokes 方程式  
【FFB-A】 Helmholtz 方程式（周波数領域）
- 乱流モデル：LES（標準スマゴリンスキーモデル、ダイナミックモデル）、DES、RANS（Launder & Sharma および Chien による低レイノルズ数型  $k-\varepsilon$  モデル）
- 時間積分法：陽解法、陰解法（Crank-Nicolson 法）
- 離散化手法：時間・空間 2次精度 有限要素法
- 対応メッシュ：中間節点を含む六面体、三角柱、ピラミッドおよび四面体要素  
移動・回転座標系/Overset メッシュ、  
メッシュの自動 Refine 機能（局所 Refine によるメッシュの最適配置）
- 並列計算機能：領域分割法による大規模計算・自動最適化領域分割統合ツール
- その他の機能：流体音響解析、キャビテーション解析、流体・固体熱輸送連成解、ALE 解析機能、VOF 法による混相流解析、入れ子回転系計算

## ◇コードの概要

**流体解析**：本コードの特長は LES による乱流現象の高精度予測である。最大 1000 億規模の解析を容易に実行できるよう、自動格子分割やボクセルメッシュへの適応など大規模データハンドリング技術が実装されている。本バージョンではスーパーコンピュータ「京」上の高速化動作技術が実装されており、最大 300 億グリッドの計算実行が確認されている（下図参照）。

**流体音響解析**：Curl の式のほか、1 億グリッド規模の解析が可能な音響解析機能をサポート。

**キャビテーション解析**：均質流体モデルに基づくキャビテーション解析機能を実装。

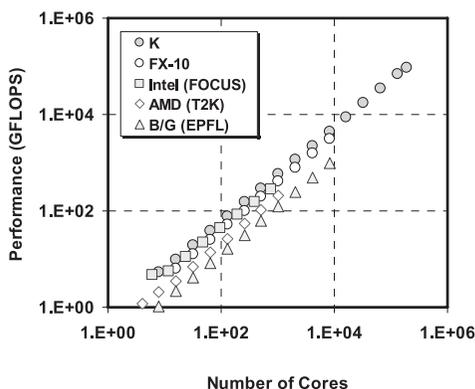
**熱輸送解析**：流体と固体中の熱伝導と、流体中の熱対流を考慮した熱輸送解析を行うことができる。

**ALE 解析機能**：連成解析システム REVOCP との連携により流体構造連成解析を行うことができる。

**混相流**：VOF 法に基づく混相流解析を行うことができる。

## 動作確認プラットフォーム

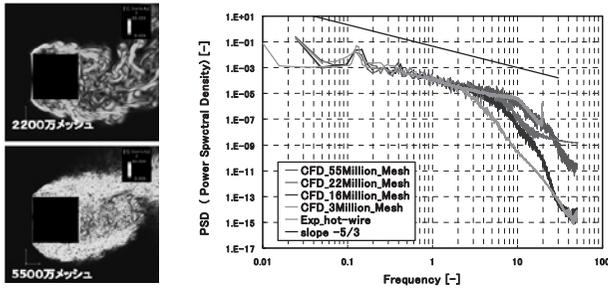
スーパーコンピュータ 「京」、  
富士通 PRIMERGY、富士通 PRIMEHPC FX10、  
IBM Blue Gene、IBM AIX、  
HITACHI HI-UX/MPP (SR16000)、HP HP-UX、  
NEC SUPER-UX (SX、地球シミュレータ)、  
DEC OSF/I (Compaq/HP Try64 UNIX)、  
Sun Solalis、SGI IRIX、IA-32/IA-64 Linux 等



FFB ベンチマークテスト結果

◇解析例

■角柱まわり乱流場の高精度予測：



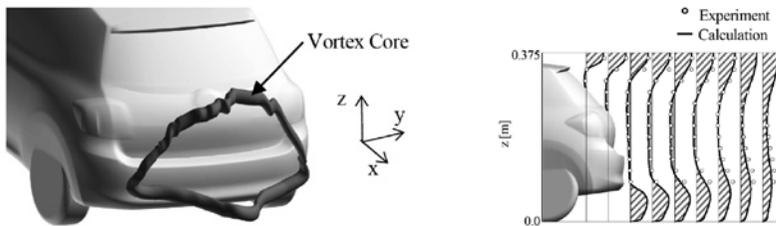
左：角柱まわりの渦構造、右：速度パワースペクトルの比較

乱流現象の予測精度検証のため、角柱まわりの LES 解析を実施した。角柱近傍の速度パワースペクトルを予測値と計測値と比較したところ、定量的に一致することが確認できた。

(参考文献：日本機械学会流体工学部門講演会、pp.245-246、2012)

■車体抵抗発生メカニズムの解明：

車体まわり流れの LES 解析を実施した。使用した計算格子は約5千万格子である。車体表面の圧力分布や後流の速度分布の計算結果が実験値とよく一致することが確認できた。また、後流の渦の分布と空気抵抗を分析した結果、渦の循環量が強く、渦が車体に近いほど空気抵抗が大きくなることを確認できた。(提供：トヨタ自動車株式会社、参考文献：日本自動車技術会 2012 年秋季学術講演会前刷集)



後流域における渦中心の可視化結果

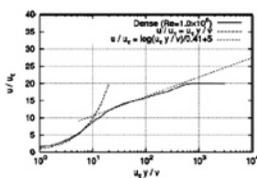
後流速度分布の比較

■船体の推進抵抗の予測：

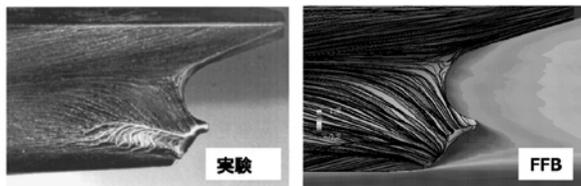
曳航水槽試験を数値計算により代替することを最終目標とし、推進抵抗の予測制度を検証している。船体まわり流れの準直接計算 (300 億グリッド) により船体抵抗を定量的に予測できる目処がたっている。今後、プロペラや造波抵抗も考慮した抵抗予測を行う予定である。(提供：財団法人日本造船技術センター)



船体表面の渦度分布



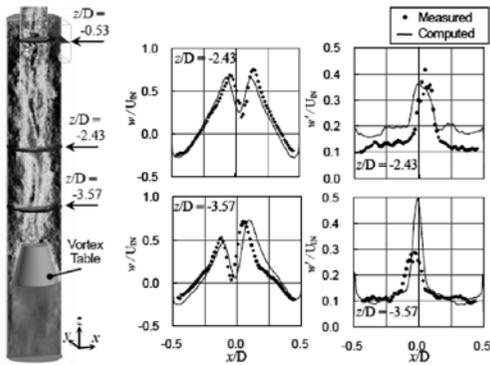
速度分布



限界流線の比較

(参考文献：日本船舶海洋工学会論文集 Vol. 16(2012) pp1-9、Journal of Ship Research、Vol. 47、No. 1 pp.24-38)

■サイクロンセパレータの粒子分離メカニズムの解明：



サイクロンセパレータの内部流れの LES 解析を実施した。予測した流速や乱れ速度の分布は計測値とよく一致した。また、計算された流れ場を用いた粒子追跡計算を実施することにより、サイクロン内部の粒子の挙動を詳細に調べた。これにより、大きさの異なる粒子がセパレータ内部で分離される詳細なメカニズムを明らかにすることができた。

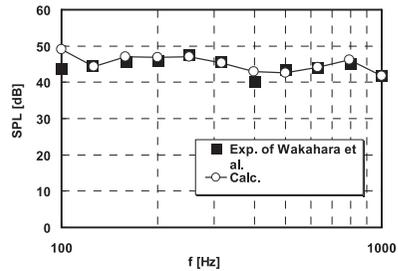
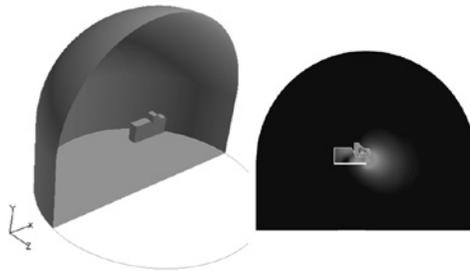
(提供：

コニカミノルタビジネステクノロジーズ株式会社

参考文献：日本機械学会論文集 B 78-795 p18)

■HVAC モデルから発生する空力騒音の予測：

FFB および FFB-A を用いた流体音響連成解析により HVAC モデルから発生する騒音を予測した。予測した音圧レベルは計測データとよく一致することが確認できた。

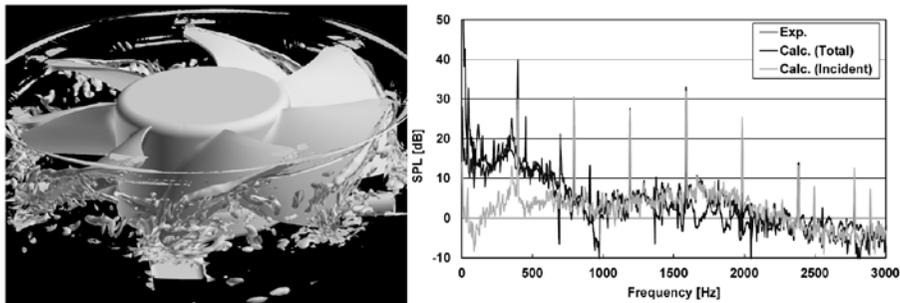


左：HVAC モデル周辺の音響場可視化結果、右：音圧スペクトルの比較

(参考文献：日本機械学会流体工学部門講演会、pp. 251-252、2012)

■ファン騒音解析：

プロペラファンから発生する空力騒音を予測した。LES 解析で得た音源データを用いた音響解析を実施することにより、音圧レベルを定量的に予測できることを確認した。



左：ファン音源の可視化結果、右：音圧レベルの比較

(参考文献：2011 年東京大学博士論文、高山糧)

(執筆責任者：加藤千幸)