



Advance/FrontFlow/red

～ 主要機能と事例のご紹介～

アドバンスソフト株式会社

1

目次



ソフトウェアの概要

FrontFlowの概要

Advance/FrontFlow/redの主要機能

基本検証解析例

各種機能の基本検証

実用問題解析例

エンジンポートの非定常解析

配管合流部のLES解析

ASMO車体まわりの空力解析

フォーミュラカーの大規模解析

都市部の汚染物質拡散予測

回転機械における流体音解析

自動車ドアミラーの流体音解析

ガスタービンのFlamelet燃焼解析

案内羽根つき曲がり管の流体構造連成解析

2



Advance/FrontFlow/red
ソフトウェアの概要



FrontFlowの概要

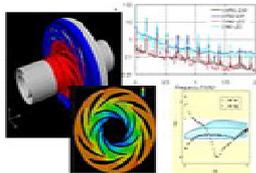


文部科学省次世代IT基盤構築のための研究開発
「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」

アドバンスソフト(株)

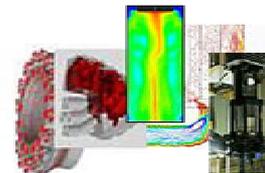
東京大学生産技術研究所

流体機械と騒音の解析
東京大学生産技術研究所 加藤千幸研究室



FrontFlow/red
FrontFlow/blue

燃焼の解析
北海道大学院工学研究科 大島研究室



大学等の先端研究機関
との技術的連携を
広く実施

Advance/FrontFlow/Redは東京大学生産技術研究所計算科学技術連携研究センターが実施した文部科学省ITプログラム「戦略的基盤ソフトウェアの開発」プロジェクトの成果(ソフトウェア)をアドバンスソフト(株)が独自に改良したものです。アドバンスソフト(株)は「戦略的基盤ソフトウェアの開発」プロジェクトに参加し、ソフトウェアの開発を行いました。

FrontFlowの概要

AdvanceSoft



ベースソフトウェア:革新PJ版FrontFlow/red

- ・有限体積法に基づく乱流解析
- ・節点中心法による高精度な解析
- ・LESによる大規模な非定常乱流解析
- ・燃焼、化学反応などを乱流と連成したマルチフィジックス解析
- ・東京大学とアドバンスソフトで連携して開発
- ・革新PJ、産業応用協議会などで精度や実用性の評価

Advance/FrontFlow/redでの拡張

- ・乱流騒音解析機能、スライディングメッシュによる回転機械の解析機能、多孔質体もでる、各種プリポストへの対応など
- ・FrontFlow/red開発者による技術サポート

5

Advance/FrontFlow/redの主要機能

AdvanceSoft



ラージ・エディ・シミュレーション(LES)による非定常乱流解析機能

- ・標準Smagorinskyモデル
- ・Dynamic SGSモデル(開発中)
- ・S-A-DESモデル(開発中)
- ・乱流ドライバー(LES非定常乱流流入条件)機能
- ・直接数値シミュレーションやRANSも可能(標準k- ϵ 、低Reynolds数、CHENモデル、RNGモデル)

大規模解析への対応

- ・領域分割法による並列化により、PCクラスタで大規模乱流解析が可能
- ・ベクトル/パラレル計算機用に高速化(地球シミュレータで実証)し、大型計算機ならさらに大規模の解析が可能
- ・mpichのほか、OpenMPI、HP-MPIならより高速な並列計算が可能

6



燃焼解析

- ・LESによる燃焼解析が可能。温度・濃度・火炎の時間変動を解析可能
- ・化学反応モデルには総括反応モデル、素反応(詳細反応)モデル、渦消散モデル(k- 計算時に可)を装備
- ・予混合燃焼ではG方程式により既燃側から未燃側への火炎面伝播を計算。拡散燃焼ではflameletモデル(混合分率方程式 + G方程式)で火炎面追跡
- ・熱物性値にはJANAFテーブルあるいはCHEMKINデータベースを使用可能
- ・粘性係数、熱伝導率および拡散係数の近似モデルはSmookeのsimplified transport modelを採用

乱流音解析

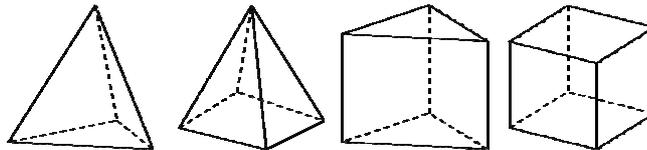
- ・乱流渦から発生する流体音を分離解法により予測。実形状での流体音解析が可能。
- ・音圧の評価にはCurleの式またはFW-Hの式を採用。回転機械からの流体音にも対応。
- ・物体から無限空間に放射される音(反射、吸収を考慮しない)に適応可能。音響解析にはAdvance/FrontNoiseを。

7

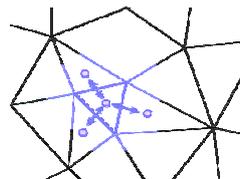


計算手法

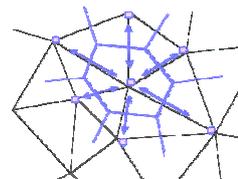
- ・メッシュには四面体、四角錐、三角柱、六面体が使用可能。これらの混合も可能。



- ・節点中心法を採用。
- ・節点周りにコントロールボリュームを作成し、その中心に変数を配置。セル中心法に比べてコントロールボリューム界面が増えるため、隣接CVとの情報伝達量が増加し、計算精度の向上が望める。



セル中心法



節点中心法

8

Advance/FrontFlow/redの主要機能

AdvanceSoft



- ・離散化：有限体積法
- ・圧力・速度カップリング：
 - SMAC法 (Fractional Step法) (陽解法)、SIMPLE法 (陰解法)
- ・時間積分法：
 - Euler陽解法、Euler陰解法、2次精度クランク・ニコルソン法、2次精度Adams-Bashforth陽解法、3次精度Adams-Moulton陰解法、4次精度ルンゲクッタ陽解法
- ・対流項のスキーム：
 - 1次精度風上差分、2次精度風上差分、2次精度風上差分+limiter (TVD法)、2次精度中心差分、3次精度風上差分+limiter (TVD法)
- ・数値振動の防止：
 - Rhie-Chow法による圧力振動の抑制、緩和修正法 (Deferrd-Correction法) による各物理量の振動抑制
- ・ソルバー：
 - 圧力のPoisson方程式はICCGとBi-CGSTAB、移流拡散方程式はBi-CGSTABソルバー、対角線スケールリング、IC/LU分解前処理による収束速度の向上

9

Advance/FrontFlow/redの主要機能

AdvanceSoft



	FrontFlow/red 機能詳細	Advance/FrontFlow/red 追加機能
基本機能	<p>基本解析機能： 定常解析 / 非定常解析 / 非圧縮性流体 / 圧縮性流体 (疑似圧縮性) / 低Mach数近似 / 複数流体間の熱伝導</p> <p>乱流モデル： 標準Smagorinskyモデル / DNS / 高レイノルズ数標準 k-ε モデル / 低レイノルズ数 k-ε モデル / 高レイノルズ RNG k-ε モデル / 高レイノルズ CHEN k-ε モデル</p> <p>ガス燃焼・化学反応モデル： 素反応(逆反応、圧力依存性、第3体、非整数化学量論係数、任意反応指標) / 炭素燃焼 / 縮結反応(スス生成含む) / Flameletモデル</p> <p>輻射性： 定圧比熱、エンタルピー、エントロピーと自由ギフトエネルギーの多項式表現 (JANAFテーブルあるいはChemkinデータベースの係数入力と一致)</p> <p>霧送特性： SmookeとSutherlandモデル</p>	<p>固体-流体間の熱伝導 (固体内部の熱伝導率を含む) / ポーラスメディア</p> <p>Dynamic SGSモデル※ / Lagrangian Dynamic SGSモデル※ / DESモデル※ / 応力方程式モデル (RSN)※ / 非線形滑粘性モデル※</p> <p>表面反応モデル： 素反応 / 非整数化学量論係数 / 任意反応指標 / Sticking係数モデル / 表面荷電反応モデル / プラズマモデル※ / マルチサイト※ / マルチサブストレツト※ / マルチ反応※ / マルチバルク成長※ / エッチング・デポジション※</p>

※開発中機能

10

Advance/FrontFlow/redの主要機能

AdvanceSoft



	FrontFlow/red 機能詳細	Advance/FrontFlow/red 追加機能
メッシュ	メッシュ形状： 6面体(ヘキサ)/4面体(テトラ)/3角柱(プリズム)/4角錐(ピラミッド)/ これらメッシュの混合 その他の機能： マルチフレーム(固定、連続のみ)、内部界面(流体-固体、固体-固体)	スライディングメッシュ機能/不連続マルチフレーム/内部界面(流体-流体系)/移動メッシュ系/メッシュ追加削除※
離散化法	有限体積法/節点中心法	
数値スキーム	SMAC法(Fractional-Step法)/SIMPLE法/Rhie-Chow法による圧力振動の抑制/Muzaferijaの手法による拡散項の精度向上 時間積分スキーム： Euler陽解法/Euler陰解法/2次精度クランク-ニコルソン法/2次精度Adams-Bashforth法/3次精度Adams-Moulton法/4次精度ルンゲ-クッタ陽解法 移動項の離散化スキーム： 1次精度風上差分/2次精度風上差分+リミタ(TVD法)/2次精度中心差分/3次精度風上差分+リミタ(TVD法)/ブレンド法(2次中心差分+1次風上)	2次上流補間差分法(LJS)※
行列解法	ICCG法(圧カポアソン方程式)/Bi-CGSTAB法(圧カポアソン方程式以外)/ベクトル化ソルバー(ES用)	
結果出力	瞬時分布(全ての物理量)/アニメーション(選択可能)/非定常統計量(時間平均、変動強度)/流体力6成分の時系列/任意点任意物理量の時系列	

※開発中機能

11

Advance/FrontFlow/redの主要機能

AdvanceSoft

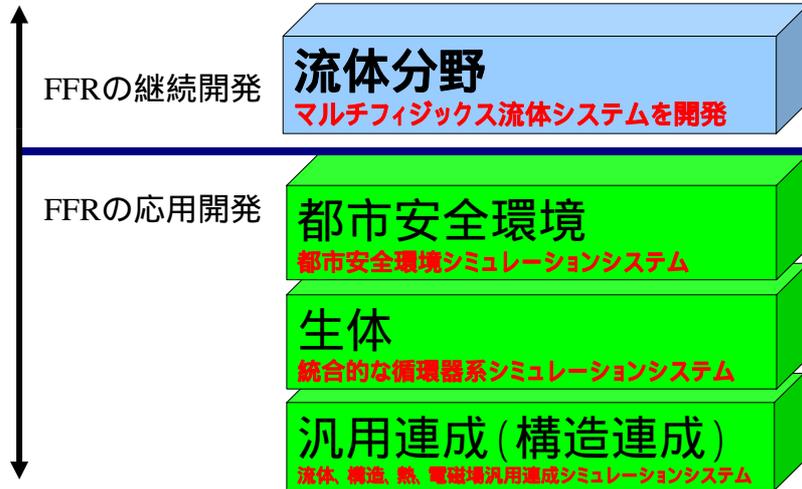


	FrontFlow/red 機能詳細	Advance/FrontFlow/red 追加機能
境界条件	流入条件/ドライバーつき流入条件/自由流出条件/大気開放条件/静圧条件/全圧条件/対称条件/輻射条件/壁面条件(スリップなし、スポルディング壁法則、スリップ)/接触界面(流体-固体、固体-固体)	スライディング条件/表面反応壁条件/接触界面(流体-流体)※
流体騒音		流体音源モデル： Lighthill-Curleモデル/Ffowcs Williams and Hawkingsモデル 任意数マイク位置/マルチフレーム、回転座標系 解析対応/音圧スペクトル解析/A修正
入出力	メッシュ： Gridgen(FV_UNIS2.4/3.0形式) 可視化： FIELDVIEW(UNIS2.4形式)/AVS/MicroAVS/Paraview	他の市販メッシュャーにも開発対応 他の市販可視化ソフトにも開発対応
高効率化	MPI並列計算/自動領域分割/ベクトル化(ES用)	
ユーザーサブルーチン	初期条件/流入境界条件/壁面条件/質量・運動量・エネルギー・化学量・任意スカラー量のソース項/結果出力	ガスフェーズ反応速度/表面反応速度/表面積分算と表面発熱モデル
その他	粒子追跡、ふく射(Flameletとの組合せ可)	構造連成系/騒音BEM連成系、キャピテーションモデル系
稼働環境	Linux/SCHRIX/AIX/HP-UX/その他大型計算機(SR)1000、地球シミュレーターなど	WindowsXP/Windows2000(並列計算には未対応)

※開発中機能

12

革新PJ FrontFlow/Redについて

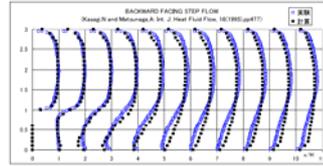
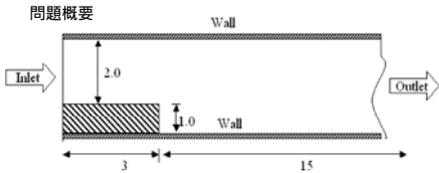


Advance/FrontFlow/red
基本検証解析例

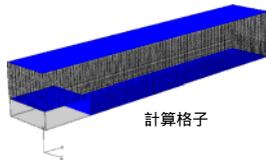
RANS基本検証:標準k-モデル

バックステップ流のRANS解析

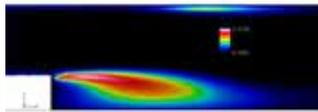
実験と他の数値解析結果



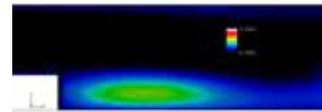
Re=5500、再付着距離: 6.51 (Kasagi, 1995)
節点34800要素30982



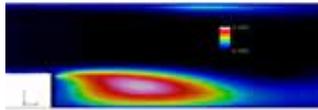
計算格子



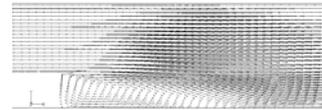
乱流エネルギーK



乱流渦粘性μt



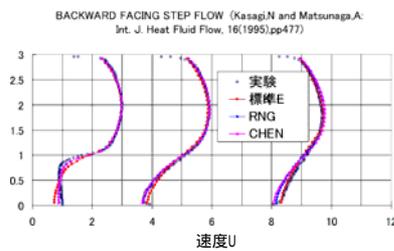
乱流散逸率ε



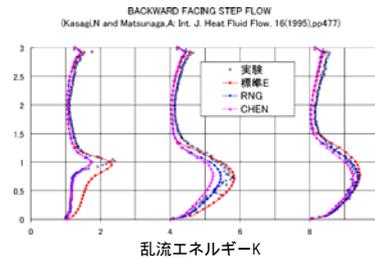
速度ベクトル

RANS基本検証:各モデル比較

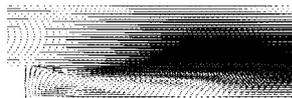
FFR実装RANSモデル(標準KEモデル、RNG-KEモデル、CHEN-KEモデル)の比較



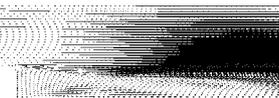
速度U



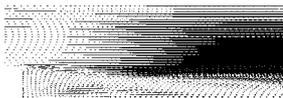
乱流エネルギーK



標準KEモデル



RNG-KEモデル



CHEN-KEモデル

LES基本検証:チャンネル乱流(Ret=180)

AdvanceSoft



解析条件

標準解析領域サイズ(各方向流れ×高さ×スパン)	6.28 × 2 × 3.14
メッシュ数	32 × 64 × 32 (64 × 128 × 64)
時間刻み	0.0005
助走時間(ステップ数)	170000
統計時間(ステップ数)	80000
速度差分スキーム	2次中心差分
乱流粘性スキーム	2次風上差分
速度時間積分	2次Adms-Bashforth法
乱流粘性 ν_t の時間積分	オイラ陰解法

LES(標準Smagorinskyモデル)による解析:メッシュサイズの影響を検討

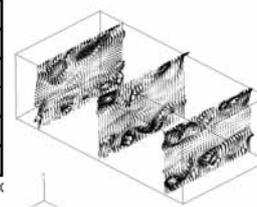
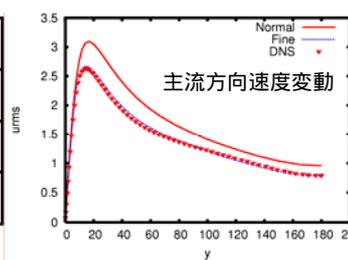
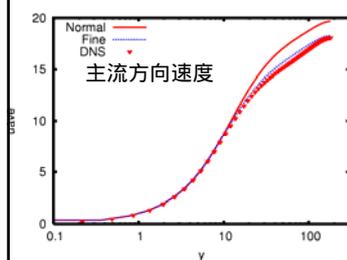
Normal: 32x64x32 Fine: 64x128x64

DNSの結果と比較

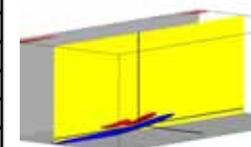
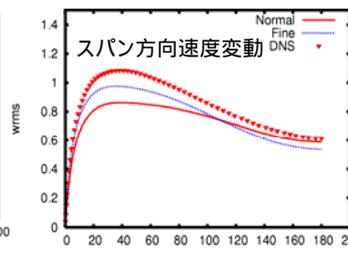
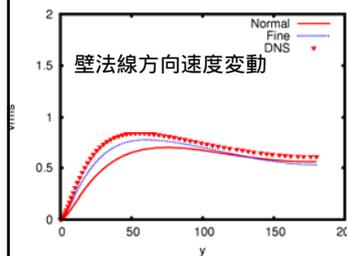
17

LES基本検証:チャンネル乱流(Ret=180)

AdvanceSoft



横断面における2次流れ



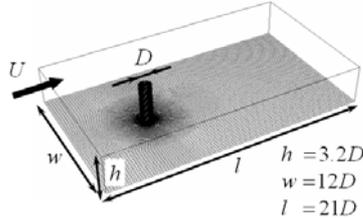
境界層乱流遷移

18

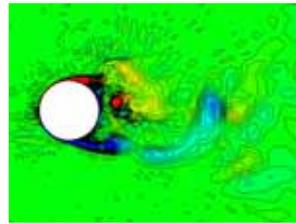
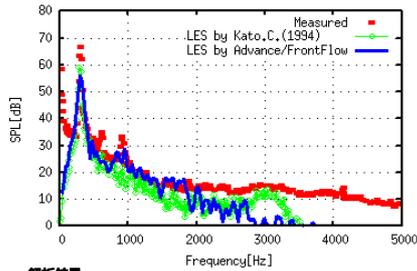
流体音解析基本検証:円柱まわり

AdvanceSoft

- 検証項目
- 1) FWH, Cuirの予測値
 - 2) 境界層乱流
 - 3) SPLのポスト処理



節点数	159,040
要素数	146,025
計算領域	21D × 12D × 3.2D
壁面近傍格子幅	0.005D
スパン方向分割	15層



解析結果
 総解析時間 : 3.5E+02 [s] (70,000ステップ)
 最大Courant数(瞬時値) : 0.2720

計算機表
 ハードOS : IA32 PC (Linux)
 CPU数 : 1 (Pentium4 2.4GHz)
 計算時間 : 70,000ステップで 約162h

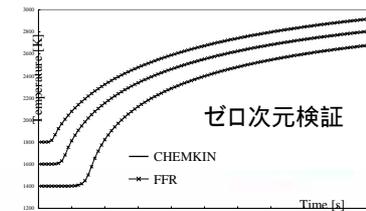
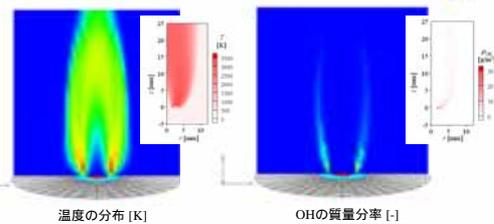
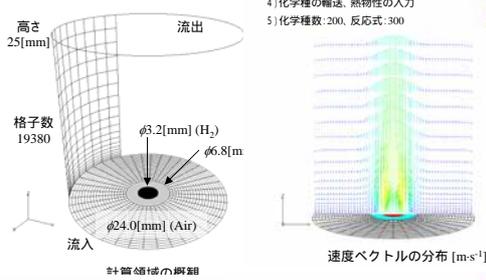
素反応モデル基本検証:水素バーナー

AdvanceSoft

- 検証項目
- 1) 層流、複雑反応系の設定
 - 2) 反応ルーチン、詳細反応
 - 3) エンタルピー、比熱比のA7式
 - 4) 化学種の輸送、熱物性の入力
 - 5) 化学種数: 200、反応式: 300

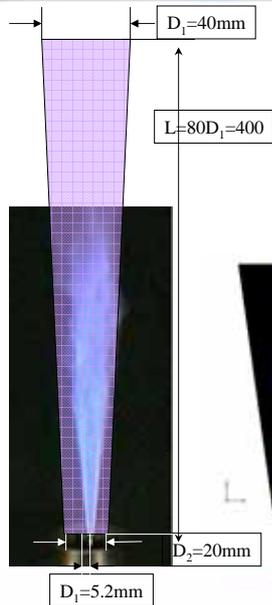
21個素反応式、9個化学種、逆反応、第3体参加

R#	Reaction	$\Delta_r H^\circ$	ν_p	E_a
1	H+O ₂ ↔ OH+O	2.00×10 ⁴	0.0	70.30
2	H ₂ +O ↔ OH+H	1.80×10 ⁵	1.0	36.93
3	H ₂ +O ↔ OH+OH	5.90×10 ⁴	1.3	71.25
4	H ₂ +OH ↔ H ₂ O+H	1.17×10 ⁴	1.3	15.17
5	H+O ₂ +M ↔ HO ₂ +M	2.30×10 ⁴	-0.8	0.00
6	H+HO ₂ ↔ OH+OH	1.50×10 ⁴	0.0	4.20
7	H+HO ₂ ↔ H ₂ +O ₂	2.50×10 ⁴	0.0	2.93
8	OH+HO ₂ ↔ H ₂ O+O ₂	2.00×10 ⁴	0.0	4.18
9	H+H+M ↔ H ₂ +M	1.80×10 ⁵	-1.0	0.00
10	H+OH+M ↔ H ₂ O+M	2.20×10 ⁵	-2.0	0.00
11	HO ₂ +HO ₂ ↔ H ₂ O ₂ +O ₂	2.00×10 ⁴	0.0	0.00
12	H ₂ O ₂ +M ↔ OH+OH+M	1.30×10 ⁵	0.0	190.38
13	H ₂ O ₂ +OH ↔ H ₂ O+HO ₂	1.00×10 ⁵	0.0	7.53
14	O+HO ₂ ↔ OH+O ₂	2.00×10 ⁵	0.0	0.00
15	H+HO ₂ ↔ O+H ₂ O	5.00×10 ⁵	0.0	5.90
16	H+O+M ↔ OH+M	6.20×10 ⁴	-0.6	0.00
17	O+O+M ↔ O ₂ +M	6.17×10 ⁵	-0.5	0.00
18	H ₂ O ₂ +H ↔ H ₂ O+OH	1.00×10 ⁵	0.0	15.02
19	H ₂ O ₂ +H ↔ HO ₂ +H ₂	4.79×10 ⁵	0.0	33.26
20	O+OH+M ↔ HO ₂ +M	1.00×10 ⁶	0.0	0.00
21	H ₂ +O ₂ ↔ OH+OH	1.70×10 ⁵	0.0	200.00



総括反応モデル:拡散バーナー

AdvanceSoft

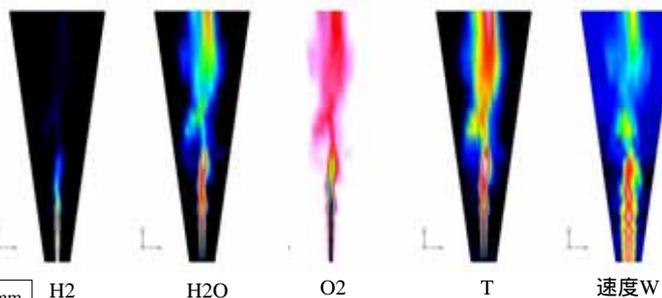


Fuel	H ₂ :N ₂ =50:50 (vol.)
co-flow	Air
Diameter of fuel nozzle	8mm
Bulk velocity at fuel nozzle	34.5m/s
co-flow velocity	0.2m/s
Reynolds number	10000

Hydrogen Jet flame
M. M. Tacke⁵, H3
Flame Database (1998)

節点: 62160

要素: 59826



21

総括反応モデル:拡散バーナー

AdvanceSoft

NASA熱物性値の計算: 7係数多項式

(NASA Polynomial, Gordon and McBride 1976)

NASAのwebサイト: <http://cea.grc.nasa.gov/>

定圧比熱

$$\frac{C_{pk}^0}{R} = a_{1k} + a_{2k}T + a_{3k}T^2 + a_{4k}T^3 + a_{5k}T^4$$

エンタルピー

$$\frac{H_k^0}{RT} = a_{1k} + \frac{a_{2k}T}{2} + \frac{a_{3k}T^2}{3} + \frac{a_{4k}T^3}{4} + \frac{a_{5k}T^4}{5} + \frac{a_{6k}}{T}$$

エントロピー

$$\frac{S_k^0}{R} = a_{1k} \ln T + a_{2k}T + \frac{a_{3k}T^2}{2} + \frac{a_{4k}T^3}{3} + \frac{a_{5k}T^4}{4} + a_{7k}$$

標準ギブス自由エネルギー

$$\frac{G_k^0}{RT} = \frac{H_k^0}{RT} + \frac{S_k^0}{R} = a_{1k}(1 - \ln T) - \frac{a_{2k}}{2}T - \frac{a_{3k}}{6}T^2 - \frac{a_{4k}}{12}T^3 - \frac{a_{5k}}{20}T^4 + \frac{a_{6k}}{T} - a_{7k}$$

表 Thermal.datの構造(NASA熱物性ファイルフォーマットの利用)

H	L 6/94H 1 0 0 0G 200.000 6000.000 1000. 1
	0.25000000E+01 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 2
	0.25473660E+05 -0.44668285E+00 0.25000000E+01 0.00000000E+00 0.00000000E+00 3
	0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.25473660E+05 -0.44668285E+00 0.26219035E+05 4

22

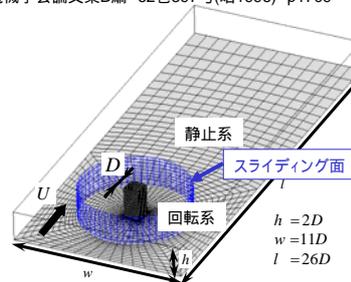
スライディング機能:回転角柱

AdvanceSoft

□ 回転角柱同期周波数騒音

黒田 5、日本機械学会論文集B編 62巻597号(昭1996) p1709

解析パターン	回転数 n rps (rpm)	スピンパラメータs
(a)	0.0	0.0
(d)	2.93 (175.8 rpm)	0.161
(e)	3.68 (220.8 rpm)	0.202
(f)	4.50 (270.0 rpm)	0.247
(g)	6.22 (373.2 rpm)	0.341



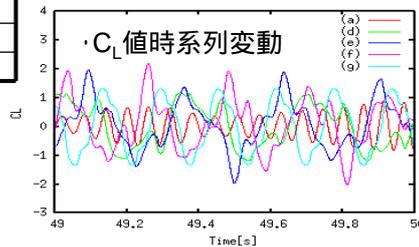
節点数	25,919
要素数	22,260
計算領域	26D × 11D × 2D
壁面近傍格子幅	0.02D
スパン方向分割	10層

解析条件

対流項離散スキーム : 2次精度中心差分
 時間積分法 : Euler陰解法
 渦粘性 : 標準Smagorinskyモデル
 時間刻み(t) : 1.0E-03(固定)
 流入条件 : 流量規定、一様流入
 Re数 : 7,100

解析結果

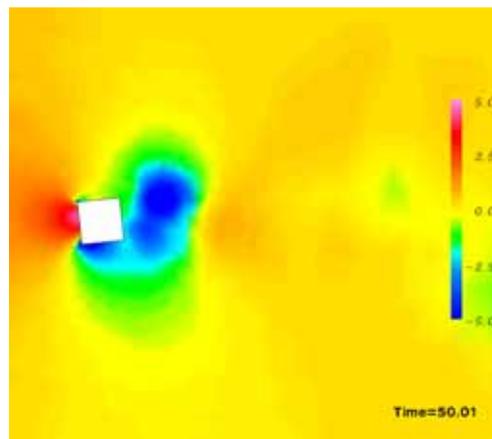
総解析時間 : 5.0E+01 [s] (50,000ステップ)
 146 - 311回転に相当
 最大Courant数(瞬時値) : 5.312



23

スライディング機能:回転角柱

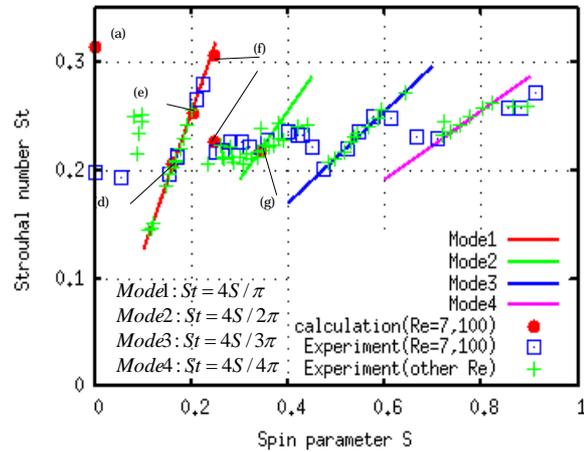
AdvanceSoft



相対圧力の時間変動

24

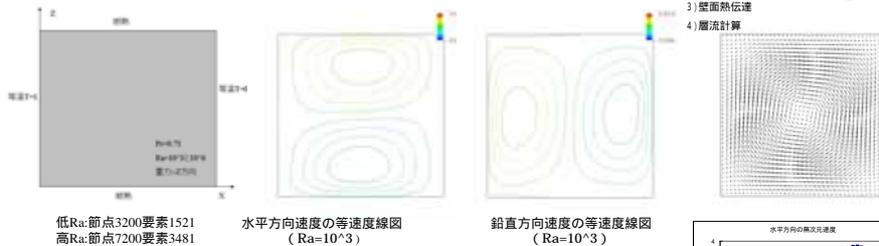
スライディング機能:回転角柱



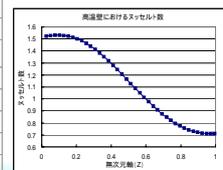
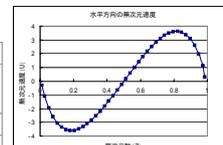
$St = 4S/\pi$ (Mode 1)
 $St = 4S/2\pi$ (Mode 2)
 $St = 4S/3\pi$ (Mode 3)
 $St = 4S/4\pi$ (Mode 4)

$S = \frac{nD^* \pi}{U}$ $St = 4 \cdot S / (k\pi) \quad (k = 1, 2, 3, 4)$
 $St = \frac{D^* f}{U}$

熱連成基本検証:自然対流(キャビティ)



解析結果					
		レイリー数Ra=10 ³	文献1)	レイリー数Ra=10 ⁶	文献1)
水平方向の速度最大値と位置 (鉛直中央断面X=0.5)	Umax	3.641	3.649	67.68	64.63
	Zmax	0.8205	0.813	0.8644	0.850
鉛直方向の速度最大値と位置 (水平中央断面Z=0.5)	Wmax	3.693	3.697	222.17	219.36
	Xmax	0.1794	0.178	0.0338	0.0379
最大ヌセルト数と位置	Numax	1.531	1.505	18.733	17.925
	Zmax=	0.1025	0.092	0.0339	0.0378
最小ヌセルト数と位置	Numin=	0.711	0.692	1.214	0.989
	Zmin=	1.0	1.0	0.983	1.0
高温壁の平均ヌセルト数	1.1372	1.118	9.14	8.8



26
高温壁における局所ヌセルト数 (Ra=10³)

熱連成の基本検証:固体流体間の伝熱

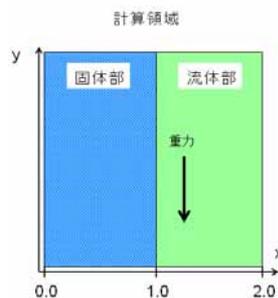
AdvanceSoft

FrontFlow/Redを用いて固体の熱伝導を考慮した自然対流の計算を行う。固体の温度変化と流体の伝熱流動を同時に解析することは、実用計算ではしばしば必要となると考えられる。この比較的簡単な系において、FrontFlow/Redの熱連成機能のテストを行い、理論解と結果を比較した。

計算領域は図1に示したように2次元であるが、この問題の解はx方向の依存性のみをもつ1次元問題である。左端と右端の温度をそれぞれT1、T2に固定する。流体部の伝熱流動と固体部の熱伝導を連成させて計算する。

計算条件:

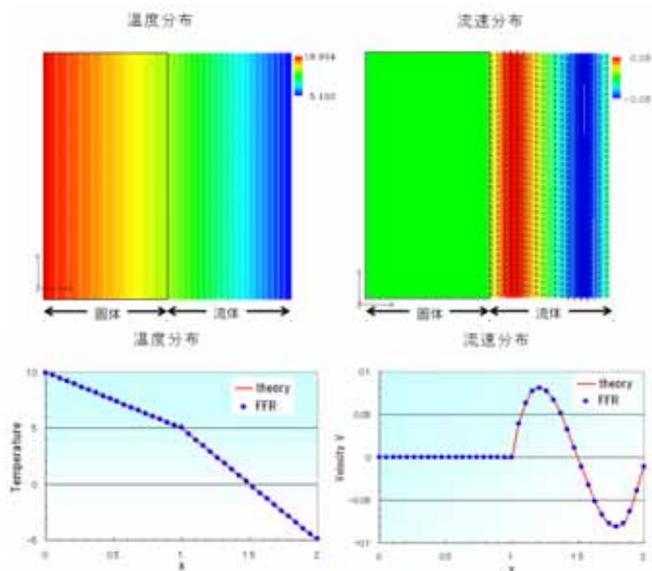
- | | |
|-----------------|-------------------|
| (1) 物性値 | (4) 外力 |
| 熱伝導率 固体0.02 | 重力加速度 -10 |
| 流体0.01 | (5) 計算格子 |
| 体膨張率 0.001 | ヘキサメッシュ (約5000節点) |
| (2) 初期条件 | |
| 流速 $u=0, v=0$ | |
| 温度 固体部10, 流体部-5 | |
| 圧力 0 | |
| (3) 境界条件 | |
| 固体部左端 温度固定10 | |
| 流体部右端 流速 ノースリップ | |
| 温度固定 -5 | |
| 固体流体間 流速 ノースリップ | |
| y方向は周期境界条件とする。 | |



27

熱連成の基本検証:固体流体間の伝熱

AdvanceSoft



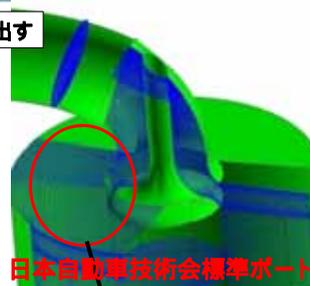
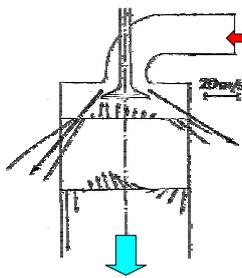
28

Advance/FrontFlow/red 実用問題解析例

Formula Nippon

エンジンポートの非定常解析(ドライバー有り)

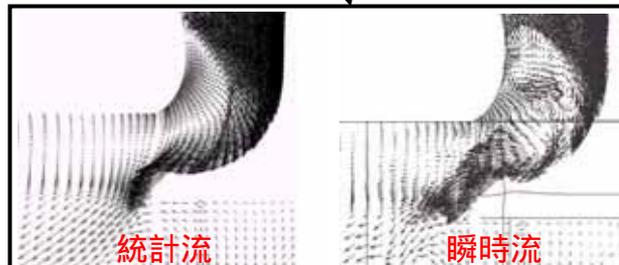
ドライバー: 周期条件の円管は十分発達した乱流を作り出す



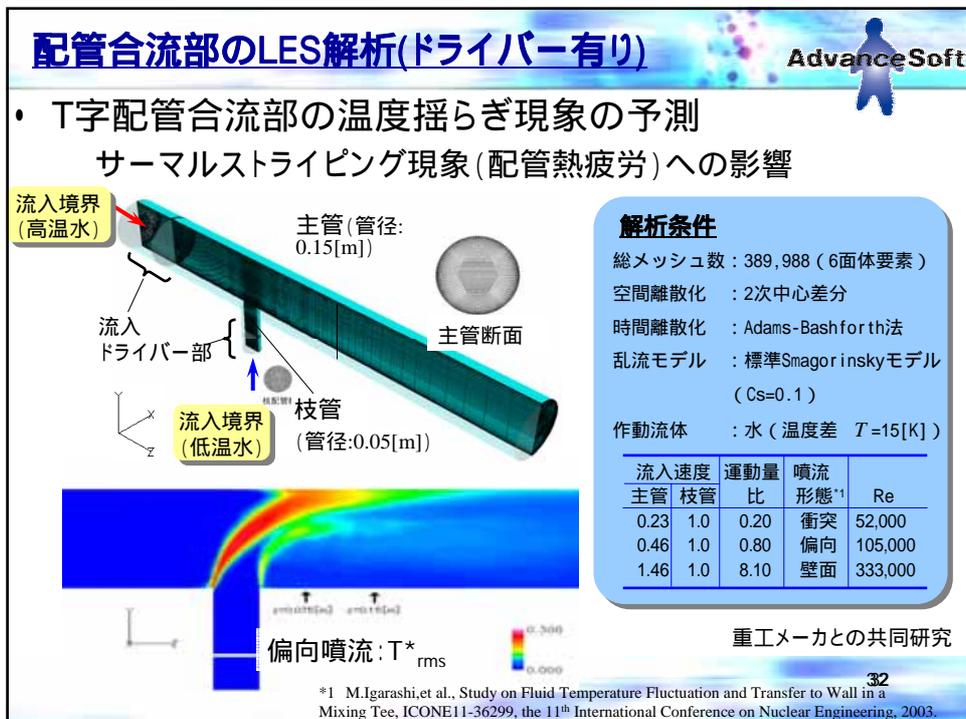
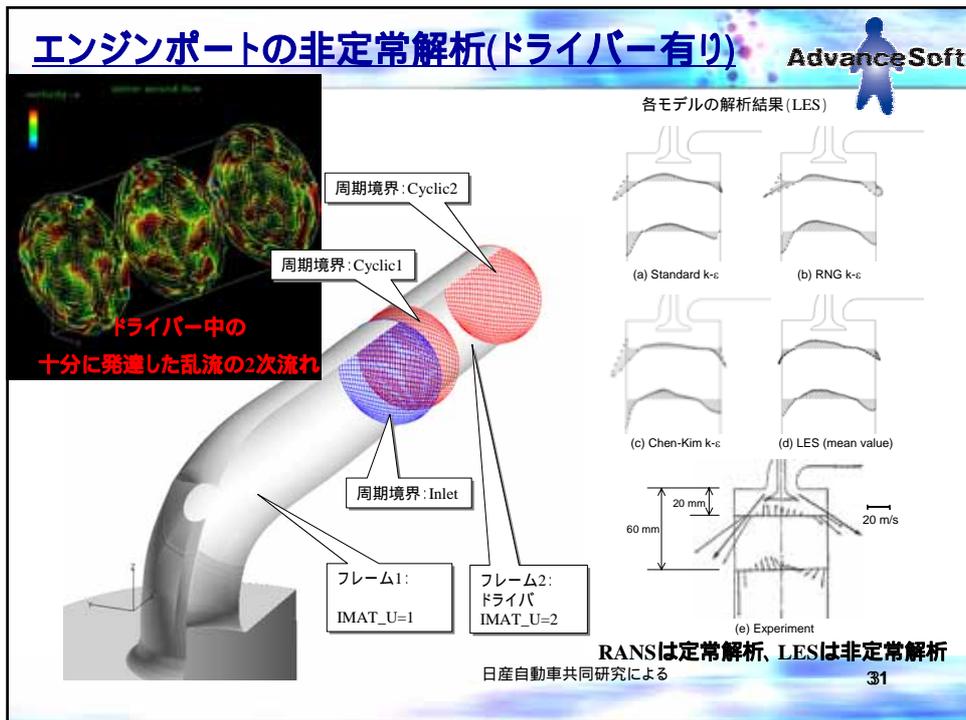
日本自動車技術会標準ポート

計算条件:

- 1) $Re=78,000$;
- 3) Flow flux: $Q=25.4g/s$
- 4) Grid number: 900,000
- 5) Time step interval: 0.0005
- 6) 統計時間: 20,000step



日産自動車共同研究による

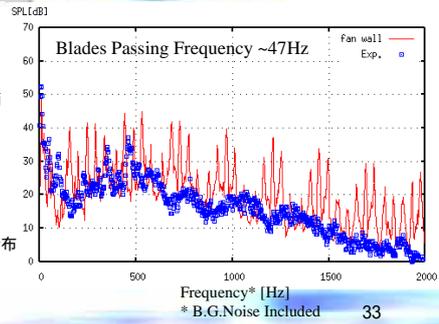
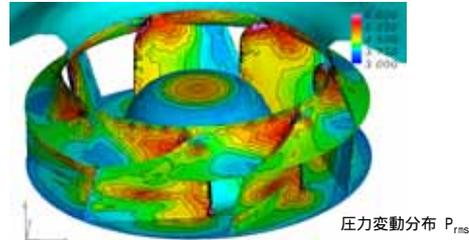
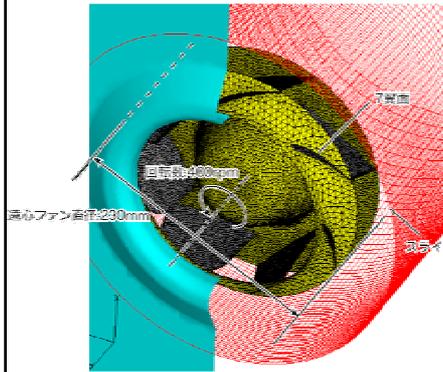


回転機械における流体音解析

東プレ(株)様との共同研究による

AdvanceSoft

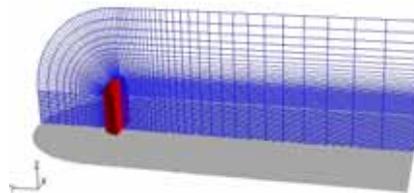
圧力脈動に起因するファン騒音の予測
非定常流体力解析
BPF圧力変動、翼列干渉音、乱流音



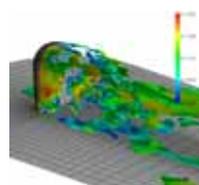
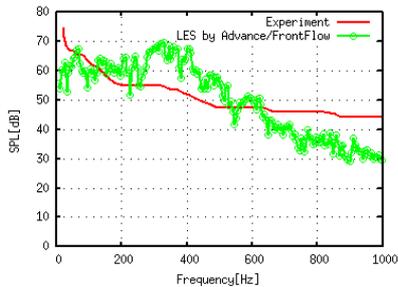
流体音解析:自動車ドアミラー

AdvanceSoft

解析条件
計算領域: 10.5D × 5D × 3.5D
Re数: 7.4E+05
乱流モデル: 標準Smagorinskyモデル
計算格子
節点数: 202,050 / 要素数: 191,520
壁面近傍格子幅: 0.03D

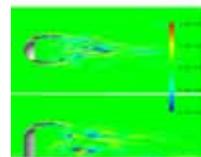


音圧スペクトル



Helicity密度等値面

$$H' = (\nabla \times \vec{u}) \cdot \frac{\vec{u}}{|\vec{u}|}$$



Power II 音源項の強度

Siebert *et al.*, 5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Seattle WA, May 10-12, AIAA paper, 99, 1895 (1999)