

# あるポンプ設計者のCFD利用

大淵 真志  
(株)荏原製作所

2014年3月29日 オープンCAE初心者勉強会

# 本日の内容

1. 自己紹介
2. CFDの歴史
3. これまで利用してきた商用CFDソフト
4. ポンプ設計現場におけるCFD利用の実際
5. 設計者がCFDを使うメリット

# 1. 自己紹介

氏名： 大淵 真志  
1964年4月 群馬県  
1989年3月 電気通信大学大学院 機械工学専攻修了  
1989年4月 (株)荏原製作所 入社  
現在 藤沢工場 水中ポンプ開発設計室勤務

CFDとの出会い 修士論文での解析 (円管内熱対流のDNS)  
航空宇宙技術研究所 山本稀義先生に師事

## 職 歴

89年4月～97年8月 研究開発部門で流体力学、CFD関連の研究開発  
97年9月～02年3月 情報部門で技術系ソフトウェア開発(非CFD)  
02年4月～09年3月 開発部門で解析専従  
09年4月～ ポンプ設計部門で設計担当(CFD利用推進)  
(現在は80%以上が設計業務)



研究から  
エンドユーザへ

市販CFD使用歴 STREAM('89-'94)、StarCD('94-'02)、  
Fluent('02-'09)、CFX('10-)

OpenFOAM利用歴 version1.3以降、主に趣味から徐々に業務に取り入れ中

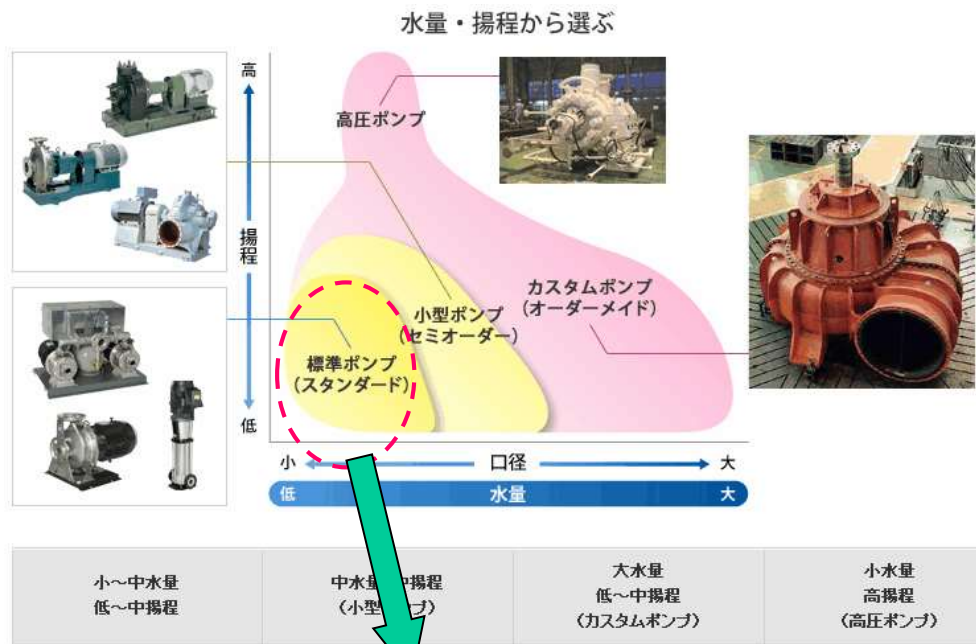
# 株式会社 荏原製作所

創業：大正元年  
資本金：686億

従業員数：4109人(15170人)  
売上：1768億円(4263億円)



風水力機械カンパニー (風水力事業)	環境事業カンパニー (環境事業)	精密・電子事業カンパニー (精密・電子事業)
<p>風水力機械カンパニーは、3事業の中で最も古い歴史と伝統を持ち、その技術力は世界でもトップレベルにあります。</p> <p>創業以来の主力製品であるポンプをはじめ、風水力機械製品・システムを事業の中核とし、優れた技術と豊富な経験をもとに、顧客・社会のニーズに応えています。</p> <p>常に新たな創造と技術革新に挑戦するとともに、グローバルに事業を展開し、幅広い地域で活躍しています。</p> <p><b>主要品目</b> ポンプ、コンプレッサ・タービン、送風機、冷凍機、冷却機、エネルギー関連装置、風力ケーブル・システムソリューション</p>	<p>環境事業カンパニーは21世紀における人類共通の最重要課題である「持続可能な社会の構築」に貢献することを事業理念に掲げ、環境・エネルギー関連のインフラ施設に関わるEPCとO&amp;M(Engineering・設計、Procurement・調達、Construction・建設、Operation・運営、Maintenance・維持管理)事業を展開しています。</p> <p><b>主要品目</b> 都市ごみ焼却プラント、産業廃棄物焼却プラント、エネルギー関連プラント、水処理施設、各種プラント及び施設、工業薬品</p>	<p>精密・電子事業カンパニーでは、本格的なナノテクノロジー時代の到来を見据え、顧客ニーズに対応した各種コンポーネント装置、半導体製造装置を開発・製造・販売しています。主力製品のドライ真空ポンプやCMP装置をグローバル市場に提供し、さらに、次世代のノードに対応する、めっき装置、ポンプめっき装置、ペナル研磨装置、電子ビーム欠陥検査装置といった各種装置を市場投入しています。</p> <p><b>主要品目</b> 真空ポンプ、CMP装置、各種めっき装置、半導体産業用各種装置・施設等</p>



## 水中ポンプ (モータ付、没水させて使用)



## 藤沢工場



所在地：神奈川県藤沢市本藤沢4-2-1

藤沢事業所内に位置する藤沢工場は、汎用ポンプ、冷凍機の量産工場として1965年(昭和40年)に建設された大規模複合工場です。新システムにより、150機種・8000種類もおよび製品の即納品体制が確立され、多機種・少量生産が可能になりました。

# 航空宇宙技術研究所(三鷹市)

## 数値風洞(NS I)1987年導入

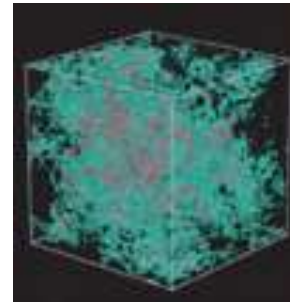
フロントエンド: 富士通M780 100MIPS 256MB

バックエンド: { 富士通VP400 1GFlops 1GB  
富士通VP200 500MFlops

端末: Green Display端末多数、Graphics端末少数

当時の計算内容:

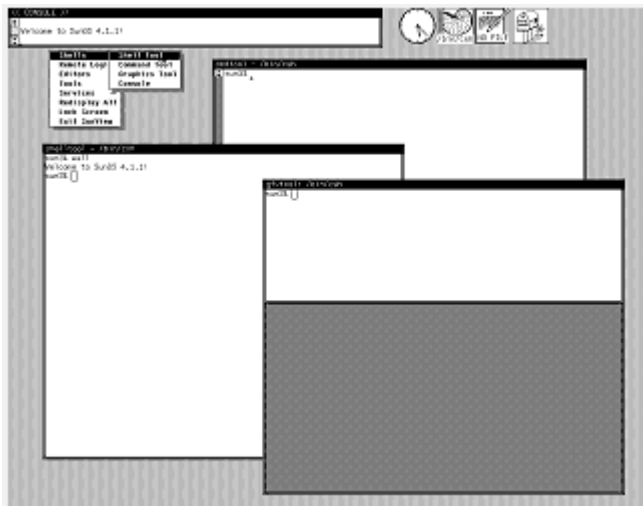
オイラー方程式、薄層近似NS方程式による航空機全機周り流れ  
3次元等方性乱流DNS(128x128x128)



# 入社当時(平成元年)の会社の計算機環境

## 部門の主力マシン

Sun Microsystems Sun4/260  
32MB、8MIPS、1.6MFlops



Window System - Sun View

PCはMacとPC98

## 当時のアプリケーション

ソフトウェアクレイドル STREAM

～数千セル(直交格子)

非圧縮定常解析、 $k-\varepsilon$ モデル

計算時間: 数日～1週間

メッシュは、方眼紙を使った手切り

物体形状は階段状近似+ポロシティ  
(開口率、占有率)で考慮

# 2. CFDの歴史

1960                      70                      80                      90                      2000                      10

22 Richardson

28 CFL

53 川口

**ロスアラモス研究所**

57 PIC	65 MAC	70 SMAC	72 SOLA	80 SALE
			75 VOF	

軍事、原子力、航空宇宙での国家的利用(60~)

80 Steger(BFC)    **NASA など航空宇宙分野の圧縮性CFD**  
83 Harten (TVD)

航空宇宙分野での産業利用(80~)

71 SIMPLE                      84 SIMPLER/SIMPLEC    **インペリアル・カレッジ**  
74 k-ε model                      86 PISO

自動車分野での利用(85~)

製造業全般での利用(90~)

81 PHOENICS                      83 FLUENT    91 Star-CD                      02 CFX    04 OpenFOAM  
84 Stream                      97 TASCFlow

55 Eniac

76 Cray1

87 VP400

02 地球シミュレータ

12 京コンピュータ

82 Cray X-MP





# コンピュータ以前のCFD研究



ルイス・フライ・リチャードソン

[http://ja.wikipedia.org/wiki/  
ルイス・フライ・リチャードソン](http://ja.wikipedia.org/wiki/ルイス・フライ・リチャードソン)



<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-2.html>

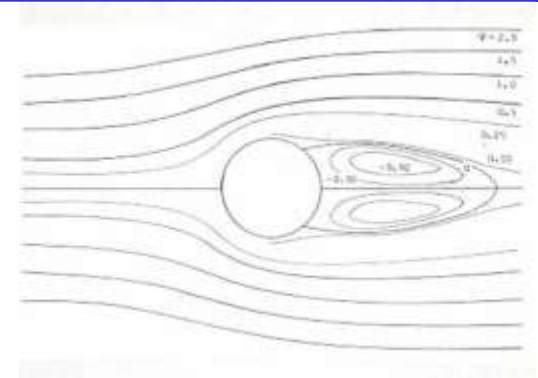
「リチャードソンの夢」 1922年

64,000人の計算者を巨大なホールに集めて  
指揮者の元で整然と計算を行えば実際の天  
候の変化と同じくらいの速さで予報が行える

CFL(Courant, Friedrich and Levy)条件(1928)

微分方程式の数値解法の安定性に関する  
歴史的論文。

Courant, R.; Friedrichs, K.; Lewy, H. (1928), "Über die  
partiellen Differenzengleichungen der mathematischen  
Physik", *Mathematische Annalen*



Kawaguti, M. : *J. Phys. Soc. Jpn.* 8 (1953), 747.

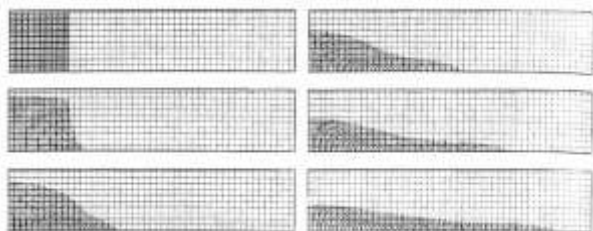
川口光年氏が、1953年にタイガー手回し  
計算機を使って毎週20時間、約1年半の  
時間を費やして求めた数値解



## 米国Los Alamos研究所によるCFD研究

計算機が開発された当初から80年代初頭にかけては、軍事、航空宇宙、原子力といった国家プロジェクトにおいてCFDが研究された。米国Los Alamos研究所が現在に通じる様々な技術の開発を行い研究を牽引していた。

### MAC(Marker and Cell)法



Harlow and Welch(1965) , Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface. Physics of Fluid Vol.8, No.12, p.2182

### SOLA-VOF

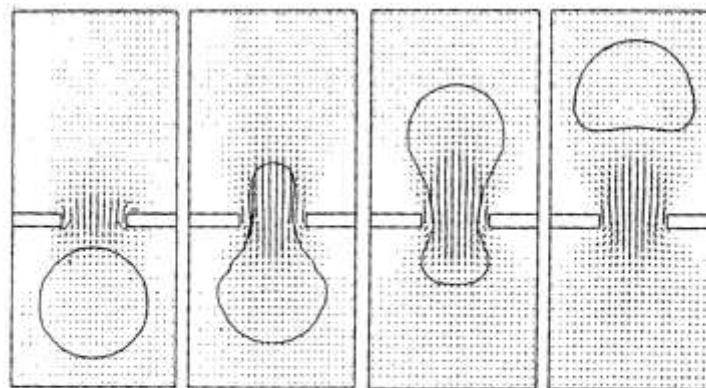


Fig. B-7.

Computational results showing deformation of an oil drop in water passing through a hole in a rigid plate. Times shown in units of  $2R/V_0$  are 0.0, 0.125, 0.5, and 0.875.

Nichols, Hirt and Hotchkiss (1980) LA-8355 SOLA-VOF: A Solution Algorithm for Fluid Flow with Multiple Free Boundaries

## NASAおよび航空宇宙産業を中心としたCFD研究

計算機の普及が、国研から大学一流企業などに進んでいった80年代  
まず航空宇宙産業でCFDが利用され始めた。

NASAを中心に圧縮性流れ解析技術の研究開発が活発に実施された。  
境界適合座標系の採用で、初期から複雑形状への対応が進み、航空機  
開発に大きく寄与した。

圧縮性流れでは衝撃波の捕獲が大きな問題であり、TVDやENOなどスキ  
ーム開発が活発に行われた。

N-S式の解法については、Beam-Warmingの近似因子分解法の様な効率  
の良い定常解法が開発された。

日本でも、航空宇宙技術研究所や宇宙科学研究所や重工各社はソルバ  
開発を積極的に実施していた。

## 英国Imperial College B.Spalding教授のグループ による実用的なCFD手法の開発

現在産業界で利用されている市販CFDコードは殆どが、Imperial CollegeのSpalding教授のグループが開発したSIMPLE法の派生技術を利用している。

Spalding教授のグループは、SIMPLE,SIMPLER,SIMPLEC,PISOなどのアルゴリズム開発、 $k-\epsilon$ 乱流モデルの開発など今日の実用的CFD技術の多くに寄与している。

英国Imperial Collegeは1970年代から精力的に研究開発を続けているCFDの研究センターである。Spalding教授はCHAM社を起業し、世界発の商用CFDソフトウェアPHENICSを販売した(1983年)、また同僚のGosman教授はCD社を起業し、StarCDを販売した(1990頃)。また、OpenFOAMもGosman研究室の研究員だったHenry Weller氏らにより開発されている。



ブライアン・スポルディング教授

<http://www.cham.co.uk/about.php>



<http://www.cham.co.uk>

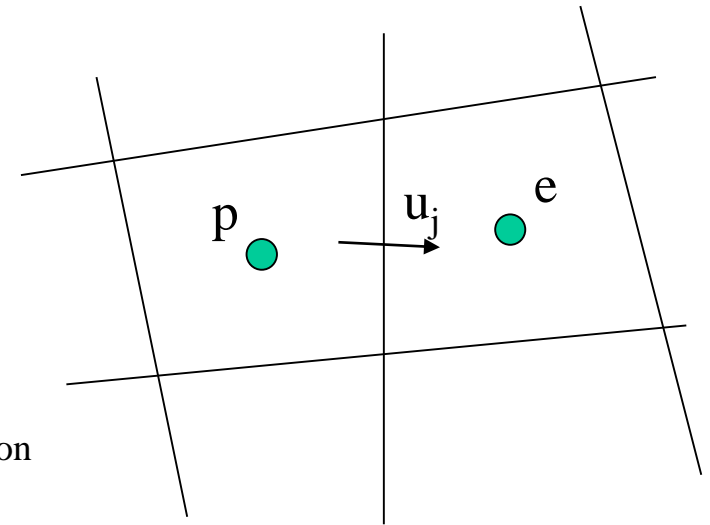
# Rhie-Chow補間と非構造格子ソルバの普及

圧縮性流れが複雑形状問題で大成功を収めている中で、非圧縮流れでは90年代になるまで、複雑形状を扱う手法の定番が定まらなかった。

これは、圧力と速度を同一点に配置した場合にChecker-board Errorを回避する良い方法がなかったためである。

この難問は、Rhie-Chow補間法(1983)というアイデアの普及で一気に解決した。若干の数値粘性の増加と引き換えに、メモリ効率の良いコロケート格子が利用できる様になり、非構造格子ソルバの普及へ繋がるきっかけを与えた。

$$u_j = \bar{u}_j - \Delta \left( \frac{1}{A_p^{u_j}} \right) \left( \frac{\partial p}{\partial x_j} - \overline{\left( \frac{\partial p}{\partial x_j} \right)} \right)$$



C. M. Rhie and W. L. Chow(1983),  
Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation  
AIAA Journal, Vol. 21, No. 11, pp.1525-1532

### 3. これまで利用してきた商用CFDソフト

#### ・ソフトウェアクレイドル社 STREAM(1989～)

国産CFDソフトウェア

直交格子、ポロシティによる複雑形状表現

自由表面、熱連成、輻射、化学反応

Fortranソースコードで配布、ユーザがビルドして利用(守秘契約の上)

貧弱な計算機でも使い易かった。

様々な問題を工夫しながら扱った。

方眼紙でメッシュを切り、結果は線画のグラフィック。

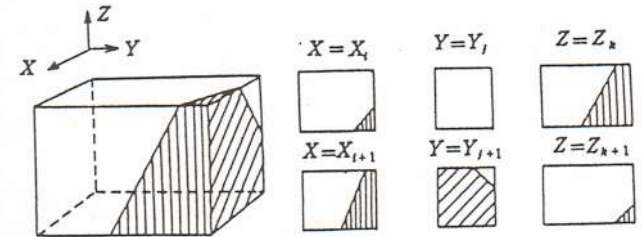
印刷は当時高価なポストスクリプトプリンタ、のちに昇華型カラープリンタが入ったが、印刷コストが高くてあまり使わなかった。

※年数は、私が利用した期間を示し、当社全体での利用実績ではない

# STREAMによる吸込み水槽の流れ解析

開口率、占有率(ポロシティ)を指定することで複雑形状を模擬できた。

数千~数万メッシュで数日~数週間も計算時間がかかった。  
特に温度場を扱う際に計算負荷が高かった。  
吸込み水槽の解析では、実験と比較して渦発生が良好に一致した。



附図 1 流体要素の開口率と占有率

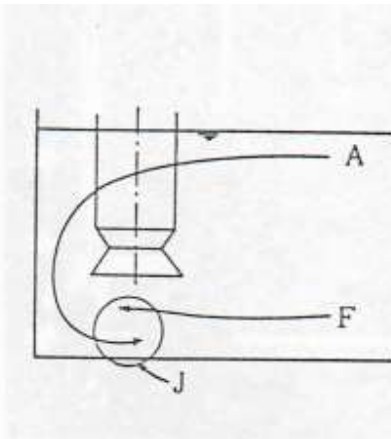
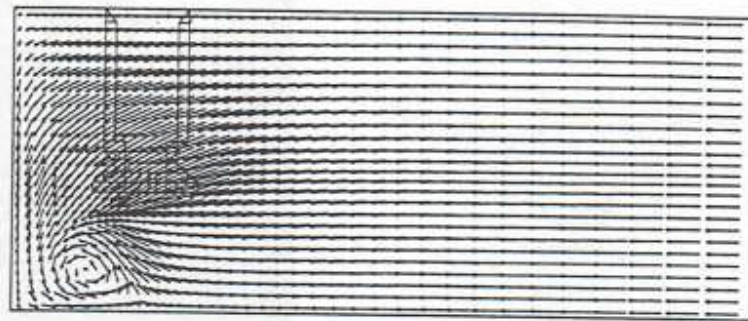


図 6.2  $\Gamma_1$ の発生原因



b1 - b1 断面の流れ

図 6.3  $\Gamma_1$ の発生状態 (計算による)

( $B/D=2.8$ ,  $R/D=1.3$ ,  $Z/D=1.1$ )

## ▪ Creare社 Fluent (1993～1996、2002～)

汎用CFDソフトウェア

流体コンサルタント(株)経由で入手

高機能、圧縮、非圧縮、2次元、3次元ごとに別ソルバ  
境界適合格子対応だったが、**メッシュ品質にうるさかった。**

結局、複雑形状が扱いにくく数年で契約停止した。

**2002年に再契約。**見違える程改善されていた。

混相流、燃焼モデル、ダイナミックメッシュなど**複雑な問題への適用性が優れていた。**2006年アンシス社に買収された。

## ▪ CD社StarCD (1994～2008)

汎用CFDソフトウェア

**最初の汎用非構造格子ソルバ**

とにかくソルバの**ロバスト性が抜群**だった。プリポスの**ProStar**も秀逸。

メッシュ生成は大変だったが、マクロを作成して使いまわすことで生産性を向上させることができた。最初から非常に優れたソルバだったが、バージョンアップが殆どなく、次第にFluentなどに機能で差をつけられた。



# StarCDによる非定常解析とポンプ内圧力変動の比較

1994~6年に実施。メッシュ数8万~20万要素。  
 トポロジー変化によるスライディングメッシュ解析。  
**1 運転条件に数週間の計算時間を要した。**  
**粗い計算だが、圧力波形は驚くほど一致した。**  
 計算ロバスト性に優れ、Pre/Post環境も優れていた。

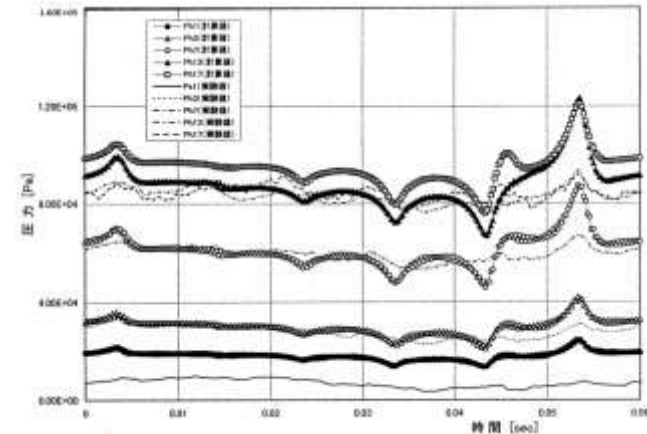
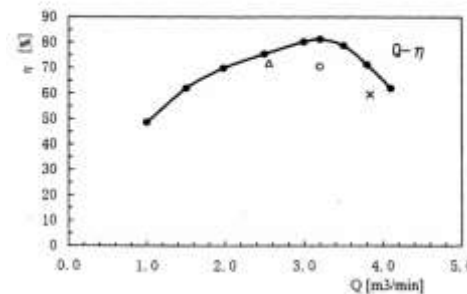
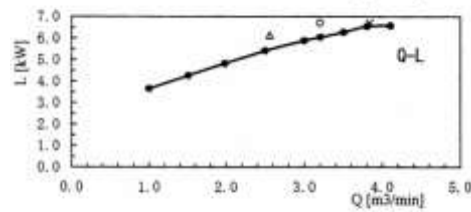
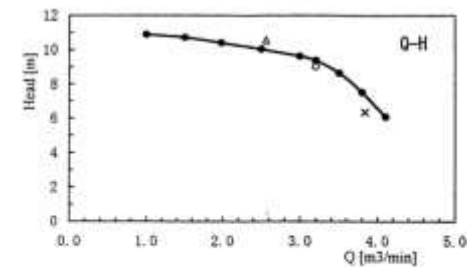
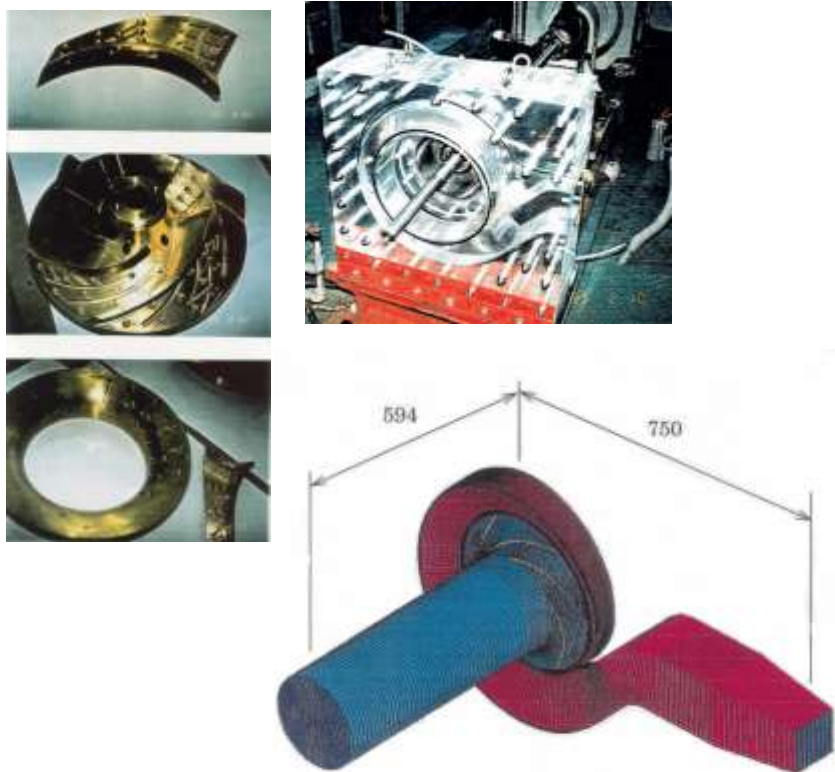


図4 7. (x) 設計流量における非定常圧力変動比較

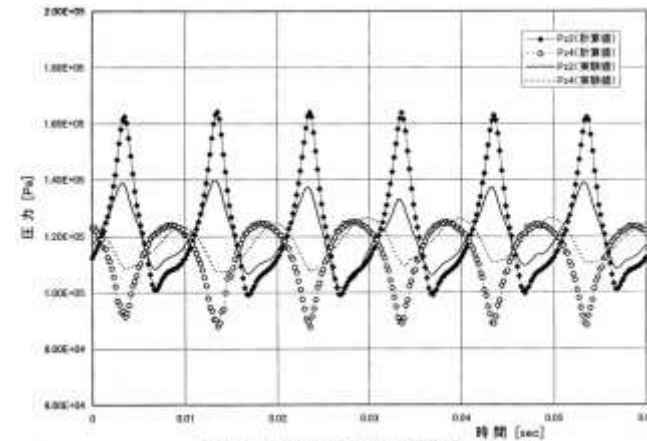


図5 7. (x) 設計流量における非定常圧力変動比較

## ・ANSYS社 CFX(2010～)

汎用CFDソフトウェア。

前身は、UKAEAのTASCFlow(有限要素法のブロック構造格子ソルバ)。

CFXはTASCFlowの非構造格子版。

有限要素ベースの有限体積法ソルバという手法のためか、**ロバスト性は抜群**。

品質の悪いメッシュでも計算できる。

**coupled solver**による非圧縮流れの収束が極めて速い。

**ターボ機械専用のメッシュ生成ツール**や**後処理機能**を豊富に備えている。

このため、ターボ機械業界でのシェアが高く普及している。

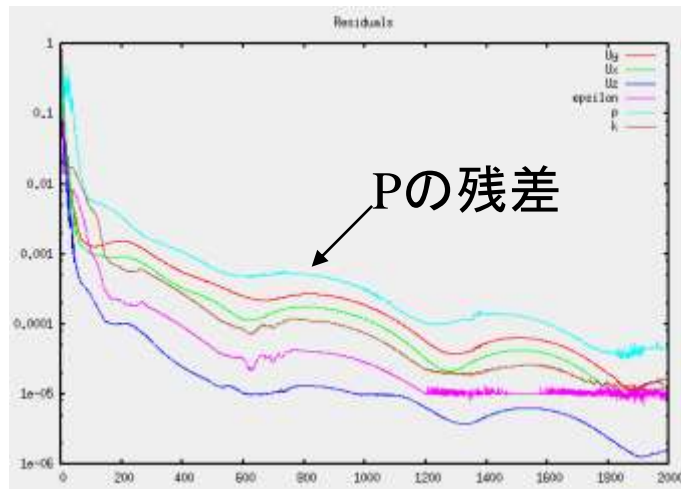
大変使いやすく、CFDに詳しくない設計者でも難なく利用できる。

この操作性をオープンソースで完全に置き換えるのは極めて難しい。

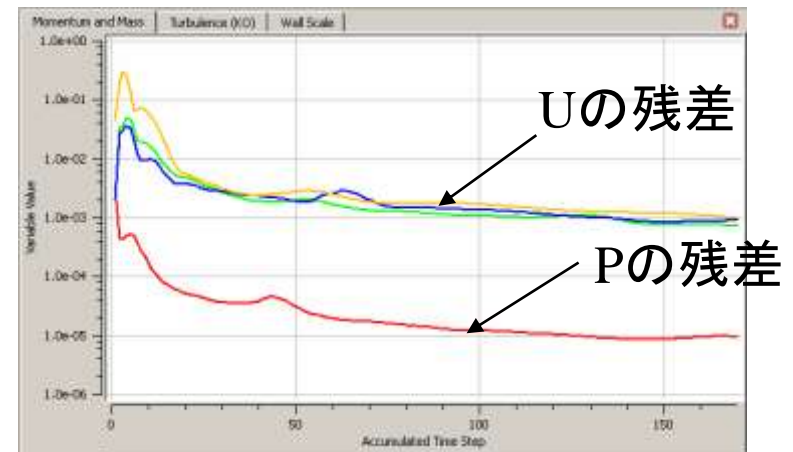
# Coupled Solverについて

速度、圧力を1つの連立方程式に連成させて解く非圧縮流れ計算手法。  
連続の式を満たした状態で反復計算を行うため、一般的なSIMPLE法等  
と比べて圧力の残差が小さく、収束も格段に速い。

$$\begin{bmatrix} [A_u] & [\nabla(\cdot)] \\ [\nabla \cdot (\cdot)] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$



simpleFoam



CFX

## 4. ポンプ設計現場におけるCFD利用の実際

設計の流れとCFD

子午面形状の定義が重要

逆解法による翼角分布設計

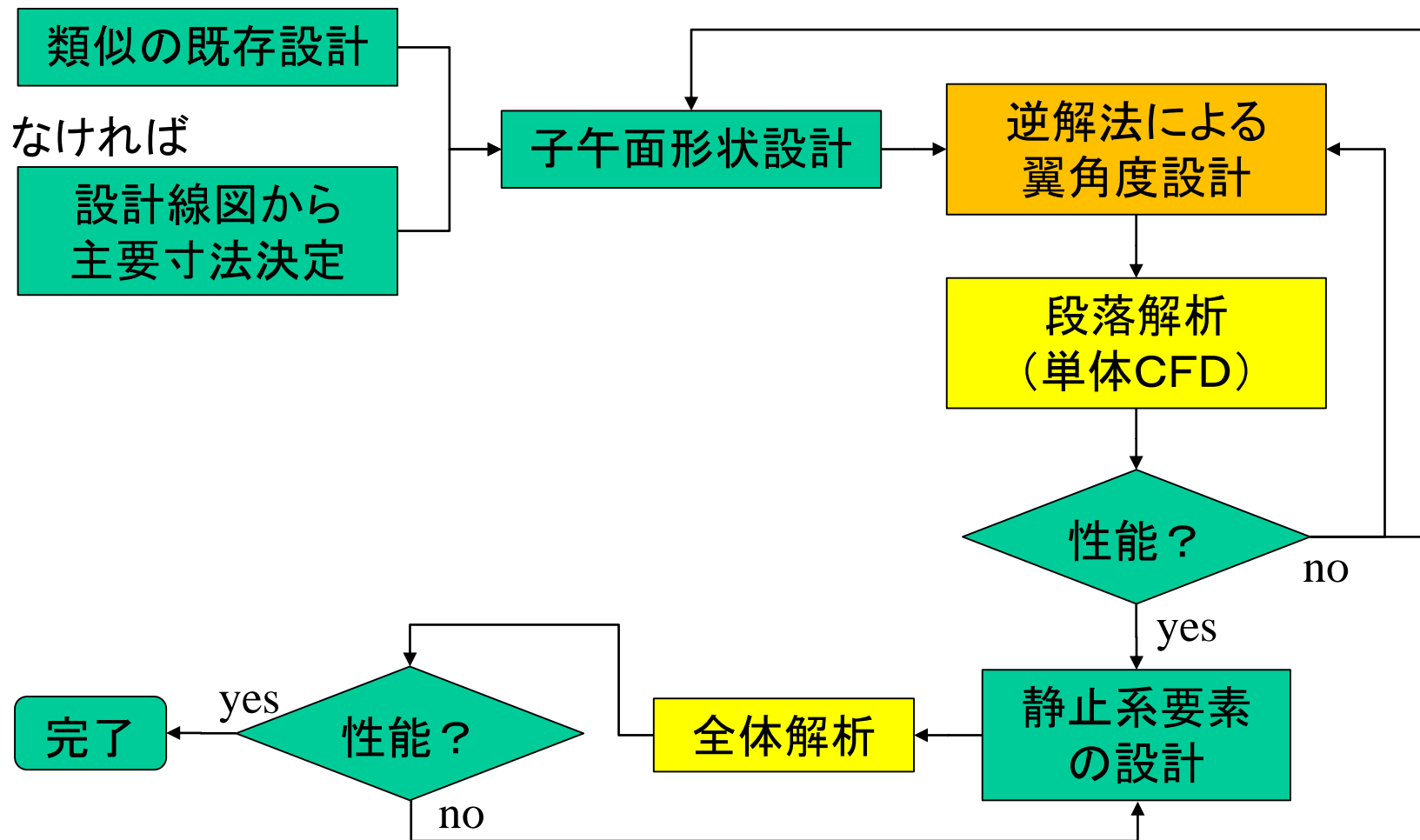
羽根車単体解析による性能評価

全体解析による性能評価

点列からCADへ

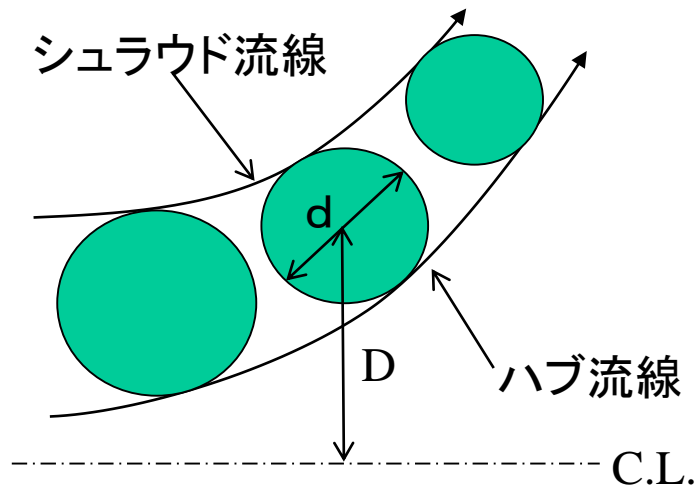
※私や私の部門の利用方法で当社全体での標準ではない

# ポンプ設計の流れとCFD



※ハイドロ設計のみの手順

# 子午面形状の定義が重要

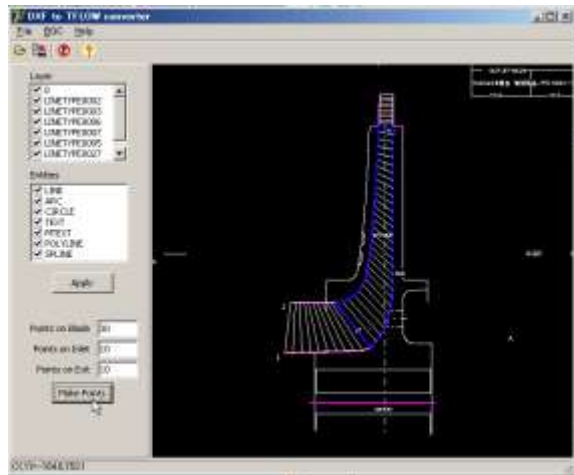


羽根車の子午面形状は性能を大きく左右する重要な要素である。

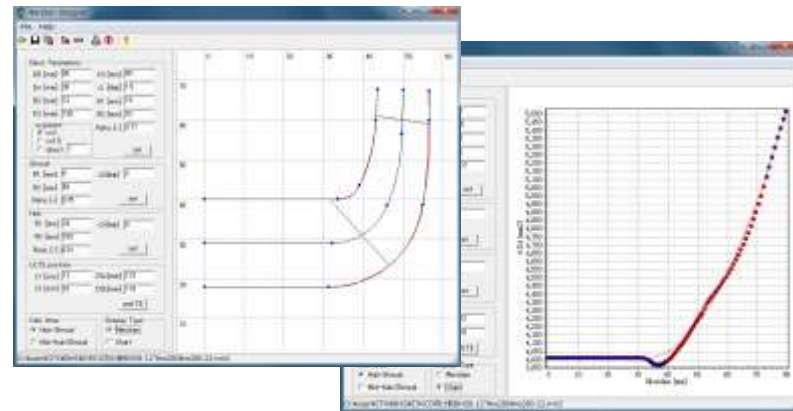
面積分布  $A(t)=\pi Dd$  は滑らかなでなければならない。

設計には、解析を多用するため、形状は点列データとする必要がある。

CAD図から点列を生成したり、新規に点列を設計するツールを作成している。



CAD図から点列を取り出すツール

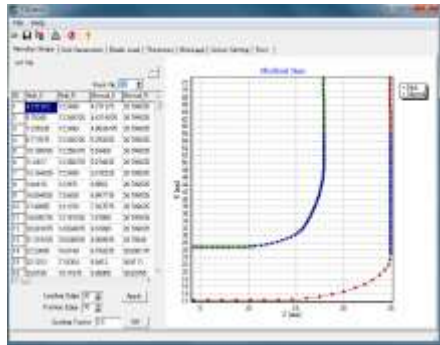


子午面形状を設計するツール

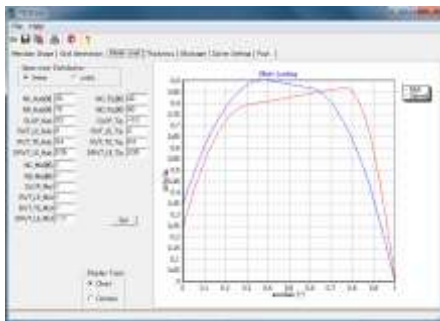


# 逆解法による翼角分布設計

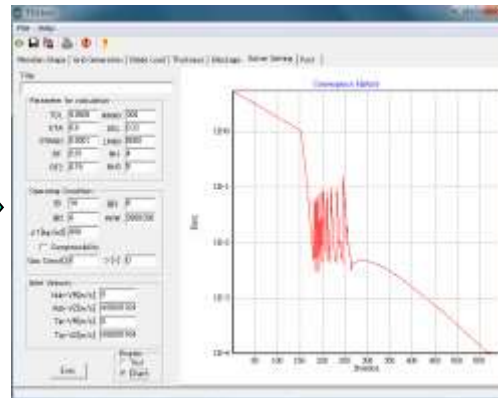
子午面形状が決まると、逆解法を使って翼角分布を設計する。



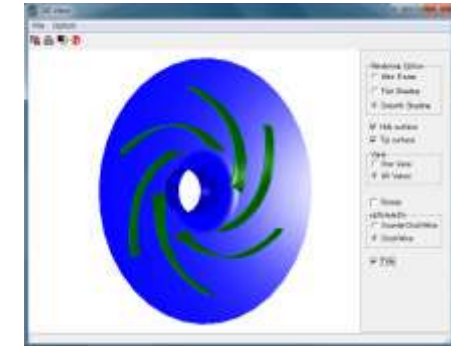
子午面形状



翼負荷分布



逆問題の計算



生成された羽根車形状

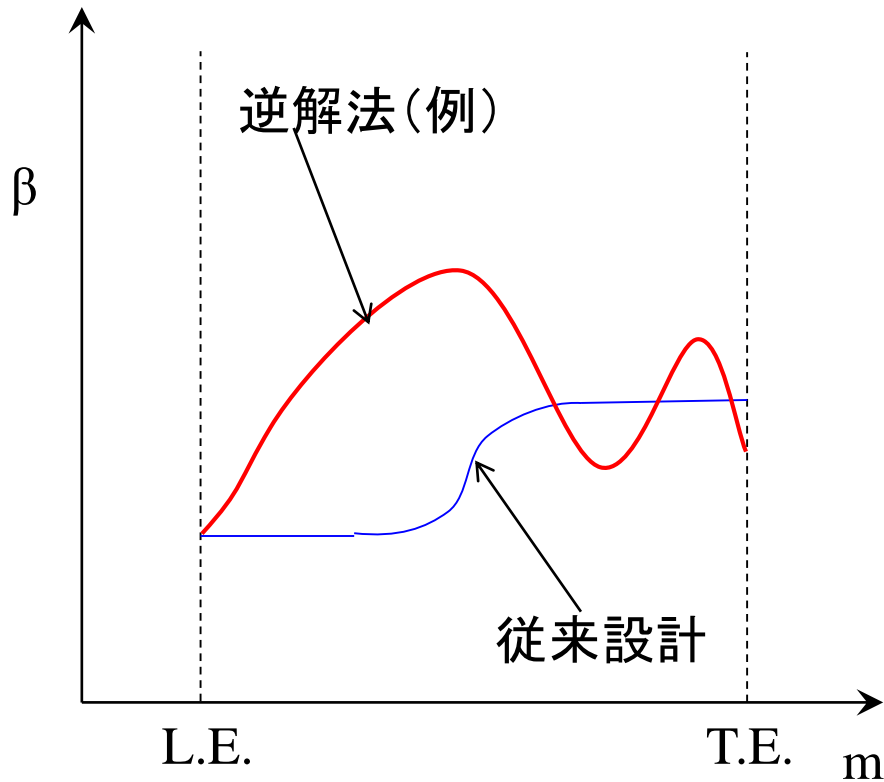


設計概要レポート

逆解法は、**ロンドン大学のZangeneh教授**により開発された非粘性流れを前提とした3次元逆解法ツール(Fortran)にGUIを用意して利用している。



# 従来設計法と逆解法設計



教科書に載っている従来設計法では、出入口の翼角度を決めて滑らかに結ぶだけで、どう結ぶかについて規定していない。

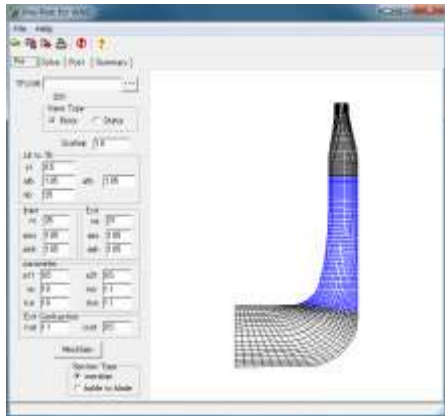
羽根角度を上げると流路面積は大きくなり、下げると小さくなる。これにより、平均流速をコントロールして全圧上昇を促進する効果を持っている。

逆解法では与えた翼負荷分布を満たす翼形状を逆算するので、従来手法で実現しにくい翼角分布を設計することができる。

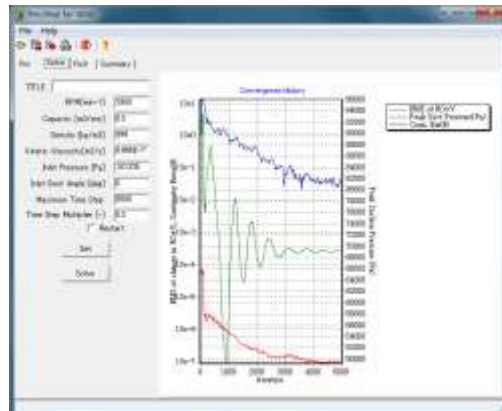
従来設計と逆解法の翼角分布比較

# 羽根車単体解析による性能評価

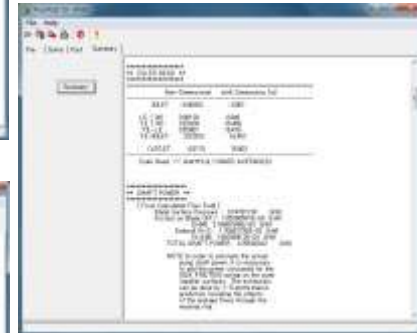
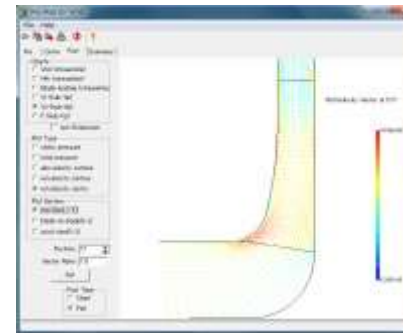
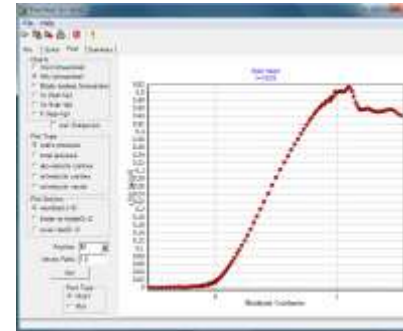
逆解法は非粘性流れに立脚しているため、粘性流れ解析を行って性能を評価する必要がある。これには計算負荷を抑えるために、通常、**羽根車単一流路のみの段落解析**を実施している。



メッシュ生成



計算実行

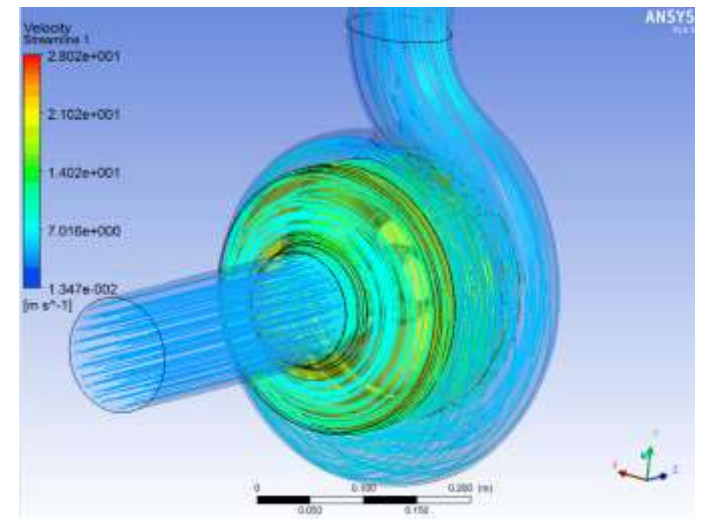
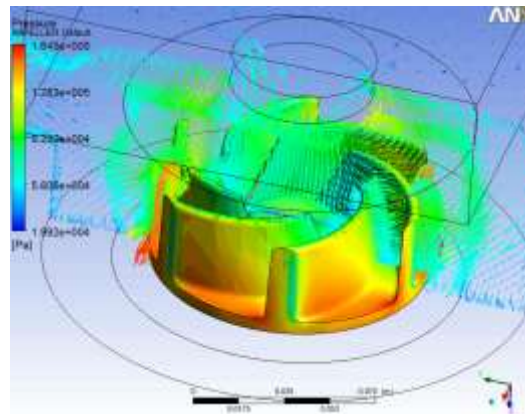
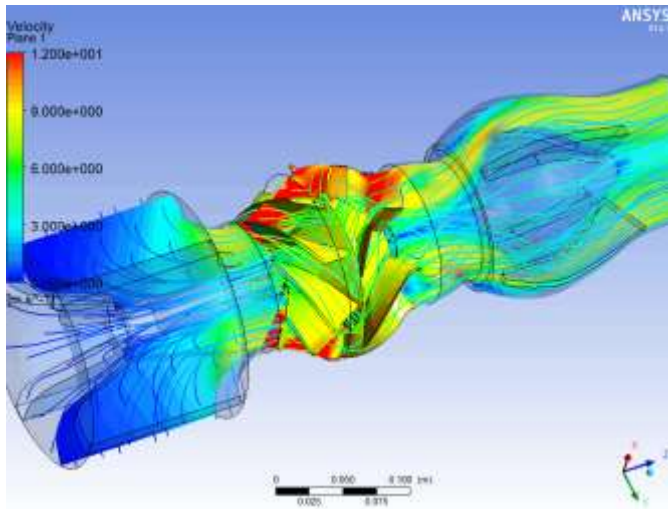


後処理

段落解析には、Cambridge大学Whittle研究所のW.Dawes教授の開発した**Dawesコード**(Fortran)にGUIをつけたツールを使っている。

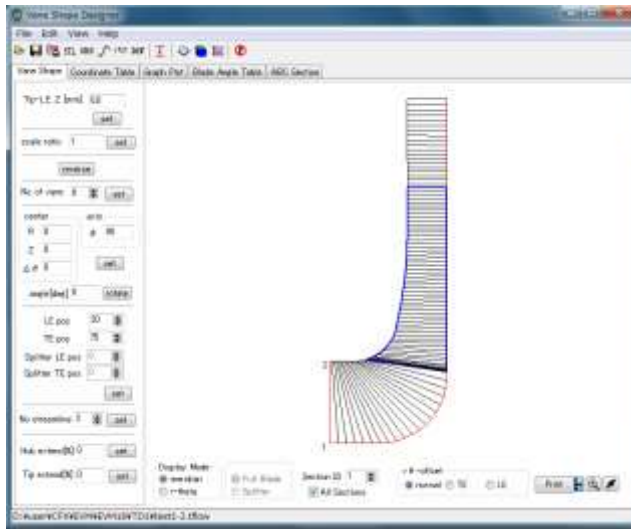
# 全体解析による性能評価

羽根車単体性能が目標を満たしたら、羽根車以外の要素（ボリュートケーシングやガイドベーンなど）を設計し、全体解析を行う。  
全体解析にはCFXを利用している。

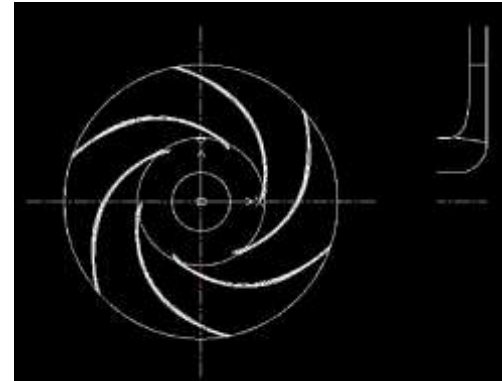


# 点列データからCADへ

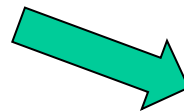
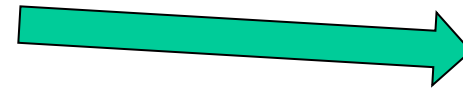
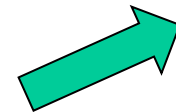
解析を使って設計を進めるには点列データが必須だが、製造フェーズにはCADデータが必要になる。このため、点列データからDXFやIGESなどのCADデータへの変換を行っている。



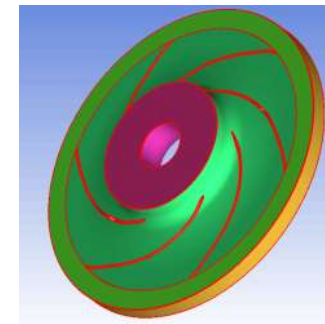
点列編集ツール



2D-CAD  
(DXFファイル)



3D-CAD  
(IGESファイル)



ICEM  
(STLファイル)

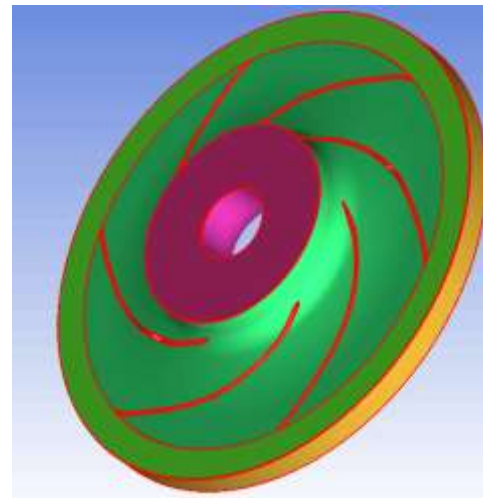
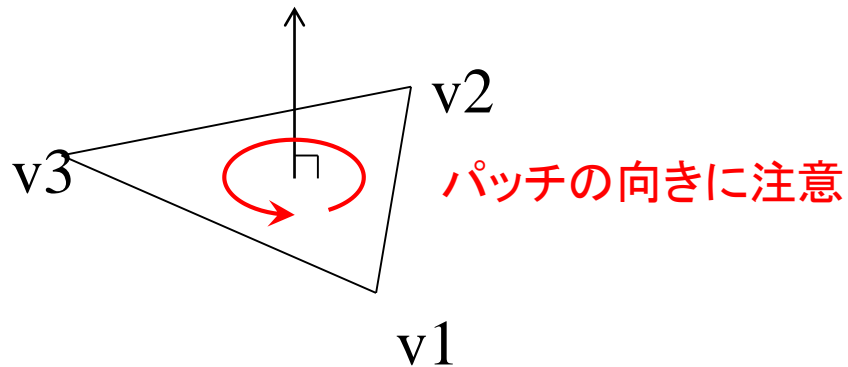
# STL Format

STLはSTeleo Lithographyの略で、造形用データフォーマットである。  
3次元の三角形パッチの集合として形状を定義する。

個々のパッチの接続情報は含まない。

solid ~ endsolidで囲まれたものが、同一グループとしてみなされる。

```
solid NAME
facet normal nx ny nz
  outer loop
    vertex x1 y1 z1
    vertex x2 y2 z2
    vertex x3 y3 z3
  endloop
endfacet
...
endsolid NAME
```



左図の例では、翼面、シュラウド、ハブ、入口、出口、翼後縁、シュラウド、ハブの外周部を別のsolidで定義している。

# IGES Format

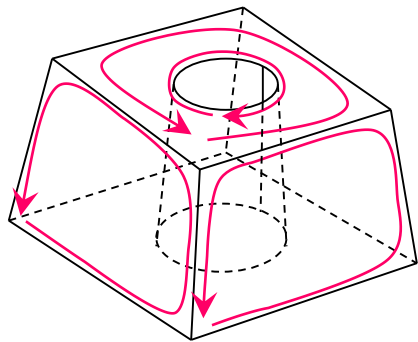
IGES5.3(1996)の仕様書はUS PRO([www.uspro.org](http://www.uspro.org))から入手した(400\$位?)。B-Rep(Boundary Representation)形式のソリッド・データを記述できる。

## <エンティティ・タイプ>

点、曲線、曲面、ソリッドなど

曲線: 2次曲線、パラメトリックスプライン、NURBSなど

曲面: 二次曲面、NURBS、ルールド面、回転面など



B-Rep形式  
(トリム曲面で囲まれた領域)

```

1H,,1H;;4H$LOT,37H$1$DUA2:[IGESLIB.BDRAFT.B2I]SLOT.IGS;
17HBravo3 BravoDRAFT,31HBravo3->IGES V3.002 (02-Oct-87),32,38,6,38,15,
4H$LOT,1.,1,4HINCH,8,0.08,13H871006.192927,1.E-06,6.,
31HD. A. Harrod. Tel. 313/995-6333.24HAPPLICON - Ann Arbor, MI,4,0:
116 1 0 1 0 0 0 0 0 1D
116 1 5 1 0 0 0 0 0 0D
116 2 0 1 0 0 0 0 0 1D
116 1 5 1 0 0 0 0 0 0D
100 3 0 1 0 0 0 0 0 1D
100 1 2 1 0 0 0 0 0 0D
100 4 0 1 0 0 0 0 0 1D
100 1 2 1 0 0 0 0 0 0D
110 5 0 1 0 0 0 0 0 1D
110 1 3 1 0 0 0 0 0 0D
110 6 0 1 0 0 0 0 0 1D
110 1 3 1 0 0 0 0 0 0D
116,0.,0.,0.,0.,0,0;
116,5.,0.,0.,0.,0,0;
100,0.,0.,0.,0.,1.,0.,-1.,0,0;
100,0.,5.,0.,5.,-1.,5.,1.,0,0;
110,0.,-1.,0.,5.,-1.,0.,0,0;
110,0.,1.,0.,5.,1.,0.,0,0;
S 1G 4D 12P 6 T

```

Global Section

Directory Entry Section

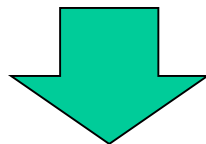
Parameter Data Section

## 5. 設計者がCFDを使うメリット

流れの様子を試作前に確認できる。

慣れてくると、  
計算しなくても、大体の予想ができるようになる。

設計で流れに起因する大きな失敗をし難くなる。



工学的センスが磨かれる。



# CFDを深く学ぶと

計算の内容を理解すれば、**安心して使える**様になる

ファイルI/Oを調べてツールを作って自動化すれば、**生産性を向上**できる

CFDを利用した最適化によって**設計の質を向上**できる

自分でできることが広がる

しかし

解析屋は周囲から何をやっているか解らないと思われがち。  
説明して理解を得る努力が必要です。

## Appendix. OpenFOAM使用歴

OpenFOAMの存在は v1.2('05-8/22)の頃から知っていたが、当時は標準ソルバの機能が低く、数値解析ライブラリと認識

07年4月にOpenFOAM-1.4がリリースされ、MRFをサポートしたため調査を行った。GGI非対応で安定性にも問題があり実用には今ひとつ。

08年2月にHrv.Jasakが1.4.1-devをリリースするとGGIやmixerGgiFvMeshにより実用的なポンプの非定常解析が可能となり、実用化を念頭に調査実施。実行可能だが手順が煩雑で、安定性に難があるという認識。

09年2月に1.5-devがリリースされ、TurboMachinery SIGが例題やライブラリを公開すると、ポンプ流れ解析が比較的容易に実施できるようになった。MRF解析でCFXと比較したところ良好に一致、社内的に注目される。

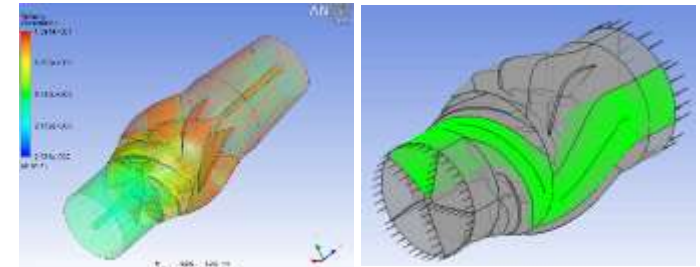
11年12月に2.1がリリースされAMIがサポートされると、正規版でポンプのルーチン解析の多くが可能に。本格的な実用化に向けて周辺基盤の開発に着手。

13年3月に2.2がリリースされ、キャビテーション解析が可能になった。

# 現状可能なこと、今後やりたいこと

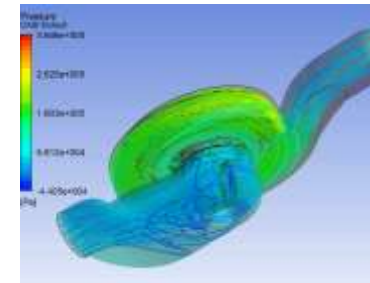
## ・現在可能な解析

- ・インペラ単独のSRF(MRF)解析
- ・インペラ+ガイドのMixing Plane段落解析(Extend)
- ・ポンプ全体のMRF/Sliding解析
- ・ポンプ+吸込水槽の自由水面解析
- ・ポンプ・キャビテーション解析



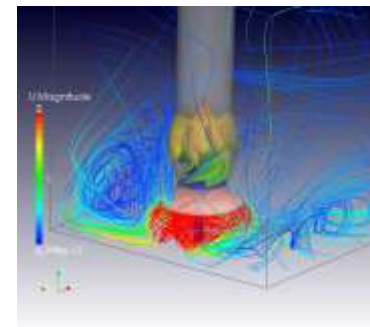
要素段落解析

緑色の部分を取り出し周期境界で計算



ポンプ全体解析

ポンプ全体を解析



吸込水槽+ポンプ  
一体解析

吸込水槽内に設置されたポンプにより水槽内に生じる渦流れを解析する

## ・今後やりたいこと

- ・水中ポンプに流入する固形物の解析
- ・最適化ツールと組み合わせたインペラ最適設計システムの構築(DAKOTAなど)
- ・mixing planeの正規版への移植
- ・ソルバのロバスト化
- ・スライディングメッシュの安定化
- ・Chalmers大学のCoupled Solverの並列対応