

宇宙航空研究開発機構特別資料

JAXA Special Publication

第4回 EFD/CFD 融合ワークショップ

The 4th Workshop on Integration of EFD and CFD

開催日：平成23年1月25日

開催場所：秋葉原コンベンションホール

2012年1月

January 2012

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

## 目 次

1. 開催趣意書 .....	1
2. 実行委員会 委員名簿 .....	2
3. プログラム .....	3
4. 発表資料	
1. Particle Tracking Accelerometry による PIV の粒子追従性問題からの解放 Release from tracer particle conditions using Particle Tracking Accelerometry .....	5
村井祐一 (北海道大学)	
2. 流体科学と EFD/CFD 融合 : 乱流研究から見る平均場ダイナモ Fluid Science and EFD/CFD Integration: Mean-Field Dynamo in Light of Turbulence Research .....	23
吉澤 徹 (JAXA、客員)	
3. 気象学における 4 次元変分法データ同化 4-Dimensional Variational Data Assimilation in Meteorology .....	35
露木 義 (気象研究所予報研究部)	
4. JAXA 「次世代超音速機技術の研究開発」 計画における EFD/CFD 連携と将来の課題 Complementary role and challenge of EFD and CFD on the National Experimental Supersonic Transport Program by JAXA .....	51
吉田憲司 (JAXA)	
5. 日本における EFD/CFD 融合 – JAXA からの提言 – Integration of EFD and CFD in Japan– A Proposal from JAXA – .....	77
口石 茂、渡辺重哉、相曾秀昭、松尾裕一 (JAXA)	
5. パネルディスカッション「日本における EFD/CFD 融合の方向性」 .....	97

## The 4th Workshop on Integration of EFD and CFD

### 第4回EFD/CFD融合ワークショップ

#### 開催趣意書

従来、数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) と実験流体力学 (Experimental Fluid Dynamics, EFD) とは、大型の風洞等を持つ研究機構ではどちらかといえば別個の分野とみなされ、それぞれ人材もリソースも独立に、独自の立場で行われてきました。しかしながら、CFDは物理現象をモデル化して数値的に解を求めている以上、結果の妥当性を実験データを用いて検証する必要がある、その意味でCFDはEFDに一方的に依存していたと言えます。EFDもこれまでCFDに対して傍観者的な立場に終始してきたことは否めない一方、EFDにはEFD固有の不確かさがあり、また得られる情報にも制限が生じます。確実に言えることは、EFD/CFD単独で得られるデータの精度や信頼性には自ずから限界が生じるということでしょう。

一方、大学の研究室等においては、実験と計算の両面からのアプローチは日常的な手段であり、実験と計算の単純な比較から考察をして行くという意味ではEFDとCFDは常に密接な関係にあります。

このような現状に鑑み、研究機構においては、二元論的な考え方を改め双方の信頼性を向上させ真に実用に供するツールとなすために、また、大学等においては、単純比較を超えたより深い洞察・知見を得られるようにするため、EFD/CFDの互いの問題点の補完や新たな枠組みの構築によって得られるシナジー効果を見いだすことが重要ではないでしょうか。

本ワークショップはこのようなEFDとCFDの融合をテーマとし、流体力学に携わる研究者や技術者が講演やディスカッションを通してその必要性・重要性について認識を深め、かつ知見を広げることを目的としております。

このワークショップが、EFD/CFD融合という古くて新しいテーマに関して情報交換をするよい機会となり、新たな発想による研究開発活動が国内外でより一層展開されるようになれば、主催者として何よりの喜びです。また、本ワークショップは今後も継続させていく予定ですので、内容についてご意見やご提案等ございましたらぜひともお知らせいただきたく、宜しくお願ひ申し上げます。

平成 23 年 1 月 25 日

第 4 回 EFD/CFD 融合ワークショップ実行委員会 委員長  
宇宙航空研究開発機構 研究開発本部 松尾 裕一  
東北大学 流体科学研究所 大林 茂

## 第4回 EFD/CFD 融合ワークショップ 実行委員会 委員名簿

委員長	松尾 裕一	JAXA 研究開発本部 数値解析グループ
	大林 茂	東北大学 流体科学研究所 附属流体融合研究センター
委員	浅井 圭介	東北大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻
	伊藤 貴之	お茶の水女子大学大学院 理学部情報科学科
	伊藤 健	JAXA 研究開発本部 風洞技術開発センター
	金崎 雅博	首都大学東京 システムデザイン学部 航空宇宙システム工学コース
	川添 博光	鳥取大学 大学院工学研究科 機械宇宙工学専攻
	佐宗 章弘	名古屋大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻
	澤田 恵介	東北大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻
	鈴木 宏二郎	東京大学大学院 新領域創成科学研究科
	鈴木 俊之	JAXA 研究開発本部 未踏技術研究センター
	坪倉 誠	北海道大学工学部 機械知能工学科
	村上 桂一	JAXA 研究開発本部 数値解析グループ
	山本 一臣	JAXA 航空プログラムグループ 国産旅客機チーム
	吉田 憲司	JAXA 航空プログラムグループ 超音速機チーム
	渡辺 重哉	JAXA 研究開発本部 流体グループ
事務局	相曾 秀昭	JAXA 研究開発本部 数値解析グループ
	口石 茂	JAXA 研究開発本部 流体グループ
	保江 かな子	JAXA 研究開発本部 流体グループ

## 第4回EFD/CFD融合ワークショップ The 4th Workshop on Integration of EFD and CFD



秋葉原コンベンションホール 5B 会議室  
AKIHABARA Convention Hall: Room 5B

### Program

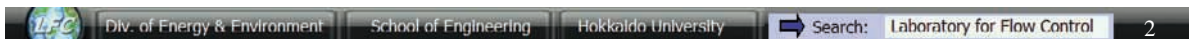
Jan. 25 (Tue.), 2011		
10:00-10:10	大林 茂 (東北大流体研) Shigeru Obayashi (Tohoku Univ.)	Opening Address
Session 1 <Invited Lecture#1>		司会: 川添 博光 (鳥取大) Chairperson: Hiromitsu Kawazoe (Tottori Univ.)
10:10-10:55	村井 祐一 (北大) Yuichi Murai (Hokkaido Univ.)	Particle Tracking Accelerometry による PIV の粒子追従性問題からの解放 Release from tracer particle conditions using Particle Tracking Accelerometry
10:55-11:40	吉澤 徹 (東大名誉教授) Akira Yoshizawa (Emeritus, Univ. Tokyo)	流体科学と EFD/CFD 融合: 乱流研究から見る平均場ダイナモ Fluid Science and EFD/CFD Integration: Mean-Field Dynamo in Light of Turbulence Research
Lunch		
Session 2 <Invited Lecture#2>		司会: 佐宗 章弘 (名大) Chairperson: Akihiro Sasoh (Nagoya Univ.)
13:00-13:45	露木 義 (気象研究所) Tadashi Tsuyuki (Meteorological Research Institute)	気象学における 4 次元変分法データ同化 4-Dimensional Variational Data Assimilation in Meteorology
13:45-14:30	吉田 憲司 (JAXA) Kenji Yoshida (JAXA)	JAXA「次世代超音速機技術の研究開発」計画における EFD/CFD 連携と将来の課題 Complementary role and challenge of EFD and CFD on the National Experimental Supersonic Transport Program by JAXA
Session 3 <JAXA Keynote Speech>		司会: 浅井 圭介 (東北大) Chairperson: Keisuke Asai (Tohoku Univ.)
14:40-15:20	口石 茂 (JAXA) Shigeru Kuchi-Ishi (JAXA)	日本における EFD/CFD 融合 -JAXA からの提言- Integration of EFD and CFD in Japan - A Proposal from JAXA -
Session 5 <Panel Discussions>		コーディネータ: 渡辺 重哉 (JAXA) Coordinator: Shigeya Watanabe (JAXA)
15:30-17:30	日本における EFD/CFD 融合の方向性 Direction toward Integration of EFD and CFD in Japan  パネリスト: 大林 茂 (東北大流体研) 澤田 恵介 (東北大) 中村 和幸 (明治大) 棚橋 美治 (MHI) 松尾 裕一 (JAXA) 伊藤 健 (JAXA)	Panelists: Shigeru Obayashi (Tohoku Univ.) Keisuke Sawada (Tohoku Univ.) Kazuyuki Nakamura (Meiji Univ.) Yoshiharu Tanahashi (MHI) Yuichi Matsuo (JAXA) Takeshi Itoh (JAXA)
17:30-17:40	松尾 裕一 (JAXA) Yuichi Matsuo (JAXA)	Closing Address
18:00-20:00	懇親会 Banquet	

# Particle Tracking Accelerometryによる PIVの粒子追従性問題からの解放

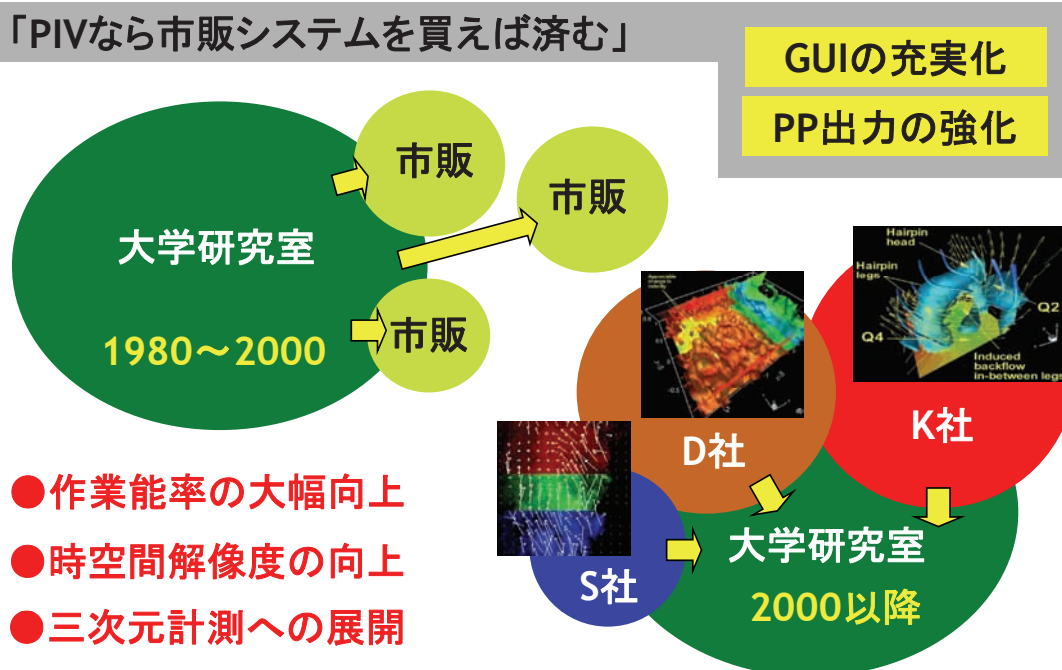


Release from tracer particle conditions  
using Particle Tracking Accelerometry

村井祐一（北海道大学）

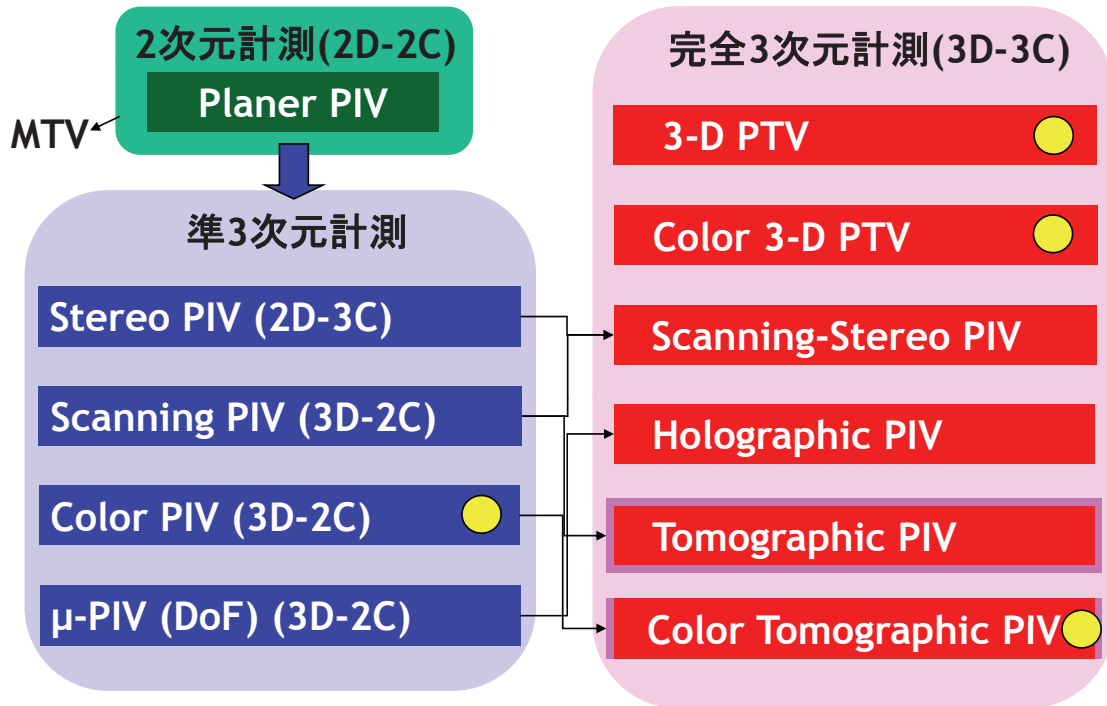


## Commercialization



LFC Div. of Energy & Environment School of Engineering Hokkaido University Search: Laboratory for Flow Control 3

## Planar to Volumetric PIV

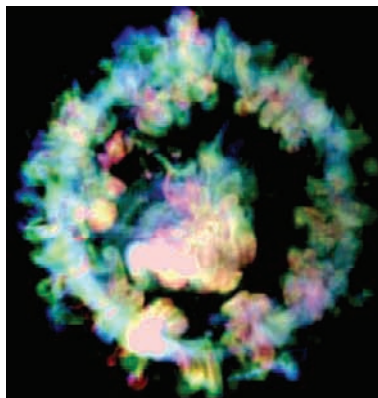


LFC Div. of Energy & Environment School of Engineering Hokkaido University Search: Laboratory for Flow Control 4

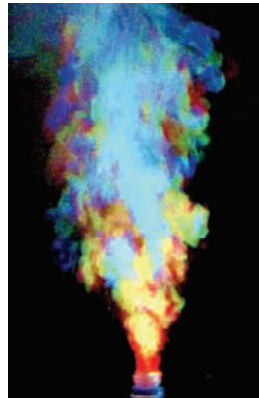
## Color Tomographic PIV

Based on Computer Tomography

IWPT会議2009で発表



壁面衝突渦輪



浮力噴流

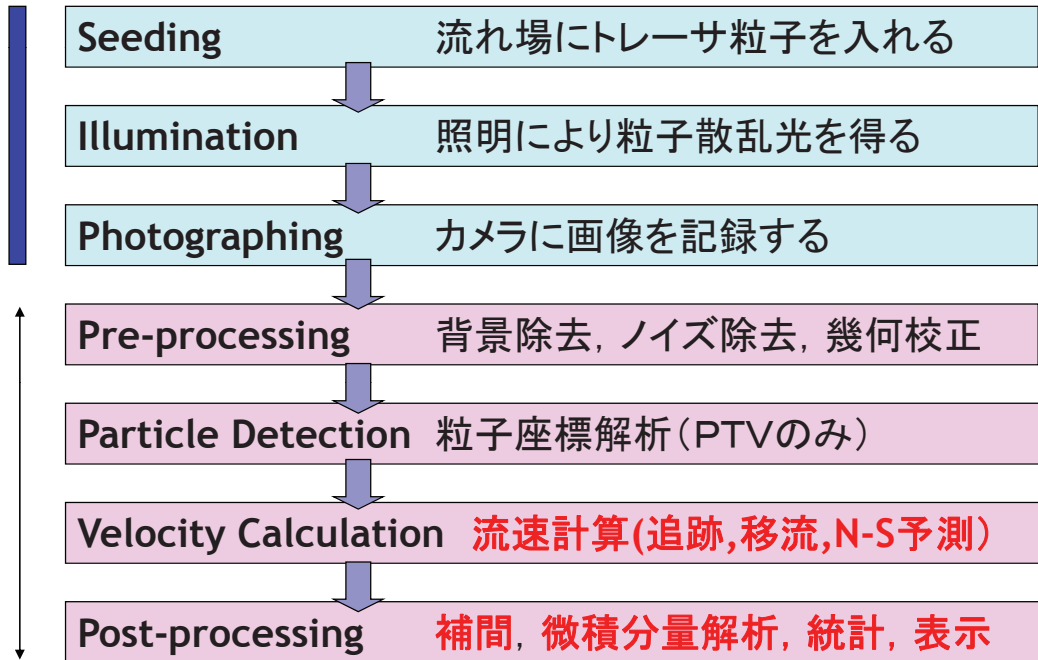


平板衝突ジェット

狙い = 色情報をPIVに最大限に有効活用する技術の探究

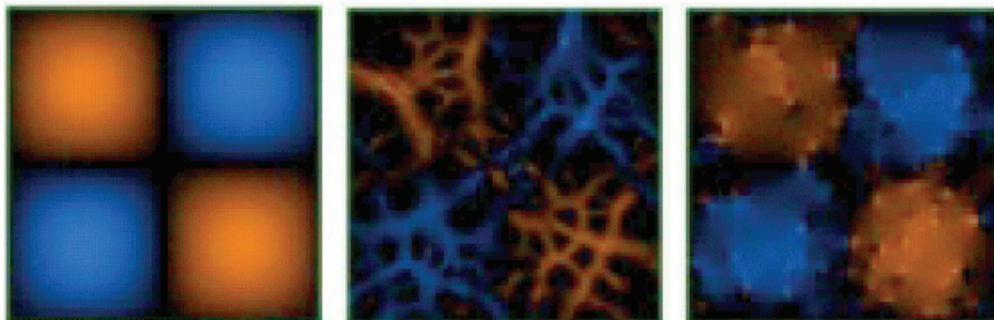
カメラ1つだけで三次元三成分の(気流の)速度ベクトル場を計測

## CFD Processes in PIV



## Vector Interpolation

### Taylor-Green Vortex の渦度分布計測シミュレーション



真値 (正解)

ローカル補間  
距離の逆数補間

グローバル補間  
ラプラス方程式

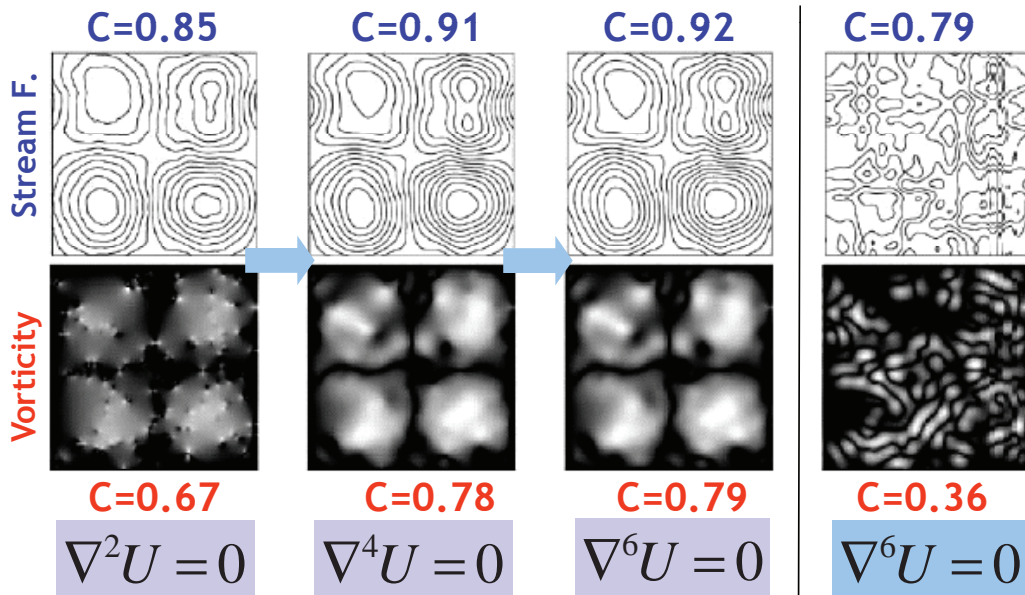
グローバル補間 = PTV情報を最大限に活かす

楕円型微分方程式 = 高次振動解を抑制する



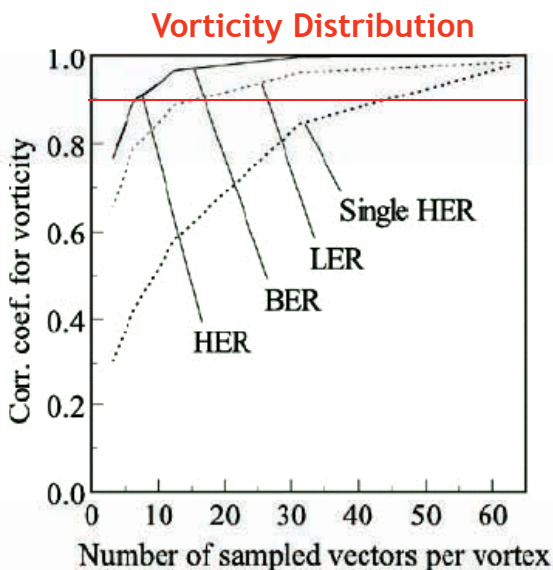
# Recursive Interpolation

低次から高次へ階層的に補間すると最も復元精度が高くなる



Ido & Murai (2005) Flow Meas. Instr.

# Number of Required Vectors



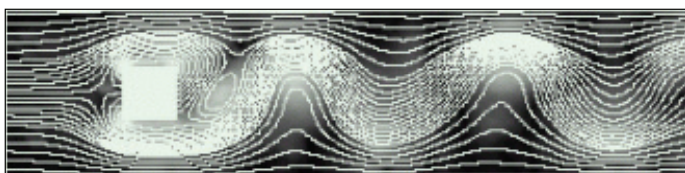
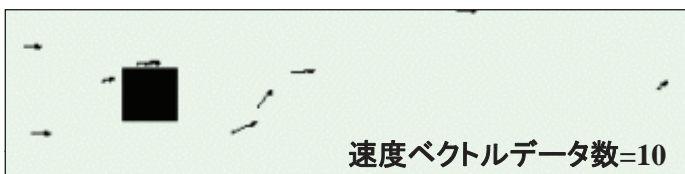
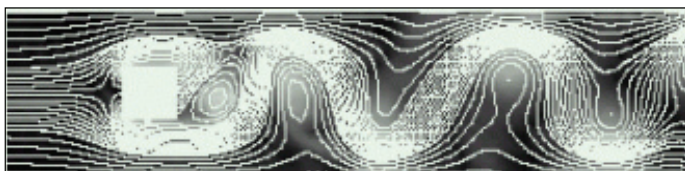
渦度を0.9以上の相関係数で補間(復元)するための渦1つあたりの速度ベクトル数

距離逆数	65
$\nabla^2 U = 0$	17
$\nabla^4 U = 0$	8
$\nabla^6 U = 0$	7

渦1つあたりPTVデータ

## Karman Vortex Reconstruction

Re=500での角柱後流カルマン渦列



N-S数値解

抽出

PTVデータ

補間

補間結果

Murai et al(2002) JSME Int. J. Ser. B, Ido & Murai (2003) Exp Fluids

## 4-D Recursive Interpolation

ラプラス方程式

$$\nabla^2 U = 0$$

$$\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}, \sigma \frac{\partial}{\partial t} \right)$$

$$\nabla^4 U = 0$$

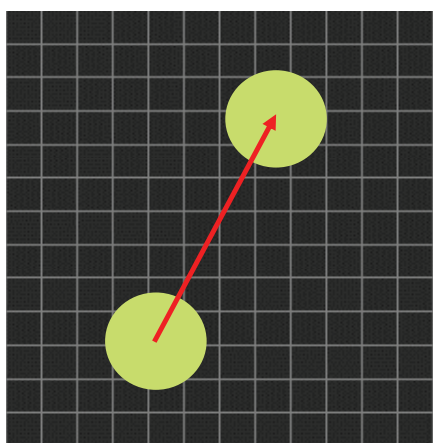
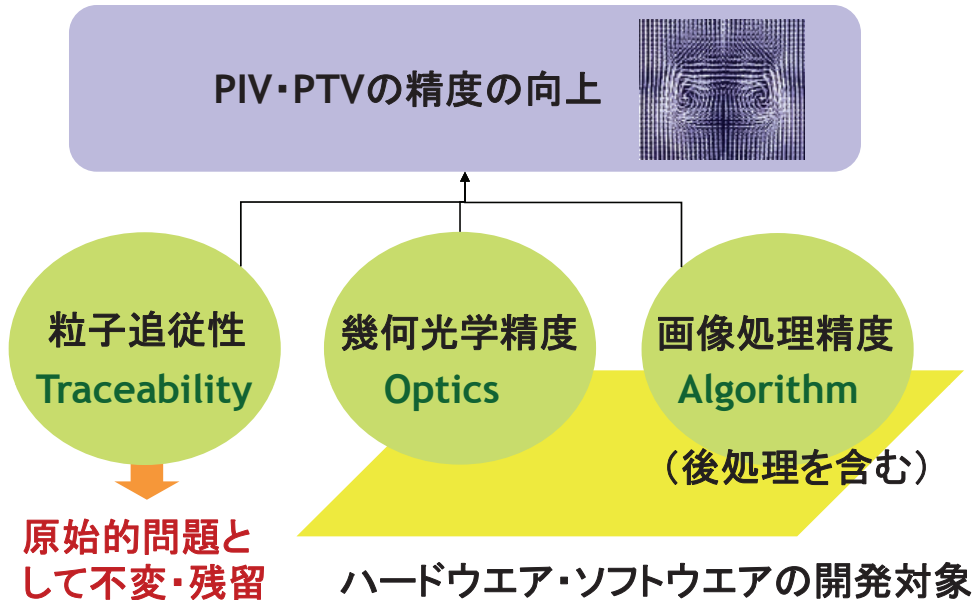
$$\nabla^6 U = 0$$

$$\nabla^{2n} U = 0$$

再帰型: 低次から高次への階層処理

- ①高い空間分解能
- ②収束解は唯一
- ③実験データ保護
- ④振動解なし

Ido & Murai (2005) Flow Meas. Instr.



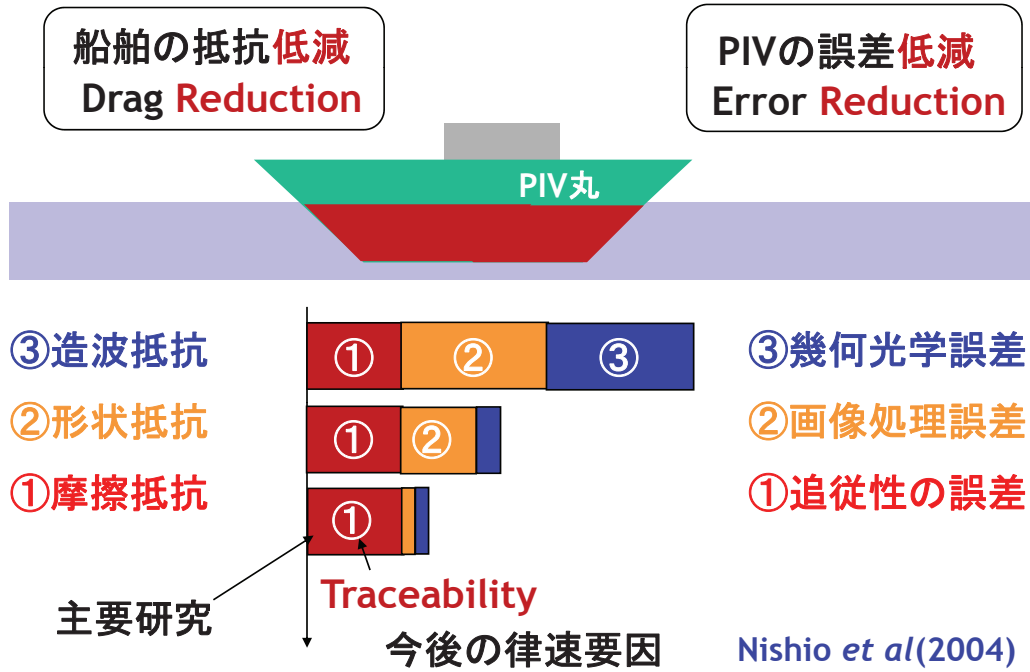
Pixel Space

### 瞬時局所速度ベクトル精度

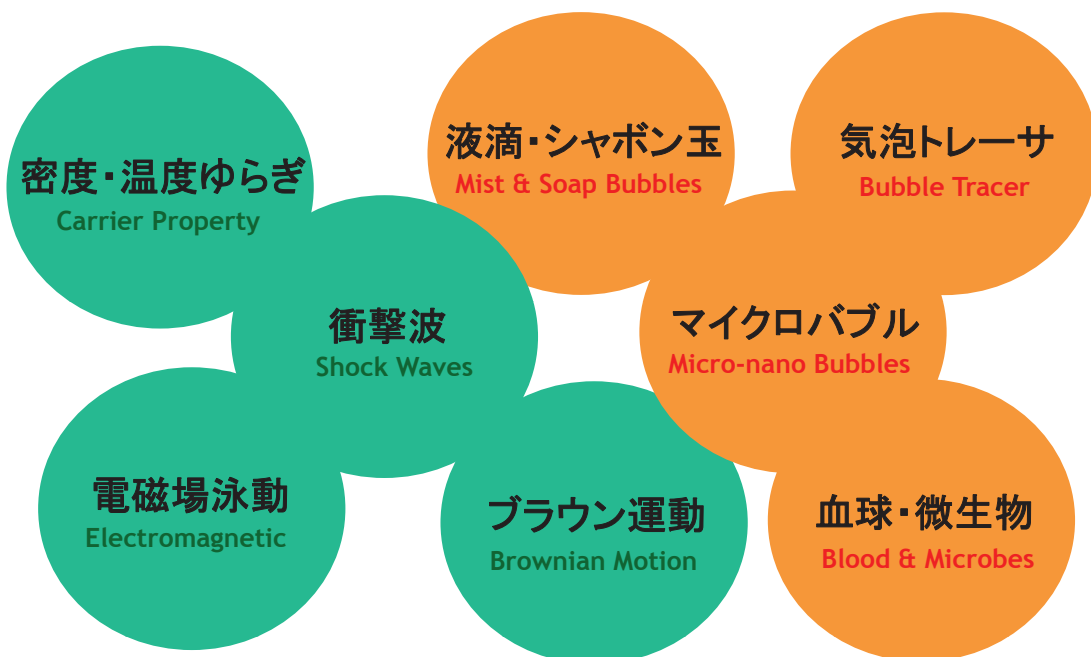
- 90年代までのPIV  
**5** pixel/frame (3bit)
- Sub-pixel 処理やPTV  
**5.8** pixel/frame (6bit)
- 再帰型やPTVハイブリッド  
**40.5** pixel/frame (7bit)

LDV~3桁(8bit), HW~4桁(14bit), UVP~3桁(8bit)  
**PIVが今後 8ビット以上の測定精度に向かうのか？**

## Invariable Traceability



## Inevitable Slip Motion



ベクトルデータが大量に取得されて信じてしまっは駄目！

## Environmental Restriction

ラボ以外の実験環境(機械, 屋外)の殆どでは追従性を欠く  
 「仮にこれを使っておこう」と言いながら後でふり返らない

異物混入に制約のある系では正確さに欠けるトレーサを使わざるを得ない. PIVの様々な応用場面で出くわす共通の問題.

「トレーサではなくセンサー」

- 科研基盤B(2007-2009)  
屋外気流計測のトレーサ
- 科研基盤B(2009-2012)  
マイクロバブル運動特性
- NEDO(2005-2009)  
超音波流量計のトレーサ

主目的: Slipの運動方程式を立てる → 逆解析で解く

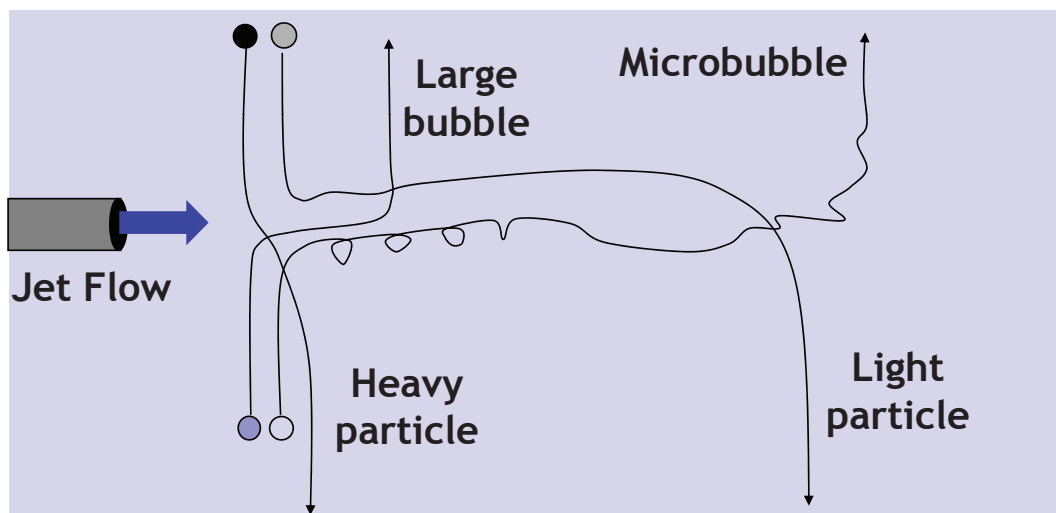
## Particle as Sensor

流れが粒子運動を決める

$$\mathbf{u}_p = T(\mathbf{u})$$

粒子運動から流動場を求める

$$\mathbf{u} = T^{-1}(\mathbf{u}_p)$$



## Equation of Motion

$$\rho_p V_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = -C_D \frac{1}{2} \rho \pi R_p^2 |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}| (\mathbf{u}_p - \mathbf{u}) - \rho_p V_p \mathbf{g} - V_p \nabla P$$

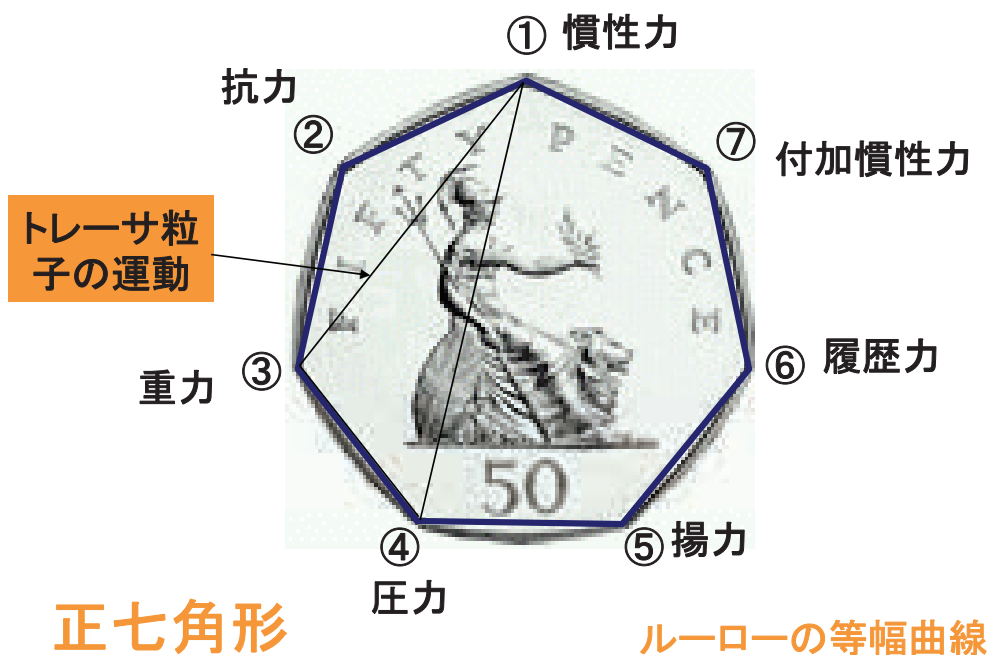
① Inertia                      ② Drag                      ③ Grav                      ④ P.G.

$$-C_L \rho V_p (\mathbf{u}_p - \mathbf{u}) \times (\nabla \times \mathbf{u}) + \int K(\tau, t) d\tau - \beta \rho V_p \left( \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} - \frac{D\mathbf{u}}{Dt} \right)$$

⑤ Lift                      ⑥ History                      ⑦ Added Inertia

トレーサ粒子	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
粒子	★	★	★		★	★	
気泡		★		★	★		★
液滴	★	★				★	★

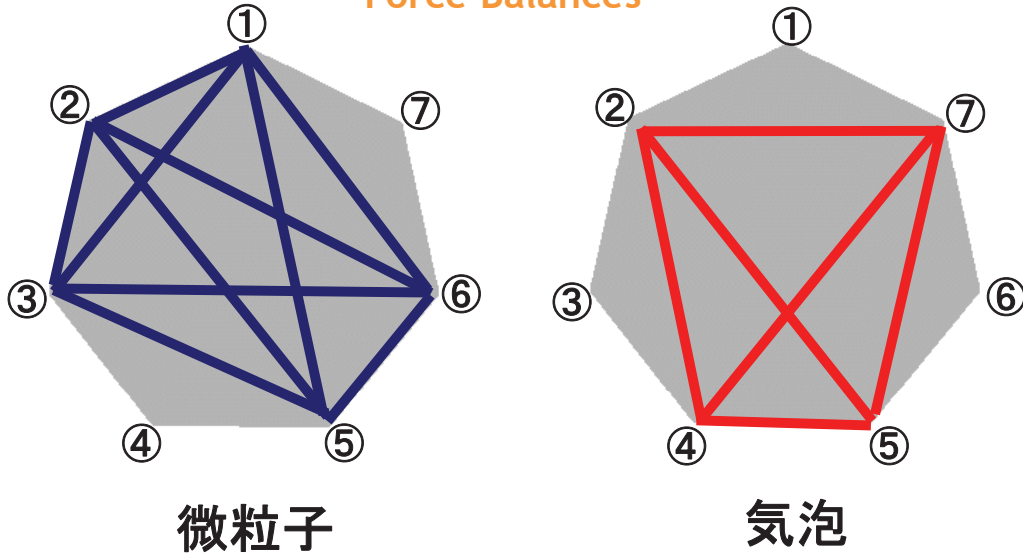
## Seven Force Elements



LFC Div. of Energy & Environment School of Engineering Hokkaido University Search: Laboratory for Flow Control 19

## Combination in Seven

### Force Balances

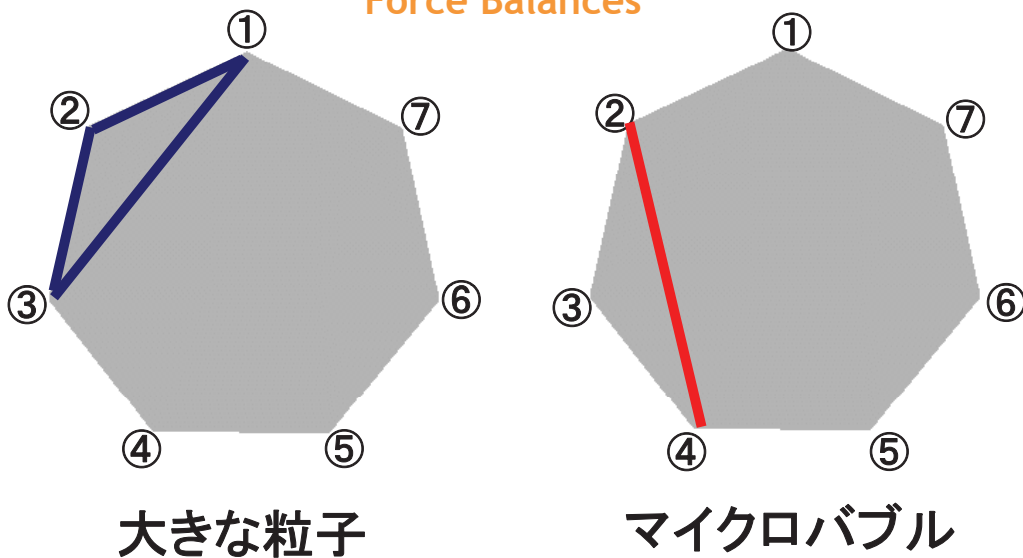


構成要素が多いほど逆解析の確度は高くなる. 情報量が多くなり予想範囲を絞り込む効果をもつため.

LFC Div. of Energy & Environment School of Engineering Hokkaido University Search: Laboratory for Flow Control 20

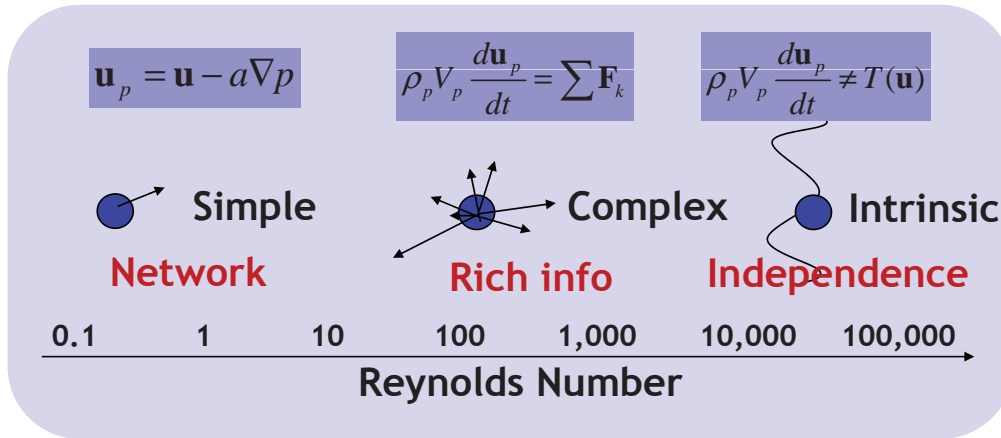
## Undesired Conditions

### Force Balances

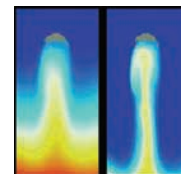


構成要素が少なくなると, 解を拘束することができなくなる. マイクロバブルの場合では流れに組織的な干渉を与えてしまう.

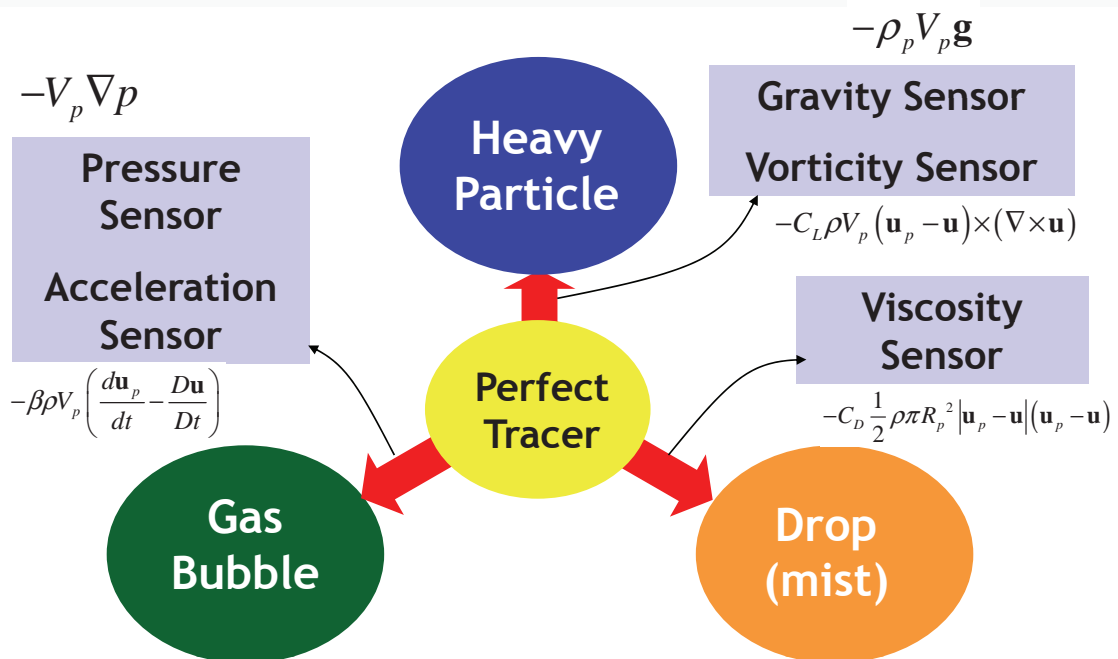
## Organized Interaction



欧州のサッカー(組織力) ←→ 南米のサッカー(個人技)



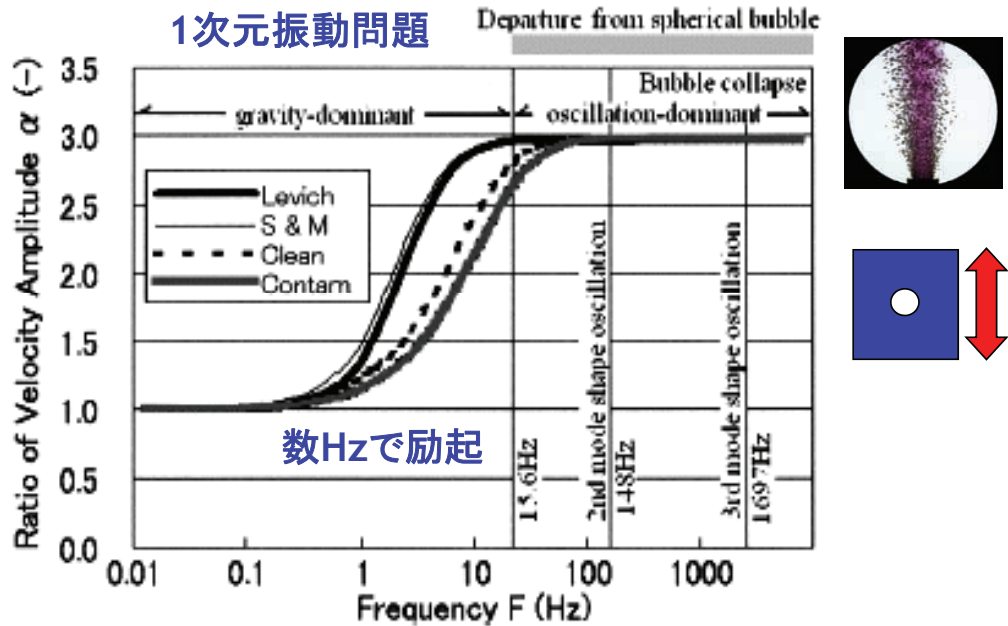
## Added Functions



逆転の発想: 完全なトレーサではその点の速度のみ



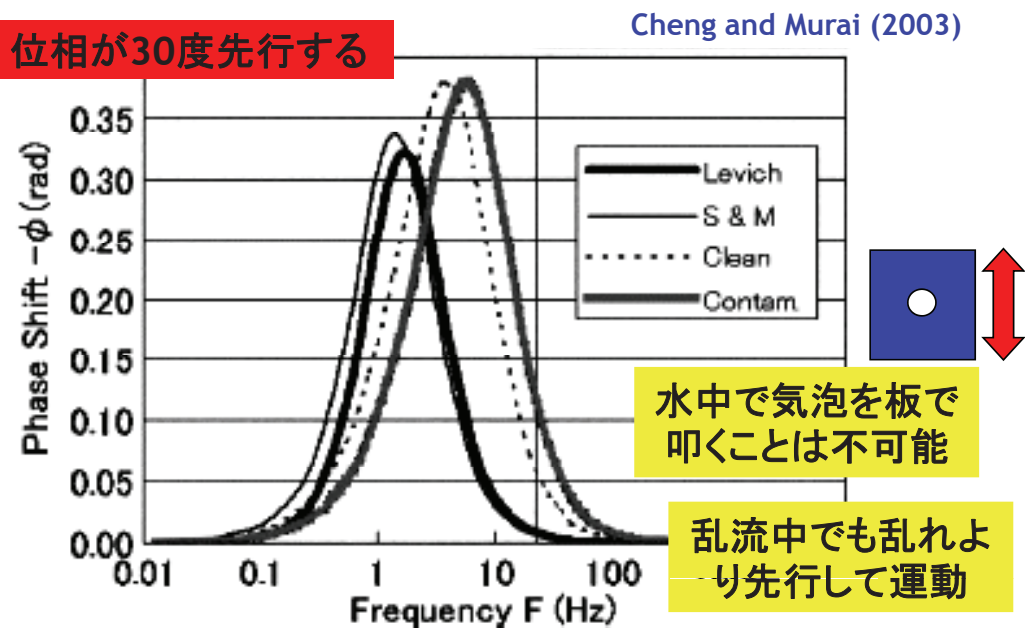
# Bubble Slip Excitation



★乱れを3倍に拡大して観測することが出来る

# Bubble Rapid Response

気泡は常に0.1s先の運動を見せる(人間は0.1s後の世界を見ている)



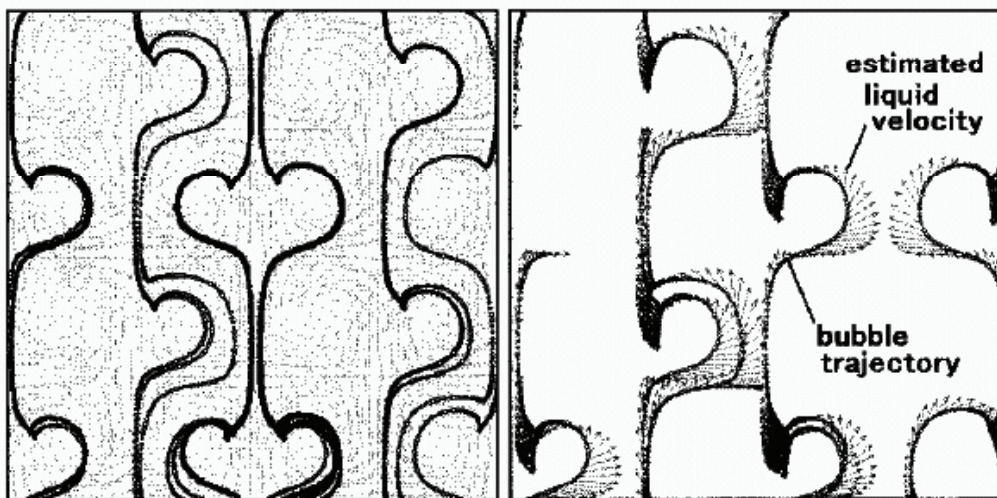
## Formula of Carrier Velocity

$$\begin{aligned}
 (\gamma + \beta) \frac{d\mathbf{u}_g}{dt} &= (1 + \beta) \frac{d\mathbf{u}_l}{dt} + (1 - \gamma)\mathbf{g} \\
 &\quad - \frac{3C_D}{8r_g} |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_l| (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_l) \\
 &\quad - C_L (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_l) \times (\nabla \times \mathbf{u}_l)
 \end{aligned}$$

液相速度ベクトルを求める式

$$\begin{aligned}
 \mathbf{u}_l^n &= \frac{(1 + \beta)\mathbf{u}_l^{n-1} + \{a^{n-1}\mathbf{u}_g^n - (1 - \gamma)\mathbf{g} + \mathbf{S}^n\}\Delta t}{(1 + \beta) + a^{n-1}\Delta t} \\
 \mathbf{S}^n &= (\gamma + \beta) \frac{\mathbf{u}_g^n - \mathbf{u}_g^{n-1}}{\Delta t} + C_L (\mathbf{u}_g^{n-1} - \mathbf{u}_l^{n-1}) \times (\nabla \times \mathbf{u}_l^{n-1})
 \end{aligned}$$

## Along Trajectory



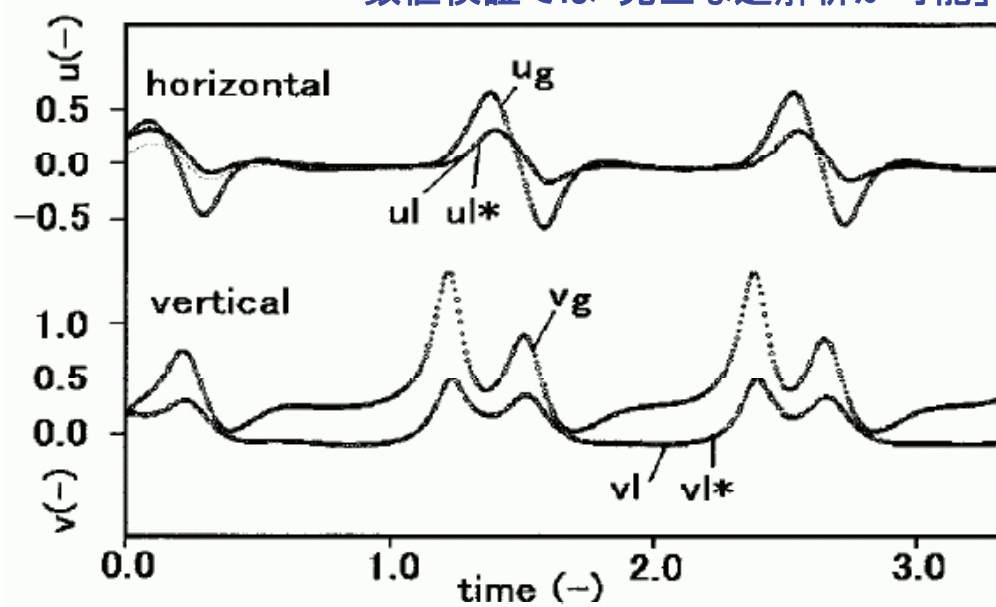
(a) Bubble trajectories

(b) Estimated liquid velocity

Taylor-Green 渦列のN-S方程式要素解による立証計算

## Backward Slip Computation

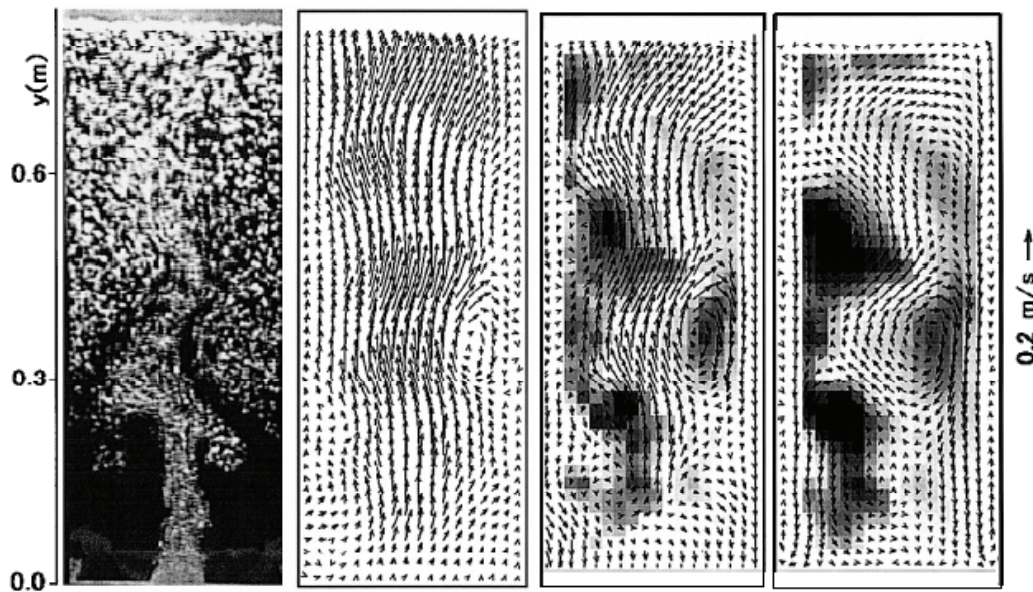
数値検証では「完全な逆解析が可能」



軌跡上の気泡速度から液相速度を求める制度

## Application to Bubble Plume

Cheng and Murai (2005)



気泡画像

気相速度

終端速度偏差

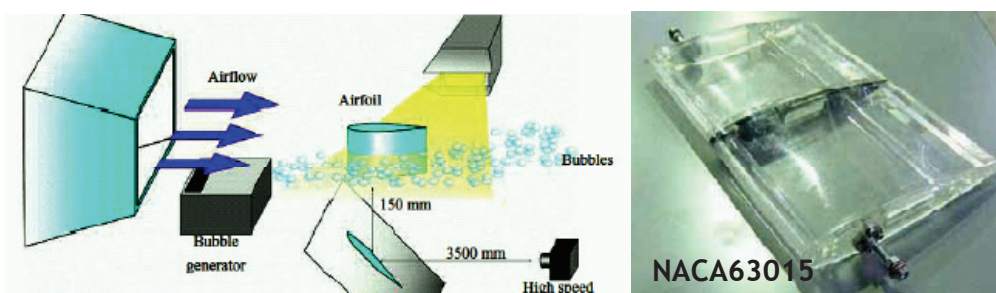
逆解析

# Aero-PIV Project

## 科研「気流環境の時空間構造測定に向けたPIV開拓研究」

風洞以外での応用時に追従性が高く扱いやすい粒子がない

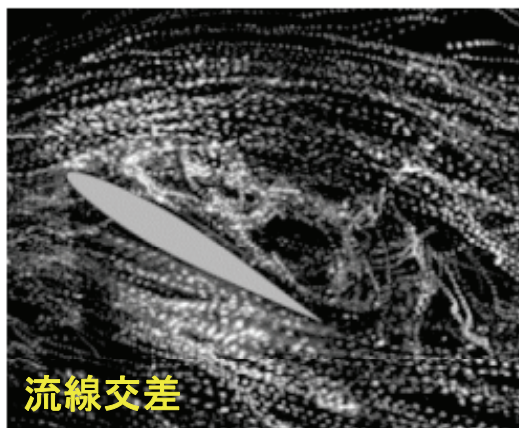
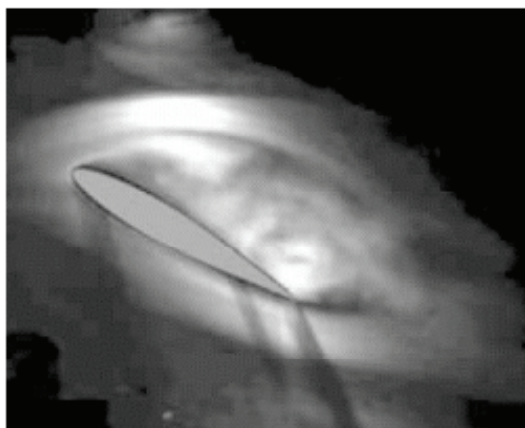
1. 流れの最短波長を表現するトレーサ濃度ゆらぎ
2. 環境ネガティブインパクトのないトレーサ物質
3. 流れにトレースしない準トレーサによるPTV逆解析 →今回



# PIV for Airfoil

失速翼の実験

Kanda and Murai (2007)

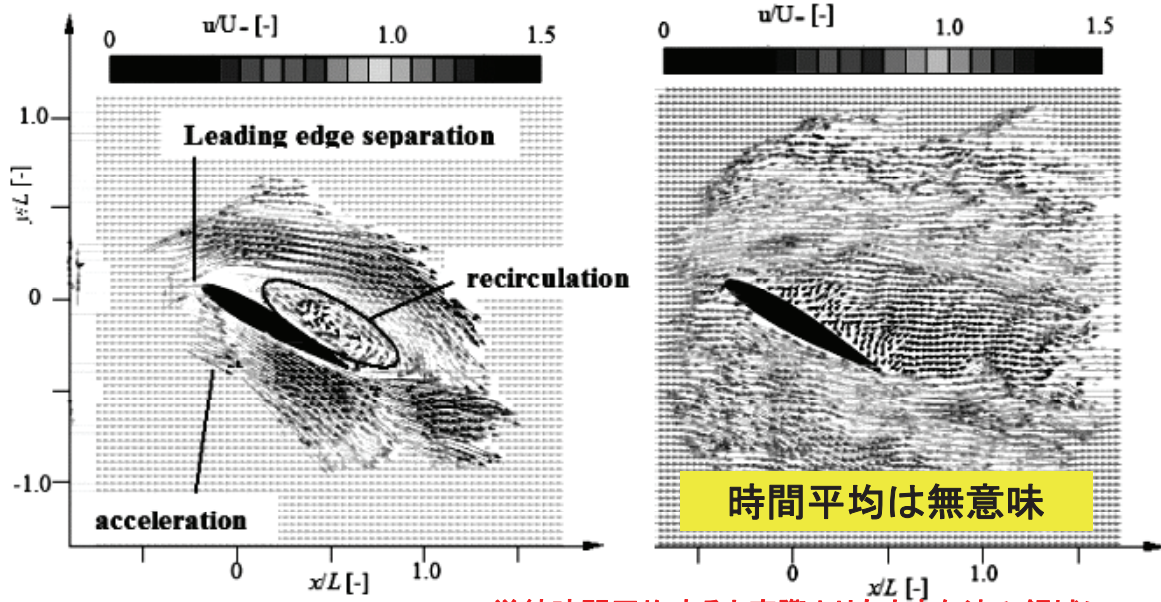


Water Mist

Soap Bubbles

$$\rho_b = \frac{\rho_w (4\pi r_b^2 \delta) + \rho (4/3)\pi (r_b - \delta)^3}{(4/3)\pi r_b^3}$$

# Mist V.S. Soap Bubbles

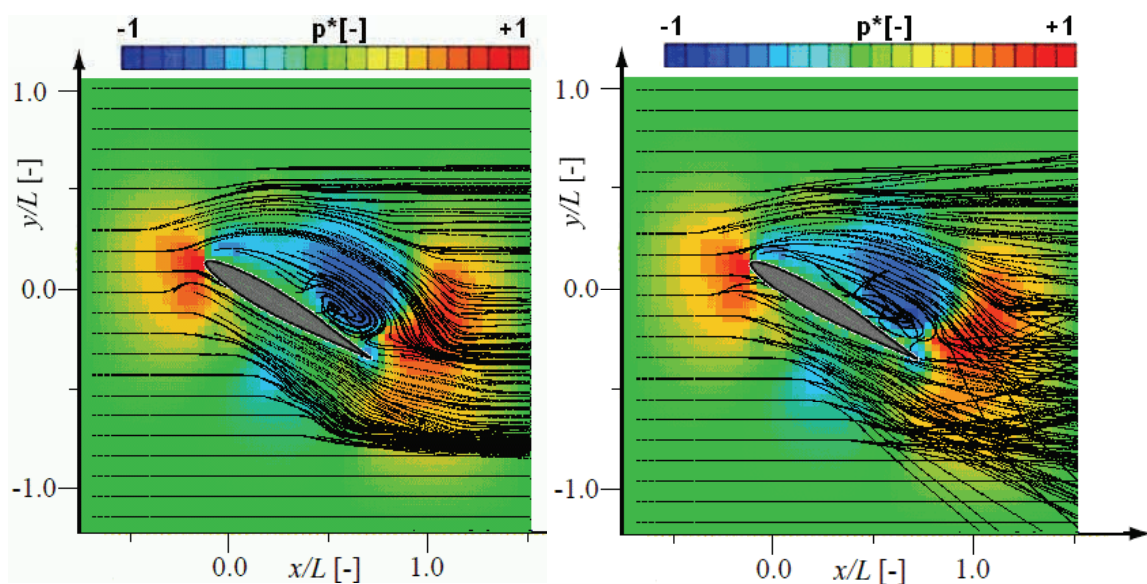


(a) Water mist image

(b) Soap bubble image

単純時間平均すると実際よりも大きな淀み領域に

# Soap Bubble Trajectory



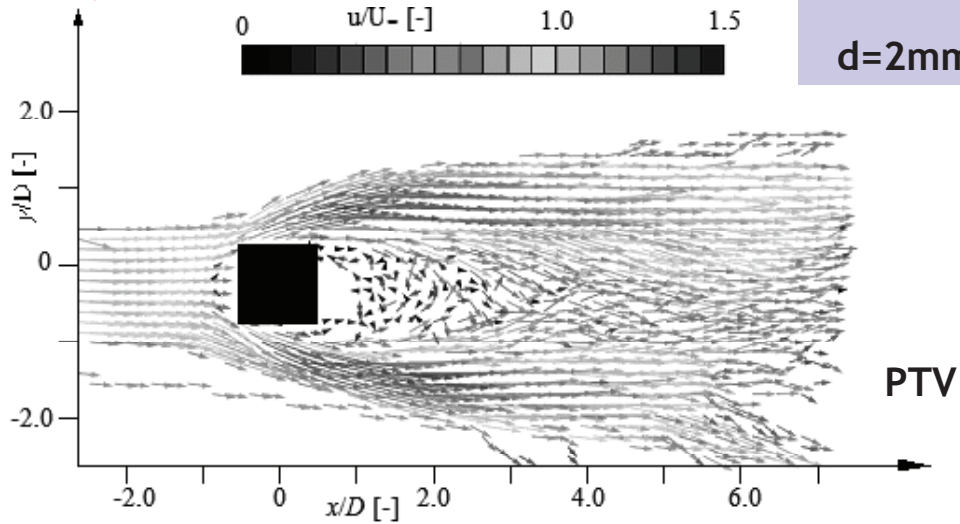
Density Ratio=1

7mm / Density Ratio=7

流脈線が交差 → だからこそ加速度を経由した逆解析へ

## Soap in Karman Vortex

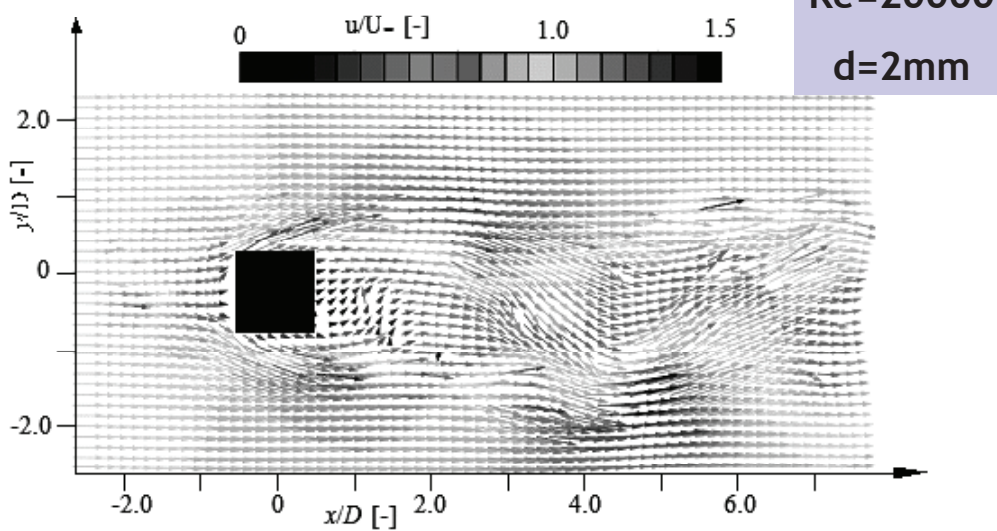
交差が頻発する



シャボン玉そのものの動きではカルマン渦が見えない

## Carrier Flow Field

加速度ベクトル場も交差している... 初期値問題



運動方程式を逆算することでカルマン渦が見えてきた

LFC Div. of Energy & Environment School of Engineering Hokkaido University Search: Laboratory for Flow Control 35

## Summary

1. 追従性が不完全な粒子をトレーサとして用いた場合、PIVおよびPTVによる結果は真値に対して著しく変化する。しかしその並進運動方程式が確立していれば、**加速度ベクトル**と時空間補間操作を介して流体の非定常な速度ベクトル場を復元することができる。
2. マイクロバブルのように運動方程式を構成する力の要素の数が少ないと、情報量が有効活用されず復元精度が保証されにくくなる。またそのようなケースでは流体と粒子の運動量交換も**構造化**し、逆解析が不適となる。
3. 1mmオーダーの気泡やシャボン玉のように多数の要素が複合した運動方程式をもつほうが流体の速度ベクトルの推定においてより正確な**拘束条件**(解の唯一性)を与えることとなる。

LFC Div. of Energy & Environment School of Engineering Hokkaido University Search: Laboratory for Flow Control 36

## Advantage of PTV

### 短所と見る場合

1. トレーサ粒子濃度を小さく抑えて重ならないように撮像しなければならない。
2. そのままでは流線や渦度が出ないので高度な後処理演算が必要。
3. 3時刻以上の追跡を可能とするように時間的連続性を保証する撮影が必要。

### 長所への読替え

1. 個々のトレーサ粒子の速度ベクトルを**高い精度で計測**。補間法次第でPIVの精度を超える。
2. 3時刻以上の追跡では常に**加速度ベクトル**も同時計測される。
3. 時間的連続性さえあれば流体に完全に追従する**トレーサである必要性から解放される**。

第4回 EFD/CFD 融合ワークショップ(2011年1月25日)

流体科学と EFD/CFD 融合:乱流研究から見る平均場ダイナモ  
 Fluid Science and EFD/CFD Integration: Mean-Field Dynamo in Light of Turbulence Research

吉澤 徹(JAXA、客員)

本小論は以下の2点からなる:

(1)ダイナモの概論

ダイナモ:地磁気、太陽磁場、その他の天体磁場(降着円盤磁場など)の発生・維持機構

(2)乱流研究からの示唆

乱流モデリング(= CFD)とは

EFD による知見 → その一部(巨視的性質)を数式で表現 → メカニズムの提起

(EFD ヘフィードバック)

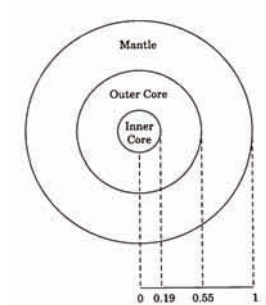
(a)レイノルズ平均モデリングの視点での平均場ダイナモ(モデリングからの示唆)

(b)降着円盤の双極ジェットと超音速および旋回効果(現象面からの示唆)

1

1 磁場が密接する典型的な天体現象

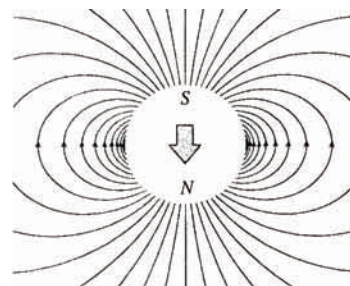
A 地磁気



地球半径:6300 km

内核:固体の鉄 外核:溶融鉄

マントル:ケイ素



ポロイダル磁場の巨視的構造:双極子成分

(トロイダル磁場はマントルにより観測不能)

興味深い事象例[1]:

(a)数十万年単位の双極子磁場の反転(逆転)

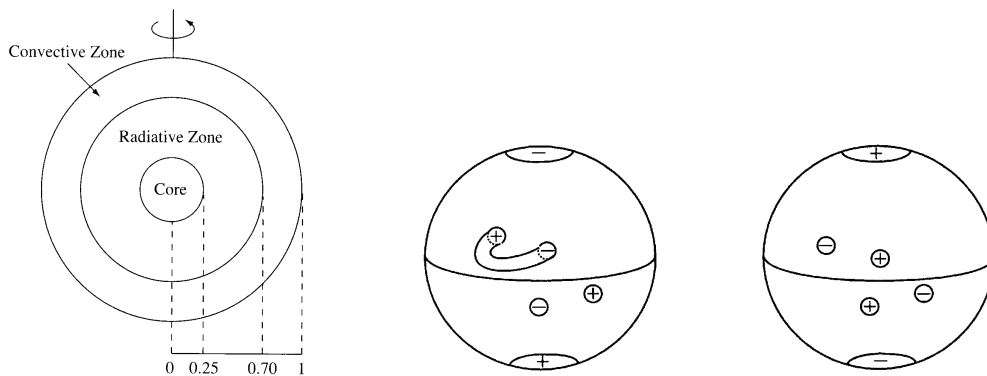
(b)単位体積当たりのエネルギー比の謎(磁場エネルギー >> 溶融鉄の運動エネルギー)

2



B 太陽磁場

太陽半径:73 万 km 主成分:水素(70%) ヘリウム(30%)



内部構造

黒点:対流層のトロイダル磁場の断面

興味深い事象例:

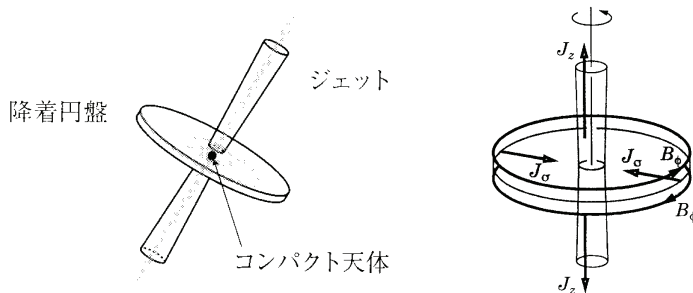
- (a) 黒点の極性則(例:先頭黒点の極性と極磁場の極性が一致)
- (b) 黒点に関する約 11 年周期

3

C 降着円盤:双極ジェット[2]



天文ジェット



中心天体:

- 原始星 (質量:太陽程度まで ジェット速度:~100 km/s)
- 活動銀河核(質量:太陽の数億倍まで ジェット速度:光速に近い) → 相対論

興味深い事象例:

- (a) ジェットの発生(旋回流 → 角運動量の放出とも関連)
- (b) ジェットのコリメーション(平行性)

4

2 平均場ダイナモとは[3-7]

ダイナモ : 流れによって磁場が発生・維持される機構

平均場ダイナモ: 磁場の巨視的性質を対象とする

地磁気の双極子磁場

太陽のトロイダル磁場(黒点の起源)

天文ジェットにおける旋形状磁場

A アルヴェン速度単位

$$\frac{p}{\rho} \rightarrow p \quad \frac{\mathbf{b}}{\sqrt{\rho\mu_B}} \rightarrow \mathbf{b} \quad \frac{\mathbf{j}}{\sqrt{\rho I \mu_B}} \rightarrow \mathbf{j}$$

$\rho$  : 密度     $p$  : 圧力     $\mathbf{b}$  : 磁場(磁束密度)     $\mathbf{j}$  : 電流密度

$\mu_B$  : 透磁率

特徴:  $\mathbf{b}$  の単位が速度となる

5

B 電磁流体方程式(説明を簡単にするため、密度一定の場合を考える)

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) u_i = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + (\mathbf{j} \times \mathbf{b})_i + \nu \nabla^2 u_i + G_i$$

$\mathbf{G}$  : 体積力(コリオリ力、ブジネスク近似による浮力など)

$$\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{b}) + \lambda_M \nabla^2 \mathbf{b} \quad \Leftarrow \quad \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{e} \quad \mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{b} \quad = \quad \frac{1}{\lambda_M} (\mathbf{e} + \mathbf{u} \times \mathbf{b})$$

電磁誘導則      アンペール則      オーム則

$\lambda_M$  : 磁気拡散率       $\mathbf{e}$  : 電場

高磁気レイノルズ数 ( $\lambda_M \rightarrow 0$ )  $\Rightarrow$  磁力線は流体に凍結

6

## C Cowling の反ダイナモ

軸対称磁場(例:ポロイダル磁場の双極子成分)は軸対称速度場では維持できない

↓

軸対称性からのずれが不可欠

↓ レイノルズ数大 ← 地球外核:  $o(10^8)$

乱流状態を想定

7

## D 平均場方程式

$$f = F + f' \quad F = \langle f \rangle$$

$$f = (\mathbf{u}, p, \mathbf{b}, \mathbf{j}, \mathbf{e}, \boldsymbol{\omega}) \quad F = (\mathbf{U}, P, \mathbf{B}, \mathbf{J}, \mathbf{E}, \boldsymbol{\Omega}) \quad f' = (\mathbf{u}', p', \mathbf{b}', \mathbf{j}', \mathbf{e}', \boldsymbol{\omega}') \quad \boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{u}$$

$$\frac{DU_i}{Dt} \equiv \left( \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \right) U_i = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( P + \left\langle \frac{1}{2} \mathbf{b}^2 \right\rangle \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-R_{ij}) + \langle G_i \rangle + \nu \nabla^2 U_i \quad \nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{U} \times \mathbf{B} + \mathbf{E}_M) + \lambda_M \nabla^2 \mathbf{B} \quad \mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{\lambda_M} (\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B} + \mathbf{E}_M)$$

$$R_{ij} = \langle u'_i u'_j - b'_i b'_j \rangle$$

$$\mathbf{E}_M = \langle \mathbf{u}' \times \mathbf{b}' \rangle$$

レイノルズ応力

乱流起電力(乱れによる電流への寄与)

平均場ダイナモ ← 電磁流体乱流のレイノルズ平均モデリング

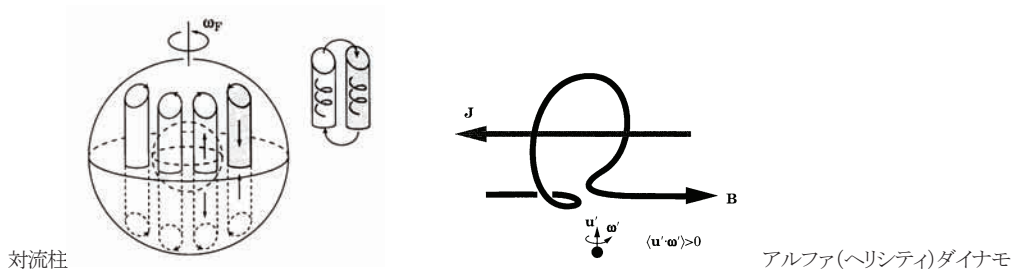
8

E 平均場ダイナモの標準モデル:乱流起電力  $\mathbf{E}_M$  のモデリング

主たる関心は磁場の発生・維持機構にある → 運動論的ダイナモ (kinematic dynamo)

流体運動の駆動力(浮力:動径方向) + 回転(コリオリ力)

(Taylor-Proudman の定理 → 2次元化)



$$\mathbf{E}_M = \alpha\mathbf{B} - \beta\mathbf{J} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{J} = \frac{1}{\lambda_M + \beta} (\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B} + \alpha\mathbf{B})$$

$\alpha\mathbf{B}$  : アルファ効果 → 磁場  $\mathbf{B}$  に平行な電流の発生 (オーム則:  $\mathbf{B}$  に垂直)

$\beta\mathbf{J}$  : 乱流(異常)抵抗効果 → 磁場の乱流拡散の増大

9

3 乱流モデリングから見る平均場ダイナモの標準モデルの欠陥

浮力などの熱効果 →  $R_{ij}$       平均歪みや平均渦度などの流れ効果 → 熱フラックス

A 乱流起電力  $\mathbf{E}_M$

(a) 流れ(平均流) 効果の欠如

(b) 速度場への反作用の欠如

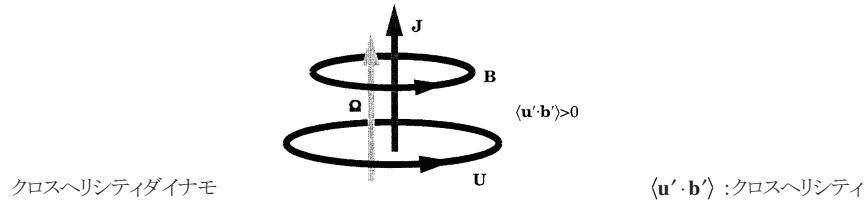
$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} = \frac{1}{\lambda_M + \beta} (\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} \quad (\alpha\mathbf{B} \times \mathbf{B} = 0)$$

B レイノルズ応力  $R_{ij}$

速度場を仮定 → 運動論的ダイナモ:  $R_{ij}$  は考察されていない

運動論的ダイナモ(標準モデル)の欠陥を平均場ダイナモの欠陥と混同

C 磁場と速度場のカップリングの組み込み[6-8]:乱流モデリングからの示唆



$$\mathbf{E}_M = \alpha \mathbf{B} - \beta \mathbf{J} + \gamma \boldsymbol{\Omega} \quad \rightarrow \quad \mathbf{J} = \frac{1}{\lambda_M + \beta} (\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B} + \alpha \mathbf{B} + \gamma \boldsymbol{\Omega})$$

(渦運動効果)

$$\gamma \propto \langle \mathbf{u}' \cdot \mathbf{b}' \rangle \quad \rightarrow \quad \mathbf{J} \times \mathbf{B} \text{ に対する平均渦度 } (\boldsymbol{\Omega}) \text{ 効果}$$

$$R_{ij} = \frac{1}{3} R_{\ell\ell} \delta_{ij} - \nu_T S_{ij} + \nu_M M_{ij} \quad S_{ij} = \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad M_{ij} = \frac{\partial B_j}{\partial x_i} + \frac{\partial B_i}{\partial x_j}$$

(磁場歪み効果)

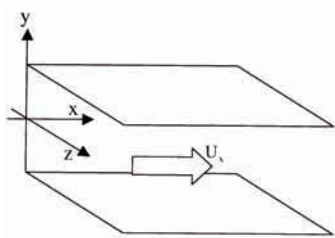
$$S_{ij} : \text{平均速度歪み} \quad M_{ij} : \text{平均磁気歪み} \quad \nu_T : \text{乱流粒粘性率} \quad \nu_M \propto \langle \mathbf{u}' \cdot \mathbf{b}' \rangle$$

11

D カップリング効果の 必要性

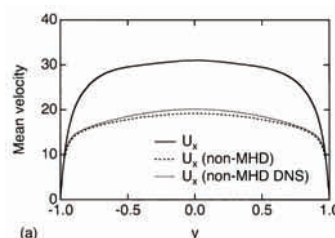
標準モデルのアルファ(ヘリシティ)効果では説明できない磁場発生例が少なくない[9, 10]

例: 平板間流れの LES (平均速度シエア → 平均渦度 → 平均電流 → 平均電流) [10]

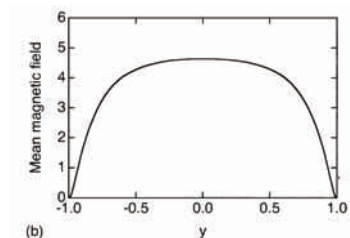


平行平板間流れ

(差動回転を模擬)



平均流  $U_x$



平均磁場  $B_x$

$\mathbf{B}$  と  $\mathbf{U}$  の整列 ← クロスヘリシティ効果

12

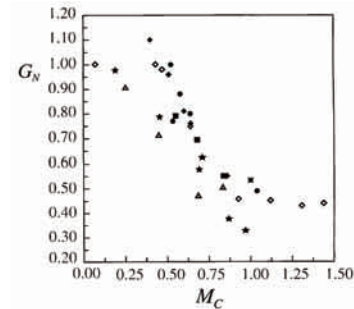
4 乱流モデリングからと天文ジェット研究への示唆

天文ジェットの特性: 旋回流(角運動量の放出) + 超音速流

A 超音速混合層の研究からの示唆

A1 成長率低下の観測[11] → 乱流拡散の低下 → コリメーションに寄与

EFD → CFD (モデリング)



$$M_C = \frac{U_1 - U_2}{a_1 + a_2} \quad G = \frac{d\delta}{dx} \quad G_N = \frac{G}{\lim_{M_C \rightarrow 0} G}$$

$M_C$  : 対流マッハ数     $a$  : 音速     $\delta$  : 混合層厚さ     $G$  : 成長率

13

A2 拡大率低下のモデリング[12,13]

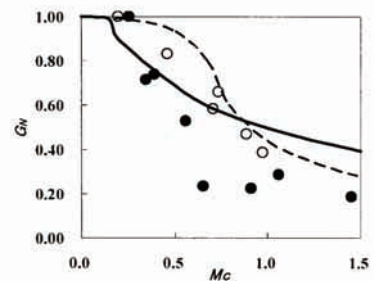
非平衡効果(→ 平板境界層流れでは弱い) × 超音速効果

$$\rightarrow \left( \frac{1}{K} \frac{D}{Dt} \frac{K^2}{\varepsilon} \right) \times M_T^2 \quad M_T = \frac{\sqrt{2K}}{\bar{a}}$$

$M_T$  : 乱流マッハ数     $\bar{a}$  : 平均音速

$$v_T = C_v \frac{K^2 / \varepsilon}{\Lambda} \left( 1 - C_{BA} \frac{1}{\Lambda} \left( 1 + C_M M_T^2 \right) \frac{1}{K} \frac{D}{Dt} \frac{K^2}{\varepsilon} \right)$$

$\Lambda$  : 時間スケール補正因子



**EFD** (拡大率低下) → 乱流モデリング (**CFD**): 非平衡超音速効果の指摘

→ 拡散低下機構の提起 ⇒ 天文ジェットの**コリメーション**

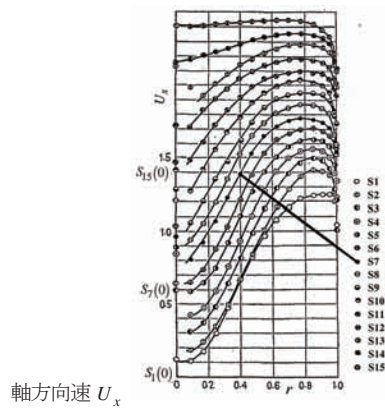
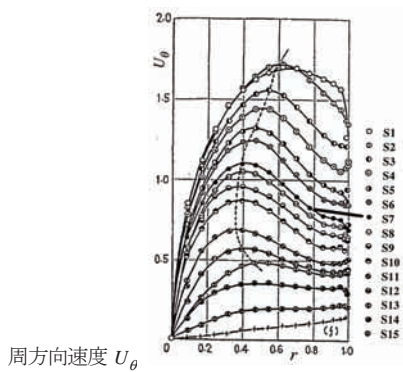
(EFD へフィードバック)

14

B 旋回流研究からの示唆

B1 円管内旋回流[14 - 16]

円柱座標  $(x, r, \theta)$



円管内旋回流の顕著な特性:EFD の知見

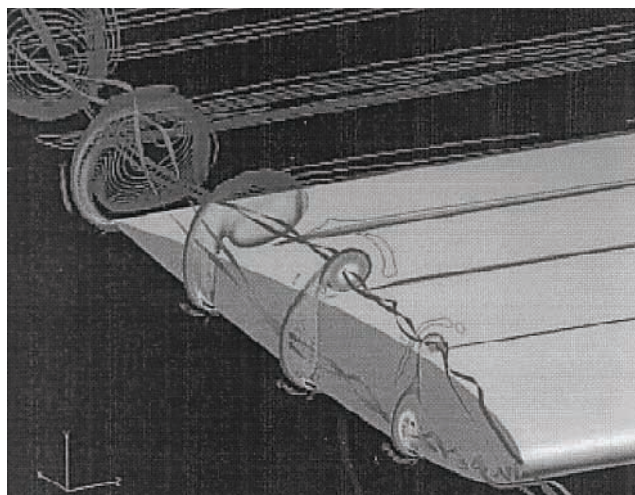
入口付近(S1)から管径の約 60 倍の距離の地点(S7)での  $U_x$  の変化はたいへん小さい



乱流拡散の低下

B2 翼端渦[17, 18]

渦中心速度が減速 → 円管内旋回流と類似



## B3 ヘリシティ効果

渦度方程式

$$\frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega}) + \nu \nabla^2 \boldsymbol{\omega}$$

$$\frac{(\mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega})^2}{|\mathbf{u}|^2 |\boldsymbol{\omega}|^2} + \frac{(\mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\omega})^2}{|\mathbf{u}|^2 |\boldsymbol{\omega}|^2} = 1 \quad (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1)$$

→  $\mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\omega}$  は  $\mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega}$  (エネルギーカスケード)を規定するパラメター→  $\mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\omega}$  大  $\Rightarrow$   $\mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega}$  小 $\mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\omega}$  :ヘリシティ( $\mathbf{u}$  と  $\boldsymbol{\omega}$  の整列度)→  $\mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\omega}$  の乱流粘性率への組み込み

問題点:ガリレイ不変ではない(準拠する座標に依存)

17

## B3 乱流モデリング:ヘリシティ効果の乱流粘性率への組み込み[19]

平均流のヘリシティ:

$$\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\Omega} \equiv U_\theta \Omega_\theta + U_x \Omega_x \quad \Omega_\theta \equiv -\frac{\partial U_x}{\partial r}$$

$$U_x \Omega_x \leftarrow \text{ガリレイ不変ではない}$$

旋回流の本質:周方向流と軸流の凹み

→ 旋回流を特徴づける量:  $U_x \Omega_x$  → ガリレイ不変となる $U_x \Omega_x$  を含む量:

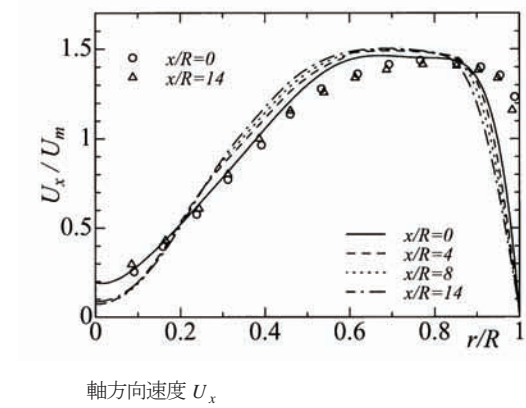
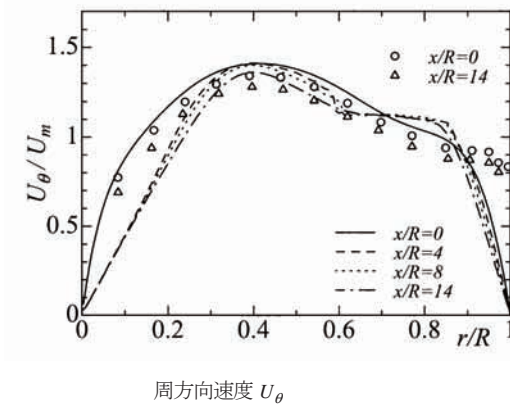
$$\left( \frac{D\Omega}{Dt} \right)_r \equiv -\frac{U_\theta \Omega_\theta}{r}$$

18



乱流粘性率への組み込み ← 時間スケール  $\tau$

$$v_T \propto K\tau \rightarrow v_T = C_v \frac{K^2 / \varepsilon}{\Lambda} \quad \Lambda = \sqrt{1 + C_s \left(\frac{K}{\varepsilon} S_{ij}\right)^2 + C_{\Omega L} \left(\frac{K}{\varepsilon} \Omega\right)^2 \left(\frac{K^2}{\varepsilon^2} \frac{D\Omega}{Dt}\right)^2}$$



EFD (拡散の低下) → 乱流モデリング (CFD): ヘリシティ効果の指摘

→ 拡散低下機構の提起 ⇒ 天文ジェットのコリメーション

(EFD ヘフィードバック)

19

## 5 結論

(a) 平均場ダイナモ研究への示唆

乱流モデリングでの典型的なカップリング効果の研究: レイノルズ応力  $R_{ij}$  への浮力効果など

↓

磁場と速度場のカップリング効果の組み込み

(b) 天文ジェット研究への示唆

乱流モデリングでの超音速および旋回効果の研究: 超音速混合層、円管旋回流

↓

超音速および旋回効果による乱流拡散の低下機構の考察

乱流の EFD/CFD 研究は、自然科学研究で見過ごされている特性に光を当てることができる

## 参考文献

- [1] 横井喜充, 下村 裕, 半場藤弘, 岡本正芳: 乱れと流れ. 培風館, 2008.
- [2] 柴田一成, 福江 純, 松本亮治, 嶺重 慎: 活動する宇宙. 裳華房, 1999.
- [3] Moffatt, H. K.: Magnetic Field Generation in Electrically Conducting Fluids. Cambridge University Press, Cambridge, 1978.
- [4] Krause F and Radler, K-H.: Mean-Field Magnetohydrodynamics and Dynamo Theory. Pergamon Press, Oxford, 1980.
- [5] Biskamp, D.: Magnetohydrodynamic Turbulence. Cambridge University Press, Cambridge, 2003.
- [6] Yoshizawa, A., Itoh, S.-I., and Itoh, K.: Plasma and Fluid Turbulence. Institute of Physics Publishing. Bristol, 2003.
- [7] Yoshizawa, A., Itoh, S.-I., Itoh, K., and Yokoi, N.: Dynamos and MHD theory of turbulence suppression. Plasma Physics and Controlled Fusion, 46, R25 (2004).
- [8] Yoshizawa, A.: Self-consistent turbulent dynamo modeling of reversed-field pinches and planetary magnetic fields. Physics of Fluids B, 2, 1589 (1990).
- [9] Sur, A. and Brandenburg, A.: The role of the Yoshizawa effect in the Archontis dynamo. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 399, 273 (2009).
- [10] Hamba, F. and Tsuchiya, M: Cross-helicity dynamo effect in magnetohydrodynamic channel flow. Physics of Plasmas, 17, 012301 (2010).
- [11] Lanuder, B. E. and Sandham, N. D.: Closure Strategies for Turbulent and Transitional Flows. Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
- [12] Yoshizawa, A., Nisizima S., Shimomura, Y., Kobayashi, H., Matsuo, Y., Abe, H., and Fujiwara, H.: A new methodology for Reynolds-averaged modeling based on the amalgamation of heuristic-modeling and turbulence theory methods. Physics of Fluids, 18, 035109 (2006).
- [13] Kim, J. and Park, S. O.: New compressible turbulence models for free and wall-bounded shear layers. Journal of Turbulence, 11, N10 (2010).
- [14] 村上光清, 鬼頭修巳, 片山 裕, 飯田芳彦: 旋回を伴う管内流れの実験的研究. 日本機械学会論文集, 41, 1793 (1975).
- [15] Murakami, M., Kito, O., Katayama, Y., and Iida, Y.: An experimental study of swirling flow in pipes. Bulletin of the JSME, 19, 118 (1976).
- [16] Kitoh, O.: Experimental study of turbulent swirling flow in a straight pipe. Journal of Fluid Mechanics, 225, 445 (1991).
- [17] 渡辺重哉, 加藤裕之, 雷 忠, 今村太郎, 榎本俊治: PIV (粒子画像流速測定法)を用いた CFD コード検証について. 宇宙航空研究開発機構特別資料 (JAXA-SP-04-12), 178 (2004).
- [18] 榎本俊治, 今村太郎, 山本一臣: NACA0012 翼端渦の乱流数値解析. 宇宙航空研究開発機構特別資料(JAXA-SP-04-12), 63 (2004).
- [19] Yoshizawa, A., Abe, H., Fujiwara, H., Mizobuchi, Y. and Matsuo, Y.: Turbulent-viscosity modeling applicable to swirling flows, based on a composite time scale with mean-flow helicity partially incorporated. Journal of Turbulence. 12, N 5 (2011).

第4回EFD/CFD融合ワークショップ  
2011年1月25日、秋葉原コンベンションホール

# 気象学における 4次元変分法データ同化

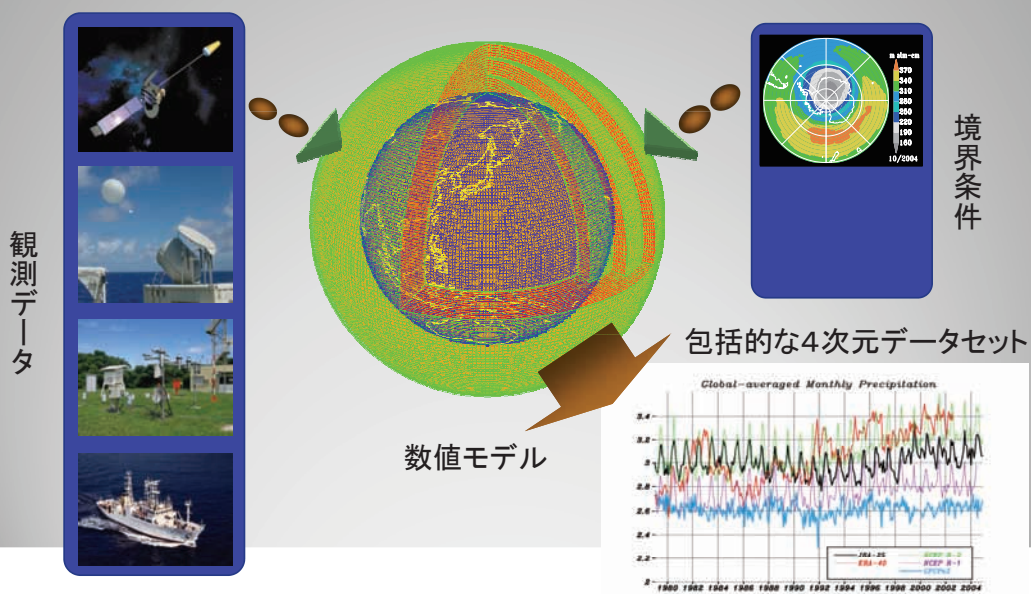
気象研究所予報研究部  
露木 義

## 講演の内容

1. データ同化と数値天気予報
2. 4次元変分法によるデータ同化
3. 変分法とカルマンフィルタ
4. データ同化の課題

# 1. データ同化と数値天気予報

## データ同化 観測と数値シミュレーションの融合手段



## データ同化の目的

### • 対象

- 時間発展する大規模かつ複雑なシステム  
(大気、海洋、・・・)

### • 目的

- 包括的な4次元データセットの作成
  - ➡ 研究の基盤的データ
- 数値モデルの初期値の推定
  - ➡ 数値天気予報、数値シミュレーション
- 数値モデルのパラメータの推定
  - ➡ 経験的定数、モデル誤差、発生・吸収源
- 観測システムの評価・設計 など

## データ同化の歴史（1）

データ同化は数値天気予報(NWP)から始まった

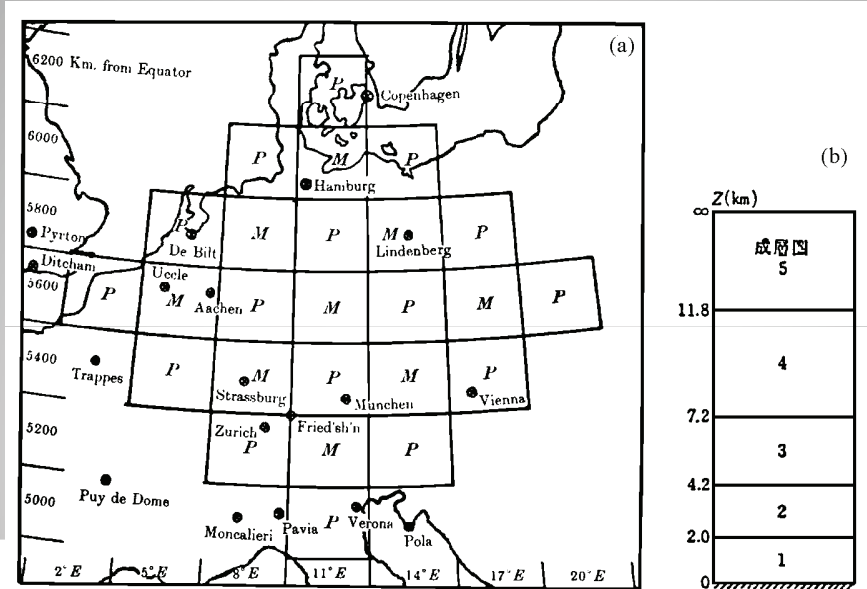
- **1922** Richarsonが手計算で数値天気予報を試みたが失敗（145hPa/6hの気圧変化を予測）
- **1950** Charneyらが電子計算機ENIACにより数値予報実験に成功（1日予報に1日要した）

初期値：主観（手書き）解析から客観（計算機）解析へ

- **1954** スウェーデン気象水理局が数値予報業務開始
- **1959** 気象庁が数値予報業務開始（世界で3番目）

客観解析法：関数あてはめ法、逐次修正法、最適内挿法  
(後二者では、モデル予報値を第一推定値に採用)

## Richardsonの実験の格子と観測点 (1910年5月20日07UTC)



Richardson (1922)

## データ同化の歴史 (2)

### 非定時観測データへの対応

- **1969** Charneyらがデータ同化を提唱
- **1979** 全球大気研究計画第1回全球実験  
⇒ 全球大気観測システムの確立

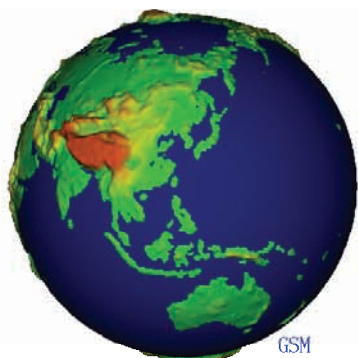
### データ同化の発展

- **1980年代～** 変分法やカルマンフィルタの研究
- **1990年代～** 全球大気長期再解析の実施

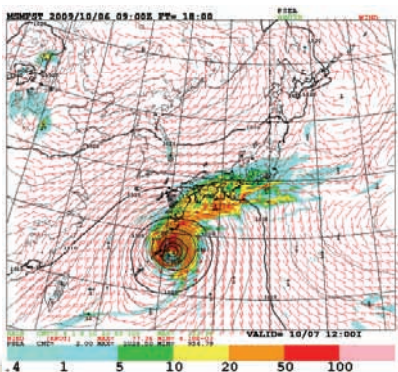
### 他の分野では、たとえば

- **1980年代～** 海洋データ同化の研究
- **1990年代後半～** 微量物質輸送データ同化の研究

# 気象庁の主な数値予報モデル



GSM



**全球モデル**  
 水平20 km 鉛直60層  
 9日予報  
 天気予報、週間予報など

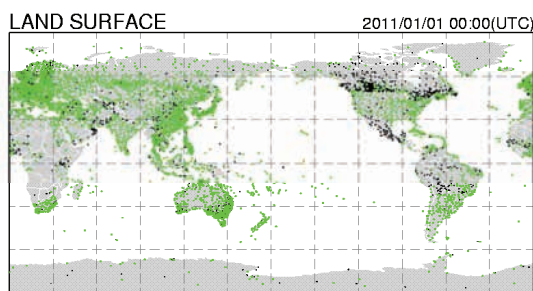


側面境界条件

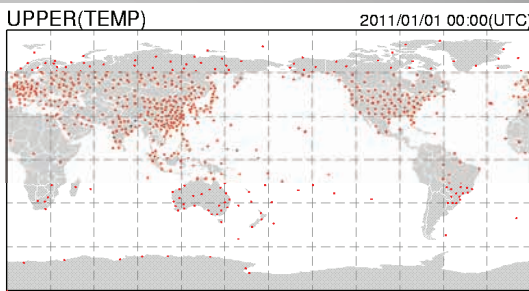
**メソモデル**  
 水平5 km 鉛直50層  
 33時間予報  
 防災気象情報、航空予報など

データ同化はいずれも4次元変分法(4DVar)

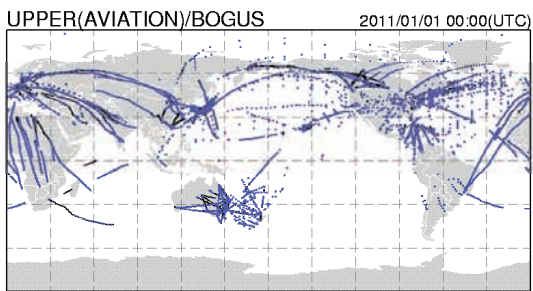
# 気象庁全球解析の観測データ (1)



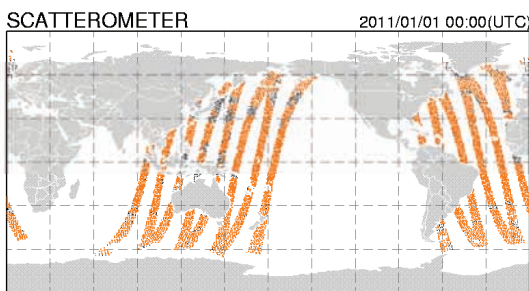
SYNOP(●) 3923 METAR  
 NOUSE(●) 11247 NOUSE(●) 3749  
 ALL: 15170 ALL: 3749



TEMP(●) 628  
 NOUSE(●) 6  
 ALL: 634

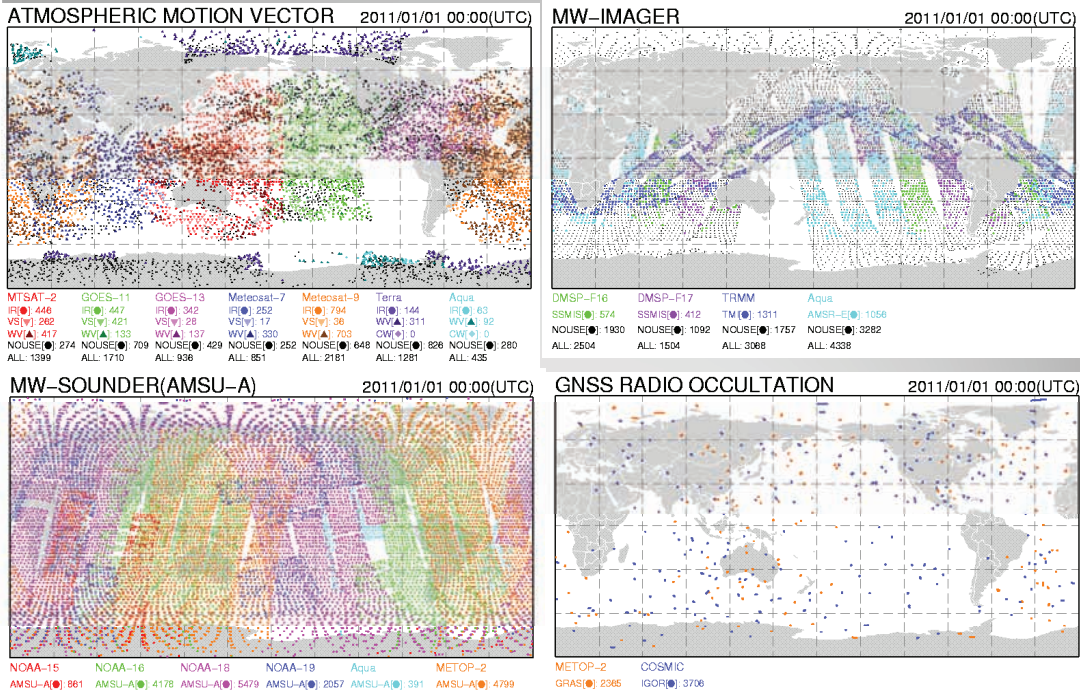


TYBOGUS(●) 0 YHTC AVIATION(●) 3939  
 NOUSE(●) 0 NOUSE(▼) 15427  
 ALL: 0 ALL: 0 ALL: 19386



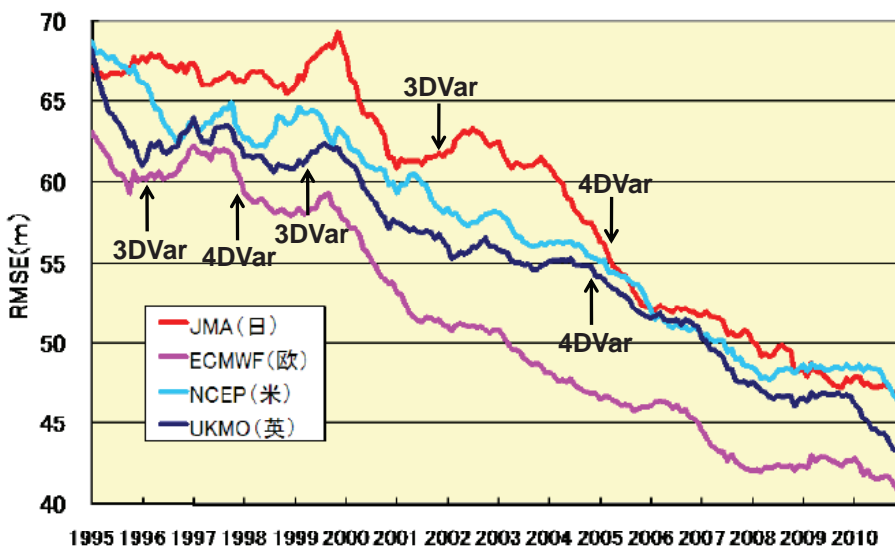
METOP-2  
 ASCAT(●) 4967  
 NOUSE(●) 932  
 ALL: 5979

# 気象庁全球解析の観測データ (2)



# NWPセンターの予報誤差の比較

図6-3 2010年11月までの北半球500hPa高度予報誤差(120時間予報)





## 2. 4次元変分法によるデータ同化

### 4DVar (強拘束)

評価関数 (予報誤差と観測誤差がガウス分布する場合)

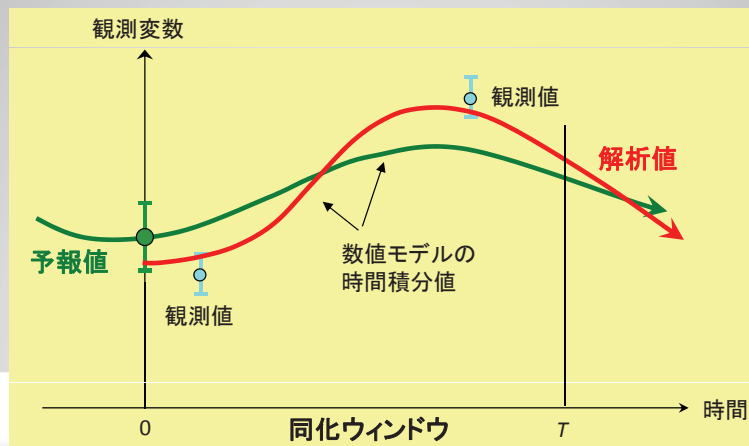
$$J(\mathbf{x}_0) = \frac{1}{2}(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_0^f)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_0^f) + \frac{1}{2}[H(M(\mathbf{x}_0)) - \mathbf{y}^o]^T \mathbf{R}^{-1}[H(M(\mathbf{x}_0)) - \mathbf{y}^o]$$

$M$  : モデルの時間推進演算子

$H$  : 観測演算子

$B$  : 背景(予報)誤差共分散行列

$R$  : 観測誤差共分散行列



## Adjoint 法

数値モデル  
( $\mathbf{c}$  : パラメータ)

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{F}(t, \mathbf{x}(t); \mathbf{c})$$

評価関数

$$J(\mathbf{x}(0), \mathbf{c}) = \int_0^T f(t, \mathbf{x}(t); \mathbf{c}) dt$$

### ・評価関数の勾配ベクトルの計算

Adjoint モデル

$$-\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \left( \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} \right)^T \mathbf{p}(t) + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \quad (\mathbf{p}(T) = \mathbf{0})$$

勾配ベクトル

$$\nabla_{\mathbf{x}(0)} J = \mathbf{p}(0)$$

$$\nabla_{\mathbf{c}} J = \int_0^T \left( \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{c}} \right)^T \mathbf{p}(t) dt + \int_0^T \frac{\partial f}{\partial \mathbf{c}} dt$$

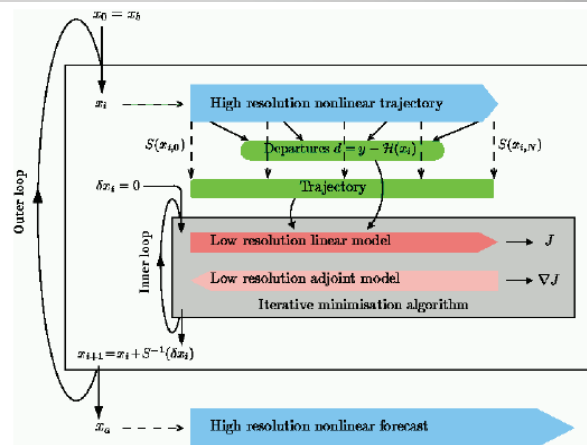
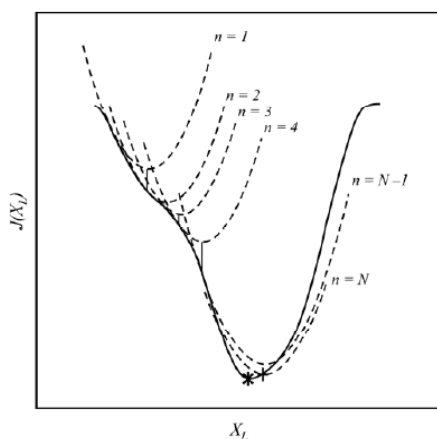
### ・反復法による評価関数の最小値探索

Quasi-Newton法、またはConjugate gradient法

## Incremental 4DVar

### 計算量を大幅に減らすために・・・

- ・評価関数を局所的に2次関数で近似して反復的に解く
- ・局所的探索では、低解像度かつ単純化した線形数値モデルを用いる



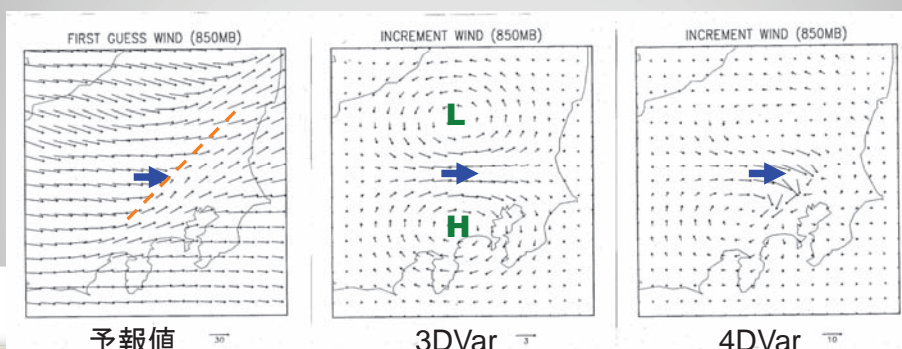
ただし、非線形性が強いとうまくいかない

Andersson et al.(2005)

## 従来の同化法に対する利点

	従来の同化法	4DVar
予報値の修正法	統計的知見を利用	数値モデルを利用
状態変数でない観測データの扱い	状態変数に変換して同化	そのまま同化
非定時観測データの扱い	定時観測データとみなして同化	観測時刻のデータとして同化

### 風の1点観測データによる風の修正量の比較



## 弱拘束4DVar

モデル誤差を考慮する

数値モデルの方程式

$$dx = F(x, t)dt + \varepsilon_t$$

### 1. 制御変数: 初期値とモデル誤差

$$J(x_0, \{\varepsilon_t\}) = \frac{1}{2} (x_0 - x_0^f)^T B^{-1} (x_0 - x_0^f) + \frac{1}{2} [H(M(x_0, \{\varepsilon_t\})) - y^o]^T R^{-1} [H(M(x_0, \{\varepsilon_t\})) - y^o] + \frac{1}{2} \int_0^T \varepsilon_t^T Q^{-1} \varepsilon_t dt$$

### 2. 制御変数: 状態変数

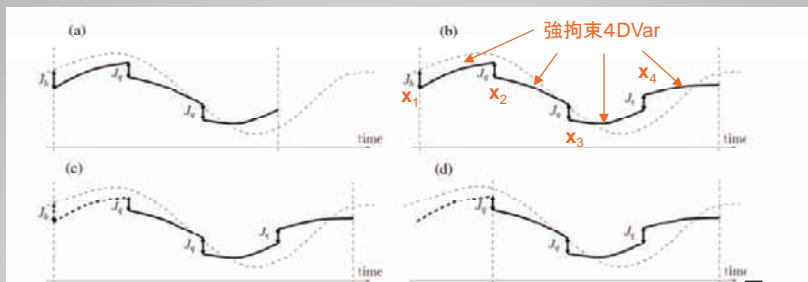
$$J(\{x_t\}) = \frac{1}{2} (x_0 - x_0^f)^T B^{-1} (x_0 - x_0^f) + \frac{1}{2} [H(M(\{x_t\})) - y^o]^T R^{-1} [H(M(\{x_t\})) - y^o] + \frac{1}{2} \int_0^T (x_t - \tilde{x}_t)^T Q^{-1} (x_t - \tilde{x}_t) dt$$

( $\tilde{x}_t$ : モデル誤差を無視して計算した状態変数)

数値天気予報では、2009年にECMWFで初めて導入された。

# Long-window 弱拘束4DVar

弱拘束にすることによって、長い同化ウィンドウを採用できる



Tremolet (2006)

## 評価関数

$$J(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n) = J_1(\mathbf{x}_1) + \dots + J_n(\mathbf{x}_n) + J_q(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + \dots + J_q(\mathbf{x}_{n-1}, \mathbf{x}_n)$$

$$J_q(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{k+1}) := \frac{1}{2} (M(\mathbf{x}_k) - \mathbf{x}_{k+1})^T \mathbf{Q}^{-1} (M(\mathbf{x}_k) - \mathbf{x}_{k+1}), \quad (\mathbf{Q}: \text{モデル誤差共分散})$$

- $J_k(\mathbf{x}_k), \nabla J_k(\mathbf{x}_k)$  ( $k=1, \dots, n$ ) は並列的に計算できる
- 同化ウィンドウが十分長ければ、背景誤差共分散は必要ない

# Ensemble 4DVar (En4DVar)

Adjoint モデルが不要

- アンサンブル予報 ( $m$  メンバー) から背景誤差共分散を近似計算

$$\mathbf{B} = \delta \mathbf{X}^f (\delta \mathbf{X}^f)^T, \quad \delta \mathbf{X}^f := \frac{1}{\sqrt{m-1}} (\mathbf{x}_1^f - \mathbf{x}^f, \dots, \mathbf{x}_m^f - \mathbf{x}^f)$$

- 状態変数  $\mathbf{x}$  をアンサンブル空間で近似 ( $\mathbf{w}$  :  $m$  次元ベクトル)

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}^f + \delta \mathbf{X}^f \mathbf{w} \quad (\langle \mathbf{w} \rangle = 0, \langle \mathbf{w} \mathbf{w}^T \rangle = \mathbf{I})$$

- 評価関数とその勾配ベクトル (制御変数:  $\mathbf{w}$ )

$$J(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} + \frac{1}{2} [H(M(\mathbf{x}^f + \delta \mathbf{X}^f \mathbf{w})) - \mathbf{y}^o]^T \mathbf{R}^{-1} [H(M(\mathbf{x}^f + \delta \mathbf{X}^f \mathbf{w})) - \mathbf{y}^o]$$

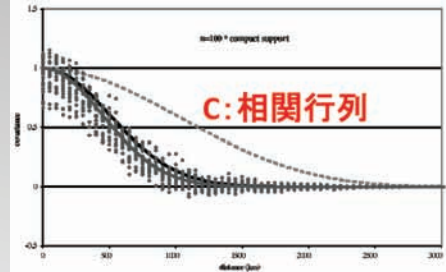
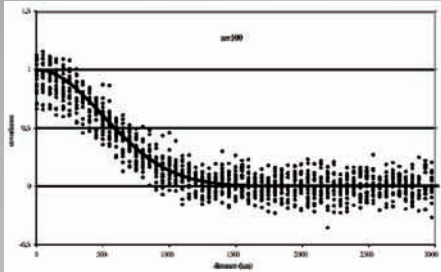
$$\nabla J(\mathbf{w}) = \mathbf{w} + \frac{1}{2} (\mathbf{H} \mathbf{M} \delta \mathbf{X}^f)^T \mathbf{R}^{-1} [H(M(\mathbf{x}^f + \delta \mathbf{X}^f \mathbf{w})) - \mathbf{y}^o]$$

- 勾配ベクトルをアンサンブル予報を使って近似計算

$$\mathbf{H} \mathbf{M} \delta \mathbf{X}^f = \frac{1}{\sqrt{m-1}} [H(M(\mathbf{x}_1^f)) - H(M(\mathbf{x}^f)), \dots, H(M(\mathbf{x}_m^f)) - H(M(\mathbf{x}^f))]$$

# 共分散の局所化

誤差共分散のサンプリングエラーを抑える (EnKF)



Lorenz (2003)

En4DVarでは・・・

$$\mathbf{B} = \mathbf{C} \circ (\delta \mathbf{X}^f (\delta \mathbf{X}^f)^T) \quad (\circ : \text{Schur 積})$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}^f + (\text{diag}[\delta \mathbf{X}_1^f] \mathbf{C}', \dots, \text{diag}[\delta \mathbf{X}_m^f] \mathbf{C}') \mathbf{w}$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}' \mathbf{C}'^T, \quad \text{diag}[\delta \mathbf{X}_k^f] := \frac{1}{\sqrt{m-1}} \begin{pmatrix} (\mathbf{x}_k^f - \mathbf{x}^f)_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & (\mathbf{x}_k^f - \mathbf{x}^f)_n \end{pmatrix}$$

$\mathbf{C}' : n \times r$  行列       $\mathbf{w} : m \cdot r$  次元

## 3. 変分法とカルマンフィルタ

## データ同化・予測問題

- 状態変数  $\mathbf{x}(t)$  の時間発展 ( $\beta_t$ : Brown運動)

$$d\mathbf{x} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, t)dt + \mathbf{G}(\mathbf{x}, t)d\beta_t, \quad \langle d\beta_t d\beta_{t'}^T \rangle = \mathbf{Q}(t)\delta(t-t')dt dt'$$

- 確率密度関数  $p(\mathbf{x}, t)$  の時間発展: **Fokker-Planck 方程式**

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} (p F_i) = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [p (\mathbf{G} \mathbf{Q} \mathbf{G}^T)_{ij}]$$

- 観測データ  $\mathbf{y}$  による  $p(\mathbf{x}, t)$  の収縮: **Bayesの定理**

$$p(\mathbf{x}(t_k) | \mathbf{y}_0, \dots, \mathbf{y}_k) = \frac{p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}(t_k)) p(\mathbf{x}(t_k) | \mathbf{y}_0, \dots, \mathbf{y}_{k-1})}{\int p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}(t_k)) p(\mathbf{x}(t_k) | \mathbf{y}_0, \dots, \mathbf{y}_{k-1}) d^n \mathbf{x}(t_k)}$$

この問題を逐次モンテカルロ法で解く  $\Rightarrow$  **粒子フィルタ**  
(大自由度系への適用可能性が大きな課題)

## 現実的なデータ同化法

確率密度関数  $p(\mathbf{x}, t)$  の平均値またはモードの直接推定  
及びそれらの周りの共分散の推定

- 平均値**  $\mathbf{x}^a = \langle \mathbf{x} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{x} p(\mathbf{x} | \mathbf{x}^f, \mathbf{y}^o) d\mathbf{x}$

線形最小分散推定  $\Rightarrow$  **カルマンフィルタ** (Kalman, 1960)

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^f + \mathbf{K}(\mathbf{y}^o - H(\mathbf{x}^f)), \quad \mathbf{K} \equiv \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T (\mathbf{R} + \mathbf{H} \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T)^{-1}$$

Evensen (1994) : **アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)** の提案

- モード**  $\mathbf{x}^a = \mathbf{x}_m = \arg \max_{\mathbf{x}} p(\mathbf{x} | \mathbf{x}^f, \mathbf{y}^o)$

MAP推定または最尤推定  $\Rightarrow$  **変分法解析** (Sasaki, 1958)

$$\text{Minimize: } J(\mathbf{x}) = -\log p(\mathbf{x}^f | \mathbf{x}) - \log p(\mathbf{y}^o | \mathbf{x}) - \log p(\mathbf{x})$$

Lewis and Derber (1985), LeDimet and Talagrand (1986) など:  
**Adjoint法による4次元変分法(4DVar)** の提案

## 状態変数の時間発展

数値モデルの方程式(ランダム項を無視)

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, t)$$

### •初期値が平均値の場合

$$\frac{d\langle \mathbf{x} \rangle}{dt} = \langle \mathbf{F}(\mathbf{x}, t) \rangle \neq \mathbf{F}(\langle \mathbf{x} \rangle, t)$$

モデルが非線形だと予測値は平均値でない → アンサンブル予報

### •初期値がモードの場合

$$\frac{d\mathbf{x}_m}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{x}_m, t) + [p(p'')^{-1} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F})]_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_m}, \quad p(\mathbf{x}, t): \text{確率密度関数}$$

モデルが非線形でも  $\nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}) = 0$  を満たせば、予測値もモード

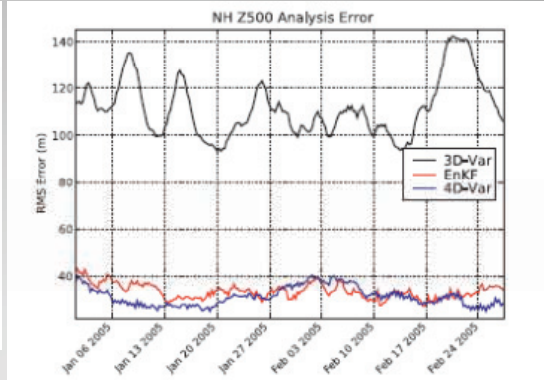
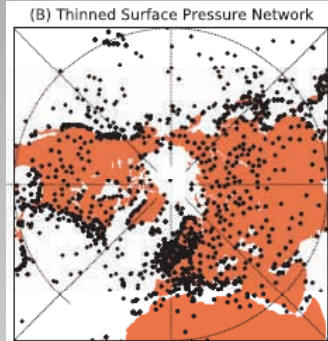
- Hamilton力学系 → 天体の運動の正確な予測?
- Lorenzモデル、順圧渦度方程式のスペクトルモデル、...

## 4DVarとEnKFの比較 (1)

	4DVar	EnKF
統計的推定法	MAP推定(最尤推定)	線形最小分散推定
定式化	非ガウス分布や非線形に対応	ガウス分布と線形を仮定
解析誤差共分散	別途、要計算	自然に得られる
システム構築の時間	<ul style="list-style-type: none"> <li>・数値モデルと観測演算子のアジョイント・コードの作成</li> <li>・長期平均予報誤差共分散行列の設計</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・サンプリングエラーやフィルタの発散などを抑えるためのチューニング</li> </ul>
時間発展	決定論的予報	アンサンブル予報

## 4DVarとEnKFの比較 (2)

1930年代  
相当の地上  
観測点



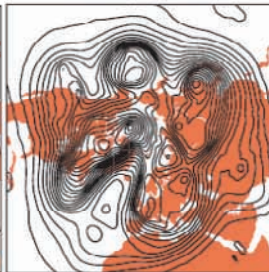
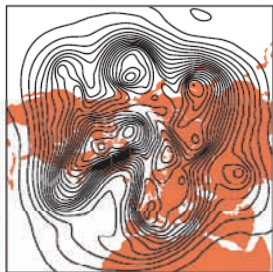
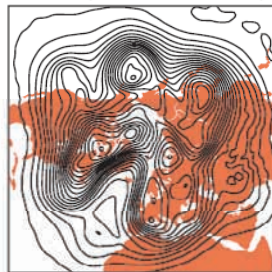
地上気圧データのみ同化

EnsDA (RMS Error = 31 m)

4D-Var (RMS Error = 31 m)

NCEP Operational

500hPa  
高度



Whitaker et al. (2009)

## 高度なデータ同化法の現状

### -変分法

- > 4DVar (strong constraint, weak constraint)
- > En4DVar

### -カルマンフィルタ

- > Perturbed observations EnKF
- > Square root EnKF (EnSRF, EAKF, LETKF)

### -ハイブリッド

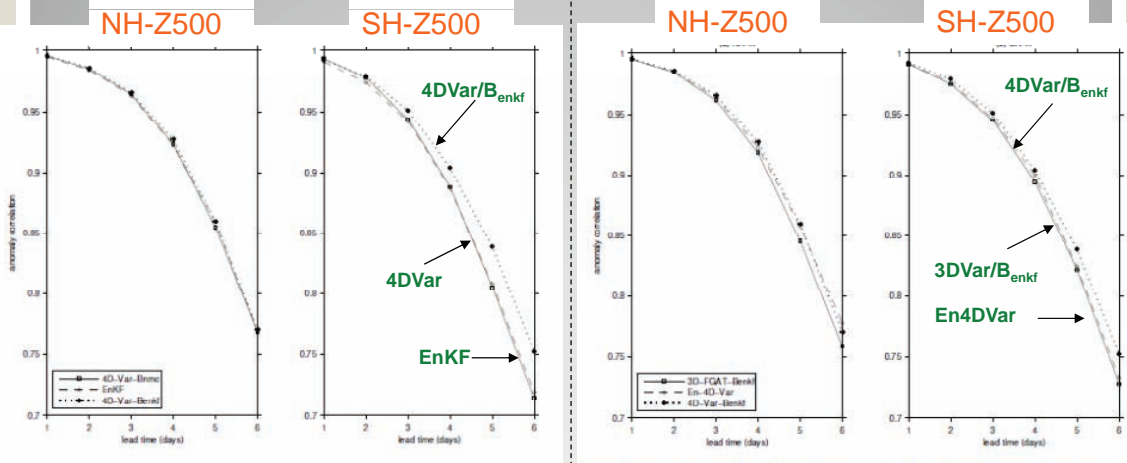
- > 3DVar + EnKF
- > 4DVar + EnKF

### -粒子フィルタ



# データ同化法の比較（予報精度）

カナダ気象局の全球モデル(400×200×58L) : 2007年2月



- EnKFと4DVarは同程度の精度
- 4DVarや3DVarにおいてEnKFで計算したBを使う(ハイブリッド)と改善
- En4DVarは、EnKFや4DVarとほぼ同程度の精度

Buehner et al. (2010)

## 4. データ同化の課題

### 1. 非線形と non-Gaussian

- モデルの非線形性の強さと観測データの時空間密度との兼ね合いに依存する。
- 集中豪雨の予測: モデルの雲物理過程は非線形性が強く、観測データは不十分。



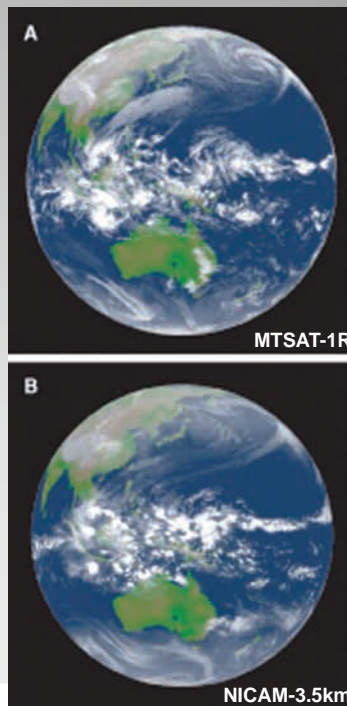
Long window 弱拘束4DVar、Incremental EnKS、粒子フィルタとのハイブリッド、...

### 2. マルチスケール

- 大気海洋結合モデル: 大気と海洋の時間スケールの違い
- 集中豪雨の予測: 積乱雲(1~10km)と環境場(10<sup>2</sup>~10<sup>3</sup>km)の時空間スケールの違い。



- 階層的アプローチ、...



H Miura et al. Science 2007;318:1763-1765

# 次世代スパコン戦略プログラム

## 分野3: 防災・減災に資する地球変動予測

(平成23~27年度) 参加機関: JAMSTEC、東京大学、気象研究所など

#### 背景

地球温暖化時の台風の動向が今なお不明確、より高精度の集中豪雨予測のニーズ  
地震発生時における避難・救援行動に必要な高解像度の被害予測、津波による浸水域等の高精度な情報のニーズ

#### 戦略目標

地球温暖化時の台風の動向の全球的予測と**集中豪雨の予測実証**  
および次世代型**地震**ハザードマップの構築と**津波**警報の高精度化

#### 研究開発課題

(1) 防災・減災に資する気象・気候・環境予測研究

(2) 地震・津波の予測精度の高度化に関する研究



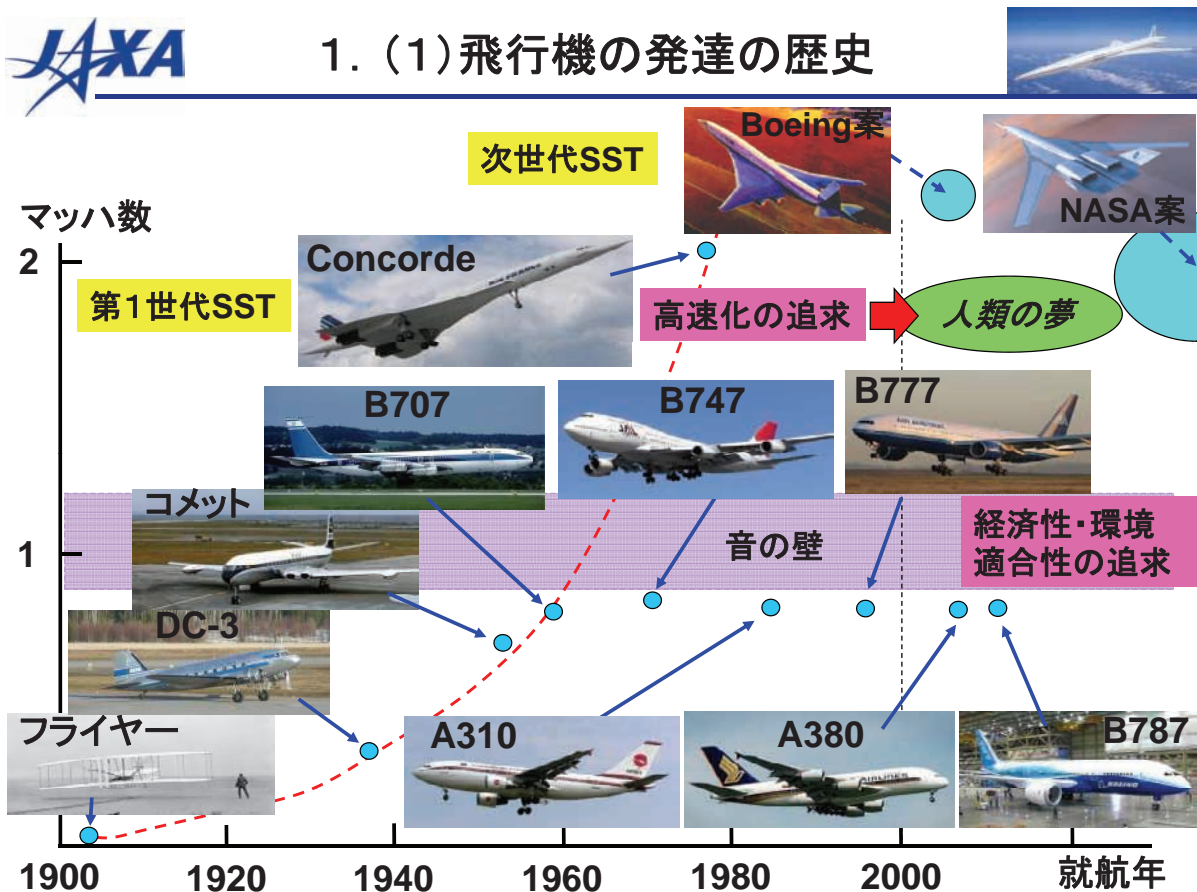
第4回EFD/CFD融合ワークショップ

## JAXA「次世代超音速機技術の研究開発」計画 におけるEFD/CFD連携と将来の課題

**【内容】**

1. はじめに
  - ・JAXA「次世代超音速機技術の研究開発」計画について
2. 小型超音速実験機プロジェクトにおけるEFD/CFD連携
  - ・CFDと風洞試験はどのように行われたか？(EFD/CFD連携の状況)
  - ・課題・教訓として何が考えられるか？
3. EFD/CFD連携の将来の課題
  - ・NEXST-1を踏まえ、どのような将来像と今後の課題があり得るか？
3. おわりに
  - ・JAXAの次期プロジェクト計画

平成23年 1月25日  
(独)宇宙航空研究開発機構 航空プログラムグループ 超音速機チーム





### 1. (2) 超音速飛行の恩恵



マッハ2超音速飛行の時間短縮効果: 多くの地域間移動が6時間圏内

- ・日本-北米、日本-欧州間の旅客数拡大
- ・高齢・持病等で長距離旅行を躊躇の人々の旅行需要創出
- ・日帰り感覚のシンガポール出張が可能

**日本は超音速飛行の最大の恩恵国!**

6時間フライト圏内: エコノミー症候群発症の境目



### 1. (3) 次世代SSTの開発機運



○コンコルドの課題: 経済性、環境適合性

- ・経済性改善⇒空力性能改善(高L/D化)、軽量化、推進系高効率化
- ・環境適合性改善⇒ソニックブーム低減、離着陸騒音低減

○コンコルドの課題解決に向けた取り組み

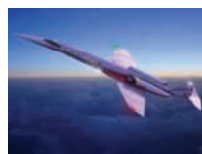
- ・主にNASAの要素技術研究の継続的な進展、等: 大型SSTを対象
- ⇒第1次機運(80年代後半~90年代中): 8社国際会議(米英仏独伊日口)

○超音速ビジネスジェット(SSBJ)の可能性に注目

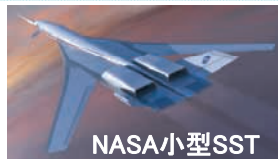
- ・各種SSBJ計画の提案: 2014年以降に市場投入予定
- ⇒第2次機運(2000年代後半~): 次世代SST構想(NASA研究目標)、他



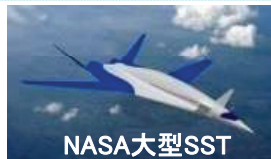
Aerospatiale計画機



Aerion SSBJ(開発中)



NASA小型SST (2020年目標)



NASA大型SST (2030年目標)



Boeing計画機



JADC 検討対象

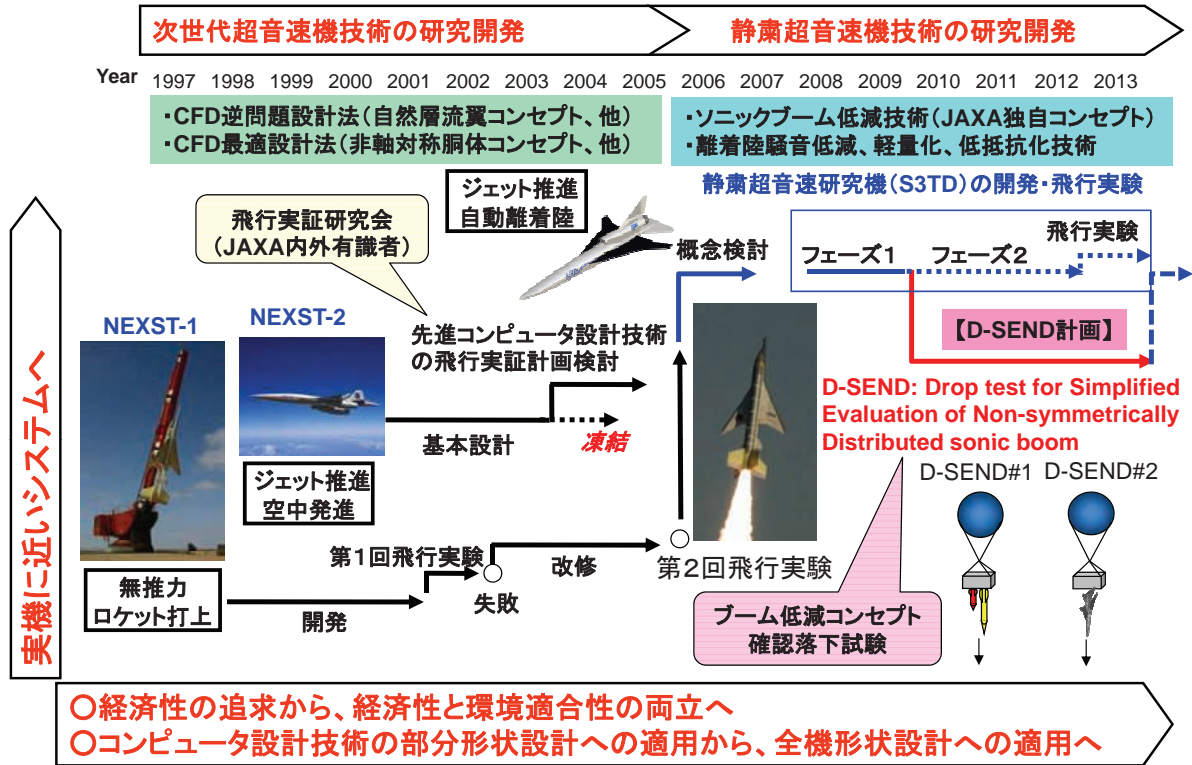


SAI SSBJ(開発中)



JADC SST(2025年目標)

# JAXA 1. (4) JAXA超音速機技術の研究計画



# JAXA 2. (1) 小型超音速実験機プロジェクト

目的：将来の次世代SST国際共同開発に際して我が国が応分の参画を可能とする中核技術の開発

**NEXST (National EXperimental Supersonic Transport) 計画**

方針：我が国が得意とするCFDによる先進空力設計技術の開発に焦点を絞り、2段階の実験機による飛行実証を経て技術を確立

(1) ロケット実験機計画(2002~03年) 超音速抗力低減  
(2) ジェット実験機計画(2005~06年) 機体/推進系干渉抗力低減

2002.7.14打上失敗 ⇒ ジェット実験機凍結 ⇒ 2005.10.10ロケット実験機再打上





## 2. (2) NEXST-1空力設計コンセプト



【想定実機(300人乗)の11% scaleの実験機】

### 1. アロー型平面形

(揚力依存抗力低減コンセプト)

- ・アスペクト比2.2(面積10.12 m<sup>2</sup>)
- ・亜音速前縁
- 外翼後退角61.2°
- 内翼後退角66°

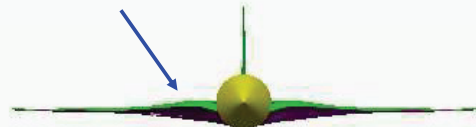
設計点 :  $C_L=0.1 @ M=2.0$

### 4. 超音速自然層流翼

(摩擦抗力低減コンセプト)

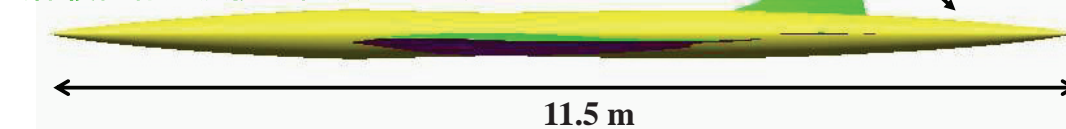
### 2. カールソン型ワープ翼

(揚力依存抗力低減コンセプト)



### 3. 線形エアール洞体

(体積依存造波抗力低減コンセプト)



回収系(パラシュート収納)

11.5 m

4.72 m

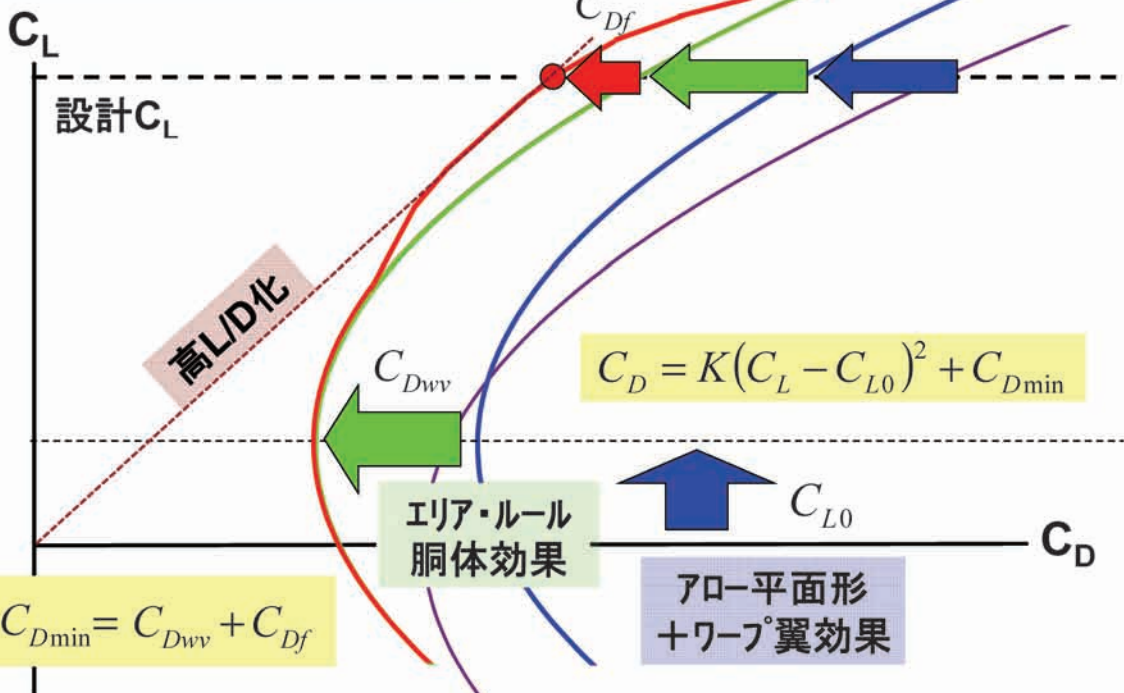


## 2. (3) 空力設計コンセプトの効果



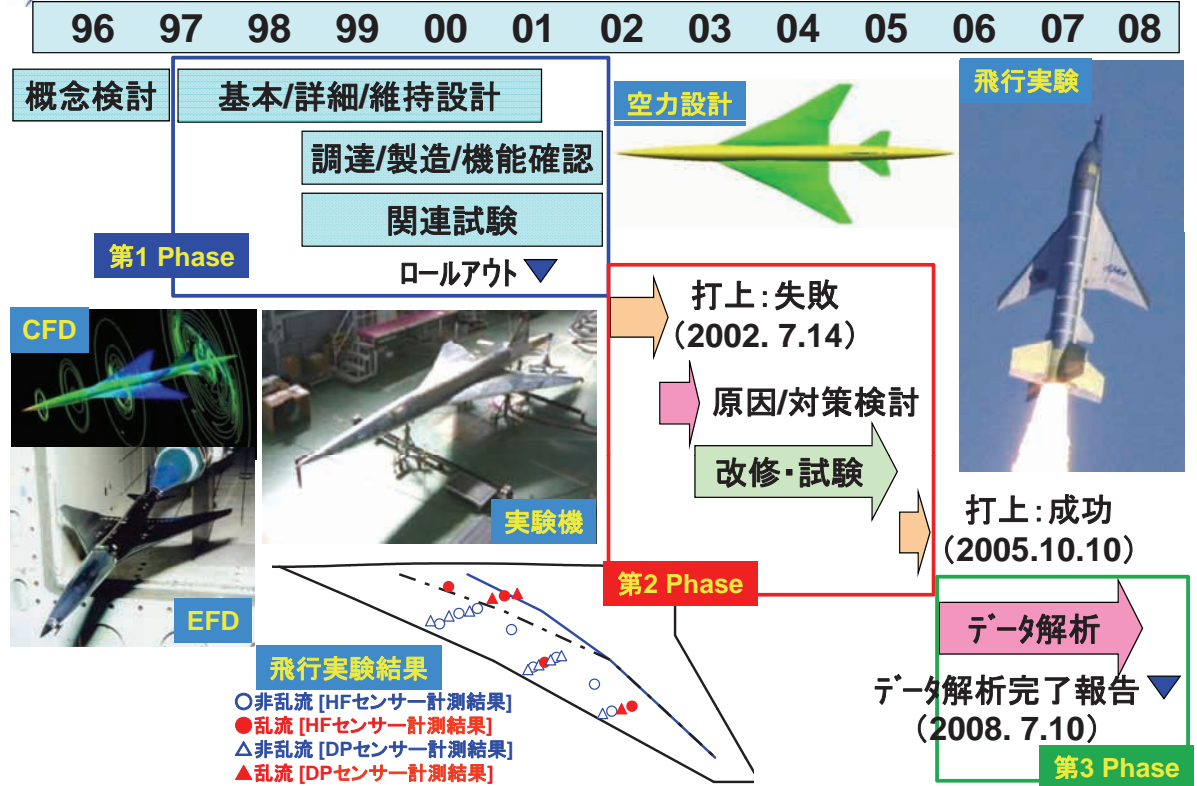
○設計点での抗力低減効果

自然層流翼効果

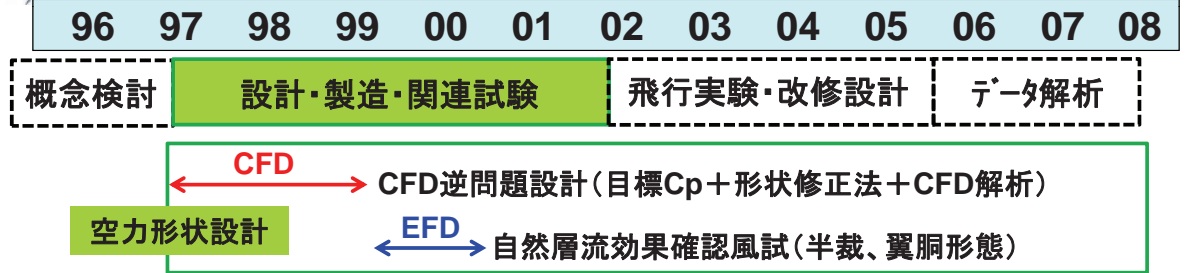




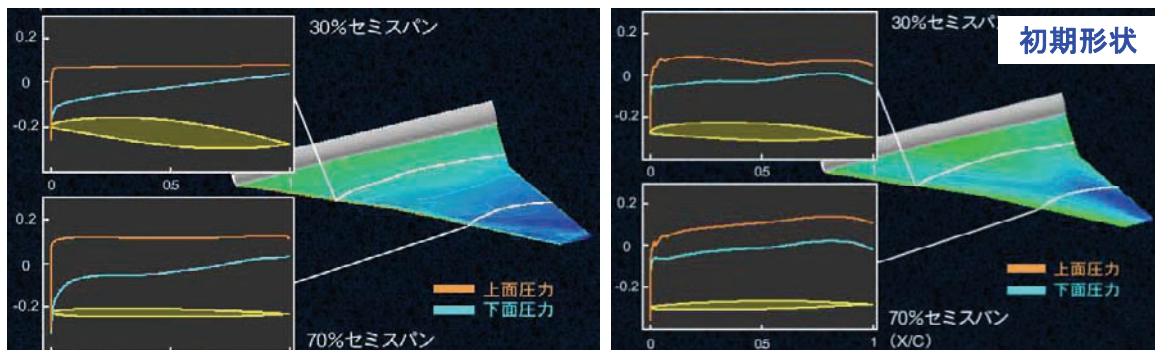
## 2. (4) NEXST-1プロジェクト概観



## 2. (5) 空力形状設計



### 超音速自然層流翼設計への適用






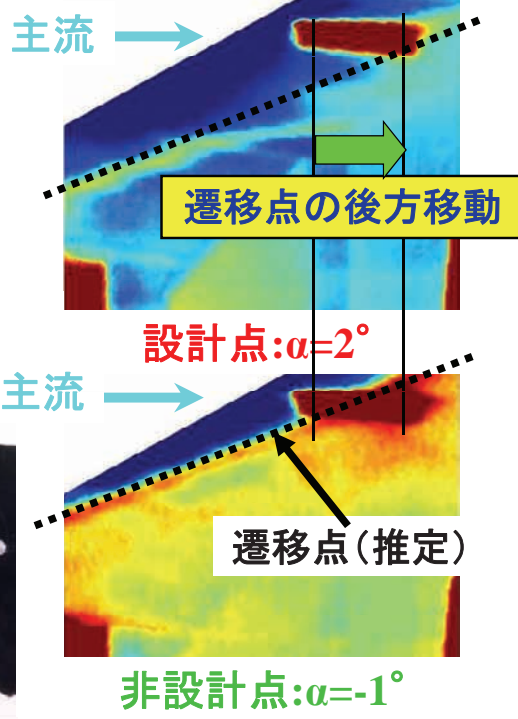
## 2. (6) 遷移特性の実験的検証



ONERA-S2MA IR画像:  $M=2$ ,  $Re_{MAC}=4.7 \times 10^6$  ( $P_0=0.6$  bar)



23.3%模型  
ホットフィルム



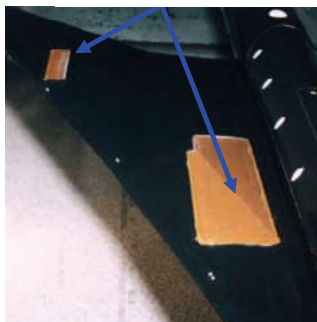
主流 →

遷移点の後方移動


設計点:  $\alpha=2^\circ$

遷移点(推定)

非設計点:  $\alpha=-1^\circ$



IRカメラ





## 2. (7) 空力設計



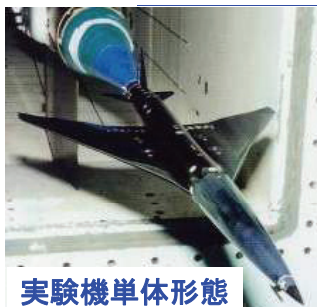
	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08
概念検討	設計・製造・関連試験						飛行実験・改修設計				データ解析		

**空力形状設計**

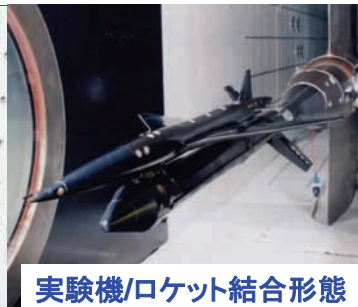
- ← CFD → CFD逆問題設計(目標Cp+形状修正法+CFD解析)
- ← EFD → 自然層流効果確認風試(半裁、翼胴形態)

**空力設計 (空力モデル)**

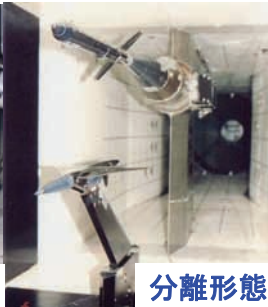
- ← 基本特性確認風試(単体、結合、分離形態)
- ← 基本風試結果の分析(CFD解析)
- ← 治具設計(CFD+弾性変形解析)



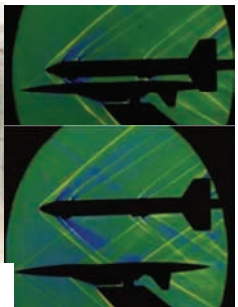
実験機単体形態



実験機/ロケット結合形態



分離形態





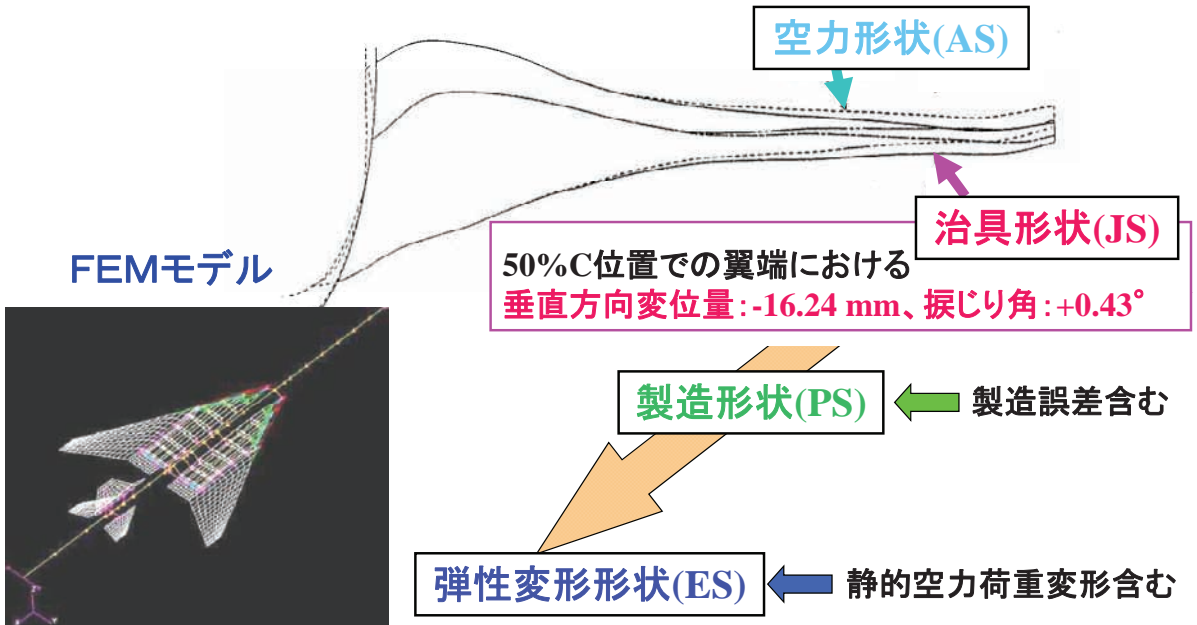


## 2. (8) 治具形状設計

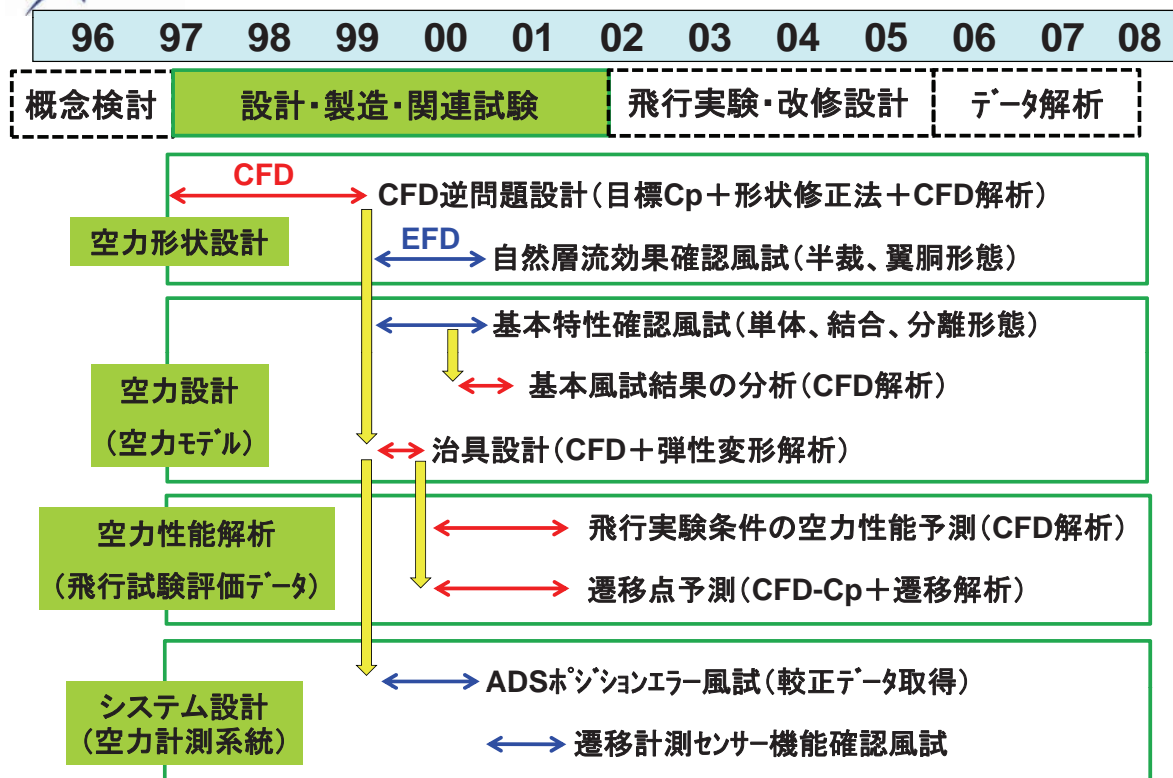


設定条件:  $M=2$ ,  $C_L=0.1$ ,  $H=18\text{ km}$

設定方法: CFD計算による空力荷重を基に翼幅方向の43断面で  
50%翼弦長回りに捩じり角と垂直方向変位を与えて設定

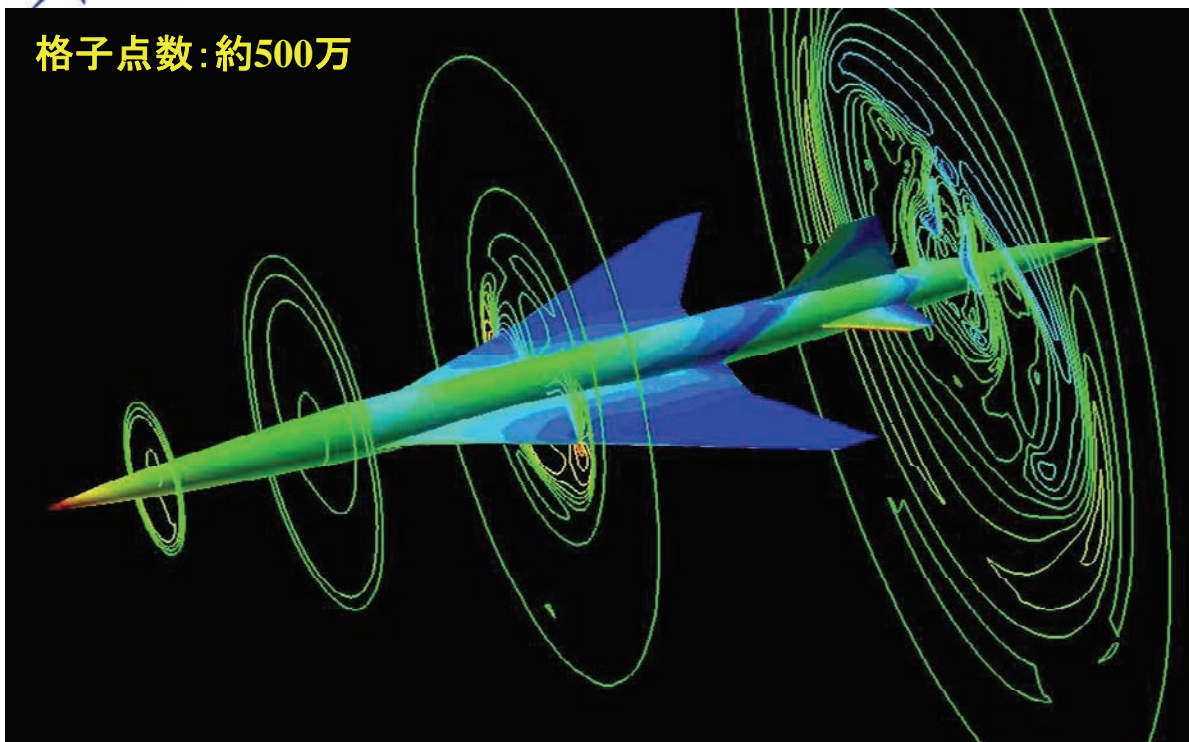


## 2. (9) 空力性能解析/システム設計





## 2. (10) 空力性能解析



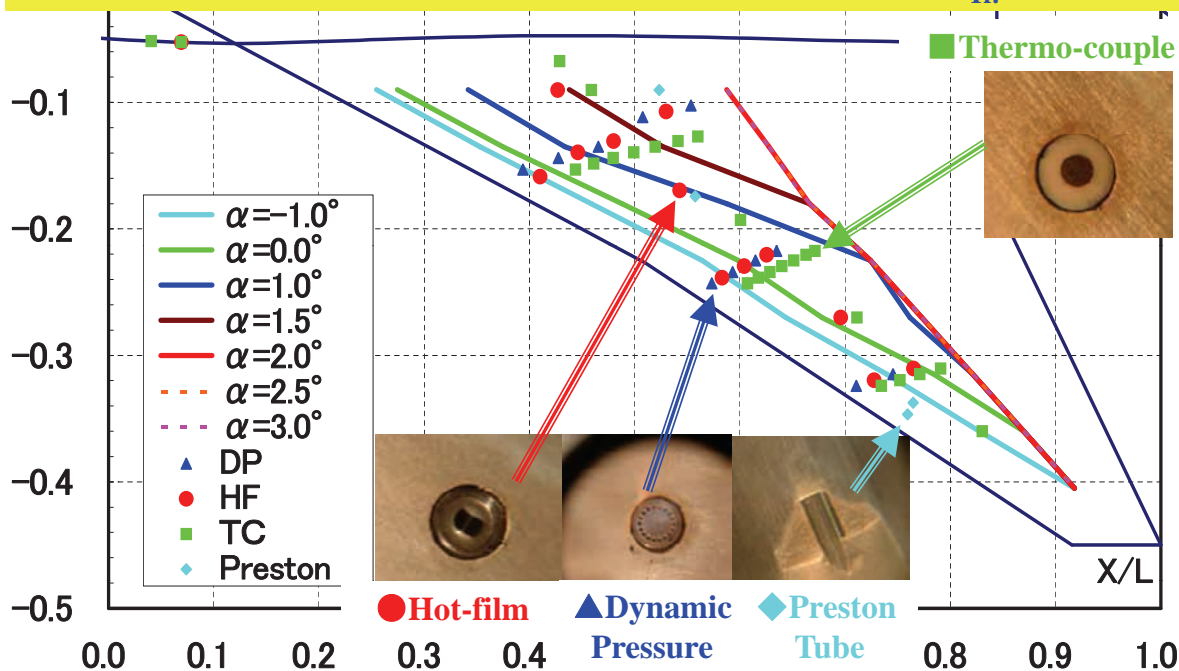
## 2. (11) 遷移点予測結果



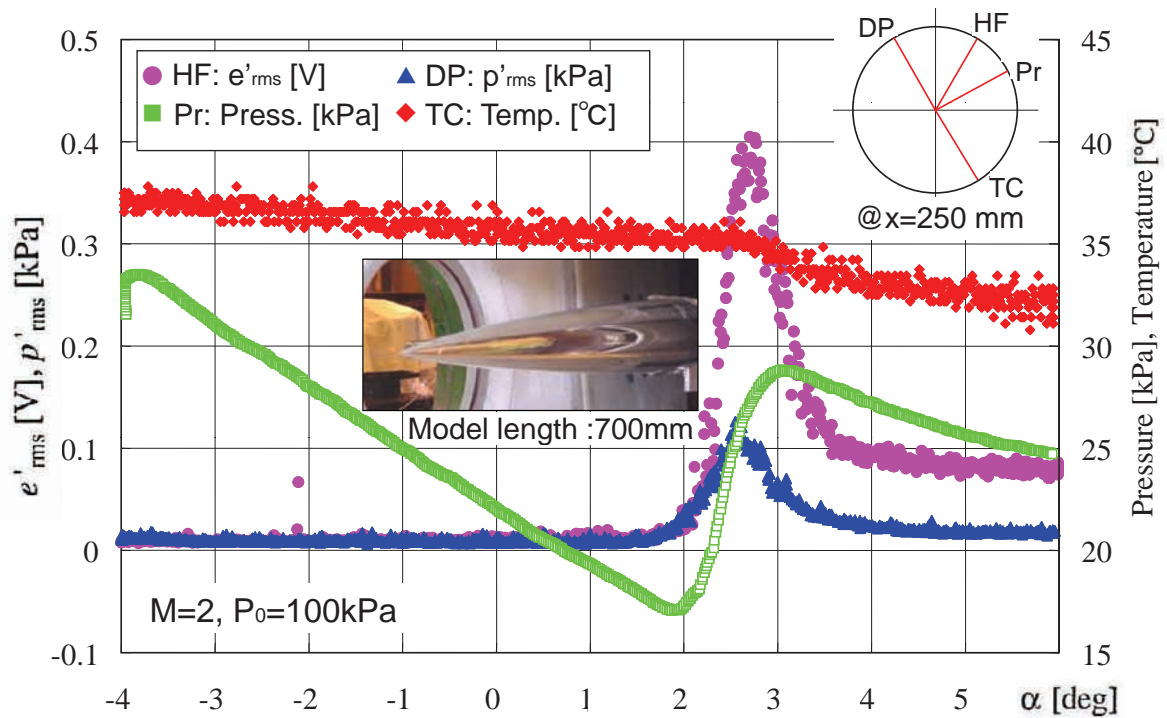
Y/L

M=2.0, H=18km,  $N_{TR}=14$

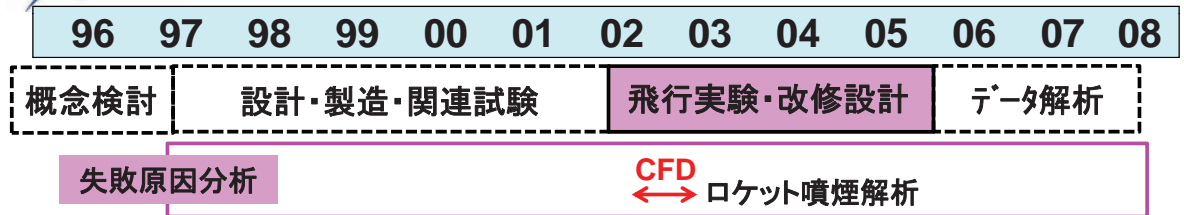
境界層の安定性理論に基づく $e^N$ 法を適用(判定基準:  $N_{TR}=14$ 採用)



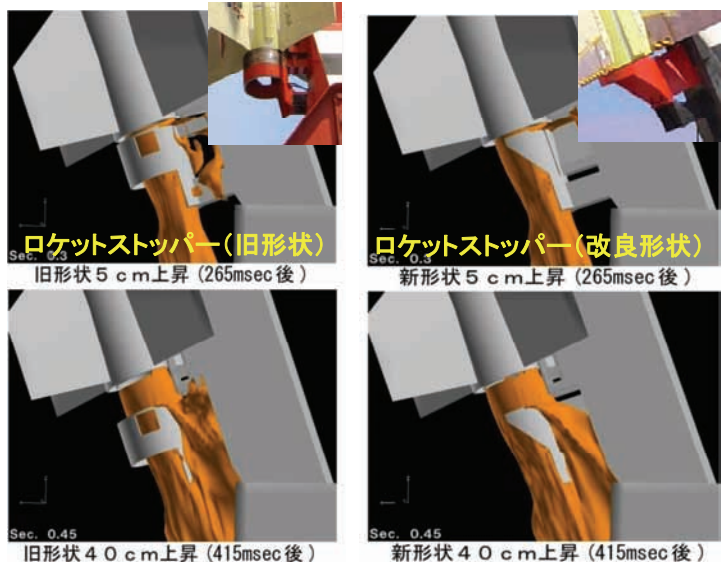
## JAXA 2. (12) 遷移計測センサー機能確認風試



## JAXA 2. (13) NEXST-1 第2Phaseの概要

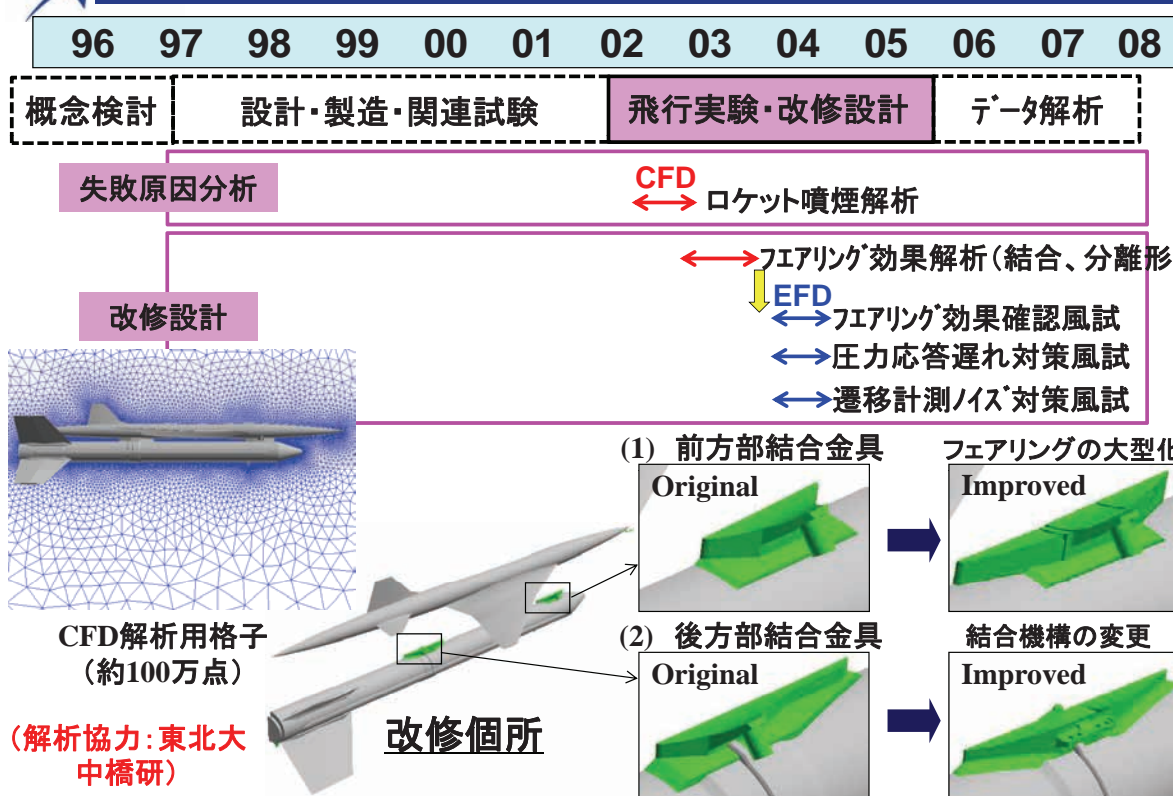


第1回飛行実験打上失敗(2002.7.14)

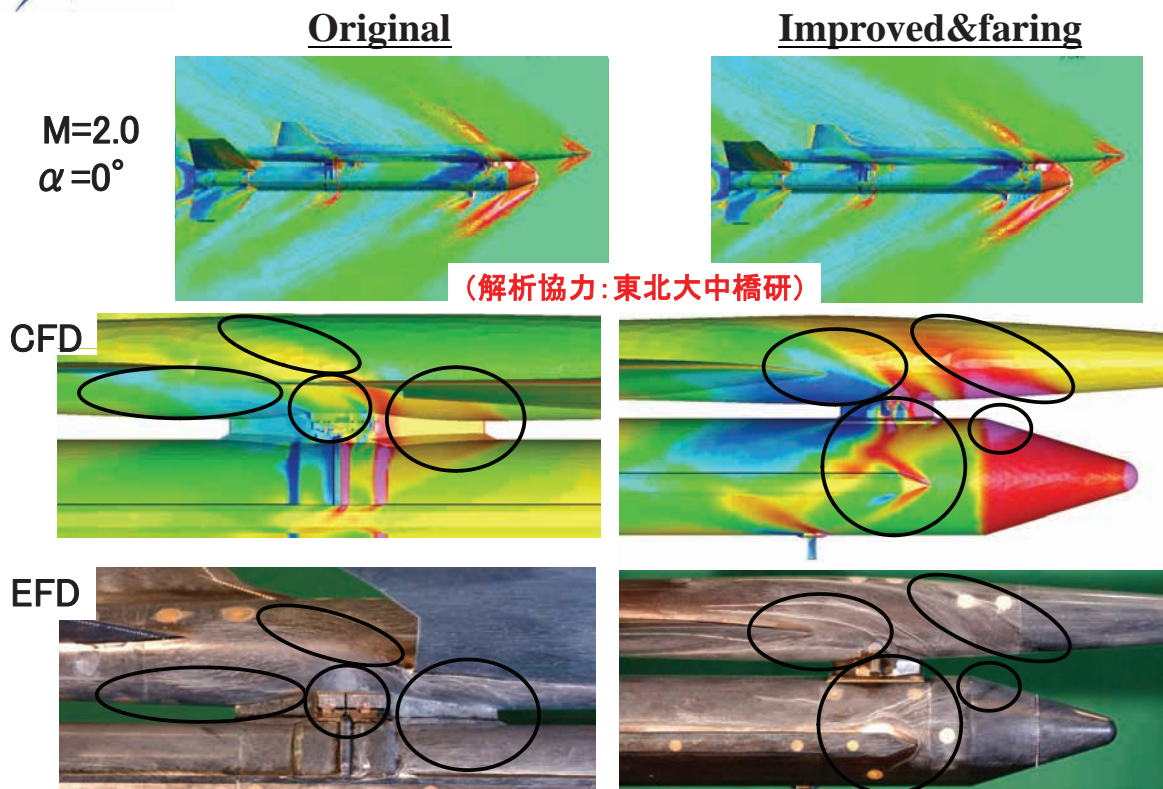




## 2. (14) 改修設計



## 2. (15) 結合部フェアリング改修CFD①

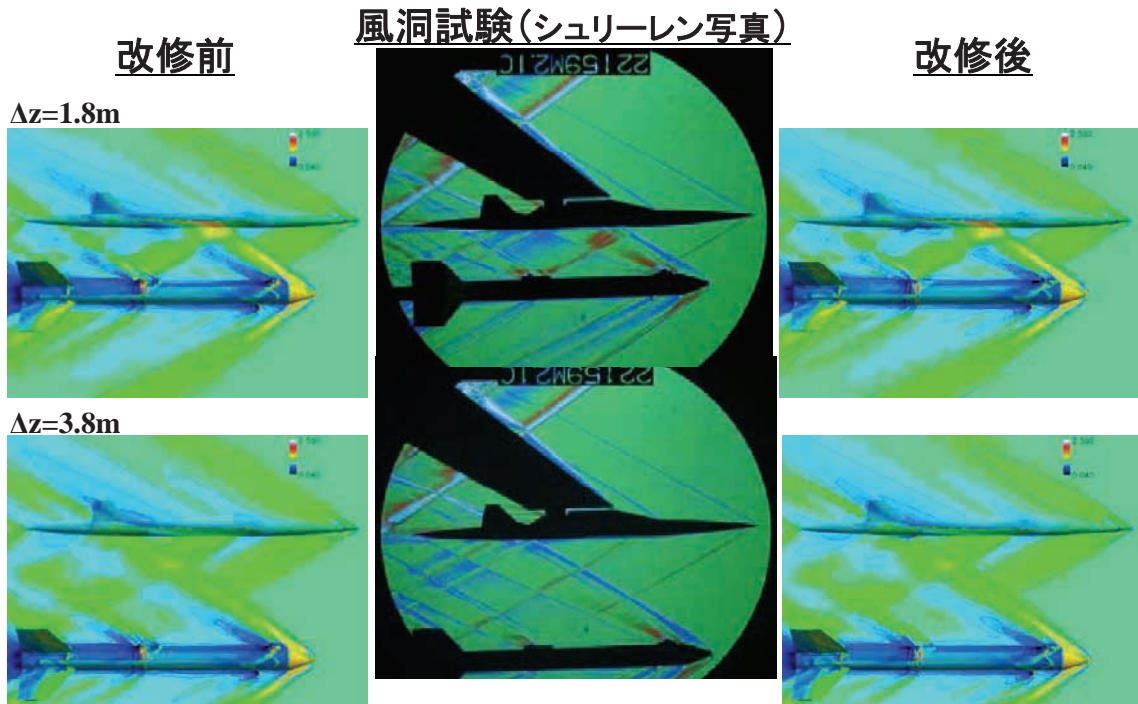


**JAXA** 2. (15) 結合部フェアリング改修CFD②



M=2.1,  $\alpha=2^\circ$

(CFD解析協力: 東北大中橋研)



**JAXA** 2. (16) NEXST-1(ロケット実験機)

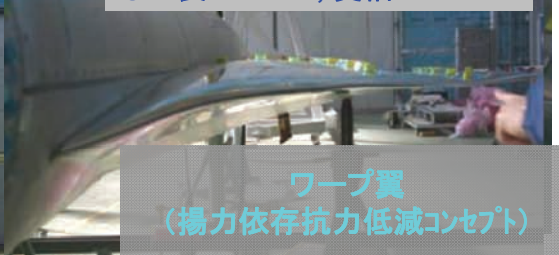
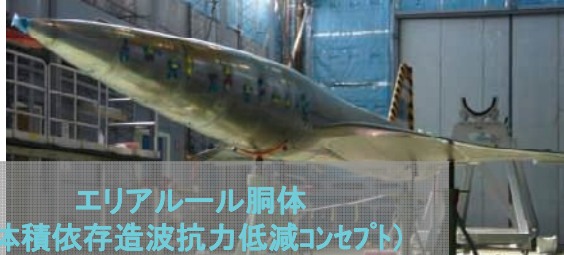


抗力 ( $C_D$ ) = 摩擦抗力 ( $C_{Df}$ ) + 体積依存造波抗力 ( $C_{Dwv}$ ) + 揚力依存抗力 ( $C_{DL}$ )

- 表面平滑度(目標) : 0.3 $\mu m$

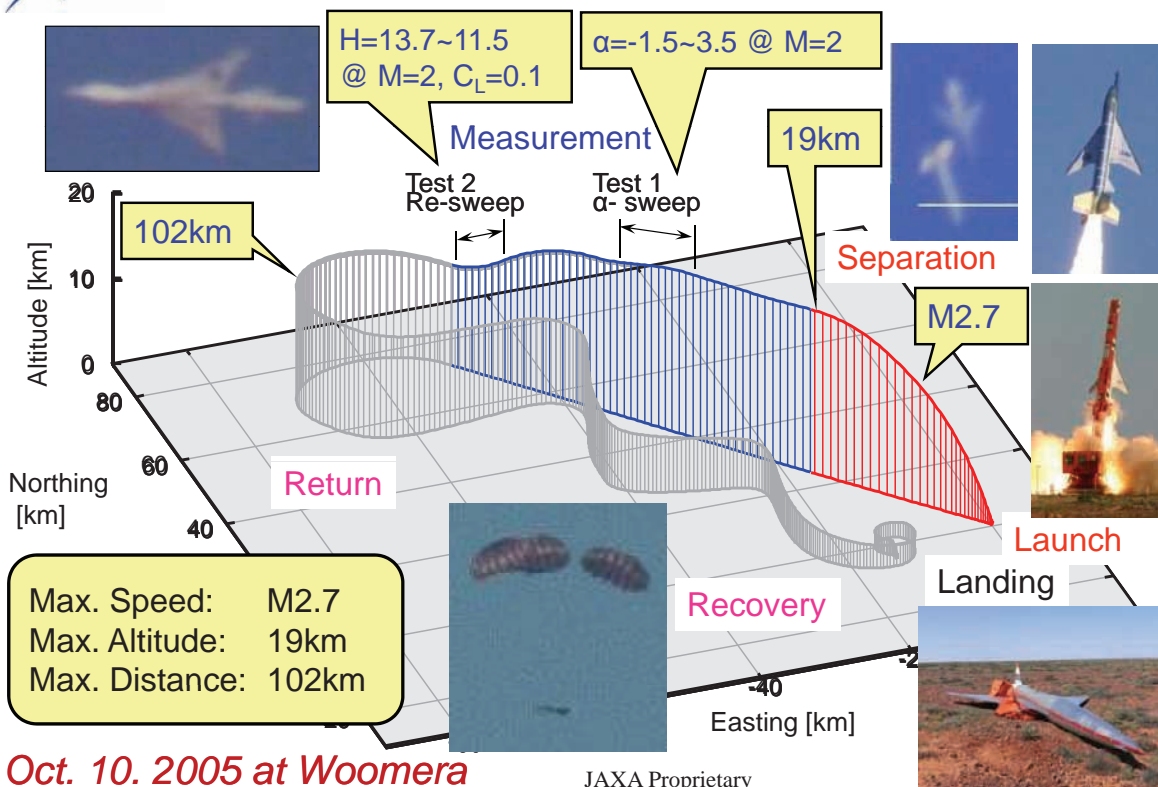


- 設計点 :  $C_L=0.1$  @  $M=2.0$
- 全長 : 11.5m, 翼幅 : 4.72m

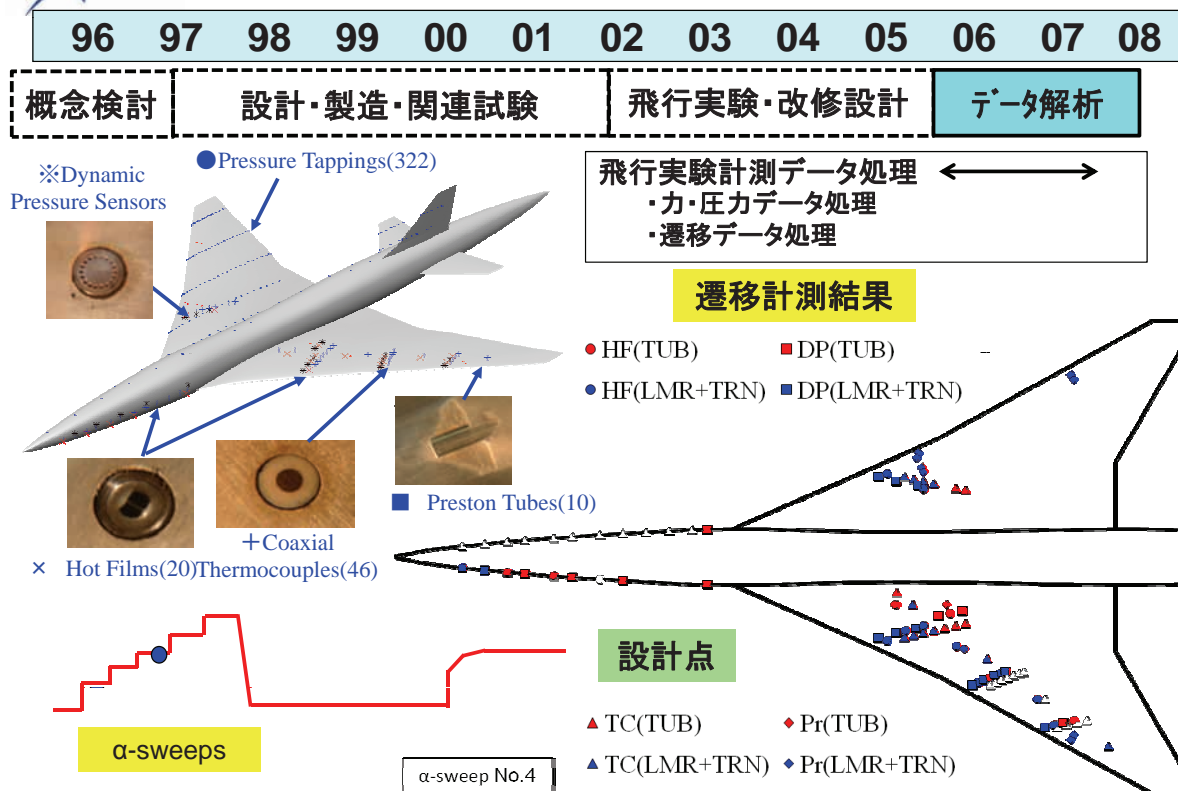




## 2. (17) 第2回飛行実験状況

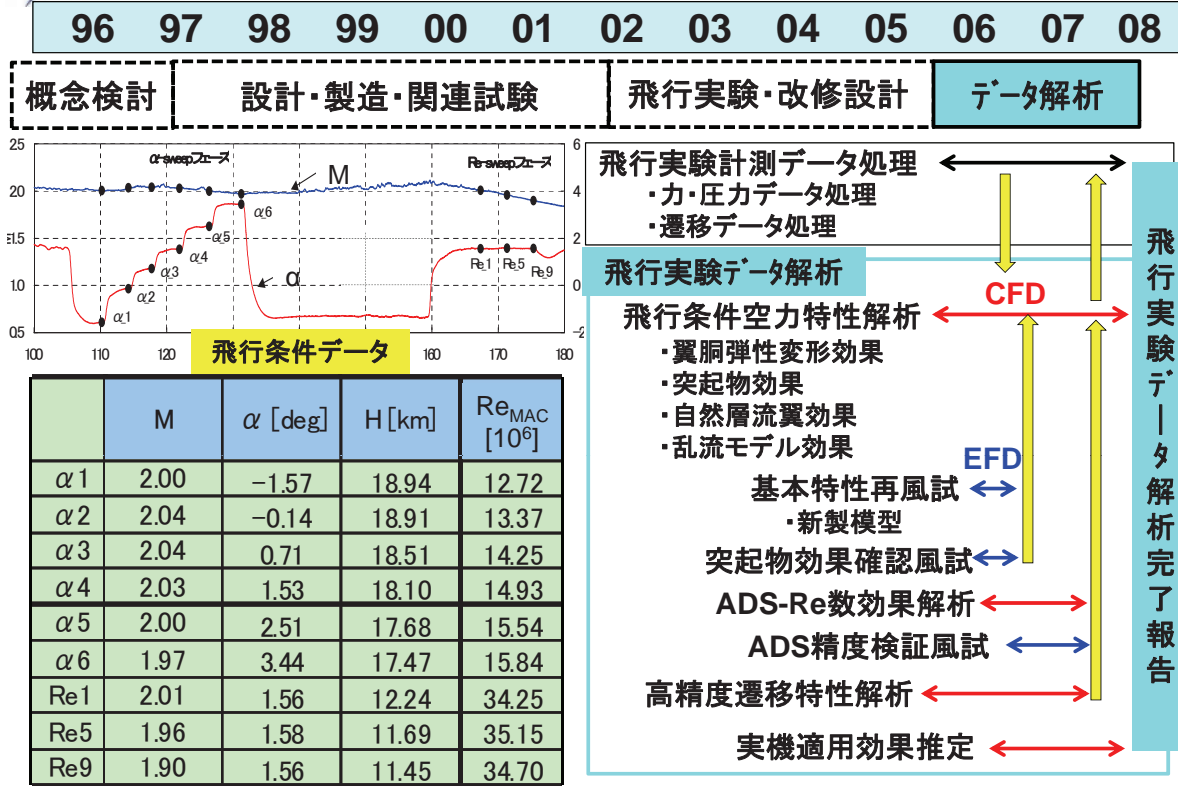


## 2. (18) NEXST-1 第3Phaseの概要





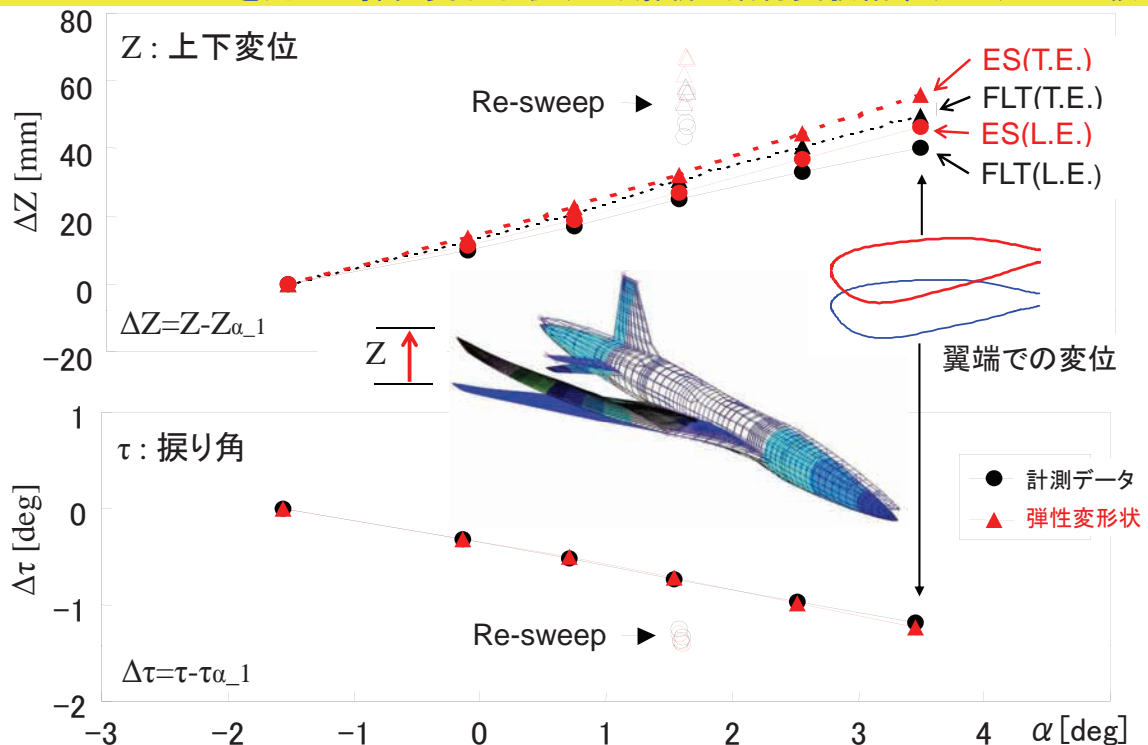
## 2. (19) NEXST-1第3Phaseの概要



## 2. (20) 主翼弾性変形効果の分析

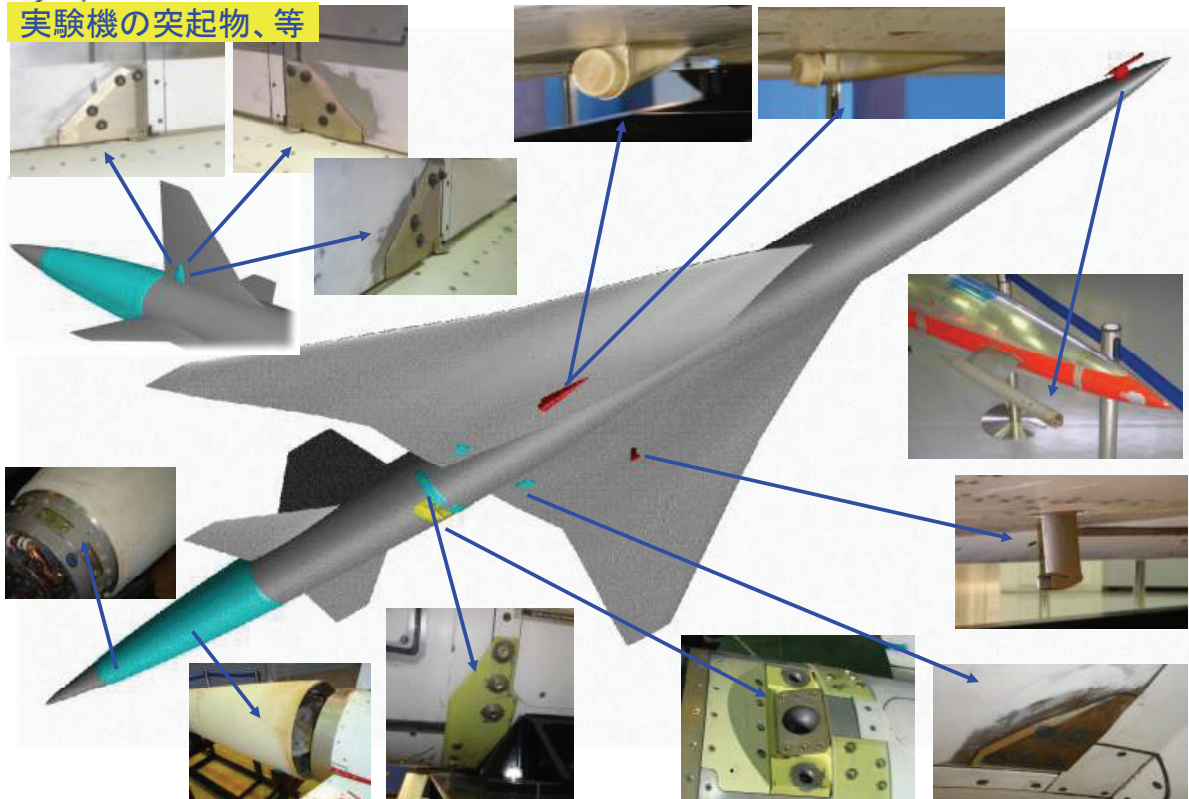


CFDとNSTRANを用いた弾性変形形状(ES)解析と飛行実験結果(FLT)との比較





## 2. (21) 突起物効果の分析①

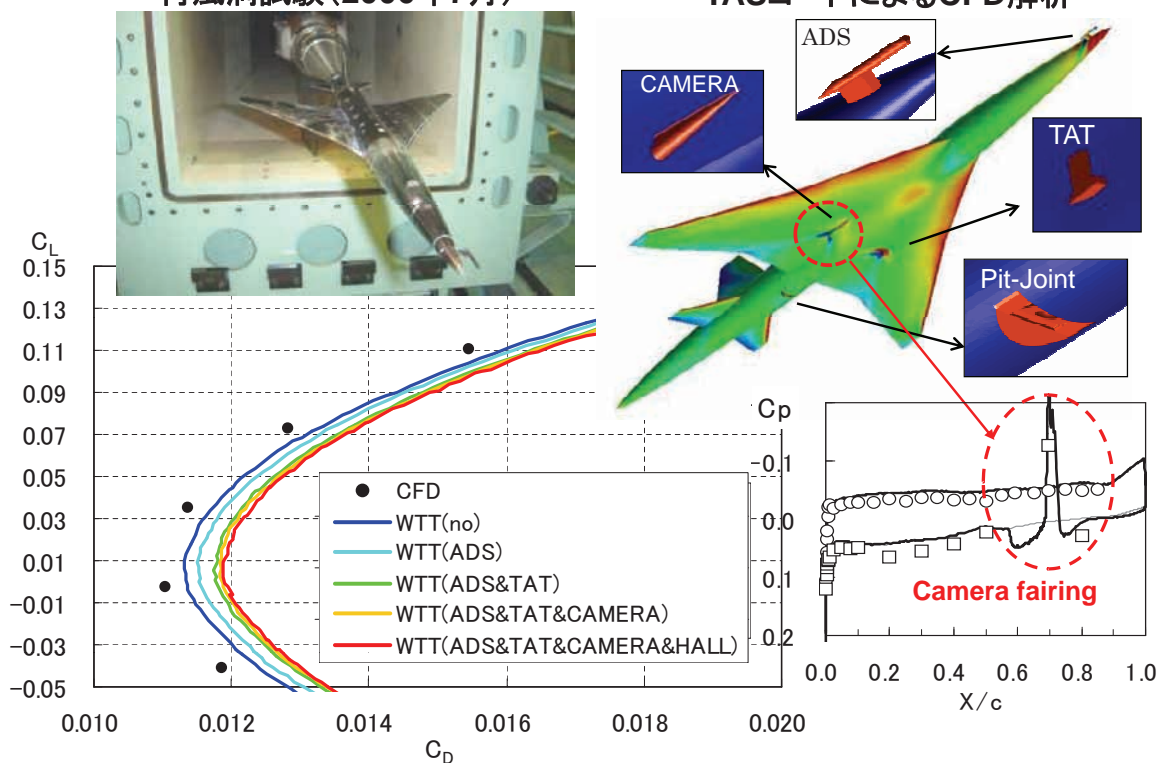


## 2. (21) 突起物効果の分析②



再風洞試験(2006年7月)

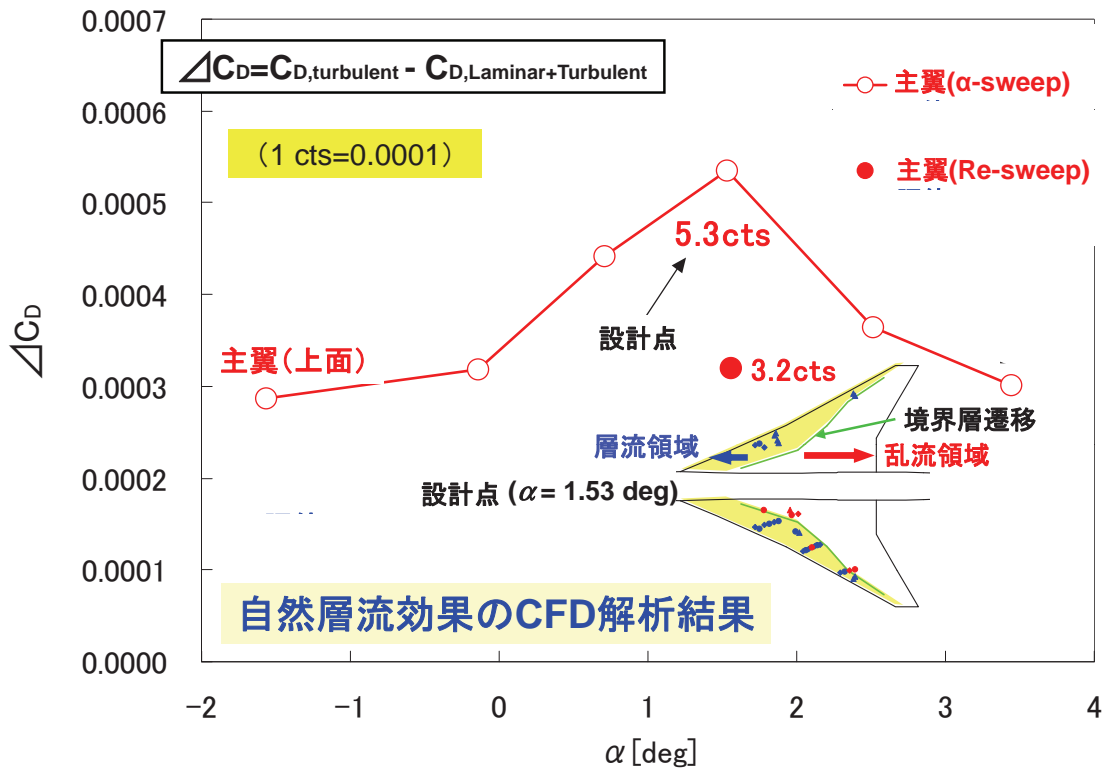
TASコードによるCFD解析



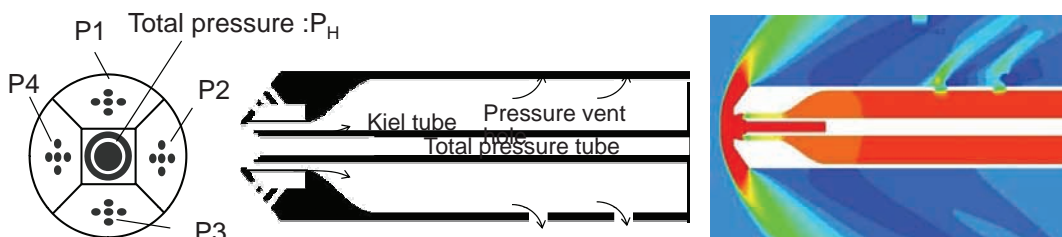
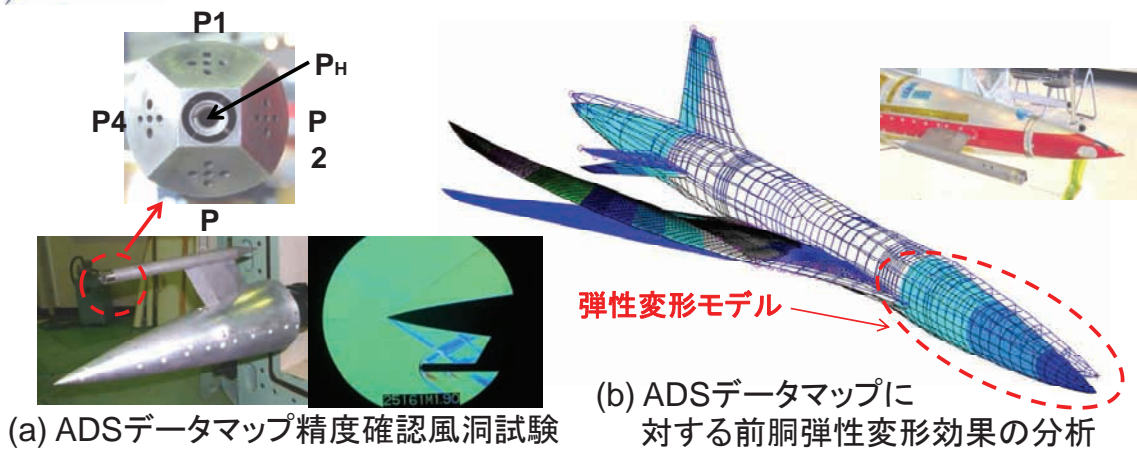




## 2. (22) 自然層流翼効果の分析



## 2. (23) その他の検討項目



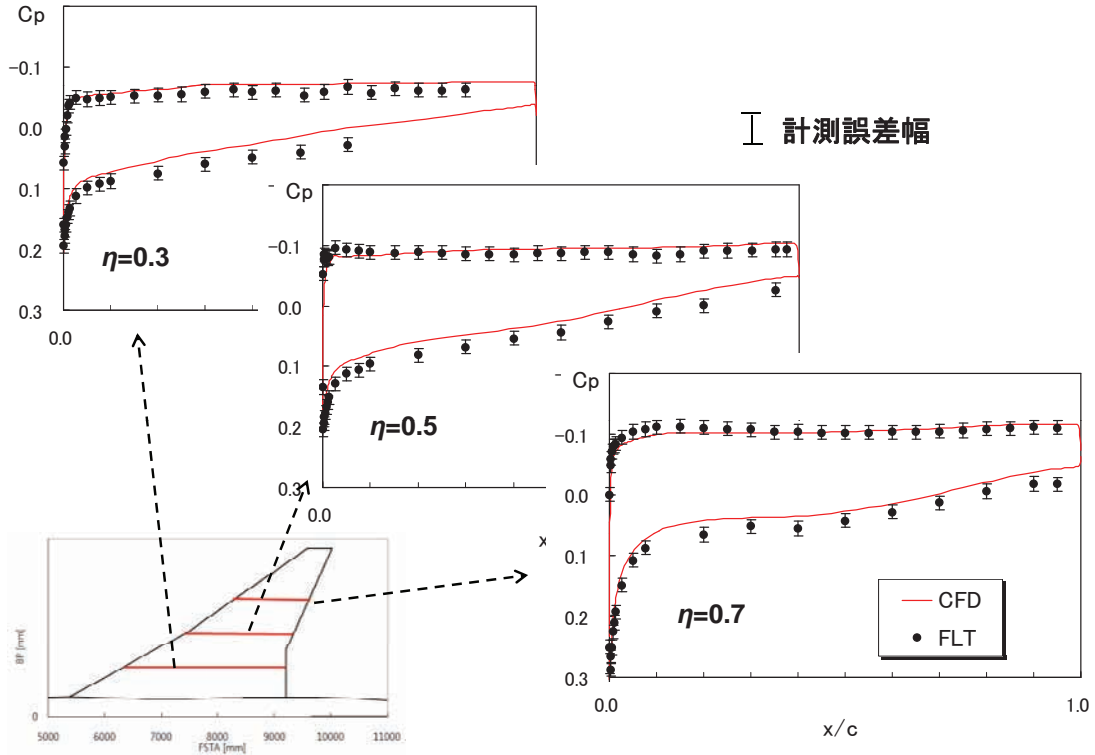
(c) ADSデータマップに対するレイノルズ数効果の分析



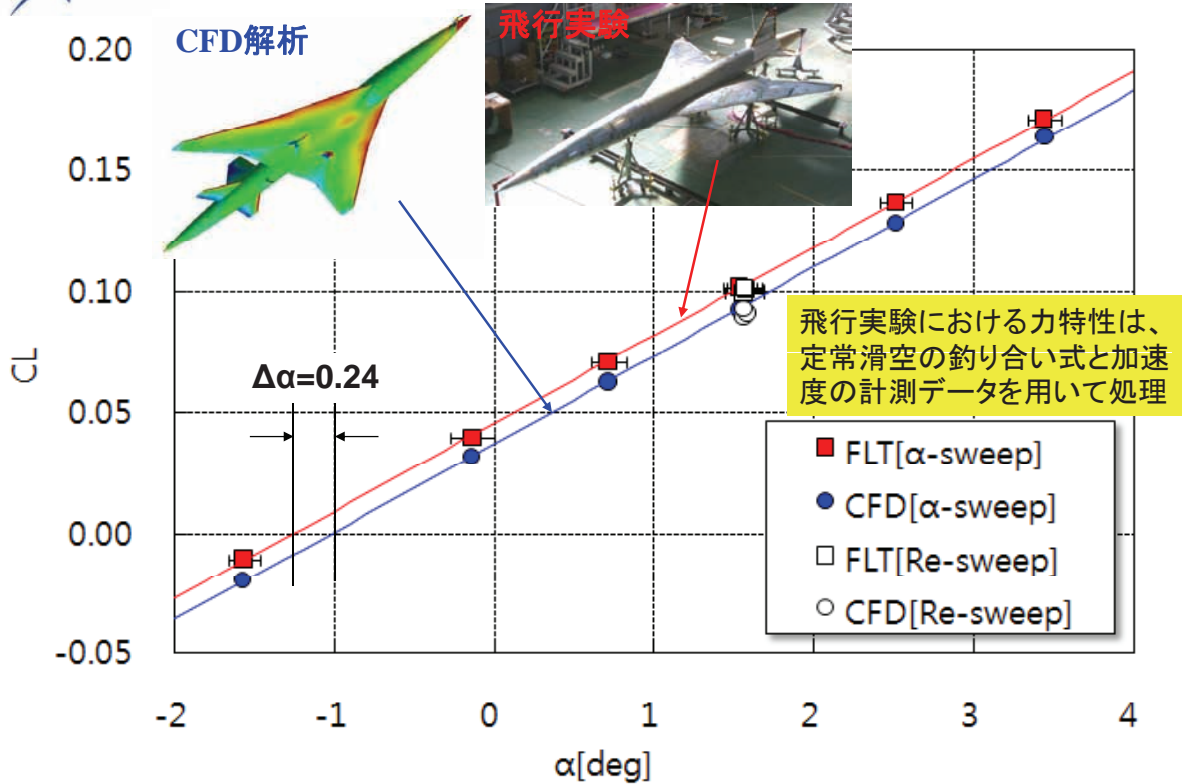
## 2. (24) 圧力分布の確認



Design Point:  $\alpha=1.53\text{deg}$  (4<sup>th</sup> step),  $Re=14.9 \times 10^6$

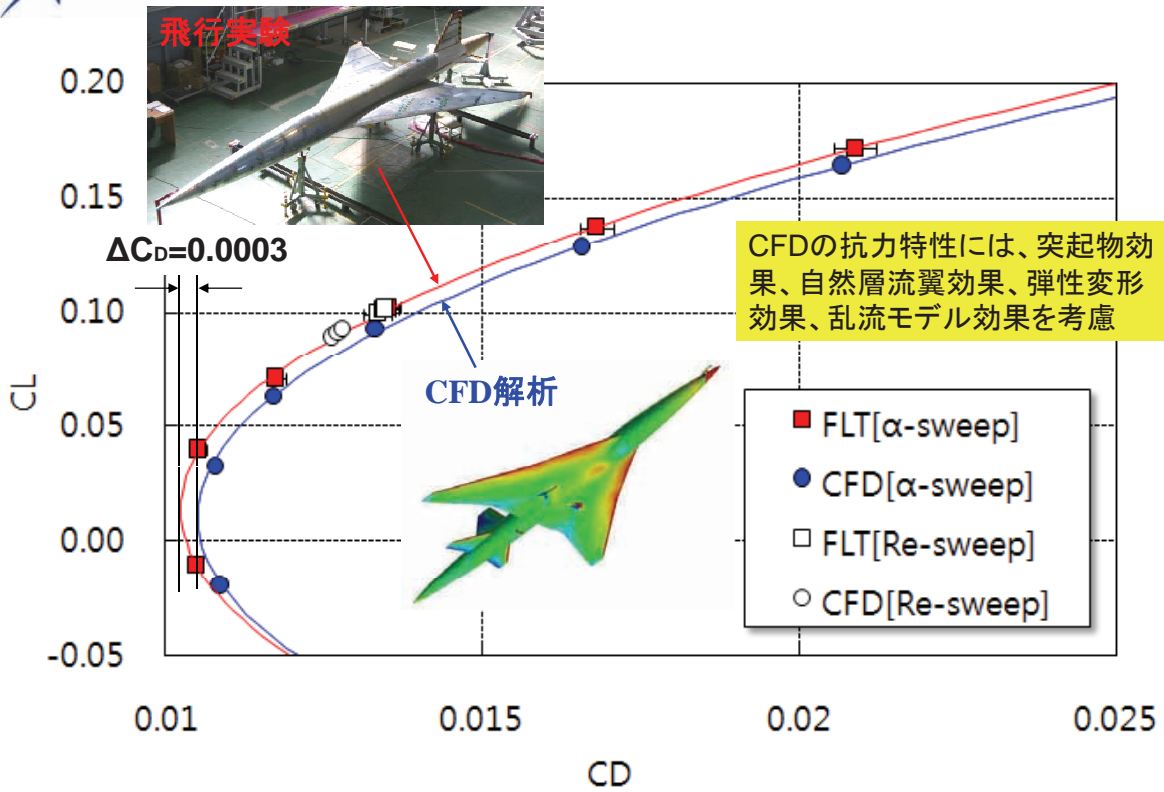


## 2. (25) 揚力特性の確認





## 2. (26) 抗力特性の確認



## 2. (27) 遷移計測結果の分析①

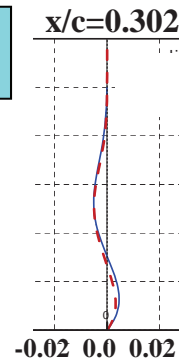
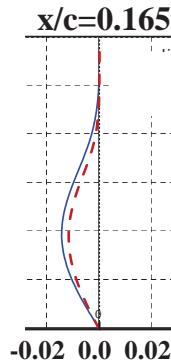
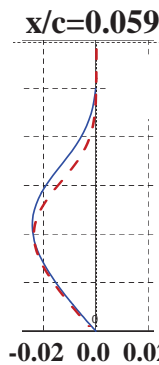
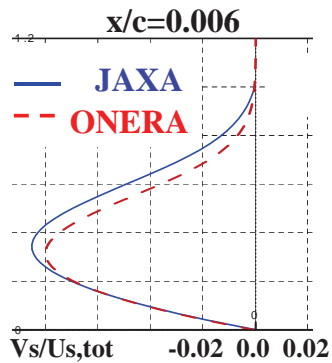


【ONERA-JAXA共同研究成果】

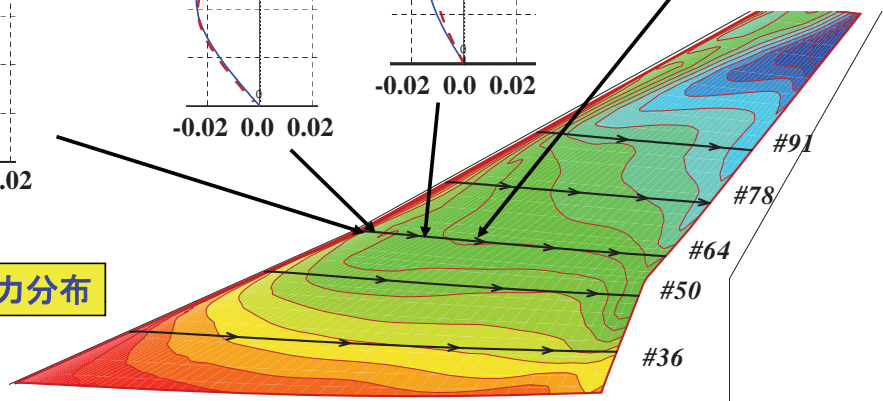
CFDを用いた境界層解析

飛行実験条件:  $M=2.02$ ,  
 $\alpha=1.59\text{deg}$ ,  $H=18.04\text{Km}$

横流れ境界層速度プロファイル



表面圧力分布





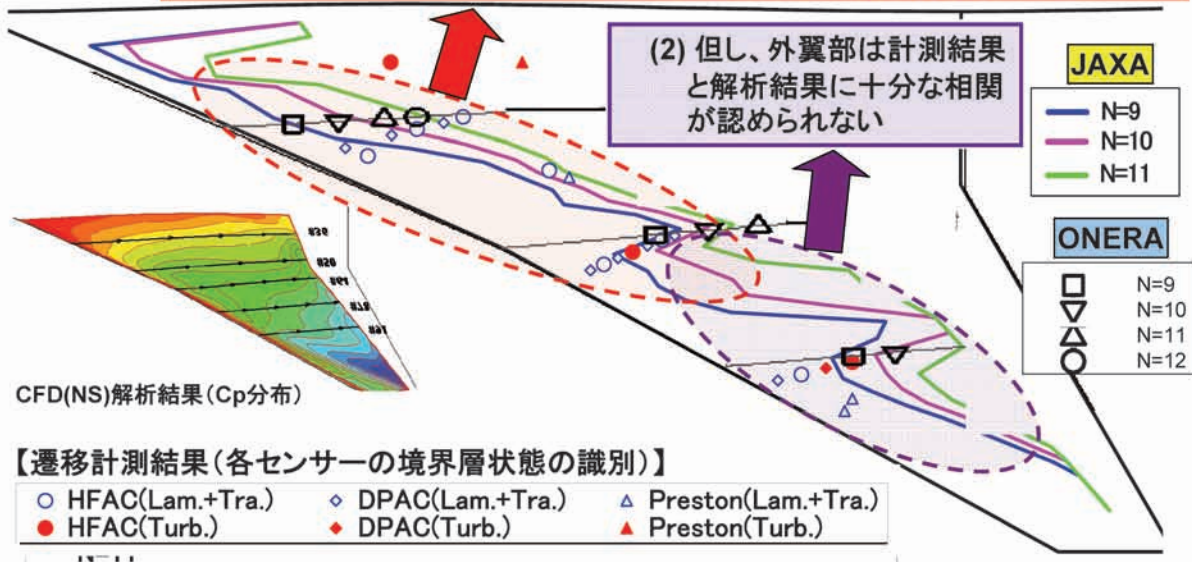
## 2. (27) 遷移計測結果の分析②



遷移解析: CFD(NS)解析による層流境界層情報を基に $e^N$ 法を適用

【ONERA-JAXA共同研究成果】

(1)両者の遷移解析結果は、良好な一致を示し、内翼から中ほどまでは計測結果とも良好な相関を有する ⇒ 遷移点判定基準として $N=11$ が妥当と推測



## 2. (28) 実機適用効果の推定①



ONEXST-1設計技術を大型SST(300人乗)の空力設計に適用

$M_{Des.}=2, CL_{Des.}=0.1$ @H=18.3 km	コンコルト技術	NEXST-1技術	
	仮想コンコルト (無推進系)	NEXST-1 実験機	想定実機 (大型SST)
全長(m)	62.0	11.5	91.4
翼面積(m <sup>2</sup> )	412.2	10.1	836.1
アスペクト比	1.6	2.2	2.2
平均空力翼弦長(m)	21.6	2.8	25.0
$Re_{MAC}(10^6)$	104.0	13.9	120.6



(無推進系を想定)





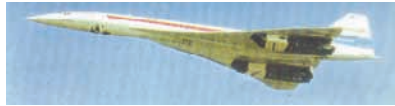
## 2. (28) 実機適用効果の推定②



### 仮想コンコルド形状の空力設計コンセプトとCFD解析

【胴体全長:62 m, 翼幅:25.6 m, 巡航M=2.0, 巡航 $C_L=0.1$ 】

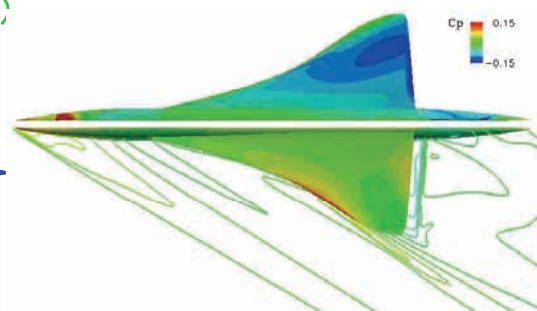
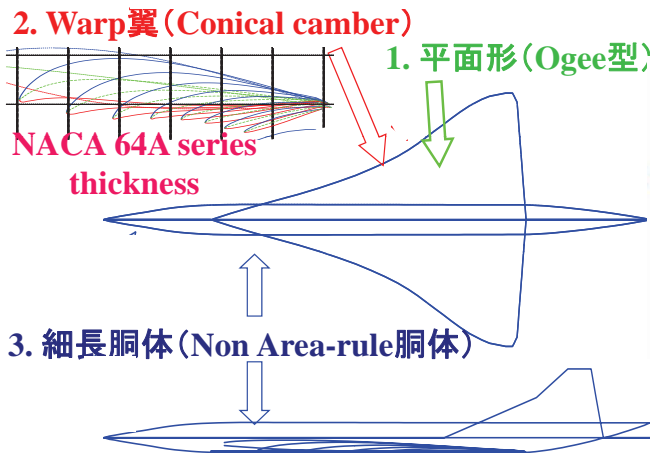
コンコルド実機



【仮想コンコルド形状=無推進系形態】

<空力設計コンセプト>

<CFD解析結果>



## 2. (28) 実機適用効果の推定③



### ONEXST-1設計技術を大型SST(300人乗)の空力設計に適用

$M_{Des.}=2, C_{L_{Des.}}=0.1$ @H=18.3 km	コンコルド*技術	NEXST-1技術	
	仮想コンコルド* (無推進系)	NEXST-1 実験機	想定実機 (大型SST)
全長(m)	62.0	11.5	91.4
翼面積(m <sup>2</sup> )	412.2	10.1	836.1
アスペクト比	1.6	2.2	2.2
平均空力翼弦長(m)	21.6	2.8	25.0
$Re_{MAC}(10^6)$	104.0	13.9	120.6
層流化率@主翼上面	0%	40%	30%

#### 【高Re数型自然層流翼設計技術の研究】

NEXST-1実験機の設計圧力分布⇒高Re数条件で効果減少

⇒高Re数型の理想的設計圧力分布を創出

⇒遷移点予測法により平均約30%翼弦長の遷移点後退を推定



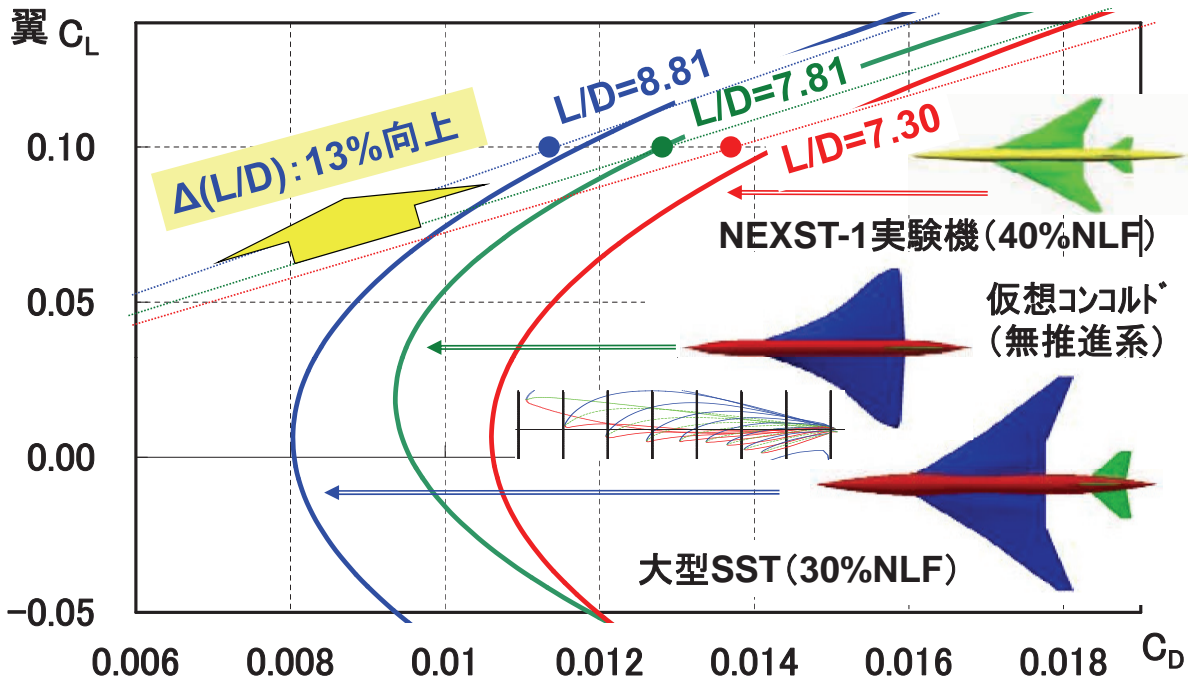


## 2. (28) 実機適用効果の推定④

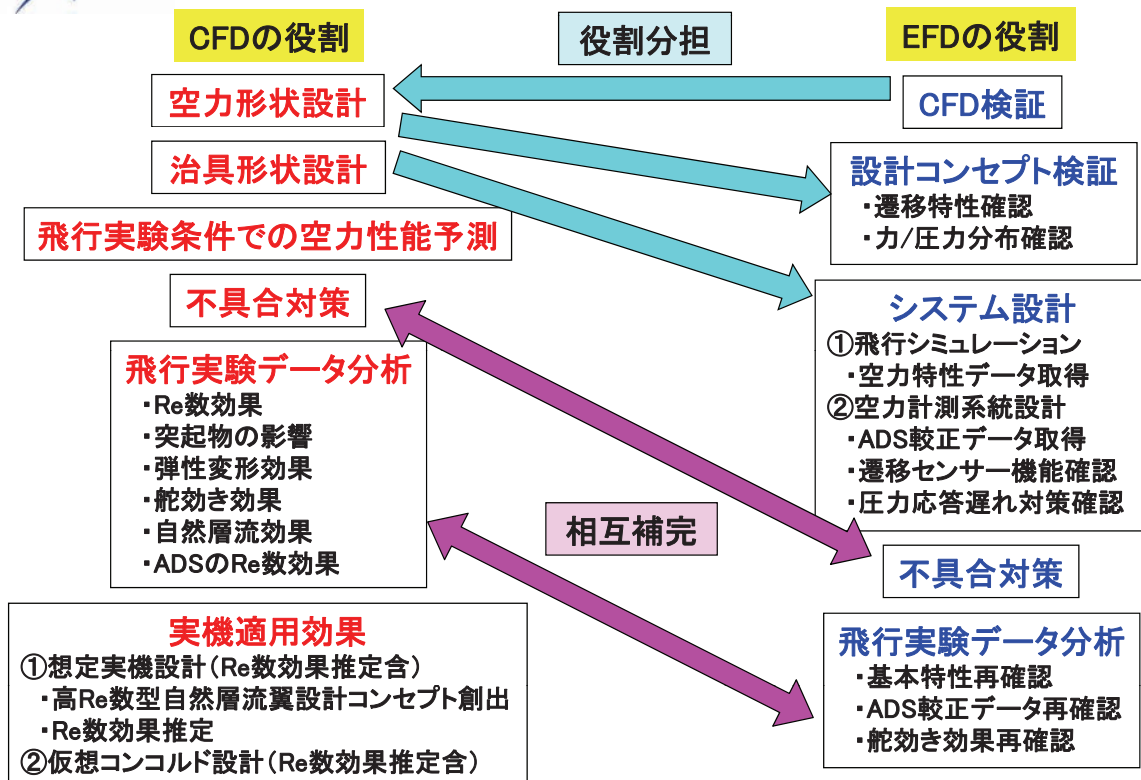



### ONEXST-1空力設計技術

=アロー型平面形+ワープ翼+エリア・ルール胴体+自然層流(NLF)



## 3. (1) NEXST-1におけるCFD/EFD連携



**JAXA** 3. (1) NEXST-1におけるCFD/EFD連携 

**【NEXST-1プロジェクトにおけるCFDと風試の役割分担】**

1. 空力形状設計
  - ・CFD設計主体⇒風試は効果確認のみ
2. システム設計
  - ・空力特性関連のデータ取得は風試主体
3. 不具合対策
  - ・原因分析、対策案の初期的検討は時間・コストの効率性からCFD解析を主体
  - ・詳細確認は風試  
(結合部フェアリング形状の改修に起因するM=1.6での横揺れ現象の発覚と対策は風試のみでしか対応不可！)
4. 飛行実験データ分析
  - ・実験機の飛行状態の模擬・補正は基本的にCFDで対応  
(但し、舵効き補正は風試データを使用)

**JAXA** 3. (2) NEXST-1のCFD/EFD連携の課題 

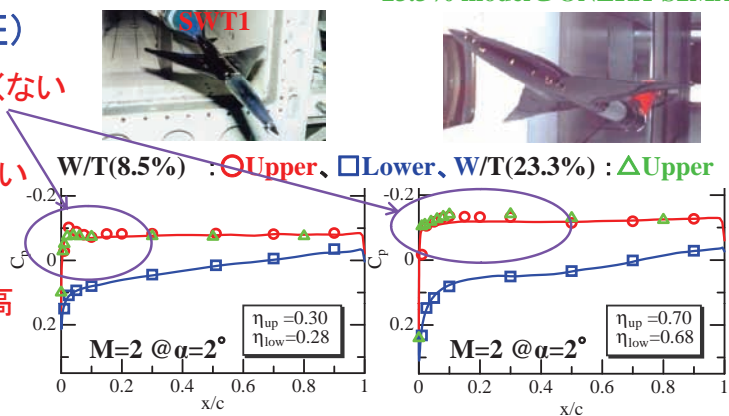
1. CFD検証

(CFDと風試結果の比較・検証)

- ・前縁部Cp分布の一致度は高くない  
⇒模型製作精度？
- ・C<sub>D</sub>の定量的な一致度は高くない  
⇒乱流モデル検証  
(特にRe数効果)
- ・低速大迎角特性の一致度は高くない  
⇒剥離特性検証  
(特にピッチアップ特性)

8.5% model@JAXA-

23.3% model@ONERA-S2MA



2. コンセプト検証

- ・遷移計測における定量性問題  
⇒主流乱れ、表面ラフネスの影響把握
- ・e<sup>N</sup>法における遷移判定基準設定問題  
⇒判定基準データベース構築の必要性



これらの課題克服の一助として、NEXST-1で蓄積したCFD、風試、飛行試験結果をデータベース化し、WEBで公開中

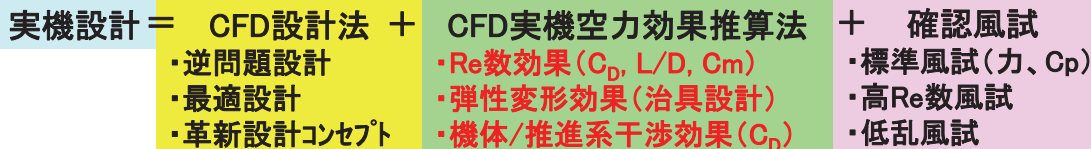


### 3. (3) 将来のEFD/CFD連携の姿



NEXST-1プロジェクトにおけるEFD/CFD連携の姿: 役割分担と相互補完

実機空力設計の立場における連携のEFD/CFD連携の将来像(私案)



**【今後の課題】**

**(1) Re数効果**

- ・流れ場検証: 標準形状による比較・検証データの蓄積
- ・乱流モデル検証: CFD検証用高Re数風試データの蓄積
- ・遷移モデル検証: 遷移予測用遷移試験データの蓄積

**(2) 弾性変形効果**

- ・構造モデル検証: 実機構造データの蓄積
- ・解析手法の効率化: CFD+NASTRAN法 (形状修正、格子補間、等) の改善

**(3) 機体/推進系干渉効果**

- ・抗力推算の高精度化: 内/外部流格子密度の最適化
- ・インテーク/機体干渉効果検証: インテークプラグ風試とCFD結果の比較・検証データの蓄積
- ・ジェット排気効果検証: パワー効果模擬風試とCFD結果の比較・検証データの蓄積

風試はCFDの補完(推算精度向上、複雑現象説明、等)として必要不可欠

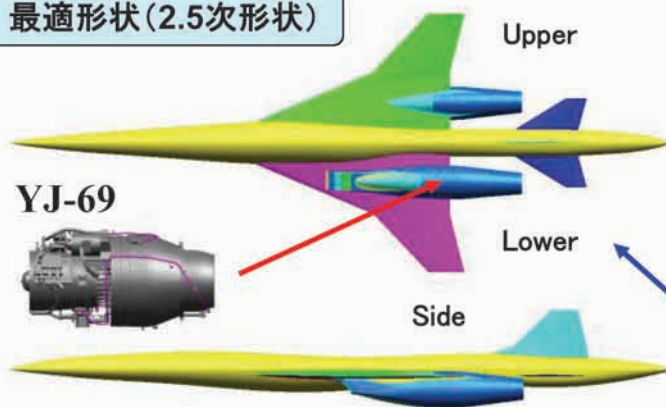
NEXST-2成果の有効活用



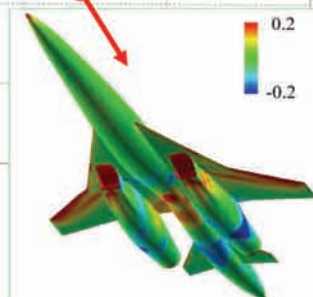
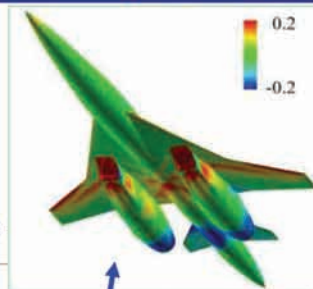
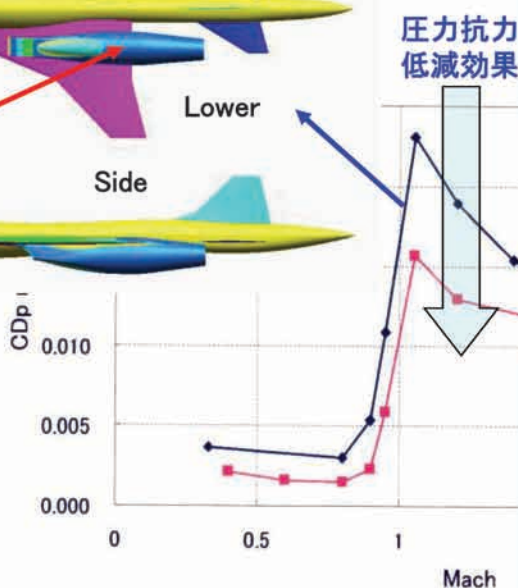
### 3. (4) NEXST-2空力設計技術①



最適形状 (2.5次形状)



最適空力設計技術  
↓  
非軸対称胴体形状最適設計法  
↓  
機体/推進系干渉抗力低減設計



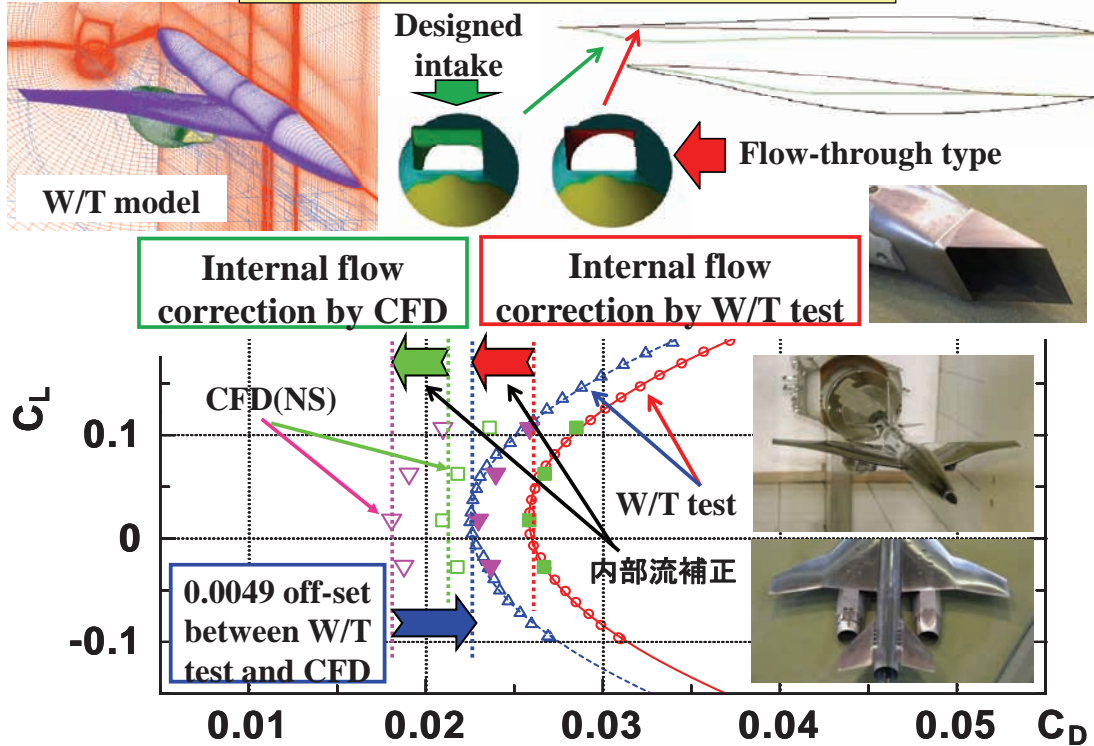




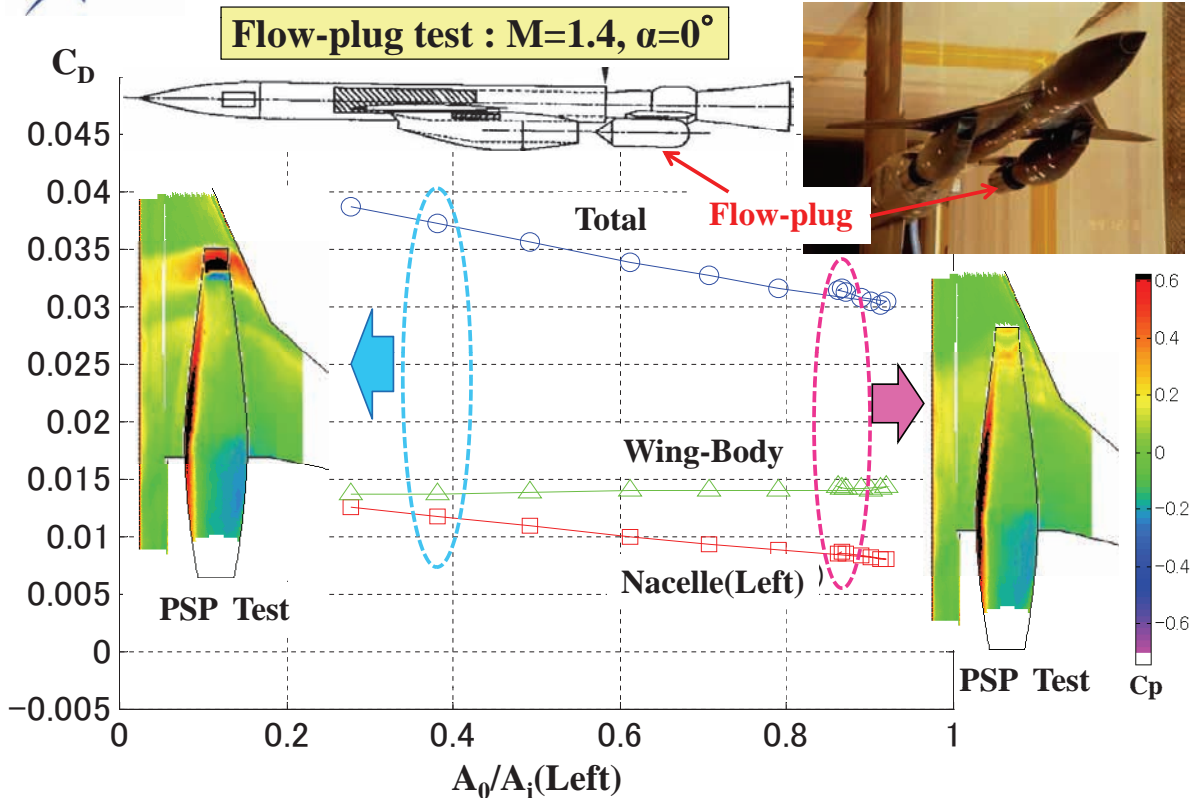
### 3. (4) NEXST-2空力設計技術②



#### フロースルーナセル風試とCFD解析感比較



### 3. (4) NEXST-2空力設計技術③

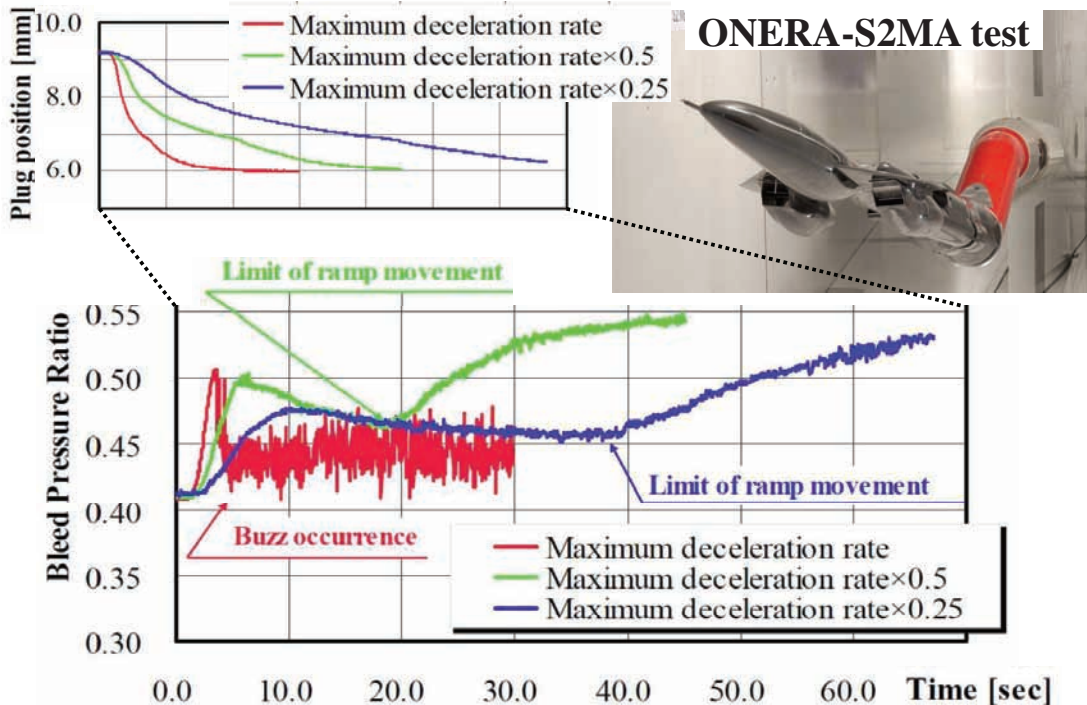




### 3. (4) NEXST-2空力設計技術④



#### フロープラグ風試@M=1.6



### 4. (1) JAXA次期プロジェクト①



#### ① 静粛超音速研究機構想

##### JAXA小型超音速旅客機案

全長: 47.8 m  
全幅: 23.6 m  
翼面積: 175 m<sup>2</sup>  
重量: 70 トン

乗客数: 36-50人  
巡航M: 1.6  
航続距離: 3,500nm以上

エンジン: 15 トン双発



エンジン(F125を想定)



多分野統合・多目的最適設計(胴体形状設計)

インテーク最適CFD設計

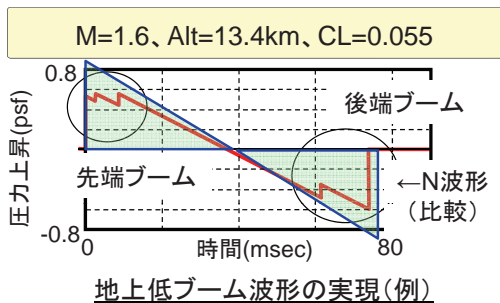
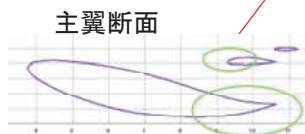
高精度CFD解析による主翼/尾翼干渉効果の最適化


#### 研究機の諸元

最大M: 1.4~1.6  
高度: 14km


全備重量: 4000kg  
燃料: 1050kg  
全長: 13.8m  
全幅: 7.055m

多分野統合・多目的最適設計(主翼形状設計)





## 4. (1) JAXA次期プロジェクト②




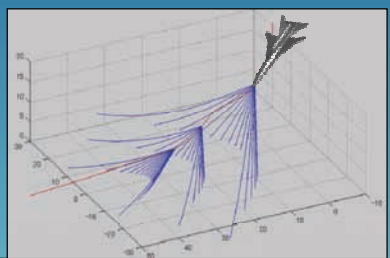
### ②低ソニックブーム設計概念実証(D-SEND)プロジェクト

**D-SEND: Drop test for Simplified Evaluation of Non-symmetrically Distributed sonic boom**  
 (非軸対称ソニックブーム場に対する簡易評価のための落下試験)

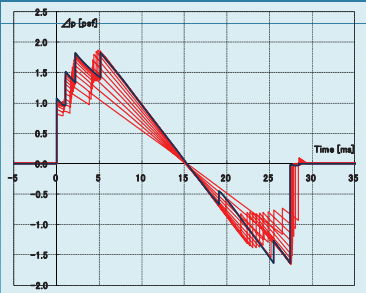
形状名: S3CM (S-cube Concept Model)

- 設計点:  $C_L=0.12$  ( $M=1.4$ ,  $H=8\text{km}$ )
- 重量:  $W=1000\text{kg}$
- 主翼面積:  $S=4.92\text{m}^2$
- 翼幅:  $b=3.5\text{m}$
- 全長:  $L=7.7\text{m}$
- 最大直径:  $D=0.48\text{m}$







ソニックブーム伝播のイメージ



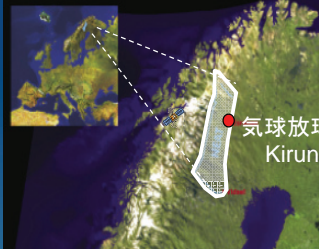
地上における低ソニックブーム波形



## 4. (1) JAXA次期プロジェクト②



スウェーデンNEAT実験場



● 気球放球場  
Kiruna

D-SEND#1

分離(高度30km)

N波形用モデル

低ブーム波形用モデル

データ受信

コマンド送信

管制棟

気球放球場

D-SEND#2

低ブーム設計概念用モデル

GPS衛星

最大マッハ数1.8  
(高度15km以下)

N型波形

低ブーム波形

BMS制御

マッハ1.4、45度ダイブ飛行

●重量:  $W=1.0\text{ ton}$

●全長:  $L=7.7\text{ m}$

低ブーム波形

係留気球(高度1km)

ブーム計測マイク

ブーム計測システム(BMS)



## 4. (2)まとめ



### 1. JAXAの次期プロジェクト

#### 【静粛超音速機技術の研究開発】

##### (1) 静粛超音速研究機(S3TD)計画

- ・基本設計完了⇒CFD設計と風試比較データの蓄積

##### (2) 低ソニックブーム設計概念実証(D-SEND)プロジェクト

- ・CFD、風試、飛行試験の相互比較データが蓄積される予定

### 2. NEXST-DB

- ・NEXSTプロジェクトのCFD、風試、飛行試験結果のデータベース化

次頁

### 3. NEXSTプロジェクトにおけるEFD/CFD連携

- ・NEXST-1プロジェクトではEFD/CFDの有効な連携を実施
- ・実機設計への適用に向けてのEFD/CFD連携の将来像として、**高精度CFD設計・解析技術と確認風試による相互補完が不可欠**

- ・今後の課題

- ①CFD検証としてのEFDの役割が急務
- ②飛行試験データによるCFD検証も有効

私案

## NEXST-DB NEXSTプロジェクト空力データベース



次世代超音速機技術の研究開発のためJAXAにより進められた**小型超音速実験機(ロケット実験機)プロジェクト**において蓄積された空力データをまとめ、**空力データベース(NEXST-DB)**を構築しました。

### データベースの目的

超音速航空機の空力データベースを提供することにより日本の航空宇宙業界の発展に貢献することを目的としています。本データベースでは**飛行実験**により取得された高いレイノルズ数のデータはもちろん、**風洞試験**や**CFD解析**結果も掲載しています。

### 掲載データ内容

1. **空力データ**
  - ・NEXST-1飛行実験データ、CFD解析、風洞試験データ
  - ・表面圧力分布、空気力、境界層遷移データ
  - ・超音速、遷音速、亜音速データ
2. **機体の形状データ**
  - ・NEXST-1機体形状CATIAデータ
  - ・CFD解析格子データ
3. **関連学術論文 やその他**

### データベース機能

- ・空力データを簡単にグラフ表示
- ・同じ条件の実験結果とCFD結果を同時に表示可能
- ・必要なデータをテキスト形式でダウンロード可能
- ・計測条件を明確化

### 利用方法

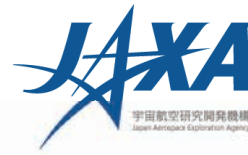
- ・以下のURLにアクセスし、IDとPasswordを取得申請して下さい。

URL: <http://nexstdb.chofu.jaxa.jp>

- ・申請の際には公的なメールアドレスを申請して下さい。



2008/08/25



日本におけるEFD/CFD融合 – JAXAからの提言 –  
Integration of EFD and CFD in Japan  
– A Proposal from JAXA –

口石 茂、渡辺重哉、相曾秀昭、松尾裕一 (JAXA)

第4回EFD/CFD融合ワークショップ

2011年1月25日

秋葉原コンベンションホール

内容

- EFD/CFD融合とは
  - 特に航空機設計開発の観点から
  - 国内外における取組例
- 過去のワークショップを振り返って
  - 寄せられた主な意見
- 現状認識／あるべき姿
- 融合の形態と考え方
- 日本における進め方 – JAXAからの提言 –
- おわりに

- 本資料は、著者4人で作成した原案を基に、ワークショップ実行委員から寄せられた意見を反映させて、完成したものです。
- 今回の発表の内容は、航空宇宙分野を主な対象としています。

## EFD/CFD融合とは

- EFD: Experimental Fluid Dynamics (実験流体力学)
- CFD: Computational Fluid Dynamics (数値流体力学)
- 両者それぞれの強み・弱みがある
- 両者を積極的に組み合わせることにより、
  - ー研究開発の効率化・高精度化が実現できないか？
  - ーこれまでできなかったことが、できるようにならないか？
  - ーこれまで分からなかったことが、分かるようにならないか？
  - ーバーチャルな世界から、**より現実的な世界**に近づけないか？

## 特に航空機設計開発の観点から

- 昨今になって、日本の航空機産業が真っ向から国際的な競争の下で飛行機作りをしていこうとしている。
- 今後この流れを維持するには、基盤技術の国際的な競争力を伸ばしていかなければならない。
- 空力設計に関しては、EFD/CFDの両アプローチがあり、それぞれについて技術開発や設備整備を進めていく必要がある。
- 一方、EFD/CFDそれぞれの技術レベルは、各国でほぼ同程度であるのが実状。

※日本は部分的に欧米から出遅れている？ (36ページ参照)

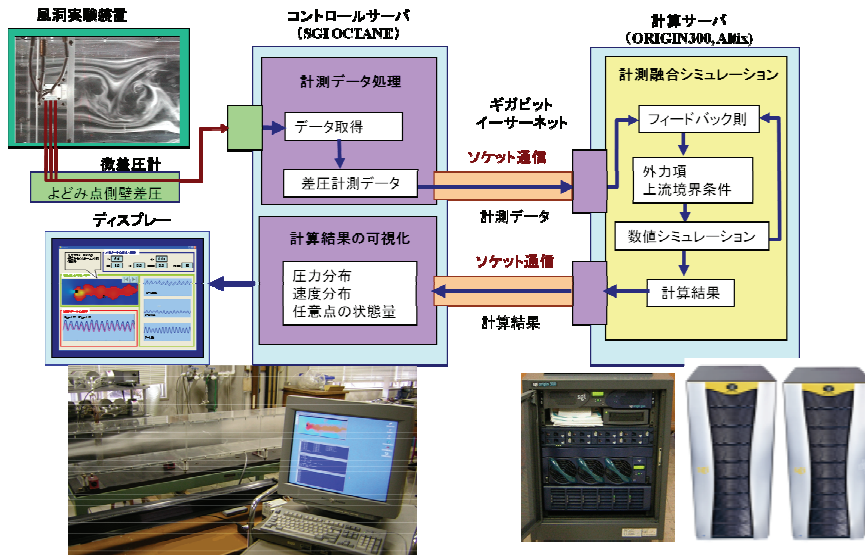
### JAXAからの提言1

**日本としてEFD/CFD融合技術を全面的に押し出すことにより、国際的優位性を確立することができないか？**

## 国内外における取組例

### ■東北大学ハイブリッド風洞

ー計測融合による、実現象(カルマン渦)のリアルタイムシミュレーション

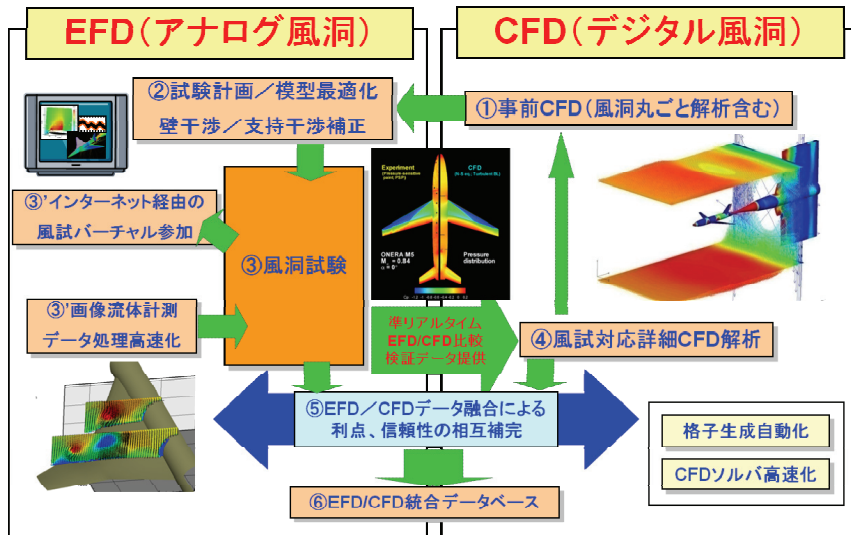


早瀬, 第1回EFD/CFD融合ワークショップ, JAXA-SP-09-002

## 国内外における取組例

### ■JAXAデジタル／アナログ・ハイブリッド風洞システム

ー風洞試験(アナログ風洞)にCFD(デジタル風洞)を強く連携させた、コンカレントなEFD/CFD融合システム



口石他, 第42回流体力学講演会, JSASS-2009-0137

## 国内外における取組例

### ■4次元変分法による後方乱気流の計測融合シミュレーション

—後方乱気流計測データを用い、気象におけるデータ同化手法の導入によりシミュレーションの初期値を決定

**計測と計算の差: 目的関数 → 最小化(アジョイント法)**

**設計変数: 初期条件**

$$J(\mathbf{Q}_0) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^N (\mathbf{H}_i(\mathbf{Q}_i) - \mathbf{Y}_i)^T \mathbf{R}_i^{-1} (\mathbf{H}_i(\mathbf{Q}_i) - \mathbf{Y}_i)$$

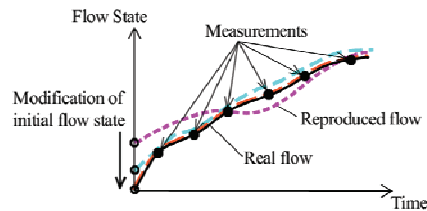
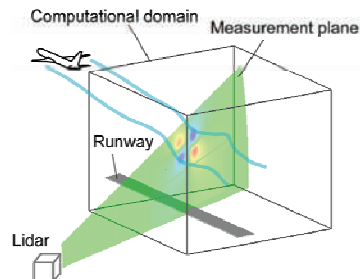
$N$ : 時間ステップ

$\mathbf{Q}_i$ : 計算変数

$\mathbf{Y}_i$ : 計測変数

$\mathbf{H}_i$ : 変換行列

$\mathbf{R}_i$ : 計測誤差共分散行列

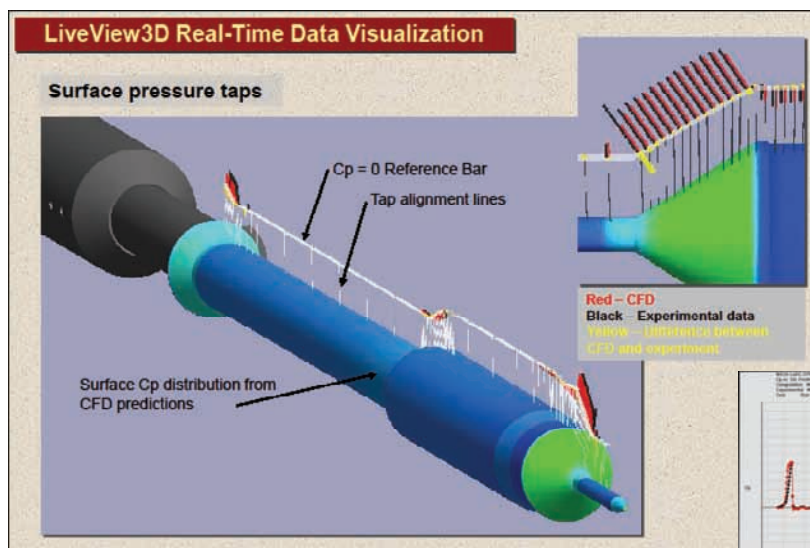


大林, 第1回EFD/CFD融合ワークショップ, JAXA-SP-09-002

## 国内外における取組例

### ■Unified Data Visualization Using the Virtual Diagnostics Interface (ViDI)

—可視化技術を駆使することにより、風洞試験の効率や利便性を向上



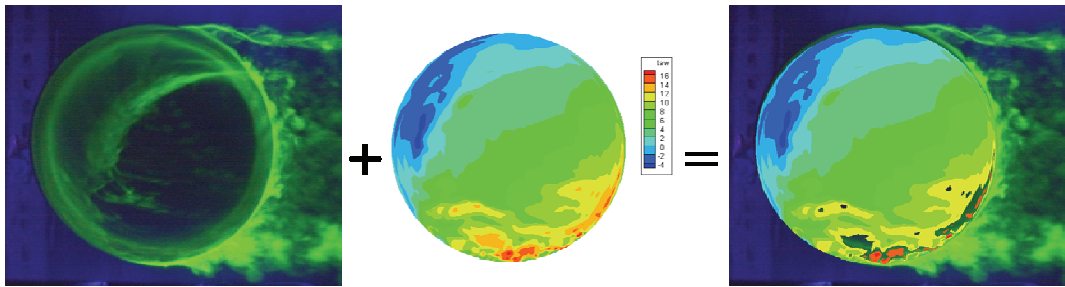
Schwartz, 第3回EFD/CFD融合ワークショップ, JAXA-SP-10-002



## 国内外における取組例

- VIDELICET (Visualization Design and Life Cycle Management) システム  
 – EFD/CFD 並置化 (juxtaposition) による認知地図の劇的改良

**Superimpose "shear stress" (CFD) on "vortices" (EFD)**



染料流しによる渦の実像
せん断応力の可視化
因果関係を示す並置化画像

フリスビーの周りにできる渦構造(実写)とせん断応力(シミュレーション)の因果関係

藤代, 第1回EFD/CFD融合ワークショップ, JAXA-SP-09-002

## 国内外における取組例

- CFDを活用した風洞模型支持装置干渉補正  
 – 支持装置あり/なしCFD解析の差分から、風試支持干渉効果を補正

支持なし模型    支持付き模型    支持のみ

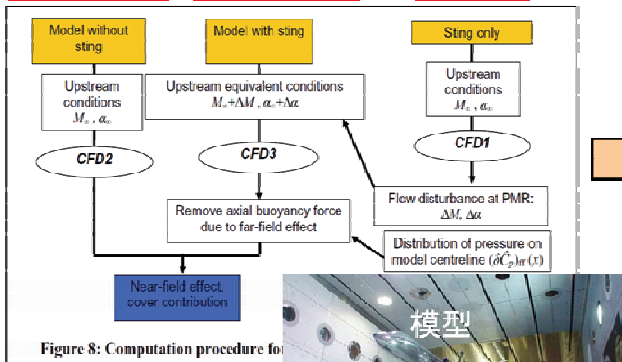


Figure 8: Computation procedure for

支持干渉補正手順

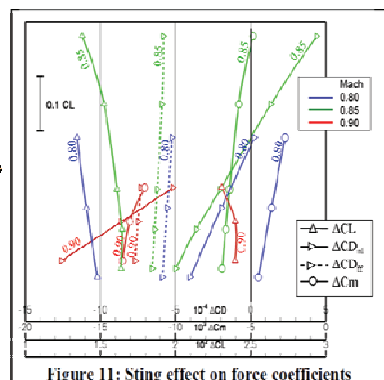
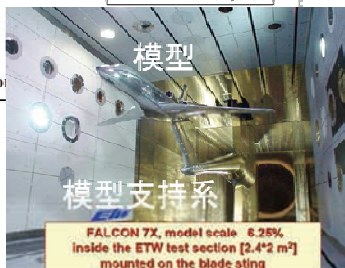


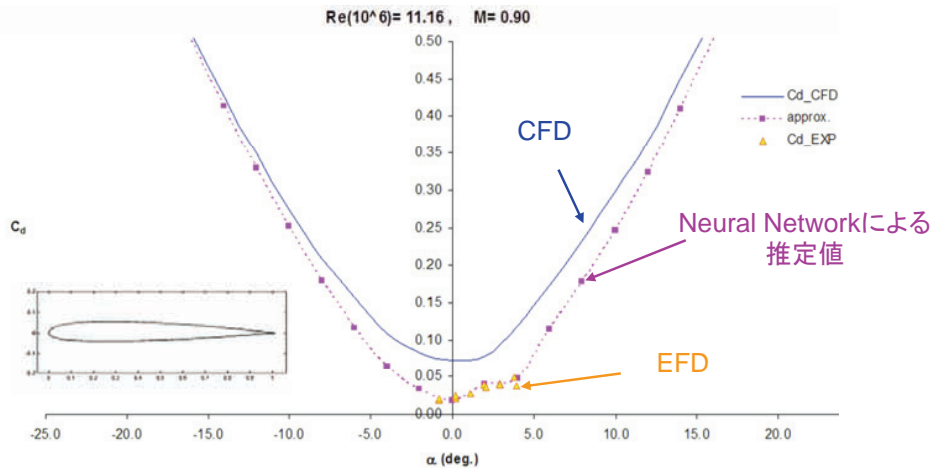
Figure 11: Sting effect on force coefficients

支持干渉推定量  
(風洞データへの補正量)

## 国内外における取組例

### ■Neural Networkによる翼型の抗力係数推定

—データ融合手法(ニューラルネットワーク)を用いて、EFDデータの欠損部分をCFDデータで補間



Meade, International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration (AFI/TFI), 2004

## 過去のワークショップを振り返って

- 第1回：2008年2月26日@JAXA調布航空宇宙センター  
参加者：59名  
内容：国内招待講演10件、全体ディスカッション
- 第2回：2009年2月23, 24日@JAXA調布航空宇宙センター  
参加者：80名  
内容：海外招待講演2件、国内招待講演6件、一般講演4件、パネルディスカッション
- 第3回：2010年1月25日@秋葉原コンベンションホール  
参加者：78名  
内容：海外招待講演1件、国内招待講演4件、パネルディスカッション

## 寄せられた主な意見

### ■ EFD/CFD融合のあり方について

- ✓ 1+1 > 2となるのが理想だが、まずはEFDでもCFDでも難しい問題を0.3+0.3程度で融合させていくことが重要では。
- ✓ 将来的にはCFDの精度を上げる活動としてのEFDという位置づけになるのでは。
- ✓ EFDはそれなりに信頼性があるが、測れないところが出てくる。そこをCFDを使って補間することはできないか。

⇒ EFD/CFDの役割分担が重要

## 寄せられた主な意見

### ■ EFD/CFD融合の実問題への適用について

- ✓ 流体現象としての不確かさが設計開発においていかほど重要なかが問題。
- ✓ EFDに一番期待されているのは実験の流体力学をいかに解釈するのかにも関わらず、そこが欠如している。

⇒ まずは流体力学現象の理解が重要

## 寄せられた主な意見

### ■EFD/CFD融合の実問題への適用について(続き)

- ✓ EFDとCFDを一致させることは困難。それよりもなぜ異なるのかを調べ、それらをどう設計に反映させるかを考えるべき。
- ✓ EFD/CFDともに目的は設計上の判断を可能たらしめること。ここでEFD/CFDを一緒にすることで迅速な判断を可能とするデータ融合という考えが出てくる。
- ✓ 航空機開発には知見の集積が大きな比重を占めている。そこでEFD/CFDで知見を向上させることを目指している。

- ⇒ 実機空力特性の真値を予測するのは困難
- ⇒ 融合により、EFD/CFD両者の不確かさを許容しつつ、如何に設計開発に資する判断材料を与えるか
- ⇒ 融合による課題・知見の抽出という観点も重要

## EFD/CFD融合の現状認識

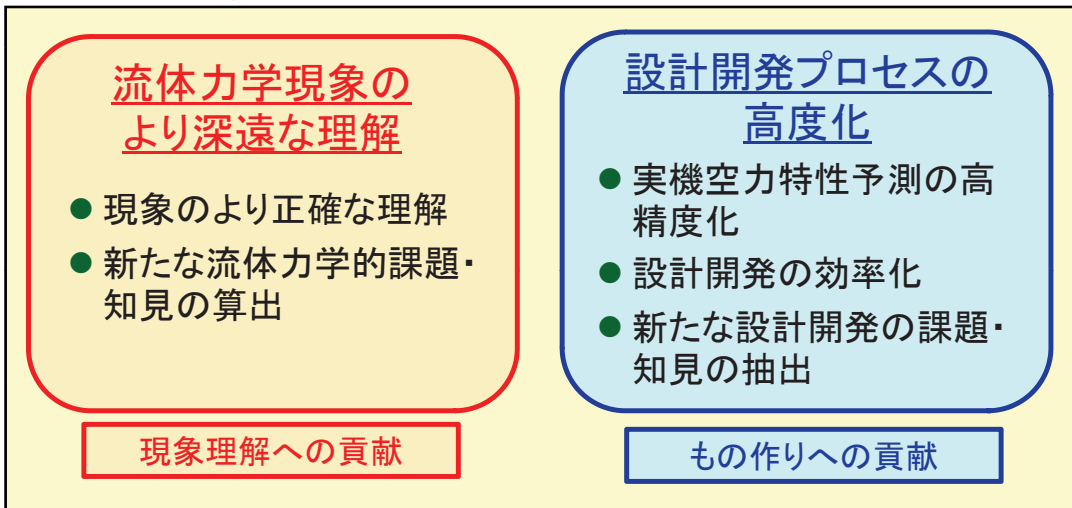
- 流体力学の研究者にはなじみの薄い専門知識が必要な場合があるため、取りかかりが悪い(敷居が高い)。
- また、具体的な課題(ニーズ)もアウトプットもイメージしづらい。
- そもそもEFD/CFD融合とは何なのか、融合して何のメリットがあるのかですら分りづらい。
  - 単なる比較・検討と融合とは異なる！
- よって研究者間でビジョンが共有できない。
- 以上により、大方は各機関で孤軍奮闘している状態。

- ⇒ EFD/CFD融合に係るコンセプト(あるべき姿)の共有が急務！

## EFD/CFD融合のコンセプト(あるべき姿)

■寄せられた意見や現状認識を踏まえ、航空宇宙分野における融合のコンセプト(あるべき姿)を以下のように考えた。

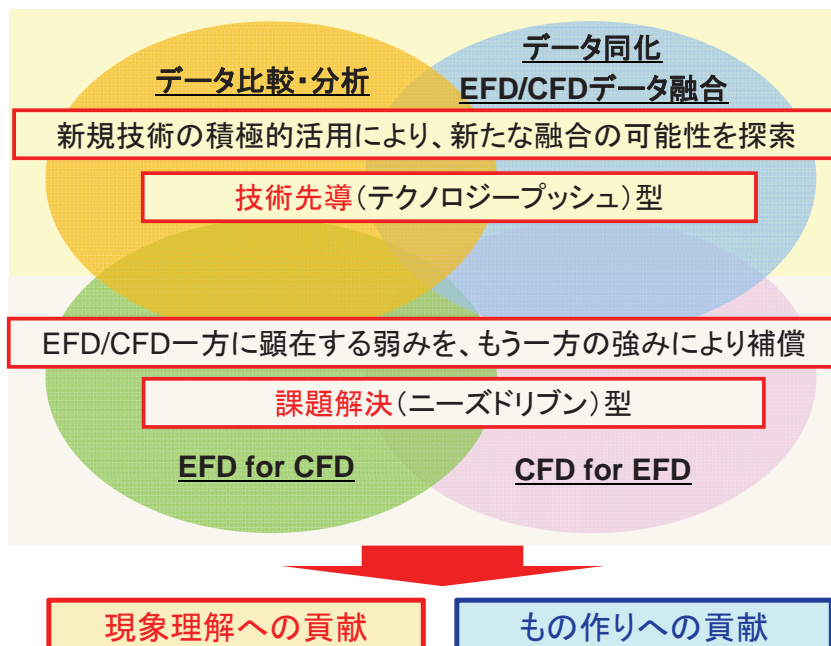
JAXAからの提言2



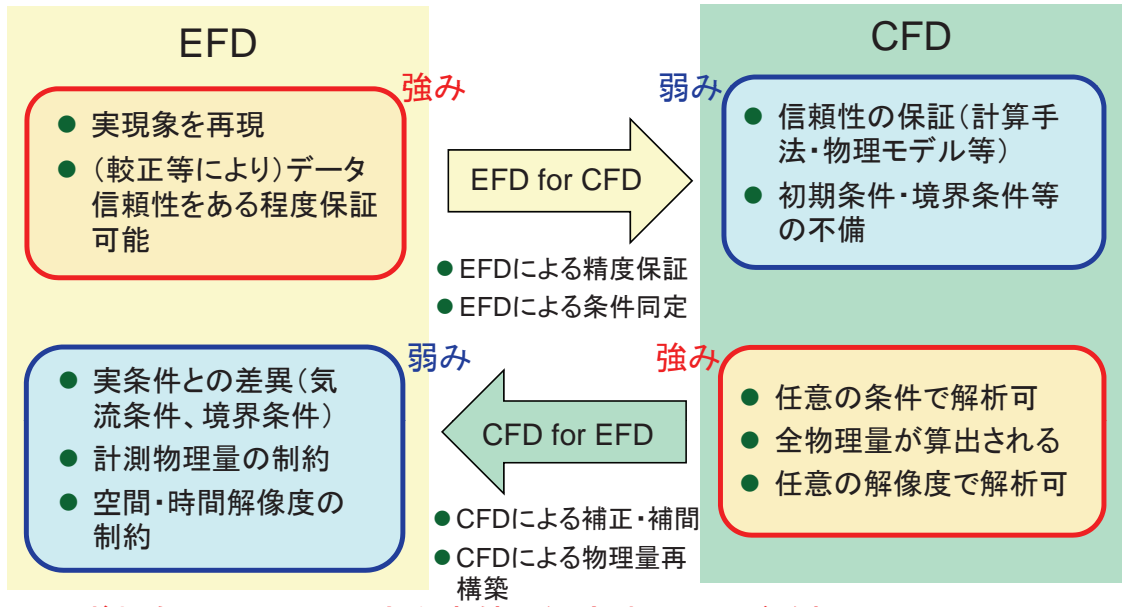
⇒ これで十分か？ 他にもあるか？

## 融合の形態と考え方

■過去の取り組み例を参考に、融合の形態を以下の4つに分類



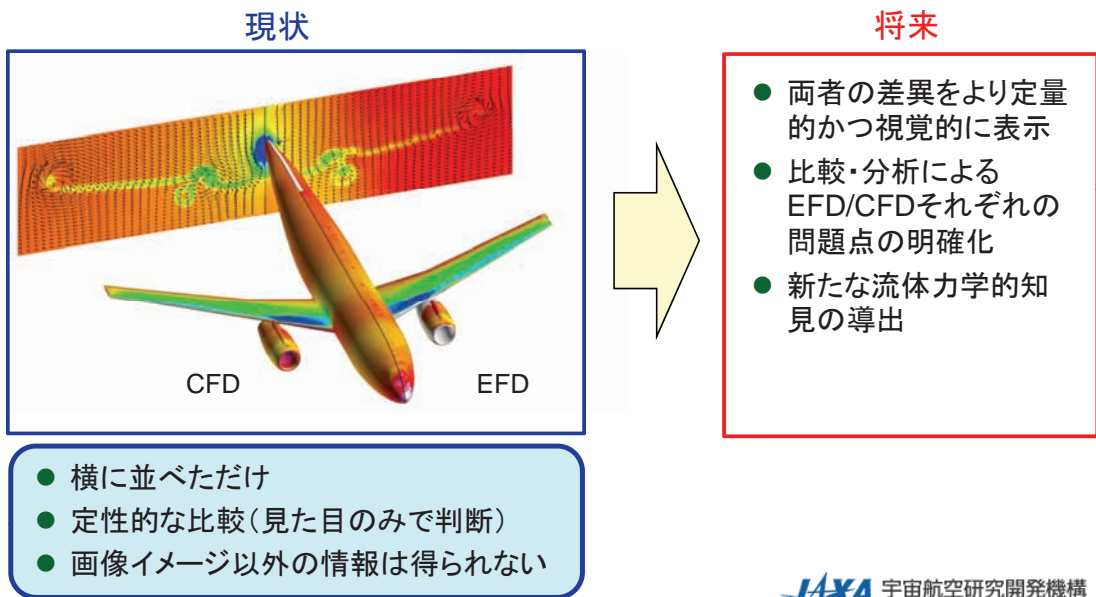
## EFD for CFD / CFD for EFD



いずれもEFD/CFD一方を真値と仮定することが前提  
⇒ EFD/CFD双方の不確かさを許容した融合は可能か？

## データ比較・分析

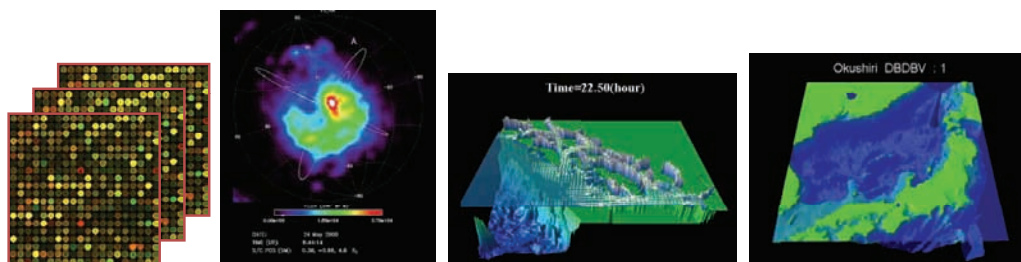
■ 可視化情報技術、データ解析技術等の活用により、単純比較では得られない知見が得られないか？



## データ同化 (Data Assimilation)

- 気象学・海洋学の分野で発達
- 数値シミュレーションモデルと観測を統合する手法
  - ー シミュレーションのみでは適切に物理現象を再現できない
  - ー 観測データは得られる情報に限界がある

観測データで数値シミュレーション内の変数を修正 = データ同化



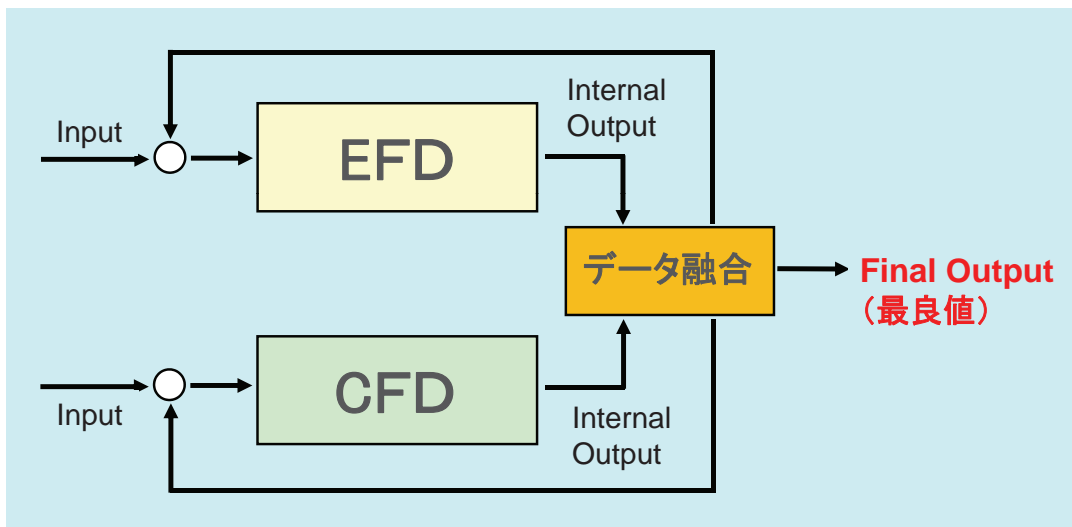
⇒ 航空宇宙分野に適用可能か？

データ同化研究開発センター  
<http://daweb.ism.ac.jp/contents/>



## EFD/CFDデータ融合

- EFD/CFDデータの**相補的活用**により、精度・信頼性を向上させたデータ(**最良値**)を導出できないか？

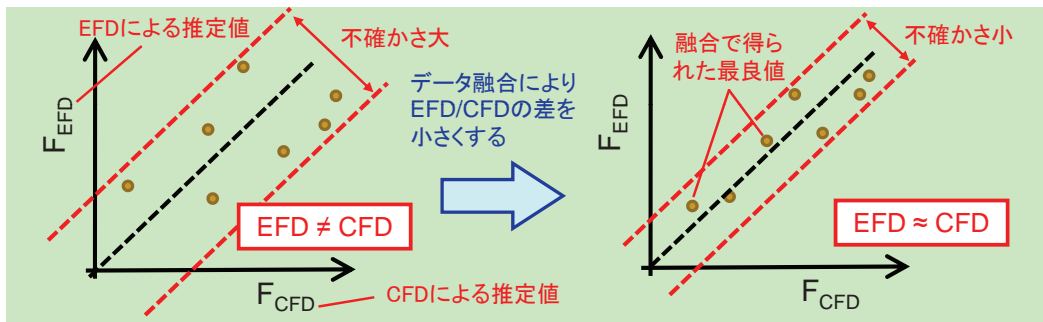


⇒ EFD/CFDそれぞれに課題の多い現状では困難？



## EFD/CFDデータ融合による最良値推定

- 融合により、流体现象に係る**真値**を求めるのが究極の目標
- しかしながら単なる融合で真値を明かめるのは、おそらく不可能
- そこで、融合によりEFDとCFDを極力一致させた値を**最良値**と考え、加えて**不確かさ幅**を評価することを当面の目標としたい。
- その不確かさ幅を、EFD/CFD融合の高度化により、可能な限り小さくしたい。



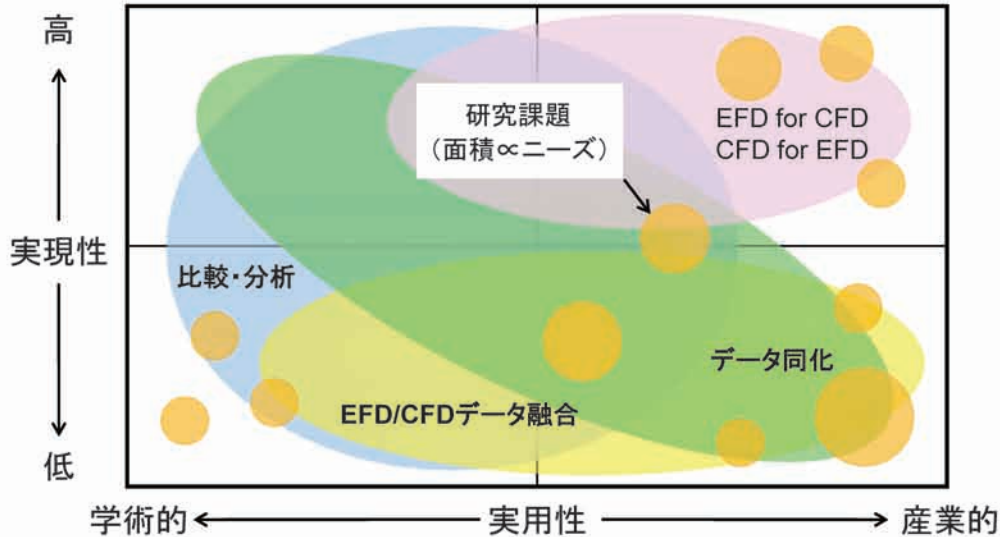
EFD/CFDデータ融合による最良値推定(イメージ)

## 融合研究課題(案)

	現象理解への貢献	もの作りへの貢献
比較・分析	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 並置化による現象因果関係の抽出・新たな知見の導出</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 並置化によるEFD/CFD健全性評価・問題点抽出</li> </ul>
CFD for EFD		<ul style="list-style-type: none"> <li>● CFDによるEFD感度解析</li> <li>● CFDによるEFDデータ補間</li> <li>● CFDによる風洞壁・支持干渉補正</li> <li>● 事前CFDによるEFD条件設定</li> <li>● パワー効果補正</li> <li>● フラッタ、パフェット等の事前予測</li> </ul>
EFD for CFD	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 物理モデル構築・高精度化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● EFDデータによる乱流モデルの選択</li> <li>● 高忠実CFD解析(模型変形、遷移)</li> <li>● EFDデータによるCFD格子の再配置</li> </ul>
データ同化	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 計測融合シミュレーションによる現象再現</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● データ同化によるCFD条件同定</li> </ul>
EFD/CFDデータ融合	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 微細・複雑現象(音響、燃焼等)の解明</li> <li>● 非定常現象の解明</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● EFD/CFD最尤値推定</li> <li>● EFD/CFDデータから実機性能の直接推定</li> </ul>



## 日本における進め方 –JAXAからの提言–



⇒ 融合研究課題をポートフォリオで整理の上、優先順位を設けて、日本として戦略的に実施できないか？

## 日本における進め方 –JAXAからの提言–

- 日本でEFD/CFD融合を推進するための基盤となる、フレームワークを構築したい。

### JAXAからの提言3

#### 「EFD/CFD融合ワーキンググループ」(仮称)の設立

- 航空宇宙に限らず、様々な専門分野から会員を募集
- メーリングリストで関連学会やセミナー等を周知
- EFD/CFDデータや参考資料を共有
- JAXA公募研究の実施
- 競争的資金(科研費等)の獲得も検討
- 将来的にはコンソーシアム的な発展を期待

※コンソーシアム(Consortium): 提携、共同、団体

## 日本における進め方 –JAXAからの提言–

- 一方、EFD/CFD融合推進のための体制をJAXAで強化
  - ✓ EFD/CFD共通データベースの構築
  - ✓ CFD解析プラットフォームの整備
  - ✓ 検証用EFDデータの取得
- ニーズを重視しつつも、テクノロジープッシュ的な発想も常に念頭に置く
- 実飛行条件予測に関しては、フライトデータ整備も今後の課題
  - フライトデータの高精度化の観点から、将来的にはEFD/CFD for Flightという考え方も必要

## (参考)JAXA CFDポータルシステム(NAGシステム)

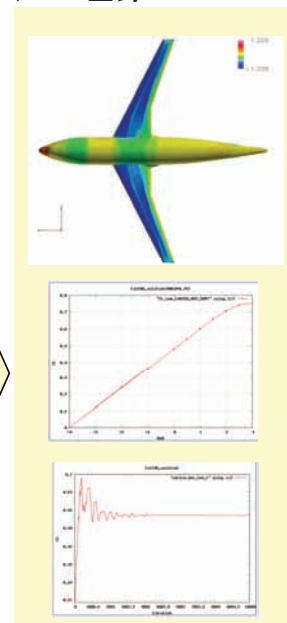
- 形状データ、解析条件ファイル等を用意してWeb(ポータルサイト)上で登録
  - ⇒ 格子生成、解析実施、データ整理までを自動実行
  - ⇒ CFDに不慣れなユーザでも手軽に解析が可能！



データ入力画面

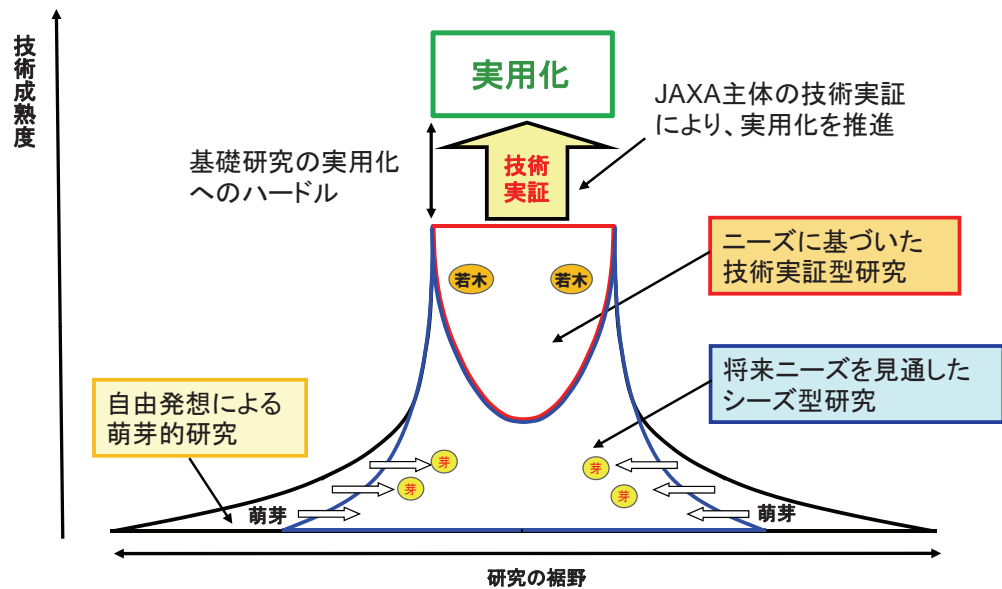


CFD解析結果DB



## 日本における進め方 –JAXAからの提言–

### ■ 研究課題の絞り込みと技術成熟・実用化まで(イメージ)



## EFD/CFD融合推進のために

- EFD/CFD融合技術は新たな研究分野(研究要素の宝庫)
  - 研究者個々人の自由な発想からの発展を期待
  - 何に対してどう役に立つかを常に考えることが重要
- EFD/CFD融合に先立って、**流体力学と他分野との融合**が、技術のブレークスルーにおいて重要
  - 従来の流体力学的発想のみでは限界がある
- 実験とシミュレーションの融合は工学共通の課題なので、成果は流体分野以外にもスピノフ可能
- 産学官の密接な連携により、効果的かつ効率的に推進したい

## おわりに(JAXAからの提言)

### ■JAXAからの提言1

日本としてEFD/CFD融合技術を全面的に押し出すことにより、国際的優位性を確立することができないか？

### ■JAXAからの提言2

航空宇宙分野におけるEFD/CFD融合の二枚看板

流体力学現象の  
より深遠な理解

現象理解への貢献

設計開発プロセスの  
高度化

もの作りへの貢献

### ■JAXAからの提言3

「EFD/CFD融合ワーキンググループ」(仮称)の設立

以下、参考資料

### 参考：過去のワークショップで寄せられた意見（詳細版）

- ✓ 航空機の実機空力特性について、EFD、CFDのどちらの方がポテンシャルが高いかを考えると、EFDでは不可能だがCFDの方がまだ可能性がある。
- ✓ EFDが何をしたいかによるのではないか。空力特性の把握だけか。フライトまで含んだシステムのモデル化か。まずは目標を考えるべき。
- ✓ 今後5年間でEFDが必要なくなるほどCFDが発達するとは思えない。EFDとCFDの使い分けが重要ということではないか。一方全てのケースについてEFDとCFDを付き合わせるのはやりすぎと考える。
- ✓ 両者を組み合わせて使うべきだと思うが、それが常時必要になるのか。
- ✓ それはEFDも同じことではないか。誰がどこでやるかで結果が異なってしまう。
- ✓ 確かにコンピュータの能力が向上してやれることが増えた一方で、EFDはそこまで技術が加速していないという側面はあるが、CFDだけで十分という前にvalidationをスムーズにできるシステムを構築することが大事なのではないか。
- ✓ 将来的にはCFDの精度を上げる活動としてのEFDという位置づけになるのでは。
- ✓ 1+1 > 2となるのが理想だが、まずはEFDでもCFDでも難しい問題を0.3+0.3程度で融合させていくことが重要では。
- ✓ 個別の問題についてはカルマンフィルタ等ツールや方法論ができつつある。それらを整理すると体系化できて他の分野にも使えるということがあるのではないか。そこが研究対象でもある。

### 参考：過去のワークショップで寄せられた意見（詳細版）

- ✓ 現状では気象に特化したものが風洞にも適用できる等、裾野が広がっていく可能性があるのでは。
- ✓ 関係者を融合する困難さもある。研究者のモチベーションをどう高めていけばよいのか。いずれにしても閉じたコミュニティにならないように、オープンな体制で海外と競うような姿が欲しい。
- ✓ CFDは日本の売りなので、ペタコン等の技術動向と合わせて今後検討すべき。
- ✓ 融合の前に分解することが重要ではないか。個々人が持つ技術や手法をスクラップ&ビルドすることにより、何ができるか、何をすべきか、という共通項が見えてくる。
- ✓ 現場と研究者で課題を共有できることが大事。
- ✓ Ill-posedの問題をEFD/CFDで補完し合うことによりWell-posedに近づけていくのが大事。
- ✓ EFD/CFDお互いの基礎がしっかりして、かつ互いをよく知っていることが大事。
- ✓ CFDと風試の両方にかかる時間を減らすことにより、より早く製品化に到達することができたらよい。
- ✓ 流体现象としての不確かさが設計開発においていかに重要なのが問題。
- ✓ EFD/CFDともにその目的は設計上の判断を可能たらしめること。ここでEFD/CFDを一緒にすることで迅速な判断を可能とするデータ融合という考えが出てくる。

## 参考：過去のワークショップで寄せられた意見（詳細版）

- ✓ 融合の最終ゴールは真値に到達することかもしれないが、完全に一致するようなデータはまず得られない。時代に応じた精度目標値に向かって、いかに融合を進めていくかを考えることが大切。
- ✓ EFDとCFDには違いが多すぎるので、両者を一致させることは困難。それよりもなぜ異なるのかを調べ、それらをどう設計に反映させるかを考えるべき。
- ✓ 生産性や効率性という観点も重要
- ✓ EFDはそれなりに信頼性があるが、測れないところが出てくる。そこをCFDを使って補間することはできないか。
- ✓ 実現象には敏感な要素がかなりあるので、EFDとCFDだけで世の中閉じようとするのがおかしい。航空機開発においてはもっと飛行試験が必要。欲しい真値はEFD/CFDの真値ではなく実機の真値のはず。
- ✓ まずは風洞試験として正しい値を模索するのが第一段階では。さらにそこから実飛行条件を予測するという2ステップで。そこにEFD/CFD融合が入り込める余地があるのでは。
- ✓ 航空機開発には知見の集積が大きな比重を占めている。そこで風洞試験とCFDの2つを使って知見を向上させ、不確かさを減らしていくことを目指している。
- ✓ 感度解析として実飛行条件を予測することができないか。

## 参考：過去のワークショップで寄せられた意見（詳細版）

- ✓ NASAで融合を推進する力は、研究者からではなく、プログラムマネージャーからきている。プロジェクトではデータが正確ならEFDでもCFDでも構わない。
- ✓ 融合する前にEFD自身でやらなければならないことがまだ数多くあるはず。
- ✓ 共同してEFD/CFD融合を進めるためには、オープンにできるデータが必要。
- ✓ EFD/CFD担当者間の連携が、なかなか困難。文化の違いが大きい。
- ✓ 頭の中で融合することができる人間を育成することが最も大切。
- ✓ 理想的で簡単な実験を高精度に行う等で、基礎的な問題を地道に検証するような研究も重要。
- ✓ 異なる情報を結びつける融合においては学習することが必ずある。その学習プロセスを現実的な問題に応用できる状況を考えておく必要がある。
- ✓ 昔はEFDにCFDを合わせ込んでいたが、CFDの精度が上がった分、CFDサイドからもEFDに要求があるべき。
- ✓ EFDに一番期待されているのは実験の流体力学をいかに解釈するのかにも関わらず、そこが欠如している。
- ✓ 融合の前に、そもそもの流体力学の基本をきちんと押さえてデータを見られる人が重要。

## 特に航空機設計開発の観点から(委員のコメント)

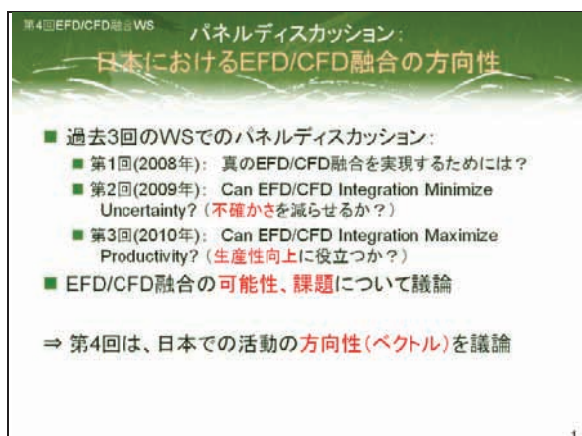
- ✓ CFDの観点で、競争力と言うのなら現状の設計点付近しかできていないレベルを何とかできるのか、という方が重要。
- ✓ 設計者から見て現状のCFDのレベルが満足できる状態にあるとはとても思えない。Stability & Controlや飛行限界の予測や空力荷重予測の信頼性も出てこない、Navier-Stokesを用いた解析の価値が半減する。
- ✓ 技術的に言えば、高レイノルズ数の非定常乱流解析の技術と航空機設計への利用ではいまだに模索の段階。
- ✓ 定量性評価と実用化を次の旅客機開発までに間に合わせることは、今後の空力CFDの一つの目標。すでに欧米から出遅れてしまっている。
- ✓ 日本で嬉しいのはCFDの細かい事を分かっている人が多い。そのため、本気になりさえすれば優位性を確立することができると思う。精度の良い試験データを取得することも容易ではないので、EFD/CFD融合という見方で何かできる事があるかもしれない。
- ✓ 実飛行とは何か？フライトデータとはどんなものか？そもそも飛行試験は何のために行うのか？を良く考えて整理してほしい。空気力学を考える上では、飛行試験では非常に多くの制約があるので、わからないことが多い。だから空力設計ではEFDやCFDでデータを取っている。

## パネルディスカッション 「日本における EFD/CFD 融合の方向性」

パネリスト（登壇順）： 大林 茂（東北大学 流体科学研究所 流体融合センター）  
 澤田 恵介（東北大学 工学研究科 航空宇宙工学専攻）  
 中村 和幸（明治大学 研究・知財戦略機構 先端数理科学  
 インスティテュート）  
 棚橋 美治（三菱重工業 名古屋航空宇宙システム製作所 研究部）  
 松尾 裕一（JAXA 研究開発本部 数値解析グループ）  
 伊藤 健（JAXA 研究開発本部 風洞技術開発センター）

司会： 渡辺 重哉（JAXA 研究開発本部 流体グループ）

**渡辺**：本日のパネルディスカッションの課題なのですが、「日本における EFD/CFD 融合の方向性」ということで、先程の JAXA からの発表も踏まえて進めていきたいと思えます。最終的には皆様と何らかの方向性を共有できるというような結果になれば成功と思っておりますので、ぜひご協力を宜しくお願いいたします。



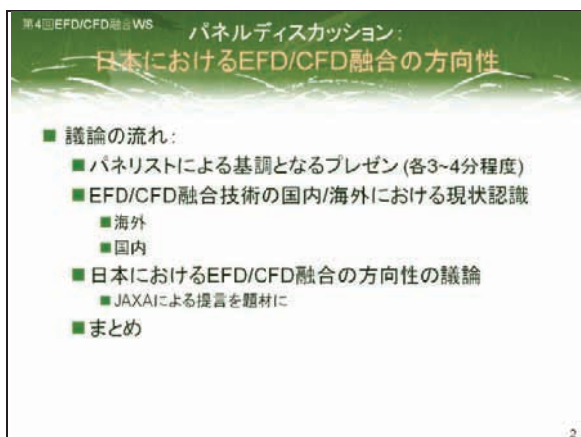
まず、これまで過去のワークショップで3回パネルディスカッションをやってきましたので、その内容を少し復習させていただきたいと思えます。初回は 2008 年であったのですが、この時はまず

初めということで、「真の EFD/CFD 融合を実現するためには？」という非常に大きなテーマでフリーディスカッションをして、その中でやはり皆でよく考えながらやらなければならないだとか、JAXA 等の公的な機関がある程度音頭をとってやっていかなければならないというような激励の言葉をいただいたりしました。それから、東北大学の流体融合センターのようなところとも密接にやっていったらどうかというような意見が出されました。

それから第2回、第3回、実行委員で何を議論しようかを考えた時に、EFD/CFD 融合とは何がどう役に立つのかというところがよく分からない。これがこう役に立ちますと誰もが納得するものが明確でないようなところもあったので、第2回では不確かさを減らせるか、精度を向上させられないか、第3回は生産性向上、効率化に役に立たないかという観点で議論をいたしました。この時も意見がまとまったとは言えないのですが、可能性として EFD/CFD 融合が精度向上や生産性向上にも役に立つだろうということは、それなりの共通認識を持たれたのではないかと思います。ただし、



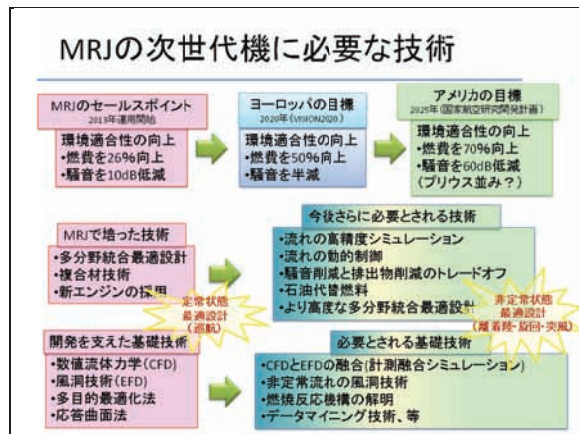
それをやるには色々な課題が多いということも同時に納得されたのではないかと思います。今回の第4回については、このまま EFD/CFD 融合の可能性だけについて議論をしていくのではなくて、やはり何か手をつけていく中で新たにでてくるものがあるのではないかと、今迄のパネルディスカッションのご意見も参考にしながら考えました。それで今回も大きなテーマになりましたが、「日本における EFD/CFD 融合の方向性」ということで議論したいと思っておりますので、ご協力をお願いいたします。基本的にはパネリストの皆様にも色々ご意見をいただくのが中心ではあるのですが、会場の皆様にもぜひ積極的に発言していただきたいと思っております。



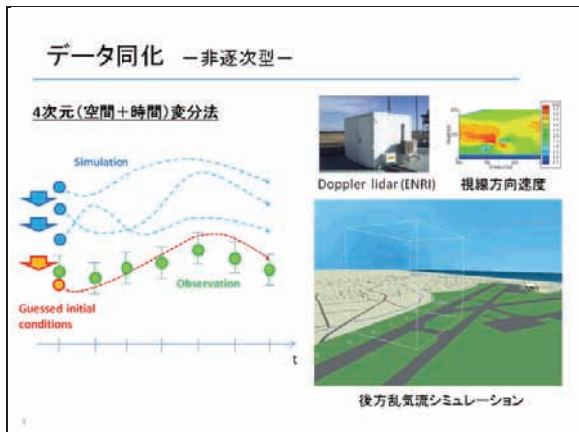
それでは、議論の流れはおおよそこのように考えておまして、最初にパネリストの皆様にも基調となるようなプレゼンをお願いしたいと思っております。その後で先程の JAXA の発表にもありますが、EFD/CFD 融合は今どのような状況なのかについておさらいしながら共通認識を持った上で、「日本における EFD/CFD 融合の方向性」というものに入りたいと思っております。それでは、順番をお願いしたいと思います。まず大林先生から宜しくお願いいたします。

大林：我々のところでは特に EFD/CFD 融合の

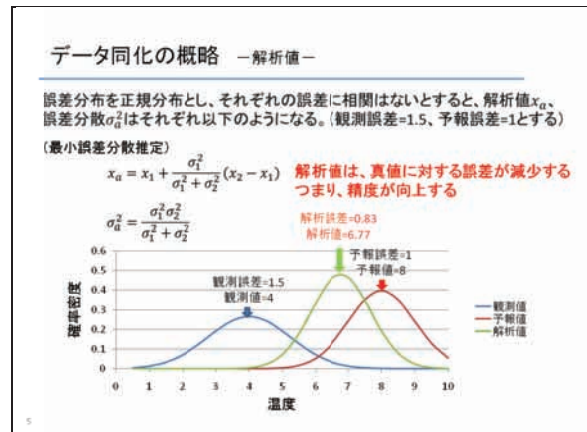
ツールとして何を目標にしているかということをお話しながら、自己紹介に代えさせていただきたいと思っております。



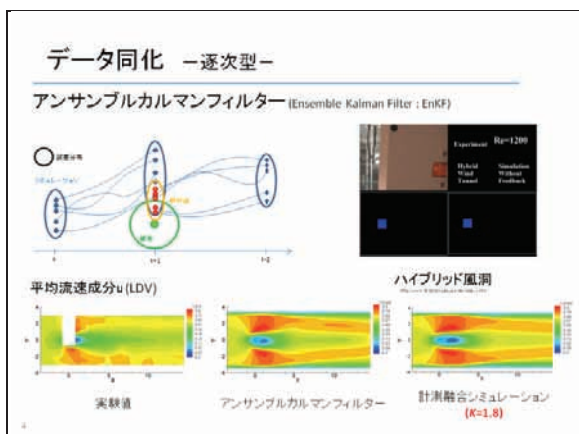
皆様ご存知のように MRJ という国産旅客機を現在開発中なのですが、この MRJ を開発するにあたって、最適化の技術を我々のグループと三菱重工業との共同で開発してきました。ここで出来た技術というのは、設計点、定常状態での最適設計技術ということが言えると思います。これに對しまして現在環境問題等を踏まえて、欧米では高い技術目標を掲げて航空機の開発戦略を練っています。ヨーロッパやアメリカとしては燃費を 50%~70%向上、あるいは騒音を半減する、それ以上下げるといったような目標を掲げています。これを実現するためには現在の定常状態の最適設計だけではとても足りないでしょうということで、非定常状態も含めた最適設計技術を作る必要があるというように考えております。当然、非定常の予測技術が必要なわけですが、例えば大迎角の剥離流れを考えた時に CFD の精度は十分ではない。計算の規模を大きくするだけでは話は中々追いつかないので、実験と融合することを考えています。



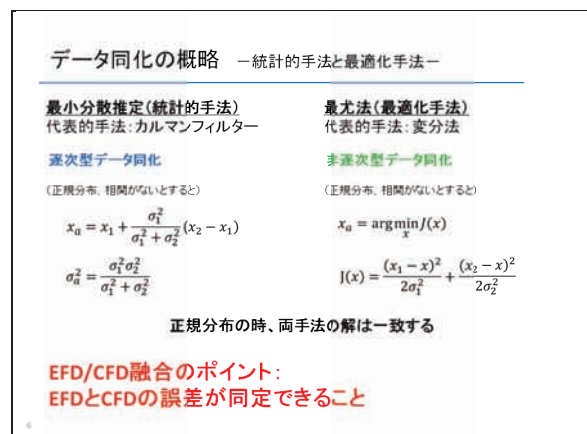
その一例なのですが、我々は JAXA と ENRI との共同研究により、仙台空港で後方乱気流を計測して、これを 4D-Var を使って再現するといったようなことを行っています。



データ同化は本日もご講演があったのですが、ごく簡単に言えば観測値と何らかの予報値があると、その二つから真値を推測するにはどうしたら良いかということです。値だけがあるのではなく、値が誤差情報を持っているということがデータ同化の重要な理論的背景です。



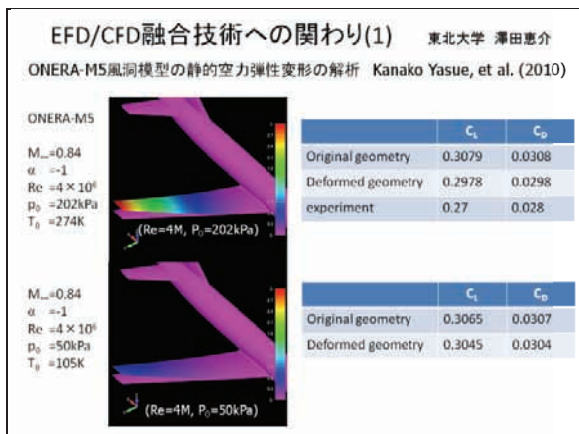
これは、東北大学の早瀬敏幸先生が開発されたハイブリッド風洞のコンセプトに対して、我々のグループではアンサンブルカルマンフィルターを使って、早瀬先生の計測融合シミュレーションと同じ結果が得られたという例です。



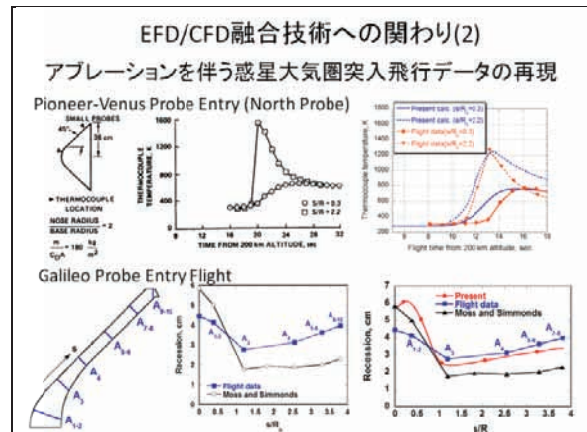
データ同化にはカルマンフィルターと変分法という二つの大きなアイデアがあって、理想的な状態として正規分布を仮定してやれば両手法の解は一致するというのですが、逆に言うと誤差がどのような形をしているかが、おそらくキーであると思います。そのような意味では、CFDの誤差とは何か、あるいは実験の誤差とは何かということ突き詰めていくことが更に融合技術を高めていく大きなポイントではないかというように考え

ています。そこで、実験でよくエラーバーが書かれています。あれがバーではなくて確率分布で表わせるようになると素晴らしいのではないかと思います。計算の方も何か計算すると解が1個のように見えるのですが、実は色々な誤差があるわけで、そういったものがきちんと見えるようにすることが重要ではないかと思っております。

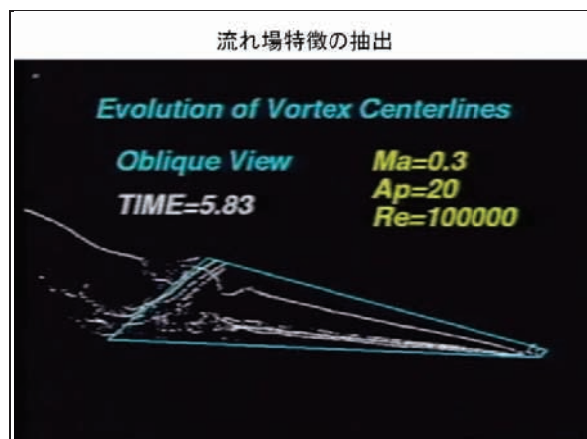
澤田：続きまして東北大の澤田が発表させていただきます。EFD/CFD 融合技術への関わりについて自己紹介するというお題をいただきましたので、先ずそこから入らせていただきます。私は基本的にと言いますか、99%CFD が専門です。



一番最近の計算例としましては、静的な空力弾性変形の計算というものを例として持って参りました。同じレイノルズ数でも総圧が違うとだいぶ曲がり方が違います。これは、ONERA-M5 の例ですが結構曲がるので、弾性変形の影響を考えたEFD データがCFD との比較において必要なのではないかという結果となりました。



これは、10年位前の例ですが、惑星大気圏に突入するカプセルのお話です。これはEFD/CFD 総動員でカプセルを設計しようということで、例えば惑星大気圏に突入したアブレーションを伴ったリエントリーカプセルのフライトデータがCFD で再現出来ないというような話がありました。上はPioneer-Venus、下はGalileo の例ですが、それに対してCFD 側で一体原因は何でしょうかというようなことを暫く研究したことがございます。



これは更に古くなりまして20年位前の例ですが、CFD の結果から流れ場の特徴抽出を試みたものです。デルタ翼を過ぎるマッハ0.3の流れですが、渦中心線を抽出したらどうなるだろうかとい

うことで行った研究です。白い線が渦中心を表していてその周りに渦が存在するわけですが、**primary** と **secondary** がこのように時間発展していき、そのうちにブレークダウンをおこすという、なかなか面白い計算ではないかと当時は思いました。今、これをぜひ PIV のような実験データに対して適用してみたいというように考えております。

を持ち寄って皆でパーティーをしましようというようなスタイルが入りやすいのではないかとこのように考えておりました。以上です。

**中村**：明治大学の中村です。私は、バックグラウンドは EFD/CFD のどちらでもなくて、数理学、統計科学、データ科学といったところから来ていて、統計数理研の樋口知之先生のところでずっとデータ同化の研究に従事してきました。

日本におけるEFD/CFD融合の方向性について

- EFDとCFDの融合の方向性(新しく作るのだから...)
  - ・ 用途: 設計 vs 解析 → 空力設計システム
  - ・ 比率: EFD / CFD → CFD >> EFD
  - ・ 特徴: 設計を支援する強力な最適化機能の搭載
- 融合システム利用互助会の形成
  - ・ JAXA内外利用者による融合事例紹介
  - ・ 海外での同様なシステムの利用例紹介
  - ・ 機能拡張セミナー、ユーザー教育の実施
  - ・ 設計者のニーズと研究者のシーズをマッチングするコーディネーション機能の充実

研究領域・バックグラウンド  
(「EFD/CFD 融合技術への関わり」に代えて)

- ▶ データ同化
  - ▶ 津波シミュレーションモデルのデータ同化
  - ▶ 浅水方程式系の**不確かさのある境界条件推定**
  - ▶ 遺伝子発現ネットワークのデータ同化
  - ▶ 遺伝子発現の**時変状態変数ならびに時不変未知パラメータの確率分布の推定**
  - ▶ 地盤変形・沈下問題へのデータ同化
  - ▶ オンライン工法変更のための**沈下量予測**
- ▶ ベイズ統計学
  - ▶ データ同化はベイズモデルの枠組で全て記述可
- ▶ 時系列・時空間データ解析

第4回EFD/CFD融合ワークショップ 2011/1/25

「日本における EFD/CFD 融合の方向性」について考えて参りました。先程の JAXA の講演にありました二枚看板というのはそうなるのではないかという気はするのですが、個人的には CFD 人間ですので融合性の方向として、まず用途としては設計で使ってもらうのが一番良いのではという気がいたします。その次に比率としては、新しく作るシステムですから上流側をがっちりやるという意味で CFD にかなり軸足を置いたシステムで良いのではないかと。日本の特徴と言うのであれば、あらゆるレベルで強力な最適化手法等を組み合わせ一度使ったらもうやめられないような最強システムを考えられたらどうかというのが、かなり極端に走った考え方ですがコメントです。それで、JAXA からワーキンググループの結成が提案されていましたが、これも同じようなものが互助会のようなものを作って、それぞれおかず

それで「津波シミュレーションモデルのデータ同化」ということで、不確かさのある境界条件データを使って推定するというのをやってきました。あと、だいぶ分野が変わるのですが「遺伝子発現ネットワークのデータ同化」というテーマで、時変の状態変数および時不変のパラメータを確率分布として推定してリスクの推定に繋げるようなことを研究してきました。また、最近特に力を入れているのが「地盤変形・沈下問題へのデータ同化」です。地盤沈下は時間スケールの長い問題のため、オンラインで観測情報を取り入れて設計、工法変更に使えるので、そのために沈下量予測をデータを使って行うようなことをやっています。この辺りが EFD/CFD と多少関係あると思っていただいても結構ですが、本業としてはベイズ統計学。データ同化はベイズモデルというもので全て記述することができます。

### データ同化のEFD/CFD融合への適用

- 狭義の「データ同化」は、時空間状態変数とデータの融合
  - 初期値・境界条件の構成
  - 未知パラメータの推定
  - 変数・パラメータ間の感度解析
  - 最適計測配置
  - 手法面では、最適化ベース(4DVAR)と確率モデルベース(ベイズフィルタ系)
- 広義の「データ同化」は、「所与の数理・データモデル」と観測データの融合
  - 不確実性そのものをモデル化(ベイズモデリング)し、データを融合しながら設計のための意思決定をする
  - 複数のモデルの間でのデータと設計目的に基づく選択
- (私見では)狭義のデータ同化でもEFD/CFD融合に使えるが、設計のためにデータ同化を使用するには、広義のデータ同化と不確実性のマネージメントまで考える必要がある

第4回EFD/CFD融合ワークショップ 2011/1/25

### ベイズモデリング

状態Xの条件下でデータYが得られる確率  $p(Y|X)$

状態Xが発生する「もともとの」確率  $p(X)$

データYが得られた時に状態がXである確率  $p(X|Y)$

データの生成確率  $p(Y) = \sum_{X} p(Y|X)p(X)$

ベイズの定理

状態 → 生成 → データ

■ : 数理モデルや事前知識による設計  
 □ : 観測を表現する式

観測を表現する式と現象を表現する式が事前知識による現象の確率を与えることで、データから現象の説明や予測が可能(因果の反転ができる!)

第4回EFD/CFD融合ワークショップ 2011/1/25

データ同化という観点から EFD/CFD 融合への提言をしていきたいと思えます。そうした時にデータ同化の位置づけを考えなおしてみる必要があるかと思ひまして、書いてみました。先程の露木さんのご講演でもありましたが、初期値・境界条件の構成から始まっているわけです。気象分野では初期値を推定できる場所が決まっていますが、それから色々と広がっている。ただ、そうした時にやっていることは結局、時空間の状態変数と実際のデータとの融合というわけで、もう少し広げてみる必要があるだろうというのが、最近我々が考えているところです。その考え方が所与の数理モデルあるいはデータモデルと観測データを融合していくと。その時点ではよく分からない不確実性、精度があまり無いところですが、そのようなところを直接モデル化してやって、それとデータを上手く融合しながら設計のための意思決定をするということがデータ同化の更に進んでいく方向だと考えています。そうするとデータと設計の目的に基づいて色々な設定、あるいはモデルを選択出来るようになるのだと思ひます。

そのためにはベイズモデリングというものが考えられます。基本的にはスライドの青とオレンジのところなのですが、この二つを上手く与えてやると、ベイズの定理を使ってももとの設定とある設定の下でのどのような観測が得られるかというそこを上手くデータ同化することが考えられます。それからデータを得られた時にファクトとしてどのようなことが起こってくるかを推定出来るのがベイズモデリングで、青のところにはCFDのモデルやあるいは色々なEFDから得られている事前の知見というものを組み込んで、オレンジのところにはデータの生成モデルというのをに入れてやることによって推定することができる。これが核になってくるのではないかと思っております。

### データ同化・ベイズモデリングとEFD/CFD融合についての私見と提案

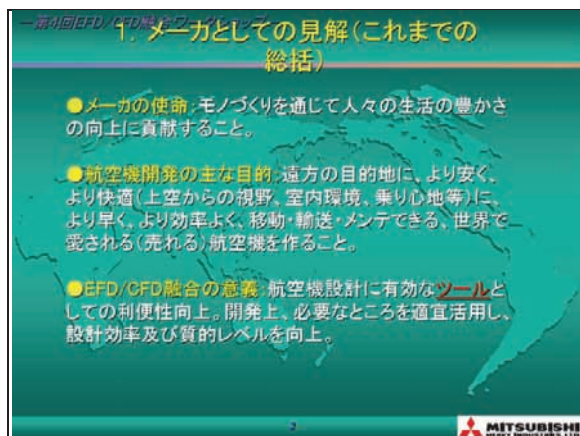
- 解析と設計にデータの取り扱い・統計的(帰納的)アプローチ(≒EFD)は必要不可欠だが、数理(演繹的)モデル(≒CFD)とは相性がよくないのがそもそもの問題
  - 手法面とそれを裏付ける思想面
- 広義のデータ同化・ベイズモデリングは一つの解では？
  - 数理モデルでは落ちている情報の推定・同定と知識発見
    - 初期・境界条件、「不確かさ」の定量化
  - 確率的な予測と効率のよい計測機配置・実験計画
  - データに基づく数理モデルの統一的な比較・選択(データ同化もまだ弱い)
    - 統計的モデル選択の手法が使える
- さらに発展的には、設計や数値計算スキームまで含むあらゆる部分を確率モデルで表現し、ベイズモデリングで更新
  - 最適解設計ではなく、一意に表現できない現象まで含めた統一的かつロバストな設計

第4回EFD/CFD融合ワークショップ 2011/1/25

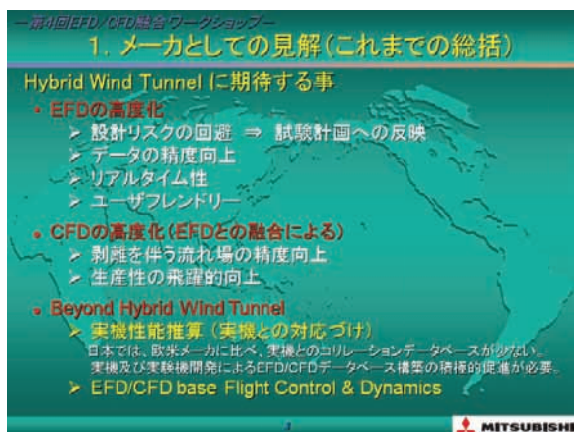
色々な解析とそれを生かした設計においては、データの取り扱い、統計的なアプローチが不可欠です。しかしながら、どうも演繹的な数理モデルとは違うというのがそもそも問題なのであって、むしろ全体をまずベイジアンモデリングで上手く組み合わせてからやろうというのが一つの解なのではないかと思えます。更に発展的には、そのような設計目的、あるいは数値計算スキームまで含むあらゆる部分を統一的な確率モデルで表現してデータを使って不確かさを減らしていくのが技術的な方向ではないかと考えています。

少し話が偏ってしまったので追加しておきますと、最終的には先程 JAXA から発表がありましたように知識の発展と設計という二つの目的があるわけですが、特に工学なので設計を主として如何にそこを定式化していくかが重要になると考えています。

**棚橋:** 三菱重工の棚橋でございます。メーカー、特に航空機メーカーから EFD/CFD 融合について、これまで行われてきたパネルディスカッションで述べてきた見解を総括した形で整理しております。今回は、それを踏まえた今後の国内における課題について、メーカーの立場から提起するという役割でお呼びいただいたのではないかと考えております。



まず、そもそも論から言いますと、メーカーの使命はモノづくりを通じて人々の生活の豊かさの向上に貢献することと考えて私は取り組んでおります。その中で航空機開発の主な目的は、より遠方の目的地により安く、より快適に、さらにはより早く、より効率よく移動・輸送あるいはメンテできる、こうした要素を踏まえた世界で愛される、売れる航空機を作ることに尽きるのではないかと考えています。この中で私どもの考えている EFD/CFD 融合の意義と申しますのは、やはり航空機設計に有効なツールとしての利便性向上です。すなわち、開発上必要なところを適宜活用し、設計効率及び質的レベルを向上していくということにあると思えます。設計者は、第二番目の「目的」に示すような、より良い飛行機を作ろうと考えます。その中で何を最適化すべきかを考えるにあたっては、通常、コストがミニマムとなるようにパラメータを振って検討する、あるいは飛行性能をマックスにする、あるいは重量をミニマムにするという、何をベストにするかということを協議し、決心します。これはニーズや設計者の考え方により異なりますが、性能面では、特に重量と抵抗に重点が置かれます。今佳境を迎えております MRJ につきましては、MDO (Multi-Disciplinary Optimization) を有効に使用して設計を行っており、重量と抵抗の双方が極小になるような条件を選定します。特にここには示しませんが、一般的な民間機における空力設計の DOC (Direct Operating Cost) への影響は約半分位あると言われております。従って EFD/CFD を空力設計に有効なツールとして使っていくということが重要と考えています。



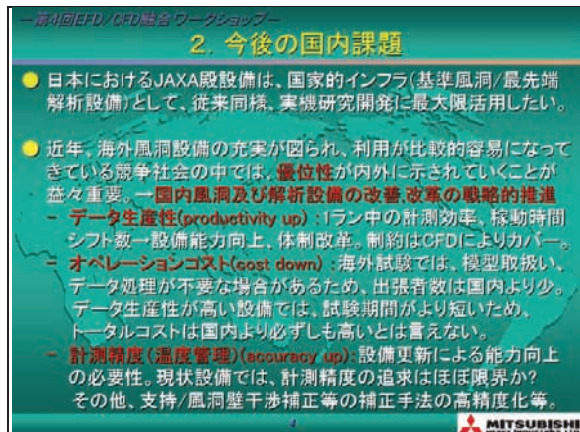
これまでも、本ワークショップ等で示されておりますが、JAXA 殿で開発中のハイブリッド風洞に期待することは、まず EFD 自体、それから CFD 自体の高度化をしていくということ。EFD につきましては、実測データに基づき設計リスクの回避に寄与することが求められますが、これを試験計画に反映していくことです。それからこれは先程から何度も言われておりますが、計測精度向上が非常に重要です。我々は六分力等、天秤を使って計測しますが、遷音速レベルですとせいぜい3カウントあたりが精度の限界です。その中で風洞自体質の良い物を求めていくことによって、これを少しでも良くしていくということが実際に必要となってきます。それから、リアルタイム性、出来るだけ早く情報を整理して見ることが出来ること。それからユーザフレンドリーなものであること。

次に CFD の高度化という面では、よく言われておりますが、やはり剥離を伴う流れ場の精度向上。剥離した後は定常解析と非定常解析とでベース部の圧力レベルが倍違うという結果が出ています。そのような意味で、非定常性計算を必要などころに施して提供していくことが必要になると思います。それから生産性の飛躍的向上。これは計算機の能力が今後向上していく中で自ずと上がっていくとは思いますが、やはり EFD も含めて

インフラの整備というものが重要となってくると思います。

それから、Beyond Hybrid Wind Tunnel とありますが、これを踏まえて更に今後必要となってくるのが実機性能推算。やはり実機においてどの程度の性能を持つものかということを設計者は知りたいわけです。その為に出来るだけ精度を詰めたいとして、どこまで詰められるか。1 カウントは所詮無理な話で、EFD、CFD とで差は出てきません。設計者としては結果的にそれがある程度、例えば5カウントの差が出たということであればそれはそう捉える。それを踏まえて安全な値を使って設計をして、安全な飛行機を作っていくような使い方をしていきます。特に日本では欧米メーカーに比べて実機とのコリレーション・データベースが少ないといった状況がありますので、例えば先程 JAXA 吉田さんが発表された実験機のデータを積極的に活用した、EFD/CFD データベース構築が必要なのではないか、日本では特にそのようなことが言えると思います。

あと更に EFD/CFD データベースとしては、Flight Control & Dynamics までシミュレート出来ることが必要だと考えています。飛行試験データもやはり色々なばらつきが出てきます。それを何に使うのか。真値は結局よくわかりません。またデータの取り方も風洞試験だと目標を固定して一から測るわけですが、飛行試験の場合は例えば抵抗値を測る時はある一定時間、速度一定の距離を何秒で通過出来るかということによって巡航状態の抵抗を測るわけですが、そういった中で真値がどこにあるのかはなかなか分かりませんので、やはり地上の設備でリスクを低減する為のデータ、EFD/CFD ベースとしては、Flight Control & Dynamics がより精度良く模擬できれば実機開発に非常に貢献してくるようになります。



今後の国内課題についてですが、日本におけるJAXA 殿の設備というものは、国家的インフラとして基準風洞の役割があります。それからスパコンのような最先端の解析設備もありますので、戦略的にはやはり従来同様に実機研究開発に活用していくべきではないかと思えます。ただ、近年海外の風洞設備が非常に充実しておりまして、利用も比較的敷居が低くなっています。やはり競争社会の中では、優位性を内外に示していくことが益々重要です。JAXA 殿のご発表でも戦略的に優位性を示していくとありましたが、私どもといたしましても国内風洞や解析設備の改善、改革を戦略的に進めていくことが重要かと考えます。特にJAXA 殿の遷音速風洞は、非常に健全に昼間きちんと休んで、夕方差し支えの無い時間で運転を終えておられます。一方、海外では2シフト制が一般的になっており、実績として効率が上がってきておりますので、国際的な優位性を示していくことが必要ではないかと思えます。

また、制約がある場合には CFD である程度カバーするということになると思うのですが、何と言っても風洞試験で実機のデータベースというのは現状の100倍というオーダーのデータ作りが必要です。そういったところでは少しでもデータ生産性の高い設備が望まれます。

それから、オペレーションコスト。これも、海

外試験の場合は、模型取扱いやデータ処理を向こう側でやってもらえるということから、出張者数が国内の試験よりも少なく済んでしまう。それにデータ生産性の高い設備だと試験期間も短くて済むというのがありますので、トータルコストは国内よりも必ずしも高いとは言えない状況になってきております。

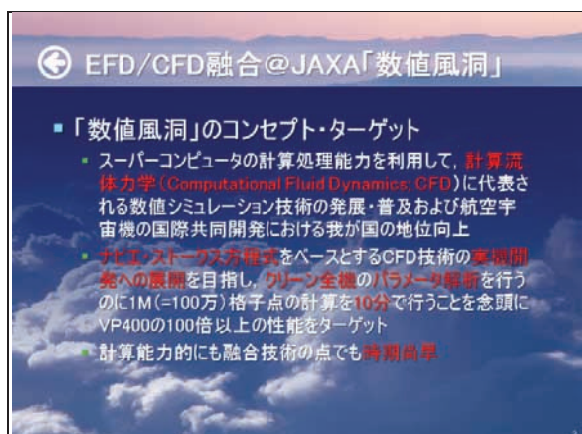
また、計測精度。温度上昇により天秤の温度分布が変わると計測精度に影響してしまいます。温度をしっかりとコントロール出来る設備がこれから精度アップを図っていく上では絶対に必要ではないかということです。それから支持干渉や、風洞壁干渉補正等の補正手法の高精度化も整備していく必要があると思えます。このような課題を戦略的に改革、推進していくということが重要かと思われれます。以上でございます。

松尾: JAXA の松尾です。私は JAXA の人間として、それからずっとスパコンに関わってきた人間として EFD/CFD 融合の方向性というものを見てきた時に数値風洞というものが思い浮かんできたので、その話をしたいと思えます。研究機関の役割というところと言うとアイデア出しと実用化とがあつたとして、JAXA ではどちらかと言うと実用化という方向だと思えます。また、CFD を行う上でスパコンはもちろん現状で十分ではないし、粒子フィルターのような話が出てきた時にますます計算速度が要求されると思えますので、そのようなこともあつて、少しこの話をさせていただきたいと思えます。





数値風洞は、地球シミュレーターを開発されたことで知られる旧航技研の三好さんが 1993 年に富士通と共同開発したもので、当時最初の 3 年間はベクトルのスパコンとして世界最高速であったことは皆様ご存知のことと思います。

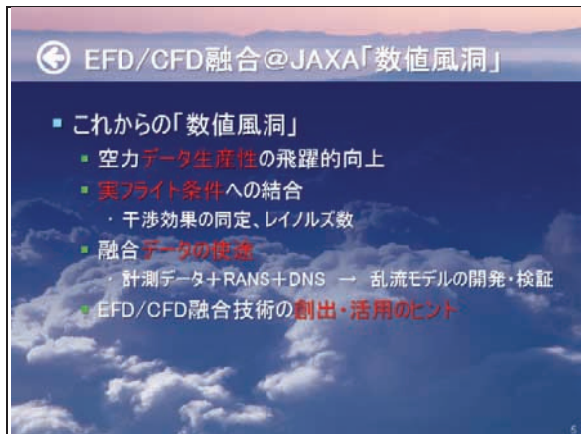


開発をする時にコンセプト・ターゲットというものがありました。当時、CFD というものはまだ出始めて、実際の開発に使えるとも使えないとも分からないような状況だったと記憶しているのですが、それをスパコンの能力を上げることによって実開発に使っていかうと。そのようなコンセプトで、具体的にはナビエ・ストークス方程式ベースの CFD を実機開発に使うということです。当時 1GFLOPS の VP400 というベクトル機があったのですが、その 100 倍の性能にしてクリーン

形態の全機 NS 解析を 10 分でやろうというコンセプトだったのですが、当時それを提言していたというのは勿論すごいことですし、それが今日の我々の考え方というか、現在の JAXA のスパコンの設計仕様に生きているのも事実だと思います。

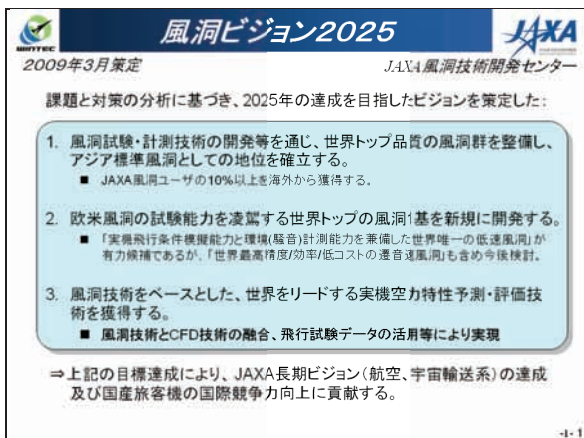


今の数値風洞では、計算機能力的には風洞模型に風洞壁や支持装置を入れた状態で計算して、風洞模型に CFD 解析結果が重なった形で表示出来るというような状況になりました。もちろんこれは風洞試験の精度向上が目的なのですが、もうひとつは CFD の高速化、効率化というような考え方が入っているのが今迄とは少し違ところで、世界最高速度の CFD ソルバーを作ろうということでやっています。そういうことで計算は出来るようになったのですが、壁や支持干渉それから気流条件の同化等に課題があります。それで現状は EFD for CFD、CFD for EFD という形で、お互いの欠点を補完する使い方がメインになっていると思いますし、吉澤先生の発表にありましたが不具合対策のような考え方というのでしょうか、今の流体力学の現状を考えますと、遷移にしても剥離にしても incremental なアプローチが非常に大事だと思います。なかなか難しい話なので、このような風洞を模擬したいという課題の中で一緒に開発出来ればと思っております。



今後の数値風洞を考えることによって次のスパコンへの要求も出てくると思いますが、CFD についてはデータ生産性がまだまだ低い。風洞試験も準備は大変なのですが、データは一度実験をするともものすごい数とれる。CFD は RANS でもまだそこまで行っていない。それから、実フライト条件への結合という話はまだなのです。EFD/CFD 融合で出てきたデータをどう使えば良いかという話もあるのですが、このような具体的なターゲットを設定することによって融合技術を活用するヒントが出てくれば良いのではないかと思います。

います。実は JAXA の風洞もかれこれ 40 年程経つ古い風洞になっていて、その技術基盤をもう一度見直してこれから何が必要かを議論し、2 年前前に JAXA の風洞関係者で策定しました。先程棚橋さんが言われたようなメーカーの問題意識を我々も重く受け止めていて、それにどう応えるかという方針を示す必要があり、このようなことを背景に、風洞としてはこのような活動を進めたいというものです。その中に EFD/CFD 融合という考え方も一部に取り入れていたり、あるいは取り入れていないところにも CFD の力を借りて技術開発を進めていくという内容が入っています。その辺りを上手くこのワークショップに繋げていけば良いと思っている次第です。ただし、ここで今議論されている内容と、風洞あるいは開発現場で必要とされている CFD と実験の協力関係は多少違うようなイメージを持っています。その辺りのギャップを埋めることが必要なのではないかと思います。その辺りの感じがしておりますので、そのような目で私からの説明を聞いていただければと思います。

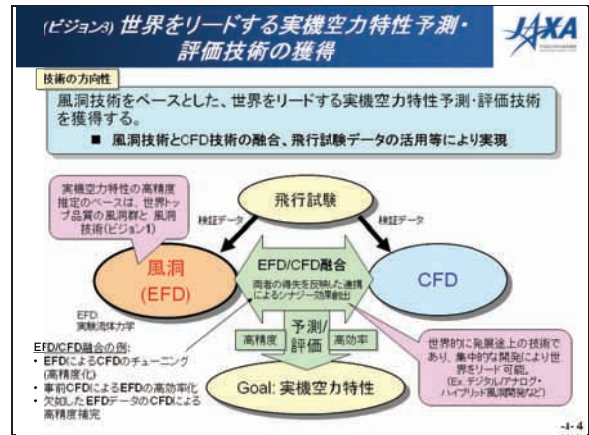


伊藤：JAXA の伊藤と申します。風洞の立場で少しお話をさせていただければと思います。最初にいきなり「風洞ビジョン」というものを示して

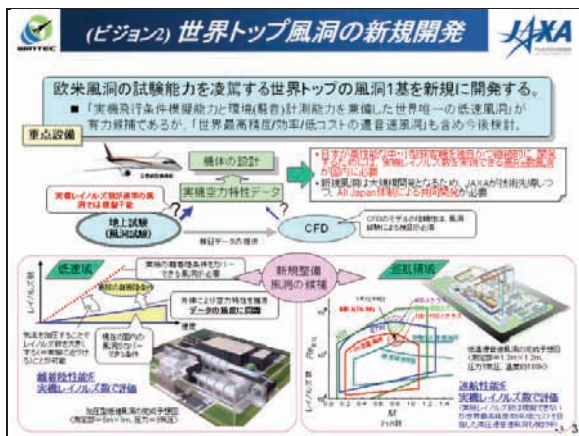
それぞれのビジョンは 3 項目になっています。一つ目は JAXA の風洞を大きな風洞群として世界において確固たる位置を占めたい、アメリカ、欧州、そしてもう一つの第三極としてアジア地域の基盤としてその役割を担うべきであるということ

です。具体的には風洞技術、試験技術の開発を通じて精度を上げる、データ品質を獲得する、効率化を図って生産性を上げることで色々なユーザーにしっかり対応しようという意気込みを持って風洞の開発をしていきたいということがポイントです。昨今の MRJ の開発等の中でもやはり精度の問題がだいぶ議論され、ここでは特に JAXA の国産旅客機チームと遷音速風洞との間で CFD と風洞を使ってその誤差をいかに詰めていくかという活動が積極的に進められています。一方で、この EFD/CFD 融合の中での実験との比較の議論は、風洞の計測をするという感覚で捉えられていないような気がします。CFD はどちらかと言うと壁が無い、あるいは支持装置が無いといった計算が中心となっているように感じます。EFD と CFD が連携、融合するためには、そこを風洞側としてはもう少し多様化してくれると良いのではないかと思います。

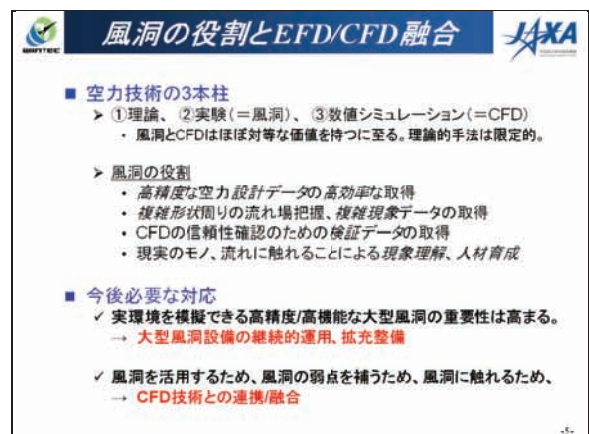
出で、低速なのか遷音速なのかという根本的な議論もあり、必要な時にタイミングを見ながら提案していくという活動として考えております。



上の二つがハードウェア的な考えに基づくものですが、三つ目の風洞ビジョンが、ソフトウェア的な視点、思想を示しています。EFD と CFD を連携して実機の予測をすることが、風洞側の立場から見ても重要だと考えています。これに今回このような場で議論されていた活動がどう繋がっていくのか、繋げていけるような努力を風洞現場としても行っていきたいと考えています。



風洞ビジョンの二つ目としては、やはり実機環境を作るような風洞を作ってそれを開発に役立てることを長期的なシナリオとしてぜひ示したいと考えています。乱流や遷移などの未解明の現象の説明には新たな設備を作ることは重要です。しかし、これは資金的な面から実は夢物語に近く、更に、どのような風洞を作るかということも議論百



空力技術というものは理論、実験、CFD、の3つが柱で、この内現在 EFD と CFD がほぼ対等な立場で設計開発に使われていると考えています。

その中で風洞の役割は、高精度で、特に設計に対して高効率なデータの取得が出来ること、あるいは乱流であるとか実在気体効果であるとか、複雑な現象の流れ場を効率的に取ることです。また、CFD の検証データの取得もこれまで重要な課題でした。これらに加え、最後に一つ個人的な気持ちを込めて入れてありますが、現実の流れを使ってデータを取得することは、人材育成という観点で、実際に空気の流れを手で触り感じながら現象を理解するという観点で、非常に重要な役割を担っているのではないかと思います。

これまでの風洞ビジョン、それから今書かせていただいた内容も含めて今後 JAXA 風洞として大型設備をしっかりと維持・運用してその精度を上げていきたいし、拡充も出来ればすべきですが、その中にこの活動、CFD との協力をどう生かせるかという意味で、風洞と CFD 技術との連携・融合が重要な課題だと考えております。

**渡辺:** どうも有難うございました。皆様、実験、CFD、またデータ同化という色々なツールを専門とされ、大学から企業、研究機関という色々な立場から考えていただいているということがよく分かりました。使い道や立場は違うとしても、方向性としては上手く EFD/CFD 融合を使っていくべきであるというところは合致しているのだと思います。

それでは、これまでパネリストの皆様からいただきましたご意見を頭に入れたところで、次に進めていきたいと思えます。議論の流れとして「EFD/CFD 融合技術の国内、海外における現状認識」ということなのですが、これは JAXA のプレゼンにもありましたが幾つか例がありますので、出来れば海外、国内の順番で情報や意見を持たれている方にお話いただき、では周りを見た時に日本は何をどうやるべきなのかということを議論出来ればと思います。

まず私の方からお話ししたいのは、Symposium on Integrating CFD and Experiments in Aerodynamics という国際学会です。個人的には前回 (2009 年)、前々回 (2007 年) と二回続けて参加いたしました。EFD/CFD 融合に特化した国際学会は他には多分無いと思うので、世界的にそれなりのモチベーションと高度な研究レベルを持った方々が参加しているだろうと考えて発表を聴きましたが、日本との差はそれほど感じられませんでした。我々も融合ということですのでいいことをやっているのではないのかという期待を持ちすぎていたのかも知れませんが、比較的プリミティブな比較が主体でした。実験をやりました、計算をやりました、ここは合います、ここは合いませんというようなところから少し融合に近いところまで千差万別ではあるのですが、だからと言ってこれは本当に我々には真似が出来ない、太刀打ち出来ないという感じではありませんでした。ただ少し日本と違うところは、やはり航空機で言えば実機の開発にこのような考え方を取り入れている例があるので、そのようなところでは実機性能を予測するのに EFD/CFD 融合をどう使うかという点でかなり進んでいるなど感じるようになりました。しかしながら技法的には今日もご紹介がありました東北大で行われている計測融合シミュレーションなど、少なくともコンセプトや研究としては海外より先に進んでいるものもあるのではないかというのが私の印象です。従って上手くこのような技術を日本の得意分野にして育てていけば、海外に抜きん出て役に立てることが出来るのではないかと考えているところです。

**会場:** 大林先生のエラーバーのお話について答えて欲しいと思うのですが、測定の不確かさに関しては正規分布で良いということが ISO の国際規格でもうたわれています。これは中心極限定理という定理がありまして、色々な誤差分布を持った測

定を積み重ねていくと最後は正規分布として扱って良いということが証明されているからです。ただ、風洞試験の不確かさというものを少し私は調べているのですが、風洞試験を考えると今言われた支持干渉だとか壁干渉だとか気流の一様性だとか色々な要素があるので、そう言いきれぬのかどうかは少しまだ考えなければいけないとは思っています。

それでもう一つ紹介したいことがありまして、先日 AIAA の学会に参加したときにアメリカの 4 つの大型遷音速風洞で行った対応試験がワークショップの話題になったのですが、各風洞の若い技術者に発表をさせていまして、要員の教育目的のために対応風洞試験をやっているというような雰囲気でした。結果は古典的な浮力補正や壁干渉補正を行った上で、4 つの風洞の結果が $\pm 5$  カウントに収まったということでした。それで、AEDC というアメリカ空軍の機関があるのですが、そこで不確かさを推定した結果がやはり $\pm 5$  カウントで綺麗な結果になったと。その不確かさの中身を見ていくと、第一が天秤、第二が模型姿勢角、第三が気流のマッハ数なり動圧なりを出していくときの不確かさということになったと発表がありました。

**渡辺**：有難うございました。風洞側の海外の取り組み、データが非常によく一致するようなところもあって、その根拠を詰めていると言うお話だったと思います。あとは不確かさについては若干逆に私のほうから補足をさせていただくと、JAXA では風洞の不確かさを定量化するというところに取り組んでいて、多分海外のトップレベルの風洞に伍すものだと思っていますので、そのような意味で日本の風洞技術は足りないところもあり、また有利になるところも沢山あるかというように思いました。



**会場**：データ融合というよりは CFD と風洞試験といった見方でこれまで伺ってきたことをお話ししたいと思います。AIAA では Drag Prediction Workshop が 2001 年から既に 4 回行われておりまして、最初は風洞データを正しいと考えて CFD を合わせますというようなことを行っていたのですが、段々 CFD でよく分からないところが出てきました。では風洞試験をもう一回やってみようということで、第 3 回目までは基本的に DLR-F4 や F6 という割に設計の古い機体形状を用いていたのですが、今後この先のことをやっていく上では新しい模型を作ったほうが良いということで、CRM (Common Research Model) というものを作って、それに対して第 4 回で実験を行った。ただ趣旨は prediction なので、まずブラインドで計算を実施してそれに対して風洞実験を行い、合っていないのを確かめようということで、NASA ラングレーの風洞とエイムズの風洞と両方を使った実験を行ったのですが、風洞の人達と CFD の人達とが非常に密接になって議論をしていました。

最近 AIAA で随分 CFD のワークショップが増えているのですが、見ていると Drag Prediction Workshop のケースだと何十ケースという計算を色々な人達が行って、それに対して統計的な分析を行う人がいて、それで CFD の問題点は何だということと色々なことを出して議論している。多分先

程の話のように、風洞も何かやらなければいけない。多分一つの風洞だけで議論していても見つからない問題が多いのでしょう。先程のNASAの二つの風洞の比較でも違いが出てきています。そこでぜひJAXAでもCRMを遷音速風洞を使ってNASAの風洞との比較を進めながら、風洞自身の精度を上げていく努力をしたほうが良いのではないかと思います。更に先程大林先生からも出ていたかと思いますが、非定常、バフエットの問題であるとか高迎角のような、フライトエンベロープの境界をCFDで正確に予測することが世界共通の目標になっている状態です。そのようなところに向けて風洞試験データをしっかり取れるようにするのがCFDとしても非常に重要と思うし、先程の棚橋さんのご意見にもありましたが、EFDとしても多分そのようなところで新しい技術を作っていくことで上手くシナジー効果が出せないだろうかと考えています。

**渡辺**：有難うございます。非常に現実的な世界でそれぞれをより良くすると共に協力して行く中で更に詰めていく、つまりすぐに融合というよりもまだそれぞれに課題があってその中でまた融合をしていく、そのようなご意見だろうかと思いません。

次に、「JAXAからの提言」の「日本としてEFD/CFD融合を全面的に押し出すことによって国際的優位性を確立することが出来ないか？」につきまして、これは主にモノづくりの世界だと思ひまして提言に対してはおおよそ肯定的だと理解しているのですが、少し補足をしていただければと思います。

**大林**：モノづくりは皆が誰も反対意見を言わない位、かなり漠然とした目標だと思うのです。むしろ、では燃費を現在の飛行機に対して70%の飛行機を作ります等、何か具体的な目標を作って空力設計をして、それに対して非定常を含めてきち

んと信頼できるデータを取る。そのために融合技術をツールとして構築していく。このように具体的な目標をつくるが必要になるのではないのでしょうか。出来ればJAXAでそのような目標を作って、新しい機体コンセプトのためのEFD/CFD融合技術といった位置づけをしていただければと思います。

**渡辺**：有難うございます。要は漠然としているからいけないので、先程ありましたCRMを使って対応風試を行うというのがある意味で同じだと思うのですが、具体的なターゲットを決めてやっていくということが皆様と共有したい点だと思います。

**会場**：JAXAの開発側にいる者ですが、開発を行っている人達がどのように研究や技術を見ているかについてよく注目しています。そのような目でこのEFD/CFDというか研究全般を見た時なのですが、最近の研究はいかに実用化するか、産業貢献するかという点が重要で、EFD/CFDもそれが最大の動機として始まったと私は理解しています。ただ、不幸にして研究側がそのような努力をしているのが開発側に殆ど見えてこない。先程伊藤さんがEFD/CFDについてこちらが考えているのと向こうが欲しがっているのが少し違うのではないかということ仰っていましたが、開発側にいるとそれを非常に感じます。

先程実は受付で参加者名簿を見せてもらったのですが、今日ここに来ておられる方のほとんどがJAXAと大学関係者でした。メーカーの方も一部いらっしゃるのですが、どちらかというソフトウェア関連やサプライヤーであって、本当のユーザーというのは棚橋さんの他にあと2~3名いらっしゃるかどうかの程度であったかと思ひます。つまり4回目になったEFD/CFDワークショップに未だにユーザーが顔を出さないというのはどうということなのかという、そのような視点で考えて

いかなければならないのかと思います。これは恐らく JAXA の役割だと思うのですが、多分向こうから見た時に EFD/CFD がどう見えているのかを考えるのが、今の EFD/CFD に求められている最大のことではないでしょうか。

先程棚橋さんがいくつかまとめておられたのですが、精度向上ですとか効率化向上や生産性アップのようなレベルではミスマッチは無いのです。しかし生産性アップとは何なのだ、精度向上というのはどこをどう向上して欲しいのだというようなところまで踏み込んだやりとりが無いと、研究側が精度を向上しましたと言っても開発側はいや私の欲しい精度はそうではなかったのだというように、開発の方がもう研究など役に立たないと思いきんでしまう恐れがあります。例えば話ですが、ある店に入って「俺はうどんが食いたいのだ」と言う。「いや、うちのうどんはまずくて蕎麦のほうがうまいので、ぜひ蕎麦を食べてください。」こういった姿勢が研究側に見えるのです。開発側はまずくても良いから「俺はうどんが食いたいのだ」と言っているにもかかわらず。このような状態をいかに打破するかというのがこの4回目を迎えた EFD/CFD の課題ではないかと考えます。

**渡辺**：有難うございます。なかなか耳の痛いお話、重々承知はしているつもりなのですが、なかなか解決できていないということなのかも知れません。今の点について棚橋さん少し補足していただけますか。ここで議論していることも含めて我々の考えていることに関して開発側とのギャップがゼロでないことは十分承知ですが、思ったよりはるかに大きなギャップがあるという感じなのではないでしょうか。

**棚橋**：メーカー側からすると、有用であれば使うというのが基本的なスタンスかと思います。現状ではそれぞれのプロジェクトが独自のツールやデータベースを持っているのですが、JAXA 殿で

開発中のハイブリッド風洞のように一つのプラットフォームで効率よく、共通のツールを使って処理が出来れば非常にメリットがあると思います。実際に使ってみて、これは使えるなということ早く示していただきたいというのが希望です。所詮我々はツールとして使って設計者はその結果を見てどのような機体を作っていくかということに帰着しますので、効率の良いツールがあれば使わせていただきユーザー側としての意見は言いますというのが正直なスタンスです。

例えば風洞試験でデータを取ると、設計上はまっすぐなはずのリフトの傾斜カーブが途中で非線形になったり、あるいはピッチングモーメントに思わぬ不安定性が出てきてしまうことがあります。一体何がそうさせるのかを解明したいが風洞試験では情報量が足りない時、そこを CFD でカバーして「ああ、この渦がこう影響しているのか」というようなことが分かってくるわけです。そのような CFD の使い方を我々はしているのですが、それを早く行うことができれば、開発もより効率よく進められるのではないかと思います。

どなたか一体何のために EFD/CFD を行っているのか不明なところもあるとおっしゃっているのですが、メーカー側からするとハイブリッド風洞のようなものは現状ローカルに使っているツールを共通基盤として整備しようという試み自体が評価できるので、更にはこのようなものを産学官の中で、成果として具体的な形として残るモノづくりのためにどのように使っていくかについて、もっと情報交換を行う必要があるのではないかと思います。その成果としてこのようなシステム作りが複雑な現象の解明や確かなモノづくりに役立って、そのような中で総合的な日本の技術力がさらに高められる、そのために、EFD/CFD があるのではないかと思います。

**渡辺**：ハイブリッド風洞では、JAXA やユーザ

一としてこのようなことは最低限出来ておかなければいけないというものを優先的に作ってきておられますので、棚橋さんに言っていただいた通りそれなりにニーズに合致しているのではないかと考えております。ただしそれはあくまでもファーストステップであって、EFD/CFD 融合にはもっと先の世界があるのであろうというご意見もあるかと思っておりますので、このようなワークショップで大学の先生や皆様、先のことを考えている皆様に議論していただきたいと思っております。

**中村**：門外漢なので少しずれたことを言うかも知れませんが、実際 EFD/CFD としてある意味で異色なことを一緒にやっというところになると、我々のような応用数理的なことをやっている人間が感じている壁、違分野間の壁と同じようなものがあるだろうと先ずは想像しているのです。そのようなものに対して、応用数理の人はあまり越えようという努力をしていないと思うのですが、越えようとする人はどのようなことをやっているかという、実際に現場に行くなり相互交流、人材交流というものを頻繁に行っているようです。

そのような場合に考えられることは二つ。一つはそのような交流をマネジメントレベルの人が行うのはかなり難しいと思うので、若手が交流を広げて行く必要があります。これは自分自身が色々な共同研究をやってきた中で感じてきたことです。そのためのシステムを作っていくって欲しいし、逆に作っていくように我々も動かなければと思っています。それからもう一つは教育の面からも効果があると思っていて、従来特に国内においては分野毎の固有の対象や技術について教育するのが基本になっていたと思うのです。横断的な教育、技術ではなく今日の吉澤先生の話にあったモデリングのようなものを積極的に教育するという観点が余り無かったと思っています。そのようなところの人材を育てていって人材交流プログ

ラムに上手く組み入れていくためには大きなプロジェクトが必要かも知れないし、先程お話があった具体的な目標というようなものが必要になると思うのです。そのような枠組みを作っていくのが一つの解決策なのではないかと、勿論難しいのは承知しているのですが、そのようなことを思っています。

**渡辺**：有難うございます。どのようにして EFD/CFD 融合のような枠組みを作っていくのかという話でした。人材交流も大事ですし、棚橋さんからももっと情報交換をしたほうが良いというお話がありました。我々が少し遠慮をしているところもあるので、そのようなことをメーカーさんなどが積極的に言っていただければ、我々も入って行きやすくなります。その辺りもどのような枠組みがあれば良いか。余りカチッとしたものではなくて、澤田先生がおっしゃっていた互助会はなかなか良いなと私も思ったので、今日はその辺りが最後にまとめられると良いと思います。

それから教育の部分については、我々も分かっているが少しおろそかにしているところはあったかと思えます。EFD/CFD 融合という方向性における教育活動という意味では先日の別のシンポジウムでも同じような話が出ていたのですが、EFD/CFD 両方を使っていくことによって流体現象を色々理解して、流体について色々なことが分かるようになるような教育ツールとして整備できるのであれば非常に良いというコメントがありました。

**松尾**：教育という話で言うと、最近 JAXA で作った格子生成ツールとソルバーに関しては、名大や東大で使っていただいています。このような活動は少しずつですが JAXA で進めております。

**渡辺**：実行がすでに出来つつあるということですね。教育の部分については多分ここにいらっしゃる皆様、一番異論の無いところではないかと考



えます。

**伊藤**：教育も含めて風洞側としても問題提起させていただいており、少しコメントさせて頂きませう。この場の認識と現場の認識の大きな違いは、遷音速風洞や大型低速風洞のような大型設備での技術開発をしている者と、長期的な基礎研究をされている方が、いきなり一緒に議論を始めたところにあるように感じています。実際に人材育成も含めて現場と基礎的なものを繋ぐための対象は、風洞で言えば例えば 2m の低速風洞やもっと小ぶりな 60cm の低速風洞等、色々な設備が JAXA にもありますので、まずそこで基本的な技術を作ることを一緒にやるべきだと思います。その時には融合の前に連携があるべきで、連携をして融合に繋げていき、そのようなステップを踏まえてその先に大型風洞での実用やメーカーが使える技術が繋がっていくのだという流れが見えてくれば、風洞現場や開発担当が注目したり助言したりすることも自ずと出てくると思います。出だしで上手く合意がとれていなかったのではないかと、という意味で問題提起をさせて頂いた部分があったので、その辺りの考え方もぜひ配慮していただければと思っています。

**渡辺**：今のご指摘も大変大事なところで、色々な方が EFD/CFD 融合に期待と興味を持っていらっしゃるのですが、立場が違うことによって議論がどうしてもすれ違うところがあると思うのです。そこで次に方向性ということで大林先生の話にもありましたが、議論だけではなかなか答えが出ないので、まずは始めるということではないだろうかというのが今日の結論の一つでもあると思います。そこで、先程の伊藤さんはもう少し小さいところから始めるべきだという話だと思いますし、大林先生からは非定常のような現象理解も共に出来るような設計技術をターゲットに絞ってやったらどうか等、色々なご意見があると思うのですが、

具体的に何かをやっていこうというところは合意だとして何をやるべきか。小さなものから大きなものまで色々なフェーズがあって良いと思います。一部の人達からは大きなものに対して大きく人や予算を確保して推進していこうという話を聞いたりします。その辺りのところをざっくばらんに色々ご意見いただけたらと思うのですが、いかがでしょうか。

**会場**：教育という立場からかも知れないのですが、EFD/CFD で一つ魅力的なのはオールジャパンになり得るのではないかとという点です。先程の海外の例では出なかったのですが EU の活動というのは非常にシステムティックで、最初レイノルズ数効果、支持干渉補正をやって模型変形の話、最近では自然層流に入っていて次はおそらく動安定、そういう方向に流れていく。そういう彼らのやり方を見ていると、大学や産業界を上手く巻き込んで非常に綺麗に分担をしている。大学だから小さい風洞というのではなくて、もしチャンスがあれば我々も ETW (European Transonic Wind Tunnel) で試験をしたいという気はあります。ですからそのような活動をひとつやはり JAXA がメインになって起こしていただきたいというのが一つ。

もう一つは飛行試験です。色々な方が言われているのですが、日本に千載一遇のチャンスが来たということです。EFD/CFD for Flight という話もあったのですが、もう少し飛行試験にも重きを置いて良いのではないかと思います。For Flight ではなくて、3 つが融合するような形で。そこにぜひ我々は協働させていただきたい。

それから、データ同化は非常に魅力的だと思います。これは私の個人的な意見なのですが、あまり実用、実用とは言わないで、見ていると飛行試験に生きる面というのはとても沢山あるような気がするのです。そのようなところに新しい血を注

いていくというのが、ぜひ JAXA にやっていただきたいと思うことの一つです。

**渡辺**：有難うございました。ヨーロッパのやり方はアメリカとはまた違う非常に地道なところが日本人の国民性に合っているのではと思う点もありますので、オールジャパンの活動として見習って欲しいという話は色々なところからいただいています。それから飛行試験についてのお話がありました。これについては今日もだいぶ出てきました実機あつての話で、ハイブリッド風洞に関してこれまでによく寄せられた意見は、風洞条件で EFD と CFD が合ってもそれだけでは何ら役には立たないのでは、という点です。飛行試験でどのような活動をターゲットとしてやっていくかについて補足なりご意見があれば伺いたいのですが、いかがでしょうか。

**大林**：飛行試験と言いますと、JAXA ではジェット FTB を整備して色々な実験が出来るようになるかと伺っていますので、ぜひこれを巻き込んで EFD/CFD 融合でジェット FTB を使わせてもらうような機会を設けてみたらどうでしょうか。

**渡辺**：また大変心強いご意見をありがとうございます。EFD/CFD の議論を JAXA で行う時にも一つクリアな目標を出したほうが良いという意見があつて、その中の非常に有力なものの一つがジェット FTB です。これは MRJ の開発とも密接に関係しており、先ほど会場からのコメントにもありましたがまさに千載一遇のチャンスですので、我々も今迄風洞と CFD だけだったものに、飛行試験というツールを加えて何か新しい世界を見出すことができると考えています。ではどのようになるとまだ十分に考えが至っていませんが、それは大きな可能性ではないだろうかという気がします。

**澤田**：EFD/CFD 融合の話で今飛行試験の方に話が行っていますが、吉田さんが先程講演された

のは一つの融合の姿ではないだろうかというように思っております。あらゆるデータを用いて徹底的に検討されたわけで、あれを超えていくのはかなり大変だというのがご講演を聞いた時の印象です。併せて、EFD/CFD それから実機のデータまで全てお持ちなのですから、それを徹底的に使うというのが一つのやり方ではないかと。折角良い例が身近にあるのに、というのが私の印象です。

それから少し脱線して言いますと、EFD/CFD 融合とは桁の違うお金が要るかも知れませんが、ぜひ JAXA に実機レベルのレイノルズ数を出せるような大型風洞を作っただけないだろうか。航空機開発がヨーロッパで着実に進んでいるのは、やはり ETW があるからではないかという気がとてもするのです。あのような融合のレファレンスになるものを出していける装置が絶対必要なのだということで、高レイノルズ数風洞建設のような大きな流れが出来ないだろうかという気がいたします。

**渡辺**：有難うございます。NEXST-1 のデータについては先程吉田さんからデータベースも整備されているという話があつて、確かに十分我々としても使いきれていないですし、それから小さいとはいえ実フライトのデータですので、大学や企業の方も含めて使っていく。つい我々は新たに飛行実証をと考えがちなのですが、既にあるものをしっかり使うという話はおっしゃる通りだと思います。風洞についてはこれはまたもっと難しい話ではあるのですが、メーカーからもそのような期待を受けていますので一つ大事かと思いました。それから先程会場からのお話で出ていましたが、データ同化ですね。飛行試験などでも使えるのではという話がありましたが、中村先生、何かイメージが沸かれていますでしょうか。

**中村**：答になっているかどうか分からないのですが、データ同化グループの状況を見てみると、

CFD もそうだと思うのですが、計算基盤が発達したおかげで今迄出来なかったことが行えるということで、時空間データ解析が進んできています。そのようなものを見ていったときに、今回の EFD/CFD 融合的なテーマの論文というのは殆ど出ていないので、例えば日本の独自性としてこれを進めていくことで新しいものが作られていく可能性はあるかと思えます。

**大林：** 気象、海洋以外でデータ同化を使われている分野はあるのですか。

**中村：** どこまでをデータ同化と呼ぶかということにもよるのでなかなか難しいのですが、例えば軍事関連で爆縮のシミュレーションがありまして、それについて統計屋と数値解析屋が一緒に取り組むような研究をアメリカのグループが進めています。ただ現状としては個別のプロジェクトがまずあって、それに紐付いてデータ同化的なことをしている人がやっているという段階です。少し補足して統計の人がデータ解析と言った場合にどのようなことを想像するかというと、原理となるモデルを考えるにあたって先ずデータを知りたいということがあります。そのために「柔らかいモデル」とよく私は言っているのですが、CFD におけるナビエ・ストークスのようなきっちりとしたモデルを立てるのではなくて、実験データに対して線形回帰の線を引くようなイメージでモデルを立ててそれで解析をするようなことを行います。そのような頭の使い方をするので CFD 的な分野の人達と上手くやるのはなかなか難しいという感触を持っていて、それが海外でも EFD/CFD 融合的なテーマがあまり無い理由なのだろうと思っています。

**松尾：** CFD の話を少しさせていただくと、まだまだ CFD 自体も基本的な剥離の問題、遷移の問題等、本日の講演でも吉澤先生がお話されていましたが、ベーシックな問題が残されています。それにはやはりデータが必要だというのがありまし

て、検証データの蓄積によって CFD をブラッシュアップするという活動も必要だという考えが出てくれば良いと思っていますし、AIAA が verification、validation という形で基準を作っていたりします。先程話に出た CRM などともそうですが、そのような基準を作る活動が CFD としてはこのようなどころから生まれてくると良いのではないだろうかと思っています。

**渡辺：** EFD/CFD 融合のような活動の中から CFD の精度を高めていくにあたっての基準づくりが出来ると良いというお話ですね。それでまた戻りますが、データ同化については過去 4 回のワークショップで毎回取り上げて来ましたが、私を含めて多くの方はまだ必ずしも十分理解出来ていない。また逆に航空宇宙側から期待があると言っても、データ同化の専門家にとってはどう期待されているのか今ひとつわからないところがあるかと思えます。そこで今後どのような枠組みが期待できるかなのですが、まず実験屋と CFD 屋の間については色々壁もありますが、お互いにそれなりの接点を持ってやってきたと思うのです。それではデータ同化の専門家にどのようにその中に入っていたか。EFD だとか CFD、航空宇宙のように分野が異なる場合に、どのように関わりあっていくと上手く進むか、ご意見はありますか。

**中村：** 基本的には最後は人材交流しかない、人が実際に行き来するしかないということはあると思いますが、まず日本にはデータ科学、統計全般の専門家が足りない状況です。それはもともと日本には統計学科が無いことが背景にあるのですが、一方で国内でも統計関連の研究に従事している人は沢山います。ではどこにいるのかといえば、各分野のドメイン、例えば医療統計あるいは生物統計、そのような個別の分野に人が分散しています。院生やポスドク等、全てそれぞれの中で閉じてやっ

ている状況にあるわけです。我々も例えば統計数理研では総研大との連携という形で人を増やす努力はしているのですが、やはり大学院だと制約がある。その中で例えば先程お話しした津波の問題で言えば、九州大学応力研の人と実際にやりとりしながらお互いのギャップを埋めていく。結局実際に人が行くしかないというのが今持っている印象で、そのためには人を増やすことと、行き来できるシステムを作るという二つが必要だろうと思っています。ただ、では具体的にどうするかというのはなかなか難しいのですが。

**渡辺：**わかりました。人を実際に増やすということと人材交流を進めるという二点ですね。それでは時間も残り少なくなってきたので、JAXA からの提言の3番目として、「EFD/CFD 融合ワーキンググループ」のようなもので比較的ゆるやかながらも一緒に課題を探したり、情報交換から始まって共同研究に結びつけるようなことを行ってはどうかと。それから澤田先生からはかなり似たものとして互助会のようなものはどうかというご意見をいただきましたので、要は今後さらに深い議論を行ったり方向性をまとめられる枠組みが必要ではないかということです。その辺についてご意見があればいただければと思うのですが。

**会場：**そのような提案を一つさせていただく前に、この意義ですね。このような融合技術というのは一つのツールだということで、ぜひ進めていただきたいと思います。以前、宇宙往還機の研究開発に参加しておりました時にヨーロッパの人はアメリカに追いつき追い越せということで、このような基礎技術の進め方につきましても非常に真面目かつ系統的に進めているということが見えました。そこで私が非常に面白いと思えたのは、ドイツのアーヘンの高エンタルピー風洞で圧縮コーナーの熱流束データをある人が取得します。そのデータをこの学会で発表するから、CFD の人

はどんどん自分達の手法を当てはめて、そこで同時に発表してくれというようなことをお願いするのです。当時は実験データに対して250%位違うような CFD 結果も出ておりましたが、それが回数を重ねることによって段々差が縮まっていたように記憶しています。近年は航空分野でも同じようなワークショップをやられているようですが、ただそこでも実験屋には実験屋の、CFD 屋には CFD 屋の世界があるかと思います。アーヘンの実験データにはエラーバーが付いておりましたが、どのような根拠でのエラーバーなのかというのが十分には出ておりませんでしたので、結局そのようなワークショップに参加された方々でも、差は縮められたとは言ってもその原因を結論づけるまでには至らなかったように思います。日本においても二つのコミュニティが並列しているところはあるので、このような何か融合を通した新しいツールが作り出されるということは非常に期待されるし、意味があるのではないかと思います。



です。ですから先程会場からコメントがあったように、枠組みについては現場の方あるいはメーカーの方々が相談しようというような形となるように進めるのが一番良いと思います。そのためには実験や CFD でどのようなことが現状達成出来ていてどのような課題に対してどの程度答えられている

のか、どのような問題が残っているのかということ、それをワーキンググループや互助会の方々と共通認識として持たれることが最初ではないかと思うのです。さらに、その中でこの融合プロジェクトにより2年後にはどこまで出来るか、3年後にはこうなっていますという目標を立てるべきだと思うのです。例えば、講演の時にお話のありましたTPS (Turbine Powered Simulator) ですね。風洞試験の中でのジェネレーターというかパワー効果を評価する技術をエラーバーと一緒に出せるようになるのがこのようなグループの活動ではないかと思うのです。

結局、このグループが解決したという事例を世に出していくことが外から見ると分かりやすいのです。例えば今度新しくLE-Xというエンジンを作りたい、その時に配管系の振動がどうなるかをCFDと実験の両方を通じて調べたいと思う人もいます。そのような時に問題を幾つか基本的な現象に細分化して解くことが出来ていれば、JAXAの宇宙グループから協力して欲しいという要望も出てくるような気がするのです。やはり問題を現状認識とそれから具体的に出来ることとに分類してプロジェクト化していくようなことを、このワーキンググループや互助会を中心として進めるべきというのが私の提案です。

**渡辺**：有難うございます。前向きなご意見をいただきました。最初からはなかなか難しいのですが、最終的にはそのような方向を目指すことができればと思います。それで何らかのワーキンググループ、名称ややり方は色々あると思うのですが、ぜひJAXAとしても何か動き出したいと思いますし、ワークショップの実行委員の方々もいらっしやいますのでその辺の方々も交えながら、このようなものはどうですかと皆様に具体的に提案出来るよう今後検討させていただければと思います。

それでは最後にパネリストの皆様からこれは言

い残した、これはぜひ言っておきたいということがあれば、いかがでしょうか。

**伊藤**：ワーキンググループの活動から、ぜひ技術の出口として世の中にインパクトのあるものを提案出来ないでしょうか。たとえば、JAXAでは今、環境問題に対して大きなインパクトがあるようなプロジェクトが出来ないかを議論しています。そのような目的意識を持った出口が、EFD/CFD融合に欲しいところです。ただのツールではなくて、この先これを使ったら何が出来ますということが言えると良いのではないのでしょうか。

**会場**：今、伊藤さんが言われた出口というのは色々あり得ると思います。先程ジェットFTBで飛行試験という話がありましたが、日本の航空機開発における大きなターゲットとして、私はぜひMRJを使うことを考えてもらいたい。やはり一番大きな違いは日本で作った飛行機かそうでないか。日本にとっての大きな最終ターゲットがあって、そこからずっと下の基礎技術までが綺麗に繋がっているヨーロッパのようなスタイル。ヨーロッパではやはりエアバスが引っ張っている。頂点にエアバスがあってそこから必要性があって広がっている形になっていると思います。MRJはJAXAの風洞を随分使って作られましたし、将来MRJを使って更に新しい航空機の為に色々な技術開発が出来る。そのような活動がEFD/CFD融合も含めて全部繋がるとというのが一番綺麗な姿ではないかと、そのような意味でJAXAも頑張りますがぜひご協力をお願いしたいと思います。

**渡辺**：綺麗にまとめていただいて有難うございます。最後にJAXAからの提言を使いまして今回のパネルディスカッションについて、ごくごく簡単にまとめさせていただきます。


おわりに(JAXAからの提言)

■JAXAからの提言1  
日本としてEFD/CFD融合技術を全面的に押し出すことにより、国際的優位性を確立することができないか？

■JAXAからの提言2  
航空宇宙分野におけるEFD/CFD融合の二枚看板

流体力学現象の より深遠な理解	設計開発プロセスの 高度化
現象理解への貢献	もの作りへの貢献

■JAXAからの提言3  
「EFD/CFD融合ワーキンググループ」(仮称)の設立

 30

これで終了とさせていただきたいと思いますが、今回登壇していただきましたパネリストの皆様と会場で積極的に発言していただきました皆様に感謝の意を表して拍手で終わりたいと思います。どうも有難うございました。(拍手)

まず、EFD/CFD 融合を押し進めることは良いのだが、ターゲットをよく絞って進めていくべきだというご意見が出ています。それからターゲットを絞るにしても、レベルが基礎的研究のところでの EFD/CFD 融合から設計そのものまで色々ある。それを踏まえてターゲットを考えなければならないというご意見だったと思います。

それから二番目の提言につきましては、左側の流体現象の理解というものも必要性を認識されながらも、どちらかという右の設計開発プロセスの高度化が主たるターゲットになるということが本日の議論だったと思います。その中で非常がキーワードになったり、実機推算という意味ではジェット FTB や MRJ のようなものを使いながら、あとは既に飛んだ NEXST-1 のデータを活用するだとか、あるいは実レイノルズ数の風洞を作って欲しいといった意見が出たと思います。

最後の提言につきましては、ワーキンググループは多分あれば良いし、何らか皆様参加していただけたらと思うのですが、進め方は結構難しいと思います。まずは非常にゆるやかなものから、会場からコメントがありましたような大きなイニシアチブを日本でとっていくものまで、色々なやり方が考えられますので、ぜひ今後皆様と相談しながら進めて行ければと思います。

では、時間を少し超過してしまいましたが、こ