

# スーパーコンピュータ利用の将来

－ 航空宇宙分野は過去の世界か？ －

宇宙航空研究開発機構

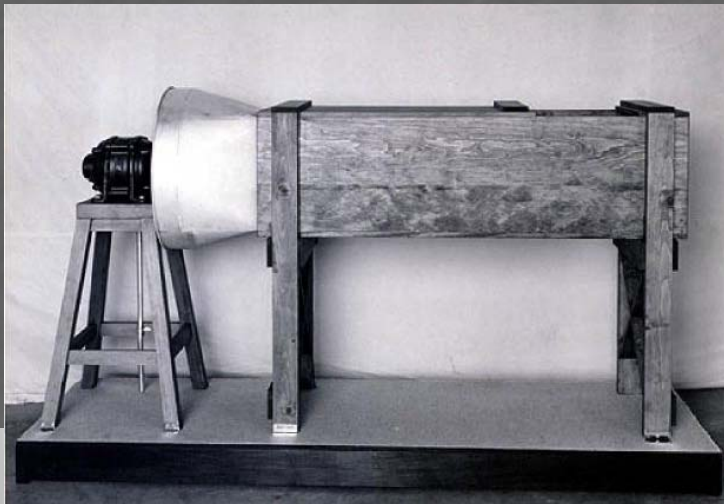
情報・計算工学(JEDI)センター

宇宙科学研究本部

藤井 孝藏

# 航空機開発に不可欠な風洞設備

## ライト兄弟が使った風洞

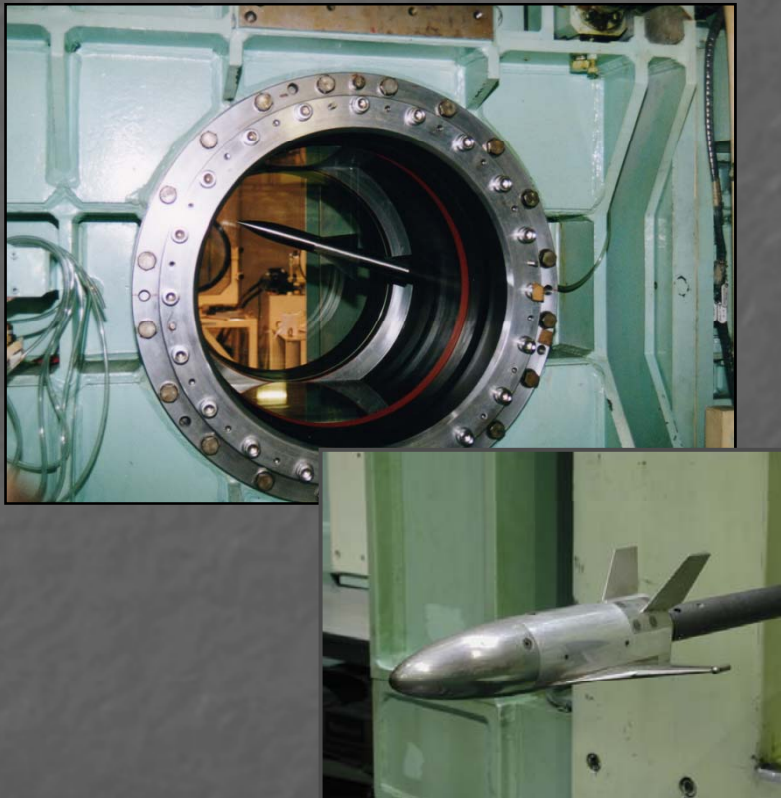


## 世界最大の風洞

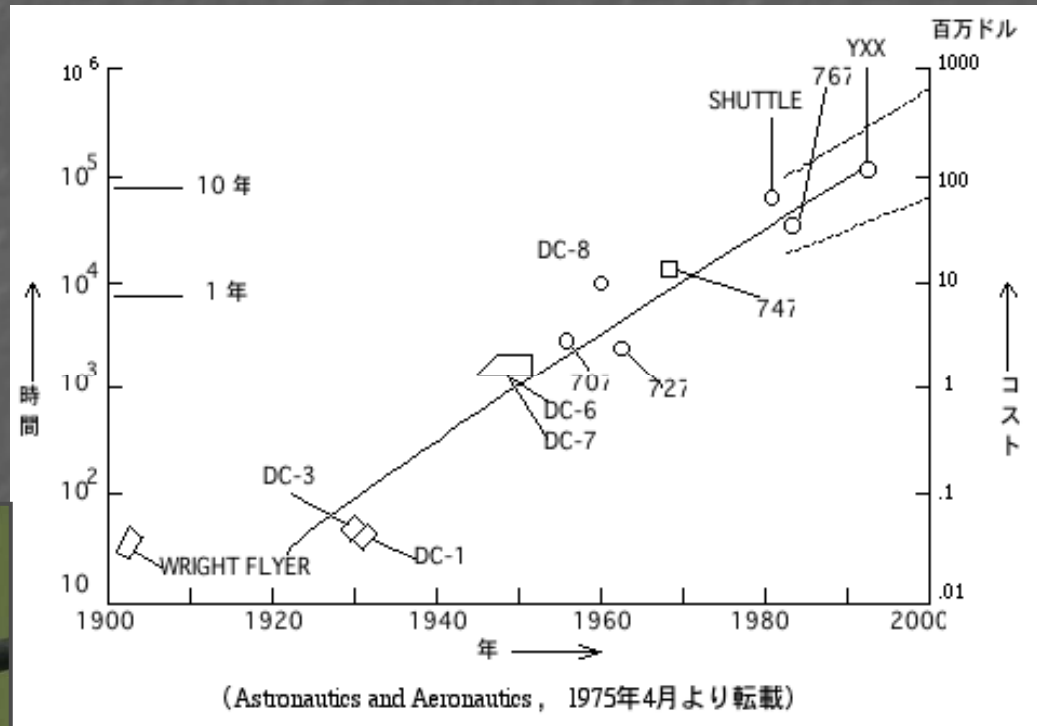


# 航空機開発に要した風洞試験時間

## 実際の風洞試験例



## 航空機開発に要した風洞試験時間



→ 数値流体力学 (CFD: Computational Fluid Dynamics)

# 航空分野が拓いてきたスパコン利用の世界

## 二つのメッセージ

### ➤ Dean Chapman教授 のメッセージ(1977)

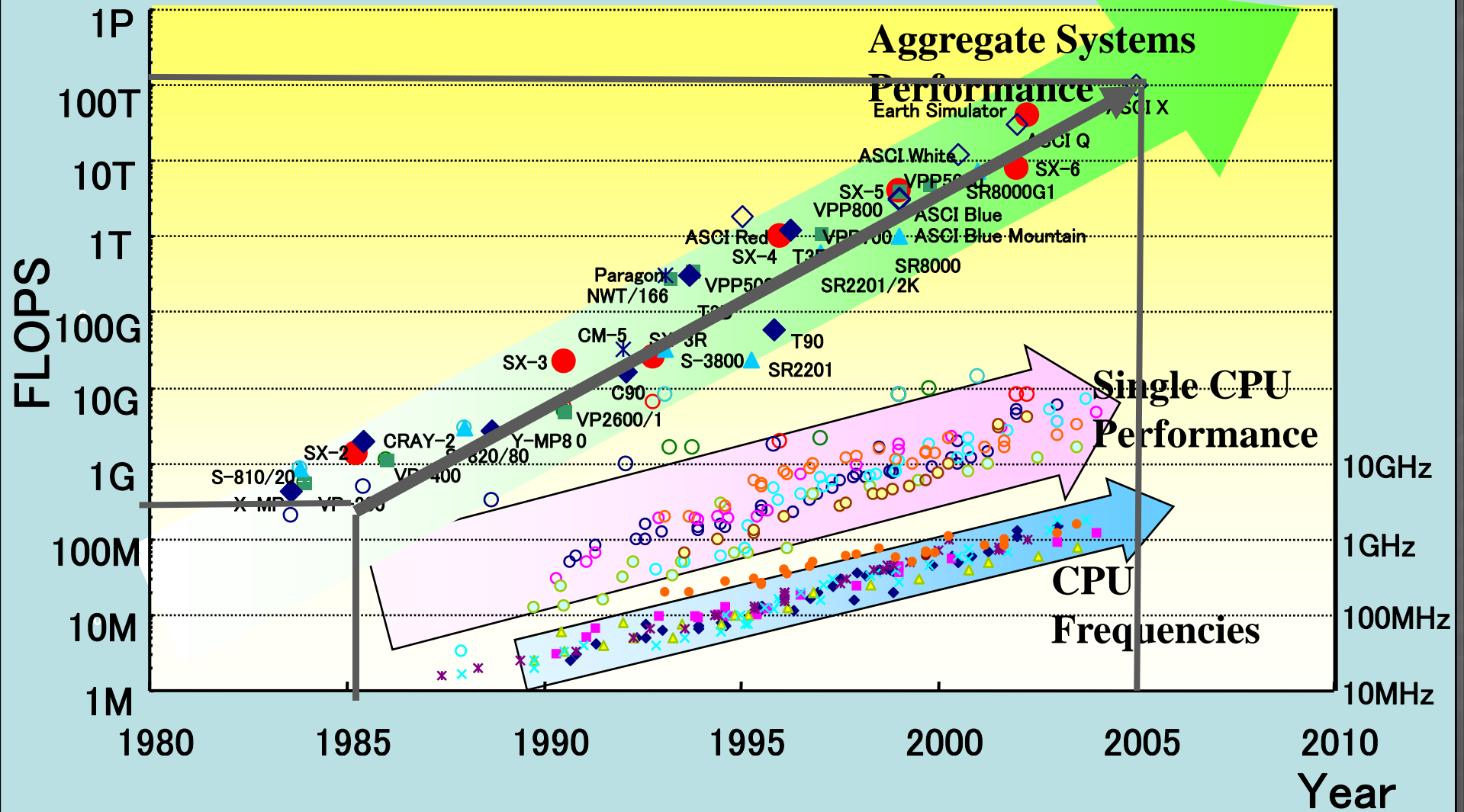
航空宇宙CFDを推進すべき理由は「**新たなる重要な技術能力の獲得**」と「**経済性**」の2つであり、それは今後数十年変わらないだろう。

風洞試験には、**スケール効果**、風洞壁干渉、空力変形などの制約がある。CFDにも、計算機スピード、メモリー容量、ディスク容量などの制約があるが技術動向はそれらの制約が急速に解決しつつあることを示している。

### ➤ Paul Rubbert 氏 (Boeing Fellow)のメッセージ(1988)

航空機の設計には、空気力学的効率、重量、製造コストの三者を正しくバランスし経済性を最大にするコンカレントエンジニアリングを実現するに足る即応性が要求される。

# 計算機性能の進展



Courtesy of Dr. Tadashi Watanabe, former NEC Corporation

# シミュレーションに要する計算時間

## 1985年の世界最速コンピュータ

Supercomputer

1 GFLOPS, 256MB メモリー

計算時間は約2時間(1985)

20万点の格子を利用した3次元NS計算



### 一格子点・時間ステップあたりの計算時間

1983 CRAY 1	86.0 $\mu$ sec
1983 F社M380	272.0 $\mu$ sec
1985 F社VP400	6.7-9 $\mu$ sec
F社VP200	11.0 $\mu$ sec
1986 CRAY 2	20.0 $\mu$ sec
2000 Note Pen III (700MHz)	25.0 $\mu$ sec
2001 Pen 4( 1.5 GHz)	9.9 $\mu$ sec
2007 Pen Xeon (3.2GHz)	4.1 $\mu$ sec

### 飛行機的设计

電機研究所の藤井孝蔵さんと東大大学院生の大林浩さんが、世界で初めて実機で計算するに成功。「手法」プログラムの開発が勝負」と、藤井さん。

【予】の機体速度マッハ0.8、迎角四・六六度の条件下で、主翼周りの空気の二万六千七百六十三点について計算。写真はその中の主翼表面と、それに垂直な断面の千六百五十点。軍用機の新型スーパーコンピュータでも一・五時間かかった。処理速度も世界最高。



## ECJ: Aircraft design by Swift Engineering Inc.

Eclipse Aviation Partners with Swift Engineering to Develop Eclipse Concept Jet  
Eclipse Aviation Partners with Swift Engineering to Develop Eclipse Concept Jet



*VLJ leader and aerodynamic design pioneer team up to build single-engine concept aircraft in less than seven months*

Presentation by Mark Page at ASME/JSME Fluid Engineering Conference, at San Diego, July 2007 (<http://www.swiftengineering.com>)

## 再びDean Chapmanの言葉

実現できなかったこと -この30年で何が変わらなかったのか？

航空宇宙CFD推進の理由は「**新たなる重要な技術能力の獲得**」と「**経済性**」の2つであり、それは今後数十年変わらないだろう。

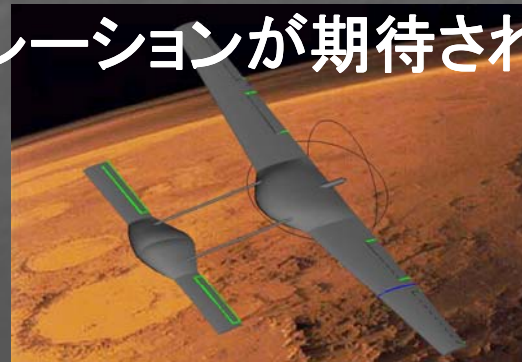
- 現象理解 — 新たなる重要な技術能力の獲得
- 空力特性評価 — 高い経済性を活用して

という使い方を実践してきたを。しかし、実現してきたのは、どちらも風洞試験の代替をイメージしたもの。よく考えると30年前と今とでシミュレーションに本質的な違いがあるように思えない。



# 航空宇宙におけるCFDへの期待 —挑戦への復帰

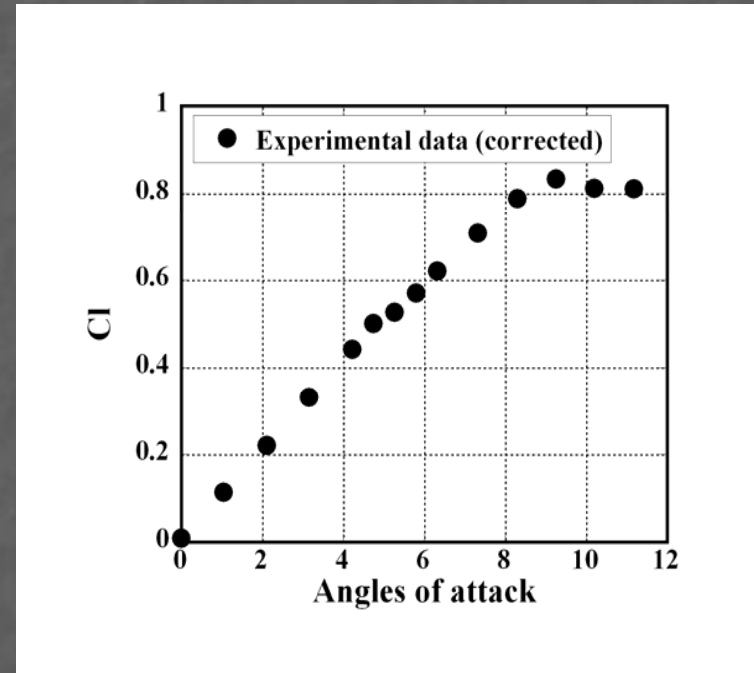
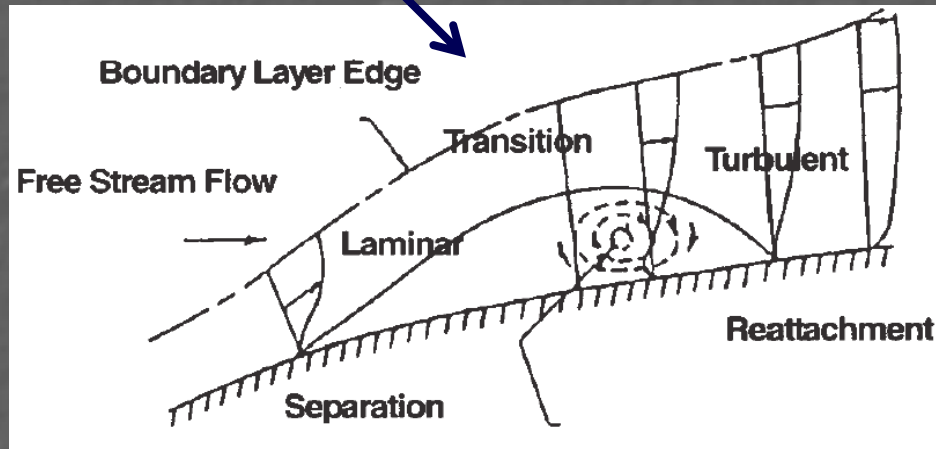
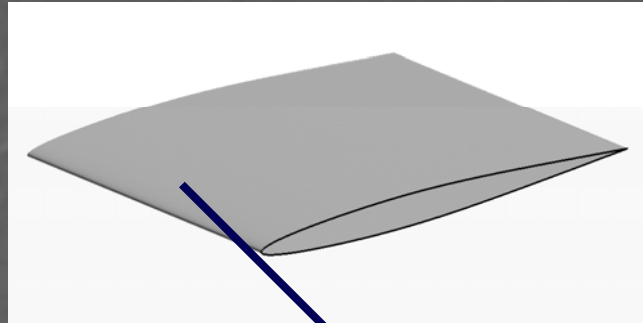
- ▶ スケール効果を評価できる手法（試験を越える）
  - ▶ 低いレイノルズ数から高いレイノルズ数まで連続的に流れの領域を捉える道具として位置づけることで更なるシミュレーションの強みを発揮する。
- ▶ 概念設計（シミュレーション本来の力を発揮）
  - ▶ 課題解決や詳細な形状改善ではなく、革新的なイノベーションを創造する手段としてのシミュレーションが期待される。



火星探査航空機（JAXA長期ビジョンより）

# 薄翼の失速特性 —1

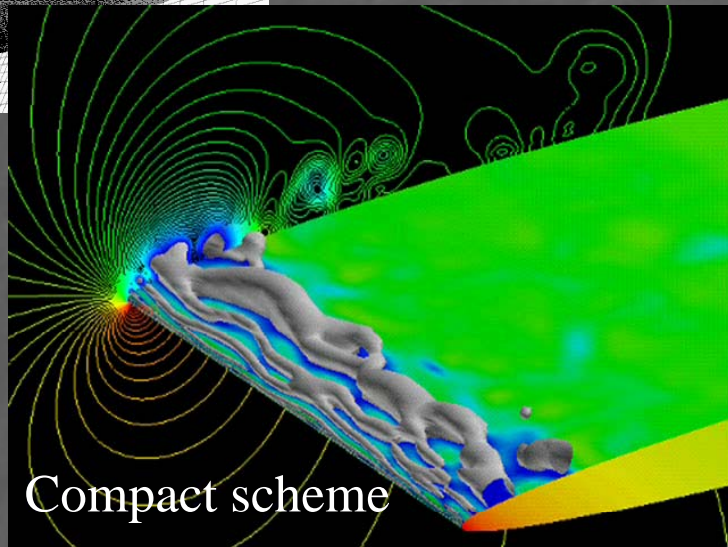
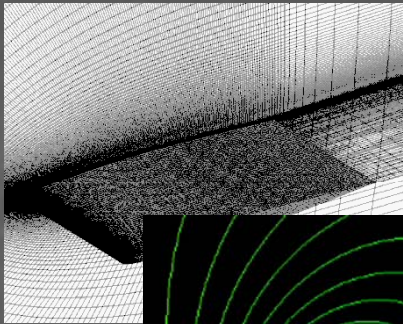
前縁付近に生ずる層流剥離泡が翼の空気力学特性を決める



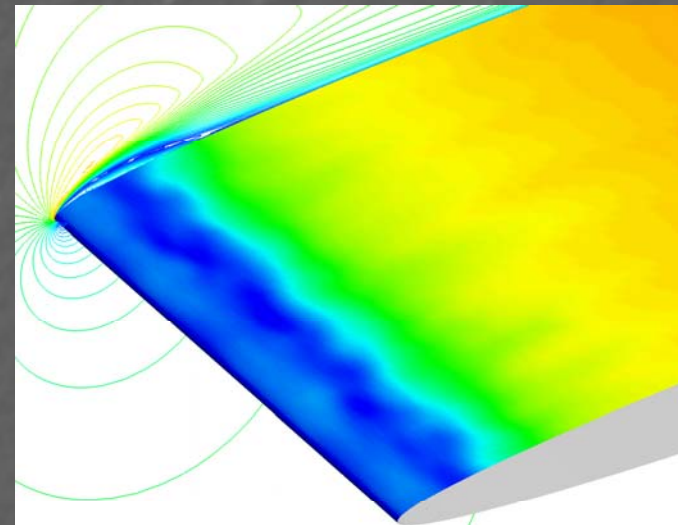
翼型の揚力特性

## 薄翼の失速特性 ー2

### LESハイブリッド法によるシミュレーション結果



流れの時間変動



時間平均された流れ場

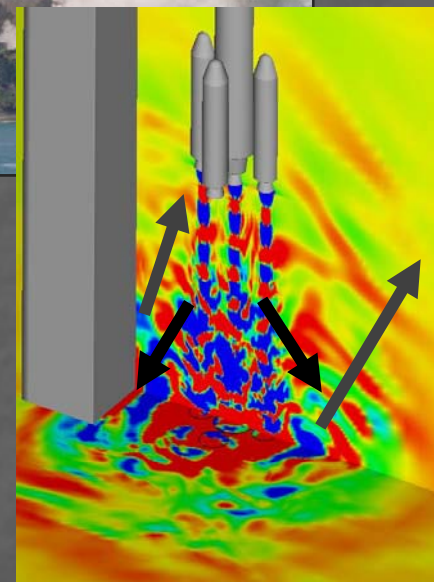
### 流体は本質的に非定常

高速気流において一見定常と考えられていた流れ場にも実は強い局所非定常性があり、それを捉えないと平均的な流れ場も正しく捉えられない。ここに乱流モデルを利用したRANSシミュレーションの限界がある。

# ロケット射点設計における課題

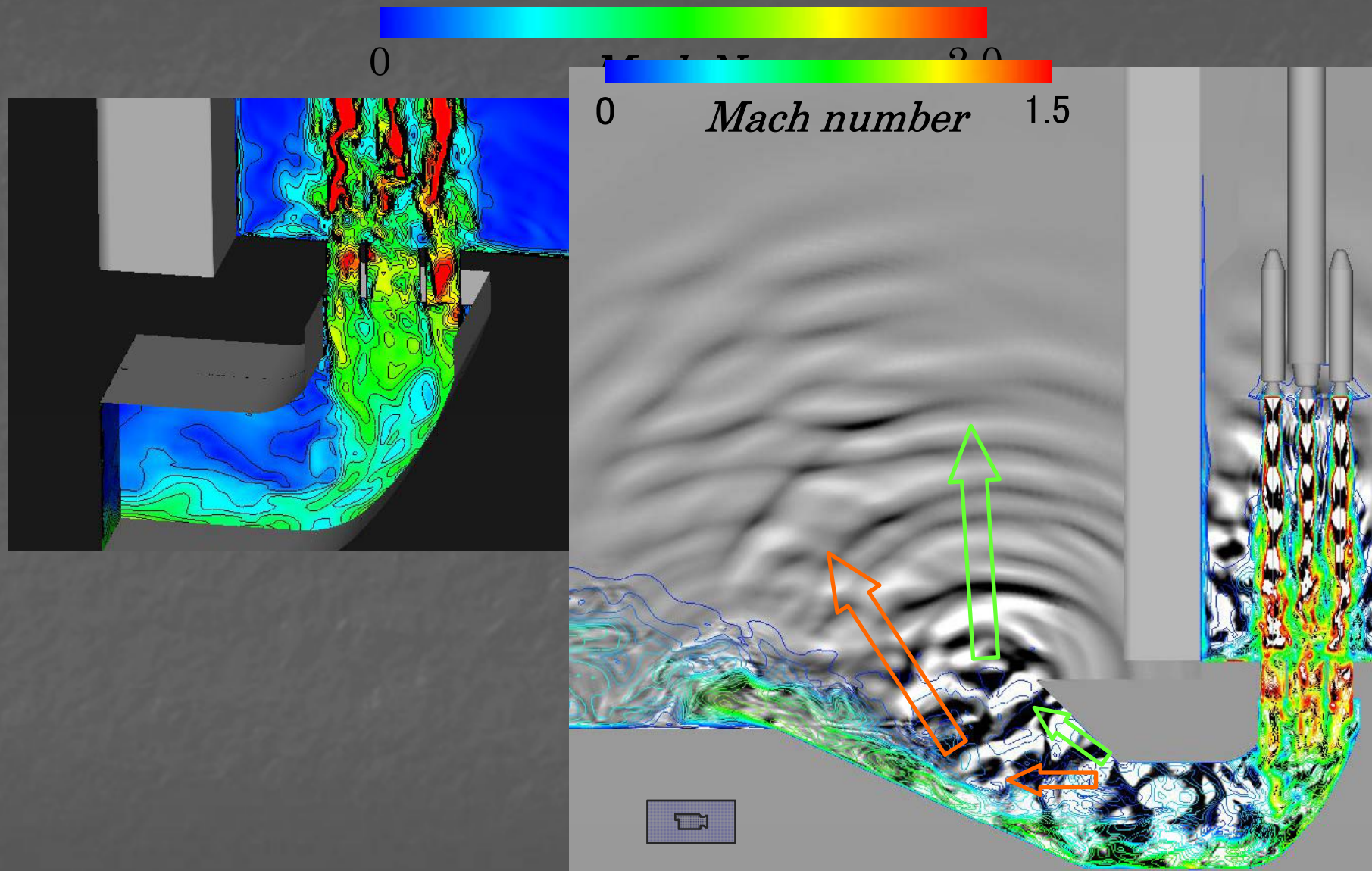


H-IIA F1

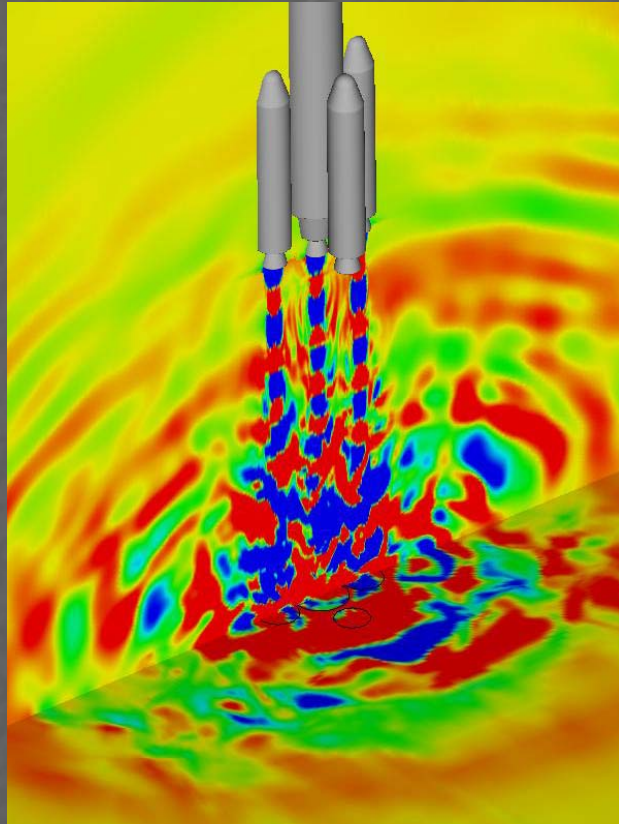
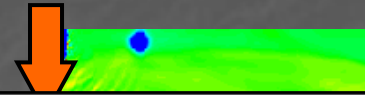


ロケットプルームから出る音響が  
衛星設計に大きな影響を与える

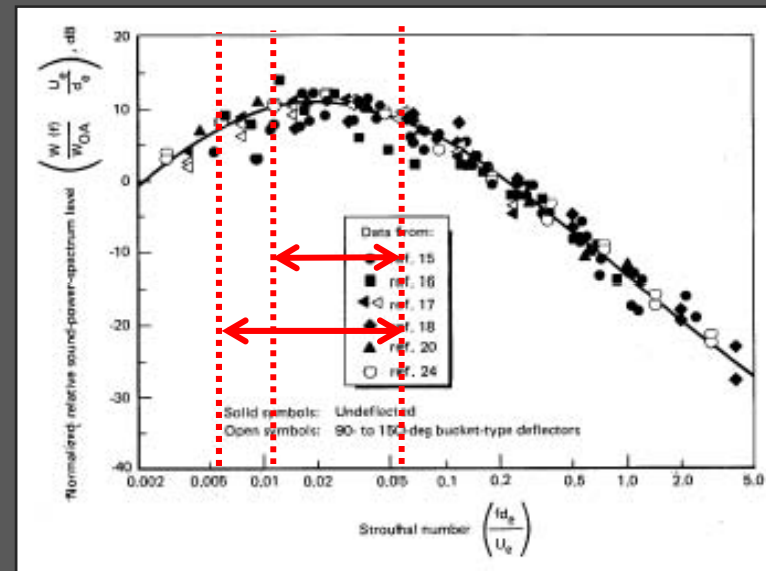
# 煙道から放出する音響波



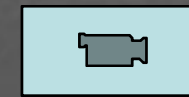
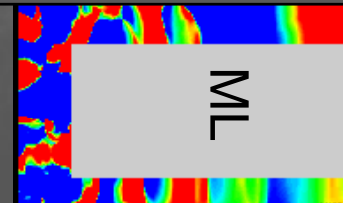
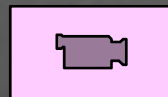
# スペクトル的な高解像度手法(新手法)の効果



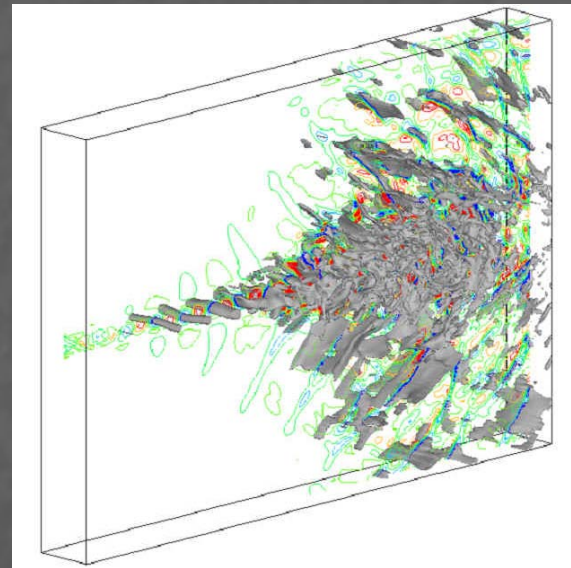
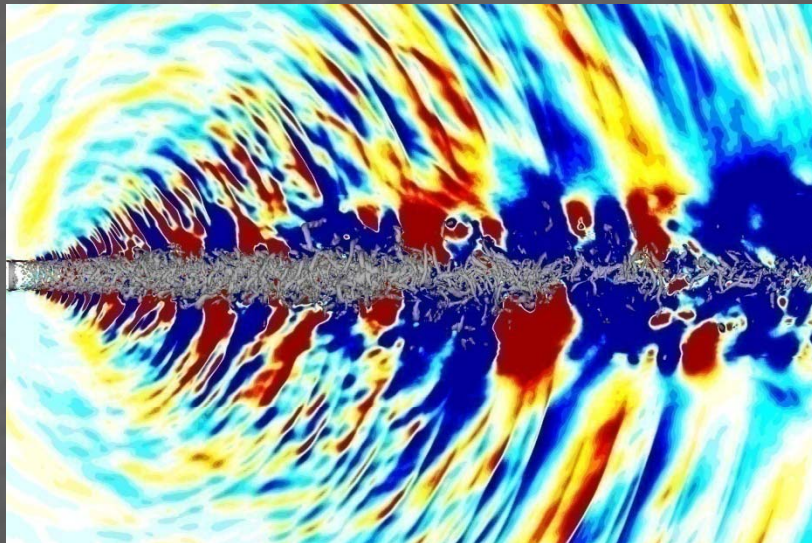
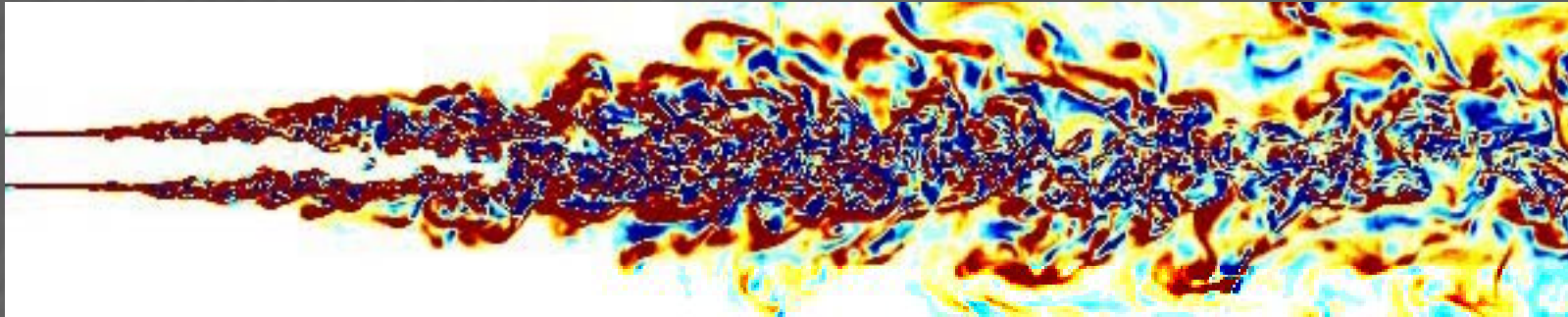
NASA SP-8072より



6 Hz 12 Hz 60 Hz



# 新手法によるジェット音響直接計算



# 実現へのシナリオ ー考慮すべき要素技術

---

## ➤ 演算能力(スーパーコンピュータ)

先端計算機は10年で1000倍程度の速度向上を維持してきた

今の単体PCは1985年世界最高速のスーパーコンピュータより数倍速い

## ➤ LESおよびLESハイブリッド法

**局時流動**(小さな時間・空間スケールの)現象が平均場も決める(RANSシミュレーションの限界)

これを捉えることがスケール効果評価の鍵となる

## ➤ スペクトル的な高次精度手法

最近の手法は、既存手法に比べて各方向数倍程度の空間解像度を実現

不連続現象への対応手法が課題だが、対処方法の提案はある



## 今後起こる大規模シミュレーション(新手法利用の場合)

	Re=10 <sup>5</sup> 以下 MAVなど	Re=10 <sup>6</sup> 程度 風洞試験レベル	Re=10 <sup>7</sup> 以上 民間輸送機など
格子点数	1000万点 8 GB	100 × 1000万点 0.8 TB	10 <sup>4</sup> × 1000万点 80 TB
計算時間	1ノード8cpuで 120時間	1ノード8cpuで 12,000時間 (1年5ヶ月程度)	1ノード8cpuで 1,200,000時間 (137年程度)
1 PFLOPS*ならば 計算時間	0.1-0.5時間	1-5時間	100-500時間 (数日から3週間程度)

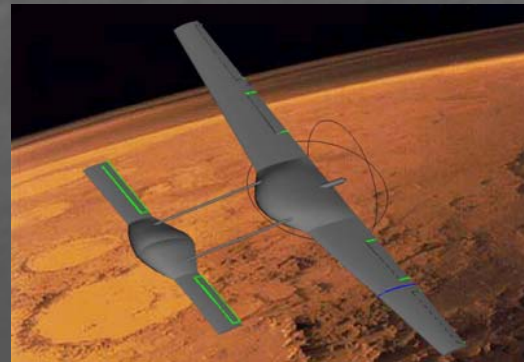
\* perfect scalability

\* ISAS所有のベクトル計算機に基づいた個人的な予測

ペタクラスの計算機が自由に使えたら、かなりのところに手が届くかも...

# 航空宇宙におけるCFDへの期待 —挑戦への復帰

- ▶ スケール効果を評価できる手法（試験を越える）
  - 低いレイノルズ数から高いレイノルズ数まで連続的に流れの領域を捉える道具として位置づけることで更なるシミュレーションの強みを発揮する。
- ▶ 概念設計（シミュレーション本来の力を発揮）
  - 課題解決や詳細な形状改善などではなく、革新的なイノベーションを創造する手段としてのシミュレーションが期待される。

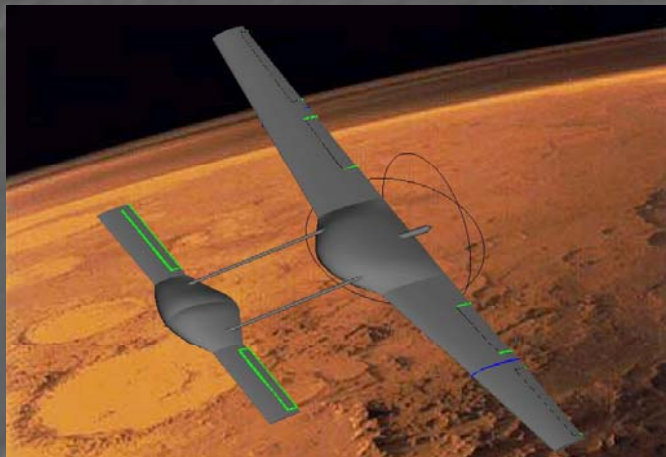


火星探査航空機（JAXA長期ビジョンより）

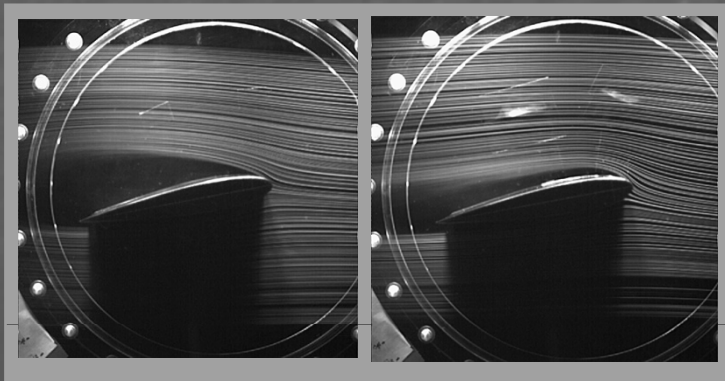
# 概念設計と新しい航空機要素技術

翼の揚力:  $L = \frac{1}{2} \rho u^2 S C_L$

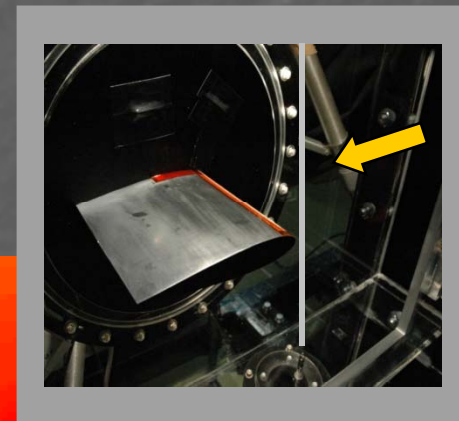
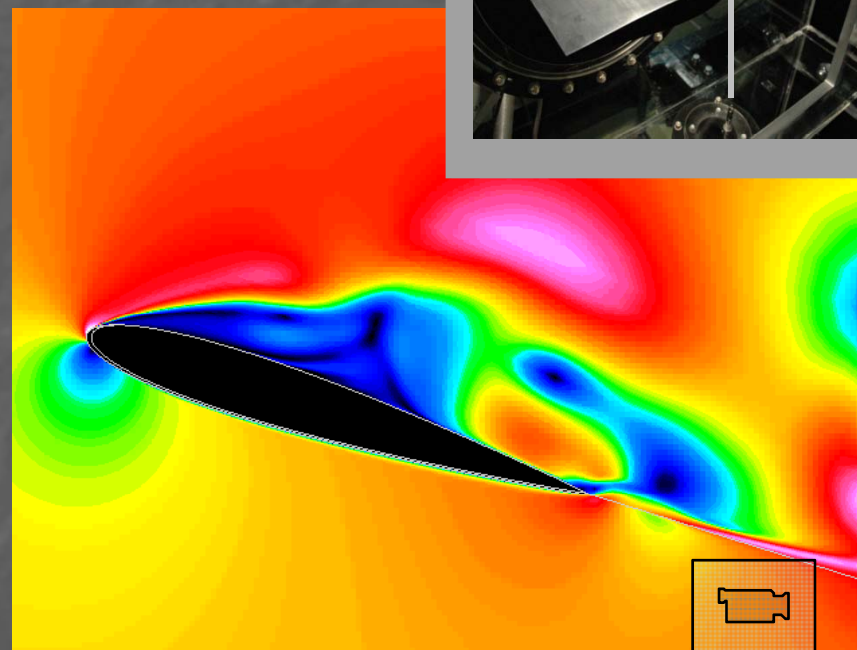
プラズマアクチュエータ



火星探査機

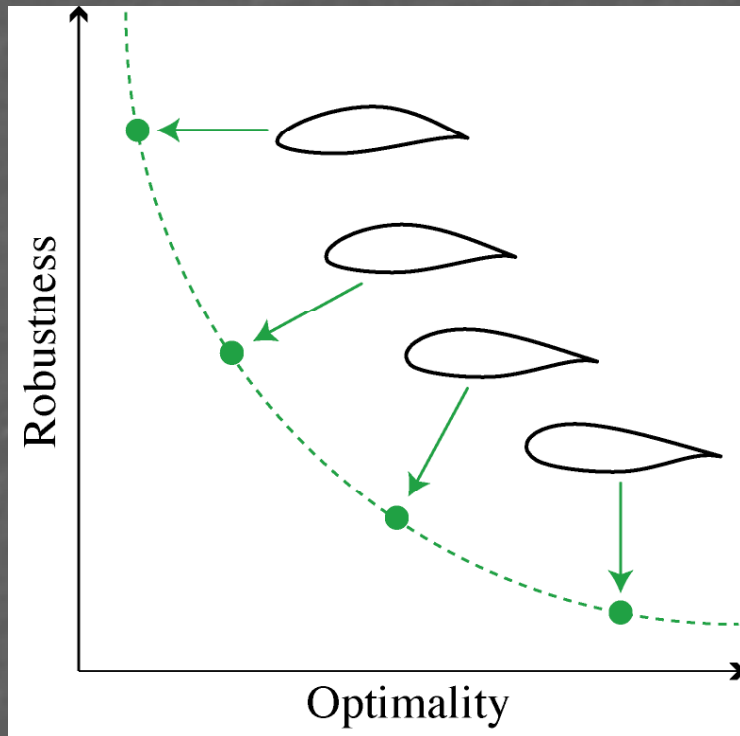


*Need to increase  $C_L$*

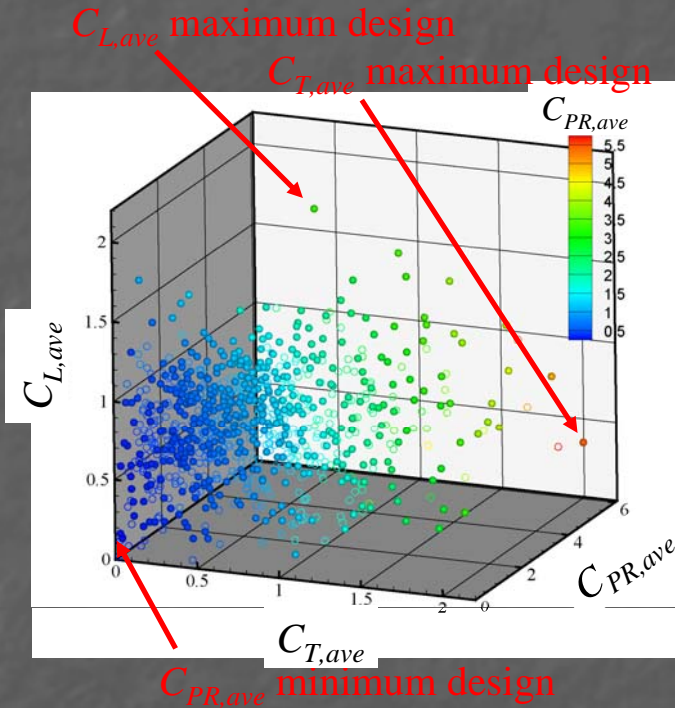
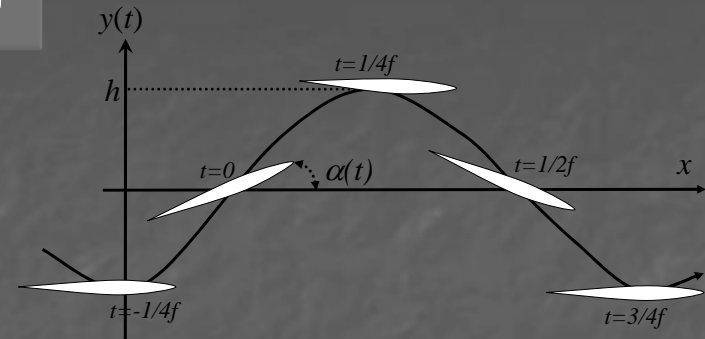


→ Flow control with DBD

# 設計探査における手法(例)



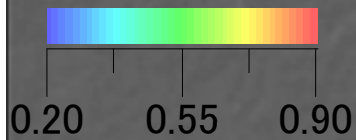
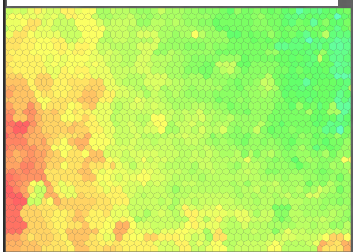
題材によってはロバスト性は目的関数となる



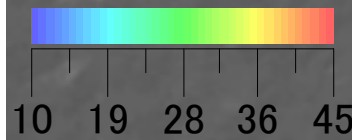
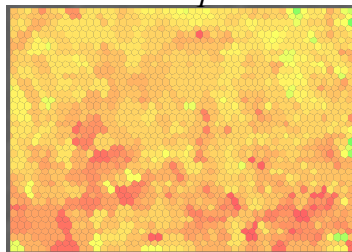
自己組織化マップ(SOM)など

# 羽ばたき運動におけるSOM解析例

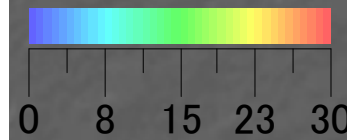
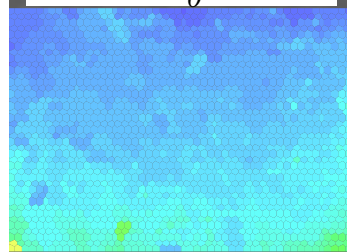
Frequency



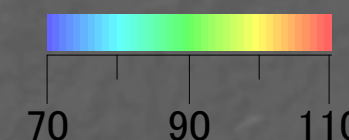
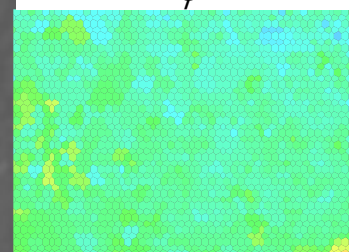
pitch amp.



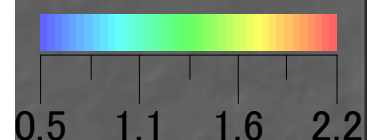
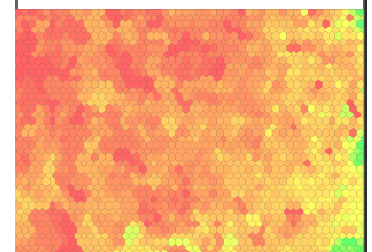
pitch offset



phase shift



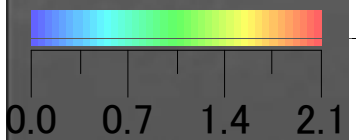
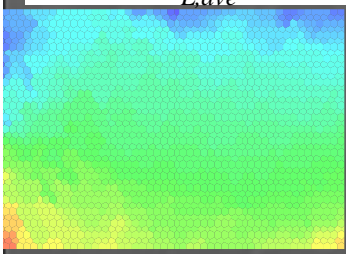
plunge amp.



Phase shift should be around 90 degs.

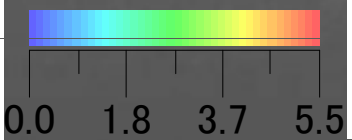
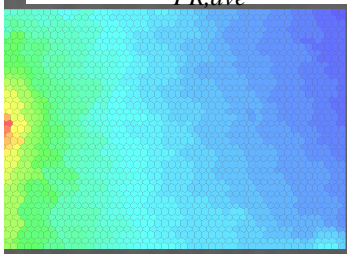
lift

-Lave



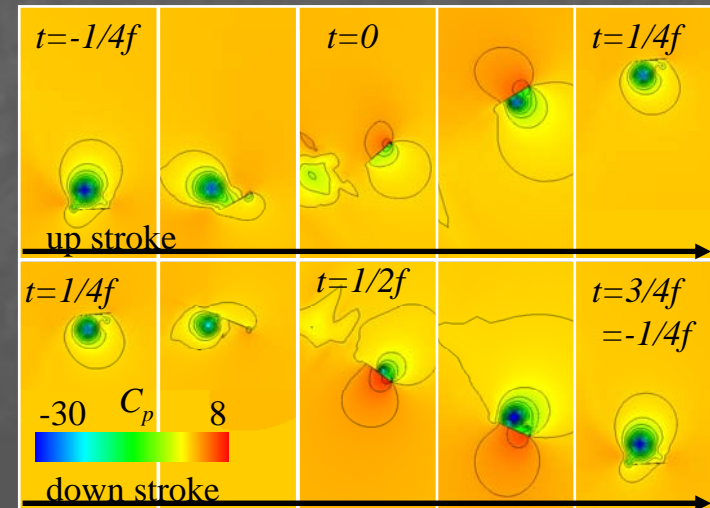
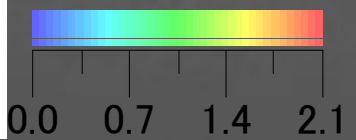
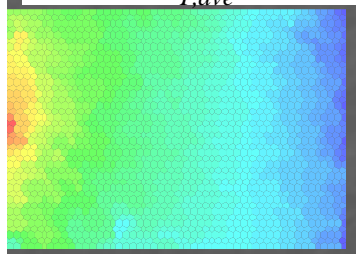
required power

-Pn,ave



thrust

-Lave



# これらを背景に今後重要となるスパコン利用と関連技術

## スケール効果を評価できる手法として利用

### ➤ 解析データ探査

空間データ中心の解析から時空間巨大データの解析へ  
実験データ処理とシミュレーションデータ処理  
可視化にとらわれない後処理の工夫  
時間積分手法の再評価

## イノベーションを創造する手段として利用

### ➤ 設計探査

多彩な多数のケースに基づく設計情報取得  
ロバスト多目的最適化, データ探査, など

\* (参考)米国NSF計画 Cyber CFD

# さらに速いスーパーコンピュータが拓く世界

---

- リアルタイムシミュレーション
  - ービジュアルコンピューティングの復活
  - ーTransaction的なデータ解析
  
- スーパーリアルタイムシミュレーション
  - ー実際よりも速く現象を予測する

## リアルタイムシミュレーションへの道

かなり乱暴な議論だが現在の計算速度から可能性を予測する。

---

(例1) ロケット打ち上げ時のプルーム音響シミュレーション

1TFLOPS マシン

時間1ステップ 計算時間  $2.4 \times 10^{-1}$  sec 実時間の  $6.1 \times 10^{-6}$  sec相当

40 PFLOPS マシン

時間1ステップ 計算時間  $6.0 \times 10^{-6}$  sec 実時間の  $6.1 \times 10^{-6}$  sec相当

---

(例2) 物体周りの流れLES解析

1TFLOPS マシン

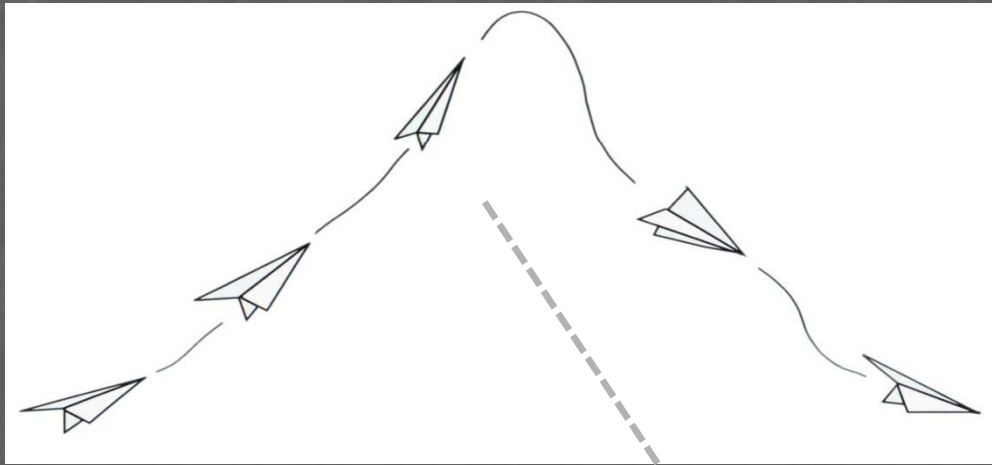
時間1ステップ 計算時間  $2.3 \times 10^{-1}$  sec 実時間の  $1.15 \times 10^{-6}$  sec相当

230 PFLOPS マシン

時間1ステップ 計算時間  $1.0 \times 10^{-6}$  sec 実時間の  $1.15 \times 10^{-6}$  sec相当



# スーパーリアルタイムシミュレーション



落ちない飛行機



ゴルフクラブの選択？

気象情報  
地形情報  
地図情報  
などなど



「はじめに応用ありき. 応用がすべてである.」

嶋正利

マイクロプロセッサ開発者

2003年サイエンティフィックシステム研究会での講演より