ユーザーサイドから見たこれまでの経験と将来像

数値風洞(NUMERICAL WIND TUNNEL)

松尾　裕一
（元科学技術庁航空宇宙技術研究所
現(独)宇宙航空研究開発機構研究開発本部）

講演者紹介

名前：松尾　裕一（まつお　ゆういち）

現職：独立行政法人　宇宙航空研究開発機構　研究開発本部　数値解析グループ長

略歴：1989年　東京大学大学院工学系研究科舶用機械工学専門課程博士課程終了、工学博士

1989年4月　科学技術庁航空宇宙技術研究所入所

1992-1993年　米国 NASA エームス研究所客員研究員。

2003年10月　独立行政法人宇宙航空研究開発機構に統合

2008年4月　より現職

日本航空宇宙学会，日本機械学会，日本流体力学会，米国 AIAA に所属

専門は、乱流のシミュレーションとモデリング、ターボ機械の流れ解析、並列計算等

三好甫先生記念計算科学シンポジウム

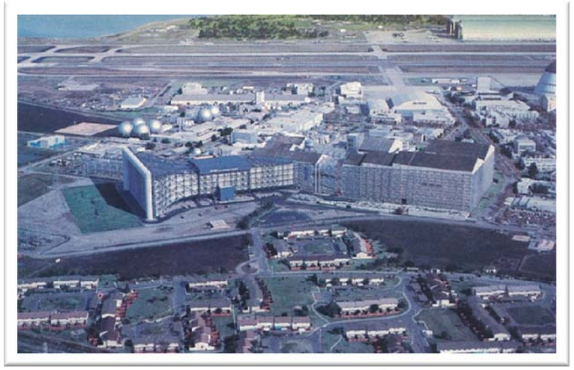
数値風洞
（NUMERICAL WIND TUNNEL）

松尾裕一
宇宙航空研究開発機構 研究開発本部

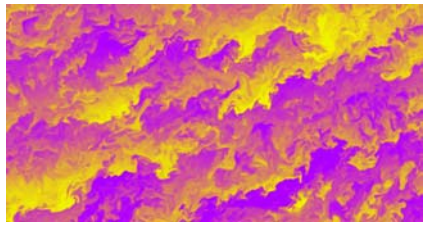
平成23年9月10日

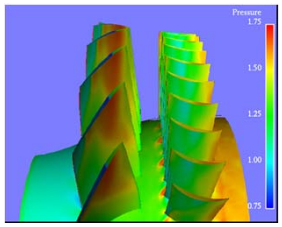
自己紹介

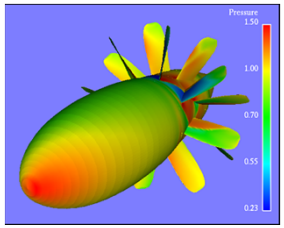
- ’90.4　　旧航空宇宙技術研究所 数理解析部入所
三好さんのいた部署



- ’92.3-’93.3 NASA Ames研究所客員研究員
（’93.2 数値風洞導入）
- この間，主に乱流，ターボ機械の解析に従事







- ’02.4～　　ポストNWTの導入・運用に従事

- ’08.4～　　JSSの導入・運用に従事

本講演の内容

- 数値風洞（NWT）とは
- 導入の頃の状況
- 数値風洞の概要
- 数値風洞が実現したもの
- 数値風洞の限界
- 今後への期待

- 導入に携わってはいない
- 運用には稼働後半（安定期）から関与
- 最初は利用者（流体力学）
- 良かった点も反省すべき点も述べる（Lessons learned）

数値風洞とは

- **２つの側面**
  - ➢スパコン…　1993年2月～2002年7月まで稼働した分散主記憶ベクトルスパコン
  - ➢コンセプト…　スパコンの中に風洞を実現する．今日まで継続

- **スパコンとしての数値風洞**
  - ➢三好さんの功績大
  - ➢1993-1995までTop500でNo1を保持
    - ダントツの性能を誇った
  - ➢関係者の力を結集，良い支援者・理解者

導入の頃の状況

- ’70年代中期
  - ➢ベクトル計算機の黎明，FACOM230-75APU
    22MFLOPS
- ’80年代前半
  - ➢数値ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ委員会⇒「数値ｼﾐｭﾚｰﾀ（NS）計画」策定
  - ➢「飛鳥」の開発と重なり予算取れず

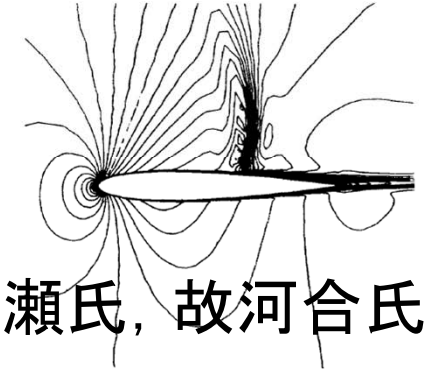
- ’87
  - ➢NS計画開始
  - ➢NS-Ⅰ（VP400）導入
    1.1GFLOPS

- ’90前後
  - ➢日米貿易摩擦⇒米国ベンダー対策

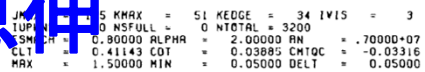
導入の頃の状況(2)

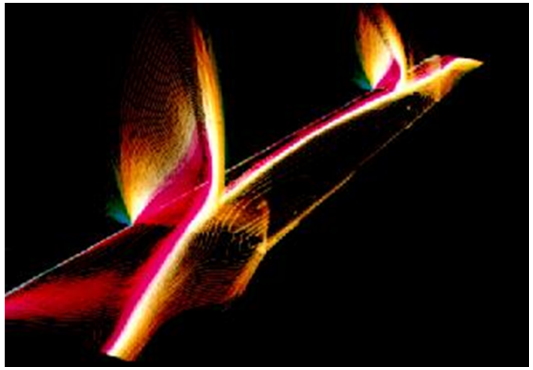
- **数値風洞と同時期に入れたスパコン**
  - Fujitsu VP2600　　VP400の拡張，使いやすかった，5GF
  - Cray Y-MP M92　　可視化用として導入，遅かった，336MF×2
  - Intel Paragon XP/S25　　MPP，時期尚早，使えなかった，25.2GF

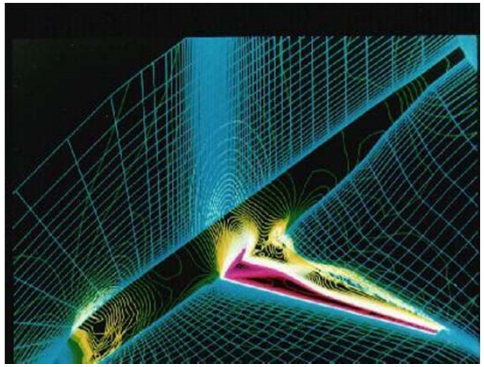
導入の頃の状況(3)



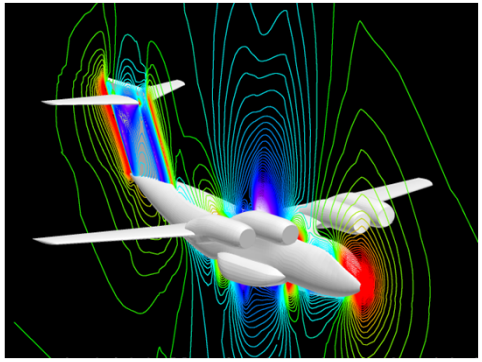
- **CFDアプリケーションの台頭**
  - 3次元遷音速逆解法(故高梨氏)
  - 高Re数遷音速流翼型解析プログラムNSFOIL(廣瀬氏，故河合氏)
- **熱狂的ユーザの出現，有望CFDアプリが急伸**



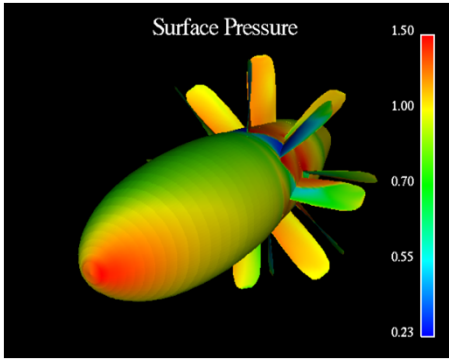




藤井氏(現ISAS/JAXA)，大林氏(現東北大流体研)による
YXX翼胴結合体のRANS*解析



澤田氏(現東北大)による
飛鳥のEuler解析



松尾による
CRPのRANS解析

RANS: Reynolds Averaged Navier-Stokes

数値シミュレータ計画

Numerical Simulator

● 数値風洞の導入の根拠となった計画（予算）

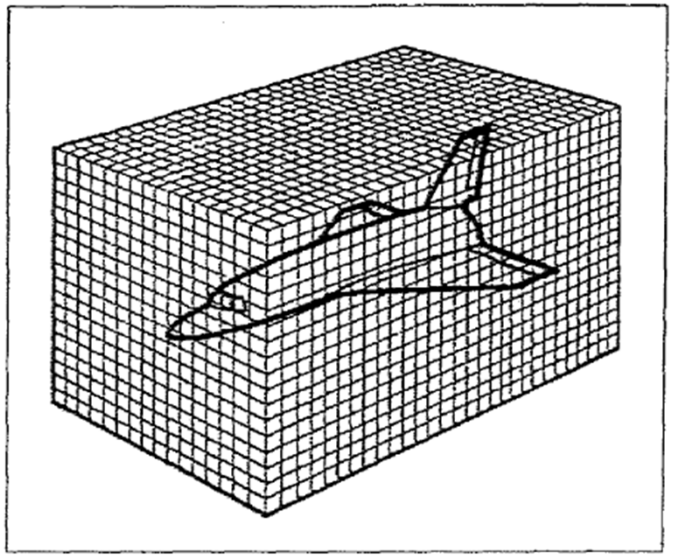
- ➢スーパーコンピュータの計算処理能力を利用して，計算流体力学（Computational Fluid Dynamics; CFD）に代表される数値シミュレーション技術の発展と普及，ならびに航空宇宙機開発における技術力の涵養と確立を目指す
- ➢第1期（ NS-Ⅰ ）…　1987-1993
  - VP400：　1GFLOPS

×280

- ➢第2期（ NS-Ⅱ ）…　1993-2002
  - NWT：　280GFLOPS

×33

- ➢第3期（ NS-Ⅲ ）…　2002-2008
  - CeNSS：　9.3TFLOPS



数値風洞の概念的説明を物理空間で行ったもの　機体回りを曲線格子系で覆い，格子点上で流れの方程式を差分近似することにより格子点上での流れ場を求める。〔図－1〕

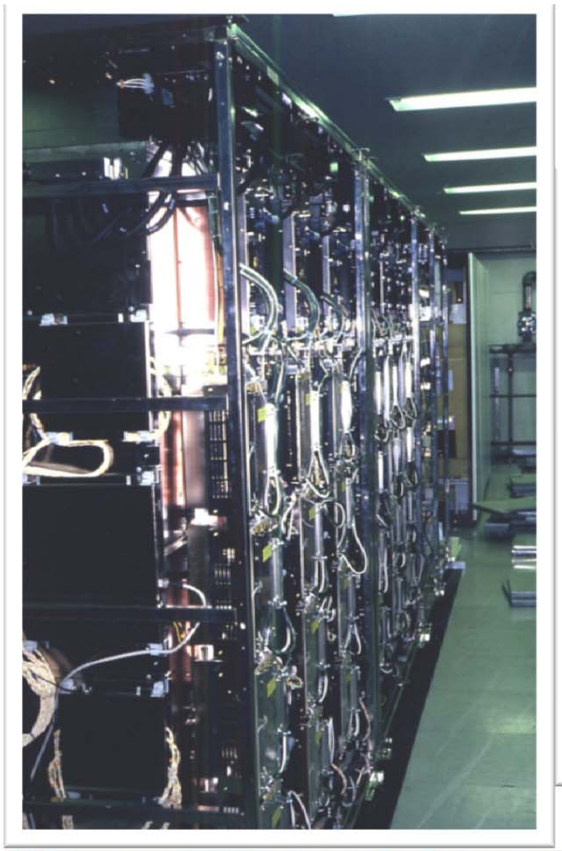
数値風洞の導入

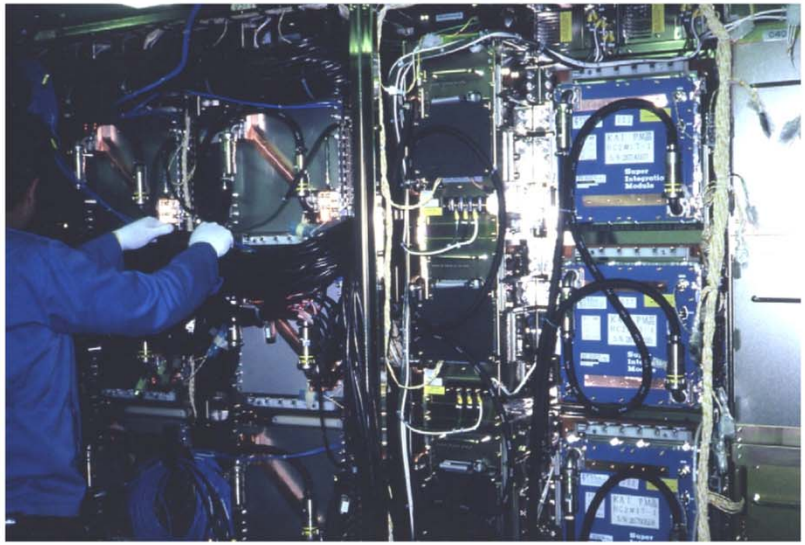
- 故高梨氏（空気力学第二部）のアイディア
  風洞のある部署

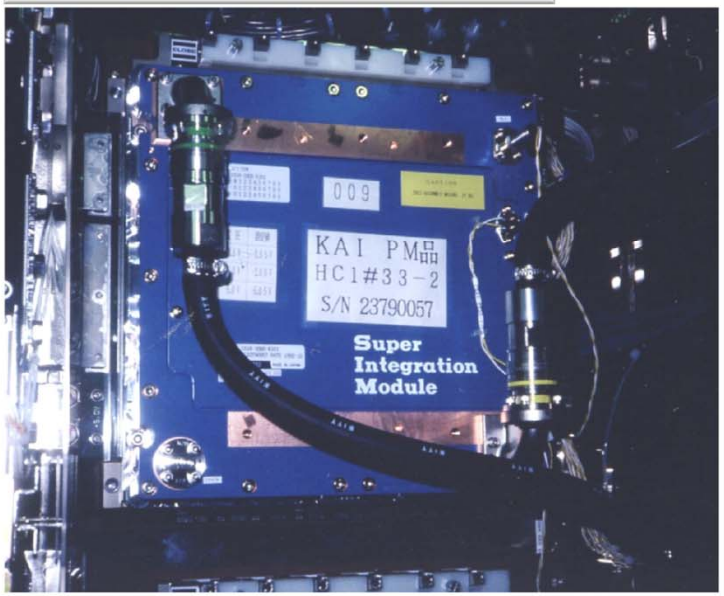
ポスター

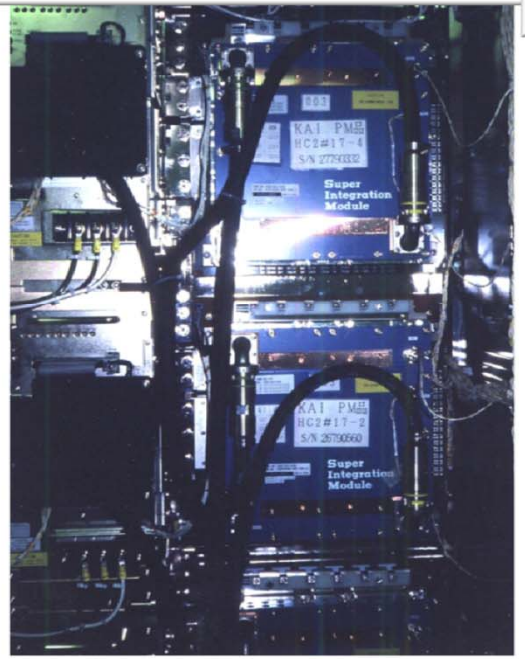
- 三好さんはUHSNWTと呼んでいた
  - Ultra High Speed Numerical Wind Tunnel
  - CFDを航空機の開発に使う⇒100万点のNS解析を10分で
    ⇒VP400の100倍以上の性能，32GB以上のメモリ
- 調達
  - 第2期数値シミュレータ（NS-II）の中核マシンの位置づけ
  - 富士通との共同研究

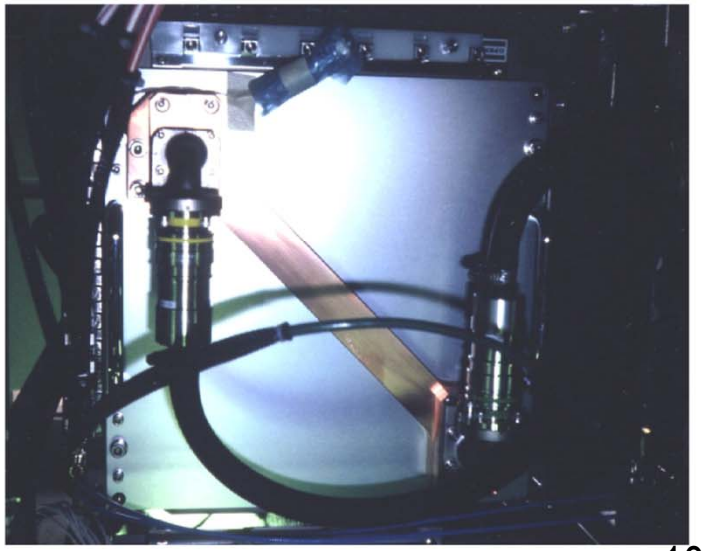
数値風洞の搬入 1993年1月









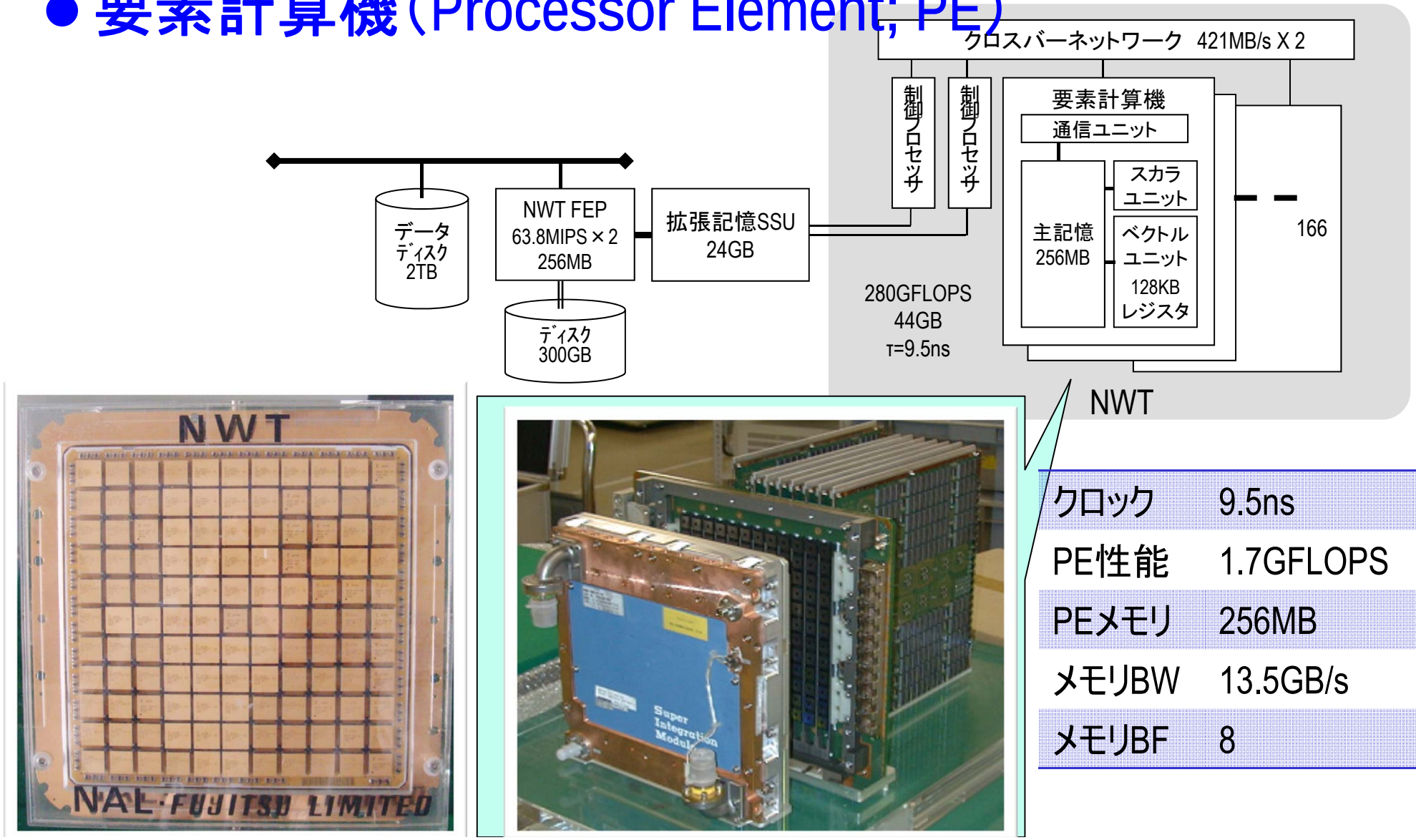


数値風洞の概要

- **数値風洞システム**
  - 1993年導入当初は140PE（238GF）
  - 1996年2月に166PE（280GF）に増強

1996年2月時点の諸元	
計算ノードPE	166
制御ノードPE	2
結合ネットワーク	クロスバ（421MB/s×2）
全体性能	280GFLOPS
全メモリ	44.5GB
クロック	9.5ns
PE性能	1.7GFLOPS
PEメモリ	256MB
消費電力	1MW

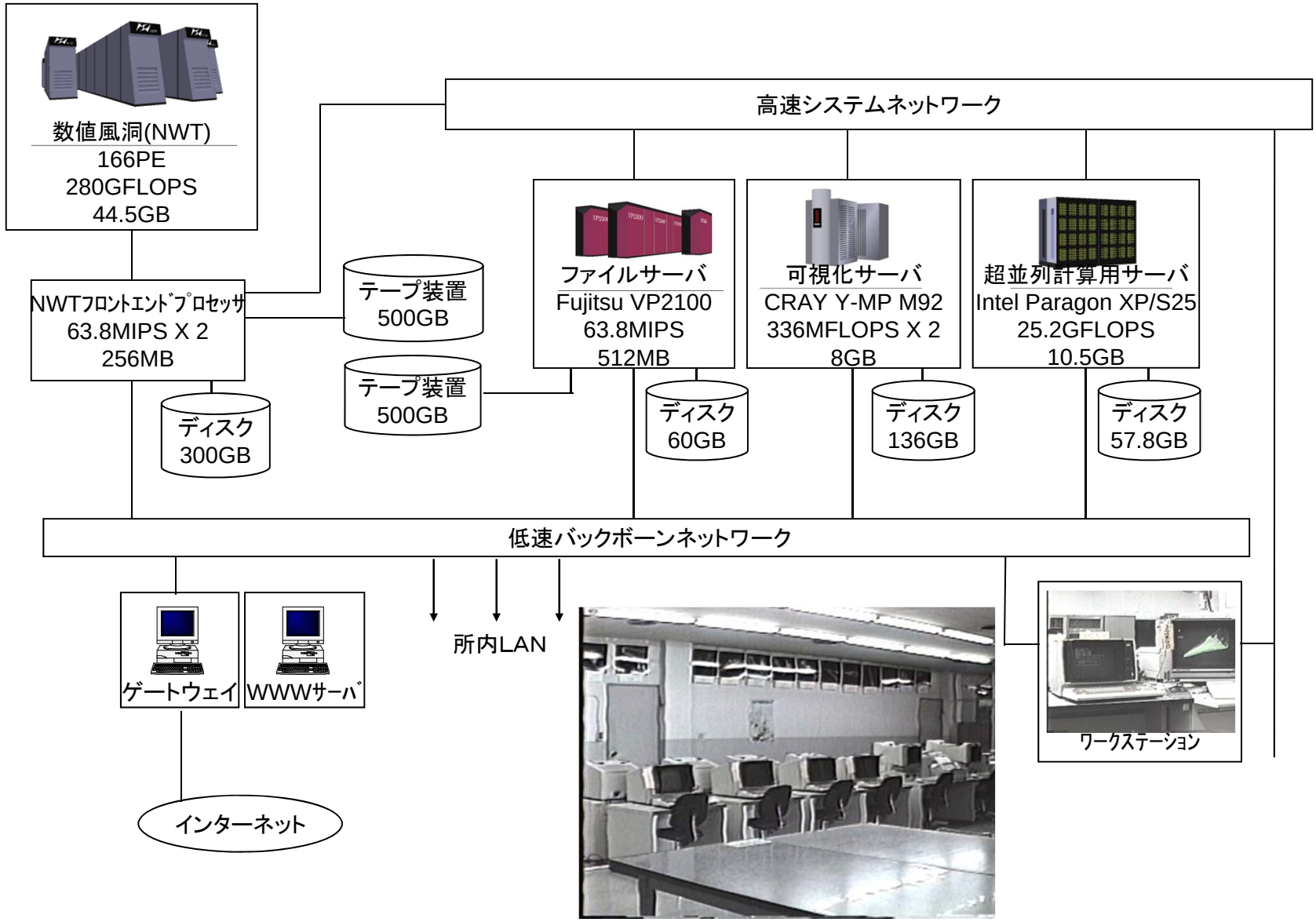
数値風洞の概要(2)



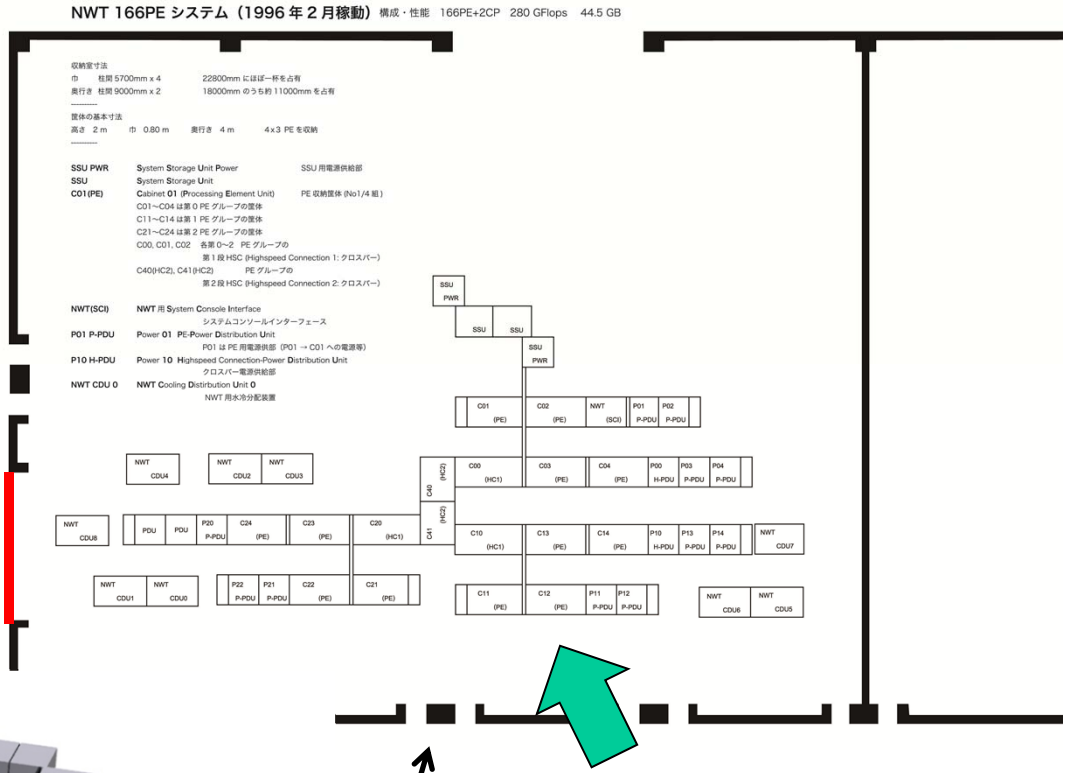
クロック	9.5ns
PE性能	1.7GFLOPS
PEメモリ	256MB
メモリBW	13.5GB/s
メモリBF	8

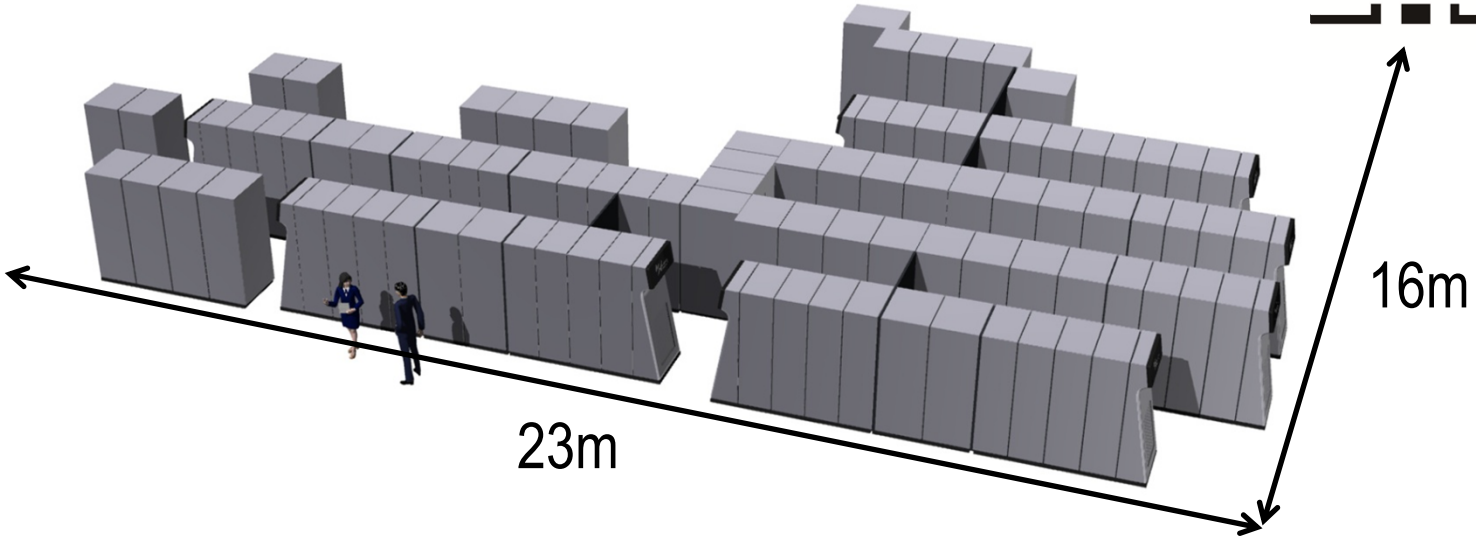
数値風洞の概要(3)

● システム全体



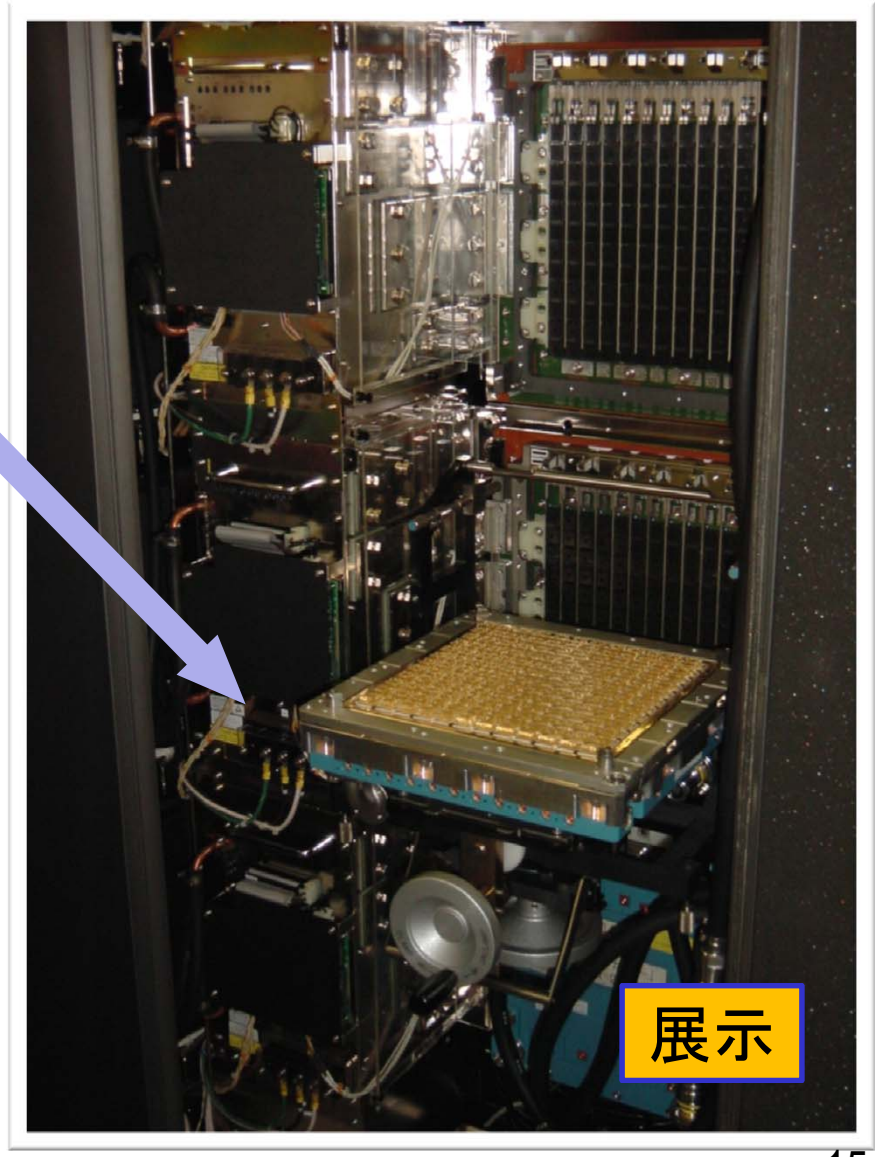
数値風洞の設置・運用


NWT 166PE システム（1996 年 2 月稼動）構成・性能 166PE+2CP 280 GFlops 44.5 GB
収納室寸法
巾 柱間 5700mm x 4 22800mm にほぼ一杯を占有
奥行き 柱間 9000mm x 2 18000mm のうち約 11000mm を占有
筐体の基本寸法
高さ 2 m 巾 0.80 m 奥行き 4 m 4x3 PE を収納
SSU PWR System Storage Unit Power SSU 用電源供給部
SSU System Storage Unit
C01(PE) Cabinet 01 (Processing Element Unit) PE 収納筐体 (No1/4 組)
C01〜C04 は第 0 PE グループの筐体
C11〜C14 は第 1 PE グループの筐体
C21〜C24 は第 2 PE グループの筐体
C00, C01, C02 各第 0〜2 PE グループの
第 1 段 HSC (Highspeed Connection 1: クロスバー)
C40(HC2), C41(HC2) PE グループの
第 2 段 HSC (Highspeed Connection 2: クロスバー)
NWT(SCI) NWT 用 System Console Interface
システムコンソールインターフェース
P01 P-PDU Power 01 PE-Power Distribution Unit
P01 は PE 用電源供給部（P01 → C01 への電源等）
P10 H-PDU Power 10 Highspeed Connection-Power Distribution Unit
クロスバー電源供給部
NWT CDU 0 NWT Cooling Distirbution Unit 0
NWT 用水冷分配装置


23m
16m

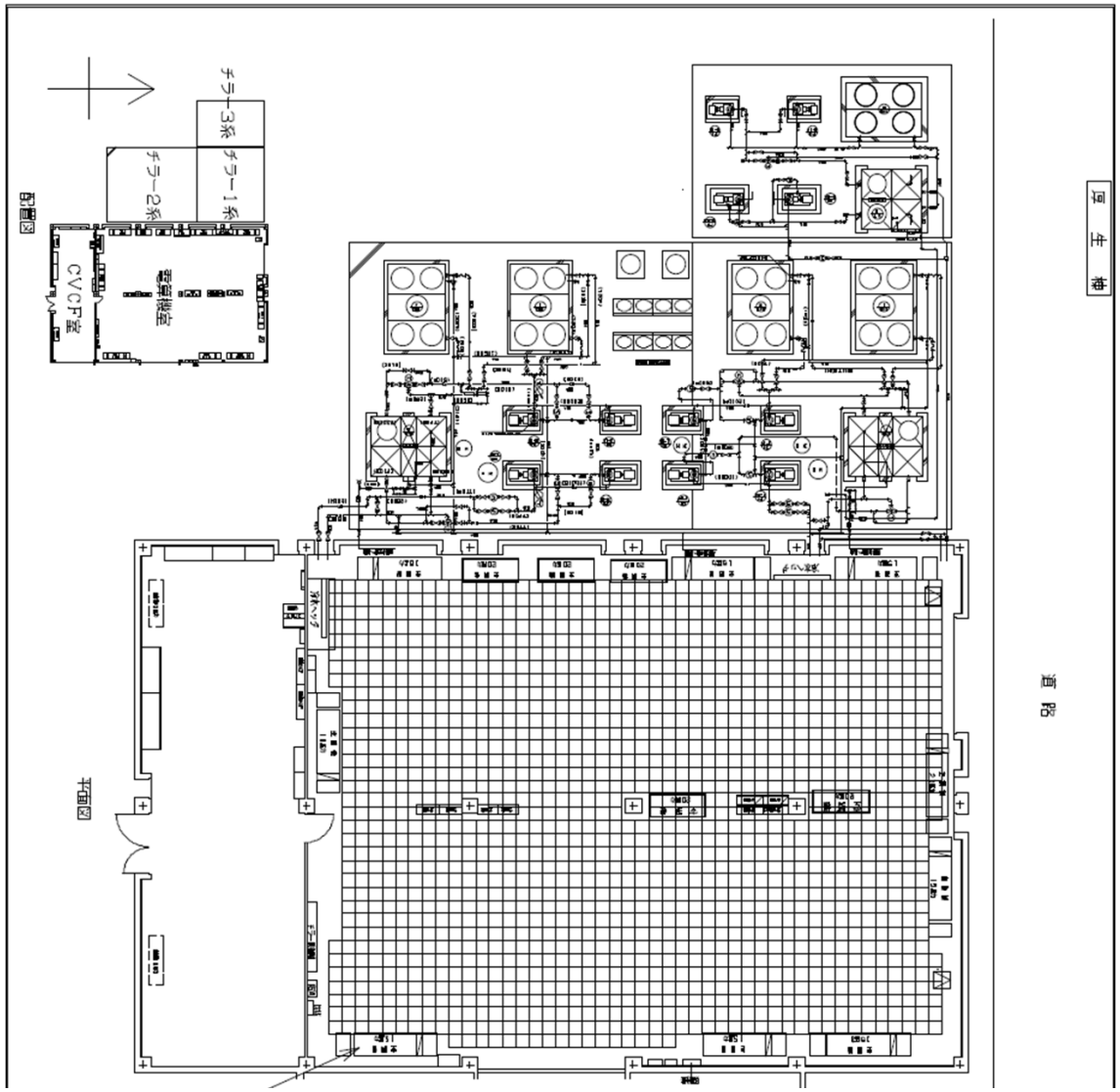
数値風洞の設置・運用(2)

- **運転・保守**
  - ➢PEは18kgの重量⇒専用治具
  - ➢後年度は非常に安定



数値風洞の設置・運用(3)

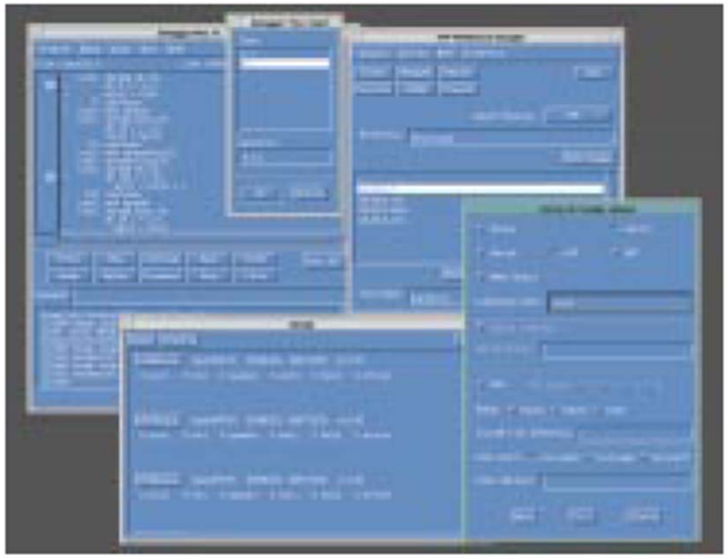
● 冷却方式は水冷，設備の維持管理に難



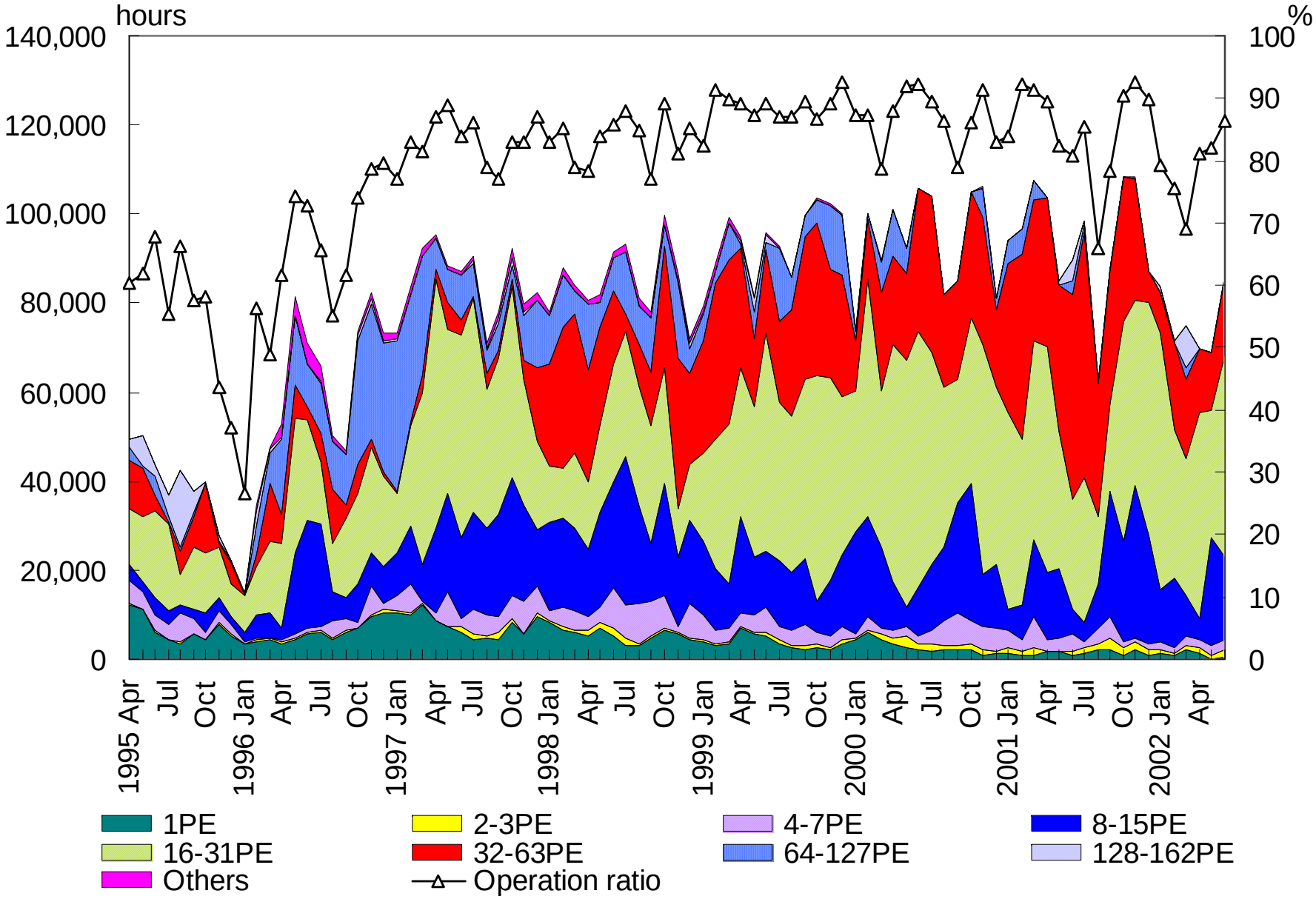
利用環境・プログラミング

- **導入当初**
  - ユーザ窓（MSP）
  - NWT-FORTRAN，ループ分割
    仮想グローバルメモリ空間
  - ツール等，並列化経験なし
    - 最初は大変だった，涙々
- **後半**
  - ユーザ窓（UXP/V）
  - NWT-FORTRAN＋
    PVMによるプロセス並列
  - VPPワークベンチ，Vampir

```
                :
   !XOCL PARALLEL REGION
                :
   !XOCL SPREAD DO /IPN
         do 1000 n = 1, nblock
         do 1 l = 1, lmax
         do 1 k = 1, kmax
v        do 1 j = 1, jmax
v          di        = 1./q(j,k,l,1,n)
v          u(j,k,l) = q(j,k,l,2,n)*di
v           :
v          rmu(j,k,l,n) = (cc**1.5)*c2bp/(cc+c2b)
v          turmu(j,k,l,n) = 0.
v      1 continue
    1000 continue
   !XOCL END SPREAD DO
                :
   !XOCL END PARALLEL REGION
                :
```



数値風洞の設置・運用(4)

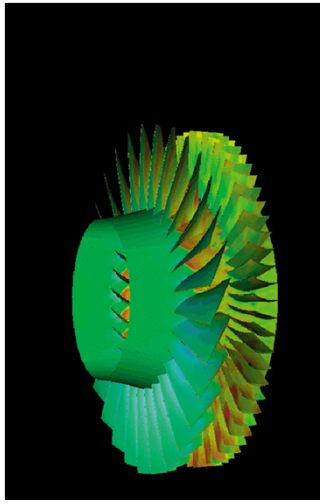

hours
%
140,000
120,000
100,000
80,000
60,000
40,000
20,000
0
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
1995 Apr
Jul
Oct
1996 Jan
Apr
Jul
Oct
1997 Jan
Apr
Jul
Oct
1998 Jan
Apr
Jul
Oct
1999 Jan
Apr
Jul
Oct
2000 Jan
Apr
Jul
Oct
2001 Jan
Apr
Jul
Oct
2002 Jan
Apr
1PE
2-3PE
4-7PE
8-15PE
16-31PE
32-63PE
64-127PE
128-162PE
Others
Operation ratio

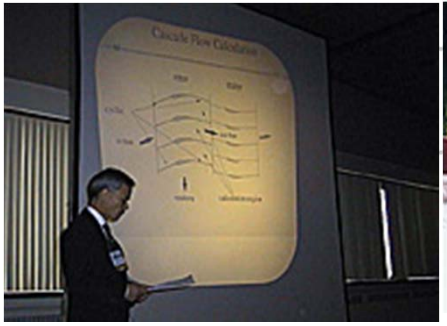
利用成果

- **初期（1993 - 1995）**
  - Top500#1　1993.11 -1995.11
  - ゴードンベル賞
    - 1994 Honorable Mention
    - 1995 QCD　215.8GF（79.3%）
    - 1996 ジェットエンジン 111.0GF（40.8%）

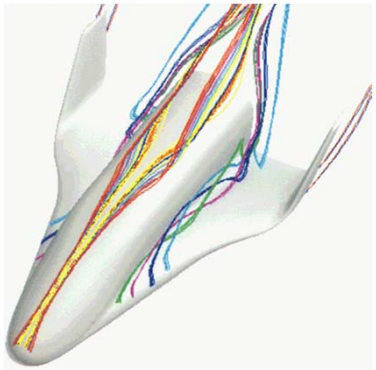
Rank	Site	Computer	Cores	Year	R_{max}	R_{peak}
1	National Aerospace Laboratory of Japan Japan	Numerical Wind Tunnel Fujitsu	140	1993	124	235.79
2	Los Alamos National Laboratory United States	CM-5/1024 Thinking Machines Corporation	1024	1993	59.7	131
		4 Machines ion	544	1993	30.4	69.63
		2 Machines ion	512	1993	30.4	65.54
		2 Machines ion	512	1993	30.4	65.54
		R		1990	23.2	25.6
7	Atmospheric Environment Service (AES) Canada	SX-3/44 NEC	4	1991	20	22
8	Oak Ridge National Laboratory United States	XP/S3 Intel				
9	Sandia National Laboratories	XP/S3 el				

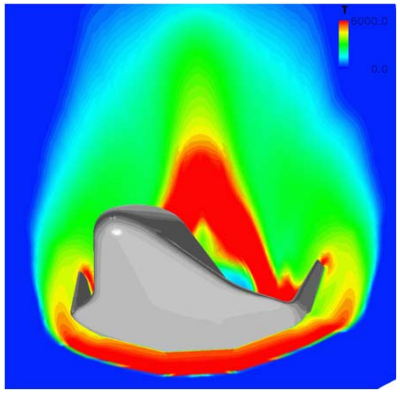
展示



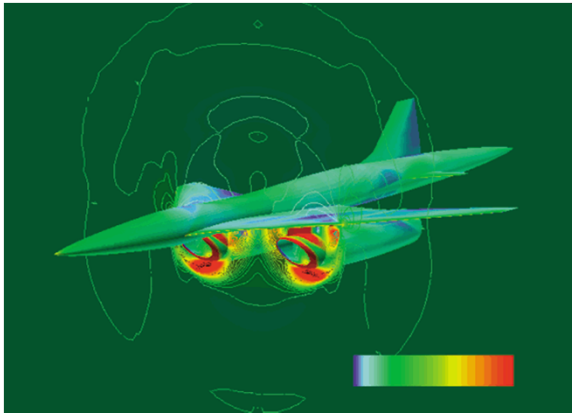


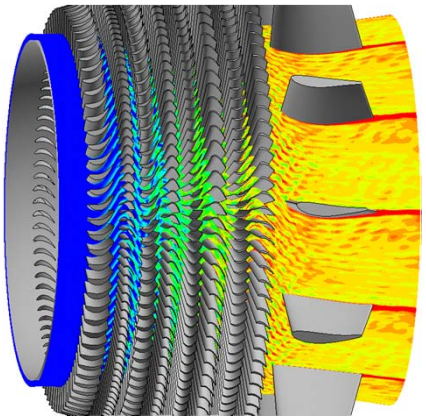
利用成果(2)

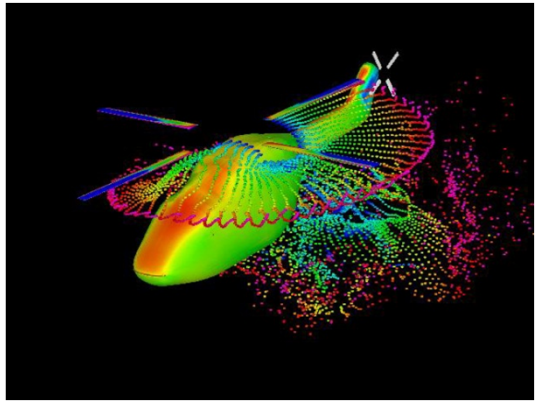




- **中期以降(1996 -)**
  - アプリケーションの発展・成熟
    - 単純形状 ⇒ 複雑形状
    - 単一分野 ⇒ 多分野融合
    - 順問題 ⇒ 逆問題，最適化
    - 可能性提示 ⇒ 実用利用
  - 様々なプロジェクトへの貢献
    - HOPE
    - SST
    - エンジン
    - ヘリコプタ







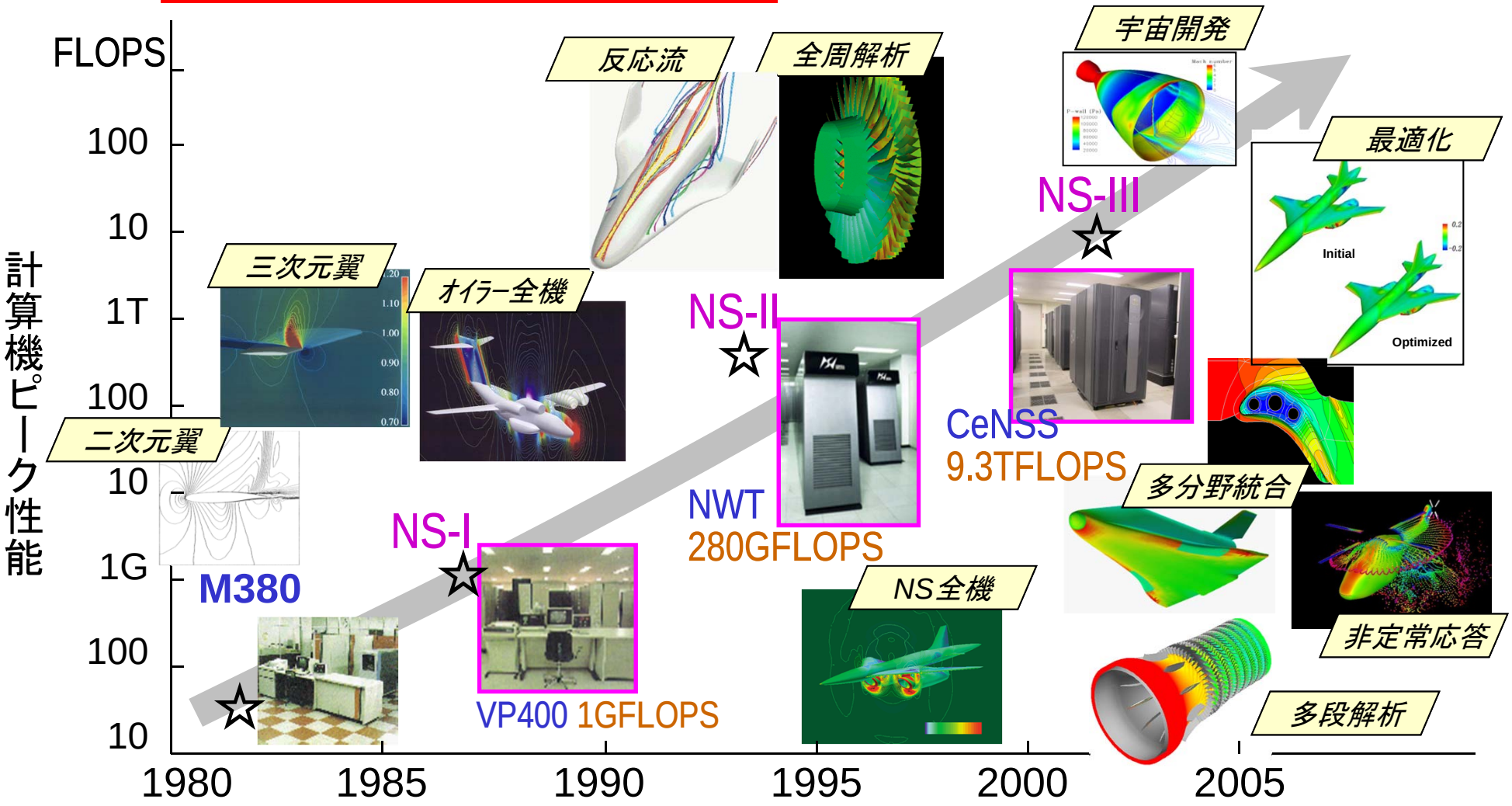
ポスター

数値風洞が実現したもの

- **日本のスパコン技術を世界一流化**
  - 半導体に競争力，テクノロジドライバになれた
  - 富士通商用機VPPにて欧州気象予報・産業界席巻
  - 地球シミュレータに継続
- **日本の航空宇宙CFDの実力を国際的水準に**
  - 航空宇宙におけるRANS解析を定着
  - 計算機とアプリが相補的に発展するという好循環
- **並列科学技術計算の端緒**
  - NWT-FORTRANの先見性の賜物
  - HPC運用スタイル

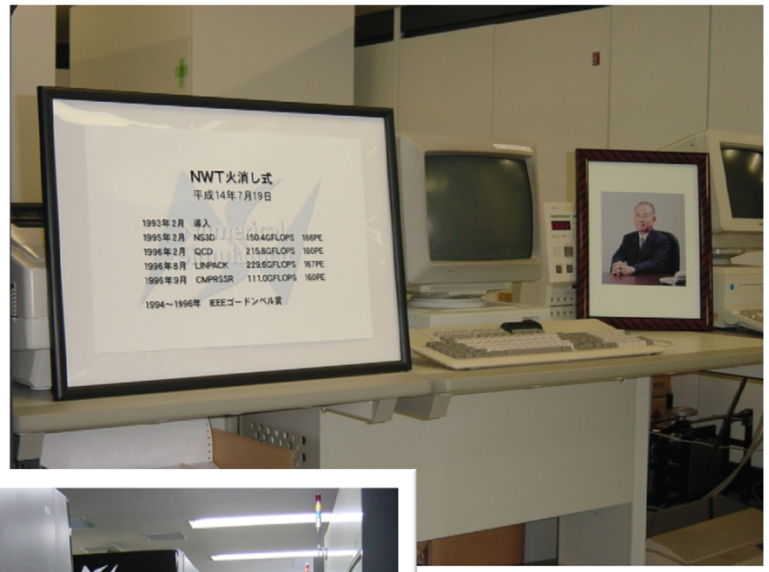
計算機の発達 vs アプリの発展

計算機とアプリが相補的に発展



数値風洞の停止

● 2002年7月18日運用終了



数値風洞は何故成功したか

- **カリスマ（三好さん）の存在**
  - 三位一体説（ユーザ，開発部隊，役所）
  - 表の牽引力，裏の統率力
- **アプリケーション主導，ユーザ重視の姿勢**
  - 数値流体力学（CFD）の隆盛に合致
  - 良くも悪くもユーザを大切にしていた
- **明確な目的・目標設定，鋭い将来予測**
  - CFDを航空機の開発に使う⇒100万点のNS解析を10分で行う
  - VP400の100倍以上の性能
  - 導入後の展開も予想（5年後にさらに10倍を実現）

三好さんの言葉

● 情報管理 Vol.40より

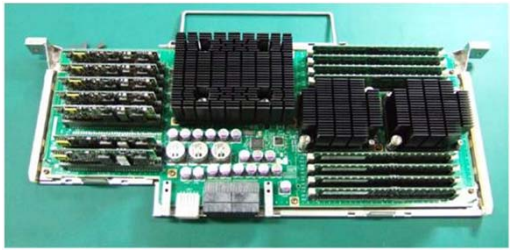
- いい計算機をつくって，はいどうぞと言ったって，これはいい計算機にはなりません．いいユーザが使って初めていい計算機になる．ユーザもやっぱり一つの集団であるわけで，計算機の開発計画と並行してそれをエキサイトさせるわけね．だから，エキサイトした集団にいい計算機を放り込むと，それはすばらしい成果を生む．
- 自分で検討してみて，大体フィージビリティ（実現可能性）があるなと見当をつけたら，三つ，組織しないといかん．
- まず，役所を組織せんといかん，予算を取るということです．
- 一方で狙いをつけたメーカーの技術者を組織せんといかん．これはぽんと頼めばできるというものではない．
- それから3番目．いいユーザのコミュニティを組織せんといかん．この三つの組織に成功しなかったら，幾ら発想がよくてフィージビリティがあっても，まずいい計算機の開発はできない．

数値風洞の限界

- **一点豪華主義**
  - 車に例えれば「エンジンは大きいが足回りが弱い」
  - 周辺部の未発達，特に入出力・ファイル
- **落ちるのは早かった，成功体験の罠**
  - 不満の噴出，ポストNWTへの淡い期待
  - 成功に浸っている暇はない ⇒ 次の準備の必要性を痛感
- **並列処理，ソフトウェア**
  - 並列処理は簡単でない，通信等に対して拙策
  - ソフトウェアの開発には時間がかかる

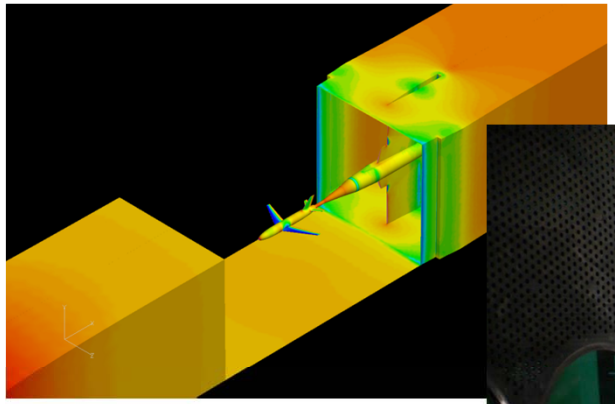
数値風洞その後

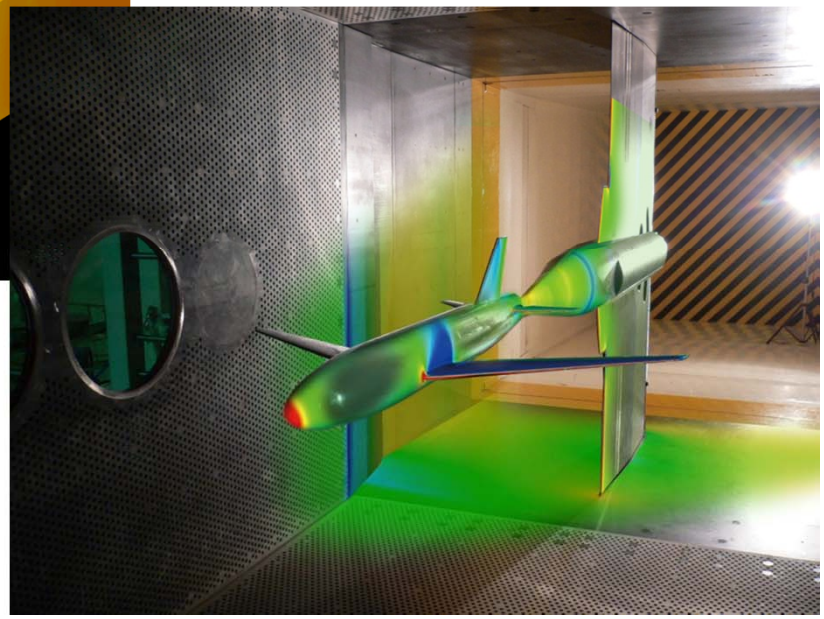
- **スカラーシステムへ移行**
  - 数値風洞の良い点は継承，限界・課題は克服
  - プログラミングモデルの継続性重視　⇒　SMPクラスタ
  - 低性能に苦戦
- **数値風洞の要求を再度投入&必要なら修正し，生まれたのが，現在のFX1をベースとするJSS**
  - 1ソケット@ノード，メモリBF=1
  - フルバンドファットツリー＋高機能スイッチ
  - システムバランス，機能を重視



数値風洞の現在

- **初期のコンセプトは実現しつつある** ポスター
  - ➢解析技術の進歩
    - ソフトウェア開発
    - 計算速度
  - ➢試験技術の進歩
    - 計測技術
    - 解析と比較可能なデータ
  - ➢融合・システム化の進展
    - 人の融合
    - データの融合=ストレージ技術の進歩（容量，転送速度）
    - デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞





- **宇宙開発，航空開発へ適用拡大**

今後への期待

- 計算機（ハードウェア）とともに重要なのは，
  - アプリケーション（ソフトウェア）
  - 人材
- その発展・育成には時間がかかる ⇒ 継続的な事業
地道な積上げ
- 必要なものは…
  - アプリケーション先導のスタイル
    - 明確なターゲットの設定，何がやりたいのか（やる必要があるのか）
  - 無理な性能ターゲットより，使えるものをきちんと整備
  - 開発，運用，ユーザの良好な関係

今後への期待(2)

- **航空宇宙の発展にとってシミュレーションは不可欠，世界トップ(ロケット・航空機)の性能，信頼性を実現するには，**
  - ➢現行システムの数10倍の性能(数PFLOPSの性能)
    - しかも，高い実効性能(≧1PFLOPS)
    - 10万コア超，1万ノード超できちんと動くシステム(成立性)
  - ➢システムバランス
    - メモリ…　容量，性能(BF≧4)
    - インターコネクト…近いところは速く(数100ノード内)
  - ➢信頼性，継続性，実用性，使い勝手
    - LINPACKは単なる耐久テスト

今後への期待(3)

- 既存のアプローチ(マルチ/メニー・コア，GPU)で良いのか？
  - 形式的な性能追及は，ユーザ，ソフトに負担大
  - 問いかけ/新たな取り組み(要素技術開発)が必要？
    - 例1:　スカラーチップへのベクトル機構の再移入(ベクトル機構付MC)
    - 例2:　メモリの3次元実装
  - ハード，ソフト，アプリのワーキングトゥゲザーが必要？
    - 特にソフトウェアの継続利用性
  - スパコン分野が業界に再び息を吹き込む時？
    - 必要な技術は独自の創意・工夫で

ご清聴ありがとうございました