



筑波大学  
University of Tsukuba

平成17年9月26日

計算科学技術シンポジウム  
「次世代スーパーコンピュータとシミュレーションの革新」

# 次世代スーパーコンピュータ開発 プロジェクトへの期待

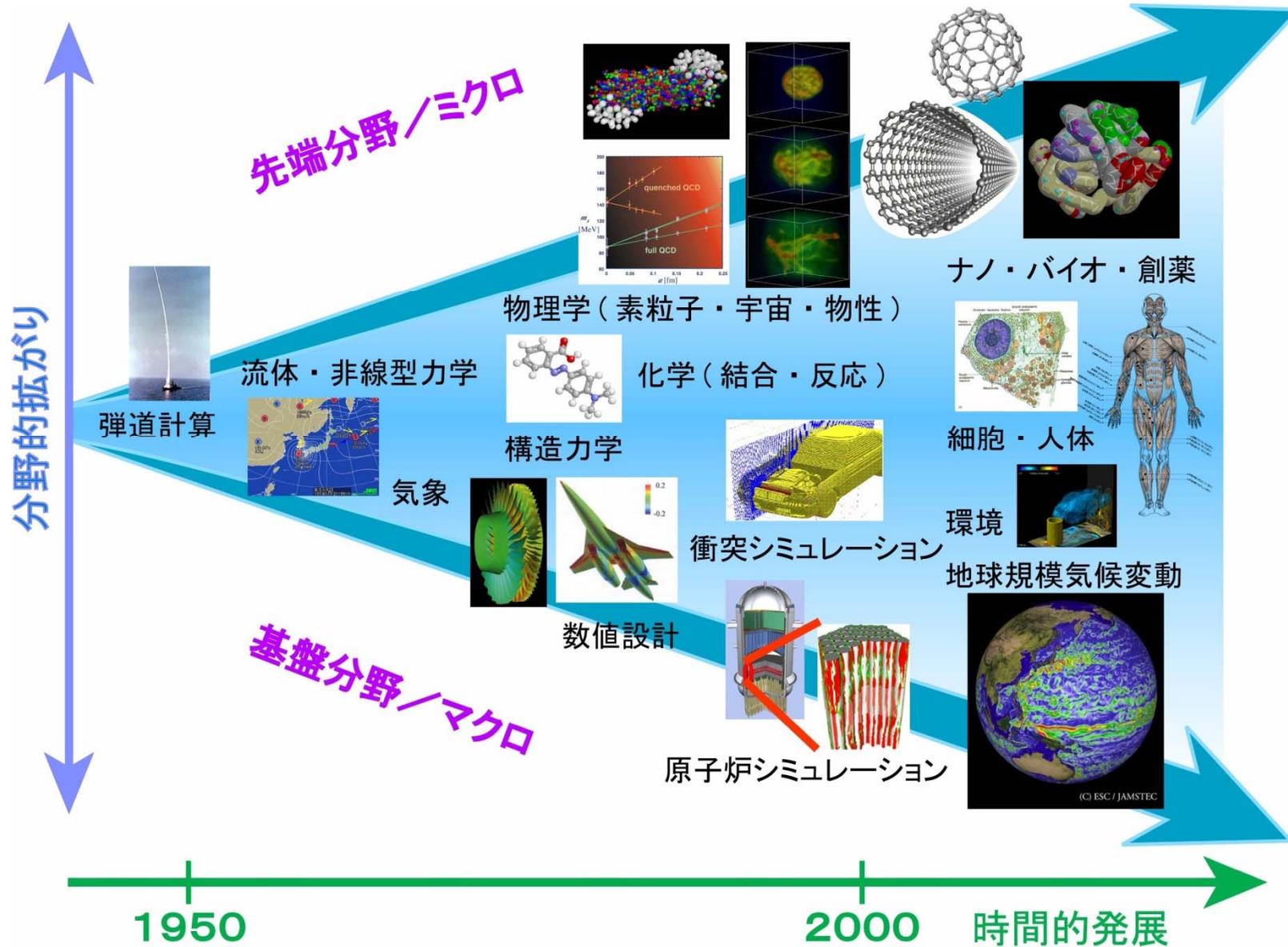
筑波大学長  
岩崎 洋一

# 目次

- 計算科学技術の切り拓く世界
- 次期スパコン開発に如何に取り組むか
- アーキテクチャを如何に考えるか
- 結び

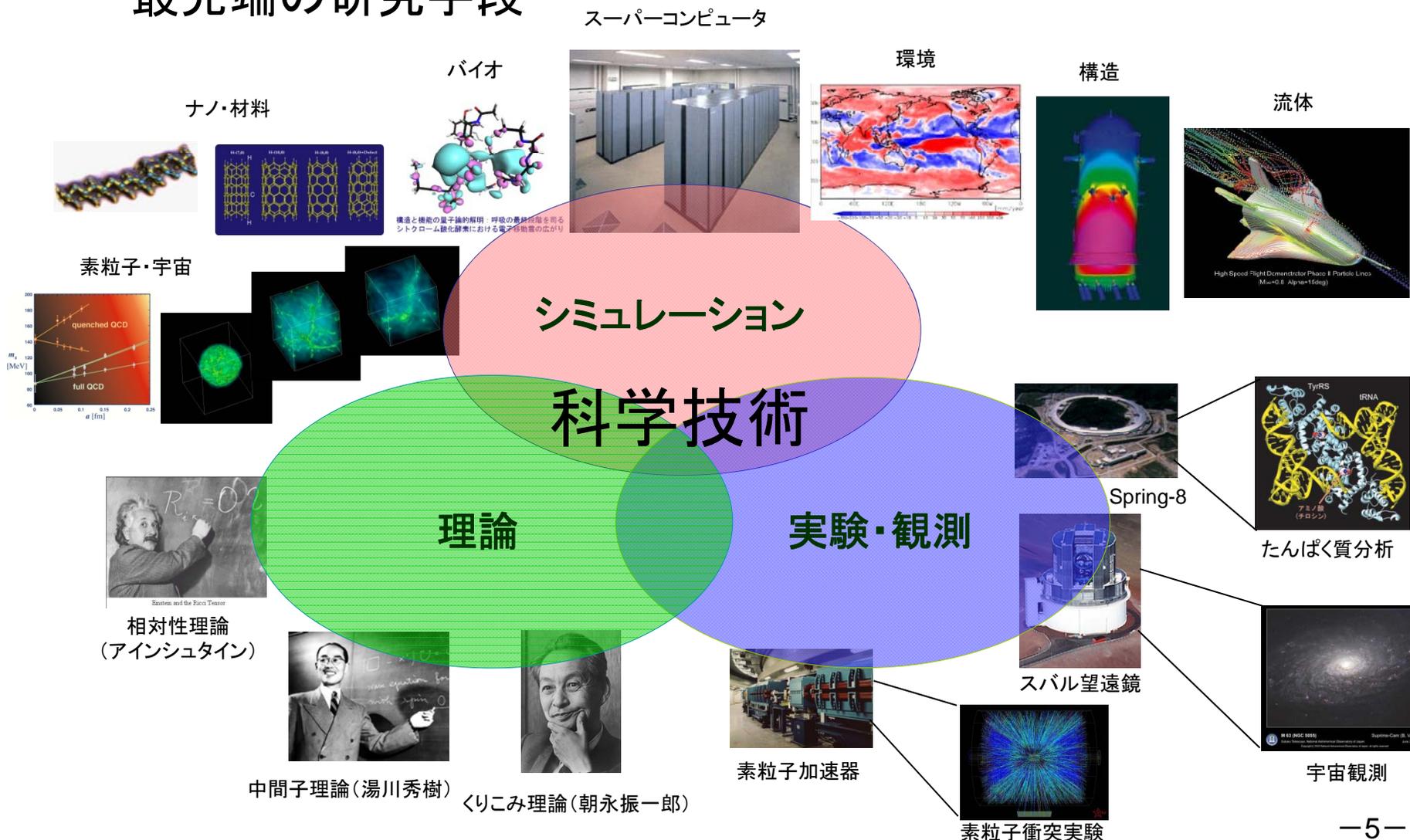
# 計算科学技術の切り拓く世界

# 計算科学技術の発展



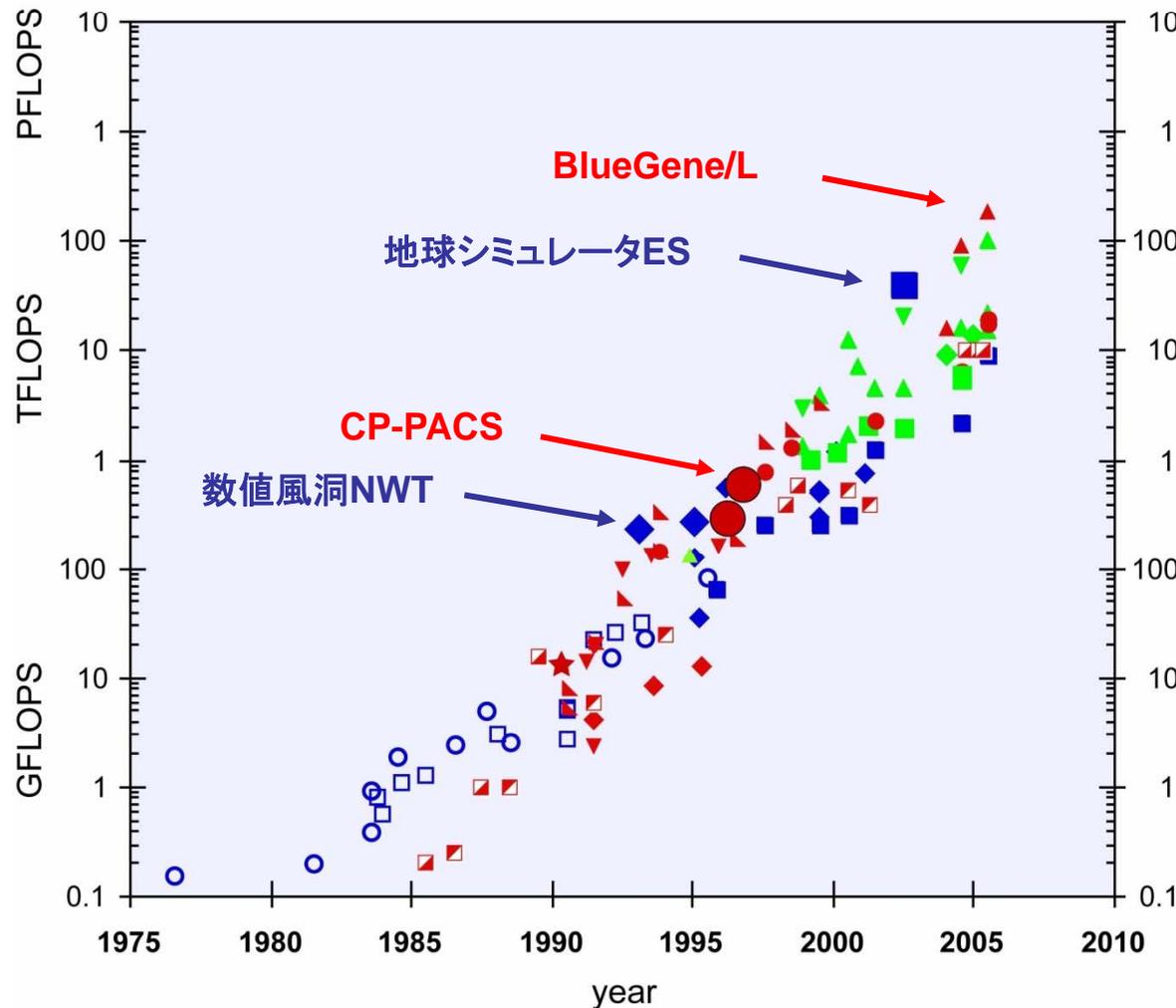
# 科学技術の三本柱としての計算科学技術

- 科学技術の全分野で、実験・観測、理論と並ぶ、重要且つ最先端の研究手段



# スーパーコンピュータの発展 (I)

30年間 (1976年~2005年) で100万倍  
の高速化



我が国の主要なプロジェクトマシン

- ◆ 数値風洞 NWT/ベクトル並列
- CP-PACS/超並列
- 地球シミュレータ ES/ベクトル並列

ベクトル計算機

- CRAY/CDC
- Hitachi/Fujitsu/NEC

ベクトル並列計算機 (SMP)

- ◆ Fujitsu
- NEC
- CRAY

スカラー並列計算機 (SMP)

- ◆ Fujitsu
- Hitachi
- ▲ IBM
- ▼ SGI/HP/Dell

超並列計算機 (MPP)

- CRAY
- ◆ Fujitsu
- ▲ IBM
- ▼ TMC/nCUBE
- ▶ Intel/MPP
- ★ QCDPAX
- Columbia
- ◻ APE

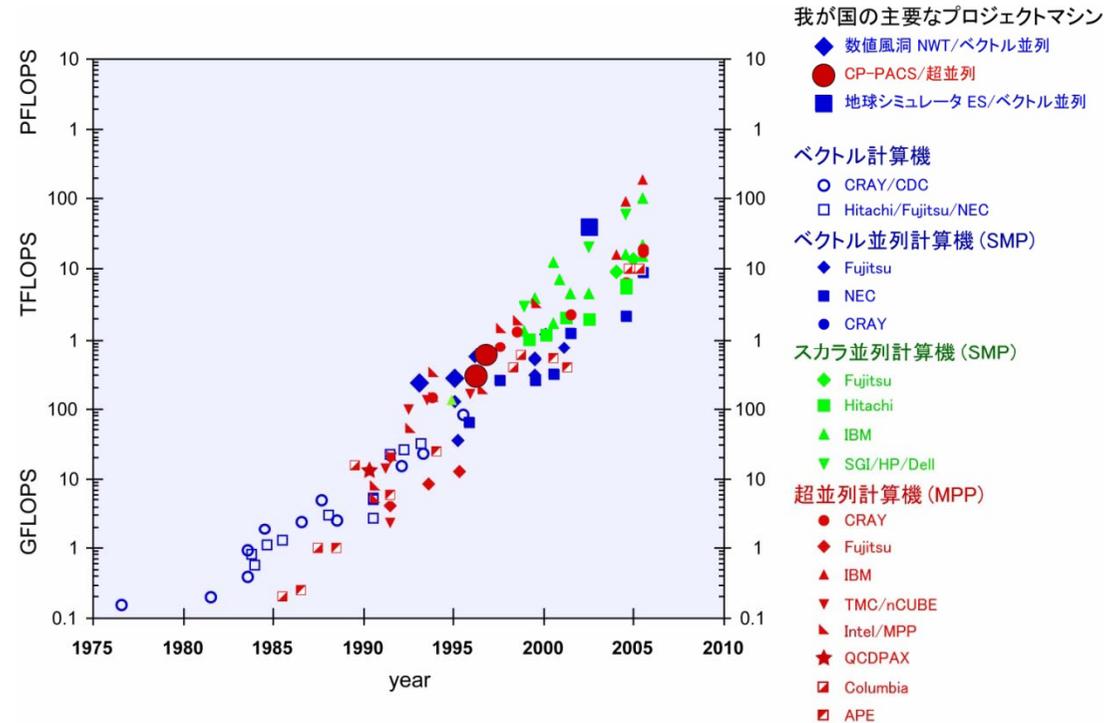
# スーパーコンピュータの発展(II)

発展を支えた様々な技術:

- 半導体技術の進歩  
(ムーアの法則)

- 数々のアーキテクチャ上のイノベーション

- 1976年                   ベクトルプロセッサアーキテクチャの出現
- 1980年代               ベクトル計算機の隆盛
- 1990年頃               マイクロプロセッサの発展と並列計算機アーキテクチャ
- 1990年代以降           並列計算機の隆盛  
                                ベクトル並列(SMP)、超並列(MPP)、スカラ並列(SMP)



# エポックメイキングなスーパーコンピュータ とその開拓した科学技術

- CRAY-1            1976年            世界初のスパコン
- 数値風洞            1993年11月      トップ500一位
- CP-PACS            1996年11月      トップ500一位
- 地球シミュレータ   2002年6月      トップ500一位

# CRAY-1(1976)



- ベクトルアーキテクチャによる高速化
  - 初めて100Mflopsを超える計算性能(133Mflops)を実現
  - 現在につながるベクトルプロセッサの始まり
- 構造解析等において“計算”可能性を実証



CRAY-1(1976)



CRAY-XMP(1985)



CRAY-YMP(1991)



CRAY-T90(1995)

- 我が国においても80年代に各社がベクトルスパコンを開発  
(我が国の計算科学技術の幕開け)



Fujitsu VP-400



Hitachi S810/20



NEC SX-2



## 数値風洞NWT (1993)

- 旧航空技術研究所にて、富士通と協力のもとに、開発・製作
- ベクトル並列アーキテクチャの導入
- 大規模フルクロスバ結合ネットワークの実現
- 1993年11月～1995年11月 トップ500一位
- 流体計算をはじめとする多様な分野で活躍
- ベクトル並列機へと発展



NWT



Fujitsu VPP500(1993)



Fujitsu VPP5000(2000)



NEC SX-4(1995)



NEC SX-5(2000)

# CP-PACS(1996 筑波大学)

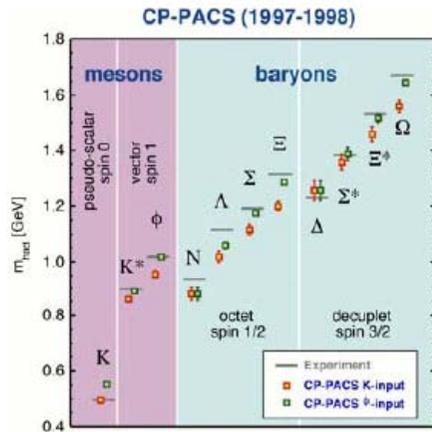
- 我が国初めての大规模汎用超並列型スーパーコンピュータ
  - スカラプロセッサだが擬似ベクトル機能
  - 柔軟・高性能なネットワーク
- 物理学と計算機工学の共同作業
- 大学とメーカー(日立)の産学連携(日立の商用機SR2201、SR8000へと発展)
- 基礎物理(素粒子、宇宙)でブレークスルー
  - モデルではない、第一原理(基本方程式)からの近似なしの計算
  - 場(流体、電磁場、波動関数など)による自然記述一般に通ずる汎用性



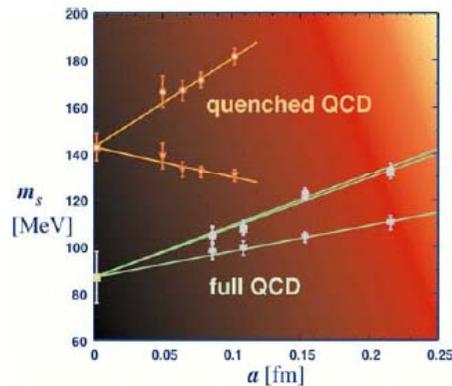
CP-PACS開発チーム

# CP-PACS/SR2201による計算科学技術シミュレーション(I)

## 素粒子物理学

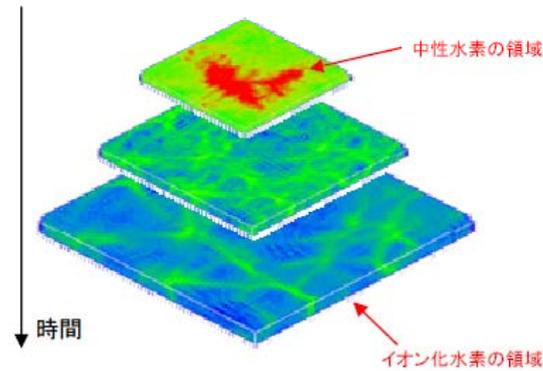


クエンチ近似のハドロン質量スペクトルの  
予言(1980年からの懸案)(1999)



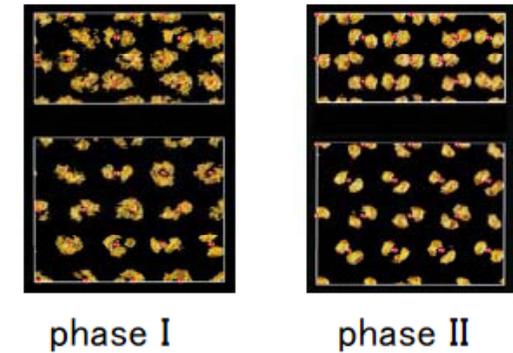
基本粒子クォーク質量の計算(自然界の  
基本定数の一つ)(2000)

## 宇宙物理学

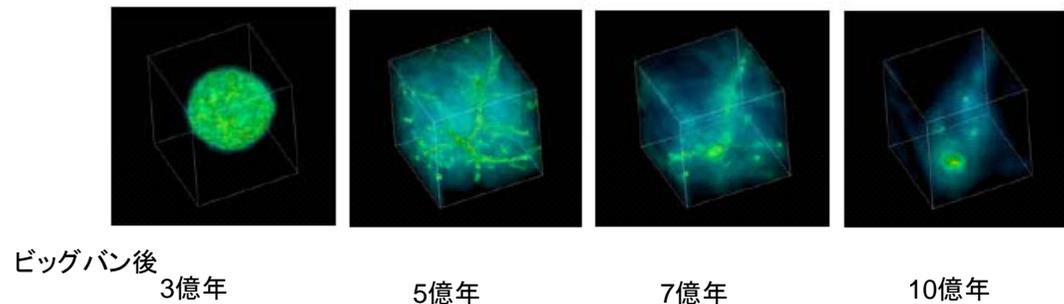


宇宙をみたく水素の再電離過程の3  
次元輻射輸送計算(世界初の試み)  
(2000)

## 物性物理学



高圧下の固体水素の結晶構造  
(1930年代からの懸案)(2000)



HMCS(CP-PACS+GRAPE)による銀河形成  
の3次元輻射流体シミュレーション(2003)

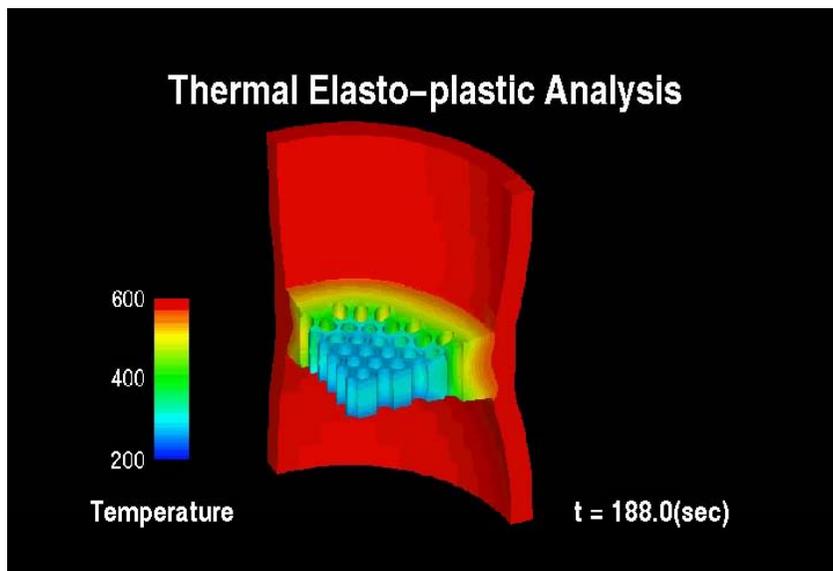
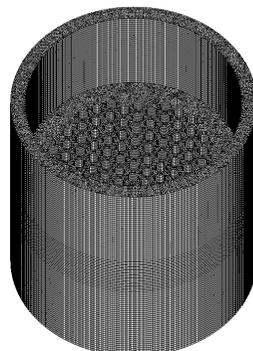
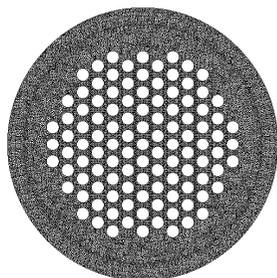
# CP-PACS/SR2201による計算科学技術シミュレーション(II)

## 非定常熱弾塑性解析 (GeoFEM code)

(東大 奥田洋司氏提供)

1,053,906 nodes

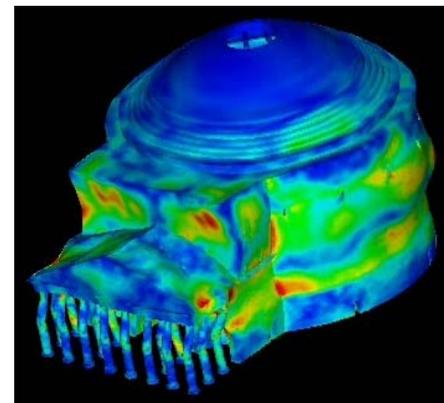
949,512 elements



原子炉実験プラントの管板の熱伝導・熱応力解析

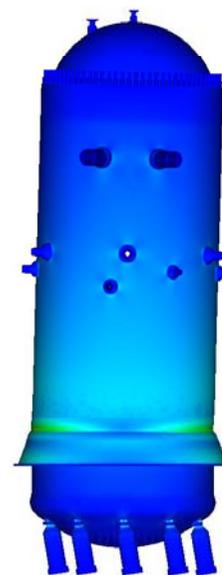
## 衝撃解析 (Adventure code)

(東大 吉村忍氏提供)



Pantheonの衝撃伝播(200万メッシュ)

## ABWR炉容器の変形と応力分布



3500万メッシュ  
SR8000での計算

# 筑波大学における超並列計算機の開発の歴史

- 1977年に研究開始(星野・川合)
- 1978年に第一号機が完成
- 1996年のCP-PACSはTOP500第一位
- 2006年完成予定のPACS-CSは第7号機

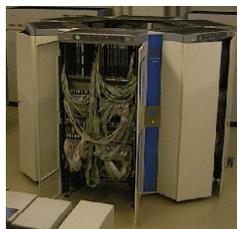
1978  
第1号機PACS-9



1980  
第2号機PAXS-32



1989  
第5号機QCDPAX



1996  
世界最高速を達成した第6号機CP-PACS



(2006)  
次期システムPACS-CS  
完成予想図



完成年	名称	計算速度
1978年	PACS-9	7千回/秒
1980年	PAXS-32	50万回/秒
1983年	PAX-128	4百万回/秒
1984年	PAX-32J	3百万回/秒
1989年	QCDPAX	14億回/秒
1996年	CP-PACS	614億回/秒
2006年	PACS-CS	14336億回/秒

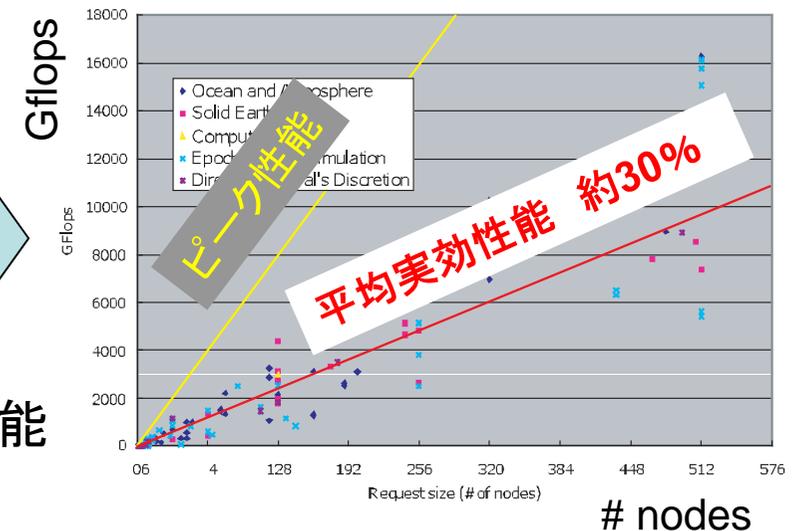
- 計算科学者＋計算機工学者の共同開発による「実用的スパコン」
- application-drivenな開発
- 持続的な開発による経験の蓄積

# 地球シミュレータ(2002)



- ベクトル並列型による超大規模システム
  - JAMSTECなど三組織とNECが協力して開発
  - one-chip vector processorによるベクトルノード
  - 大量のバンク構成による高いメモリバンド幅
  - 高いネットワークバンド幅の1次元フルクロスバ結合

高い  
実効性能



- 本格的計算科学としての地球規模の気候変動研究を始めて実現

# 地球シミュレータと地球規模気候変動(I)

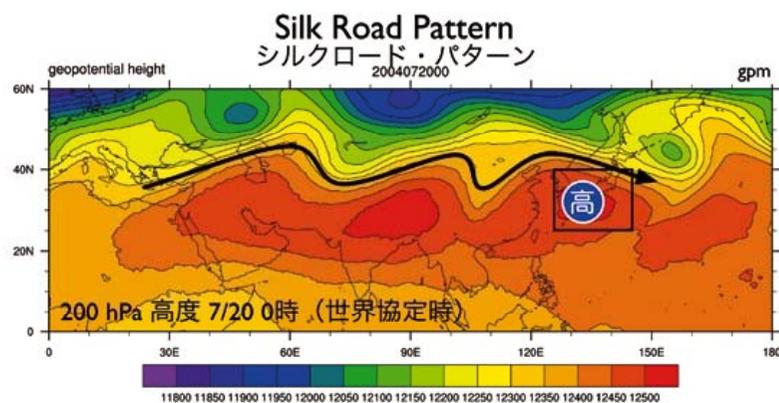
## ■ 高解像度大気海洋大循環モデルの開発

- 大気モデル AFES 10kmメッシュ
- 海洋モデル OFES 0.1°メッシュ
- 結合モデル CFES
- 次世代大気大循環モデル NICAM 3.5kmメッシュ
- 温暖化予測大気大循環モデル 20kmメッシュMRI-GCM

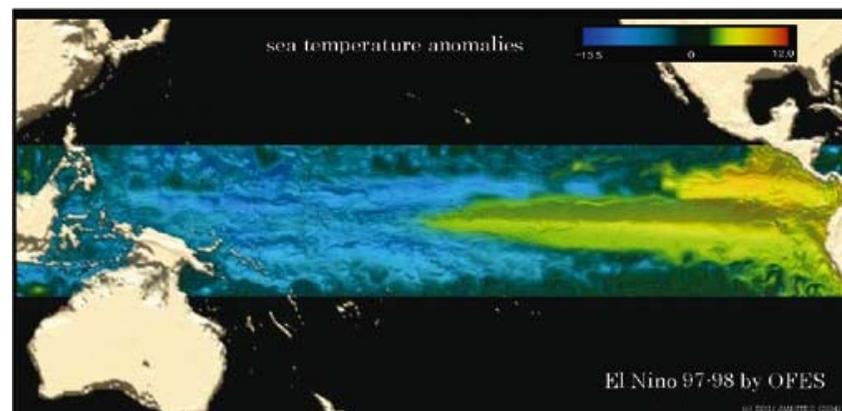
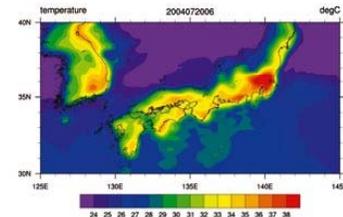
2002年度Gordon Bell賞

- 最高性能賞: AFES  
26.58Tflops(65%) /640ノード
- 言語賞: HPFによる核融合3次元流体シミュレーションコード  
14.9Tflops(45%)/512ノード
- 特別賞: 流体Direct Numerical Simulation  
16.4Tflops(51%)/512ノード

## ■ 最近の成果



AFESによるシルクロードパターンと関東地方異常高温(2004年7月20日)の再現



OFESによる1997~98年エルニーニョの再現

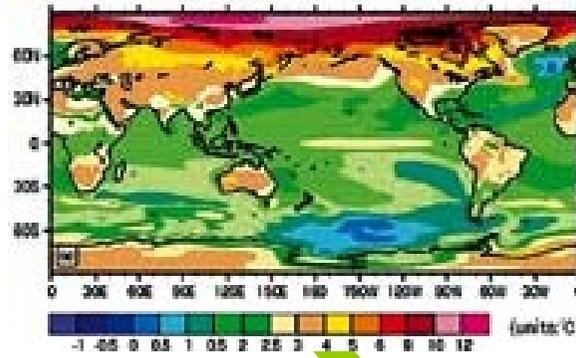
# 地球シミュレータと地球規模気候変動(II)

## ■ 地球温暖化予測

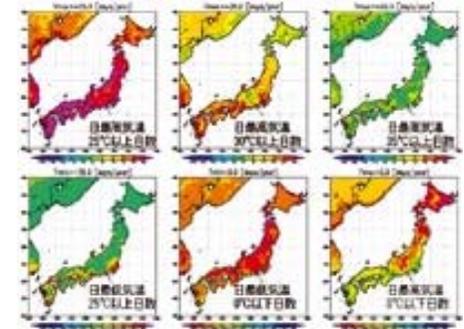
### ■ IPCC AR4に向けての成果例:A1Bシナリオに対する計算



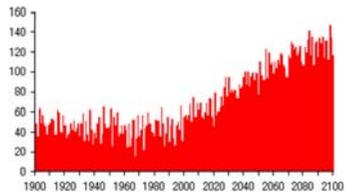
2099年の地球の気温上昇



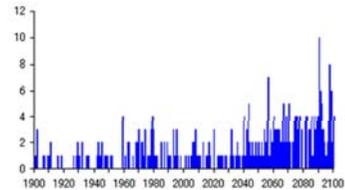
2090~2099年の地球の気温上昇



21世紀末と現在の日本各地の温度差



日本の真夏日数の変化



日本の豪雨回数の変化

	東大気候システム研究センター他	電力中央研究所他	気象庁気象研究所
大気・海洋メッシュ	100km・20km	150km・100km	270km・50-200km
温度上昇	+4.0度	+2.5度	+2.4度
降水量増加	+6.4%	+6.0%	+5.7%

# 計算科学技術の重要性: 今後ますます増大

- 基礎科学のフロンティアを開拓するシミュレーション
- 原子・分子のミクロの法則(量子力学)に基づく物質と生命のシミュレーション
- マクロな自然と人間社会の関わり方のシミュレーション
- ものづくりの道具となるシミュレーション

**素粒子・宇宙物理**

素粒子・初期宇宙の解明

提供: 国立天文台

銀河・惑星形成シミュレーション

**ナノテクノロジー**

物質設計

触媒

提供: (独)物質・材料研究機構

**ライフサイエンス**

計算創薬・テーラーメイド医療

遺伝子・タンパク質から細胞・人体まで解析

**地球・環境**

エルニーニョ予測

提供: (独)海洋研究開発機構

気候変動

**原子力**

原子炉設計

ものづくり

デジタルエンジニアリング

**防災・気象**

津波予測

台風

提供: 東北大学

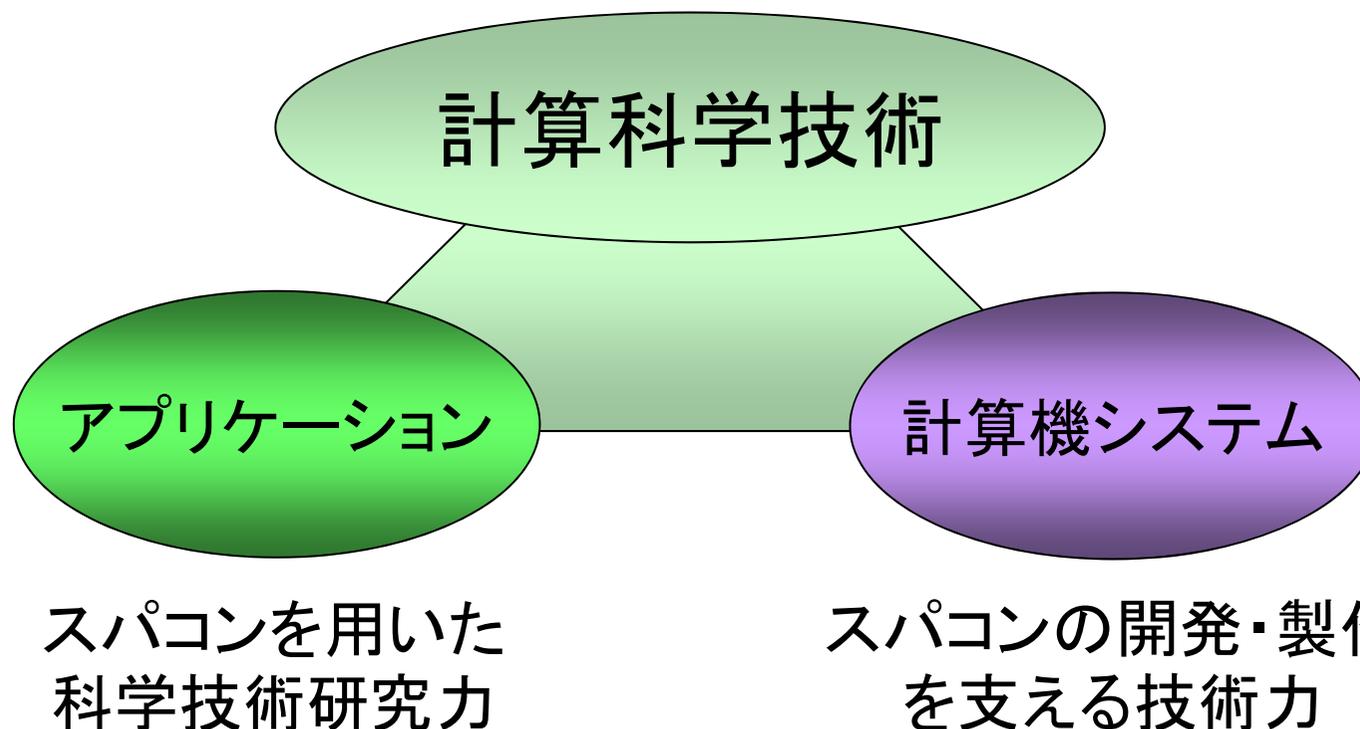
ロケットエンジン設計

航空機開発

提供: (独)宇宙航空研究開発機構

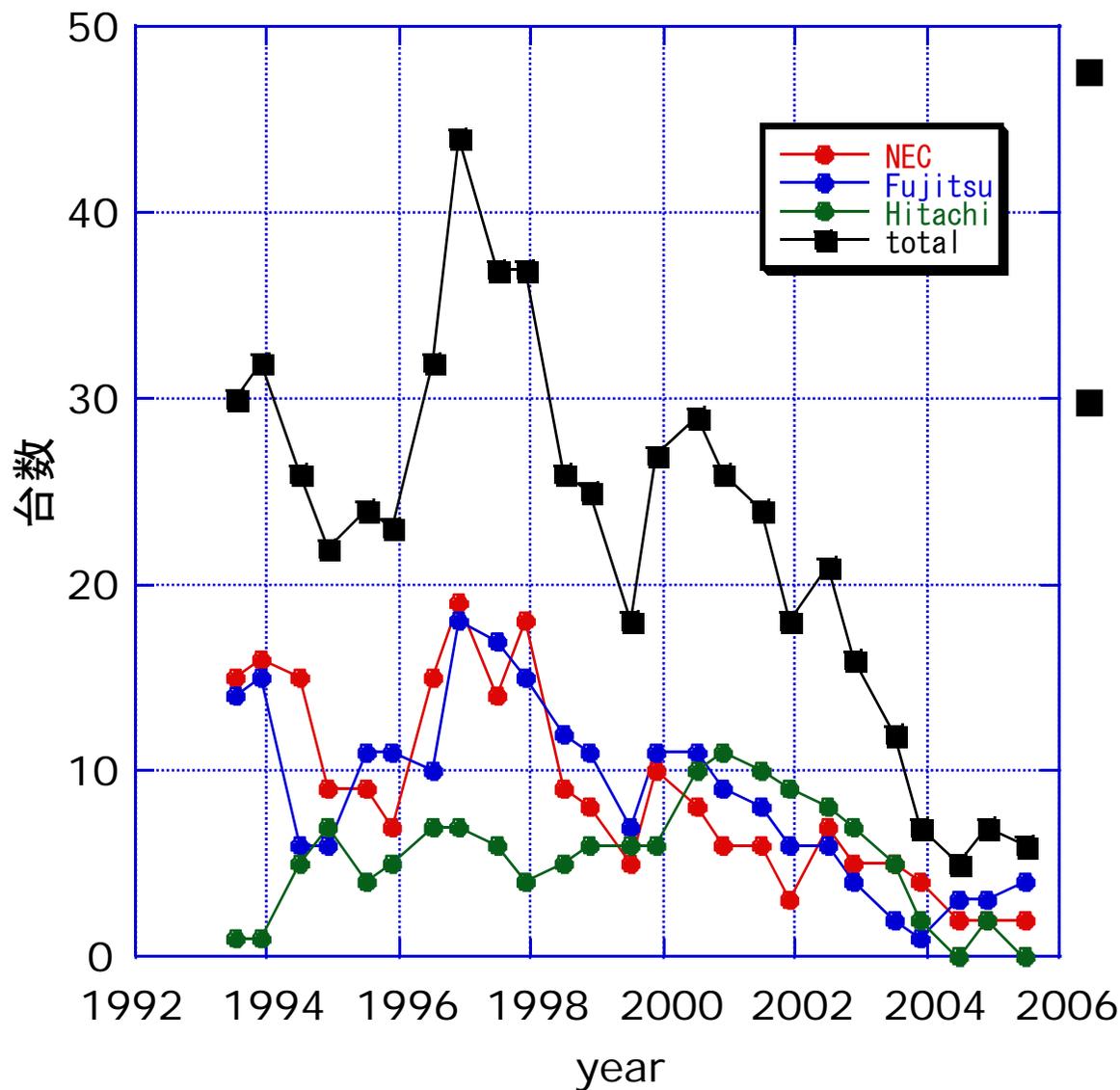
# 次期スパコン開発に如何に 取り組むか

# 計算科学技術を支える二つの要素



国産スーパーコンピュータの  
状況を見てみると...

# TOP500リスト100位以内の日本製スパコン台数



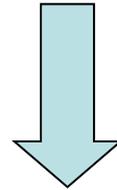
■ 1997年をピークに国産スパコンのTOP100内台数が激減

■ ベクトル・擬似ベクトル・スカラSMP等、各社でアーキテクチャは異なるが全体的な台数低減傾向に大きな違いはない

# 科学技術創造立国と計算科学技術

トップ500だけがスパコン指標ではないが、

- スパコン開発・製作を支える技術力の低下
- スパコンを用いた科学技術研究力の低下



- 科学技術の最先端を切り開く装置としての次期スパコン開発が必要且つ重要
- その実現には、産官学の協力が必須

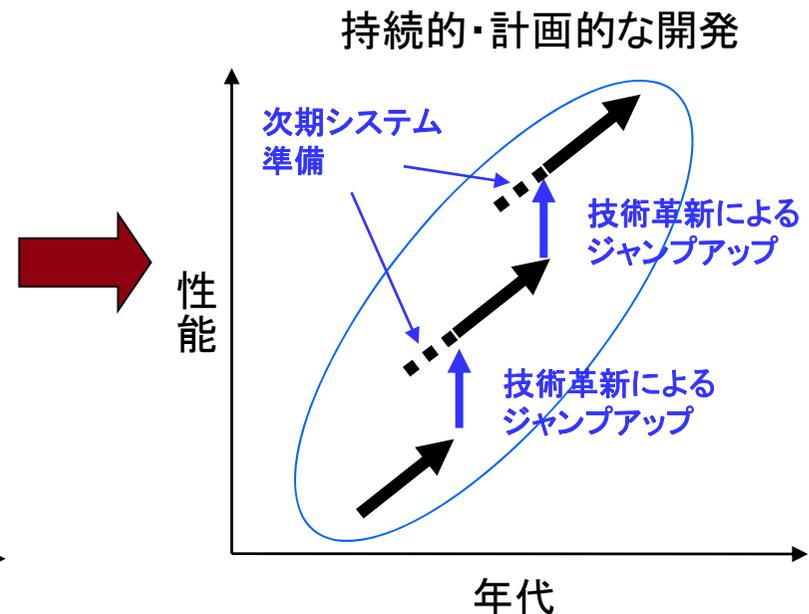
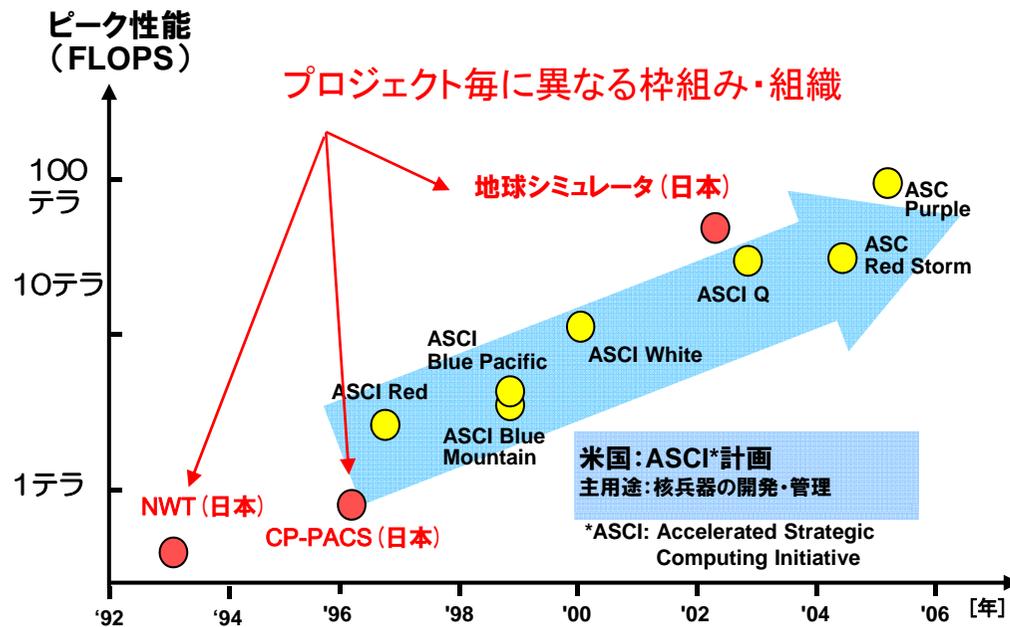
# スパコン開発に対する基本的な考え方

「わが国におけるスーパーコンピュータの開発の必要性  
について」 平成16年1月5日

- ロードマップに基づく持続的な開発の必要性
- 高い目標(グランドチャレンジ)を目指すことの重要性
- 計算科学者・計算機工学者・メーカーの協力
- スパコンの規模・配備・分野に関する考え方
- スパコンだけに閉じたスパコン開発からの脱却  
— 過去からの反省点 —

# ロードマップに基づく持続的な開発の必要性

- 単発的开发を繰り返すのではなく、長期ロードマップに従った戦略的開発
- 将来的に発展が見込まれる方式・技術の予測に基づくロードマップ
  - アーキテクチャ 例) ベクトルか 超並列か？
  - 技術革新(省電力、高密度、新デバイス、ネットワークなど)
- この実現には、国による計画的な支援が不可欠



# 我が国としてのプロセッサ開発の重要性

- プロセッサなくして計算機はない
  - ベクトルプロセッサ：  
確固とした伝統があるが、将来的展望を如何に考えるか
  - マイクロプロセッサ：  
高性能汎用プロセッサは米国製がdominant
- 科学技術計算に向けた我が国独自のマイクロプロセッサ開発路線を設定できないか
  - スパコン技術の根幹
  - 困難であっても、オールジャパンで追求する価値あり
- 組み込みプロセッサとの連携の可能性
  - 我が国の強み
  - BlueGene/Lのプロセッサは組み込みプロセッサの改良版

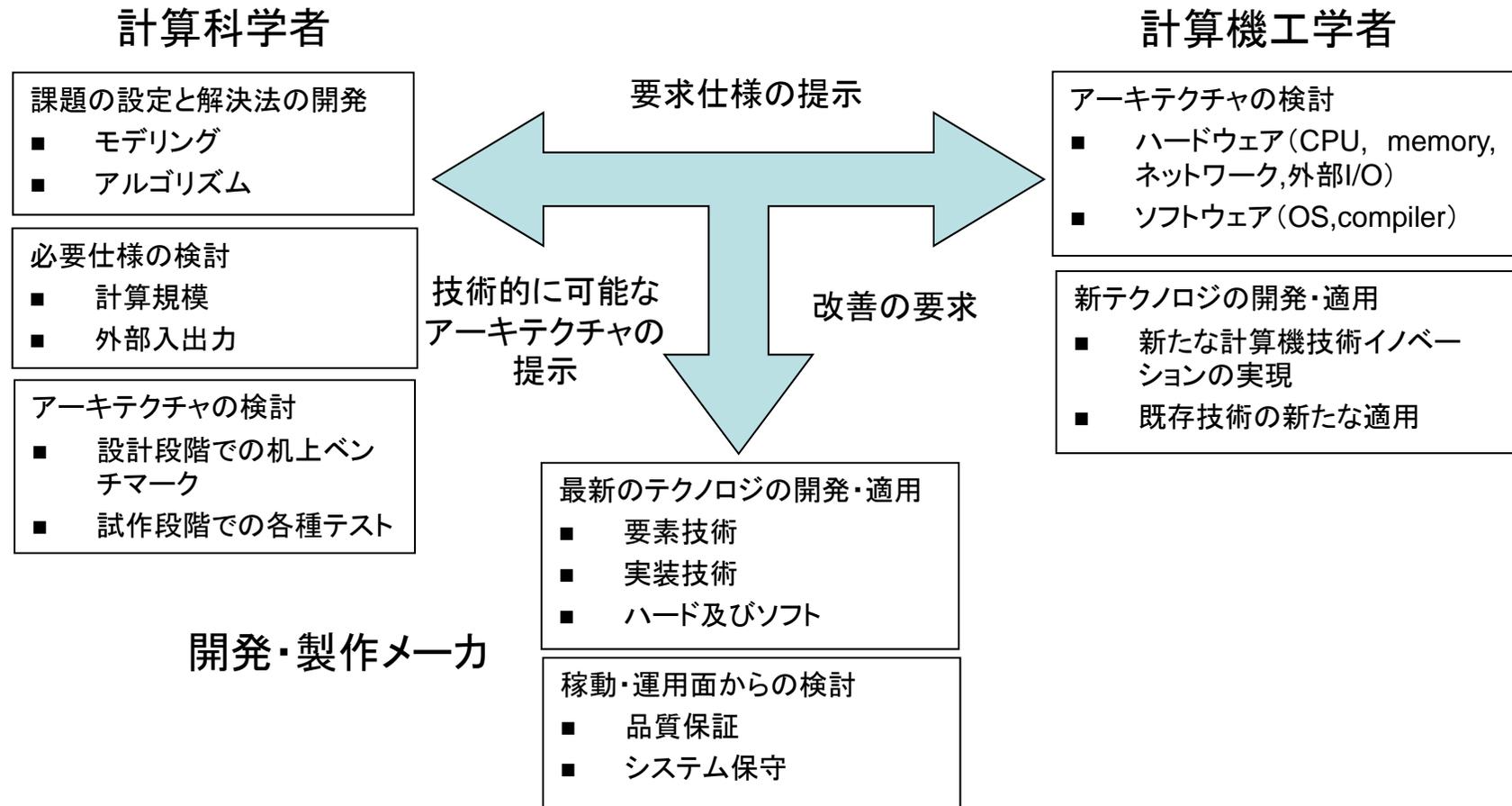
# 高い目標(グランドチャレンジ)を目指すことの 重要性

- 国によるスパコン開発の目的は、科学技術のブレークスルーの実現
- これを実現するには、高い目標を掲げ、妥協のないプロジェクト実施が必要
  - 明確な科学技術上の目標の設定
  - 原点に立ち戻った、問題のモデル化と計算アルゴリズムの(再)定式化
  - これに適した計算機開発
  - 必要ならばゼロベースからの応用プログラム開発
- 計算科学技術の革新は、このような妥協のない努力の過程で育まれると考える

## 明確なターゲットと汎用性に関するコメント

- ターゲットを絞った妥協のない努力が、高性能でかつ汎用性の高い計算機システムの開発に導く
  - 最初から汎用性を狙っては、真の高性能システムはできない  
(過去の経験からのレッスン)

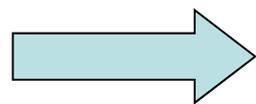
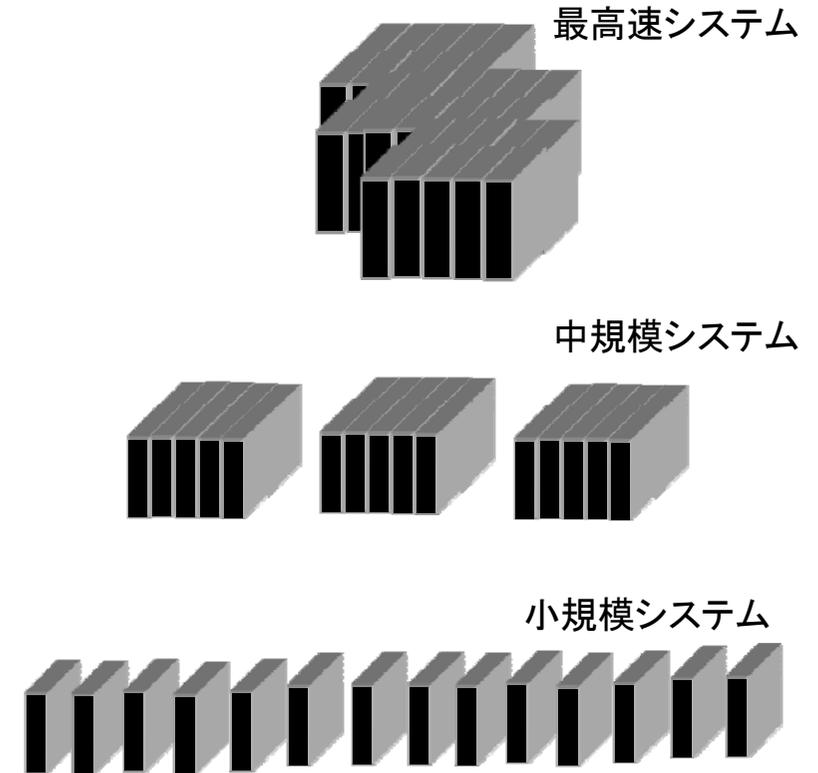
# 計算科学者・計算機工学者・メーカーの協力



- 課題を解決できるアーキテクチャの実現に向けて、計算科学者・計算機科学者・開発メーカーの間での厳しい討議が必須
  - CP-PACSプロジェクトでは、毎回6時間以上の議論を、物理学者・計算機工学者・メーカー技術者全員で、5年間・60回以上行った

# スパコンの規模・配備・分野に関する考え方(I)

- “一点豪華”状況の回避
- 重層的な配備の重要性
  - 最高速システムと同時に、複数の中規模システムを配備
    - 世界最高速のシステムは、集中利用して初めて実質世界最高速
    - 最高速システムによるcapability computingと同時に、中規模システムによるcapacity computingを底支え
    - 単一分野集中でなく、計算科学技術の多様な分野を底支え



計算科学技術全体の持続的且つ厚みのある  
発展に必須

# スパコンの規模・配備・分野に関する考え方(II)

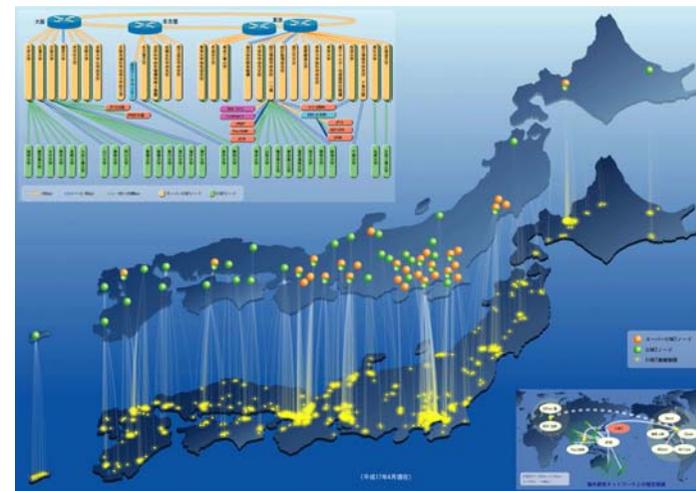
## ■ 重点分野とその時代的変遷

- 重点分野は科学技術の進展と共に変遷する
- 現在の発展途上分野から明日の重点分野が成長できるようなシステム配備が重要

➡ 重層的配備を必要とするもう一つの理由

## ■ 高速ネットワークを含めた計算環境整備が重要

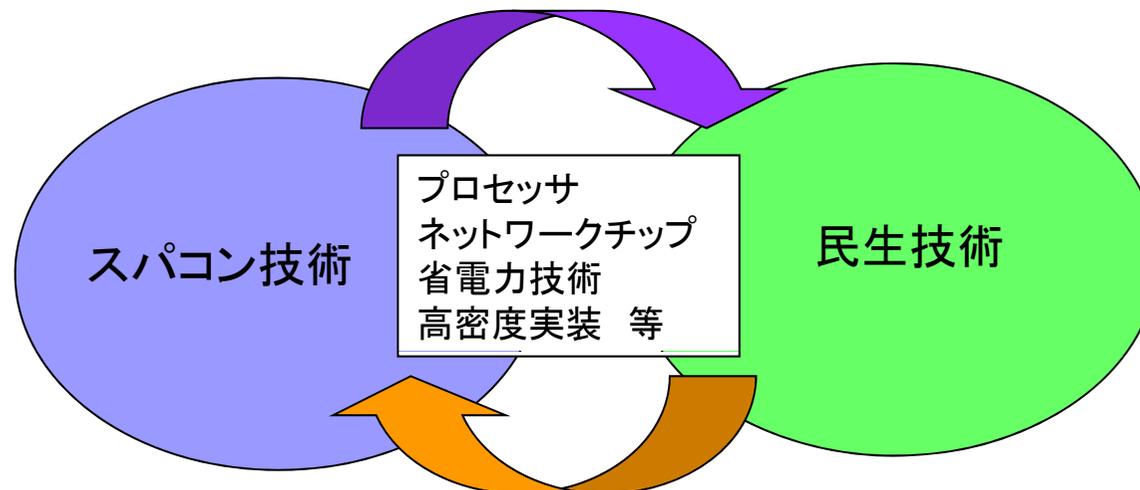
- 国内ネットワーク
- 国際連携とグリッド



SuperSINET/SINETノード配置

# スパコンだけに閉じたスパコン開発からの脱却 — 過去からの反省点 —

- スパコンの開発・整備が、スパコン市場だけで支えられたことはない
- スパコンだけに閉じた技術開発を継続することは極めて困難：
  - メーカーにとって、多額のコストのカバーは大問題
  - 国にとって、重要ではあっても、極めて限定された技術分野への多額の投資の継続は容易でない
- スパコン技術と民生IT技術の相互乗り入れを視野に入れたスパコン開発が必要ではないか



アーキテクチャを如何に  
考えるか

# 考えるべきポイント

## ■ 実効性能の追求

実効性能

= (ノードピーク性能)

× (ノード台数)

× (計算効率)

## ■ 実現可能性

- 現実的な設置スペース
- 現実的な電力
- 開発・製作のコスト

# ピーク1PFLOPSクラスを目指すとするれば

大きく分けて三つの可能性

- ベクトルSMP方式

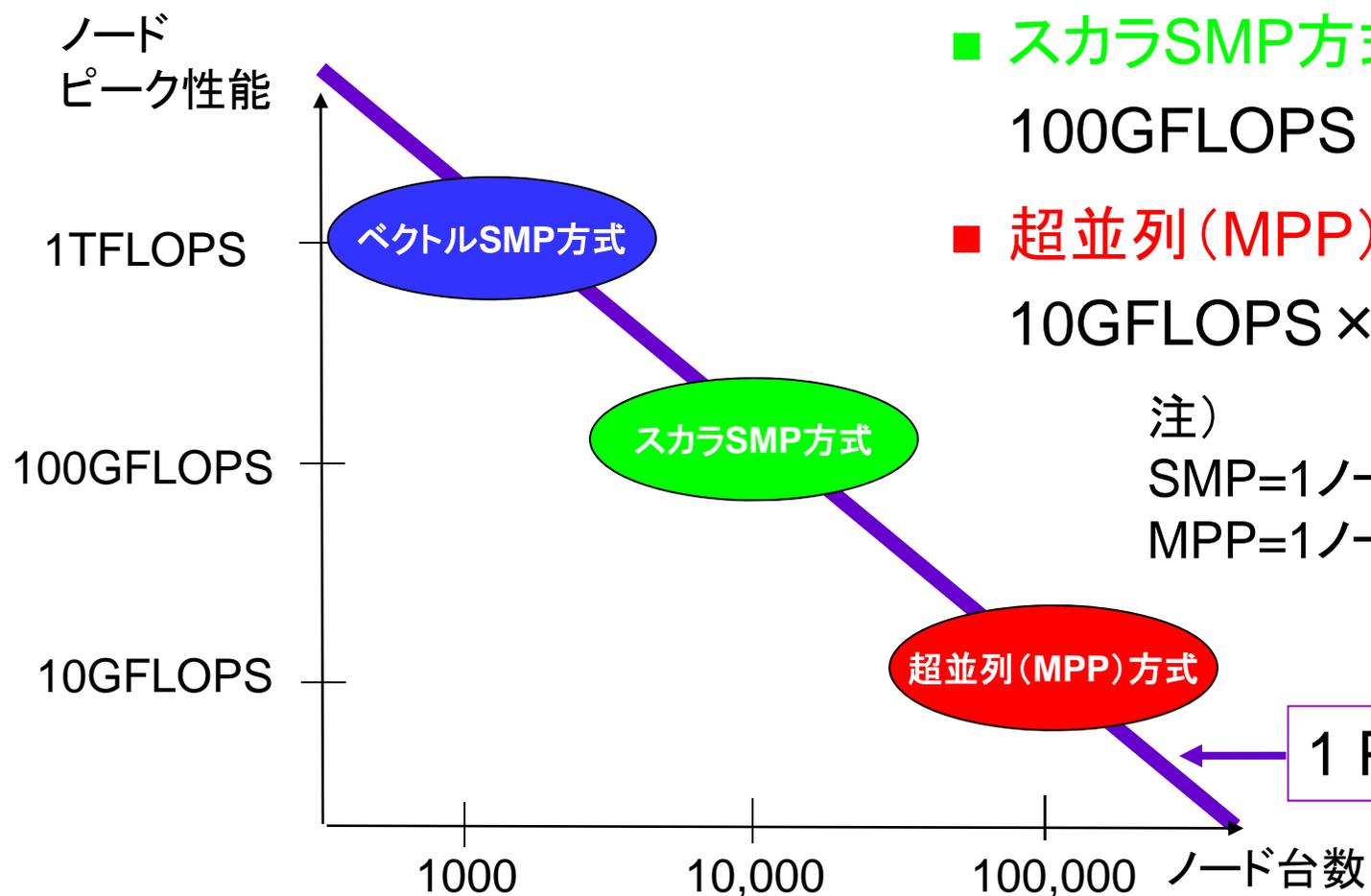
1TFLOPS × 1000ノード

- スカラSMP方式

100GFLOPS × 10,000ノード

- 超並列(MPP)方式

10GFLOPS × 100,000ノード



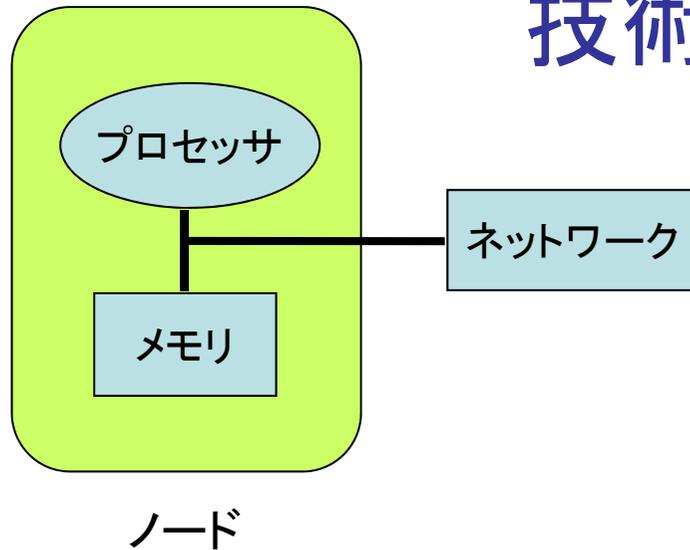
注)

SMP=1ノードに複数プロセッサ

MPP=1ノードに1プロセッサ

1 PFLOPS

# 技術上のポイント



- 各ノード
  - プロセッサ
  - メモリ性能(バンド幅、容量)
- 結合ネットワーク
  - トポロジー
  - ネットワークリンク性能(バンド幅)

- プロセッサ:メモリ:ネットワークの性能のバランス
  - メモリ性能向上率はプロセッサ性能向上率の約六分の一
- システム全体のfeasibility(設置面積、消費電力、開発コスト)

高性能システムに対して、これらの2条件を満たすことは容易でない

この観点から三つの方式を眺めると...

# ベクトルSMP方式

## 特徴

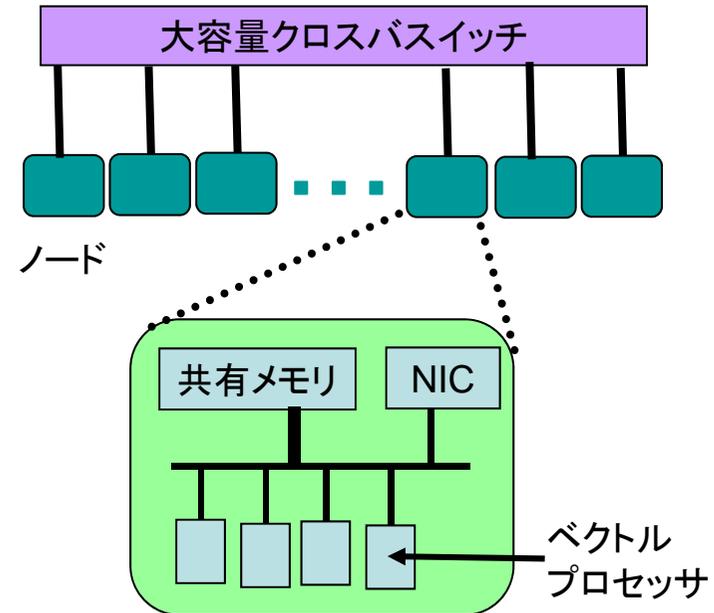
- 高性能ベクトルプロセッサを共有メモリ結合したノード
- 少数(～1000台)のノードを強力なネットワークで結合

## ■ 長所

- 幅広いアプリケーションで非常に高い実行効率

## ■ チャレンジ

- 電力・スペースの巨大化への抜本的対策
- CPU性能とバランスしたメモリ性能・ネットワーク性能の実現



例: 地球シミュレータ

# スカラSMP方式

## 特徴

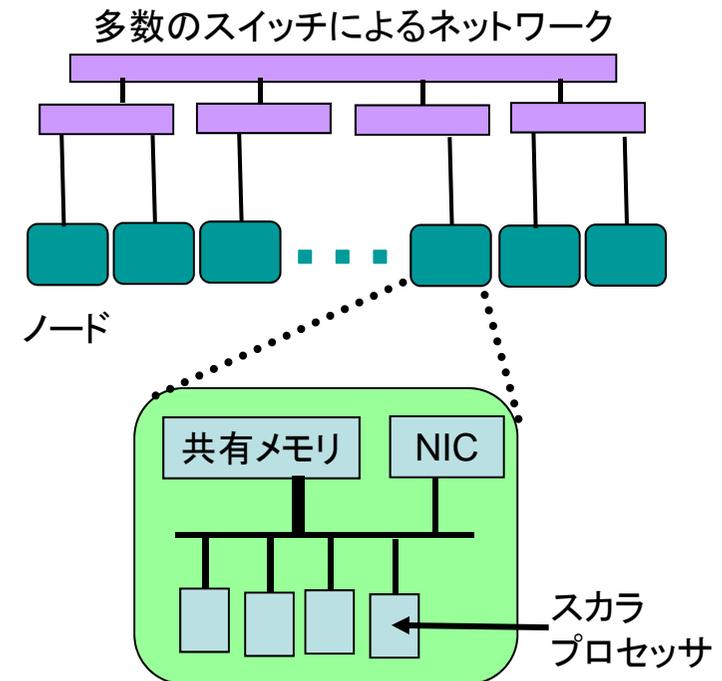
- 高性能スカラプロセッサを共有メモリ結合したノード
- 中規模数(～10,000台)のノードを比較的拡張性のあるネットワークで結合

## ■ 長所

- 汎用プロセッサとメモリを用いることにより比較的 low コストで実現可能
- キャッシュが有効なアプリケーションでは比較的高い実行効率

## ■ チャレンジ

- ベクトルSMPほどではないが、電力・スペースの巨大化への抜本的対策
- 実効性能の確保(メモリ性能・ネットワーク性能が問題)



例: ASCI Purple  
他に PrimePower

# 超並列(MPP)方式

## 特徴

- 高性能・コンパクトなスカラプロセッサ単体でノードを構成
- 大規模数(～100,000台)のノードを超並列向けネットワークで結合

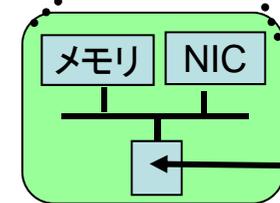
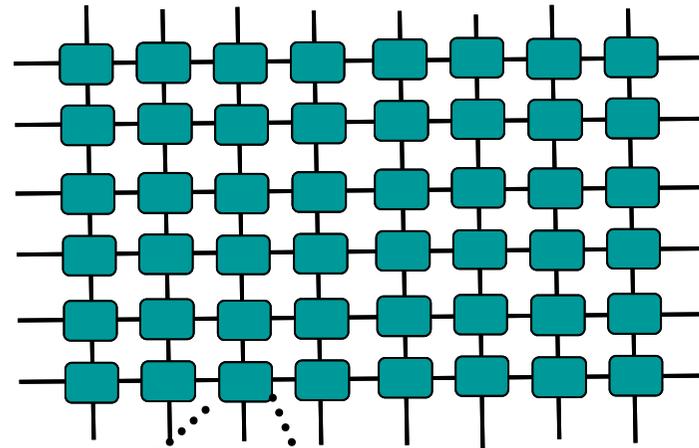
## ■ 長所

- 小さな電力・高いスペース効率
- PFLOPSを超えるシステムへの拡張性

## ■ チャレンジ

- アプリケーションソフトの超並列向け書き換え
- 耐故障性の保障

メッシュ結合等



スカラ  
プロセッサ



例: BlueGene/L  
他に ASCI RedStorm

# アーキテクチャ選択のポイント

- 実効性能
- 実現可能性
  - 設置スペース
  - 電力
- ロードマップの次のステップへの継続性
  - 1PFLOPS⇒10PFLOPS⇒...
- 重層的配備の重要性
  - 1点豪華主義(単なるトップ500一位の回復)を避ける
- 民生技術との相互乗り入れ
  - プロセッサ、ネットワーク
  - ⇒将来性の確保

# ソフトウェアの観点から

- 大規模システムを支えるソフトウェア技術の開発
  - 耐故障性制御(特に超並列方式)
  - 省電力制御
  - 大規模並列プログラミング支援
  - ハイブリッドプログラミング支援(SMPの場合)
  - 性能モニタリング／プロファイリング技術
- 大規模システムに適したアプリケーションソフトウェアの開発
  - アーキテクチャに応じたモデル／アルゴリズム／プログラムの開発と実装
  - 生産性の高いプログラミング環境とモジュール化したソフトウェア体系の開発
  - 大規模ソフトウェアの性能チューニング技術

# 異機種結合の可能性・有効性

- 対象とする系を支配する物理法則に依存  
例) 短距離力 長距離力
- 計算量の圧倒的差があって初めて有意義  
例)  $O(N)$   $O(N^2)$
- 普遍的長距離力(重力、クーロン力等)に対しては、  
専用ハードウェアによる計算加速が、 $O(N^2)$ の計算量の対処に、極めて有効

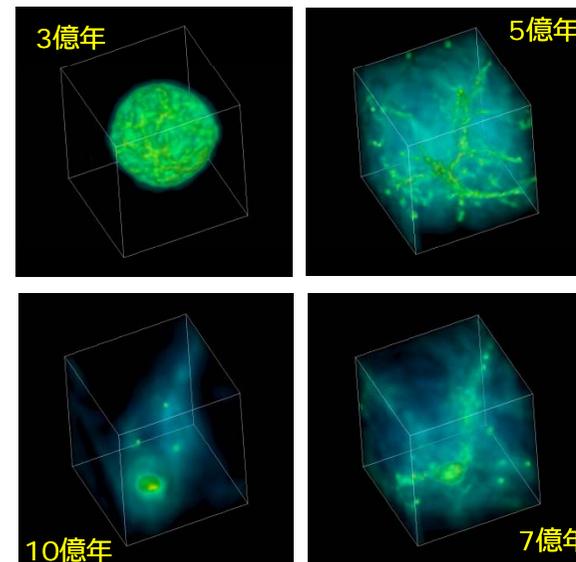
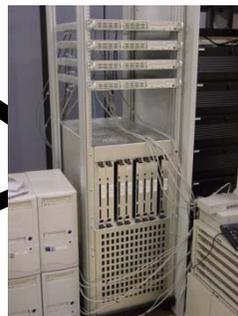
GRAPEシリーズ (近田、杉本、牧野、戎崎)

GRAPE-1~GRAPE-6 ⇒ GRAPE-DR

Gordon Bell賞: 1996年・2000年・2001年・2003年 (性能)、  
1995年(特別)、1999年(価格性能比)

# 異機種結合の例

- HMCS (Heterogeneous Multi-Computer System) 筑波大
  - 連続系用計算機 (CP-PACS及びPCクラスタ)と粒子系用計算機 (GRAPE-6)を並列ネットワークで結合
    - ピーク性能 0.6TFLOPS+8TFLOPS
  - 世界初の輻射+流体+重力の複合計算による銀河形成シミュレーションを実現(2002)
  - ボードレベルで汎用プロセッサとGRAPE-6の融合へと進化させたシステムFIRSTの開発・製作が進行中(2004年度～)
    - ピーク性能 3TFLOPS+35TFLOPS



# 結び

## ■ 次期スーパーコンピュータの開発は我が国の科学技術創造立国に必須

### ■ 科学技術のグランドチャレンジの解決

- 素粒子・宇宙
- ナノ・材料
- バイオ・医療
- 気候・気象・環境
- プラズマ・原子力
- 航空・自動車



科学技術のブレークスルーと  
新たな知の創造・発見

### ■ IT全般と交流する最先端技術の推進

- スパコン技術の民生への利用
- 民生技術のスパコン技術への利用

## ■ 次期スーパーコンピュータ開発に対する基本的考え方

- 国家プロジェクトとして、科学技術のグランドチャレンジを解決するリーディングマシンの開発を目指すべき

## ■ その実現の為に必要なこと:

- グランドチャレンジの明確な設定
- 解決のための最適なコンピュータアーキテクチャの選択
- 計算科学者・計算機工学者・メーカ三者の密接な協力

## ■ 最高速システムと中規模システムの重層的配備の重要性

- 計算科学技術の多様な分野における発展とその底支え



持続的に革新を続ける産業・経済の基盤