

先端シミュレーションおよび産業におけるGPUの役割

長岡技術科学大学 電気電子情報工学専攻 出川智啓

今回の内容

- ▶ スーパーコンピュータの歴史
- ▶ スーパーコンピュータの構成
- ▶ シミュレーションの歴史と進歩
- ▶ GPGPU教育計算機システムGROUSEの利用方法

コンピュータシミュレーションの規模

- ▶ 計算の規模を表す単位
 - ▶ 便宜上, 計算を行う計算機の性能を利用
 - ▶ Floating-Point Operations Per Second
 - ▶ 1秒あたりに実数(浮動小数)の演算が何回できるか
 - ▶ Flop/s(Floating-point operations/s)と書く場合もある
- ▶ 現在の最高性能は数十 Peta FLOPS

コンピュータシミュレーションの規模

- ▶ センチメートル (0.01メートル)
 - ▶ キログラム (1000グラム, 千)
 - ▶ メガワット (1000,000ワット, 100万)
 - ▶ ギガヘルツ (1000,000,000ヘルツ, 10億)
 - ▶ テラバイト (1000,000,000,000バイト, 1兆)
 - ▶ ペタFLOPS (1000,000,000,000,000FLOPS, 1千兆)
-
- ▶ $10 \text{ ペタFLOPS} = 1 \text{ 京FLOPS}$

コンピュータシミュレーションの規模

- ▶ 数十 ペタFLOPSはすごい

- ▶ けどまだまだ不十分

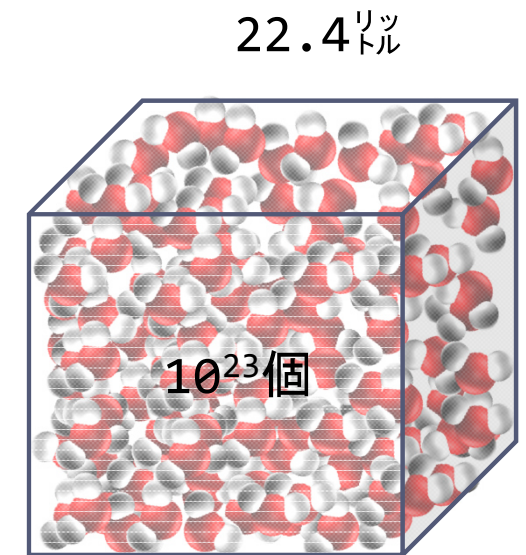
- ▶ 分子運動の再現

- ▶ 1気圧0°Cの空気22.4リットル

- ▶ アボガドロ数($=6 \times 10^{23}$)の分子が存在

- ▶ 数十ペタの性能を持っていても、分子運動の再現は事実上不可能

- ▶ 1秒間に 10×10^{15} 回の計算ができて、アボガドロ数回の計算をするには 10^7 秒必要(四則演算1回のみ)



コンピュータシミュレーションの用途

▶ 天気予報

- ▶ 気象の観測データから将来の気象を予測
- ▶ 1959年からスーパーコンピュータを利用

▶ 工業製品の設計

- ▶ 自動車の衝突安全
- ▶ 燃費向上
- ▶ 航空機の翼端

▶ 計算能力が上がれば計算できる問題が増える

コンピュータの歴史

- ▶ 世界初のデジタルコンピュータ
 - ▶ 1944年 ハーバードMark I
 - ▶ 機械式リレーを採用
- ▶ 世界初の汎用コンピュータ
 - ▶ 1946年 ENIAC
 - ▶ 軍事用に開発(ミサイルの弾道計算など)
 - ▶ 300FLOPS
- ▶ 金融や株取引にも利用が拡大
 - ▶ 様々な用途に利用できるようコンピュータを設計

スーパーコンピュータ

- ▶ 様々な用途に利用できるようコンピュータを設計
 - ▶ 設計が複雑化
 - ▶ 1970年代には性能が停滞
- ▶ 科学技術計算に特化して性能を高めたコンピュータ
 - ▶ Cray-1
 - ▶ 世界初のスーパーコンピュータ
- ▶ 日本製スーパーコンピュータ
 - ▶ 日立, 富士通, NECが製造
 - ▶ たびたび世界トップの性能を達成

スーパーコンピュータの性能

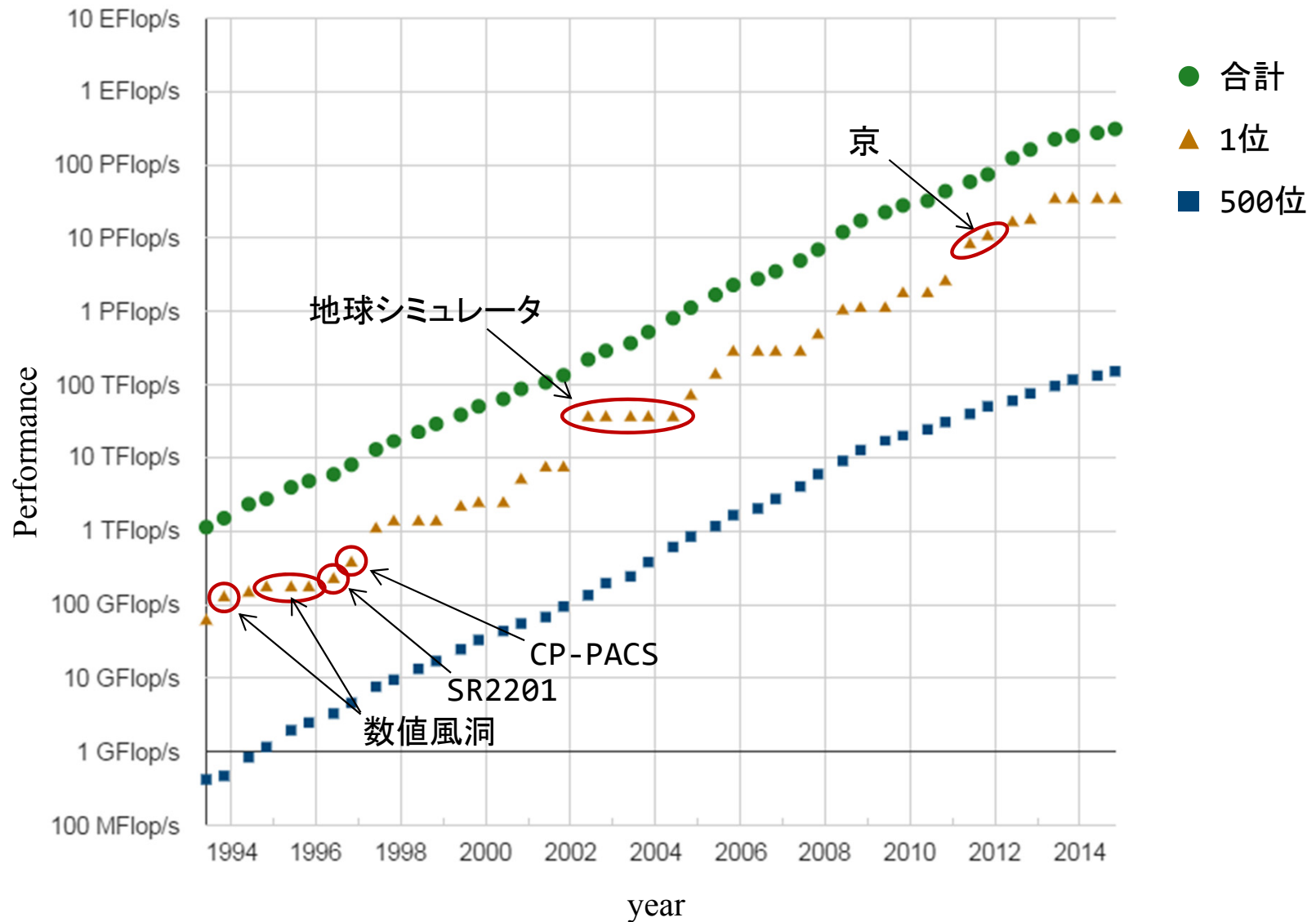
▶ TOP500

- ▶ <http://www.top500.org>
- ▶ スーパーコンピュータの世界ランキング
- ▶ 6月と11月に更新

▶ 日本のスーパーコンピュータもたびたび世界一に

- ▶ 数値風洞
- ▶ SR2201(東大)
- ▶ CP-PACS(筑波大)
- ▶ 地球シミュレータ
 - ▶ 前期トップのコンピュータから5倍の性能向上
 - ▶ 2年半にわたって首位
- ▶ 京

TOP500における性能の遷移



TOP500 List (2014, Nov.)

▶ <http://www.top500.org/>

	計算機名称(設置国)	アクセラレータ	実効性能(PFlop/s)	消費電力(MW)
1	Tianhe-2 (China)	Intel Xeon Phi	33.9	17.8
2	Titan (U.S.A.)	NVIDIA K20x	17.6	8.20
3	Sequoia (U.S.A.)	-	17.2	7.90
4	K computer (Japan)	-	10.5	12.7
5	Mira (U.S.A.)	-	8.59	3.95
6	Piz Daint (Switzerland)	NVIDIA K20x	6.27	2.33
7	Stampede (U.S.A.)	Intel Xeon Phi	5.17	4.51
8	JUQUEEN (Germany)	-	5.01	2.30
9	Vulcan (U.S.A.)	-	4.29	1.97
10	- (U.S.A.)	-	3.58	1.50

スーパーコンピュータの構成

▶ クラスタ

- ▶ 各ノードが, OSを持つ独立したコンピュータによって構成
- ▶ 各ノードが高速なネットワークで接続
- ▶ 2台～数千台

▶ MPP Massively Parallel Processor

- ▶ 超並列コンピュータ

スーパーコンピュータの構成

- ▶ プロセッサが一つのシステム
 - ▶ コンピュータ登場時のシステム
 - ▶ 1990年頃にスーパーコンピュータの世界から消滅
- ▶ 現在の傾向
 - ▶ 80%以上がクラスタ
 - ▶ 残りがMPP

スーパーコンピュータの構成

▶ 専用設計

- ▶ スーパーコンピュータのメーカーに依頼して作成
- ▶ 科学者や技術者だけが利用

▶ クラスタ

- ▶ パソコンを揃えたり, 部品を買い集めて作ることができる

- ▶ 少数の特別設計で高価なスーパーコンピュータから, 汎用部品を利用したスーパーコンピュータに移行
- ▶ アクセラレータによる計算能力の向上

アクセラレータ

- ▶ コンピュータの特定の機能や処理能力を向上させるハードウェア
 - ▶ CPUで行っていた処理を専用ハードウェアが担当
 - ▶ 動画画像のエンコード・デコード等
- ▶ コンピュータシミュレーションではCPUの代わりに計算を実行するハードウェアを指す
 - ▶ 画像処理装置(Graphics Processing Unit)
 - ▶ メニーコアプロセッサ

アクセラレータ (GPU)

- ▶ グラフィックスカードを数値計算用に利用
- ▶ GPGPU
 - ▶ グラフィックス処理用の専用チップであるGPU(Graphic Processing Unit)を一般的な目的(General Purpose)に利用
 - ▶ GPUを計算に利用することを特にGPU Computingと呼ぶ

アクセラレータ (GPU)

- ▶ GPGPUプログラミング環境
 - ▶ CUDA (Compute Unified Device Architecture)
 - ▶ 消費電力あたりの計算性能が高い
 - ▶ 多数のコアを使った超並列処理

アクセラレータ（メニーコアプロセッサ）

▶ PEZY-SC

- ▶ 株式会社PEZY Computingの1,024コアの低消費電力型メニーコアプロセッサ
- ▶ 1024コア, 動作周波数733MHz
- ▶ 理論演算性能
 - ▶ 単精度 3.0 TFLOPS
 - ▶ 倍精度 1.5 TFLOPS

アクセラレータ（メニーコアプロセッサ）

▶ Intel Xeon Phi

- ▶ OSを搭載しており、接続しているワークステーションとは独立して動かすことが可能
 - ▶ 61コアCPU(1GHz), メモリ8GBのLinuxサーバ
 - ▶ 理論演算性能(単精度) 約1 TFLOPS
- ▶ CPUからの制御が必要なアクセラレータとは異なる
- ▶ アーキテクチャがIntel CPUと同じであるため、コンパイルし直すだけで動作する
- ▶ 新モデルを投入予定*
 - ▶ 72コア, メモリ16GB
 - ▶ 理論演算性能3.0 TFLOPS

*<http://news.mynavi.jp/articles/2014/11/17/sc14/>

Green500 (2014, Nov.)

- ▶ AMD社のGPUが1位
- ▶ 日本の次世代機「睡蓮」が2位*
- ▶ NVIDIA社のGPUが3位以降にランクイン

*4月2日に1位相当の値を記録

http://news.mynavi.jp/articles/2015/04/02/kek_suiren/

	計算機名称	アクセラレータ	GFLOPS/W	消費電力(kW)
1	L-CSC	AMD FirePro S9150	5.27	57.15
2	Suiren	PEZY-SC	4.95	37.83
3	TSUBAME-KFC	NVIDIA K20x	4.45	35.39
4	Storm1	NVIDIA K40m	3.96	44.54
5	Wilkes	NVIDIA K20	3.63	52.62
6	iDataPlex	NVIDIA K20x	3.54	54.60
7	HA-PACS	NVIDIA K20x	3.52	78.77
8	Cartesius Accelerator Island	NVIDIA K20m	3.46	44.40
9	Piz Daint	NVIDIA K20x	3.19	1,753.66
10	romeo	NVIDIA K20x	3.13	81.41

シミュレーションの歴史と進歩

▶ 日本の自動車の競争力

- ▶ 製造技術の高さ, 品質の高さ
- ▶ 製造ラインでのロボットの活用, 車体溶接の自動化, 製造ラインの改善
- ▶ 労働者の質や意欲, 技術の高さ
- ▶ CAE(Computer Aided Engineering, コンピュータ支援設計)技術の活用
- ▶ CAE技術の活用により, 試作・実験・評価を省略でき, 開発期間も試作や実験にかかるコストも低減

シミュレーションの歴史と進歩

- ▶ 1980年にアメリカの自動車会社がスーパーコンピュータを設計に利用
 - ▶ 導入したスーパーコンピュータは増強せず，個人で使うワークステーションを利用
- ▶ 日本でも1980年半ばからスーパーコンピュータを導入
 - ▶ 定期的に増強
 - ▶ 設計図面を廃止し，全てコンピュータ上で設計
 - ▶ 構造解析に利用し，部品の破壊の原因，プレス加工の予測，衝突後の大変形の再現
 - ▶ オイルショック後，低燃費化というニーズに対応するため，空力解析に利用

シミュレーションの歴史と進歩

このスライドは諸事情により空白です

シミュレーションの歴史と進歩

- ▶ 1985年
 - ▶ 2次元でのシミュレーション
 - ▶ 実験結果と“傾向は”一致

シミュレーションの歴史と進歩

- ▶ 1987年
 - ▶ 3次元化し, 実車に近い形状で計算

シミュレーションの歴史と進歩

- ▶ 1988年～1990年
 - ▶ 車輪や床下も含めたモデル化

シミュレーションの歴史と進歩

- ▶ 1993年
 - ▶ 空気抵抗を誤差1%で予測可能
 - ▶ 空力解析以外にも利用

シミュレーションの歴史と進歩

- ▶ 1992年～1993年
 - ▶ 車体から発生する騒音のシミュレーション
 - ▶ ドアミラーやピラーの形状の改良
 - ▶ エンジンルームの冷却
 - ▶ 10mm以上の部品は全て含めて解析

シミュレーションの歴史と進歩

▶ 衝突解析

シミュレーションの歴史と進歩

- ▶ 安全性の設計に活用
- ▶ 開発期間の短縮と安全性の向上を両立

ロボットによる心臓外科手術

- ▶ ロボットアームと内視鏡を使った心臓外科手術
- ▶ 人工心臓を使わず，心臓を動かしたまま行う

ロボットによる心臓外科手術

https://www.youtube.com/watch?v=G3LiyN_oCEo

<http://news.mynavi.jp/articles/2010/09/25/gtc03/001.html>

ロボットによる心臓外科手術

- ▶ 心臓は複雑な形をしていて、周期的に脈打っている
- ▶ 毎秒何十枚と撮られる映像をリアルタイムで処理しながらロボットアームを制御
 - ▶ 心臓を2次元の画像に変換して、
 - ▶ その画像を基にロボットが動く道筋を計算して、
 - ▶ 実際に3次元の動きに変換する
- ▶ 心臓の動きに合わせてロボットアームを制御

住宅設備機器開発

▶ 住宅設備機器開発のための混相流シミュレーション



池端昭夫, 吉田慎也, “住宅設備機器開発のための混相流シミュレーション,” 第27回数値流体力学シンポジウム講演予稿集, E05-4, 2013(on USB Flash Drive). の結果を著者が撮影

車載システム

- ▶ Google, NVIDIA, AudiなどによるOpen Automotive Alliance
 - ▶ 自動車へのAndroidプラットフォーム搭載促進を目指す

NVIDIA社の自動車関連ソリューション

- ▶ NVIDIA DRIVE PX

- ▶ 高機能運転支援システム

- ▶ NVIDIA DRIVE CX

- ▶ 自動車の高度情報化

Jetson TK1

- ▶ 世界初の組み込みスーパーコンピューター
 - ▶ NVIDIA Tegra K1を採用
 - ▶ Keplerアーキテクチャ
 - ▶ 192 CUDA コア
 - ▶ NVIDIA 4-Plus-1™ クアッドコア ARM® Cortex-A15 CPU
 - ▶ Linux for Tegraが動作

月面探査

- ▶ Google Lunar XPRIZE
 - ▶ Googleによる国際宇宙開発レース
 - ▶ 日本の民間月面探査チーム「HAKUTO」が参加
- ▶ ロケット発射時のシミュレーション
- ▶ 着陸などのシミュレーションや実際の制御にGPUを用いた自動運転技術を利用

担当者連絡先

- ▶ 長岡技術科学大学電気電子情報工学専攻
- ▶ 出川智啓(でがわともひろ)

- ▶ 電気1号棟5階516室(517室と一続き)

補足

プロセッサの性能向上

▶ 電子回路の構成部品

- ▶ 機械式リレー
- ▶ 真空管
- ▶ トランジスタ
- ▶ IC (Integrated Circuit)
- ▶ LSI (Large Scale Integrated Circuit)



集積率が向上

プロセッサの性能向上

- ▶ CPUとメモリの性能向上
 - ▶ 半導体の製造過程で回路を細線化
 - ▶ 250nm→180nm→130nm→90nm→65nm→45nm→32nm
 - ▶ 現在22nm（10nmまではなんとかかなりそう→3次元構造へ）
- ▶ 線幅が減ると同じ回路を作る際の面積が半分に
- ▶ 同じ面積に集積するトランジスタ数は倍に

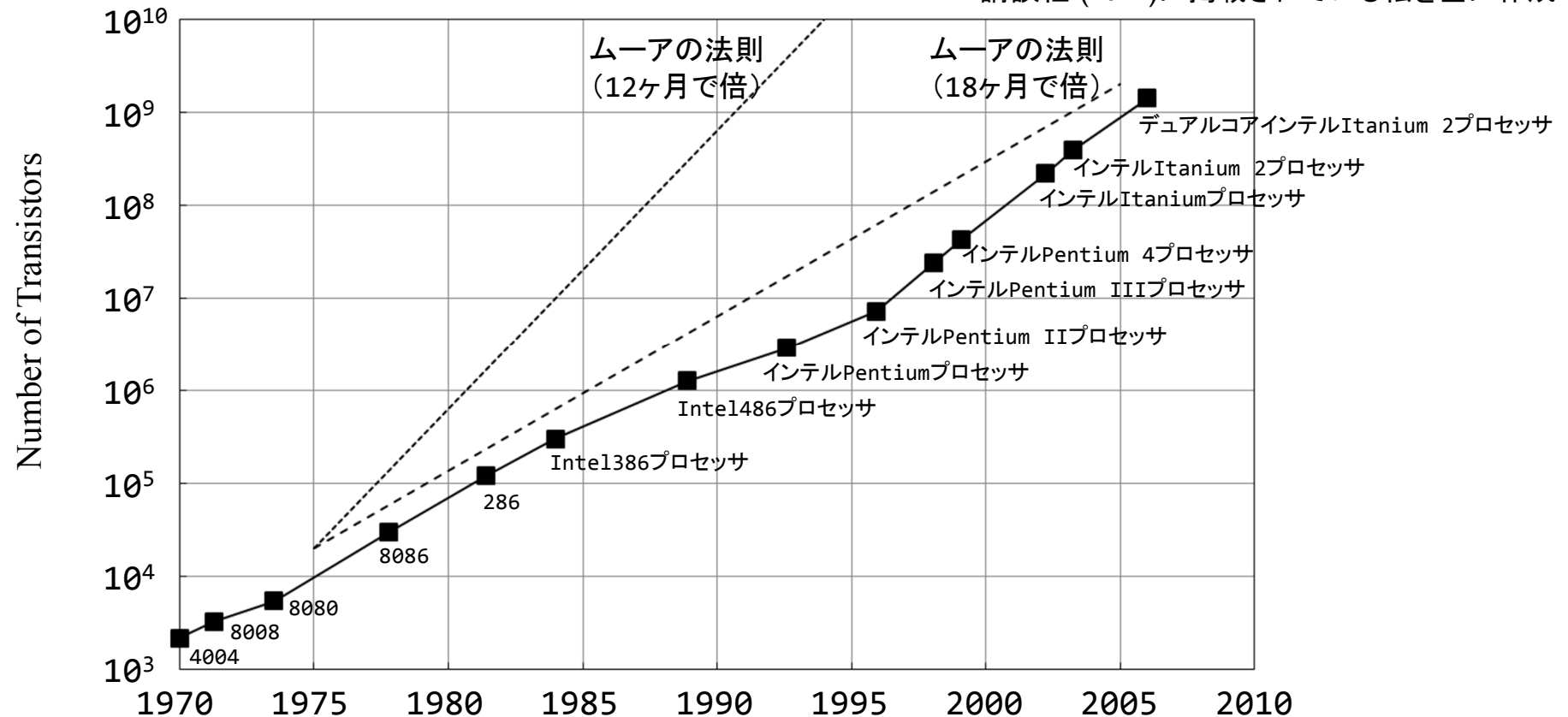
ムーアの法則*

*Moore, G.E., Electronics, Vol.38, No.8(1965).
<http://ja.wikipedia.org/wiki/ムーアの法則>
http://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s_law

▶ インテルの共同設立者ムーアによる経験則

- ▶ 半導体の集積率は1年で2倍に増加
- ▶ 後に「18ヶ月で2倍」に修正

姫野龍太郎, 絵でわかるスーパーコンピュータ, 講談社 (2012)に掲載されている絵を基に作成



プロセッサの性能向上

▶ プロセッサの処理速度の向上

- ▶ 1秒あたりに0と1を切り替える回数(動作周波数)を増加
- ▶ 周波数を上げるためには電圧を上げる
- ▶ (トランジスタ スイッチング速度, 消費電力等のキーワードでGoogling)

▶ 消費電力は電圧の2乗に比例

- ▶ 消費電力の増加は発熱量の増加に直結
- ▶ 発熱による回路の誤動作や故障

▶ 空気による冷却

- ▶ 対応できるのは消費電力は100W以下(ホットプレート並)

プロセッサの性能向上

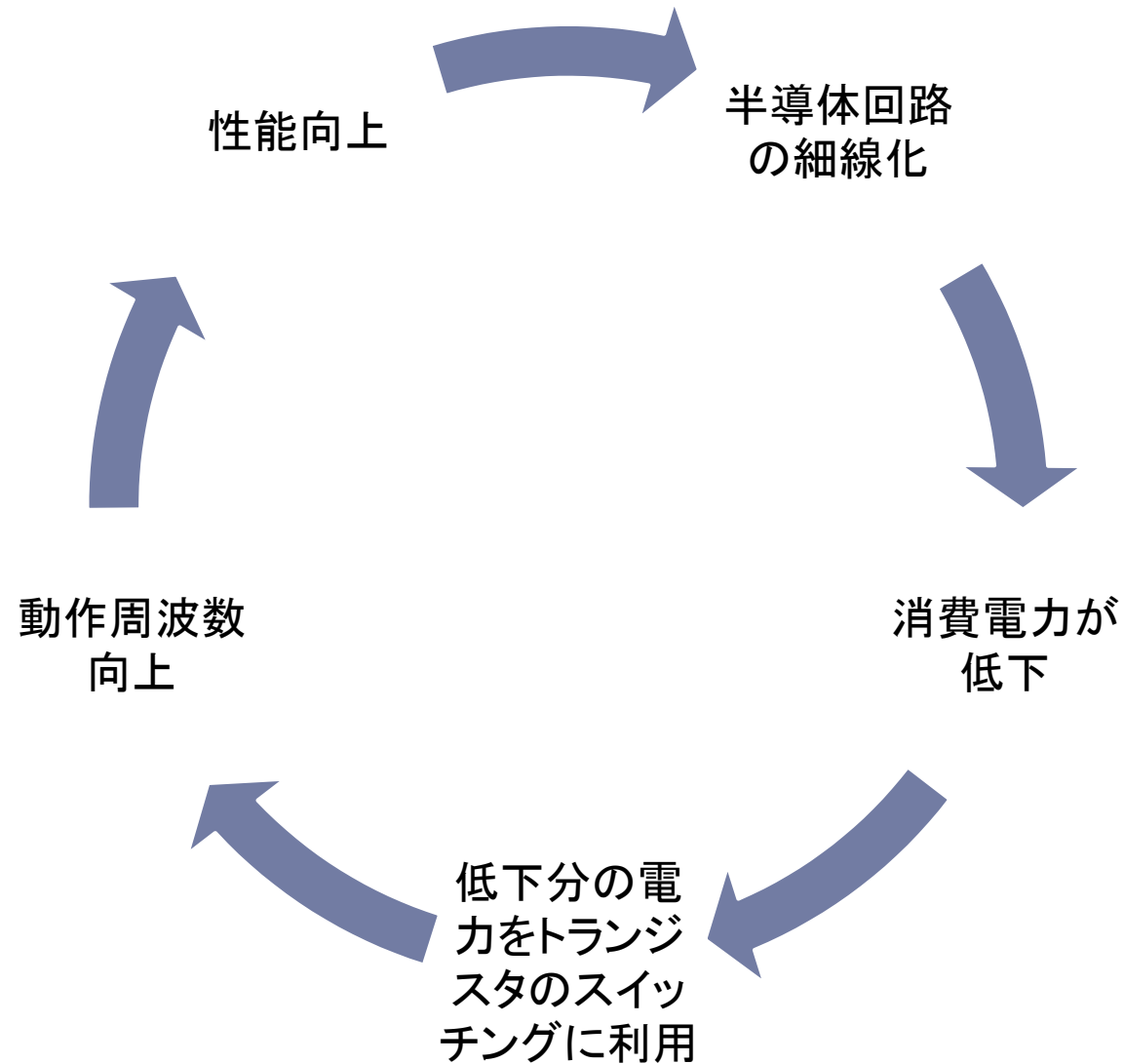
- ▶ 製造技術の進歩による配線の細線化
 - ▶ 抵抗が線幅に比例して減少
 - ▶ 抵抗が減少して消費電力が減少
 - ▶ 減少した電力を周波数向上に利用
- ▶ 細線化により絶縁部分も狭小化
 - ▶ 漏れ電流の発生
 - ▶ 消費電力が減少せず
- ▶ 周波数向上が不可能

ポラックの法則*

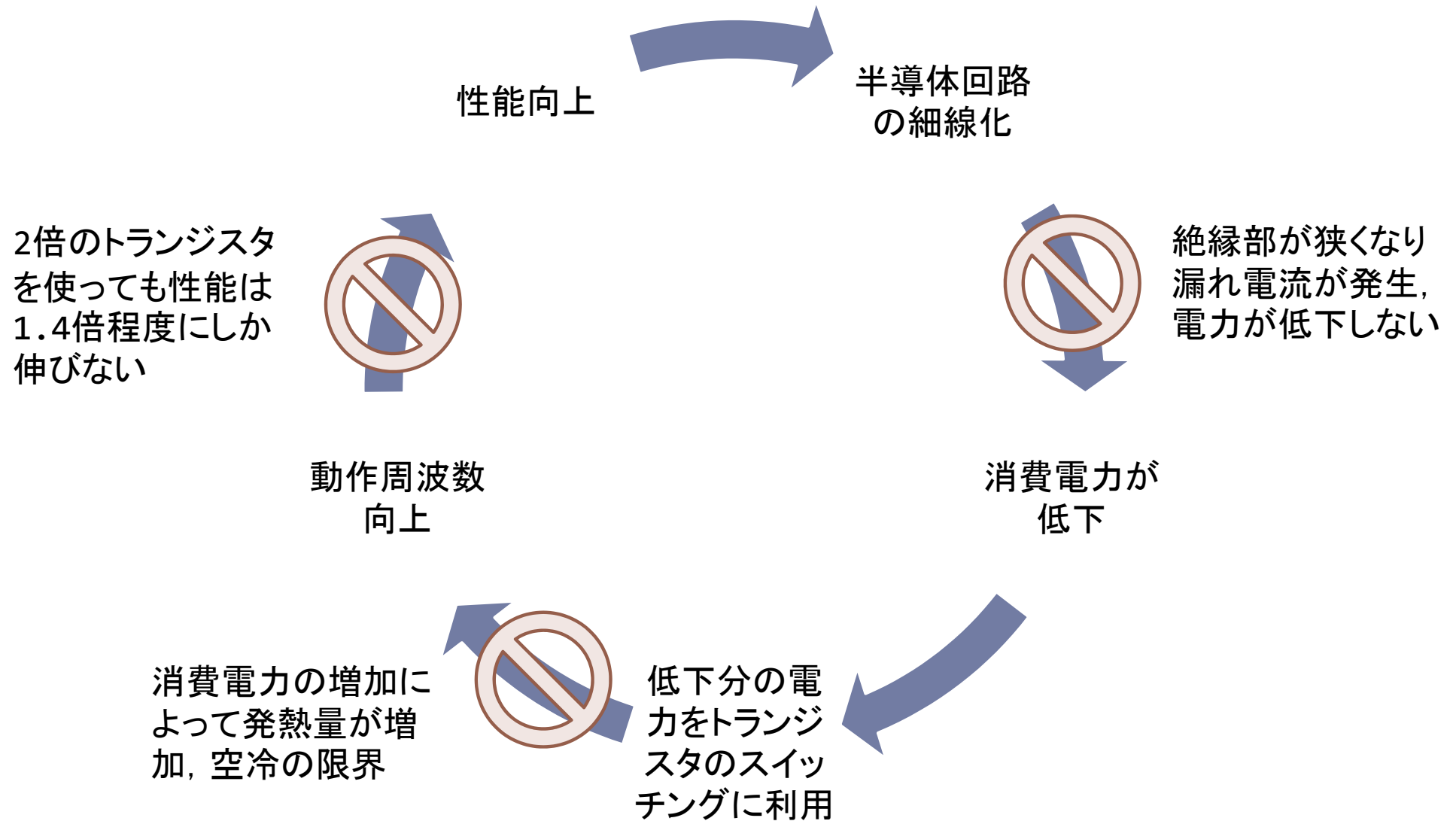
*<http://ja.wikipedia.org/wiki/ポラックの法則>
http://en.wikipedia.org/wiki/Pollack%27s_Rule

- ▶ 2倍のトランジスタを使っても、プロセッサの性能はその平方根倍(1.4倍)程度にしか伸びない
 - ▶ 消費電力は2倍, 性能は1.4倍
- ▶ 一つのCPUに複数のプロセッサ(コア)を搭載
 - ▶ 消費電力を上げずに理論的な性能を倍に
 - ▶ プログラムの作り方に工夫が必要

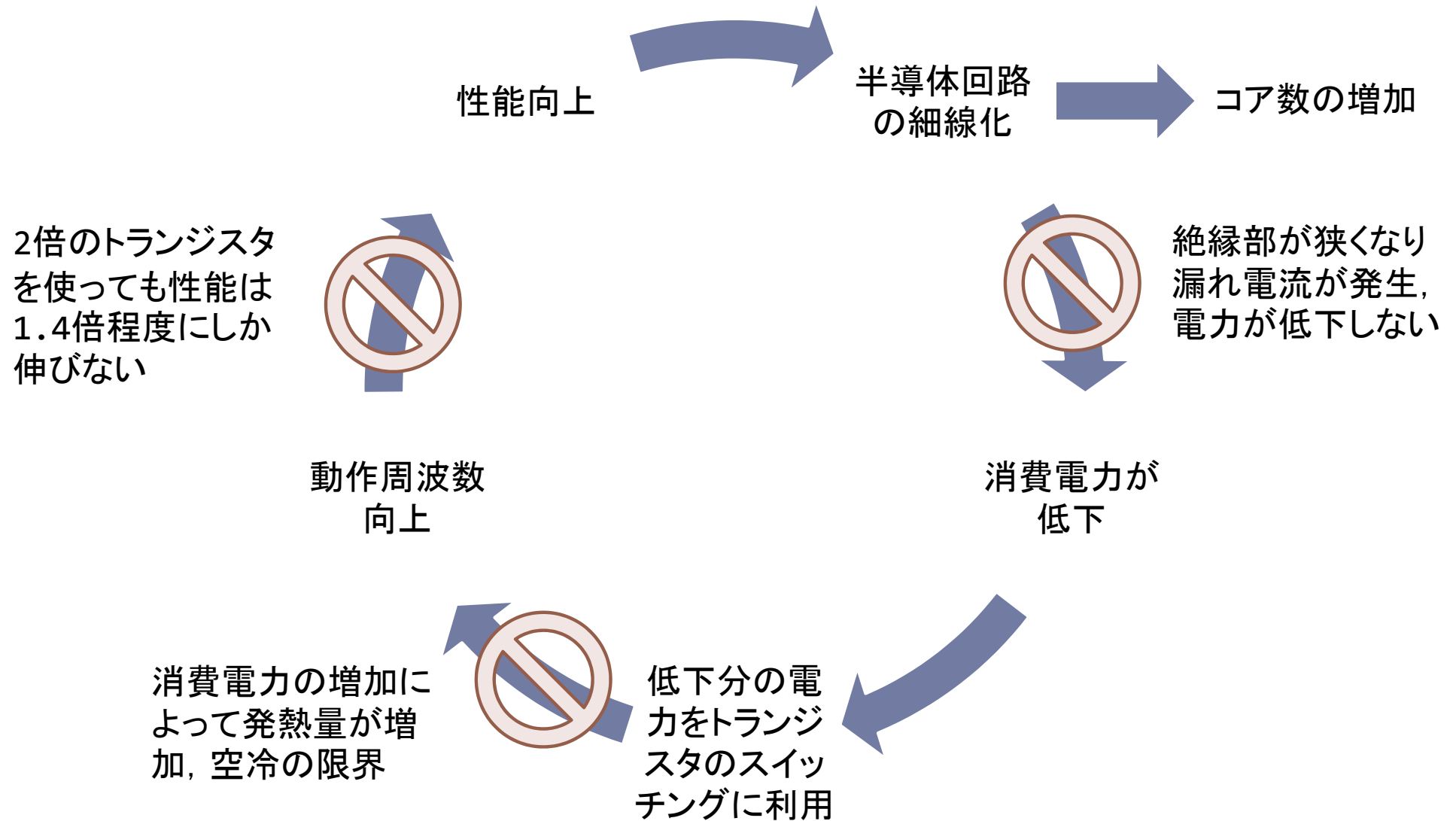
プロセッサの性能向上



プロセッサの性能向上



プロセッサの性能向上



スーパーコンピュータの重要性

- ▶ 科学技術の競争力を高める・維持するうえで重要
- ▶ コンピュータシミュレーション(計算機科学)
 - ▶ 理論と実験に次ぐ第3の科学
- ▶ 現象の再現, 模擬実験
 - ▶ 理論によって導かれた方程式をシミュレーションにより検証
 - ▶ 実験ができない現象も再現可能
 - ▶ 天体, ビックバン, 銀河の衝突等

スーパーコンピュータの重要性

- ▶ **よい道具は世界観を変える**
- ▶ 天体望遠鏡が宇宙に対する世界観を変えた
- ▶ 顕微鏡がミクロの世界に対する世界観を変えた
- ▶ いいコンピュータを持つと、他の科学者にはできない発見ができる
 - ▶ 何に使うかが非常に重要

シミュレーションとノーベル賞

- ▶ 1998年ノーベル化学賞
- ▶ ジョン・ポープル, ウォルター・コーン
- ▶ 「量子化学における計算科学的方法の展開」
 - ▶ 分子の電子状態を求める分子軌道法という計算方法に関する理論の研究を行うと共に, GAUSSIANと呼ばれるアプリケーションソフトウェアの開発を行った

シミュレーションとノーベル賞

- ▶ 2006年ノーベル物理学賞
- ▶ ジョージ・ストーム, ジョン・マザー
- ▶ 「宇宙マイクロ波背景放射の異方性の発見」
 - ▶ 直接の理由は精度の高い計測器を開発だが, 計測データの処理に非常に大きな計算能力が必要で, コンピュータが重要な役割を果たした

シミュレーションとノーベル賞

- ▶ 2007年ノーベル平和賞
- ▶ 気候変動に関する政府間パネル, アル・ゴア
- ▶ 「地球温暖化の防止に対する貢献」
 - ▶ 温室効果ガスが地球の気候にどんな影響を与えるかをスーパーコンピュータを使ったシミュレーションで計算し, 提言をまとめた.
 - ▶ 温暖化には地域差や降水量の変動を明らかにした
 - ▶ 実は地球シミュレータも大活躍

シミュレーションとノーベル賞

- ▶ 2011年ノーベル経済学賞
- ▶ トーマス・サージェント, クリストファー・シムズ
- ▶ 「マクロ経済の原因と結果をめぐる実証的な研究に関する功績」
 - ▶ マクロ経済に影響する複雑な要素を研究し, 政策をたてる際に役立つ方法を提供した. 過去の大量のデータを分析するためにコンピュータを利用した

シミュレーションの展開

- ▶ コンピュータシミュレーションによる仮想実験, 未知の現象の発見
- ▶ 大量のデータを高速に処理して分析
 - ▶ ビッグデータ
- ▶ 汎用的なコンピュータから科学技術計算専用のスーパーコンピュータへ
- ▶ 科学技術計算に加えてデータ処理を考慮した設計が行われるようになる