

# コンピュータアーキテクチャ (12)

坂井 修一

東京大学大学院 情報理工学系研究科 電子情報学専攻  
東京大学 工学部 電子情報工学科／電気電子工学科

---

- ・ はじめに
- ・ コンピュータの歴史
- ・ デバイス技術とコンピュータ

# はじめに

---

- 本講義の目的
  - コンピュータアーキテクチャの基本を学ぶ
- 時間・場所
  - 火曜日 8:40 - 10:10 工学部2号館241
- ホームページ（ダウンロード可能）
  - url: <http://www.mtl.t.u-tokyo.ac.jp/~sakai/hard/>
- 教科書
  - 坂井修一『コンピュータアーキテクチャ』（コロナ社、電子情報レクチャーシリーズC-9）
  - 坂井修一『実践 コンピュータアーキテクチャ』（コロナ社）

教科書通りやります
- 参考書
  - D. Patterson and J. Hennessy, Computer Organization & Design, 3<sup>rd</sup> Ed. (邦訳『コンピュータの構成と設計』(第3版)上下(日系BP))
  - 馬場敬信『コンピュータアーキテクチャ』(改訂2版)、オーム社
  - 富田眞治『コンピュータアーキテクチャ I』、丸善
- 予備知識： 論理回路
  - 坂井修一『論理回路入門』、培風館
- 成績
  - 試験＋レポート＋出席

# 講義の概要と予定 (1 / 2)

---

## 1. コンピュータアーキテクチャ入門

デジタルな表現、負の数、実数、加算器、ALU, フリップフロップ、レジスタ、計算のサイクル

## 2. データの流れと制御の流れ

主記憶装置、メモリの構成と分類、レジスタファイル、命令、命令実行の仕組み、実行サイクル、算術論理演算命令、シーケンサ、条件分岐命令

## 3. 命令セットアーキテクチャ

操作とオペランド、命令の表現形式、アセンブリ言語、命令セット、算術論理演算命令、データ移動命令、分岐命令、アドレッシング、サブルーチン、RISCとCISC

## 4. パイプライン処理 (1)

パイプラインの原理、命令パイプライン、オーバヘッド、構造ハザード、データハザード、制御ハザード

## 5. パイプライン処理 (2)

フォワーディング、遅延分岐、分岐予測、命令スケジューリング

## 6. キャッシュ

記憶階層と局所性、透過性、キャッシュ、ライトスルーとライトバック、ダイレクトマップ型、フルアソシアティブ型、セットアソシアティブ型、キャッシュミス

## 7. 仮想記憶

仮想記憶、ページフォールト、TLB、物理アドレスキャッシュ、仮想アドレスキャッシュ、メモリアクセス機構

# 講義の概要と予定 (2 / 2)

---

## 8. 基本CPUの設計

デジタル回路の入力、Verilog HDL、シミュレーションによる動作検証、アセンブラ、基本プロセッサの設計、基本プロセッサのシミュレーションによる検証

## 9. 命令レベル並列処理(1)

並列処理、並列処理パイプライン、VLIW、スーパースカラ、並列処理とハザード

## 10. 命令レベル並列処理(2)

静的最適化、ループアンローリング、ソフトウェアパイプラインニング、トレーススケジューリング

## 11. アウトオブオーダー処理

インオーダーとアウトオブオーダー、フロー依存、逆依存、出力依存、命令ウィンドウ、リザーベーションステーション、レジスタリネーミング、マッピングテーブル、リオーダーバッファ、プロセッサの性能

## 12. 入出力と周辺装置

周辺装置、ディスプレイ、二次記憶装置、ハードウェアインタフェース、割り込みとポーリング、アービタ、DMA、例外処理

試験： 7月後半

# 13. コンピュータの歴史と展望

---

## ■ 内容

- 黎明期のコンピュータ
- デバイス技術とコンピュータ
  - ・ ムーアの法則
  - ・ 集積度
  - ・ 速度
- コンピュータの技術
  - ・ デバイス
  - ・ アーキテクチャ
  - ・ ソフトウェア
- スーパーコンピュータの発展

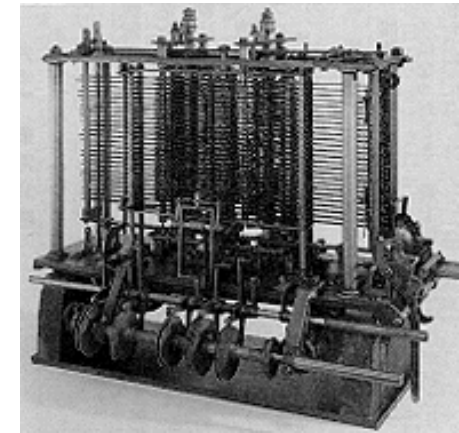
# コンピュータ(CPU)の歴史

## ■ 機械式計算機

- Pascal (1642)
  - ・ 歯車式加減算器
- Babbage (1834構想)
  - ・ 歯車式
  - ・ 演算機能と記憶機能を分離
  - ・ プログラミング！
    - Ada



パスカルの計算機  
(所蔵 日本IBM株式会社)



Babbageの解析機関

## ■ Zuseの計算機

- Z1 (1938): 電気+機械
- Z2(1941): リレー式
  - ・ 2進数
  - ・ 浮動小数点
  - ・ プログラミング言語！

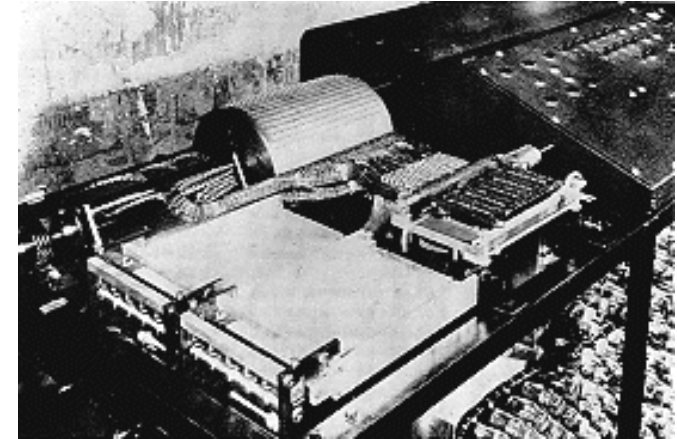


Zuse Z1: 復元機

# 初期のコンピュータ

## ■ 世界初の電子計算機ABC (1939)

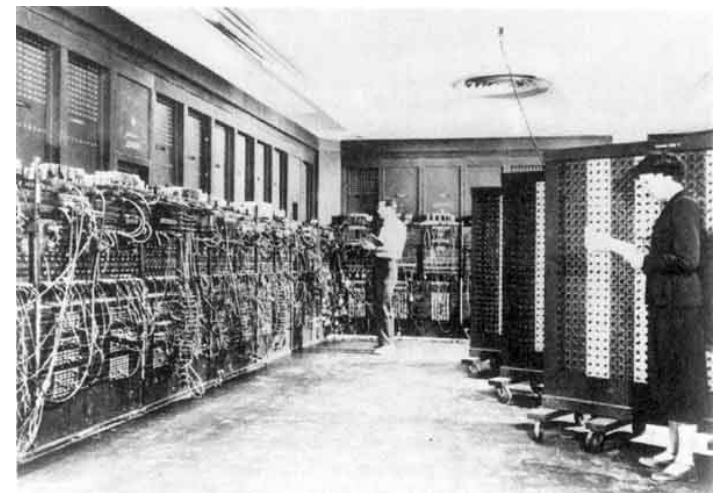
- AtanasoffとBerryが発明・開発
- 真空管300本
- 2進数の採用
- 8桁までの加減算
- コンデンサ記憶



ABC

## ■ ENIAC (1945)

- 真空管17,468本, 167m<sup>2</sup>, 30トン, 160KW
- 1秒間に5000回の足し算  
(参考) 現在のPC: 1秒間に30億回
- プログラム格納型ではなかった



ENIAC

# コンピュータの発明

特徴 計算機 (研究・完成年)	機 械	電 気	電 子	10 進	2 進	制 御 プログラム	メモ リ アド レス	条 件 ジャン プ	固 定 内 蔵 プログラム	可 変 内 蔵 プログラム	ソ フト ウ ェ ア の 問 題
バベッジ 解析機関 (1834-1871)	I			I		I		I			I
ルードゲイト (1909)	I			I		I	I	I			
ツェーゼ Z1, Z2, Z3 (1938-1941)	R	R			R	R	R				
シュレヤー (1938)			T		T						
アタナソフ ABC (1939)	R		R		R						
エイケン Mark-I (1943)	R	R		R		R	R				
COLOSSUS (1943-1944)			U		U			U			
ENIAC (1946)			U	U	U	U		U			
ベル研究所 Model-V (1946)		U		U	U	U	U	U			
改造 ENIAC (1948)			U	U	U	U		U	U		
マンチェスター Mark-I (1948)			R		R	R	R	R	R	R	
EDSAC (1949)			U		U	U	U	U	U	U	U

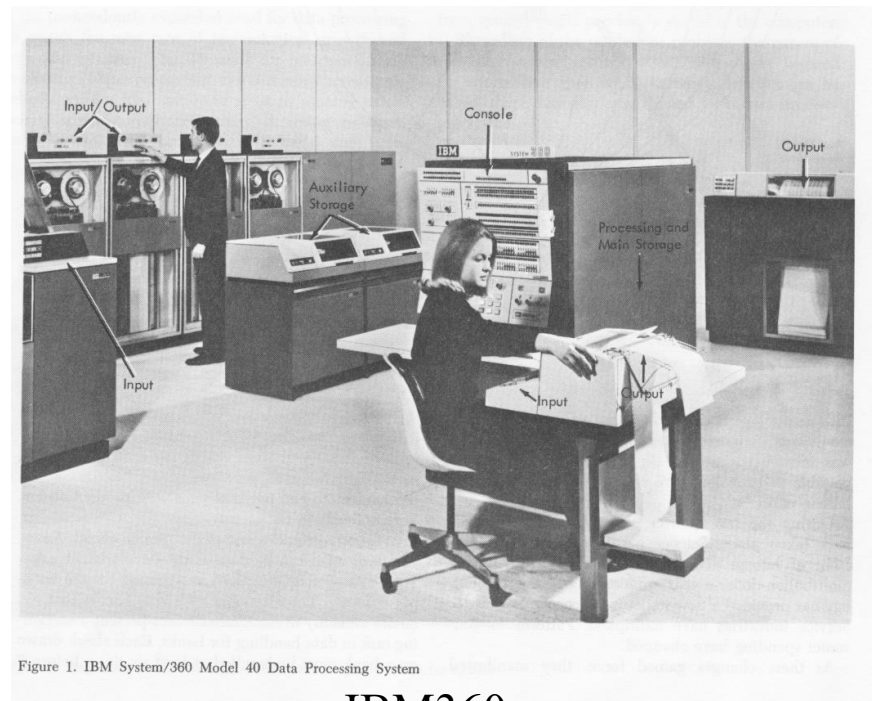
I : 思想と構想      T : 部分的試作      R : システムの実現      U : 応用を含めた実用

— 星野力『誰がどうやってコンピュータを創ったのか?』（共立出版）より



# 大型コンピュータの時代

- IBM360と後継機： 1964年～1980年ごろ
  - IC(集積回路)の利用
  - 1秒間に100万回の命令実行(IBM360/65, 1965)



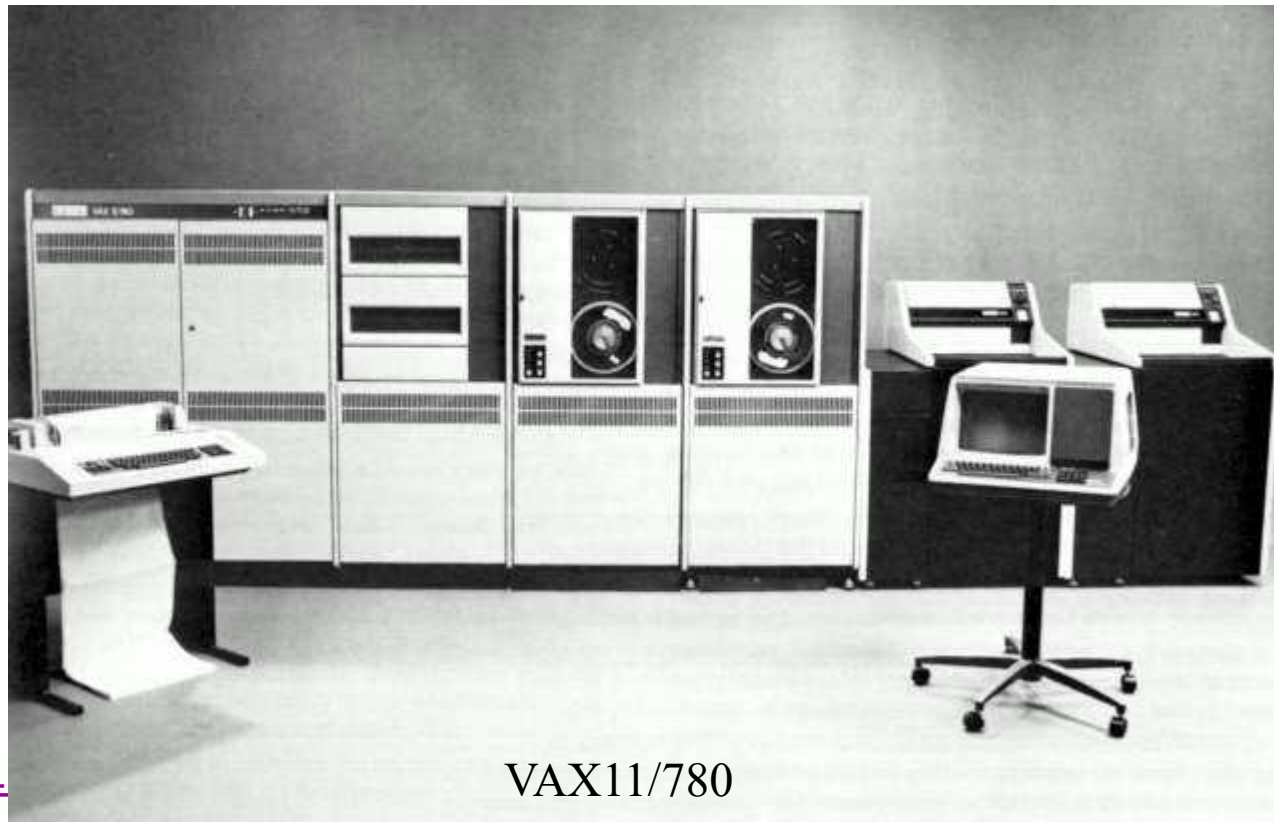
IBM360

# ミニコンピュータの発展

## ■ DEC ミニコンピュータ

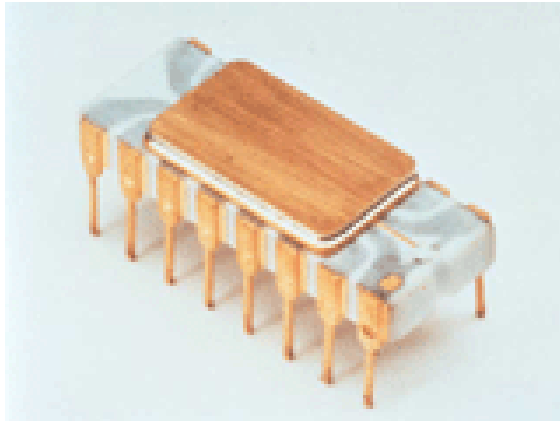
– PDP-11(1970–)

– VAX-11 (1977–): 1秒間に100万回の命令実行

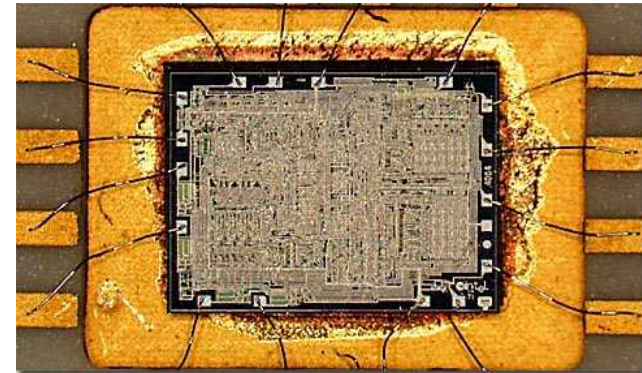


# マイクロプロセッサの発明

- Intel 4004: 電卓用マイクロプロセッサ (1971)
  - サイズ  $3 \times 4\text{mm}$
  - プロセス  $10\ \mu\text{m}$
  - トランジスタ 2,300個
    - ・ 今のプロセッサ: 数億個以上
  - クロック  $108\text{kHz}$ 
    - ・ Pentium4の3万~4万分の1



コンピュータアーキテクチャ



東大・坂井

# マイクロプロセッサの発展

---

## ■ ムーアの法則

- マイクロプロセッサの集積度・性能、メモリの集積度は毎年1.5倍～1.6倍になる

→ 常に指数関数的な進歩を遂げてきた

## ■ マイクロプロセッサ

- 1970年代はおもちゃ
- 1980年代はワープロ、表計算
- 1990年代から、インターネットとともに情報処理の主演



# マイクロコンピュータ全盛～情報機器の多様化

## ■ マイクロコンピュータ

- IBM PC/AT型
  - ・ Intel CPU + Microsoft Windows
- Apple Macintosh

## ■ 小型情報機器

- カーナビ
- PDA
- 携帯電話
- ユビキタスデバイス
  - ・ スマートダスト



デスクトップPC  
(DELL Optiplex)



iMac (Apple)



カーナビ  
(Carrozeria)



タブレット端末  
(iPad3)



携帯電話  
(Xperia Acro)

# スーパーコンピュータ

- スーパーコンピュータ: 超高速計算機
  - 天気予報・環境シミュレーション
  - 科学計算: 量子力学、有機化学、原子炉、宇宙
  - 流体計算: 宇宙船、自動車
  - Etc.



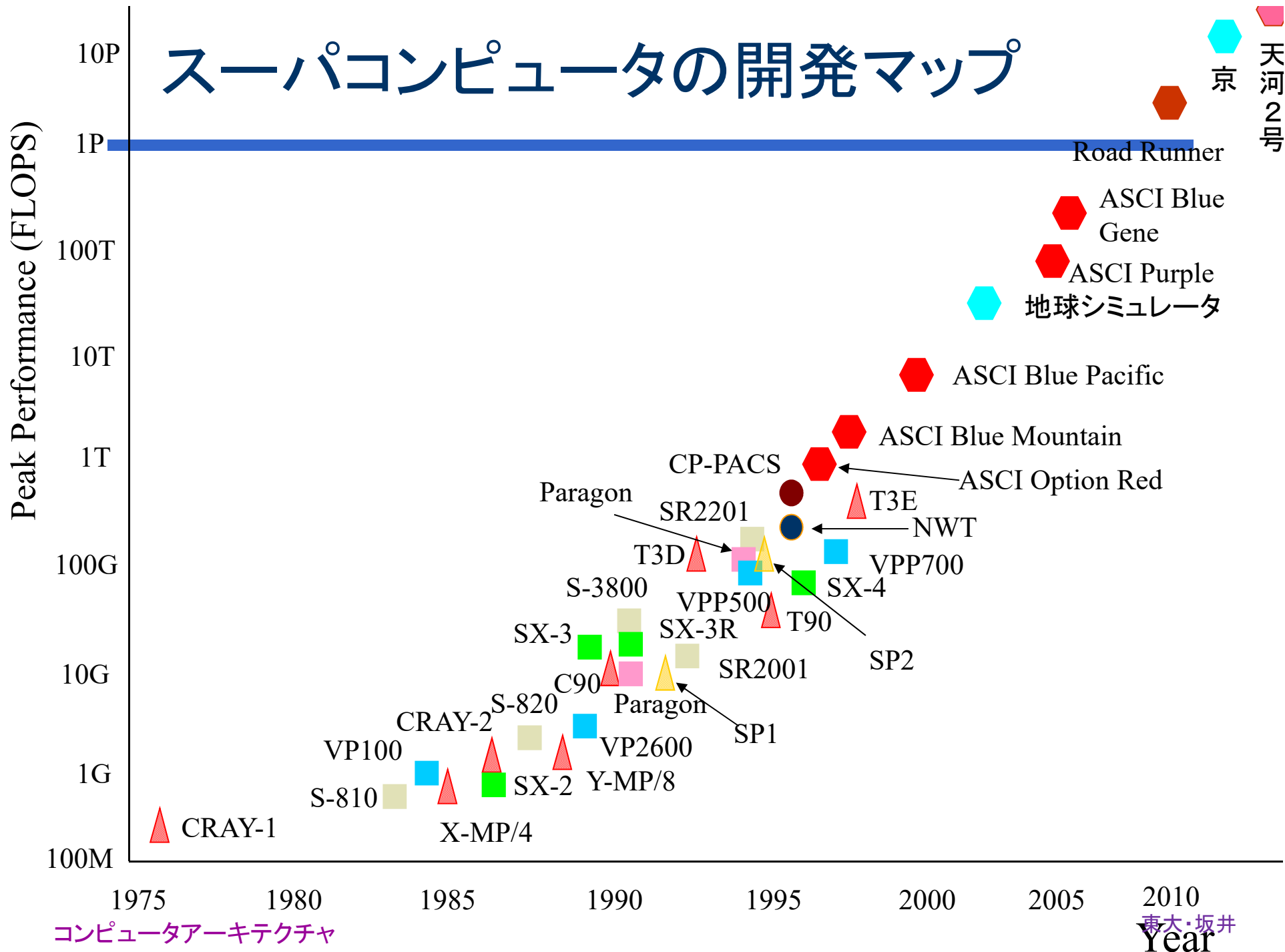
スーパーコンピュータCRAY-1 (1975)



京コンピュータ (2011)



# スーパーコンピュータの開発マップ



# どれぐらい速く・小さくなったか

## ■ 世界最高速のコンピュータの場合

ENIAC (1945) vs. 天河2号 (2014)

- 四則演算: 5000回/秒 → 5.5京回/秒
  - ・ 13桁の高速化
- CPU数 1 → 312万!
- 総消費電力: 160KW → 18MW!



## ■ マイクロプロセッサの場合

- Intel 4004(1972) vs. Intel Core i7 (2014)
- 四則演算(32ビット換算): 10000回/秒 → 100億-1000億回/秒
  - ・ 6-7桁の高速化
- 消費電力: 420mW → 130W!!
- トランジスタ数(CMOS換算): : 5000 → 10億



# これからのコンピュータ

## ■ もはや／もうすぐ

- ユビキタスコンピューティング
  - ・ 超小型情報機器
  - ・ どこにも、いつでも、どんな用途にでも
  - ・ 姿は見えないが静かに役に立つ
  - ・ IoT:すべての機器がネットにつながり、コンピュータ制御される時代
- 情報家電・個人用情報機器
  - ・ 介護用ロボット
  - ・ 愛玩用ロボット
- 電子政府・電子化社会
  - ・ 3D 電子会議
  - ・ 情報公開社会
  - ・ オープンガバナメント
  - ・ 直接民主制

## ■ だいぶん先？

- 脳や人体との合体
  - ・ 障害のカバー: 可視化など
  - ・ インターネットを「脳」で操作!?
  - ・ 倫理問題
- ナノテクとの合体
  - ・ 癌細胞除去
  - ・ 遺伝子修復
- 機械が本当の知能をもつ
  - ・ 「特異点を超えて」:カーツワイル
  - ・ ターミネーター
  - ・ マトリックス

→ 強い人工知能の発明は「人類最後の発明」となり、あとは機械が自発的に発明をするようになる!

# アーキテクチャ技術の展開

---

- 授業でやったこと
  - プログラム実行機構
  - 命令セットアーキテクチャ
  - パイプライン
  - キャッシュ、仮想記憶
  - 命令レベル並列処理
    - ・ VLIW
    - ・ スーパスカラ
    - ・ アウトオブオーダー実行
    - ・ リネーミング
  - 投機処理
- 大学院で学ぶこと
  - マルチプロセッサ
    - ・ 共有メモリ型
    - ・ メッセージ交換型
  - マルチスレッディング: SMT、ハイパースレッディングなどを含む
  - チップマルチプロセッサ(CMP): いわゆるマルチコア
  - ネットワークインタフェースの改良・高度化
  - 省電力アーキテクチャ
  - ディペンダブルアーキテクチャ
  - セキュリティ技術