

計算機構成論

Lecture 9

コンピュータシステムの性能評価

2023年度前期

情報理工学部 Rクラス担当

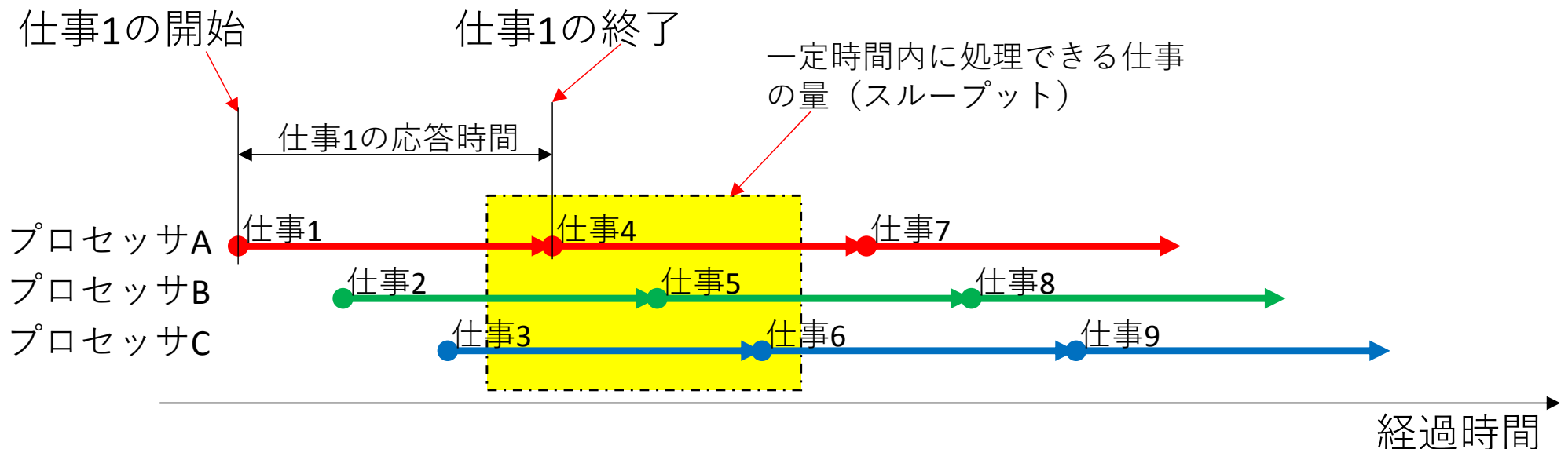
越智裕之

内容

- スループットと応答時間
 - CPU実行時間
 - CPUクロック・サイクル数、クロック・サイクル時間
 - CPI
 - ベンチマーク
 - アムダールの法則
 - 今後の計算機の展望 (Lecture 2再掲)
-
- 教材：教科書1.6から1.10
(から上記のトピックを抜粋)

スループットと応答時間

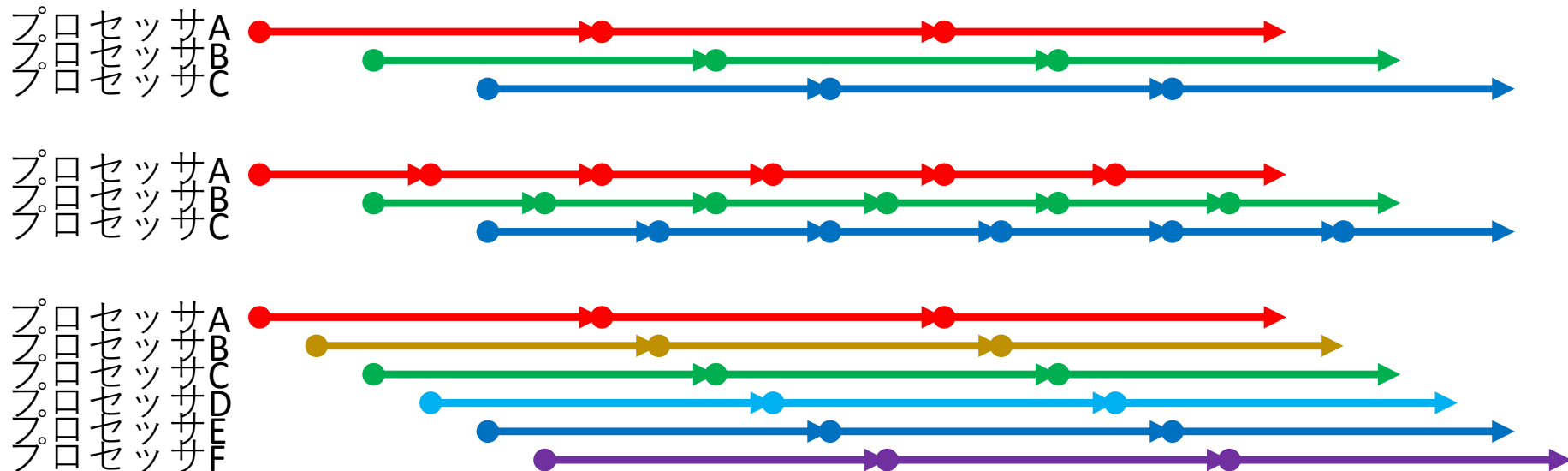
- 性能の2つの指標:
 - 応答時間（実行時間）
仕事(プログラム)の開始から終了までの時間
 - スループット
一定時間内に処理できる仕事の量



教科書p30の例題

下記の変更でスループットが増大するか応答時間が短縮されるか？

- ・ コンピュータのプロセッサを高価(高速)なものに変える。
- ・ 複数プロセッサを使用してタスクを分担しているシステムにプロセッサを追加する。



・2つの指標は通常関連する

- 速いプロセッサにより、が向上
- プロセッサの数を増やすと、通常はだけ向上
(場合は、両方の性能指標が向上)

実行時間の内訳

- 性能と実行時間は反比例

性能 = $1 / \text{実行時間}$

(「実行時間が半分」だと、「性能が2倍」という。)

- 実行時間 = 応答時間 = 経過時間

- CPUが実際に処理を行った時間: ユーザーCPU時間
- OSのオーバーヘッドの作業時間: システムCPU時間
- I/O、ディスクアクセス、メモリアクセス時間

CPU(実行)時間

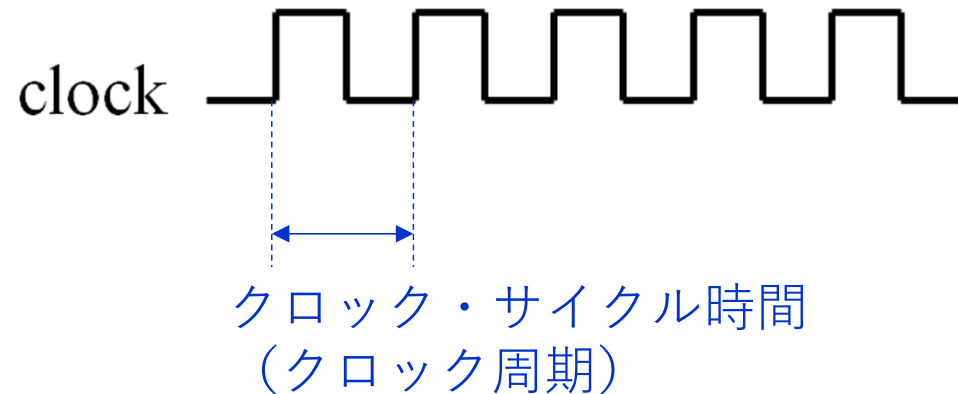
The UNIX “time” command breaks up the wall clock time
as user and system time

CPU実行時間の計算式

あるプログラムのCPU実行時間 =
そのプログラム実行に必要なCPU クロック・サイクル数
x クロック・サイクル時間

クロック・サイクル時間 (クロック周期) = $1 / \text{クロック周波数}$

周波数4GHzのプロセッサのクロックサイクル時間 = 秒



演習問題 その①

クロック周波数2GHzのコンピュータAで10秒で実行できるプログラムProcAがある。別のアーキテクチャのコンピュータBではProcAを実行させると、コンピュータAの1.2倍のクロック・サイクル数が必要らしい。コンピュータBでProcAを6秒で実行させるには、そのクロック周波数はいくらにしないといけないか？

時間がないと省略：教科書p34の例題そのままなので、自習してください
(テスト範囲)

演習問題 その①：回答例

$$10\text{秒} = (\text{クロック・サイクル数}) \times \frac{1}{2.0 \times 10^9}$$

より, ProcAをコンピュータAで動かした時の
クロックサイクル数 $= 2.0 \times 10^{10}$

この1.2倍のサイクル数は 2.4×10^{10} なので

$$6\text{秒} = 2.4 \times 10^{10} \times \text{クロック・サイクル時間}$$

より, 答えは, 4.0GHz

実は、1クロックサイクルで1命令とは限らない

- ・複雑な命令(乗算、割り算など)は複数クロック・サイクル必要
- ・メモリアクセスは状況により必要なクロック・サイクル数は変化する
- ・パイプライン処理、投機的実行などをするプロセッサでは状況により、1つの命令に必要なクロック・サイクル数は変化する

CPI: Clock cycles Per Instruction
= 命令あたりの平均クロック・サイクル数

教科書p35

*普通一つのプログラム全体での平均を取る。

あるプログラム実行に必要なCPU クロック・サイクル数
= そのプログラムの実行命令数 \times CPI

プログラム実行時間をCPIを使って書くと

あるプログラムのCPU実行時間 =
そのプログラムの実行命令数 \times CPI \times クロック・サイクル時間

演習問題 その②

同じ命令セット・アーキテクチャだが、その計算機の実現方法が異なるコンピュータAとコンピュータBがある。それぞれのクロック・サイクル時間は、コンピュータAは250psで、コンピュータBは500psである。あるプログラムに対して、コンピュータAのCPIが2.0、コンピュータBのCPIが1.2である。このプログラム実行時間は、コンピュータAとBではどちらがどれだけ速いか？

時間がないと省略：教科書p35そのままなので、自習してください(テスト範囲)

演習問題 その②：回答例

あるプログラムの実行命令数を I とする.

実行時間 $=I \times \text{CPI} \times \text{クロックサイクル時間}$ なので,

$$A \text{ の実行時間} = I \times 2.0 \times 250 \text{ ps}$$

$$B \text{ の実行時間} = I \times 1.2 \times 500 \text{ ps}$$

なので, A が B より1.2倍速い

性能の比較の方法：ベンチマーク

- 計算機Aは、プログラム1を1秒、プログラム2を1000秒
 - 計算機Bは、プログラム1を10秒、プログラム2を100秒
- どちらが性能がいいか？
- 多くのプログラムに対して、平均を取って競い合えばいい。
⇒どんなプログラムに対して評価するか？
- ベンチマーク: コンピュータの性能評価を目的としたプログラム

SPEC: System Performance Evaluation Corporation

- ベンチマークを策定している組織
 - SPEC CPU92, SPEC CPU2006 SPEC Power
 - 実際に良く使われるアプリケーションが使われている。
- SPEC CPU 2006 にはCINT2006（整数演算），CFP2006（浮動小数点演算）の2種類がある
- SPEC CPU 2017が現在の最新
- SPECpowerベンチマーク： サーバのワット当たりの計算性能を評価

Intel Core i7 920のCINT2006の評価

プログラムの実行命令数 × CPI × クロック・サイクル時間 = CPU実行時間

Description	Name	Instruction Count x 10 ⁹	CPI	Clock cycle time (seconds x 10 ⁻⁹)	Execution Time (seconds)	Reference Time (seconds)	SPECratio
Interpreted string processing	perl	2252	0.60	0.376	508	9770	19.2
Block-sorting compression	bzip2	2390	0.70	0.376	629	9650	15.4
GNU C compiler	gcc	794	1.20	0.376	358	8050	22.5
Combinatorial optimization	mcf	221	2.66	0.376	221	9120	41.2
Go game (AI)	go	1274	1.10	0.376	527	10490	19.9
Search gene sequence	hmmer	2616	0.60	0.376	590	9330	15.8
Chess game (AI)	sjeng	1948	0.80	0.376	586	12100	20.7
Quantum computer simulation	libquantum	659	0.44	0.376	109	20720	190.0
Video compression	h264avc	3793	0.50	0.376	713	22130	31.0
Discrete event simulation library	omnetpp	367	2.10	0.376	290	6250	21.5
Games/path finding	astar	1250	1.00	0.376	470	7020	14.9
XML parsing	xalancbmk	1045	0.70	0.376	275	6900	25.1
Geometric mean	—	—	—	—	—	—	25.7

幾何平均

教科書図1.18

*アプリケーションによってCPIの値に5倍の開きがある

SPECpower_ssj2008 for Xeon X5650

Target Load %	Performance (ssj_ops)	Average Power (Watts)
100%	865,618	258
90%	786,688	242
80%	698,051	224
70%	607,826	204
60%	521,391	185
50%	436,757	170
40%	345,919	157
30%	262,071	146
20%	176,061	135
10%	86,784	121
0%	0	80
Overall Sum	4,787,166	1,922
$\Sigma ssj_ops / \Sigma power =$		2,490

教科書図1.19

10%刻みでサーバの負荷を変化せて消費電力を測り、
 $\Sigma ssj_ops / \Sigma power$ で評価

Amdahl's Law (アムダールの法則)

教科書1.10節

プログラムのある部分をいくら高速化したとしても、全体としての性能向上は、改善を行った部分の割合で制約される。

$$\text{改善後の実行時間} = \frac{\text{改善の影響を受ける実行時間}}{\text{改善度}} + \text{改善の影響を受けない実行時間}$$

「どんなプログラムでも、1000台のコンピュータを並列に動かせば、原理的に1000倍速くなる。でも、いろんなオーバーヘッドがあるのでそこまでは早くなれないけど、ま、100倍ぐらいは早くなるでしょう、」なんて適当なことという技術者にはならないように.....

例: ウェブサーバー: 90% CPU、10% が I/O の処理

- 10倍速いCPUを使うと、全体の時間はどうなるか？
- 100倍だと？
- 1000倍だと？
- 無限に速いCPUを使ったら？

* 演習問題その③をやってください！

ムーアの法則

1.5年で一定面積当たりのトランジスタ数が2倍ぐらいに

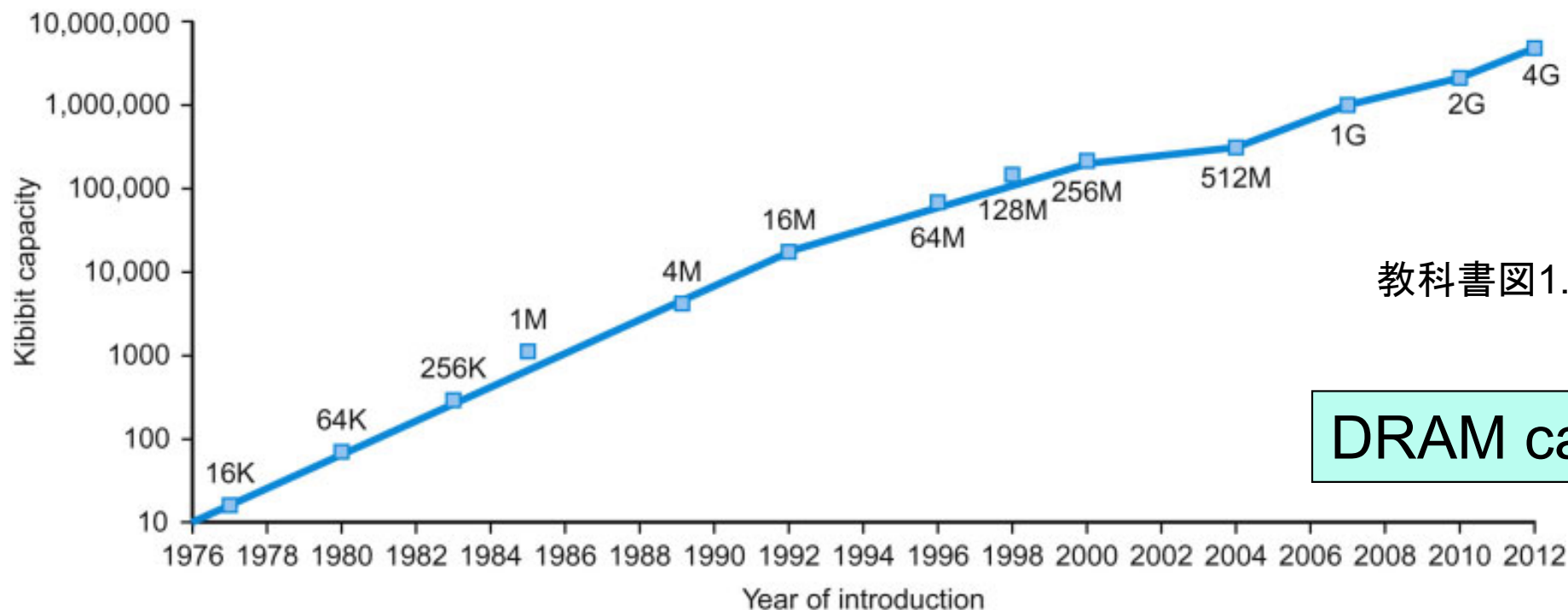
- 容量 Up
 - 性能 Up
 - コスト Down
- 】につながる

相対コスト性能比の変遷

教科書図1.10 (英語版)

Year	Technology used in computers	Relative performance/unit cost
1951	Vacuum tube	1
1965	Transistor	35
1975	Integrated circuit	900
1995	Very large-scale integrated circuit	2,400,000
2013	Ultra large-scale integrated circuit	6,200,000,000

←トランジスタの線幅が1.5年で $1/\sqrt{2}$ 倍になるといっている。

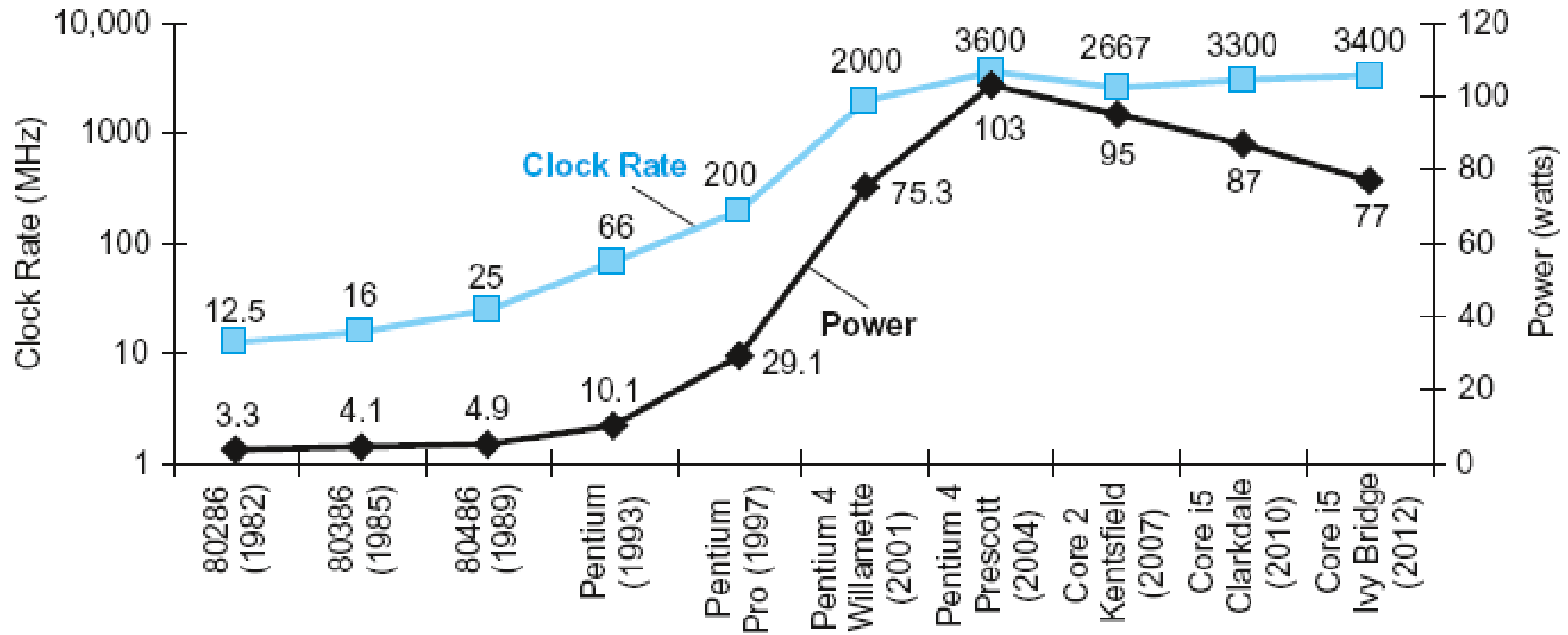


教科書図1.11 (英語版)

Power Trends

教科書図1.16 (英語版)

Lec. 2再掲



- CMOSの場合

$$\text{Power} = \text{Capacitive load} \times \text{Voltage}^2 \times \text{Frequency}$$

× 30

5V → 1V

× 1000

教科書p41の相対電力の計算問題

- 新しいCPUは従来に比べて
 - 容量性負荷，電圧，周波数がすべて85% とすると電力はどうなるか？

$$\frac{P_{\text{new}}}{P_{\text{old}}} = \frac{C_{\text{old}} \times 0.85 \times (V_{\text{old}} \times 0.85)^2 \times F_{\text{old}} \times 0.85}{C_{\text{old}} \times V_{\text{old}}^2 \times F_{\text{old}}} = 0.85^4 = 0.52$$

■ 電力の壁：

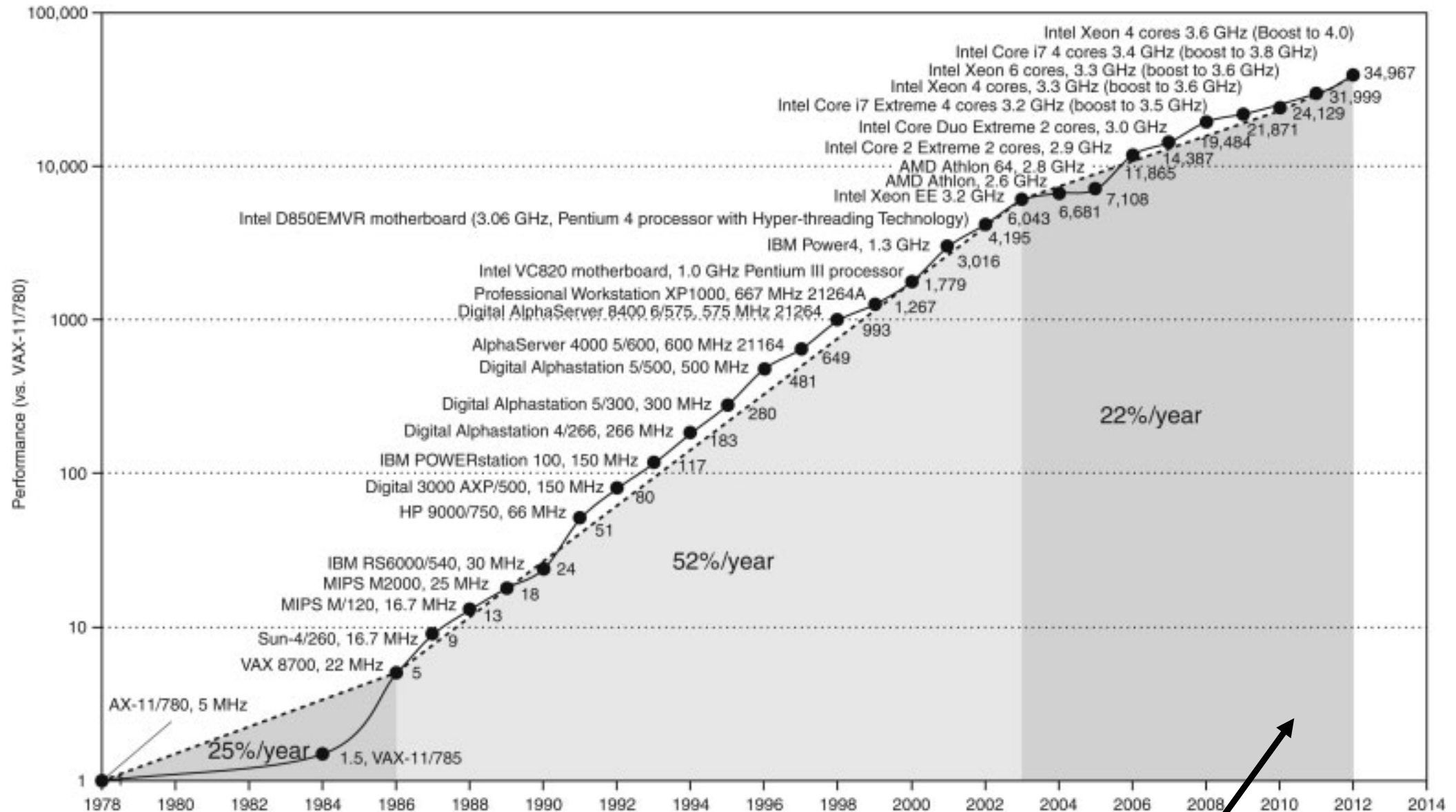
- 現状の電圧をさらに下げるのは難しい
- 発熱の問題

→ 単体プロセッサの性能向上の限界（次ページ）

→ マルチプロセッサ，マルチコアへ

単体プロセッサの性能向上

教科書図1.17 (英語版)



Constrained by **power**, instruction-level parallelism, memory latency

Lec. 9での要チェック用語集

スループット

応答時間

実行時間

CPU時間

ユーザーCPU時間

システムCPU時間

クロック・サイクル数

クロック・サイクル時間

CPI

SPECベンチマーク

アムダールの法則

演習問題 その③

すべての浮動小数点命令の速度が5倍速くなるようにコンピュータを機能改善したとする。その機能改善の前だと、あるベンチマークの実行時間が10秒であったとする。その10秒の半分が浮動小数点命令の実行に費やされていたとすると、この機能改善による速度向上比はどうか。

演習問題 その④ (ある英語講義スライドより拝借)

Note that

execution time = clock cycle time x number of instructions x CPI

Question: Which of the following two systems is better? Why?

- A program is converted into 4 billion MIPS instructions by a compiler; the MIPS processor is implemented such that each instruction completes in an average of 1.5 cycles and the clock speed is 1 GHz
- The same program is converted into 2 billion x86 instructions; the x86 processor is implemented such that each instruction completes in an average of 6 cycles and the clock speed is 1.5 GHz