

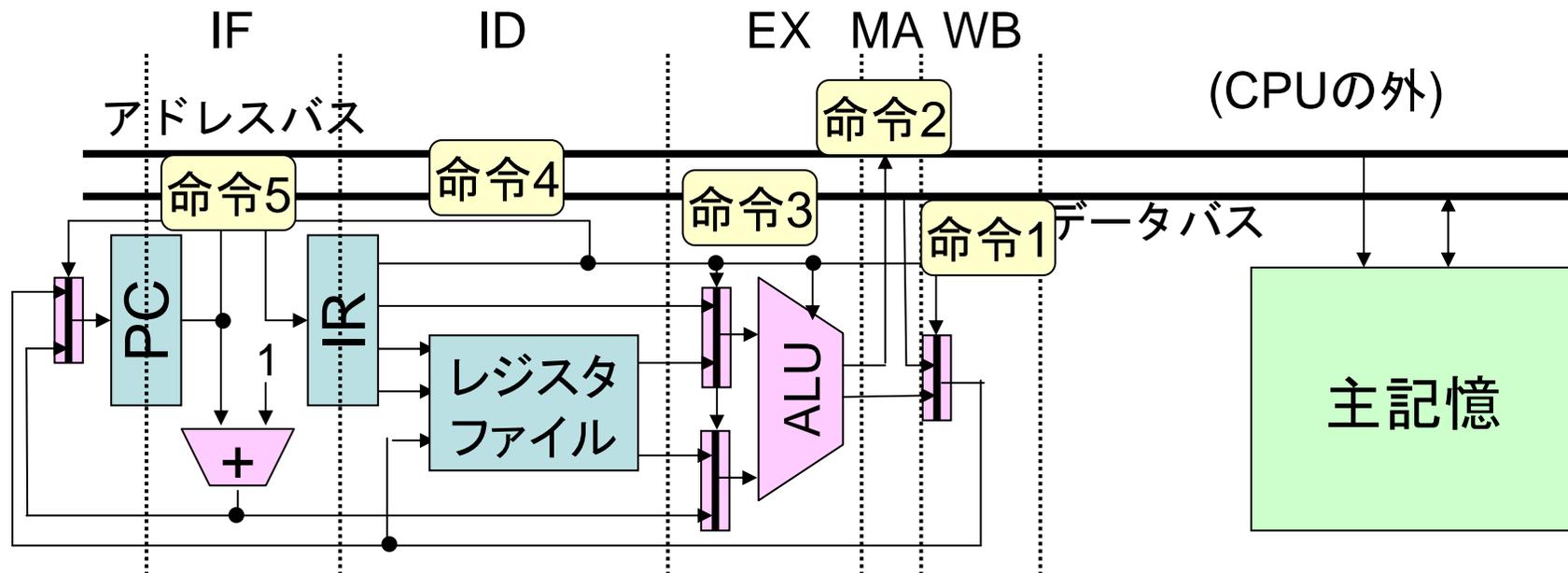
(5) CPUの高速化技術

- CPUが高速化するとあらゆる処理が早くなる
->様々な高速化技術が提案されている
- 紹介する高速化技術
 - パイプライン処理
 - RISCとCISC
 - スーパスカラ
 - VLIW(Very Long Instruction Word)
 - マルチプロセッサ

(a) パイプライン処理

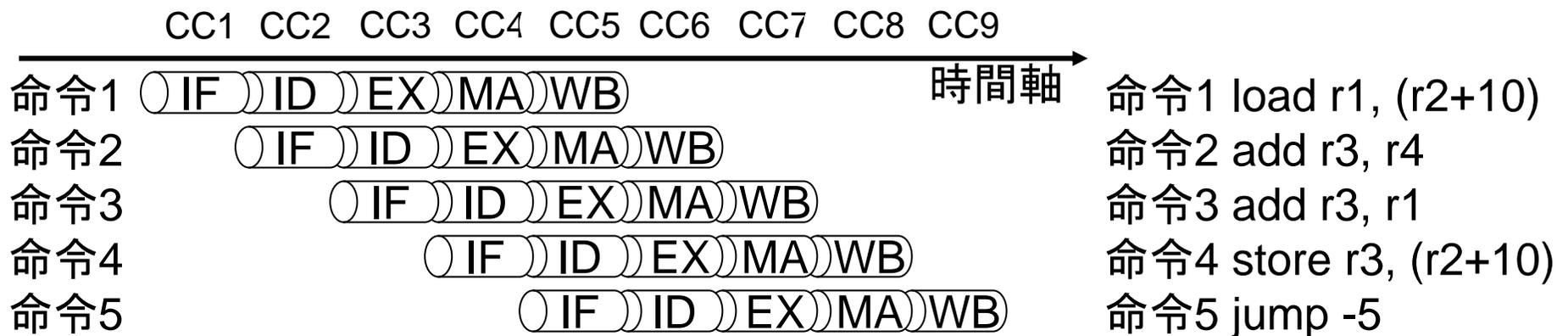
- ベルトコンベア上の流れ作業をイメージ
- 現在はさらに細かく作業を分割
 - スーパーパイプライン
- 流れ作業が停止することもある
 - **パイプラインストール**と呼ぶ
 - 原因はXXハザードと名づけられている

命令1 load r1, (r2+10)
命令2 add r3, r4
命令3 add r3, r1
命令4 store r3, (r2+10)
命令5 jump -5



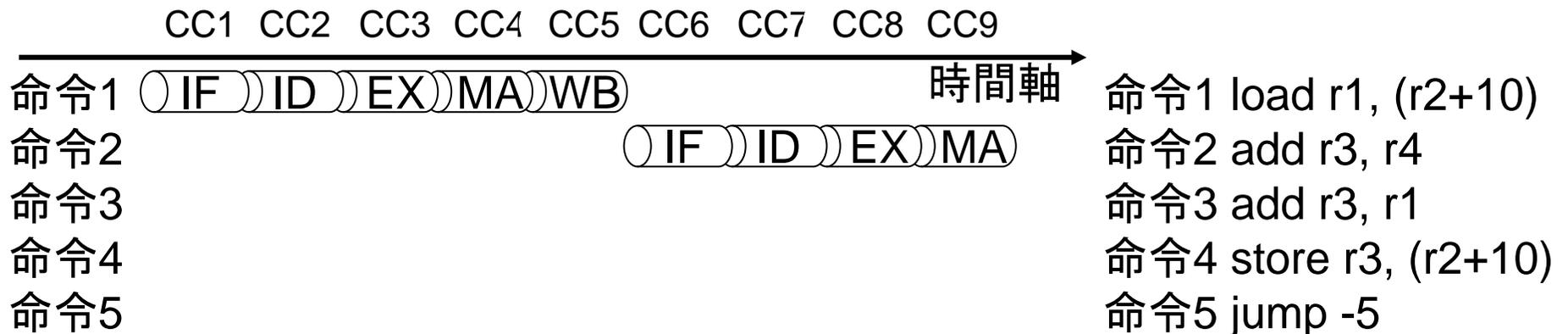
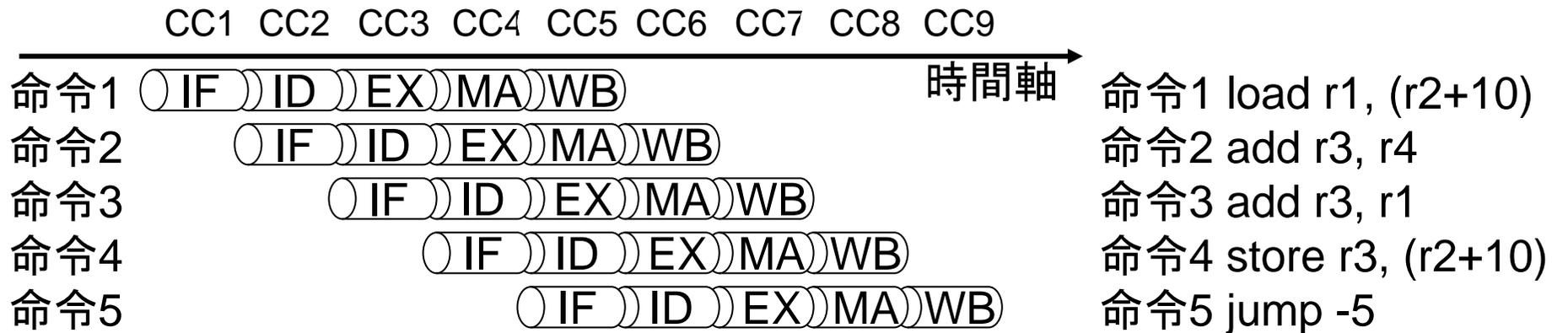
パイプライン処理の時間軸表記

- 下記のような時間軸を用いた表現も行う
 - 時間の単位は**クロックサイクル**(CC)
 - 同一クロックサイクルの処理は上下方向で表される
 - 前の図はCC5の状態



パイプライン化なしとの時間軸の比較

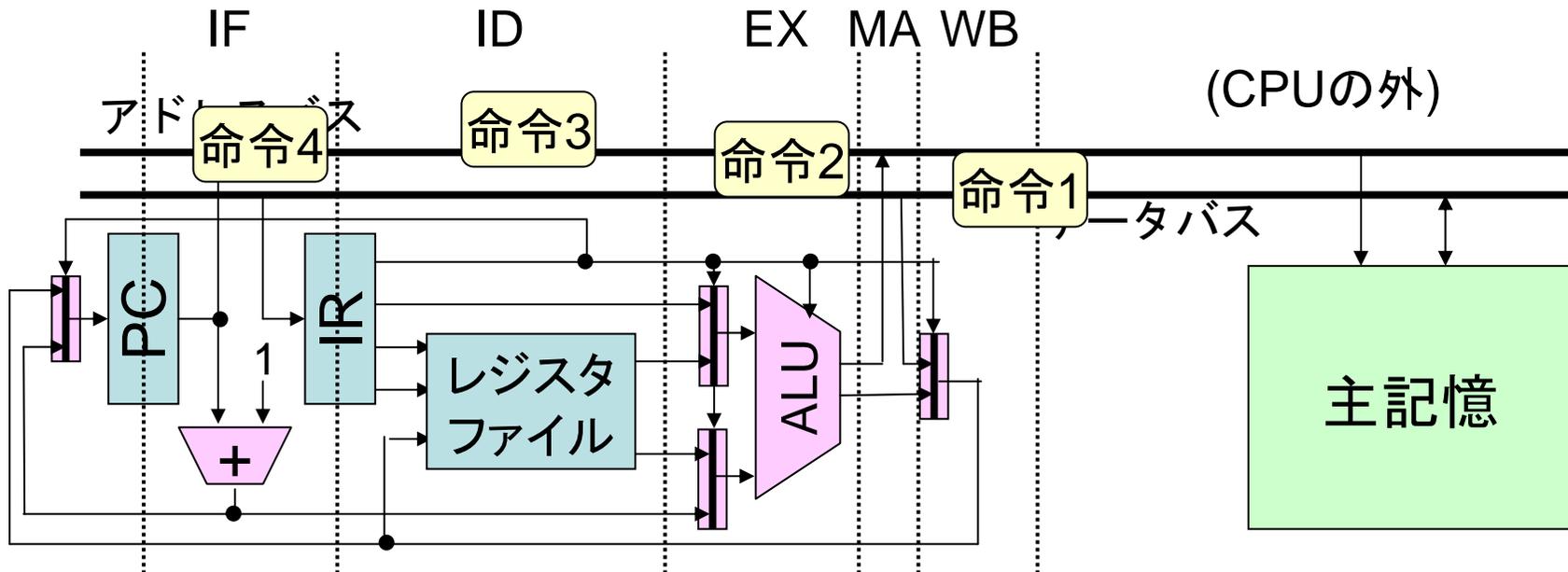
- パイプライン化ありは9クロックサイクル(CC)で終了
- パイプライン化なしは $5 \times 5 = 25$ CCで終了



データハザード

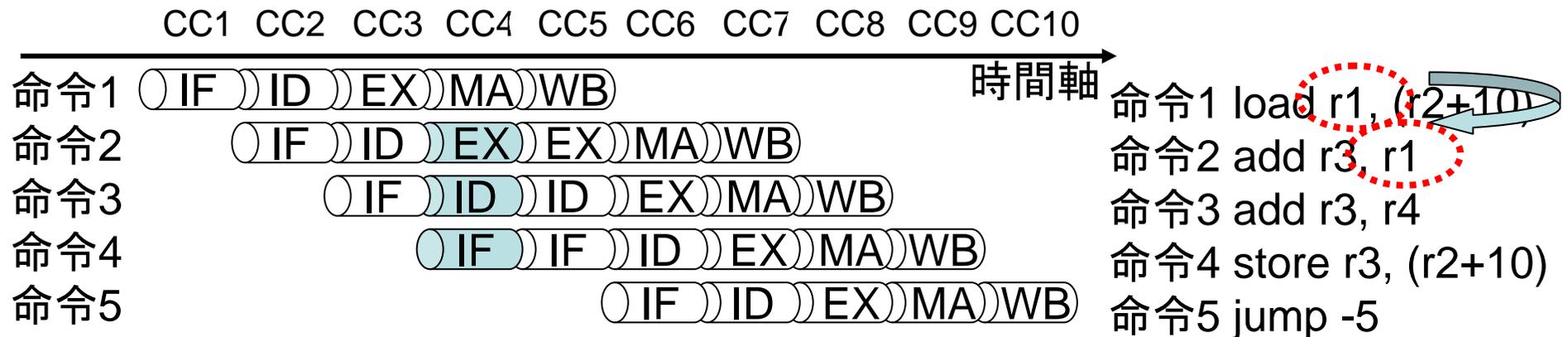
- 処理すべきデータが届いていないことが原因
 - 命令2が使うデータは命令1が主記憶読み出し中
 - 命令1のMA終了まで命令2はEXで待機
 - 後続命令も玉突きで待機

命令1 load r1, (r2+10)
命令2 add r3, r1
命令3 add r3, r4
命令4 store r3, (r2+10)
命令5 jump -5



データハザード

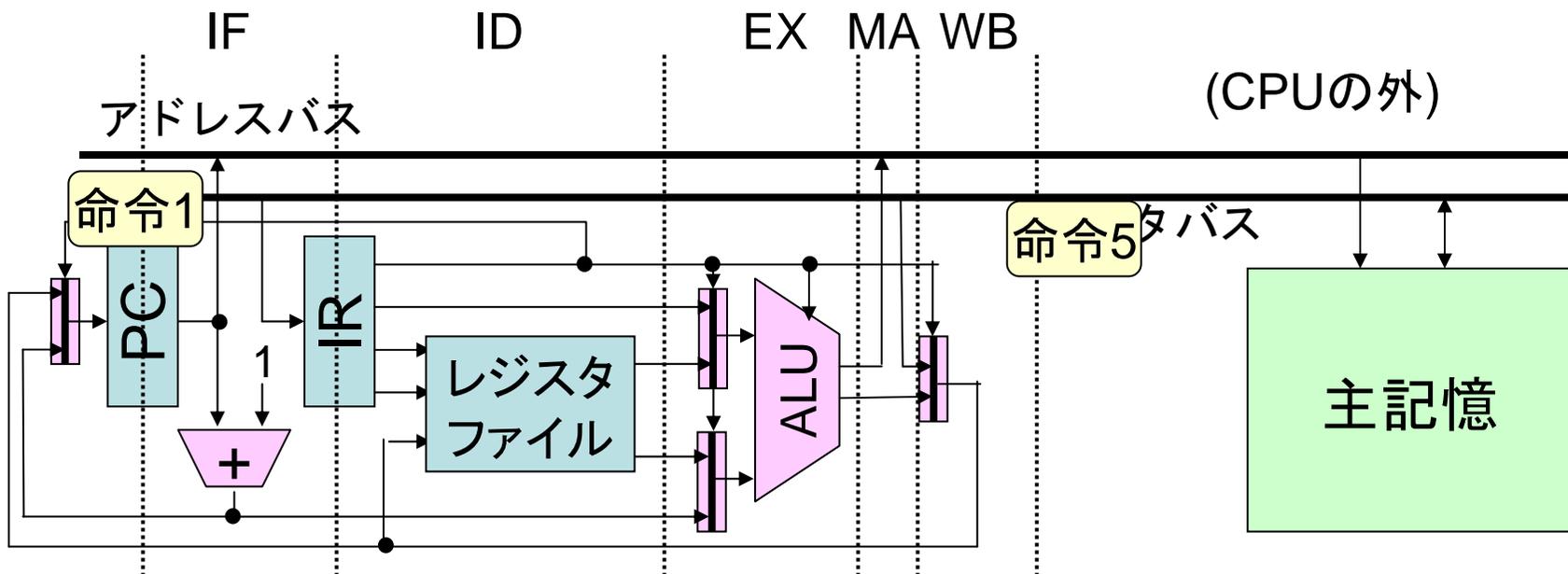
- 時間軸表記は以下のようなになる
 - 色塗り部がストール状態
 - 次CCでも同一のステージに存在
 - 終了が1CC伸びる
- **データフォワーディング**というデータハザード軽減のテクニックはすでに使われている
 - 演算結果をレジスタファイルを経さずに後続に渡す



制御ハザード

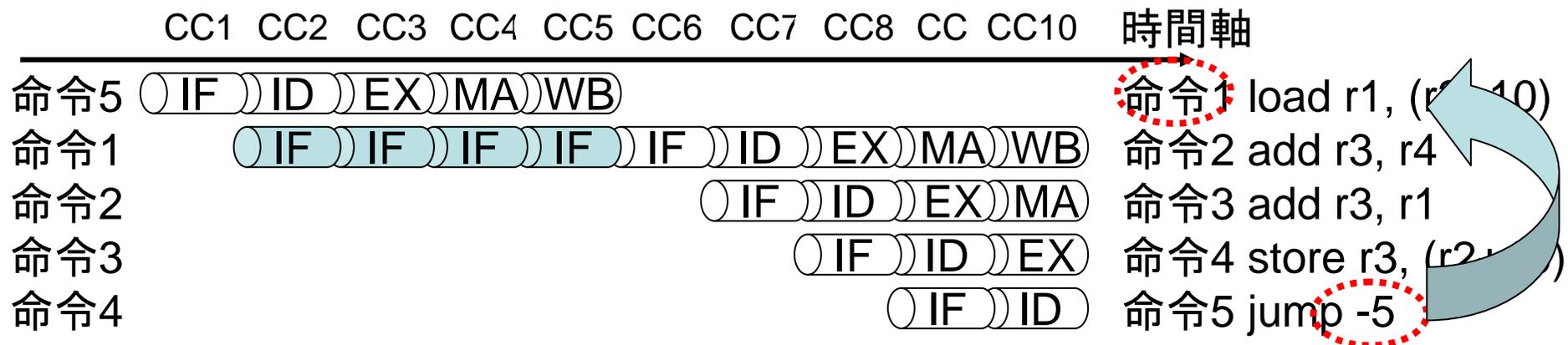
- 分岐命令の後の命令は分岐命令が完了するまでフェッチできない
 - PCが正しい値に更新されていないため

命令1 load r1, (r2 + 10)
命令2 add r3, r4
命令3 add r3, r1
命令4 store r3, (r2 + 10)
命令5 jump -5



制御ハザード

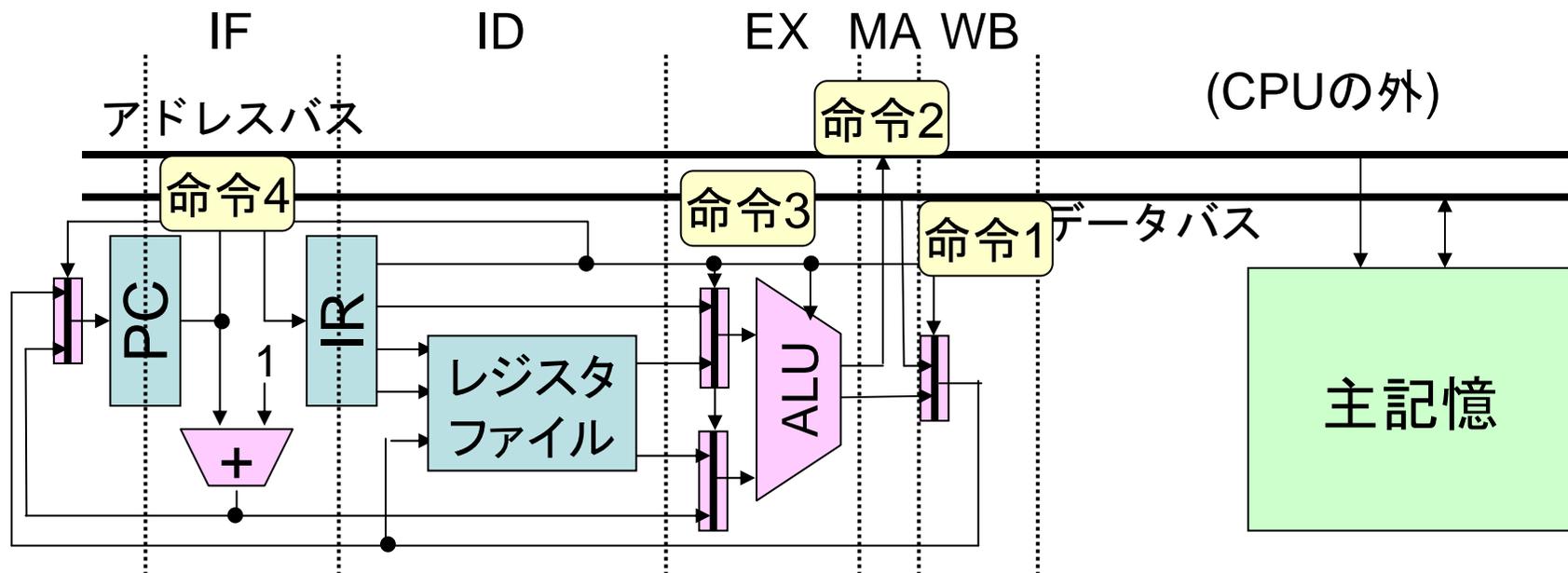
- PCが正しい値になるまで次の命令はストールする
- 分岐予測などの軽減策がある
 - 分岐先を予測してあらかじめフェッチしておく
 - パイプラインが長い(細かく分割)するほど影響大



構造ハザード

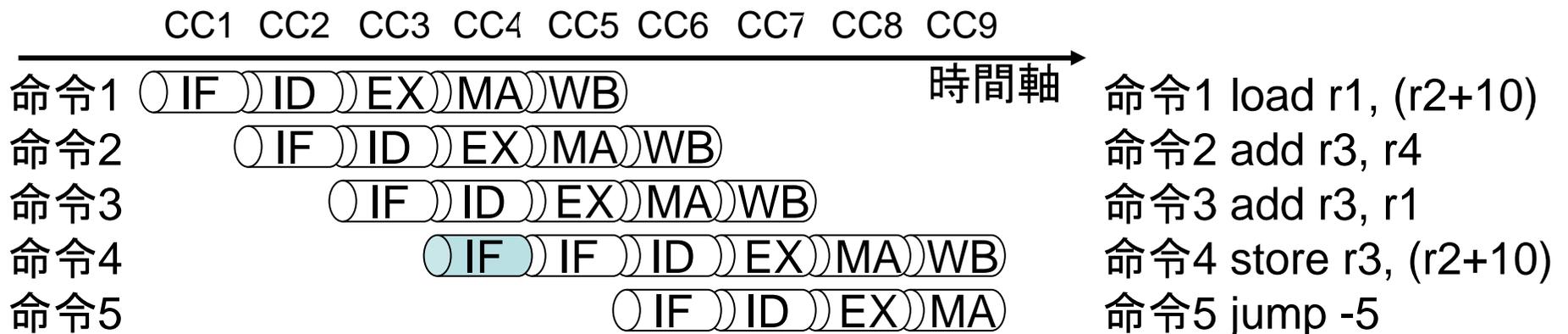
- ハードウェア数が不足することなどによるハザード
 - 下記では主記憶アクセスの競合

命令1 `load r1, (r2+10)`
命令2 `add r3, r4`
命令3 `add r3, r1`
命令4 `store r3, (r2+10)`
命令5 `jump -5`



構造ハザード

- 先の命令である命令4を優先して命令1のフェッチをストールさせる
- 対策
 - ハードウェアを増やす
 - 命令専用メモリとデータ専用メモリを準備



(b) RISCとCISC

- RISC(Reduced Instruction Set Computer)
 - 1つの機械語命令を1クロックサイクルで実行できるように揃える
 - パイプライン処理を効果的に行う
- CISC(Complex Instruction Set Computer)
 - 1つの機械語命令で複雑な動作を行う命令セット
 - パイプライン処理には向いていない
 - 命令によってパイプラインの段数が大きく変わったりする
 - 現在はRISCに近い命令に分解して実行することも多い

○ IF) ID) EX) MA) WB

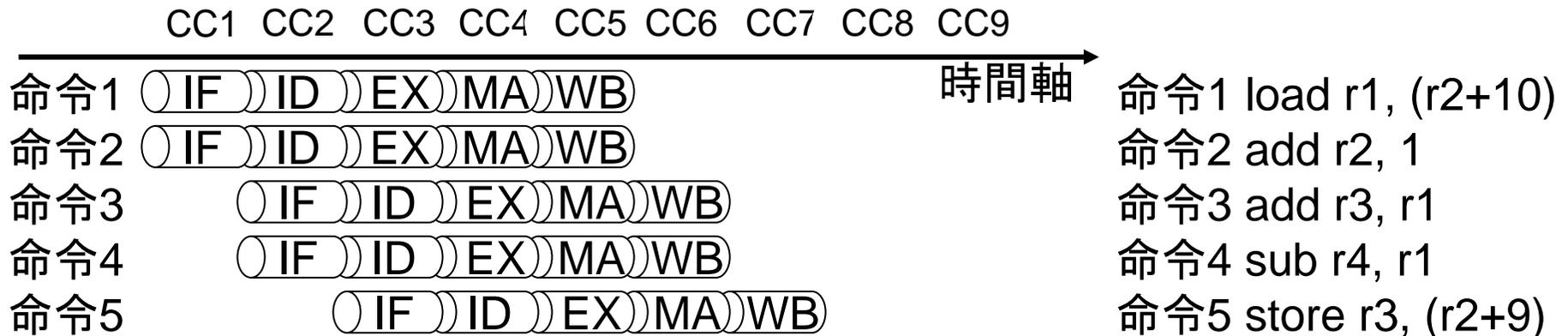
○ IF) ID) MA) MA) EX) MA) WB

命令1 add r3, r4

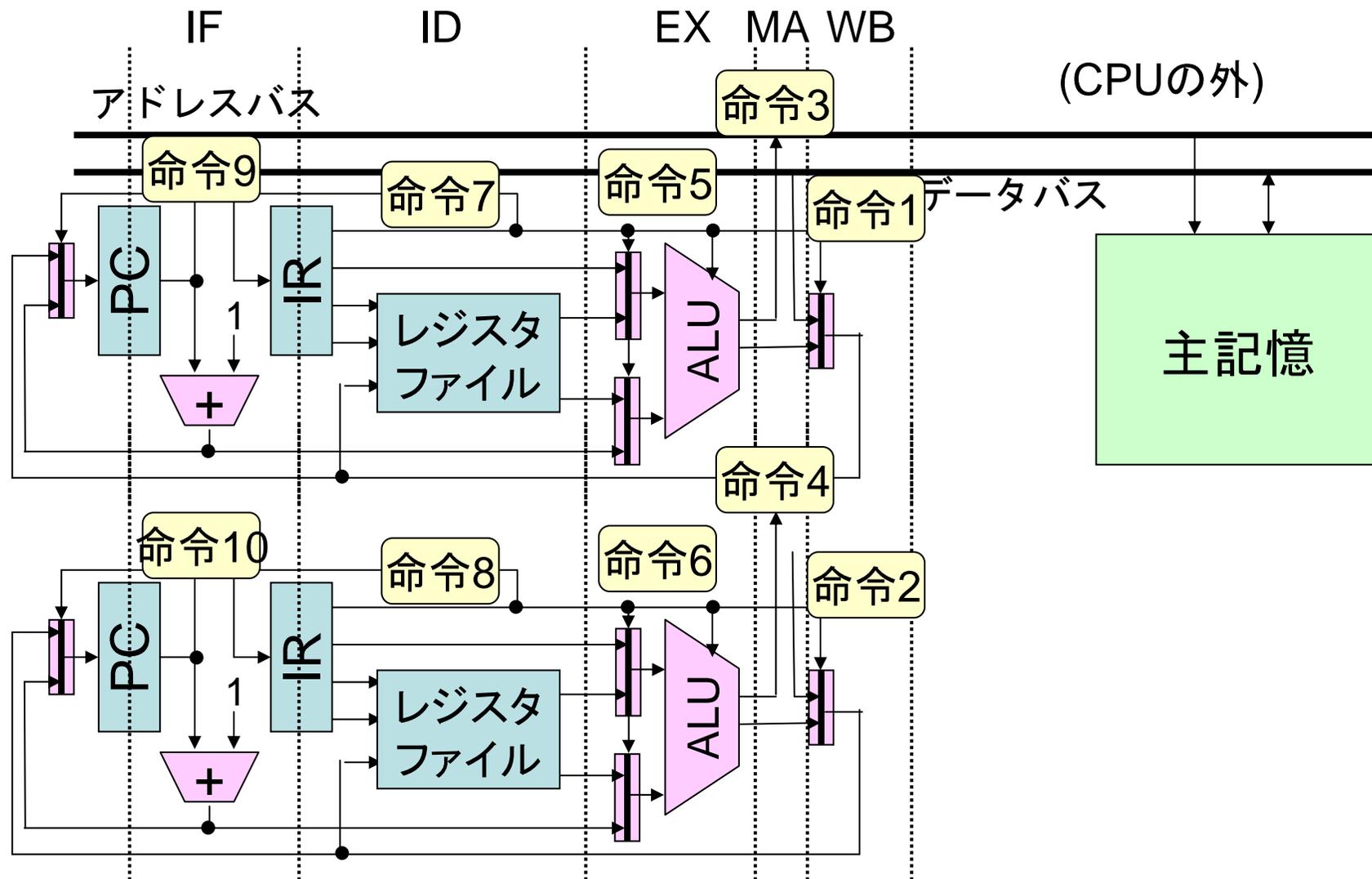
命令2 add (r3), (r4)

(c) スーパースカラ

- 命令実行に必要な論理回路を複数準備して並列実行
 - n命令並列: n-wayスーパースカラ
 - 理想的な状態では、CPIは1/nになる
- 同時に実行する演算の間でハザードが発生しないように注意する必要がある
- 3-way以上では**アウトオブオーダー実行**も併用する必要がある
 - アウトオブオーダー実行: 数十命令程度をいちどバッファに溜め、プログラム順によらず、その中から実行可能な物を実行してゆく方式



(c) スーパースカラ



(d) VLIW(Very Long Instruction Word)

- 複数の演算を定義できる命令を準備
 - 命令長が長くなる ->VLIW(命令)と呼ぶ
- VLIW命令への複数の演算の割付はコンパイラが実行
 - ハードウェアが並列実行可能か判定するスーパスカラとは対照的
 - ハードウェアが簡単になる

通常の命令

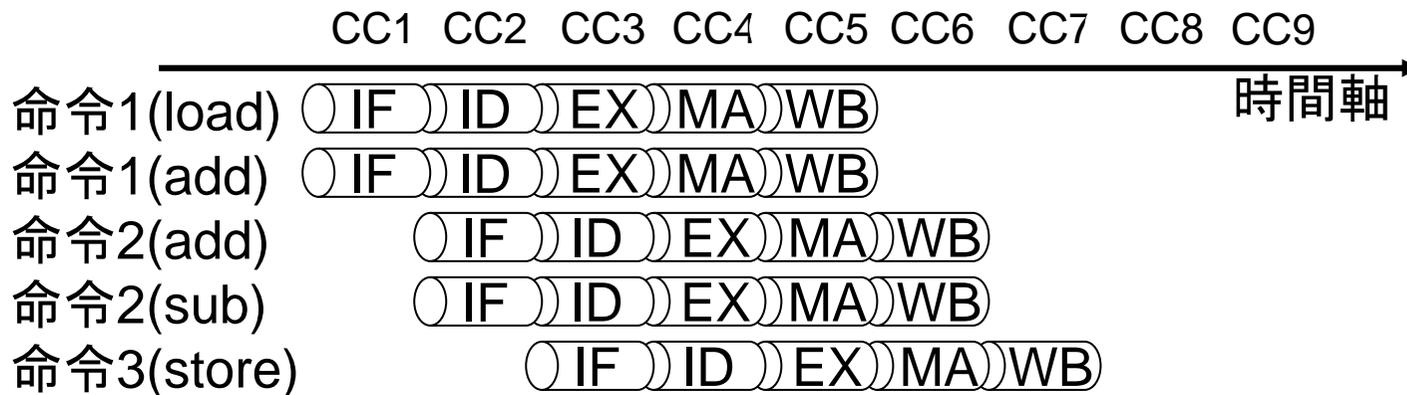
命令1 load r1, (r2+10)
命令2 add r2, 1
命令3 add r3, r1
命令4 sub r4, r1
命令5 store r3, (r2+9)

VLIW命令

命令1 [load r1, (r2+10)][add r2, 1]
命令2 [add r3, r1][sub r4, r1]
命令3 [store r3, (r2+9)][[]]

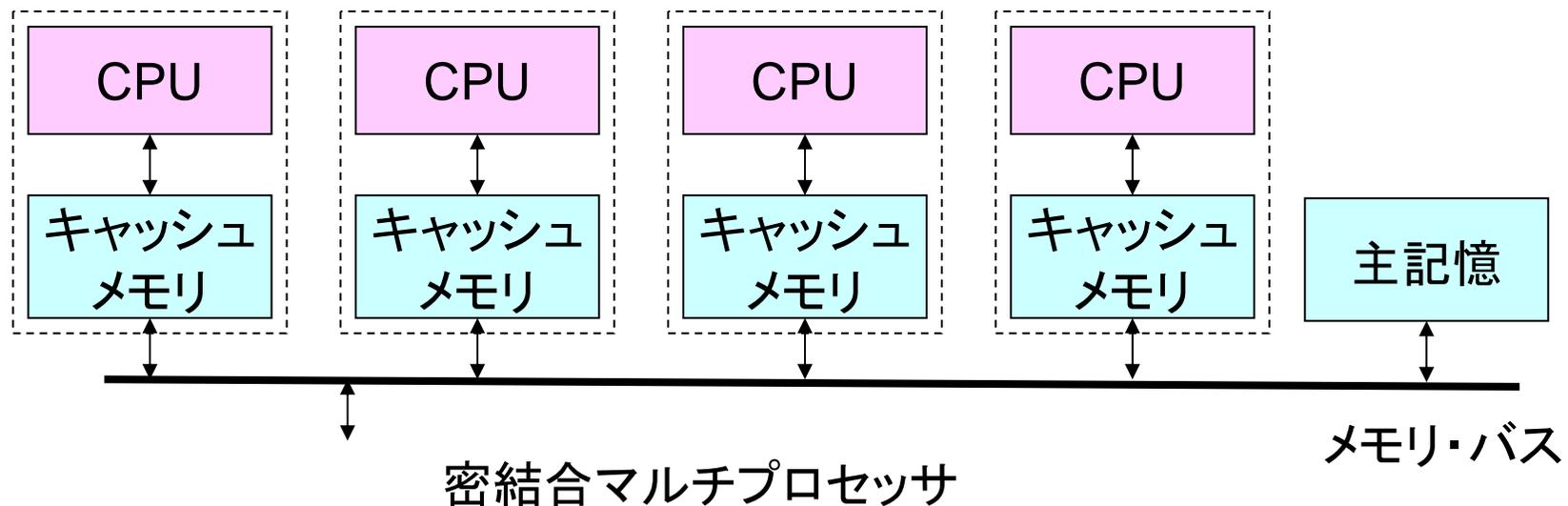
(d) VLIW(Very Long Instruction Word)

- ハードウェア構成はスーパースカラに似た形となる
- CPIは理想的には $1/n$ となる
 - n は1VLIW命令に記述できる演算の量



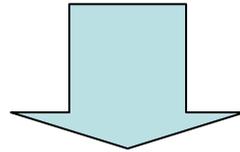
(e)マルチプロセッサ

- 複数のCPUを搭載し、処理を分散させることにより処理性能を向上させる技術
 - 疎結合マルチプロセッサ
 - 各CPUはそれぞれ主記憶装置をもち、OSも別々にできる
 - 密結合マルチプロセッサ
 - 各CPUが一つの主記憶装置を共有し、一つのOSで稼動
 - マルチコアプロセッサ



3.4 記憶階層のアーキテクチャ

- CPUが高速化しても次に処理すべきデータが来ないとうなる？
->CPUはデータを待つ(ストール)



- 記憶階層もきっちり設計しないと性能は出ない
 - 要求->読み出しまでの時間である**アクセス時間(レイテンシ)**の短縮
 - 1秒あたりのデータ転送量である**バンド幅**の拡大

参照の局所性

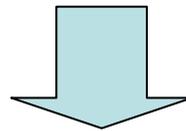
データの読み書きは分散しているわけではない

- 空間的局所性

- あるデータを読み書きした後は、近くのデータを読み書きする確率が高い

- 時間的局所性

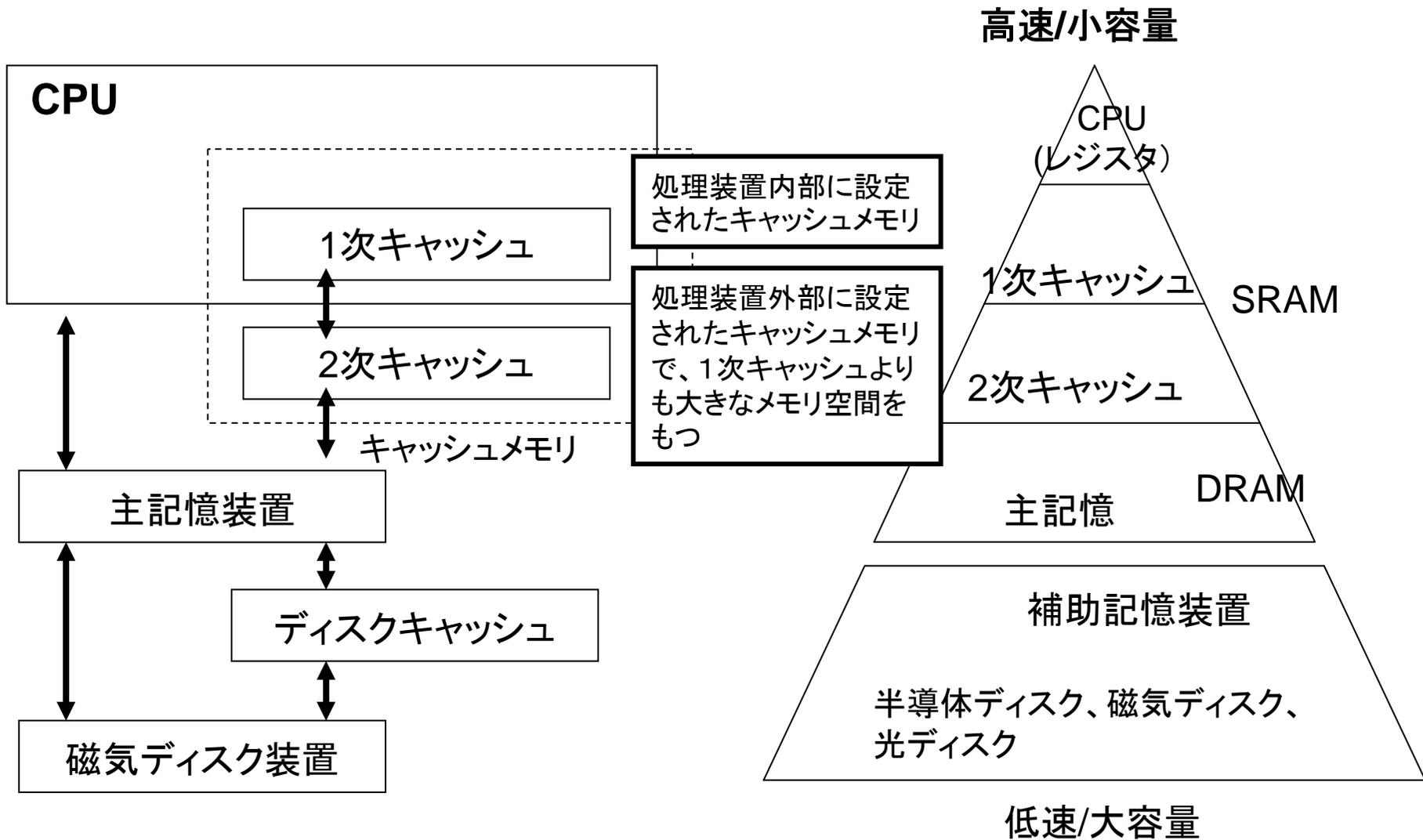
- あるデータを読み書きした後は、一定時間内に、再度そのデータを読み書きする確率が高い



- キャッシング

- 一度読み書きしたデータをまわりの物ごと高速な記憶装置に移す
- 高速な記憶装置を**キャッシュメモリ**と呼ぶ

記憶階層



最近の記憶階層の傾向

- 1次キャッシュは命令用とデータ用に分かれる
 - 狭義のハーバードアーキテクチャ
 - 本来は命令用主記憶とデータ用主記憶を作るアーキテクチャ
- 2次キャッシュもCPU内部に乗る傾向にある
- 3次キャッシュも搭載される傾向にある
 - マルチコアプロセッサでは、CPUコア間で共有
- ディスクキャッシュにSSDを使う例が出ている
 - 速度はDRAMより遅いが大容量

(2) メモリのアクセス時間

- 複雑な記憶階層では、読み出し要求の結果は記憶階層どこで返ってくるか分からない
->平均のアクセス時間を用いる

[平均アクセス時間の例1]

= 主記憶装置へのアクセス時間・(1 - キャッシュヒット率)
+ キャッシュメモリへのアクセス時間・キャッシュヒット率

例：主記憶のアクセス時間80ns、1次キャッシュのアクセス時間10ns、
1次キャッシュのヒット率90%
アクセス時間 = $80 \times (1 - 0.9) + 10 \times 0.9 = 8 + 9 = 17\text{ns}$

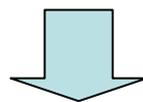
演習

次の記憶階層の平均アクセス時間を求めよ

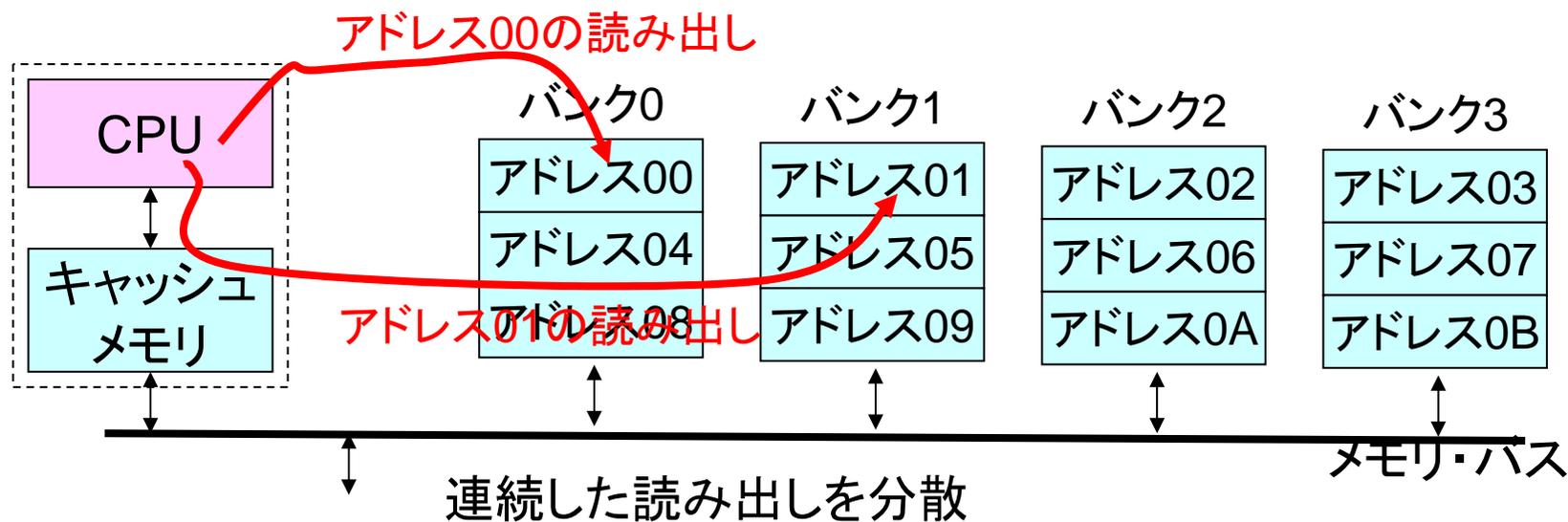
- 1次キャッシュで読み出される確率80%
- 1次キャッシュは1nsでアクセス可能
- 2次キャッシュで読み出される確率10%
- 2次キャッシュは10nsでアクセス可能
- 主記憶で読み出される確率10%
- 主記憶は100nsでアクセス可能

(3) メモリインタリーブ

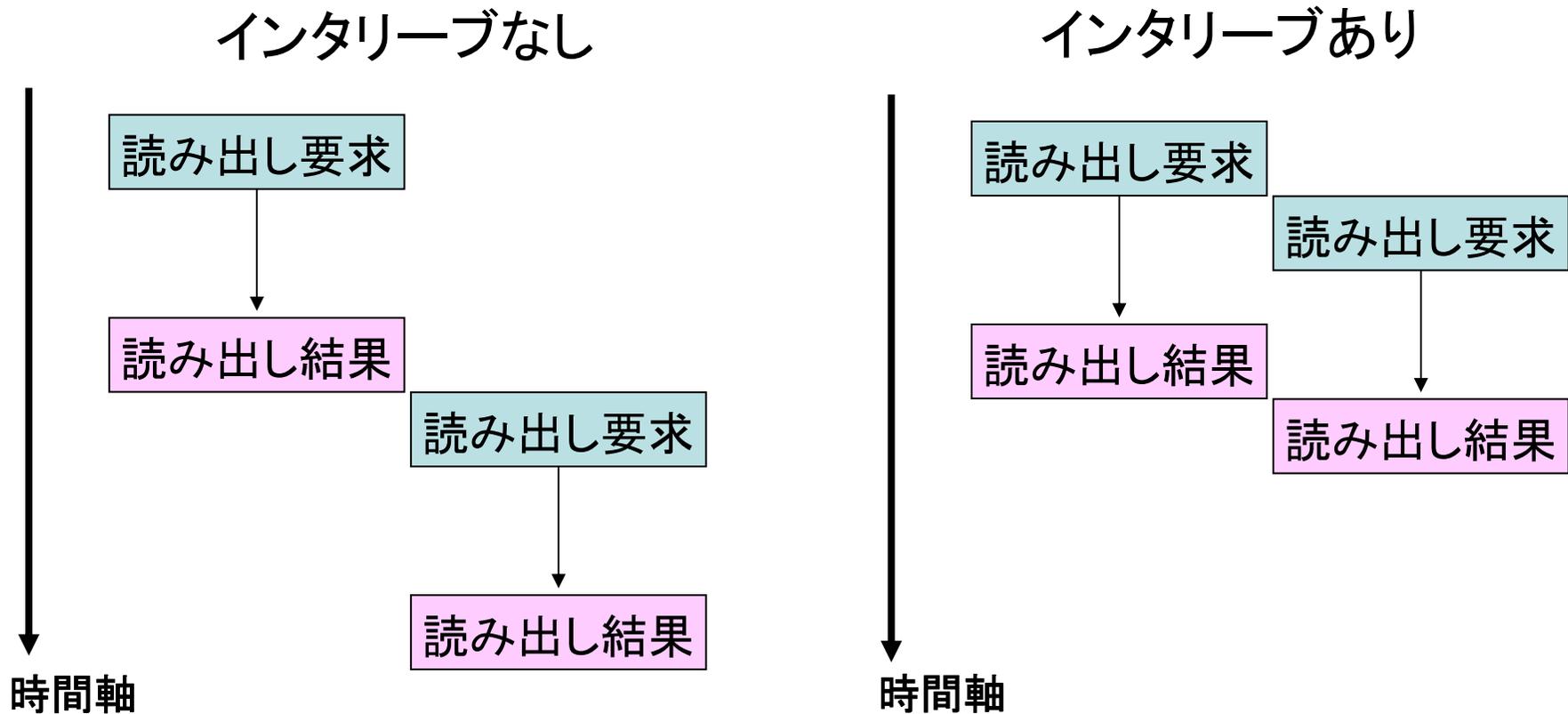
- CPUよりも主記憶の方が動作速度が遅い
 - 連続して読み出しをかけると待たされることが多い
 - 1次キャッシュあたりまでは連続読み出し可能



- 主記憶を**バンク**に分割して並列に読み書き可能にする
 - さらに連続した読み出しを分散させる



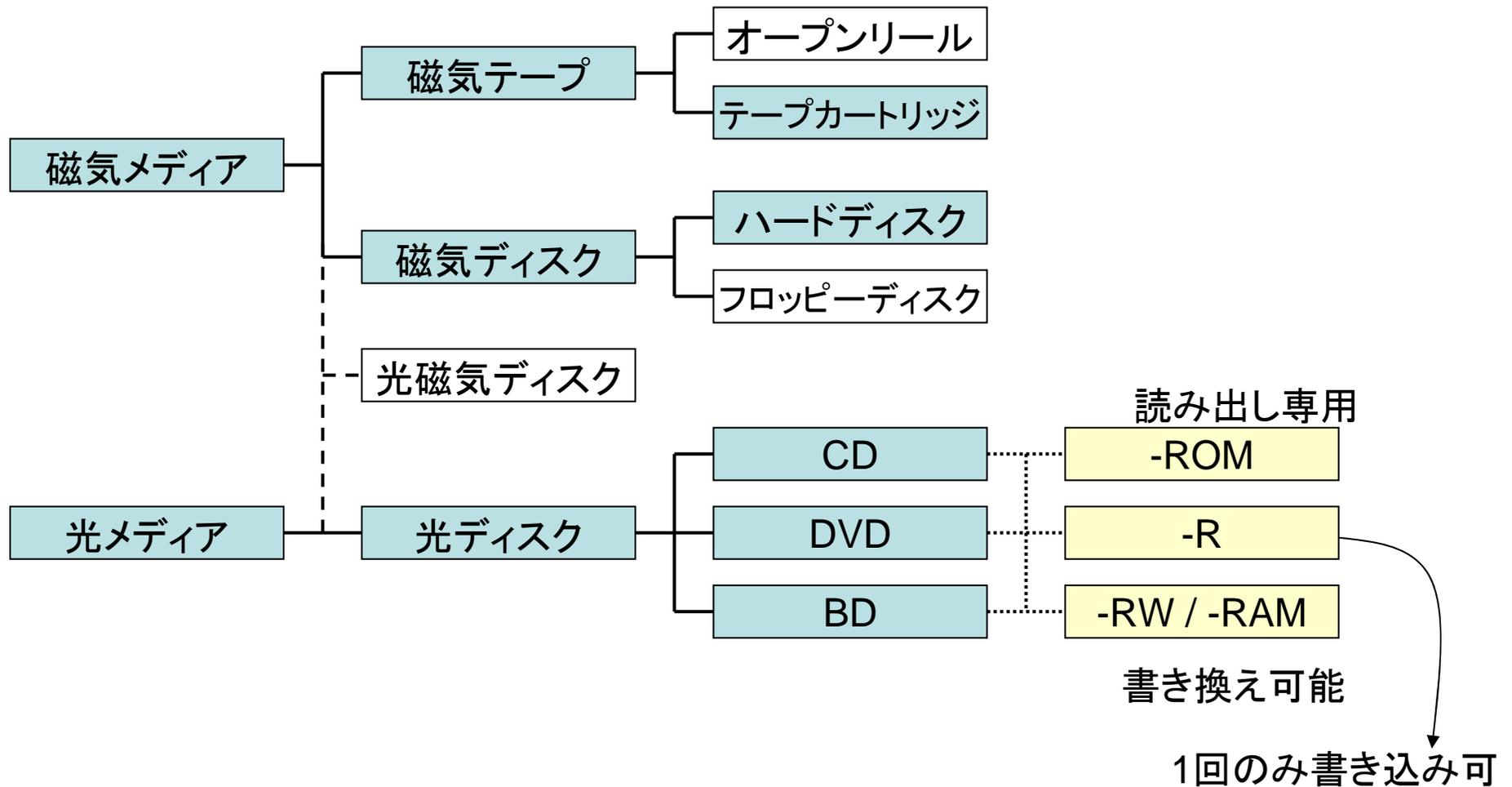
(3) メモリインタリーブ



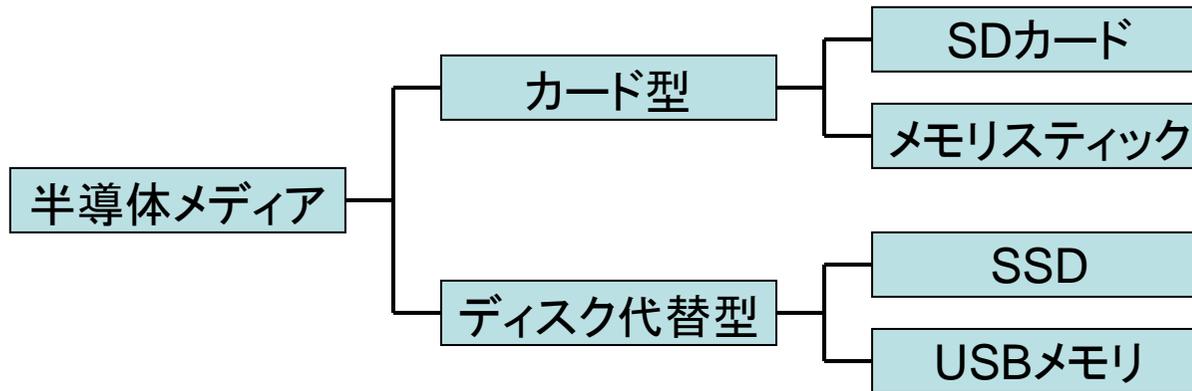
- あくまで理想状態の結果で、アドレス00->04->08のようなアクセスには効果がないことに注意

3.5. 入出力装置としての補助記憶装置

様々な補助記憶装置



様々な補助記憶装置



- 新たなメディアによって廃れる記憶装置もある
 - そもそも、メジャーになれなかったものも多数
- 近年では半導体メディアが勢力拡大中

情報の記録方法の違い

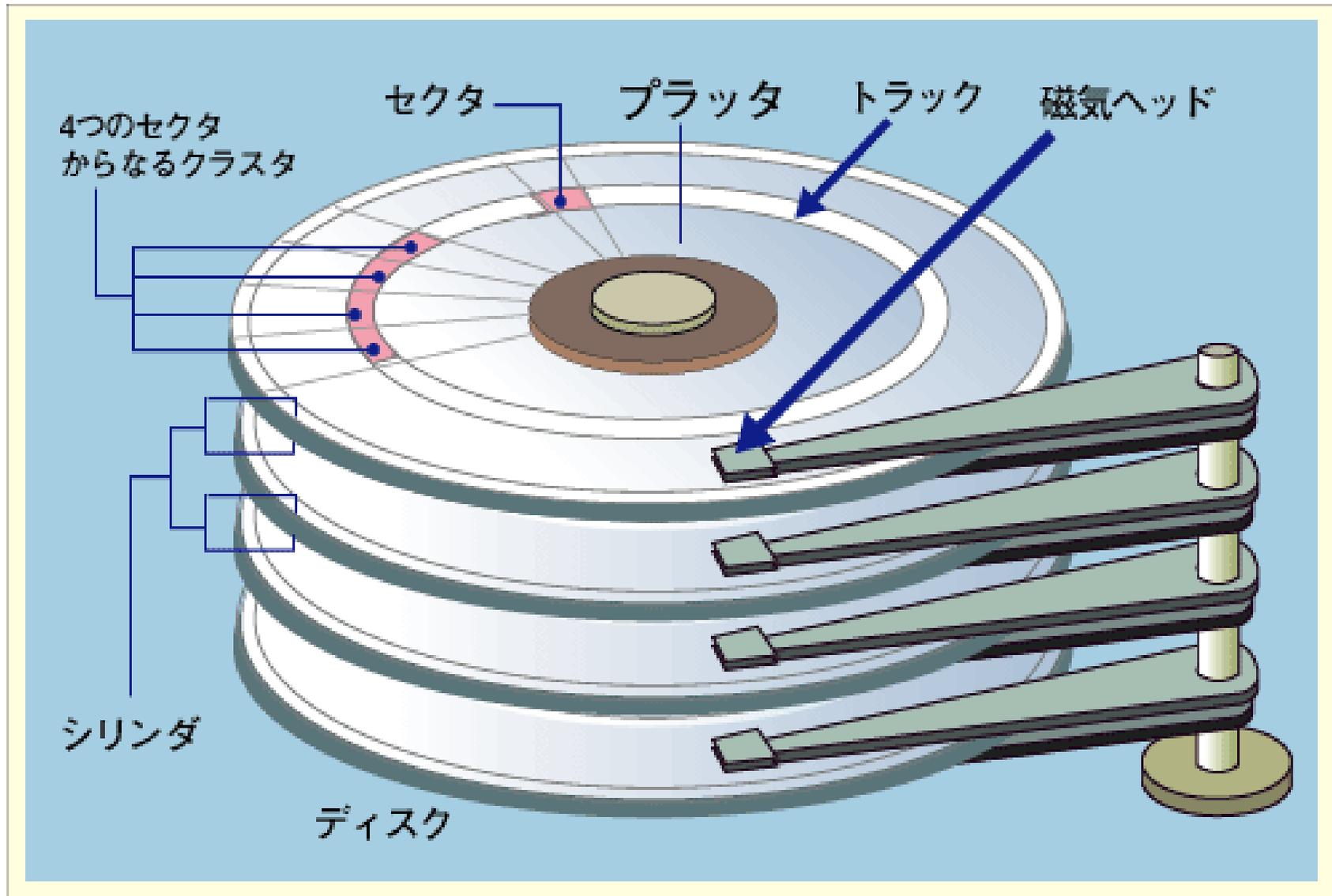
- 磁気メディア：磁気の方角(NS/SN)で0/1を記録
- 光ディスク：メディアにレーザー光を照射して、その反射率の違いを0/1とする
- 光磁気ディスク：メディアにレーザー光を照射して、その偏光の違いを0/1とする
- 半導体メディア：フラッシュメモリなどの不揮発性のICメモリに記録

(1)磁気メディア

(1.1) 磁気ディスク(ハードディスク、HDD)

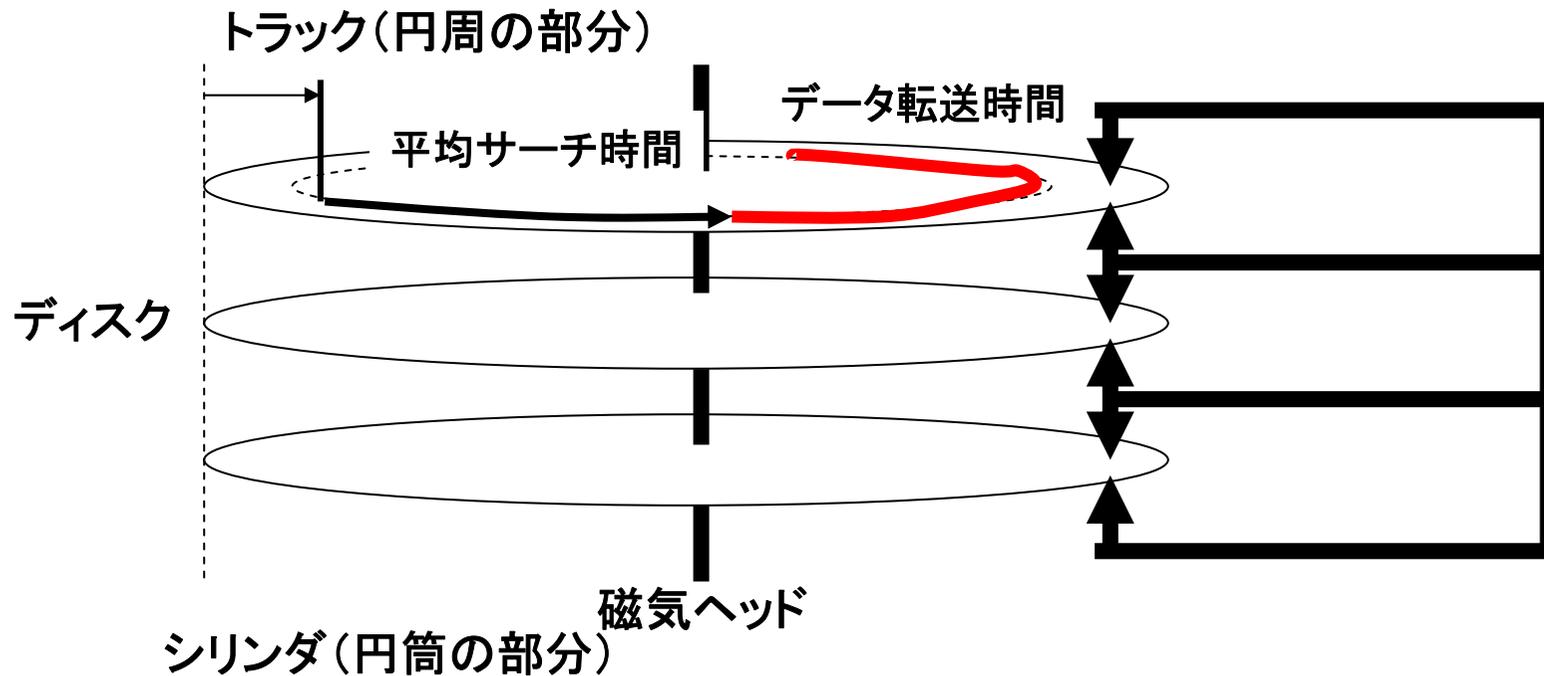
- データ構造
 - ディスクの同心円状にいくつかのトラックを配置
 - トラックを扇状にいくつかのセクタに分割
 - 複数のディスクを配置し、同一の位置のトラックの集合をシリンダとする
 - 磁気ヘッドはディスク間で同期して動く
- データはセクタ単位で書かれる
 - いくら小さなデータでも最低1セクタは占有
- 最近は必ずしも上記の構造になってはいない
 - 内周と外周でトラックあたりのセクタ数が違ったりする
 - 各セクタにシーケンシャルな番号をつけて管理
 - 内部的には上記のような処理もしている

磁気ディスクの構造



磁気ディスクの平均アクセス時間

[ブロックのアクセス時間]
= [平均シーク時間] + [平均サーチ時間] + [データ転送時間]

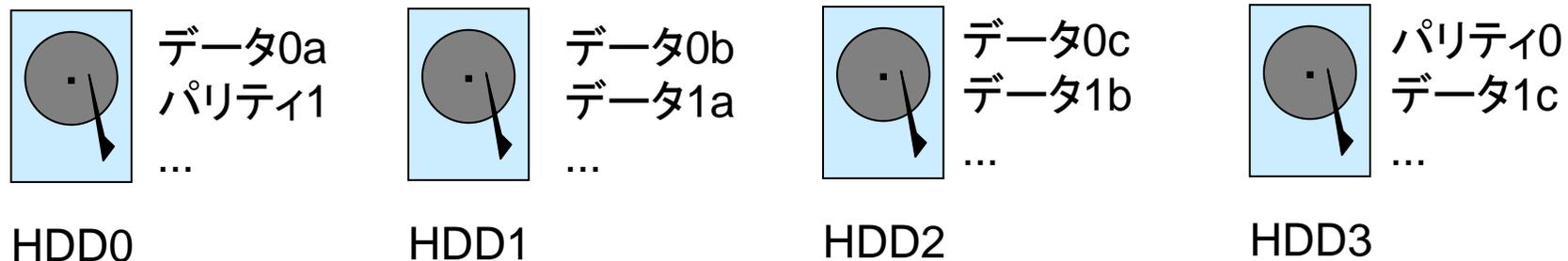


磁気ディスクの平均アクセス時間

- 平均シーク時間
 - 磁気ヘッドがデータブロックのあるトラックまでの平均移動時間
- 平均サーチ時間
 - 磁気ヘッドがデータブロックの先頭セクタに来るまでの平均時間
 - 最大のサーチ時間は1回転の時間であり、最小のサーチ時間は0
[平均サーチ時間] = [1/2回転の時間]
- データ転送時間
 - 磁気ヘッドがデータブロックを読み込む時間
 - 通常、ディスク回転速度とブロック長(セクタ数)から計算
 - データブロックが別トラックにまたがれば、再度、シークやサーチが必要

(2) RAID (Redundant Array of Independent (Inexpensive) Disks

- 複数のHDDを集めて一つの装置として使う方法
 - 冗長化: どれか1つのHDDが壊れてもデータは無事
 - RAID1(ミラーリング): 同一のデータを複数台のHDDに記録
 - 高速化: データを分散させて高速読み出し
 - RAID0(ストライピング): メモリインタリーブと同じ
- 両方を目的としたRAID5
 - **パリティ**という誤り訂正符号を生成
 - データとパリティを分散して書き込む



さらに高規格なRAIDと RAIDの注意点

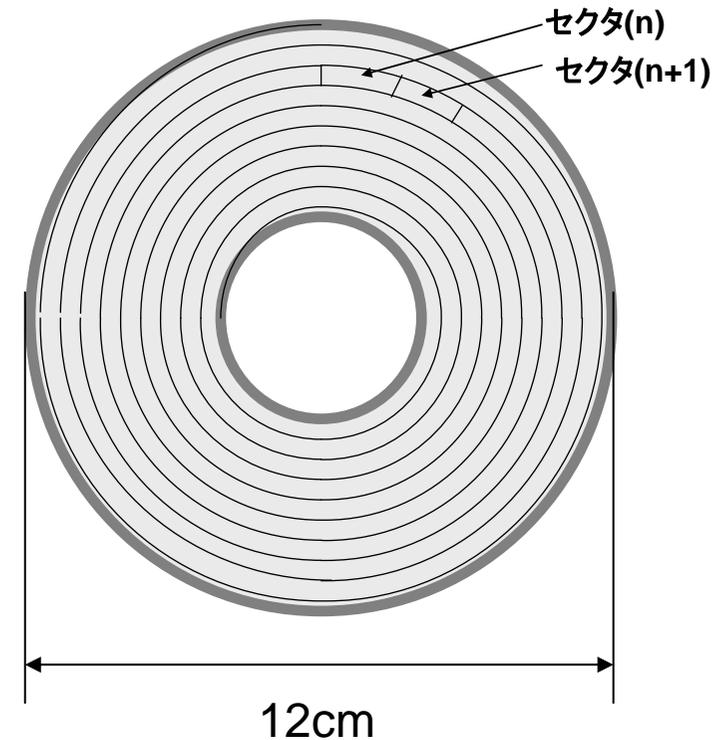
- 高規格なRAID
 - RAID6
 - パリティを2重に取って2個のHDD故障に対応
 - RAID10
 - RAID1とRAID0の併用
 - 同一のバンクに対応するHDD2台が同時に壊れない限りOK
- RAIDの注意点
 - 動作継続のためであって、バックアップのためではない
 - 誤って削除とかOSが暴走してデータ上書きなどは防げない
 - 同一生産ロットのHDDで構成するとHDDが同時に壊れることがある

(3) 光ディスク

- データ構造はHDDを片面にした感じ
- ただし、読み出し専用を基本にしている
 - 書き込みはあまり得意でない
 - 基本的に追記しかできない
 - 追記スペースがなくなったら全部消して書き直し
- 系統を立てたモデル展開をしている
 - 容量の違い: CD, DVD, BD
 - 読み書き仕様: -ROM, -R, -RW, (-RAM)

容量の違いによる光ディスク規格

- CD: Compact Disc
 - 約650MBもしくは約700MB
 - 音楽のデジタル記録を目的に開発
- DVD: Digital Versatile Disc
 - 1層約4.7GB、2層約8.5GB
 - 映像のデジタル記録を目的に開発
- BD: Blu-ray Disc
 - 1層約25GB、2層約50GB
 - High Definition映像のデジタル記録を目的に開発



読み書き仕様の違いによる 光ディスク規格

- (CD|DVD|BD)-ROM: Read Only Memory
 - 樹脂製の円盤に細かい凹凸をつけてデータを記録
 - 凹凸による反射光の違いをデータとして読み取る
- (CD|DVD|BD)-R: Recordable
 - 記録面に添付されている有機色素膜にレーザー照射で穴を開け、データを記録
 - 有機色素膜の下には反射膜があり、反射光に差異をつける
- (CD|DVD|BD)-RW: ReWriteable
 - データ記録膜の結晶状態／アモルファス状態の違いで0/1を表す
 - 強いレーザー光で急速加熱／急冷でアモルファス化、弱いレーザー光で焼きなまして結晶化

光ディスクの書き込み

- ディスクアットワンス
 - ディスク単位で書き込みを行う形式
 - 一度だけしか書き込みできず、追記は不可能
- マルチセッション
 - 複数のセッション(CDの書き込み単位)の書き込みができる追記が可能な形式
 - トラックアットワンス(トラック単位での書き込み)で記録される
- パケットライティング
 - トラックよりも小さいパケット単位で書き込みが行える方式

その他の補助記憶装置

- フロッピーディスク(フレキシブルディスク)
 - ディスク1枚だけのHDDと考える(容量は1.44MB)
- 光磁気ディスク(Magneto Opticalディスク)
 - 強いレーザーを照射しつつ磁界をかけることでデータを磁気的に書き込む
 - 読み出しは磁化の向きで弱いレーザーが偏光されることを利用
- 磁気テープ
 - トラックが1次元のHDDと考える
 - データバックアップ用として利用
- 半導体メディア
 - ICメモリに同じ
 - OS側からはディスクと見えるようにディスクを模している

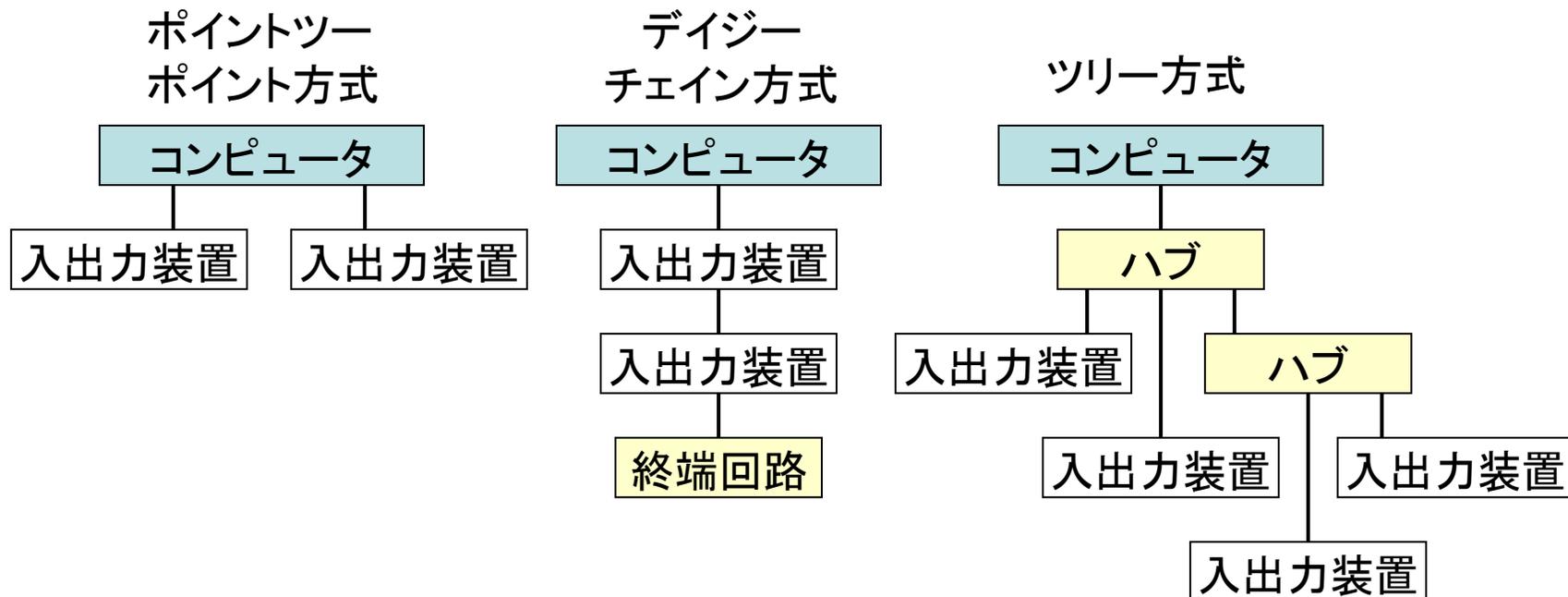
4.3 入出力インターフェース

入出力インターフェース: コンピュータと入出力装置や補助記憶装置の接続規格

- シリアルインタフェース: 単一の伝送路を利用
- パラレルインタフェース: 複数の伝送路を利用
- ワイヤレスインタフェース: 伝送路なし・・・のように見えるが、実質は単一の伝送路
 - 電波の飛ぶ空間は共有されるため

入出力インタフェースによる コンピュータと装置の接続形式

- ポイントツーポイント方式：S-ATA, SASなど
- デイジーチェーン方式：SCSI, GPIBなど
- ツリー方式：USB, IEEE1394など



(1) シリアルインターフェース

- 特徴
 - 単一の伝送路を利用して1ビットずつデータを伝送
 - 近年では超高速化に有利なため、様々なインターフェースがシリアル化
- 代表的なもの
 - RS-232C
 - 様々な周辺機器を接続するための低速な汎用インターフェース
 - USBにその役割を譲り渡した
 - 実装がシンプルなので、組み込み機器などでは未だに使われている
 - USB(Universal Serial Bus)
 - 周辺機器をパソコンと接続する高速なシリアルインターフェース
 - 高速化で記憶装置も接続する傾向にある
 - ハブを介してツリー状に接続できる
 - ホットプラグ機能(機器を動作中に抜き差しできる)を有する

(1) シリアルインターフェース

- 代表的なもの(続き)
 - IEEE1394
 - USBと異なり、パソコンを介さず、機器同士で接続可能
 - デジタルビデオカメラの接続端子として採用(i.LINK、DV端子)
 - シリアルATA (S-ATA)
 - パラレルインターフェースで説明するATAのシリアル版
 - 超高速化のためにシリアル化した物の1例
 - SAS(Serial Attached SCSI)
 - パラレルインターフェースで説明するSCSIのシリアル版

(2) パラレルインタフェース

- 特徴
 - 複数の伝送路を束ね、同時に複数ビットの伝送
 - かつては高速伝送の主流であった
 - 超高速では複数の伝送路間の同期が難しい ->シリアル化
- 代表的なもの
 - ATA(Advanced Technology Attachment), IDE
 - もともと内蔵用のHDDを接続するためのパラレルインタフェース(IDE)
 - CD-ROM等を含めて4台まで接続できるように拡張(ATA)
 - SCSI(Small Computer System Interface)
 - デイジーチェーン接続で最大7台まで周辺装置を接続
 - ワークステーションあたりが主に用いていた
 - GPIB(IEEE488)
 - 計測機器などのデジタル機器を接続する

(3) ワイヤレスインタフェース

- 特徴

- 配線を行う必要がない
- 通信が混雑していても何が悪いのか分かりにくい

- 代表的なもの

- IrDA

- 赤外線を利用した近距離のデータ通信インタフェース
- 送信部と受信部を向かい合わせにしないと通信できない

- Bluetooth

- 携帯機器向けの電波を用いた無線インタフェース
- 免許なしで自由に使える2.4GHz帯の電波を利用
- 到達距離は10m程度

3.7 入出力装置

(1) 入力装置

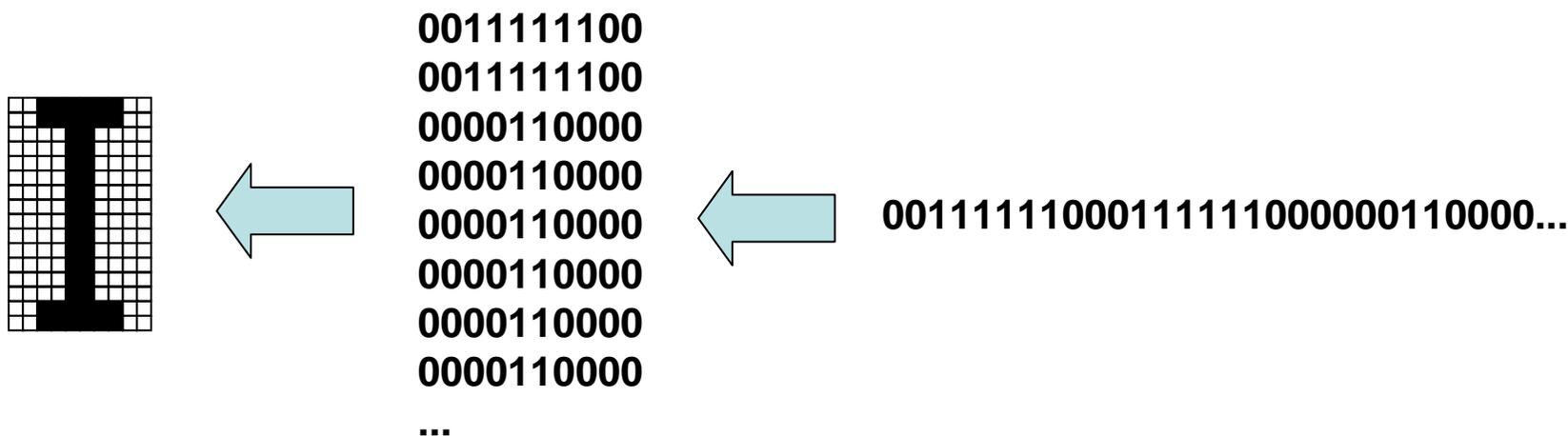
- キーボード
 - キーをタイプすることにより文字、数字、記号を入力
 - 最近はUSBで接続
- ポインティングデバイス
 - ディスプレイ画面上に位置情報(座標情報)を入力する装置の総称
 - 最近はUSBで接続
 - マウス、トラックボール、ペンタブレット、タッチパネル、など
- イメージスキャナ
 - 図形や写真を読み取って、画像データに変換して入力する装置
 - 性能指標として、1インチ当たりのドットの数であるDPI(Dots Per Inch)を用いる(高いほど高性能)

(1) 入力装置

- OCR(Optical Character Reader)
 - 手書きの文字や印刷された文字を光学的に読み取り、文字データに変換する
 - 誤認識に注意
- OMR(Optical Mark Reader)
 - マークシート用紙などに、マークされた記入欄を光学的に読み取る装置
 - OCRよりもはるかに誤認識が少ない
 - バーコードを読み取る装置であるバーコードリーダーも、OMRの1種

(2) ディスプレイ

- メモリ(VRAM)中のデータを画像として表示
 - VRAM(Video Random Access Memory)と呼ばれる
 - 1画面のデータ量は、VRAM容量以下
- 画面のサイズ(画素量)は規格名を用いることも
 - 例: VGAは640x480, XGAは1024x768



画像(画面)のデータ量の計算

- [画像のデータ量] = [画像の総画素数] × [1ドットあたりの容量]
- [画像の総画素数] = [縦の画素数] × [横の画素数]
- [1ドットあたりの容量] = [赤色情報のビット数]
+ [緑色情報のビット数] + [青色情報のビット数]
+ ([輝度情報のビット数])

例:

[100ドット × 500ドットで16777216色の画像]
=[総画素数50,000ドット] × [RGB各8ビット]
=[50,000ドット] × [24ビット]
=1,200,000ビット
=150,000バイト

演習

以下の画面の表示に必要な最低限のVRAMの量は？

- 画面サイズはXGA
- 色はRed 5ビット、Green 6ビット、Blue 5ビットで表示

ディスプレイの種類

- CRTディスプレイ (CRT: Cathode Ray Tube)
 - ブラウン管を利用したディスプレイ
 - かつては主流であったが、現在は廃れている
- 液晶ディスプレイ(LCD: Liquid Crystal Display)
 - 電圧をかけると分子の配列が変わる液晶の特徴を利用
 - 2枚のガラス板の間に液晶を封入し、電圧をかけることで、液晶分子の向きを変え、光を透過させたり反射させたりすることで画像を表示
 - 自分では発光しないので、バックライトを配置したりする

ディスプレイの種類

- 液晶ディスプレイの種類
 - STN型: 単純マトリックス方式
 - 低コストだが、TFT型に比べて応答速度が遅く、コントラストも低い
 - TFT型: アクティブマトリックス方式
 - 画素ごとにトランジスタなどの「アクティブ素子」を配置
 - 現在のコンピュータのディスプレイで広く使用されている
- 有機ELディスプレイ(EL: Electric Luminescence)
 - 電圧をかけると発光するEL素子を配置し、それに電圧をかけることで発光
 - 電圧をかけると発光するEL素子を配置し、それに電圧をかけることで発光

(3) プリンタ

- 特徴
 - 紙に文字や画像を出力する出力装置
 - 性能指標
 - 1秒あたりに印刷できる文字数(1分あたりに印刷できるページ数)
 - 1インチあたりの画素数(DPI: Dots Per Inch)などがある
- 代表的なもの
 - ドットインパクトプリンタ
 - 細かなピンを多数配置し、そのピンで文字や図形に合わせてインクを染み込ませたインクリボンを紙に叩きつける
 - カーボン紙などの複写用紙に対応できる

(3) プリンタ

- 代表的なもの(続き)
 - インクジェットプリンタ
 - インクを吐出できる細かなノズルを多数配置し、そのノズルから文字や図形に合わせてインクを吐出
 - レーザープリンタ
 - レーザー光を当てると帯電するドラムにレーザー光で文字や図形を描き、帯電部にトナーと呼ばれるインクの粒子を付着させ、それを紙に転写する (コピー機と同じ)
 - 印刷をページ単位で処理するので、性能指標もページ単位
 - プロッタ
 - 紙を画板に固定し、ペンを動かして図形を描くこと専門とする
 - 現在では、ペンの代わりにインクジェットのヘッドを用い、紙の側も動かす物が主流

3章のまとめ

- コンピュータの機能は5つに分けて考えられる
- CPU内部で命令と情報が処理される様子
 - 命令は基本的にIF, ID, EX, MA, WBの5段階で実行される
 - 主記憶中の情報の位置を効果的に示すために様々なアドレッシングモードがある
 - CPU性能はクロック周波数や平均CPIなどで見積もれる
- CPUへ効率的にデータを供給するため、記憶階層が構築されている
 - 記憶階層の性能は平均アクセス時間やバンド幅であらわされる
- 入出力関係
 - ディスク性能や画面データの量について