

## コンピュータハードウェア (10)

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 / 電気工学科

- はじめに
- アウトオブオーダー処理

コンピュータハードウェア

東大・坂井

## 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 10:15 - 11:45、I3 - 31
- 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)  
教科書通りやります
- 参考書
  - D. Patterson and J. Hennessy, Computer Organization & Design, 2nd Ed. (邦訳 『コンピュータの構成と設計』 (第2版) 上下 (日経 B P))
  - 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
  - 富田真治 『コンピュータアーキテクチャ』 a、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 (+ 出席)

コンピュータハードウェア

東大・坂井

## 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)  
フォワードリング、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、フルアソシティブ型、セットアソシティブ型、キャッシュミス

コンピュータハードウェア

東大・坂井

## 講義の概要と予定 (2 / 2)

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
8. 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
9. 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、トレーススケジューリング
10. 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
11. 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

レポート締切: 6/30, 試験: 7月後半

コンピュータハードウェア

東大・坂井

## 10. アウトオブオーダー処理

- 内容
  - アウトオブオーダー処理
    - アウトオブオーダー処理とはなにか
    - データ依存性再考
    - アウトオブオーダー処理の機構
  - レジスタリネーミング
    - ソフトウェアによるレジスタリネーミング
    - ハードウェアによるレジスタリネーミング(1)
      - マッピングテーブル
    - ハードウェアによるレジスタリネーミング(2)
      - リオーダーバッファ
  - スーパースカラプロセッサの構成
    - アウトオブオーダー処理を行うプロセッサの構成
    - プロセッサの性能

コンピュータハードウェア

東大・坂井

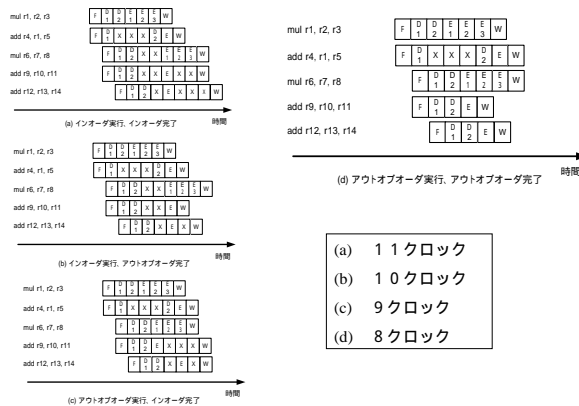
## アウトオブオーダー処理とはなにか

- アウトオブオーダー処理
  - プログラムの意味を変えない範囲で命令実行・完了の順序を変更し、並列度をあげる処理
    - cf. インオーダー処理: 命令を動的に入れ替えることをしない処理
  - 動的スケジューリングの一種
    - 動的スケジューリング: 実行時に行うスケジューリング
  - アウトオブオーダー実行
    - 命令をEステージに入れる順番を入れ替える
  - アウトオブオーダー完了
    - 実行結果をレジスタに格納する順番を入れ替える

コンピュータハードウェア

東大・坂井

## アウトオブオーダー処理の例



コンピュータハードウェア

東大・坂井

## データ依存性再考

- データ依存性の分類
    - フロー依存
      - 命令Aで書き込んだ値を後続の命令Bで読み出すことで起こるA Bの依存関係、真の依存関係ともいう
    - 逆依存
      - 命令Aで読み出したレジスタ(メモリ語)に後続の命令Bが書き込みを行うことで起こるA Bの依存関係
    - 出力依存
      - 命令Aで書き込んだレジスタ(メモリ語)に後続の命令Bが再度書き込みを行うことで起こるA Bの依存関係
- 逆依存と出力依存は、主に**レジスタ数の不足**からくる依存
- cf. インオーダーの場合
- フロー依存だけを意識すればよく、フォワードینگで解決していた

コンピュータハードウェア

東大・坂井

## データ依存の例題

```
mul r1, r2, r3
add r4, r1, r5
add r5, r6, r7
add r4, r8, r9
add r10, r4, r11
add r12, r10, r13
```

フロー依存: (r1), (r4), (r10)

逆依存: (r5)

出力依存: (r4)

コンピュータハードウェア

東大・坂井

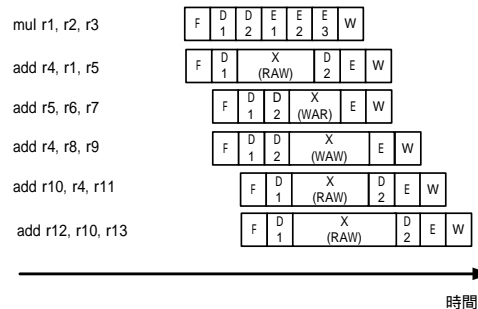
## データ依存とデータハザード

- フロー依存 RAW(read after write)ハザード
- 逆依存 WAR(write after read)ハザード
- 出力依存 WAW(write after write)ハザード

コンピュータハードウェア

東大・坂井

## 例題のパイプライン実行

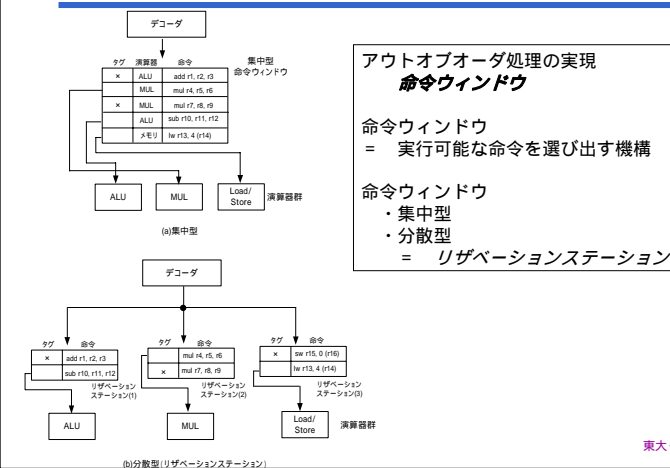


アウトオブオーダー実行が可能であっても、3種類の依存関係からくるハザードによって、実行時の並列度が下がる

コンピュータハードウェア

東大・坂井

## アウトオブオーダー処理の機構



東大・坂井

## レジスタリネーミング

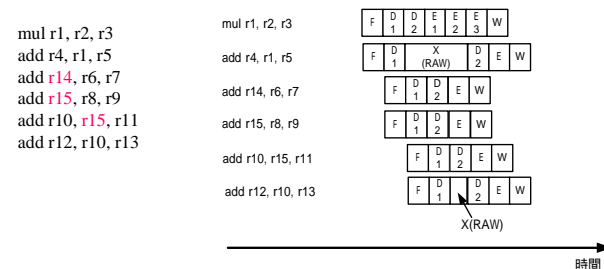
- レジスタリネーミング
  - レジスタ番地のつけかえによる逆依存、出力依存の解消
- やりかた
  - ソフトウェア
  - マッピングテーブル
  - リオーダーバッファ

コンピュータハードウェア

東大・坂井

## ソフトウェアによるレジスタリネーミング

- ソフトウェアによるレジスタリネーミング
  - = 機械語プログラムの書き換え



3クロックの実行時間短縮

コンピュータハードウェア

東大・坂井

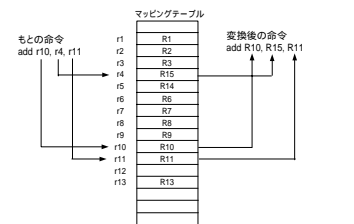
## ソフトウェアによるリネーミングの問題点

- (1) 機械語プログラムで指定できるレジスタ数には限界がある
- (2) CPUのアーキテクチャの細部(特に並列動作可能なユニット数)にプログラムが影響を受けるため、透過性・互換性が失われる
- (3) 機械語プログラムの変換の手間がかかる

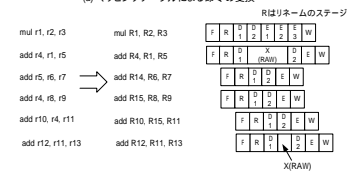
コンピュータハードウェア

東大・坂井

## ハードウェアによるレジスタリネーミング(1) マッピングテーブル



(a) マッピングテーブルによる命令の変換

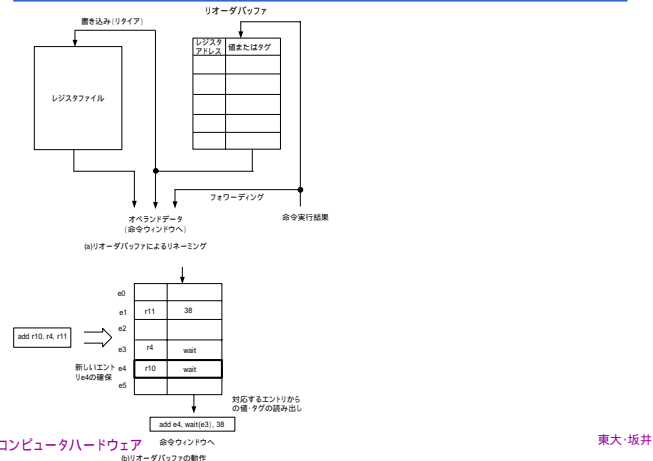


(b) マッピング機構を入れたパイプライン

コンピュータハードウェア

東大・坂井

## ハードウェアによるレジスタリネーミング(2) リオーダーバッファ



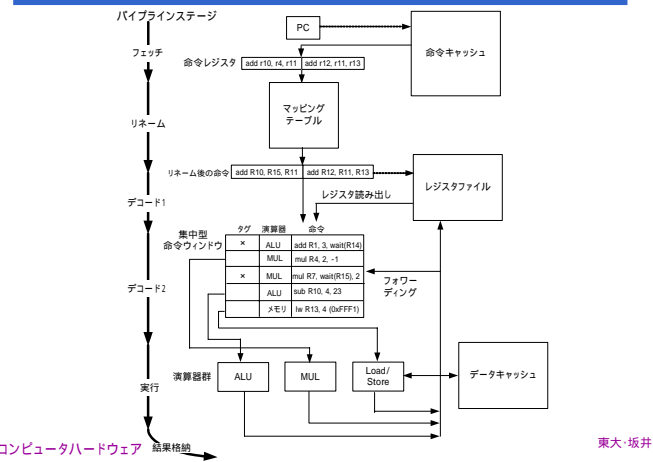
## マッピングテーブル VS リオーダーバッファ

	マッピングテーブル	リオーダーバッファ
ハードウェア機構・動作	単純	複雑
パイプライン長	+ 1 ステージ	増えない

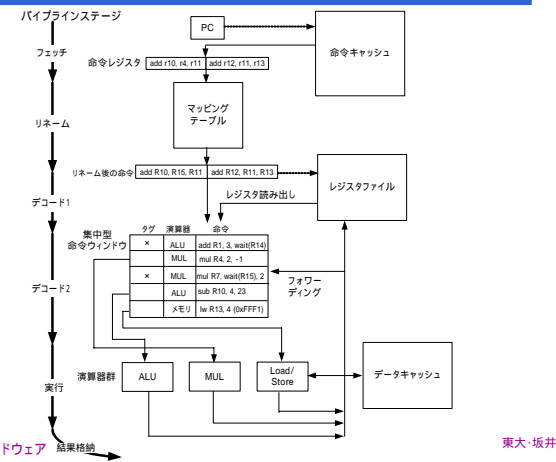
コンピュータハードウェア

東大・坂井

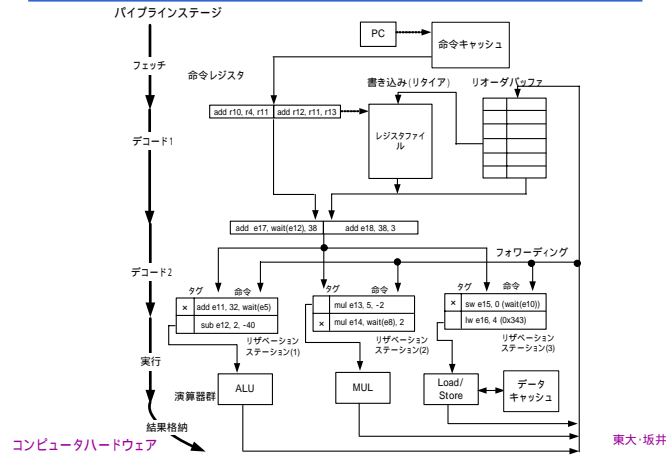
## アウトオブオーダー処理を行うプロセッサの構成(1)



## アウトオブオーダー処理を行うプロセッサの構成(1)



## アウトオブオーダー処理を行うプロセッサの構成(2)



## プロセッサの性能

- 性能指標 (例)  
 $\text{クロックあたりの平均実行命令数} \times \text{クロック周波数}$

- クロックあたりの平均実行命令数
  - 増やす方法
    - フォワードイング
    - 命令スケジューリング
    - 分岐予測
    - キャッシュ
    - 命令レベル並列処理
    - アウトオブオーダー処理
  - 減る要因
    - 分岐予測の失敗
    - キャッシュミス
    - TLBミス
    - ページフォルト
    - ハザード
- クロック周波数
  - パイプラインの各ステージの複雑さによって決まる

コンピュータハードウェア

東大・坂井

## コンピュータハードウェアレポート課題

- 下の課題についてのレポートを、指定の提出方法で提出せよ。
  - レポートの表紙(巻頭)に、次の事項を記述すること
    - 学部、学科
    - 学年
    - 学生証番号
    - 氏名
  - 切: 6月30日 締切を過ぎた原稿は理由のいかんによらず、一切受け付けない
- 課題
  - 学生証番号が奇数の人は課題1、偶数の人は課題2。
    - 課題1: 教科書の間6.3 (P.120)を解け
    - 課題2: 教科書の間6.4 (P.120)を解け
  - 提出方法: 電気系事務室レポート提出ボックスまで、紙のレポートを提出のこと。メールは受理しません。
  - 補足: 図6.14 および図6.15 は、次の場所にファイルを置いておくので、必要に応じて利用せよ。
    - [http://www.mtl.t.u-tokyo.ac.jp/~sakai/hard/report\\_figure.vsd](http://www.mtl.t.u-tokyo.ac.jp/~sakai/hard/report_figure.vsd)
    - このファイルはMicrosoft Visio で書かれている。Visio は電気系図書室にCDがあり、本学電気系学生はインストール・利用可能であるので、必要ならば貸し出しを受けること。
  - なお、Visio が使えない人のために、命令実行以前のプロセッサの図を次の場所に置いておくので、必要に応じてハードコピーして使うこと。
    - <http://www.mtl.t.u-tokyo.ac.jp/~sakai/hard/figure1.pdf>
    - <http://www.mtl.t.u-tokyo.ac.jp/~sakai/hard/figure2.pdf>

コンピュータハードウェア

東大・坂井

## レポート問題についての補足

- 足りない情報は自分で適切に補うこと
  - 演算器の数
  - 乗算器の実行時間
  - 乗算器はパイプライン化されているか?
  - キャッシュのポート数
  - etc.

コンピュータハードウェア

東大・坂井