

# コンピュータ アーキテクチャ I 第7回

---

塩谷 亮太 (shioya@ci.i.u-tokyo.ac.jp)

東京大学大学院情報理工学系研究科 創造情報学専攻

# 質問や感想など

- 場合によると思うのですが、回路規模をなるべく大きくしないことが重要視されるのか、回路規模を大きくしてでも機能を増強したいことの方が多いのか  
（回路規模を実現可能な最大ギリギリまで設定してから時分割での処理も行うことにするのか、回路規模が大きくなりすぎないように早めに時分割での処理も併用するのか？）  
ということが気になりました。

# 質問や感想など

- 提出の課題の量はちょうど良いのですが、もう少しテスト勉強になるような提出のない練習問題（例題）を出してもらえると嬉しいです。
- 課題の量は適切だと感じています。
- 課題があるとちゃんと復習する機会を作ることができてテストの対策にもなると思うので今のペースと量がちょうどいいです。
- 課題の分量は私にとっては少し重く感じます。
- 課題は少し多い(というより理解しきれていないため1問1問が大変)に感じますが、このままの寮でもやっていけるかな、と思います。(とはいえもちろん減ったら嬉しいです)

# 質問や感想など

- 遅延スロットへの命令挿入はコンパイラががんばる、人力でアセンブリ言語でがんばることもある、と書いてありましたがどのようなときにコンパイラが頑張る、どのようなときにアセンブリ言語を使うのでしょうか

# 質問や感想など

- 課題について質問があつて、「add  $A, 1 \rightarrow A$ 」と「add  $A+1 \rightarrow A$ 」はどちらの表記でも大丈夫でしょうか？

どっちでも良いです

# 質問や感想など

- また、アセンブリ言語でifやforは使えないのでLABEL も使ってはいけないのかと思っていましたが、なぜLABELは使ってもいいのでしょうか？

LABEL は命令の場所（命令のアドレス）につけている印  
アドレスの数字と 1 : 1 に機械的に変換できるので、アセンブリ  
言語でも使える

# 質問や感想など

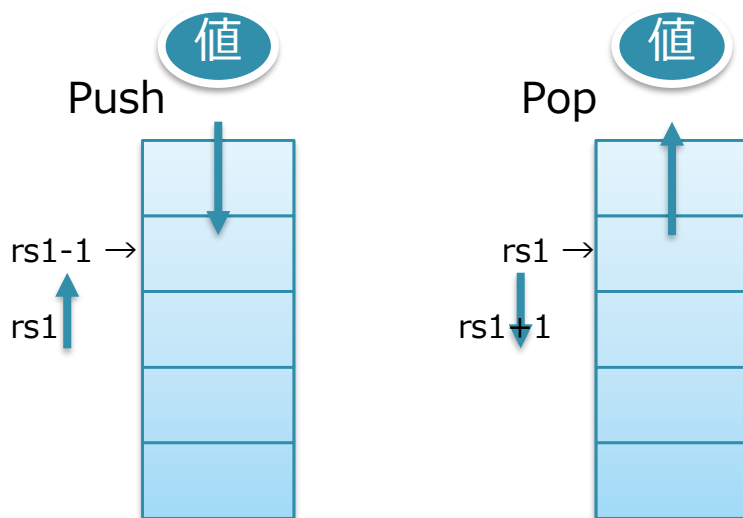
- pushとpopの $rs1-1 \rightarrow rd$ ,  $r2 \rightarrow [rd]$ と $[rs1] \rightarrow rd$ ,  $rs1+1 \rightarrow rs1$ で何が行われているのかがよくわからなくなってしまったのですが、
  - pushは、 $rs-1$ がスタック・ポインタで、それを $rd$ に入れてアドレスとし、メモリでそのアドレスが示す部分の中身 $[rd]$ を値 $r2$ とする(=書き込む)
  - popは、メモリでアドレス $rs1$ が示す部分の中身 $[rs1]$ を $rd$ に入れて(=読んで)、スタック・ポインタを $rs1+1$ とする

という理解で正しいでしょうか。 → 正しいです

- また、pushはレジスタとメモリに書き込んでいるけれど、popはレジスタとレジスタに書き込んでいるから、popでのみ構造ハザードが起きるということでしょうか。 → 正しいです

# 構造ハザードの例 2 : push/pop

- x86 や ARM ではスタック操作のための push/pop 命令がある
  - push :  $rs1-1 \rightarrow rd$ ,  $r2 \rightarrow [rd]$ 
    1. スタック・ポインタ（が入ってるレジスタ）をデクリメントし,
    2. それをアドレスにしてメモリに値を書き込む
  - pop :  $[rs1] \rightarrow rd$ ,  $rs1+1 \rightarrow rs1$ 
    1. スタック・ポインタをアドレスにして値を読む
    2. スタック・ポインタをインクリメント





# 質問や感想など

- いろんなところでアルファベットの大文字小文字が出てきて、どっちが適切かわかりません。

どっちでも良いです

# 質問や感想など

- 分岐予測はなんとなく人間ぽい行動ぽく感じました。それなりにハイリスクハイリターンに感じましたが、よく使われるのでしょうか。予測アルゴリズムが複雑になるのは納得できました。
- 分岐予測について、ペナルティがあるということですがどのようなケースでも入れないよりは入れる方がいいのか、どれくらい性能の向上に繋がるのかになりました。
- 分岐予測できちんと予測が当たる確率はどの程度なのでしょう  
か？間違っていた時命令を取り消さなければならないと思うとかなり予測に自信がないと扱いづらそうだと感じてしまいます。
  - 何もしないで待つよりは一方的に得なので、普通はやります
  - 次回以降で性能への影響を説明

- パイプラインの構造ハザードの図を見て思ったのですが、そもそも最初に送られてくる「製品」に欠陥があり、それによってライン全体が小休止してしまう、というようなこともあるのでしょうか？
- 強いて言えば、分岐予測で予測ミスした場合はそれに近い。本来作るべきではない「製品」が流れていって、最後にそれがわかる

# 質問や感想など

- $i=0$ のように値を代入する際、第2回の講義資料ではレジスタAに  $i$  の値を入れてからレジスタBに  $i$  のアドレスを入れstしていますが課題5.1の解説ではレジスタAに  $i$  のアドレスのみ入れて処理をしているので疑問に思いました。この2つの処理には違いがあるのでしょうか？

B に計算結果の  $i$  値が入っているので、同じ事をしています

- データ・ハザードの解消方法として3通りあげられていましたが、一番よくつかわれる解消方法はどれですか。
  - 普通はフォワーディングします

- データハザードは、入れたデータの特徴によって何を用いて解決するのが効率が良いかが異なるように感じました。（if文が多かったら分岐予測はあまりいい方法ではない、など、、、）実際の場面ではどのように使い分けているのか（判断しているのか）気になりました。

# 質問や感想など

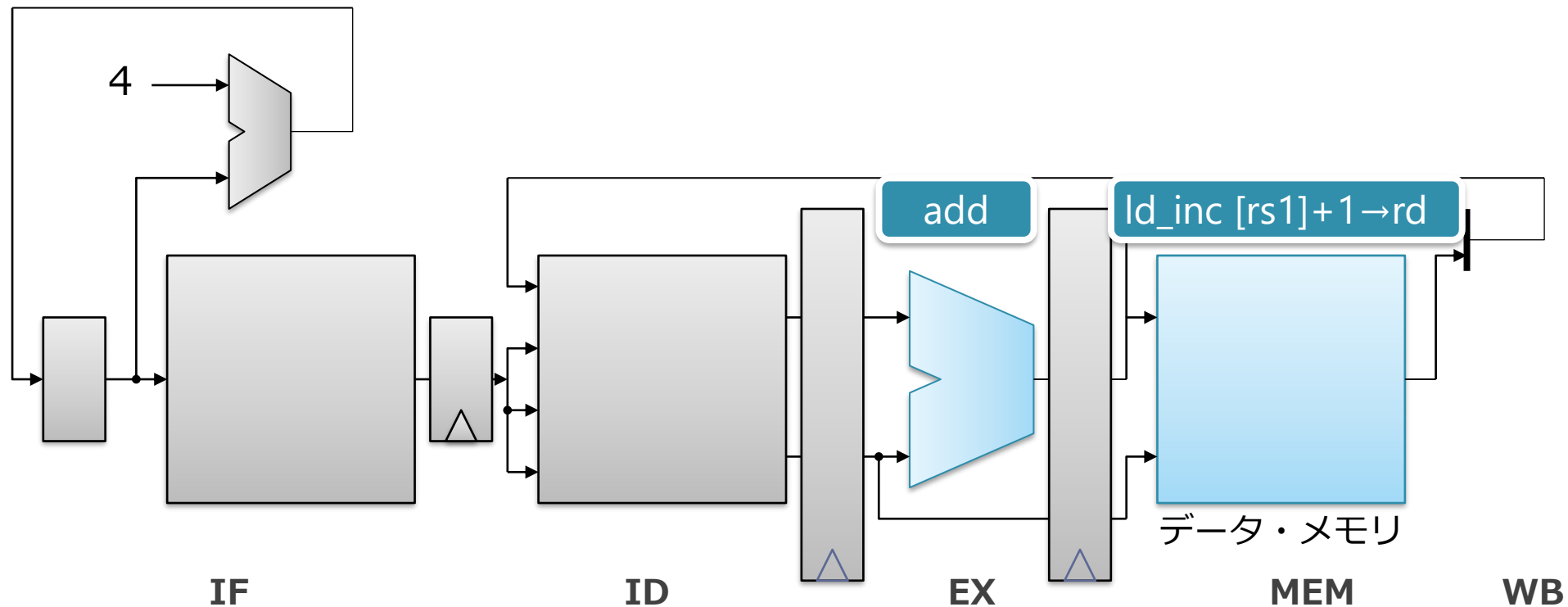
- 課題の6.1の(3)と(4)についてですが、2進数を16進数に直すときにopcodeやrdなどで分けてそれぞれを16進数に直すのですか？
- 2進数を16進数に変換するときに、例えば、0000 0001 0011は、0x013と最高位の0も含めて書けば良いですか。

- D-FFの回路では、命令の信号を送らないようにするスイッチが全工程の間で一緒なので、ステージ全体の長さを同じにすることはできないのではないかと考えました。（工程にかかる時間によってラッチの長さは変わると思うから。）



- スライド59では工程を1つずつずらすのではなく、2つずつずらしていけば、EXとMEMが同じ時間に行われなくて済むようになるのではないかと思います。

# Id\_inc [rs1]+1→rd と add が連続した場合



- EX ステージ以外では、演算器にはアクセスできない
  - 他の命令が使っている可能性がある

- スライド81で間の全工程にNOPを入れる場合は、パイプライン形成しなくても良さそうだなと思いました。
  - その場合に限れば、そう
  - ハードは共通で、それに対して色々なソフトが来るが、典型的な場合に速く動いてほしい

- 58ページのx86とは何のことでしょうか？
  - そう言う名前の命令セットです（第2回）

- また、分岐予測をして制御ハザードを解消するのは有効な手段なのでしょうか？実際に使われている手段ですか？あいまいな感じがして役に立つ例があるのだろうかと思ってしまいました。

使われていない CPU はない, と言っても良いぐらい使われている

- NOPを挿入すると遅延スロットをを使用した時より性能が落ちるという解釈であっていますか。

- if文の予測はAIのようにユーザーのプログラミングの傾向から予測するのではなく、システムを作る段階で予測方法を定めてそれを元に判断しているのでしょうか

プログラムの実行中に、その傾向を学習します

# 質問や感想など

- 課題5-2ではNOTとNANDを組み合わせて複雑な回路図を作っていましたが、答えを見るとかなり単純化されていて驚きました。3入力NANDは2入力を3つに増やした形になっていたこともあり納得しましたが、これらを一から自分で作るのは結構ハードな気がしたのでまた復習して回路を作るコツを掴みたいと思いました。



- 遅延スロットの場合、命令を実行するときに間違った値を入れないようにコンパイラが命令の順番を入れ替えたり、位置を変えたりするというのでしょうか。

- 前回の工場パイプラインのように、単純に1人が一つの(データ・ハザードが起こらないという意味で)独立した仕事を行う場合だけでなく、実際には並行で行われる作業があったり、前のデータが必要だったりして、単純にはいかないんだなと思いました。とても複雑で、考えるだけでうええとなりました、、、。

- 分岐命令のときifの結果が最後にならないとわからないのは意外でした。スライドで一番目の工程の人がelseだと予測しているのですが、何かのデータに基づいて予測しているのですか？
  - 「前回はこの行の if はこっちに行った」場合, 「次回も同じ方向いくだろう」と言うような予測をします
  - これだけでも8割以上の予測は当たります

- 分岐予測をするための前例は、どこに格納されているのでしょうか？（それ専用のメモリを確保しているのでしょうか。）

分岐予測器という回路が専用のメモリをもっています

- 覚えることが多すぎてパンクしてしまいそうです。さまざまな用語が覚えられていないため、その用語を調べるために前に戻って調べていると授業が進んでいておいていかれる、ということを繰り返してしまいます、。。

# 課題の解説

---

## 課題 6.1

- (1) 0xf2a1 を 2 進数で表記せよ

16進の1桁を4桁の 2 進数に変換していくと良い

1111 0010 1010 0001

- (2) 0111 1000 1111 0000 を 16 進数で表記せよ

同様に, 4桁の2進数を1桁の16進に変換していく

0x78F0

## 課題 6.1

- RISC-V の「add x1←x1,x1」命令を 2 進数で表記すると以下の通りとなる

0000000 00001 00001 000 00001 0110011

- (3) 上記を sub x1←x1,x1 に書き換え, 2 進数と 16 進数の双方で表記せよ

0100000 00001 00001 000 00001 0110011

0100 0000 0001 0000 1000 0000 1011 0011

0x401080b3

- (4) 上記を add x2←x3,x4 に書き換え, 2 進数と 16 進数の双方で表記せよ

0000000 00010 00011 000 00010 0110011

0000 0000 0010 0001 1000 0001 0011 0011

0x00310133



# 課題 6.1

- 2023/06/26 追記
  - 前ページの (4) の回答を修正しました
  - $r1$  と  $r2$  が逆になっていました

# RISC-V の 基本整数命令

## ■ 概要

- 加減算, 論理演算,  
ロード・ストア,  
即値, 分岐とジャンプなど
- 各命令は 32bit 幅

- 前半の講義で 4 桁の数字で  
表していたことと同じことを  
32bit の中を細かく区切って  
やっている

RV32I Base Instruction Set

imm[31:12]						rd	0110111	LUI
imm[31:12]						rd	0010111	AUIPC
imm[20:10:1 11 19:12]						rd	1101111	JAL
imm[11:0]				rs1	000	rd	1100111	JALR
imm[12:10:5]		rs2	rs1	000	imm[4:1:11]	1100011	BEQ	
imm[12:10:5]		rs2	rs1	001	imm[4:1:11]	1100011	BNE	
imm[12:10:5]		rs2	rs1	100	imm[4:1:11]	1100011	BLT	
imm[12:10:5]		rs2	rs1	101	imm[4:1:11]	1100011	BGE	
imm[12:10:5]		rs2	rs1	110	imm[4:1:11]	1100011	BLTU	
imm[12:10:5]		rs2	rs1	111	imm[4:1:11]	1100011	BGEU	
imm[11:0]				rs1	000	rd	0000011	LB
imm[11:0]				rs1	001	rd	0000011	LH
imm[11:0]				rs1	010	rd	0000011	LW
imm[11:0]				rs1	100	rd	0000011	LBU
imm[11:0]				rs1	101	rd	0000011	LHU
imm[11:5]		rs2	rs1	000	imm[4:0]	0100011	SB	
imm[11:5]		rs2	rs1	001	imm[4:0]	0100011	SH	
imm[11:5]		rs2	rs1	010	imm[4:0]	0100011	SW	
imm[11:0]				rs1	000	rd	0010011	ADDI
imm[11:0]				rs1	010	rd	0010011	SLTI
imm[11:0]				rs1	011	rd	0010011	SLTIU
imm[11:0]				rs1	100	rd	0010011	XORI
imm[11:0]				rs1	110	rd	0010011	ORI
imm[11:0]				rs1	111	rd	0010011	ANDI
0000000		shamt	rs1	001	rd	0010011	SLLI	
0000000		shamt	rs1	101	rd	0010011	SRLI	
0100000		shamt	rs1	101	rd	0010011	SRAI	
0000000		rs2	rs1	000	rd	0110011	ADD	
0100000		rs2	rs1	000	rd	0110011	SUB	
0000000		rs2	rs1	001	rd	0110011	SLL	
0000000		rs2	rs1	010	rd	0110011	SLT	
0000000		rs2	rs1	011	rd	0110011	SLTU	
0000000		rs2	rs1	100	rd	0110011	XOR	
0000000		rs2	rs1	101	rd	0110011	SRL	
0100000		rs2	rs1	101	rd	0110011	SRA	
0000000		rs2	rs1	110	rd	0110011	OR	
0000000		rs2	rs1	111	rd	0110011	AND	
0000	pred	succ	00000	000	00000	0001111	FENCE	
0000	0000	0000	00000	001	00000	0001111	FENCE.I	
0000000000000			00000	000	00000	1110011	ECALL	
0000000000001			00000	000	00000	1110011	EBREAK	
csr			rs1	001	rd	1110011	CSRRW	
csr			rs1	010	rd	1110011	CSRRS	
csr			rs1	011	rd	1110011	CSRRC	
csr			zimm	101	rd	1110011	CSRRWI	
csr			zimm	110	rd	1110011	CSRRSI	
csr			zimm	111	rd	1110011	CSRRCI	

画像は下記より

The RISC-V Instruction Set Manual Volume I: User-Level ISA Document Version 2.2

## 課題 6.2

- 第1回の講義資料を参考に、以下の if 文をアセンブリ言語で書け
  - 使用する命令セットは第2回の講義資料のものに準じる
  - 変数 i はメモリのアドレス 0x100 に割り当てられているものとせよ
  - 変数 i の初期値は任意（「...」）とせよ
  - 変数 j は任意のレジスタに割り当てて良い

```
1: i = ...;
2: j = 2;
3: if (i > j) {
4:     if (i - 1 < 10) {
5:         i = i + 1;
6:     }
7: }
```

## 課題 6.2

1: i = ...;	li 0x100→A	// メモリアドレス 0x100 を A に設定
2: j = 2;	ld (A)→B	// i である*(0x100) を B にロード
3: if (i > j) {	li 2→C	// j を レジスタ C に設定
4:   if (i - 1 < 10) {	b B <= C EXIT	// if (i > j) の逆なら EXIT へ
5:     i = i + 1;	sub B-1→D	// i - 1 を計算して D に
6:   }	li 10→E	// < 10 のための 10 を E に設定
7: }	b D >= E EXIT	// if (i - 1 < 10) の逆なら EXIT
	add B+1→B	// i = i + 1
	EXIT:	
	st B→(A)	// i を元のメモリアドレスに書き戻す

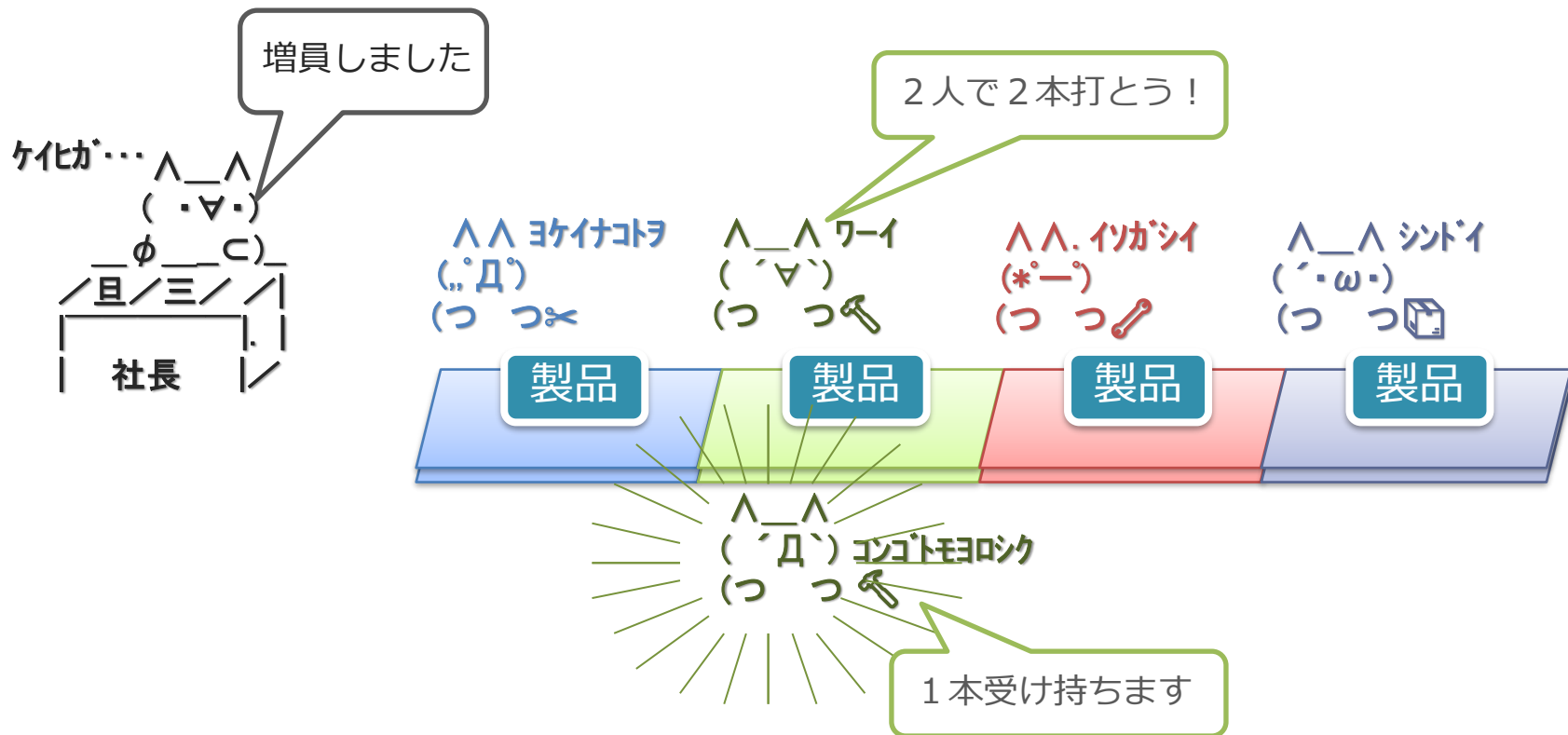
# 前回の振り返り

---

# ハザード (hazard)

- パイプラインがうまく動作しないこと
  - パタヘネ（教科書）の定義だと,  
「パイプラインにおいて次のサイクルに次の命令を実行できないこと」
- 1. 構造ハザード：ハード資源の不足に起因
  - 1. 構造ハザードとはなにか？
  - 2. その解決方法
- 2. 非構造ハザード：バックエッジに由来
  - a. データ・ハザード
  - b. 制御ハザード

# 増員による構造ハザードの解消

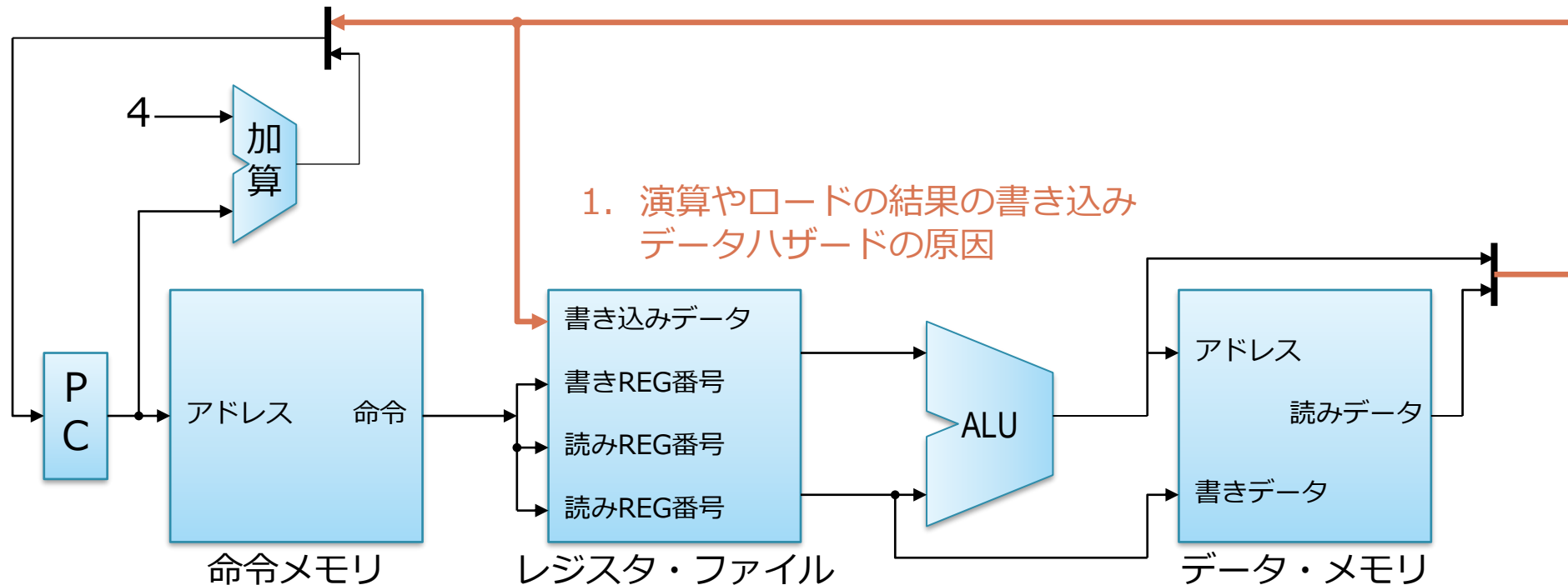


- 1人増やして緑のステージで単位時間に2本の釘が打てるように
  - これがハード資源の追加による構造ハザードの解消
  - ただし、追加しただけ経費がかかる
    - (ハードだとその分複雑になって電力を食う)

# バックエッジとは：逆方向（右から左）にいく信号

2. 分岐結果の PC への反映  
制御ハザードの原因

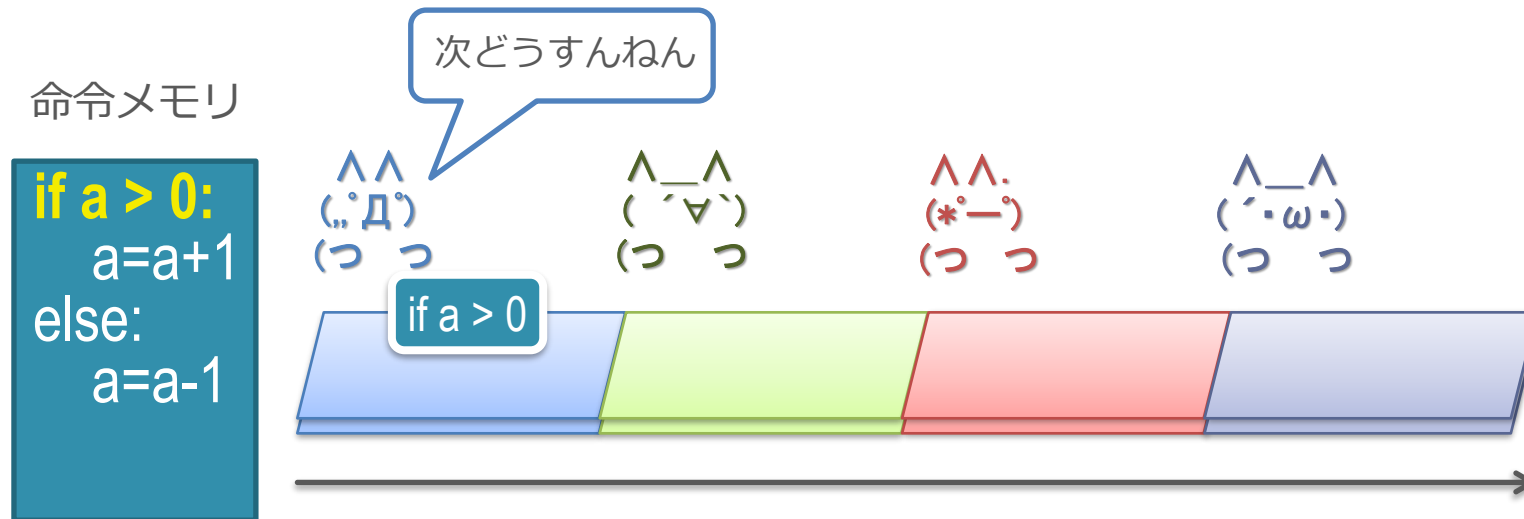
1. 演算やロードの結果の書き込み  
データハザードの原因



- バックエッジがあるため、命令を単純に流せない場合がある
  - 工場のラインのように、一方向に流せない

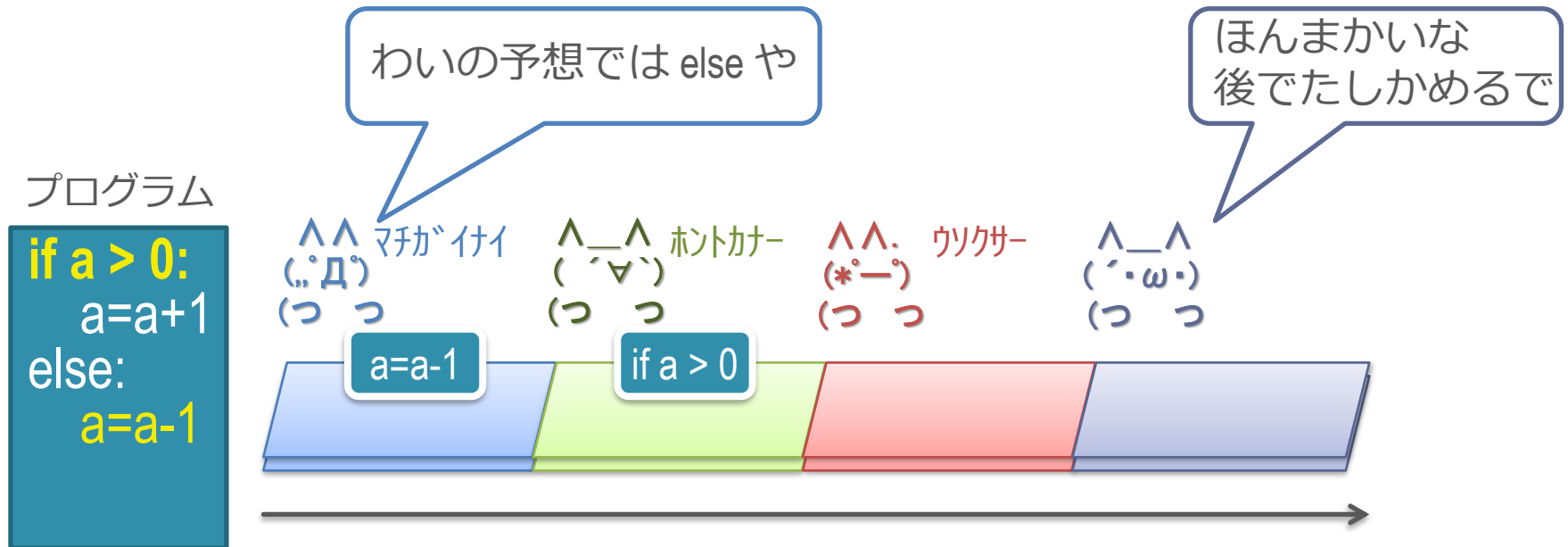


# 分岐命令の処理と制御ハザード



- 「if a > 0」の結果は最終段の( ^・ω・ )の人まで反映出来ない
  - 先頭は次に a=a+1 と a=a-1 のどちらを取り込めばいいのかわからない

# 分岐予測



## ■ 動作

- 「if a > 0」の結果を予測して、命令を取り込む
  - 前はこっちに行ったので、次もこっちに違いないとかで予測
- あとから予測が正しいか確認する

# 命令の並列実行

---

# 今日の内容

1. 命令の並列実行の基本
2. データ依存
3. 静的命令スケジューリング
4. 動的命令スケジューリング

# 命令の並列実行

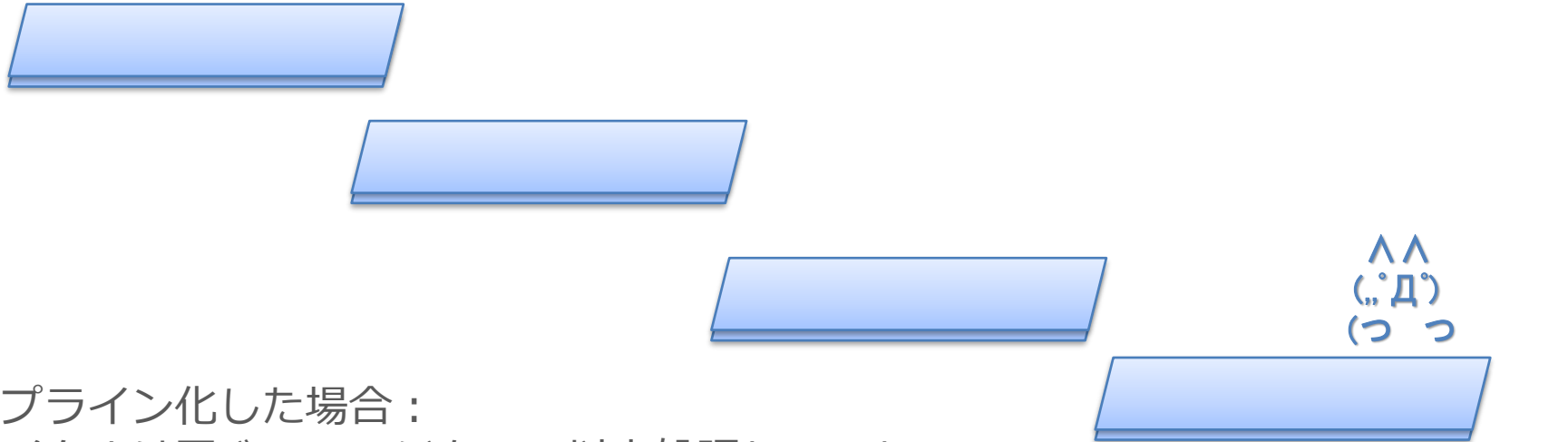
1. スカラ・プロセッサ：
  - 1 クロック・サイクルあたり 1 命令を処理
2. スーパスカラ・プロセッサ
  - 1 クロック・サイクルあたり 2 命令以上を処理

# スカラ・プロセッサ

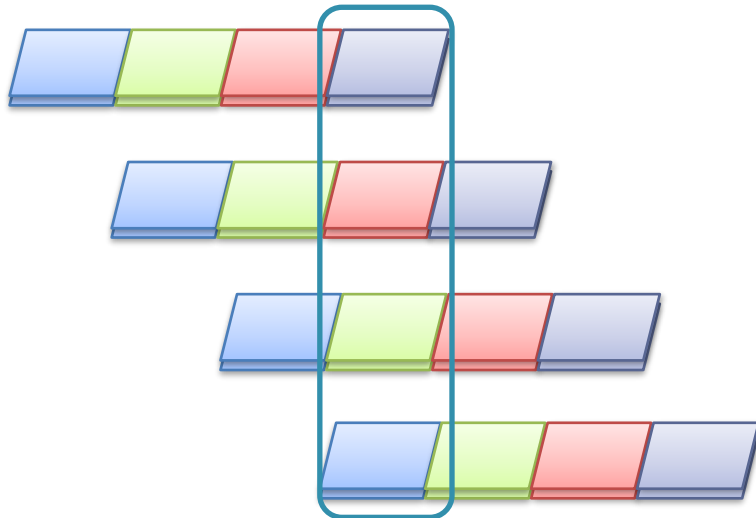
- 1 クロック・サイクルあたりに単一の命令を実行するプロセッサ
- パイプライン化：
  - 1 つの命令に関わる処理を分割して毎サイクル並列に実行
  - パイプライン化すると「単一の命令を実行」にならない？
    - 1 クロック・サイクルあたりでみると, 単一の命令を処理
    - 1 クロック・サイクルに同じステージを複数処理しない

# パイプライン化

パイプライン化しない場合：

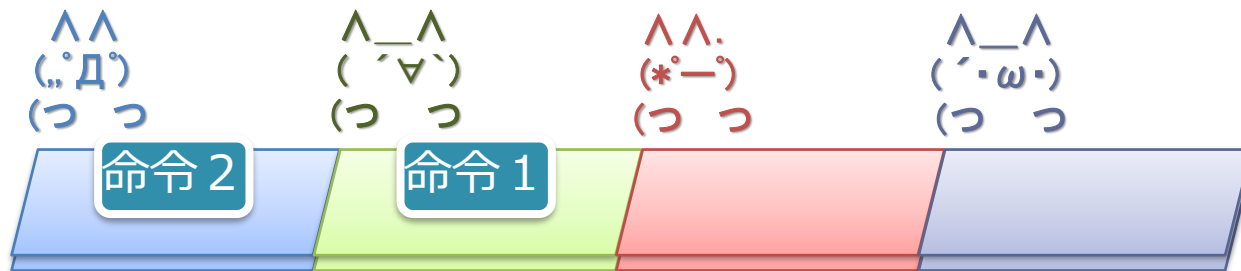


パイプライン化した場合：  
各サイクルは同じステージを2つ以上処理していない



# パイプライン化による性能向上の限界（復習）

- パイプライン化による性能向上には限界がある
  1. 回路的な理由による周波数向上の限界
    - D-FF の遅延
    - 電力供給と熱（冷却）の壁
  2. アーキテクチャ的な理由による実効性能の限界
    - ハザードによる実効性能の低下

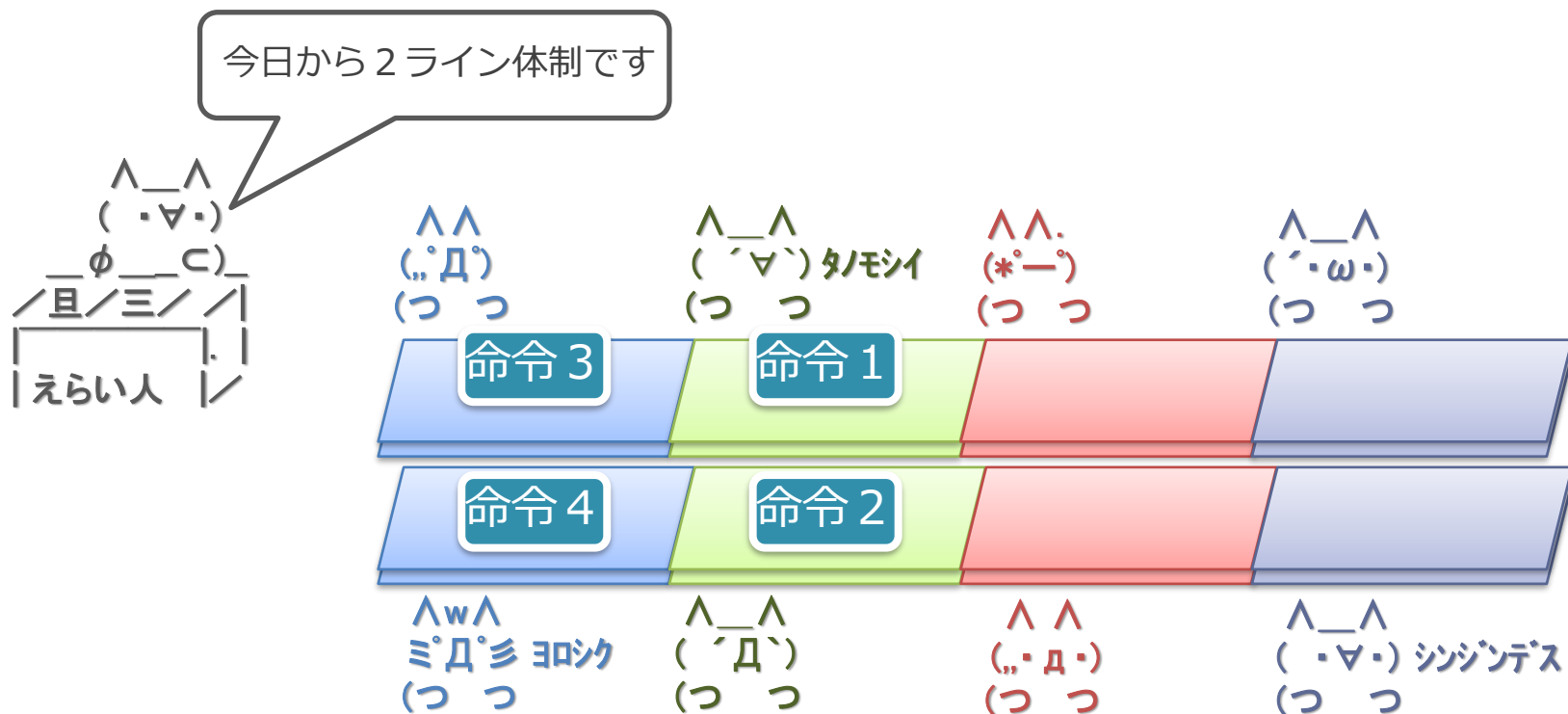




# スーパスカラ・プロセッサ (superscalar processor)

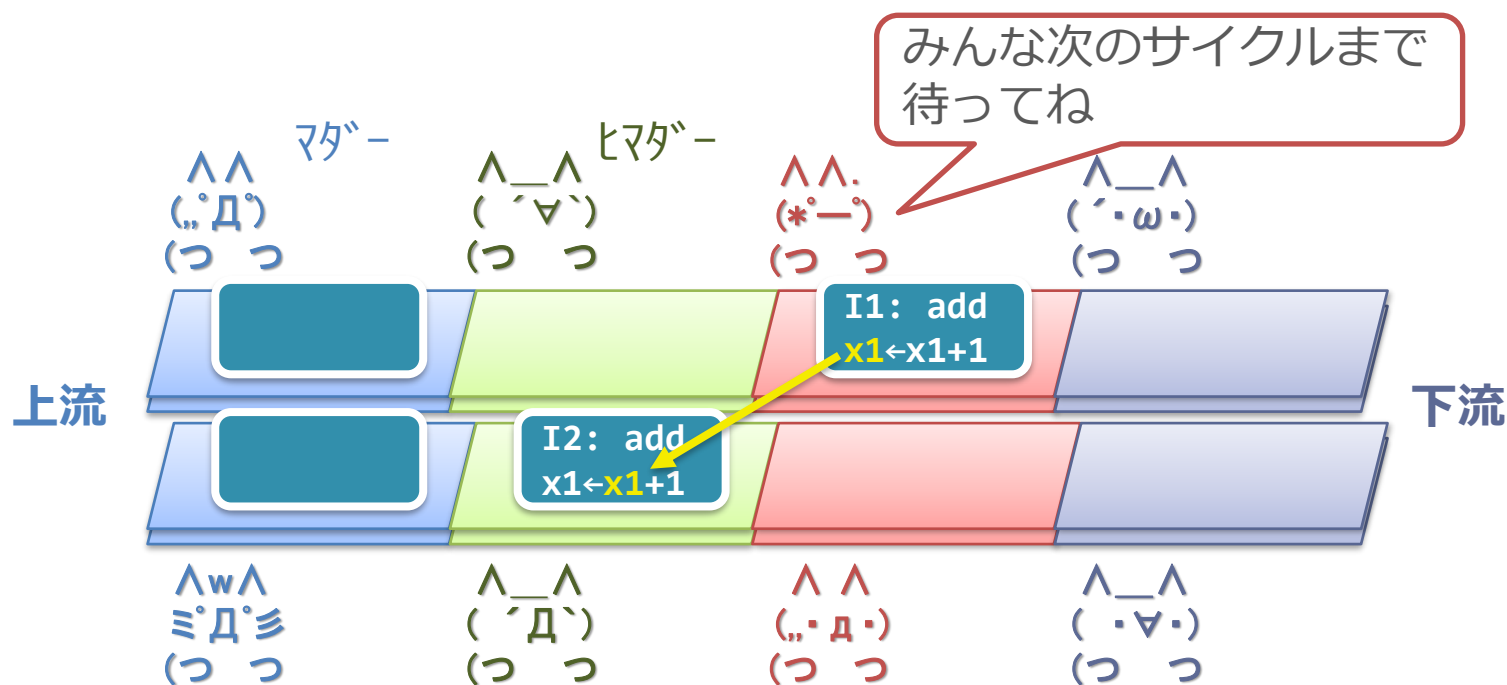
## ■ スーパスカラ・プロセッサ

- パイプラインや関連する演算器などを複数並べる
- 複数の命令を並行して処理して性能を向上

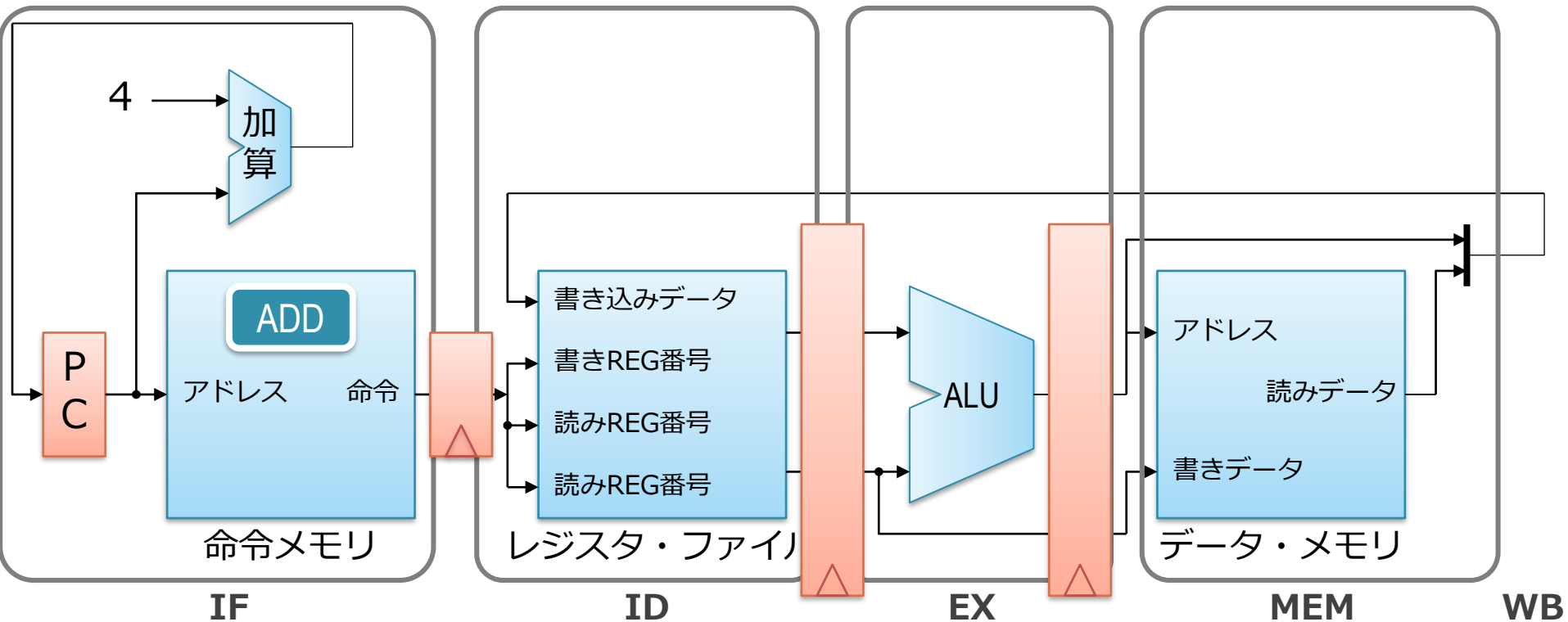


# 単純なスーパースカラ・プロセッサの動作

- 同時にフェッチしてきた命令間に依存がない場合は並列に実行
  - もし依存がある場合は、後続の命令全てを待たせて処理
    - パイプラインの上流側を全てストールさせる
  - これはプログラムの意味を保つため
    - 下の図だと I1 と I2 を並列に計算したらおかしくなる

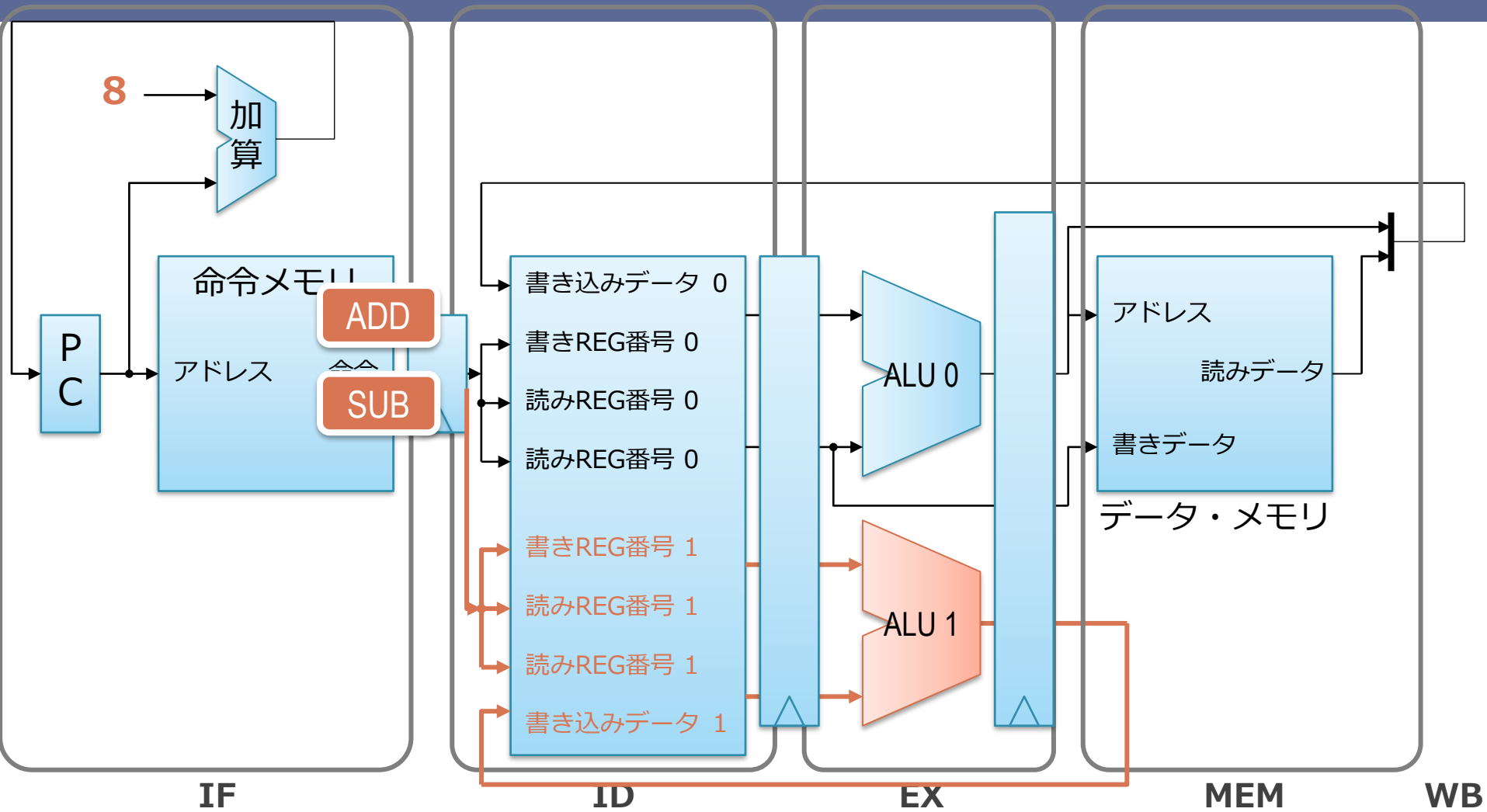


# パイプライン化されたスカラ・プロセッサのブロック図



- 各ステージの間に, D-FF (オレンジの四角) を入れる
  - WB の書き込みについては, レジスタ・ファイル自体がクロックに同期して書き込みが行われるので D-FF は不要
- 各ステージの処理が早く終わっても, 次のクロックまでは D-FF で信号の伝搬は止まる

# 単純な 2-way スーパースカラ・プロセッサの例



- フェッチ, レジスタ・アクセス, ALU を2命令分に拡張 (赤線)
- この例では, データ・メモリは1つのまま (並列実行に制限がある)

# 理想的な場合のスーパースカラ（2-way）による性能向上 = 単位時間あたりの命令処理数が倍増



スカラプロセッサ



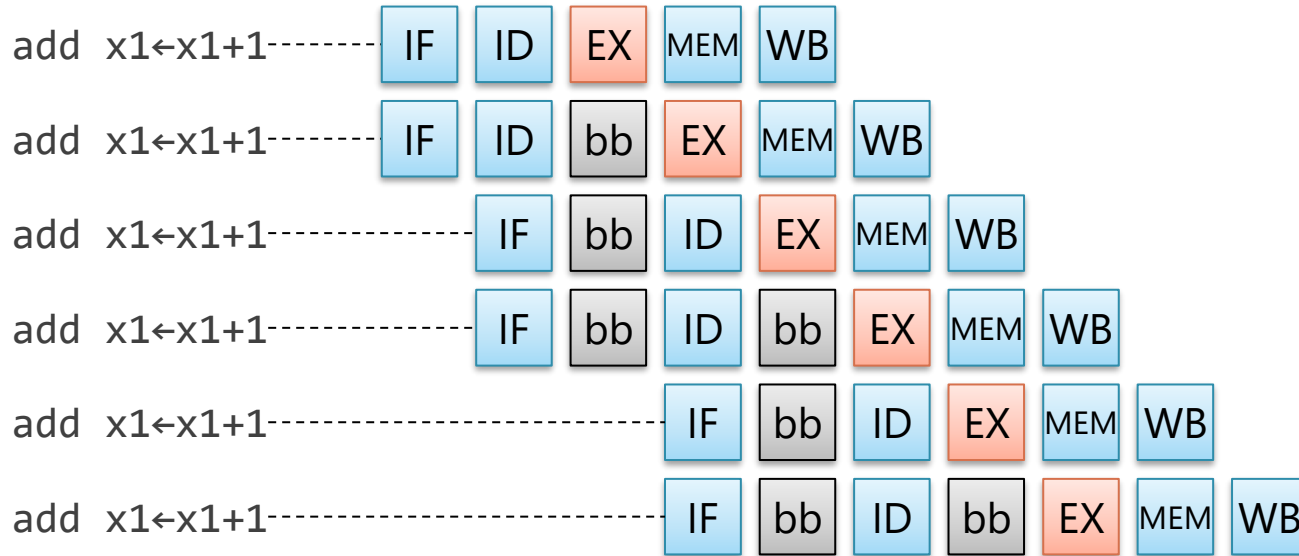
2-way スーパースカラプロセッサ



# スーパースカラによる並列実行の制約

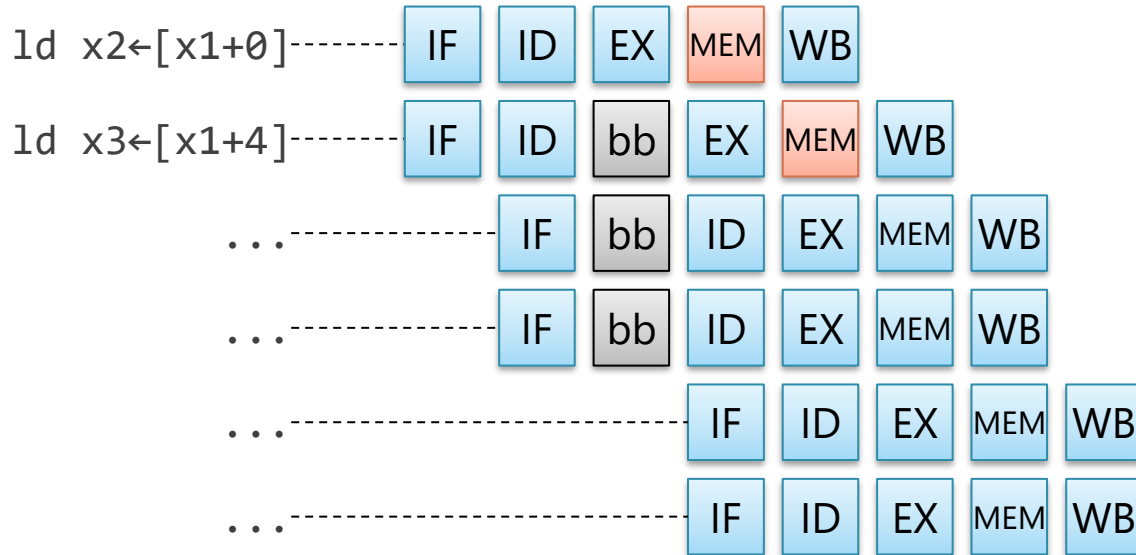
- さまざまな制約があり、実際の性能向上は  $N$  倍にはならない
  - 2-way なら実際には数割ぐらいの性能向上
- 制約の例：
  1. 同時にフェッチされた命令間に依存がある場合
  2. 構造ハザードが起きる場合

# 1. 同時にフェッチされた命令間に依存がある場合



- 最悪の場合：上記のように全ての命令間に連続に依存があるとき
  - 演算が逐次的に行われるようにバブルが入る
  - この場合はスカラ・プロセッサから全く性能があがらない

## 2. 構造ハザードが起きる場合



- 例：先ほどのブロック図のように、データ・メモリが1つしかない場合
  - ロード命令は1サイクルに1つしか実行できない
  - 上記のように、ロードが連続するとバブルが入る
- 回路規模が大きい & 使用頻度が低い演算器はパイプライン間で共有されることが多い = 複数同時に来ると止まる
  - 乗算器, 除算器, 超越関数の演算器など



# 単純なスーパースカラによる並列実行のまとめ

- これまでに説明したような単純なスーパースカラではあまり大きな性能向上が期待できない
  - 2-way なら数割ぐらいの向上
- 同時実行幅（way 数）を増やしていても、何かの制約ですぐ止まる
  - $n$  命令のうち 1 つでもひっかかってたらダメ

# 同時実行幅を増やしていても、何かの制約ですぐ止まる

## ■ どうする？

- 1. 構造ハザード  
→ 必要な回路を増やせば解決する  
(当然にコストが増える)
- 2. データ依存  
→ **命令スケジューリング**

# 今日の内容

1. 命令の並列実行
- 2. データ依存**
3. 静的命令スケジューリング
4. 動的命令スケジューリング

# 命令間の依存関係

- 命令のスケジューリング
  - プログラムの意味を変えずに、命令の実行順を並び変えること
  - これによって並列に実行できる命令を増やす
- プログラムの意味が変わらない = 依存関係をくずさない
  - 以降のスライドでは、スケジューリングの背景として命令間の依存関係を整理しておく

# 命令間の依存関係

1. 制御依存
2. データ依存
  1. 真の依存
  2. 偽の依存

# 制御依存

- 分岐とその後ろにある命令間の依存
  - 分岐命令の後ろにある命令は、分岐先がわかるまで実行不能
  - 分岐先が確定するまでどこを実行すれば良いか不明なため
- これは分岐予測による投機実行により、効果的に解決できる  
(前回の講義)



# データ依存


## 1. 真の依存

- フロー依存 : RAW (read after write)

## 2. 偽の依存

- 逆依存 : WAR (write after read)
- 出力依存 : WAW (write after write)

# 真の依存：フロー依存 RAW (read after write)

- 文字通り, 同じレジスタを「書いた後に読む」際の依存
  - 「真の依存」, 「フロー依存」, 「RAW」は呼び方が違うだけでおなじものを指している
  - 一般に「データの依存関係」と言われたら思い浮かべるもの
- 真の依存の例：I1 が終わらないと I2 は実行できない  
I1: add **x1** ← x2 + 1  
  
I2: add x3 ← **x1** + 1



# 偽の依存 1 : 逆依存 WAR (write after read)

- 同じレジスタを「読んだ後に書く」

- 真の依存（書いた後に読む）と方向が逆

- 逆依存の例：

I1: add x2 ← x1 + 1

I2: add x1 ← x3 + 1



- I1 と I2 の間には真の依存は存在しない

- 「←」の右の入力部分だけみると順番を入れ替えても問題ない
- しかし、もしスケジューリングして I2 を先にやると x1 が破壊されてしまう

# 逆依存がある場合にスケジューリングをすると結果が壊れる

## ■ 逆依存がある命令列：

// 初期状態：x1=1, x2=0, x3=3

I1: add x2←x1+1

I2: add x1←x3+1

// 終了状態：x1=4, x2=2, x3=3

## ■ I1 と I2 の実行順を入れ替えた場合：

// 初期状態：x1=1, x2=0, x3=3

I2: add x1←x3+1

I1: add x2←x1+1

// 終了状態：x1=4, x2=5, x3=3

# 偽の依存 2 : 出力依存

## WAW (write after write)

- 同じレジスタを「書いた後に書く」

- 出力依存の例 :

I1: add **x1** ← x2 + 1



I2: add **x1** ← x3 + 1

- 逆依存と同様に, I1 と I2 の間には真の依存は存在しない
  - 「←」の右辺にある入力部分だけをみると, 順番を入れ替えても問題なさそう?
  - しかし, スケジュールして I2 を先にやると I1 により x1 が破壊されてしまう

# 出力依存がある場合にスケジューリングをすると結果が壊れる

## ■ 逆依存がある命令列：

// 初期状態：x1=1, x2=0, x3=3

I1: add x1←x2+1

I2: add x1←x3+1

// 終了状態：x1=4, x2=2, x3=3

## ■ I1 と I2 の実行順を入れ替えた場合：

// 初期状態：x1=1, x2=0, x3=3

I2: add x1←x3+1

I1: add x1←x2+1

// 終了状態：x1=1, x2=2, x3=3

# 真の依存と偽の依存

- 真の依存は原理的に取り除きようがない
- 偽の依存（逆依存と出力依存）はレジスタを使い回すことによって発生する
  - いろいろ取り除きようがある

# 偽の依存の解消の例

- たとえばレジスタがたくさんあれば，他のレジスタを使うようプログラムを書き換えて偽の依存を取り除ける

- 逆依存（x4 を使うよう書き換え）

I1: add x2←x1+1      I1: add x2←x1+1  
I2: add x1←x3+1      I2: add x4←x3+1



- 出力依存（x4 を使うよう書き換え）

I1: add x1←x2+1      I1: add x1←x2+1  
I2: add x1←x3+1      I2: add x4←x3+1



- ただし，使えるレジスタの数には限りがある

- 上記は「たまたま」x4 は使っていなかった場合の例
- 一般に記憶回路の容量と速度はトレードオフがある
  - 講義第2回「なぜレジスタとメモリがあるのか？」

# 今日の内容

1. 命令の並列実行
2. データ依存
- 3. 静的命令スケジューリング**
4. 動的命令スケジューリング

# 静的命令スケジューリング

## ■ 静的命令スケジューリング

- 並列実行できるようにプログラム内の命令を並びかえておく方法
- 通常はコンパイラが行う

## ■ 静的 vs. 動的

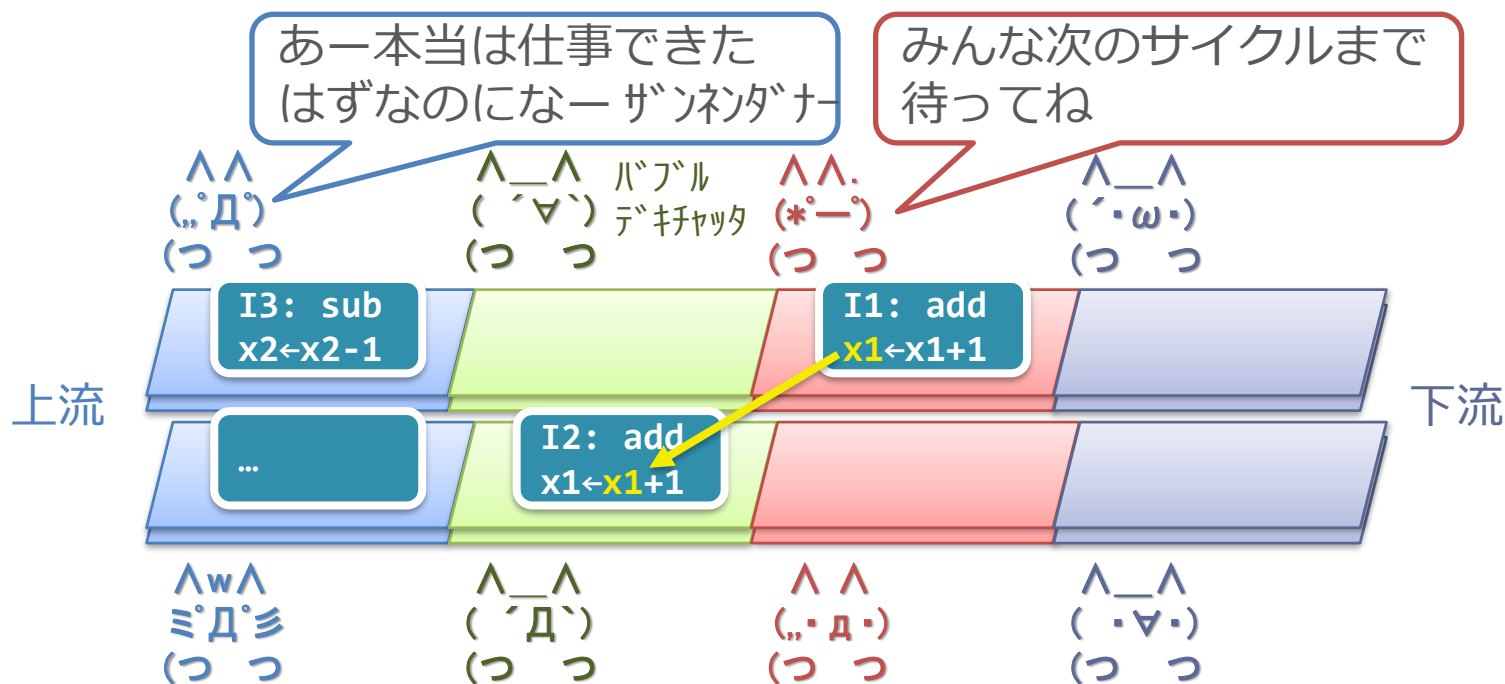
- 静的：
  - 事前にプログラム内の命令を並び替えておく
  - = CPU からみると実行順は変化しない
- 動的：
  - CPU が実行時に並び替える



# 単純なスーパースカラでの実行の例

- 下記のコードでは I1 と I2 には真の依存があるが、I3 は無関係
  - しかし、上流が全部とまるので、I3 も実行できない

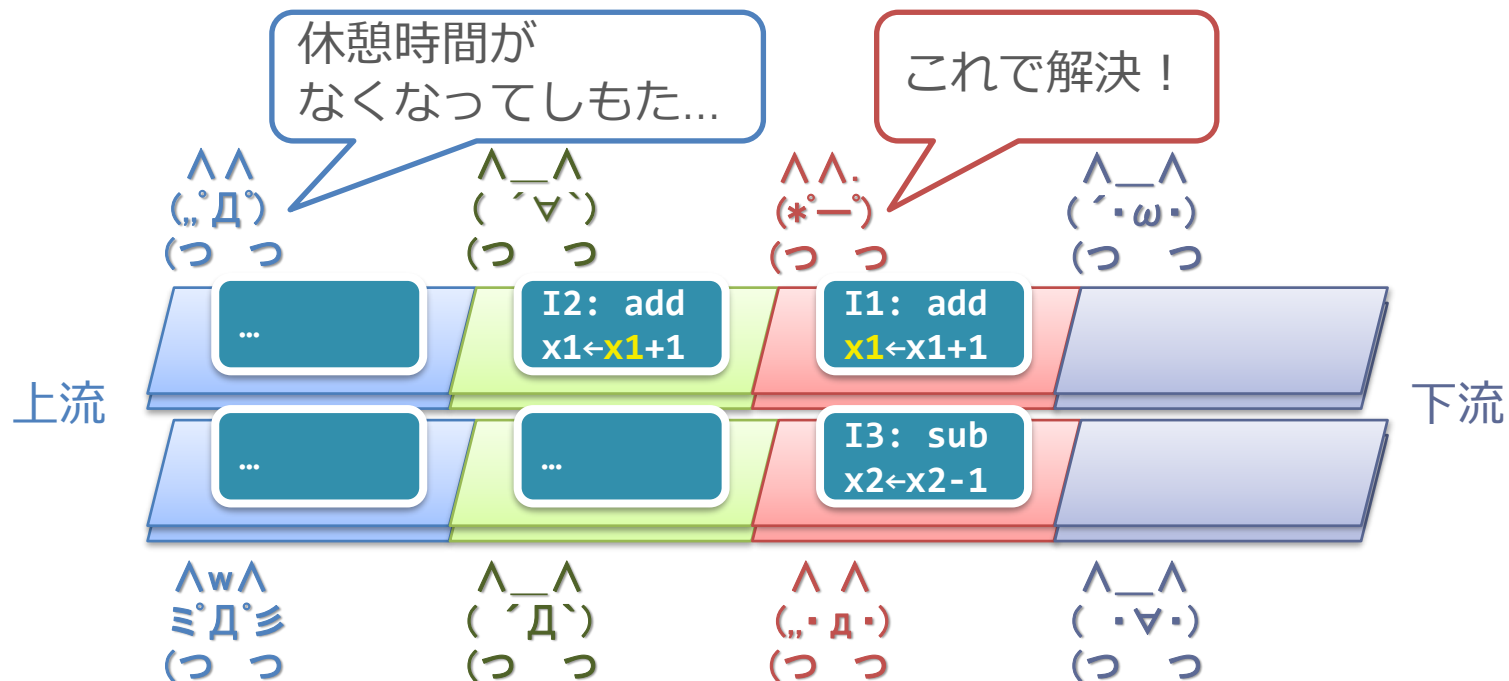
- I1: add  $x1 \leftarrow x1 + 1$   
I2: add  $x1 \leftarrow x1 + 1$   
I3: sub  $x2 \leftarrow x2 - 1$



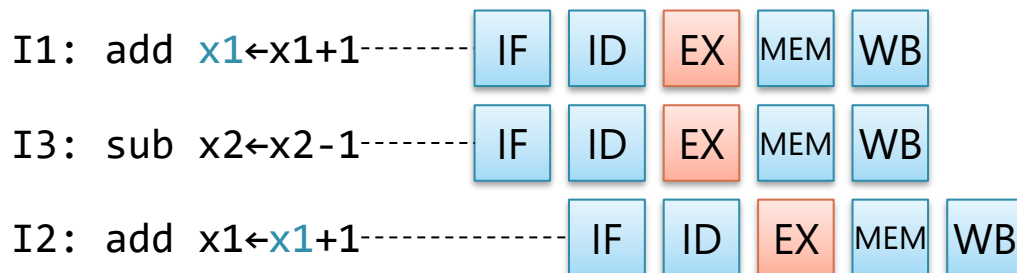
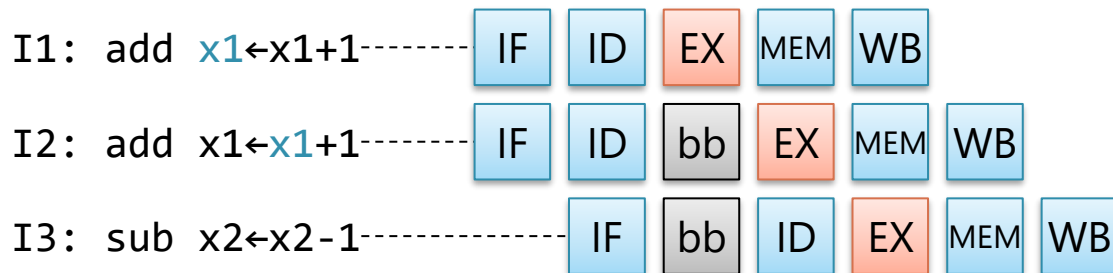
# 静的スケジューリングによる解決

- I2 と I3 を入れ替えておけば、パイプラインはとまらない
  - I1 と I3 が同時にパイプラインに投入される

- I1: add  $x1 \leftarrow x1 + 1$   
I2: add  $x1 \leftarrow x1 + 1$   
I3: sub  $x2 \leftarrow x2 - 1$
- 
- I1: add  $x1 \leftarrow x1 + 1$   
I3: sub  $x2 \leftarrow x2 - 1$   
I2: add  $x1 \leftarrow x1 + 1$



# 静的スケジューリングによる解決



- I2 と I3 の順序を入れ替えたので、バブルが消えた

# VLIW : Very Long Instruction Word

- 静的スケジューリングを前提とした CPU のアーキテクチャ
- 通常の命令を複数にまとめたものを 1 つの命令とする
  - 命令セットの仕様として, 1 つの VLIW 命令内では依存関係を持たないようにする
  - = フェッチした後は必ずそれらは並列実行できる

- I1: add x1←x1+1  
I2: add x2←x2+1  
I3: sub x3←x3-1  
通常の命令セット

I1: 

add x1←x1+1  
add x2←x2+1  
sub x3←x3-1

VLIW ではこれで 1 命令仕様としてこのグループの中に依存関係があることを許さない

# VLIW の利点と問題点

## ■ 利点：

- ハードウェアがすごく簡単
  - スーパスカラでは依存を検出して止める機構があった
  - VLIW では依存を検出して止める機構は不要
    - ◇ 仕様として1つのVLIW 命令内に依存は発生しない

## ■ 問題点：

1. 性能向上に限界がある
2. 互換性がとりにくい

# VLIW の問題 1 : 性能がいまいち出ない

- VLIW は静的スケジューリングに全面的に頼っている
  - あらかじめコンパイラが VLIW 命令を頑張って作る
  - しかし, コンパイラが出来る並び替えは結構自由度が低い

# 静的スケジューリングが難しい例 1

## ■ 例1：分岐を乗り越えた並び替えは難しい

- 3 行目のメモリ・アクセスを if 文の前に持ってくるのは困難
- うかつにやるとメモリ・アクセス例外が起きて落ちる
  - NULL ポインタにアクセスしてしまう

```
1: i = i + 1
2: if (flag)
3:     a = *ptr; // flag が false の時は ptr は NULL
```

# 静的スケジューリングが難しい例 2

## ■ 例 2 : ポインタ参照の順番を入れ替えるのは難しい (不可能ではない)

- 2 行目と 3 行目のメモリ・アクセスを入れ替えることは困難
- うかつにやると意味が変わる

```
1: func(int* a, int* b, int z){  
2:     *a = z + 1; // z+1 より先に c = *b を始めたい  
3:     int c = *b; // しかし a は b と同じ場所を  
                  // 指している可能性がある
```



# 余談：C 言語などでのポインタ経由アクセス

- 以下では, `a` と `b` のために2回分のロード命令が生成される
  - メモリからレジスタに読み出した値は, 普通は使い回す
  - しかし間にグローバル変数へのアクセスが入ると,  
一回 `*ptr` をロードしてレジスタに置いた値が使い回せない
- ```
int g = 0;
func(int* ptr){
    int a = (*ptr) + 1; // *ptr を読み出すロードが生成される
    g = 1; // ptr が g を指している可能性がある
    int b = (*ptr) - 1; // ここにもう一度ロードが入る
```

# 余談：C 言語などでのポインタ経由アクセス

- こういうときは `*ptr` をローカル変数に 1 回コピーしてからアクセスしたほうが速い
  - 以下のコードでは `t` と `g` は自明に別の変数
- ```
int g = 0;
func(int* ptr){
    int t = (*ptr); // *ptr を読み出すロードはここだけで発生
    int a = t + 1;
    g = 1;
    int b = t - 1;
```

# VLIW の問題 2 : 互換性がとりにくい

- 静的に CPU の挙動を仮定して命令をスケジュールする
  - = その仮定がくずすような変更（ハードの改良）ができない
- 要因：
  1. 並列実行幅が固定されている
  2. 実行タイミングを仮定してスケジュールされている  
（発展的なので、付録に

# 1. 並列実行幅が固定されている

- 仕様として「N 命令相当を 1 つの VLIW 命令 とする」としている
  - 性能を上げるために N を後から増やそうと思っても増やせない
  - 既存のコードが動かなくなってしまう

- たとえば N を 2 から 4 にすると互換性がとれない

- I1: 

add x1←x1+1  
add x2←x2+1

I2: 

sub x1←x1-1  
sub x2←x2-1

ある VLIW バージョン 1

I1: 

add x1←x1+1  
add x2←x2+1  
sub x1←x1-1  
sub x2←x2-1

ある VLIW バージョン 2  
そのまま実行すると仕様違反

# VLIW が有用な場所

- VLIW はここまで述べてきたような理由により、現在主流ではない
- しかし、以下のような場面であれば有用
  1. 絶対性能よりも、ハードが小さいこと（電力）の要求が高い
  2. 動作させるソフトウェアが限られている場合
    - 組み込み分野では、特定の1つのソフトのみが動くような使い方をすることがある
      - ◇ 例：炊飯器のCPU（コントローラ）は、お米を炊く制御プログラムしか実行しない
    - こう言う場合は互換性が問題になりにくい
      - ◇ 任意のプログラムを実行する必要がないから

# VLIW が有用な場所

- 典型的には、組み込み CPU が該当
  - 簡単なハードでそこそこの性能がほしい時に有用
- CPU を作る学生実験で性能出したい場合なんかでも有望
  - 実装が簡単 & 課題となる少数のプログラムさえ速ければよい
  - 人力の静的スケジュールで最適化する
    - 専用のコンパイラを作るのはめっちゃ大変
    - 実験の課題だけ手で頑張って命令の順序を入れ替えるならなんとかなる

# 今日の内容

1. 命令の並列実行
2. データ依存
3. 静的命令スケジューリングと VLIW
4. **動的命令スケジューリング**

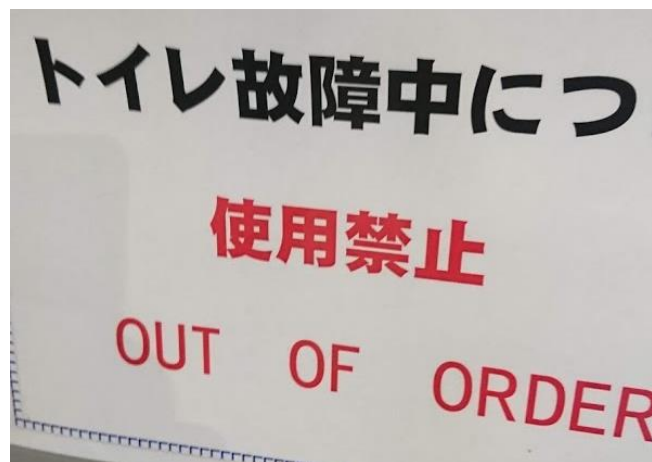
# 動的命令スケジューリング

- CPU により, うまく並列実行できるように命令を並びかえる方法
  - 静的 : 事前に並び替えておくので, CPU からみると変化しない
  - 動的 : CPU が実行時に並び替える



# 言葉の定義

- 並び替えに関係する用語：
  - In-order : プログラムに書かれている順のこと
  - Out-of-order (OoO) : 上記とは違う順番のこと
- (一般には, 公共性の高い機器が故障してることを言うらしい)



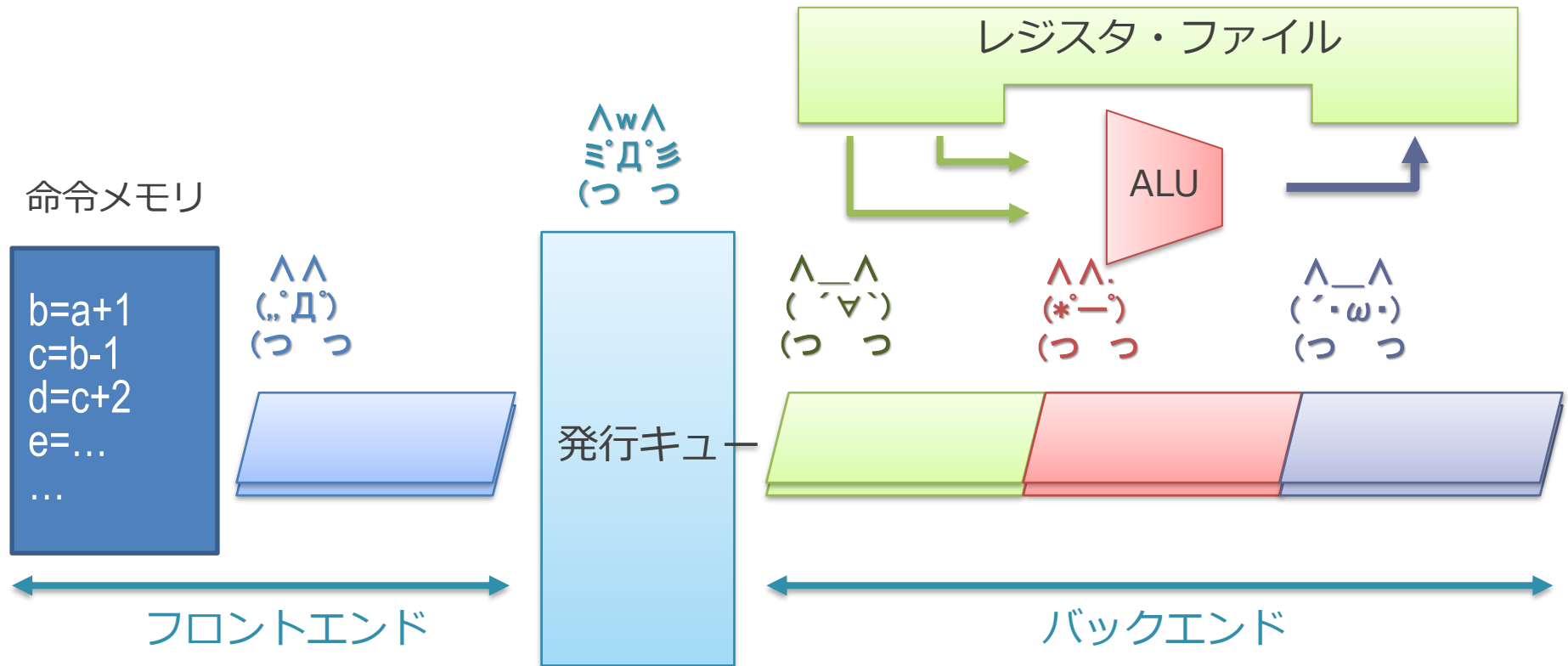
# Out-of-order 実行

- Out-of-order 実行：
  - 動的に命令をスケジューリングして実行すること
  - つまり「プログラム順 = in-order」に実行しないこと
- Out-of-order スーパースカラ・プロセッサ
  - Out-of-order 実行を行うスーパースカラ・プロセッサのこと
  - 現在主流の高性能 CPU は、基本的にみなこのタイプ
    - PC やスマホ, サーバーは大体これ

# Out-of-order 実行

- スカラ or スーパスカラとは直した概念
  - ...ではあるが、普通は動的スケジューリングを行う CPU はスーパスカラ
- スカラで動的スケジューリングをやってもあまり意味がないから
  - Out-of-order 実行を行う機構をつける前に、まず in-order なままスーパスカラ化した方がよい
  - その方が、より少ない回路で性能があがる

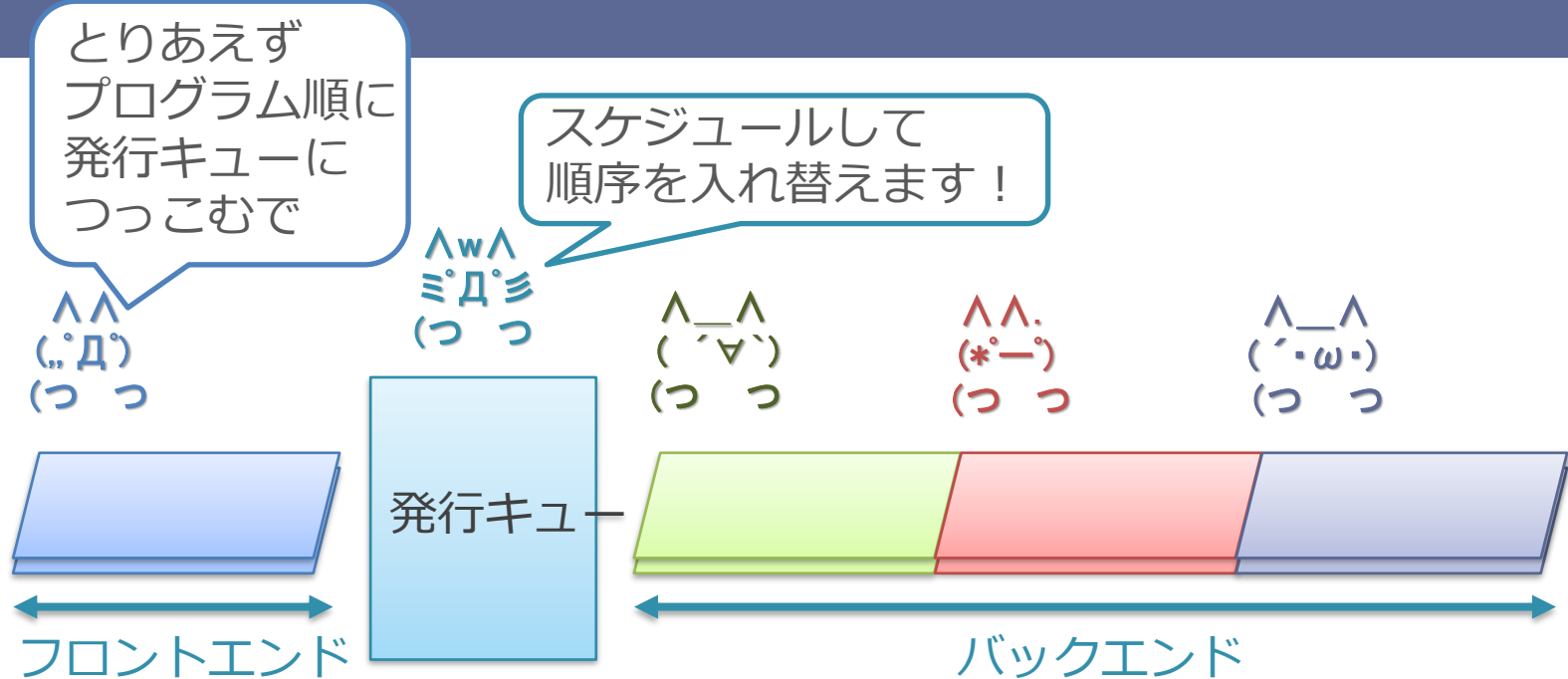
# Out-of-order スーパースカラ・プロセッサの構造



## ■ 発行キューによって前後に分離された構造を持つ

1. フロントエンド : 命令を供給
2. 発行キュー : 命令の待ち合わせ
3. バックエンド : 命令を実行

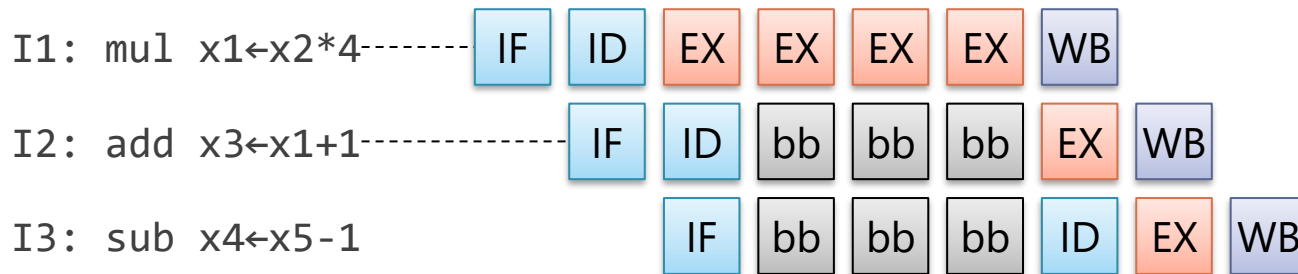
# 大ざっぱな動作



1. フロントエンドで命令をプログラムに順にフェッチ
2. 発行キューに投入
3. そのとき実行可能なものから順にバックエンドに命令を送信
4. レジスタを読んで演算器で実行し書き戻す

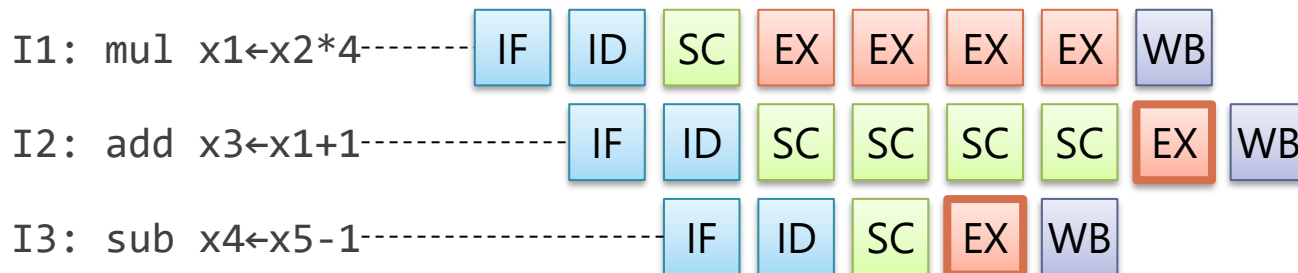
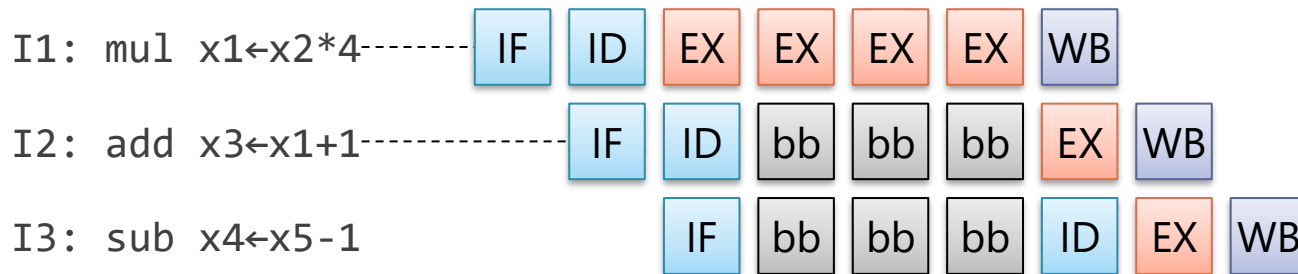
# in-order 実行と out-of-order 実行の違い

- I1 の mul は4サイクルかかる
  - In-order 実行だと, I3 は I1 に依存していないが待たされる
  - プログラムに書かれた順に実行するため



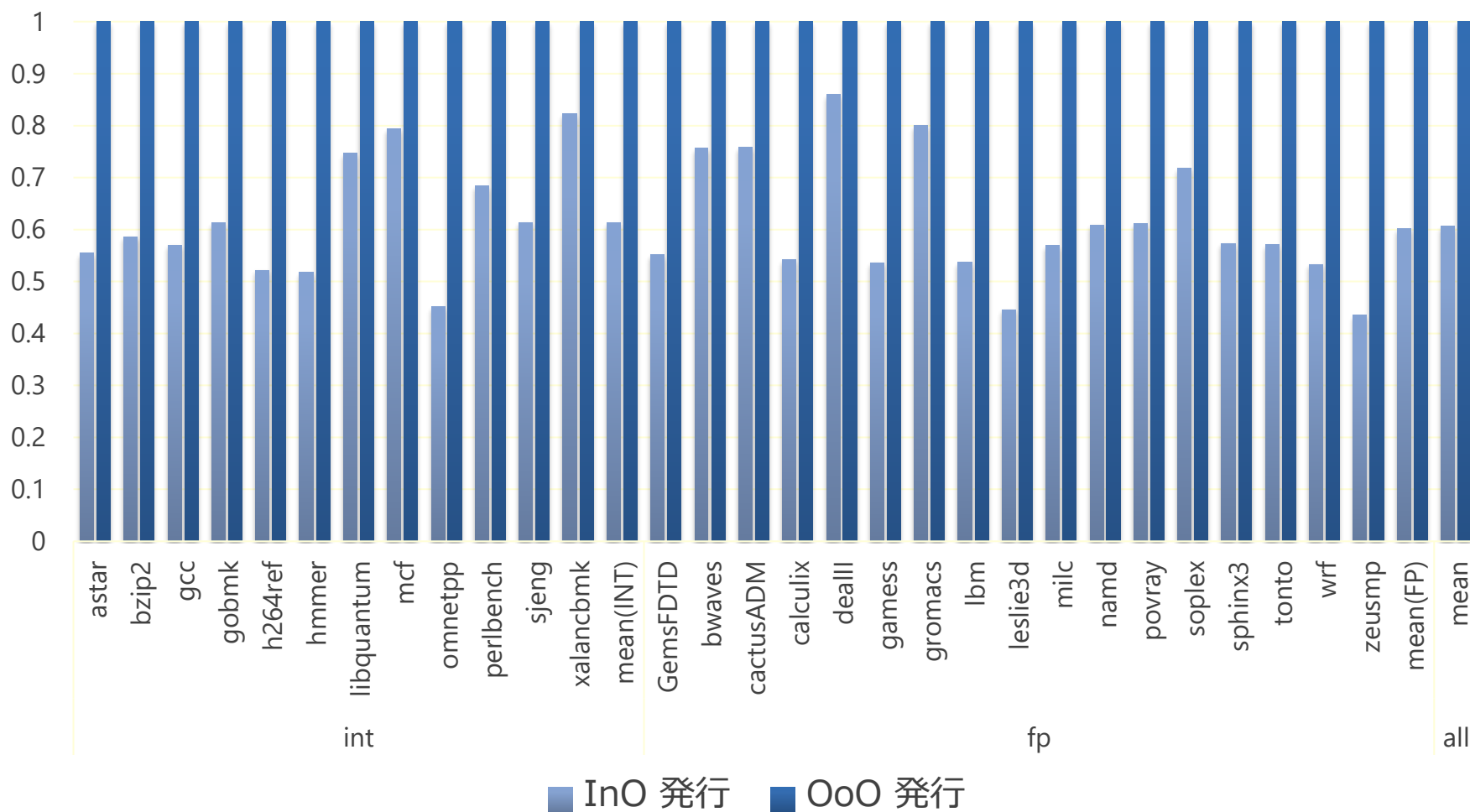
# in-order 実行と out-of-order 実行の違い

- Out-of-order 実行だと, I3 が I2 を追い越して実行できる
  - 各命令はスケジューラ (SC) に入ってから実行可能になるまで待つ
  - 発行キューは, その時実行可能なものから順に EX に命令を送る
    - x1 は計算中なので SC で待つ
    - x5 は既に結果が得られていたので, 先に送信



# In-order 実行と out-of-order 実行の性能

(SPEC CPU 2006 と呼ぶベンチマークをシミュレーションした結果より)



■ OoO 実行の CPU の性能で正規化

● InO 実行の CPU の性能は、平均で OoO 実行の60%程度



# 余談：「スーパスカラ・プロセッサ」という言葉

- 広義の「スーパスカラ・プロセッサ」
  - パイプラインや演算器を複数備え、複数の命令を同時に実行できるもの
- 単に「スーパスカラ・プロセッサ」と書いた場合：
  - 「out-of-order 実行を行うスーパスカラ・プロセッサ」の意味で使われることがある
  - 文脈による

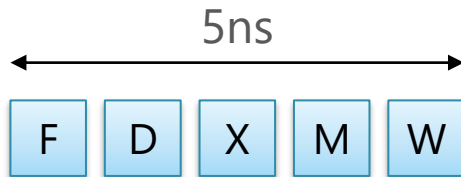
# まとめ

1. 命令の並列実行の基本
2. データ依存
3. 静的命令スケジューリング
4. 動的命令スケジューリング

# 課題 7

## ■ 前提：

- 各命令は以下の5つの処理を経て実行されるものとする
  - F：フェッチ, D：デコード, X：演算,  
M：メモリアクセス, W：書き戻し
- これらの各処理には 1 nano second (ns) がかかるものとする
- 演算子しか行わずメモリアクセスを伴わない命令でも, 必ず M を経るものとする
- たとえば以下の命令を実行するために必要な時間は 5ns
  - 「必要な時間」とは, フェッチから書き戻しが終わるまでの時間とする



# 課題 7

- 前記の前提の下でスカラのシングル・サイクル・プロセッサを構成することを考える
- (1) その場合の最大動作周波数はいくつになるか述べよ
- (2) 以下の命令列を実行するのに必要な時間を計算せよ

```
add x1←x2+x3  
sub x2←x3+x4  
add x5←x6+x7
```

# 課題 7

- 前記の前提の下で, F,D,X,M,W の5ステージからなるパイプライン・プロセッサを構成することを考える  
ただし, in-order スカラ・プロセッサであるものとする
- (3) その場合の最大動作周波数はいくつになるか述べよ
- (4) 以下の命令列を実行するのに必要な時間を計算せよ  
add x1 $\leftarrow$ x2+x3  
sub x2 $\leftarrow$ x3+x4  
add x5 $\leftarrow$ x6+x7
- (5) 以下の命令列を実行するのに必要な時間を計算せよ  
依存関係のために必要な場合のみパイプラインを適宜ストールして実行するものとせよ  
add x1 $\leftarrow$ x2+x3  
ld x2 $\leftarrow$ (x1)  
add x5 $\leftarrow$ x2+x7  
ld x2 $\leftarrow$ (x3)

## 課題 7

- (6) 以下の命令列を実行するのに必要な時間を計算せよ  
ここで mul は乗算命令であり X に 4 サイクルが必要である。  
依存関係のために必要な場合のみパイプラインを適宜ストールして実行するものとせよ  
add x1 ← x2 + x3  
mul x2 ← x1 + x4  
add x5 ← x2 + x7
- (7) 以下の命令列を実行するのに必要な時間を計算せよ  
ここで beq はオペランドが等しい時に分岐する分岐命令である  
プロセッサは分岐予測を行うものとし, beq が分岐予測ミスを起こして LABEL に飛んだあとにフラッシュされてやり直した場合を想定せよ  
li x1 ← 1  
li x2 ← 1  
beq x1 == x2, LABEL  
add x1 ← x2 + x3  
LABEL:  
add x2 ← x3 + x4

## 課題 7

- 各パイプライン・ステージを1文字としてテキスト・エディタ上や紙のノートに絵を描いて考えると良い
  - いちいち四角を描いたりすると、めんどくさい
- たとえばこんな：
  - F D X M W  
F D X M W  
F D X M W

# 提出方法

## ■ 以下を提出：

### 1. 課題 7：

- 提出は Moodle の「課題 7」のところからお願いします
- 紙に書いた場合は写真を撮ってアップロードしてください

### 2. 感想や質問：

- 「感想や質問」のところに投稿してください
- わからない場所がある場合，具体的に書いてもらえると良いです

## ■ 提出締め切り

- Moodle に設定した締め切りまで（6/18 日曜日の 23:59 頃，要確認）

## ■ 注意：

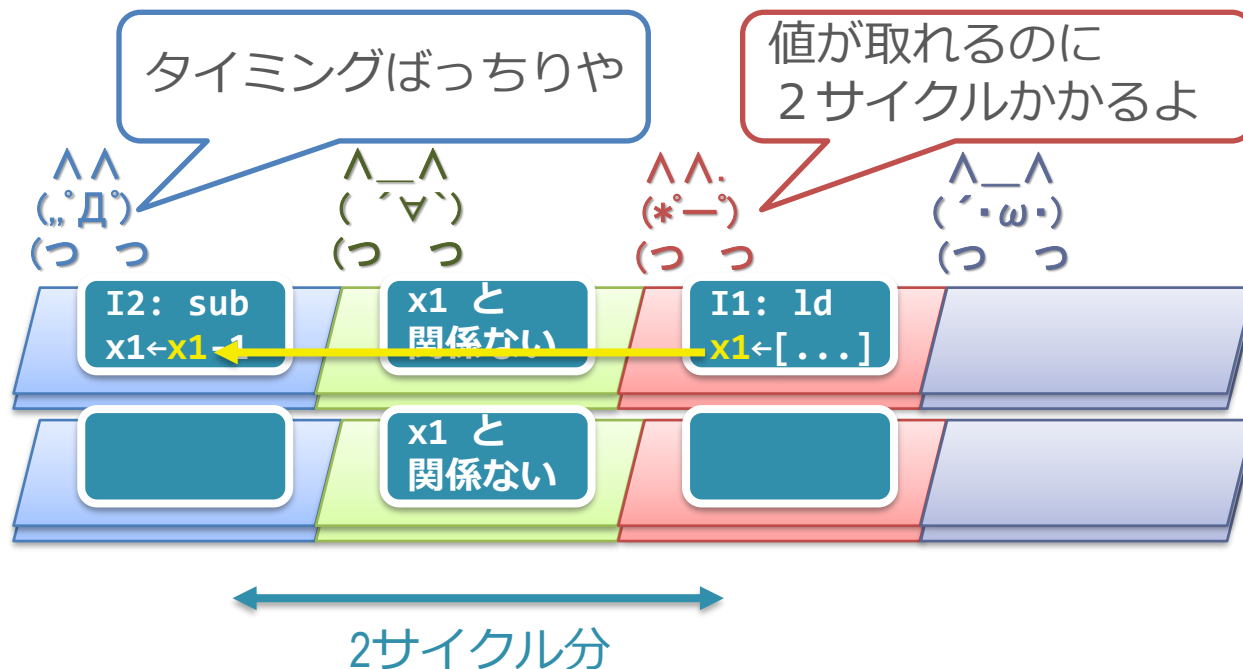
- 課題の出来は，ある程度努力したあとがあれば良しです
  - 必ずしも正解していなくても良いです
- 課題は成績の判定にかなり使われます
  - 仮に課題を一度も出さなかった場合，  
期末試験だけ受けてもまず通らないと思います





## 2.実行タイミングを仮定してスケジュールされている

- 複数サイクルかかる命令は、それに合わせてスケジュールされる
  - 「**M サイクル後**に結果が使用できる」前提でパイプラインが止まらないように事前に命令が並べてある
- 以下では、**I1: ld** の値が使えるタイミングで **I2** が実行できるよう両者を離してある



## 2. 実行タイミングを仮定してスケジュールされている

- M を変化させにくい

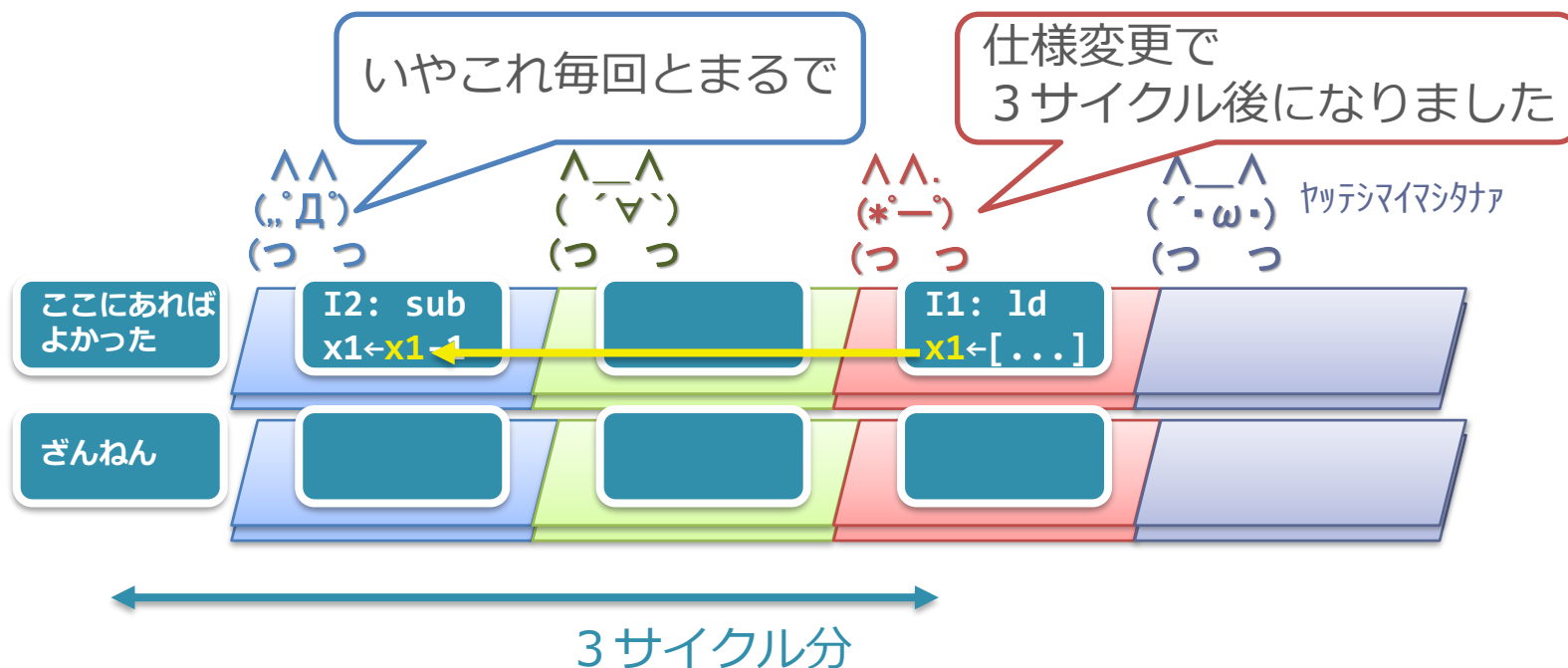
1. 短くなる = 既存のコードは恩恵を受けられない
2. 長くなる = 毎回バブルが発生して性能ががたおちする
  - 想定したタイミングに入力が揃わない

- たとえば、次世代の以下のような CPU 作る場合を考える：

1. 乗算器を改良してレイテンシが短くなった
2. キャッシュを倍にしてヒット率をあげたがレイテンシが多少伸びた

# キャッシュのレイテンシが伸びた場合

- Id のレイテンシが 2 から 3 に変更となった場合
  - 2 サイクルにジャストで合わせて I2 をスケジューリングしておくと、毎回バブルが発生することに



# 実行タイミングを仮定してスケジュールされている ことの他の問題

- そもそも実行時にレイテンシが動的に変化する場合是对応困難
  - キャッシュのヒットとミスが場合によってかわるようなロード
- コンパイラではあらかじめヒットかミスを仮定してスケジュール
  - プロファイラで事前に特性をとって、それに基づくことである程度緩和はできる

# VLIW の例 : Intel Itanium

- インテルと HP で作った VLIW プロセッサ
  - 2000 年代前半ぐらいまでは x86 からこれに移行しようとしていた
  - EPIC アーキテクチャと言われる命令セットを持つ
- これまで述べたような VLIW の問題を緩和するような機構を色々投入
  - 命令セットの互換性をとりながら同時実行幅を増やす
  - 分岐を跨いだロードの移動をハードで支援

# Intel Itanium の性能

- しかし, x86 よりも全然性能がでなかった
  - 1. 静的スケジューリングの限界
  - 2. レイテンシを仮定したコード
  - 3. クロックが上げられなかった
    - 1. 2. に関連して, キャッシュ・アクセスのステージ数を増やしてクロックを上げることができない
    - 2. VLIW の問題緩和の機構のせいで返って複雑化

# Intel Itanium の末路

1. 当時 32 ビットから 64 ビットへの移行の要求が高まっていた
  - 主にメモリ使用量を増やすため
    - 32 ビットのアドレスで表せるのは 4GB まで
  - Itanium はこのための 64 ビット CPU でもあった
2. インテルは互換 CPU の製造開発を許したくなかった
  - しかし既に与えたライセンスは取り消せない
  - 64 ビット世代で内容を刷新して今度は独占を目指した
3. AMD が独自に x86-64 を策定
  - Itanium がさっぱり性能でないので、MS が見切りをつけて Windows の x86-64 対応を開始
4. 後追いでインテルも x86-64 の CPU を開発
  - Itanium は一応製造されているが、2021 年に最終出荷で終了