コンパイラ

第10回 最適化

http://www.info.kindai.ac.jp/compiler
E館3階E-331 内線5459
takasi-i@info.kindai.ac.jp

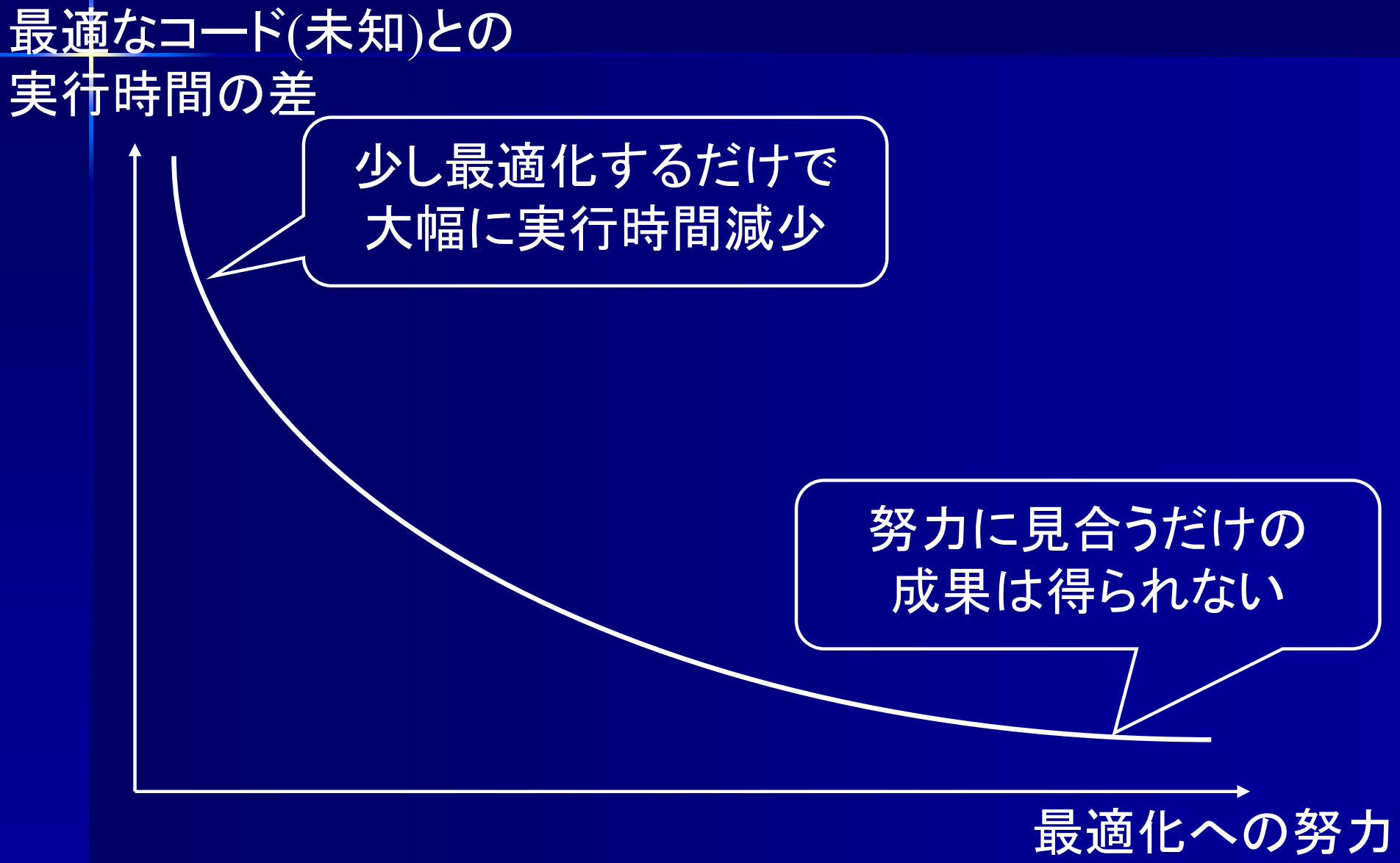
コンパイラの構造

- 字句解析系
- 構文解析系
- 制約検査系
- 中間コード生成系
- 最適化系
- 目的コード生成系

最適化(optimization)

- 時間最適化
  - 実行時間を短くする
    - どんな計算機でも重要
- 空間最適化
  - プログラムサイズを小さくする
    - 容量の小さい計算機(組込マイコン等)では重要

最適化の効率


最適なコード(未知)との
実行時間の差
少し最適化するだけで
大幅に実行時間減少
努力に見合うだけの
成果は得られない
最適化への努力

最適化の分類

- 最適化の範囲
  - 局所的最適化 (local optimization)
  - 大域的最適化 (global optimization)
- ハードウェアとの関係
  - 機械独立最適化 (machine independent)
  - 機械依存最適化 (machine dependent)

時間最適化

- 命令の実行回数を減らす　　機械独立最適化
  - より少ない命令に置き換える
  - 冗長な命令の削除
  - ループ内命令をループ外に移動
- より速い記憶装置を使う　　機械依存最適化
  - 記憶位置をメモリからレジスタに
- ハードウェアの機能を利用する
  - ベクトル化・並列化を行う

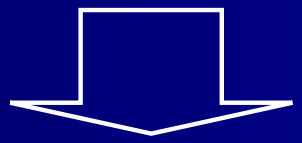
命令実行回数削減

- 命令の実行回数を減らす
  - 可能なことはコンパイル時に計算
  - 式の性質を利用して計算を簡略化
  - 冗長な命令を取り除く
  - 実行頻度の少ない場所に移動
  - 一度求めた結果を再利用
  - ループ回数を減らす
  - 手続き呼び出しの展開

覗き穴最適化 (peephole optimization)

- 覗き穴最適化
  - 局所的最適化

一定範囲(覗き穴)内の命令をチェック

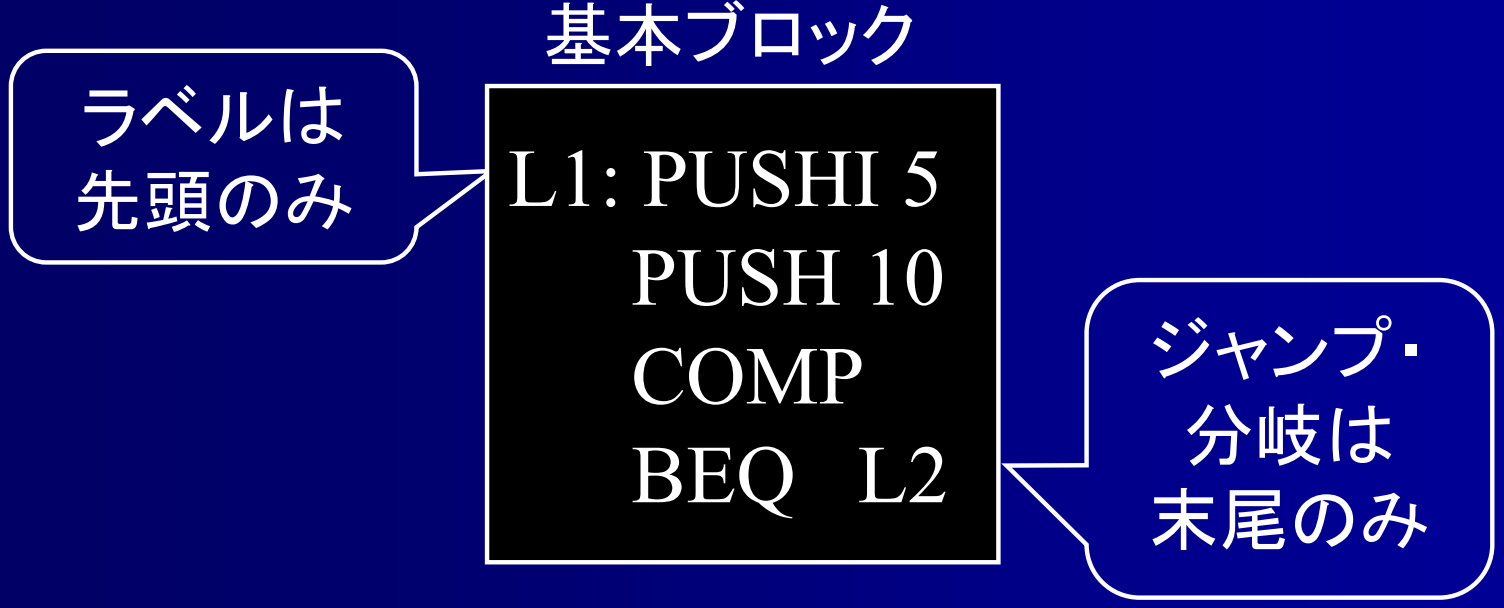


より効率的な命令に置換え

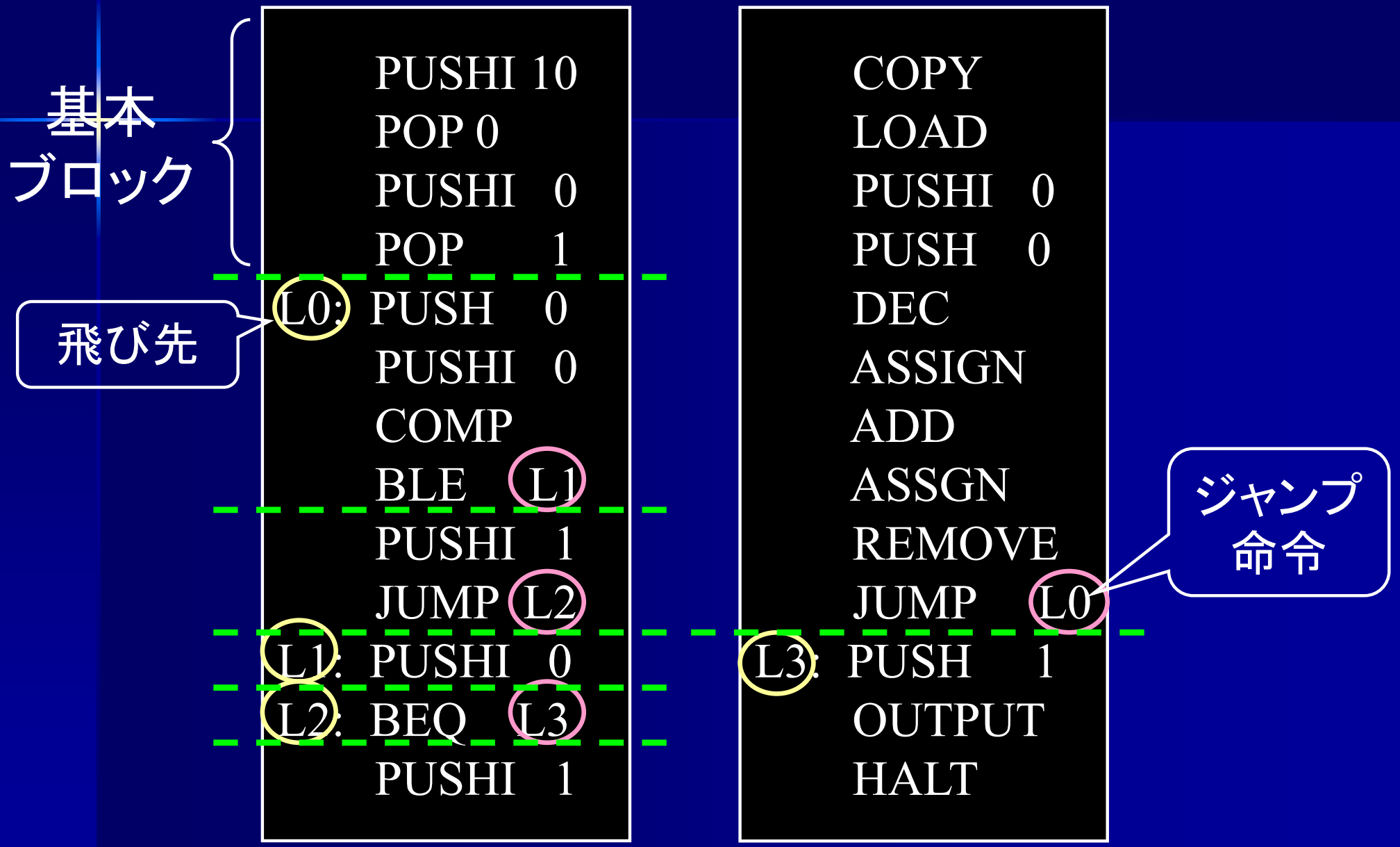
覗き穴の範囲＝基本ブロック

基本ブロック(basic block)

- 命令の基本ブロック
  - ラベルからジャンプ・分岐まで
    - 先頭以外ラベル(ジャンプの飛び先)命令無し
    - 末尾以外ジャンプ・分岐無し



基本ブロック



ジャンプの次 or 飛び先の手前 で区切る

基本ブロック

```
        PUSHI 10
        POP 0
        PUSHI   0
        POP     1
```

```
L0:  PUSH    0
     PUSHI   0
     COMP
     BLE     10
```

```
     PUSHI   1
     JUMP  11
```

```
L1:  PUSHI   0
```

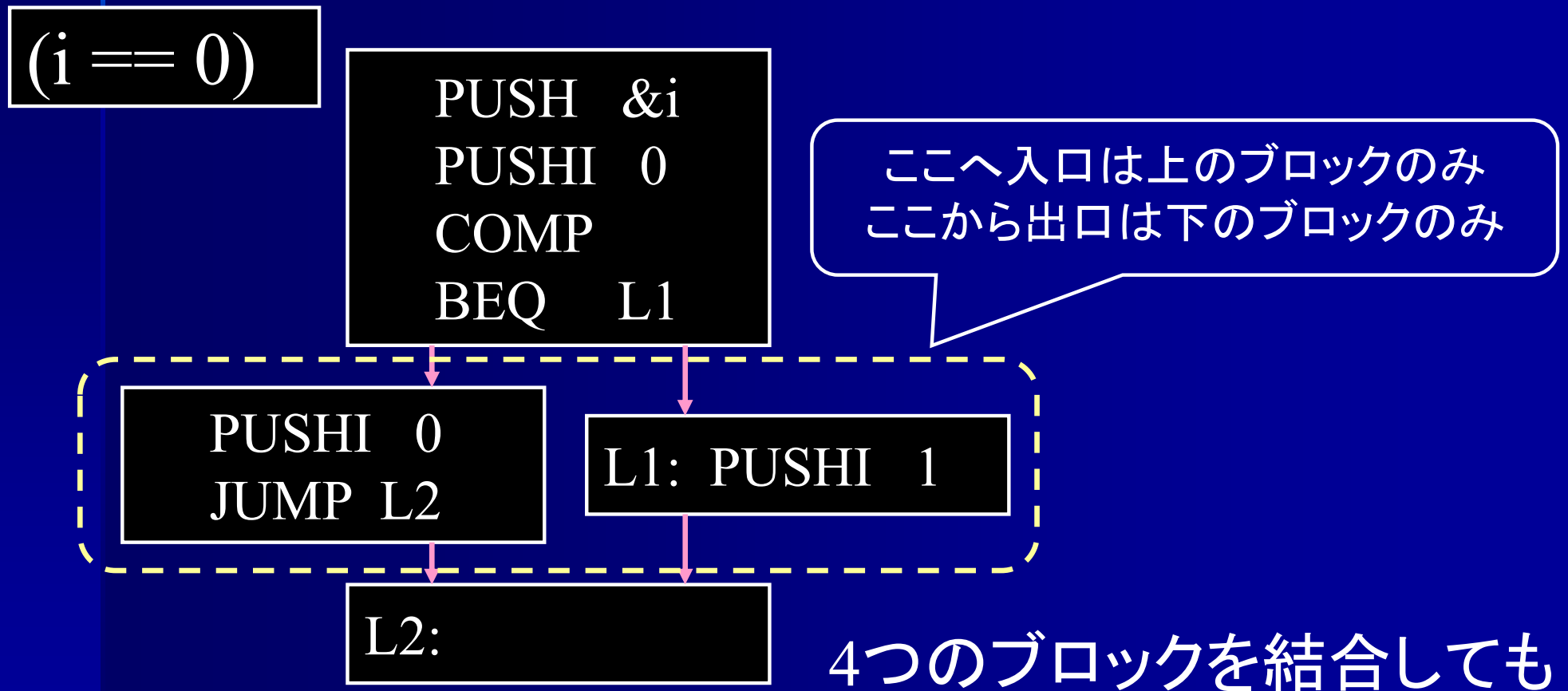
```
L2:  BEQ    L3
```

```
     PUSHI   1
     COPY
     LOAD
     PUSHI   0
     PUSH    0
     DEC
     ASSIGN
     ADD
     ASSGN
     REMOVE
     JUMP    L0
```

```
L3:  PUSH    1
     OUTPUT
     HALT
```

拡張基本ブロック

- 比較演算部分のブロックの組み合わせ



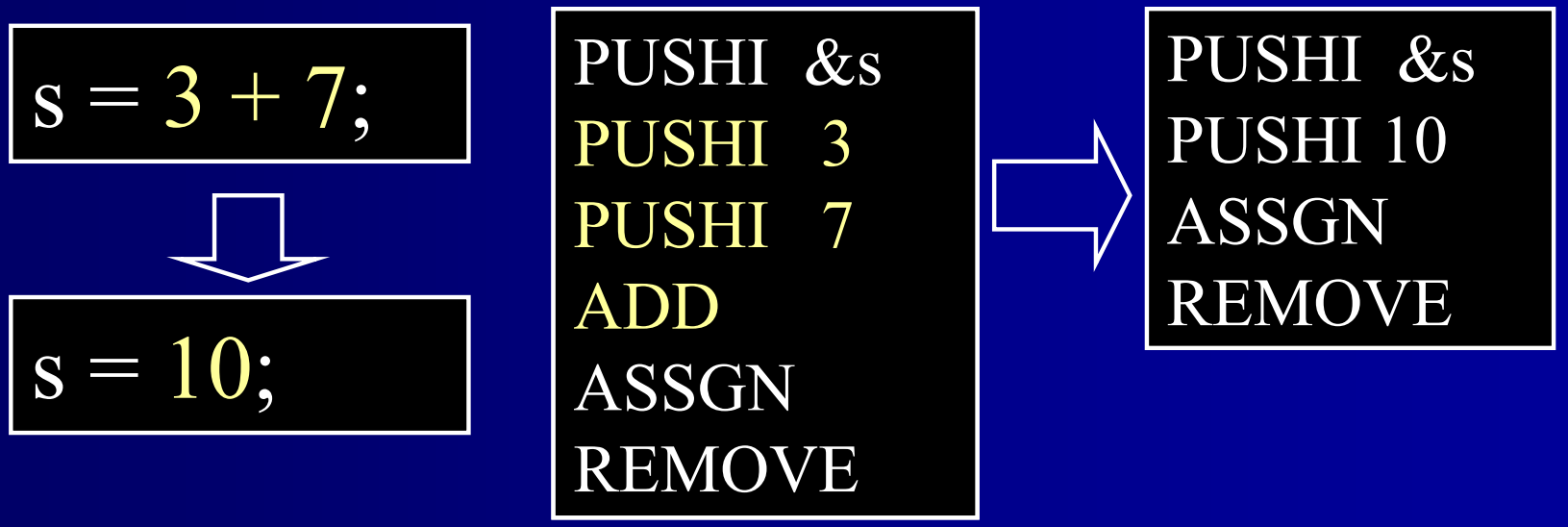
4つのブロックを結合しても
基本ブロックとして扱える

覗き穴最適化

- 基本ブロックごとに最適化
  - コンパイル時定数計算
  - 代数的簡約化
  - 強さ軽減
  - 冗長命令削除

コンパイル時定数計算

- コンパイル時定数計算
  - コンパイル時に定数を計算しておく

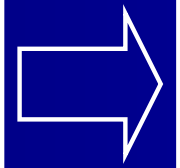


コンパイル時定数計算

```
m = 2 * 4;
```

```
m = 8;
```

```
PUSHI  &m
PUSHI   2
PUSHI   4
MUL
ASSGN
REMOVE
```



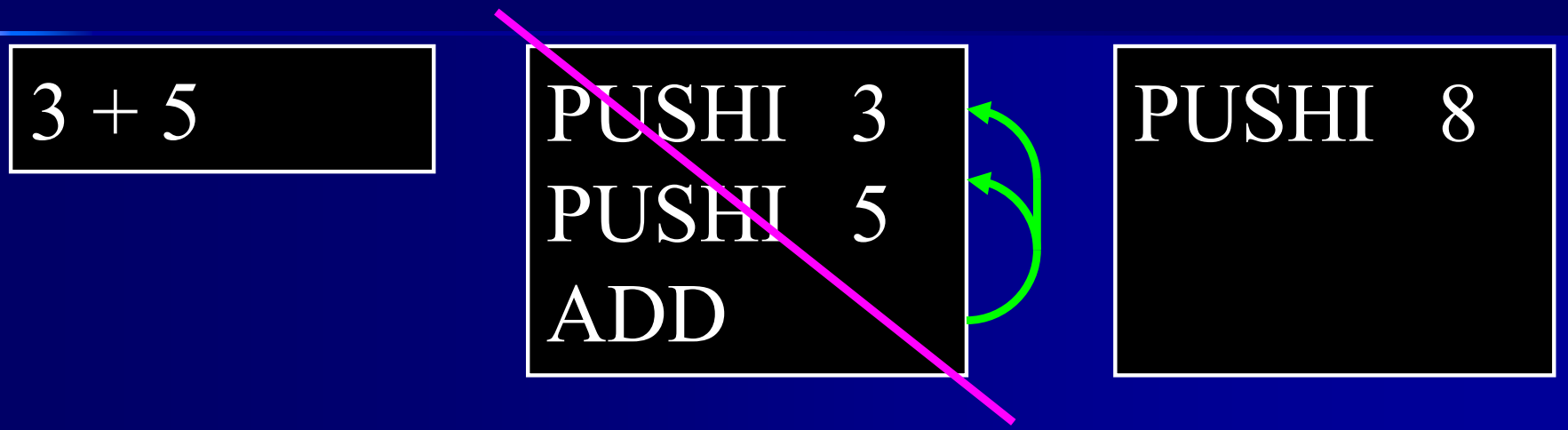
```
PUSHI  &m
PUSHI   8
ASSGN
REMOVE
```

```
d = 10 / 0;
```

零除算エラーとして
コンパイル時にはじく

```
PUSHI  &d
PUSHI 10
PUSHI   0
DIV
ASSGN
REMOVE
```

コンパイル時定数計算



ADD挿入時に

1. 前2個の命令をチェック
2. 両方とも PUSHI なら命令を削除
3. 計算後の命令を積む

PseudoIseg クラス

Kc			命令表格納部
pIseg	: ArrayList <Instruction>		# 命令表
pIsegPtr	: int		# カウンタ
PseudoIseg ()			# コンストラクタ
- setI (opcode : Operator, flag : int, addr : int)		: int	# 命令を格納
appendCode (opcode : Operator, addr : int)		: int	# 命令を格納
appendCode (opcode : Operator)		: int	# 命令を格納
getLastCodeAddress()		: int	# 命令末尾位置
dump()		: void	# 命令表表示
dump2file ()		: void	# 命令表出力
dump2file (outputFileName : String)		: void	# 命令表出力
replaceCode (ptr : int, op : Operator)		: void	# 命令を変更
replaceCode (ptr : int, addr : int)		: void	# 命令を変更
checkOperator (ptr : int, op : Operator)		: boolean	# 命令の一致判定
getOperand (ptr : int)		: int	# オペランドを得る
removeLastCode ()		: void	# 末尾の命令を削除

命令の一致判定

- Isegの命令の一致判定は
  PseudoIseg.checkOperator (int, Operator)
  を利用

```
boolean checkOperator (int ptr, Operator op)
```

例：10番地の命令が PUSHI か？

```
iseg.checkOperator (10, Operator.PUSHI)
```

オペランドの習得，命令の削除

- isegの命令からオペランドを習得

```
int getOperand (int ptr)
```

- isegの末尾の命令を削除

```
void removeLastCode ()
```

<Term> “+” <Term> の最適化

```
void parseExp () {
  parseTerm();
  while (token == “+” ) {
    token = nextToken ();
    parseTerm();

    /* 直前の2つの命令が PUSHI か判定する */
    int addr = iseg.getLastCodeAddress();
    if (iseg.checkCode (addr-1, Operator.PUSHI)
       && iseg.checkCode (addr, Operator.PUSHI)) {
                                  :
```

```
                                :
int addr = getLastCodeAddress();
if (checkCode (addr-1, PUSHI)
   && checkCode (addr, PUSHI)) {
    /* 定数+定数の場合 */
    int val1, val2, val3;
    val1 = getOperand (addr-1); // 2つ前のオペランド
    val2 = getOperand (addr) ;   // 1つ前のオペランド
    val3 = val1 + val2;          // 定数計算
    removeLastCode ();
    removeLastCode (); // 命令を2個削除
    appendCode (PUSHI, val3 ); // 計算後の値を積む
} else appendCode (ADD);
```

コンパイル時定数計算

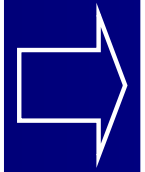
```
a[1] = 10;
```

```
PUSHI  10
PUSHI   1
ADD
PUSHI  10
ASSGN
REMOVE
```

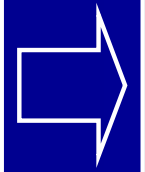
```
PUSHI   11
PUSHI   10
ASSGN
REMOVE
```

```
x = b[20];
```

```
PUSHI   0
PUSHI  30
PUSHI  20
ADD
LOAD
ASSGN
REMOVE
```



```
PUSHI   0
PUSHI  50
LOAD
ASSGN
REMOVE
```



```
PUSHI   0
PUSH   50
ASSGN
REMOVE
```

※ &x = 0
&a = 10
&b = 30
の場合

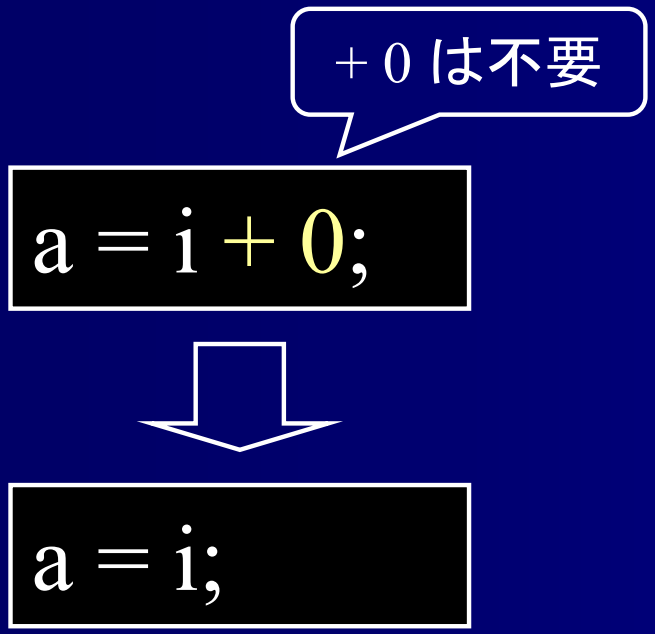
- <Unsigned> ::= NAME [“[” <Exp> “]”] の場合

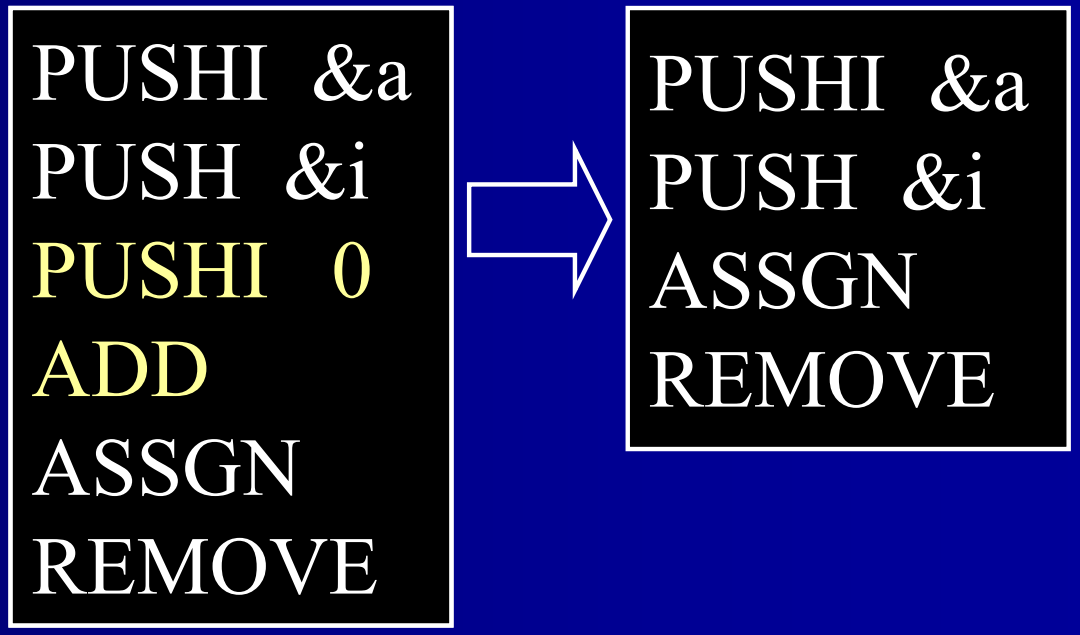
```
if (token == NAME) {
   String name = // tokenから変数名を得る
      int address = // 変数表を参照してname の番地を得る
   token = nextToken();
   appendCode (PUSHI, address);     // 左辺値右辺値共通
   if (token == “[”) { // 配列の場合
      token = nextToken();
      if (token ∈ First (<Exp>))
         parseExp(); else syntaxError();
      if (token == “]” )
         token = nextToken(); else syntaxError();
      int addr = getLastCodeAddress();
      if (checkCode (addr, PUSHI)) { // 配列の添え字が定数
                                  :
```

```
                                    :
if (token == “]” )
   token = nextToken(); else syntaxError();
int addr = getLastCodeAddress()
if (checkCode (addr, PUSHI)) { // 配列の添え字が定数
   int val = getOperand (addr); // 添え字の値を得る
   address += val;          // 先頭の番地 + 添え字 を計算
   removeLastCode ();
   removeLastCode ();   // 命令を2個削除
   if (token == “=” ) {    // 次のトークンが代入の場合
      appendCode (PUSHI, address);       // 左辺値を積む
   else  appendCode (PUSH, address);    // 右辺値を積む
} else {
   appendCode (ADD);
                                    :
```

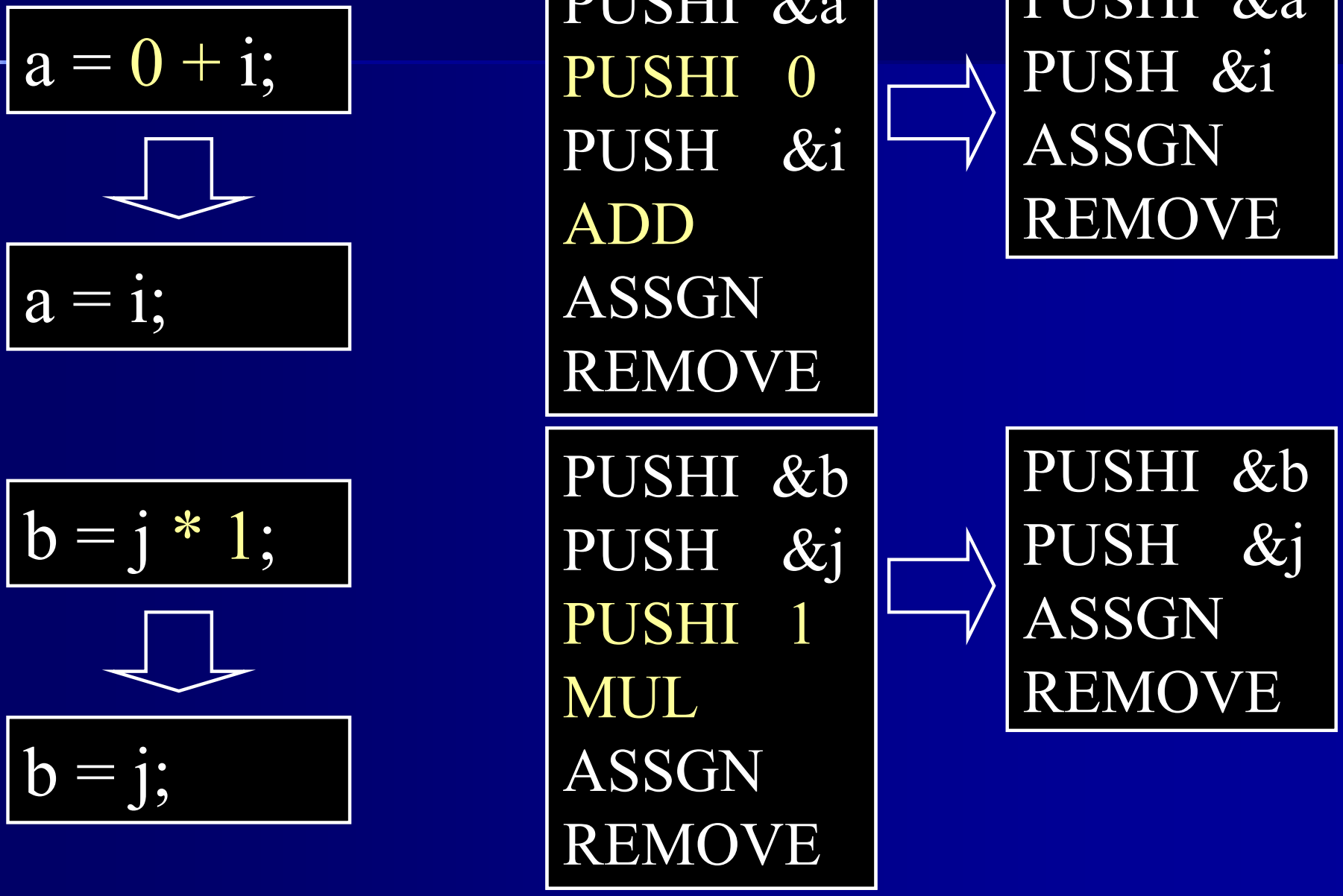
代数的簡約化 (同一則)

- 代数的簡約化
  - 簡略できる演算を簡略化する





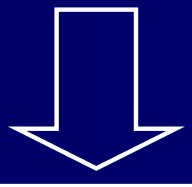
代数的簡約化 (同一則)


a = 0 + i;
a = i;
PUSHI &a
PUSHI 0
PUSH &i
ADD
ASSGN
REMOVE
PUSHI &a
PUSH &i
ASSGN
REMOVE
b = j * 1;
b = j;
PUSHI &b
PUSH &j
PUSHI 1
MUL
ASSGN
REMOVE
PUSHI &b
PUSH &j
ASSGN
REMOVE

代数的簡約化 (有界則)

常に 0

```
a = (i*j+k/l) * 0;
```



```
a = 0;
```

```
PUSHI  &a
PUSH   &i
PUSH   &j
MUL
PUSH   &k
PUSH   &l
DIV
ADD
PUSHI  0
MUL
ASSGN
REMOVE
```

```
PUSHI  &a
PUSHI  0
ASSGN
REMOVE
```

代数的簡約化

- *0 でも削除できない(削除に注意が必要な)例

```
a = (x = y) * 0;
b = 0 * (++i);
```

変数への代入がある

```
c = input * 0;
```

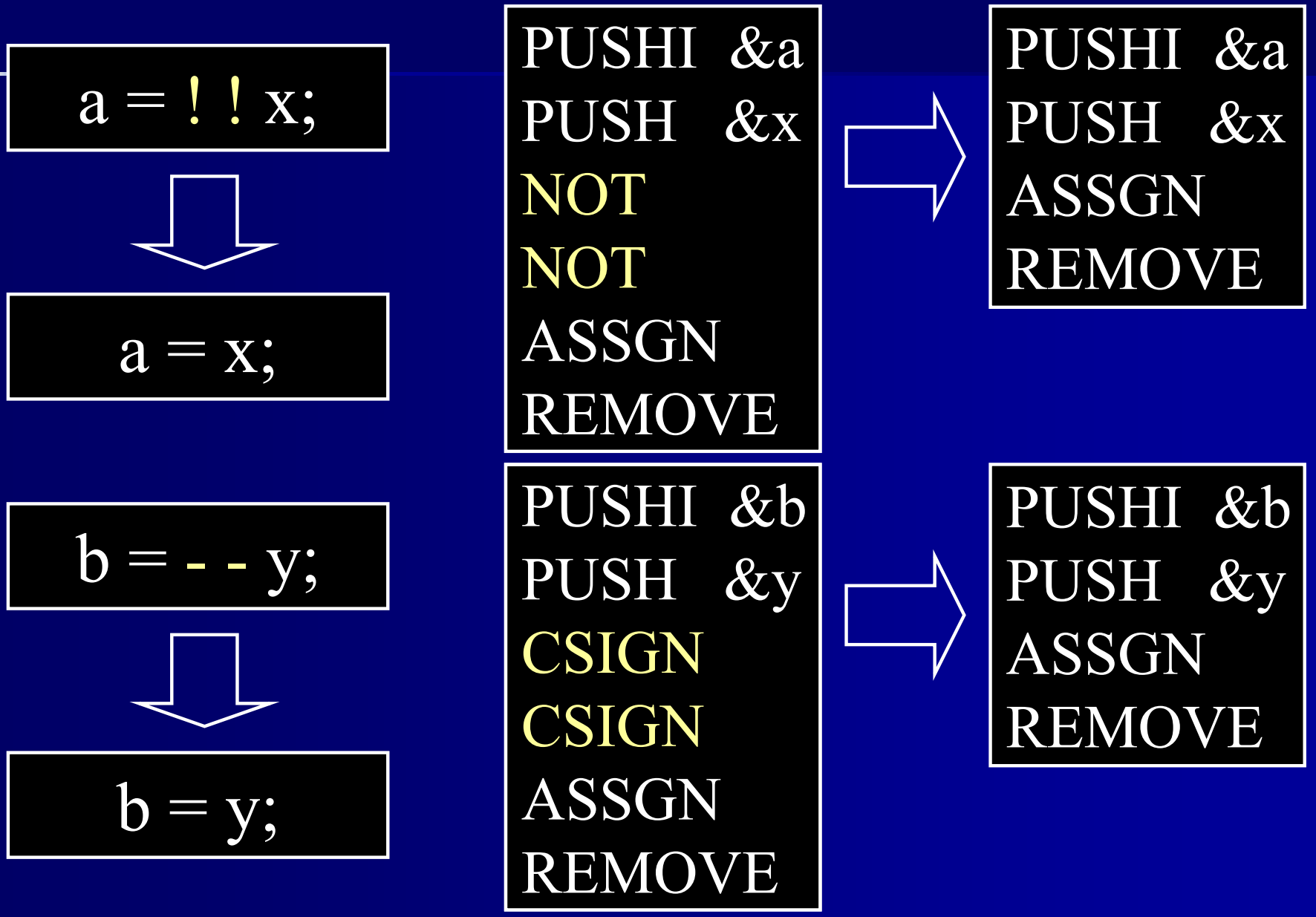
ユーザ入力がある

```
d = output (e) * 0;
```

外部への出力がある

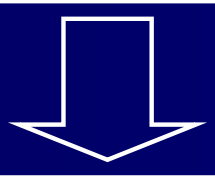
代入, 入力, 出力がある場合は注意が必要

代数的簡約化 (二重否定)


a = ! ! x;
a = x;
PUSHI &a
PUSH &x
NOT
NOT
ASSGN
REMOVE
PUSHI &a
PUSH &x
ASSGN
REMOVE
b = - - y;
b = y;
PUSHI &b
PUSH &y
CSIGN
CSIGN
ASSGN
REMOVE
PUSHI &b
PUSH &y
ASSGN
REMOVE

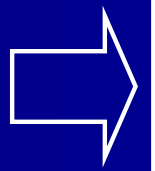
代数的簡約化 (零判定)

(f == true)



(f)

```
    PUSH  &f
    PUSHI   1
    COMP
    BEQ    L1
    PUSHI  0
    JUMP  L2
L1: PUSHI  1
L2:    :
```



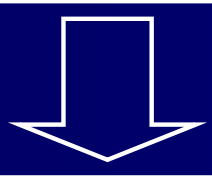
```
    PUSH  &f
       :
```

(※以下の様にした方が安全)

```
PUSH  &f
NOT
NOT
   :
```

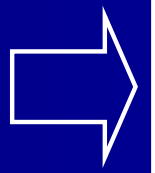
代数的簡約化 (零判定)

(f == false)



(! f)

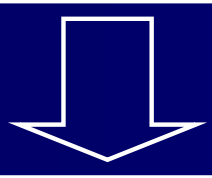
```
      PUSH  &f
      PUSHI  0
      COMP
      BEQ    L1
      PUSHI  0
      JUMP  L2
L1:  PUSHI  1
L2:      :
```



```
      PUSH  &f
      NOT
        :
```

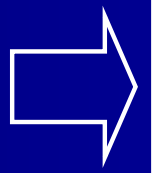
代数的簡約化 (零判定)

(n == 0)



(! n)

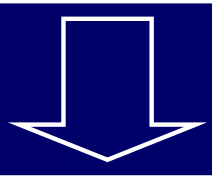
```
      PUSH  &n
      PUSHI  0
      COMP
      BEQ    L1
      PUSHI  0
      JUMP  L2
L1:  PUSHI  1
L2:      :
```



```
      PUSH  &n
      NOT
        :
```

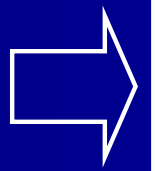
代数的簡約化 (零判定)

(n != 0)



(n)

```
    PUSH  &n
    PUSHI  0
    COMP
    BNE    L1
    PUSHI  0
    JUMP  L2
L1: PUSHI  1
L2:    :
```



```
    PUSH  &n
       :
```

(※以下の様にした方が安全)

```
PUSH &n
NOT
NOT
   :
```

簡約化可能な演算命令の例

- 0	0							- - x	x
x * 0	0	0 * x	0	x * 1	x	1 * x	x		
x / 0	err	0 / x	0	x / 1	x			x / x	1
x % 0	err	0 % x	0	x % 1	0			x % x	0
x + 0	x	0 + x	x						
x - 0	x	0 - x	- x					x - x	0
x == 0	! x	0 == x	! x	x != 0	x	0 != x	x		
! F	T			! T	F			! ! x	x
x && F	F	F && x	F	x && T	x	T && x	x	x && x	x
x || F	x	F || x	x	x || T	T	T || x	T	x || x	x
x == F	! x	F == x	! x	x == T	x	T == x	x	x == x	T
x != F	x	F != x	x	x != T	! x	T != x	! x	x != x	F

比較命令

t : スタックトップ　s: スタックの2番目

比較命令	s < t	s == t	s > t
COMP	-1	0	1
EQ	0	1	0
NE	1	0	1
LE	1	1	0
LT	1	0	0
GE	0	1	1
GT	0	0	1

情報システムプロジェクトI の
VSMアセンブラでは COMP のみ使用可

比較演算のアセンブラコード

(<Exp>$_1$ == <Exp>$_2$)

```
        <Exp>1のコード
        <Exp>2のコード
        COMP
        BEQ     L1
        PUSHI  0
        JUMP    L2
L1: PUSHI  1
L2:
```

演算子	分岐コード
==	BEQ
!=	BNE
<=	BLE
<	BLT
>=	BGE
>	BGT

比較演算のアセンブラコード (EQ 命令がある場合)

(<Exp>$_1$ == <Exp>$_2$)

<Exp>$_1$のコード
<Exp>$_2$のコード
EQ

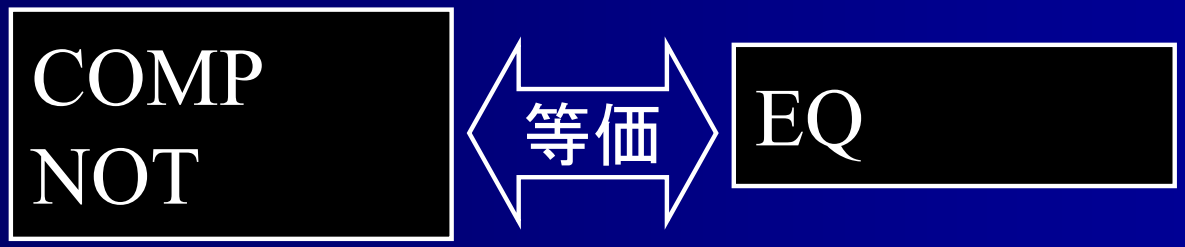
演算子	比較命令
==	EQ
!=	NE
<=	LE
<	LT
>=	GE
>	GT

COMP と EQ

比較命令	s < t	s == t	s > t
COMP	-1 (true)	0 (false)	1 (true)
EQ	0 (false)	1 (true)	0 (false)

COMP と EQ は 真偽が逆

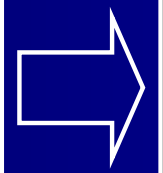
⇒ COMP の値を否定すれば EQ と等価



代数的簡約化(比較演算)

(<Exp>$_1$ == <Exp>$_2$)

```
        <Exp>1のコード
        <Exp>2のコード
        COMP
        BEQ     L1
        PUSHI   0
        JUMP    L2
L1:     PUSHI   1
L2:
```



```
        <Exp>1のコード
        <Exp>2のコード
        COMP
        NOT
```

COMP と NE

比較命令	s < t	s == t	s > t
COMP	-1 (true)	0 (false)	1 (true)
NE	1 (true)	0 (false)	1 (true)

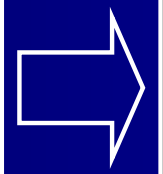
COMP と NE は 真偽が同じ

⇒ COMP の値はそのままで NE と等価

代数的簡約化(比較演算)

(<Exp>$_1$!= <Exp>$_2$)

```
      <Exp>1のコード
      <Exp>2のコード
      COMP
      BNE     L1
      PUSHI  0
      JUMP    L2
L1: PUSHI  1
L2:
```



```
      <Exp>1のコード
      <Exp>2のコード
      COMP
```

(※以下の様にした方が安全)

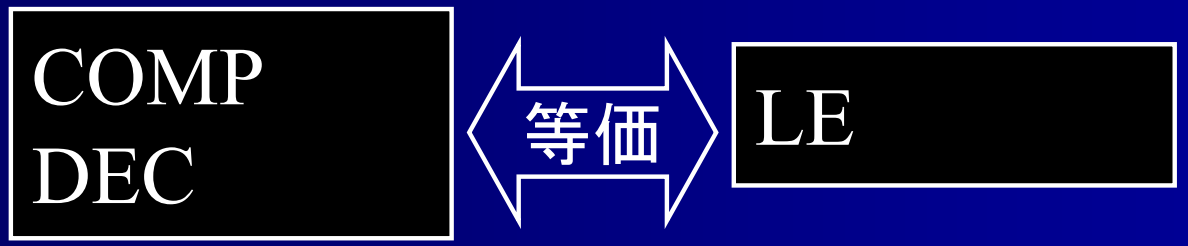
```
COMP
NOT
NOT
```

COMP と LE

比較命令	s < t	s == t	s > t
COMP	-1 (true)	0 (false)	1 (true)
LE	1 (true)	1 (true)	0 (false)
COMP DEC	-2 (true)	-1 (true)	0 (false)

COMP の値から 1 を引くと LE は 真偽が同じ

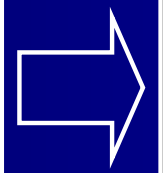
⇒ COMP の値から1を引けば LE と等価



代数的簡約化 (比較演算)

(<Exp>$_1$ <= <Exp>$_2$)

```
      <Exp>1のコード
      <Exp>2のコード
      COMP
      BLE     L1
      PUSHI  0
      JUMP    L2
L1: PUSHI  1
L2:
```



```
      <Exp>1のコード
      <Exp>2のコード
      COMP
      DEC
```

(※以下の様にした方が安全)

```
COMP
DEC
NOT
NOT
```

比較演算のアセンブラコード

(<Exp>$_1$ == <Exp>$_2$)

```
      <Exp>1のコード
      <Exp>2のコード
      COMP
      BEQ     L1
      PUSHI   0
      JUMP    L2
L1:   PUSHI   1
L2:
```

演算子	コード
==	COMP NOT
!=	COMP
<=	COMP DEC
<	COMP INC NOT
>=	COMP INC
>	COMP DEC NOT

代数的簡約化 (条件分岐)

if (<Exp>$_1$ == <Exp>$_2$) ...

```
      <Exp>1
      <Exp>2
      COMP
      BEQ     L1
      PUSHI   0
      JUMP    L2
L1:   PUSHI   1
L2:   BEQ     L3
```

代数的簡約化

```
<Exp>1
<Exp>2
COMP
NOT
BEQ   L3
```

代数的簡約化

```
<Exp>1
<Exp>2
COMP
BNE   L3
```

否定した結果
0 のとき分岐 ⇔ 0以外のとき分岐

代数的簡約化 (条件分岐)

if (<Exp>$_1$ <= <Exp>$_2$) ...

```
      <Exp>1
      <Exp>2
      COMP
      BLE     L1
      PUSHI   0
      JUMP    L2
L1:   PUSHI   1
L2:   BEQ     L3
```

代数的簡約化

```
<Exp>1
<Exp>2
COMP
DEC
BEQ   L3
```

代数的簡約化

```
<Exp>1
<Exp>2
COMP
BGT   L3
```

1 を引いた結果
0 のとき分岐

⇔ 1 のとき分岐

条件分岐のアセンブラコード

if (<Exp>$_1$ == <Exp>$_2$)

```
      <Exp>1のコード
      <Exp>2のコード
      COMP
      BEQ     L1
      PUSHI   0
      JUMP    L2
L1:   PUSHI   1
L2:   BEQ L3
```

演算子	コード
==	COMP BNE L3
!=	COMP BEQ L3
<=	COMP BGT L3
<	COMP BGE L3
>=	COMP BLT L3
>	COMP BLE L3

代数的簡約化 (条件分岐)

```
if (<Exp> == 0 ) ...
```

```
      <Exp>
      PUSHI  0
      COMP
      BEQ    L1
      PUSHI  0
      JUMP   L2
L1:   PUSHI  1
L2:   BEQ    L3
```

代数的簡約化

```
<Exp>
NOT
BEQ   L3
```

代数的簡約化

```
<Exp>
BNE   L3
```

条件分岐のアセンブラコード

if (<Exp> == 0) …

```
      <Exp>のコード
      PUSHI   0
      COMP
      BEQ     L1
      PUSHI  0
      JUMP    L2
L1: PUSHI  1
L2: BEQ L3
```

演算子	コード
==	BNE L3
!=	BEQ L3
<=	BGT L3
<	BGE L3
>=	BLT L3
>	BLE L3

冗長命令削除 (自己代入)

- 冗長命令削除
  - 無用な命令を取り除く

自分自身への代入

```
a = a;
```

削除

```
PUSHI   &a
PUSH    &a
ASSGN
REMOVE
```

冗長命令削除 (自己代入)

```
a = a + (2 - 2);
b = b * (3 / 3);
c = c && (5 == 5);
d = (d == (1 > 0));
```

定数計算

```
a = a + 0;
b = b * 1;
c = c && true;
d = (d == true);
```

代数的簡約化

```
a = a;
b = b;
c = c;
d = d;
```

削除

冗長命令削除 (ASSGN と REMOVE)

```
s = i + j;
output (s);
```

```
PUSHI   &s
PUSH    &i
PUSH    &j
ADD
ASSGN
REMOVE
PUSH    &s
OUTPUT
```

スタックに s の値が残る

s の値を削除

s の値を積む

```
PUSHI   &s
PUSH    &i
PUSH    &j
ADD
ASSGN
OUTPUT
```

```
output (s = i + j);
```

冗長命令削除 (ASSGN と REMOVE)

```
i = j*k;
```

```
PUSHI  &i
PUSH   &j
PUSH   &k
MUL
ASSGN
REMOVE
```

スタックに
i の値が残る

即座に値を削除

```
PUSH  &j
PUSH  &k
MUL
POP   &i
```

冗長命令削除 (COPY と REMOVE)

```
i++;
```

スタックに
値を残すため

即座に値を削除

```
PUSH  &i
COPY
INC
POP   &i
REMOVE
```

```
PUSH  &i
INC
POP   &i
```

```
++j;
```

```
PUSH  &j
INC
COPY
POP   &j
REMOVE
```

```
PUSH  &j
INC
POP   &j
```

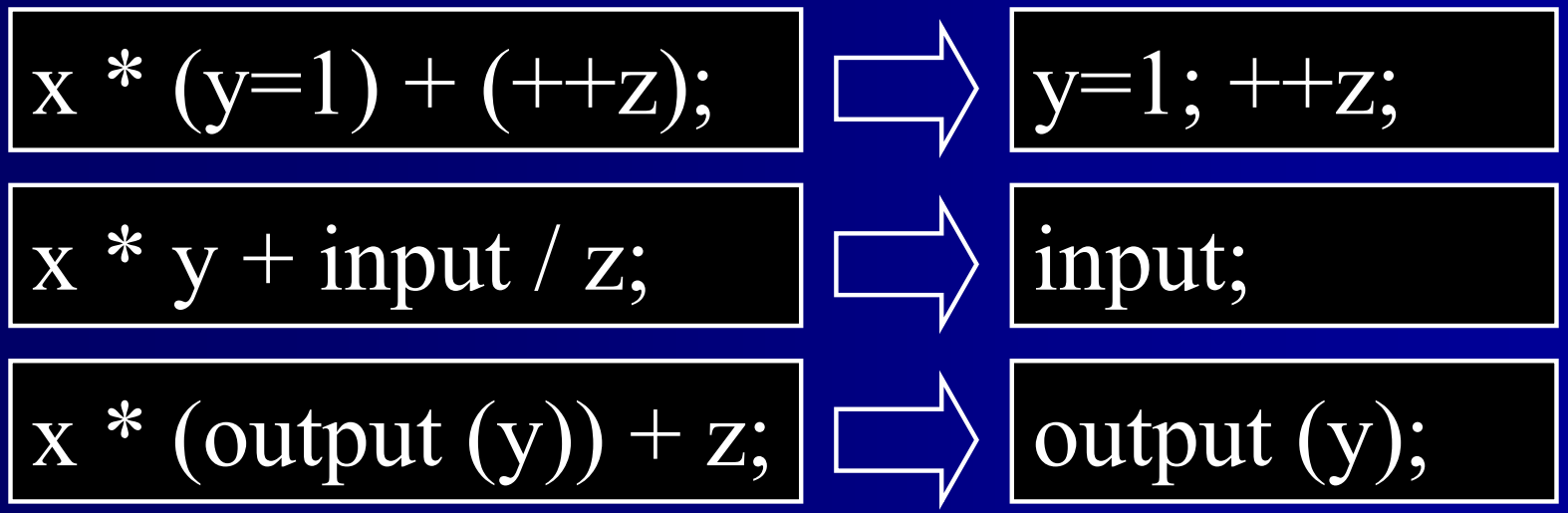
冗長命令削除 (不要な式文)

```
a * b + c / d;
```

代入, 入力, 出力の無い式文

⇒ 削除可能

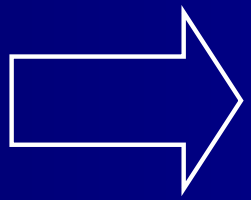
代入, 入力, 出力がある場合は
注意が必要



強さの軽減 (strength reduction)

- 強さの軽減
  - より速い演算に置き換える

```
a = x * 2;
```



```
a = x + x;
```

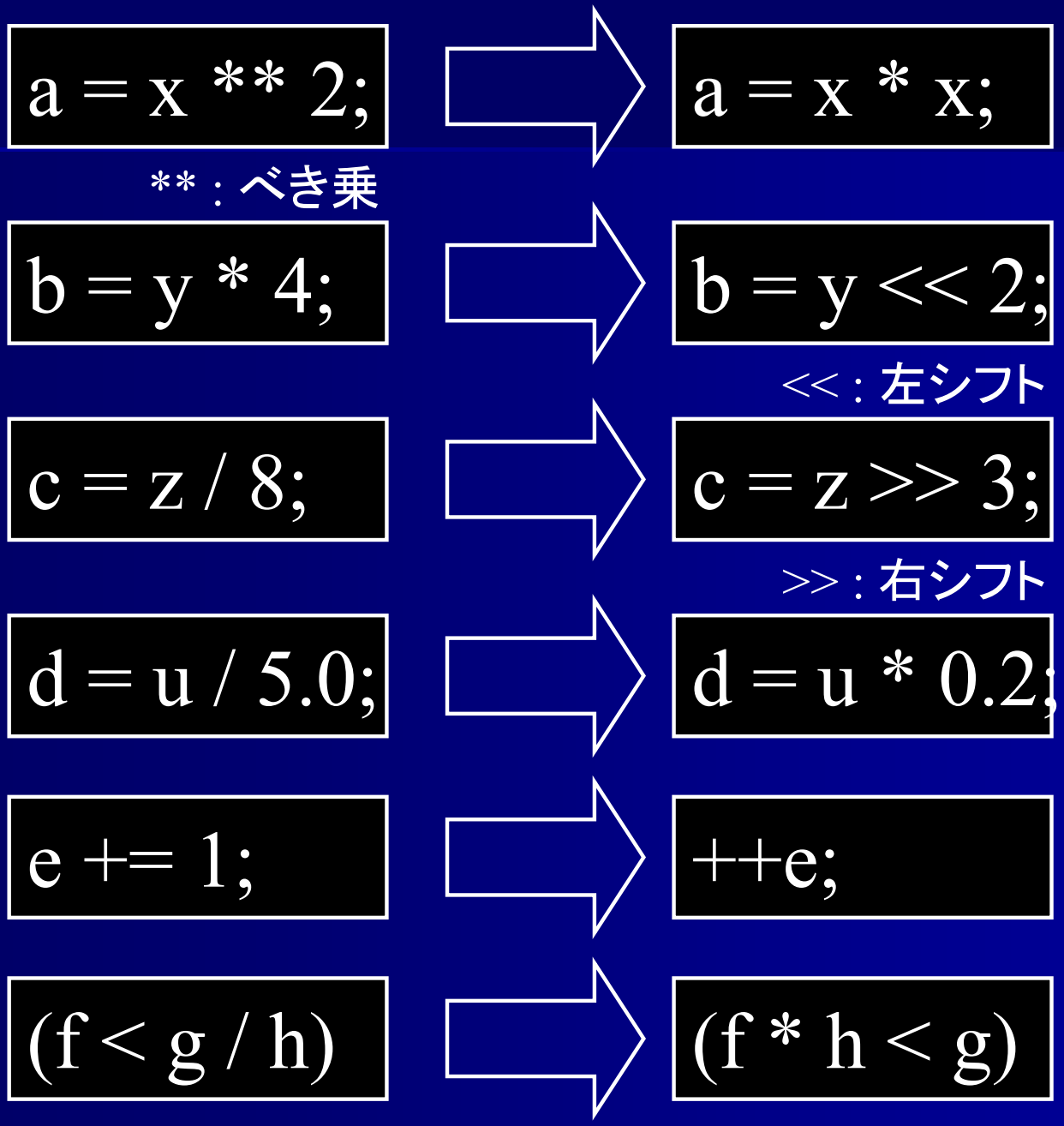
多くの計算機では掛け算より足し算の方が速い

機械依存最適化

```
a = x << 1;
```

の方が速いかも？

強さの軽減


a = x ** 2;
a = x * x;
** : べき乗
b = y * 4;
b = y << 2;
<< : 左シフト
c = z / 8;
c = z >> 3;
>> : 右シフト
d = u / 5.0;
d = u * 0.2;
有効桁数に注意
e += 1;
++e;
(f < g / h)
(f * h < g)

冗長命令削除 (不要な代入)

```
z = x+y;
```

以降のプログラムで z が不使用ならば削除可能

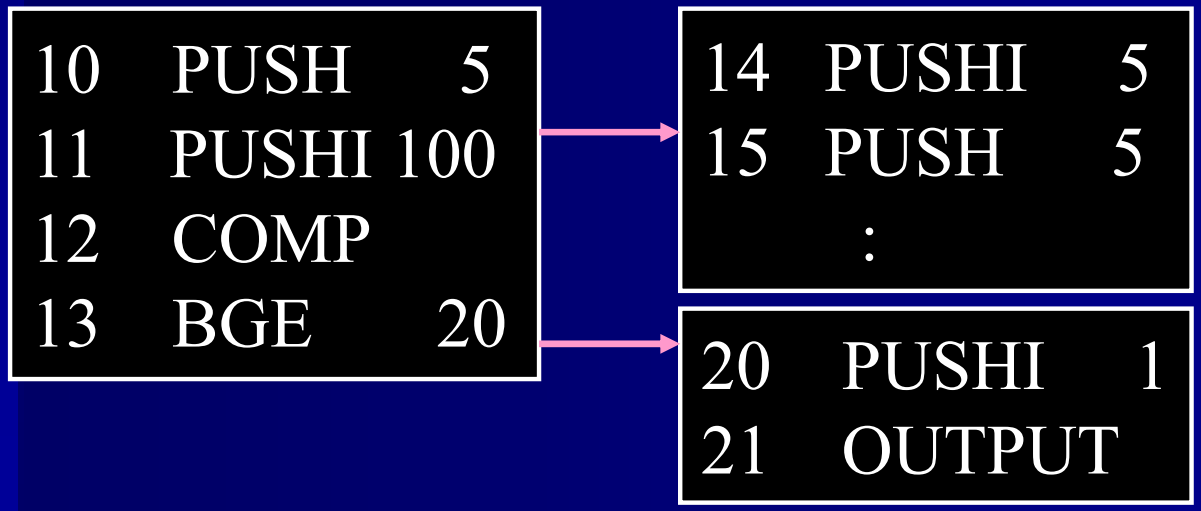
⇒ 以降のプログラムの解析が必要

制御フロー解析
データフロー解析

大域的最適化

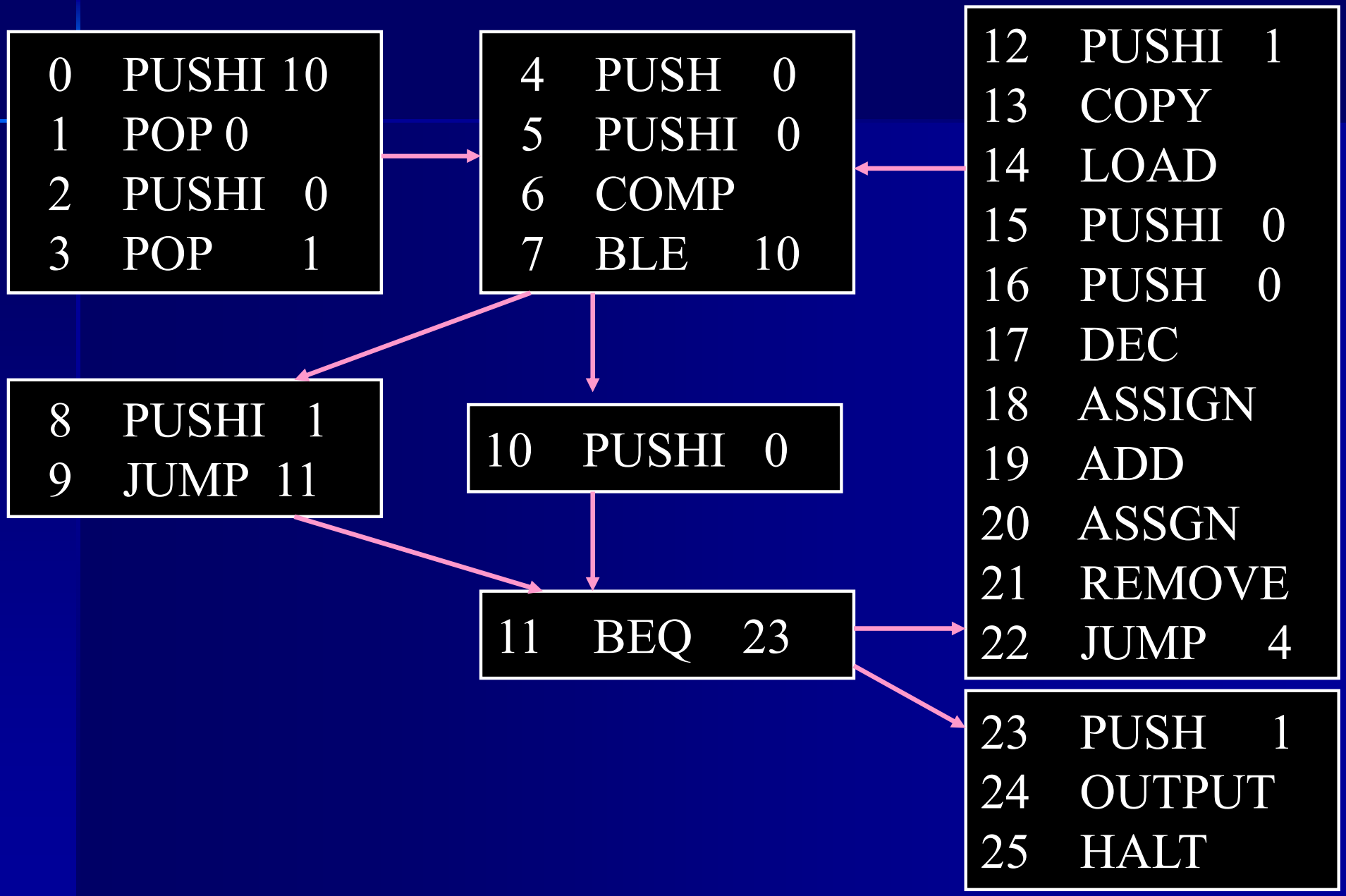
制御フローグラフ (control flow graph)

- 制御フローグラフ
  - ノード：基本ブロック
  - ノード間の矢印：ノードA→ノードB が存在
    - ⇔ ノードAの最後の命令から
      ノードBの最初の命令に行く可能性あり



13 BGE 20
からは
14 と 20 へ

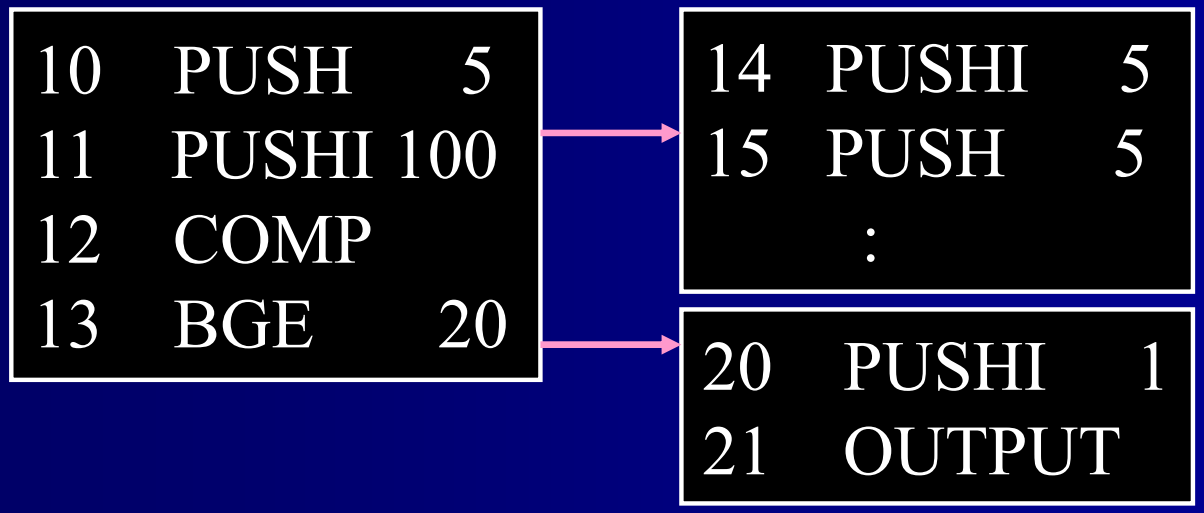
制御フローグラフ


0 PUSHI 10
1 POP 0
2 PUSHI 0
3 POP 1
4 PUSH 0
5 PUSHI 0
6 COMP
7 BLE 10
8 PUSHI 1
9 JUMP 11
10 PUSHI 0
11 BEQ 23
12 PUSHI 1
13 COPY
14 LOAD
15 PUSHI 0
16 PUSH 0
17 DEC
18 ASSIGN
19 ADD
20 ASSGN
21 REMOVE
22 JUMP 4
23 PUSH 1
24 OUTPUT
25 HALT

制御フロー解析 (control flow analysis)

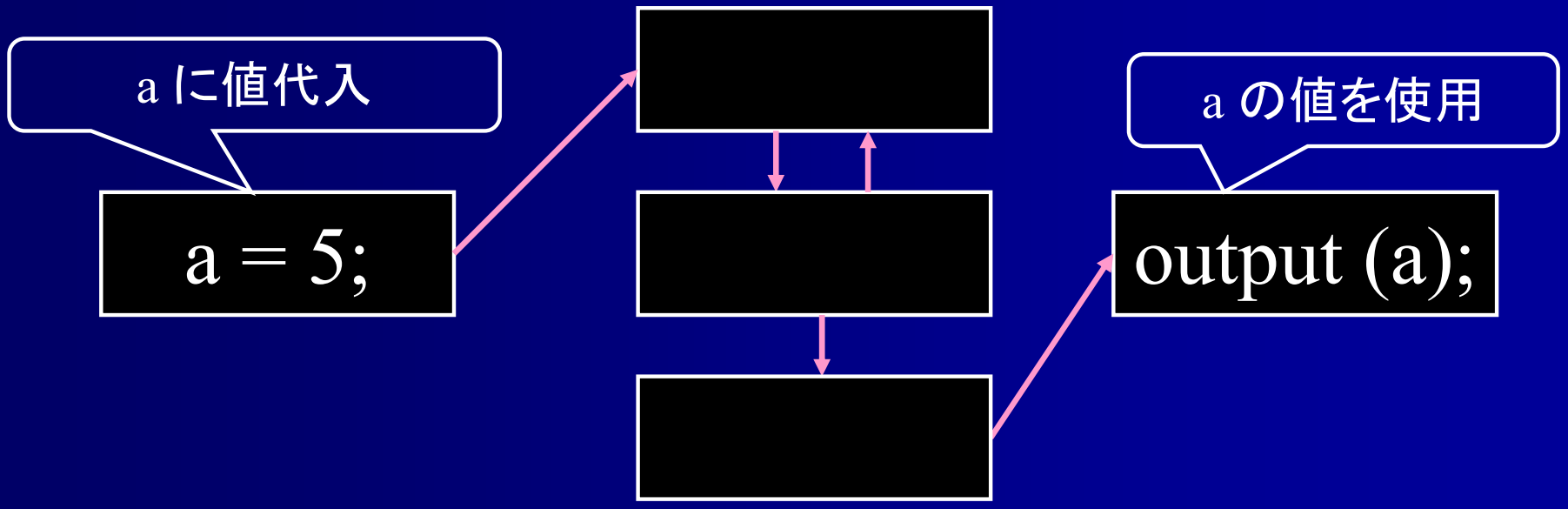
- 制御フロー解析
  - 大域的最適化
  - 制御フローグラフを用いて解析する

基本ブロック



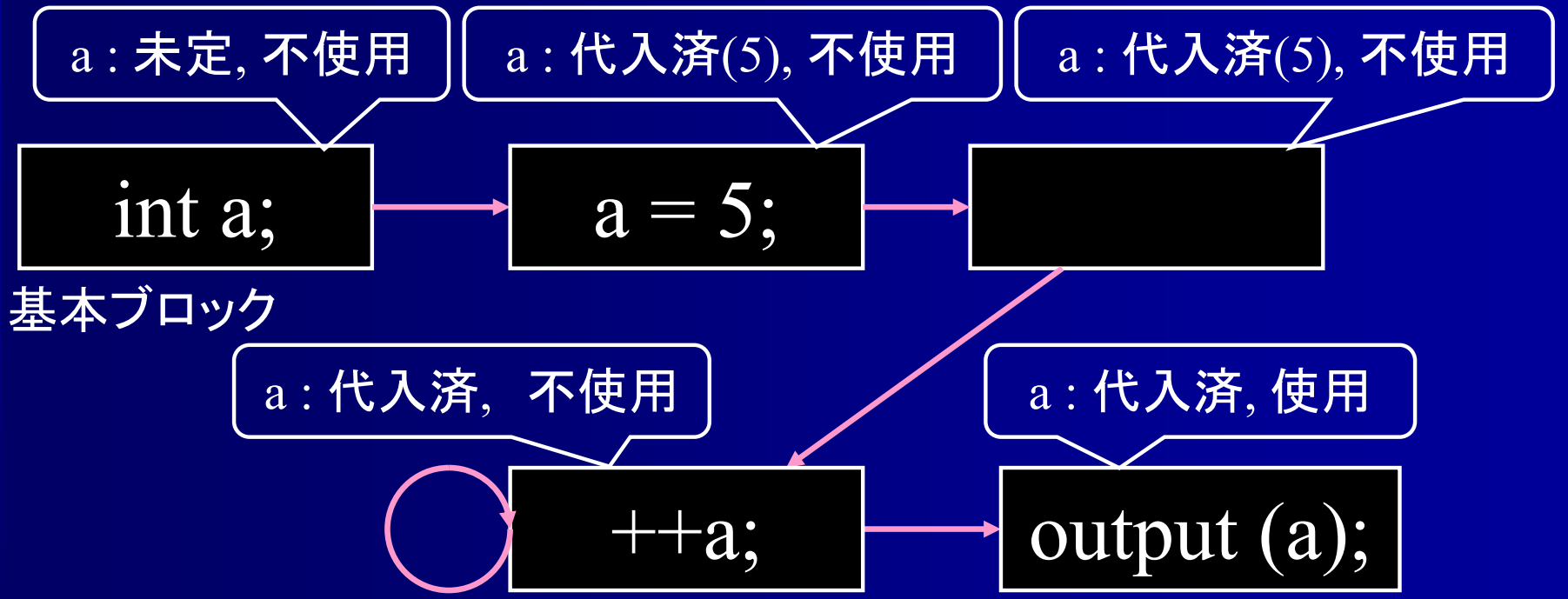
データフロー解析 (data flow analysis)

- データフロー解析
  - 式で求めた値が何処で利用されているか
  - 制御フロー解析と共に使用



データフロー解析

ブロック内で各変数の
左辺値(代入), 右辺値(値の使用)の
有無をチェック



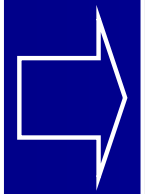
制御フロー・データフロー解析

- 制御フロー・データフローを用いて解析
  - 冗長命令削除
  - 計算結果の再利用
  - 定数伝播
  - 複写伝播
  - 到達不能命令削除
  - 実行頻度の少ない場所に移動
  - ループ回数を減らす
  - 手続き呼び出しの展開

冗長命令削除
(恒真の条件分岐)

```
while (true) {
   <st>
}
```

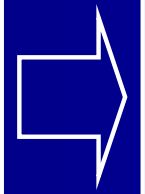
```
L1: PUSHI  1
    BEQ    L2
    <st>
    JUMP  L1
L2:
```



```
L1: <st>
    JUMP  L1
L2:
```

```
if (true) {
   <st>
}
```

```
    PUSHI  1
    BEQ    L1
    <st>
L1:
```

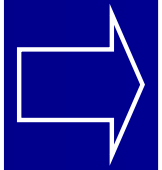


```
    <st>
L1:
```

冗長命令削除 (連続ジャンプ)

```
while (<exp>1) {
   while (<exp>2) {
      <st>
   }
}
```

```
L1: <exp>1
      BEQ   L4
L2: <exp>2
      BEQ   L3
      <st>
      JUMP L2
L3: JUMP L1
L4:
```

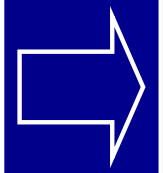


```
L1: <exp>1
      BEQ   L4
L2: <exp>2
      BEQ   L1
      <st>
      JUMP L2
L3: JUMP L1
L4:
```

冗長命令削除
(次の行へのジャンプ)

```
if (<exp>) {
    <st>
} else {}
```

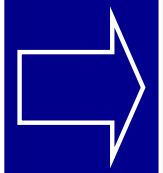
```
    <exp>
    BEQ   L1
    <st>
    JUMP  L2
L1:L2:
```



```
    <exp>
    BEQ   L1
    <st>
L1:
```

```
if (<exp>) {}
else {
    <st>
}
```

```
    <exp>
    BEQ   L1
    JUMP  L2
L1: <st>
L2:
```



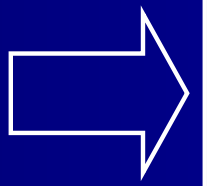
```
    <exp>
    BNE   L2
    <st>
L2:
```

2行下へ分岐
かつ1行下がジャンプ

到達不能命令の削除

- 到達不能命令の削除
  - 決して実行されない命令を削除

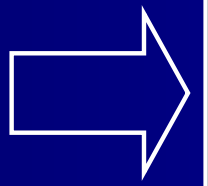
```
while (<exp>) {
    :
    break;
    <st>
}
```



```
while (<exp>) {
    :
    break;
}
```

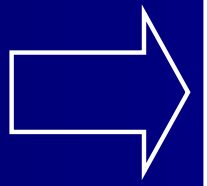
到達不能命令の削除

```
func () {
    :
    return x;
    <st>
}
```



```
func() {
    :
    return x;
}
```

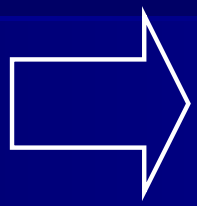
```
while (<exp>) {
    :
    continue;
    <st>
}
```



```
while (<exp>) {
    :
    continue;
}
```

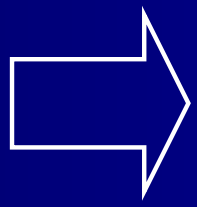
到達不能命令の削除

```
if (false) {
    <st>
}
```



if 文全体を削除

```
if (false) {
    <st1>
} else {
    <st2>
}
```



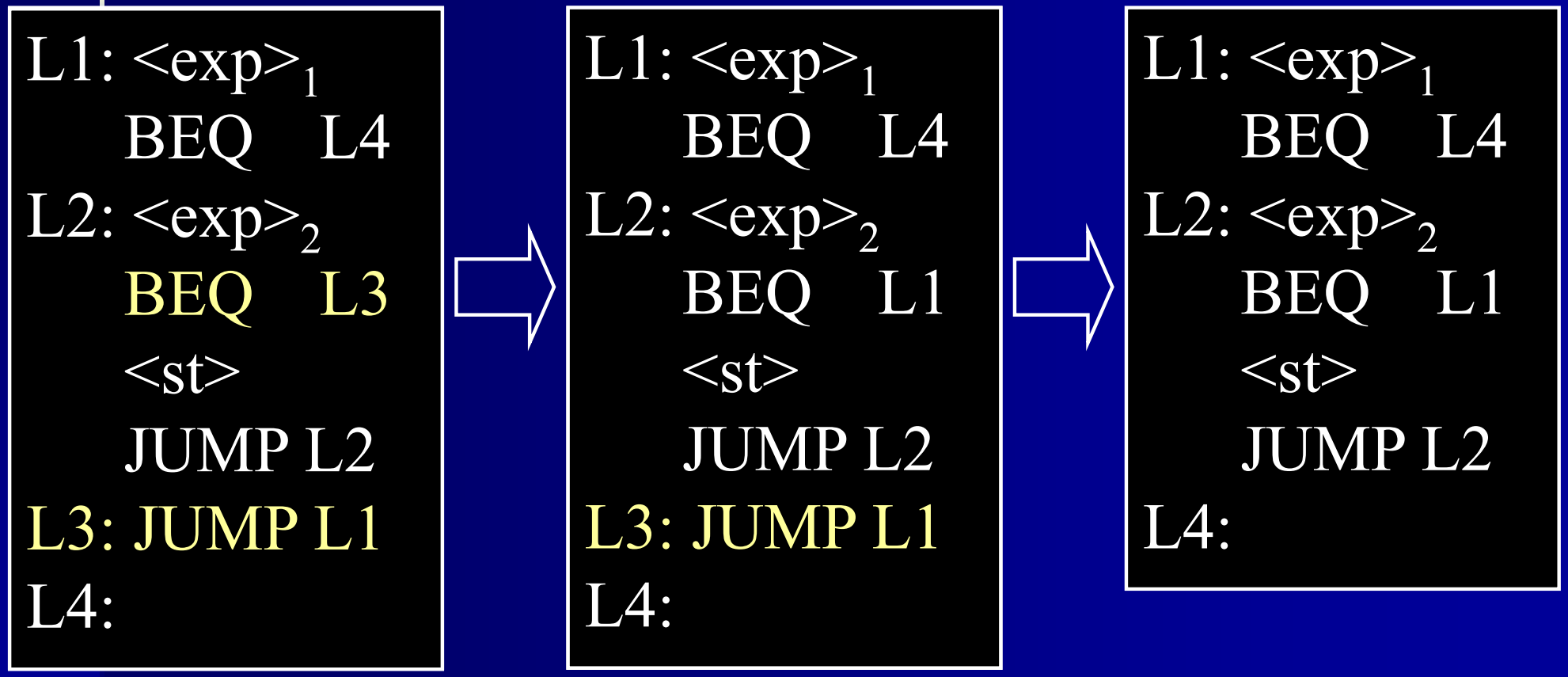
```
<st2>
```

恒真・恒偽の条件分岐は
デバグ等で使用される

```
final boolean DEBUG = false;
    :
if (DEBUG) (デバグ情報出力)
```

到達不能命令の削除

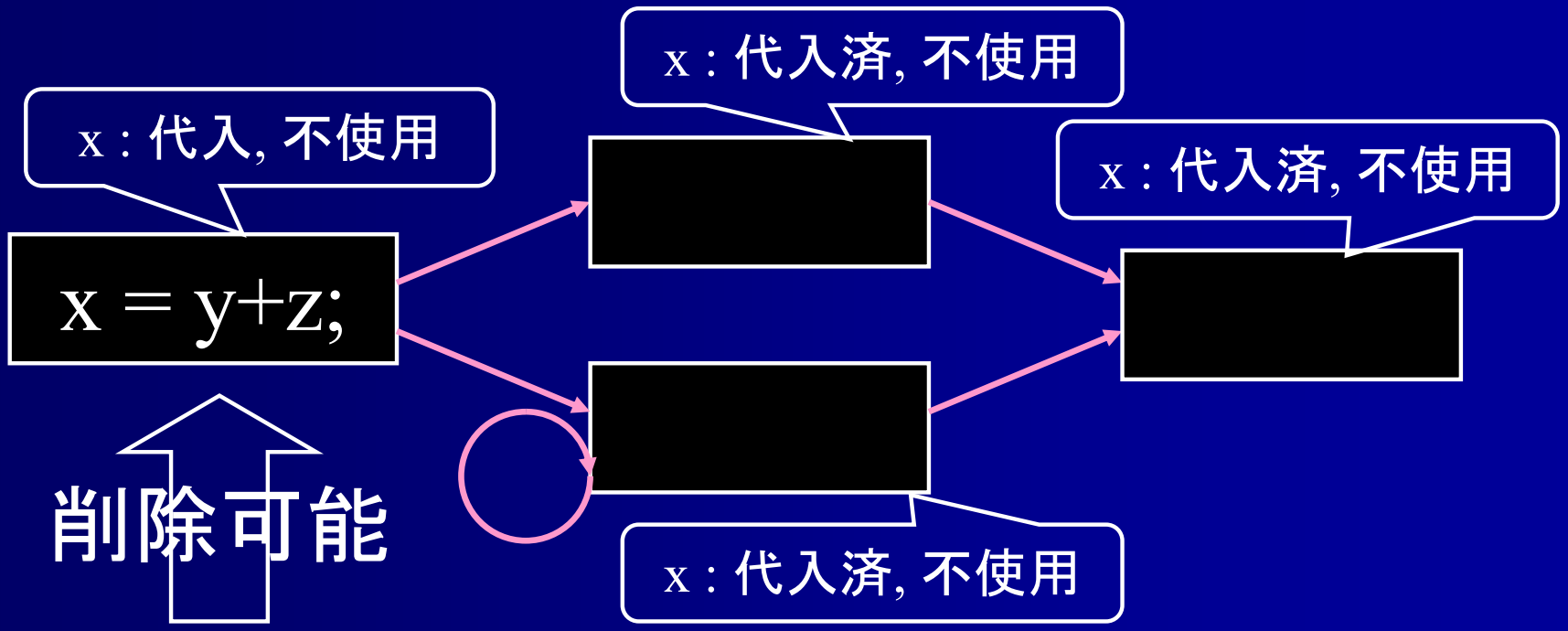
```
while (<exp>1)
  while (<exp>2)
    <st>
```



JUMP 命令, RET命令の直後に
到達不能命令が発生し易い

冗長命令削除 (不要な代入)

- 不要な代入
  - それ以降使用されない代入は削除可能

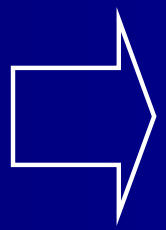


以降の全ブロックで x の値は使用されない

結果の再利用

- 一度求めた結果を再利用

```
a = i + j;
b = (i + j) * k;
```

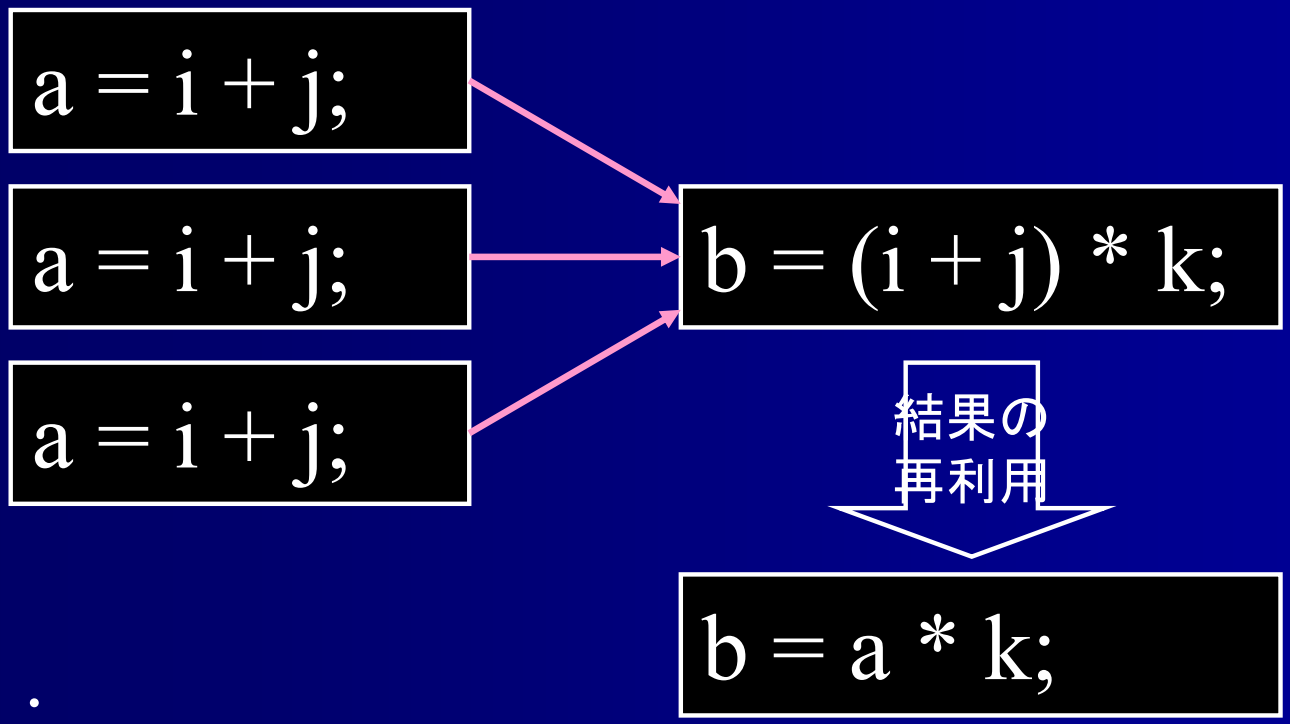


```
a = i + j;
b = a * k;
```

利点：演算回数を減らせる

条件：
b を計算する前に必ず a を計算
a の計算から b の計算までの間で i, j の値に変化無し

結果の再利用



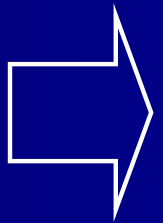
条件：
全てのブロックで a に i+j を代入
a の計算から b の計算までの間で i, j の値に変化無し

共通部分の再利用

- 共通部分の計算結果を一時変数に記憶

例：

```
a = (i + j) + x;
b = (i + j) - y;
c = (i + j) * z;
```

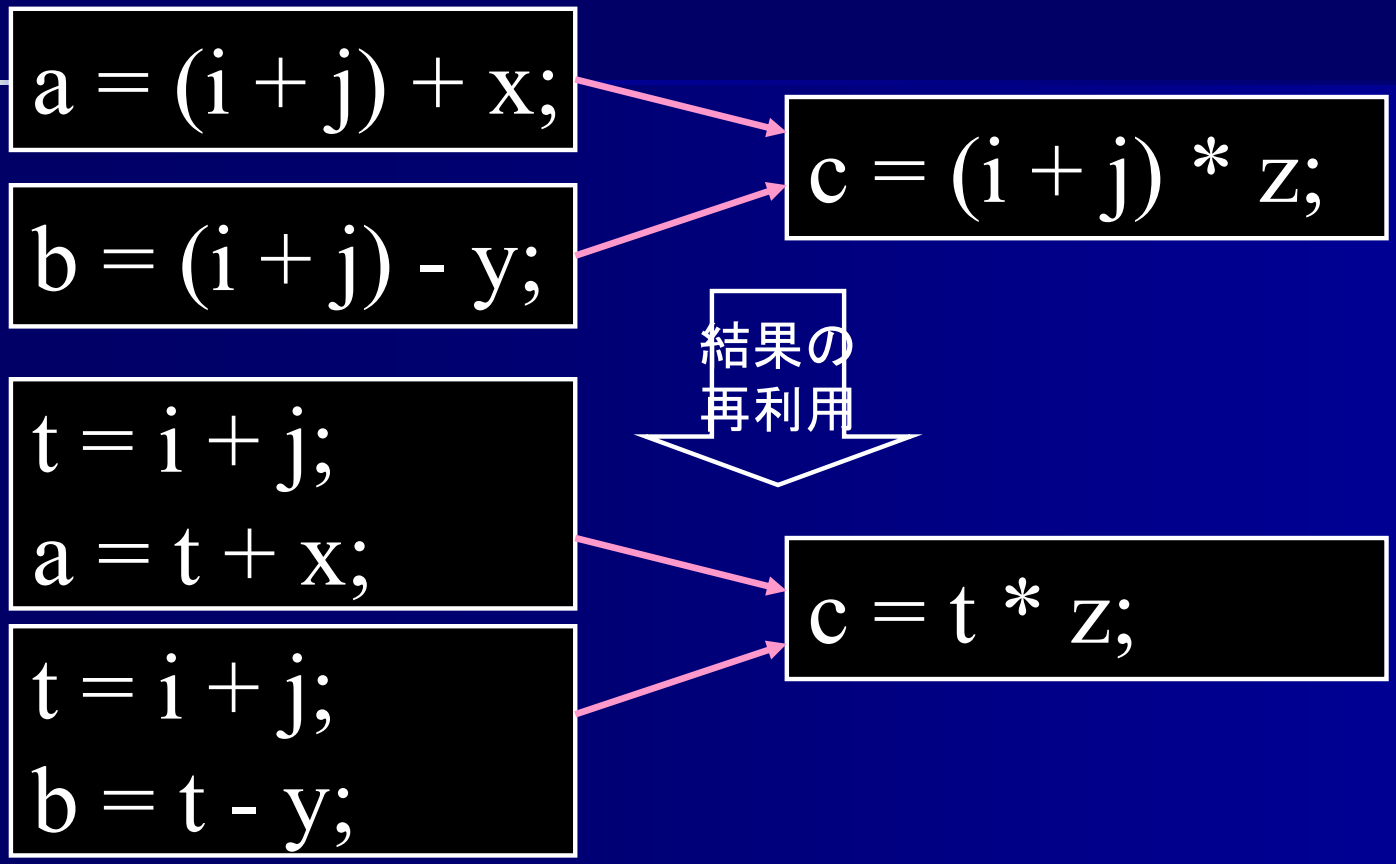


一時変数

```
t = i + j;
a = t + x;
b = t - y;
c = t * z
```

条件：a, b, c を計算する間 i, j の値に変化無し

共通部分の再利用

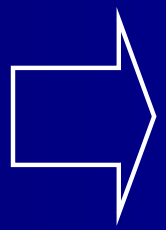


条件：
全てのブロックで i+j を計算
a, b, c を計算する間 i, j の値に変化無し

定数伝播

- 定数を代入した変数は定数として扱う

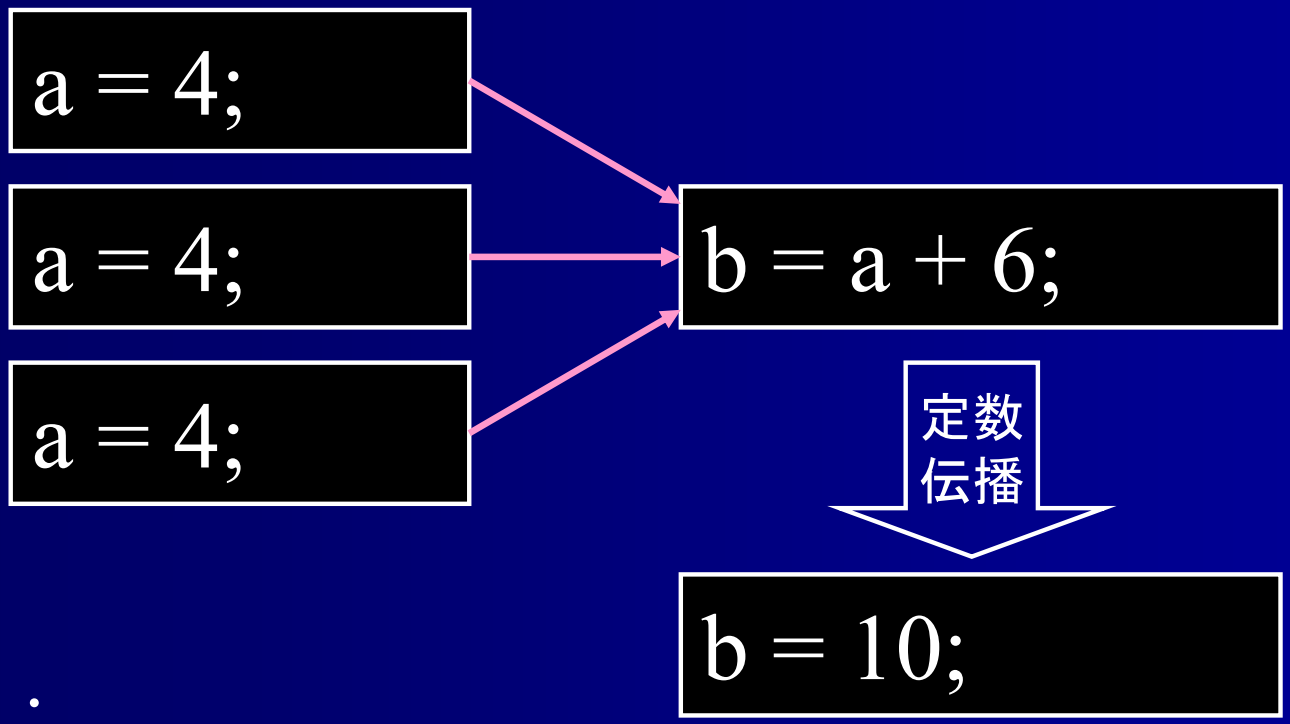
```
a = 4;
b = a + 6;
```



```
a = 4;
b = 10;
```

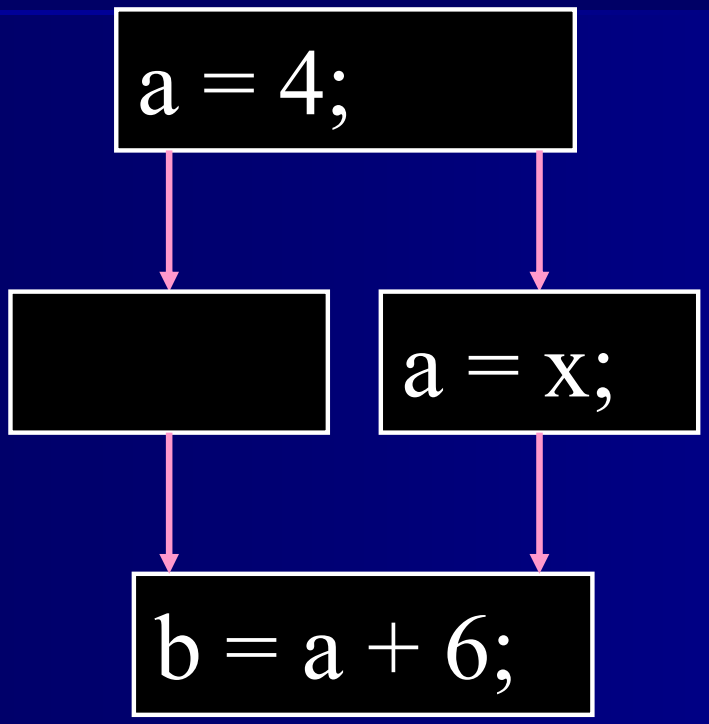
条件：
b を計算する前に必ず a に定数を代入
a の値に変化無し

定数伝播



条件：
全てのブロックで a に同一の定数を代入

定数伝播

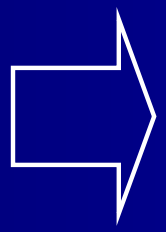


a に定数 4 以外が入るルートがあるので
定数とは見做せない

複写伝播

- 値をコピーした変数は同一として扱う

```
a = i;
b = a * 5;
```

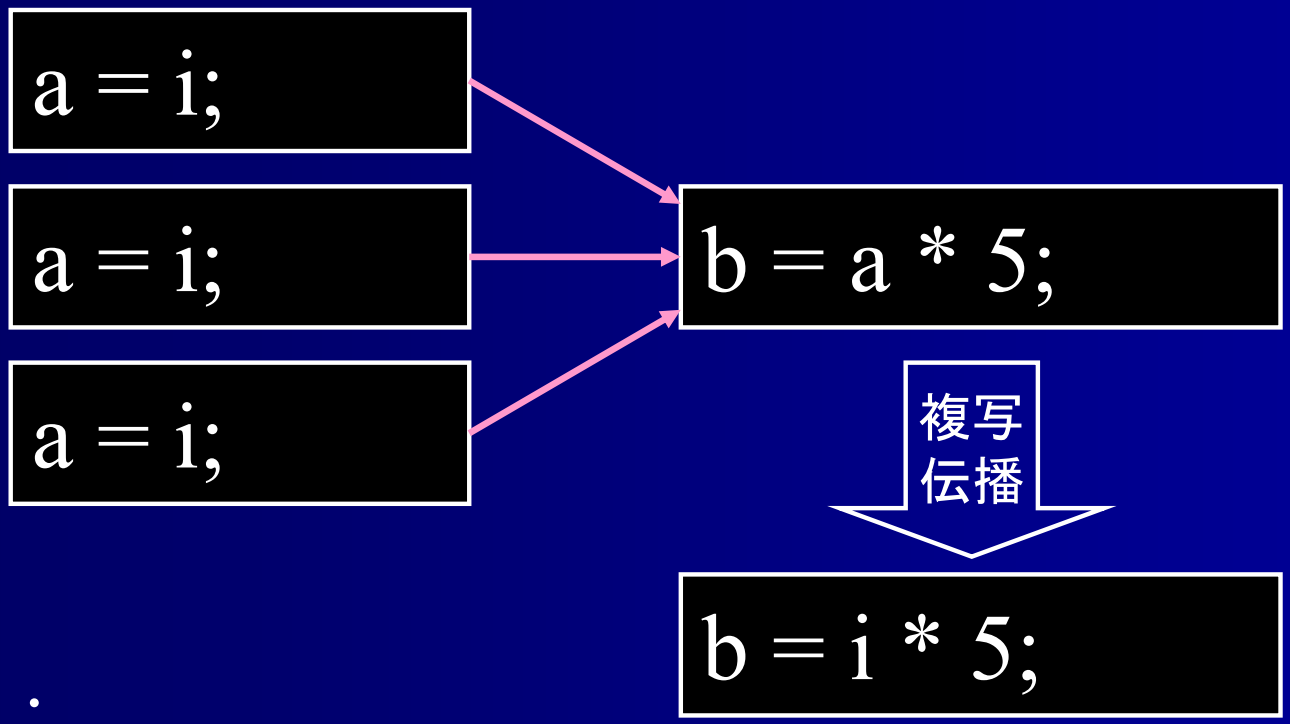


```
a = i;
b = i * 5;
```

利点 : a への代入が不要になる場合がある

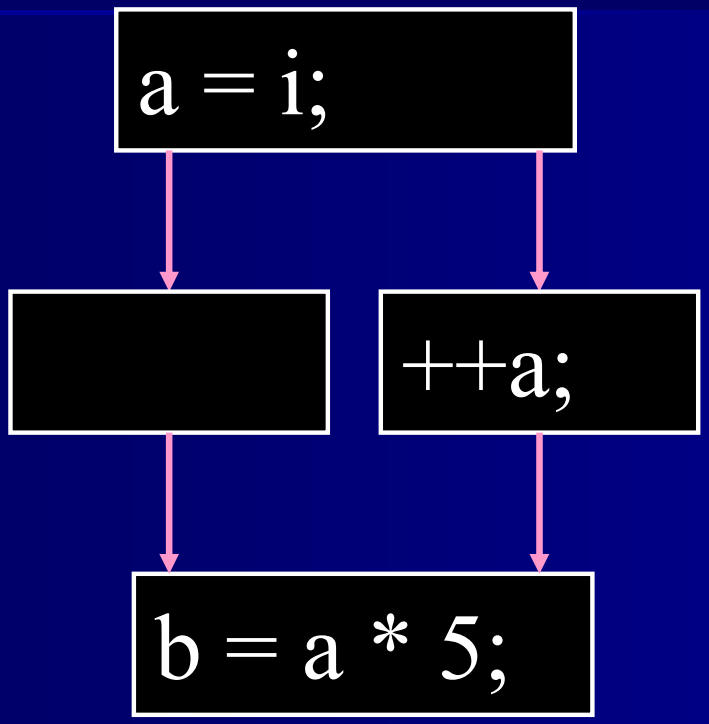
条件 :
b を計算する前に必ず a に i をコピー
i の値に変化無し

複写伝播



条件：
全てのブロックで a に i をコピー
i の値に変化無し

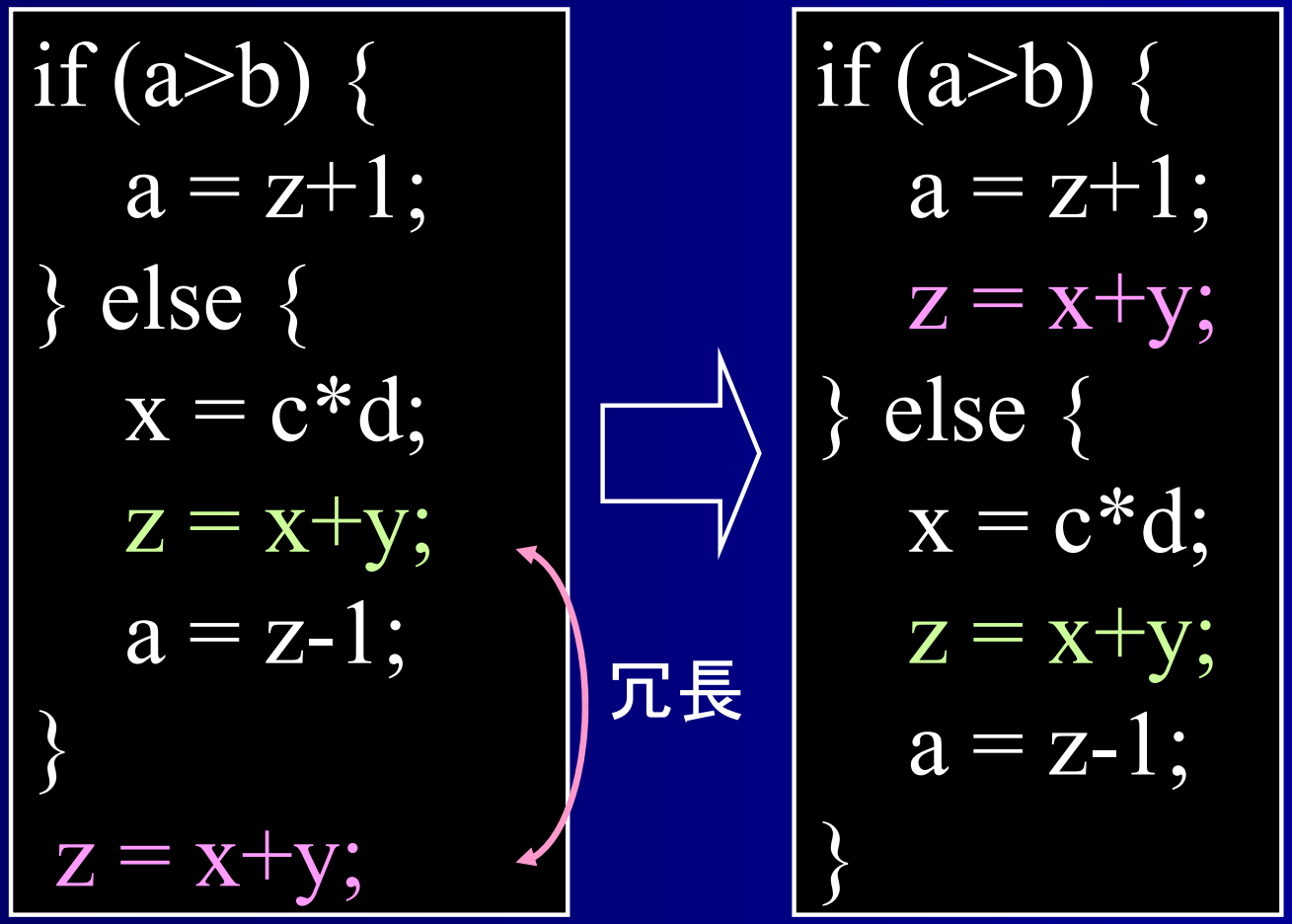
複写伝播



a の値が変更されるルートがあるので
a は i の複写とは見做せない

部分冗長性の削除

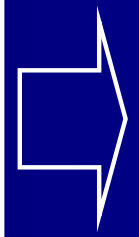
- 部分冗長性の削除



実行頻度の少ない場所に移動

- ループ内変数をループ外に

```
for (i=0; i<n; ++i) {
   a = 20;
       :
```



```
a = 20;
for (i=0; i<n; ++i) {
       :
```

条件：
a がループ内で不変 = 相対定数

実行頻度の少ない場所に移動

- 制御変数の計算をループ外に

```
while (i < n*n) {
      :
```

```
t = n*n;
while (i < t) {
      :
```

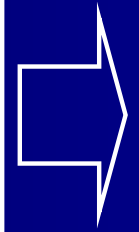
条件：
n がループ内で不変 = 相対定数

実行頻度の少ない場所に移動

- 誘導変数の強さ軽減

誘導変数：ループ時に定数だけ値が変わる変数

```
for (i=0; i<n; ++i) {
   j = i*10 + 5;
      :
```



```
j = -5;
for (i=0; i<n; ++i) {
   j += 10;
      :
```

j はループ毎に
値が 10 増える

ループ回数を減らす

- ループ融合

```
for (i=0; i<n; ++i) {
    a[i] = c[i] + x;
}
for (i=0; i<n; ++i) {
    b[i] = c[i] + y;
}
```

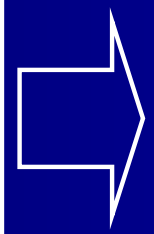
```
for (i=0; i<n; ++i) {
    t = c[i];
    a[i] = t + x;
    b[i] = t + y;
}
```

利点：ループ制御命令の実行回数が半分
c[i] へのアクセスの時間局所性が利用可能

ループ回数を減らす

- ループ展開

```
for (i=0; i<10; ++i) {
    a[i] = b[i] + x;
}
```



```
a[0] = b[0] + x;
a[1] = b[1] + x;
a[2] = b[2] + x;
a[3] = b[3] + x;
a[4] = b[4] + x;
a[5] = b[5] + x;
a[6] = b[6] + x;
a[7] = b[7] + x;
a[8] = b[8] + x;
a[9] = b[9] + x;
```

利点：ループ制御命令が不要
配列のアドレスをコンパイル時に計算可能

ループ回数を減らす

- ループ展開

```
for (i=0; i<n; ++i) {
    a[i] = c[i] + x;
}
```

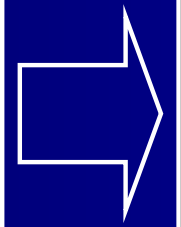
```
for (i=0; i<n; i+=2) {
    a[i] = c[i] + x;
    a[i+1] = c[i+1] + x;
}
```

利点：ループ制御命令の実行回数が半分
a[i] と a[i+1] の処理を並列実行可能

手続き・関数呼び出しの展開

- 手続きの展開

```
{
   :
   func (i, j);
   :
}
func (int x, int y) {
  (x, y の処理)
}
```



```
{
   :
   (i, j の処理)
   :
}
```

利点：手続き呼び出し処理が不要

ハードウェア機能の利用

- レジスタの利用
- 局所性の利用
- ベクトル計算の利用
- 並列計算の利用

レジスタの利用

- レジスタ
  - CPUが直接演算可能 ⇒ メモリよりも高速
  - 容量はごく僅か

大域的なレジスタの利用

- 使用頻度が高いデータをレジスタに格納

⇒ データの使用頻度の解析が必要

局所的なレジスタの利用

- すぐに使うデータをレジスタに格納

⇒ データの生存区間の解析が必要

レジスタの利用

制御変数 i の値を
繰り返し参照

```
for (i=0; i<n; ++i) {
  a[i] = b[i] + x*(i+5);
}
```

制御変数の値を
レジスタに格納

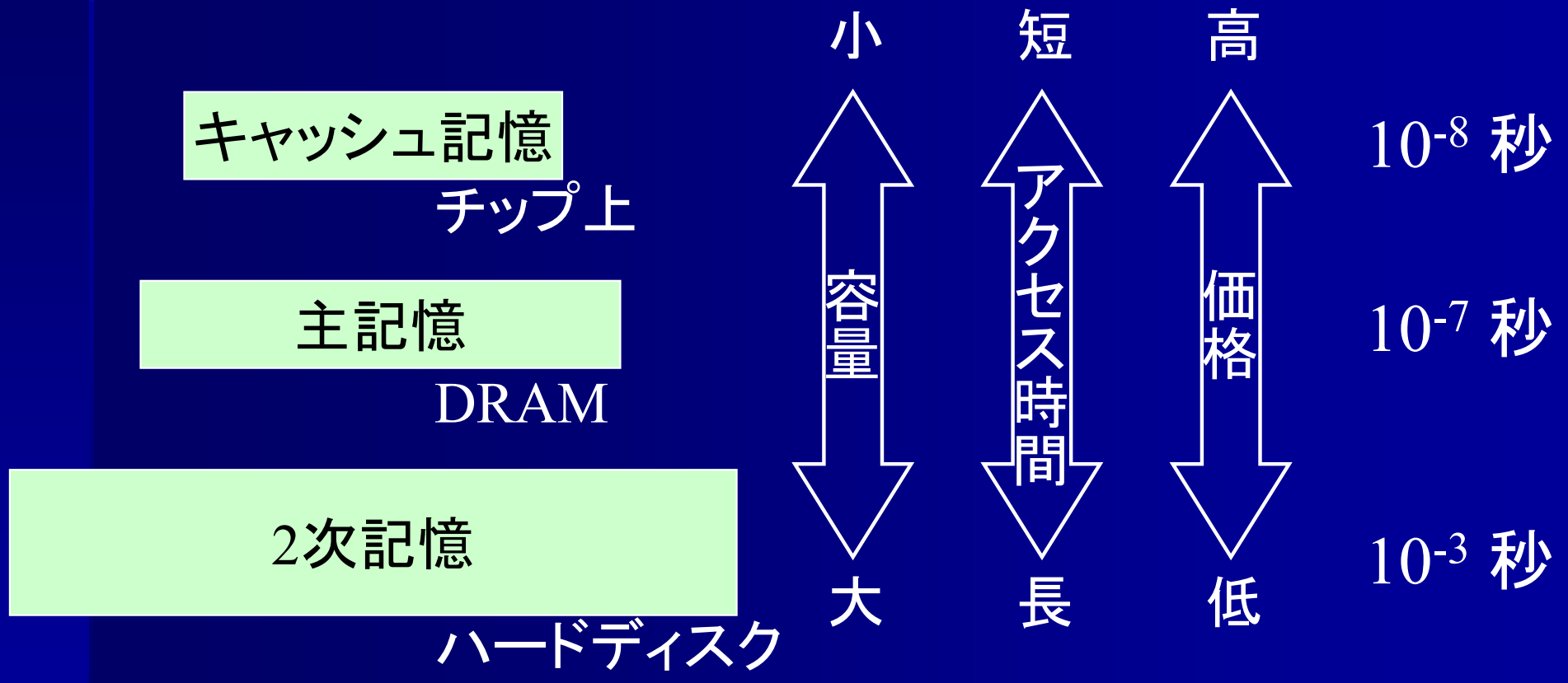
```
for (R=0; R<n; ++R) {
  a[R] = b[R] + x*(R+5);
}
```

こちらの方が
速い可能性も

```
t = x*4;
for (R=0; R<n; ++R) {
  a[R] = b[R] + (t += x);
}
```

メモリ

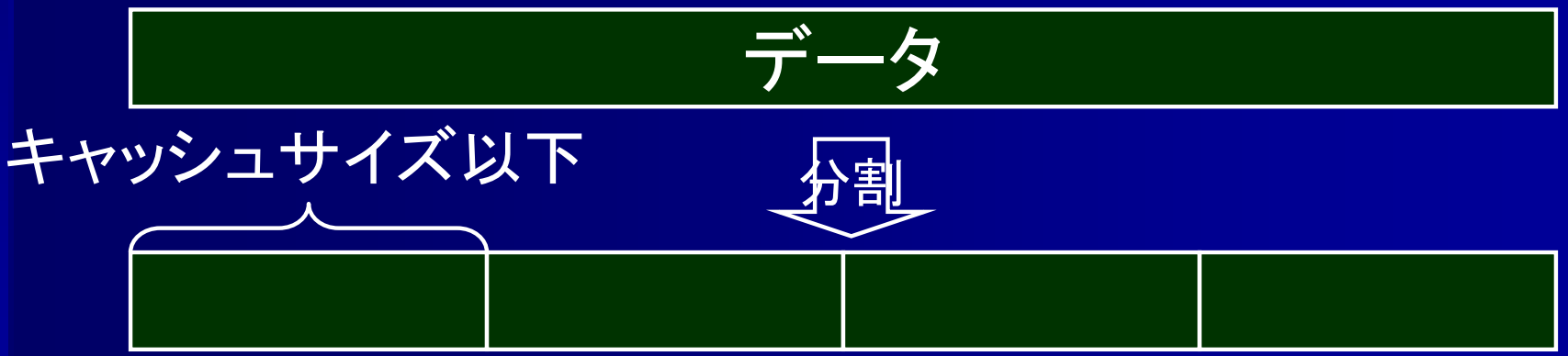
- メモリの記憶階層



局所性の利用

- キャッシュメモリ
  - 高速にアクセス可能
  - 容量は小さい

⇒ データをキャッシュに収まるサイズに分割
分割したデータごとに処理



データのタイル化

データのタイル化

```
for (i=0; i<1000; ++i)
  for (j=0; j<1000; ++j)
    for (k=0; k<1000; ++k)
      c[i, j] += a[i,k] * b[k,j];
```

データサイズ
1000*1000*1000

⇒ キャッシュに入らない

```
for (x=0; x<1000; x+=10)
 for (y=0; y<1000; y+=10)
  for (z=0; z<1000; z+=10)
   for (i=x; i<x+10; ++i)
    for (j=y; j<y+10; ++j)
     for (k=z; k<z+10; ++k)
      c[i, j] += a[i,k] * b[k,j];
```

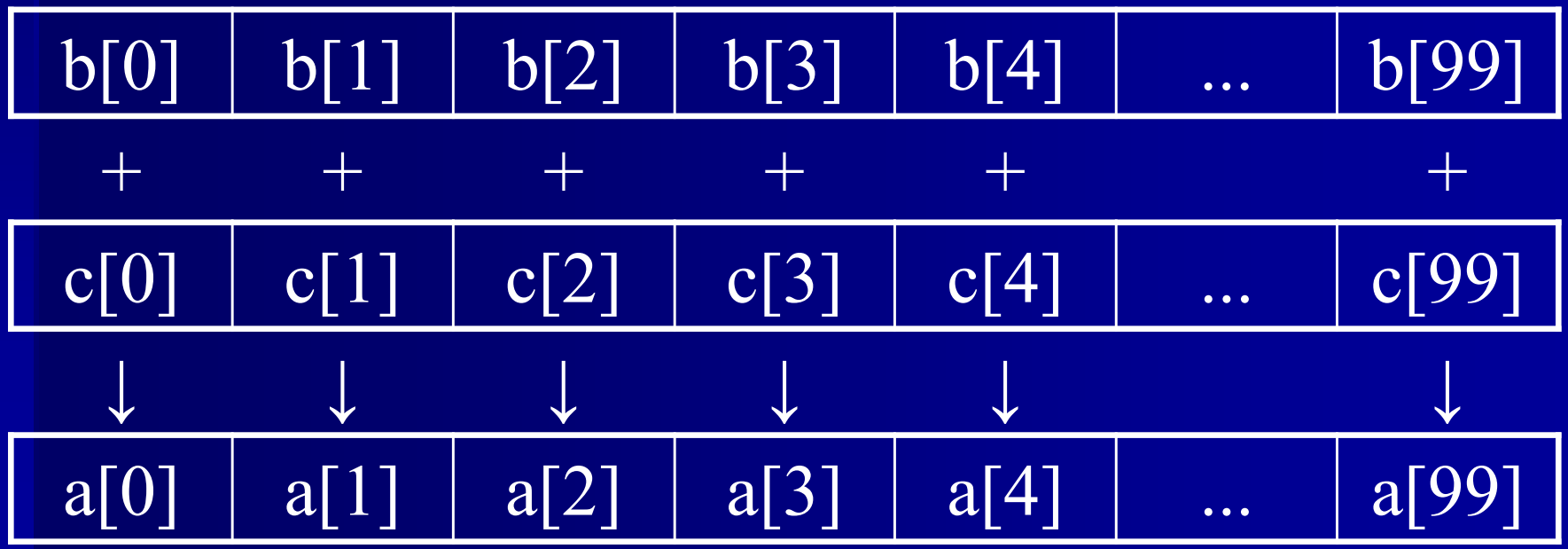
この内部ではデータサイズ 10*10*10

⇒ キャッシュ内で処理可能

ベクトル計算の利用

- ベクトル計算
  - 配列(ベクトル)の要素を並列に計算

```
int a[100], b[100], c[100];
a[0:99] = b[0:99] + c[0:99];
```



ベクトル計算の利用

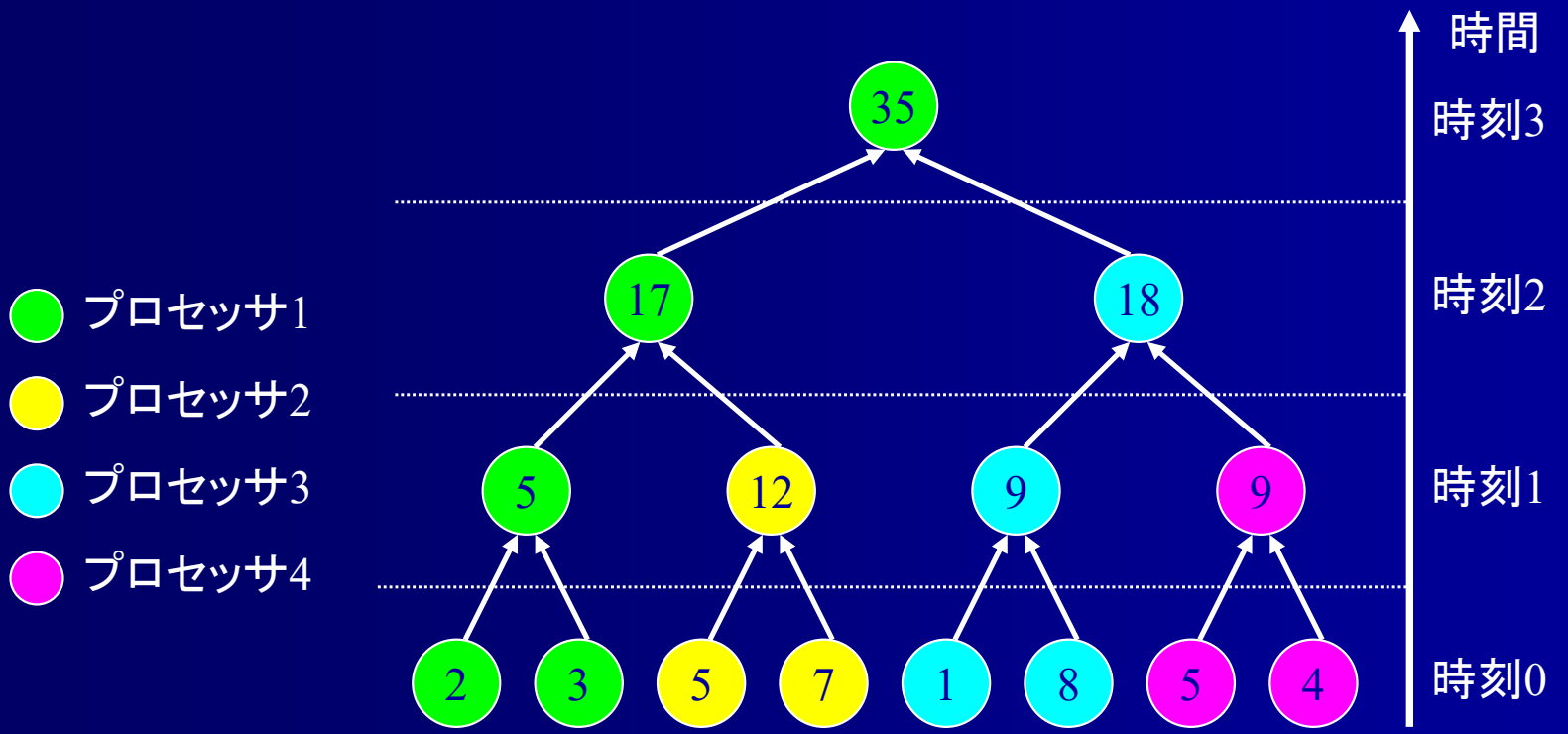
```
for (i=0; i<1000; ++i) {
   a[i] = b[i] + c[i];
   e[i] = a[i] + f[i];
}
```

```
a[0:999] = b[0:999] + c[0:999];
e[0:999] = a[0:999] + f[0:999];
```

並列計算の利用

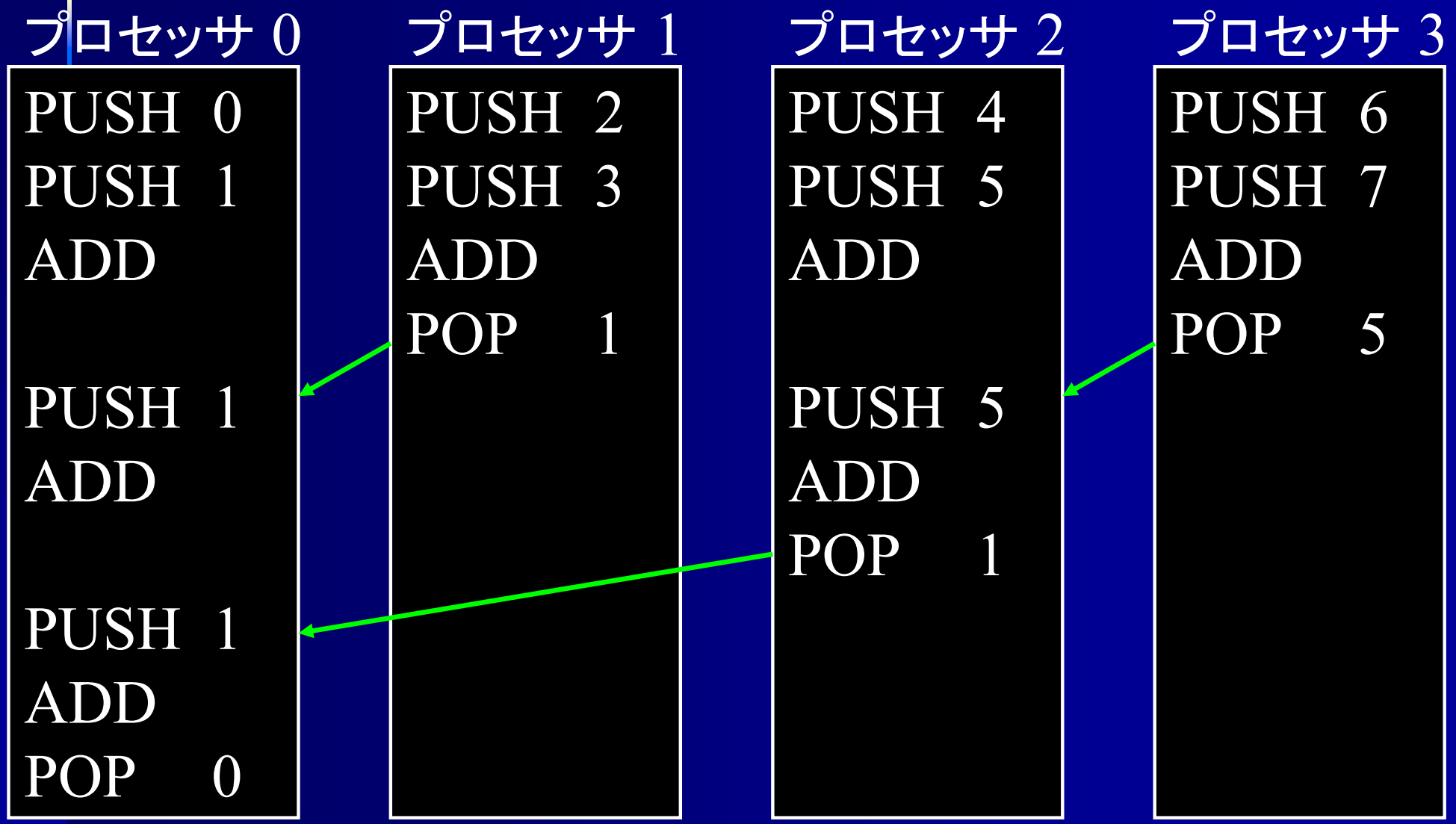
- 並列計算
  - 複数のプロセッサで命令を並列計算

```
s = 2+3+5+7+1+8+5+4;
```



並列計算の利用

```
a[0] = a[0]+a[1]+a[2]+a[3]+a[4]+a[5]+a[6]+a[7];
```



参考プログラム

情報システムプロジェクトI 配布資料

projI22/material/kc/Kc22Opt.class

```
$ java kc.Kc22Opt bsort.k bsortOpt.asm
$ ./vsm bsortOpt.asm
```

diff でどこを最適化したか確認できる

```
$ java kc.Kc22Opt bsort.k bsortOpt.asm
$ java kc.Kc22 bsort.k bsort.asm
$ diff  bsortOpt.asm bsort.asm
```