

博士論文本審査発表資料

高速なRUBY用仮想マシンの開発

EFFICIENT IMPLEMENTATION OF RUBY VIRTUAL MACHINE

東京大学大学院
情報理工学系研究科 特任助教
笹田耕一

Agenda

2

- **背景と目的**
- **高速なRuby用仮想マシン**
- **Rubyの並列化**
- **まとめ**

背景

3

□ スクリプト言語の必要性の増大

□ スクリプト言語の重要性増大

- 計算機の性能向上, スクリプト言語の機能向上
- 利用シーンの増加
 - GUIプログラミング, ネットワークアプリケーション
 - ウェブアプリケーション

□ システムプログラミング言語 v.s. スクリプト言語

- John K. Ousterhout, Scripting: Higher-Level Programming for the 21st Century, Computer, IEEE, 1998 より
- **型付・静的** v.s. **型無・動的**
部品開発 **部品結合**
高い性能 **柔軟で迅速な開発**

PL/I, FORTRAN v.s. JCL on OS/360
C v.s. Shellscript, sed, awk on UNIX
C, C++ v.s. Tcl, VB on GUI
Java v.s. Perl, Javascript on Internet

よく使われている プログラミング言語比較

4

言語	モデル	開発効率	機能	並列実行	性能	実行方式
C	静的	×	×	○	◎ ₊	ネイティブ
Java	静的	△	○	○	◎	VM + JIT
sh	動的	△	×	×	×	Interpreter
Perl	動的	○	○	×	△	VM
Python	動的	○	○ ₊	×	△	VM
Ruby	動的	○	◎	×	×	Interpreter

機能:オブジェクト指向, メタプログラミング, 高階関数

背景: Ruby

5

- オブジェクト指向スクリプト言語Ruby
 - 近年注目されているスクリプト言語
 - 動的で柔軟な言語仕様
 - 高い記述性
- Ruby処理系(CRuby)
 - C言語で記述, リファレンス実装
- その他の処理系実装も存在
 - JRuby (Java)
 - IronRuby (.NET)
 - Rubinius (Ruby)

RubyConf 参加者数

2004 60人

2005 200人

2006 300人

2007 500人

RubyKaigi 参加者数

2006 200人

2007 450人

* 両年とも数時間で5千円チケット完売

CRubyの問題点

6

- **性能向上が困難な処理系の構造**
 - 構文木を再帰関数でたどる処理系
 - 既知の処理系最適化技術が適用不可
- **Rubyの並列実行が不可能**
 - コモディティ化した計算機を活用不可
 - Rubyスレッドを並列実行できないスレッド処理機構

Rubyが遅いことに関して

7

*We would be absolutely
dead on Ruby.*

Ruby Performance Revisited

<http://joelonsoftware.com/items/2006/09/12.html>

Joel Spolsky

本研究の目的

8

高速なRuby処理系の実現

RubyのVM化



仮想マシンYARVの開発

Rubyの並列実行



Rubyスレッドを並列実行

よく使われている プログラミング言語比較

9

言語	モデル	開発効率	機能	並列実行	性能	実行方式
C	静的	×	×	○	◎ ₊	ネイティブ
Java	静的	△	○	○	◎	VM + JIT
sh	動的	△	×	×	×	Interpreter
Perl	動的	○	○	×	△	VM
Python	動的	○	○ ₊	×	△	VM
Ruby	動的	○	◎	× → ○	× → ○	Interpreter → VM

機能: オブジェクト指向, メタプログラミング, 高階関数

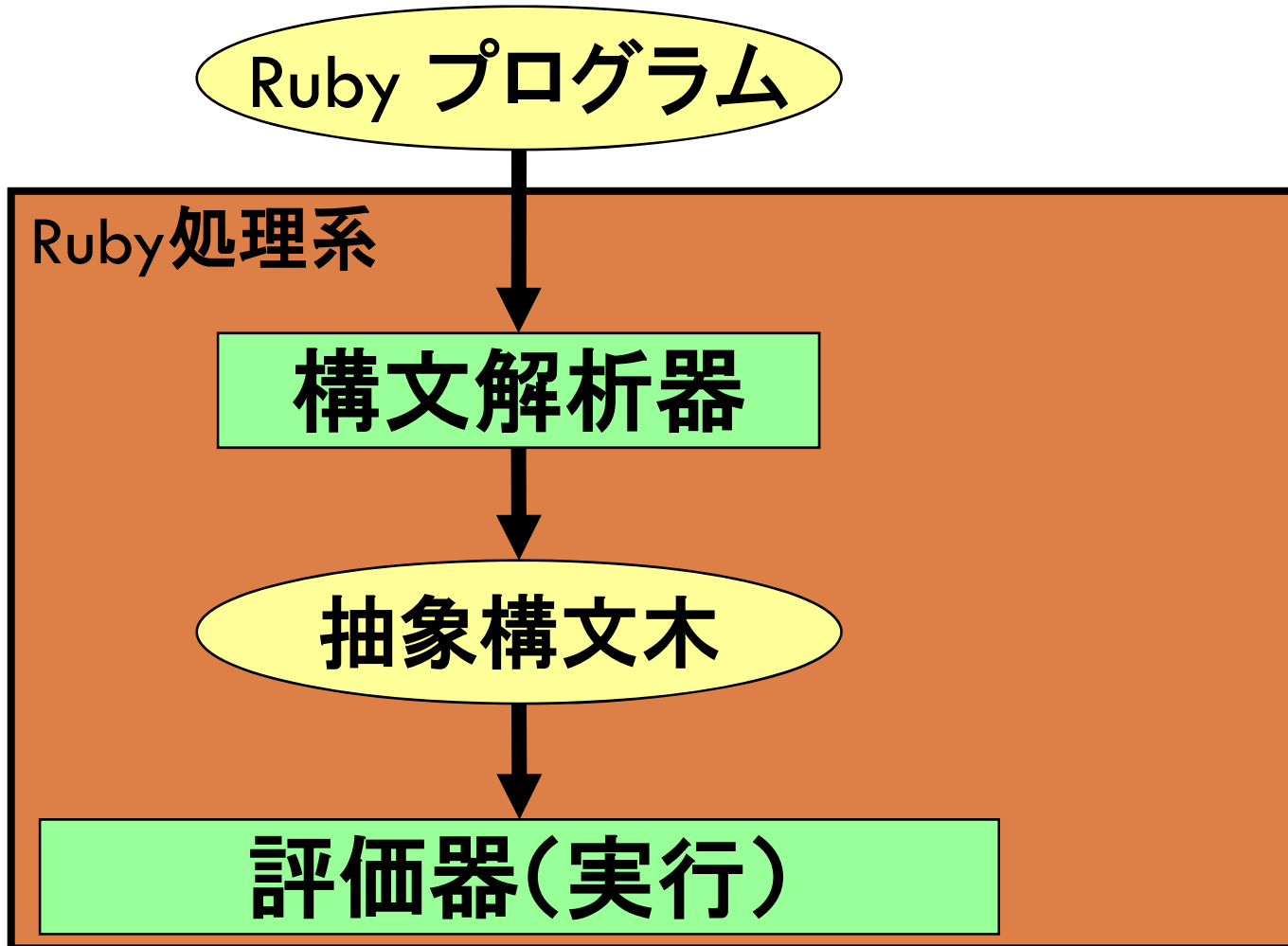
Agenda

10

- 背景と目的
- 高速なRuby用仮想マシン
- Rubyの並列化
- まとめ

CRubyの構成

11



CRubyの処理

12

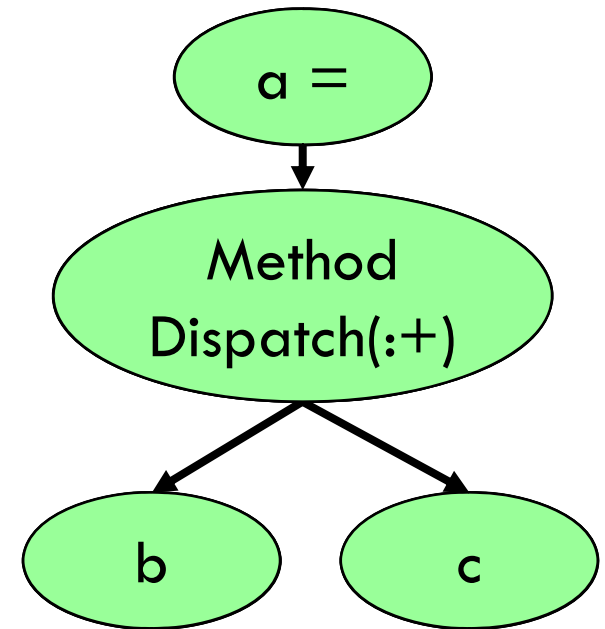
Ruby Program

$a = b + c$

Parse



Abstract Syntax Tree



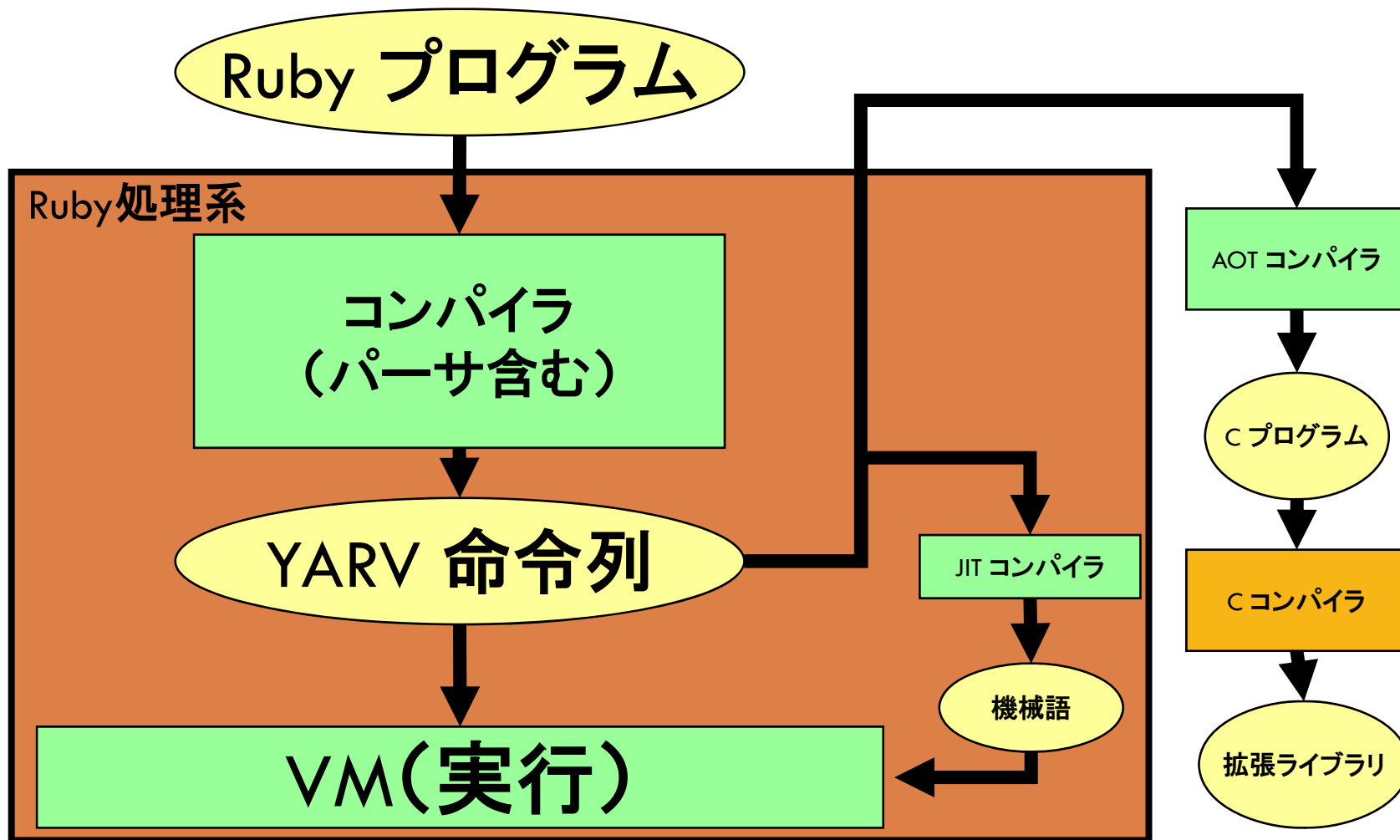
Ruby向け仮想マシンYARV

13

- YARV: Yet Another RubyVM
 - Rubyプログラムを表現するYARV命令セット
 - コンパイラ
 - 仮想機械(VM)
 - スタックマシン
 - 各種最適化を適用
 - C言語で実装
 - まずは, どこでも速い, を目標に
- 簡単なVM生成系を利用した効率的な開発

YARVの構成

14



検討: 仮想マシンの計算モデル スタックマシン v.s. レジスタマシン

15

- レジスタマシン型VMのほうが1.4倍高速
 - ▣ Yunhe Shi, et.al., Virtual machine showdown: stack versus registers, 2005 (Java, OCaml用VMで評価)
 - ▣ レジスタマシン
 - 命令数が少ない
 - 命令ディスパッチ回数減少により, VM一般で有利
 - ▣ スタックマシン(古典的)
 - コンパイル時間が短い, 実装が容易
 - インタプリタとして大事
 - ▣ Rubyはメソッド呼び出し多発
 - スタックマシンのほうが有利と判断

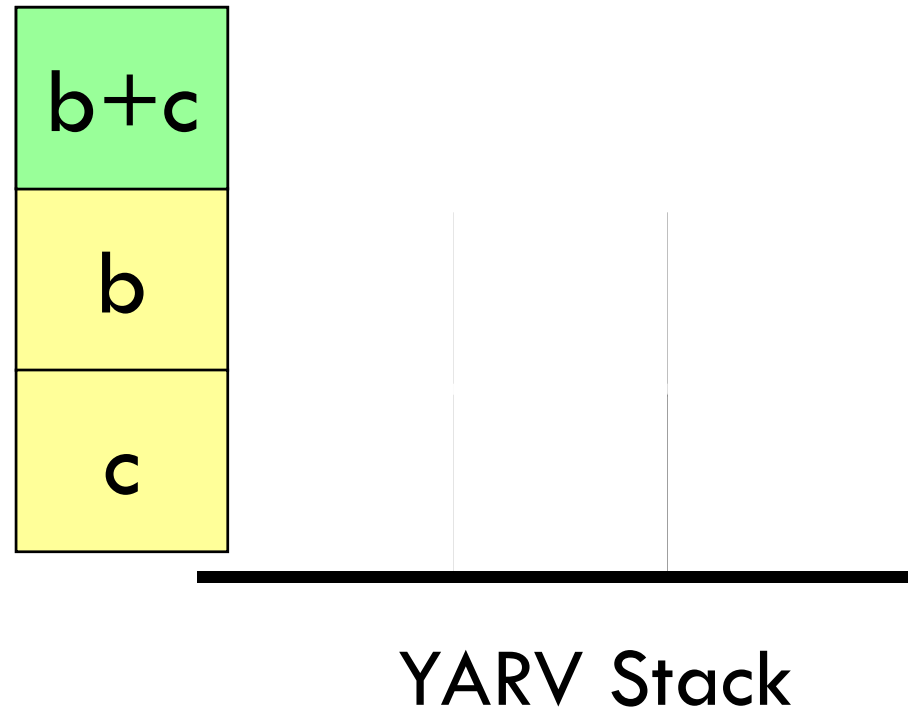
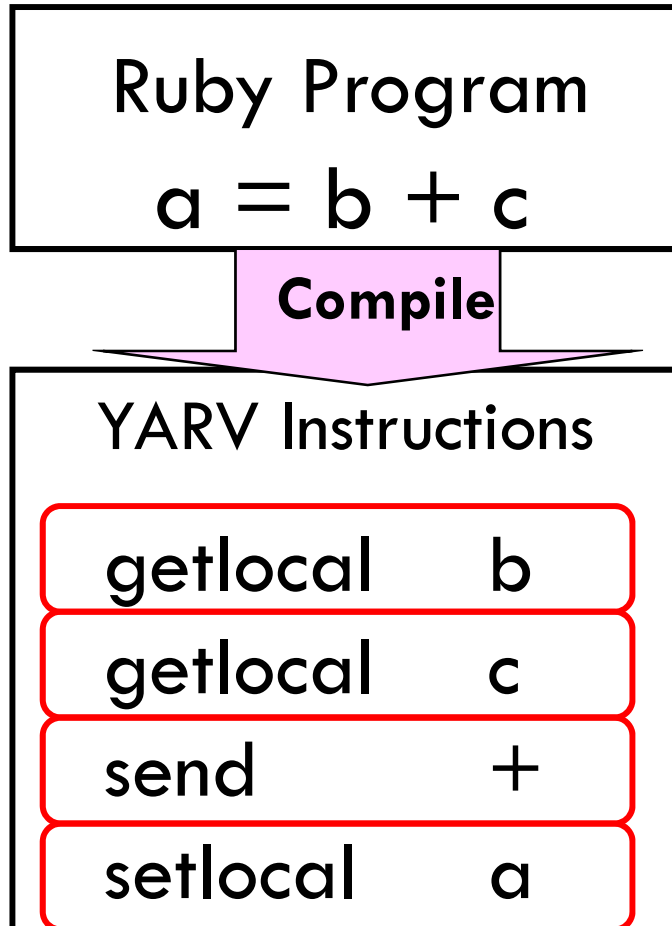
命令セット・コンパイラ

16

- YARV命令セット
 - スタックマシンモデル
 - Rubyプログラムを十分表現可能な命令セット
 - 55命令
- Rubyパーサ
 - Rubyプログラム → 抽象構文木
 - CRubyのものを利用
- コンパイラ
 - 抽象構文木 → YARV 命令列
 - ピープホール最適化
 - 最適化命令へ変換

YARVの処理

17



- **オブジェクト管理, GC**
 - CRubyと同等
- **スタックマシン**
 - 仮想レジスタ: PC, SP, LFP, DFP, CFP, ...
 - 値用スタックと制御フレーム用スタックの2本立て
 - 環境をヒープにコピーするClosureの実現が容易
 - スコープ変更 → 制御フレーム用スタック push
 - メソッド呼び出し, ブロック呼び出し(yield), クラス定義文
- **表引き法による例外処理**
 - 例外が発生しない限り高速
 - ただし, setjmp/longjmp も利用

VM命令の実行と最適化

19

□ 命令の実行手順

1. 命令列から命令のフェッチ
 2. 命令へ分岐
 3. 命令列から命令オペランドのフェッチ
 4. スタックオペランドのフェッチ
 5. 命令処理の実行
 6. スタックへ結果を書き込み
 7. プログラムカウンタ(PC)を進め, 1 へ戻る
- ダイレクトスレッドコード
- 命令融合
- スタックキャッシング
- 特化命令
- インラインキャッシュ

ネイティブコンパイラ(開発中)
プロファイラ
コンパイル時ののぞき穴最適化

最適化: 特化命令

20

- **問題: メソッド呼び出しのオーバーヘッドが特に大きな処理**
 - 「メソッド呼び出しのオーバーヘッド」>>「処理のオーバーヘッド」
 - Integer#+ などの数値計算
- **解決: 特定のメソッド呼び出しパターンを特化命令へ置換**
 - 特定 selector、特定の引数の数のメソッド呼び出しを置換
 - 例) a + b
 - send :+,1 → opt_plus
 - 型(クラス)のチェック
 - 動的特性を満たすため、再定義のチェック

Python では
チェックしない

```
opt_plus:  
  if(a と b は整数?)  
    if 整数についての + メソッドは再定義されていないか?  
      return a+b  
    else return 通常の方法呼び出し(a.+(b))
```

最適化:オペランド・命令融合

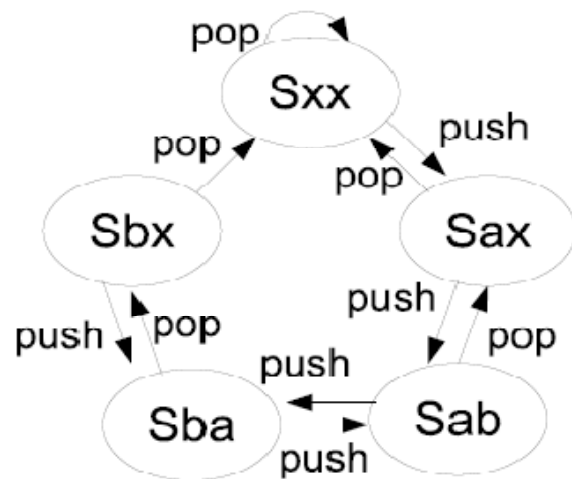
21

- 問題:メモリ上の命令列からのフェッチオーバーヘッド
- 解決:融合操作
 - オペランド融合
 - `insnA op1` → `insnA_op1`
 - `op1` が頻出する場合、ひとつの命令に融合(例:
`putobject_true`)
 - 命令融合
 - `insnA insnB` → `insnA_insnB`
 - `insnA, insnB` という並びが頻出する場合、ひとつの命令に融合
(a.k.a superinstruction)
 - 専用命令の作成
 - 処理に埋め込まれているため、メモリ上の命令列からのフェッチオーバーヘッド削減

最適化: 静的スタックキャッシング

22

- 問題: スタック操作のオーバヘッド
- 解決: スタックキャッシングの利用
 - スタックトップレジスタ(SReg)を用意
 - スタックへプッシュする代わりにSregへアクセス
 - 5状態、2レジスタの静的スタックキャッシング
 - 5状態なので、同じ命令につき5命令必要
 - putobject (スタックにひとつ積む)
 - putobject_xx_ax
 - putobject_ax_ab
 - putobject_bx_ba
 - putobject_ab_ba
 - putobject_ba_ab



- M. Anton Ertl , Stack caching for interpreters, PLDI, 1995

最適化: 静的スタックキャッシング

23

Ruby プログラム
 $v1 = v2 + v3$

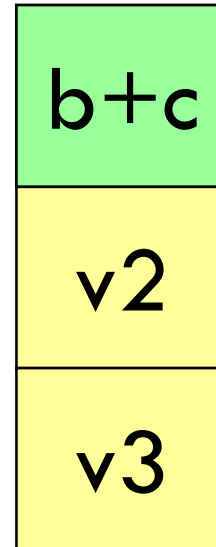
YARV 命令列(SC)

getlocal_xx_ax v2

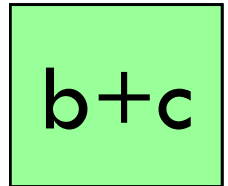
getlocal_xx_ab

send_ab_ax +

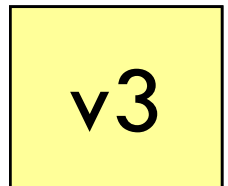
setlocal_ax_xx v



Reg A



Reg B



スタック操作
無し!

YARV
スタックマシン

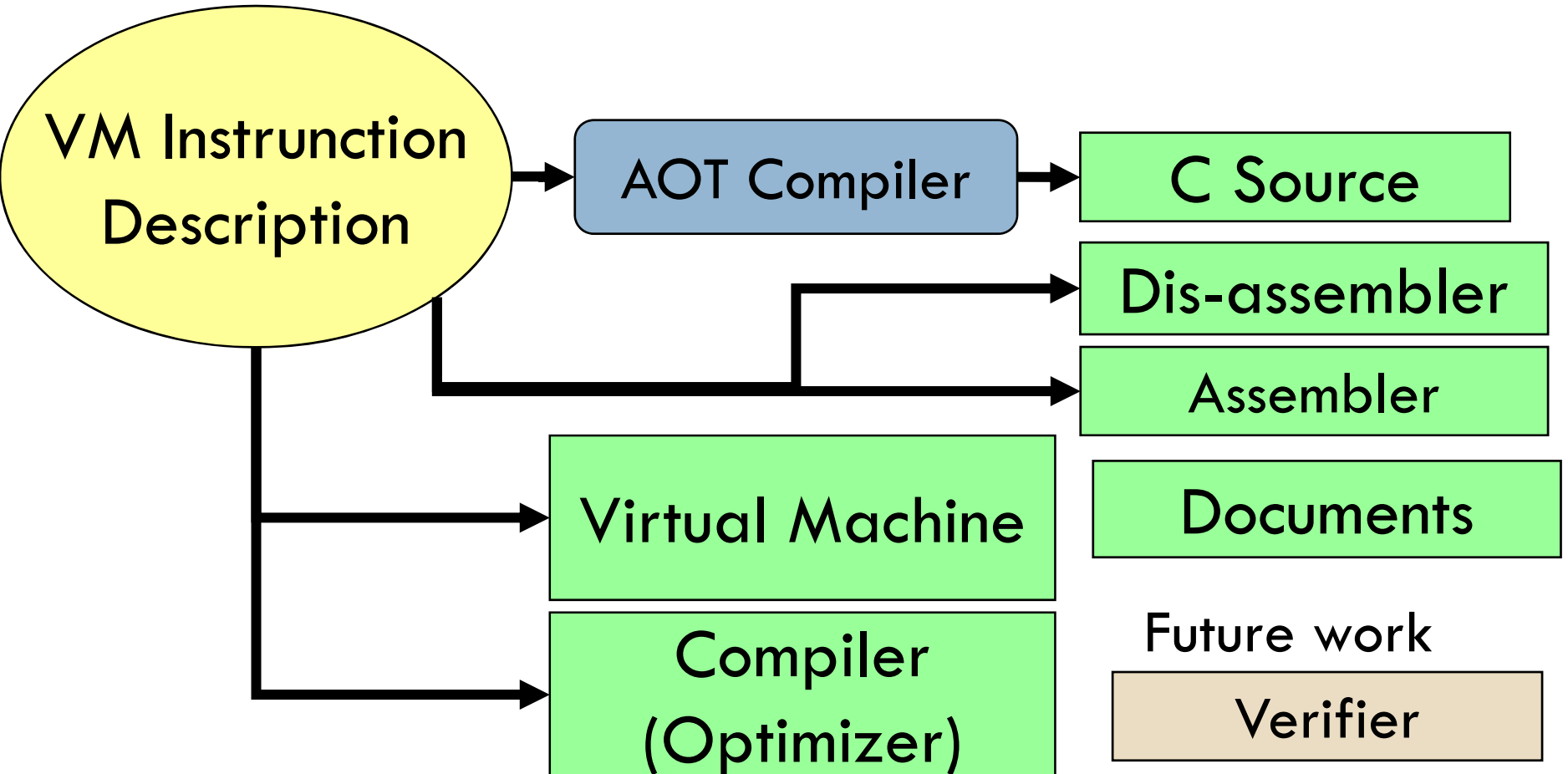
VM生成系の利用

24

- 仮想マシンは複雑なソフトウェア
 - 各命令ごとのスタックのpush/pop, pc 増加, etc
 - 最適化用命令が必要
 - オペランド・命令融合のための命令の用意
 - スタックキャッシュ用命令の用意(基本の5倍必要)
- VMの多くの処理は機械的に生成可能
 - VM生成系の利用
 - 関連研究
 - M. Anton Ertl et.al: vmgen: a generator of efficient virtual machine interpreters, 2002 ← ベース. 命令オペランドの融合には対応しない
 - 内山等: 仮想機械の仕様記述に基づくバイトコードインタプリタ生成系, 2005 ← 厳密な解析を行うため, C言語呼び出しに未対応

VM生成系

25



VM生成系：命令記述と生成例

26

□ 値の宣言と、ロジックの記述(C言語)

(1)命令オペランド(2)スタックオペランド→前処理

(3)スタックへプッシュする値→後処理

```
DEFINE_INSN
mult_plusConst
(int c)      // (1) 命令オペランド定義
(int x, int y) // (2) スタックオペランド定義
(int ans)    // (3) 命令の返り値定義
{
    // C言語による命令ロジック記述部分
    ans = x * y + c;
}
```

```
mult_plusConst:{
    int c = *(PC+1);
    int y = *(SP-1);
    int x = *(SP-2);
    int ans;
    PC += 2;
    SP -= 2;
    {
        ans = x * y + c;
    }
    *(SP) = ans; SP += 1;
    goto **PC;}

```

前処理

後処理

VM生成系：融合命令の生成

27

- 開発者が融合対象を指定
- VM生成系は融合命令のVMコード, コンパイラパターンマッチ用コードを自動生成

オペランド融合：入力

mult_plusConst 5

出力

mult_plusConst_5

命令融合：入力

dup + mult_plusConst

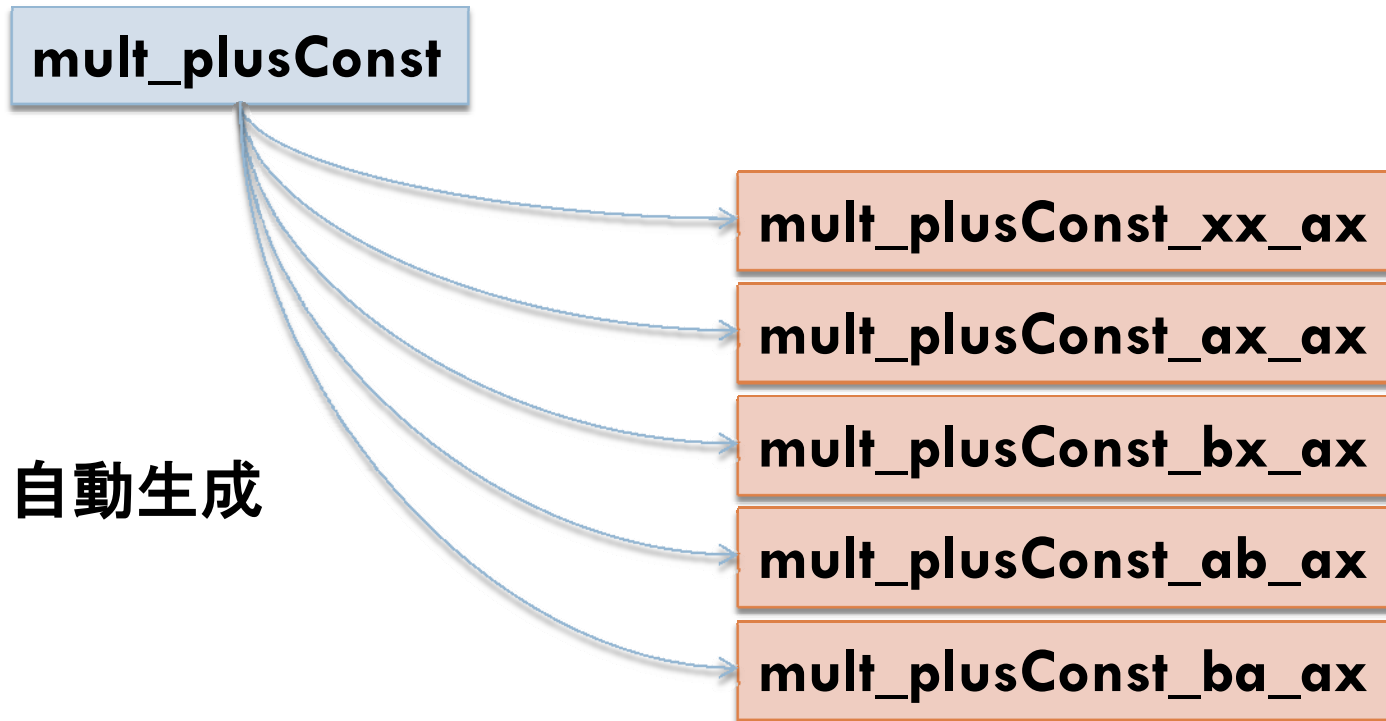
出力

Dup_mult_plusConst

VM生成系： スタックキャッシング用命令生成

28

- プッシュ・ポップ処理をSC用レジスタアクセスにして自動生成
- コンパイラで遷移状態に応じた命令に変換



VM生成系に関する考察

29

- 実装は容易
 - 主に文字列置換
- 手作業では困難な最適化を適用
 - 前田他, Scheme インタプリタにおける仮想マシンアーキテクチャの最適化, IPSJ SIGPRO, 2003. →手作業での融合での高速化
 - 手作業によるバグの混入防止
- コード量が容易に増加
 - 最適化によっては膨大なコード量に
 - 基本命令:52命令 → 生成後:875命令
 - 命令キャッシュミス, ビルド時間が問題
 - 命令数削減が必要

評価：評価環境

30

□ 評価環境

Pentium-M 753(1.2GHz, L1I/D 32KB, L2S 2MB)、メモリ
1GB, WindowsXP + cygwin, GCC 3.4.4

□ 比較言語処理系

- Ruby 1.9.0 (2005-03-04)
- Perl 5.8.6
- Python 2.4.1
- Gauche 0.8.4(Scheme 処理系)

評価: 例外処理

31

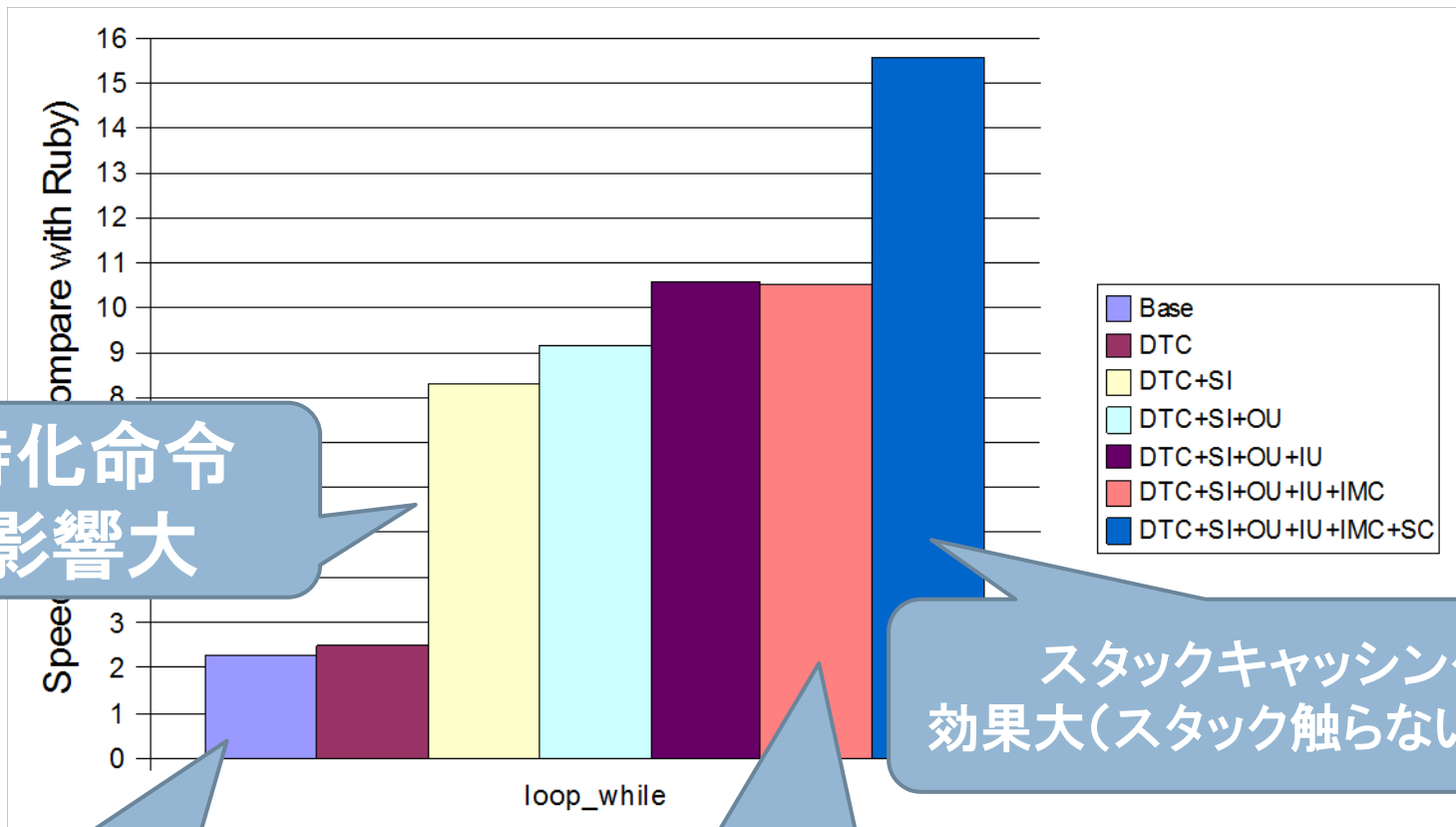
- 表引き法により, 例外発生しない場合は高速に実行
- 例外が発生すると, 例外表の検査のためオーバヘッド
→ 一般的に, 例外発生は例外的なので本方式が有利

	30万回の ループ	Ruby (sec)	YARV (sec)	Speedup
例外発生 なし	ensure	1.77	0	-
	rescue	4.67	0.15	31.11
例外発生 あり	rescue	3.65	5.51	0.66

```
x.times{begin; rescue/ensure; end}
```

評価: while loop

32



特化命令
影響大

スタックキャッシング
効果大(スタック触らないため)

VM化だけで
2倍高速化

メソッド呼び出しが無い
のでインラインメソッド
キャッシュ効果なし

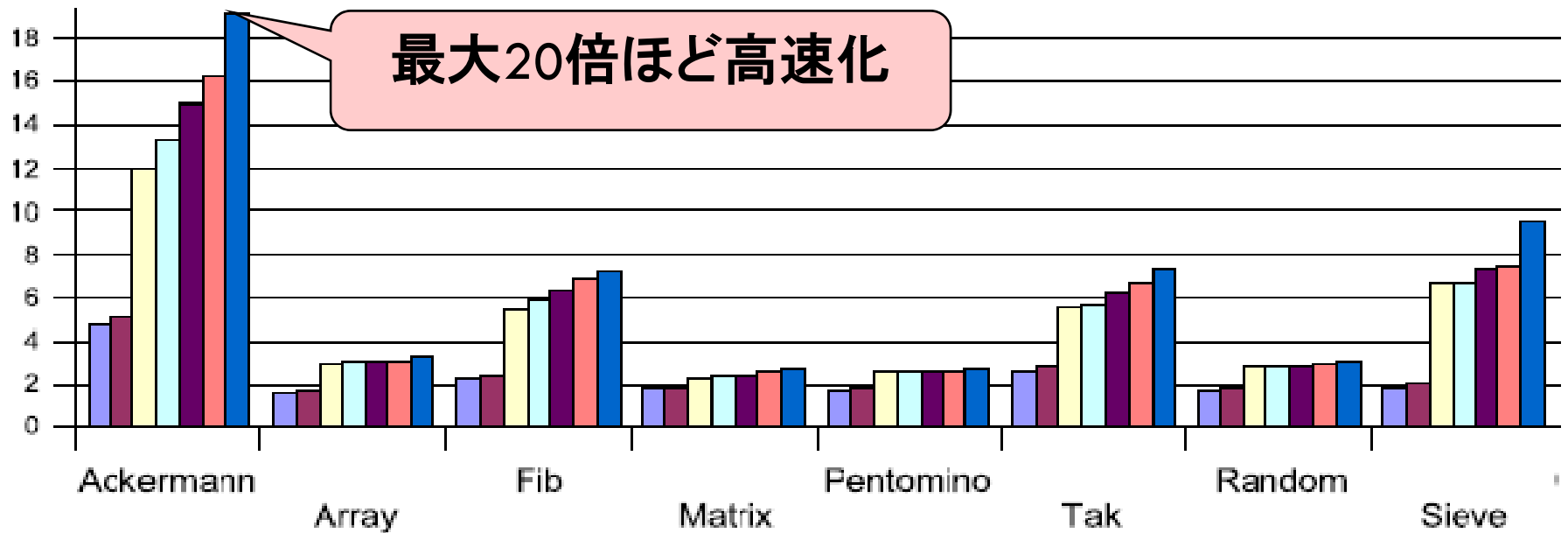
Base: V
DTC: D
SI: Spe

OU: C
IU: Ins

Method Cache
Caching

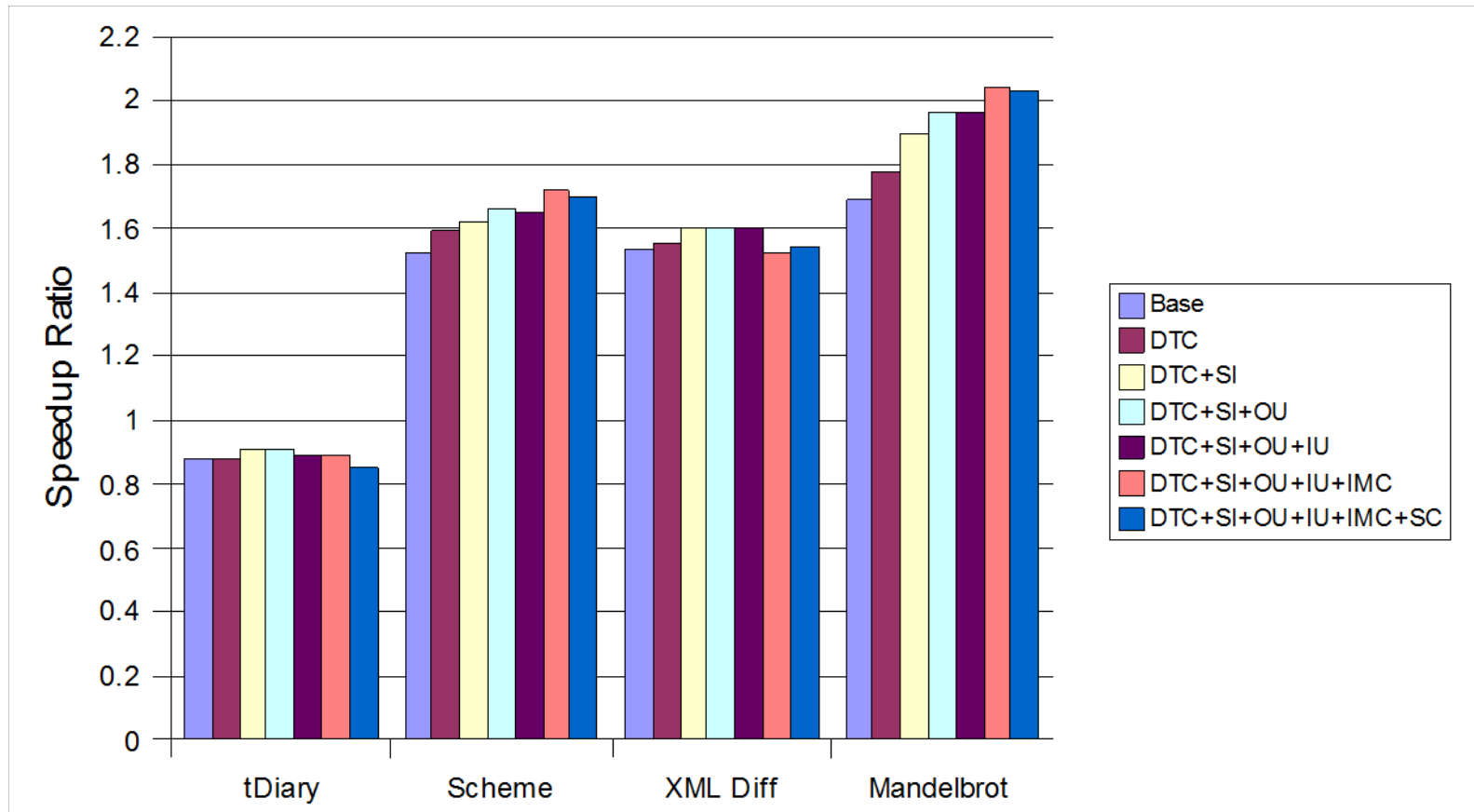
評価：高速化が有効な例

33



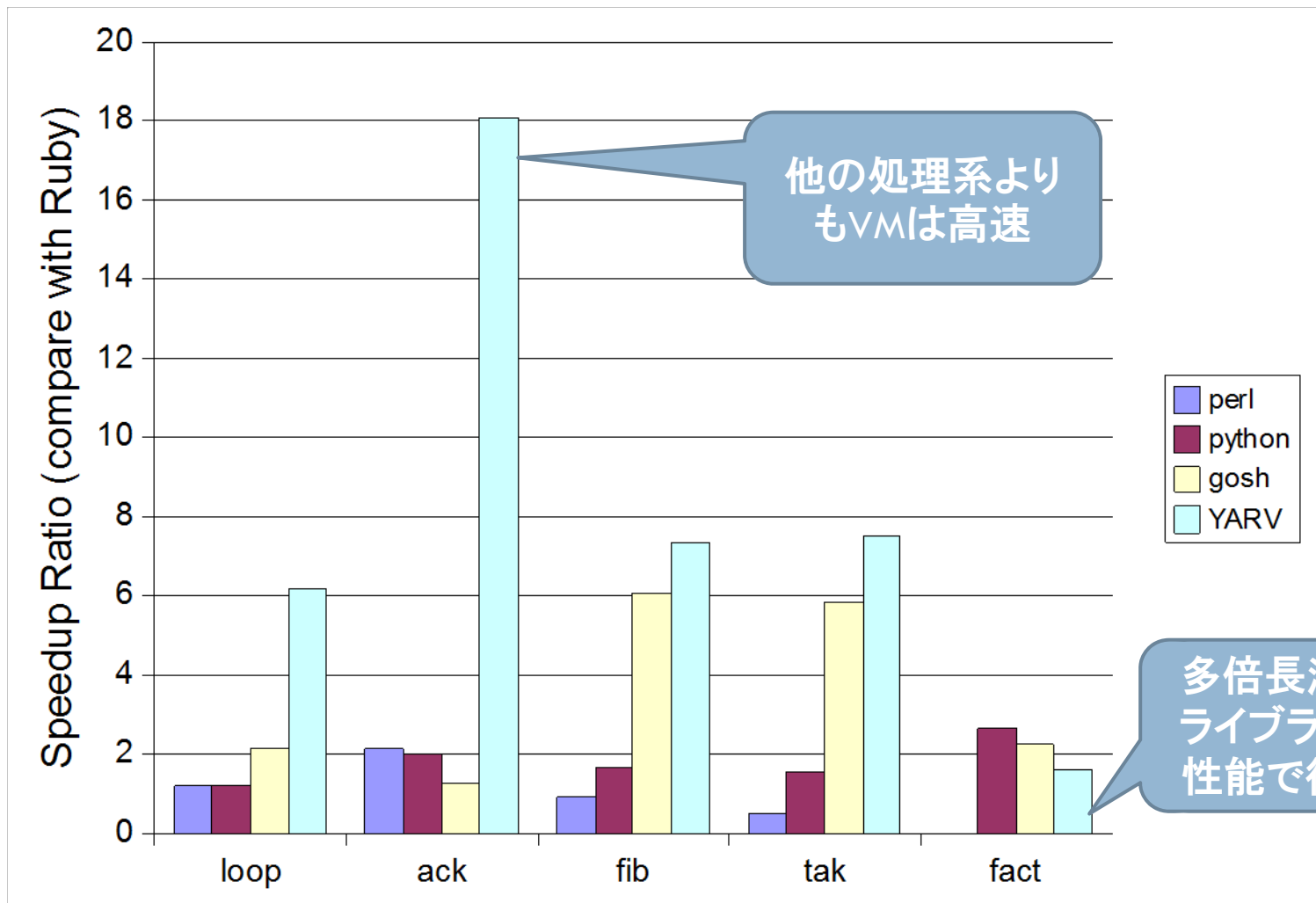
評価：マクロベンチマーク

34



評価：他言語との比較

35



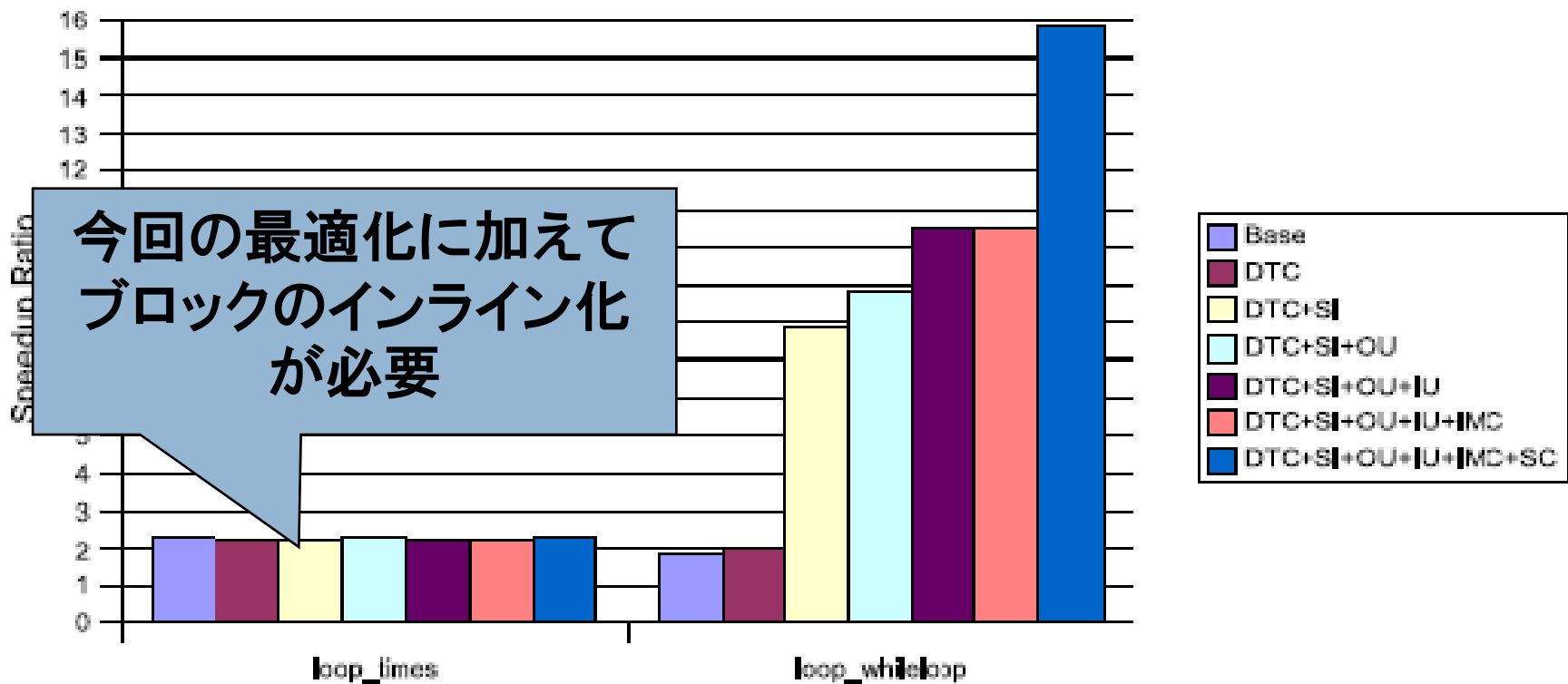
分析1

36

- VM化(Base)だけで性能向上を確認
 - ▣ どのベンチマークでも1.5倍～2倍
- 各最適化で性能向上を確認
 - ▣ 数値計算, 記号処理などが高速化
 - ▣ 規模が小さいプログラムでスタックキャッシングが有利
 - ▣ 整数計算で特化命令が有利
- 融合操作のさらなる性能向上の可能性
 - ▣ マイクロベンチマークを基準に融合命令を選定
- tDiary の性能低下
 - ▣ eval() を利用しているため
 - ▣ そもそもVM化では速くならないプログラム
 - ライブラリを多用しているため

評価：繰り返し(w/block)

37



分析2

39

- ボトルネックがVM以外では各最適化効果なし
 - ライブラリの利用(文字列演算, 多倍長演算)
 - オブジェクトの利用
 - 例外の発生
- ブロック呼び出しには各最適化効果なし
 - VM化による高速化は効果があった
 - Rubyではブロック呼び出しが多用されるため問題
 - ブロック呼び出し処理のオーバーヘッド > 最適化効果
→ 今後の課題

Agenda

40

- 背景と目的
- 高速なRuby用仮想マシン
- Rubyの並列化
- まとめ

Rubyの並列化

41

- 「並列」実行による高速化
 - 同時に複数のRubyプログラムを並列計算機上で動作
 - fork による並列実行はすでに可能
 - データ共有が難しく, 表現できるプログラムに制限
 - 参考: dRuby – 手軽にRPCを実現
- Rubyは言語レベルでスレッドに対応
 - 「並行」実行をサポート
 - 並列実行への拡張は自然

目標と課題

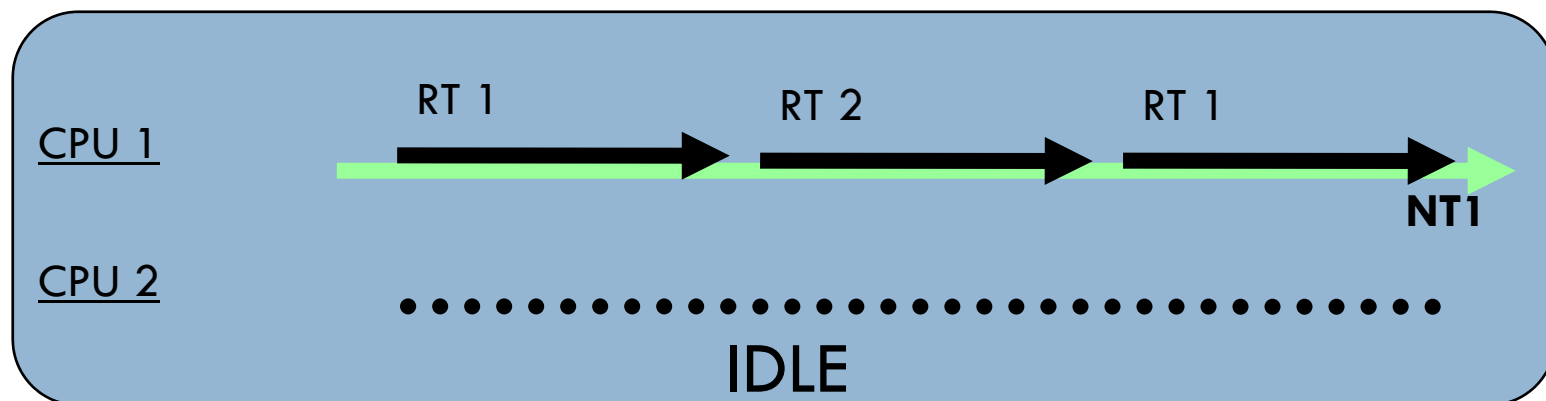
42

- Rubyスレッドの並列実行によるRubyの並列化
 - ネイティブスレッド(NT)の利用
 - どのようにRubyスレッドとのマッピングするか？
 - VMでの適切な排他制御の導入
 - メモリ保護違反などを起こさない「安全」な実行に必須
 - 排他制御オーバーヘッド削減が必要

現在のRubyスレッド(RT)処理機構とその問題点

43

- 独自のユーザレベルスレッド
 - 並列実行不可
- スタックコピーによるスレッド切り替え
 - 切り替え時間がスタックの深さに比例



ネイティブスレッドを利用した Rubyスレッド処理機構

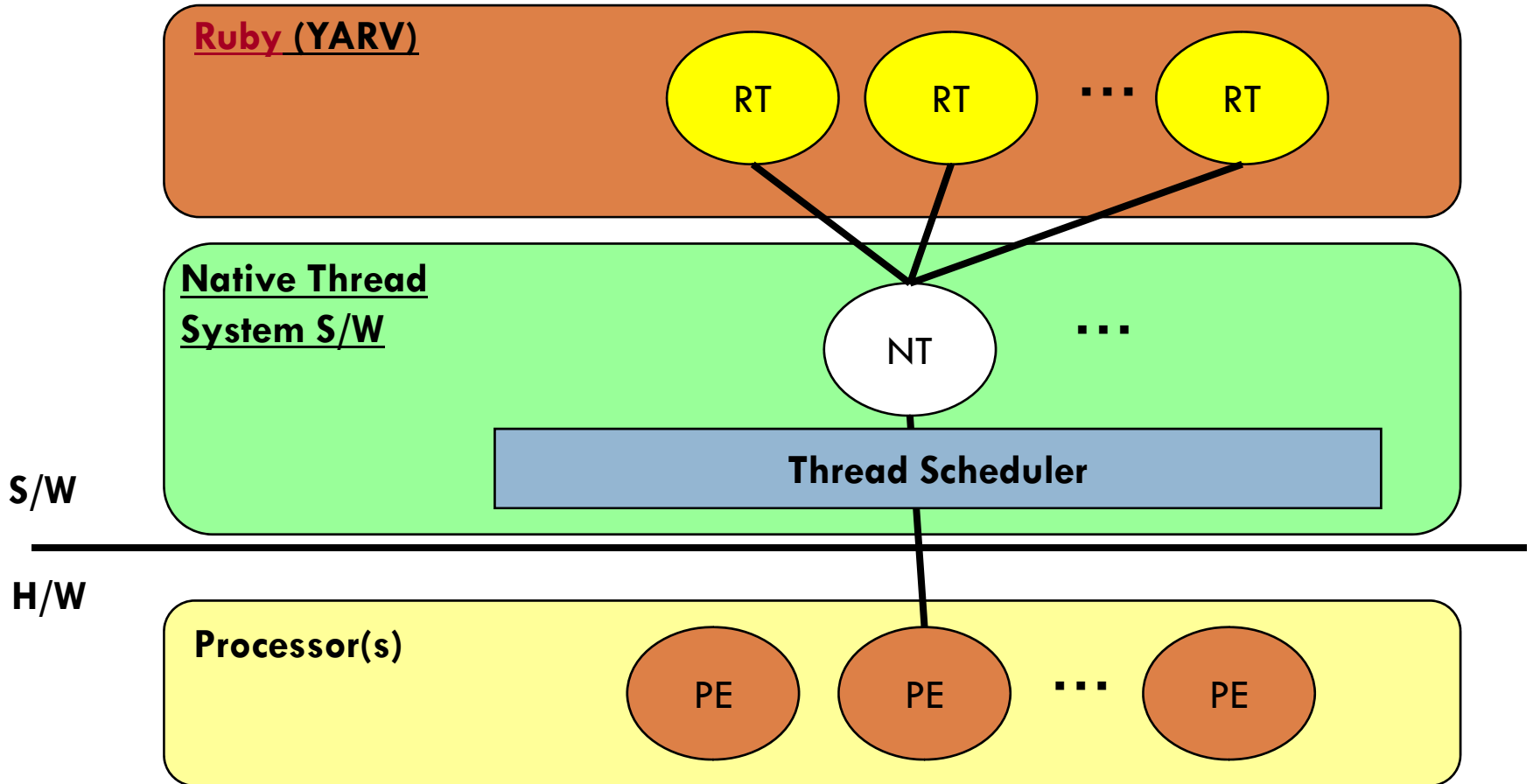
44

- ネイティブスレッドを利用して並列化
 - POSIX Thread (Pthread)
 - Windows Thread
- ネイティブスレッドとRubyスレッドのマッピング
 - 1:N → ユーザレベルスレッド
 - 1:1 → スレッド管理を全てNTで
 - M:N → 切り替えなどをユーザレベルで

検討(1)

Rubyスレッドとネイティブスレッド(1:N):CRuby

45

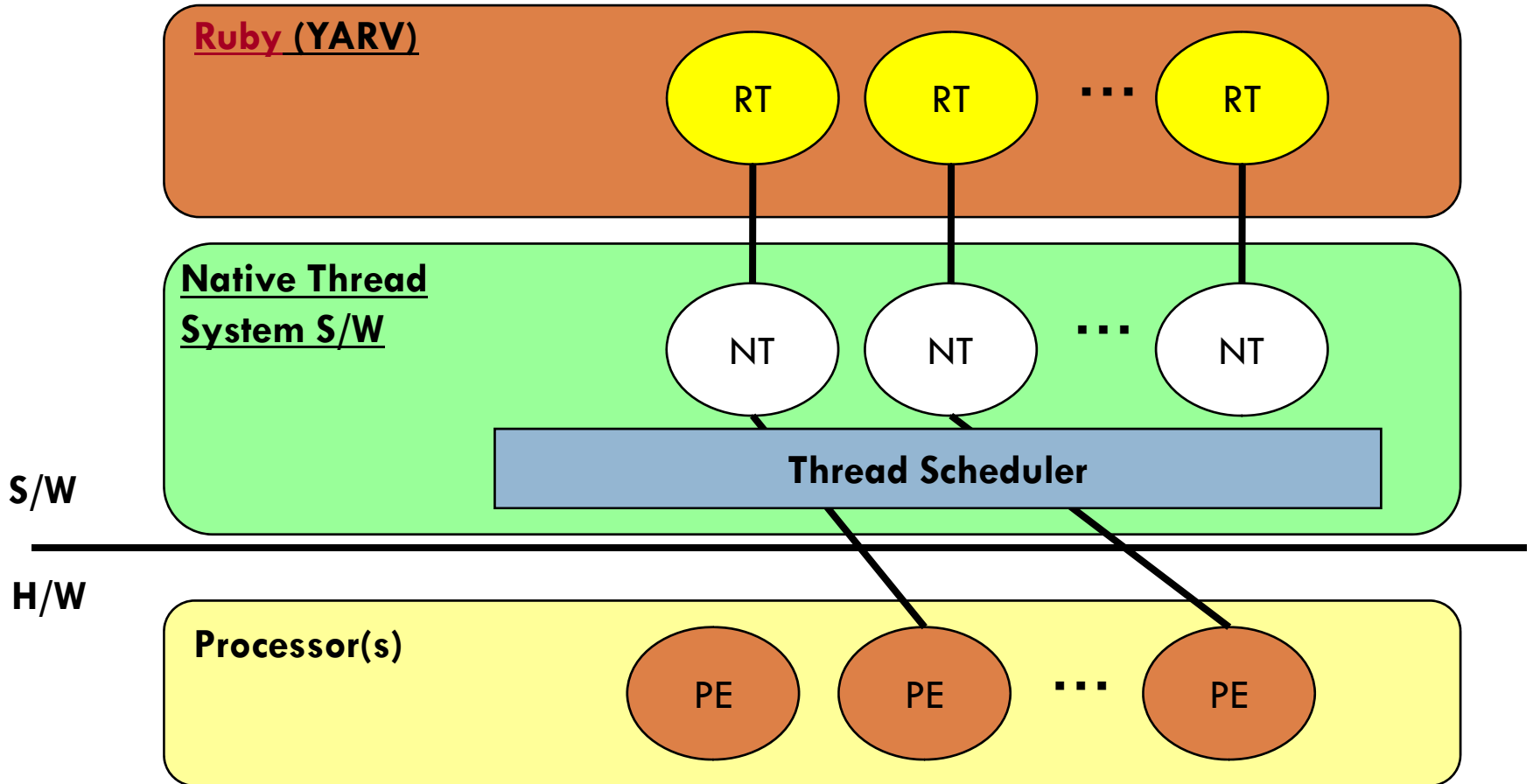


PE: Processor Element, UL: User Level, KL: Kernel Level

検討(2)

Rubyスレッドとネイティブスレッド(1:1)

46

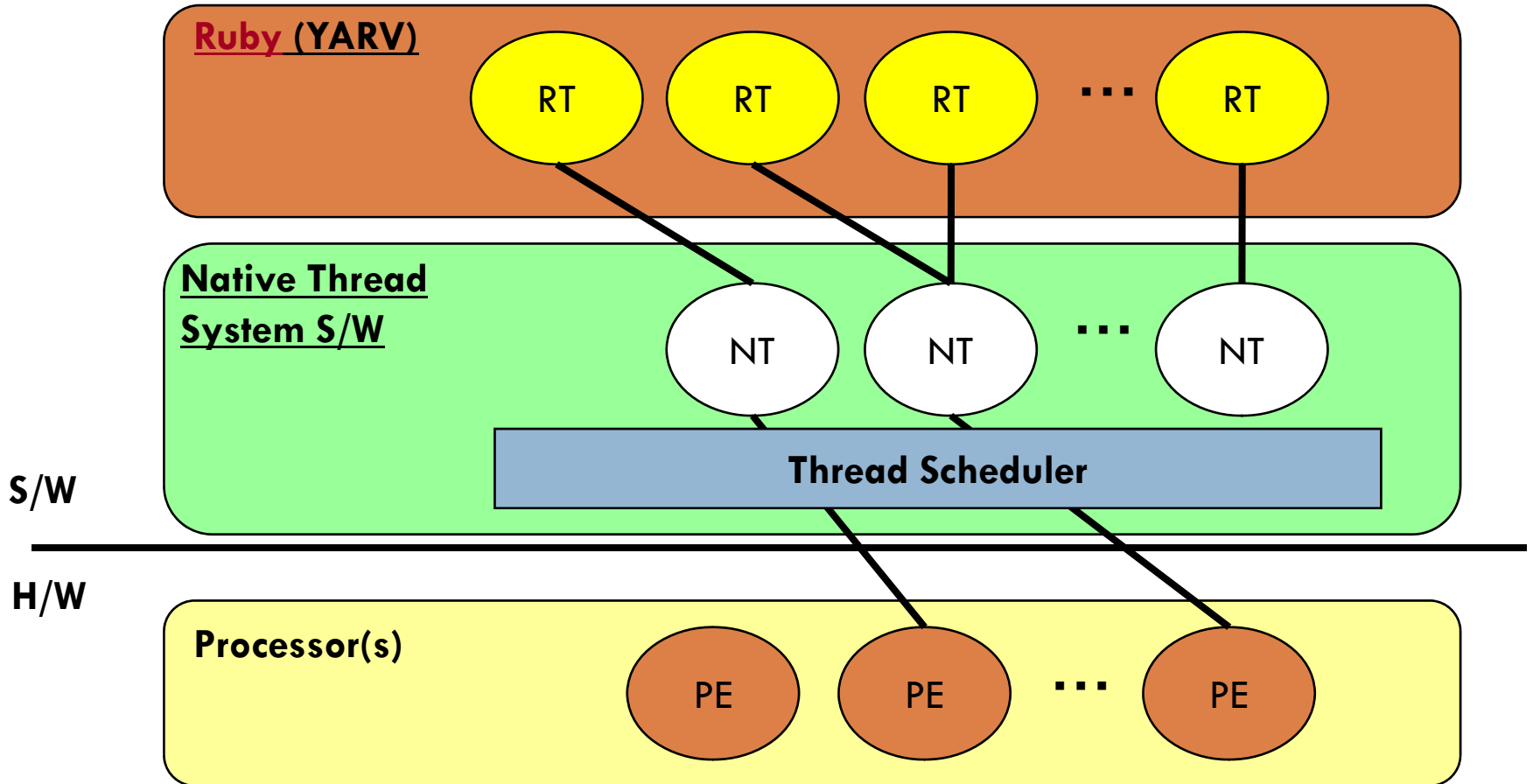


PE: Processor Element, UL: User Level, KL: Kernel Level

検討(3)

Rubyスレッドとネイティブスレッド(N:M)

47



PE: Processor Element, UL: User Level, KL: Kernel Level

検討: ネイティブスレッド適用方式

48

□ ネイティブスレッドとRubyスレッドのマッピング

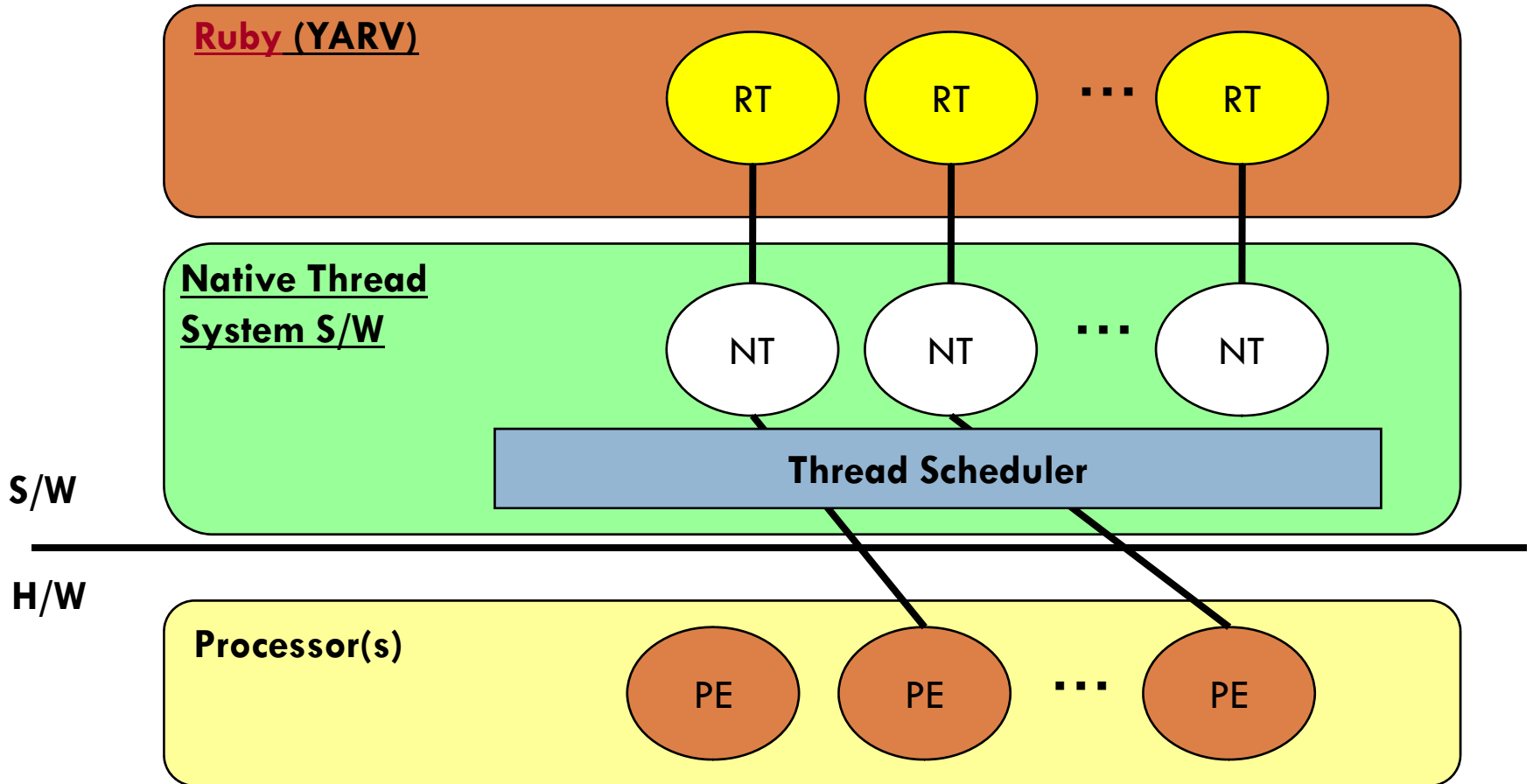
	Pros	Cons
1:N	スレッド制御が軽い	並列実行できない
1:1	並列実行可能 シンプル,移植性が高い	スレッド制御が重い
N:M	スレッド制御が軽い 並列実行可能	複雑,移植性が悪い

- システムをシンプルにするために 1:1 モデルで
 - ネイティブスレッド処理機構にスレッド制御の性能を担保
今後の研究開発に期待

システムの全体構成

Rubyスレッドとネイティブスレッド(1:1)

49



PE: Processor Element, UL: User Level, KL: Kernel Level

設計: Rubyスレッドのネイティブスレッド対応

50

- Rubyスレッドの生成・終了・排他制御
スケジューリング
 - ネイティブスレッドに委譲
- ネイティブスレッド非対応機能の対応
 - Rubyスレッドの合流
 - 割り込み処理の対応

排他制御の導入

51

- VMに排他制御の導入が必要
 - Ruby VMは異常終了してはいけけない
- 排他制御が必要な箇所
 1. スレッド間で共有するVM管理データ
 2. GCやオブジェクト管理
 3. インラインキャッシュ
 4. スレッドセーフでないネイティブメソッド

(1) スレッド間で共有する管理データ

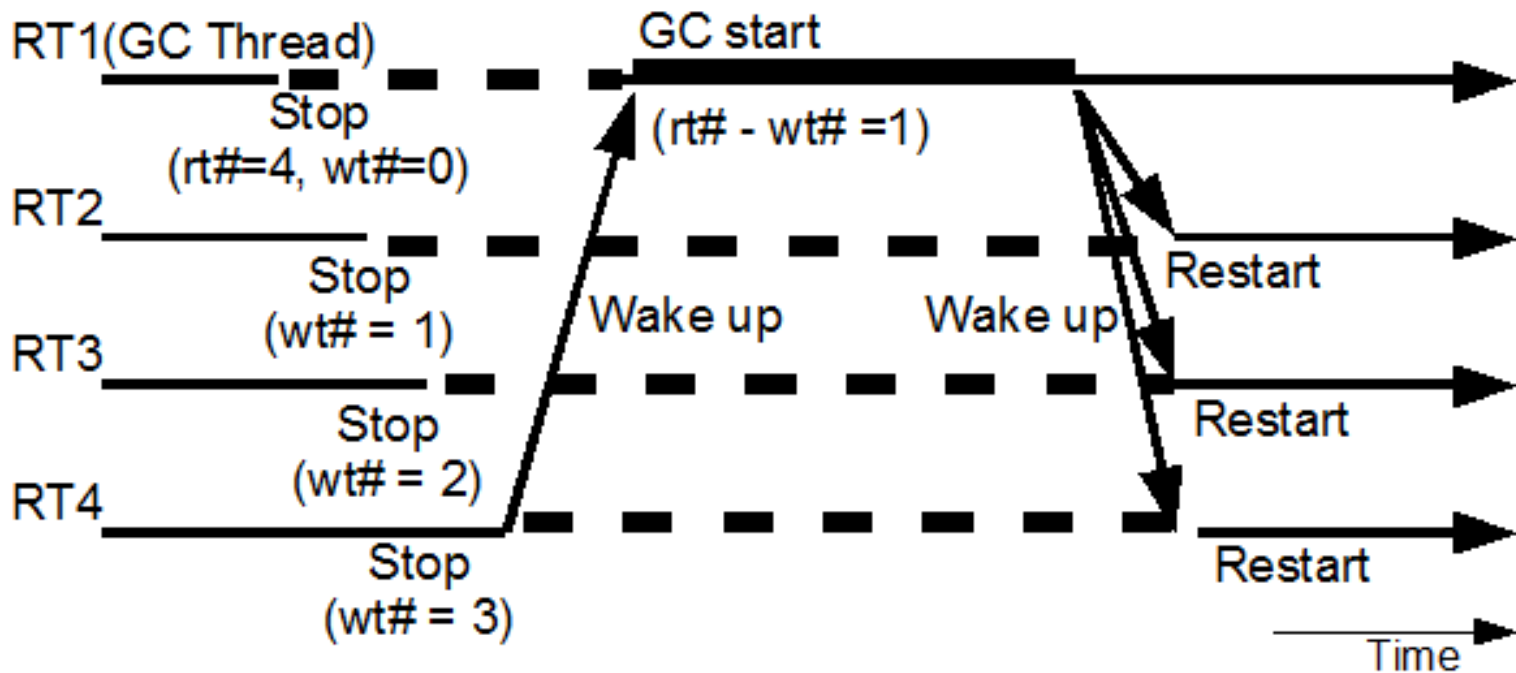
52

- 主に表で管理
 - グローバル変数名 → 実体
 - メソッド名 → メソッドボディ
 - ...
- 表のアクセス時に排他制御

(2) GCやオブジェクト管理

53

- GC時には全スレッドを停止し，逐次GC



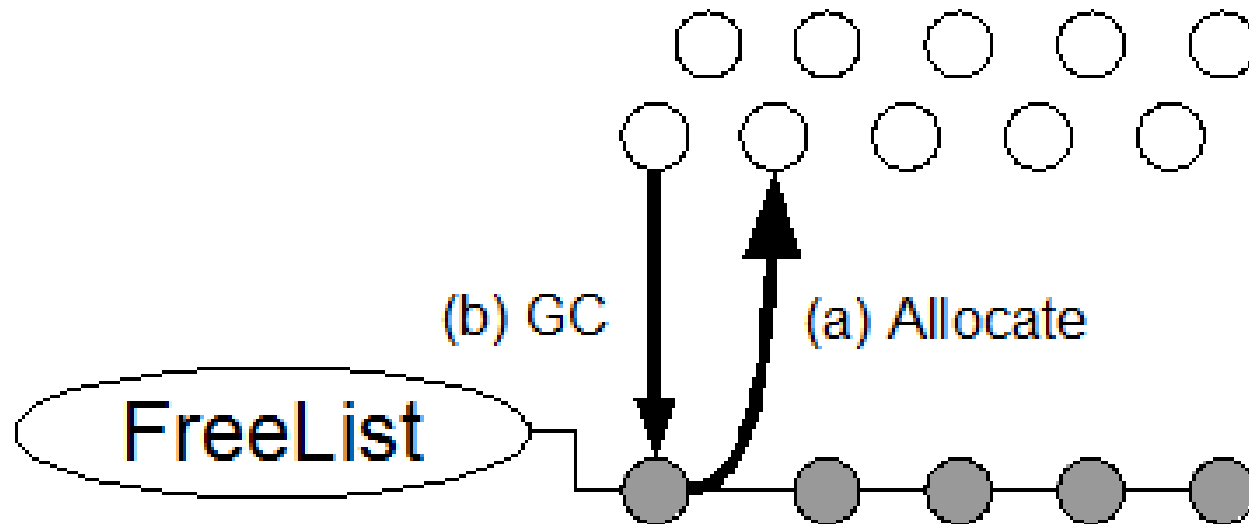
rt#: Ruby Threads Number
wt#: Wating Threads Number

(2) GCやオブジェクト管理

TLFLを用いた排他制御不要なオブジェクトの生成

54

Object Space

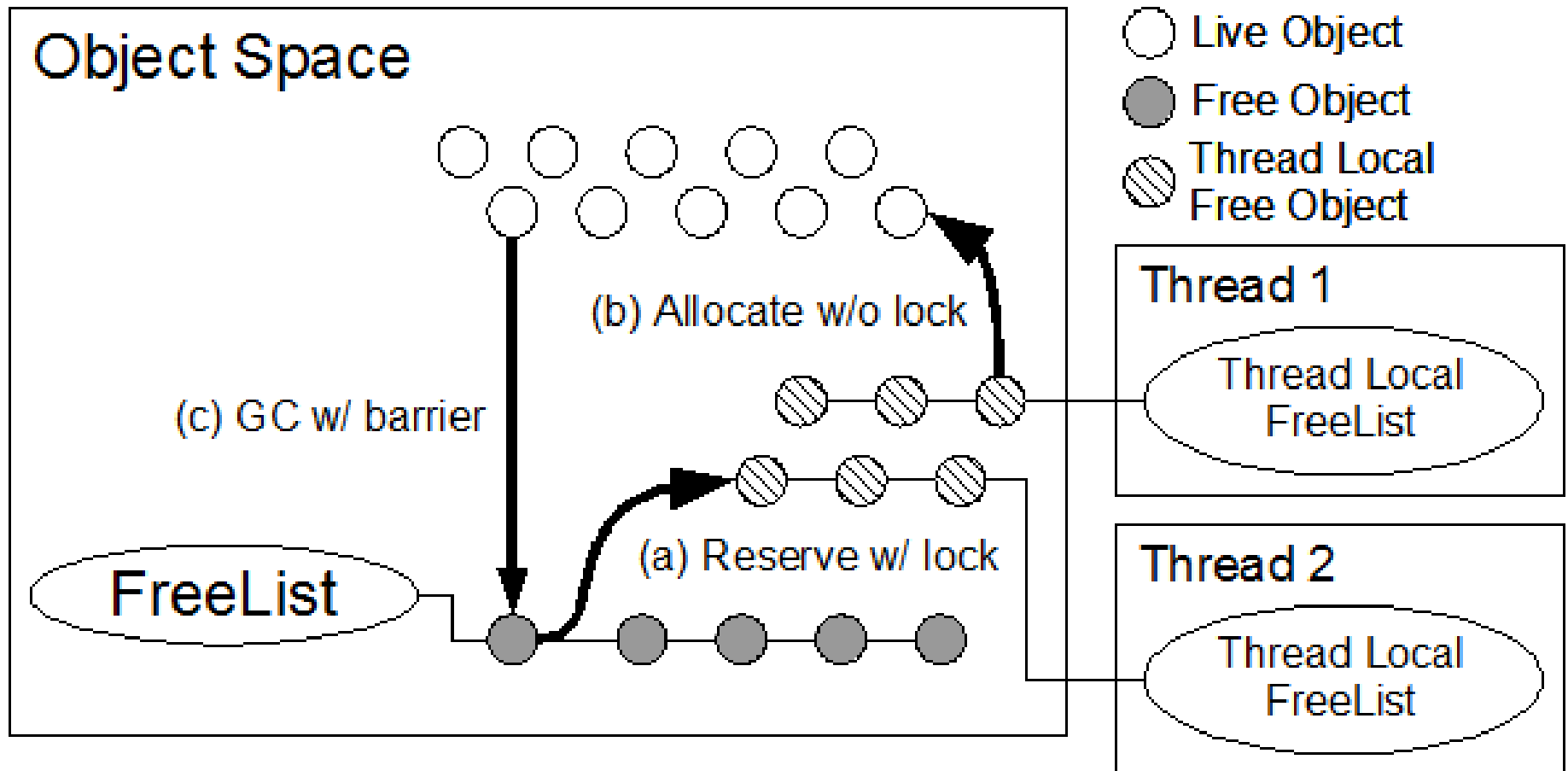


- Live Object
- Free Object

(2) GCやオブジェクト管理

TLFLを用いた排他制御不要なオブジェクトの生成

55



(3) インラインキャッシュ

56

- VMの高速化に利用
 - ▣ キャッシュエントリを命令列に埋め込み
- 一貫性保持のための排他制御→性能に大問題
 - ▣ キャッシュエントリの「鍵」と「値」の一貫性
 - ▣ 高速化のための工夫が足を引っ張ってはいけない
- 排他制御不要なインラインキャッシュ
 - ▣ キャッシュミス時 → キャッシュエントリを生成
 - 古いキャッシュエントリはゴミに(GC任せ)
 - 生成オーバヘッド増, しかしミスは少ないため問題無し

(4) スレッドセーフでないネイティブメソッド

57

- CRuby にはCで記述したRubyを拡張するネイティブメソッドが多数存在→非スレッドセーフ
 - ▣ 並列実行していないから必要なかったため
- ジャイアントロックで保護
 - ▣ 過去のライブラリを使うため
- スレッドセーフに書き換え
→ GL 不要に
- 段階的な並列度向上が可能

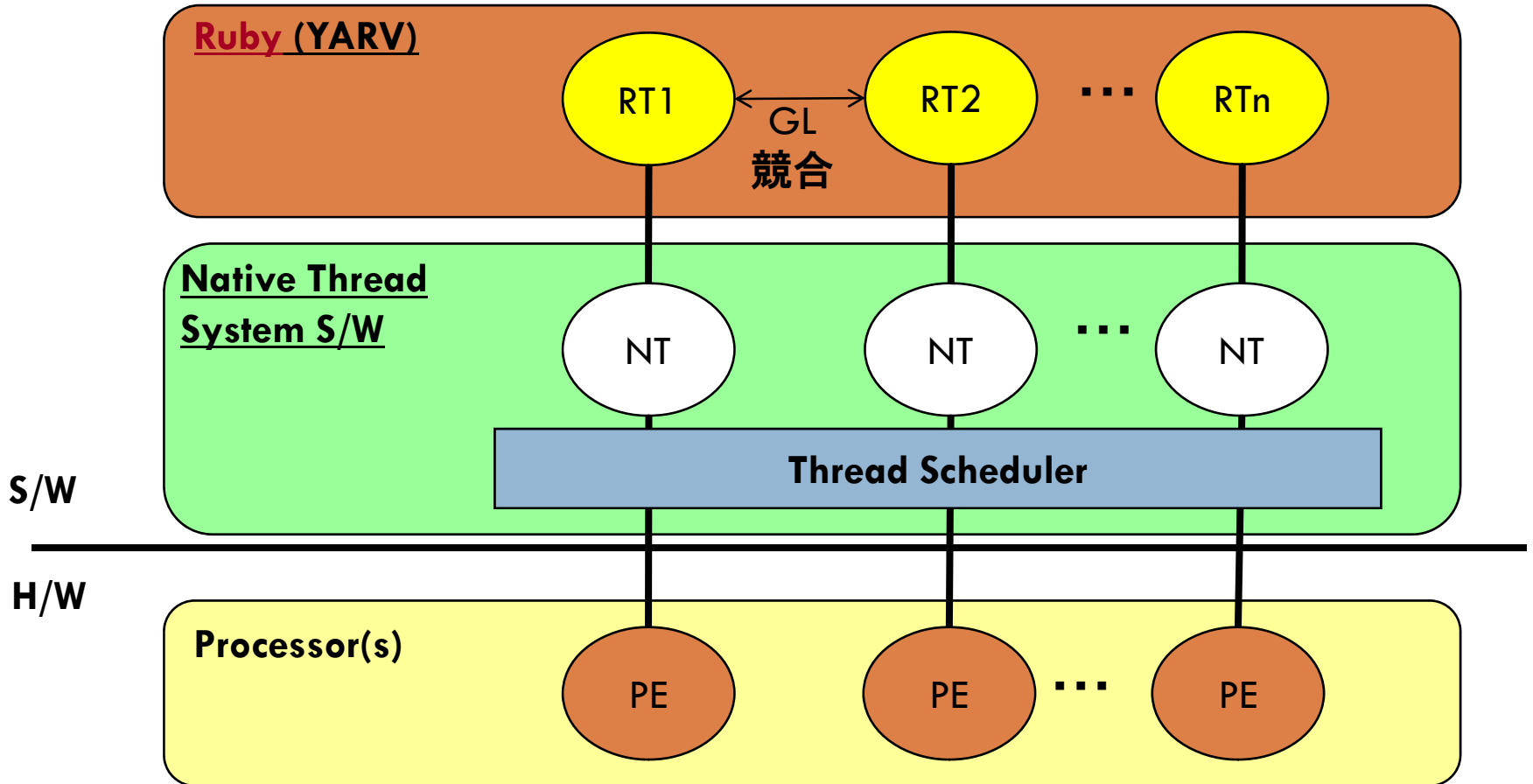
利用CPU制限によるGL競合回避

58

- GL競合(取り合い)による性能低下
→ 利用CPUの制限
 - GL競合回数を一定間隔で監視
 - 競合を繰り返すRubyスレッドの実行CPUを制限
 - NPTLのpthread_setaffinity_npを利用
 - Windows では SetThreadAffinityMask
 - 一定時間過ぎたら制限を解除

利用CPUの制限

59

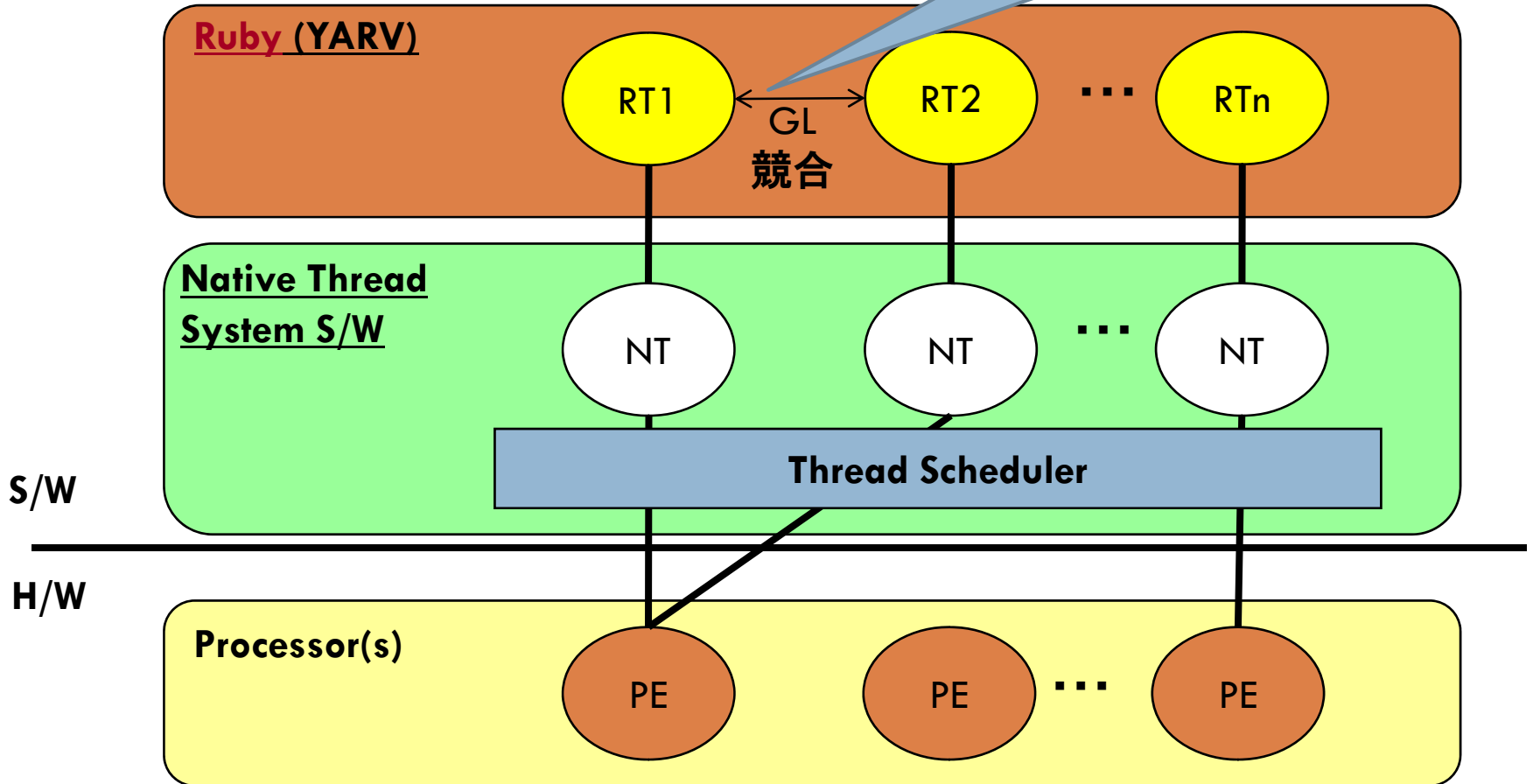


PE: Processor Element, UL: User Level, KL: Kernel Level

利用CPUの制限

60

RT1 と RT2 を
並列実行させない
→ 取り合い回避



PE: Processor Element, UL: User Level, KL: Kernel Level

評価 評価環境

61

- **評価環境**
 - CPU: Intel Xeon CPU E5335 2.0GHz
Quad core x 2 = 8 core
 - OS: GNU/Linux 2.6.18 x86_64 SMP / NPTL
 - Compiler: gcc version 4.1.2
- **比較対象のRuby**
 - **ruby** 1.8.6 (2007-11-02) [x86_64-linux]
- **YARV最適化オプション**
 - **融合操作とStack caching 以外すべて**

評価

スレッド制御

62

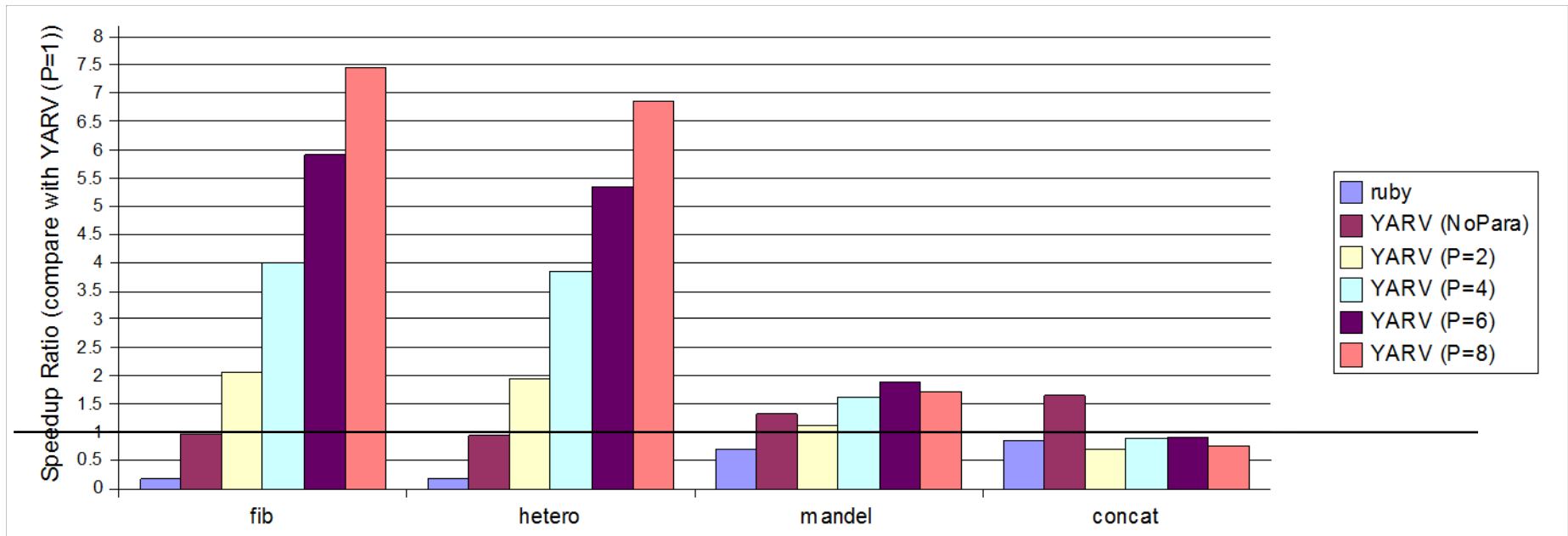
- 生成, 切り替え: 10万回, 排他制御: 100万回
- 生成・合流はNT制御オーバーヘッドで低速
 - ネイティブスレッド制御オーバーヘッド
 - VM用スタック・スレッドローカルフリーリスト割り当てオーバーヘッド
- 排他制御は高速
- ネイティブスレッドによるスタックの深さに依存しない
高速なスレッド切り替え

	Ruby (sec)	YARV (sec)	Ratio	NTPL (sec)
生成	0.89	1.95	0.46	0.59
排他制御	0.67	0.38	1.76	-
切り替え(深さ1)	6.01	0.06	100.17	-
切り替え(深さ16)	11.55	0.06	192.5	-

評価

並列実行(マイクロベンチマーク)

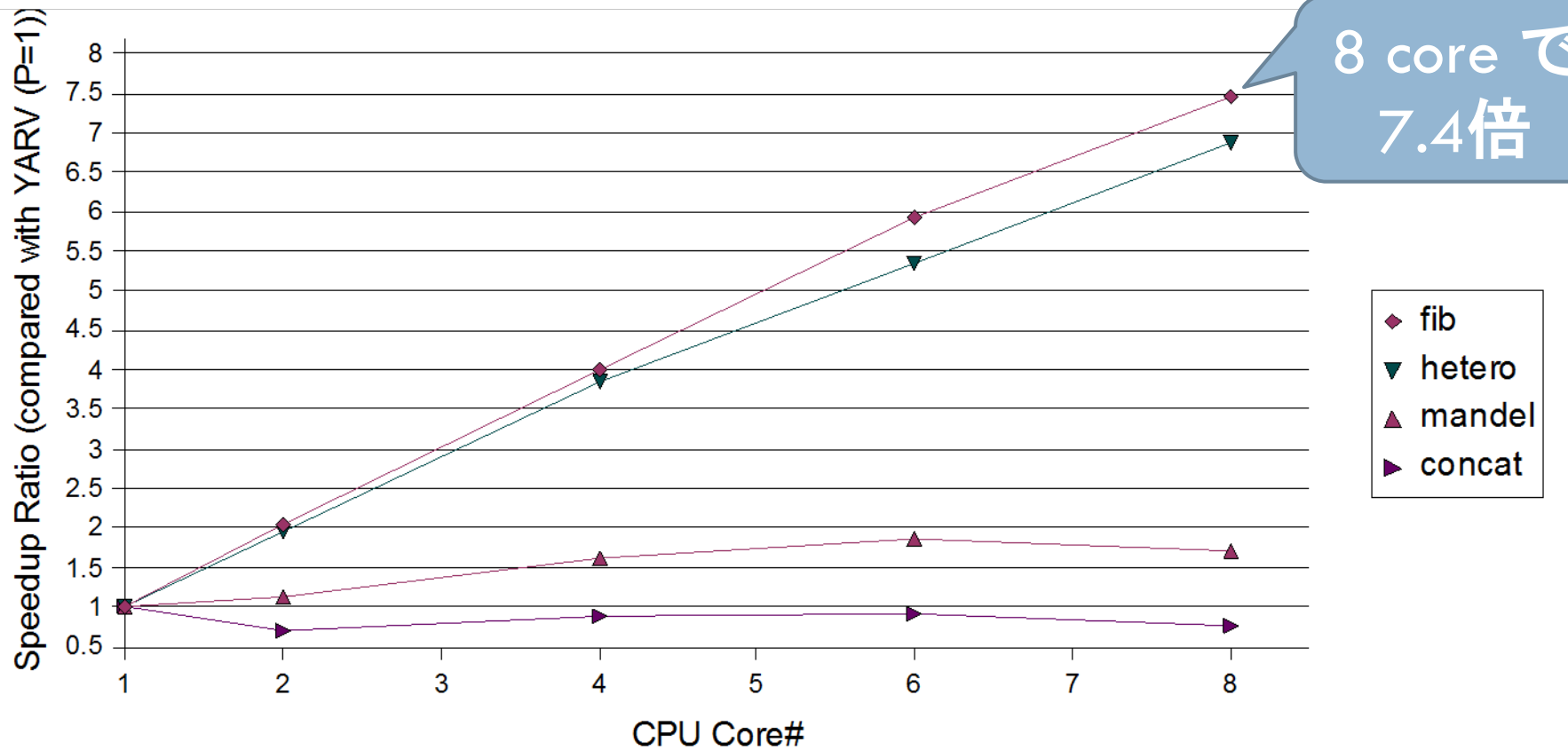
63



- fib: N番目のfib数を再帰で求める。N>30でスレッド生成
- hetero: fib + concat (1 スレッド)
- mandel: Mandelbrot 集合を求めるプログラム(GC多発)
- concat: 複数のスレッドで一つの文字列を追加
(そもそも並列度無し・GL競合)

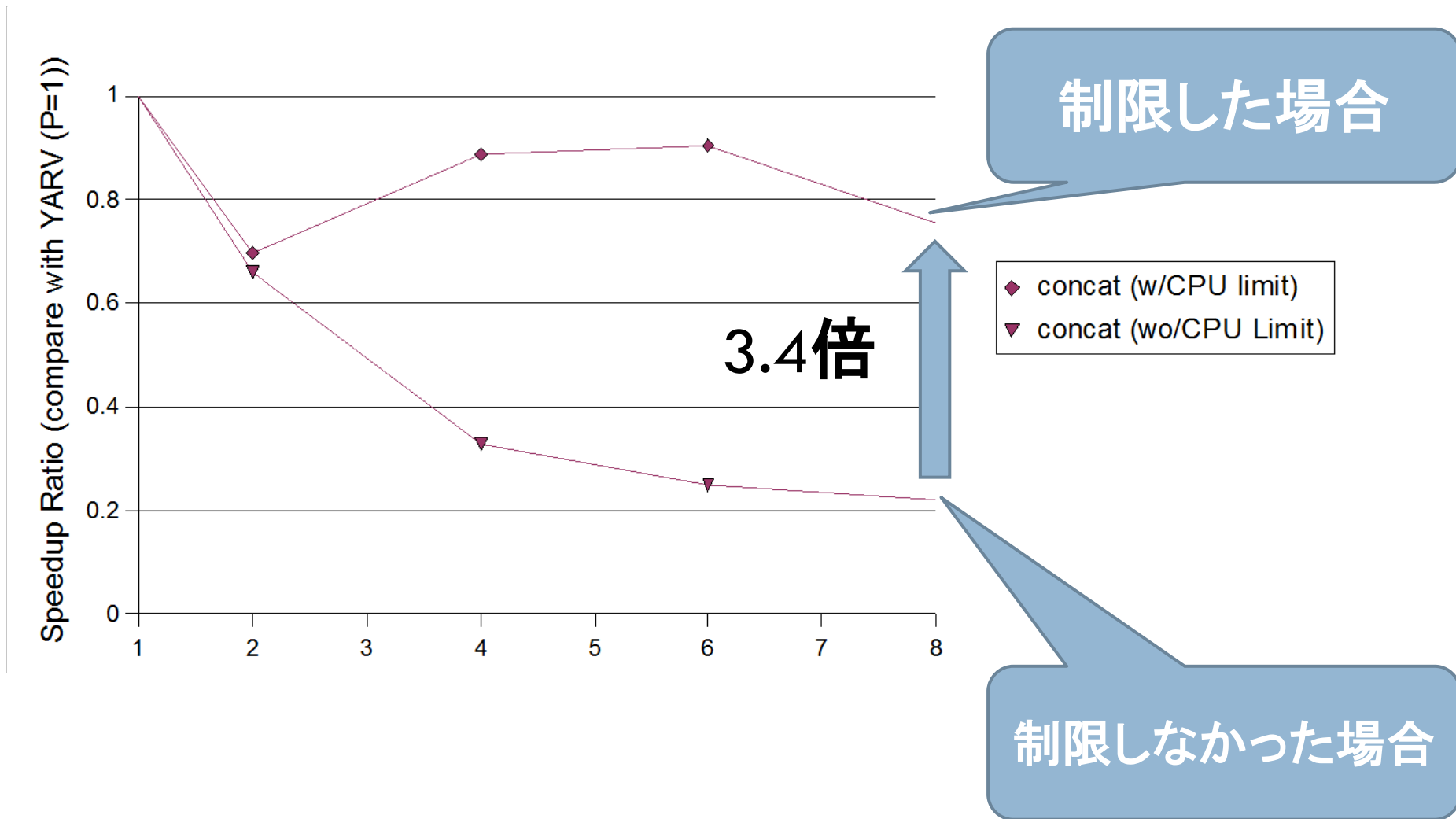
評価：マイクロベンチマーク

64



評価：CPU制限

65



分析

66

- GL, GCを利用しないプログラム, GL競合を起こさないプログラムでの台数効果を確認
- MandelはGC時間で律速
- GL競合によるオーバヘッド
 - ▣ 現在, GLを必要とするネイティブメソッドは多いため, この問題は頻出
 - ▣ 競合回避のためのCPU制限は有効

Agenda

67

- 背景と目的
- 高速なRuby用仮想マシン
- Rubyの並列化
- **まとめ**

成果

68

高速なRuby処理系の実現

仮想マシンYARVの開発

VMの設計

→ 1.5倍～4倍の性能向上

実行時最適化

→ 最大20倍

VM生成系の利用

Rubyの並列実行

Rubyスレッドを並列実行

ネイティブスレッドの利用

排他制御の導入

→ 8 core で最大 7.4 倍

排他制御オーバーヘッド削減

→ 最悪値に比べ3.4倍高速

まとめ

- **高性能なRuby用仮想マシン構成**
 - **VM化による性能向上の確認**
 - スタックマシン型バイトコードへコンパイルし実行するモデル
 - 例外表の利用
 - 1.5～4倍程度の性能向上を確認
 - **動的特性を考慮した最適化手法**
 - 既知の最適化が最大20倍，マイクロベンチマークでとくに有効
 - **VM生成系を利用したVM構成法**
 - 最適化命令を容易に生成
 - 簡単な生成系でも有効

まとめ

70

- Rubyの並列化
 - Rubyスレッドの並列実行
 - 8 core で 7.4 倍の性能向上
 - ネイティブスレッドを適用(1:1)
 - 移植性, 性能, システムの複雑度の妥協点
 - VMへの適切な排他制御の導入とその軽量化
 - VM管理データ, GC, インラインキャッシュ, ...
 - ネイティブメソッド→ジャイアントロックの利用
 - GL競合による性能低下は著しいが, それを回避する手段により, ある程度性能低下を抑制

今後の課題

71

- VMの高速化
 - さらに高速な命令ディスパッチ手法の適用
 - JIT/AOTコンパイラの開発
 - 静的解析の活用
- 並列化
 - ネイティブメソッドのスレッドセーフ化
 - データ構造の検討
 - 並列GCの導入
 - 「スレッド」以外の並列化手法の提供
 - MVM
 - 分散拡張

成果(論文・発表)

72

□ 主著論文

- 笹田耕一, 松本行弘, 前田敦司, 並木美太郎: Ruby用仮想マシンYARVの実装と評価, 情報処理学会論文誌(PRO), Vol.47, No.SIG 2(PRO28), pp.57-73 (2006.2).
- 笹田耕一, 松本行弘, 前田敦司, 並木美太郎: Ruby用仮想マシンYARVにおける並列実行スレッドの実装, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.SIG10(PRO33), pp.1-16 (2007)

□ 主著論文(参考)

- 笹田耕一, 佐藤未来子, 河原章二, 加藤義人, 大和仁典, 中條拓伯, 並木美太郎: マルチスレッドアーキテクチャにおけるスレッドライブラリの実現と評価, 情報処理学会論文誌: ACS, Vol.44, No.SIG11(ACS3), pp. 215--225 (2003).
- 笹田耕一, 佐藤未来子, 内倉要, 小笠原嘉泰, 中條拓伯, 並木美太郎: SMTプロセッサ向けの軽量な同期機構, 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.SIG16(ACS12), pp.14-27 (2005.12)

□ 国際会議

- K.Sasada, M.Sato, S.Kawahara, N.Kato, M.Yamato, H.Nakajo and M.Namiki: Implementation and Evaluation of a Thread Library for Multithreaded Architecture, The 2003 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA'03), Vol.II, pp. 609--615 (2003).
- K.Sasada: YARV: Yet Another RubyVM - Innovating the Ruby Interpreter, Companion to the 20th Annual ACM SIGPLAN Conference on Object-Oriented Programming, Systems, Languages, and Applications, OOPSLA 2005, pp.158--159 (2005).
- RubyConf 2004 ~ 2006: Oral Presentation

研究業績(その他発表)

- 1) 笹田耕一, 佐藤未来子, 河原章二, 加藤義人, 大和仁典, 中條拓伯, 並木美太郎: マルチスレッドアーキテクチャにおけるスレッドライブラリの実現と評価, SACSIS (Symposium on Advanced Computing Systems and Infrastructures) 2003, Vol.2003, No.8, pp. 13--20 (2003).
- 2) 笹田耕一: Rubyプログラムを高速に実行するための処理系の開発, 情報処理学会第46回プログラミングシンポジウム報告集, pp. 1--10 (2005).
- 3) 笹田耕一, 佐藤未来子, 内倉要, 加藤義人, 大和仁典, 中條拓伯, 並木美太郎: SMTプロセッサにおける細粒度最適化手法の検討, 情報処理学会研究報告(SWoPP青森2004), Vol.2004-ARC-159, pp. 37--42 (2004).
- 4) 笹田耕一, 佐藤未来子, 内倉要, 加藤義人, 大和仁典, 中條拓伯, 並木美太郎: SMTプロセッサにおける同期方式の検討, 情報処理学会第154回計算機アーキテクチャ・第101回ハイパフォーマンスコンピューティング合同研究会(HOKKE-2005), Vol.2005-ARC-162, pp. 31--36 (2005).
- 5) 笹田耕一, まつもとゆきひろ, 前田敦司, 並木美太郎: Ruby用仮想マシンYARVの実装と評価, 情報処理学会PRO研究会 SWOPP2005 (2005).
- 6) 笹田耕一, まつもとゆきひろ, 前田敦司, 並木美太郎: Ruby用仮想マシンYARVにおける並列実行スレッドの実装, 第61回 情報処理学会PRO研究会 豊橋商工会議所 (2006.10).
- 7) 笹田耕一, 並木美太郎: Ruby による JavaVM の実装, 情報処理学会第65回全国大会予稿集 (2003).
- 8) 笹田耕一: プログラム言語 Ruby におけるメソッドキャッシング手法の検討, 情報処理学会第67回全国大会, Vol.1, pp. 305--306 (2005).

研究業績(その他)

74

□ 解説論文

- 1) ささだこういち: Ravaで見るJava仮想マシンのしくみ, Java Press, Vol.31, pp. 158--165 (2003).
- 2) ささだこういち: 日本発LL—Rubyプログラミングステップアップ, Software Design (2006).
- 3) ささだこういち: Parrotいんたーなる, まるごとPerl, Vol.1 (2006)

□ その他

- 1) ささだこういち: YARVについてLightning Talk, Lightweight Language Weekend (2004.8)
- 2) ささだこういち: 日本Rubyの会自主企画「RubyConf2004に参加して」, 関西オープンソース2004, 大阪産業創造館 (2004.10)
- 3) ささだこういち: 日本Rubyの会自主企画「Ruby Hot Topics ~YARV and Rails~」YARVについて, Open Source Conference 2005 (2005.3)
- 4) ささだこういち: Ruby Language Update, Lightweight Language Day and Night (2005.8)
- 5) ささだこういち: YARVについて(招待講演), Ruby勉強会@関西 (2005.11)
- 6) 笹田耕一: 「Rubyを実装するということ」ESPer2006 未踏集会 (2006.5)
- 7) 笹田耕一: YARVヒッチハイクガイド, 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 コンピュータサイエンス専攻 コロキウム (2006.9)
- 8) 笹田耕一: Ruby 1.9実装の現状と今後 日本Ruby会議 2007 (2007.6)
- 9) まつもとゆきひろ, 笹田耕一: Ruby Language Update Lightweight Language Spirits

研究業績(授賞等)

75

- 2003年 5月 SACSIS 2003 優秀学生論文賞受賞 「マルチスレッドアーキテクチャにおけるスレッドライブラリの実装と評価」 笹田 耕一, 佐藤 未来子, 河原 章二, 加藤 義人, 大和 仁典, 中條 拓伯, 並木 美太郎
- 2004年 3月 東京農工大学 阿刀田基金 受給
- 2005年 5月 IPA 2004年度未踏ソフトウェア創造事業(未踏ユース) スーパークリエイター認定
- 2005年 5月 SACSIS 2005 優秀若手研究賞(共著) 「SMTプロセッサにおけるスレッドスケジューラの開発」 内倉要, 佐藤未来子, 笹田耕一, 加藤義人, 大和仁典, 中條拓伯, 並木美太郎
- 2005年5月SACSIS2005 最優秀独創的研究アイデア賞(共著) 「SMTプロセッサのFPGAへの実装と評価」 加藤義人, 大和仁典, 小笠原嘉泰, 佐藤未来子, 笹田耕一, 内倉要, 中條拓伯, 並木美太郎
- 2007年10月IPA OSS貢献者賞受賞

成果(開発したソフトウェア)

76

- Ruby 1.9.1 (2007年 12月リリース予定...?)
 - 本研究の成果が取り込まれる予定
 - いくつかの最適化は制限
 - 命令融合, スタックキャッシング
 - 一般的に有利かどうかはまだわからないため
 - 並列化はなし(YARV (NoPara))
- IPA未踏ソフトウェア創造事業の支援
 - 2004年6月～2005年2月 IPA未踏ユース採択(PM: 筑早稲田大学教授)
 - 2005年6月～2006年2月 IPA未踏採択(PM: 千葉東工大助教授)
 - 2006年11月～2007年8月 IPA未踏採択(PM: 千葉東工大助教授)

今後の展望

- Rubyの発展
 - ▣ 本研究によってRubyの利用可能範囲の拡大
- Rubyのような動的言語のさらなる需要大
 - ▣ 速度性能よりも開発速度重視の時代
 - ▣ 本研究で示したVMの実装・最適化技術が利用可能
- 並列計算機で簡単に性能を出すスクリプト言語
 - ▣ 簡単な記述で大きな計算パワーを利用
 - ▣ 本研究ではその1手段を提示

Rubyが遅いことに関して...続き

78

*I understand that there are plans for Ruby to address performance with some kind of **bytecode compiler** and that will be nice. When these things happen and when Ruby starts getting competitive benchmarks it will be a lot more **appropriate for a lot more types of applications.***

Ruby Performance Revisited

<http://joelonsoftware.com/items/2006/09/12.html>

Joel Spolsky

以上

79

ご静聴ありがとうございました。

東京大学大学院情報理工学系研究科 特任助教

笹田 耕一

ko1@atdot.net

研究業績(論文)

- 1) 笹田耕一, 佐藤未来子, 河原章二, 加藤義人, 大和仁典, 中條拓伯, 並木美太郎: マルチスレッドアーキテクチャにおけるスレッドライブラリの実現と評価, 情報処理学会論文誌: ACS, Vol.44, No.SIG11(ACS3), pp. 215--225 (2003).
- 2) 笹田耕一, 佐藤未来子, 内倉要, 小笠原嘉泰, 中條拓伯, 並木美太郎: SMTプロセッサ向けの軽量な同期機構, 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.SIG16(ACS12), pp.14-27 (2005.12)
- 3) 笹田耕一, 松本行弘, 前田敦司, 並木美太郎: Ruby用仮想マシンYARVの実装と評価, 情報処理学会論文誌(PRO), Vol.47, No.SIG 2(PRO28), pp.57-73 (2006.2).
- 4) 笹田耕一, 松本行弘, 前田敦司, 並木美太郎: Ruby用仮想マシンYARVにおける並列実行スレッドの実装, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.SIG10(PRO33), pp.1-16 (2007)

研究業績(国際会議)

- 1)K.Sasada, M.Sato, S.Kawahara, N.Kato, M.Yamato, H.Nakajo and M.Namiki: Implementation and Evaluation of a Thread Library for Multithreaded Architecture, The 2003 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA'03), Vol.II, pp. 609--615 (2003).
- 2)K.Sasada: YARV: Yet Another RubyVM - Innovating the Ruby Interpreter, Companion to the 20th Annual ACM SIGPLAN Conference on Object-Oriented Programming, Systems, Languages, and Applications, OOPSLA 2005, pp.158--159 (2005).
- 3) RubyConf 2004 ~ 2006: Oral Presentation

研究業績(その他発表)

- 1) 笹田耕一, 佐藤未来子, 河原章二, 加藤義人, 大和仁典, 中條拓伯, 並木美太郎: マルチスレッドアーキテクチャにおけるスレッドライブラリの実現と評価, SACSIS (Symposium on Advanced Computing Systems and Infrastructures) 2003, Vol.2003, No.8, pp. 13--20 (2003).
- 2) 笹田耕一: Rubyプログラムを高速に実行するための処理系の開発, 情報処理学会第46回プログラミングシンポジウム報告集, pp. 1--10 (2005).
- 3) 笹田耕一, 佐藤未来子, 内倉要, 加藤義人, 大和仁典, 中條拓伯, 並木美太郎: SMTプロセッサにおける細粒度最適化手法の検討, 情報処理学会研究報告(SWoPP青森2004), Vol.2004-ARC-159, pp. 37--42 (2004).
- 4) 笹田耕一, 佐藤未来子, 内倉要, 加藤義人, 大和仁典, 中條拓伯, 並木美太郎: SMTプロセッサにおける同期方式の検討, 情報処理学会第154回計算機アーキテクチャ・第101回ハイパフォーマンスコンピューティング合同研究会(HOKKE-2005), Vol.2005-ARC-162, pp. 31--36 (2005).
- 5) 笹田耕一, まつもとゆきひろ, 前田敦司, 並木美太郎: Ruby用仮想マシンYARVの実装と評価, 情報処理学会PRO研究会 SWOPP2005 (2005).
- 6) 笹田耕一, まつもとゆきひろ, 前田敦司, 並木美太郎: Ruby用仮想マシンYARVにおける並列実行スレッドの実装, 第61回 情報処理学会PRO研究会 豊橋商工会議所 (2006.10).
- 7) 笹田耕一, 並木美太郎: Ruby による JavaVM の実装, 情報処理学会第65回全国大会予稿集 (2003).
- 8) 笹田耕一: プログラム言語 Ruby におけるメソッドキャッシング手法の検討, 情報処理学会第67回全国大会, Vol.1, pp. 305--306 (2005).

研究業績(その他)

84

□ 解説論文

- 1) ささだこういち: Ravaで見るJava仮想マシンのしくみ, Java Press, Vol.31, pp. 158--165 (2003).
- 2) ささだこういち: 日本発LL—Rubyプログラミングステップアップ, Software Design (2006).
- 3) ささだこういち: Parrotいんたーなる, まるごとPerl, Vol.1 (2006)

□ その他

- 1) ささだこういち: YARVについてLightning Talk, Lightweight Language Weekend (2004.8)
- 2) ささだこういち: 日本Rubyの会自主企画「RubyConf2004に参加して」, 関西オープンソース2004, 大阪産業創造館 (2004.10)
- 3) ささだこういち: 日本Rubyの会自主企画「Ruby Hot Topics ~YARV and Rails~」YARVについて, Open Source Conference 2005 (2005.3)
- 4) ささだこういち: Ruby Language Update, Lightweight Language Day and Night (2005.8)
- 5) ささだこういち: YARVについて(招待講演), Ruby勉強会@関西 (2005.11)
- 6) 笹田耕一: 「Rubyを実装するということ」ESPer2006 未踏集会 (2006.5)
- 7) 笹田耕一: YARVヒッチハイクガイド, 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 コンピュータサイエンス専攻 コロキウム (2006.9)
- 8) 笹田耕一: Ruby 1.9実装の現状と今後 日本Ruby会議 2007 (2007.6)
- 9) まつもとゆきひろ, 笹田耕一: Ruby Language Update Lightweight Language Spirits

研究業績(IPA未踏)

85

- IPA未踏ソフトウェア創造事業
 - ・2004年6月～2005年2月 IPA未踏ユース採択(PM: 筧早稲田大学教授)
 - 「Rubyプログラムを高速に実行するための処理系の開発」
 - スーパークリエイータ認定
 - ・2005年6月～2006年2月 IPA未踏ソフトウェア創造事業採択(PM: 千葉東工大助教授)
 - 「オブジェクト指向スクリプト言語Rubyの処理系の刷新」
 - ・2006年11月～2007年8月 IPA未踏ソフトウェア創造事業採択(PM: 千葉東工大助教授)
 - 「Ruby用仮想マシンYARVの完成度向上」

研究業績(授賞等)

- 2003年 5月 SACSIS 2003 優秀学生論文賞受賞 「マルチスレッドアーキテクチャにおけるスレッドライブラリの実装と評価」 笹田 耕一, 佐藤 未来子, 河原 章二, 加藤 義人, 大和 仁典, 中條 拓伯, 並木 美太郎
- 2004年 3月 東京農工大学 阿刀田基金 受給
- 2005年 5月 IPA 2004年度未踏ソフトウェア創造事業(未踏ユース) スーパークリエイータ認定
- 2005年 5月 SACSIS 2005 優秀若手研究賞(共著) 「SMTプロセッサにおけるスレッドスケジューラの開発」 内倉要, 佐藤未来子, 笹田 耕一, 加藤義人, 大和仁典, 中條拓伯, 並木美太郎
- 2005年5月SACSIS2005 最優秀独創的研究アイデア賞(共著) 「SMTプロセッサのFPGAへの実装と評価」 加藤義人, 大和仁典, 小笠原嘉泰, 佐藤未来子, 笹田耕一, 内倉要, 中條拓伯, 並木美太郎
- 2007年10月IPA OSS貢献者賞受賞

研究業績(その他の活動)

- 2003年4月～2006年3月 東京農工大学工学部 ティーチングアシスタント
- 2003年4月～2006年3月 東京農工大学工学部 プログラミング相談員
- 2004年7月～2005年3月 東京農工大学大学院 リサーチ・アシスタント
- 2004年8月 2日～7日 文部科学省ITスクール チューター
- 2004年8月～ 日本Rubyの会 理事(会計)
- 2005年1月～2007年1月 情報処理学会 情報科学若手の会 幹事
- 2005年11月～ 日本Rubyカンファレンス2006 実行委員
- 2006年9月～ 日本Ruby会議2007 実行委員
- 2007年1月～ 情報処理学会夏のプログラミングシンポジウム 幹事
- 2007年4月～ 情報処理学会SIGOS 運営委員
- 2007年6月～ ソフトウェア科学会 PPL2008 プログラム委員

予備資料

設計: YARV命令セット

89

- 現時点では 52 命令
 - できるだけシンプルに
 - VM生成系によって自動的に複雑・高速な命令に
- プリミティブ型がないため、数値演算命令無し

`a = recv.method(b)`

```
getlocal 2 # push recv
getlocal 3 # push b
send :method, 1
setlocal 1 #
```

設計: 例外処理

90

- Rubyレベルでは表引きで処理
 - 例外処理部分突入時にはコスト無し
 - Ruby スタックの巻き戻しを行い探索
- setjmp/longjmp による例外処理機構と併用
 - VM関数のネストを自然に表現可能
 - マシンスタックの巻き戻しを実現

設計: 例外処理

YARV実行のC関数コールグラフ

VM handler 関数(setjmp)

VM関数

C関数

VM handler 関数(setjmp)

VM 関数

C関数

表を引いて例外ハンドラ探索

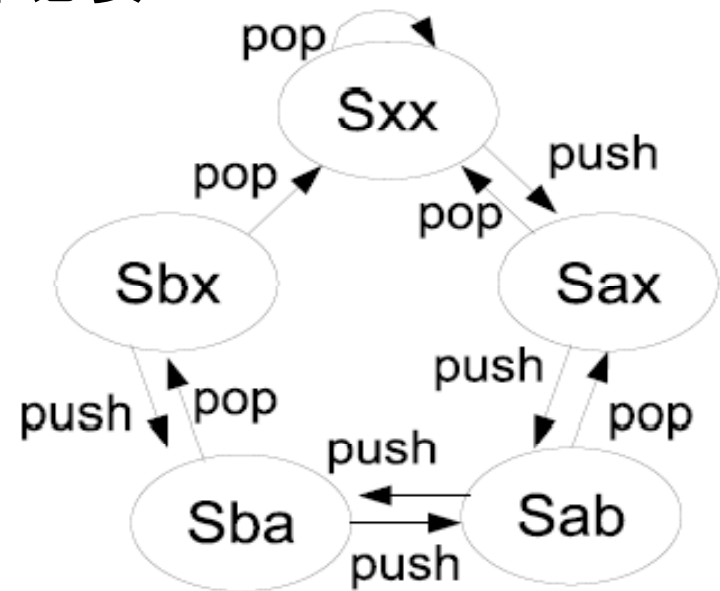
見つからなければ longjmp

例外を発生するには longjmp

最適化: 静的スタックキャッシング

92

- 5状態、2レジスタの静的スタックキャッシング(SC)
 - スタックトップの2値をレジスタに格納
 - 5状態なので、同じ命令につき5命令必要
 - putobject (スタックにひとつ積む)
 - putobject_xx_ax
 - putobject_ax_ab
 - putobject_bx_ba
 - putobject_ab_ba
 - putobject_ba_ab



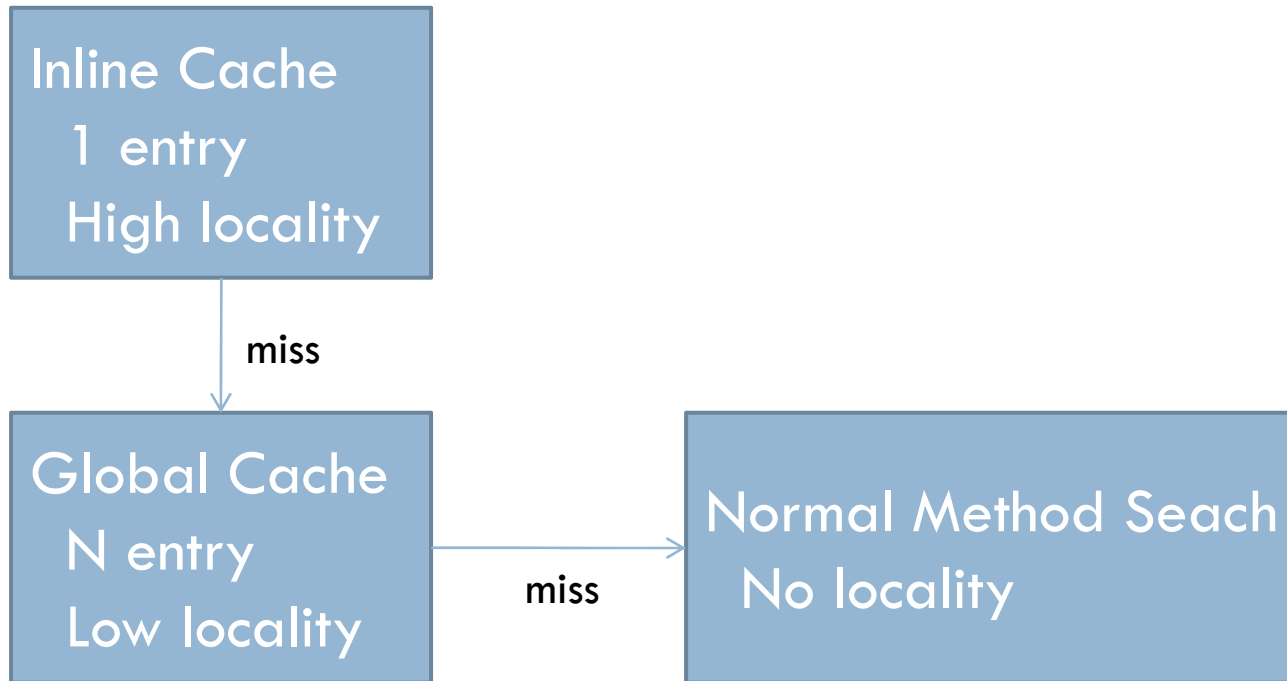
最適化: インラインキャッシュ

93

- **インラインメソッドキャッシュ**
 - ▣ メソッド検索結果を命令列にキャッシュ
- **インラインキャッシュ**
 - ▣ 検索結果のRuby定数値を命令列にキャッシュ
- **キャッシュ時にVM状態カウンタも同時に格納**
 - ▣ 現在の値と比較し、キャッシュの状態を確認
 - ▣ 定義・再定義が発生したときインクリメント

YARVのメソッド探索

94



VM生成系：命令記述と生成例

95

□ 値の宣言と、ロジックの記述(C言語)

- (1)命令オペランド(2)スタックオペランド
- (3)スタックへプッシュ

```
DEFINE_INSN
mult_plusConst
(int c) // 命令オペランド定義
(int x, int y) // スタックオペランド定義
(int ans) // 命令の返り値定義
{
// C言語による命令ロジック記述部分
ans = x * y + c;
}
```

スタックオペランド
フェッチ

命令オペランド
フェッチ

```
mult_plusConst: {
int c = *(PC+1);
int y = *(SP-1);
int x = *(SP-2);
int ans;
PC += 2;
SP -= 2;
{
ans = x * y + c;
}
*(SP) = ans; SP += 1;
goto **PC;}
```

PC/SP
設定

結果を
push

VM生成系： オペランド融合命令の生成

96

- 融合命令オペランドを #define で定義
- ロジック部分は変更無し

mult_plusConst 5

```
mult_plusConst
{
  #define c 5
  VALUE y = *(SP-1);
  VALUE x = *(SP-2);
  VALUE ans;
  PC += 1;
  SP -= 2;
  {
    ans = x * y + c;
  }
  #undef c
  *(SP) = ans; SP += 1;
  goto **PC;
}
```

オペランド
定義

VM生成系: 命令融合した命令の生成

97

dup + mult_plusConst

UNIFIED_dup_mult_plusConst:

```
{  
  int c_1 = *(PC+1);  
  int v_0 = *(SC-1);  
  int ans;  
  PC += 3;  
  SP -= 1;  
  { // dup  
    #define v v_0  
    #define v1 v1_0  
    #define v2 v2_0  
    v1 = v2 = v;  
    #undef v  
    #undef v1  
    #undef v2  
  } // cont ->
```

利用する値を
適切に定義

命令を連結

```
// -> cont  
{ // mult_plusConst  
  #define c c_1  
  #define x v1_0  
  #define y v2_0  
  ans = x * y + c;  
  #undef c  
  #undef x  
  #undef y  
}  
*(SP) = ans; SP += 1;  
goto **PC;  
}
```

VM生成系： スタックキャッシング用命令生成

98

- プッシュ・ポップ処理をSC用レジスタアクセスに
- コンパイラは命令列を状態遷移に則り変換

mult_plusConst_ab_ax

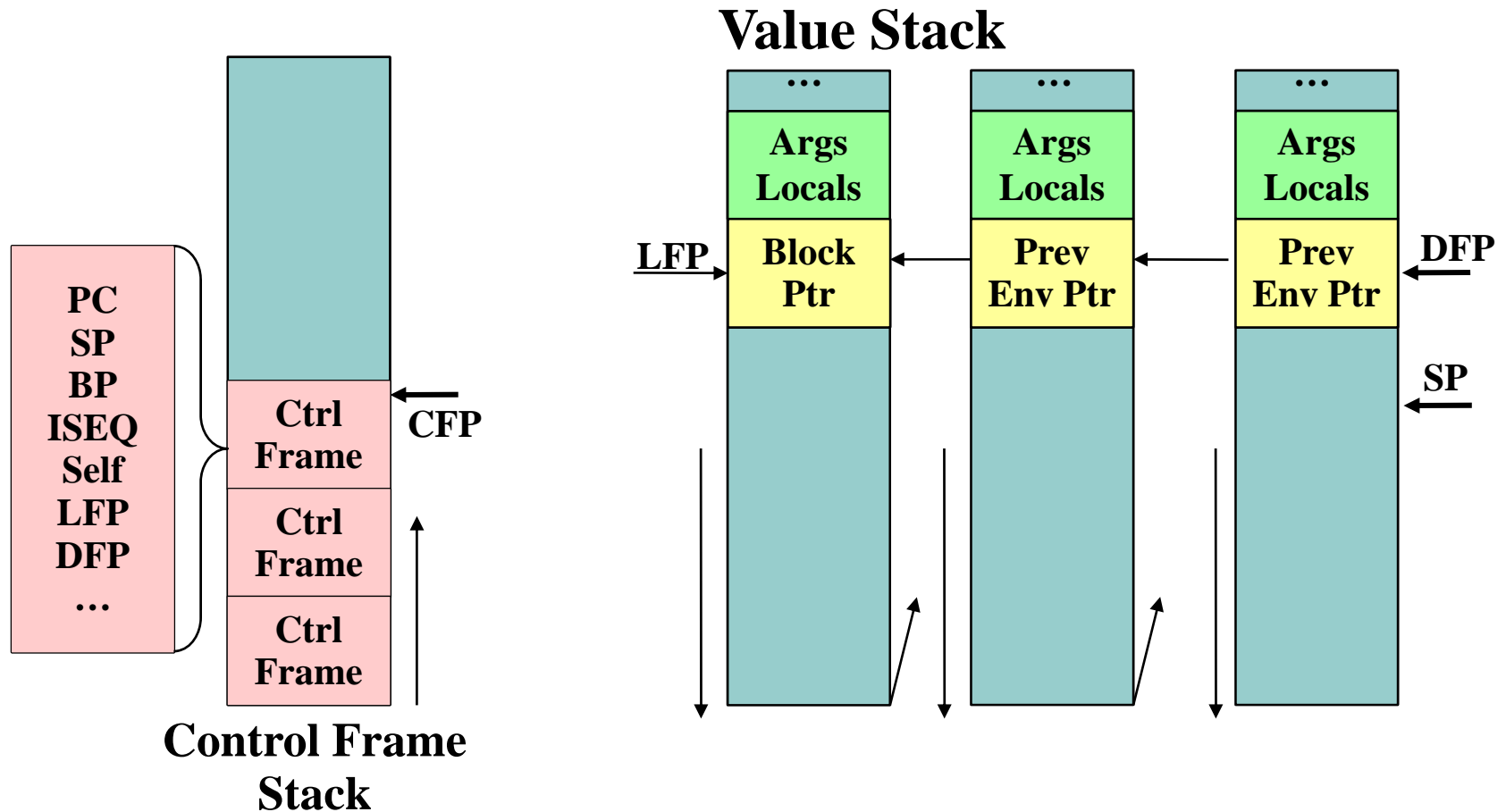
```
mult_plusConst_ab_ax
{
  int c = *(PC+1);
  int y = SC_regB;
  int x = SC_regA;
  int ans;
  PC += 2;
  {
    ans = x * y + c;
  }
  SC_regA = ans;
  goto **PC;
}
```

SCLレジスタ
アクセス(pop)

SCLレジスタ
アクセス(push)

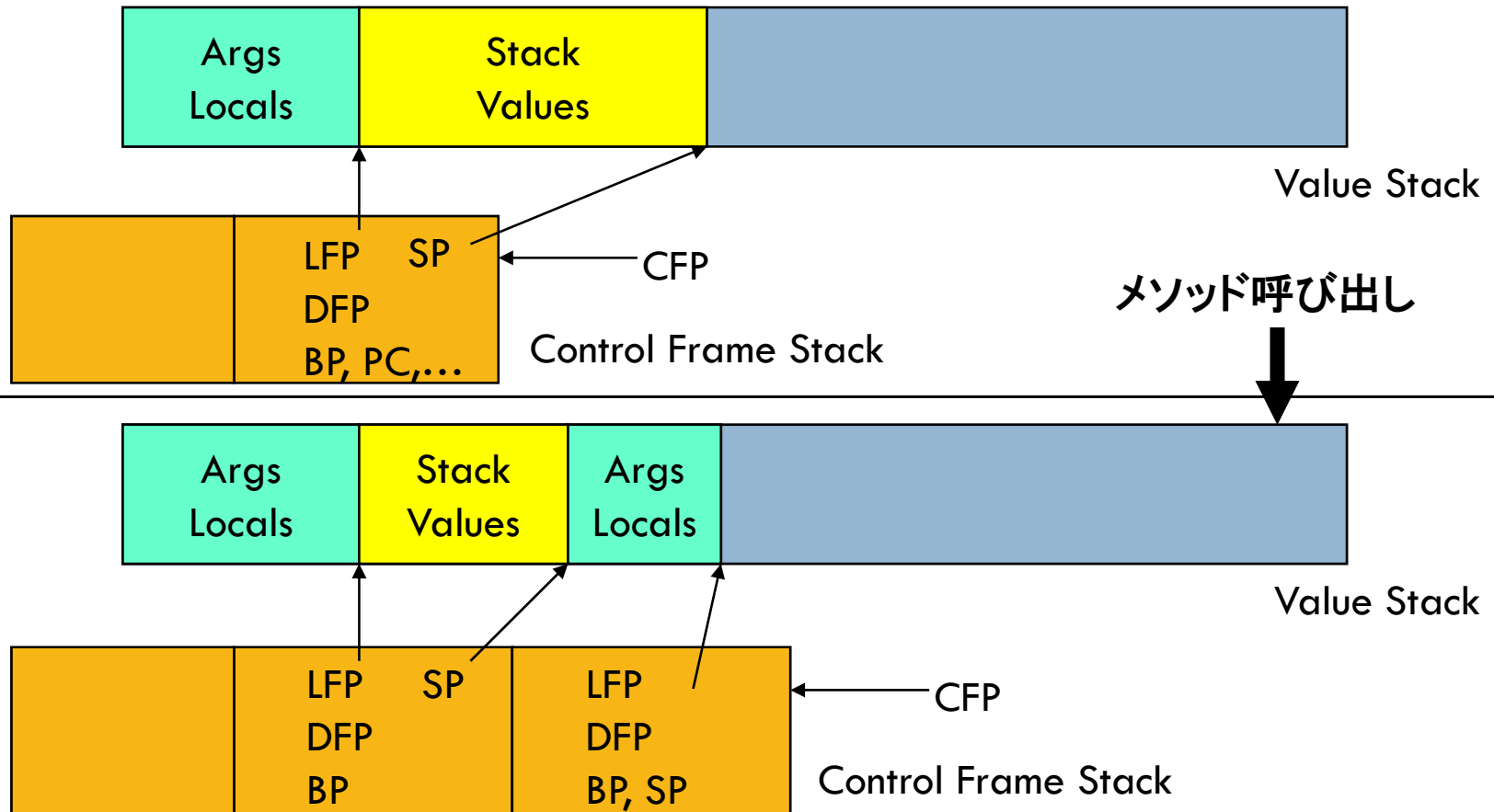
設計: スタックフレーム・環境

99



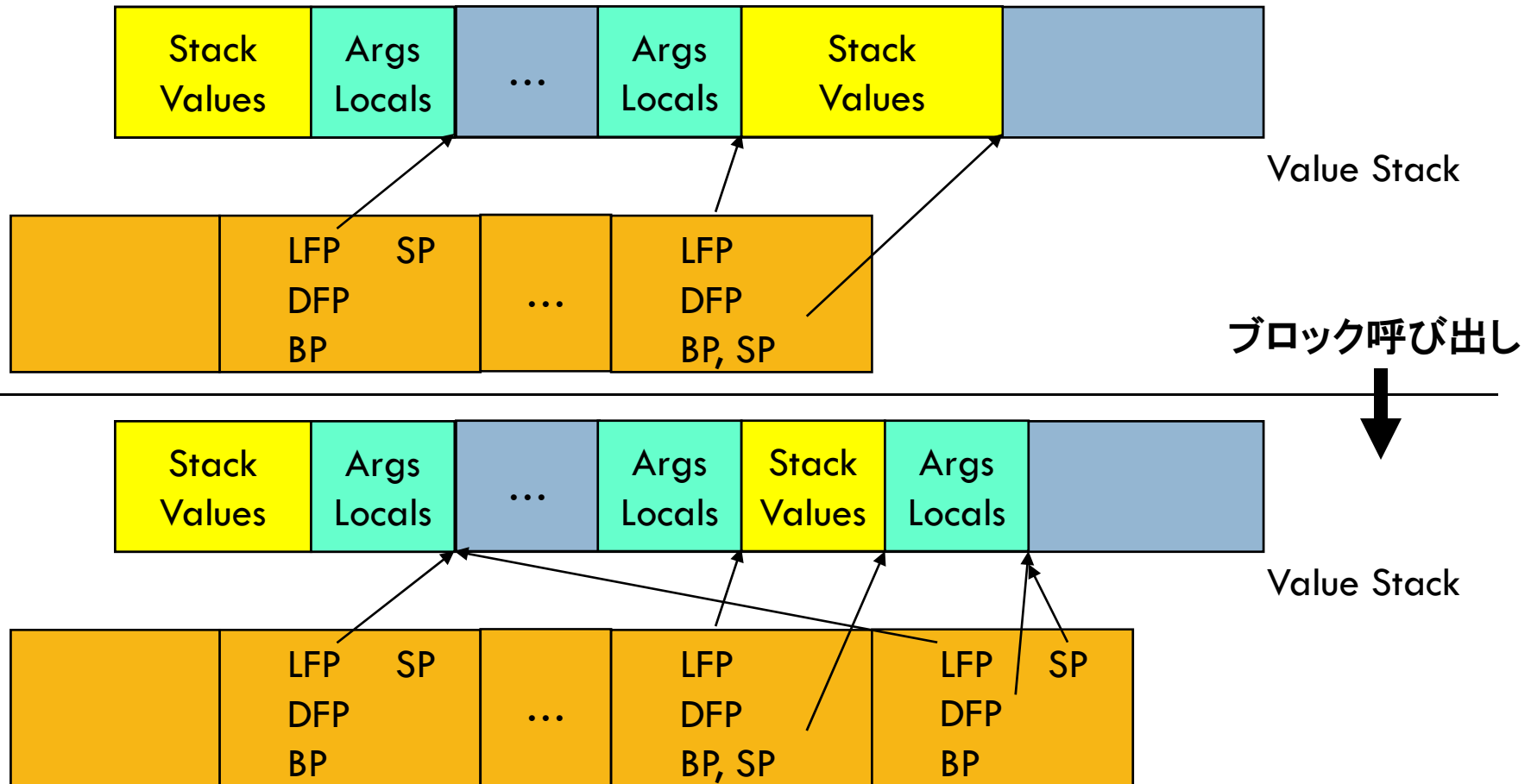
設計:スタックフレーム(メソッド呼び出し)

100



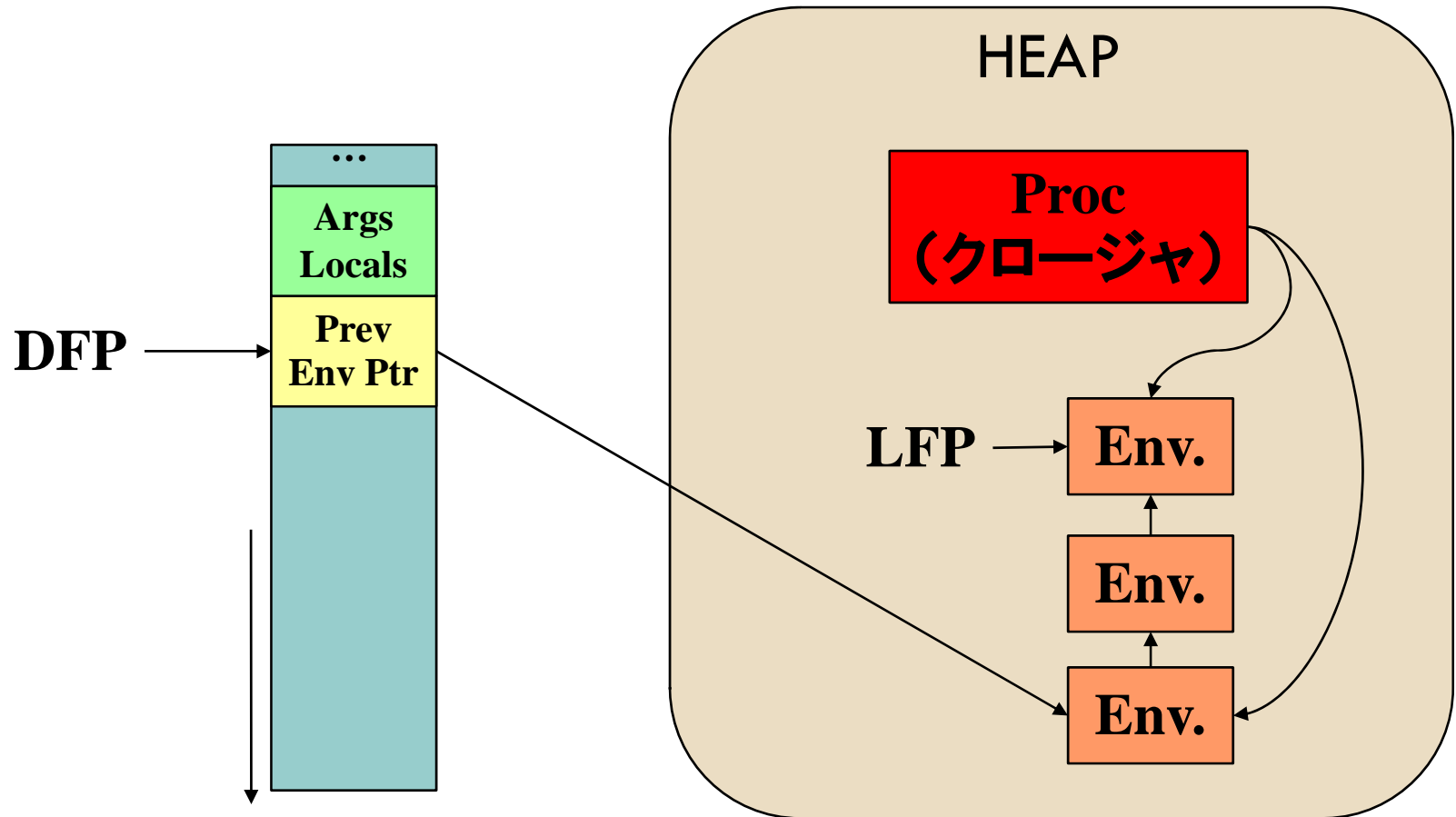
設計:スタックフレーム(ブロック呼び出し)

101



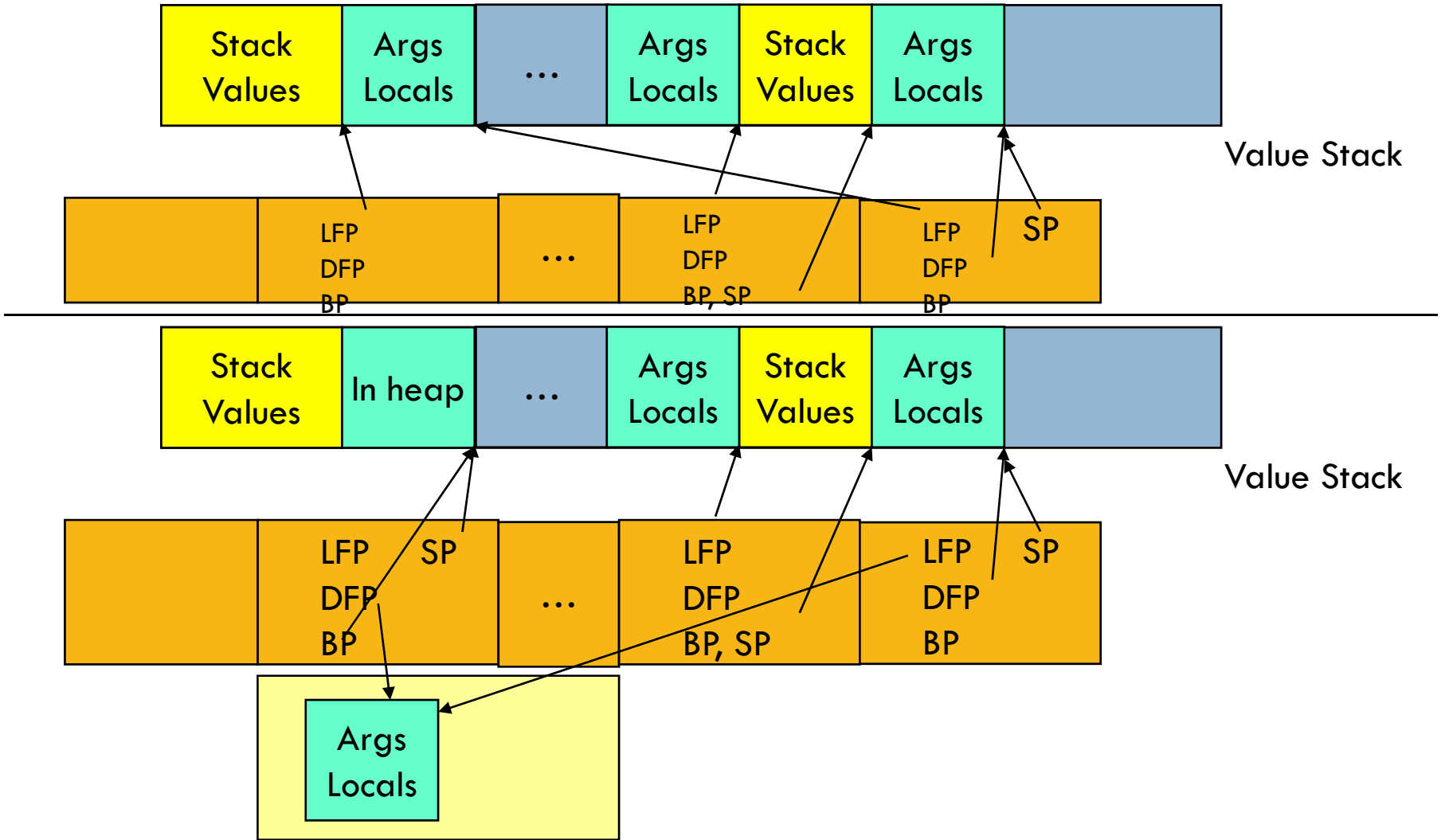
設計: スタックフレーム・環境 (クロージャ)

102



設計: スタックフレーム (with ヒープ)

103



設計: Rubyスレッドのネイティブスレッド対応

Rubyスレッドへの割り込み

104

□ Rubyスレッドは割り込み可能

▣ 他スレッドに例外可能

- Timeout 処理に利用

特に I/O のタイムアウト

▣ シグナルハンドラの実行

```
t = Thread.new{  
  #...  
}  
t.raise(exception)
```

□ ネイティブスレッドには「割り込み」インターフェースは無し

設計: Ruby スレッドのネイティブスレッド対応

Ruby スレッドへの割り込み(cont.)

105

- (1) 割り込みフラグのポーリング
 - VM命令のいくつかの箇所でチェック
- (2) ブロック状態になる際にはブロック解除関数を登録
 - ポーリングしない処理部分(selectシステムコール発行時など)でも割り込みに対応
 - 例: selectシステムコールを中断させるブロック解除 → 当該スレッドにシグナル送信(select は EINTR で中断)

設計: Rubyスレッドのネイティブスレッド対応 管理スレッドの用意

106

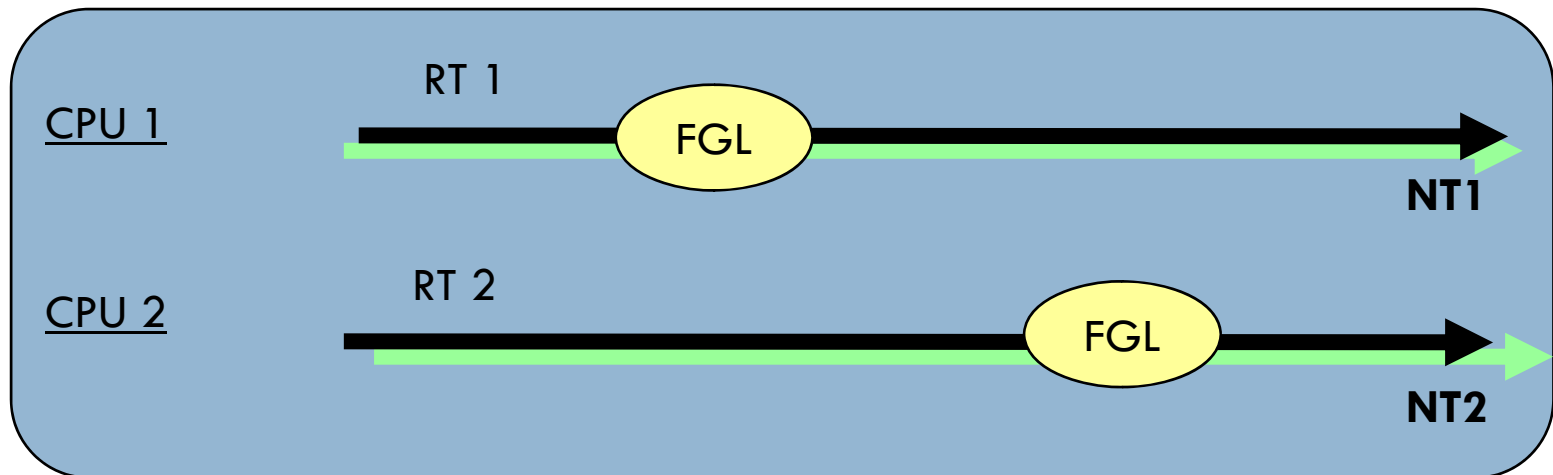
- UNIXでのシグナル受信
 - PthreadではどのNTに配送されるか不明→シグナル受信専用の管理スレッド
 - 他のNTはシグナルマスクで受信不可
 - 受信したらmainスレッドへRubyスレッドへの割り込み機能を利用して割り込み

検討: 並列実行における排他制御

(a) 細粒度ロックのみ

107

- 十分な並列性を発揮(「普通」のアプローチ)
- × 全ての既存のコードに対し、FGLなどによるスレッドセーフ(TS)コードへ変更が必須
→「既存の豊富なRubyライブラリ」が利用不可



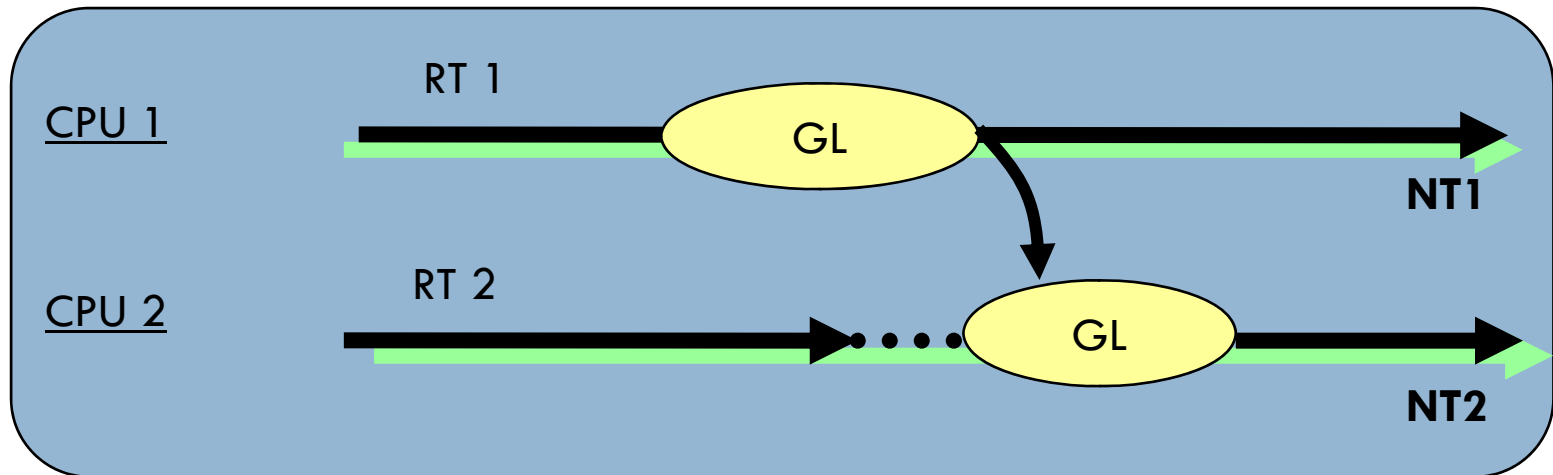
FGL: Fine-Grained Lock

検討: 並列実行における排他制御

(b) 細粒度ロック+ジャイアントロック(GL)

108

- TSでないCメソッドコールはGLで保護
 - ▣ ○ 既存のコードが利用可能(並列実行不可)
 - ▣ ○ とりあえず今までどおりCメソッド記述可能
 - ▣ ○ 必要に応じてFGLによるTSコードへ移行可



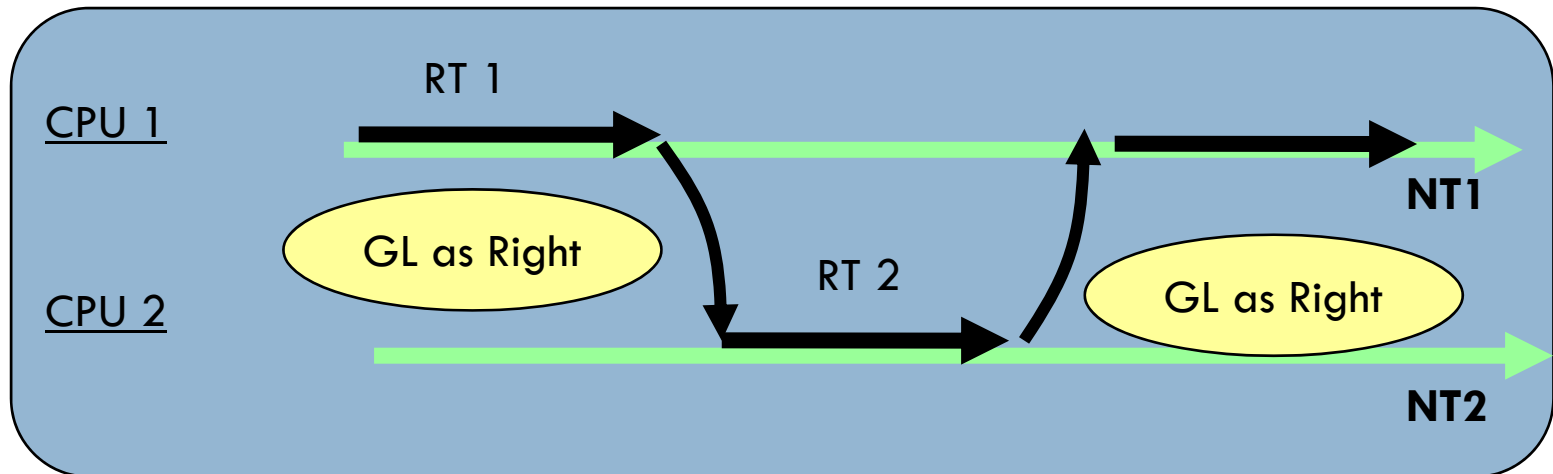
GL: Giant Lock

検討: 並列実行における排他制御

(c) ジャイアントロックを持つRTのみ実行

109

- GLを実行権として扱い、持つRTのみ実行
 - ○ 排他制御不要
 - × 並列実行不可能
 - Pythonなどで利用



検討: 並列実行における排他制御

(d) 排他制御しない(Rubyプログラマ任せ)

110

- ○ 排他制御不要
- × 処理系不正処理(SEGV等)発生
- 低級言語的アプローチ



検討： 排他制御の各方式のまとめ

	スケーラビリティ (台数効果)	逐次処理 の性能	既存コード の再利用	やさしさ	
(a)	◎	○	×	○	性能追求 だけなら
(b)	○	○	○	○	Single Core用
(c)	×	◎	○	○	
(d)	◎	◎	○	×	Hacker 用？

設計: Rubyスレッドの並列実行 スレッド情報へのポインタをTLSに

112

- スレッド情報へのポインタをネイティブスレッドが提供するTLSに格納
 - TLS: Thread Local Storage
 - GCC 拡張
 - Windows VC++ 拡張
 - pthread_getspecific の利用

設計: Rubyスレッドの並列実行 非TSなコードのための適切なGL制御

113

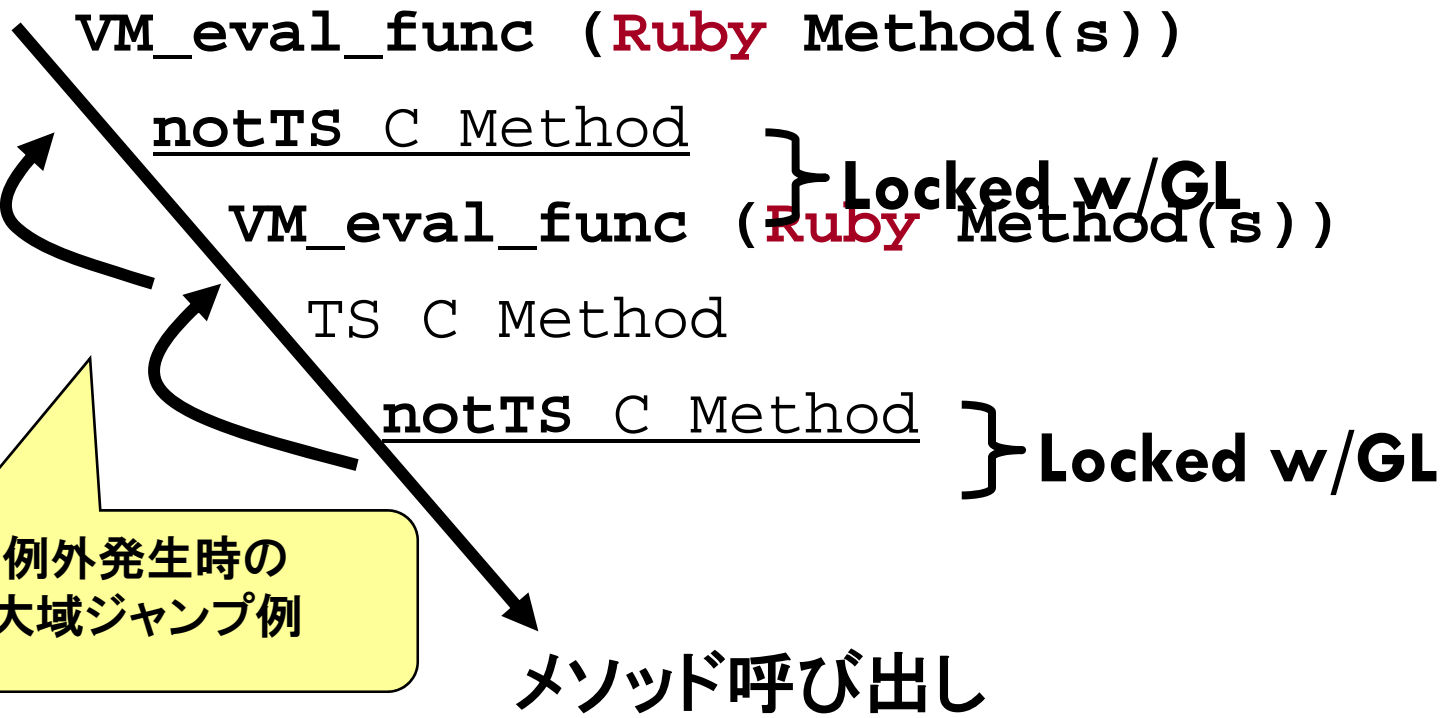
- 非TSなコード == 既存のCメソッド実装
 - メソッド起動時にGL獲得
- TSなコード ==
対処したCメソッド or Ruby メソッド
 - GL獲得なしで起動可能
- CメソッドはRubyメソッド呼び出し(逆も)可能
 - メソッド呼び出し時、GL獲得状態によって処理分岐
- 例外発生時のGL獲得情報に注意

設計: Rubyスレッドの並列実行 非TSなコードのための適切なGL制御

114

Machine level Call Graph:

top



設計: Rubyスレッドの並列実行

ロックコストを下げるための工夫(cont.)

115

- **ロックを不要に**
 - (1) 単一スレッド実行時にはGL無視
 - (2) スレッドローカルヒープの用意
 - オブジェクトアロケーション時、ロック不要
 - (3) ロック不要なメソッドキャッシュ
 - キャッシュヒットすれば余計なコスト不要
 - キャッシュミス時、コスト増

設計: Rubyスレッドの並列実行 ロックコストを下げるための工夫(cont.)

116

- (5) 利用CPUの制限
 - 競合を繰り返すRubyスレッドの実行CPUを制限
 - NPTLのpthread_setaffinity_npを利用
 - Windows では SetThreadAffinityMask
 - 一定時間過ぎたら制限を解除
 - ちょっと後ろ向きの工夫
(v.s. TS なコードを増やす)

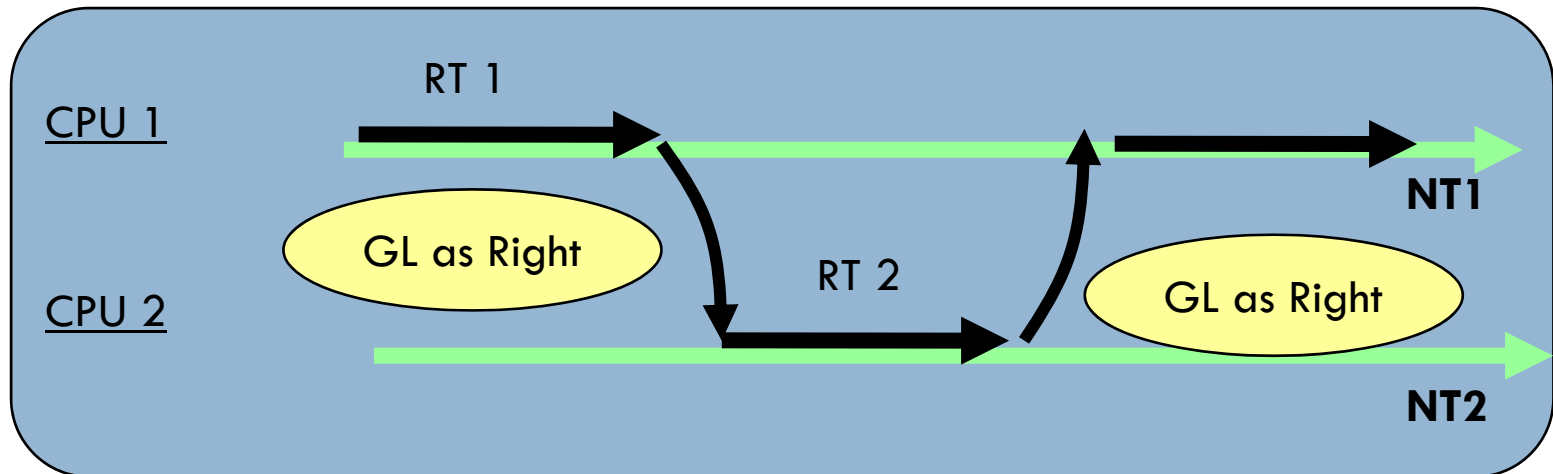
検討: 並列実行における排他制御

(c) ジャイアントロックを持つRTのみ実行

117

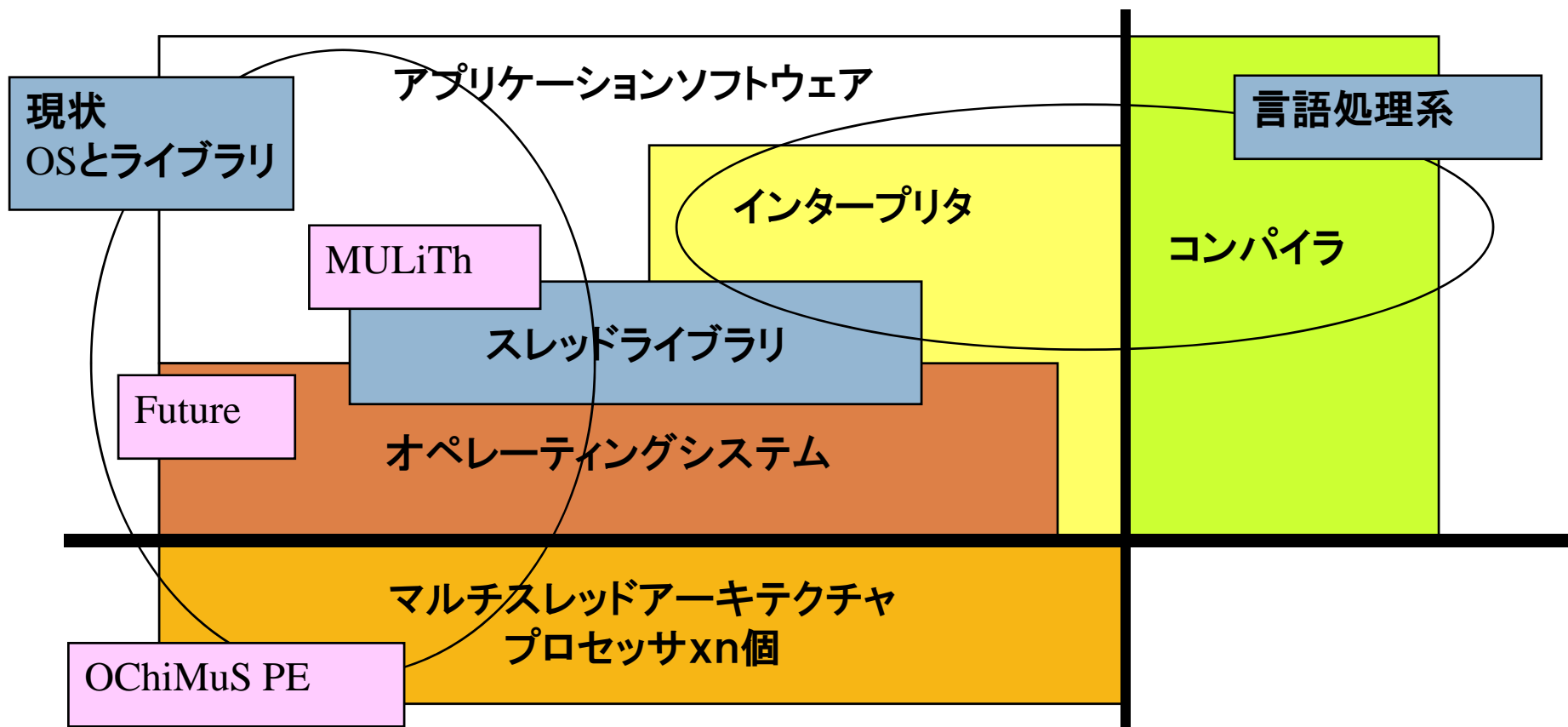
- GLを実行権として扱い、持つRTのみ実行
- ○ 排他制御不要
- × 並列実行不可能

YARV (NoLock)



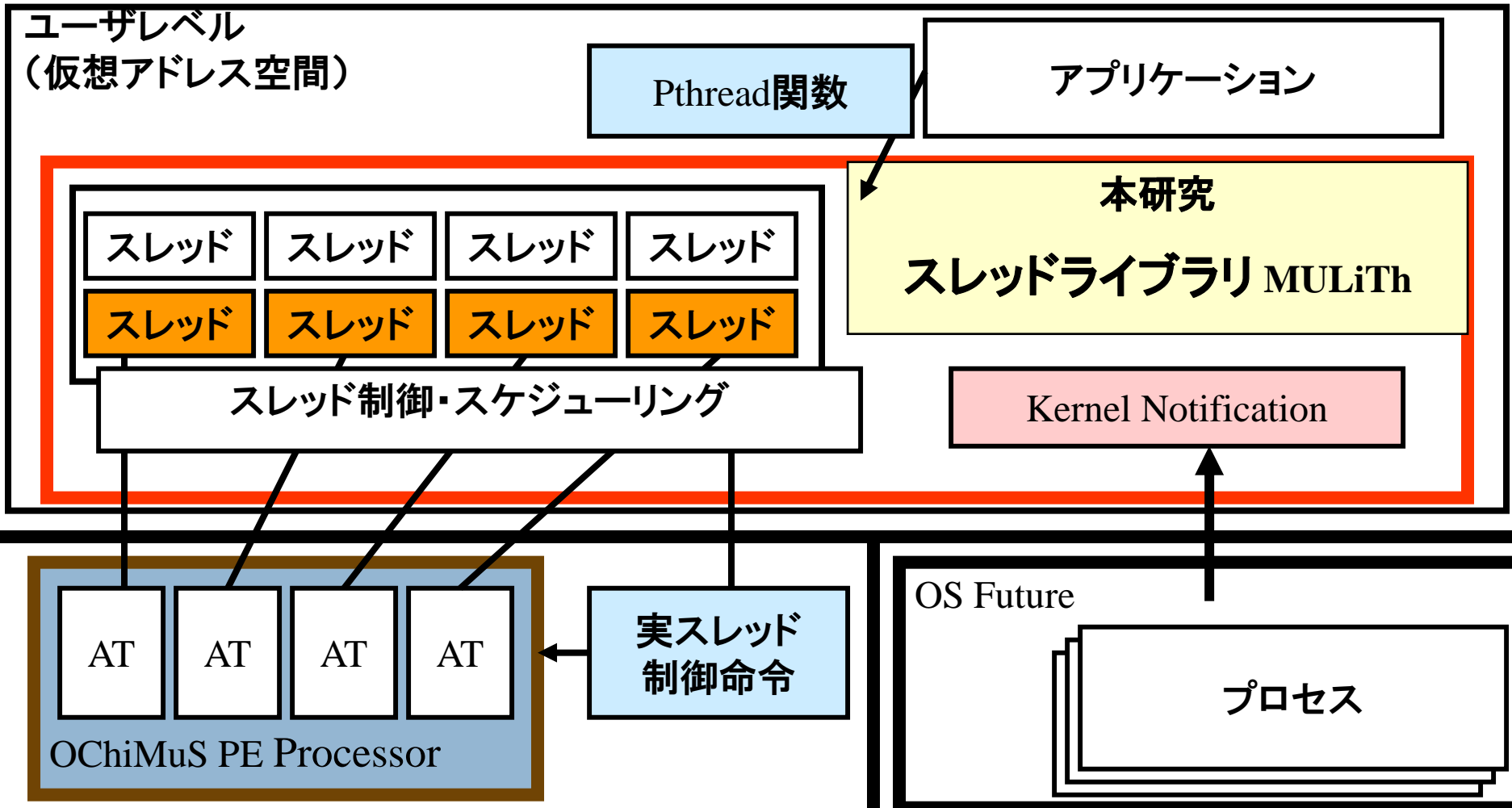
目標とするシステム

118



CPU・OS・ライブラリの全体像

119



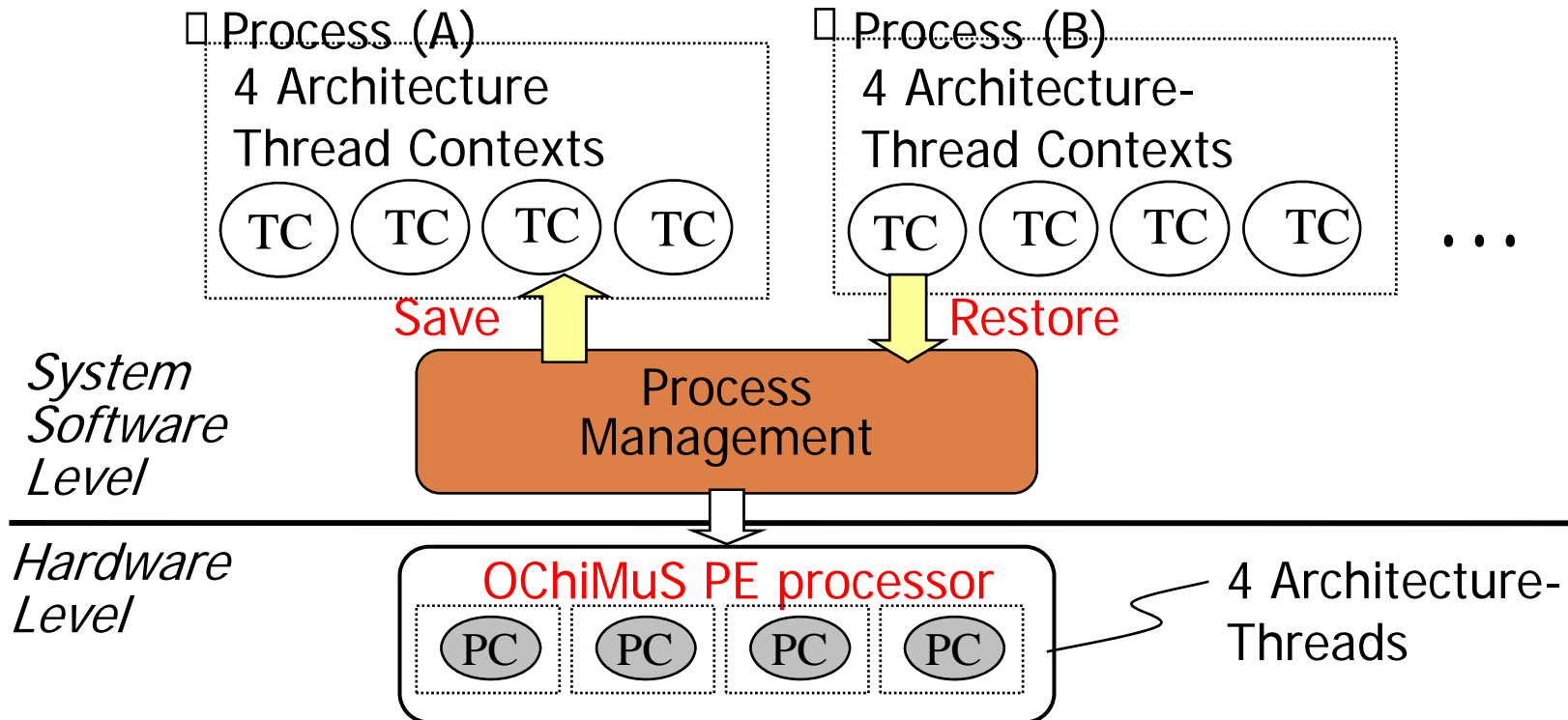
システムソフトウェア

OS Future

120

□ プロセス管理

- 複数ある実スレッドコンテキストの退避・復帰
- 実スレッド管理はスレッドライブラリが担当



MULiThにおけるスレッドの管理

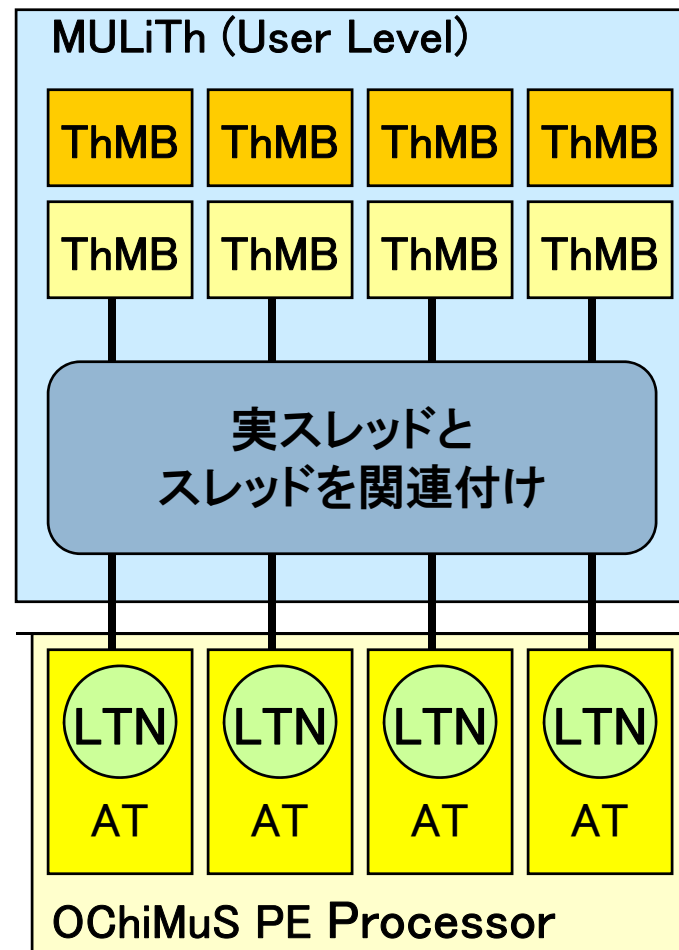
121

- スレッド管理ブロック(ThMB)
 - 各スレッドごとの情報を保持
 - コンテキスト・属性
- スレッド識別子
 - ⇒ ThMBの先頭アドレス



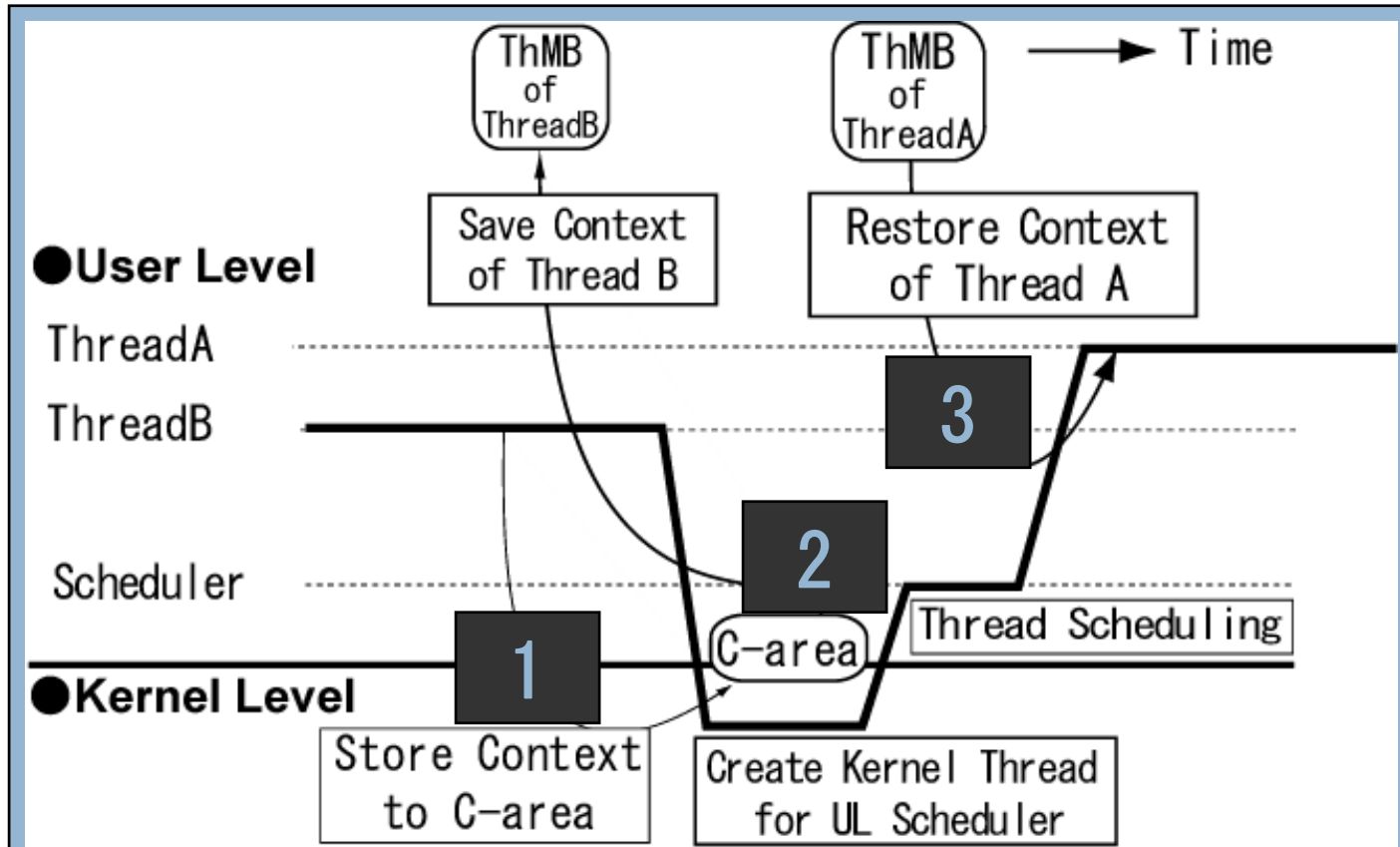
LTNとして使用

- 実行中スレッドは
プロセッサが把握



従来型事象通知

122

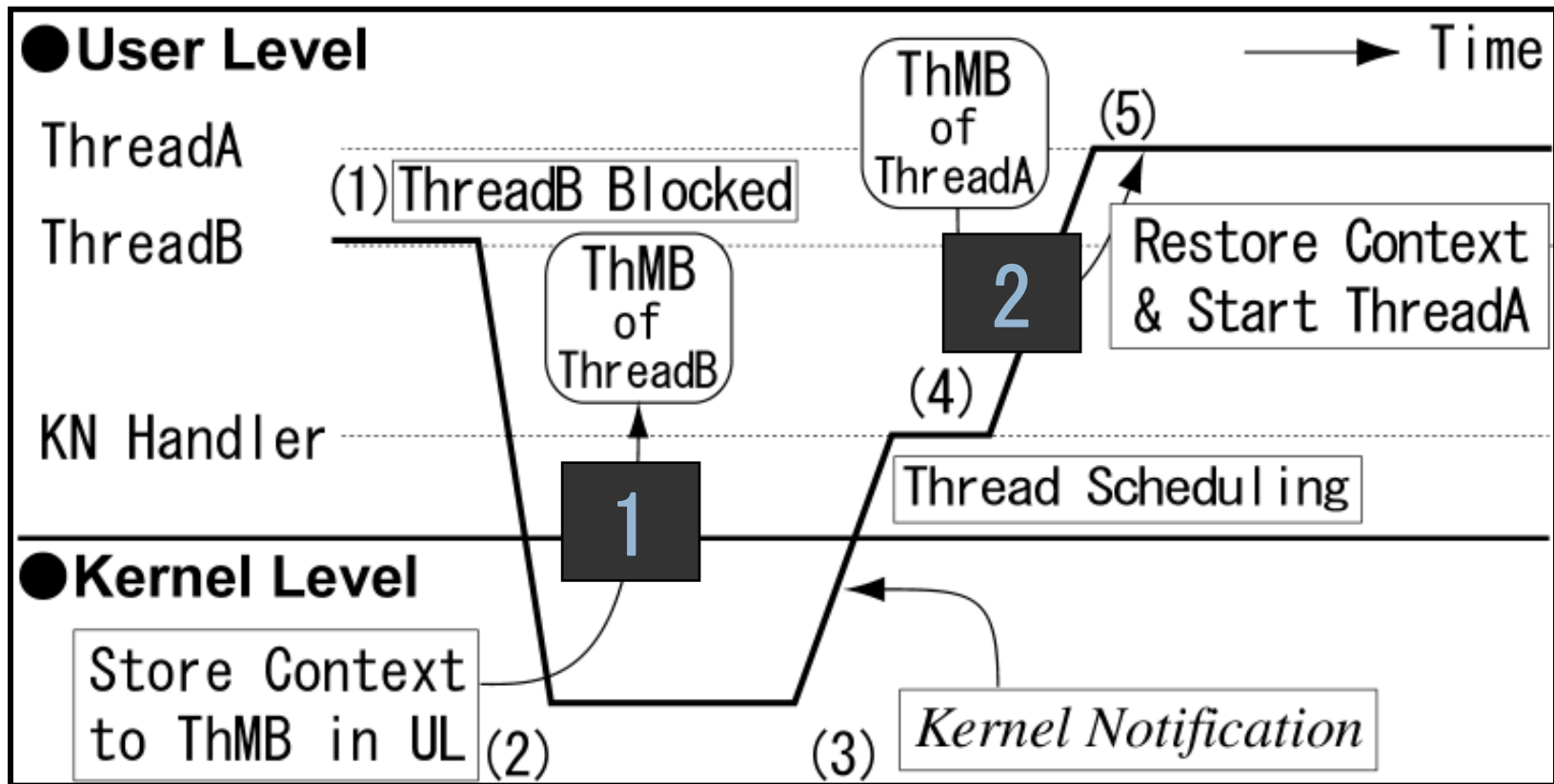


3回のコンテキストコピー + Kernel Thread 生成

猪原茂和, 益田隆司:情報処理学会論文誌, Vol.~36, No.~10, pp.¥ 2498-2510 (1995).

ユーザとカーネルの非同期的な協調機構によるスレッド切り替え動作の最適化

Kernel Notification による事象通知



■ OSからの効率的な事象通知を実現

- コンテキストのコピー回数が少ない
- この機構でスレッドのプリエンプションを実現可

評価

スレッド切り替え時間

124

