

推薦論文

省レジスタアーキテクチャ向け ソフトウェアパイプラインの評価

千葉 修一^{1,a)} 青木 正樹¹ 鎌塚 俊¹ 松井 雅人² 八代 尚³

受付日 2019年6月6日, 採録日 2019年11月7日

概要: スーパーコンピュータ「京」向けに開発されたコンパイラの最適化技術の代表格として, ソフトウェアパイプラインがあげられる。「京」では, SPARC アーキテクチャの拡張機能 HPC-ACE として拡張レジスタ (128 本の SIMD レジスタ) が追加された. ソフトウェアパイプラインの技術は, 多数のアーキテクチャレジスタを活用できるようになったことを基盤にして実装されている. 次期のポスト「京」では, アーキテクチャとして Armv8-A アーキテクチャ, HPC 拡張として SVE (32 本の SIMD レジスタ) が採用される. そこでソフトウェアパイプラインを SIMD レジスタ数の観点を中心として評価し, 「京」からポスト「京」への技術継承が可能か否かを考察し, ポスト「京」の開発に向けた提案を行う.

キーワード: HPC, スーパーコンピュータ, コンパイラ, 最適化, 数値シミュレーション

Evaluation of Software Pipelining for Architecture with Small Number of Registers

SHUICHI CHIBA^{1,a)} MASAKI AOKI¹ SHUN KAMATSUKA¹ MASATO MATSUI² HISASHI YASHIRO³

Received: June 6, 2019, Accepted: November 7, 2019

Abstract: Software Pipelining is a representative of compiler optimization technologies developed for K computer. This technology has been implemented based on the following fact: K computer has extended registers (128 SIMD registers) of HPC-ACE, which is the architectural extension to SPARC, and a lot of architectural registers are available. Post-K supercomputer adopts Armv8-A architecture with HPC extension SVE, which has 32 SIMD registers. Thus, in this paper we offer a suggestion for development of Post-K supercomputer by evaluating Software Pipelining in the point of view of the number of SIMD registers and considering inheritability of technologies from K computer for Post-K supercomputer.

Keywords: HPC, super computer, compiler, optimization, numerical simulation

1. はじめに

2012 年 9 月から共用開始となったスーパーコンピュータ「京」(以降, 「京」と略す) [1] は, TOP500, ゴードンベル賞など様々なタイトルを獲得している. 2018 年 4 月現在でも

大規模グラフ解析の性能ランキングとなる Graph500, および共役勾配法の処理速度の性能ランキングとなる HPCG (High Performance Conjugate Gradient) では, 世界ランキング 1 位を有している. これらの成果は, CPU やネットワークを中心としたハードウェアだけでなく, コンパイラなどのソフトウェアも含めたシステム全体のバランスを考えた設計によるものである. また, 計算科学分野だけでなく産業利用などの幅広い分野のアプリケーションで利用されている. 「京」の CPU を中心とした諸元を表 1 に示す.

¹ 富士通株式会社
FUJITSU LIMITED, Numazu, Shizuoka 410-0396, Japan

² 株式会社メトロ
Metro, Inc., Numazu, Shizuoka 410-0007, Japan

³ 国立研究開発法人理化学研究所
RIKEN, Kobe, Hyogo 650-0047, Japan

a) shuc@jp.fujitsu.com

本論文の内容は 2018 年 9 月の FIT2018 第 17 回情報科学技術フォーラムにて報告され, 同プログラム委員長により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

表 1 K computer System Specification
Table 1 K computer system specifications.

CPU Specification	
Peak performance	128GFLOPS (16GFLOPS×8cores)
CPU clock	2.0 GHz
Floating-point registers (Core spec)	SIMD register (128 bit SIMD) : 128 General purpose register (64bit) : 188
Cache	L1I\$/L1D\$: 32KiB (2way), L2\$: Shared 6MiB (12way)
Power	58W (30°C, Water Cooling)
Network Specification	
トポロジ	6D Mesh/Torus
リンクバンド幅	5GB/s (6.25Gbps x 8 lanes x 10 dirs)
ノードバンド幅	20 GB/s x in/out
Software Specification	
Compiler optimization	HPC-ACE, Reciprocal approximation, HW/SW prefetch, Hardware barrier

「京」のシステムを支える特徴的な技術として、HPC-ACE (High Performance Computing Arithmetic Computational Extension) [2] があげられる。HPC-ACE は、SPARC アーキテクチャに対して、HPC (High Performance Computing) 向けに拡張を加えたアーキテクチャである。128 本に拡張された SIMD レジスタ (スカラの浮動小数点レジスタとしては 256 本) と、それらを活用する拡張命令 (SIMD 命令、逆数近似命令など) を利用することでアプリケーションを高速かつ高効率に実行することを実現している。アプリケーションがこれらの機能を利用するためには、アプリケーションの翻訳時にコンパイラが適用する最適化技術が必要不可欠となる。特に「京」向けに開発されたソフトウェアパイプラインは HPC 向けのアプリケーションに対して重要である。

ソフトウェアパイプラインは、命令レベルで並列性を高める最適化技術である。ループ構造の変形、およびループ内の命令列を CPU の演算器が効率的に処理できるように並べ替えることで IPC (Instruction Per Cycle) を向上させる。

EuroBen benchmark [3] に含まれる 9 次の多項式を解くコード (図 1, 以降, 9th degree code とする) を例にとり、「京」におけるソフトウェアパイプラインの効果の評価した。

9th degree code は、回転ごとに配列 x1 のデータを読み込み、9 つの積和演算を行う演算主体のコードである。このコードを用いて評価を行った結果を図 2 に示す。

グラフは、ソフトウェアパイプラインの適用有無による性能の変化を示している。縦棒グラフは実行時間を意味しており、低いほど高速に実行できていることが分かる。ソフトウェアパイプラインの適用により 1.7 倍の性能向上が見られる。横線グラフは、浮動小数点演算の効率 (以降, 実行効率とよぶ) を示しており、ピークの演算

```

Do i = 1, n
  y(i, jsw) = c0 + x1(i)*(c1 + x1(i)*
&          (c2 + x1(i)*(c3 + x1(i)*
&          (c4 + x1(i)*(c5 + x1(i)*
&          (c6 + x1(i)*(c7 + x1(i)*
&          (c8 + x1(i)*c9)))))))))
End do
    
```

図 1 9th degree polynomial expression
Fig. 1 9th degree polynomial expression.

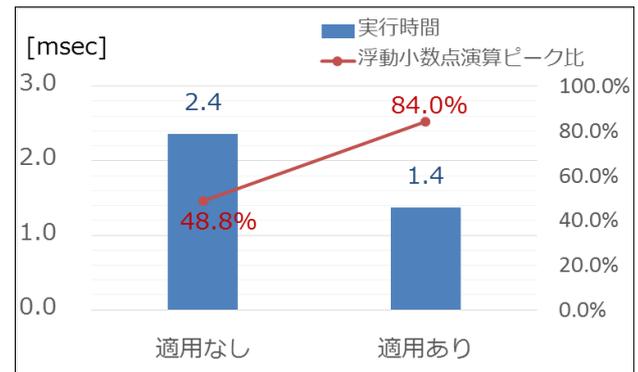


図 2 9th degree code の実装
Fig. 2 Implementation of 9th degree code.

性能に対してどのくらいの演算性能が得られているかの比率を示している。こちらのグラフは、高いほど高効率だといえる。ソフトウェアパイプラインの適用により、演算数に変化はないが実行時間が短くなったため、実行効率が高くなっていることが分かる。

また、HPCI 戦略プログラム [4] でも「京」を利用した多くの研究が行われており、分野 4「次世代ものづくり」で利用されているアプリケーション FrontFlow/blue でも、ソフトウェアパイプラインを利用したチューニング [5] が報告されている。このように「京」においてソフトウェアパイプラインは非常に大きな性能効果が得られる最適化であることが分かる。「京」は 2019 年度中に運用終了し次期のシステムとなるポスト「京」[6] へ移行されることとなっている。ポスト「京」ではコデザインを導入することで、システムとアプリケーションがお互いの特性を設計段階で取り込んでいる。これにより、「京」以上の実行効率、および電力効率を実現するシステムの開発が進められている。また、その一環で CPU に Arm プロセッサが採用された。これに合わせて、命令セットアーキテクチャは「京」で利用していた SPARC アーキテクチャから Armv8-A アーキテクチャへ変更される。さらに HPC 向けに SVE (Scalable Vector Extension) [7] と呼ばれる拡張機能が追加される。SVE では、32 本の SIMD レジスタ (ベクトルレジスタ)、16 本のプレディケートレジスタが利用される。「京」で搭載された SPARC 向けの拡張命令であ

表 2 HPC-ACE and SVE Specification
Table 2 HPC-ACE and SVE specifications.

	HPC-ACE	SVE
SIMD registers	128	32
General purpose registers	188	31
Predicate registers	-	16

る HPC-ACE との比較を表 2 に示す。

SVE では HPC-ACE に比べ大幅にレジスタ数が少ないことが分かる。そこでソフトウェアパイプラインングを SIMD レジスタ数の観点を中心として評価し、「京」からポスト「京」への技術継承の可否を考察し、ポスト「京」のソフトウェア開発に提案を行う。

2. 評価に利用する環境

ソフトウェアパイプラインングを評価するために利用する CPU の概要について述べる。ポスト「京」は現在開発中であるため、以下の 2 つの観点で評価を行える環境を用意した。

- ① SIMD レジスタ数の変化 (128 本, 32 本)
- ② 命令セットアーキテクチャの変化 (SPARC, Arm)

評価①については、「京」の後継機である富士通製 PRIMEHPC FX100 (以降, FX100 とよぶ) を利用した。また, FX100 向けのコンパイラを改造し, プログラムが利用する最大の SIMD レジスタ数を変更する機能を追加した。この機能を利用することで 32 レジスタの評価を実現した。評価②については, 評価①で利用する FX100 と Arm チップである X-Gene 2 [8] が搭載されたマシンを比較することで評価を行った。

富士通製 FX100 の諸元を表 3 に, MACOM 社製の X-Gene 2 が搭載されたサーバの諸元を表 4 に示す。

コンパイラは, 富士通社製コンパイラ (Technical Computing Suite V2.0L30 相当) を利用した。また, X-Gene 2 に関しては, FX100 向けのコンパイラを改造し, コード出力を Armv8-A の AArch64 (A64 命令セット) に対応させたものを利用した。翻訳時オプションは, 最適化レベルとして -Kfast を利用する。また, ソフトウェアパイプラインングの適用有無については -Kswp, および否定オプションとなる -Knoswp を利用する。

3. ソフトウェアパイプラインングの動作

3.1 ソフトウェアパイプラインングの概要

評価に先立ち, 「京」におけるソフトウェアパイプラインングの動作概要について説明する。ソフトウェアパイプラインングは, ループの命令列の実行順序を並べ替えることで, 命令レベル並列性を向上させる最適化である。ループのイテレーションをまたいで命令の移動を行い, ループを再構成する形で, 実行性能を向上させる。

表 3 SPARC64™ XIfx Specification
Table 3 SPARC64™ XIfx specifications.

	Specification
Peak performance	1TFLOPS 以上(倍精度)
CPU clock	2.2 GHz
Core	32 +2 (*)
SIMD length	256 bit
Registers (Core spec)	SIMD register (256 bit wide SIMD) : 128 General purpose register (64bit) : 188
Cache	L1I\$/L1D\$: separate 64KiB (4way) L2\$: shared 24MiB (24way)
Memory throughput	240GiB/s x2 (R/W)

(*) 2 個はアシスタントコア

表 4 X-Gene 2 Specification
Table 4 X-Gene 2 specifications.

	Specification
Peak performance	Unknown
CPU clock	2.8 GHz
Core	8
SIMD length	128 bit
Registers (Core spec)	SIMD register (128 bit wide SIMD) : 32 General purpose register (64bit) : 31
Cache	L1I\$/L1D\$: Separate L2\$: Shared L3\$: Globally shared 8MB
Memory throughput	Unknown

「京」ではソフトウェアパイプラインングのフレームワークとしてモジュロスケジューリング [9], [10] を採用している。「京」に実装されたモジュロスケジューリングは, 大きく分けて 2 つの処理からなる。1 つは, 命令レベル並列性を高くするために, 各サイクルの演算器資源の利用効率を上げる視点で命令をスケジューリングする。もう 1 つは, スケジューリング結果を適切にループに反映させるために, レジスタリネーミングを施しながら, ループを複製する。これはモジュロリネーミングとよばれる。

ソフトウェアパイプラインング適用後のループにおいて, 元ループの各イテレーションの命令が, 何サイクル数ずつずれて始まるかを表す値を II (Initiation Interval) とよぶ。これは最適化前のループ 1 回転分の命令を処理できるサイクル数に相当し, 小さいほど実行性能が良いという指標となる。図 3 に仮想的なマイクロアーキテクチャにおけるソフトウェアパイプラインングの結果を示す。

ソフトウェアパイプラインングは, IPC の向上効果が得られるようになる一方で, 注意を要する点がある。1 つは, レジスタリネーミングを実施するため, アーキテクチャレジスタ数を要することである。もう 1 つは, アンローリングするようにループを複製するため, ループカーネルを通過するために必要なループ回転数を要することである。そのため, ソフトウェアパイプラインングを適用する際は, レジスタやループ回転数の制約のもとで, マイクロアーキテクチャの利用効率を向上させることになる。プログラム

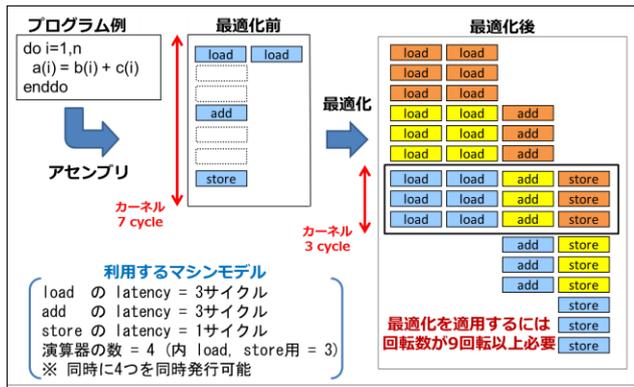


図 3 ソフトウェアパイプラインの動き
Fig. 3 Operation schema of software pipelining.

の特性としてループの回転数が翻訳時に判明している場合は、その命令配置自体を調整して、アンローリング数を抑えることが可能である。また、レジスタリネーミングによってレジスタが不足することが予想される場合は、命令スケジューリングによる重なりを抑えることで、レジスタのライブレンジの干渉を抑えて必要なレジスタ数を低減させることが可能である。「京」では演算器資源から定まる最小のIIを基準として、必要なレジスタ数およびループの回転数を確認しながら、ソフトウェアパイプラインを実施する。図4に示す処理の流れで適用の有無を判定する。

ソフトウェアパイプラインはハードウェアの演算器資源を活用するために、Out-of-order 機構の補助として、パイプラインのストールを削減するための命令スケジューリング最適化である。そのため、たとえばメモリバンド幅がボトルネックとなり実行速度が律速されるループには性能向上効果が期待できない。そのため、適用シーンの配慮も必要となる。

ここまでで述べたとおり、ソフトウェアパイプラインを実施すると、命令レベル並列性の向上を実現する代わりに、アーキテクチャレジスタが多く必要となる。必要なレジスタ数は、ループ内の命令列やマイクロアーキテクチャの特性、ならびに命令スケジューリング結果に依存するため一概にはいえない。そのため、必要なレジスタ数を抑えた命令スケジューリングを実施するアルゴリズムの研究 [11]、モジュロスケジューリングの中でスビルする命令を生成する研究 [12]、そして実用的なマシンモデルで評価する研究 [13] などが行われている。本研究もレジスタ数を観点にした評価であり、実際のハードウェアを利用し動作結果を観測することで、より正確な評価を行うものである。

3.2 評価環境の違いによる性能の変化

ソフトウェアパイプラインの効果を評価するために「2. 評価に利用する環境」に示した評価環境で実行時間を測定する。評価で示す実行時間の縦棒グラフは、ソフトウェアパイプラインの適用をしていないケースを「1.0」と

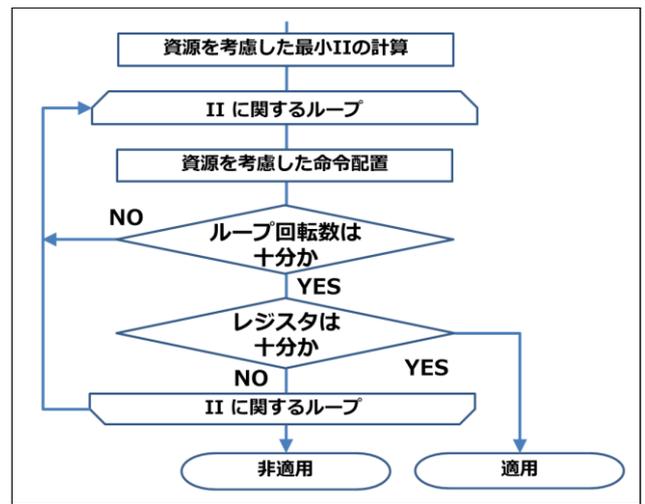


図 4 処理の流れ
Fig. 4 Operation flow.

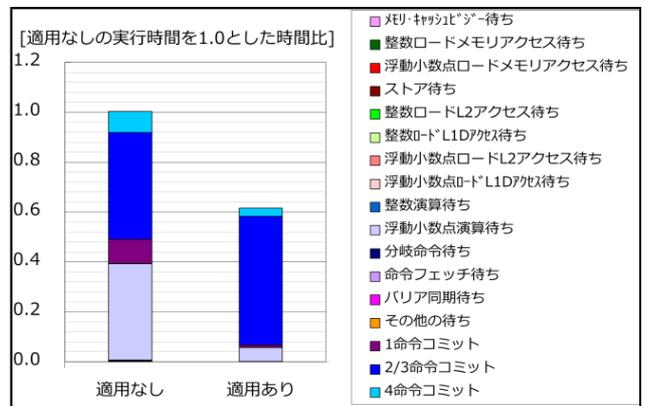


図 5 FX100 (128レジスタモード) の評価
Fig. 5 Evaluation of FX100 (128-register mode).

し、適用したケースの実行時間を比率で表現したグラフ（以降、性能効果比グラフとよぶ）を用いる。富士通製 FX100 では詳細プロファイラ (fapp) を利用することで、実行時間内の CPU の動作を知ることが可能である。このプロファイラの結果を用いて実行時間内の内訳を表現する。

FX100 の SIMD レジスタを 128 本利用した通常の動作モード（以降、128 レジスタモードとよぶ）で、ソフトウェアパイプラインを適用する場合としない場合のそれぞれについて 9th degree code を測定した結果を図 5 に示す。

ソフトウェアパイプライン適用なしのケースに対して、適用したケースでは“浮動小数点演算待ち”が削減されていることが分かる。これはソフトウェアパイプラインによって命令の並列性が促進され、先行する演算の結果を利用して計算する演算処理が待ち合わせなく動作できているためである。

次に FX100 の SIMD レジスタの利用数を 32 本に制限し動作するモード（以降、32 レジスタモードとよぶ）で 9th degree code を測定した結果を図 6 に示す。

32 レジスタモードにおいてもソフトウェアパイプライン

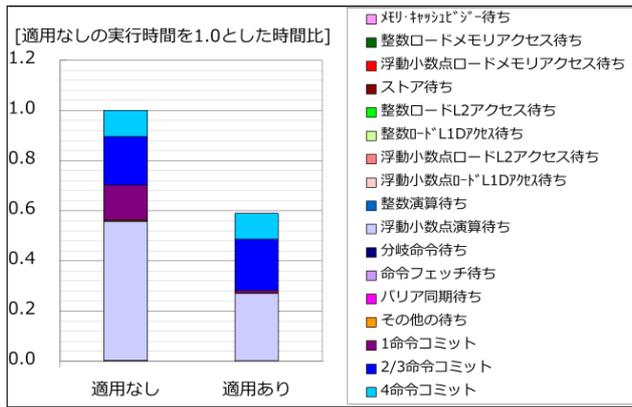


図 6 FX100 (32 レジスタモード) の評価
 Fig. 6 Evaluation of FX100 (32-register mode).

表 5 ソフトウェアパイプラインの適用情報
 Table 5 Status of software pipelining.

	128 レジスタモード	32 レジスタモード
ソフトウェアパイプラインの適用前の最適化		
ループアンローリング	6 展開	3 展開
SIMD 幅	4	4
ソフトウェアパイプラインの情報		
II	15	22

ニングの適用によって性能向上がみられる。その内訳に着目すると、図 5 とは CPU の動作状況が異なることが分かる。32 レジスタモードでは、ソフトウェアパイプライン適用後であっても“浮動小数点演算待ち”の割合が多い。そこで、コンパイラが翻訳時に出力する情報からレジスタモードにより動作の違いが出る原因を考察する。128 レジスタモードと 32 レジスタモードの翻訳情報を表 5 に示す。

2つのレジスタモード間では、ソフトウェアパイプラインの入力となるループアンローリングの適用状況が異なり、32 レジスタモードでは半分の展開数となっている。これは利用できるレジスタ数が少なくなることで、ループボディの命令列も制限されるためである。また、ソフトウェアパイプラインの動作に関しても、利用できるレジスタの違いに起因して、II の値が異なる。II は値が小さいほど各イテレーションの命令列の重なりが強くなり、より高い IPC を実現し高速に実行できるようになる。先に述べたループアンローリングからの入力の影響も含め、32 レジスタモードでは、II の値が高くなっている。そのため、浮動小数点演算命令の実行完了待ち時間（命令レイテンシ）が隠蔽できず、浮動小数点演算待ちが残っている。これらを総合すると、32 レジスタモードにおいてソフトウェアパイプラインによる効果は観測できたが、省レジスタにおける課題があるといえる。

次に Arm アーキテクチャの CPU で評価を行うため、

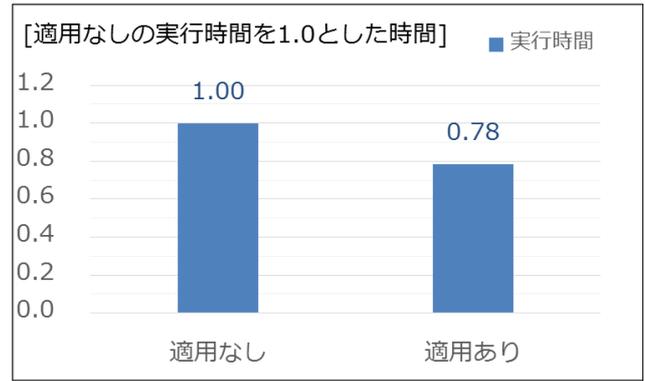


図 7 X-Gene 2 を用いた評価
 Fig. 7 Evaluation on X-Gene 2.

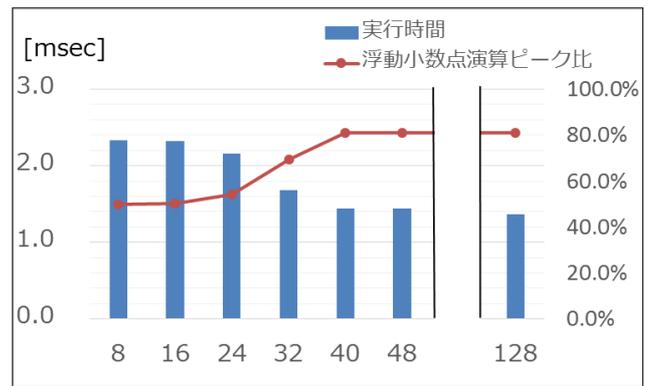


図 8 SIMD レジスタ数と実行性能の関係
 Fig. 8 Relation of SIMD registers and execution performance.

MACOM 社製の X-Gene 2 を利用して、ソフトウェアパイプラインの適用の有無それぞれについて、9th degree code を測定した結果を図 7 に示す。

結果より、Armv8-A アーキテクチャである CPU でもソフトウェアパイプラインの効果が観測できている。先に述べたとおり、本システム向けのコンパイラは、FX100 向け (SPARC 向け) のコンパイラをベースとして AArch64 のコード出力に対応したものを利用している。ただし、コンパイラが保持する他の最適化機能にハードウェアやマイクロアーキテクチャ向けのチューニングは実施していない。しかしながら、ソフトウェアパイプラインは、十分に効果が期待できることが分かった。

これまでの結果から、ソフトウェアパイプラインの効果を決める要因として SIMD レジスタ数が想定される。そこで、SIMD レジスタ数に着目した評価を行った。図 8 は、FX100 を利用し SIMD レジスタ数を 8 から 128 の間で変化させた場合の 9th degree code の実行性能の比較である。

図より、レジスタ数が多い方がより実行時間が短くなり、性能が向上していることが分かる。ただし、性能の向上は 40 本付近で頭打ちになっている。9th degree code は、SIMD レジスタ数が 40 本あればソフトウェアパイプライン

ニングの十分な効果が引き出せるといえる。

4. ベンチマークによる検証

ここまで、9th degree code を中心にソフトウェアパイプラインングの効果を評価してきた。本章からは、一般的なベンチマーク、および実アプリケーションにおける評価を進める。まずベンチマークについて、並列コンピュータ向けの著名なベンチマークである NAS Parallel Benchmark class A (以降、NPB と略す) [14] を利用して評価を行った。NPB は多くのシステム上で評価されており、地球シミュレータではコンパイラの評価を目的とした並列性に関する研究 [15] も行われている。

また多種のベンチマークを有しているため、まず 128 レジスタモードでソフトウェアパイプラインングの効果を検証し、その中で効果が大きいものを対象としさらに検証を進めた。128 レジスタモードで測定した性能効果比グラフを図 9 に示す。

測定の結果、MG と EP は 6%以上の性能向上が得られた。一方で LU は 2.3%の低下となり、他の 5 本の性能変化は 1.3%以内に収まるという結果を得た。ソフトウェアパイプラインングはつねに効果が得られるものではなく、アプリによって差があることが分かる。

本章では、ソフトウェアパイプラインングの性能向上を検証するため、向上率が最も大きい MG ベンチマークに着目する。またレジスタ数の影響を確認するため、32 レジスタモードにおける性能効果も検証した。

4.1 ベンチマークの概要

MG ベンチマークは、三次元ポアソン方程式をマルチグリッド法で解くプログラムとなっている。コードとしては再帰呼び出しにより階層ごとに局所的なデータを用いて演算を行うという特徴がある。128 レジスタモードで測定した実行時の処理区間のコスト分布は表 6 のようになっている。またループ部は関数の先頭からの登場順にナンバリングしている。

残差計算の処理である関数 resid の実行コストが合計で 50%以上の割合を占めていることが分かる。また、その中でも 2 番目のループが 41%の実行コストとなっている。

高コストの 2nd loop ループは、三重ループ構造 (制御変数は内側から、i1, i2, i3) となっており、内側の演算は図 10 のようになっている。

配列 a と積算するための配列 u, u1, u2 の加算処理に若干の依存があるが、それ以外の計算は並行で処理可能なものが多い。図 10 のコードにおける演算の依存関係を図 11 に示す。

配列 a と配列 u, u1, u2 の積算結果を用いた減算計算を頂点に大きく 3 つの演算ツリーがあることが分かる。直接依存がない演算処理はすべて並列で実行することが可能

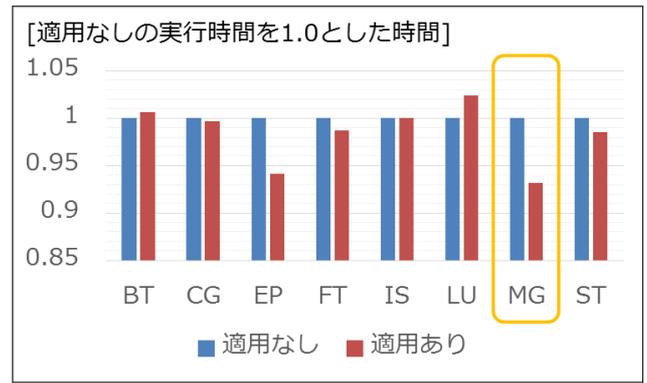


図 9 NPB におけるソフトウェアパイプラインングの効果
Fig. 9 Effect of software pipelining in NPB.

表 6 MG ベンチマークのコスト分布
Table 6 Time cost distribution in MG benchmark.

関数 / ループ部	実行コスト割合 (%)
resid / 2nd loop	41.1765
zran3 / 3rd loop	23.5294
resid / 1st loop	11.7647

```

r(i1, i2, i3) =
> v(i1, i2, i3)
> - a(0) * u(i1, i2, i3)
> - a(2) * ( u2(i1) + u1(i1-1) + u1(i1+1) )
> - a(3) * ( u2(i1-1) + u2(i1+1) )
    
```

図 10 resid 2nd loop のループボディ
Fig. 10 Loop body of the resid 2nd loop.

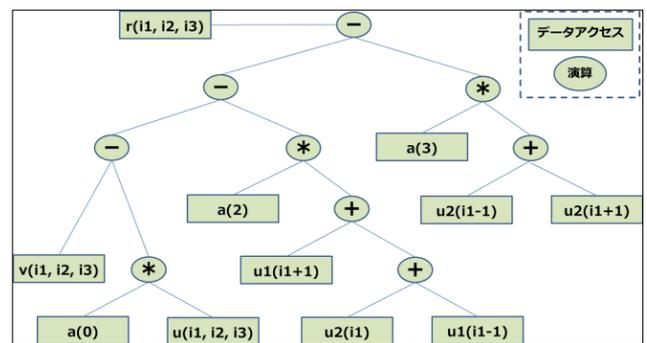


図 11 演算の依存関係
Fig. 11 Dependency of the operations.

であり、並列性の高さが確認できた。これらの分析から、ソフトウェアパイプラインングによる最適化の効果が高いコードであるといえる。

4.2 性能の測定結果と分析

MG ベンチマークを 32 レジスタモードで実行した結果を図 12 に示す。

想定どおり浮動小数点演算待ちが削減されることで、実

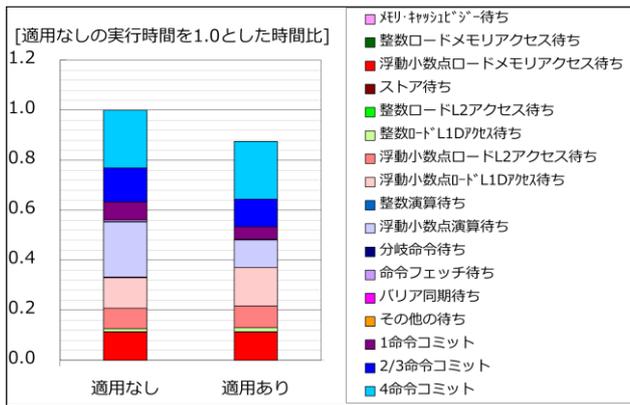


図 12 NPB MG の評価 (全区間)

Fig. 12 Evaluation of NPB MG (entire region).

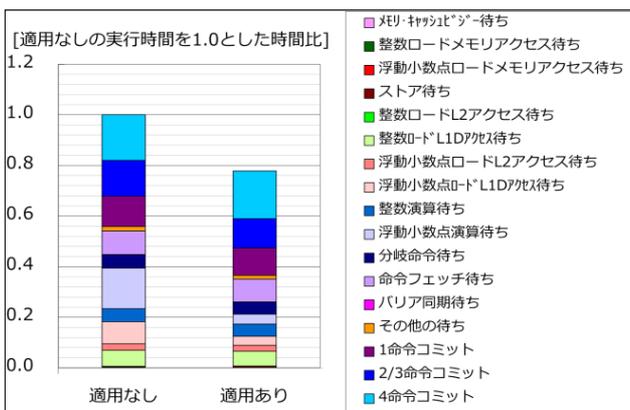


図 13 NPB MG の評価 (残差計算 2nd loop)

Fig. 13 Evaluation of NPB MG (resid 2nd loop).

行性能が向上していることが分かる。L1 キャッシュのアクセス待ちを表す“浮動小数点ロード L1D アクセス待ち”が増加している点は、演算待ちが解消されたことで、配列データの読み込みが追い付いていないためである。また、最適化の適用後に命令数の増加を確認したが、実行性能に影響を与えるような変化はなかった。次に、高コストの処理部となっている残差計算の 2nd loop のみを測定したデータを図 13 に示す。

浮動小数点演算待ちの削減効果がさらに高くなり、全体で約 22% の実行時間が削減されていることが分かる。これらのことから、MG ベンチマークの全体、特に高コストの処理区間でソフトウェアパイプラインの効果が得られることが確認できた。

また 9th degree code と同様に SIMD レジスタ数を 8 から 128 の間で変化させた場合の実行性能の比較を図 14 に示す。

16 本付近から緩やかに頭打ちが始まる。図 11 から分かるように、命令列中の演算数の割合が低く、かつロードしたメモリデータの再利用性も低い。そのためレジスタのライブレンジが短く、単位時間あたりのレジスタの要求量が少ない。結果、9th degree code より少ないレジスタ数で

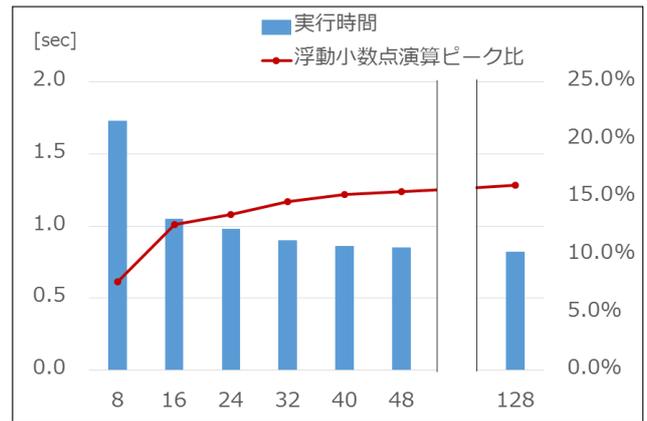


図 14 SIMD レジスタ数と実行性能の関係

Fig. 14 Relation of SIMD registers and execution performance.

もソフトウェアパイプラインの効果が表れている。

5. 数値シミュレーションによる評価

次に、数値シミュレーションの実アプリケーションを利用して、実行性能へ SIMD レジスタ数の影響評価を行う。

5.1 数値シミュレーションの概要

ポスト「京」向けに開発が進められている数値シミュレーションを利用して評価を行った。ここではポスト「京」の重点課題 (4) として選定されている“観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化”で利用される数値気象シミュレーションコードの NICAM (Non-hydrostatic ICosahedral Atmospheric Model) [16] を利用した。

5.2 アプリケーションの概要

NICAM は、Fortran 言語で記載されたプログラムで、1 時間ステップの中で大きく分けて 2 種類の問題を解く。1 つは格子上的風速・気温・密度・水蒸気・雲物質などを有限体積法で時間発展させる力学過程である。プログラムの特徴としては、構造格子ステンシル計算であり、演算密度はあまり高くなくメモリへの要求が多くなっている。もう 1 つは雲の相変化や大気放射による加熱・冷却などの物理現象を扱う物理過程である。こちらはループ内の計算量が多く、分岐処理も多数含まれる。NPB と同様に NICAM についても多くのシステム上で研究が行われている。コンパイラに関連する研究としては、「京」と TSUBAME2.5 の 2 つのシステムを比較し、最適化やソフトウェアパイプラインについて言及した研究 [17] があり、演算ネックを解消する手法について述べられている。

128 レジスタモードを利用し、NICAM に含まれる主要な処理区間の実行時間を測定した結果を図 15 に示す。

Kernel A~F は力学過程、Kernel G~M は物理過程の主要区間の実行時間を表し、ソフトウェアパイプライン

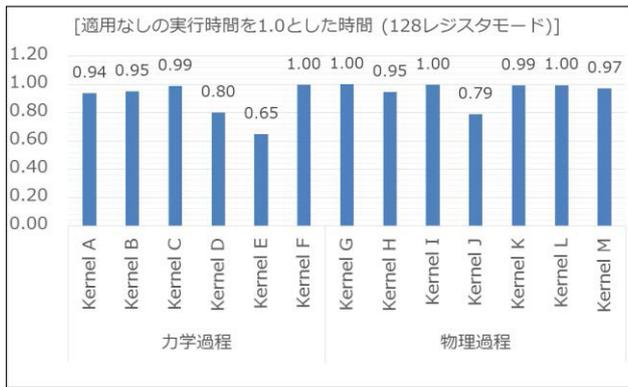


図 15 NICAM の評価 (128 レジスタモード)

Fig. 15 Evaluation of NICAM (128-register mode).

を適用しない実行時間を“1.0”としたときの相対比となっている。それぞれソフトウェアパイプラインの適用効果が得られている。これらのデータと 32 レジスタモードで測定したデータを比較することで評価を実施した。

5.3 性能の測定結果と分析

NICAM の Kernel A~M に対して 32 レジスタモードで測定した結果を図 16 に示す。

図 15 と比較すると、力学過程では Kernel D と Kernel F に差があるが、それ以外は同じような効果が得られている。一方で、物理過程では Kernel J で逆効果、かつ効果に大きく差が見られる。効果のギャップが一番大きな Kernel J を分析すると、コンパイラの翻訳時のメッセージから、レジスタ不足によりソフトウェアパイプラインが適用できていないことが分かっている。詳細プロファイラを利用し、実行時間内の浮動小数点演算待ちのコスト割合を測定すると、128 レジスタモードで 5.78%であったものが 32 レジスタモードで 22.25%に増加している。

レジスタが不足するケースにおいては、この浮動小数点演算待ちを別の手段で解消する必要があり、32 レジスタモードにおけるコンパイラに課題があるといえる。Kernel J の特徴を検証することで、この課題に対して定量的な判断材料を提案できないか検討した。処理区間ごとの処理命令の内容を比較した結果を表 7 に示す。

実行データから Kernel J については、他に比べて有効命令数が少ないが突出した傾向は見られない。プログラムコードでは、ループボディが非常に大きく分岐処理があり、多くの除算計算を含んでいる。本研究では、Kernel J のレジスタ不足を解消し改善を検証するには至らなかったが、ポスト「京」でソフトウェアパイプラインを活用するためには、Kernel J のコードを分析しモデル化することが課題である。

次に性能評価において一番重要な実行時間に着眼した評価を行う。そこで、128 レジスタモードと 32 レジスタモードの実行時間を比較したグラフを図 17 に示す。グラフは、

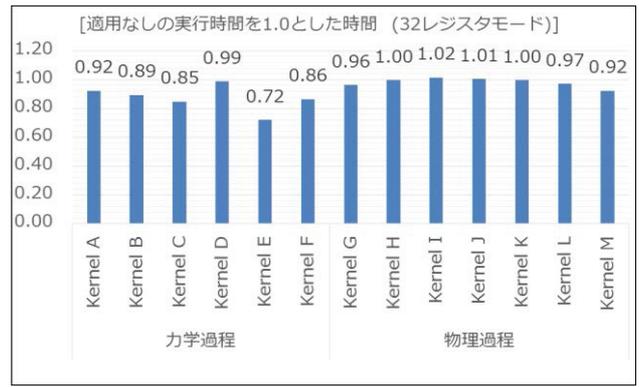


図 16 NICAM の評価 (32 レジスタモード)

Fig. 16 Evaluation of NICAM (32-register mode).

表 7 処理区間ごとの実行データ

Table 7 Execution data for each region.

処理区間	浮動小数点演算数	有効命令数	B/F 比
Kernel A	9.22E+07	6.92E+07	1.33
Kernel B	1.53E+08	5.15E+07	1.08
Kernel C	1.05E+08	8.81E+07	1.14
Kernel D	1.00E+08	8.05E+07	1.41
Kernel E	1.88E+08	7.47E+07	0.45
Kernel F	7.70E+07	3.29E+07	1.41
Kernel G	1.63E+08	4.86E+07	1.71
Kernel H	9.49E+07	2.56E+07	4.04
Kernel I	2.90E+07	6.29E+07	1.19
Kernel J	1.51E+07	4.98E+06	1.94
Kernel K	4.74E+07	5.60E+07	8.21
Kernel L	6.10E+07	1.28E+08	1.77
Kernel M	2.03E+08	3.50E+08	3.18

128 レジスタモードを利用したときの実行時間を“1.0”としたときの相対比となっている。

全体的に 10%~30%実行時間が長くなっている。一因として、32 レジスタモードは評価用にコンパイラを作成しているため、ソフトウェアパイプライン以外の最適化が効果的に動作していないことが考えられる。しかしながら、Kernel A については大きな乖離が見られる。そこで、詳細プロファイラにより Kernel A の分析を行う。表 8 に詳細プロファイラによる命令数の変化を示す。

メモリロード/ストア命令数の増加は、レジスタの不足が発生することで一時的にレジスタの内容をメモリに退避させ、利用するときに復元するスプिल/フィル命令が原因である。また、メモリアクセスを行うためのアドレス計算で利用する整数演算も増加している。これらは、ループボディ内で利用されるレジスタが多く、かつそれらが長い区

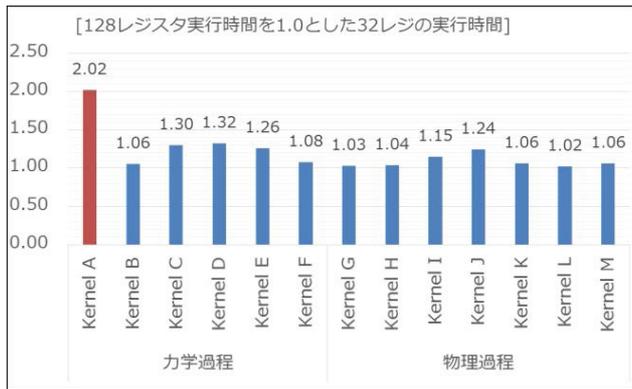


図 17 カーネルごとの実効時間比

Fig. 17 Execution time rate for each kernel.

表 8 実行命令数の比較

Table 8 Comparison in the number of execution instructions.

	浮動小数点演算命令数	整数演算命令数	メモリロード/ストア命令数
128 レジスタモード	1.83E+07	6.34E+06	1.66E+07
32 レジスタモード	1.85E+07	7.86E+06	3.67E+07

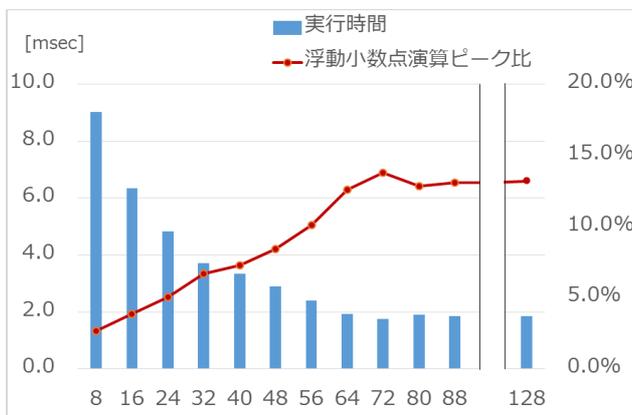


図 18 SIMD レジスタ数と実行性能の関係

Fig. 18 Relation of SIMD registers and execution performance.

間で利用されることでレジスタの絶対量が不足していることで発生している。

NICAM についてもレジスタ数との関係性を評価するため、SIMD レジスタ数を 8 から 128 の間で変化させた場合の実行性能の比較を図 18 に示す。

レジスタ数が 72 本付近に実行性能の分岐点がある。このように、レジスタ数が不足することで、十分な実行性能が引き出せていないと分かる。そこで高コストのプログラムコードを分析し要求されるレジスタ数を削減することを考える。Kernel A の高コスト部のコードの計算構成を図 19 に示す。

```

do ij = nstart, nend
  sclt_rhogw = 配列 rhogw_vm より計算
  sclt(ij, TI) =
    (配列 rhogvx_vm, rhogvy_vm, rhogvz_vm より計算) &
    * 積算データ + sclt_rhogw
enddo
do ij = nstart, nend
  sclt_rhogw = 配列 rhogw_vm より計算
  sclt(ij, TJ) =
    (配列 rhogvx_vm, rhogvy_vm, rhogvz_vm より計算) &
    * 積算データ + sclt_rhogw
enddo
    
```

図 19 NICAM Kernel A の高コスト処理

Fig. 19 High cost part of NICAM Kernel A.

```

do ij = nstart, nend
  sclt(ij, TI) =
    (配列 rhogvx_vm, rhogvy_vm, rhogvz_vm より計算) &
    * 積算データ
enddo
do ij = nstart, nend
  sclt_rhogw = 配列 rhogw_vm より計算
  sclt(ij, TI) = sclt(ij, TI) + sclt_rhogw
enddo
~ 以降, sclt(ij, TJ) のループも同様に分割 ~
    
```

図 20 ループ分割による変形

Fig. 20 Transformation by loop fission.

コード内の“配列 rhogw_vm より計算”および、“配列 rhogvx_vm, rhogvy_vm, rhogvz_vm より計算”処理部の命令数が多いため、レジスタ不足が発生している。そこでループ構造を変形し、ループボディの命令数の削減を試みた。最初の変形として、ループ分割を適用してループボディを分割した変形を図 20 に示す。

次にループ融合によりループボディの命令数を調整した変形を図 21 に示す。このとき、共通となる演算の削減も適用する。

これらの変更を行い 32 レジスタモードにおいて、すべてのループにソフトウェアパイプラインが適用できることを確認した。配列 sclt はループ間で利用されるため、ロード/ストア命令が増加することになるが、アドレス計算の共通式の削除やスパル/フィル命令の削減の効果の方が高く、結果としてメモリロード/ストア命令数が 3.67E+07 から 9.85E+06 まで削減された。本コードを利用し 32 レジスタモードで測定した実行時間を詳細プロファイルと重ねて表示したグラフを図 22 に示す。

実行時間が大幅に短縮され、ソフトウェアパイプライン

```

do ij = nstart, nend
  sclt_rhogw = 配列 rhogw_vm より計算
  (共通データ X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2) = &
  (配列 rhogvx_vm, rhogvy_vm, rhogvz_vm より計算)
  sclt(ij, TI) = (X1, Y1, Z1)*積算データ
  sclt(ij, TJ) = (X2, Y2, Z2)*積算データ
enddo
do ij = nstart, nend
  sclt(ij, TI) = sclt(ij, TJ)+配列 rhogw_vm より計算
  sclt(ij, TI) = sclt(ij, TJ)+配列 rhogw_vm より計算
enddo
    
```

図 21 ループ融合とループ分割による変形

Fig. 21 Transformation by loop fusion and loop fission.

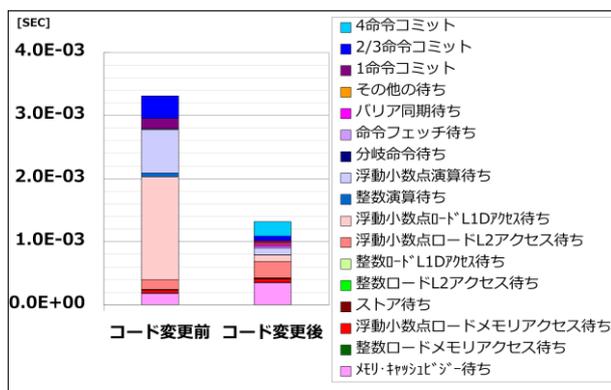


図 22 コード変更後の実行性能比

Fig. 22 Execution performance rate after code change.

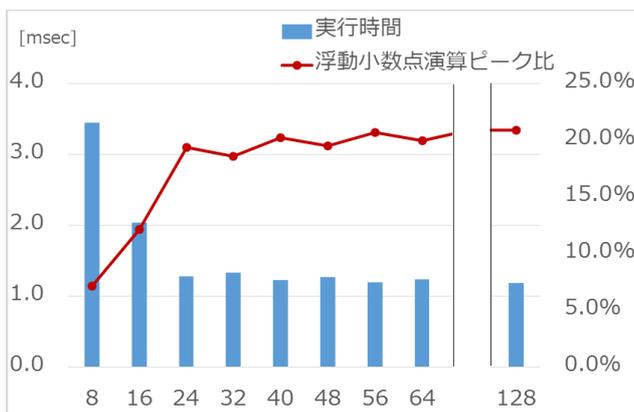


図 23 変更後の SIMD レジスタ数と実行性能の関係

Fig. 23 Relation of SIMD registers and execution performance after code change.

ングが効果していることが分かる。浮動小数点演算待ちだけでなく、浮動小数点ロードの L1 キャッシュ待ちも大きく減少する結果となった。

また、要求されるレジスタ数を再評価するため SIMD レジスタ数を 8 から 128 の間で変化させた場合の実行性能の比較を図 23 に示す。

ループボディ内の命令数が削減されたことで、要求されるレジスタ数が削減されている。図 18 で示した 72 本近く要求されるコードであっても、コードを変更することで 32 本を下回る本数に削減可能なことも分かった。命令数が多くレジスタ不足によりソフトウェアパイプラインが適用できない場合であっても、ループ変形を適切に実施し、ループ内の命令数を削減することで、省レジスタのアーキテクチャにおいてもソフトウェアパイプラインによる性能向上が得られることが分かった。今回は、経験則からハンドチューニングによるコード変更を行ったが、ハードウェアの特性やコンパイラの最適化を考慮しハンドチューニングすることは難しい。ポスト「京」に向けてはコンパイラによる自動的な変形が必要であると考えられる。

NICAM の実アプリケーションを評価することで、以下の 3 つの知見が得られた。

- ① 実アプリケーションでも効果を観測
- ② 適用ケースの定量的な判断基準が必要
- ③ コンパイラによる自動的なループの変形が課題

6. まとめ

「京」で搭載されたコンパイラの最適化技術としてソフトウェアパイプラインがある。本評価では、これらの技術がポスト「京」など省レジスタのアーキテクチャでも有効であることを確認した。特に浮動小数点演算待ちが発生するケースにおいて大きな効果が得られている。この効果を引き出すためにはプログラミングの段階でループ構造を考慮する必要がある。また、チューニングの段階で、プログラムのループ構造を変更することでソフトウェアパイプラインの適用を促進できることを示した。

今後は、今回得られた知見をさらに分析し、ソフトウェアパイプラインの適用有無に影響する要因の具体化、そして他のシステム (Arm 機, Intel 機など) における評価を行う必要があると考えている。

また、今回得た知見をポスト「京」のコーデインヘフィードバックし、コンパイラ開発、およびポスト「京」向けプログラミングモデルの確立につなげたい。

謝辞 本論文の一部は、文部科学省「特定先端大型研究施設運営費等補助金 (次世代超高速電子計算機システムの開発・整備等)」で実施された内容に基づくものである。

参考文献

- [1] R-CCS : システム紹介, 入手先 (<http://www.r-ccs.riken.jp/jp/k/system.html>) (参照 2018-05-17).
- [2] Fujitsu Limited: SPARC64TM VIIIfx, available from (<http://www.fujitsu.com/downloads/JP/archive/imgjp/jhpc/sparc64viiiifx-extensionsj.pdf>) (accessed 2018-05-17).
- [3] EuroBen Benchmark, available from (<https://www.euroben.nl/>) (accessed 2018-05-17).
- [4] R-CCS : HPCI 戦略プログラム (戦略 5 分野) について,

- 入手先 (<https://www.r-ccs.riken.jp/jp/science/spire>) (参照 2019-08-25).
- [5] 熊畑 清, 井上俊介, 南 一生: FrontFlow/blue の勾配計算カーネルのスーパーコンピュータ「京」上でのチューニング, *High Performance Computing Symposium* (2013).
 - [6] R-CCS: LAGSHIP 2020 Project, available from (<http://www.r-ccs.riken.jp/fs2020p/>) (accessed 2018-05-17).
 - [7] arm Developer: Introduction to Scalable Vector Extension, available from (<https://developer.arm.com/products/software-development-tools/hpc/sve>) (accessed 2018-05-17).
 - [8] MACOM: X-Gene™ Family, available from (<https://www.apm.com/products/data-center/X-Gene-family/>) (accessed 2018-05-17).
 - [9] Rau, B.R. and Glaeser, C.D.: Some Scheduling Techniques and An Easily Schedulable Horizontal Architecture for High Performance Scientific Computing, *Proc. 14th Annual Workshop on Microprogramming*, pp.183-198 (1981).
 - [10] Lam, M.: Software pipelining: An effective scheduling technique for VLIW machines, *Proc. ACM SIGPLAN 1988 Conference on Programming Language Design and Implementation*, pp.318-328 (1988).
 - [11] Llosa, J.: Swing Modulo Scheduling: A Lifetime-Sensitive Approach, *Proc. 1996 Conference on Parallel Architectures and Compilation Techniques*, pp.80-87 (1996).
 - [12] Zalamea, J., Llosa, J., Ayguad'e, E. and Valero, M.: MIRS: Modulo scheduling with integrated register spilling, *Proc. 14th Annual Workshop on Languages and Compilers for Parallel Computing (LCPC2001)*, pp.239-253 (August 2001).
 - [13] Ramakrishna, R.B.: Iterative modulo scheduling: An algorithm for software pipelining loops, *Proc. 27th Annual International Symposium on Microarchitecture*, pp.63-74 (November 1994).
 - [14] NPB, available from (<https://www.nas.nasa.gov/publications/npb.html>) (accessed 2018-05-17).
 - [15] 村井 均, 岡部寿男: NAS Parallel Benchmarks による HPF の評価, 情報処理学会論文誌: コンピューティングシステム, Vol.47, No.SIG7 (ACS 14) (2006).
 - [16] NICAM, available from (<http://nicam.jp/hiki/>) (accessed 2018-05-17).
 - [17] Yashirom, H., Terai, M., Yoshida, R., Iga, S., Minami, K. and Tomita, H.: Performance Analysis and Optimization of Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM) on the K Computer and TSUBAME2.5, *Proc. Platform for Advanced Scientific Computing Conference (PASC '16)* (2016).

推薦文

本論文では省レジスタアーキテクチャ向けのソフトウェアパイプラインングについて評価を行っている。ソフトウェアパイプラインングは、命令レベルで並列性を高める最適化技術であり、「京」において非常に大きな性能効果が得られている。「京」の HPC-ACE アーキテクチャでは 128 本の SIMD レジスタが利用可能であるのに対して、ポスト「京」の SVE アーキテクチャでは利用可能な SIMD レジスタが 32 本に削減されている。このような省レジスタアーキテクチャでソフトウェアパイプラインングが有効であるかどうかについてはこれまで明らかにされていなかっ

たが、評価の結果からソフトウェアパイプラインングがポスト「京」など省レジスタのアーキテクチャでも有効であることが確認された。また、チューニングの段階で、プログラムのループ構造を変更することでソフトウェアパイプラインングの適用を促進できることが示された。これらの知見はポスト「京」のプロセッサだけではなく、他のプロセッサにも適用できると期待され、推薦論文にふさわしい論文であるといえる。

(FIT2018 第 17 回情報科学技術フォーラムプログラム
委員長 河内谷 清久仁)



千葉 修一 (正会員)

富士通株式会社次世代テクニカルコンピューティング開発本部所属。スーパーコンピュータ「京」、およびスーパーコンピュータ「富岳」のソフトウェア開発のプロジェクトリーダーとしてコンパイラの研究・開発に従事。



青木 正樹

富士通株式会社次世代テクニカルコンピューティング開発本部所属。スーパーコンピュータ「京」、およびスーパーコンピュータ「富岳」におけるアプリケーションの高並列化・高性能化に従事。



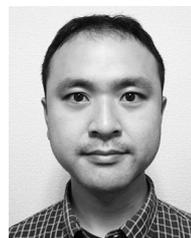
鎌塚 俊

富士通株式会社次世代テクニカルコンピューティング開発本部所属。スーパーコンピュータ「富岳」のコンパイラ開発のグループリーダーとして最適化の研究・開発に従事。



松井 雅人

株式会社メトロ技術本部 HPC ソリューション部。スーパーコンピュータ「京」、およびスーパーコンピュータ「富岳」におけるアプリケーションの高並列化・高性能化に従事。



八代 尚 (正会員)

特定国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究センター所属。高解像度気候・気象アプリケーションの開発とそれを用いた研究に従事。