

戦略的創造研究推進事業
チーム型研究(CREST)

研究領域

「ポストペタスケール高性能計算に資する
システムソフトウェア技術の創出」

研究領域中間評価用資料

研究総括: 佐藤 三久

2015年8月

目 次

1. 研究領域の概要	1
(1) 戦略目標	1
(2) 研究領域	4
(3) 研究総括	4
(4) 採択課題・研究費.....	5
2. 研究総括のねらい.....	6
3. 研究課題の選考について.....	8
4. 領域アドバイザーについて.....	9
5. 研究領域の運営について.....	9
6. 研究の経過と所見.....	11
7. 総合所見	13

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

① 戦略目標名

「メニーコアをはじめとした超並列計算環境に必要となるシステム制御等のための基盤的ソフトウェア技術の創出」

② 具体的内容

スーパーコンピュータ(スパコン)を用いたシミュレーションは、従来の理論・実験とは異なる新しい研究手法を実現し、科学技術のブレークスルー達成や国際競争力の強化に資するものであり、その重要性はますます高まっている。その利用分野は、素粒子物理等の基礎科学からものづくり等の産業応用まで多岐にわたっており、また、環境・エネルギー、健康・医療、安全・安心等の社会課題解決への貢献も期待されている。

このような中、シミュレーションに求められる精度は高まる一方であり、また、扱うデータも爆発的に増大している。特に、観測機器の高度化に伴うデータの増大が加速しており、例えば、次世代シーケンサは個人のゲノムデータを日々蓄積し、地球観測衛星からは日々大量の観測データが送られてくるといった状況にある。このような大量のデータを最大限に活用したシミュレーションを行うことが可能となれば、例えば、次世代シーケンサのゲノムデータから遺伝子の振る舞いが細胞や臓器にどのように影響するかという問題を全身スケールで予測することが可能になると考えられる。これは、手術前の評価や実験が行い難い事象に対する事前検討を行うことを可能とするものであり、従来の診断や治療の概念を根本的に転換する可能性がある。また、地球観測衛星から日々送られてくる大量のデータを用いて生物・化学過程を含んだ高精度な気候シミュレーションにより、地球環境-人間社会系の相互作用を含めた精緻な予測が行えることとなり、さまざまな政策決定や社会システムづくりへの貢献が期待される。

以上のように、大量のデータを用いた大規模・複雑なシミュレーションを実現することは、多様な科学技術分野における革新的な成果に大きく貢献し、社会的、経済的に大きなインパクトをもたらすものと考えられる。

2012年に稼働開始となる次世代スーパーコンピュータでは10ペタFLOPS級の計算性能が実現することになるが、アプリケーションは、CPUレベルで8万並列(コア数で64万並列)を超える環境下での開発が求められている。今後の計算機開発の方向性からも、CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)を用いたCPUのメニーコア(Many Core)化や並列度が高まる傾向は明らかであり、大規模化・複雑化するシミュレーションを実現するためには、超並列コンピュータを明確に意識した先導的な取組が必要である。例えば、現在のノード間の並列は手動並列によって実現しているが、数十万を超える並列環境にあ

っては別の手法が必要となる等の将来のスパコン開発・利用における問題点が明確になっている。

上記のような課題の解決には、従来のハードウェアとアプリケーションを中心とした研究開発だけではなく、両者を繋ぐソフトウェアであるオペレーティングシステム(OS)やミドルウェア、言語、コンパイラ、ライブラリ、開発支援ツールといったソフトウェアレイヤ(階層)に着目し、それぞれの要素を協調させた研究開発(例えば、将来の超並列時代におけるハイブリッド並列プログラミング手法や、超並列化されることによって発現する大量のファイルI/Oによる性能劣化への対処として超並列分散ファイルシステム等についての研究開発が考えられる)に取り組むことが重要である。

具体的には、ハイブリッド並列プログラミング手法としては、ノード内におけるメモリ転送性能がボトルネックになることを見越した「メニーコア環境におけるプログラミングモデル、言語、コンパイラ技術」、「コアに最適にタスクを割り当てるOS、ミドルウェア」等の研究開発、ノード間制御としては、将来のスパコンが数千万を越えるノード数になった場合でも利用者に負担をかけることなくスパコンを効率的に利用できる「分散並列プログラミング」、分散並列プログラムを実現する「プログラミング言語およびコンパイラや数値計算ライブラリ研究」等のノード間での自動並列を実現させるための研究開発等が考えられる。分散並列ファイルシステムとしては、「OS内部の処理機構(ネットワークプロトコルなど)」、「並列I/Oライブラリ」等の研究をしつつ、ファイルシステムとして重要な役割であるデータ保全も念頭においた上での研究開発等が考えられる。

本戦略目標では、超大規模シミュレーションやデータ解析を要する課題に対応するため、研究室単位の技術シーズをそれぞれの要素技術の協調を考慮しつつ高度化し、将来的な超並列システムの構成要素となることを目指したスーパーコンピューティング基盤技術の研究開発に戦略的に取り組む。これにより、新たな機能、手法の必要性やハードウェアに対する斬新な要求事項等、計算科学技術の革新的な展開を創出することが期待される。

③政策上の位置付け

本戦略目標は、戦略重点科学技術「科学技術を牽引する世界最高水準の次世代スーパーコンピュータ」に該当する。

また、第3期科学技術基本計画分野別推進戦略では、「スーパーコンピュータを継続的に開発するために、スーパーコンピュータ用に開発されるプロセッサ、並列ソフトウェア等の技術が、情報家電等我が国の主要産業の国際競争力を高める形で応用できるよう開発戦略を策定する必要」があるとされている。さらに「重要な研究開発課題」として、研究開発基盤を構成する情報通信分野に関し、「課題解決力や国際競争力の高いサービス提供を可能とする次世代のオープンアーキテクチャ及びその開発基盤の整備」が位置付けられており、具体的には、「技術としてはソフトウェアが鍵となり、オペレーティングシステム、ミドルウェア、コンパイラ等の基本ソフトウェアすべてをオープンアーキテクチャに基づい

て俯瞰的に設計するとともに、それらによって構成されるオープンシステムの課題解決力や国際競争力を確保することが必要」とされている。本戦略目標はこれらに則るものである。

また、「新成長戦略(基本方針)」(2009年12月30日閣議決定)では、「(5)科学・技術立国戦略」に(科学・技術力による成長力の強化)と(研究環境・イノベーション創出条件の整備、推進体制の強化)が挙げられており、このうち「優れた人材を育成し、研究環境改善と産業化推進の取組を一体として進めることにより、イノベーションとソフトパワーを持続的に生み出し、成長の源となる新たな技術及び産業のフロンティアを開拓していかなければならない」、「世界中から優れた研究者を惹きつける魅力的な環境を用意する」の箇所について本戦略目標による推進が図られるものと期待される。

④本研究事業の位置付け、他の関連施策との切り分け、政策効果の違い

スーパーコンピュータを用いた計算科学技術の振興は、科学技術のブレークスルーや国際競争力の強化に資するものであり、日米間だけでなく中国も含めた世界的なスパコン開発競争が激化している。とりわけ米国では、次々世代のスーパーコンピュータの性能であるエクサ、ゼッタFLOPSを目指すハードウェア、アプリケーションの両面からの検討がDOD、DOEを中心に企業や大学も参画して開始されている。

我が国における関連施策としては、2006年度からの「次世代スーパーコンピュータの開発・利用プロジェクト」が挙げられるが、同プロジェクトは10ペタFLOPS級の計算機を開発するものである。本戦略目標は、これを超える将来のスーパーコンピューティングに活用される基盤技術の創出を目指すものである。

⑤将来実現しうる成果等のイメージ

本戦略目標の下での研究により、ハードウェアとアプリケーションをつなぐ基幹的ソフトウェアが強化され、将来の超並列計算環境下における大量データの処理の高効率化が期待できる。その結果、ハードウェアの性能を十分に引き出した高精度のシミュレーションが可能となる。

また、IT分野における基盤技術の確立に継続的に取り組むことにより、スーパーコンピューティング分野のみならず我が国のIT分野全体の技術力の向上に資することとなり、関係分野における人材育成も可能となる。さらに、確立される基盤技術が新製品へ展開されることが期待される。

⑥科学的裏付け

「電子情報通信分野 科学技術・研究開発の国際比較 2009年版」(JST 研究開発戦略センター)には、スーパーコンピュータについて、「日本で開発された地球シミュレータが2002年から約2年半にわたり処理性能でトップの座を占めた。その後、一時低迷が見られた日

本の開発力は、次世代スーパーコンピュータプロジェクトにより復活しつつある。これを持続させるための施策が重要」と記載されている。本戦略目標は、この指摘に対応した取組を行うものであり、将来のスーパーコンピューティング実現のための基盤技術の創出を行うものである。

また現在、我が国の大学の研究室等では、コンパイラ等のソフトウェアやOS等について、将来のスーパーコンピュータや情報関連機器の開発に利用可能な先端的な技術開発が行われているところである。これらの取組をベースに将来のスーパーコンピューティングの基盤技術の研究開発に取り組むことにより、飛躍的な成果が期待できる。

⑦留意点

研究実施にあたっては、本戦略目標下での研究成果が実際に利活用されることが重要であることから、アプリケーション研究者等の計算機ユーザの参加を得つつ研究開発を進めることが好ましい。また効果的な研究開発を促すため、特に重要な技術に集中して進めることが期待される。

また、将来的なシステムインテグレーション等の開発に関する基盤技術の確立のためには、企業と情報を共有しつつ研究開発を実施する等の産学連携が重要であり、また国際連携の促進も期待される。

(2) 研究領域

「ポスト・ペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」

(2010年度発足)

本研究領域は、次々世代(次世代スーパーコンピュータ「京」の次の世代)あるいはそれ以降のスーパーコンピューティングに資する、システムソフトウェアやアプリケーション開発環境等の基盤技術の創出を目指すものである。

具体的には、2010年代半ば以降に多用されるとされる、メニーコア化された汎用型プロセッサや専用プロセッサ(現在GPGPUと呼ばれるものを含む)を用いて構成されるスーパーコンピュータの特徴を生かし、その上で実行されるアプリケーションを高効率・高信頼なものにするシステムソフトウェア(プログラミング言語、コンパイラ、ランタイムシステム、オペレーティングシステム、通信ミドルウェア、ファイルシステム等)、アプリケーション開発支援システム、超大規模データ処理システムソフトウェア等に関する、実用性を見据えた研究開発を対象としている。また、実用上の観点からそれらのソフトウェアレイヤをまたがる研究開発を奨励している。

(3) 研究総括

佐藤 三久(国立研究開発法人理化学研究所計算科学研究機構エクサスケールコンピューティング開発プロジェクト 副プロジェクトリーダー)

(4) 採択課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究代表者	中間評価時 所属・役職	研究課題	研究費*
2010 年度	櫻井鉄也	筑波大学・教授	ポスト・ペタスケールに対応した階層モデルによる超並列固有値解析エンジンの開発	185
	建部修見	筑波大学・教授	ポストペタスケールデータインテンシブサイエンスのためのシステムソフトウェア	246
	中島研吾	東京大学・教授	自動チューニング機構を有するアプリケーション開発・実行環境	370
	堀敦史	理研・上級研究員	メニーコア混在型並列計算機用基盤ソフトウェア	359
	丸山直也	理研・チームリーダー	高性能・高生産性アプリケーションフレームワークによるポスト・ペタスケール高性能計算の実現	476
2011 年度	塩谷隆二	東洋大学・教授	ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発	189
	滝沢寛之	東北大学・准教授	進化的アプローチによる超並列複合システム向け開発環境の創出	332
	千葉滋	東京大学・教授	ポスト・ペタスケール時代のスーパーコンピューティング向けソフトウェア開発環境	255
	南里豪志	九州大学・准教授	省メモリ技術と動的最適化技術によるスケーラブル通信ライブラリの開発	292
	藤澤克樹	九州大学・教授	ポストペタスケールシステムにおける超大規模グラフ最適化基盤	294
2012 年度	遠藤敏夫	東京工業大学・准教授	ポスト・ペタスケール時代のメモリ階層の深化に対応するソフトウェア技術	239
	近藤正章	東京大学・准教授	ポストペタスケールシステムのための電力マネジメントフレームワークの開発	226
	野田五十樹	産総研・総括研究主幹	超大並列計算機による社会現象シミュレーションの管理・実行フレームワーク	263
	朴泰祐	筑波大学・教授	ポスト・ペタスケール時代に向けた演算加速機構・通信機構統合環境の研究開発	310
			総研究費	4,036

* 研究費：2014年度上期までの実績額に2014年度下期以降の計画額を加算した金額

下記「5. 研究領域の運営について」でも後述するが、各研究課題の進捗・成果の状況にもとづき、研究が順調に進み成果の出ている研究課題については研究費を手厚くし、また研究遂行上の困難・問題にぶつかった研究課題については研究内容の変更・絞込を求めるなど、研究領域全体として研究を加速し、成果を最大化するための施策を行っている。

2. 研究総括のねらい

①社会的・科学的課題解決へのスーパーコンピュータによる貢献を持続させるための高機能・高信頼なシステムソフトウェアを研究・開発する

超大規模計算・記憶資源を活用した数値シミュレーションやデータ解析は、理論や実験・観測に加えて新たに登場した科学・技術の第三の方法論として、その役割の重要性が飛躍的に高まっている。これに呼応して、欧米、中国ではスーパーコンピュータの開発競争が激化し、我が国でも、2012年には次世代スーパーコンピュータ「京」の正式稼働が開始され、「京」上でのアプリケーション実行により、様々な社会的・科学的課題の解決に重要な貢献が多数なされている。一方、「京」の計算資源の利用は、様々なアプリケーション実行の需要により、すでに殆ど飽和状態に近く、多くの研究者は長い待ち時間の末に計算結果を手にするのが常態となっている。このようなスーパーコンピュータの重要性や需要に鑑み、各国でもすでに次の世代のスーパーコンピュータの開発・研究が(一部は水面下で)進められている。

このような状況下、スーパーコンピュータをフル活用し、社会的・科学的課題の解決に持続的に貢献するためには、スーパーコンピュータ上で実行されるプログラム(シミュレーションプログラムやデータ解析プログラムなど)が現在のスーパーコンピュータで効率良く開発されかつ効率よく実行されることのみならず、これからのさらなる性能を目指して大きく変化していくスーパーコンピュータのハードウェア性能を十分に引き出すことを可能にする高機能・高信頼性を有するシステムソフトウェアの存在が不可欠である。つまり、スーパーコンピュータによる科学・技術の進歩・イノベーション、社会的課題解決への持続的貢献は、進歩・変化していくスーパーコンピュータに向けたシステムソフトウェアの持続的研究開発なくしてはありえないとも言える。

本研究領域では、このような高性能・高機能・高信頼性システムソフトウェア、すなわち、プログラミング言語、コンパイラ、ランタイムシステム、オペレーティングシステム、通信ミドルウェア、ファイルシステム等や、アプリケーション開発支援システム(数値計算ライブラリを含む)、超大規模データ処理システムソフトウェア等の研究を実施するが、上述のスーパーコンピュータによる持続的貢献の観点から、単なる新規性の高いアイデアとその実現性を示すためのアカデミックな机上研究に留まらず、実際にシステムソフトウェアを開発し、またそれを公開・発信し、関係するコミュニティで利用されるようになるこ

とを各研究課題の目標として設定することを要求し、評価においてもこのことを重視する旨を明示した。

その結果として、すでいくつかのソフトウェアの成果がでており、公開されている。櫻井チームの固有値計算ライブラリはすでいくつかの大規模なアプリケーションに利用されている。また、藤澤チームでは、京コンピュータを用いて、グラフ計算のランキングである Graph500 において 1 位を獲得している。

②将来のスーパーコンピュータ研究・開発の方向性を模索し提示する

本研究領域の研究課題提案においては、次世代以降のスーパーコンピュータのアーキテクチャが、メニーコア化された汎用型プロセッサや専用プロセッサ(現在 GPGPU と呼ばれるものを含む)を用いて構成されるという方向性以外明確になっているとは言えないことから、研究・開発で前提としているアーキテクチャを出来る限り詳述するよう求めた。また、採択された各研究課題には、各々が提案時に示したアーキテクチャ上で、研究開発するシステムソフトウェアが効率良く稼働すること(もしくはその可能性が高いこと)の実証および、その主たる成果をオープンソースとして公開することを要請している(成果のシステムソフトウェア上で実際にアプリケーションソフトウェアが効率良く実行されることが望まれることは言うまでもない)。

また、本研究領域での採択課題の研究・開発期間は最長 5 年間であるが、上述の持続的貢献の観点から、中間評価の段階で、実用性の高いシステムソフトウェアが最終的に実現される見通しが付くことを、相当程度示してもらったこととした。これは、本研究領域を推進することにより、本研究領域の期間後期(2015 年頃から)において、スーパーコンピュータ「京」に続く次世代以降の我が国のスーパーコンピュータ、ポスト京に活用され得るシステムソフトウェア基盤技術の形成に貢献することも想定している。また、次世代以降の超並列コンピューティングによるスーパーコンピュータのシステムアーキテクチャ、ソフトウェアアーキテクチャの方向性を示すことも目論んでいる。このために、海外研究者や企業と情報を共有しつつ研究開発を実施する等の国際連携や産学連携を志向した。

上記を実現するために、これからの領域の方針として、現在、開発が進められているポスト京コンピュータにおいて、本領域にて開発されたソフトウェアの展開・利用による貢献の方策についても検討する所存である。

さらには、各研究課題が終了しはじめる頃(2016 年頃)から、本研究領域の成果を用いたシステムソフトウェアを利用して、超並列計算機システム上における大規模データに基づく新しい大規模シミュレーション・予測手法等が生まれ続け、環境分野からライフサイエンス分野に至る広範な分野で、科学・技術の新たな展開がもたらされることも期待している。

③次代のスーパーコンピュータ分野におけるリーダーを育成する

社会的・科学的課題解決へのスーパーコンピュータによる貢献を持続させ、またそのために必要な高機能・高信頼性システムソフトウェアの持続的研究開発を行い、また将来のスーパーコンピュータ研究・開発の方向性を模索・提示するためには、当然のことながら、それを担うことが出来る人材が不可欠である。この観点から、将来を嘱望される若手研究者を積極的に登用し、また研究目標・研究体制・研究計画において、上述の「ねらい」や「5. 研究領域の運営について」で後述する運営方針の範囲内において、研究者の自主性を尊重した柔軟な対応を行うことで、優れた研究成果を創出することだけではなく、我が国や世界の次代のスーパーコンピューティング分野研究・開発を担うリーダーを育成することも目論んでいる。例えば、研究課題提案に際しては、課題提案者がその研究構想を実現するために必要十分な研究体制で良いので、総額 1.5 億～3 億円未満 (CREST 種別 I) の比較的小規模な提案もエンカレッジした。

3. 研究課題の選考について

戦略目標にしたがって、ポスト・ペタスケールのコンピューティング技術として、メモリーコアプロセッサや加速演算機構などのハードウェアとアプリケーションソフトウェアの両者を繋ぐソフトウェア、すなわち、オペレーティングシステム (OS) や通信ミドルウェア、データ入出力ソフトウェアなどのシステムソフトウェア、プログラミングモデルや言語・コンパイラ技術、数値計算ライブラリ・アルゴリズム、開発支援ツールの分野から、課題を採択した。特に、これからのアプリケーション分野の開拓に向けて、グラフ処理や社会シミュレーション技術のテーマも取り入れた。

研究課題の選考は、まず提案書等の書面をベースに一次選考をおこない、次いで領域アドバイザーとの合議を踏まえて採択数のおおよそ二倍程度の候補提案を選び、実際にヒアリングを実施する、という方針をとった。ヒアリングでは、書面提案での評価や印象をある程度忘れて評価することにして、プレゼンテーションによって研究内容が明確に示されており、またポスト・ペタスケール時代において有用性・実現性があるか、更にはチャレンジングで新規性があるかどうかを重視した。また、提案者が自己の提案のどの部分にどの程度リスクがあるかを把握しているかどうかも参考にした。

これらの方針に従って領域アドバイザーと協議し、合議結果を概ね尊重して採否を決定した。具体的には、三期にわたる選考の結果、合計 14 研究課題を採択した。この結果、本研究領域のテーマと関連した分野において国内外で活躍を続けている主要若手研究者を本研究領域に参加させることができ、またこれに加え、これまで目立たなかったが良い研究実績がある、あるいは良い潜在力を持った研究者を結集することができた (例：櫻井鉄也、藤澤克樹など)。

また、上記の方針に加え、「2. 研究総括のねらい」で述べたこととも関連するが、本研究領域のテーマと関連した分野において、既に大変良い実績を持ち、あるいは現在も顕著な

成果をあげ続けている国内有数の研究者は、あえて研究代表者とはせず、むしろ領域アドバイザーという形での本研究領域への参画を要請することで、スーパーコンピューティング分野において今後我が国のリーダーとなり、次代を担うことが予想・期待される若手研究者を、研究代表者として相当程度網羅することができたと考えている。

4. 領域アドバイザーについて

領域アドバイザー名	現在の所属	役職	任期
青柳 睦*	九州大学	教授	2010年10月～2014年12月
石川 裕	理研	PJリーダー	2010年10月～2018年3月
久門 耕一	(株)富士通研究所	取締役	2010年10月～2018年3月
河野 健二	慶應義塾大学	准教授	2010年10月～2018年3月
小林 広明	東北大学	教授	2010年10月～2018年3月
佐藤 三久	筑波大学	教授	2010年10月～2015年3月
下條 真司	大阪大学	教授	2010年10月～2018年3月
中川 八穂子	(株)日立製作所	シニアPJマネージャ	2010年10月～2018年3月
中島 浩	京都大学	教授	2010年10月～2018年3月
牧野 淳一郎	理研	副PJリーダー	2010年10月～2018年3月
松岡 聡	東京工業大学	教授	2010年10月～2018年3月
高橋 桂子	海洋研究開発機構	地球情報基盤センター長	2015年6月～2018年3月

* 2014年12月逝去

領域アドバイザーの人選においては、「2. 研究総括のねらい」や「3. 領域アドバイザーについて」でも触れたように、研究者として「現役」であり、本来ならば自らのこれまでの研究をベースにして、本研究領域で研究代表者として十分活躍できるような研究者を選んだ。また、本研究領域の対象分野をおおよそカバーできる必要最小の人数に抑えた。

このような人選をした結果、年齢層やポジションが低めの若手研究者を研究代表者として参画させ、優れた「現役」の研究者でもある領域アドバイザーからの助言・指示を得ることができる体制を実現できた。これにより、スーパーコンピューティング分野における次代のリーダー育成にも大いに貢献できていると考える。

5. 研究領域の運営について

①運営方針：研究者の自主性と研究総括・領域アドバイザーからの指示・助言の両立

研究領域の運営方針としては、研究代表者・研究参加者の自主的な意思と、研究総括・領域アドバイザー側からの指示・助言とをバランス良く両立させることに努めた。具体的

には、研究代表者等による領域会議での発表、サイトビジットでのヒアリング、また国内外の学会での接触その他をきっかけとして、メールや面談など、研究代表者と直接コミュニケーションを取ることに努め、研究代表者が研究上で望む点、迷っている点、あるいは気が付いていない点などを早期に把握し、対処・指導を行うようにしている。例えば、堀敦史、滝沢寛之、千葉滋の研究課題において、上述のコミュニケーションおよび対処・指導にもとづいて、より円滑な研究の遂行および成果の創出を実現するための研究体制および計画の修正を行うなどした。

②研究の円滑な遂行・成果創出加速等のための柔軟な研究費配分変更

上述のような運営方針のもと、研究計画修正の実効性・有効性を高めるためには、当然のことながら研究費の配分についても柔軟に修正・変更する必要がある。実際、2013年度・2014年度の研究費配分においては、各研究課題の進捗・成果の状況を把握・検討し、研究が順調に遂行され成果の出ている研究課題については、総括裁量経費を用いる等して研究費を増額し、また研究遂行上の困難・問題にぶつかった研究課題については研究内容の変更・絞込みを求め、またこれに伴い予算を減額するなど、研究領域全体として研究を加速し、成果を最大化するための研究費配分を行っている。具体的には、2013年度には3課題の予算増額、2014年度には5課題の予算増額・1課題の予算減額を行っている。特に、堀敦史、藤澤克樹、櫻井鉄也、千葉滋が代表者を務める採択課題については、研究総括や領域アドバイザーの評価や意向に従ったかたちで、チーム内編成や予算配分について当初予定を修正している。藤澤や櫻井のチームの成果は、評価が高く、研究を強化する必要があると判断されたため、研究を加速できるように重点配分を行った。

③研究課題間連携による実用性の高いソフトウェアの実装の促進

本領域の各レイヤのソフトウェアは、レイヤ間およびレイヤ内で互いに関係しているものが多い。それぞれのソフトウェアの価値を高め、高度化するためには、関連するソフトウェアを相互に連携させることが重要である。

各研究課題間での連携も積極的に推進しており、一課題を除き、ほぼ全ての課題が何らかの形で他の研究課題との連携を行っている。これにより、「2.研究総括のねらい」でも触れたように、単なる机上研究に留まらず、実際に他チームにも利用できるレベルの実用性を持ったシステムソフトウェアの実装を促進している。例えば具体的には、藤澤克樹と遠藤敏夫の研究課題が連携し、藤澤らが研究・開発している半正定値計画問題ライブラリSDPARAの密行列演算部分を、遠藤らが研究・開発しているメモリ階層を有効活用する手法を応用することで、大幅な性能の改善を実現することが出来た。また、千葉滋と野田五十樹の研究課題が連携し、野田らの研究・開発するエージェントシミュレーションライブラリNetMASを、千葉らの研究・開発している分散プログラミング環境、またそのノウハウを応用して大規模並列化するなどの取り組みを進めている。この他にも非常に多くの課題間

連携が行われている。

これから、後半に向けて、各チームのソフトウェアの完成度が高まりつつある中で、連携を行うミーティングを領域として積極的に支援し、シナジー効果を高めていく計画である。たとえば、すでに朴チーム、堀チーム、南里チームでは PGAS プログラミング言語と通信ソフトウェアレイヤの連携に関する国際ワークショップを計画しており、これは JST の国際連携強化のための予算を当てて開催するものである。

④国際連携・産学連携促進によるスーパーコンピューティングの方向性の模索・提示

上記に加え、これも「2. 研究総括のねらい」で簡単に触れたように、国際連携や産学連携を積極的に促すことで、次代のスーパーコンピューティングにおけるシステムアーキテクチャ・ソフトウェアアーキテクチャの方向性を、国際的な競争・協力関係の中で、より現実的な説得力を持って示すことも目指している。特に、平成 26 年 12 月には国際シンポジウム ISP2S2(International Symposium on Post Petascale System Software)を研究領域主催で開催し、海外のトップクラスの研究者 13 名を招き招待講演を依頼するとともに、本研究領域の全ての研究課題の研究代表者・全ての主たる共同研究者が研究成果を口頭発表・ポスター発表等によって発信した。また、将来のスーパーコンピューティングの方向性についても議論を行い、海外との共同研究を更に促進することを目指した。更には、産学連携の観点から、スーパーコンピューティングに関連する企業の展示も広く募集し、実際に 11 社の企業展示が行われた。

上記研究領域主催シンポジウムの他にも、各研究課題主催の国際シンポジウム・ワークショップ・セミナー等も数多く開催されている。

また、この分野で著名な国際会議 SC においては、本領域の研究展示ブースを開設し、研究成果の国際的な発信を行っている。

6. 研究の経過と所見

「2. 研究総括のねらい」で示したねらいに対して、研究は順調に進行している。社会的・科学的課題解決へのスーパーコンピュータによる貢献を持続させるための高性能・高機能・高信頼なシステムソフトウェアの研究・開発に対しては、研究領域全体で発表論文数が 500 本(うち国際論文が 419 本)、開発ソフトウェアが 176 本(うち公開済み 81 本)、口頭発表数は 1,554 件(うち招待講演数は 331 件)、また各種受賞も 23 件にのぼるなど、極めて順調に進行しているといえる。例えば、藤澤チームの研究課題では、いわゆるビッグデータ処理に関連して今後重要性が更に増すと考えられているグラフアルゴリズムについて、国際的に最も有名で大きなベンチマークコンテスト「Graph500」で世界一を含む上位入賞を複数回果たすなど、優れた成果を出している。また、丸山チームの研究課題では、構造格子差分法の参照実装の一つであるフェーズフィールド法を GPU4,000 台用いた高効率な実装に成功し、スーパーコンピューティング分野において世界で最も大きく権威のある学会

ACM/IEEE Supercomputing(SC11)において、その年に最も優れた成果を上げた研究者に与えられる「ゴードン・ベル賞」を受賞している。また、朴チームの研究課題では、スーパーコンピューティングのより現実的な性能を競う世界的なベンチマークコンテスト「HPC Challenge」の、プログラムの書き易さ・生産性を考慮したクラス「Class 2」において最も優れた性能を上げ、「ベストパフォーマンス賞」を受賞した。その他にも、国際的な水準に照らしても非常に優れた研究成果が多数発表され、また進行しつつあり、更には「5. 研究領域の運営について」でも述べた通り、研究課題間の連携も積極的に行われるなど、高性能・高機能・高信頼なシステムソフトウェアの持続的かつ実用を見据えた研究・開発に大きく貢献することができたと考えている。また、今後の発展にも大きく期待できる状況にあるといえる。

一方、スーパーコンピューティングを用いた社会的・科学的課題解決への貢献の観点からも、優れた成果が出ている。例えば、塩谷チームの研究課題では、東日本大震災時に石巻市で発生した津波遡上の状況を大規模かつ三次元でシミュレーションする手法を実現、実際にシミュレーションを行うことに成功し、将来の津波被害の予測や被害の予防にスーパーコンピューティングが応用できる可能性を示した。また、スーパーコンピュータ「京」を用いた世界最大規模の全球大気アンサンブルデータ同化の実証実験において、櫻井チームの研究課題において開発された密行列固有値計算ライブラリが用いられている。また、丸山チームの研究課題では、東京都心部の気流を1mという非常に細かい解像度でシミュレーションする手法を実現し、実際の都心部の建造物のデータをもとにシミュレーションを行うことに成功している。その他にも、社会的・科学的課題の解決へ貢献する優れた研究成果が多数発表されており、また成果の報道発表も多数行われるなど、非専門家向けの人々に向けた情報発信も積極的に行われている。

将来のスーパーコンピューティング研究・開発の方向性の模索・提示の観点からも優れた研究成果・普及効果が出ている。例えば、藤澤チームの研究課題によって得られた大規模グラフ探索技術に関する各種成果(上述の Graph500 の成果も含む)について、国内外の民間企業との共同研究・連携が進んでおり、次世代のスーパーコンピュータにおいて必要となると考えられている、いわゆるビッグデータ処理の手法・実装について、今後大きな影響を与えるものと考えられる。また、丸山チームの研究課題において開発されている MassiveThreads(軽量マルチスレッド処理ライブラリ)が、米国企業において研究・開発が進められている次世代のスーパーコンピューティング向けの並列プログラミング言語 Chapel のスレッド実行基盤として採用されている。また、研究成果の知財化に関しては、南里チーム研究課題から2件、野田チームの研究課題から1件の特許出願が行われている。また、「5. 研究領域の運営について」でも述べた通り、研究領域主催で国際シンポジウム(ISP2S2)を開催し、海外のトップクラスの研究者を招待して本研究領域の研究成果の発信や情報交換、共同研究の提案、また次代のスーパーコンピュータに向けた方向性の議論等を行ったり、また各研究課題主催の国際シンポジウム・ワークショップ・セミナー等も数

多く開催されたりする等、総じて国際連携・産学連携が積極的に推進され、優れた成果を数多く上げている。

次代のスーパーコンピュータ分野を担う人材の育成に関しては、「3. 研究課題の選考について」や「4. 領域アドバイザーについて」でも述べた通り、既に大変優れた実績を持ち、あるいは現在も優れた成果をあげ続けている国内有数の研究者は敢えて研究代表者とはせず、領域アドバイザーの形で本研究領域への参画を要請することで、次代のスーパーコンピューティング分野の研究・開発を担うことが予想・期待される若手研究者を相当程度網羅することができた。また、実際に本研究領域に参加している研究者は上述の通り、国際的な水準に照らしても優れた研究成果を多数あげており、またこれも上述の国際シンポジウム ISP2S2 等の際に、海外のトップクラスの研究者と交流し、あるいは共同研究を進めるなど、人材育成も順調であると考えている。この事的一端を表す数字を上げれば、本研究領域に参加している研究者のうち、13 名が昇進し(組織間の異動の際の昇進を含む)、またそれ以外にも 8 名が組織間を異動しており、この点だけを見ても人材育成が着実に行われていると考えられる。

7. 総合所見

前項までに述べてきた通り、「1. (1)戦略目標」と「1. (2)研究領域」や、それを受けて本研究領域で実現を目指したこと(「2. 研究総括のねらい」)、具体的には、社会的・科学的課題解決へのスーパーコンピュータによる貢献を持続させるための高機能・高信頼なシステムソフトウェアの研究・開発、将来のスーパーコンピュータ研究・開発の方向性の模索・提示、また次代のスーパーコンピュータ分野におけるリーダーの人材育成、これらのいずれについても、「3. 研究課題の選考について」や「4. 領域アドバイザー」に述べたような積極的な若手研究者の登用、また「5. 研究領域の運営について」で述べたような本研究領域の運営方針(研究者の自主性と研究総括・領域アドバイザーからの指示・助言の両立)、適切な研究進捗等の情報の把握とそれに応じた研究計画・研究費配分の柔軟な変更(研究費の増額による研究・成果創出の加速、または研究内容の変更・絞込など)、研究課題間連携・国際連携・産学連携などの促進によって、現時点においても順調に実現されており、また優れた研究成果も多数出ていることなどから、本研究領域の運営は円滑・順調に行われていると考えている。

また、「2. 研究総括のねらい」において簡単に言及したが、スーパーコンピュータ「京」の後継となる我が国のフラッグシップスーパーコンピュータ、ポスト京の開発プロジェクト(FLAGSHIP2020 プロジェクト)が 2014 年度からスタートし、基本設計が進められている。2015 年中にはシステムの詳細設計が開始される見込みであることから、本研究領域の開始前の時点に比べて、本研究領域の重要性は益々高まっていると認識している。

上述の本研究領域の運営状況や重要性の高まり等を鑑みると、今後の本研究領域の進むべき方向性としては、基本的にはこれまでの運営方針を堅持しつつ、更なる研究・成果創

出・成果還元の加速を目指すことが求められていると考えられる。これから、後半に向けては、本領域の成果を我が国のフラグシップであるポスト京への展開・貢献に結び付けていく方策について検討していく。また、終了するチームの成果であるソフトウェアについては終了とともに普及が行われなくなることをないように、ポスト京での展開以外にも、領域が存続する限り、普及にかかわる活動については支援していくことが重要であると考えている。

また、研究課題間の連携を更に促進することで、更に実用性の高い研究成果の創出を促すことも重要であると考えている。そのためには、チーム間の連携のワークショップやシンポジウムなどのミーティングを領域として積極的に支援してシナジー効果を高め、成果の高度化を目指す。さらに、研究者間の連携を更に深めることによって、いわゆる「横串」を通し、領域の各チームのメンバーと本領域の人材育成により育った若手研究者を中心に、我が国の将来のスーパーコンピューティングをリードする集団の形成の先駆となれればと考えている。

国際連携・産学連携についても同様に更に促進し、優れた研究成果の創出・発信や産業への応用を加速することで、世界のスーパーコンピューティング研究分野における我が国の存在感を更に高めることも重要と考えている。この観点から、ドイツにおけるエクサ級コンピューティング向けのソフトウェア研究・開発プロジェクトである SPPEXA と連携し、ドイツ研究財団(DFG)・フランス国立研究機構(ANR)・科学技術振興機構(JST)の三者共同で新たに SPPEXA-2 というイニシアティブを立ち上げ、ドイツやフランスの研究者と国際共同研究を行い、研究成果の最大化や世界への発信を促進する計画も進めている(既に本研究領域の研究代表者を対象とした公募は終了し審査中であるが、採択された場合に実際に共同研究が開始するのは2016年1月からの予定である)。

以上