

**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」**

研究領域事後評価用資料

研究総括：佐藤三久

2018年2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)採択研究課題・研究費.....	5
2. 研究領域および研究総括の設定について.....	6
3. 研究総括のねらい.....	7
4. 研究課題の選考について.....	9
5. 領域アドバイザーについて.....	10
6. 研究領域の運営について.....	11
7. 研究の経過と所見.....	13
8. 総合所見	23

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「メニーコアをはじめとした超並列計算環境に必要な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」

① 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。

②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。

③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。

④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。

⑤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」(国立研究開発法人科学技術振興機構(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。

⑥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・フラッグシップ 2020 プロジェクト・副プロジェクトリーダー)

(4) 採択研究課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究代表者	研究終了時 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	226
	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	260
	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	402
	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	360
	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	512
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	229
	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	369
	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	260
	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	293
	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	298
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	241
	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ージメントフレームワークの開発	230
	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	268
	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	352
			総研究費	4,300

* 研究費：2017 年度上期までの実績額に 2017 年度下期の計画額を加算した金額

2. 研究領域および研究総括の設定について

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」

本研究領域は、科学・技術の新たな展開のための基盤として重要であるスーパーコンピューティングについて、次々世代(次世代スーパーコンピュータ「京」の次の世代)あるいはそれ以降におけるスーパーコンピュータの性能・機能が十分に引き出されるための、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に関する研究開発を対象としている。

本研究領域では、メニーコア化された汎用型プロセッサや GPGPU 等の専用プロセッサを用いて構成されるという、次々世代以降のスーパーコンピュータのアーキテクチャの方向性を念頭に置いた上で、その特徴を生かしつつ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ためのシステムソフトウェア、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の研究開発を行うとしている。したがって、本研究領域は、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とは別に、両者をつなぐレイヤであるシステムソフトウェアの観点から次々世代以降のスーパーコンピューティングの高効率化・高度化を目指す本戦略目標の達成に向けて適切に設定されている。

また、システムソフトウェア分野全般を対象とするとともに、大規模計算機システムが実際に有効活用されるために必要なアプリケーション開発支援システムや超大規模データ処理システムソフトウェア等までも対象にしており、さらに実用性を見据えて、それらのソフトウェアレイアをまたがる研究開発が重視されている。したがって、多様な分野の研究者の協働が促され、本研究領域から創出される技術が将来のスーパーコンピューティングにおいて実際に使われるような技術の創出を図ろうとする優れた研究提案が多数見込まれる。

(JST 記載)

研究総括 米澤 明憲 (2010年4月～2015年3月)
佐藤 三久 (2015年4月～2018年3月)

米澤明憲氏は、ソフトウェアシステムにおける「並列オブジェクト」という概念を自ら着想し、その後(1)「並列オブジェクト」に基づくプログラミング言語、(2)「並列オブジェクト」の高次・動的拡張方式、(3)「並列オブジェクト」の数学的モデル、(4)「並列オブジェクト」に基づいて構築されたソフトウェアの超並列コンピュータでの高効率な実行方式、などを次々に研究開発し、顕著な業績を上げてきている。「並列オブジェクト」は、

米国リンデン社の「セカンドライフ」や、「ツイッター」システムに採用されている、また米国のいくつかのスーパーコンピュータセンターで多用されている分子動力学シミュレーションプラットフォーム NAMD が並列オブジェクト言語システム CHARM++を用いて実装されている、など応用的・実用的にも重要な展開が進んでいる。同氏は、これらに前後して、1999年に米国計算機学会(ACM)より ACM Fellow の称号を、2008年に国際オブジェクト技術協会(AITO)より Dahl-Nygaard(ダール・ニゴール)本賞を、2009年には紫綬褒章を受けるなど、その業績と関係分野への貢献は国内外からきわめて高く評価されており、本研究領域について幅広く先見性・洞察力を有していると思われる。

また、同氏は、東京大学情報基盤センター長を歴任するとともに、日本ソフトウェア科学会理事長のほか、米国計算機学会(ACM)プログラミング言語部会(SIGPLAN)幹事、ドイツ国立情報科学技術研究所(GMD)科学顧問をはじめとして、国際学会・論文誌等における要職を歴任してきている。

以上を総合すると、同氏は本研究領域について適切な研究マネジメントを行う経験、能力を有しているとともに、関連分野の研究者から信頼され、公平な評価を行いうると見られる。

佐藤三久氏は、2015年4月に米澤明憲氏の後任研究総括として着任した。領域発足当初から領域アドバイザーとして領域運営・活動に大きく貢献しており、領域関係者、JST関係者の総意により後任研究総括に設定された。

(JST 記載)

3. 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、我が国では、2012年に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、多くの需要を満たす新たなスーパーコンピュータが要望されている。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・研究が進められている。我が国でも2014年から、「京」コンピュータの後継機のポスト「京」を開発するフラッグシップ2020プロジェクトが開始されている。

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性能・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、数値計算ライブラリ、ジョブ管理実行システム、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こととした。また、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した。

(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時においては、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かったことから、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た。

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た。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、本研究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した。

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、広範な科学技術の分野で新たな展開がもたらされることも期待することとした。

(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考慮の一つとした。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。

4. 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：櫻井鉄也氏、藤澤克樹氏など)。

また、上記の方針に加え、「3. 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の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。

5. 領域アドバイザーについて

領域アドバイザー名	終了時の所属	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06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、「3. 研究総括のねらい」や「4. 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。

6. 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た。例えば、堀敦史氏、滝沢寛之氏、千葉滋氏、遠藤敏夫氏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、各年度にわたって研究費配分について、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た。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、堀敦史氏、藤澤克樹氏、櫻井鉄也氏、千葉滋氏、遠藤敏夫氏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。藤澤氏や櫻井氏、近藤氏のチームの成果は、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】

本研究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た。例えば具体的には、藤澤氏と遠藤氏の研究課題が連携し、藤澤氏らが研究・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、遠藤氏らが研究・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、近藤氏の省電力に関する研究については、藤澤氏や遠藤氏のアプリの消費電力評価を行い、電力からの評価を与えるなどの協力が行われた。また、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 LENS (Language, Network and System Software) 2015 を開催し、国際的な連携強化を図った。

この他にも多くの課題間連携が行われた。

(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「3. 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。

本研究領域では、2014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。

国際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である。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 というイニシアチブを立ち上げ、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こととした。結果として、本研究領域からは、中島、櫻井、朴、滝沢、塩谷、丸山、千葉の 7 チームが採択され、2016 年 4 月から本研究領域の終了まで、研究が延長されることになり、国際連携により研究成果の充実を図ることができた。

2017 年 12 月には、SPPEXA の研究パートナーも招待し、2 回目の国際シンポジウム ISP2S2 を開催した。加えて、前回に引き続き、海外のトップクラスの研究者も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が成果について発表した。

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た。

さらに、この分野で著名な国際会議 SC においては、本研究領域の展示ブースを開設し、研究成果の国際的な発信を行った。

また、産学連携について、積極的にエンカレッジした。顕著な例としては、藤澤チームにおいてグラフ解析に関する成果を活用して多くの企業と共同研究を行うことになった。

7. 研究の経過と所見

各研究チームでの成果について簡単に述べる。いくつかのチームの研究は、ドイツ・フランスとの共同研究プログラム SPPEXA により延長されている。

櫻井チームにおいては、取り組んだ固有値計算ソフトウェアはペタスケールシステムで十分な性能を有し、ポストペタ・エクサスケールも見据えた階層的な実装や大規模化にも成功しており、既にいくつか重要なアプリにも導入され、実アプリで従来できなかった規模の計算を実現した。さらに、想定されていなかった新たな展開としてビッグデータや AI などの新規の分野の展開の可能性も示された。また、企業の実アプリに利用されるなどの社会的な貢献が顕著であり、新規のベンチャー企業の立ち上げなども行われ、期待以上の展開が行われた。その結果、学術的に意味のある成果をあげ、かつ産業界へのアウトリーチや今後の発展も期待できるものとなった。この研究課題は SPPEXA で継続され、日独の協力の下、非線形固有値問題への拡張、耐故障技術の開発、ブロックやシフトなどの性質を利用した疎行列線形ソルバの開発、統計的手法を利用した効率的なパラメータ推定法の開発および実アプリケーションに対する高性能実装技術の開発を行った。開発された固有値ルーチンの非線形固有値問題への高度化を行うとともに、ドイツ側のソフトウェアに組み込み、高い性能が得られることを確認した。

中島チームでは、数値計算の計算機科学の研究者とアプリケーション研究者が密接に連携し、アプリケーション開発に直結する離散化モデルから基本ライブラリの整備、そしてコード自動最適化までのアプリケーション開発フレームワークの開発が行われた。この他にも、多くのライブラリ群が開発され、これらをまとめて開発されたソフトウェアを ppOpen-HPC として積極的に公開しており、研究領域内外のアプリ研究者と連携による実用的な成果も得られている。SPPEXA での継続研究においては、ppOpen-HPC を基に、ポスト「京」等メニーコアアーキテクチャ向けのアプリケーション開発フレームワーク主として、メニーコアアーキテクチャに対応した pK-Open-HPC を開発した。その一つのコンポーネントである、高性能な疎行列計算向け前処理付き反復法ソルバ pK-Open-SOL では、エクサスケールを想定し、汎用的な多色順序付け用の階層的な並列化手法を提案するとともに、悪条件な連立一次方程式を想定した安定で効率的なソルバを開発し、ドイツ側の従来の反復解法では求解が困難であった量子科学アプリケーションから導出される大規模な固有値問題を日本側が開発した堅牢なソルバにより解けることを示した。

建部チームにおいては、すでに実用に供しているファイルシステム Gfarm をベースに、ポストペタ・エクサスケール時代のニーズ対応できる次世代大規模ファイルシステムに向けた現実的なプロトタイピングと評価を行った。ビッグデータ解析、AI などデータサイエンスへの期待の高まりから、高性能分散データ処理を行う上で大容量・高性能ストレージの実現は重要な課題であり、研究期間を 1 年延長してシミュレーションによる高性能化、高信頼化の評価を行い、大規模システム適用可能性を検証した。さらに、Gfarm の産業界への展開のため NPO 法人が設立され、実用でのファイルシステムに必要な安定性、ソフトウェア品質の確保、大規模な実証実験などを進めた。

堀チームは、メニーコア時代の新しいプロセスモデルとして Partitioned Virtual Address Space (PVAS) を提案した。このモデルは改良され、ポスト「京」においても提供される計画である。また、耐故障のノード交換アルゴリズム sliding substitution や並列 I/O 技術など、ポスト・ペタスケールの計算技術への貢献が期待できる成果が得られた。

丸山チームにおいては、高性能 GPU 実装とそれに基づく高性能・高生産性プログラミングフレームワークの研究開発で多くの有用な成果を達成しており、得られた成果のインパクトは特に流体、構造分野のアプリの高性能 GPU 実装の点で国際的に高く評価された。また、ExaFMM や MassiveThreads など開発されたソフトウェア、ライブラリはすでに実績のあるソフトウェアに組み込まれ利用されるなど、成果の活用も進んでいる。また、気象コード向けに開発した Hybrid Fortran フレームワークにより、指示文により拡張された Fortran によるプログラムから CPU や GPU 向けコードを自動生成する研究を実施した。SPPEXA においても研究は継続され、日独仏国際共同研究として DSL 開発と経験を活かし、正 20 面体全球気候モデルである NICAM を対象に、スイススーパーコンピューティングセンターおよびスイス気象庁を中心に開発されているフレームワーク GridTools の評価を行った。

塩谷チームは、階層型領域分割法(HDDM)を中心とする、ソルバおよび入出力・可視化ライブラリを含む大規模数値計算データ処理システムおよび、分散メモリ並列 MPS 陽解法や連続体力学向け DSL など、目標としたポスト・ペタスケールに向けた大規模なシステムでのシミュレーションを可能とする数値計算ソフトウェアの開発を行った。高い強スケーリング性能により「京」の 8 千の計算ノードを用いて世界的にトップクラスとなる 1 千億自由度規模の有限要素解析に成功している。開発したソフトウェアを用いた具体的な計算科学での成果についても、津波遡上解析など社会的なインパクトが大きい成果や電磁解析での企業との共同研究を行っており、商用化を含むイノベーション創出に結びつくものも見られる。また、現在、実施されているポスト京の重点課題プロジェクトと連携しており、ポスト京への直接的な展開も期待される。SPPEXA においては、階層型領域分割法(HDDM)の技術を発展させて、学術研究・産業界で需要が高い有限要素法(FEM)と粒子法による連続体力学のシミュレーションに対象として、高性能なシミュレーションのためのソフトウェア開発を行った。日独の共同研究として、ドイツの EXASOLVERS チームの UG ソルバと HDDM ソルバの相互評価を行った。

滝沢チームでは、多様化するポスト・ペタスケールの高性能計算機システムに対して、従来システムのソフトウェアを活用する場合には様々なエキスパートによるコード書き換え・性能チューニングが必要となることから、そのような性能可搬性の阻害要因を体系的にまとめて、それらをアプリケーションコードと切り離す「HPC リファクタリング」の方法論を提案し、その方法論に基づいて、HPC の最適化事例をまとめるとともに、書き換えについての記述と変換の自動化を行うフレームワーク Xevolver を開発・公開した。これまで手動で行われてきた作業を分離して記述しノウハウ化し、自動化するフレームワークは実用性の高いアプローチであり、実際にいくつかの事例で成果が得られた。SPPEXA では、研究開発されてきた Xevolver コード変換フレームワークやそのアプローチの有効性や一般性を、ドイツの SPPEXA プロジェクトの共同研究相手である ExaFSA グループが開発してきた次世代アプリケーションで実証する事例研究を行った。

千葉チームでは、ドメイン専用言語(DSL)を用いた開発手法に基づく高性能計算のためのソフトウェア基盤、開発ツールを研究した。Java 言語をホスト言語として、MPI や GPU を用いる DSL を埋め込む、埋め込み型ドメイン専用言語 Bytepresso では、Java 風の言語で従来の C や Fortran に匹敵する性能を得ることを示した。また、Ruby 上で GPU プログラミングを行うための言語基盤 Ikra の開発では動的言語のための型推論系を研究開発し、ステンシル計算を行う Ruby プログラムから型推論したうえで CUDA コードを生成できる。スパコンにおいても Ruby でのプログラム需要が増えており、GPU を持つスパコンでは実用に結びつく成果である。SPPEXA では、共同研究先の ExaStencil グループが開発を進めているマルチグリッド法のステンシル計算向け DSL である ExaSlang と同等の抽象化を、本研究課題の成果の埋め込み DSL である Bytespresso で実現し、その有用性を示すことを目的として、いくつかのベンチマークを実装し性能評価を行った。

南里チームでは、エクサスケールシステムの規模での利用に耐えうる通信ライブラリとそれを用いたスケーラブルなアプリケーションの実現を目的として、通信ライブラリの設計、通信最適化技術、アプリケーションの性能解析技術の研究に取り組んだ。通信ライブラリ ACP を設計・開発し、大規模な並列システムに必要な省メモリ低オーバーヘッド通信の実現という目標に対しては一定の成果が得られており評価できる。ACP を用いて、通信ライブラリに必要なメモリ量が少ないことを示し、OpenFM0 などのいくつかのアプリケーションに用いて有効性を検証した。また、通信シミュレータ NSIM-ACE の開発や、隣接通信や集団通信の最適化、パケットペーシングによる最適化などの通信の自動最適化技術について研究開発した。

藤澤チームでは、ポスト・ペタスケールに向けて、大規模かつヘテロなシステムでの世界最高性能の大規模グラフ解析および数値最適化システムの開発と評価を行った。大規模グラフに関する高速解析アルゴリズムの高速実装に関して、Graph500 での世界 1 位を 4 期連続で達成するなど高い評価を達成している。このようなベンチマーク的な成果だけでなく、世界最高性能の並列最適化ソルバの開発に成功している。また、X10 による大規模グラ

フ処理ライブラリや高階層のメモリ・ストレージを考慮した大規模グラフ処理ソフトウェアを開発・公開した。最先端アルゴリズムと最新計算技術により、今後予想される実データの大規模化、複雑化に対処可能かつ世界最高性能のグラフ処理ソフトウェア群を開発した。スパコン応用として、ビッグデータ技術が注目されるなか、多数の企業との共同研究を行っているなど、幅広い展開をしている。

遠藤チームでは、高位メモリ階層の高性能と低位メモリ階層の大容量を活用するための、メモリ階層活用システムソフトウェアに関する研究開発を行い、GPUをベースとするスパコンにおいて実際のステンシルベースの実アプリケーションにおいて技術統合により、その有用性を実証した。特に、ステンシルベースの実アプリケーションである都市気流シミュレーションコードに開発された技術を適用することによって、高い実用性を示した。また、TB級の容量とGB/s級の接続速度を持つFlashデバイスをDRAMと併用し、デバイスの特性を考慮したアクセス手法と時間ブロッキング手法による局所性向上により実用的な速度を達成し、ステンシル計算における問題規模を大幅に拡張することに成功した。本研究課題で得られた知見については、チームが所属している東京工業大学のスパコン Tsubame 3.0 の設計に反映され、ソフトウェアからのポストペタスケールシステム技術への貢献という本研究領域が目指した成果の例となりうると考える。また、本研究課題で取り上げたメモリ階層や次世代メモリデバイスについては研究開始当初よりも注目を集める技術領域となっている。

近藤チームは、電力資源を各アプリケーションに、また各ハードウェア要素に適応的に配分することで性能や電力効率を向上させる「電力制約適応型システム」をコンセプトに、電力資源を真に有効利用できる電力マネジメントフレームワークの研究開発を行った。特に、この研究においては、CPUの製造時の消費電力特性のばらつきに注目し、このばらつきを考慮した電力制御の必要性を世界で初めて指摘し、これを考慮した電力性能制御アルゴリズムを開発したことは高く評価されている。また、CPU/主記憶/ネットワークなど各ハードウェア要素の電力余剰を検出し、より電力を効率的に利用できるハードウェアへと電力を分配するパワーシフティング技術も開発しており、本研究課題で得られた新規技術を利用するためのソフトウェアとして、ジョブの電力配分最適化プロセスを自動化する電力性能最適化パッケージおよび電力制約適応型電力資源管理スケジューラを開発・公開している。本研究領域の開始時に比べても大規模高性能計算システムにおける消費電力制御や消費電力を考慮したアプリケーション開発の重要性は高まっており、ポストペタスケールシステムを見据えたシステムソフトウェアの創出を目的とする本研究領域において、本研究課題の成果はポストペタスケールシステム設計へのフィードバックなど領域の目標達成に大きく貢献する成果といえる。

野田チームでは、社会システムを計算科学の対象とするマルチエージェント社会シミュレーションを網羅的かつ大規模に実行・制御するための開発・運用フレームワークを構築した。研究開発においてはターゲットとする社会科学の研究領域のジョブの規模・特性を

分析し、社会シミュレーションの大規模実行に必要な小規模および中規模の多数のジョブを効率的かつ計画的に実行するためソフトウェアを開発・公開している。本研究課題は HPC の社会科学的応用を広げる重要な役割を果たす課題であり、単なるミドルウェアの開発だけでなく、社会科学向けのシミュレーション環境を開発・整備したことに加え、各研究グループが社会科学分野の研究課題を持ち、開発されたシステムを用いて災害避難、交通流最適化、証券取引制度改革など国民生活に直結する具体的な有用な結果を得ている。ポストペタスケールシステムの対象として従来の大規模数値計算による科学技術計算だけでなく、ビッグデータ等の新たな応用も期待されており、本研究領域の成果として、本研究は新たな HPC 活用の有力な応用領域になると考える。

朴チームでは高性能並列計算における演算系と通信系を TCA (Tightly Coupled Accelerators) という概念の下で融合し、アクセラレータによる演算加速と FPGA を用いたノード間直接通信ハードウェアを統合して、高性能計算を行うハードウェア、システムソフトウェア、アプリケーションの開発を垂直統合的に行った。FPGA による直接通信により低レイテンシ通信が可能であることを示すだけでなく、アプリケーションの検討による研究の進展から、演算部分も含めて FPGA にオフローディングする AiS (Accelerator in Switch) を提案し、FPGA を用いた高性能通信・計算の融合という新たな方向性を提示した。また、アクセラレータ対応 PGAS 並列言語 XcalableACC (XACC) を提案し、アクセラレータ型クラスタにおいて既存の手法に比べアクセラレータの制御とクラスタ間の分散メモリ並列処理の両方に対し指示文ベースの抽象度の高いプログラム記述が可能になることを示すとともに、いくつかのアプリケーションの実証実験により、その有効性を示した。最近の動向として、ポスト・ペタスケール時代の新たなデバイスのひとつとして FPGA に注目が集まっており、ポストペタスケールシステムを見据えたシステムソフトウェアの創出を目的とする本研究領域において、本研究の成果は FPGA を活用するシステム技術への展開に寄与するものである。

「3. 研究総括のねらい」で示したねらいに対して、まず、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 964 本(うち国際論文が 810 本)、開発ソフトウェアが 77 本(うち公開済み 61 本)、口頭発表数は 2,406 件(うち招待講演数は 523 件)、また各種受賞も 80 件余りにのぼるなど、大きな成果を得ることができた。発表論文・受賞について、いくつか顕著なものについて以下に挙げる。

- 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、国際的に最も有名な国際的な性能ランキングで大きなベンチマークコンテスト「Graph500」において、「京」による解析結果に対し、2013 年から 2017 年まで、6 回連続の 1 位を獲得している。

- 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、2014 年の SC14 において「ベストパフォーマンス賞」を受賞した。
- 丸山チームの SC16 の研究論文、M. Wahib, N. Maruyama and T. Aoki, “Daino: A High-level Framework for Parallel and Efficient AMR on GPUs” は、この分野で著名な会議である SC16 の Best Paper Award を受賞した。
- 近藤チームの SC15 での研究論文、Y. Inadomi, T. Patki, K. Inoue, M. Aoyagi, B. Rountree, M. Schulz, D. Lowenthal, Y. Wada, K. Fukazawa, M. Ueda, M. Kondo, I. Miyoshi, “Analyzing and Mitigating the Impact of Manufacturing Variability in Power-Constrained Supercomputing” は、CPU の製造時の消費電力特性にばらつきを考慮した電力制御の必要性を世界で初めて指摘し、これを考慮した電力性能制御アルゴリズムを開発し、注目を浴びた。
- 滝沢チームの論文、Hiroyuki Takizawa, “Evolutionary Adaptation of HPC Applications to Revolutionary System Changes,” Invited Talk at ISC’14, Germany, 2014 は、日米欧の有望な若手研究者の招待講演セッションが企画され、招待講演で注目された。
- 南里チームの論文、Shinji Sumimoto, “ACP: Advanced Communication Primitives for Exa-scale Systems ”は、VECPAR2014 において Best Poster Award 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ている。開発されたソフトウェアについて、いくつか特徴的なものについて以下に挙げる。

- 櫻井チームでは、積分型疎行列固有値解析エンジン z-Pares と新 1 ステップ型密行列固有値解析エンジン EigenExa の 2 つの固有値ライブラリを開発し、ポストペタスケールスパコンで利用が想定される数万ノード規模の計算で十分なスケーラビリティを発揮し、従来解くことができなかった規模の計算を可能とした。
- 建部チームでは、ポスト・ペタスケールに対応する Gfarm ファイルシステムと Pwraque ワークフローシステムを公開し、多くのユーザにダウンロードされ利用されている。

- 中島チームでは、5つの離散化手法(有限要素法, 差分法, 有限体積法, 境界要素法, 個別要素法)をサポートするアプリケーション開発フレームワーク (ppOpen-APPL)、多重格子法、可視化、カプラーなどの数値ライブラリ (ppOpen-MATH)、自動チューニング言語 (ppOpen-AT)、実行支援 (ppOpen-SYS)を含むパッケージ ppOpen-HPC を開発、公開している。
- 丸山チームでは、タスクスチール機能を有した軽量マルチスレッドライブラリ MassiveThreads、大規模並列計算機向け FMM ライブラリ ExaFMM などのマルチコア環境を活用するライブラリを公開している。特に、MassiveThreads は、米国 Cray 社において研究・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。
- 塩谷チームでは、分散メモリ並列向け陽的 MPS 法ソルバライブラリ LexADV_EMPS、領域分割法に基づく線形ソルバお試しライブラリ LexADV_TryDDM、並列オフライン可視化ツール LexADV_WOVis などの可視化ライブラリを開発・公開している。すでに、ポスト「京」の重点課題プロジェクトと連携して利用が計画されている。
- 藤澤チームでは、大規模な数値最適化問題(半正定値計画問題: SDP)に対する並列ソルバSDPARAや並列分散並列言語 X10において利用するグラフ処理用 ScaleGraph ライブラリを公開している。これらのライブラリを用いて、民間企業などとの共同研究に用いられている。
- 遠藤チームでは、ユーザプログラムから総計で利用可能なメモリ容量を仮想的に増加させるステンシル計算用のライブラリ HHRT: Hybrid Hierarchical Runtime library を公開している。
- 野田チームでは、社会科学のための大粒度ジョブの網羅的シミュレーション実行管理環境 OACIS と中粒度ジョブの網羅的シミュレーション実行管理環境 CARAVAN を提供しており、講習会等の活動も行われている。
- 朴チームでは、アクセラレータ向け並列言語 XcalableACC のコンパイラを公開・提供しており、複数のシステムにおいて評価が行われた。

上に挙げたものは 1 部であり、この他にも、多くのソフトウェアが開発されており、公開、もしくは公開の準備中であり、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、研究成果の知財化に関しては、中島チームから 1 件、塩谷チームから 4 件、南里チームから 2 件、近藤チームから 1 件、野田チームから 3 件、朴チームから 3 件の特許出願が行われており、主に企業からの参加研究者の成果となっている。

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。以下に、例を挙げる。

- 塩谷チームの成果として、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。
- 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。櫻井チームの固有値ライブラリは他にも大規模ナノチューブの解析やオートマテックトランスミッション(AT)の開発製造で企業と共同研究を実施しており、産業にも貢献している。
- 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気象シミュレーションを行うことに成功している。
- 中島チームでは、雲の生成・消滅を詳細に計算できる全球大気モデル NICAM に、日本の代表的な全球気候モデル MIROC の海洋部分を、開発した並列カプラー ppOpen-MATH/MP によって連結させた超精密気象-海洋モデル「NICAM-COCO (NICOCO)」を開発し、熱帯域を東進する巨大な雲群マッデン=ジュリアン振動(MJO)と、東太平洋の海面温度が通常より高くなるエルニーニョ現象との相互作用の再現を可能にした。これにより、日本付近の季節予報や台風発生予測の精度向上に貢献することが期待される。
- 藤澤チームのグラフ解析プログラムを用いて、災害時のライフラインや交通網などの復旧対策において、スーパーコンピュータを活用し、最適な復旧作業のスケジュールを高速に立案する技術を開発した。大規模災害時に短時間で変化する状況に対応し、刻々と変化する災害状況を反映した最適な計画立案を膨大なデータを用いてリアルタイムで計算することを可能にした。
- 第5期科学技術基本計画ではIoTやAIさらにビックデータの活用によってインテリジェンスを有している社会で人間が豊かに暮らすという超スマート社会の実現を目指す Society 5.0 が推進されている。これに関連して、藤澤チームでは、次世代AIに対する取り組みとして、ヒト・モノの移動に関する数理・物理モデルによる現象の表現・再現・予測に取り組んでおり、現在のAIが不得意とする見えないデータ・過去のデータにない現象に対して最先端理論(Algorithm Theory) + 大規模実データ(Big Data) + 最新計算技術(Computation)で予測や制御可能するための研究を多数の民間企業と推進している。
- 野田チームの研究課題においては、実際に金融関係の社会科学の研究者がチームに参加して、実際の応用に即した開発とアプリの利用を行った。人工市場シミュレー

ションを用いた現実の金融市場の制度検証などを行い、さらに本研究の一環として開始した東京証券取引所との共同研究を行った。

- 野田チームでは、その他の網羅的なシミュレーションの応用として、金沢市における人流シミュレーションにより災害時の避難経路の策定や京都市異種車両混合交通シミュレーションなど、広範囲な応用を開拓している。また、金沢 21 世紀美術館にて 2014 年に開催された、「3.11 以後の建築」企画展において、日建設計とともに、本研究の成果を用いて災害対策案と避難シミュレーションを組み合わせたインタラクティブな展示を行い、計算科学の応用についての啓発に努めた。

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。以下に特筆すべき事項について挙げる。

- これからのスーパーコンピューティングのシステムの方向性の一つとして、研究当初から GPU をはじめとするアクセラレータの進歩が想定されていたが、丸山チーム、遠藤チームの研究をはじめとして、DSL などのプログラミング言語、小規模な GPU のメモリを活用するライブラリなど、GPU を活用するための多くの優れた研究が行われた。また、朴チームでは並列システムを前提とするアクセラレータを活用するプログラミング言語の研究開発が行われた。これらのソフトウェアはさらに進展していくと予想されるアクセラレータを利用したエクサスケールシステムへの発展に寄与するものである。
- 一方、計算ノードはさらにコア数が増えメニーコアとなり、システムの規模も大きくなっていくと予想される。櫻井チームや中島チームで開発された数値計算ライブラリは、メニーコアと十分に大きなシステムに対応するソフトウェアとなっており、これからのエクサスケールのシステムについても十分対応できるものとなっている。同様に、塩谷チームのアプリケーションについても大規模なシステムでの有効性の検証が行われており、将来のシステムでの新たな成果が期待できる。一部のソフトウェアについては、現在、開発中のポスト「京」にも利用されるものとなる。
- また、丸山チームにおいてはメニーコアを利用するマルチスレッドライブラリ、南里チームにおいては大規模なシステムを活用する省メモリの通信ライブラリの研究開発、堀チームにおいては新しいプロセスモデルによるメニーコアの利用技術の研究開発が行われ、これらのソフトウェアはシステム大規模化・メニーコア化に対応するものである。

- 低電力化および省電力技術は、将来のエクサスケールシステムは重要な研究課題である。近藤チームは、電力資源を各アプリケーションに、また各ハードウェア要素に適応的に配分することで性能や電力効率を向上させる「電力制約適応型システム」を提案し、それを実現するためのスケジューラなどのシステムソフトウェアの開発に取り組み、現在の実際のシステムでも有効であることを実装した。将来のポストペタのシステムではさらに重要となる技術であり、ポスト京での応用も検討されている。
- 本研究領域の研究開始当初からの状況の変化の一つとして、近年、回路書き換えが可能な FPGA の技術が注目され、特殊なディープラーニング処理や検索処理など、従来の演算器では不効率な演算やストリーム処理などにおいて、FPGA が有効であることがわかってきた。朴チームではいち早く、この変化に注目し、計画変更して取り組むことにより、FPGA を用いてネットワークと演算処理を統合する AiS (Accelerator in Switch) を提案し、一つの方向性を示した。これはポスト・ペタスケールの一つ一つの方向性を示すものになった。
- プログラミング技術に関しては、滝沢チームにおいては既存の HPC プログラムを新たなシステムへ容易に移行するためのフレームワークの研究開発、千葉チームでは HPC プログラミングについてのモジュラリティに注目し生産性を向上させる研究に取り組んだ。また、千葉チームでは Ruby 上で GPU プログラミングを行うための言語基盤 Ikra を開発した。これらの研究はポスト・ペタスケールに限らず、これからのスーパーコンピューティングのプログラム開発において継続して検討していくべき課題である。
- ポスト・ペタスケールのストレージ技術については、建部チームが Gfarm ファイルシステムを拡張・高度化することにより、取り組んだ。実際のシステムを構築することは難しいためにシミュレーションによる検証を行ったが、これから構築されるシステムでの適用・検証が期待される。また、遠藤チームでは、これからエクサスケールに向けて、複雑化・階層化するメモリシステムの活用技術に取り組んだ。メモリ階層がさらに進むことが考えられるが、どのように対処するべきかの方向性を示すものになった。
- 藤澤チーム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 (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。
- 野田チームで研究開発された網羅的かつ大規模に実行・制御するための開発・運用フレームワークは現在チームで取り組んでいるアプリ分野のみならず、さらに広い分野に適用できるものと期待できる。従来、スーパーコンピュータは比較的大規模

な並列シミュレーションを対象としてきたが、エクサスケールに向けてはその膨大な計算リソースの活用としては、今回の野田チームで取り組んだ応用分野だけでなく、スーパーコンピュータの幅広い分野への応用の可能性を示すものである。

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、「4. 研究課題の選考について」や「5. 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。チームリーダーを中心として、各研究課題主催の国際および国内シンポジウム・ワークショップ・セミナー等が数多く開催され、我が国のリーダーシップが醸成されたと考える。また、CRESTの研究を通じて、チームリーダーをはじめ、若手のキャリアアップが図られた。顕著な例としては、藤澤氏はCRESTを中心とした研究に対して、文部科学大臣表彰 科学技術賞(研究部門)を受賞した。藤沢氏と中島チームの佐藤氏は、SCにおいて招待講演に招待されるなど、すでに国際的なリーダーとして認知されている。

また、多くの若手に対し、若手奨励賞、研究賞等の賞が授与されており、若手の活躍が顕著であったことを示している。

さらには、本研究領域の研究を通じて培った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研究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。

8. 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「3. 研究総括のねらい」に示した本研究領域で実現を目指した事項について、「4. 研究課題の選考について」や「5. 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「6. 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、本研究領域の運営は円滑・順調に行われ、目標を概ね達成できた。

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・開発については、著名な学会での研究発表、多くの論文だけでなく、多くの優れたソフトウェアが開発され、公開されている。さらに、開発されたソフトウェアを用いて、津波シミュレーション、気象シミュレーションからグラフ解析、経済シミュレーションまで多くの実際の応用分野での大規模アプリケーション

の実行が行われ、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。特に、従来の大規模数値シミュレーションだけでなく、ビッグデータ解析、社会シミュレーションへのスーパーコンピューティングの応用の拡大とその重要性を示す成果となった。また、アプリに近いテーマの研究チームでは企業との連携・共同研究も活発に行われた。

将来のスーパーコンピュータ研究・開発の方向性の模索・提示は、本研究領域の重要な課題であった。本研究領域の対象課題を、主にシステムソフトウェアを中心としたものにしたが、領域の課題設定時にはハードウェアの研究開発を入れるべきかどうかの議論があった。研究チームの多くの研究はメニーコアあるいはアクセラレータを備えた大規模システムのトレンドをソフトウェアからとらえたものになり、エクサスケールに達する、これからのスーパーコンピュータに対応、あるいはその方向性を提示するものになったと考える。また、従来の大規模数値計算を中心として技術に加え、ビッグデータ処理に必要なストレージ技術や複雑化するメモリ階層、電力問題にも取り組むことができた。さらに、研究領域開始後のFPGAなどの新しいトレンドについてもいち早く対応してきた。

「3. 研究総括のねらい」において言及したが、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(フラッグシップ2020プロジェクト)が2014年度からスタートし、2020年頃の完成を目指して開発が進められている。本研究領域の成果展開として、数値計算ライブラリや電力制御ソフトウェアなど、本研究領域で開発されたソフトウェアを利用することを検討している。

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という観点からは、多くの若手に対し、若手奨励賞、研究賞等の賞が授与されていることからわかるように優秀な人材が輩出された。研究チームがイニシアチブをとって、各研究課題主催の国際および国内シンポジウム・ワークショップ・セミナー等が研究数多く開催され、各研究チームのリーダーおよび研究者の国際的な認知度の向上が図られたことも大きな成果である。

国際連携として、ドイツ、フランスとともにSPPEXAの共同研究を行ったが、研究期間を研究チームによっては1年また2年延長することができ、国際的な共同研究を通じて成果をさらに充実させることができたと考える。

現在、各国においてエクサスケールを目指したスーパーコンピューティングの研究開発が進められている。本研究領域で開発された技術とソフトウェアは、本研究領域終了後も、利用され、さらに研究の方向性を牽引するものでなくてはならない。本研究領域の成果のポスト京への展開については上に述べたが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はないように、ポスト京での展開以外にも普及に関わる活動を継続していくことが重要である。そのために、高性能並列システム技術の推進・普及団体であるPCクラスタコンソーシアムの部会として、「オープンソースHPCソフトウェア普及部会」を設置し、ソフトウェアの普及を図ることを提案している。この活動に合わせて、これらのソフトウェアのためのポータルサイトを構築して、研究開発の継続と普及を支援する体制を構築する計画である。

以上