

**(独) 科学技術振興機構
戦略的創造研究推進事業
個人型研究(さがけ)
追跡調査報告書**

**研究領域「機能と構成」
(2000-2005)
研究総括 片山 卓也**

2010.3.26

<目次>

概要.....	1
第1章 追跡調査・追跡評価について	2
1.1 調査／評価の目的	2
1.2 調査／評価の対象	2
1.3 研究領域の概要	2
第2章 全研究課題（研究者）の発展状況	5
2.1 参加研究者全員に対するアンケート調査	5
2.2 参加研究者全体の動向	6
2.2.1 研究者の職位の推移	6
2.2.2 論文、総説・解説の発表件数の推移	7
2.2.3 著書件数の推移	8
2.2.4 特許出願件数の推移	9
2.2.5 招待講演件数の推移	10
2.2.6 研究者の受賞	12
2.2.7 研究者の研究助成金獲得状況	14
2.2.8 参加研究者の研究成果と発展状況	16
2.2.9 さきがけ研究の意義	29
2.3 第2章のまとめ	32
第3章 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な波及効果	33
3.1 詳細調査の内容	33
3.2 代表事例の発展状況	33
3.2.1 効率的で正しいプログラムの自動生成（小川 瑞史 第1期）	33
3.2.2 スケルトン並列プログラムの最適化（胡 振江 第2期）	36
3.2.3 高信頼性 Web サービス（中島 震 第2期）	40
3.2.4 刺激応答型実時間システムの自動検証技術：安全性・信頼性技術の開発 （大崎 人士 第3期）	45
3.2.5 プログラミング言語の制御構造の意味論的分析（長谷川 真人 第3期） ..	48
3.3 第3章のまとめ	51

概要

本資料は、戦略的創造研究推進事業の個人型研究（さきがけタイプ）（以下、さきがけ）の研究領域「機能と構成」（2000-2006 年）において、研究終了後一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況等を明らかにし、独立行政法人科学技術振興機構（JST）事業及び事業運営の改善等に資する追跡評価のために調査した結果をまとめたものである。

「機能と構成」は、これからの社会を支える高度な機能をもった情報システムの構築を目指し、そのための構成や構築方法に関して、基本技術や先進応用事例及び基礎となる理論の研究を行うなど"先進情報システムとその構成に向けて"、独創性に富んだ提案を積極的にとりあげようとするものである。その第 3 期の研究者が研究を終了してから 4 年を経過した時点で、参加研究者全員 20 名を対象として調査を行った。

まず、参加研究者全員に対して、論文、特許、研究助成金、招待講演、受賞などに関するアンケート調査を実施し、20 名中 18 名から回答を得た。アンケート調査結果及び補足的な調査結果を基に、研究総括と相談の上、代表事例を抽出し、選定された研究者 5 名に対して、詳細インタビュー調査を実施した。

アンケート結果から、さきがけ期間中、及び終了後から追跡調査時点までの、職位、論文発表件数、特許出願件数、研究助成金獲得額などを比較し、さきがけ期間中に比して、さきがけ終了後に研究活動が向上していることを確認した。職位については、さきがけ期間中あるいは終了後に教授となった研究者は 6 名おり、それぞれの分野でリーダー的存在として活躍している。研究成果の発表では、さきがけ期間中、年平均 4 報以上論文を発表している研究者は 5 名であったが、さきがけ終了後には 7 名に微増した。研究助成金に関しては、さきがけ期間中・終了後合わせて 3 千万円以上の研究助成金を獲得した研究者が 2 名みられた。また、さきがけ研究の意義に対する意見は、回答のあった 14 名中 13 名が自身の研究に役立ったと考えており、8 名から何らかの制度・運営に関する改善等の意見が寄せられた。具体的には、若手研究者に非常に大きな自由度と責任を与えてその後の研究の足がかりとなる基礎研究を行うことを可能にしたこと、異分野融合への進展、他の研究者との交流を促進したこと等の幾つかの利点が挙げられた。一方で、さきがけ研究の課題としては研究費の制限、年 2 回の報告義務のマンネリ化、研究期間の短さ等の意見が寄せられた。

詳細インタビュー調査には、事前調査結果および研究総括のご意見を参考にして、詳細調査対象となる代表的事例を 5 名抽出した。詳細調査対象となる各研究者から、本研究終了後の継続・発展の状況や、研究成果から生み出された波及効果等をインタビュー形式で調査した。その結果、さきがけ研究をより発展させ、応用研究への広がり、産業界との連携、研究ネットワークの拡大等の効果が得られていることが把握できた。

第1章 追跡調査・追跡評価について

1.1 調査／評価の目的

戦略的創造研究推進事業の個人型研究さきがけにおいて、研究終了後一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況を明らかにし、JST 事業及び事業運営の改善等に資するために追跡調査を行う。

1.2 調査／評価の対象

本追跡評価はさきがけ研究領域「機能と構成」（2000-2006 年）の研究課題全てを対象とする。表 1-1 に調査対象と調査対象期間を示す。

表 1-1 調査対象と調査対象期間

	さきがけ期間	さきがけ終了後調査対象期間	研究課題数
第 1 期	2000 年 10 月 - 2003 年 9 月	2003 年 10 月 - 2009 年 3 月	6
第 2 期	2001 年 12 月 - 2005 年 3 月	2005 年 4 月 - 2009 年 3 月	7
第 3 期	2002 年 11 月 - 2006 年 3 月	2006 年 4 月 - 2009 年 3 月	7

1.3 研究領域の概要

「機能と構成」の研究総括は片山 卓也（北陸先端科学技術大学院大学 学長）であり、研究領域の概要は以下のとおりである。

「機能と構成」は、"先進情報システムとその構成に向けて"、独創性に富んだ提案を積極的にとりあげようとするものである。具体的には、これからの社会を支える高度な機能をもった情報システムの構築を目指し、そのための構成や構築方法に関して、基本技術や先進応用事例及び基礎となる理論の研究を行う。例えば、ソフトウェア、ネットワーク、プロセッサ、分散・実時間・埋め込みシステム、セキュリティ、設計・実装・進化方法論と環境、テスト・検証技術、形式的手法、高信頼性技術、ユーザインタフェースなどの研究を含む。

この領域の概要に沿って研究を行うため、9 人の領域アドバイザーを定め、研究者の指導にあたった。表 1-2 に領域アドバイザーを示す。

表 1-2 領域アドバイザー

領域アドバイザー	さがけ終了時の所属・役職
青山 幹雄	南山大学 数理情報学部 教授(2001 年年 4 月～2006 年 3 月)
阿草 清滋	名古屋大学大学院 情報科学研究科 研究科長・教授
市川 晴久	日本電信電話（株） NTT 先端技術総合研究所 所長
岩野 和生	日本アイ・ビー・エム（株） 取締役(2000 年年 4 月～2001 年 3 月)
菊野 亨	大阪大学大学院 情報科学研究科・教授
中島 秀之	公立はこだて未来大学 学長
南谷 崇	東京大学 先端科学技術研究センター教授
湯浅 太一	京都大学 大学院情報学研究科 教授
米崎 直樹	東京工業大学 大学院情報理工学研究科 教授

研究課題（研究者）の公募は、2000 年度から 2002 年度までの間に 3 度行い、総計 20 件の研究課題を採択した。表 1-3 に各期の研究課題名、研究者ならびに所属と役職を示す。

さがけ期間中の成果には世界的に傑出したものが多く、領域事後評価報告書では、特筆すべき成果として下記の事例が挙げられている。

- ✓ 基礎理論では、関数型言語を正確に表現するプログラム意味論を数学的に展開することによって、プログラム意味論を大きく前進させるパラメトリシティ原理の提案（長谷川 真人）が行われ、またモデル検査技術による web サービス国際標準言語の問題点の発見（中島 震）、数百万行規模のファイルからコードクローンの検出を短時間で行う技術の確立（神谷 年洋）が行われた。
- ✓ 人工知能の成果を利用したコンピュータ将棋（飯田 弘之）においては、世界大会において入賞を繰り返すと同時に社会的に大きな関心を集めた。研究成果の公開という観点では特許の出願、ソフトウェアの公開を積極的に実施し、さがけライブ 2005 にも 2 名（井口 寧、飯田 弘之）が出展した。

表 1-3 研究課題と研究者（第 1 期、第 2 期、第 3 期）

期（採択年度）	研究課題名	研究者	さがけ採択時の所属・役職	さがけ終了時の所属・役職	追跡調査時の所属・役職
第 1 期 (2000 年度)	効率的で正しいプログラムの自動生成	小川 瑞史	NTT コミュニケーション科学基礎研究所 主任研究員	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 特任教授	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 教授
	超高速 I/O 指向オペレーティングシステム	河合 栄治	科学技術振興事業団 ささがけ研究者	奈良先端科学技術大学院大学 附属図書館研究開発室 助手	(独) 情報通信研究機構 連携研究部門 有期研究員
	超計算：ソフトウェア自動生産のための新領域探求	グリュック ロバート	科学技術振興事業団 ささがけ研究者	(独) 科学技術振興機構 ささがけ研究者	University of Copenhagen, Department of Computer Science, Associate Professor
	理論領域と実用領域を結ぶ新しいプログラミング単位	河野 真治	琉球大学 工学部 助教授	琉球大学 工学部 情報工学科 助教授	琉球大学 工学部 情報工学科 准教授
	インターコミュニケーション・プログラミング	関口 龍郎	科学技術振興事業団 ささがけ研究者	(独) 科学技術振興機構 ささがけ研究者	東京大学大学院 情報理工学系研究科 特別研究員
	計算状態パーソナル・スクラップブック	リチャード リーポッター	科学技術振興事業団 ささがけ研究者	(独) 科学技術振興機構 ささがけ研究者	(独) 科学技術振興機構 CREST 専任研究員
第 2 期 (2001 年度)	オブジェクト指向分析モデルの形式的構築法と検証法	青木 利晃	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 助手	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 助手	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 准教授
	オブジェクトとメディアによるソフトウェア構造化	神谷 年洋	科学技術振興事業団 ささがけ研究者	(独) 科学技術振興機構 ささがけ研究者	(独) 産業技術総合研究所 サービス工学研究センター 研究員
	プログラムのメタレベルを表現・操作する言語機構	亀山 幸義	筑波大学 電子・情報工学系 助教授	筑波大学大学院 システム情報工学研究科 助教授	筑波大学大学院 システム情報工学研究科 准教授
	スケルトン並列プログラムの最適化	胡 振江	東京大学大学院 情報理工学系研究科 数理解析学専攻 助教授	東京大学大学院 情報理工学系研究科 助教授	情報・システム研究機構 国立情報学研究所 アーキテクチャ科学研究系 教授
	実時間マルチタスク処理を支援するプロセッサアーキテクチャ	田中 清史	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 助教授	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 助教授	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 准教授
	高信頼性 Web サービス	中島 震	日本電気(株) ネットワーキング研究所 主管研究員	情報・システム研究機構 国立情報学研究所 教授	情報・システム研究機構 国立情報学研究所 アーキテクチャ科学研究系 教授
	ユビキタス環境を支えるプログラミング言語システム	橋本 政朋	(独) 産業技術総合研究所 サイバーアシスト研究センター 研究員	(独) 産業技術総合研究所 情報技術研究部門ユビキタスソフトウェアグループ 研究員	(独) 産業技術総合研究所 サービス工学研究センター最適化研究チーム 研究員
第 3 期 (2002 年度)	探索と知識の融合がもたらす知能の創造と進化	飯田 弘之	静岡大学 情報学部 助教授	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 教授	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 教授
	ハードウェア・プログラミングによる超細粒度並列処理	井口 寧	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学センター 助手	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学センター 助教授	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学センター 准教授
	刺激応答型実時間システムの自動検証技術：安全性・信頼性技術の開発	大崎 人士	(独) 産業技術総合研究所 情報処理研究部門 研究員	(独) 産業技術総合研究所 システム検証研究センター 研究員	産業技術総合研究所 システム検証研究センター 主任研究員
	大規模分散アルゴリズム開発及び性能評価のツール構築	デファゴ クサビエ	北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科 助手	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 特任助教授	北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 准教授
	広域分散共有メモリ機構を支援する最適化コンパイラ	丹羽 純平	東京大学大学院 情報理工学系研究科 助手	(独) 科学技術振興機構 ささがけ研究者	サイボウズ(株) PG 開発者
	プログラミング言語の制御構造の意味論的分析	長谷川 真人	京都大学 数理解析研究所 助教授	京都大学 数理解析研究所 助教授	京都大学 数理解析研究所 教授
	Web アプリケーション指向ソフトウェアモデリング	結縁 祥治	名古屋大学大学院 工学研究科情報工学専攻 助教授	名古屋大学大学院 情報科学研究科 助教授	名古屋大学大学院 情報科学研究科 教授

第2章 全研究課題（研究者）の発展状況

2.1 参加研究者全員に対するアンケート調査

参加研究者全員に対して、さがけ期間中と終了後の研究実績について問い合わせる調査票を送付し、全 20 名中 18 名の回答を得た。回答率は 90.0%である。研究課題名及びさがけ採択時、終了時ならびに追跡調査時の所属は表 1-3 に、調査票の質問事項は表 2-1 に示す。

表 2-1 調査票の質問事項

問 1	回答者の情報（氏名、所属、連絡先等）
問 2	さがけ期間中および終了後の研究で、国際的に高い評価を受けている代表的な研究テーマと成果（5 件以内）
問 3	さがけ期間中と終了後に公表された原著論文、総説・解説
問 4	さがけ期間中と終了後に公表された著書
問 5	さがけ期間中と終了後に出願された特許出願
問 6	さがけ期間中と終了後に発表された招待講演
問 7	さがけ期間中と終了後に獲得・継続した研究助成金
問 8	さがけ期間中と終了後に受賞された賞
問 9	さがけの成果に関しての応用・実用化や社会的価値の創出につながる取り組み
問 10	その他、アピールしたいこと
問 11	さがけ研究の意義（良かった点、問題点、その他）
問 12	さがけ制度、あるいは JST の事業についての意見

なお、以降の調査結果は、基本的にアンケートへの回答結果を基に作成しているが、アンケート未回収者については、各研究者のホームページの閲覧及び各種公開データベースの検索によりデータを補った。また、アンケート回答に明らかな間違いがある場合は、調査のうえ訂正及び削除を行っている。さらに必要に応じて、アンケート回答に基づいて各研究者のホームページや各種データベースでの調査を行った。

2.2 参加研究者全体の動向

2.2.1 研究者の職位の推移

職位は、研究成果の蓄積が社会から認められたことを確認する一つの指標であると考えられるため、研究者全員のさきがけ採択時、終了時及び追跡調査時の職位の推移を図 2-1 に示した。

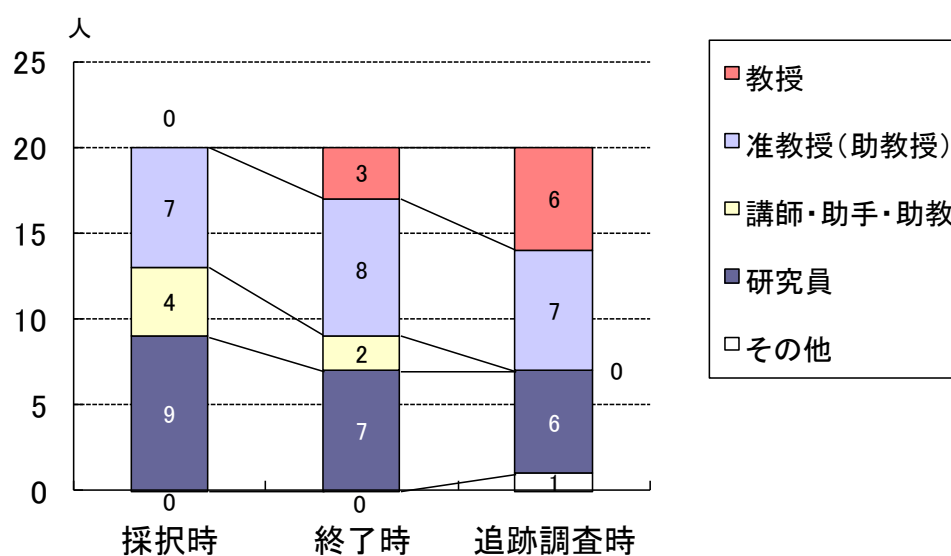


図 2-1 研究者のさきがけ採択時、終了時及び追跡調査時の職位の推移

大部分の研究者がさきがけ採択時から終了時、追跡調査時になるにつれて、より上位の職種についている。特に、採択時に 0 名であった大学教授職には、追跡調査時では 6 名と大幅に増加している。さきがけ終了後の研究キャリアにおいて、着実に研究リーダーへと昇格、活躍していることが見てとれる。

2.2.2 論文、総説・解説の発表件数の推移

論文発表件数の推移は研究者の研究活動を示す一つの指標であると考えられるため、さきがけ期間中と終了後の論文、総説・解説数（発表件数）の個人別推移（年平均）を図 2-2 に示した。

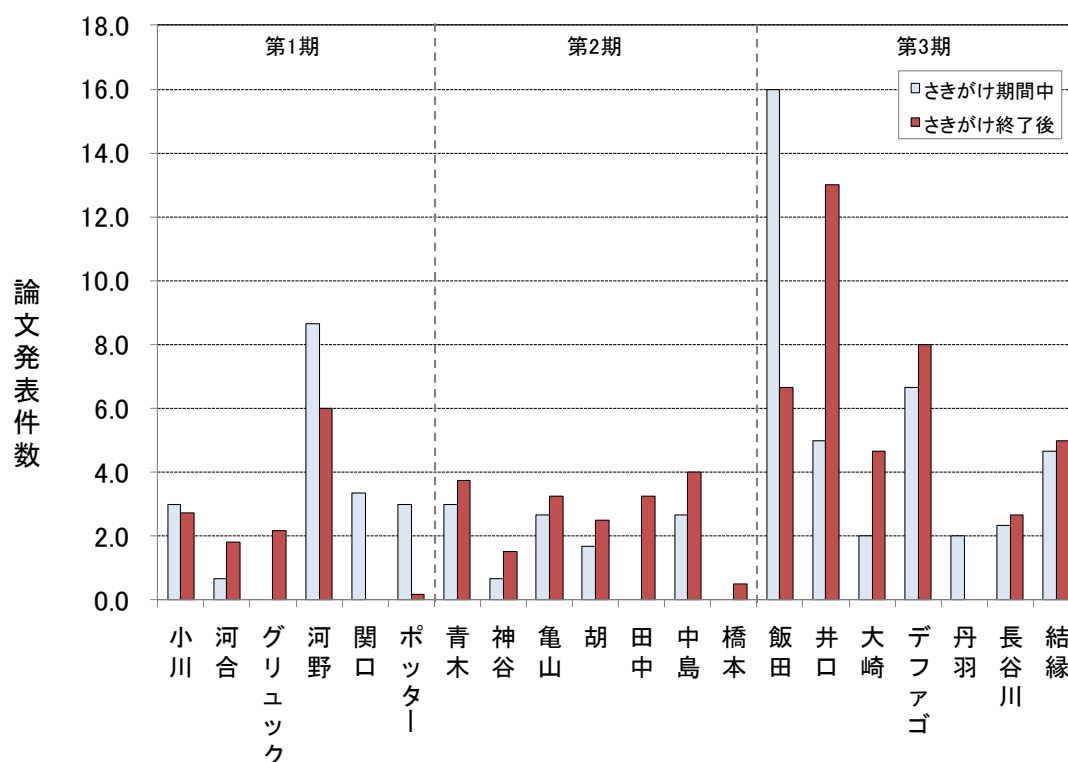


図 2-2 研究者の論文（論文、総説・解説）発表件数（年平均）

傾向としては、さきがけ期間中に多くの論文を発表している研究者はさきがけ終了後の論文発表件数（年平均）も多い。同一人の比較でみると、さきがけ終了後のほうが論文発表件数（年平均）の多い研究者が 14 名と過半数を占めている。特に井口は大きく伸ばしている。また、田中（第 2 期）の場合、さきがけ期間中にはハードウェアも含めた製作業務に従事していたため、論文発表件数（年平均）は主としてさきがけ終了後に多くなっている。

2.2.3 著書件数の推移

さきがけ期間中と終了後の著書件数（年平均）を図 2-3 に示した。

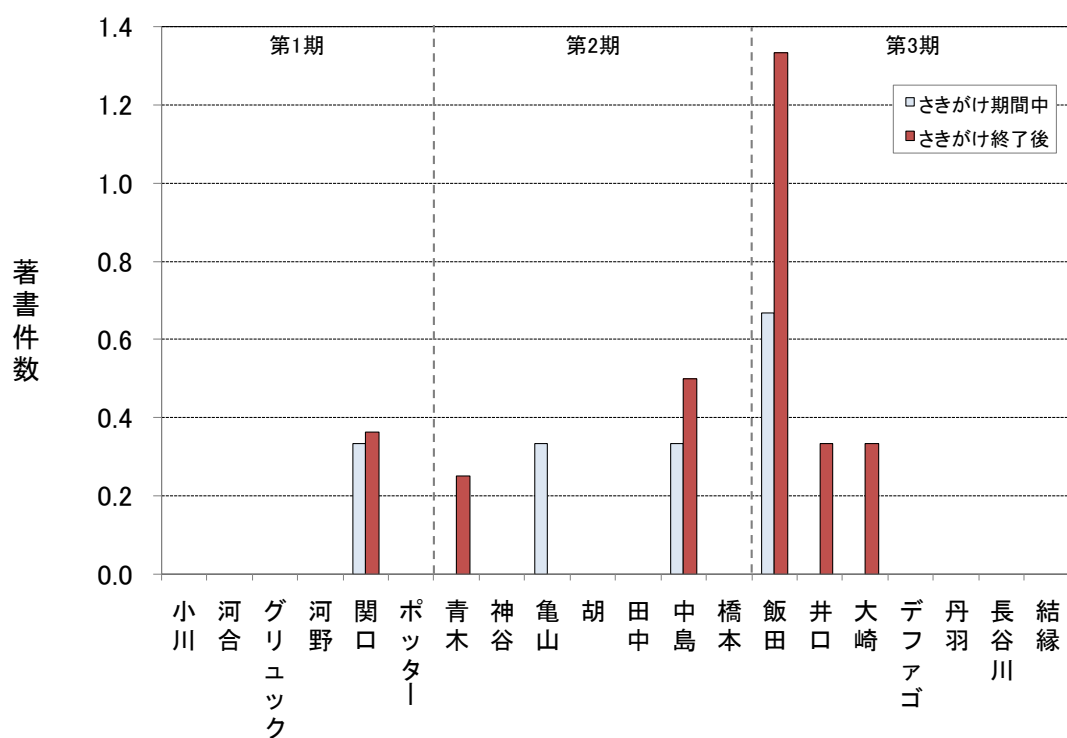


図 2-3 研究者の著書件数（年平均）

飯田がさきがけ期間中も多かったが、終了後はさらに著書件数（年平均）を伸ばしている。また、中島（第2期）や大崎（第3期）はモデル検査法の解説書をそれぞれさきがけ終了後に発表するなど、さきがけの研究成果を産業界へ普及させる活動の一環として捉えることができる。

2.2.4 特許出願件数の推移

特許出願件数は基礎研究から産業への貢献を分析する一つの指標であると考えられるため、さきがけ期間中と終了後の特許出願件数（年平均）の個人別推移を図 2-4 に示した。

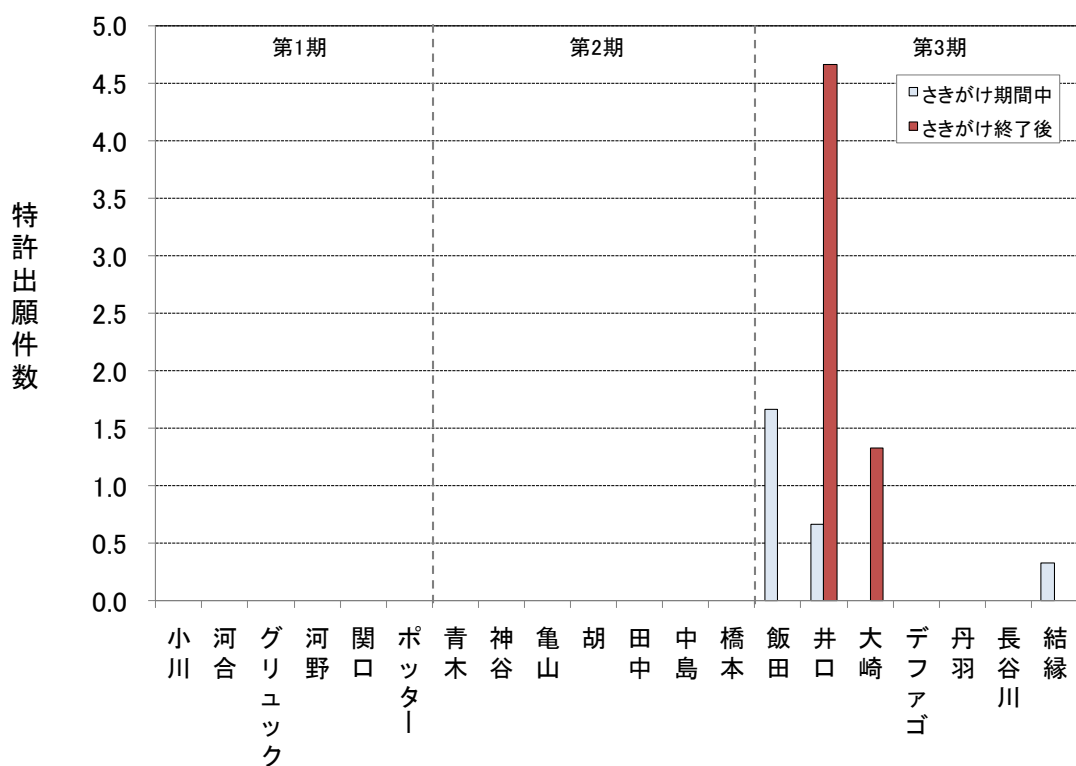


図 2-4 研究者の特許出願件数（年平均）

特許の出願者はきわめて限られており、飯田、井口、大崎、結縁（何れも3期）の4名のみである。飯田はさきがけ期間中に特許を出願しているのに対し、井口や大崎はさきがけ終了後に出願している。飯田の場合ベースとなる技術はすでにさきがけ期間中に特許がなされている。井口はさきがけ期間中の大規模 VLSI 上に専用並列化回路として展開する手法の研究の成果として、さきがけ終了後の特許出願件数（年平均）が増えている。

2.2.5 招待講演件数の推移

招待講演件数は学界での認知の高さを分析する一つの指標であると考えられるため、さきがけ期間中と終了後の招待講演件数（年平均）の個人別推移を図 2-5 に示した。さらに、図 2-5 のうち数として、さきがけ期間中と終了後の国際会議での招待講演件数（年平均）を図 2-6 に示した。

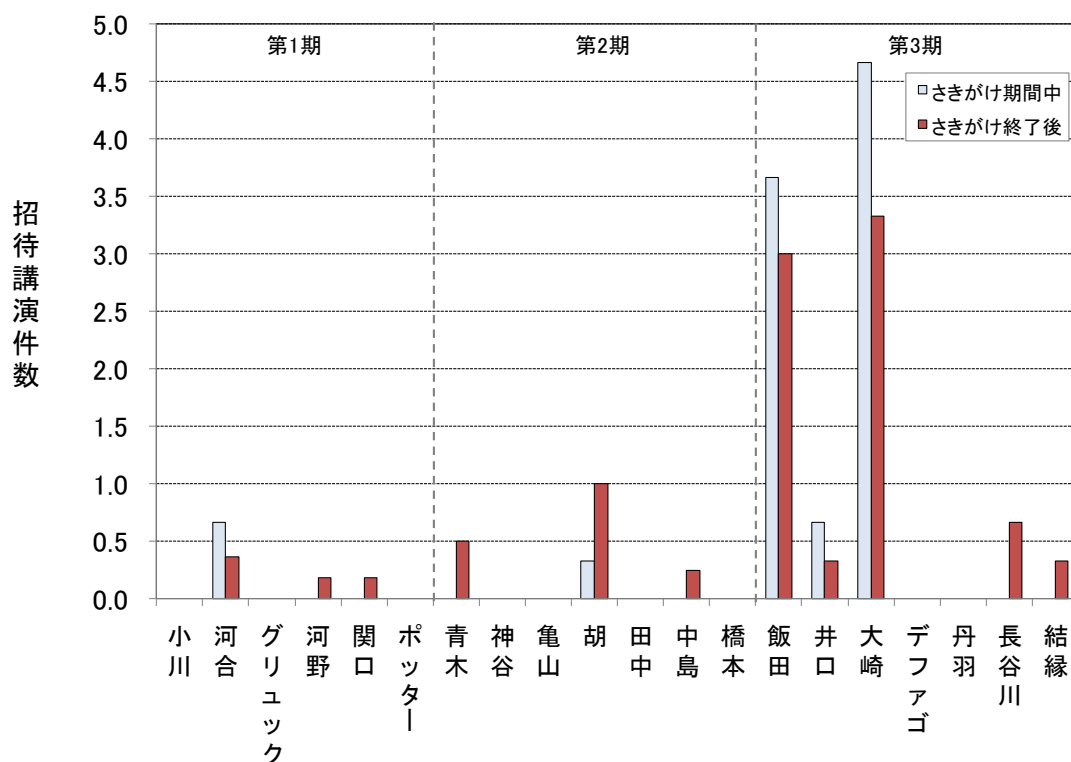


図 2-5 研究者の招待講演件数（年平均）

招待講演は、一部の研究者においてはさきがけ期間中から活発に行われているが、多くの場合、さきがけ終了後に行われている。中島（第 2 期）など、産業分野への応用を重視する研究者では、さきがけ期間中の研究が認められて、関心を持つ産業界や学会からチューターとしての講演を求められることが多いと考えられる。

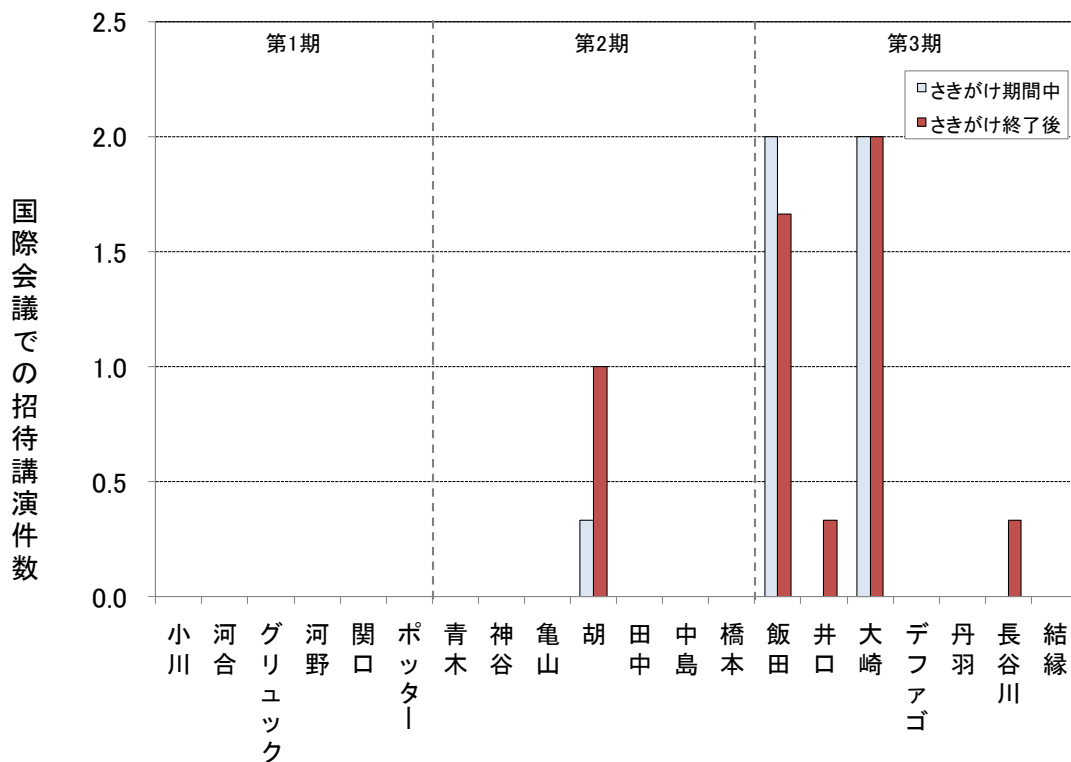


図 2-6 研究者の国際会議での招待講演件数（年平均）

20 名中 3 名について、さきがけ終了後における国際会議での招待講演件数（年平均）がさきがけ期間中に比べて増えていることが分かる。特にさきがけ終了後、胡（第 2 期）は構造化プログラムの系統的設計法に関する研究成果を国際会議である ACM PLDI 2007 で発表、第三準同型定理を木構造を走査する計算に対して拡張した研究成果を国際会議 ACM POPL' 09 で発表、構造化プログラムの最適化手法に関する研究成果を国際会議 EuroPar 2007 で発表するなど海外での発表が増えている。また、大崎（第 3 期）もさきがけ期間中の研究をさらに発展させた論文を、同分野の権威ある国際会議である RTA (Rewriting Techniques and Applications) で発表し、2008 年の最優秀論文賞を受賞している。

2.2.6 研究者の受賞

各種機関からの受賞は、さきがけ研究者が外部からどの程度評価されているかの一つの証左であるため、さきがけ期間中と終了後の受賞について、表 2-2(a)と表 2-2(b)にそれぞれ示した。

さきがけ終了後には、計 16 個の受賞が確認されており、マイクロソフト、GPW、文部科学省など幅広い場所から賞が授与されている。

表 2-2 研究者の受賞状況

(a) さきがけ期間中

受賞者名	賞の名称	授与機関	受賞年
神谷 年洋、井上、楠本	第 35 回市村学術賞 貢献賞 「コードクローン検出システム」	新技術開発財団	2003
神谷 年洋	未踏ソフトウェア創造事業 天才プログラマー／スーパークリエイター 「コードクローン検出ツール CCFinderNexGen の開発」	(独)情報処理推進機構 (IPA)	2004
中島 震	論文賞	日本ソフトウェア科学会	2003
長谷川 真人	第 19 回日本 IBM 科学賞 (コンピューターサイエンス分野)	日本 IBM (株)	2005

(b) さきがけ終了後

受賞者名	賞の名称	授与機関	受賞年
河合 栄治	The Best Paper Award	USENIX (The Advanced Computing Systems Association)	2005
河合 栄治	優秀論文賞	情報処理学会	2005
河合 栄治	山下記念研究賞	情報処理学会	2006
河合 栄治	通信ソサイエティ活動功労賞	電子情報通信学会	2006
青木 利晃	優秀論文賞	情報処理学会	2005
青木 利晃	山下記念研究賞	情報処理学会	2006

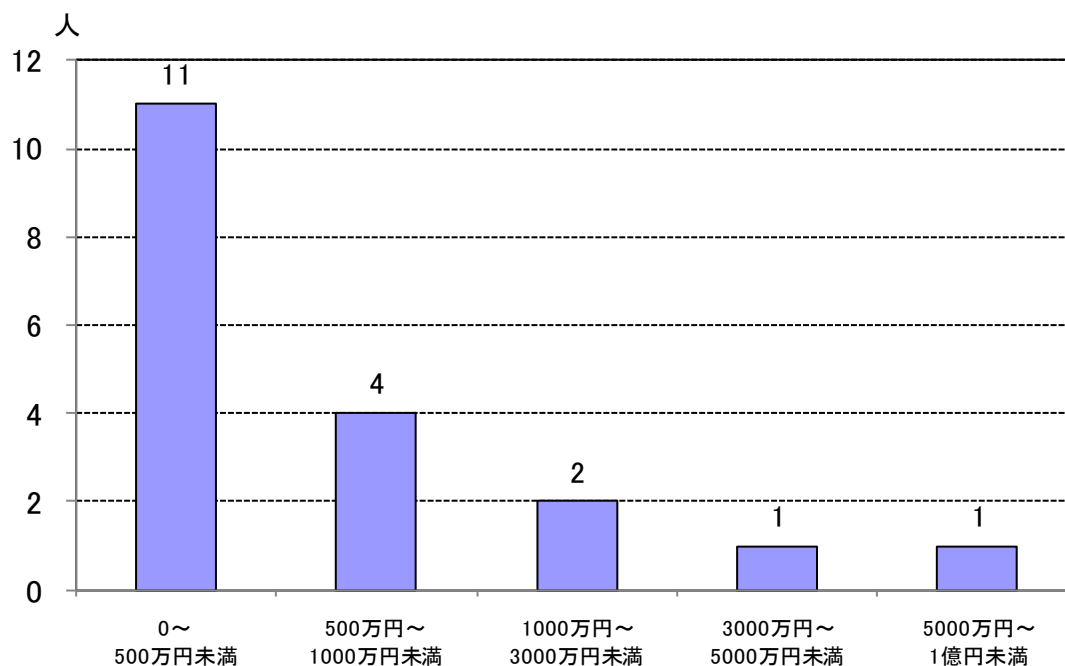
受賞者名	賞の名称	授与機関	受賞年
神谷 年洋 他 8名連名	情報・システム ソサエティ論文賞 「ソフトウェアシステムの類似度とその計測ツール SMMT」	電子情報通信学会	2007
神谷 年洋	基礎研究賞	日本ソフトウェア科学会	2008
神谷 年洋	マイクロソフトリサーチ日本情報学研究賞	マイクロソフト	2009
胡 振江	最優秀論文賞	日本ソフトウェア科学会プログラミング研究会	2008
胡 振江	第 25 回高橋奨励賞	日本ソフトウェア科学会	2009
飯田 弘之	GPW 研究奨励賞 「Futility Pruning に関する研究」	GPW	2008
大崎 人士	文部科学大臣表彰 若手科学者賞	文部科学省	2006
大崎 人士	最優秀論文賞	国際会議 RTA (International Conference on Rewriting Techniques and Applications)	2008
長谷川 真人	文部科学大臣表彰 若手科学者賞 「プログラミング言語の意味論の研究」	文部科学省	2008
結縁 祥治	論文賞	情報処理学会	2008

このように、さきがけ終了後の受賞が多くなっており、研究成果の発展が内外で評価されつつあるものと考えられる。また、個別では、さきがけ期間中に IBM 科学賞を受賞した長谷川（第 3 期）のように情報科学全体への基盤的な研究貢献が評価された例がみられる。さきがけ終了後には優秀な論文発表としての受賞も多く、河合（第 1 期）、神谷（第 2 期）、胡（第 2 期）、大崎（第 3 期）、結縁（第 3 期）が受賞、さらに文部科学省若手科学者賞を大崎、長谷川が受賞している。

2.2.7 研究者の研究助成金獲得状況

研究者の研究助成金獲得状況について、図 2-8 の下部に示した制度を対象として集計を行った。

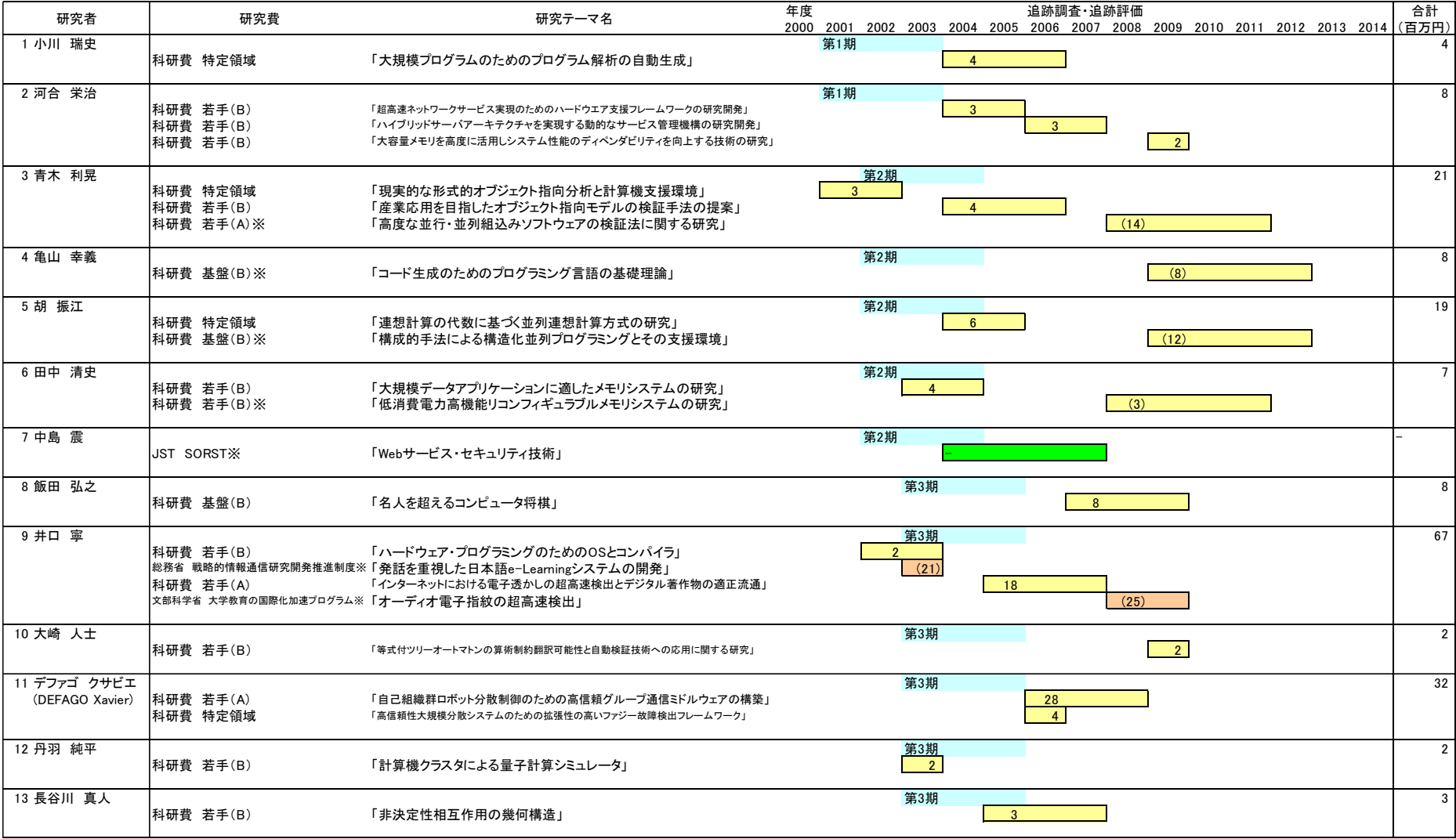
さきがけ期間中と終了後の研究助成金獲得金額合計の分布を図 2-7 に、研究者の研究助成金獲得状況を図 2-8 に示した。



注) 中島は獲得した助成金について回答があったが金額が不明なため、上記図表には含めていない。

図 2-7 研究者の研究助成金獲得状況（さきがけ期間中・終了後合計）

さきがけ終了後から、金額の幅はあるもののコンスタントに研究助成金を獲得していることが分かる。個別では、井口（第3期）やデファゴ（第3期）が、累積で3千万円を超える研究費助成金を獲得しており、これらは電子透かしやロボット等に関わる実用面の広がり期待できる内容が多い。また、検証手法やプログラミング分野についても青木（第2期）や胡（第2期）が累積で2千万円前後の研究費助成金を獲得している。



※一部不明

研究助成金は、下記のみを対象とした。

科研費	特別推進		
	特定領域*		
	新学術領域		
	基盤 (S)	基盤 (A)	基盤 (B)
	若手 (S)	若手 (A)	若手 (B)
JST	さががけ		
	CREST		
	SORST		
	地域イノベーション創出総合支援事業		
その他	NEDOなど国の競争的資金制度に採択されたもの		

*特定領域とつくものすべてが対象（特定領域（A）, 特定領域（B）, 特定領域（C））

【凡例】

科研費

JST

その他

（注）各々の研究助成金の合計金額は四捨五入して百万円単位で表示しているため、個々の数値の和と合計が一致しない場合がある。

図 2-8 研究者の研究助成金獲得状況

2.2.8 参加研究者の研究成果と発展状況

図 2-9 に、参加研究者の発展状況についての回答分布図を示す。さがけ研究の進展、新規領域への展開、共同研究の実施、応用可能性の高まり、応用・実用化に向けた取組の 5 項目について分類した。なお、1 つの研究が複数の項目に該当する場合もある。

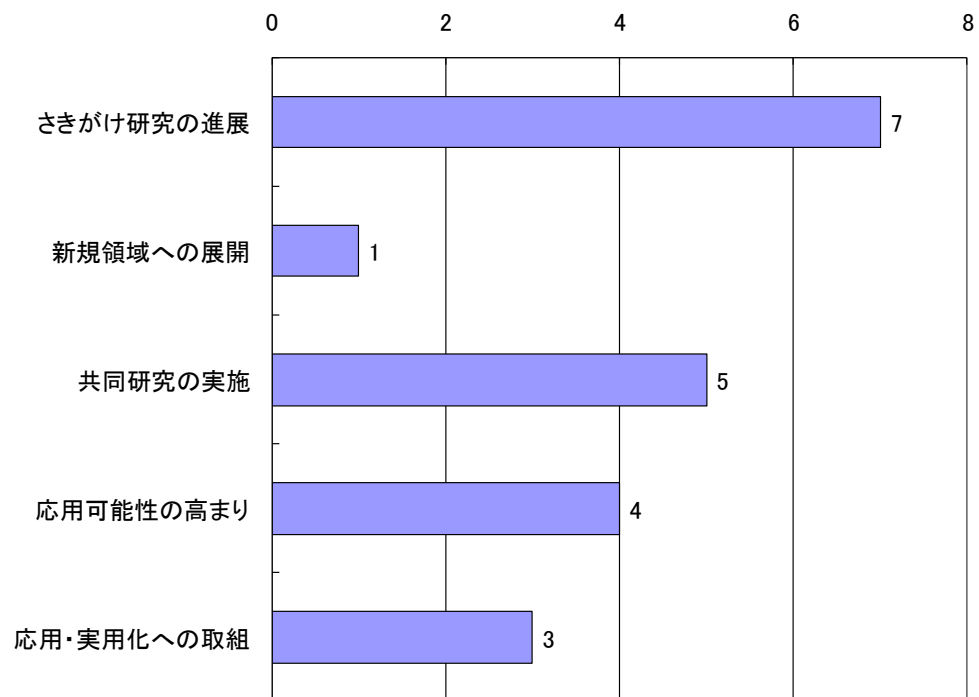


図 2-9 研究成果の発展状況（単位：人）

さがけ期間中の研究の発展という観点からは、さがけの研究成果を理論面でさらに拡張した研究展開がみられるとともに、産業界のフィールドへの適用、実用化に向けた取組みも多く行われている。たとえば、中島（第 2 期）、大崎（第 3 期）はソフトウェアのモデル検査手法の普及や適用に向けた著書やチュートリアルを推進している。さらに、個別企業との共同研究により実践の場での活用性を追求していく方向もみられる。これらには、セキュリティ関連分野や自動車、ロボット、公共の自動機器などこれからの社会に幅広く埋め込まれていく組み込みソフトウェア分野などへの適用を図っている例もみられる。

以下に、参加研究者のさがけ期間中の研究成果とその発展状況を個別に示す。

I-1 小川 瑞史

(i) さきがけ期間中の研究成果

人間が作成するプログラムを効率の面で凌駕するプログラムの自動生成に取り組んだ。正しいプログラムの自動生成はプログラム開発の究極の姿であるが、これまでは生成されたプログラムの実行効率は非常に低いために、特別な領域を除いては一般的には実用化されていない。本研究は、この問題にチャレンジし、プログラムのフロー解析を対象に新しい手法「グラフの代数的構成法、その上の関数型プログラミング+プログラム変換、SP 項の導入」という非常に有望な方法を開発した。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究に基づき、企業との共同研究を通してフィールドワーク（現実の問題発掘と解決）を進めてきた。

たとえば、プッシュダウンモデル検査を用いた大規模 Java プログラム解析においては、従来、アドホックな構成であった文脈依存 Java プログラム解析を形式言語理論に基づき新しいアルゴリズムの提案を行い、現時点で従来手法と同程度の正確さとスケーラビリティ（20 万行程度）を得ており、さらなるスケーラビリティ（100 万行超）を目指している。

また、プッシュダウンモデル検査を用いたセキュリティプロトコル検証では、従来研究では扱うのが困難であった再帰的セキュリティプロトコルに対し、モデル検査手法を拡張し、実際によく知られた再帰的セキュリティプロトコルのバグ自動検出を示した。

さらに、(コントロール) グラフの代数的構成に基づくプログラム解析の分野において、現実のプログラムのコントロールフローグラフの木幅はほとんど 3 以下であることに着目し、グラフの代数的構成を用いた大幅な効率化を提案した。

このほかでは、構成的証明に基づくプログラム導出に成功したほか、非線形項書換系の合流性及び単一正規形性の十分条件の問題にも取り組んでいる。

I-2 河合 栄治

(i) さきがけ期間中の研究成果

オペレーティングシステムにおける I/O 機構の再構築により、超高速 I/O 指向オペレーティングシステムを実現した。河合は、サーバに搭載されているオペレーティングシステムの I/O 処理機構が同期的であることにより高いオーバーヘッドが生じている点に着目し、非同期性の導入によりこの問題を解決する方法に挑戦した。その結果、CPU 処理能力の枯渇防止のための多重化 I/O 実行間隔制御および実時間スケジューリングによる実行間隔制御における確定的なプロセッサ利用という、2つの技術を開発することにより目標を達成した。また、具体的な成果物として、Chamomile と名付けた Web Accelerator を開発したが、これは ISP や通信機器ベンダー等からも高い評価を受けている。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究に基づき、企業との共同研究を通してフィールドワーク（現実の問題発掘と解決）を進めてきた。具体的には、PC の周辺機器接続用インタフェースとして普及している USB をインターネットに拡張する USB/IP の研究を行った。システム技術に関する著名な国際会議である **USENIX Annual Technical Conference** において最優秀論文賞を受賞したり、実装が **Linux** カーネルに取り込まれるなど高い評価を得ている。

また、現在、研究ネットワークである **JGN2Plus** についての研究開発に携わっている。その中で、電子政府を支援するクラウドコンピューティング環境や、環境に配慮したデータセンター設計など、応用・実用化に近い研究開発を行っている。

I-3 Glueck Robert（グリュック）

(i) さきがけ期間中の研究成果

仕様からソフトウェアを自動生成する方法に関してはいくつかのアプローチがあるが、正しいが効率の悪いプログラムをプログラム変換の手法により効率を上げる方法を研究した。この方法は従来から多くの研究が続けられ、多くの成果が報告されているが、未だ実用的な解決が得られていない難問である。プログラム変換における基本変換である、合成、逆転、特殊化について科学的に質の高い研究を行い、この領域の発展に貢献した。また、評価の高い国際会議や論文誌にて多数の論文発表を行った。特に、プログラム逆転や特殊化については非常に優れた結果を出している。もちろん、これらの結果によっても実用的な問題が解ける段階にはなっていないが、そのための基礎となる理論的、科学的貢献は大きい。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

可逆計算、可逆プログラミング分野での業績を挙げており、もとのプログラムから逆関数を自動的に生成する研究の第一人者として活躍している。**PEPM (Partial Evaluation and Program Manipulation)** などの重要な国際会議でプログラム委員長（2008 年）を務めるほか、可逆プログラミング言語の設計や可逆計算モデルの理論的に関する論文を発表している。

I-4 河野 真治

(i) さきがけ期間中の研究成果

主に組込みソフトウェアなどを対象として実用的なソフトウェアの開発に利用でき、かつ、モデル検査などによる正しいプログラムの構築が行いやすいプログラミング言語、その言語で記述されたプログラムの検証法、検証システム構成法に関する研究を行い、実用的で有望な結果を得た。**CbC** と呼ばれる言語を新たに設計し、その言語に対するモデル検査による並列検証系の研究とその実装を行い、**CbC** による実用的で正しいプログラムの開

発の可能性を実証した。ソフトウェアの不具合による携帯電話のリコール問題などが多発する現在、この研究成果は非常に重要である。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

さきがけで研究した **Continuation based C** のプログラムに関する検証や PS 3 の Cell への適用について論文を発表している。また、現在は GCC 4.0 をベースに実装しており、sourceforge.jp 上に公開している。PS2 を使ったゲームフレームワークは、PS3 上で、Cell の SPU を用いた **Cerium Engine** として、学生のゲーム作りに使われている。

I-5 関口 龍郎

(i) さきがけ期間中の研究成果

インターネットが社会基盤となっている現在、そこでの安全性の確保は極めて重要であり、安全性を担保可能なインターネットプログラミング言語の研究が活発に行われている。ここでは、そのような言語の設計と安全性確保のための検証系を組み込んだ言語処理系の設計・構築を行ったが、第 1 級の研究結果を出したと考える。実用性のある言語では安全性上問題のあるポインターを排除することは出来ないことを前提として、ポインター解析に従来より強力な方法を導入することにより、実行速度と安全性の両面において現在開発されている言語としては最高レベルの性能を発揮している。実用的なソフトウェア開発での採用にあともう一步必要であるが、この分野に非常に大きな貢献をした。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

2005 年の日本ソフトウェア科学会ではプログラム委員とともにグリッド・分散のセッションにおける座長を務めている。

I-6 Richard Potter(ポッター)

(i) さきがけ期間中の研究成果

プログラムの実行状態の表示、保存、復帰、途中状態からの実行再開などを行うツールがプログラムの理解や開発に有効であるという考えにもとづき、コンピュテーションスクラップブックというツールの研究を行った。この原理自身は特に新しいものではないが、構築されたツールは非常に優れ、有効なものである。ポッターのプログラミングの能力とセンスの良さ、ツール設計の適切さによるものである。開発された 2 つのツールのうち、Linux オペレーティングシステム上のプログラム開発を対象にした **SBUML** は特にそのアイデアの斬新さや適用範囲の広さから期待の大きいツールである。ネットワークプログラミングやシステムプログラミングにとって非常に強力なツールになり得る。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 CREST 専任研究員として、自律連合システムに参加し、仮想化されたネットワーク環境上で仮想計算環境を稼働させることによって、クラスタシステム上に自律連合型システム環境を仮想的に作り出し、自律連合型システムの有効性を検証するプロジェクトに従事している。

Ⅱ－１ 青木 利晃

(i) さきがけ期間中の研究成果

分析モデルを形式的に構築し、構築したモデルを検証することによりその正しさを保証する研究に取り組んだ。従来から形式手法によるソフトウェアの検証は研究されてきたが、検証コストが高いことにより産業界で採用されるには至っていない。この問題を解決するために、オブジェクト指向分析・設計モデルの検証のコストを下げる目的で、定理証明やモデル検査による検証方法論や検証支援環境、検証結果の再利用方法論などの研究を行い、オブジェクト指向分析設計モデルの検証としては先進的な結果を出た。また、開発したツール(F-Developer)の公開など形式技術のソフトウェア開発への適用に関して優れた研究成果をあげた。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

「モデル検査によるリアルタイムオペレーティングシステムの設計」「検証環境モデリングによるモデル検査スクリプトの自動生成」といった研究を通じてモデル検査手法の適用可能性をさらに広げつつある。

また、研究で用いているモデル検査や定理証明といった技術を産業界に普及する活動を行っている。具体的には、定理証明システムの設計検証への応用手法、モデル検査の組み込みシステム開発への応用手法などである。

Ⅱ－２ 神谷 年洋

(i) さきがけ期間中の研究成果

従来のオブジェクト指向技術の利点を損なうことなく柔軟な運用を可能にするソフトウェアの構築を目指した。オブジェクト指向ソフトウェア開発技術では、ソフトウェアはオブジェクトという情報隠蔽されたモジュールによって記述され、モジュールの再利用性や記述の堅牢性が高められている反面、オブジェクト間の関係記述が困難であり、ソフトウェアの進化が行いにくい。本研究では、オブジェクト間の関係記述のためにメディアと言う概念を提案し、オブジェクト+メディアによってソフトウェアを記述する方法論 SOMA を提唱し、SOMA によりソフトウェアを記述するための言語環境 soja の開発を行った。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

ソフトウェア開発者が抱える大量かつ多種の文書の問題に対して、開発者の必要に応じて、様々なリバースエンジニアリング技術・ツールを組み合わせることを可能にするツールキットを提供することにより、開発者の能力を拡張する、という提案を行っている。現在、ソフトウェア工学における研究の重心は、モノ（プロダクト）・コト（プロセス）からヒトに移ってきている。この研究提案は、開発者を中心としてソフトウェア開発技術を整理することを目標としている。

II-3 亀山 幸義

(i) さきがけ期間中の研究成果

プログラムの実行を制御する機構をプログラム内部から操作してプログラムの実行メカニズムを柔軟かつ強力にするためのメタレベル機構に関して、限定継続とメタ変数・文脈に関する理論的研究を行った。精密な理論的研究を展開し、非局所脱出の体系、**shift/reset**機構の公理化、継続機構の階層化などに関して研究を行い、安全なメタレベル機構の開発に関して優れた成果をあげている。研究成果も一流の国際会議などで公表し、また、関連の国際会議でプログラム委員長などをするなど、大変高い研究成果が得られた。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

プログラミング言語における制御を表す言語プリミティブ、特に「限定継続」を扱うコントロールオペレータについての研究を行っている。具体的には動的限定継続に関する論文を情報学会誌に発表（2008年）するとともに、**Symbolic Computation in Software Science (SCSS)** という国際会議でも発表している（2008年）。限定継続の機構は現在、多くのプログラミング言語研究者に注目されている領域である。

また、メタプログラムで生成されるコードが安全なものであることを保証する言語機構について研究を行い、この分野における国際的にトップレベルの会議である **PEPM (Partial Evaluation and Program Manipulation)** で2回発表を行った。

さらに、複数の類似したモデルを同時に高速にモデル検査するための手法として多値モデル検査のアルゴリズムを提案し、**ATVA (Automated Technology for Verification and Analysis)** 国際会議において発表を行った。

II-4 胡 振江

(i) さきがけ期間中の研究成果

データに内在する並列性を並列データ構造として捉え、それを処理するための並列処理スケルトンを少数用意し、それらの組み合わせによって並列処理プログラムを作成しようとした。このような方式で並列プログラムを構成するための理論体系を整備し、それにもとづいてスケルトンライブラリを構成し、現実の問題に対して並列プログラムが効率的に

構成できることを具体的に示した。他の類似研究に比べると、扱える並列データ構造の種類が多く、また、スケルトンとその組み合わせ機構が数学的に整理されており、体系的な展開が可能である。国際的にも高い評価を得ており、優れた研究成果をあげた。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

第三準同型定理に基づいた自動的な並列化手法を提案した。元の関数の右逆元である右逆関数を用いて、第三準同型定理に基づいた並列化を自動的に行うことを示した。また、右逆関数の導出を用いた自動並列化システムの実装を与えその有効性を示した。この研究成果をプログラミング言語の設計と実装に関して世界で最も権威ある国際会議である ACM PLDI 2007 で発表した。また、第三準同型定理を木構造を走査する計算に対して拡張した。本研究成果をトップ国際会議 ACM (POPL Principles of Programming Languages) 2009 で発表した。

科学計算などでよくみられるある要素の近傍要素を必要とする計算に焦点をあてた最適化手法を提案した。まず、対象とする計算を抽象化した標準形を設計した。そして、スケルトンプログラムから標準形への変換規則及び標準形の効率的な実装を与えた。本研究成果をまとめた論文を国際会議 EuroPar (2007 年) と International Journal on Parallel Processing (IJPP) (2007 年) で発表した。

II-5 田中 清史

(i) さきがけ期間中の研究成果

マルチタスク環境でリアルタイムアプリケーションを効率よく実行するプロセッサアーキテクチャに関し、プロセッサコンテキストバッファ、高速割り込み応答機構、再構成キャッシュメモリなどの機構を提案した。更に、PRESTOR-1 と呼ばれるプロセッサチップを開発し、その有効性評価を行った。基本性能に関しては、RTL シミュレーションにより評価を行い、予定された性能が得られることを確認している。実用的には、効率化に関する改善点があることが判明しているが、限られた研究期間のなかで、構想から実装までを行い、一定の成果をあげた。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究で行ったプロセッサアーキテクチャを発展させ、「低消費電力化を実現するプロセッサアーキテクチャの研究」を行っている。主にキャッシュメモリの低消費電力化に重点を置いている。関連する論文を Asia-Pacific Computer Systems Architecture Conference (ACSAC)、International Workshop on Advanced Low Power Systems など で発表している (2007 年)。さらに、2008 年には、データプリフェッチ最適化のためのバイナリ変換手法についても情報処理学会シンポジウムや IEEE 2008 International Symposium on Frontiers in Computer Architecture Design (FCAD'08) において発表して

いる。

Ⅱ－6 中島 震

(i) さきがけ期間中の研究成果

インターネット上のウェブサービスの安全な構成法に関する研究を行い、2つの大きな成果を得た。一つ目は、ウェブサービスに関する国際標準言語 **WSFL** の仕様にデッドロックに関する問題点があることを、モデル検査技術によって明らかにした。この結果は国際的に高い評価を得ている。もう一つは、ウェブサービスにおけるセキュリティに関するものであり、数学的束理論とモデル検査を用いて安全にデータを移動させる方法を研究した。いずれの研究も、現実の問題を最新の情報科学の手法とツールを用いて解決したもので、大変優れた研究成果である。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究の中心テーマである **Web サービスのモデル検査**については、(a) **WS-FM (Web Service and Formal Methods)**という国際ワークショップの **PC 委員**として日本から唯一参加、(b) 2005 年発表論文で言及した試作ツールに関する問い合わせ、(c) 2002 年発表、2005 年発表の論文が、約 5 年経った現在でも論文に引用されることが多い、など国際的な関心を喚起した。

また、産業界との連携という観点からは、2009 年 12 月 22 日に (株) **NTT データ**、富士通 (株)、日本電気 (株)、(株) **日立製作所**、(株) **東芝** の 5 社とともに **ディペンダブル・ソフトウェア・フォーラム (Dependable Software Forum、略称名は DSF)** を発足させ、高信頼性ソフトウェアの開発・検証のための形式手法の普及展開を図りつつある。

さらに、ソフトウェアプロダクトライン工学 (**SPLE**) の有力な方法である **FODA (Feature Oriented Domain Analysis)** で提案されたフィーチャーダイアグラムを形式化し、自動検査する方法についても研究を進めており、システム検証の科学技術シンポジウムにおいて発表を行っている (2007 年)。

Ⅱ－7 橋本 政朋

(i) さきがけ期間中の研究成果

プログラムの更新による計算機の停止を回避する方式に関する研究を行った。プログラムの停止を伴わずに更新を行う試みはこれまでもあったが、本研究の方法は従来のものに比べてスケーラビリティや自動化に優れ、適用範囲が広い。方式の提案とそのためのメカニズム、プロトタイプシステムの構築に関する研究を行った。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

2005 年の人工知能学会において、「意味の位置づけを可能にする意味表現を用いた情報家電

操作のための対話的インタフェース」を発表している。

Ⅲ－１ 飯田 弘之

(i) さきがけ期間中の研究成果

コンピュータ将棋の研究開発を通して、探索と知識の融合による高度な知能の実現を目指した。これまでのコンピュータ将棋の開発と比較すると、本アプローチは科学的裏づけを重視したものであり、新たな探索法の提案などにより世界トップレベルの非常に強力なシステムを構築した。更に、一般のゲームについても研究を行い、ゲーム洗練度の指標の提案とそのゲーム進化に関する大変興味深い結果を得ている。また、三名人モデルの提案を行った。本研究は、ゲームを人間の最も基本的な知的活動と捉え、その科学的解明を目指すと同時に、知能に関する新たな研究領域を構築しようとするものであった。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

実現確率探索という選択的探索アルゴリズムをベースにした将棋ソフト「TACOS」を開発し、序盤での新たな工夫により TACOS を強めることに成功した。具体的には、得意な戦法を選択できるようになったこと、また、定石から外れた場合でも、自分にとって得意な戦型となるように試合をリードする手法について、機械学習を適用することで実現した。こうして、序盤では有利に試合を進めることができるようになった。実際、2009 年 5 月に開催された 14th Computer Olympiad (スペイン) 将棋部門では、タコスが優勝(金メダル)するに至る。

また、ゲーム洗練度の研究から発展させて、ゲームにおける公平性やスリル感について理論構築を行い、2008 年にテクニカルレポートとしてとりまとめた。

さらに、さきがけ研究期間に考案・確立したゲーム洗練度の理論に基づいて「超公平な社会モデル」を検討し、少子高齢化社会において、介護を必要とする年輩者や知的障害者の方々等(社会的弱者)を社会の中心に据える取り組みを展開中である。具体的には、2009 年に、老年学(Gerontology)の国際会議(Gerontology International Synthesis Conference)において、老年学の視点から人間の尊厳を IT によって支援するというテーマの招待講演を行った。

Ⅲ－２ 井口 寧

(i) さきがけ期間中の研究成果

ソフトウェアから演算並列性を引き出し、大規模 VLSI 上に専用並列化回路として展開する手法の研究に取り組んだ。近年のハードウェア技術の進歩により VLSI のゲート数は飛躍的に増大しているが、それらを有効に活用する技術が十分には確立されていない。本研究は、ソフトウェアの一部を直接ハードウェア化することにより、高速な実行を行わせようとしたものである。C 言語で記述されたソフトウェアを対象にして、並列化の効果の高いル

ープ構造の展開や、コンパイラへの並列化ディレクティブ挿入による並列化の指示などにより、並列性の高い **FPGA** を合成する方式の研究を行った。超細粒度並列処理のためのテストベッドの構築、並列化回路合成スキーム、チップ面積を有効活用する並列化手法などの研究を行うと同時に、電子透かし検出アルゴリズムなどの実例に対してその有効性を確認するなどの成果を上げている。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

High Performance and Highly Survivable Routers and Networks (HPSRN 2007) という国際会議において音楽向けの電子透かしを高速検出する技術に関する発表を行っている。また、グリッドや並列処理システム等のネットワーク化された計算機システムの信頼性確保や構築に関する研究発表も多く行っている。たとえば、2007 年以降には電子情報通信学会論文誌において分散処理のためのタスクフロースケジューリングに関する論文を発表している。

Ⅲ－３ 大崎 人士

(i) さきがけ期間中の研究成果

リアクティブシステムの安全性を自動的に検証する研究に取り組んだ。安心性や安全性は、今日の情報システムにとって最も重要な要件であるが、本研究は情報科学の基礎技術である形式仕様化や形式検証技術によりこの問題の解決を図ろうとするものである。大崎は、従来のツリーオートマトンを拡張した新しい等式つきツリーオートマトンの概念を独自に考案し、その理論展開を図ると同時に、それにもとづいて形式検証のためのツール群を構築し、リアクティブシステムのための自動検証システムを開発した。等式つきツリーオートマトンは国際的にも高く評価され、新しい研究分野として認識されている。国際的共同研究を活発に行い、成果を着実にあげると同時に、著名な国際会議での論文発表やチェアー、プログラム委員などを務め、国際的評価も高い。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

「等式付ツリーオートマトン (equational tree automata)」の概念を世界に先駆けて提案し、木構造言語理論の新たな一研究分野を築くことに貢献した。この理論についての論文は、2006 年度の文部科学大臣表彰若手科学者賞、2008 年度の **RTA (Rewriting Techniques and Applications)** の最優秀論文賞を獲得している。理論的には従来ほとんど未開拓だった木構造言語の豊かな階層化という他の追随を許さない新規性をもつと同時に、等式付ツリーオートマトン理論に根ざした自動検証ツールの実装とアルゴリズム開発を通じ、現代情報システムの安全性検証技法の発展に大きく貢献すると考えられる。賛同する研究者が世界的に増えつつあり、暗号通信プロトコルや仕様記述の自動検証の研究分野を始め、多岐にわたる分野で優秀な研究成果が生まれつつある。

理論面では、イリノイ大学の研究者と共同で理論の拡張を図っており、先述の RTA 等の国際会議にて発表している。

Ⅲ－４ Defago Xavier (デファゴ・クサビエ)

(i) さきがけ期間中の研究成果

大規模分散システムの高信頼、耐故障性に関する研究である。このようなシステムでは、それを構成する計算ノードやネットワークが故障することは日常的であり、このような故障に際してもシステム全体が動作し続けることが重要である。最も基本的な全順序ブロードキャスト通信プロトコルのためのアルゴリズムの詳細な検討と分類を行い、新しいアルゴリズムを得ている。また、誤り検出方式に関しては、従来よりも高性能で応用の広い **Accrual** 誤り検出器を発明した。さらに、これらの成果を実験的に検証するためのシミュレーション環境 **NekoLS** の開発を行い、これらの方式の有効性を確認している。これらは、国際的評価の高い論文誌や専門家会議の招待講演などで発表されている。高く評価できる研究である。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

さきがけにおいて開発された誤り検出器は、巨大 SNS サイト **Facebook** に組み込まれたミドルウェアである **Cassiopea** 開発プロジェクトにおいても活用されている。

モバイルロボットへの応用を図り、2009 年には **AINA** (**Advanced Information Networking and Applications** 等の国際会議において発表を行っている。

さきがけでの研究業績が寄与して、クサビエは高信頼性分野のきわめて重要かつ難関とされるワーキンググループである **IFIP working group 10.4 on Dependable Computing and Fault-Tolerance** のパーマネントメンバーに選出された。

Ⅲ－５ 丹羽 純平

(i) さきがけ期間中の研究成果

広域環境に存在する計算機資源上で、並列プログラムを効率良く実行させるための研究に取り組んだ。近年、大規模科学計算のために大量の計算機パワーが必要とされ、グリッド計算システムが注目されている。通常は高速 LAN で結合された計算機群が利用されるが、超高速広域ネットワークで結ばれた研究機関の計算資源を利用する次世代実験科学のための計算プラットフォームが今後重要になると考えられる。本研究は、広域環境中の共有メモリ並列プログラムを高速に動作させるための最適化コンパイラやランタイムシステムの構築法に関するものであり、クラスタキャッシュやプリフェッチ機構、スケーラブル共有メモリ機構、効率的耐故障機能などの方式を考案し、実装・評価を行い、それらの有効性を実証した。このような研究は今後のさきがけとなるものであり、高く評価できるものである。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

2006 年にサイボウズへ入社し、グループウェアのリモートアクセスツールや全文検索システムの開発に携わる。

Ⅲ－6 長谷川 真人

(i) さきがけ期間中の研究成果

プログラムの振舞いを表す制御構造を数学的に解明することを目指した。再帰、継続、多相性をもった高階関数型言語の振舞いを正確に表現するプログラム意味論を、カテゴリ理論などを用いて数学的に展開し、これまでのプログラム意味論を大きく前進させた。この研究から生まれたパラメトリシティ原理は、高く評価できるものである。国際的な評価も高く、日本 IBM 科学賞を受賞した。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

巡回構造から生じる再帰計算の意味論をトレース付きモノイダル圏を用いて構築し、これが領域理論を用いた不動点意味論を真に拡張するものであることを示した。再帰プログラムの意味論への基礎的な貢献として、また相互作用の幾何や結び目の理論とプログラム意味論を結び付ける仕事として、広く認められている。トレース付きモノイダル圏についての研究発表は、コンピュータサイエンス関連の学会のほか、Cambridge Philosophical Society, のような純粋理論の学会でも行われている。

第一級継続を持つ多相型プログラミング言語のパラメトリシティ原理の検討成果とあわせ、国際的に認められており、POPL、FoSSaCS (Foundations of Software Science and Computation Structures) などの重要性の高い国際会議においてプログラム委員を務めている。

Ⅲ－7 結縁 祥治

(i) さきがけ期間中の研究成果

高信頼 Web アプリケーションプログラム開発手法に関する研究に取り組んだ。Web アプリケーションの振舞いを抽象的な Web オートマトンとして形式化し、これをもとに高信頼 Web アプリケーションを開発する研究を行った。Web オートマトンの定義、Web オートマトンからのテスト系列の生成、Web オートマトンから非同期 π 計算への変換、それらの現実システムへの適用の研究を行い、このような形式的方法論が高信頼 Web アプリケーションの開発に有効なこと示したものであり、高く評価できる研究である。

(ii) さきがけ終了後の発展状況

さきがけで進めた時間に関するプロセス代数の研究を車載ソフトウェアの高信頼化に応

用するための取り組みを、研究機関と進めている。

発表論文においては、通信プロセスモデルや実時間システムに関する検討成果を発表し続けており、そこには APSEC (Asia-pacific software engineering conference 2007) のような国際会議も含まれる。

なお、より応用に近い論文では、情報家電における振る舞い記述に関するものも発表されている (2007 年)。

2.2.9 さきがけ研究の意義

(1) アンケート回答のまとめ

アンケート回答から、本研究領域の参加研究者にとって、さきがけ研究がどのように意義があったのか意見をまとめ、図 2-10 に示した。アンケートを回収できた研究者 18 名のうち、さきがけ制度に対して肯定的意見のみを有する研究者は 6 名、肯定的意見と改善要望の両論を併記していた研究者が 7 名、否定的意見のみを有する研究者が 1 名であり、何らかの評価をしている回答者 14 名のうち 13 名は自身の研究に役に立っていると考えていることが窺える。

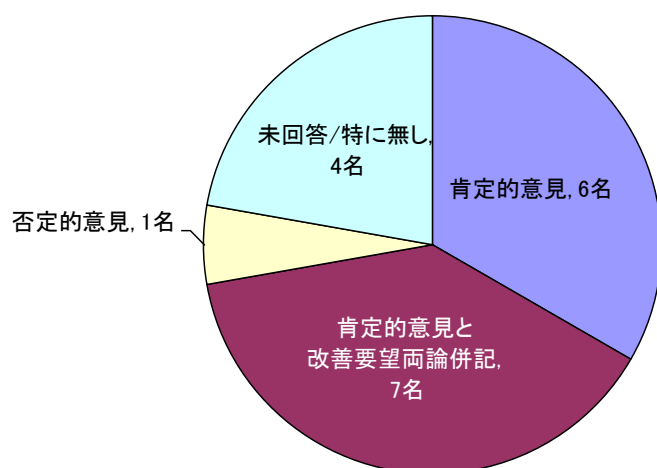


図 2-10 さきがけ研究の意義に対する意見

(2) さきがけ研究の意義に関する肯定的意見の内容

さきがけ研究の意義に関する肯定的意見の内容を図 2-11 に示した。

「研究者間の人的ネットワークの形成」及び「研究基盤の確立」の指摘が多い。研究者間のネットワークについては、さきがけ終了後も共同研究やそれぞれの研究室間のワークショップを開催するなどの活動に結びついている。さきがけの場合、合宿も組み込んでいることから、研究者間の連帯意識が生まれるとともに、論文発表以外の研究領域についての意見交換も幅広く行われており、その後のネットワーク形成に寄与している。代表的研究

者からも、「さきがけのよさは同じ領域の人が集まって議論すること。ネットワークを作っていくことが重要であり、ここでは問題をつくっていく過程から議論する仲間ができる。ポスドク以降で、一番苦勞するところを共有するような経験ができるというメリットが大きい。」との意見が得られた。

研究基盤の確立については、その後の発展的研究により受賞や国際会議での活躍しており、意義が大きかったものと考えられる。

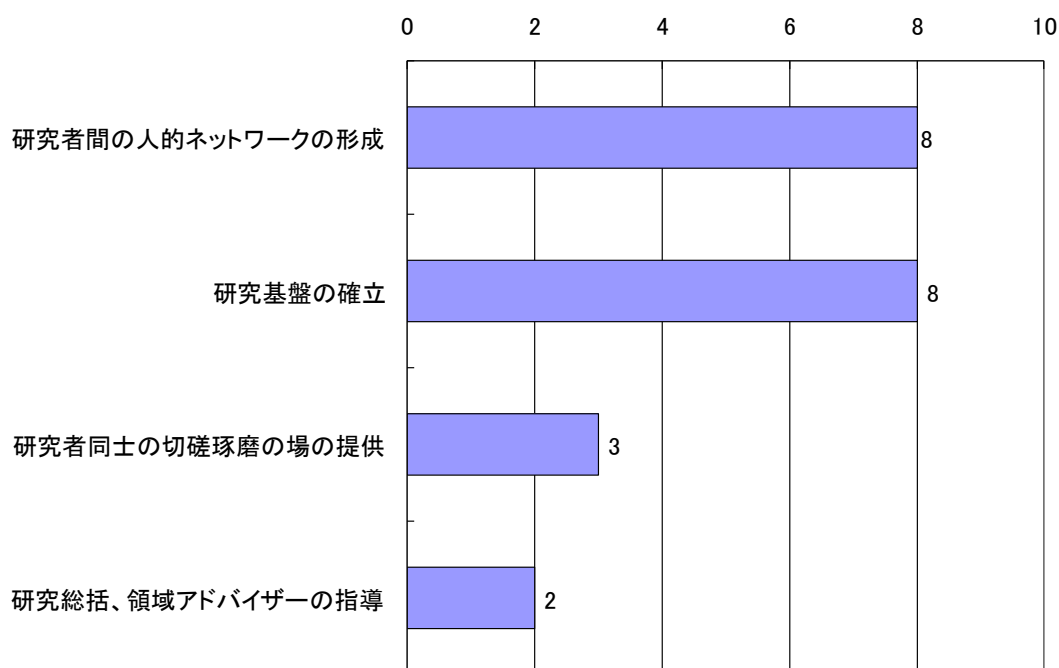


図 2-11 さきがけ研究の意義に対する肯定的意見（単位：人）

(3) さきがけ研究に対する改善要望の内容

さきがけ研究に対する改善要望の内容をみると、期間面では、さらに長期のプログラムがあるとよいとの意見があり、基盤的な研究テーマについては進捗をモニタリングしつつ、期間面の柔軟性を持たせることも考えられる。

研究テーマについては、偏りとの指摘もあるが、新規性、社会的必要性などを考慮して設定していくうえでは、重点化も必要と考えられる。ただし、情報技術の分野は変化が激しいため、研究テーマの見直しや組み換えについては柔軟に相談できることが望ましい。

予算の執行については、適正に研究を進める上である程度きびしいのはやむを得ないが、そのために事務作業等にとられる時間が大きくならないような配慮は必要である。また若手ということもあり、手続き面のコツもみえていないため、アドバイザー等による支援も有効であろう。

(3)今後の課題

代表的研究者からは、当該分野における JST の情報の発信について、「発信情報の受け手としては、研究者のヘッドクォーターに積極的になってもらうようにアピールしていくべきである。教授やセンター長などにわかりやすく出していくことが有効である」との意見が得られた。

また、情報科学という領域設定については、やはり代表的研究者より「情報系という分野として広すぎる。「機能と構成」が広げるうえでの限度であろう。ただし、あれより狭くしてしまうとつまらない。自分が参加したときには、研究総括のさじ加減と応募する人の分野の広がりとはちょうどよいバランスを生み出した」との意見が得られており、バランスのとれた領域設定が望まれる。また、「もはや情報科学は総称であって分野の名前ではない。情報は産業分野や特定の理論に依存しているので、組込みなどの領域になるとよい。そうすることで、非常にみやすい領域設定になる。」との意見も得ている。

今後の CREST などとの対応関係については、数学などの理論中心の場合の難しさも指摘されている。たとえば、「数学の CREST はあるが、ゴールを設定して人を集めてやるというのは、相当負担ではないか、むしろ分野によっては数学者を一部入れて実施するのは良い」との意見が得られた。

2.3 第2章のまとめ

さきがけ期間中、及び終了後から追跡調査時点までの、職位、論文発表件数、特許出願件数、研究助成金獲得額などを比較し、さきがけ期間中に比して、さきがけ終了後に研究活動が向上していることを確認した。

職位については、採択時に0名であった大学教授職には、追跡調査時では6名と大幅に増加しているなど、さきがけ終了後に職位が上位となるケースが多くみられた。論文発表件数については、さきがけ期間中に比べて、終了後の論文発表件数（年平均）が増えている研究者は14名と過半数を占めている。著書件数については、さきがけ終了後に発表件数を大きく伸ばす研究者が出ているなど、さきがけ期間中に培った成果がさらに展開・発信されている様子がみてとれる。また、招待講演はさきがけ期間中・終了後において頻度の高い研究者がおり、国際的にも関心を集めることで、それぞれの分野におけるプレゼンスを高めたと考えられる。

研究助成金に関しては、さきがけ期間中・終了後の累積で3千万円を超える研究費助成金を獲得している研究者が2名みられた。

さきがけの意義としては、人的ネットワークの形成・拡大効果が大きく評価されており、その後の研究活動の拡張、高度化において有効に機能していることが窺える。

第3章 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な波及効果

3.1 詳細調査の内容

アンケート調査結果および研究総括のご意見を参考にして、詳細調査対象となる代表的研究者 5 名を抽出した。2010 年 1 月～2 月にかけて、それら 5 名に対して、インタビューによる詳細調査を実施した。インタビューでは主として以下の項目について把握した。

- ① 研究成果の発展状況や活動状況に関して
- ② 研究成果から生み出された科学技術的・社会・経済的な効果・効用
- ④ その他

3.2 代表事例の発展状況

3.2.1 効率的で正しいプログラムの自動生成（小川 瑞史 第 1 期）

(1) 研究成果の発展状況や活動状況に関して

さきがけ期間中は、人間が作成するプログラムを効率の面で凌駕するプログラムの自動生成に取り組んだ。ソフトウェアの高信頼化において、人間の記述したプログラムの正しさを検証する方法に対し、自動生成により正しさを保証する方法がある。しかしながら従来のプログラム生成が比較的単純な式変形規則の発見的適用を用いることが多く、自動化が困難であった。

本研究は、この問題に高度な数学的な証明を核として事前にプログラム生成系に組込むこと、さらにその適用に適した応用領域を切り出すことで、自動化の可能性にチャレンジした。具体的には、現実のプログラムのコントロールフローグラフの木幅はほとんど 3 以下であることと、木幅に上界があるときには SP 項によるグラフの代数的構成が可能であることを用いて、効率的なフロー解析の理論的生成法を示した。

さきがけ終了後は、理論的な研究とともに、企業との共同研究を通してフィールドワーク（現実の問題発掘と解決）を進めてきた。

プログラム解析・検証の分野では、主としてプッシュダウンモデル検査を用いて、大規模 Java プログラムの文脈依存 points-to 解析や、DSP デコーダなどを想定した C プログラムの丸め誤差解析、セキュリティプロトコル検証などを進めてきた。Java の文脈依存 points-to 解析では 20 万行程度のスケーラビリティを達成しており、さらなるスケーラビリティ（100 万行超）を目指した研究を続けている。

丸め誤差解析については、企業との共同研究の際に発見した現実的な要請から端を発したものであり、過去に例を殆ど見ない斬新なテーマである。たとえば MPEG などのデコーダにおいて、浮動小数点を固定小数点に置き換えて近似してハード化等を行う際に、誤差

がたまってきた画面がスムーズにならないなどの問題への解決をめざしている。ここではデコーダのリファレンスプログラムに対し、丸め誤差を定義する算術演算を設計し、近似誤差の伝播をモデル検査により解析している。

セキュリティプロトコルでは、従来モデル検査では扱うのが困難であった再帰的セキュリティプロトコルにモデル検査手法を拡張し、実際によく知られた再帰的セキュリティプロトコルのバグ自動検出を示した。

より数理論理的な分野では、項書換系において、非線形な場合の研究を進め、1981年に示された Chew の定理（証明に欠陥があった）の証明を初めて与えた。現在、1992年に提案された合流性の十分条件に関する未解決問題に取り組んでいる。

また応用に近い分野では、連想計算を使った連想検索エンジン GETA を用いて、スパムフィルタやワインデータベースのコメントに基づく連想検索サーチなどの実験を行い、今後、棋譜の探索など対象の広がりが期待できる。



図 3-1 小川研究者の研究領域の全体像（小川提供）

小川のさきがけ期間以降（2001 年以降）に発表した論文の被引用件数（Web of Science を用いて調査）を図 3-2 に示す。被引用件数はさきがけ以降に 2005 年以降伸びており、小川による研究成果を参照する関連研究が進展していることが窺える。

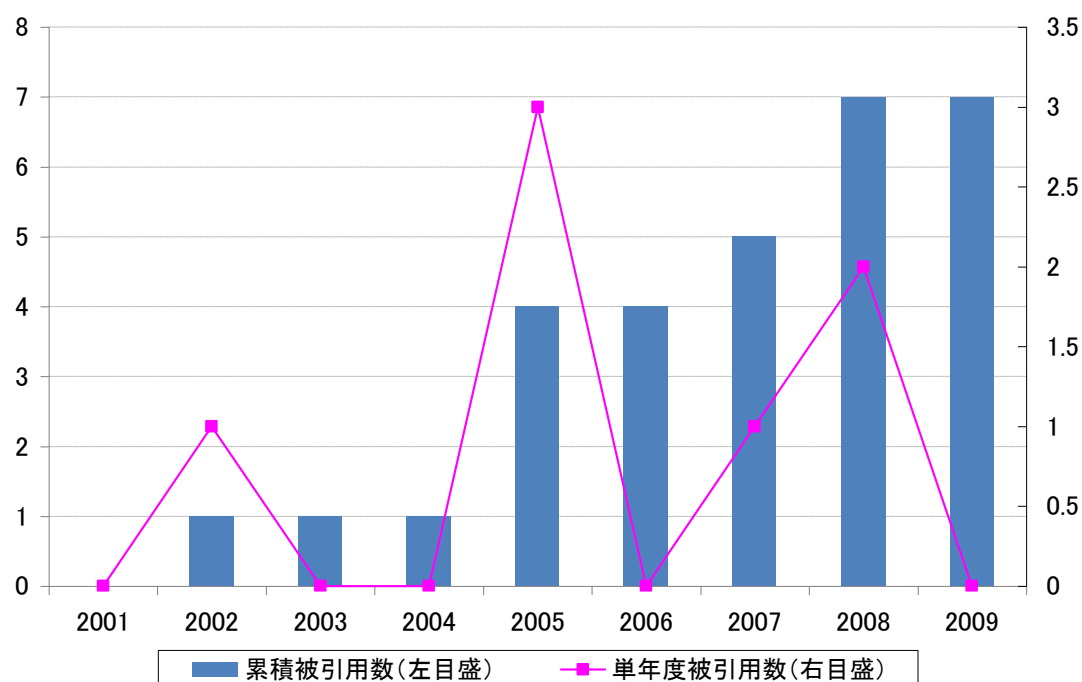


図 3-2 小川の論文被引用数推移

(2) 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な波及効果

丸め誤差の研究は、フランスなどからも問い合わせがあり、実用に近いことから注目を集めている。この研究はデジタルシグナルプロセッサにおける AD コンバータや DA コンバータへの応用も期待される。

JAVA のプログラム解析は、発展的な研究部分について今後発表する予定であり、企業との共同研究も予定している。

書換え系領域では、マドリッドで 1 月に行われた国際会議 POPL2010 で提示されたオープンプロブレムに対し、非線形書換え系の手法の適用が有望であり、現在、その提示者（英国）と連絡をとりつつ研究を進めている。

3.2.2 スケルトン並列プログラムの最適化（胡 振江 第2期）

(1) 研究成果の発展状況や活動状況に関して

さきがけ以前、さきがけ期間中、そして終了後と一貫して取り組んでいるテーマが、並列処理プログラムの形式化手法である。さきがけ期間中には、少数の並列処理スケルトン（積み木）の組み合わせによって並列処理プログラムを作成する試みを行い、このような方式で並列プログラムを構成するための理論体系の整備ならびに、それにもとづいて並列プログラムが効率的に構成できることを具体的に示している。この際に重要なデータ並列スケルトンは、**map**, **reduce**, **scan**, **zip** の4つである。この4つの組み合わせで、構造化文書処理や科学計算といった並列プログラムが構成可能であることが明らかとなっている（スケルトンによる並列処理プログラミングについては、次頁参照）。

さきがけ研究後の発展として、スケルトン並列プログラミングの最適化を挙げることができる。これは、単純にスケルトンプログラムを組み合わせても、基本ブロック間で大量のデータ通信が発生することなどから効率的なプログラムとならないことに対処するものである。このために、前後する2つのブロックを1つにまとめて通信を減らし、最適化処理（融合化）を行うことで、ある程度の効率向上が得られている。そして、さらなる効果を得るため、対象とする計算を抽象化した標準形を設計し、スケルトンプログラムから標準形への変換を行うことで、効率性を向上させるという研究を行った。この研究では、変換規則及び標準形の効率的な実装を与えており、研究成果をまとめた論文を国際会議 **EuroPar 2007** と **International Journal on Parallel Processing (IJPP:2007)** で発表している。

また、並列プログラムの自動生成手法については、右逆関数を活用した、第三準同型定理に基づく自動並列化システムを考案、実装し、その有効性を示す（**ACM PLDI 2007** で発表）とともに、第三準同型定理を、木型のデータ構造に対しても拡張した（**ACM POPL'09** で発表）。

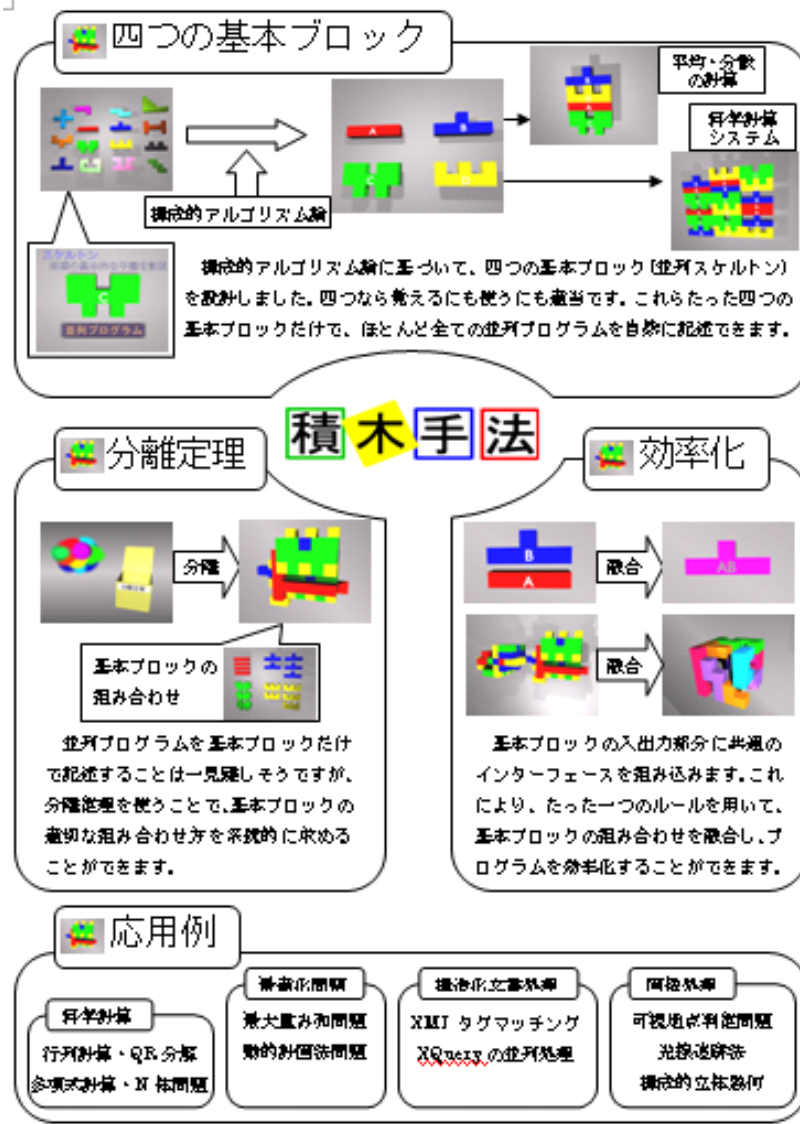


図 3-3 並列スケルトンを積み木としたプログラミングの概要（胡提供）

胡のさがけ期間以降（2002 年以降）に発表した論文の被引用件数（Web of Science を用いて調査）を図 3-4 に示す。被引用件数は伸びており、研究成果が着実にインパクトをもたらしているとともに、関連研究が進展していることが窺える。

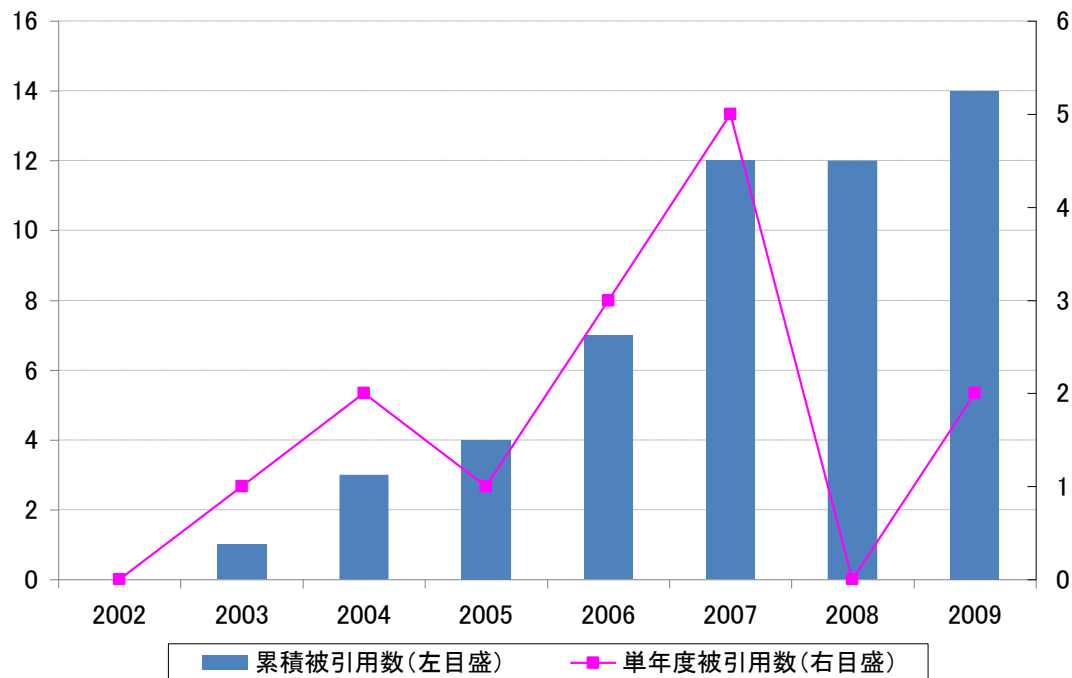


図 3-4 胡の論文被引用数推移

プログラミングを科学的なアクティビティとして体系させる研究において、胡らの研究成果は世界で注目を浴びている。とくに、並列プログラムの自動生成分野においては、胡らにより、世界に先んじた領域開拓が進められている。胡らが 90 年代から研究・発展させてきた構成的アルゴリズム論に基づくスケルトン並列プログラミング手法は、グーグルが **Map** と **Reduce** により検索エンジンの効率化を実現したことから、その実用面の有効性が認識されはじめています。

(2) 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な波及効果

並列処理プログラミングにおいてスケルトンを活用することで、ユーザはほとんど並列性を意識せずに、スケーラビリティの高いプログラムを得ることができるという利点がある。このようなスケルトンの有用性を幅広く社会で共有していくための試みとして、「助っ人 (SkeTo)」プログラムライブラリーを公開している。この並列スケルトンライブラリは、標準の C++ の言語仕様のもとで定義されており、ユーザは特別な記法を新しく覚える必要がないとともに、様々な並列計算機環境において使用することが可能である点が特徴として指摘される。なお、このプログラムライブラリーは、BSD ライセンスによるオープンソースとして公開しており、誰もが使用可能である。

企業との共同研究では、米国 Sun Microsystems 社とともに、「Fortress 上でのスケルトン並列プログラミング手法に基づいたライブラリ開発」を行っており、新たなプログラム言語開発に寄与している。Fortress は、同社が開発した大規模並列科学技術計算向け言語

であり、著名な計算機科学者であるガイ・スティーラのグループとともに、開発研究を実施したものである。このプロジェクトは 2007 年から 2 年間継続しており、成果は、オープンにして公開される予定である。

3.2.3 高信頼性 Web サービス (中島 震 第2期)

(1) 研究成果の発展状況や活動状況に関して

さきがけ期間中には、インターネット上のウェブサービスに関する国際標準言語 WSFL の仕様を対象として、モデル検査技術の有効性を確認、セキュリティレベルに基づく情報漏洩解析の方法を提案した。

さきがけ研究後は、その成果を踏まえ、WSFL の発展形である WS-BPEL を対象として、WS-BPEL に対する安全性解析を実行するとともに、情報漏洩解析の方法の具体化を図っている。ここでは、さきがけ研究でも活用したモデル検査ツール SPIN を用いるとともに、中間表現の導入、制御変数の抽象化という新たな試みを行い、安全性の検証を行った（下図はそのフローであり、EFA（拡張有限オートマトン）という中間表現を導入して、モデル検査用の表現 Promela に変換したうえで、SPIN を適用している）。また、情報漏洩の解析については、制約オートマトンを活用する方法を考案し、有効性を確認している。

こうした発展的研究を行うとともに、WS-FM (Web Service and Formal Methods) という国際ワークショップを開始するにあたり PC 委員として日本から唯一招待されるなどの活動を通じて国際的な関心を喚起した。また、ドイツ Passau 大学のポストドク研究者が、一連の研究に関心を示し、2009 年秋から 1 年間、ドイツ国費奨学金 (DAAD) によって当研究グループに参加している。

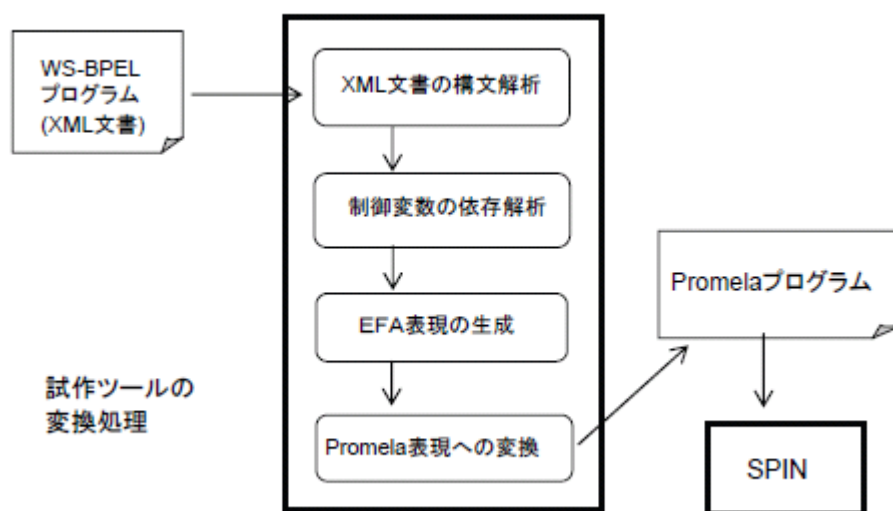


図 3-5 WS-BPEL の解析フロー

(中島, 戦略的創造研究推進事業 発展研究 研究終了報告書
「Web サービス・セキュリティ技術」(2007 年))

上記、一連の研究での基本は、モデル検査に代表される自動検証法がソフトウェア工学の諸問題に対する解決手段として使えるかを検討することである。従来のソフトウェア工学と一線を引くという立場から、中島は「ディペンダブル・ソフトウェア工学」と造語した。研究の関心は新たな課題の検討を通してアルゴリズムベース自動検証法を深めることともいえる。その一例として、ソフトウェア・プロダクトライン工学 (SPLE) や実行時監視の問題にチャレンジしている。

具体的には、SPLE の有力な方法である FODA(Feature Oriented Domain Analysis)で提案されたフィーチャダイアグラムを形式化し、自動検査する方法についても研究を進めている。既に、複数の国際会議で成果を発表している(2007 年、2009 年、2010 年)。下図のダイアグラムが不整合であること、また、不整合の原因が緑色で示された部分に特定できること、を自動的に解析する。

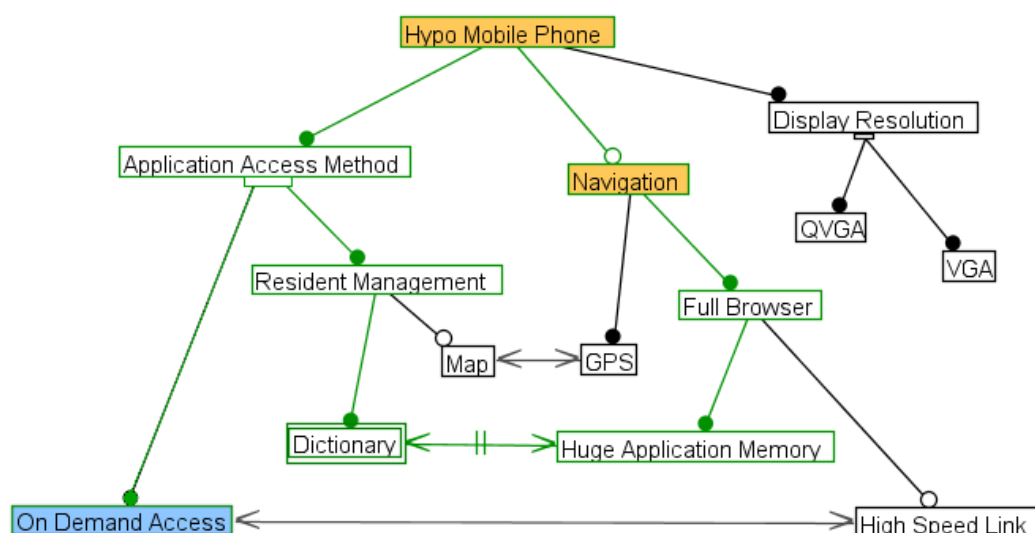


図 3-6 フィーチャーダイアグラム自動解析結果の例 (中島提供)

また、従来のソフトウェア工学は、開発時に、対象のシステムをどこまで見通しよく理解しているかという問題に対処するものであったが、Web サービスのようにソフトウェアの機能がサービスとして提供されるようになると、実行時監視もその対象として含めるべきとの問題意識が高まりつつある。このため、実行時検証 (runtime verification) という研究分野が立ち上がりつつあり、中島は、この領域において、モデル検査などのアルゴリズムベース自動検証の研究成果を応用した研究も進めている。

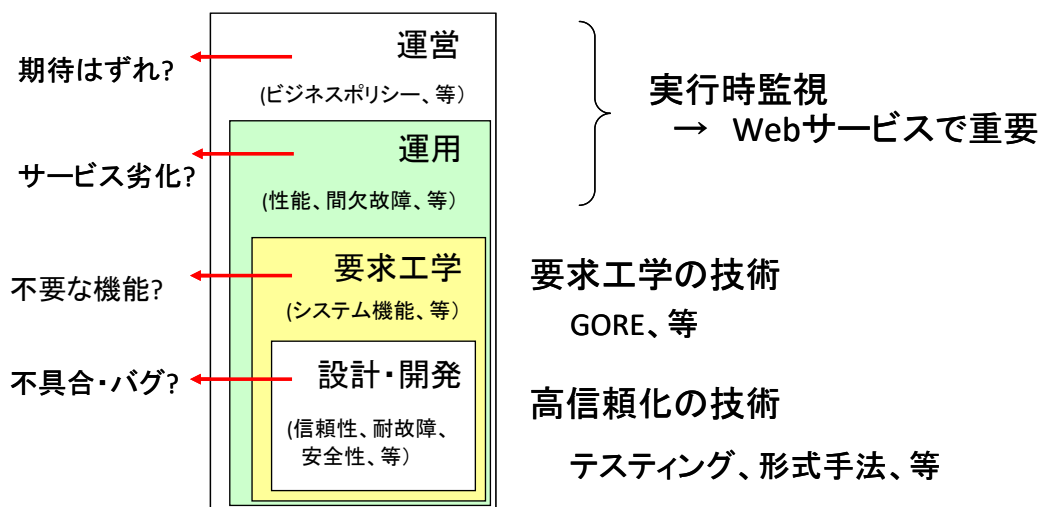


図 3-7 ソフトウェア工学の対象範囲の拡大 (中島提供)

中島のさがけ期間以降 (2002 年以降) に発表した論文の被引用件数 (Web of Science を用いて調査) を図 3-8 に示す。被引用件数は着実に伸びており、とくに最近になって増えていることから、モデル検査技術への関心の高まりの中で、研究成果が着実にインパクトをもたらしていることが窺える。

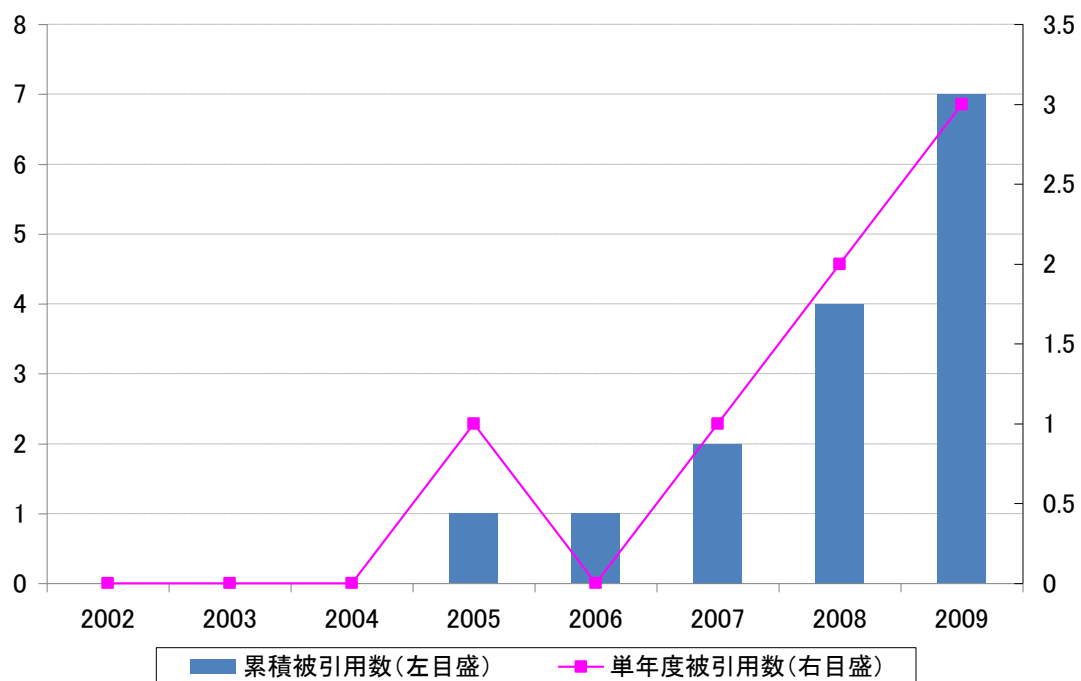


図 3-8 中島の論文被引用数推移

中島は、さがけ終了後 SPIN について日本語で書かれた最初の本である「SPIN モデル

検査」という著書を上梓したが、この本の前書きを、モデル検査法の第一人者であるホルツマン博士が記述するなど、海外での研究者との交流も広がりつつある。

海外におけるこの分野の研究はヨーロッパが中心であり、40年にわたる基礎理論の蓄積に基づき、応用に力を注ぎつつある。また、米国も VLSI の検証に形式手法を活用するなど歴史を持っている。日本は研究が点でしかなく、大きなフレームがない、テクノロジーマップがない、などの問題を抱えているが、上記のような国際的な場での活動や海外研究者とのネットワークを通じつつ、この分野での日本のプレゼンスを高めるべく尽力している。

(2) 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な波及効果

モデル検査の技術については、その代表的方法論である SPIN について、前述のように日本で最初に解説書を著す、SPIN についてのチュートリアルを行う、など、この方法の普及に努めた。こうした一連の活動もあって、日本の産業界においても SPIN を使った組み込みソフトウェア検証の研究が進みつつある。

また、2009 年 12 月 22 日に (株) NTT データ、富士通 (株)、日本電気 (株)、(株) 日立製作所、(株) 東芝の 5 社とともにディペンダブル・ソフトウェア・フォーラム (Dependable Software Forum、略称名 DSF) を発足させ、高信頼性ソフトウェアの開発・検証のための形式手法の普及展開を図りつつある。

DSF は、障害を起こさないソフトウェアの生成を実現するために、回避 (故障や攻撃の発生を予防)、除去 (故障の数や攻撃の程度を減少)、耐障害性 (フォールトトレラント) という 3 つの観点から実践的、かつ系統的・論理的な構成技術と設計技術を確立させる研究開発活動を行い、最初の取り組みとして、形式手法適用評価 WG (Formal Method Application WG、以下 FMAWG) を立ち上げている。FMAWG は、形式手法の産業界への効果的な普及と定着を目指し、形式手法に関して実績及びノウハウを持つ企業・個人・団体による有益な議論と知見の共有を行い、共同で成果物を構築することを推進するものである。

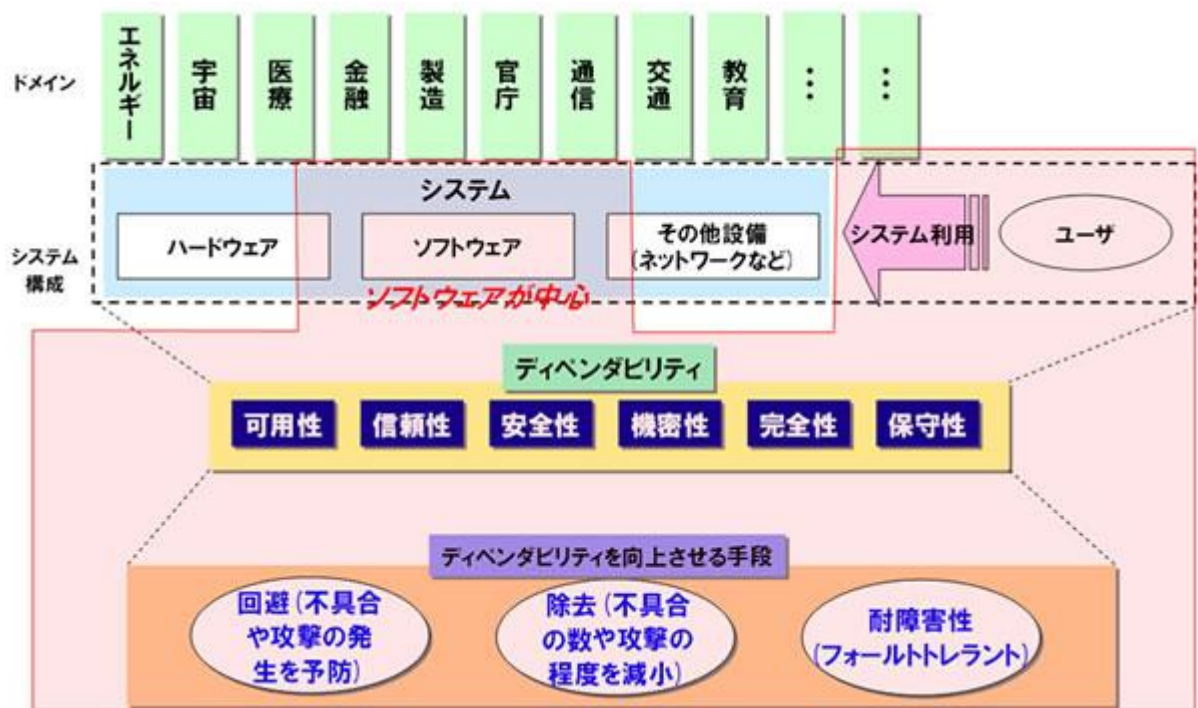


図 3-9 DSF の検討範囲 (DSF のプレスリリース資料 (2009 年 12 月) より、
<http://pr.fujitsu.com/jp/news/2009/12/22.html>)

このようにさきがけ研究成果ならびに、その研究活動を通して構築した人的ネットワークを活用することが積極的なアウトリーチ活動につながっている。従来、形式手法や自動検証の分野では、研究活動が産業界の実践から遊離するという理由からアウトリーチ活動が難しかった。これが、目に見える形になってきているという点で、社会的な効果が大きいと考えられる。

3.2.4 刺激応答型実時間システムの自動検証技術：安全性・信頼性技術の開発

(大崎 人士 第3期)

(1) 研究成果の発展状況や活動状況に関して

さががけ期間中は、「等式付ツリーオートマトン (equational tree automata)」の概念を独自に考案し、その理論展開を図ると同時に、それにもとづいて形式検証のためのツール群を構築し、リアクティブシステムのための自動検証システムを開発した。等式付きツリーオートマトンは木構造言語理論の新たな一研究分野を築くことに貢献するものとして、国際的にも高く評価され、新しい研究分野として認識されている。

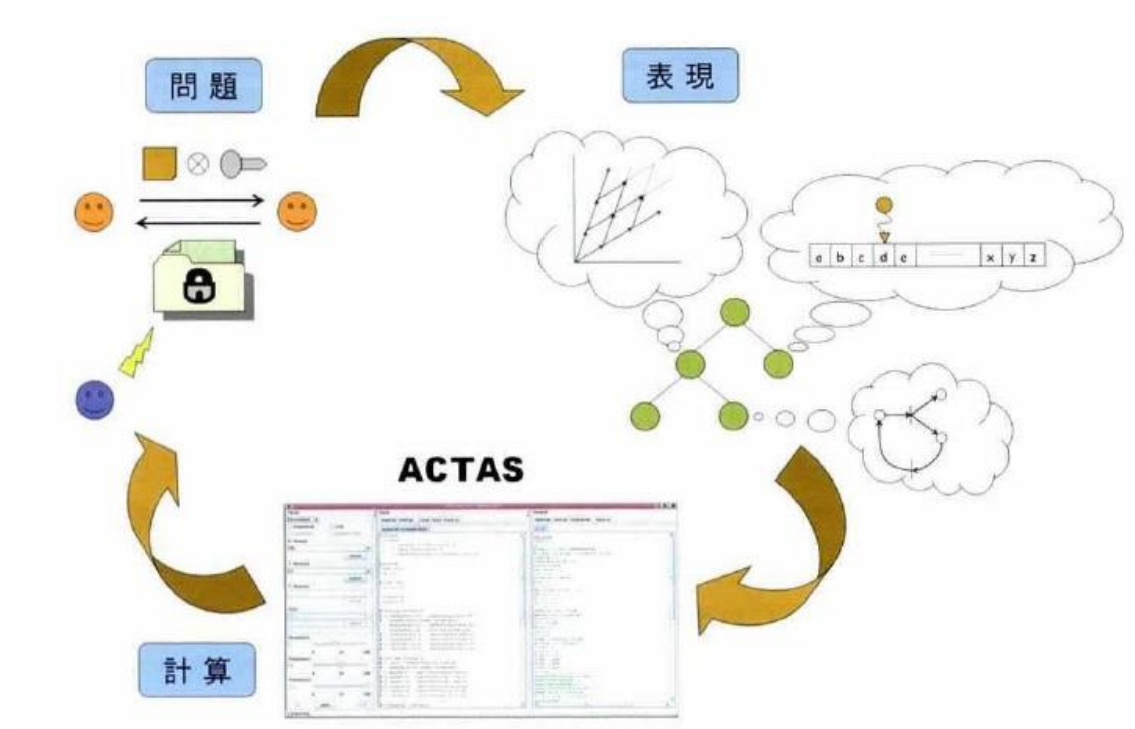


図 3-10 自動検証ツールの概念図

(大崎, 「等式付木構造自動機械にもとづく自動検証器」(2005 年))

さががけ終了後は、「等式付ツリーオートマトン」理論についての論文を発表し、2006 年度の文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞している。また、非線形の関数が入ると、検証は難しいという議論を踏まえて、「等式付ツリーオートマトン」について非線形の翻訳可能性を追求した。この結果についての論文が 2008 年度の RTA (Rewriting Techniques and Applications) の最優秀論文賞を獲得している。

大崎のさががけ期間以降 (2002 年以降) に発表した論文の被引用件数 (Web of Science

を用いて調査)を図 3-11 に示す。被引用件数は着実に伸びており、とくに国際学会で最優秀論文賞を獲得した 2008 年において高まっている。このことから、知名度の上昇とともに関連研究が進展していることが窺える。

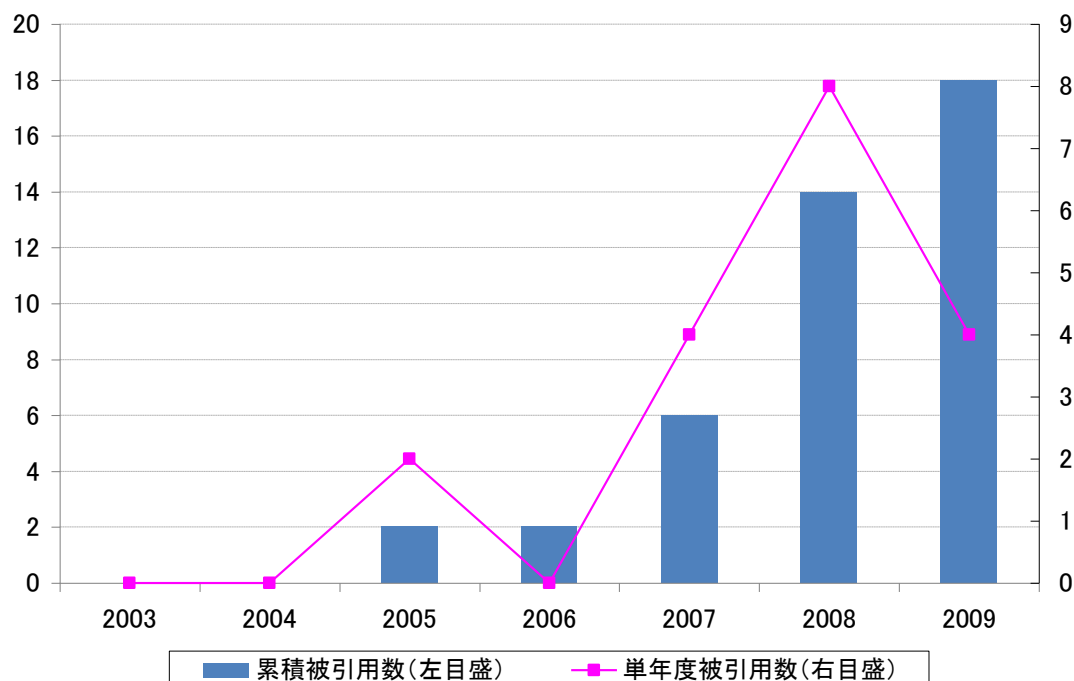


図 3-11 大崎の論文被引用数推移

大崎は、2002 年～2009 年の間にフランスのリール大学、カシャン高等研究所 (ENS)、マルセイユ大学、米国のイリノイ大学短期の招聘研究員として活躍するとともに、2007 年 6 月～翌 6 月までの 1 年間は客員研究員としてイリノイ大学のコンピュータ科学科において研究活動を行っており、海外における研究動向や課題状況を踏まえた研究の発展がなされた。非線形(不等式)制約の場合の検証の問題は世界的にみても未解明の難題であり、かつ現実の問題適用する際に必須のテーマとして切実性を持つ。先に挙げた RTA の受賞論文は、この難問に対する 1 つのアプローチを示すもので、日本の研究の先進性を示すことができた。また、こうした研究が生まれた背景として、海外での様々な研究活動を通じて形成された、研究者とのネットワークが重要な役割を果たしている。

(2) 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な波及効果

研究活動は総合活動であり、科学研究とフィールドワークの両方を常にみていく必要がある、との考え方から、企業の問題解決支援に取り組んでいる。情報家電や車載用の組み込み分野を対象としており、関西地域の企業との連携が多いことから、「組み込み適塾」をはじめ、組み込みソフト産業推進会議(関経連)との活動の機会が増えている。これは日常生活のあらゆるところに組み込み機器が入り込み、組み込みソフトウェアの信頼性は、社会経済の安

定に直結するという問題意識に基づくものである。また、高度ソフトウェア技術者の人材が、今後の日本のソフトウェア産業の行く末を左右するとの認識もある。しかし、大学での体系的な教育、企業での OJT(On-the-Job-Training)のみに頼る現在の人材育成システムでは、高度ソフトウェア技術者を育成することは困難なため、共通の認識をもった産学官が一体となった現在の『関西モデル』の取り組みを、今後益々推し進めていくものである。

大崎が現在所属している検証研究センターにおいては、さまざまな検証技術の開発を行っており、その成果を踏まえつつ、システム技術連携研究体において現実の企業の問題解決に向けた高度人材育成や高度なインフラによる検証サービス提供、を行っている。検証サービスは、企業へのサポートサービスとして、有料で提供するものである。

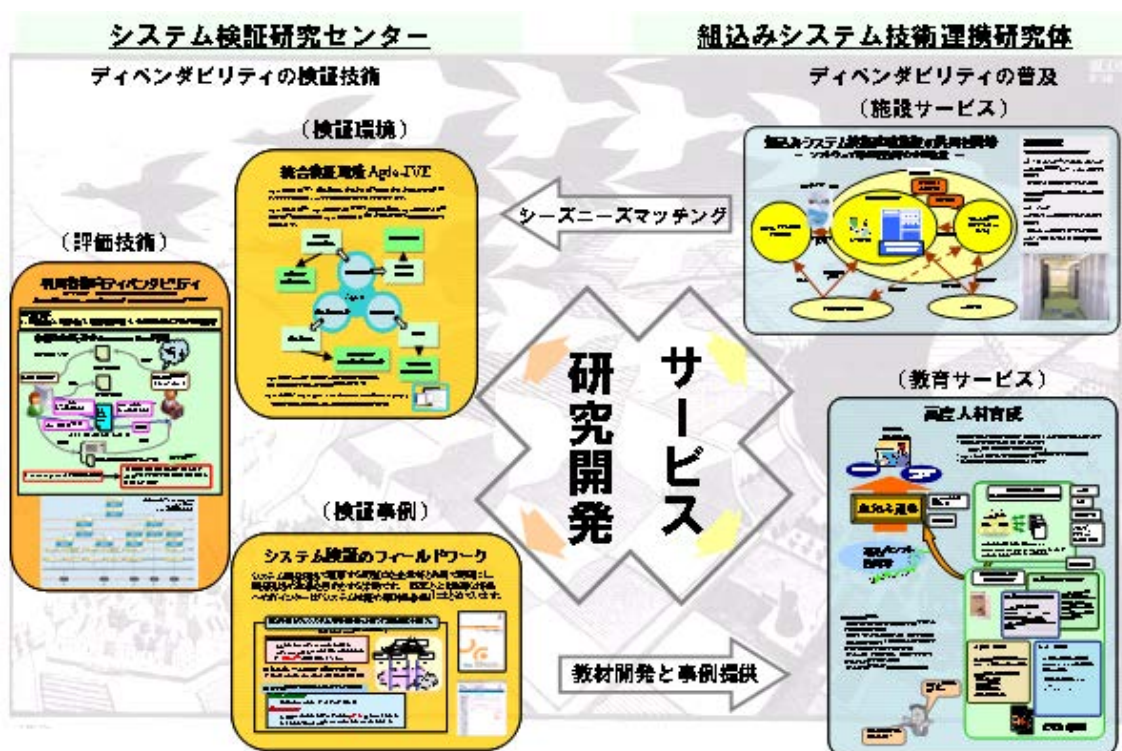


図 3-12 システム検証研究センターと組込みシステム技術研究体の活動（大崎提供）

3.2.5 プログラミング言語の制御構造の意味論的分析（長谷川 真人 第3期）

(1) 研究成果の発展状況や活動状況に関して

長谷川は、プログラム言語の意味論について先進的な研究を行い、共有や再帰を含む複雑なプログラムを数学的に扱う道を切り開いてきた。これは、従来型のカルテジアンカテゴリに対してモノイダルカテゴリ(テンソル積を持つカテゴリ)の上で意味論のモデルを構築しており、再帰プログラムの意味論への基礎的な貢献を果たしたというものである。さきがけ期間中には、第一級継続を用いた多相型プログラムが満たすパラメトリシティ原理を生み出すなど、意味論が扱える計算の対象をさらに広げることに成功している。

具体的には、モノイダルカテゴリのトレースに関して、下記のような重要な定理を証明することで再帰計算の意味論展開を可能にしている。

表 3-1 長谷川による再帰計算とトレースに関する定理の例（長谷川提供）

適当な（古典的な）条件のもとでは、トレースによる意味論は不動点意味論と完全に一致する：

定理 (Hyland / 長谷川) テンソル積 $\otimes$ が直積（カルテジアン積）に制限された場合には、トレースと、Bekič property を満たす不動点演算子との間に、一対一対応が存在する

例：従来の領域理論と最小不動点

反例：巡回的ラムダ計算（値しかコピーできない $\Rightarrow$ テンソル積は直積ではない） — 以下の一般化でカバーされる：

定理 (長谷川) トレースと、適切な随伴関手から、dinaturality を満たす不動点演算子が構成できる

この定理によって、巡回的ラムダ計算における再帰計算の、トレースによる意味論が展開できる

また、パラメトリシティ原理は様々なデータ型に適用できる多相型プログラムが満たす一様性原理であるが、従来は純粋な関数型プログラミング言語についてのものしか存在しなかった。さきがけ研究により、副作用を伴うプログラミング言語のためのパラメトリシティ原理がはじめて与えられ、以後のプログラム意味論の展開に大きな影響を与えている。これらの業績に基づき、長谷川は 2005 年には日本 IBM 科学賞を受賞している。

長谷川のさきがけ期間以降（2003 年以降）に発表した論文の被引用件数（Web of Science

を用いて調査)を図 3-13 に示す。被引用件数は 2005 年以降着実に伸びており、研究成果が着実にインパクトをもたらしているとともに、関連研究が進展していることが窺える。

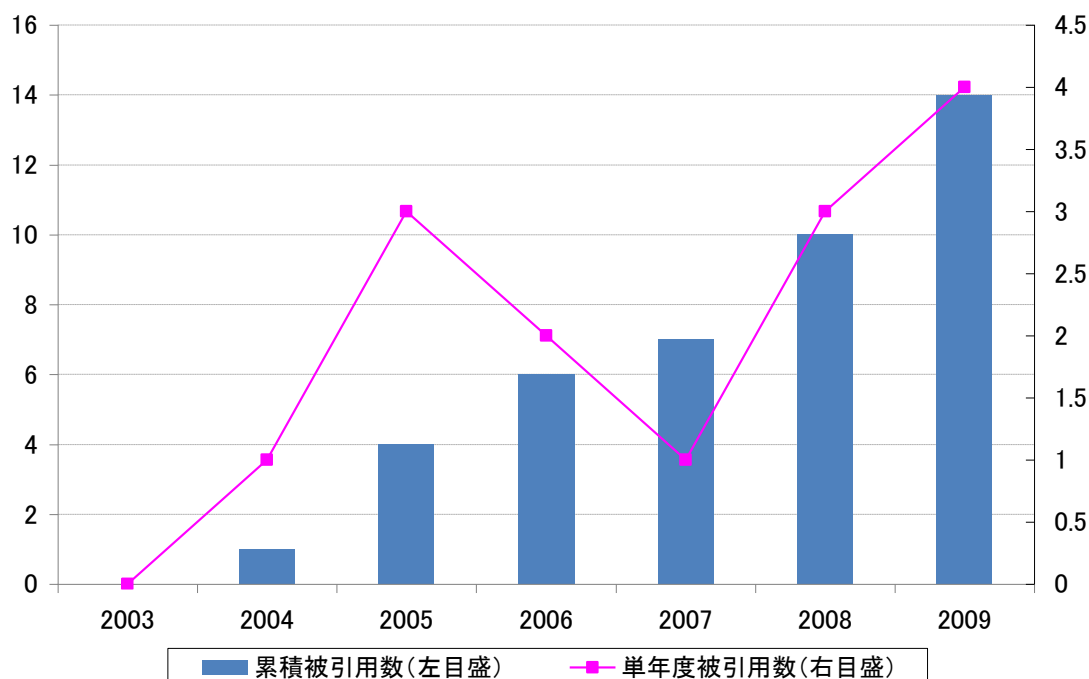


図 3-13 長谷川の論文被引用数推移

国際的にみた場合、この分野では、ヨーロッパが先行しており、特にイギリスやフランスにおいて研究の歴史がある。長谷川は、博士課程をイギリスのエジンバラ大学で過ごし、そこで得た着想を、さきがけで研究することで、世界に先行する成果を挙げている。この成果は当時世界的にみて先行しており、非常にめずらしいものであったが、その後の理解や支持も増えている。たとえば、基礎理論では領域理論や相互作用の幾何などの研究との関連の広がりや深まり、また応用としては関数型プログラミング言語 Haskell における副作用を伴う再帰計算の表現、などが挙げられる。

(2) 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な波及効果

長谷川の業績は、相互作用の幾何や結び目の理論とプログラム意味論を結び付ける仕事として、広く認められている。

長谷川の研究以降、トレース付きモノイダル圏をもとにした、新しいモデルが、様々な研究者によって研究されており、最近では、トレース付きモノイダル圏における一様性原理の発見とその応用、公理的領域理論への応用、相互作用の幾何との関係、再帰と他の制御構造の関係の分析、線型な型体系における再帰の分析などに結びついている。

たとえば、相互作用については、トレースを用いて、下記のような記述が可能であり、平行計算および線型論理のさまざまなモデルの構成、線型不動点（一般化された再帰）のモデルの構成に応用されるとともに、最近では、プログラム変換における不要な高階中間コードの除去、属性文法、非明示的計算量の理論などへの応用が期待される。

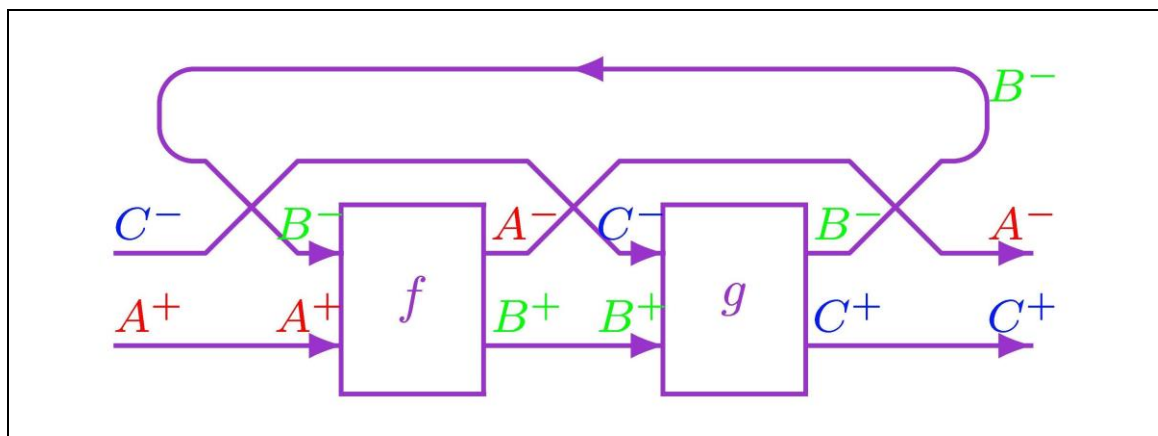


図 3-14 トレースを用いた相互作用のモノダイル圏上の記述（長谷川提供）

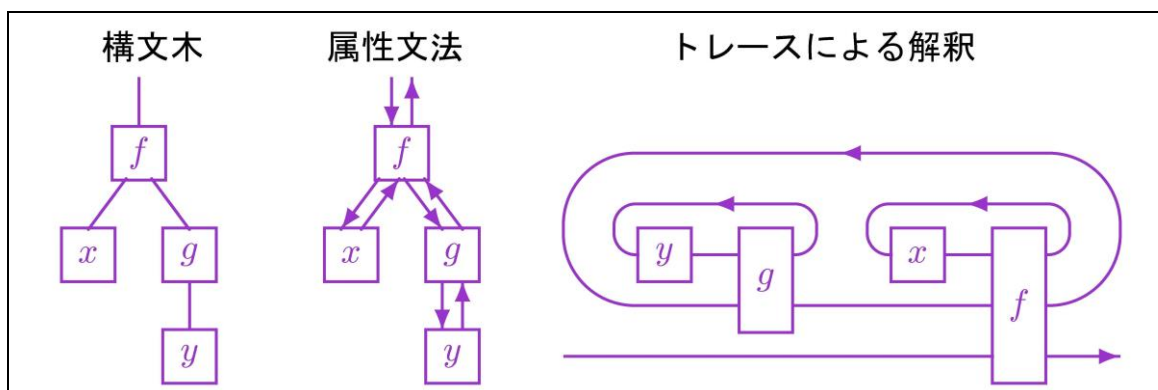


図 3-15 応用例：属性文法のトレースによる記述（長谷川提供、長谷川の同僚の勝股審也数理解析研究所助教の研究に基づく）

今後の課題としては、1) 具体的なトレース付きモノイダル圏を見つけるのは決して易しくないこと（モデルを構成する技法の拡充が必要）、一般化された不動点（線型不動点）から古典的な（通常の）不動点を得られるかどうかは自明でないこと、等が挙げられており、さらなる展開が期待される。

なお、さがけにおける同僚である亀山とは、さがけ期間中に限定継続と呼ばれる制御構造に関する共同研究を行い、現在も研究上の協力関係を継続している。亀山との共同研究は、限定継続に関する理論の重要なギャップを埋めたものであり、その後これに触発された研究が多くなされている。

3.3 第3章のまとめ

ユビキタス社会化が進む中で、組み込みも含めて様々なソフトウェアが、我々の身の回りのいたるところで稼動している。また、ソフトウェアは、Web サービス、ASP、SaaS、クラウドなどと、呼称を変えつつもネットワークを通じてサービスとして提供されつつある。そこでは、基盤システム、プラットフォーム、アプリケーションといった階層間の相互作用、さらに基盤同士もグリッド化して並列処理によるコンピューティング能力の拡張を図るとともに、上位のアプリケーションやコンテンツのレベルでも複数のリソースが相互に連携をし、所定の機能を果たしていく、という複雑な構造を呈している。また、携帯電話など誰もが使う日常的な機器においても巨大なソフトウェアが搭載されており、それが前述のような複雑なタスクと組み合わせられている。

本調査で抽出した「機能と構成」の代表的事例の研究者たちは、こうしたソフトウェアの巨大化、複雑化という現象に対して、論理的に正しいソフトウェアを構築・改善していくための方法論について、それぞれ異なる切り口からアプローチしつつあるものとして位置づけられる。

研究総括のインタビューからは、当領域の発展状況について以下のような認識を示していた。

- ・ソフトウェアの信頼性や検証のための原理的なものはこれまでヨーロッパが強かった。日本はよい研究者もいるが、数が少ないので目立たない状況にあった。
- ・日本においては、研究投資の蓄積が少ない分野であるが、ソフトウェアの世界において論理的にきちんとしたものをつくり、そのプログラムが正しいことを証明すべきである、という方向が高まりつつある。この方向で先頭を走っているのがこのさきがけ研究者のグループである。
- ・また、理論とともに産業界への応用における中心人物もさきがけ研究者達であり、実用化に向けた研究では青木、中島 結縁、大崎が今の日本のリーダーである。
- ・小川の Java プログラム解析、胡の並列プログラムの自動生成などもレベルの高い国際会議において評価されるなど、世界に先駆けた仕事となっている。
- ・理論面については、長谷川が先駆的な研究を行っており、日本 IBM 科学賞を受賞している。

詳細調査対象の各研究者へのインタビューを通じて、上記の認識が裏付けられた。また、さきがけ研究を発展させた結果、以下のような社会への貢献が認められた。

小川は、さがけにおけるソフトウェアの自動生成研究、その後の効率的なアルゴリズムや **JAVA** プログラムの解析を通じて、信頼性の高いプログラムの効率的な開発・検証につながる研究を行っている。また、丸め誤差問題へのアプローチにより、映像等に関するソフトウェアのパフォーマンス向上とそれによるユーザの使い勝手向上等に寄与するものと期待される。

胡は、さがけ以前以降を含む一貫したスケルトン並列プログラムの研究において、信頼性の高い並列処理向けプログラミングを効率的に行うための方法論やツールを開発している。また、科学技術系のシミュレーションなど巨大なコンピューティングパワーが必要とされる領域においては、並列処理によってそのリソースを確保していくが、そうした並列処理を前提とした新たな科学技術計算向け言語の開発プロジェクトに関わるなど実用への広がりが期待される。

中島は、さがけにおいてモデル検査手法を用いた **Web** サービスの検証方法を研究し、ソフトウェアのサービス化に向けた動きをとらえた領域開拓を行っている。また、モデル検査に関する普及・啓蒙にも熱心に取り組み、2009 年末の大手ベンダーとの共同による **DSF (Dependable Software Forum)** の結成へと結実している。また、**Web** サービスのもとではユーザ側の想定外の反応等に対応する必要がある、運用段階での信頼性が重要になることを踏まえ、実行時検証 (**runtime verification**) においても、モデル検査などの研究成果を応用した研究も進めている。

大崎は、等式付きツリーオートマトンの研究を通じて、新たな形式検証のための理論的枠組みの拡充を図りつつある。こうした基礎的な研究を進める一方で、産業総合技術研究所検証研究センターを通じて、企業におけるソフトウェアの信頼性に関わる問題解決支援にも従事している。主に情報家電などの組み込み分野を対象としており、関西経済連合会と連携した「組み込み適塾」の活動にも関わっている。ここにおいては、形式手法を活用しつつ、低コストで安全なものをつくるという文脈のもとで、実践への応用が期待される。

長谷川は、プログラム言語の意味論という、この領域のもっとも基盤となる部分で貢献しており、トレース付きモノイダル圏という枠組みによる再帰プログラムの意味論やパラメトリシティ原理に関する研究は、世界に先駆けた基礎的研究として評価されている。長谷川の研究以降、相互作用の幾何との関係を掘り下げるなどの研究が進められており、プログラム変換における不要な高階中間コードの除去などへと応用が広がることが期待される。これにより複雑な要求仕様に対して、簡潔で正しいプログラムの構築を可能とする枠組みが整備されてくることが期待される。

以上のように、本調査で抽出した代表的研究者は、数学によるコンピュータプログラムの形式表現を継続的に研究しており、基礎的研究の深化が期待される。さらに、きちんとした基礎研究の裏づけを背景に、産業分野への応用も積極的に進めており、産学連携のブリッジ役としても活躍が期待される。

また、形式手法によるソフトウェアの信頼性向上への取り組みは、従来欧州において長い歴史があり、応用も進んでいるが、日本では、これまで十分浸透してこなかった面がある。しかし、日本においても長谷川のような基礎理論面での先進研究が登場するとともに、応用面でも、さきがけ研究者を中心とする産業界とのブリッジ活動を通じて、DSF の立ち上げや、組込み適塾の活動など、具体的かつ組織的な動きが高まりつつある点は、海外比較の面でも重要な貢献と位置づけられる。