

戦略的創造研究推進事業  
チーム型研究(CREST)  
追跡評価用資料

研究領域

「実用化を目指した組込みシステム用デ  
ィペンダブル・オペレーティングシステム」  
(2006 年度～2013 年度)

研究総括: 所 眞理雄

2020 年 3 月



## 目次

要旨	1
第 1 章 追跡調査概要	3
1.1 研究領域概要	3
1.1.1 戦略目標	3
1.1.2 研究領域概要	3
1.1.3 研究総括及び研究副総括	3
1.1.4 領域アドバイザー	4
1.2 研究領域終了後の進展と波及効果	6
1.2.1 研究成果の発展状況や活用状況	6
1.2.2 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果	11
1.3 研究領域の展開状況(系譜図)	14
第 2 章 追跡調査(研究領域全体動向)	16
2.1 追跡調査について	16
2.1.1 調査の目的	16
2.1.2 調査の対象	16
2.1.3 調査方法	16
2.2 研究成果概要	18
2.2.1 研究助成金	18
2.2.2 論文	21
2.2.3 特許	23
2.2.4 研究代表者の主な活動状況	25
2.3 科学技術や社会・経済への波及効果	27
2.3.1 科学技術への波及効果	27
2.3.2 社会・経済への波及効果	30
第 3 章 各研究課題の主な研究成果および波及効果	33
3.1 DEOS 技術(ディペンダビリティ技術)	33
3.2 2006 年度採択研究課題	42
3.2.1 並列・分散型組込みシステムのためのディペンダブルシングルシステムイメージ OS(石川裕)	42
3.2.2 省電力でディペンダブルな組込み並列システム向け計算プラットフォーム(佐藤三久)	52
3.2.3 マイクロユビキタスノード用ディペンダブル OS(徳田英幸)	61
3.2.4 高機能情報家電のためのディペンダブルオペレーティングシステム(中島達夫)	69
3.2.5 ディペンダブルシステムソフトウェア構築技術に関する研究(前田俊行)	76

3.3 2008 年度採択研究課題 .....	83
3.3.1 実時間並列ディペンダブル OS とその分散ネットワークの研究(加賀美聡)...	83
3.3.2 利用者指向ディペンダビリティの研究(木下佳樹).....	90
3.3.3 Security Weaver と P スクリプトによる実行中の継続的な安全確保に関する研究(倉光君郎) .....	99
3.3.4 耐攻撃性を強化した高度にセキュアな OS の創出(河野健二).....	108

## 要旨

本資料は、戦略的創造研究推進事業の CREST(チーム型研究)研究領域「実用化を目指した組込みシステム用ディペンダブル・オペレーティングシステム」(2006 年度～2013 年度)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、国立研究開発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ために、追跡調査を実施した結果をまとめたものである。

第 1 章は本研究領域の追跡調査の概要について述べた。

第 2 章は本研究領域の各研究課題における研究期間中及び研究終了後の研究成果等について、研究助成金の種類と金額、発表した原著論文の数、出願あるいは登録した特許数を表にまとめた。また、科学技術や社会・経済への波及効果として各研究代表者の受賞、学会・研究会等への貢献、共同研究、新聞報道等について記載した。

第 3 章は本研究領域の各研究課題について、研究期間中の研究成果と関連論文ならびに、研究終了後の研究の継続と発展状況について、科学技術の発展や、社会・経済に及ぼす波及効果と展望についてまとめた。

本研究領域では、実用化と将来の更なる研究基盤を与えることを目標とするため、各研究課題の研究成果を統合し、全体システムとして実用に近い形でデモを行い、その有効性ならびに実用性を実証することを方針とした。この方針の下、本研究領域内の研究を統合・推進する組織として、研究チームを横断する組織(「コアチーム」など)を設けるとともに、JST 直属のディペンダブル組込み OS 研究開発センターを設立して研究開発を推進した。その結果、多くのディペンダビリティ要素技術に加え、ディペンダビリティ統合化技術である DEOS(Dependability Engineering for Open Systems)技術を開発できた。

本資料をまとめるにあたり、研究総括と、上記の目標達成への貢献度が高い研究代表者 3 名(石川裕、木下佳樹、倉光君郎)、この 3 名の研究代表者から推薦された共同研究者 1 名(松野裕<sup>1)</sup>)にインタビューを行った。インタビューで入手した情報は、1 章および 3 章に反映させた。

研究成果の発展状況や活用状況をみると、DEOS の機能を強化するために開発した主な技術として、形式アシュランスケース・フレームワーク(木下)、要求獲得のためのシソーラス情報支援機能(山本修一郎<sup>2)</sup>)、D-Case Communicator(松野)などが挙げられる。ディペンダビリティ要素技術では、並列・分散型システム技術が世界最高水準のスーパーコンピュータの開発(石川、佐藤三久)に繋がり、また、信頼性向上技術(前田俊行、中島達夫、倉光)、省電力化技術(河野健二)、クラウドコンピューティング技術(徳田英幸)、ロボット・自動運転技術(加賀美聡、河野)などの新たな技術が開発された。

社会・経済への波及効果としては、研究領域終了直前に設立した DEOS 協会による DEOS

<sup>1</sup> 松野裕：日本大学理工学部応用情報工学科准教授(共同研究者)

<sup>2</sup> 山本修一郎：名古屋大学大学院情報科学研究科教授(共同研究者)

の普及活動が挙げられる。その普及活動により、DEOS 協会の正会員数は、設立当初 11 社であったが、2018 年 7 月現在では 35 社になっている。また、DEOS の国際標準化を推進し、2018 年 6 月に国際標準 IEC 62853 Open systems dependability として発行された。ディペンダビリティ要素技術は、世界最高水準のスーパーコンピュータとして、多様な分野の科学技術シミュレーションの飛躍的な向上を目指して現在開発が進められているエクサスケールの「ポスト「京」」において、高信頼化や高性能化に貢献している。さらに、信頼性向上技術、省電力化技術、クラウドコンピューティング技術、ロボット・自動運転技術を進展させたことにより、情報活用用途、情報源の多様化や情報量の増大化に対応した高機能・高性能コンピューティングを、高い信頼性で実現する道を拓いた。

## 第 1 章 追跡調査概要

### 1.1 研究領域概要

#### 1.1.1 戦略目標

高セキュリティ・高信頼性・高性能を実現する組込みシステム用の次世代基盤技術の創出

#### 1.1.2 研究領域概要

本研究領域は、将来、社会で実際に広範に使用されうる OS 技術を創出するために、要素技術の研究成果およびそれらを統合したシステムとして、研究成果を実用に供することを目指し、オープンソース化などを行って将来の更なる研究開発の基盤を提供することを目標とした。

実行にあたり、研究対象を狭義の組込みシステムのディペンダビリティに止めることなく、オープンシステムのディペンダビリティを実現することとした。本研究領域の成果は、ディペンダビリティ要素技術(並列・分散型システム技術、信頼性向上技術、省電力化技術、クラウドコンピューティング技術、ロボット・自動運転などへの応用技術など)と、ディペンダビリティ統合化技術である DEOS(Dependability Engineering for Open Systems)技術である。

DEOS 技術では、その概念を「継続的に変化に対応でき、サービスを継続的に提供でき、説明責任を全うするための支援を行える性質」と定義した。その DEOS 概念を実現するためのプロセス(DEOS プロセス)、アーキテクチャ、実際に使用可能なツール類を開発し、本研究領域終了年度に DEOS 協会を設立し、普及啓発に努めた。

#### 1.1.3 研究総括及び研究副総括

##### (1) 研究総括

2006 年 10 月～2014 年 3 月 所眞理雄(株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所  
エグゼクティブ・アドバイザー/ファウンダー  
現：株式会社オープンシステムサイエンス研究所  
代表取締役社長)

##### (2) 副研究総括

2006 年 10 月～2014 年 3 月 村岡洋一(早稲田大学理工学術院名誉教授)

#### 1.1.4 領域アドバイザー

本研究領域は、研究対象を狭義の組込み用オペレーティングシステムに止めることなく、「オープンシステムディペンダビリティ(OSD)」を実現するためのアーキテクチャ、プロセス、要素技術にまで対象を拡げて、その基盤となる設計手法、実現のためのフレームワーク、関連ツール技術を確立し、その成果を国際標準化やロボットでの実証実験で示すことを目標とした。その目標を達成するために、それぞれの研究分野の第一人者であるとともに、利用者の視点でも研究テーマに対する適切な助言を求めることが出来る8名を領域アドバイザーとした(表 1-1)。また、本研究領域では、実用化を推進するために領域運営アドバイザーを設け、適切な助言を求めることが出来る企業の役員クラス10名を領域運営アドバイザーとした(表 1-2)。

表 1-1 領域アドバイザー一覧

領域アドバイザー	所属	役職	任期
岩野 和生	三菱商事株式会社 企画業務部 兼ビジネスサービス部門	顧問	2006年6月～2014年3月
落水 浩一郎	北陸先端科学技術大学院大学 同高信頼組込みシステム教育研究センター	副学長 特任教授	2011年5月～2014年3月
菊野 亨	大阪学院大学 情報学部	教授	2007年2月～2014年3月
妹尾 義樹	日本電気株式会社 事業イノベーション戦略本部 ビッグデータ戦略室	シニアエキスパート	2006年6月～2014年3月
田中 英彦	情報セキュリティ大学院大学	学長・教授・情報セキュリティ研究科長	2006年6月～2014年3月
西尾 章治郎	大阪大学大学院 情報科学研究科	研究科長・教授	2006年6月～2007年12月
松田 晃一	独立行政法人情報処理推進機構	顧問	2006年6月～2014年3月
安浦 寛人	九州大学	理事・副学長	2006年6月～2014年3月

(註)所属と役職は CREST 終了時点を記載

表 1-2 領域運営アドバイザー一覧

領域運営アドバイザー	所属	役職	任期
梶本 一夫	パナソニック株式会社	所長	2009年5月～2014年3月
戸井 哲也	富士ゼロックス株式会社	執行役員	2012年6月～2014年3月
田中 譲	北海道大学大学院	教授	2006年6月～2014年3月
鶴保 征城	学校法人 HAL 東京	校長	2006年6月～2014年3月
貴家 和保	富士ゼロックス株式会社	本部長・執行役員	2009年5月～2011年3月
鎌田 富久	株式会社 ACCESS	取締役副社長 兼 CTO	2006年6月～2010年3月

丸山 好一	NEC ディスプレイソリューションズ株式会社	顧問	2006年6月～2010年3月
勝丸 泰志	富士ゼロックス株式会社	執行役員	2008年4月～2009年3月
櫛木 好明	松下電器産業株式会社	シニアフェロー	2008年4月～2009年3月
菊野 亨	大阪大学 情報学部	教授	2006年6月～2007年1月

(註)所属と役職はCREST終了時点に記載

### 1.1.5 研究課題および研究代表者

表 1-3 研究課題と研究者(第1期、第2期)

採択期 (採択年度)	課題名	研究 代表者名	採択時の所属・役職	終了時の所属・役職	調査時点の所属・役職 (2018年12月末時点)
第1期 (2006年度)	並列・分散型組込みシステムのためのディペンダブルシングルシステムイメージOS	石川 裕 Ishikawa Yutaka	東京大学大学院情報理工学系研究科教授	東京大学大学院情報理工学系研究科教授 東京大学情報基盤センター センター長	理化学研究所計算科学研究センター「ポスト「京」」プロジェクトリーダー システムソフトウェア研究チームチームリーダー
	省電力でディペンダブルな組込み並列システム向け計算プラットフォーム	佐藤 三久 Sato Mitsuhsa	筑波大学 教授	筑波大学 教授 筑波大学 計算科学研究センター長	理化学研究所計算科学研究センター副センター長 筑波大学連携大学院教授 筑波大学名誉教授
	マイクロビキタスノード用ディペンダブルOS	徳田 英幸 Tokuda Hideyuki	慶應義塾大学 環境情報学部 教授	慶應義塾大学 環境情報学部 教授	国立研究開発法人情報通信研究機構理事長 慶應義塾大学名誉教授
	高機能情報家電のためのディペンダブルオペレーティングシステム	中島 達夫 Nakajima Tatsuo	早稲田大学理工学術院 教授	早稲田大学理工学術院 教授	早稲田大学理工学術院 教授
	ディペンダブルシステムソフトウェア構築技術に関する研究	前田 俊行 Maeda Toshiyuki	東京大学大学院情報理工学系研究科助教	東京大学大学院情報理工学系研究科助教	千葉工業大学人工知能・ソフトウェア技術研究センター(STAIR Lab) 副所長
第2期 (2008年度)	実時間並列ディペンダブルOSとその分散ネットワークの研究	加賀美 聡 Kagami Satoshi	産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター研究チーム長	産業技術総合研究所 副研究センター長	Google JAPAN

採択期 (採択年 度)	課題名	研究 代表者名	採択時の所属・役職	終了時の所属・役職	調査時点の所属・役 職 (2018年12月末時 点)
7	利用者指向ディペンダビリティの研究	木下 佳樹 Kinoshita Yoshiki	産業技術総合研 究所 システム検証セン ター センター長	神奈川大学理学部 教授	神奈川大学理学部 教授
8	Security Weaver とPスクリプトに よる実行中の継続 的な安全確保に関 する研究	倉光 君郎 Kuramitsu Kimio	横浜国立大学大学 院工学研究院 准教 授	横浜国立大学大学 院工学研究院 准教 授	日本女子大学理学 部 教授
9	耐攻撃性を強化し た高度にセキュア なOSの創出	河野 健二 Kono Kenji	慶應義塾大学理工 学部 准教授	慶應義塾大学理工 学部 准教授	慶應義塾大学理工 学部 教授

(註)2007年度は採択された研究チームがなかったため、2008年度を第2期とした。

## 1.2 研究領域終了後の進展と波及効果

### 1.2.1 研究成果の発展状況や活用状況

本研究領域の成果は、ディペンダビリティ統合化技術である DEOS (Dependability Engineering for Open Systems) 技術と、ディペンダビリティ要素技術に区分される。DEOS 技術、ディペンダビリティ要素技術の内容は、以下の通りである。

#### (a) DEOS 技術

本研究領域では、「システム全体としてディペンダビリティを実現する手法およびシステム」として、新たにディペンダビリティ統合化技術として DEOS の概念と、その概念を実現するプロセス (DEOS プロセス) を構築して国際標準化を図った。さらに DEOS プロセスを実際に活用するためのシステムを構築した。これらに関する技術が DEOS 技術である。

なお、DEOS 全体に関わる技術を「DEOS 統合化技術」、DEOS システムにおけるツール群を「DEOS 要素技術」とした。

#### (b) ディペンダビリティ要素技術

ディペンダビリティには、アクセス制御機能、高速・高信頼処理機能、高性能コンピューティング機能、高信頼システム構築技術、リアルタイム保障機能、ソフトウェアバグからの保護機能が必要であり、これらに関する技術がディペンダビリティ要素技術である。

#### (1) DEOS 技術

研究終了直前、2013年10月に一般社団法人ディペンダビリティ技術推進協会 (DEOS 協会)

を設立<sup>3</sup>した。DEOS 協会は、DEOS の産業界での利用、成果の発展、人材の育成などを目的とし、ディペンダビリティ技術の研究開発を促進する事業、ディペンダビリティ技術の普及・啓発のための事業、ディペンダビリティ技術に関わる事業の創生・発展を支援するための事業などを行っている。設立当初から所が理事長に就任し、その後木下が理事<sup>4</sup>に就任し、木下、倉光、河野が学会会員<sup>5</sup>を務めている。なお、学会会員 18 名中 9 名が本研究領域の研究者である。

DEOS の機能を強化するために開発した主な技術は以下の通りである。

(a)形式アシュランスケース<sup>6</sup>・フレームワーク(木下)

アシュランスケースの整合性をコンピュータによって検査することを可能とするため、形式言語により記述する形式アシュランスケース・フレームワークを開発した。

(b)要求獲得のためのシソーラス<sup>7</sup>情報支援機能(山本修一郎<sup>8</sup>)

要求分析者が技術文書からシソーラスに登録すべき機能の候補を抽出する際に、漏れがなく、正確な機能として抽出ができる支援ツールを開発した。

(c)D-Case Communicator(松野裕<sup>9</sup>)

各地に分散しているステークホルダ間の合意形成を活発に進めるツールとして、Web ベースの GSN(Goal Structuring Notation)<sup>10</sup>エディタ(D-Case Communicator)を開発した。

## (2)ディペンダビリティ要素技術

### ①並列・分散型システム技術(世界最高水準のスーパーコンピュータの開発)

演算性能が大幅に飛躍した最先端のスーパーコンピュータは、理論・実験に並ぶ科学技術の第 3 の手法であるシミュレーション利活用を進展させる研究開発基盤となっている。

「フラッグシップ 2020 プロジェクト」<sup>11</sup>は、世界トップレベルのコンピュータ・シミュレーションの実現を通し、社会が抱える複雑な課題の解決とサイエンスの探求に挑んでおり、エクサスケールの「ポスト「京」」により、多様な分野の科学技術シミュレーションの性能の飛躍的な向上を目指している。

しかしながら、「ポスト「京」」は、「最速」のみを目指すのではなく、「使いやすく、多

<sup>3</sup> DEOS プレスリリース 2013 年 11 月 20 日

<sup>4</sup> DEOS 概要 <http://deos.or.jp/consortium-guidance/summary-j.html>

<sup>5</sup> DEOS 会員一覧 <http://deos.or.jp/consortium-guidance/member-j.html>

<sup>6</sup> アシュランスケース：主張、その主張の証拠と前提、および証拠と前提から主張がどのように導かれるかの議論から構成される文書

<sup>7</sup> シソーラス：単語の上位/下位関係、部分/全体関係、同義関係、類義関係などによって単語を分類し、体系づけた類語辞典・辞書

<sup>8</sup> 山本修一郎：名古屋大学大学院情報科学研究科教授(共同研究者)

<sup>9</sup> 松野裕：日本大学理工学部応用情報工学科准教授(共同研究者)

<sup>10</sup> GSN(Goal Structuring Notation)：システムが達成すべき目的や性質について、その達成を導く方法・思考を可視化する際に用いる記法

<sup>11</sup> 文部科学省/分野別の研究開発/情報通信分野/「ポスト「京」開発事業「フラッグシップ 2020 プロジェクト(ポスト「京」の開発)」(2014 年度～2019 年度) <http://www.r-ccs.riken.jp/fs2020p/>

くの用途に用いられる世界最高水準のスーパーコンピュータ」を目指している。このコンセプトに基づき、Co-design によるアプリケーション実行性能の向上・低電力化技術や、チップ内回路の最適化などによる省電力高性能システム技術の開発にも取り組んでいる。

石川と佐藤は、2014 年より「フラッグシップ 2020 プロジェクト」の「ポスト「京」の開発」に参画し、石川はプロジェクトリーダー兼システム開発チームリーダー、佐藤はアーキテクチャ開発チームリーダーを務めている。「ポスト「京」」は、アプリケーション実行性能で「京」の 100 倍(ペタスケール)を目指しており、並列・分散型システム技術を発展させ、以下のスーパーコンピュータ要素技術を開発している。

(a) 軽量マイクロカーネル(McKernel) (石川)

本研究領域で開発した、ソフトウェアのみで 1 台のコンピュータを論理的に複数に分割し複数の OS を同時に動作させる手法 SHIMOS(Single Hardware with Independent Multiple Operating System)を発展させ、次世代メニーコア CPU のための軽量マイクロカーネル(McKernel)を開発した。

(b) 並列プログラミング言語(佐藤)

ポストペタスケールコンピューティングのための並列プログラミング基盤として、並列プログラミング言語拡張仕様 XcalableMP(XMP)を用いて各種コンポーネントへのインターフェースを作成するとともに、上位のプログラミングパラダイムとしてワークフロー言語である YML を用いた。この基本構想に基づき、XMP と YML の統合環境 FP2C(Framework for Post-Petascale Computing)を構築した。

(c) 通信ライブラリ(佐藤)

ポストペタスケールコンピューティングのプロセッサはメニーコアになると想定し、メニーコア向けの高速化した低レベル通信ライブラリ DCFA(Direct Communication Facility for Accelerator)と、MPI(Message Passing Interface)通信ライブラリ NewMedeline を開発した。

(d) 演算加速機構融合型並列システム HA-PACS(佐藤)

ポストペタスケールコンピューティングを実現する密結合並列演算加速機構アーキテクチャと、その実証システム HA-PACS を開発した。密結合並列演算加速機構アーキテクチャは、本研究課題で開発した PEARL(PCI-Express Adaptive and Reliable Link)を FPGA(書き換え可能ゲートアレイ)で実現し、これを用いて演算加速機構を結合したものである。

## ②信頼性向上技術

(a) プログラムの正しさを検証する手法(ゆるいメモリー貫性モデル) (前田)

並列プログラミングにおいてミスが生じやすくなる原因の一つである「メモリー貫性モデル」、特に「ゆるいメモリー貫性モデル」において、プログラムが不正なメモリ操作をしないことを検証する手法として、新たな理論を構築した。

「ゆるいメモリー貫性モデル」に対応した従来の研究では、モデルの表現が複雑でプロ

グラム開発者に理解しづらいという問題、また、特定のモデルにのみ対応していて他のモデルに応用が可能か自明ではなく、柔軟性に欠けるなどの問題があった。これらの問題を解決するため、「ゆるいメモリー貫性モデル」を簡潔に表現できるプログラミング言語の柔軟な型システムの理論を構築した。

#### (b) システムソフトウェアのモニタリングアーキテクチャ(中島)

システムモニタリングに適した分散システム/サービスアーキテクチャの開発、収集した情報を分析可能とするミドルウェア/サービスの開発に取り組み、Web サービス性能解析ツール、カーネルログから機械学習を用いて異常を検出するツール、スケーラブルなモニタリングツール、ネットワークのモニタに基づくセキュリティ対策技術などを開発した。

開発した技術は、極めて低いオーバーヘッドでの Web アプリケーション性能異常解析技術「mBrace」、機械学習アルゴリズムを用いた異常状態検出技術「Ayaka」、Linux カーネル内のデータ構造の状態遷移をモニタリングする異常検出技術「IntegrityMonitor」など、システムモニタリング性能向上に適した特徴を持つ技術である。

#### (c) 曖昧さの少ない言語の構文解析の実用化(倉光)

D-Case など、曖昧さのない日本語の技術文書の意味を理解して安全に処理する基盤技術の技術革新を図るため、分析的形式文法<sup>12</sup>の一種である解析表現文法 PEG<sup>13</sup>およびその解析アルゴリズムである Packrat Parsing<sup>14</sup>を基盤とした構文解析技術とブロックチェーン技術による契約の自動化に取り組んだ。

従来の PEG の課題に対して、ビッグデータ解析で利用されるストリームアルゴリズムを応用した新しい高速アルゴリズム、文脈に依存した構文解析処理、「選択の順序」を意識することなく記述できる拡張機能を開発し、機能性や利便性を向上させ、PEG 実用化の道を拓いた。また、D-Case/D-Add アーキテクチャの更新を考えて、ブロックチェーンによる契約の自動化プロジェクトを立ち上げ、日本語による契約を記述し、イーサリアム<sup>15</sup>上でコンピュータ言語として実行可能な厳密さを両立させるシステムを試作した。

### ③省電力化技術(河野)

#### (a) 仮想コアマイグレーション<sup>16</sup>方式

<sup>12</sup> 分析的形式文法：ある言語に含まれる文字列を構文解析して受理するアルゴリズムを定式化するもの

<sup>13</sup> PEG：Parsing Expression Grammar 解析表現文法の一つで、曖昧さが存在しないことから、コンピュータ言語の構文解析に向いている。PEG は、宣言的であること、アプリケーションに用いているプログラミング言語から独立していることから、一旦作成すると、他のプログラミング言語系にも転用できるなどの利点がある

<sup>14</sup> Packrat Parsing：PEG により構文解析を行う際の解析アルゴリズムである。解析の途中経過をメモ化し、バックトラッキングにおいて、そのメモを用いることにより重複を排除するという機能があり、解析時間は文字列の長さに対して常に線形となる

<sup>15</sup> イーサリアム(Ethereum)：分散型アプリケーションやスマート・コントラクトを構築するためのプラットフォームで、チューリング完全な計算力を持つ「ブロックチェーン」のこと

<sup>16</sup> 仮想コアマイグレーション：マルチコア環境において、ゲスト仮想マシンを、現在のコアから他のコアに移行させること

現在のデータセンターでは、ネットワーク機器による電力消費量も無視できないものとなっている点に着目し、物理マシンだけでなく、できるだけ多くのネットワーク機器も停止できるような形で仮想コアマイグレーション方式を確立した。ネットワークスイッチの空きボードを利用して、ラック内に納められた物理マシンを上位のネットワークスイッチに直接接続することにより、ネットワーク機器の冗長性を損なわずに下位のネットワークスイッチが停止できるため、省電力化が図れる。

#### (b) GPU の仮想化技術

メニーコア向けの省電力基盤を提供するため、GPU の仮想化を行った。GPU の仮想化は、ホスト CPU が GPU とやり取りする MMIO (Memory-Mapped I/O) の仮想化、GPU チャンネルの仮想化、GPU ページテーブルの仮想化などで達成している。GPU の仮想化を実現することによって、GPU に対するコマンドのスケジューリングを仮想マシンモニタの階層で行うことが可能になり、複数の仮想マシンからの要求を調停し、電力要求に合わせて GPU の使用量を粗粒度に調整することができるようになった。

### ④クラウドコンピューティング技術(徳田)

#### (a) クラウド・IoT 融合基盤技術

スマートシティの実現に向け、モノのネットワークとクラウドを融合するネットワークサービス基盤の研究開発に取り組み、実際のセンサデータに加え、仮想センサデータを自動的に収集できる仕組みも構築し、活用する情報の拡大を図った。Web 上の非センサデータを、あたかも実際に現物を検出したかのように、センサデータとして利用すること(仮想センサ化)を可能とする技術を開発し、Web 空間の情報を容易に IoT (Internet of Things) データソースとして活用できるクラウド・IoT 融合基盤技術 ClouT : Cloud of Things を構築した。

#### (b) ビッグデータ・クラウド・IoT 融合基盤技術

情報活用範囲を、従来は未利用あるいは利用度の低かった情報を含むソーシャル・ビッグデータに拡大するため、ソーシャル・ビッグデータ生成技術、ソーシャル・ビッグデータ保護技術、パターン抽出手法などを開発した。さらに、複数の組織間で情報の流通が可能となるよう、ソーシャル・ビッグデータ連携認証(フェデレーション)<sup>17</sup>機能を開発し、ClouT と統合した、ビッグデータ・クラウド・IoT 融合基盤技術 BigClouT を開発した。BigClouT はスマートシティにおける公共ビッグデータ利活用基盤の役割を果たし、都市に関するビッグデータからの知識抽出が可能となった。

### ⑤ロボット・自動運転技術

#### (a) ロボット聴覚の実環境理解(加賀美)

---

<sup>17</sup> 連携認証(フェデレーション)：一度認証を通れば、その認証を使って、許可されているすべてのサービスを使えるようにする仕組み

ロボットなどが、屋外の自然環境や広い屋内(大規模会場)などの広域において、正確に位置情報を把握できるよう、統計的三角測量と LiDAR<sup>18</sup>センサによる統計的誤差最小法とを組み合わせた 3D 地図作成法を開発した。また、音情報については、音源を分離し音源の位置を推定する機能を開発し、「聞き分ける」機能を実現した。

さらに、視覚情報と聴覚情報に基づく位置の推定を行うため、LiDAR と 32ch マイクアレイの手持ち装置を開発した。この視覚情報と聴覚情報(「聞き分ける」機能)とを結びつけることにより、ロボットが人の動きと音源の位置の関係を正確に把握できるようになるなど、視聴覚情報活用の基盤を確立した。

#### (b) 完全自動運転における危険と異常の予測(河野)

完全自動運転を実現するためには、多数の車両から得られる動画データなどに対して、有効グラフ解析や深層学習をオンラインリアルタイムで実行する必要がある。この完全自動運転に用いられる、GPGPU(General Purpose computing GPU)アプリケーション実行ソフトウェア(GLoop)を開発した。従来、高機能な GPGPU アプリケーションは非常に多くの資源を必要とし GPU を独占してしまうが、GLoop は所定の実行スケジュールの下で、機能を損なうことなく複数の GPGPU アプリケーションを実行できる。

また、完全自動運転には仮想化も不可欠であるが、仮想マシンモニタの脆弱性は仮想マシン全体のセキュリティを損なってしまう、アタッカーには都合の良い標的である。この脆弱性を少なくする仮想マシンモニタ FWinst を開発し、高いセキュリティを実現した。

## 1.2.2 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

### (1) DEOS 技術

#### ① 国際標準化

本研究領域では、研究期間中から IEC<sup>19</sup>およびその国内委員会に対して、DEOS を国際標準化した IEC 62853 Open systems dependability 制定の提案を行い、2013 年から議論が開始された。研究終了後も DEOS 協会で標準制定を推進する活動を継続し、2018 年 5 月に IEC で承認され、同年 6 月に国際標準として発行された。

IEC 62853 は AI を使った自動運転やロボットをはじめとする自律システムを社会がどのように受容していくのか、その方針を与えうるものとして注目されている。木下が取り組んでいる自動車の AI 搭載自動運転のアシュランスに関する日英国際共同研究“TIGARS”では、標準化活動による社会展開も行おうとしており、本研究領域で培った標準化のノウハウと人的資源が活用されている。

<sup>18</sup> LiDAR : Laser imaging Detection and Ranging レーザー画像検出と測距(光を用いたリモートセンシング技術)

<sup>19</sup> IEC : International Electrotechnical Commission(国際電気標準会議)

## ②DEOS 協会活動

(a)ディペンダビリティ技術の認証制度(DEOS 認証制度)<sup>20,21</sup>

DEOS 協会の活動として、2015年にDEOS 認証制度を発足した。この制度は、ディペンダビリティ技術の普及に役立つ製品、システム、教育コンテンツなどに対して認証を付与するもので、2018年7月現在では3社3件が認証を取得している。

(b)普及活動

DEOS 協会設立後、毎年協会主催の「オープンシンポジウム」を開催している。また協会内に7部会(OSD部会、技術部会、D-Case部会、D-ADD部会、標準化部会、認証部会、自動車応用部会)を設け、各部会ともシンポジウムやワークショップを開催し、ディペンダビリティ技術の普及に努めている。このような社会のニーズに沿った継続的な活動により、DEOSの普及に努めた結果、DEOS協会の正会員数は、設立当初11社であったが、2018年7月現在では35社になっている。

## (2)ディペンダビリティ要素技術

### ①並列・分散型システム技術(石川、佐藤)

「フラッグシップ2020プロジェクト」は、第四期科学技術基本計画における方針「国家基幹技術として位置づけられている世界最高水準のスーパーコンピュータを国として戦略的に開発・整備することで、科学技術の振興、産業競争力の強化、安全・安心の国づくり等を実現していくため、「①エクサスケールスーパーコンピュータの開発・整備」と「②エクサスケールスーパーコンピュータを活用するためのアプリケーションの開発」を推進する」に基づいて発足したプロジェクトである。

このプロジェクトで開発している技術は、「京」などにも実際に適用されており、「京」は2015年7月にはGraph500において第1位を獲得し、それ以降2018年6月まで7期連続で第1位を獲得している。また、「京」を使用したアプリケーションである「ビッグデータ同化」による気象予測シミュレーション「ゲリラ豪雨予測手法」は、2013年7月に京都で災害をもたらした豪雨、2014年9月に神戸で急発生した孤立積乱雲、2015年9月に鬼怒川が氾濫した関東・東北豪雨などの事例に取り組み、良好な結果を得た。

### ②信頼性向上技術(前田、中島、倉光)

(a)ゆるいメモリー貫性モデルのための柔軟な型システム

社会・経済への波及効果の高い最先端のアプリケーションソフトウェアの多くは、並列処理システムにおいて実行されており、その並列処理システムの安全性・高信頼化・高性

<sup>20</sup> DEOS プレスリリース 2015年6月17日

<sup>21</sup> DEOS 認証制度について <http://deos.or.jp/certification/index-j.html>

能化に貢献する実用的な技術を開発した。

#### (b) システムソフトウェアのモニタリングアーキテクチャ

情報爆発に伴い、情報システム基盤の安全性を確保するためのシステムモニタリング機能の重要性が一層増している。新たなスケーラブルシステムモニタリングアーキテクチャやサービス機能を構築し、システム自体の安全性を向上させ、ユーザのミスや悪意のある攻撃を未然に防ぐための手法を開発した。

#### (c) 曖昧さの少ない言語の構文解析

D-Case のような業務に使う文書では、曖昧さの少ないしっかりとした自然言語が使われている。このような曖昧さの少ない自然言語の構文解析が可能になれば、自然言語と人工言語(コンピュータ言語)を一緒にして機械処理することが可能となる。また、コンピュータ言語の構文解析は、例えばプログラミング言語のコンパイルや、インターネットの Web ページやメールアドレスを表す URL の文字列解析などに用いることで、自動的な検査機能が向上するため、その応用範囲は広い。

### ③省電力化技術(河野)

複数のデータセンターから構成されるクラウド環境の場合、消費電力量が同じであっても、地域によって電力価格が異なることがある。ネットワーク機器も停止できる仮想コアマイグレーション方式を用いることにより、電力価格の安い地域に設置されたデータセンターを積極的に利用することで、電力コストを削減できるという効果だけでなく、余剰電力を有効に活用することができるという環境上のメリットも大きい。

### ④クラウドコンピューティング技術(徳田)

現代の都市は、エネルギー管理の効率化、経済成長と開発、生活の質と安心安全など、多様な問題に直面している。この問題を解決する手段の一つが ICT 技術を駆使したスマートシティであり、そのスマートシティを実現するための基盤(ClouT 基盤、BigClouT 基盤)を構築した。この基盤を活用して、都市にあふれるデータから抽出された付加価値の高い知識を市民に還元し、交通、健康、エネルギー、サービス、防犯などの様々な分野への、高精度なイベント検知・分類、都市機能の解析・可視化・変化予測などにより、効率的かつリアルタイム性を持ったスマートシティの実現が可能となる。

開発した市民参加型のアプリケーションを用いて、実際に藤沢市とつくば市で実証実験を行い、その有効性を検証した。藤沢市では多くの人が集まるイベントでの参加者の行動変容を分析し、つくば市では外国人訪問客の困りごとを収集し、リアルタイムに回答することにより、滞在中の満足度の向上を図った。

### ⑤ロボット・自動運転技術(加賀美、河野)

#### (a) ロボット聴覚の実環境理解

音は画像と比べ拡張性が強いのでロボット聴覚による音環境理解は、画像だけでは捉えきれない環境でも理解ができる一方、広域から得られる情報の活用方法が課題となる。このため、屋外の自然環境や広い屋内(大規模会場)などの実環境における音環境を把握する「聞き分ける」機能を向上させる技術を開発した。「聞き分ける」機能は、人型ロボットだけでなく、多様な分野においても需要がある。「聞き分ける」機能を向上させた視聴覚情報統合技術は、自然環境や災害現場での活用が試みられている。

#### (b) 完全自動運転における危険と異常の予測

完全自動運転には危険と異常の予測が極めて重要であり、その実現には多量なデータを多くのプログラムがオンラインでリアルタイムに実行でき、かつ外部からの攻撃に耐えうるシステム環境の開発が求められている。これらの課題を解決するシステム環境(GLoop、FWinst)を開発した。

### 1.3 研究領域の展開状況(系譜図)

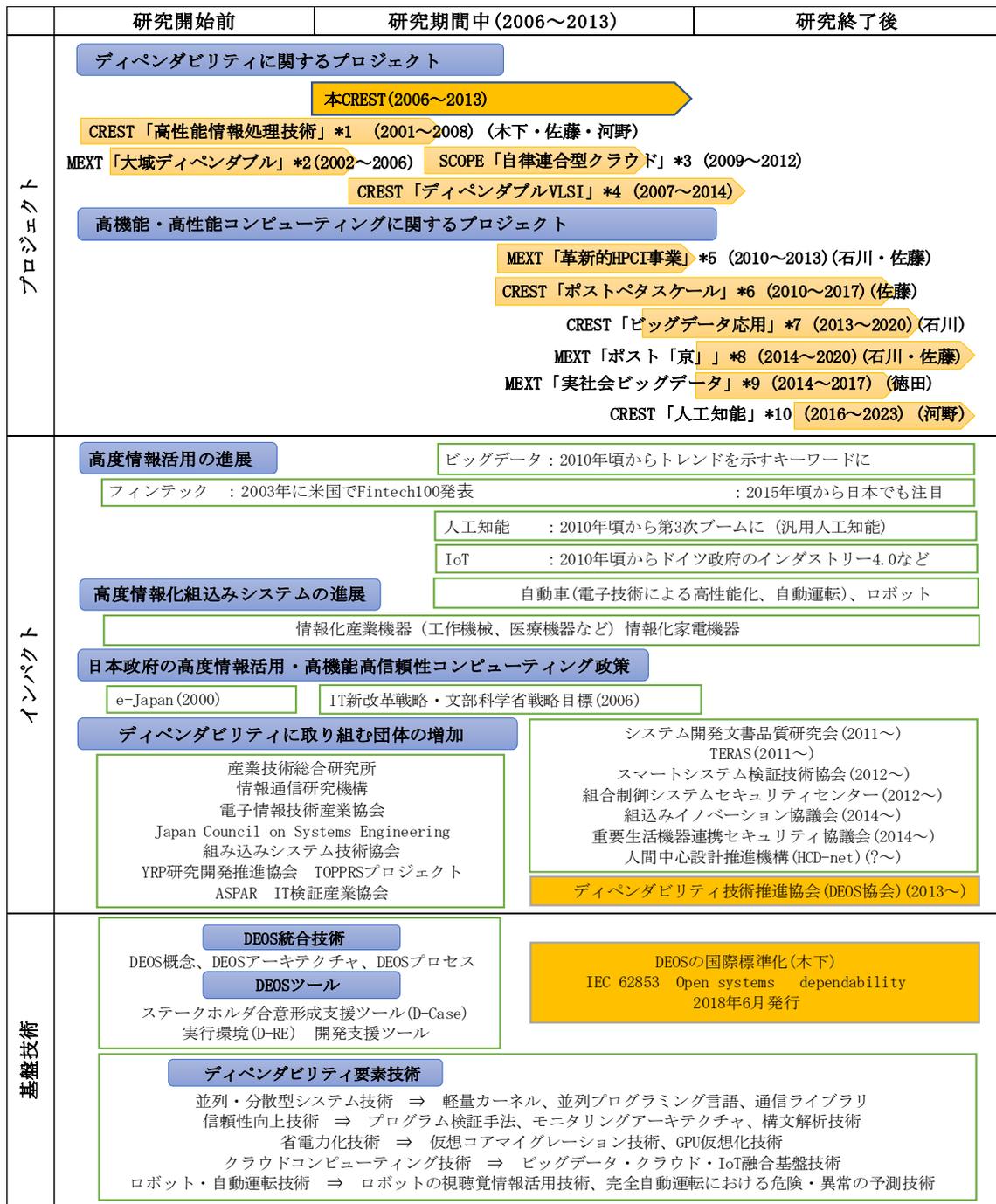
本研究領域の展開状況を図 1-1 にまとめた。高度情報活用に関する「プロジェクト」は、ディペンダビリティと高機能・高性能コンピューティングに関するプロジェクトが進められたが、図には科研費を除く代表的なプロジェクトを示した。

ディペンダビリティについては、本研究領域は組込みシステムを対象として発足し、対象をオープンシステムに広げて研究開発を行ったが、VLSI システムやクラウドコンピューティングを対象とした研究開発も進められた。CREST 研究領域「情報社会を支える新しい高性能情報処理技術」には、木下が研究代表者として、佐藤、河野が共同研究者として参画した。

高機能・高性能コンピューティングについては、「ポスト「京」」が最大のプロジェクトであり、石川と佐藤が参画し、石川はプロジェクトリーダーを務めている。なお、「ポスト「京」」には本研究領域で開発した技術の一部が活用されている。また、MEXT「革新的 HPCI 構築事業」(石川、佐藤が研究代表者として参画)、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」(佐藤が研究総括として参画)、CREST 研究領域「科学的発見・社会的問題解決に向けた各分野のビッグデータ利活用推進のための次世代アプリケーション技術の創出・高度化」(石川が共同研究者として参画)、CREST 研究領域「イノベーション創発に資する人工知能基盤技術の創出と統合化」(河野が共同研究者として参画)など、多くのプロジェクトが実行された。

「インパクト」としては、高度情報化組込みシステム(オープンシステム)の進展が大きく、それに伴い、ディペンダビリティに取り組む機関や団体が増加している。DEOS 協会は、本研究領域の成果を普及させることを目的とした団体で、DEOS は 2018 年 6 月に国際標準(IEC 62853)として発行された。

「基盤技術」は本研究領域の成果であるディペンダビリティ要素技術と DEOS 技術を示している。



- \*1 : CREST「情報社会を支える新しい高性能情報処理技術」(2001～2008)
- \*2 : MEXT 21世紀COEプログラム「大域ディペンダブル情報基盤プロジェクト」(2002～2006)
- \*3 : SCOPE「ディペンダブルな自律連合型クラウドコンピューティング基盤の研究開発」(2009～2012)
- \*4 : CREST「ディペンダブルVLSIシステムの基盤技術」(2007～2014)
- \*5 : MEXT「革新的HPCI構築事業」の「HPCIの整備」(2010～2012)  
および「レイテンシコアの高度化・高効率化による将来のHPCIシステムに関する調査研究」(2012～2013)  
および「演算加速機構を持つ将来のHPCIシステムに関する調査研究」(2012～2013)
- \*6 : CREST「ポストベ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」(2010～2017)
- \*7 : CREST「科学的発見・社会的問題解決に向けた各分野のビッグデータ利活用推進のための次世代アプリケーション技術の創出・高度化」(2013～2020)
- \*8 : MEXT「ポスト「京」開発事業 FLAGSHIP2020Project」(2014～2020)
- \*9 : MEXT「実社会ビッグデータ利活用のための統合・解析技術の研究開発」(2014～2017)
- \*10 : CREST「イノベーション創発に資する人工知能基盤技術の創出と統合化」(2016～2023)

図 1-1 系譜図

## 第 2 章 追跡調査(研究領域全体動向)

### 2.1 追跡調査について

#### 2.1.1 調査の目的

追跡調査は研究終了後、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、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の事業および事業運営の改善に資するために行うものである。研究領域終了後の研究代表者の研究課題の発展状況を調査した。

#### 2.1.2 調査の対象

本追跡調査は CREST 研究領域「実用化を目指した組込み用ディペンダブル・オペレーティングシステム」の全研究課題を対象とした。調査対象期間は、調査項目毎に「2.1.3 調査方法」の項で示した。

#### 2.1.3 調査方法

##### (1) 研究助成金

本研究領域の研究代表者が研究代表者を務める研究助成金を調査した。その中から研究助成金の総額が 1 千万円/件以上のものを抽出した(研究期間中に継続、開始を含む)。

研究助成資金の獲得状況の調査については、主に以下の Web サイトを利用した。

- ・ 調査対象研究代表者所属大学の研究者データベース
- ・ 調査対象研究代表者の所属する研究室、本人の Web サイト
- ・ 競争的研究資金の機関データベース  
(科学研究費助成事業データベース、厚生労働科学研究成果データベース)
- ・ 民間女性研究成果概要データベース(学術研究データベース・リポジトリ 国立情報学研究所[[https://dbr.nii.ac.jp/infolib/meta\\_pub/CsvSearch.cgi](https://dbr.nii.ac.jp/infolib/meta_pub/CsvSearch.cgi)])
- ・ 公益財団法人助成財団センター([http://www.jfc.or.jp/grant-search/ap\\_search.php5](http://www.jfc.or.jp/grant-search/ap_search.php5))
- ・ 日本の研究.com(<https://research-er.jp/>)

##### (2) 論文

論文の抽出は、文献データベース Scopus(エルゼビア社)を用い、CREST 研究期間中の論文については、研究代表者及び研究課題の研究者(グループリーダー及び、研究終了報告書の成果論文で責任著者となっている研究者)、CREST 研究終了後については研究代表者が著者になっている論文を著者名検索により出力し、ドキュメントタイプが Erratum 以外の論文を収集した。さらに本研究課題に関係しないと思われる論文を除いた。得られた論文の

発行年で、研究課題終了年の12月までに発行された論文を「(A)CRESTの研究成果の論文」に、終了年の翌年1月以降に発行された論文を「(B)CRESTの研究成果の継続と発展に関する論文」に、まずは分類した。次いで、(B)のうち終了時点で投稿中の論文や期間中の成果を終了後に発表したものを(A)に再分類し、当方で判断困難なものは研究代表者に直接確認して分類した。論文数は、(A)については成果論文の総数(①)と研究代表者の論文数(②)を求め、(B)については研究代表者を著者に含む論文数(③)を求めた。さらに、③のうち研究代表者が責任著者(筆頭著者、最終著者または連絡先著者)となっている論文数(④)も求めた。

表 2-1 論文検索対象期間

採択年	研究期間	検索対象期間	
		期間中	終了から調査時点
第1期 (2006)	2006年10月～2012年3月	2006年1月～2012年12月	2013年1月以降
第2期 (2008)	2008年10月～2014年3月	2008年1月～2014年12月	2015年1月以降

(註)2007年度は採択された研究チームがなかったため、2008年度を第2期とした。

### (3) 特許

特許出願および登録状況は、研究代表者が発明者になっているもので、その発明の名称からそれぞれの研究課題と関連していないと思われるものを上記と同様に除いた。出願日(PCTによる国際出願の場合は優先日)が研究終了時以前のを期間中に分類した。

・使用データベース：PatentSQARE(株式会社 パナソニック)

### (4) 受賞、招待講演、ベンチャー、報道

受賞、国際会議の招待講演、ベンチャー情報、報道については、Web検索を用いた。特に各研究代表者の研究室ホームページ、科研費ホームページ、日経テレコン等を参考にし、それぞれのリストを作成した。さらに、研究代表者に直接確認してデータの確認をし、不足分については追加事項を確認した。これらは各研究終了後を対象としたが、ベンチャーおよび報道については期間を問わず調査した。

## 2.2 研究成果概要

### 2.2.1 研究助成金

各研究代表者が獲得した助成金のリストを表 2-2 に示した。ここでは、原則として研究終了後に実施したもの(研究期間中に並行して実施したものも含む)で、助成金総額が1千万円/件以上のものを示しているが、各研究代表者はこれらの他にも助成金(研究分担者として、あるいは研究代表者であるが比較的少額)を獲得して研究を進めている。

表 2-2 研究助成金獲得状況

研究代表者	研究期間 (年度)	研究種目	研究課題	金額 (億円)	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
石川 裕	2006～ 2011	JST (CREST)	並列・分散型組み込みシステムのためのディベンダブルシングルシステムイメージOS	4.1			■	■	■	■	■	■										
	2006～ 2008	科研費 (基盤研究(B))	次世代PCクラスタを活用する超大規模仮想メモリ空間支援システムの研究	0.2			■	■														
	2007～ 2010	MEXT 先端研究基盤共用 促進事業 先端研究 基盤共用・プラッ トフォーム形成事 業	先端的大規模計算シミュレーションプログラム利用サービス	2.0			■	■	■	■												
	2008～ 2011	MEXT 次世代IT基盤構築 のための研究開発	シームレス高生産・高性能プログラミング環境	6.0 (最大)				■	■	■	■											
	2010～ 2012	MEXT 革新的HPCI構築事 業	HPCI の整備	4.7					■	■	■											
	2010～ 2011	JSPS 最先端研究開発支 援 最先端研究基盤 事業	e-サイエンス実現のためのシステム統合・連携ソフトウェアの高度利用促進	60.0							■	■										
	2012～ 2013	MEXT 革新的HPCI構築事 業	レイテンシコアの高度化・高効率化による将来のHPCI システムに関する調査研究	3.3									■	■								
	2014～ 2020	MEXT ポスト「京」開発 事業 FLAGSHIP2020 Project	ポスト「京」の開発	1,300 (国費 1,100)											■	■	■	■	■	■	■	■
佐藤三久	2005～ 2007	科研費 (基盤研究(A))	大容量分散コンピューティングのための大規模スケラブルP2Pグリッド基盤の研究	0.3			■	■														
	2006～ 2011	JST (CREST)	省電力でディベンダブルな組込み並列システム向け計算プラットフォーム	4.5			■	■	■	■	■	■										
	2010～ 2012	JST 戦略的国際共同研 究プログラム (SICORP)	ポストベータスケールコンピューティングのためのフレームワークとプログラミング	3.00 (最大)							■	■	■									
	2011～ 2013	JSPS 国際交流事業,国際 共同研究事業 多国間国際研究協 力事業	Enabling Climate Simulation at Extreme Scale	0.45 (最大)								■	■	■								

研究代表者	研究期間 (年度)	研究種目	研究課題	金額 (億円)	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
佐藤三久	2011～ 2013	MEXT 特別研究費	「先端学際計算科学による 計算科学の革新」事業	4.9																	
	2012～ 2013	MEXT 革新的HPCI構築事 業	演算加速機構を持つ将来の HPCI システムに関する調 査研究	3.3																	
	2015～ 2017	JST (CREST)	ポストベタスケール高性能 計算に資するシステムソフ トウェアの創出																		
徳田英幸	2002～ 2006	MEXT 21世紀COEプログラ ム	次世代メディア・知的社会 基盤	7.1																	
	2006～ 2011	JST (CREST)	マイクロユビキタスノード 用ディペンダブルOS	1.4																	
	2008～ 2009	NICT 委託研究,高度通 信・放送研究開発 委託研究	ダイナミックネットワーク 技術の研究開発	3.3																	
	2010～ 2012	JSPS 国際交流事業 組織 的な若手研究者等 海外派遣プログラム	横断的問題解決スペシャリ スト海外派遣プログラム	0.4																	
	2013～ 2015	NICT 高度通信・放送研 究開発委託研究	モノのネットワークとクラ ウドを融合するネットワー クサービス基盤の研究開発	1.6																	
	2014～ 2017	NICT 高度通信・放送研 究開発委託研究	オープン・スマートシティ を実現するソーシャル・ ビッグデータ活用・還流 基盤	2.7																	
	2018～ 2019	NICT 高度通信・放送研 究開発委託研究	スマートシティにおける市 民の影響力を拡張するビッ グデータ・クラウド・IoT 融合基盤技術 Acronym BigCloud	1.9																	
中島達夫	2006～ 2011	JST (CREST)	高機能情報家電のための ディペンダブルオペレー ティングシステム	2.9																	
	2006～ 2010	科研費 (特定領域研究)	情報爆発に対応する高度に スケーラブルなモニタリ ングアーキテクチャ	0.6																	
前田俊行	2006～ 2011	JST (CREST)	ディペンダブルシステムソ フトウェア構築技術に関す る研究	1.8																	
加賀美聡	2008～ 2013	JST (CREST)	実時間並列ディペンダブル OSとその分散ネットワー クの研究	3.0																	
	2014	科研費 (基盤研究(A))	自動運転のための組み 込み情報通信技術の研究 開発	0.2																	
木下佳樹	2008～ 2013	JST (CREST)	利用者指向ディペンダビリ ティの研究	2.8																	
	2009～ 2011	JST (A-STEP)	モデル化技術によるMCU 仕様検証と機能検証の自動 化	0.6																	

研究代表者	研究期間 (年度)	研究種目	研究課題	金額 (億円)	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
木下佳樹	2014～ 2015	IPA	オープンシステム・ディ ベンタビリティのための形 式アシュランスケース・フ レームワーク	0.3																	
	2018～ 2019	Lloyd's Register Foundation	Towards Identifying and closing Gaps in Assurance of autonomous Road vehicleS -TIGARS	0.2																	
倉光君郎	2008～ 2013	JST (CREST)	Security WeaverとPスクリ プトによる実行中の継続的 な安全確保に関する研究	6.2																	
河野健二	2008～ 2013	JST (CREST)	耐攻撃性を強化した高度に セキュアなOSの創出	2.1																	

注1：1.5～5.0億円

助成元	色
JST	赤
科研費	青
文部科学省	黄
NEDO	桃
日本学術振興会	緑
総務省	紫
その他	黒

## 2.2.2 論文

論文発表数はその研究活動の状況を示す重要な指標であるため、本研究領域の研究代表者が研究期間中および研究終了後に発表した原著論文の数を表 2-3 に示す。

表 2-3 では、研究課題ごとに、①CREST の研究成果の論文数、②そのうち研究代表者を著者に含む論文数、③CREST の研究成果の継続と発展に関する研究代表者の論文数、④そのうち責任著者となった論文数をまとめた。なお、本研究領域では、国際会議での発表を公式な研究成果発表としていることも多く、その発表数も表 2-3 に含まれている。

これらの論文を被引用数で見ると、トップ 10%の論文は 1 報(徳田)であった。研究期間中および研究終了後の論文の中で、引用数が 10 回を超える論文が 5 報以上あったのは、石川(8 報)、佐藤(7 報)、中島が(12 報)、加賀美(10 報)、河野(5 報)であった。

表 2-3 研究者の論文(原著論文)数

期 (採択 年)	研究課題名	研究 代表者名	① CREST の研究成 果の論文 数	② 左記 ①のうち 研究代表 者の論文 数	③ CREST の研究成 果の継続 と発展に 関する論 文数	④ 左記 ③のうち 責任著者 の論文数
第 1 期 2006 (平成 18 年)	並列・分散型組込みシステム のためのディペンダブルシ ングルシステムイメージ OS	石川 裕	25	23	27	22
	省電力でディペンダブルな 組込み並列システム向け計 算プラットフォーム	佐藤 三久	21	20	32	29
	マイクロビキタスノード 用ディペンダブル OS	徳田 英幸	15	15	24	22
	高機能情報家電のためのデ ィペンダブルオペレーテ ィングシステム	中島 達夫	58	46	33	30
	ディペンダブルシステムソ フトウェア構築技術に関す る研究	前田 俊行	8	8	13	11
第 2 期 2008 (平成 20 年)	実時間並列ディペンダブル OS とその分散ネットワーク の研究	加賀美 聡	40	39	10	5
	利用者指向ディペンダビリ ティの研究	木下 佳樹	14	7	5	4
	Security Weaver と P スクリ プトによる実行中の継続的 な安全確保に関する研究	倉光 君郎	30	11	8	8

期 (採択 年)	研究課題名	研究 代表者名	① CREST の研究成 果の論文 数	② 左記 ①のうち 研究代表 者の論文 数	③ CREST の研究成 果の継続 と発展に 関する論 文数	④ 左記 ③のうち 責任著者 の論文数
	耐攻撃性を強化した高度に セキュアな OS の創出	河野 健二	37	25	12	12
領域全体*			238	187	164	143

\*：複数研究者による共著論文があるため、各研究課題の単純合計とは一致しない。

2018年12月17日調査

### 2.2.3 特許

特許出願および登録は、研究目的と段階によりその数は異なるが、当該研究が最終的に一定の成果を収め、実用化による社会貢献につながる段階に達したことを示す重要な指標でもある。本研究領域は対象がソフトウェアであり、特許出願数および登録数は少ないが、研究代表者による特許出願数および登録数を表 2-4 に示す。

徳田は、研究終了後の「ビッグデータ・クラウド・IoT 融合基盤」の研究成果である「疑似データ生成」および「混雑情報推定」に関する国内特許を 2 件出願した。前田は、研究期間中の成果である「プログラム解析・検証」に関する国内特許を 1 件出願（登録済）した。加賀美は、研究期間中の成果である「複数 OS のメモリ使用」に関する国内特許を 1 件出願した。木下は、研究期間中の成果である「整合性検査」に関する国内特許を 1 件（登録済）出願した。倉光は、研究期間中の成果である「ディペンダビリティに用いる言語」、「構文解析」、「システムの稼働状態監視」に関する国内特許を 3 件出願（1 件登録済）した。河野は、研究期間中の成果である「障害検出に用いるパケットデータ抽出」に関する国内特許を 1 件出願（登録済）した。

表 2-4 研究期間中・終了後の特許の出願と登録状況

期 (採択 年)	No	研究 代表者名	研究課題名	研究領域期間中				研究領域終了後			
				出願件数		登録件数		出願件数		登録件数	
				国内	海外	国内	海外	国内	海外	国内	海外
第 1 期 2006 (平成 18 年)	1	石川 裕	並列・分散型組込みシステムのためのディペンダブルシングルシステムイメージ OS	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	佐藤 三久	省電力でディペンダブルな組込み並列システム向け計算プラットフォーム	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	徳田 英幸	マイクロコピキタスノード用ディペンダブル OS	0	0	0	0	2	0	0	0
	4	中島 達夫	高機能情報家電のためのディペンダブルオペレーティングシステム	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	前田 俊行	ディペンダブルシステムソフトウェア構築技術に関する研究	1	1	1	1	0	0	0	0

期 (採択 年)	No	研究 代表者名	研究課題名	研究領域期間中				研究領域終了後			
				出願件数		登録件数		出願件数		登録件数	
				国内	海外	国内	海外	国内	海外	国内	海外
第2期 2006 (平成18 年)	1	加賀美 聡	実時間並列ディペンダ ブルOSとその分散ネ ットワークの研究	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	木下 佳樹	利用者指向ディペンダ ビリティの研究	1	0	1	0	0	0	0	0
	3	倉光 君郎	Security WeaverとP スクリプトによる実行 中の継続的な安全確保 に関する研究	3	0	1	0	0	0	0	0
	4	河野 健二	耐攻撃性を強化した高 度にセキュアなOSの 創出	1	1	1	1	0	0	0	0

領域全体				7	2	4	2	2	0	0	0
------	--	--	--	---	---	---	---	---	---	---	---

2018年12月28日調査

※PCT出願された特許は、海外出願件数1件として計上し、各国出願分は含めない。海外の登録件数は、いずれかの国で登録されていれば1件とする。

## 2.2.4 研究代表者の主な活動状況

研究代表者の主な活動状況として、研究助成金の獲得、論文発表、受賞、重要な役職への就任、教授などへの昇任状況を示す。

### (a) 研究助成金の獲得

石川、佐藤、徳田は、研究期間中および研究終了後、研究代表者として獲得した研究助成金(1億円以上)が3件以上ある。

#### 石川 裕

研究項目(研究助成金1億円以上)	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
MEXT(先端的大規模計算)													
MEXT(シームレス高生産・高性能)													
MEXT(HPCI)													
JSPS(e-サイエンス)													
MEXT(レイテンシコア)													
MEXT(ポスト「京」)													

#### 佐藤 三久

研究項目(研究助成金1億円以上)	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
SICORP(ポストペタ)													
MEXT(先端学際計算科学)													
MEXT(演算加速機構)													
CREST(ポストペタ)													

#### 徳田 英幸

研究項目(研究助成金1億円以上)	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
NICT(ダイナミックネットワーク)													
NICT(ClouT)													
NICT(ビッグデータ利活用)													
NICT(BigClouT)													

図 2-1 研究期間中および研究終了後、研究代表者として獲得した研究助成金(1億円以上)

### (b) 論文発表

中島は、研究期間中および研究終了後の論文数が一番多かった。

#### 中島 達夫

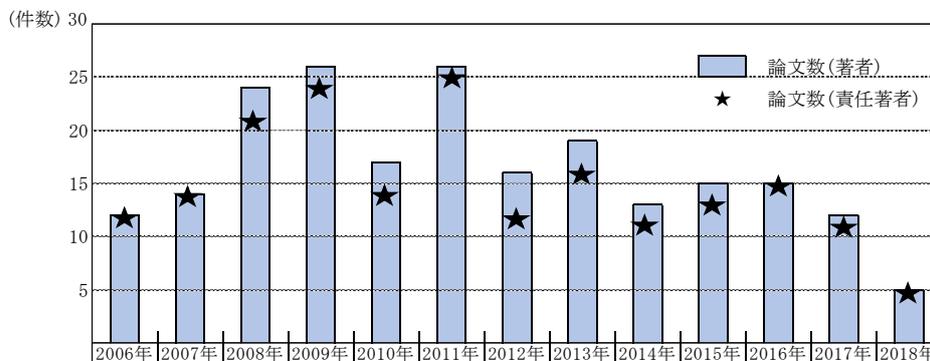


図 2-2 研究期間中および研究終了後の論文数

(c)受賞

石川、佐藤、徳田、河野は、研究終了後の受賞が3件以上あった。

石川 裕(2012年～)

受賞	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
Best Paper Award(ACM HDC)									●				●
Outstanding Paper Award(The Fourth International Symposium on Computing and Networking)											●		
2016年度功労賞(日本ソフトウェア科学会)											●		
コンピューティングシステム優秀論文賞(情報処理学会)											●		
Best Paper Award(ROSS Committee in cooperation with ACM sighpc)												●	

佐藤 三久(2012年～)

受賞	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
HPC Challenge Class2 Award(HPC Challenge Competition)								●	●				
大川出版賞(公益財団法人大川情報通信基金)								●					

徳田 英幸(2012年～)

受賞	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
第11回情報セキュリティ文化賞(情報セキュリティ大学院大学)										●			
慶應義塾大学福澤賞(慶應義塾大学)											●		
文部科学大臣表彰：科学技術賞(文部科学省)												●	

河野 健二(2014年～)

受賞	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
ソフトウェア論文賞(日本ソフトウェア科学会)								●					
IBM Faculty Award(IBM)										●			
基礎研究賞(日本ソフトウェア科学会)										●			

図 2-3 研究終了後の受賞件数

(d)重要な役職への就任

石川、佐藤、徳田は、研究終了後に重要な役職に就任している。

	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
石川 裕	東京大学情報基盤センター長・教授 理化学研究所計算科学研究センターシステムソフトウェア研究チームリーダー 「フラッグシップ2020プロジェクト(ポスト「京」の開発)」プロジェクトリーダー												
佐藤 三久	筑波大学計算科学研究センター長・教授 理化学研究所計算科学研究センタープログラミング環境研究チームリーダー 理化学研究所計算科学研究センター 副センター長												
徳田 英幸	慶應義塾大学環境情報学部教授 国立研究開発法人情報通信研究機構 理事長												

図 2-4 研究終了後の重要な役職就任

(e)教授などへの昇任

倉光、河野は、研究終了後、准教授から教授に昇任している。前田は、研究終了後、助教から STAIR の副所長に昇進している。

	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
前田 敏行							東京大学大学院情報理工系研究科助教						
								理化学研究所計算科学研究機構利用高度化研究チームリーダー					
									千葉工業大学人工知能・ソフトウェア開発センター			(STAIR) 副所長	
倉光 君郎									横浜国立大学大学院工学研究院知的構造の創生部門准教授				
												日本女子大学理学部教授	
河野 健二									慶應義塾大学理工学部情報処理学科准教授				
												慶應義塾大学理工学部情報処理学科教授	

図 2-5 研究終了後の昇任など

## 2.3 科学技術や社会・経済への波及効果

### 2.3.1 科学技術への波及効果

#### (1) 受賞

科学技術の進歩への貢献や研究成果に関する評価を示す指標の一つとして、受賞が挙げられる。表 2-5 に、研究終了後の研究代表者の受賞を示す。

本研究領域の研究代表者に対して授与された賞は 18 件であり、石川(6 件)、佐藤(3 件)、徳田(3 件)、中島(2 件)、木下(1 件)、河野(3 件)であった。石川は日本ソフトウェア科学会の 2016 年度功労賞、佐藤は 2013 年度と 2014 年度に HPC Challenge Class2 Award、徳田は 2015 年度情報セキュリティ文化賞、2016 年度慶應義塾大学福澤賞、2017 年度文部科学大臣表彰科学技術賞、中島は 2013 年度と 2014 年度に IEEE の Best Paper Award、木下は IEC(国際電気標準化会議)の 2018 年度 1906 賞、河野は日本ソフトウェア科学会の 2015 年度基礎研究賞を受賞した。

表 2-5 受賞リスト

期 (採用 年)	No.	受賞者	賞名	授賞機関 (国)	受賞 年度	受賞理由
第1期 2006 (平成 18年)	1	石川 裕 (2012年～)	Best Paper Award	ACM HPDC 2014	2014	CMCP: A novel page replacement policy for system level hierarchical memory management on many-cores
			Outstanding Paper Award	The Fourth International Symposium on Computing and Networking	2016	Topology-Aware Data Aggregation for High Performance Collective MPI-I/O on a Multi-Core Cluster System
			2016年度功労賞	日本ソフトウェア科学会	2016	日本ソフトウェア科学会の学会活動に対する、特に顕著な貢献
			2016年度情報処理学会論文誌 コンピューティングシステム優秀論文賞	情報処理学会	2016	新しいタスクモデルによるメニーコア環境に適したMPI ノード内通信の実装
			Best Paper Award	ROSS Committee in cooperation with ACM sighpc	2017	Toward Full Specialization of the HPC Software Stack: Reconciling Application Containers and Lightweight Multi-kernels
			Best Paper Award	ACM HPDC 2018	2018	メニーコアCPUにおける第3の並列実行モデルの新たな実装方式を提案
	2	佐藤 三久 (2012年～)	HPC Challenge Class2 Award	HPC Challenge Competition	2013	XcalableMP(並列プログラミング言語)によるHPC Challenge ベンチマークの実装と評価
			大川出版賞	公益財団法人大川情報通信基金	2013	岩波講座「計算科学 別巻 スーパーコンピュータ」
			HPC Challenge Class2 Award (Finalist: Best Performance)	HPC Challenge Competition	2014	XcalableMP(並列プログラミング言語)およびXcalableACC(演算加速器を搭載したスーパーコンピュータに対してアプリケーションを開発できるようにXcalableMPを拡張した言語)の高い生産性と性能
	3	徳田 英幸 (2012年～)	第11回情報セキュリティ文化賞	情報セキュリティ大学院大学	2015	慶應義塾大学で情報通信技術の応用に関する技術開発や人材育成、政策提言などに寄与
			慶應義塾大学福澤賞	慶應義塾大学	2016	ユビキタスネットワーク・コンピューティングの研究開発普及啓蒙を通じた我が国の情報通信の発展への貢献
			文部科学大臣表彰：科学技術賞	文部科学省	2017	OS 基盤技術とユビキタスコンピューティング技術の研究

期 (採用 年)	No.	受賞者	賞名	授賞機関 (国)	受賞 年度	受賞理由
	4	中島 達夫 (2012年～)	ICESSE2013 Best Paper Award	IEEE	2013	Improving GPOS real-time responsiveness using vCPU migration in an embedded multicore virtualization platform
			UIC-ATC2014 Best Paper Award	IEEE	2014	Automatically Generating External OS Kernel Integrity Checkers for Detecting Hidden Rootkits
第2期 2008 (平成 20年)	1	木下 佳樹 (2014年～)	IEC(国際電気標準化 会議) 1906 賞	IEC(国際電気標 準化会議)	2018	開放系(open system)に関する新 標準開発におけるプロジェクト リーダーとしての活動
	2	河野 健二 (2014年～)	ソフトウェア論文賞	日本ソフトウェ ア科学会	2013	「Amberate: Web アプリケーショ ンの脆弱性自動検出フレームワ ーク」2011, Vo. 28, No. 4
			IBM Faculty Award	IBM 株式会社	2015	仮想化技術に関する一連の研究
			基礎研究賞	日本ソフトウェ ア科学会	2015	オペレーティングシステムおよ びシステムソフトウェアにおけ る一連の研究

2019年1月28日調査

## (2) 学会・研究会への貢献

徳田は、2007年に情報処理学会フェロー、2012年に日本ソフトウェア科学会フェロー、2018年に日本工学会フェローとなり、2014年には日本学術会議の会員に選任された。また、情報処理学会の副会長(2014年度～2015年度)を務めた。

佐藤は、2012年に情報処理学会フェローとなった。また、情報処理学会の理事(調査研究担当)(2009年度～2010年度)、OpenMP Users group (Community) board member、Parallel Computing Journal Editorial board memberを務めた。

石川は、2014年に情報処理学会フェローとなった。

河野は、日本ソフトウェア科学会の理事(2010年度～2012年度)を務めた。また、電子情報通信学会英文誌編集委員(2007年度～2012年度)、日本ソフトウェア科学会ディペンダブルシステム研究会主査(2009年度～2012年度)、情報処理学会システムソフトウェアとオペレーティングシステム研究会主査(2011年度～2015年度)を務めた。

## (3) 共同研究

中島は、国立情報学研究所との共同研究「柔軟な適応性をもつ分散システムの構築・管理」(科研費基盤研究(B)2012年度～2015年度)、「不揮発性メモリ及び小型原子時計等を前提とした分散システム技術」(科研費基盤研究(A)2016年度～2019年度)を行った。

木下は、国立情報学研究所との共同研究「議論の発展過程の数理科学的研究」(2012年度～2014年度)、産業技術総合研究所との共同研究「有機化合物のスペクトルデータベースシステム(SDBS)の帰属、および帰属決定プロセスについてのアシュランスケースの研究」(2014年度～2018年度)、平塚市との共同研究「平塚市地域防災計画の整合性検査方式の研究」(2014年度～2018年度)を行った。

河野は、東京大学との共同研究「完全自動運転における危険と異常の予測」(CREST研究領域「イノベーション創発に資する人工知能基盤技術の創出と統合化」2016年度～2021年度)を行っているほか、名古屋大学との仮想化に関する共同研究も行った。

#### (4) 技術指導や教育活動

DEOSは、DEOS協会設立後、毎年協会主催の「オープンシンポジウム」を開催してオープンシステムディペンダビリティに関する技術指導や教育に努めている。また、協会内に7部会(OSD部会、技術部会、D-Case部会、D-ADD部会、標準化部会、認証部会、自動車応用部会)を設け、シンポジウムやワークショップの開催や、普及を促進するために多くの論文発表により技術指導や教育に努めている。

なお、DEOS協会では設立当初から所研究総括が理事長に就任し、その後木下が理事<sup>22</sup>に就任し、木下、倉光、河野や本研究領域の共同研究者6名が学会会員を務めており、上記の活動を行っている。

### 2.3.2 社会・経済への波及効果

#### (1) 報道

研究成果の社会・経済への波及効果を促す媒体として新聞等の報道がある。そこで本研究期間中および研究終了後の研究成果に関する報道について調査を行った。

報道件数は、研究期間中は89件、終了後は111件、合計200件であった。石川は、「ポスト「京」」の開発や「京」における高性能シミュレーションに関する報道が多く、佐藤は、「京」の高性能化(Graph500において世界第1位を獲得)や「京」における高性能シミュレーションに関する報道が多かった。徳田は、情報通信分野の幅広い活動や情報通信機構理事長としての活動に関する報道が多かった。

表 2-6 報道件数

				(件)			
研究代表者	研究期間中	研究終了後	合計	研究代表者	研究期間中	研究終了後	合計
石川 裕	26	17	43	加賀美 聡	4	8	12

<sup>22</sup> DEOS 概要 <http://deos.or.jp/consortium-guidance/summary-j.html>

研究代表者	研究 期間中	研究 終了後	合計	研究代表者	研究 期間中	研究 終了後	合計
佐藤 三久	8	26	34	木下 佳樹	1	2	3
徳田 英幸	50	54	104	河野 健二	0	4	4

## (2) 企業との連携や共同研究

徳田は、情報通信研究機構の「高度通信・放送研究開発委託研究」において、以下の3件の共同研究を行った。(a)「新世代ネットワークの実現に向けた欧州との連携による共同研究開発/モノのネットワークとクラウドを融合するネットワークサービス基盤の研究開発」(2013年度～2015年度)(共同研究先:東日本電信電話株式会社(NTT 東日本)、国立情報学研究所、日本電信電話株式会社(NTT)、パナソニックシステムネットワークス株式会社)、(b)「ソーシャル・ビッグデータ利活用基盤技術の研究開発/新たなソーシャル・ビッグデータ利活用基盤技術の研究開発」(2014年度～2017年度)(共同研究先:東京大学、東京電機大学、NTT)、(c)「欧州との連携による公共ビッグデータの利活用基盤に関する研究開発/スマートシティにおける市民の影響力を拡張するビッグデータ・クラウド・IoT融合基盤技術」(2016年度～2019年度)(共同研究先:NTT 東日本、国立情報学研究所、NTT、筑波大学、株式会社 YRP-IOT)。

中島は、富士通株式会社およびパナソニック株式会社と、組込み向け仮想マシンやセキュリティに関する共同研究を行った。

木下は、株式会社デンソーと共同で、「自動車機能安全ケースのためのフレームワークに関する研究」(2014年度～2015年度)を行った。

倉光は、株式会社サイバー総研および株式会社アルテと共同で研究を行った。

河野は、株式会社日立製作所と共同でソフトウェア信頼性向上のための研究を、NTT と共同でクラウド向け高信頼基盤に関する研究を行った。

## (3) ベンチャー

ベンチャーの設立はない。

## (4) 実用化・製品化

DEOS は実用化しており、DEOS 協会から技術資料のほか以下のソフトウェアを公開している。

- D-Case Editor
- D-Case Weaver
- D-RE (DEOS Runtime Environment)
- D-Visor + D-System Monitor
- DS-Bench/Test-Ent (DS-Bench/D-Cloud)

佐藤は、本研究領域で開発したソフトウェア PEACH の試作品を、株式会社日立製作所、東京農工大学に提供した。

中島は、本研究領域で開発したソフトウェア SPUMONE を横河電機株式会社に提供した。

#### (5) 研究人材の育成

徳田は、文部科学省/国際化拠点整備事業「Global Information and Communication Technology and Governance Academic Program」(2010 年度～2014 年度)、文部科学省/博士課程教育リーディングプログラム事業「グローバル環境システムリーダープログラム」(2011 年度～2017 年度)に共同研究者として参画した。

中島は、文部科学省/革新的・先導的教育研究プログラムの開発推進/21 世紀 COE プログラム/情報・電気・電子「プロダクティブ ICI アカデミアプログラム」(2002 年度～2006 年度)、文部科学省/革新的・先導的教育研究プログラムの開発推進/グローバル COE プログラム/情報・電気・電子「アンビエント SoC 教育研究の国際拠点」(2007 年度～2011 年度)に共同研究者として参画した。

倉光は、文部科学省/情報技術人材育成のための実践教育ネットワーク形成事業 enPit-Pro「Open IoT 教育」(2017 年度～2021 年度)に横浜国立大学の代表として参画し、セキュアプログラミング講座を担当している。

### 第 3 章 各研究課題の主な研究成果および波及効果

前述の通り、本研究領域の成果は、ディペンダビリティ要素技術とディペンダビリティ統合化技術である DEOS (Dependability Engineering for Open Systems) 技術に区分される。

DEOS 技術の研究開発には研究代表者全員が携わっており、3.1 項に DEOS 全体に関する主な研究成果および波及効果を記述し、3.2 項および 3.3 項に研究課題ごとの主な研究成果および波及効果を記述した。

#### 3.1 DEOS 技術(ディペンダビリティ技術)

##### (1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

###### ① 研究のねらい

本研究領域では、実用化と将来の更なる研究基盤を与えることを目標とするため、各研究課題の研究成果を統合し、全体システムとして実用に近い形でデモを行い、その有効性並びに実用性を実証することを方針とした。

この方針に従い、領域発足からおよそ 2 年間をかけて、研究総括の下、研究チーム、領域アドバイザー、研究推進委員が協議を進めた。その結果、システムあるいはサービスの視点で技術を評価することの重要性や、システムのライフサイクルを考慮したアーキテクチャの重要性などの考え方の基礎を確立するとともに、実用化を研究成果のゴールと定め、かつ個々の研究成果(ディペンダビリティ要素技術)の実用化だけではなく全体を統合化した研究成果(ディペンダビリティ統合化技術 DEOS)の実用化を目標とした。

###### 研究実施体制<sup>23</sup>

この目標実現のため、本研究領域内の研究を横断・統合した推進する組織として、2007 年 4 月に JST 直属の研究開発センターとしてディペンダブル組込み OS 研究開発センター (DEOS センター) を設立し、研究チームと一体になった活動を開始した。

2008 年夏に研究チームを横断する形で、石川を中心に「コアチーム」を立ち上げ、2009 年からは DEOS センターを中心に「オープンシステムディペンダビリティ」実現のためのソフトウェア実装の枠組みとなる「フレームワーク」の開発を開始した。

2010 年 4 月からは、コアチームを廃止し、テーマごとに 6 つのチームに分けた「サブコアチーム」を編成してそれぞれの課題の研究を進めた。さらに 2011 年からは DEOS Process/Architecture チームを発足させ、要素技術との統合、整合、実用化に向けた統合システム開発を行った。

図 3-1<sup>23</sup> に研究開発体制とコアチーム・サブコアチームの関係を、これらのチーム編成

<sup>23</sup> 本研究領域 事後評価用資料

とその役割を表 3-1<sup>23</sup> に示した。

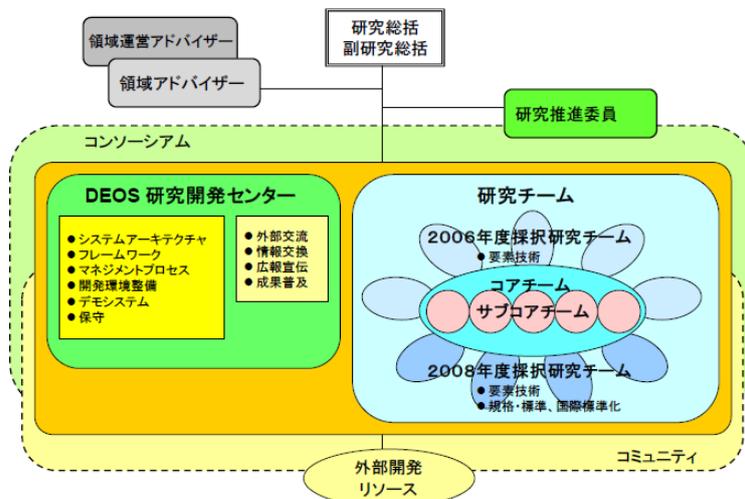


図 3-1 研究開発体制とコアチーム、サブコアチーム

表 3-1 チーム編成とその役割

チーム名	リーダー	チームの課題
コアチーム (2008年6月～2010年3月)	石川 裕	「オープンシステムディペンダビリティ」実現のためのソフトウェア実装の枠組みとなる「フレームワーク」の開発
サブコアチーム (2010年4月～2014年3月)		
D-Case & Metric チーム	松野 裕*1	ディペンダビリティメトリクスと合意形成の研究
EBI チーム	菅谷 みどり*2	システム監視とエビデンス分析の研究
VM & Multi-OS チーム	追川 修一*3	仮想化技術とその応用の研究
System Software Verification チーム	前田 俊行	システムソフトウェア検証の研究
DS-Bench & D-Cloud チーム	石川 裕 佐藤 三久	ディペンダビリティ計測と評価の研究
Framework チーム	横手 靖彦*4	フレームワーク・アーキテクチャとシステム開発
DEOS Process/Architecture チーム (2011年4月～2014年3月)	倉光 君郎 横手 靖彦*4	統合システムとしての DEOS Process/Architecture の研究、および各研究チームの採択時のテーマに基づく要素技術との統合、整合、実用化に向けた統合システムの開発

- \*1 松野 裕 : 石川チーム共同研究者(東京大学情報基盤センター特任講師)
- \*2 菅谷 みどり : 倉光チーム共同研究者(横浜国立大学大学院工学研究院講師)
- \*3 追川 修一 : 中島チーム共同研究者(筑波大学大学院システム情報工学研究科准教授)
- \*4 横手 靖彦 : 石川チーム共同研究者(東京大学情報基盤センター特任教授)

## ②期間中の研究成果

### (i) DEOS 概念の構築

前述の通り、研究対象を狭義の組込みシステムのディペンダビリティに止めることなく、オープンシステムのディペンダビリティを実現することとし、その概念を DEOS 概念として「継続的に変化に対応でき、サービスを継続的に提供でき、説明責任を全うするための支援を行える性質」と定義した。

また、その実現には、「変化対応機能」、「障害回避・迅速対応・再発防止機能」、「システム要求の合意・証憑・ログデータなどの履歴管理・保存機能」が必要であるとした。

### (ii) DEOS プロセスとアーキテクチャの確立

DEOS 概念を実現するためのプロセス (DEOS プロセス) と、そのアーキテクチャを開発した。

DEOS プロセスは、通常運用から始まる変化対応機能を実現する変化対応サイクル、障害回避・迅速対応機能を実現する障害対応サイクル、システム要求の合意・証憑・ログデータなどの履歴を管理・保存する合意記述データベースを主な構成要素とし、(A)開発と運用を統合した反復的プロセスであること、(B)再発防止機能を実現するために障害対応サイクルから変化対応サイクルへのパスがあること、を特徴とするプロセスである。

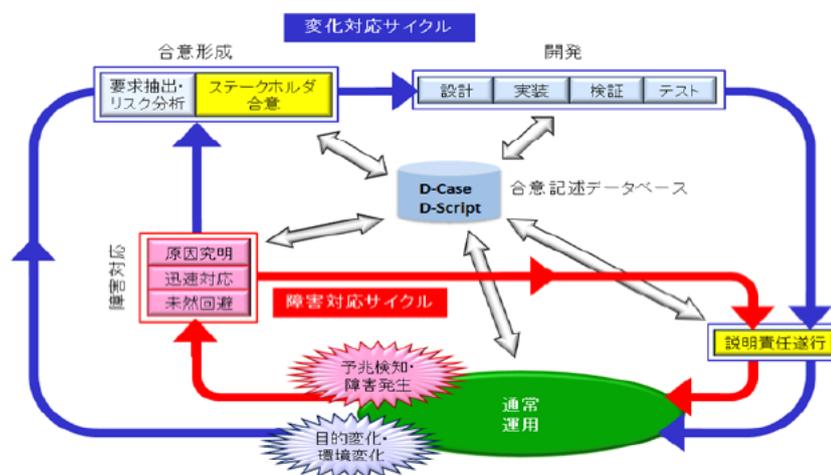


図 3-2 DEOS プロセス<sup>23</sup>

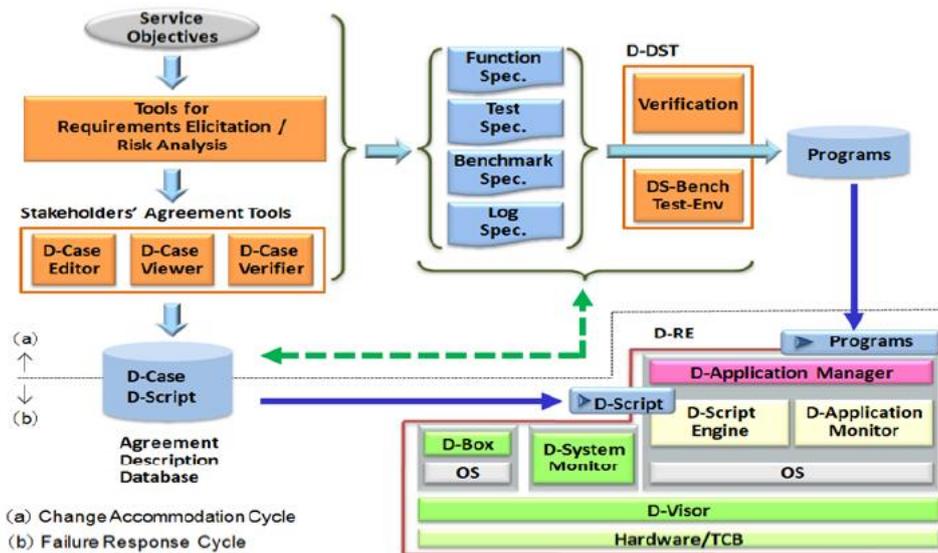


図 3-3 DEOS アーキテクチャ<sup>23</sup>

(iii) DEOS の手法およびツールの開発

DEOS のプロセスおよびアーキテクチャに基づき、D-Case を開発した。D-Case は、DEOS プロセスにおいて、重要なステークホルダ間の合意形成のための手法およびツールで、欧米で必要性が増している Safety Case<sup>24</sup>というシステムの安全性を保証するための手法をベースとしている。D-Case は、ステークホルダ間の合意を形成するための方法およびツールである。D-Case における合意記述データベースが D-ADD (DEOS Agreement Description Database : 図 3-3 では Agreement Description Database と記載) であり、障害発生時の迅速対応や障害発生時の未然回避に関する合意内容が格納される。さらに、DEOS プロセスの実行環境 D-RE (DEOS Runtime Environment) に対応できるよう Safety Case を拡張している。

DEOS プロセスの特徴は以下の通りである<sup>25</sup>。

- (a) 議論とエビデンスに基づく合意のための、構造化された表記法
- (b) ステークホルダ間合意のマネジメントサポート
- (c) 通常運用時におけるステークホルダ間合意のモニタリングサポート
- (d) 合意内容記述の整合性検査サポート

また、DEOS プロセスを具現化するために開発したツールを表 3-2 に示した。

<sup>24</sup> Safety/Assurance Case ガイド (Ver. 1.0)

<http://www.jst.go.jp/crest/crest-os/tech/D-CaeEditor/Download-files/GuideV1.pdf>

<sup>25</sup> 本研究領域 研究課題「並列・分散型組込みシステムのためのディペンダブルシングルシステムイメージ OS」研究終了報告書

表 3-2 DEOS プロセスを具現化するツール<sup>23</sup>

D-Case (DEOS Case)	
ステークホルダ間の合意を形成するための方法およびツール	
ステークホルダ合意形成支援ツール	D-Case Editor
Web 版 D-Case Editor	D-Case Editor (D-Case Editor Weaver)
パワーポイント用 D-Case ステンシル	D-Case Stencil
D-Case 整合性検査ツール	D-Case/Agda
D-Case モデリング環境連携	D-Case OSLC
D-ADD (DEOS Agreement Description Database)	
ステークホルダ間の合意の記録と、その証拠として用いられるデータベース	
D-Script (DEOS Script)	
アプリケーションプログラムの動的制御スクリプト	
D-DST (DEOS Development Support Tools)	
DEOS 開発支援ツール群 (検証ツール、テスト支援ツール)	
ソフトウェア検証ツール	モデル検査器
テスト支援ツール	DS-Bench/Test-Env (DS-Bench/D-cloud)
D-RE (DEOS Runtime Environment)	
DEOS を実現するサービスを提供するための実行環境	
実時間 Linux	ART-Linux
仮想マシンモニタと OS 監視ツール	D-Viser + D-System Monitor
改竄検知機能付き記録装置	D-Box
システムレコーダー	System Recorder

## (2) 研究課題終了後の継続と発展状況

### ① 研究の継続と発展状況

研究領域終了直前、2013 年 10 月に一般社団法人ディペンダビリティ技術推進協会 (DEOS 協会) を設立<sup>26</sup>した。DEOS 協会は、DEOS の産業界での利用、成果の発展、人材の育成などを目的とし、ディペンダビリティ技術の研究開発を促進する事業、ディペンダビリティ技術の普及・啓発のための事業、ディペンダビリティ技術にかかわる事業の創生・発展を支援するための事業などを行っている。設立当初から所研究総括が理事長に就任し、その後木下が理事<sup>27</sup>に就任し、木下、倉光、河野が学会会員<sup>28</sup>を務めている。なお、共同研究者では、倉光チームから横手靖彦<sup>29</sup>、松野裕<sup>30</sup>、木下チームから湯浅能史、武山誠、中原早生が学会会員を務めており、学会会員 18 名中 9 名が本研究領域の研究者である。

DEOS の機能を強化するために開発した主な技術は以下の通りである。

<sup>26</sup> DEOS プレスリリース 2013 年 11 月 20 日

<sup>27</sup> DEOS 概要 <http://deos.or.jp/consortium-guidance/summary-j.html>

<sup>28</sup> DEOS 会員一覧 <http://deos.or.jp/consortium-guidance/member-j.html>

<sup>29</sup> 横手靖彦：石川チーム (2008 年 10 月～2009 年 3 月)、倉光チーム (2009 年 4 月～2015 年 3 月)

<sup>30</sup> 松野裕：木下チーム (2008 年 10 月～2010 年 3 月)、石川チーム (2010 年 4 月～2012 年 3 月)、倉光チーム (2012 年 4 月～2015 年 3 月)

(a)形式アシュランスケース・フレームワーク<sup>31, [2]</sup>

アシュランスケースの整合性をコンピュータによって検査することを可能とするため、形式言語により記述する形式アシュランスケース・フレームワーク (FF0: Formal assurance case Framework for Open Systems Dependability)を開発した。(木下) (詳細は 3.3.2(2) ①(iii)に記述)

(b)要求獲得のためのシソーラス情報支援機能<sup>[3]</sup>

要求獲得で用いるシソーラスの構築手法と、その支援ツールを開発した。要求分析者が技術文書からシソーラスに登録すべき機能の候補を抽出する際に、漏れがなく、正確な機能として抽出ができる支援ツールを開発した。抽出結果をその分野のエキスパートが候補を吟味することで、ステークホルダ間の合意形成を正しく行うことができる。(山本修一郎<sup>32)</sup>

(c)D-Case Communicator<sup>[4]</sup>

各地に分散しているステークホルダ間の合意形成を活発に進めるツールとして、Web ベースの GSN(Goal Structuring Notation)エディタ (D-Case Communicator)を開発し、公開した。このエディタは既存のWeb技術を使って開発しており、一般的なWebブラウザ(Chrome、Firefox、Safari)で使用することができる。(松野裕<sup>33)</sup>

(d)KnowledgeLine

非常に多くの、また時間的経過を示す情報を、的確に蓄積し活用するツールとして開発した KnowledgeLine に対して、D-ADD と組み合わせることによりディペンダビリティの要素を加え、ITシステムのオープンシステムディペンダビリティを実現するための開発プラットフォームを構築した。(永山辰巳<sup>34)</sup>

## ②DEOS の応用に向けての貢献

(i)国際標準化<sup>[1]</sup>

本研究領域では、研究期間中から IEC<sup>35</sup>およびその国内委員会に対して、DEOS を国際標準化した IEC 62853 Open systems dependability 制定の提案を行い、2013 年から議論が

<sup>31</sup> 情報処理推進機構/ソフトウェア工学分野の先導的研究支援(RISE)プロジェクト「オープンシステム・ディペンダビリティのための形式アシュランスケース・フレームワーク」成果報告書  
<https://www.ipa.go.jp/files/000052722.pdf>

<sup>32</sup> 山本修一郎：名古屋大学大学院情報科学研究科教授(共同研究者)

<sup>33</sup> 松野裕：日本大学理工学部応用情報工学科准教授(共同研究者)

<sup>34</sup> 永山辰巳：株式会社 Symphony 代表取締役(共同研究者)

<sup>35</sup> IEC：International Electrotechnical Commission(国際電気標準会議)

開始された。研究終了後も DEOS 協会で標準制定を推進する活動を継続し、2018 年 5 月に IEC で承認され、同年 6 月に国際標準として発行された。

## (ii) DEOS 協会活動

### (a) ディペンダビリティ技術の認証制度 (DEOS 認証制度)<sup>36, 37</sup>

DEOS 協会の活動として、2015 年に DEOS 認証制度を発足した。この制度は、ディペンダビリティ技術の普及に役立つ製品、システム、教育コンテンツなどに対して認証を付与するもので、2018 年 7 月現在では 3 社 3 件が認証を取得している。

### (b) 普及活動

DEOS 協会設立後、毎年協会主催の「オープンシンポジウム」を開催している。第 5 回 (2018 年 6 月 5 日) のテーマは「IEC 62853 Open systems dependability (開放系総合信頼性) ～活用の現状と今後の期待～」であった。また協会内に 7 部会 (OSD 部会、技術部会、D-Case 部会、D-ADD 部会、標準化部会、認証部会、自動車応用部会) を設け、各部会ともシンポジウムやワークショップを開催し、ディペンダビリティ技術の普及に努めている。また、普及を促進するために多くの論文<sup>38, 39, 40, 41</sup>を発表している。

このような社会のニーズに沿った継続的な活動により、DEOS の普及に努めた結果、DEOS 協会の正会員数は、設立当初 11 社であったが、2018 年 7 月現在では 35 社になっている。

## (iii) DEOS の適用事例

DEOS 協会の「オープンシンポジウム」や、各部会のシンポジウム、研究会において、多くの適用事例が報告されている。主な事例報告は以下の通りである。

### (a) D-Case<sup>42</sup>

第 3 回 D-Case 研究会 (2013 年 4 月) では、「D-Case を使ったロボットのディペンダビリティの保証」が報告された。日本科学未来館の展示フロアの巡回ロボットの開発を対象として、ロボット開発者と日本科学未来館が、D-Case を用いて実証実験を行った。自律移動や

<sup>36</sup> DEOS プレスリリース 2015 年 6 月 17 日

<sup>37</sup> DEOS 認証制度について <http://deos.or.jp/certification/index-j.html>

<sup>38</sup> Kobayashi N., Yamamoto S. “The effectiveness of D-Case application knowledge on safety process”, *Procedia Computer Science*, 2015, 60(1), 906-917.

<sup>39</sup> 石津流弥, 松野裕 “D-Case : ステークホルダを明確化した GSN による合意形成手法”, 電子情報通信学会技術研究報告, 2016, 116(284), 1-6.

<sup>40</sup> 小林展英, 森崎修司, 山本修一郎 “D-Case を用いた安全分析結果の説明手法の提案”, 情報処理学会論文誌, 2017, 58(2), 521-530.

<sup>41</sup> Onuma Y., Takai T., Koshiyama T., Matsuno Y. “D-Case steps: New steps for writing assurance cases”, *Lecture Notes in Computer Science*, 2018, 11094 LNCS, 71-78.

<sup>42</sup> DEOS 協会 D-Case 部会 活動案内

安全停止などの機能、運用方法や説明責任機能などを確認し、その有効性や将来にむけての改善点などを明確化した。(加賀美聡)

第10回 D-Case 研究会(2016年4月)では、「D-Case に基づく議論構造可視化支援ツールのプロトタイプ開発と、スマートコミュニティにおける合意形成に向けた基礎実験」が報告された。安心・安全に関する一般市民・専門家・行政間の合意形成について、D-Case を利用した SNS 上の合意形成の有効性を確認した。(松野裕)

そのほか、以下の事例が報告されている。

- ・ D-Case 活用事例：ET ロボコンへの適用(富士ゼロックス株式会社)
- ・ D-Case 活用事例：エンジン制御への適用(トヨタ自動車株式会社)
- ・ D-Case による LAN アプリケーションのディペンダビリティ設計(株式会社サイバー総研)
- ・ 自動車の Adaptive Cruise Control (ACC) システムにおける D-Case 実証実験(株式会社豆蔵)
- ・ 開発現場への D-Case 導入事例(株式会社デンソークリエイト)
- ・ ペルソナに基づく D-Case の記述(奈良先端科学技術大学院大学 高井利憲)
- ・ D-Case に基づく議論構造可視化支援ツールのプロトタイプ開発と、スマートコミュニティにおける合意形成に向けた基礎実験(松野裕)

#### (b) D-ADD

第2回 DEOS オープンシンポジウムでは、「カーナビシステム開発における D-ADD 技術を活用した設計文書管理の実例<sup>43</sup>」が報告された。カーナビゲーションシステムの開発を対象として D-ADD の活用を試み、作業アイテムの欠落防止、成果物の一元管理に有効であることを確認した。(永山辰巳)

そのほか、以下の事例が報告されている。

- ・ D-ADD の実践的活用事例(PCI ソリューション株式会社)<sup>44</sup>
- ・ QMS と D-ADD を組み合わせた、ソフトウェア開発プロセスの改善事例(アイコクアルファ株式会社)<sup>44</sup>

#### (iv) DEOS 協会が公開している情報<sup>45</sup>

DEOS 協会では、DEOS 普及のため多くの技術資料やソフトウェアを公開している。主な技術資料やソフトウェアは以下の通りである。

#### (a) 書籍

<sup>43</sup> 第2回 DEOS オープンシンポジウム 2015年6月17日

<sup>44</sup> DEOS 協会 自動車応用部会設立シンポジウム 2017年6月22日

<sup>45</sup> DEOS 協会 HP /DEOS の技術/資料・リンク集

<http://deos.or.jp/technology/link/index-j.html>

- ・ DEOS 変化しつづけるシステムのためのディペンダビリティ工学(近代科学社 所眞理雄編)

(b) 技術資料

- ・ D-Case - ディペンダビリティ合意形成のための手法とツール
- ・ D-Script - スクリプトによる障害対応の実現
- ・ 合意形成データベース - オープンシステムディペンダビリティと D-Case を繋ぐリポジトリ
- ・ サービス延命を可能とする基盤システムソフトウェア
- ・ D-Case のロボット応用 - 日本未来科学館フロア移動ロボットを題材として
- ・ D-Case/Agda によるアシュランス・ケース記述
- ・ DEOS 実用化のためのオープンシステムディペンダビリティ国際標準化戦略
- ・ はじめての D-Case
- ・ はじめての D-ADD

(c) ソフトウェアおよびその仕様書、手順書

- ・ D-Case Editor
- ・ D-Case Weaver
- ・ D-RE (DEOS Runtime Environment)
- ・ D-Visor + D-System Monitor
- ・ DS-Bench/Test-Ent (DS-Bench/D-Cloud)

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した論文リスト(4 報以内)

- [1] 原田文明, 木下佳樹, 武山誠 “ディペンダビリティに関する国際標準化の動向 : IEC TC56 の概要と国際会議での動向(信頼性)” 電気情報通信学会技術研究報告, 2015, 115(379), 19-25.
- [2] Kinoshita S., Kinoshita Y. “The 6W1H model as a basis for systems assurance argument”, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2016, 9923LNCS, 63-74.
- [3] 加藤順三, 佐伯元司, 大西淳, 海谷治彦, 林晋平, 山本修一郎 “要求獲得のためのソーラス構築支援”, 情報処理学会論文誌, 2016, 57(7), 1576-1589.
- [4] Matsuno Y. “D-Case Communicator: A web based GSN editor for multiple stakeholders”, Lecture Notes in Computer Science, 2017, 10489 LNCS, 64-69.

## 3.2 2006 年度採択研究課題

### 3.2.1 並列・分散型組込みシステムのためのディペンダブルシングルシステムイメージ OS(石川裕)

#### (1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

##### ①研究のねらい

ディペンダビリティ要素技術開発として、Linux をベースに、高信頼単一システムイメージを提供する並列分散 OS の実現を目指し、以下の 4 課題に取り組んだ。

- (a) クラスタリングされたコンピュータ群のシングルシステムイメージ機構
- (b) マルチコア CPU を利用して複数の OS を同時に動作させる論理分割機構
- (c) リアルタイム分野の要素技術としての最悪実行時間予測ツール
- (d) ソフトウェア検証のためのインターフェース (P-Bus、P-Component)

また、2008 年に本研究領域内の連携を密にするためチームを横断するコアチームが組織され、石川はコアチームのリーダーとなった。コアチームにおいて本研究領域の方向性を議論した結果、ディペンダビリティを表現、評価するための枠組みが必要であるとの結論に至り、ディペンダブルなシステムを開発・運用するための DEOS (Dependable Embedded Operating Systems) 概念、プロセス、アーキテクチャの構築に取り組んだ。

#### 研究実施体制

##### ・「石川」グループ

研究代表者：石川裕(東京大学情報基盤センターセンター長)

研究項目：高信頼性シングルシステムイメージ OS

##### ・「島田」グループ

主たる共同研究者：島田利郎(富士ゼロックス株式会社研究技術開発本部システム要素技術研究所グループ長)

研究項目：D-Case に基づくソフトウェア開発支援環境

##### ②期間中の研究成果

###### (i) 高信頼単一システムイメージを提供する並列分散 OS

ディペンダブルなサーバを構築するための要素技術として、単一 IP アドレスクラスタの研究開発を行った。単一 IP アドレスクラスタは、複数のコンピュータから構成されるサーバに一つの IP アドレスを割り当ててサーバの性能および可用性を向上させる技術である。

単一 IP アドレスクラスタには、代表ノード型(代表ノードを一つ持つ方式)と、ブロード

キャスト型(代表ノードを用いずに全ての入力パケットを全クラスタにブロードキャスト配送する方式)(図 3-4)がある。代表ノード型では可用性を高めるためには代表ノードの冗長化が必要となるため、冗長化の必要のないブロードキャスト型を基盤として研究開発を行った。この基盤上に柔軟な TCP 接続分散機構、サーバプロセスのマイグレーション機構、サーバプロセスの耐故障機構を構築した。<sup>[1],[2],[3]</sup>

また、1 台のコンピュータを論理的に複数に分割し、複数の OS を同時に動作させる機構の研究開発を行った。この目的を達成する方法としては、コンピュータの仮想化を用いる方法や論理分割のための特殊なハードウェア機構を用いる方法があるが、それぞれ、仮想化のオーバーヘッドが無視できない、一般的なコンピュータが使用できない、という問題がある。このためソフトウェアのみで論理分割を実現する手法 SHIMOS(Single Hardware with Independent Multiple Operating System)を開発した。CPU 性能ベンチマークでは仮想マシンより 6%高速、I/O 性能ベンチマークでは仮想マシンより 3 倍高速となる結果を得た<sup>46</sup>。この技術は、「京」コンピュータの後継機として開発が進められているポスト「京」上の軽量カーネル (McKernel)として開発が進められている。

さらに、システムソフトウェアの安全性向上のために、Linux カーネル内に新たなプログラミングインターフェース層(P-Bus)を構築し、P-Bus 上に OS カーネル拡張モジュール(P-Component)を実装した。P-Bus では、インターフェースの安全な利用のために満足すべき条件が規定しており、それらの仕様を形式的に記述している。

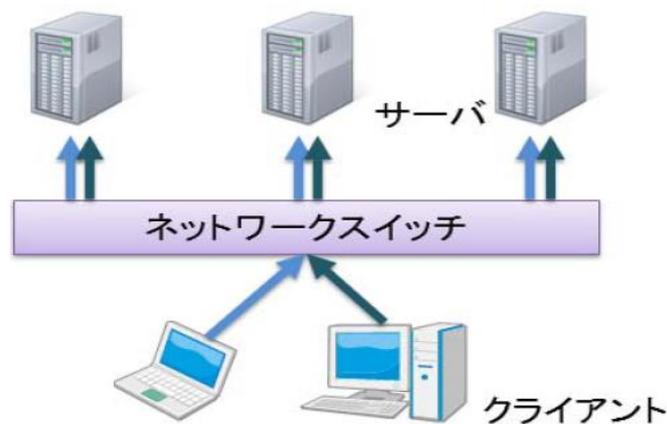


図 3-4 ブロードキャスト型単一 IP アドレスクラスタ<sup>47</sup>

(ii) DEOS

本研究領域で提唱している概念「オープンシステムディペンダビリティ」の達成のために、中心となる DEOS プロセスの原案を提案した。2008 年からは、石川を中心として本研

<sup>46</sup> Shimosawa T., Matsuba H., Ishikawa Y. “Logical Partitioning without Architectural Supports”, 32nd IEEE International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC 2008), 2008, 355-364.

<sup>47</sup> 本研究課題 研究終了報告書(本研究課題 研究終了報告書 p5 図 1 ブロードキャスト型単一 IP アドレスクラスタ)

究領域の研究チームを横断する形で「コアチーム」を立ち上げ、DEOS プロセスの実現のために必要な DEOS アーキテクチャの基本設計を行い、さらに、それらをサポートする手法やソフトウェアとして以下を開発した。

- (a) DEOS プロセスにおける合意記述データベースである D-Case
- (b) D-Case ダイアグラムの作図・編集を支援する D-Case Editor
- (c) DEOS プロセスを実現するためのランタイム環境 D-RE (DEOS Runtime Environment)
- (d) ディペンダビリティベンチマークフレームワーク DS-Bench

### ③研究成果に関連した主な成果論文リスト(3報以内)

- [1] Fujita H., Matsuba H., Ishikawa Y. “TCP Connection Scheduler in Single IP Cluster”, 8th IEEE International Symposium on Cluster Computing and Grid (CCGRID’ 08), 2008, 366-375.
- [2] Gerofi B., Fujita H., Ishikawa Y. “An Efficient Process Live Migration Mechanism for Load Balanced Distributed Virtual Environments”, 2010 IEEE International Conference on Cluster Computing (Cluster 2010), 2010, 197-206.
- [3] Fujita H., Ishikawa Y. “DTS: Broadcast-based Content-aware TCP Connection Handover”, IPSJ Transactions on Advanced Computing Systems (ACS-33), 2011, 4(2), 59-69.

## (2) 研究課題終了後の継続と発展状況

### ①研究の継続と発展状況

本研究課題期間中には本研究課題と並行して、以下の研究代表者あるいは共同研究者として研究を進めた。

- ・ 科研費基盤研究(B)「次世代 PC クラスタを活用する超大規模仮想メモリ空間支援システムの研究」(2006 年度～2008 年度)
- ・ 文部科学省/研究環境・基盤整備/研究拠点形成/先端研究基盤共用促進事業/先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業「先端的大規模計算シミュレーションプログラム利用サービス」(2007 年度～2010 年度)
- ・ 文部科学省/分野別の研究開発/情報通信分野/未来社会実現のための ICT 基盤技術の研究開発(次世代 IT 基盤構築のための研究開発)/高生産・高性能計算機環境実現のためのシステムソフトウェアの研究開発「シームレス高生産・高性能プログラミング環境」(2008 年度～2011 年度)
- ・ 日本学術振興会(JSPS)/最先端研究開発支援/最先端研究基盤事業「e-サイエンス実現のためのシステム統合・連携ソフトウェアの高度利用促進」(2010 年度～2011 年度)
- ・ 文部科学省/分野別の研究開発/情報通信分野/革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラの構築事業(革新的 HPCI 構築事業)/革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラの構築「HPCI の整備」(2010 年度～2012 年度)

・文部科学省/分野別の研究開発/情報通信分野/革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラの構築事業(革新的 HPCI 構築事業)/革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラの構築/将来の HPCI システムのあり方の調査研究「レイテンシコアの高度化・高効率化による将来の HPCI システムに関する調査研究」(2010 年度～2012 年度)

・CREST 研究領域「情報社会を支える新しい高性能情報処理技術」研究課題「ヒューマノイドのための実時間分散情報処理」(2003 年度～2008 年度)(研究代表者：(独)産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター松井俊浩)

・文部科学省/革新的・先導的教育研究プログラムの開発推進/グローバル COE プログラム/学際・複合・新領域「ゲノム情報ビッグバンから読み解く生命圏」(研究代表者：東京大学新領域創成科学研究科情報生命科学専攻森下真一)(2009 年度～2013 年度)

本研究課題終了後は、以下の研究代表者あるいは共同研究者として更に研究を発展させている。

・文部科学省/分野別の研究開発/情報通信分野/革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラの構築事業(革新的 HPCI 構築事業)/革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラの構築 将来の HPCI システムに関する研究「レイテンシコアの高度化・高効率化による将来の HPCI システムに関する調査研究」(2012 年度～2013 年度)(以降、MEXT「革新的 HPCI 構築事業」と略記)

・CREST 研究領域「科学的発見・社会的課題解決に向けた各分野のビッグデータ利活用推進のための次世代アプリケーション技術の創出・高度化」研究課題「「ビッグデータ同化」の技術革新の創出によるゲリラ豪雨予測の実証」(2013 年度～2018 年度)(研究代表者：理化学研究所計算科学研究機構チームリーダー三好建正)(以降、CREST「ビッグデータ応用」と略記)

さらに、研究代表者石川裕は、2014 年に東京大学大学院情報工学研究科教授および情報基盤センター長を辞し、文部科学省/分野別の研究開発/情報通信分野/「ポスト「京」開発事業「フラッグシップ 2020 プロジェクト(ポスト「京」の開発)」(2014 年度～2020 年度)(以降、「フラッグシッププロジェクト 2020」と略記)のプロジェクトリーダー、および理化学研究所計算科学研究センターのシステムソフトウェア研究チームリーダーとして研究を進めている。

主要な成果は、図 3-5 に示す通り、(i)レイテンシコアの高度化・高効率化による将来の HPCI システムに関する調査研究、(ii)ポスト「京」の開発・整備、(iii)「ビッグデータ同化」の技術革新の創出によるゲリラ豪雨予測の実証であり、以下にその詳細を記述した。

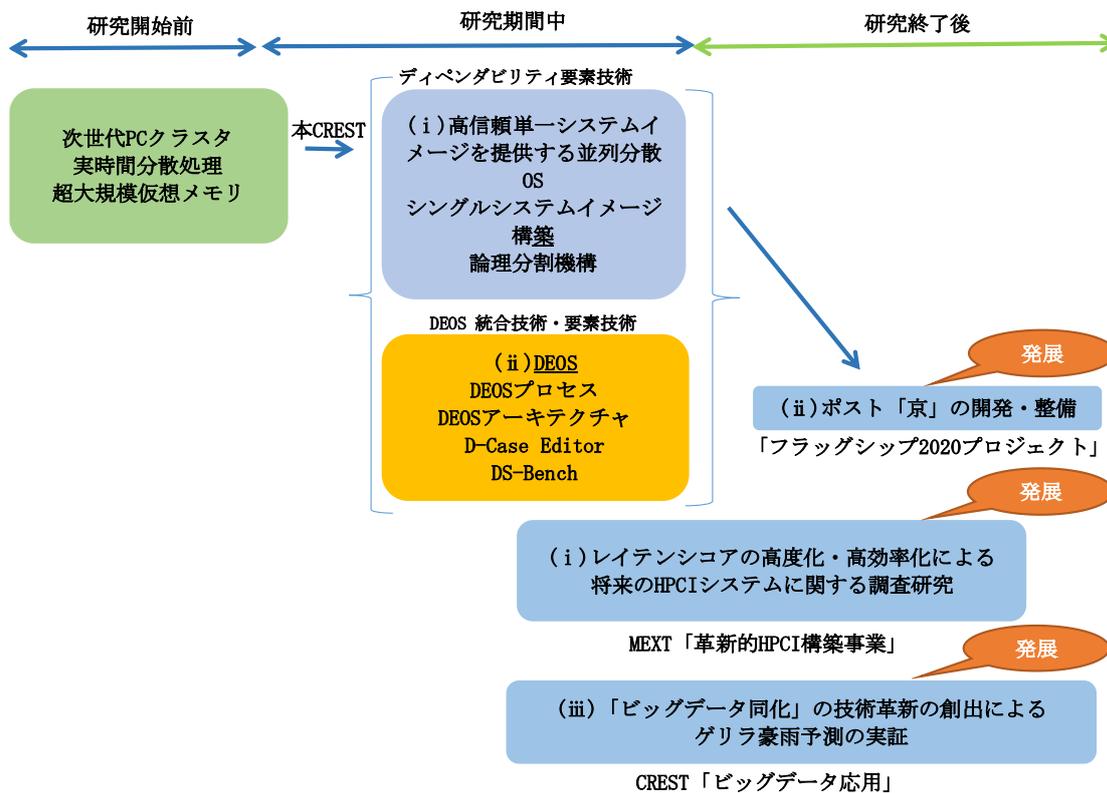


図 3-5 研究助成金と成果の展開状況

(i) レイテンシコアの高度化・高効率化による将来の HPCI システムに関する調査研究

MEXT「革新的 HPCI 構築事業」<sup>48</sup>では、「今後の HPCI 技術開発に関する報告書<sup>49</sup>」を尊重して概念設計に反映することとし、「京」および「FX10<sup>50</sup>」におけるアプリケーション並列性能および I/O 性能、耐故障性および運用・保守の観点で課題を精査するとともに、2018 年頃設置可能な並列システムを汎用型プロセッサからのアプローチでフィージビリティスタディを行った。

概念設計のコンセプトとして、(A) 幅広いアプリケーションユーザのニーズに合致した問題サイズおよび要求時間内で終了、(B) 「京」のシステムアーキテクチャを踏襲し、「京」で開発されたアルゴリズムやチューニング技術などを継承、発展可能なアーキテクチャ、(C) コモディティ(PC クラスタなど)と技術(アプリケーション、システムソフトウェア)の相互移植性が高いことを掲げ、以下の調査結果を得た。

<sup>48</sup> 「レイテンシコアの高度化・高効率化による将来の HPCI システムに関する調査」

[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chousa/shinkou/028/shiryo/\\_icsFiles/afieldfile/2012/08/14/1324574\\_2\\_1.pdf](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/028/shiryo/_icsFiles/afieldfile/2012/08/14/1324574_2_1.pdf)

<sup>49</sup> 文部科学省研究振興局長の諮問会議「HPCI 計画推進委員会」で取りまとめられた報告書で「計算科学ロードマップ白書」と呼ばれている。

[http://www.hpci-aplfs.aics.riken.jp/document/roadmap\\_1312.pdf](http://www.hpci-aplfs.aics.riken.jp/document/roadmap_1312.pdf)

<sup>50</sup> 東京大学情報基盤センターのスーパーコンピュータ

科学的課題アプリケーション<sup>51</sup>として4つのアプリケーション(ALPS<sup>52</sup>、RSDFT<sup>53</sup>、NICAM<sup>54</sup>、COCO<sup>55</sup>)を選択し、2018年概念設計マシンでの性能予測を行った結果、ALPSは要求実行時間1日に対し予測実行時間は2時間以内となるなど、何れも予測実行時間は要求実行時間を大きく下回る結果を得た。

また、システムの性能については200~300PFLOPS、消費電力は20~30MWと予測した。信頼性と耐故障性については、CPUの高信頼性/高可用性機能およびインターコネクタの高可用性機能により耐故障性を確保し、ノード構成が「京」に類似していることから「京」と同程度のノード信頼性が確保できると予測し、目標MTBF(Mean Time Between Failure)も「京」と同程度と予測した。設置面積は、ストレージを除き「京」の1/2程度、高速積層メモリの採用や全面水冷化によりノード実装密度が「京」の2倍程度に向上すると予測した。

#### (ii) ポスト「京」の開発・整備

「フラッグシップ2020プロジェクト<sup>56</sup>」は、世界トップレベルのコンピュータ・シミュレーションの実現を通し、社会が抱える複雑な課題の解決とサイエンスの探求に挑むプロジェクトとして2014年に発足し、2021年頃の本格稼働を目指している。プロジェクトは「ポスト「京」の開発」、「アプリケーションの開発」で構成されており、「両者のCo-design(協調設計)」により開発を進めている。「アプリケーションの開発」は、重点課題(9課題)と萌芽的課題(4課題)を設定し、それぞれ大学や研究機関が研究開発を担当している。

「ポスト「京」の開発」は、理化学研究所計算科学研究センターが担当し、システムソフトウェア開発チーム、アーキテクチャ開発チーム、アプリケーション開発チーム、コデザイン推進チームを設けた。この4チームにより、重点課題から選定されたターゲットアプリケーションの開発とともに協調設計手法に基づき開発を進めている。石川は「ポスト「京」の開発」のプロジェクトリーダーとシステムソフトウェア開発チームリーダーを務めている。

「ポスト「京」」は、アプリケーション実行性能で「京」の100倍を目指しており、ARM

<sup>51</sup> 「レイテンシコアの高度化・高効率化による将来のHPCIシステムに関する調査研究のためのアプリケーションと性能評価」中間報告 [http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chousa/shinkou/028/shiryo/\\_icsFiles/afiedfile/2013/04/05/1332667\\_2\\_1.pdf](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/028/shiryo/_icsFiles/afiedfile/2013/04/05/1332667_2_1.pdf)

<sup>52</sup> ALPS: Algorithms and Libraries for Physics Simulations 新機能を持った強相関・磁性材料の物性予測・解明のシミュレーション

<sup>53</sup> RSDFT: Real-Space Density-Functional Theory Siナノワイヤなど次世代デバイスの根幹材料の量子力学的第一原理シミュレーション

<sup>54</sup> NICAM: Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model 長期天気予報の実現、温暖化時の台風・豪雨などの予測シミュレーション

<sup>55</sup> COCO: CCSR Ocean COmponent Model 海況変動予測、水産環境予測のシミュレーション

<sup>56</sup> <http://www.r-ccs.riken.jp/fs2020p/>

アーキテクチャ<sup>57</sup>を基にしたメニーコアマシンとしている。石川がリーダーを務めるシステムソフトウェア開発チームでは以下の開発に取り組んでいる。

(a) 「次世代メニーコア CPU のための軽量カーネル(McKernel)の開発」として、効率良いメモリ管理機構の提供、OS サービス処理用コアとアプリケーション実行用コアを分けることによる OS ノイズの除去、アプリケーションポータビリティを確保するために Linux API の提供<sup>[1], [2], [4]</sup>。

(b) 「下位通信層の開発」として、通信ライブラリやファイル入出力処理に使用される効率的かつ移植性の高い下位通信層の提供。

(c) 「入出力ファイルの開発」として、ビッグデータ処理を効率よく処理するためのミドルウェアの提供。

(iii) 「ビッグデータ同化」の技術革新の創出によるゲリラ豪雨予測の実証

CREST 「ビッグデータ応用」<sup>58</sup>では、共同研究者として研究を進め、「ビッグデータ同化」におけるジョブ間並列通信機構および観測データ蓄積配布機構を開発した<sup>[3]</sup>。

データ同化は、シミュレーションと実測データをつなぐ学際的科学であり、気象シミュレーションでは天気予報の精度を左右する重要な役割を果たしている。「ビッグデータ同化」は、シミュレーションの大規模化とセンサ技術の進歩に対応した、シミュレーションおよびセンサからの大容量データを高速に組み合わせることを可能にする技術である。

2016 年には「京」を使った解像度 100m の高精細シミュレーションとフェーズドアレイ気象レーダの双方から得られる高速かつ膨大なデータを組み合わせることで、解像度 100m で 30 秒ごとに 30 分先までの天気予報技術を「ゲリラ豪雨予測手法」として確立した<sup>59</sup>。さらに高性能化をはかり、2017 年には、30 秒ごとに 10 分先までの「超高速降水予報技術」を確立した<sup>60</sup>。

## ②科学技術の進歩への貢献

(i) 世界最高水準のスーパーコンピュータの開発

演算性能が大幅に飛躍した最先端のスーパーコンピュータは、理論・実験に並ぶ科学技術の第 3 の手法であるシミュレーション利活用を進展させる研究開発基盤となっている。

<sup>57</sup> ARM Ltd. により設計・ライセンスされているプロセッサコアのアーキテクチャで、消費電力を抑える特徴がある。

<sup>58</sup> CREST 研究領域「科学的発見・社会的課題解決に向けた各分野のビッグデータ利活用推進のための次世代アプリケーション技術の創出・高度化」研究課題「「ビッグデータ同化」の技術革新の創出によるゲリラ豪雨予測の実証」(2013 年度～2018 年度)(研究代表者：理化学研究所計算科学研究機構チームリーダー三好建正) 2016 年度実績報告書

<sup>59</sup> 理化学研究所プレスリリース「「京」と最新鋭気象レーダを生かしたゲリラ豪雨予測」 2016 年 8 月 9 日 [http://www.riken.jp/pr/press/2016/20160809\\_1/](http://www.riken.jp/pr/press/2016/20160809_1/)

<sup>60</sup> 理化学研究所プレスリリース「30 秒更新 10 分後までの超高速降水予報を開始」 2017 年 7 月 4 日 [http://www.riken.jp/pr/press/2017/20170704\\_1/](http://www.riken.jp/pr/press/2017/20170704_1/)

日本では2011年度には10PFLOPSの「京」を開発し世界最高の処理能力を実現したが、その後各国も高性能化の開発を進め、2014年度には30PFLOPSレベル、2017年度には100PFLOPSレベルの高性能スーパーコンピュータが登場した。「ポスト「京」」の目標は、これらの競合スーパーコンピュータを凌駕する1エクサフロップス(「京」の100倍である1,000PFLOPS)である。

しかし、「ポスト「京」」は「最速」のみを目指すのではなく、「使いやすく、多くの用途に用いられる世界最高水準のスーパーコンピュータ」を目指している<sup>61</sup>。このコンセプトに基づき、Co-designによるアプリケーション実行性能の向上・低電力化技術や、チップ内回路の最適化などによる省電力高性能システム技術の開発にも取り組んでいる。

#### (ii) スーパーコンピュータ要素技術の開発

Linuxで動作するアプリケーションを効率的に動作させる「メニーコア型並列コンピュータ向け軽量カーネル(McKernel)」の開発、効率よく通信を行える「MPICH(Message Passing Interface CHameleon)通信ライブラリ」の実装、ビッグデータ処理を効率よく処理するためのミドルウェア「DTF(実時間ジョブ間ファイルI/O)」などにより、現在の「京」や「ポスト「京」」におけるシミュレーションの高性能化を図る多くの要素技術を開発している。

なお、McKernelは、筑波大学と東京大学が運用しているスーパーコンピュータ(Oakforest-PACS)で使えるようになっている。

### ③社会・経済への波及効果

#### (i) 世界最高水準のスーパーコンピュータの開発

「フラッグシップ2020プロジェクト」は、第四期科学技術基本計画における「国家基幹技術として位置づけられている世界最高水準のスーパーコンピュータを国として戦略的に開発・整備することで、科学技術の振興、産業競争力の強化、安全・安心の国づくり等を実現していくため、「①エクサスケールスーパーコンピュータの開発・整備」と「②エクサスケールスーパーコンピュータを活用するためのアプリケーションの開発」を推進する」という方針に基づいて発足したプロジェクトである。総事業費は約1,300億円(国費1,100億円)で、2020年までに「京」の約100倍(1エクサフロップス)の性能を有するスーパーコンピュータを開発することを目指している。

ポスト「京」の開発は社会的関心も高く、「理研、次世代スパコンの開発着手ー性能「京」の100倍に」(日刊工業新聞2014年4月1日)、「省エネ・使い勝手を磨く スパコン「京」の後継、「最速」は目標にせず」(朝日新聞2016年2月25日)、「開発進む「ポスト京」ー計算速度1年を5日に 都市災害予測・創薬に威力」(日刊工業新聞2016年5月4日)など

<sup>61</sup> 研究代表者石川裕インタビュー結果

の新聞記事が掲載された。

(ii) ソフトウェアの高度利用促進・次世代アプリケーション技術の創出

ソフトウェアの高度利用促進・次世代アプリケーション技術の創出は、(i)で述べた通りポスト「京」プロジェクトでも「②エクサスケールスーパーコンピュータを活用するためのアプリケーションの開発」として重要な課題である。

ポスト「京」において1エクサフロップスを実現することにより、医療・創薬分野の「新薬スクリーニングのための分子動力学シミュレーション」、総合防災分野の「被害予測のための地震波伝播シミュレーション」、基礎科学分野の「量子色力学から原子核・宇宙初期の解明を目指す格子QCD(Quantum Chromo-Dynamics)計算」などの性能が、100倍向上すると考えられている。また、10～数十倍性能が向上すると考えられているアプリケーションは、医療・創薬分野の「病気診断に貢献する心臓シミュレーション」、総合防災分野の「実時間ゲリラ豪雨予測」、グリーンエネルギー分野の「デバイス材料の電子状態計算」、基礎科学分野の「太陽活動の長期シミュレーション」、機器設計分野の「車体衝突シミュレーション」などである。

「京」を使用したアプリケーションである「ビッグデータ同化」による気象予測シミュレーション「ゲリラ豪雨予測手法」は、2013年7月に京都で災害をもたらした豪雨、2014年9月に神戸で急発生した孤立積乱雲、2015年9月に鬼怒川が氾濫した関東・東北豪雨などの事例に取り組み、良好な結果を得た。この成果は「理研など、スパコン「京」と最新鋭気象レーダを生かした「ゲリラ豪雨予測手法」開発」(日経速報ニュースアーカイブ 2016年8月9日)に掲載され、また「超高速降水予報技術」についても「NICTと理研など、30秒更新10分後までの超高速降水予報を開始」(日経速報ニュースアーカイブ 2017年7月4日)に掲載された。

④上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な論文リスト(4報以内)

- [1] Gerofi B., Shimada A., Hori A., Takagi M., Ishikawa Y. “CMCP: A Novel Page Replacement Policy for System Level Hierarchical Memory Management on Many-cores”, HPDC’14 Proceedings of 23rd International Symposium on High-Performance Parallel and Distributed Computing, 2014, 73-84.
- [2] Gerofi B., Takagi M., Ishikawa Y., Riesen R., Powers E., Wisniewski R.W. “Exploring the design space of combining Linux with lightweight kernels for extreme scale computing”, Proceedings of the 5th International Workshop on Runtime and Operating Systems for Supercomputers, ROSS 2015 - In conjunction with HPDC 2015, 2015.
- [3] Miyoshi T., Kunii M., Ruiz J., Satoh S., Ushio T., Bessho K., Seko H., Tomita H., Ishikawa Y. ““Big Data Assimilation” Revolutionizing Severe Weather Prediction”, Bulletin of the American Meteorological Society, 2016, 97(8), 1347-1354.
- [4] Gerofi B., Riesen R., Wisniewski R.W., Ishikawa Y. “Toward Full Specialization

of the HPC System Software Stack: Reconciling Application Containers and Lightweight Multi-kernels”, International Workshop on Runtime and Operating Systems for Supercomputers (ROSS), held in conjunction with ACM International Symposium on High-Performance Parallel and Distributed Computing (HPDC), 2017.

## ⑤その他

石川は 2014 年度に情報処理学会フェローとなり、2016 年度日本ソフトウェア科学会功労賞を授与されている。2014 年度と 2018 年度の ACM HPDC Best Paper Award や 2016 年度情報処理学会論文誌コンピューティングシステム優秀論文賞などを受賞している。

また、PC クラスタコンソーシアム<sup>62</sup>の会長を務めている。

---

<sup>62</sup> PC クラスタコンソーシアム (PCCC)

<https://www.pcccluster.org/ja/consortium/consortium-bm.html>

### 3.2.2 省電力でディペンダブルな組込み並列システム向け計算プラットフォーム(佐藤三久)

#### (1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

##### ① 研究のねらい

これからの省電力性と高性能性を持つシステムはマルチコア・マルチチップ構成になることを想定し、マルチコア・マルチチップからなる並列システムのディペンダビリティ提供を目指して、並列システムを用いてディペンダビリティを提供する技術(冗長構成による耐故障機能など)と並列システム自体のディペンダビリティ技術(並列プログラムの耐故障性や動的な電力制御など)の開発に取り組んだ。

また、DEOS 要素技術として、動的なプログラムテスト環境 D-Cloud、ベンチマークにおけるテスト環境 DS-Bench/Test-Env の開発にも取り組んだ。

#### 研究実施体制

##### ・「電力制御・高信頼並列システム」グループ

研究代表者：佐藤三久(筑波大学計算科学研究センターセンター長・教授)

研究項目：並列組込み向け高信頼共有メモリ機構および省電力実時間並列処理実行制御機構

##### ・「通信システムアーキテクチャ」グループ

主たる共同研究者：朴泰祐(筑波大学計算科学研究センター教授)

研究項目：並列システム内高信頼高性能通信機構

##### ・「高速ネットワーク」グループ

主たる共同研究者：有本和民(株式会社ルネサスエレクトロニクス設計開発本部システムコア技術統括部統括部長)

研究項目：低電力高速インターコネクと省電力高密度並列ハードウェアプラットフォームの開発

##### ② 期間中の研究成果

###### (i) 並列システムの省電力高信頼化機構

サーバに着目し、QoS(Quality of System)を考慮しつつ並列処理により高信頼化と省電力化を行うためのプロセッサ電力制御機構 CPMD(Cooperative Power Management Daemon)を開発した。また、並列プログラムにおいて、耐故障機能を提供するソフトウェアとして高信頼ソフトウェア分散共有メモリ機構を用いた SCASH-FT を開発し、ノードが故障しても動作が継続できることを実証した。

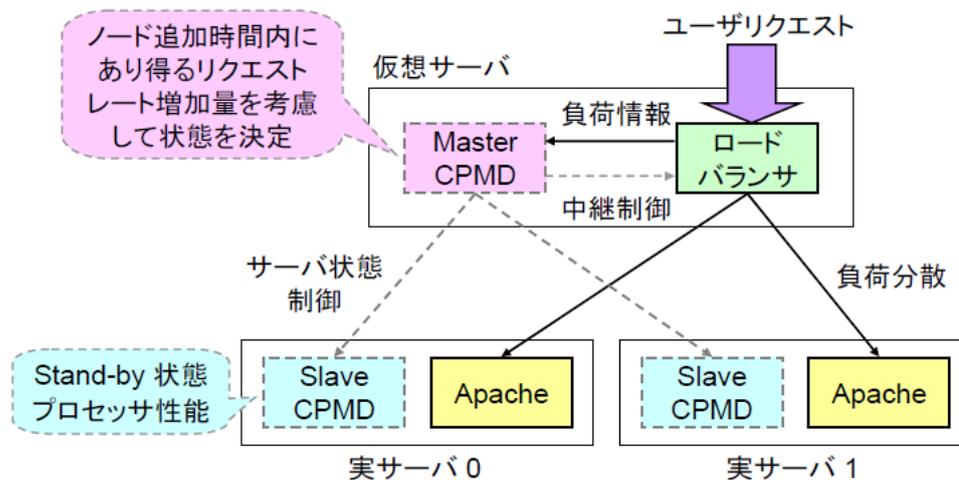


図 3-6 分散 Web サーバでの CPMD の構成<sup>63</sup>

(ii) 省電力高性能高信頼通信機構

組込みシステムを想定した近距離通信に用いる新しいネットワークリンク PEARL (PCI-Express Adaptive and Reliable Link)、さらにこの PEARL 構成用ルータチップとして PEACH (PCI-Express Adaptive Communication Hub) を開発した。PEARL では、従来 I/O 装置接続用であった PCI-Express Gen2 をノード間相互接続に利用し、レーン数および通信レートの制御により、要求通信性能に合わせて消費電力を最適化する機構、複数レーンの故障に対する耐故障性機構を実現した。なお、PEACH は、筑波大学のスーパーコンピュータ HA-PACS の重要技術として GPU の相互接続に活用している。

また、汎用 PC サーバ間で汎用的に用いられる Ethernet においても、高機能・高信頼性を実現する通信システムとして RI2N (Redundant Interconnection with Inexpensive Network) を開発し、無故障時の通信性能向上と、故障時の通信経路確保の両立を実現した。

(iii) DEOS におけるプログラムテスト環境 D-Cloud、DS-Bench/Test-Env

フォルトインジェクション機能<sup>64</sup>を持つ仮想マシンとして FaultVM および FaultVM-SpecC を開発し、動的なテスト環境として、プログラムテスト環境 D-Cloud を構築した。D-Cloud では前述のフォルトインジェクションが可能な仮想マシン FaultVM を用いており、仮想デバイスレベルでの故障についてのテストが可能であるだけでなく、仮想マシンをクラウドとして管理することにより、多くの計算資源を柔軟に利用することができ、多くのケースについてのテスト作業を自動化することができる。さらに D-Cloud を発

<sup>63</sup> 本研究課題 研究終了報告書(本研究課題 研究終了報告書 p11 図 1 分散 Web サーバでの CPMD の構成)

<sup>64</sup> フォルトインジェクション機能：意図的にシステムにエラーを発生させたり負荷をかけて、バグの検出を行ったり、システムの堅牢度の確認を行う機能

展させ、DS-Bench において仮想マシンと実マシンを統合してベンチマークが実行できる Test-Env を開発した。

### ③研究成果に関連した主な成果論文リスト(3報以内)

- [1] Hanawa T., Koizumi H., Banzai T., Sato M., Miura S., Ishii T., Takamizawa H. “Customizing virtual machine with fault injector by integrating with SpecC device model for a software testing environment D-cloud”, Proceedings - 16th IEEE Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing, PRDC 2010, 2010, 5703226, 47-54.
- [2] Banzai T., Koizumi H., Kanbayashi R., Imada T., Hanawa T., Sato M. “D-Cloud: Design of a software testing environment for reliable distributed systems using cloud computing technology”, Proceedings - 10th IEEE/ACM International Conference on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid), 2010, 631-636.
- [3] Otani S., Kondo H., Nonomura I., Ikeya A., Uemura M., Asahina K., Arimoto K., Miura S., Hanawa T., Boku T., Sato M. “An 80Gb/s dependable communication SoC with PCI express I/F and 8 CPUs”, ISSCC 2011, 2011, 266-268.

## (2) 研究課題終了後の継続と発展状況

### ①研究の継続と発展状況

本研究課題期間中には本研究課題と並行して、以下の研究代表者あるいは共同研究者として研究を進めた。

- ・ 科研費基盤研究(A)「大容量分散コンピューティングのための大規模スケーラブル P2P グリッド基盤の研究」(2005 年度～2007 年度)
- ・ JST 国際連携活動/国際科学技術共同研究推進事業戦略的国際共同研究プログラム/フランス/情報通信技術「ポストペタスケールコンピューティングのためのフレームワークとプログラミング」(2010 年度～2012 年度)(以降、JST 国際連携「FP3C」と略記)
- ・ JSPS/国際交流事業/国際共同研究事業/多国間国際研究協力事業「Enabling Climate Simulation at Extreme Scale」(2011 年度～2013 年度)
- ・ 科研費基盤研究(C)「コモディティネットワークを用いた超並列クラスタ用ネットワークの研究」(2005 年度～2006 年度)(研究代表者：筑波大学大学院システム情報工学研究科朴泰祐)
- ・ 科研費基盤研究(B)「次世代 PC クラスタを活用する超大規模仮想メモリ空間支援システムの研究」(2006 年度～2008 年度)(研究代表者：東京大学大学院情報理工学系研究科石川裕)
- ・ 文部科学省/分野別の研究開発/情報通信分野/未来社会実現のための ICT 基盤技術の研究開発(次世代 IT 基盤構築のための研究開発)/高生産・高性能計算機環境実現のためのシステムソフトウェアの研究開発「シームレス高生産・高性能プログラミング環境」(2008 年度～2011 年度)(研究代表者：東京大学大学院情報理工学系研究科石川裕)

本研究課題終了後は、

- ・文部科学省/特別研究費「先端学際計算科学による計算科学の革新」事業(筑波大学計算科学研究センター)(2011年度～2013年度)(以降、筑波大学「先端学際計算科学事業」と略記)
- ・文部科学省/分野別の研究開発/情報通信分野/革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラの構築事業(革新的HPCI構築事業)/革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラの構築「演算加速機構を持つ将来のHPCIシステムに関する調査研究」(2012年度～2013年度)(以降、MEXT「革新的HPCI構築事業」と略記)

の研究代表者として研究を進めた。さらに、

- ・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の創出」(2010年度～2017年度)では2015年度から研究総括として研究を進めた。

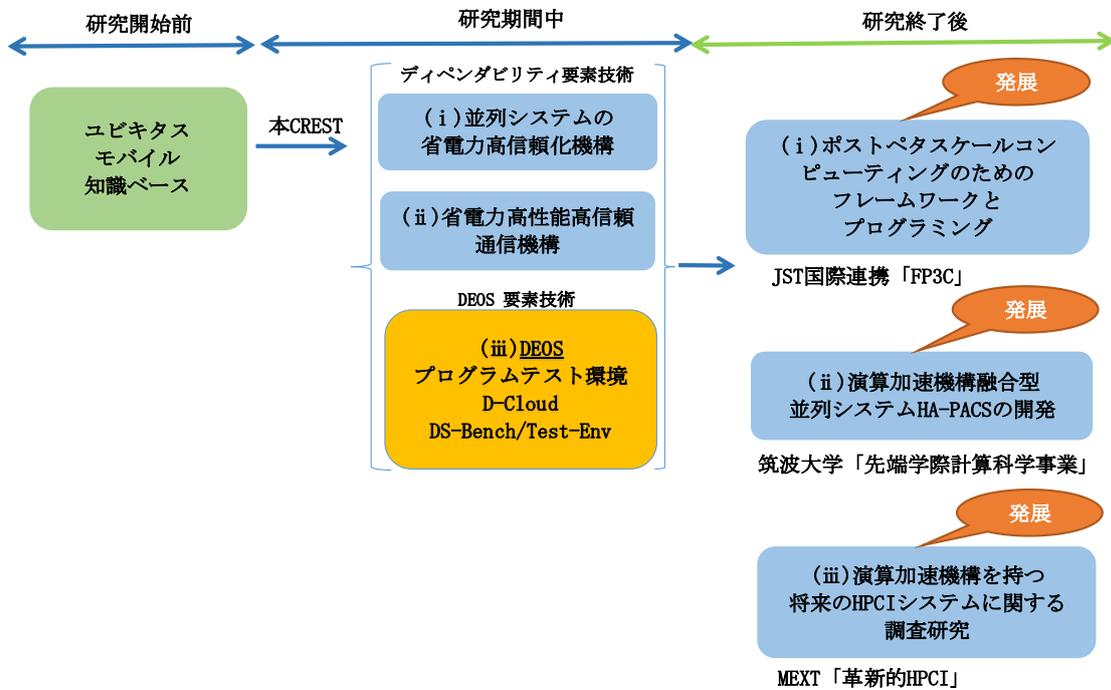


図 3-7 研究助成金と成果の展開状況

研究代表者佐藤三久は、2010年より理化学研究所計算科学研究機構(現計算科学研究センター)プログラミング環境研究チームのチームリーダーを兼務した。2014年に筑波大学計算科学研究センター長を任期満了まで務めた後、理化学研究所計算科学研究機構(現計算科学研究センター)で引き続きプログラミング環境研究チームのチームリーダーを務め、その後、2018年には計算科学研究センターの副センター長に就任している。また、文部科学省/分野別の研究開発/情報通信分野/「ポスト「京」開発事業「フラッグシップ2020プロジェクト(ポスト「京」の開発)」(2014年度～2020年度)(プロジェクトリーダー：理化学研究所計算科学研究機構フラッグシップ2020プロジェクト石川裕)(以降、「フラッグシッ

「2020 プロジェクト」と略記)の副プロジェクトリーダーおよびアーキテクチャ開発チームリーダーを務め、研究開発を進めている。

主要な成果は、図 3-7 に示す通り、(i)ポストペタスケールコンピューティングのためのフレームワークとプログラミング、(ii)演算加速機構融合型並列システム HA-PACS の開発、(iii)演算加速機構を持つ将来の HPCI システムに関する調査研究、であり、以下にその詳細を記述する。

#### (i) ポストペタスケールコンピューティングのためのフレームワークとプログラミング<sup>[1]</sup>

JST 国際連携「FP3C」<sup>65</sup>において、ペタスケールコンピューティングを超えて超最先端の高性能コンピューティングの道を拓く、ソフトウェア技術、プログラミングモデルおよび言語の確立に取り組み、以下の成果を挙げた。

##### (a) 並列プログラミング言語 XcalableMP とワークフローモデル YML との統合

ポストペタスケールコンピューティングのための並列プログラミング基盤として、並列プログラミング言語 XcalableMP (XMP) を用いて各種コンポーネントへのインターフェースを作成するとともに、上位のプログラミングパラダイムとしてワークフロー言語である YML を用いた。この基本構想に基づき、XMP と YML の統合環境 FP2C (Framework for Post-Petascale Computing) を構築した。

##### (b) メニーコア向け低レベル通信ライブラリ

ポストペタスケールコンピューティングのプロセッサはメニーコアになると想定し、メニーコア向けの高速化した低レベル通信ライブラリ DCFA (Direct Communication Facility for Accelerator) と、MPI (Message Passing Interface) 通信ライブラリ NewMedeline を開発した。

##### (c) 総合型耐故障システム

チェックポイント型耐故障性インターフェース FTI、メッセージロギング MPI ライブラリ Hydee および障害予測機構を開発し、これらを統合して総合型耐故障性システムを構築した。このシステムでは、システムのログ情報から事前に障害を予測し、予測された障害の直前にチェックポイントをとることができるため、復旧後の再計算の時間の大幅な短縮が可能となる。

##### (d) GPU などの演算加速機構

GPU などの演算加速機構を持つクラスタ向けに XcalableMP を拡張した XMP-dev を開発した。さらに、GPU と CPU に計算を自動的に振り分ける実行時システム StarPU を適用して高速化を図るため、GPU に対応させた XMP-dev のプログラムの記述を殆ど変えることなく、GPU だけでなくマルチコア CPU を含めた全リソースに計算を分配する処理系

<sup>65</sup> JST 国際連携活動/国際科学技術共同研究推進事業戦略的国際共同研究プログラム/フランス/情報通信技術「ポストペタスケールコンピューティングのためのフレームワークとプログラミング」(2010 年度～2012 年度) 平成 24 年度実施報告書

XMP-dev/StarPU を開発した。

(e) 数値計算ライブラリ

FP2C による階層的なプログラミングモデルにおける GPU を活用したアルゴリズム、自動チューニング技術、アプリケーションフレームワーク<sup>66</sup>に関する技術を開発した。

この研究において、中心的に研究開発を進めた並列プログラミング XcalableMP を実装した Omni コンパイラの一部は、本研究課題で開発されたものであり、研究の基本的なインフラとして貢献している。本研究課題で開発した拡張 OpenMP は、XcalableMP の言語仕様のもとになっている。また、本プロジェクトで研究した XMP-dev では XcalableMP を GPU などの演算加速機構でのプログラミングができるように拡張したものである。

(ii) 演算加速機構融合型並列システム HA-PACS の開発<sup>[2], [3]</sup>

筑波大学「先端学際計算科学事業」は、これからの計算科学に必要とされるエクサフロップス(毎秒百京回演算)の性能の実現に向けて、計算基盤の能力および機能の飛躍的な向上のためのハード・ソフト双方の要素技術開発と計算科学の重要アプリケーションの革新を目指した研究開発である。以下の研究開発を行った。

(a) エクサスケールを実現する密結合並列演算加速機構アーキテクチャの研究開発と実証システム HA-PACS の開発をおこなった。超並列演算加速機構アーキテクチャとは、演算加速機構を直結する PEARL (PCI-Express Adaptive and Reliable Link) ネットワークリンクで結合したものであり、これを FPGA(書き換え可能ゲートアレイ)を用いて開発した。

(b) これを用いて、1 ペタフロップス超のシステムを開発した。プログラミング支援などの演算加速機構のプログラミングを支援する基本ソフトウェアの研究開発を行い、エクサスケールに向けたコードの開発を支援する環境の研究開発を行った。

(c) このシステムを用いて、素粒子物理、宇宙物理、生命科学の、重点 3 分野のグランドチャレンジ・アプリケーションの開発を行った。

PEARL は、まさに本研究課題で開発した技術であり、筑波大学「先端学際計算科学事業」においては、本研究課題で開発したシステムをもとに FPGA で実現した次のバージョンである。このバージョンでは、PEARL チップによる通信デバイス PEACH (PCI Express Adaptive Communication Hub) をもとに構築したアーキテクチャ Tightly Coupled Accelerators (TCA) を提案し、近接通信を利用した低レイテンシ高速通信を可能とした。これにより、計算科学アプリの加速を実証した。

(iii) 演算加速機構を持つ将来の HPCI システムに関する調査研究<sup>[4]</sup>

---

<sup>66</sup> 特定のドメインのアプリケーションを対象に、高いレベルの記述を行い、それを並列コードに変換する手法

MEXT「革新的 HPCI 構築事業」<sup>67</sup>において、電力効率の大幅な効率化と強スケーリング<sup>68</sup>(プロセッサ数を増やすことによる高速化)による新たな計算科学の展開を目指して、演算加速機構による並列大規模システムについてフィージビリティスタディを行い、以下の結論を得た。

(a) アーキテクチャおよびシステムの設計・検討

「演算重視型<sup>69</sup>」と「メモリ削減型<sup>70</sup>」のステンシル計算<sup>71</sup>を両立させるアーキテクチャをターゲットに設定し、演算加速機構(チップ)のアーキテクチャやサイズ、1チップあたりのコア数、チップ内メモリ容量、コアの基本性能を策定した。

(b) プログラミングモデルおよび評価環境の構築

XcalableMP+OpenACC<sup>72</sup>によるプログラミングモデルを設定し、命令レベルシミュレータを開発した。このプログラミングモデルでは、チップ内のプログラミングに XcalableMP のテンプレート(データや index 空間をマッピングするための仮想格子)を用い、ホストからチップにオフロード(処理機能を移動)<sup>73</sup>する際のインターフェースとして OpenACC の指示文を用いる。

(c) 実装検討および電力の推定・評価

GRAPE-DR<sup>74</sup>のアーキテクチャをベースに電力を推定した。GRAPE-DR コアに、改良を行った RTL(Register Transfer Level)設計を用いて、28nm プロセスでの予備的な電力を見積もった。その結果に基づき、14nm プロセスでの電力を 70~90GFLOPS/W と推定した。

(d) 計算科学アプリケーションからの検討・評価

演算加速機構アーキテクチャを用いるアプリケーションの中で効果が期待できるアプリケーションとして、格子 QCD(素粒子分野)、重力多体計算 N-Body(宇宙物理分野)、磁気流体コード HMD(宇宙物理分野)、分子動力学 MD(生命科学分野)、地震波計算コード(地球物理分野)などを選定し、性能概算などの解析を行った。

MEXT「革新的 HPCI 構築事業」においては、本研究課題で初めて開発され、HA-PACS に用

<sup>67</sup> 「演算加速機構を持つ将来の HPCI システムに関する調査研究」

[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chousa/shinkou/028/shiryo/\\_icsFiles/afielddfile/2013/04/05/1332667\\_3\\_1.pdf](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/028/shiryo/_icsFiles/afielddfile/2013/04/05/1332667_3_1.pdf)

<sup>68</sup> 強スケーリング：高性能計算の分野で代表的なスケーラビリティの定義の一つ。スケーラビリティを、全体の問題の大きさを保ってプロセッサ数を増やしたときに実行時間がどのように変化するかで定義する

<sup>69</sup> 「演算重視型」：行列積などに代表されるように演算密度が高い計算、もしくは特定の演算頻度が高い部分があり、その部分を特定の演算加速機構にオフロードすることによって高い効果が見込めるもの

<sup>70</sup> 「メモリ削減型」：演算あたりのメモリアクセス要求が高く、オンチップメモリや特定のメモリアーキテクチャの改善によって、高い効果が認められるもの

<sup>71</sup> ステンシル計算：あるきまった近傍領域(ステンシル)内のデータを参照しながら計算格子を繰り返し更新するような計算

<sup>72</sup> OpenACC：GPU などのアクセラレータ向けの共通プログラミングインターフェース

<sup>73</sup> オフロード：システムの機能を部分的に取り出して外部に渡すという負荷分散の手法

<sup>74</sup> GRAPE-DR：高速インターネット、超高速コンピュータシステムと大容量ストレージの持つ能力を効率よく科学技術計算に活用する情報システム基盤

いられた PEACH/PERAL での近接低レーテンシ高速通信を演算加速機構チップ間の直接通信として想定している。また、プログラミングモデルである XcalableMP は、本研究課題でその一部を開発した Omni コンパイラでの知見が反映されている。

「フラッグシップ 2020 プロジェクト」ではアーキテクチャ開発チームリーダーとして、これまでの経験をもとに、ポスト「京」のアーキテクチャ詳細設計および XcalableMP を中心としたプログラミング言語の研究開発に取り組んでいる。

## ②科学技術の進歩への貢献

(i) ポストペタスケールコンピューティングのためのフレームワークとプログラミング

並列プログラミング基盤として開発した XMP と YML の統合環境 FP2C は、大規模 PC クラスタのほか大規模環境でも有効と考えられ、「京」コンピュータへも移植して検証を進めている。

数値計算ライブラリでは、FP2C を用いた階層型の固有値解法のアルゴリズム、XMP から数値計算ライブラリを呼び出すためのインターフェース、不確定要素の多いシステムにおける自動チューニング技術、アプリケーションフレームワークにおける適切な技法選択に関する技術を開発した。

(ii) 演算加速機構融合型並列システム HA-PACS の開発

これからの計算科学に必要とされるエクサフロップス(毎秒百京回演算)の性能の実現には、演算加速機構を付加することが一つの選択肢であるが、その場合は演算加速機構間のデータ通信が問題になっていた。提案した、PEARL/PEACH により構成した密結合並列演算加速機構アーキテクチャは、近接のノードにおいて、低レーテンシ高速通信を可能とするもので、これを用いるためのプログラミングモデル・言語と、実際のアプリケーションの開発を行った。実際に、1 ペタフロップス級の性能を持つシステム HA-PACS を構築し、アプリケーションからの有効性を実証した。また、このシステムは実際のプロダクトランに提供されている。

(iii) 演算加速機構を持つ将来の HPCI システムに関する調査研究

多数の演算コアを内蔵したチップによる演算加速機構は、汎用プロセッサで構成された並列システムの各ノードに接続もしくは内蔵されている、ヘテロロジーニアスな(異機種が混在した)並列システムを想定した。この想定に基づき、全体のアーキテクチャと、それに基づく、ネットワークのレーテンシとバンド幅、メモリの容量とバンド幅、ストレージ容量などの目標を設定した。さらに演算加速機構チップや演算加速機構間ネットワークの課題など、多くの具体的な検討課題を明確にした。

また、汎用プロセッサからの API (Application Program Interface) やシステム全体に用

いるプログラミングモデルを検討した。プログラミングについては、できるだけ指示文ベースでプログラミングできるようにし、既存のプログラムからの移行を容易にする必要があり、XcalableMP と OpenACC を統合したプログラミングモデルを設定した。

さらに、それぞれの計算科学分野において課題とされる計算科学プログラムを取り上げ、Co-design によるアーキテクチャの設計を行い、演算加速機構アーキテクチャを用いる「メモリ削減型」および「演算重視型」アプリケーションの選定・解析を行った。

### ③社会・経済への波及効果

ナノテクノロジー、ライフサイエンスの進歩や、気候気象予測や地震・防災に対処する計算科学を推進するために、ポスト「京」に代表される革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ (HPCI) の実現が強く求められている。HPCI には高い計算能力が求められるが、一方、設置面積や消費電力などの制約からノード数の増加による並列システムの性能向上には限界がある。GPU と CPU を併用したシステムや演算加速機構などは、この問題を解決する技術である。

### ④上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な論文リスト(4報以内)

- [1] Odajima T., Boku T., Hanawa T., Lee J., Sato M. “GPU/CPU work sharing with parallel language XcalableMP-dev for parallelized accelerated computing”, Proceedings of the International Conference on Parallel Processing Workshops, 2012, 6337468, 97-106.
- [2] Hanawa T., Kodama Y., Boku T., Sato M. “Interconnection Network for Tightly Coupled Accelerators Architecture”, Hot Interconnects, 2013, 79-82.
- [3] Kodama Y., Hanawa T., Boku T., Sato M. “PEACH2: An FPGA-based PCIe network device for Tightly Coupled Accelerators”, SIGARCH Computer Architecture News, 2014, 42(4), 3-8.
- [4] Nakao M., Murai H., Shimosaka T., Tabuchi A., Hanawa T., Kodama Y., Boku T., Sato M. “XcalableACC: extension of XcalableMP PGAS language using OpenACC for accelerator clusters”, WACCPD@SC, 2014, 27-36.

### ⑤その他

佐藤は 2012 年度に情報処理学会フェロー、2015 年度筑波大学計算科学研究センターフェローとなり、2013 年には大川出版賞を受賞している。

### 3.2.3 マイクロユビキタスノード用ディペンダブルOS(徳田英幸)

#### (1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

##### ①研究のねらい

組込みシステムのディペンダビリティ要素技術として、Linux をベースとしたディペンダブル通信機構、ディペンダブル消費電力管理機構の開発に取り組んだ。当初は、マイクロレンジ組込み機器(ネットワーク接続可能な情報家電機器や無線センサノード、携帯電話やPDA など)を対象としたが、途中で対象を、携帯型組込み機器に限らず非携帯型組込み機器を含む、より一般的な組込み機器とすることに拡張した。

さらに、DEOS の開発においては、ディペンダビリティメトリックスの開発に取り組んだ。

#### 研究実施体制

・「徳田」グループ

研究代表者：徳田英幸(慶應義塾大学環境情報学部教授)

研究項目：高可用性電力管理機構、高信頼ネットワーク機構、ディペンダビリティメトリックス

##### ②期間中の研究成果

###### (i)ディペンダブル通信機構

複数種類のネットワークインターフェースを持つ次世代オープン端末のためのディペンダブル通信機構の開発に取り組んだ。

ネットワーク通信を行う組込み機器が急速に増えている中で、(a)トランスポート層での通信路の冗長化、および移動時の切断時間短縮により、ネットワークの可用性を向上させること、(b)アプリケーションごとに送信データの重要性を指定可能とすることにより、トランスポート層での無駄なオーバーヘッドを回避することを目的にトランスポートプロトコル SCTP を拡張して耐切断性の高い通信機構を実現した。さらに、この通信機構を、FreeBSD7.0 Distribution および Linux 2.6 に組み込まれるための普及活動を実施し、現在、全世界に配布されている。

###### (ii)ディペンダブル消費電力管理機構

バッテリー電力の詳細なロギングと予約に基づくディペンダブル消費電力管理機構の開発に取り組み、バッテリー駆動 Linux 機器の消費電力を細粒度に管理、制御する機構を実現した。

開発した消費電力管理機構では、バッテリー駆動機器においては全電池容量に対して可用

性保証の時間を指定でき、AC 駆動機器においては所定の電力消費量に対して可用性保証の時間を指定できる。また、開発フェーズ(一定時間、一定負荷での電力量の見積もり機能)、運用フェーズ(電源電力の監視とプロセスの選択停止機能)、保守・更新フェーズ(開発時見積もった挙動と実際の挙動の差異抽出機能)に活用するディペンダビリティ支援機能を持っている。この消費電力管理機構は、pSurvive システムとして Android MarketPlace で公開している。

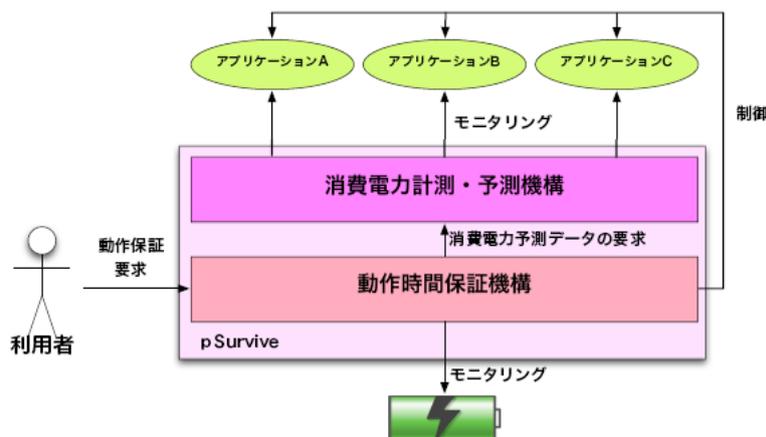


図 3-8 pSurvive システム構成図<sup>75</sup>

(iii)ディペンダビリティメトリックス

組込み機器のディペンダビリティの質と量を数的に評価することを目的として、ディペンダビリティメトリックスの開発に取り組んだ。

当初は、ディペンダビリティの質を表すために複数の評価軸を組み合わせ、これらの個々のディペンダビリティ支援の集合を全体のディペンダビリティと捉え、それらを実験できる Web サービスを構築した。この評価方法では、開発者が開発中のシステムが満たすディペンダビリティ支援を申告し、そのシステムが満たすディペンダビリティ支援の内容を直感的に図として示すことを意図していた。しかし、開発者が申告したディペンダビリティ支援によって、システム全体が確実にディペンダビリティを満たしていることを証明する手段が必要となり、この考え方が D-Case 開発につながった。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト(3 報以内)

- [1] Honda M., Nishida Y., Nakazawa J., Tokuda H. “Performance enhancement of transport layer handover on single-homed mobile nodes”, IEICE Transactions on Communications, 2007, E90-B(10), 2683-2692.
- [2] Mori M., Yura J., Nakazawa J., Tokuda H. “P-survive: Process level energy reservation for networked sensing systems”, Proceedings of INSS 2008 - 5th International Conference on Networked Sensing Systems, 2008, 4610881, 242.

<sup>75</sup> 本研究課題 研究終了報告書 図 7 p16

- [3] Ishikawa Y., Fujita H., Maeda T., Matsuda M., Sugaya M., Sato M., Hanawa T., Miura S., Boku T., Kinebuchi Y., Sun L., Nakajima T., Nakazawa J., Tokuda H. “Towards an open dependable operating system”, Proceedings of the 2009 IEEE International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing, ISORC 2009, 2009, 5231989, 20-27.

## (2) 研究課題終了後の継続と発展状況

### ① 研究の継続と発展状況

本研究課題期間中には本研究課題と並行して、以下の研究代表者あるいは共同研究者として研究を進めた。

- ・文部科学省/革新的・先導的教育研究プログラムの開発推進/グローバル COE プログラム/学際・複合・新領域「次世代メディア・知的社会基盤」(2002 年度～2006 年度)
- ・JSPS/国際交流事業/組織的な若手研究者等海外派遣プログラム/人社系「横断的問題解決スペシャリスト海外派遣プログラム」(2010 年度～2012 年度)
- ・総務省/ICT 重点技術の研究開発プロジェクト「ユビキタスネットワーク制御・管理技術」(2003 年度～2007 年度)(研究代表者：株式会社 KDDI 研究所大橋正良)
- ・総務省/ICT 重点技術の研究開発プロジェクト「ユビキタスサービスプラットフォーム技術」(2008 年度～2010 年度)(研究代表者：株式会社 KDDI 研究所大橋正良)
- ・JSPS/国際交流事業/二国間交流事業/共同研究・セミナー/共同研究/ヨーロッパ「モバイルコンピューティング社会のためのユビキタス文化交流マルチメディアシステム」(2008 年度～2010 年度)(研究代表者：慶應義塾大学環境情報学部清水泰)
- ・科研費基盤研究(B)「動画像自動検索・分析・配信を実現するユビキタス・アクティブ・知識ベースシステム」(2009 年度～2012 年度)(研究代表者：慶應義塾大学環境情報学部清水泰)
- ・科研費特定領域研究「ストーリー性を有するマルチメディア感性検索・自動配信システム国際的実利用環境構築」(2009 年度～2010 年度)(研究代表者：慶應義塾大学環境情報学部清水泰)

本研究課題終了後は、文部科学省博士課程教育リーディングプログラム事業におけるグローバル環境システムリーダープログラムで慶應義塾大学理工学研究科と政策・メディア研究科を連携して研究教育プログラムを設計し、政策・メディア研究科委員長として推進した。また、研究分野に関しては、CREST の成果をサイバー・フィジカルシステム(CPS)におけるセンシング技術、処理・解析(プロセッシング)技術、作動・制御(アクチュエーション)技術などの CPS/IoT 基盤技術の研究開発へと発展した。その結果、文部科学省「ビッグデータ利活用のためのデータ連携技術に関するフィージビリティスタディ及び予備研究」(2013 年度)(研究代表者：筑波大学北川博之)、文部科学省「実社会ビッグデータ利活用のためのデータ統合・解析技術の研究開発」(2014 年度～2017 年度)(研究代表者：筑波大

学北川博之)の共同研究者として研究活動を発展させ、その後の日欧共同プロジェクトの代表的事例となった ClouT、BigClouT プロジェクトへと進展した。また、学内においては、科研費基盤研究(B)「体験連動型ユビキタス・外国語教育メディア自動配信システム国際的実利用環境構築」(2012年度～2015年度)(研究代表者：慶應義塾大学総合政策学部藁谷郁美)の共同研究者として言語グループとも共同研究を進めた。

さらに、国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)/高度通信・放送研究開発委託研究「モノのネットワークとクラウドを融合するネットワークサービス基盤の研究開発」(2013年度～2015年度)(研究代表者：東日本電信電話株式会社)(以降、「NICT委託研究-1」と略記)の実施責任者として、NICT/高度通信・放送研究開発委託研究「オープン・スマートシティを実現するソーシャル・ビッグデータ利活用・還流基盤」(2014年度～2017年度)(以降、「NICT委託研究-2」と略記)の代表研究者として、NICT/高度通信・放送研究開発委託研究「スマートシティにおける市民の影響力を拡張するビッグデータ・クラウド・IoT融合基盤技術 Acronym BigClouT」(2016年度～2019年度)(研究代表者：東日本電信電話株式会社)(以降、「NICT委託研究-3」と略記)の実施責任者として研究を進めた。

研究代表者徳田英幸は、2017年3月に慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科委員の職を辞し、総務大臣の任命により国立研究開発法人情報通信研究機構の理事長に就任している。

主要な成果は、図3-9に示す通り、(i)モノのネットワークとクラウドを融合するネットワークサービス基盤の研究開発、(ii)オープン・スマートシティを実現するソーシャル・ビッグデータ利活用・還流基盤、(iii)スマートシティにおける市民の影響力を拡張するビッグデータ・クラウド・IoT融合基盤技術 Acronym BigClouT であり、以下にその詳細を記述した。

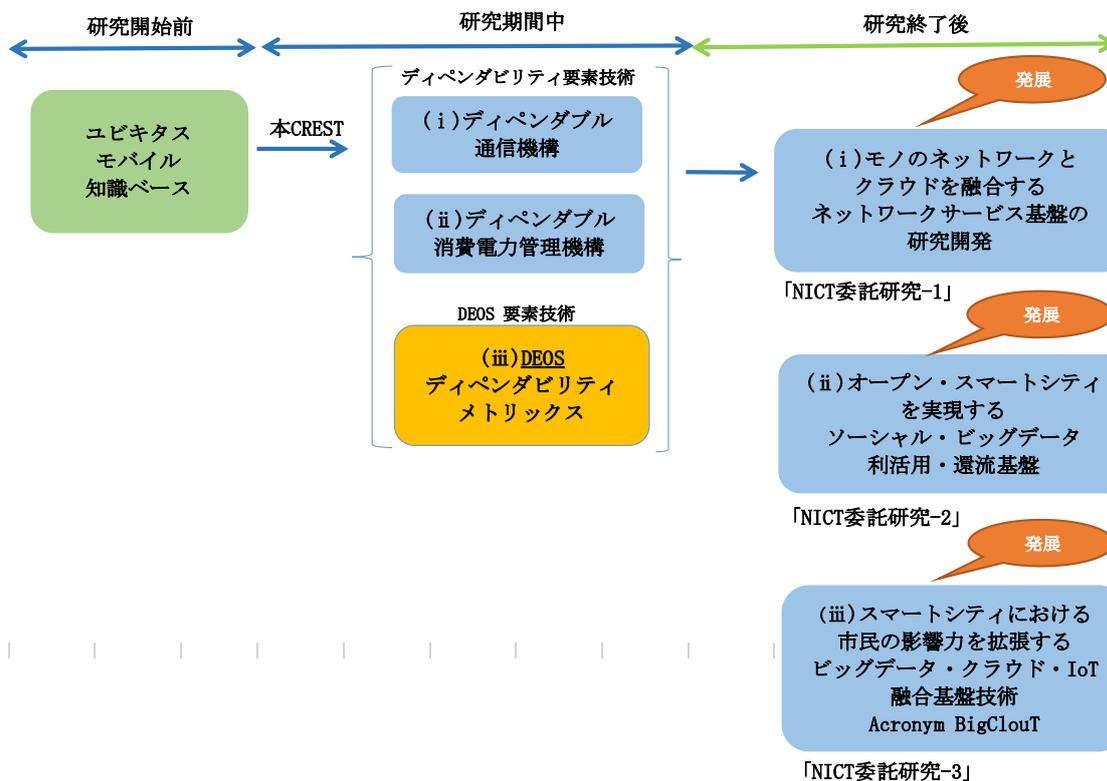


図 3-9 研究助成金と成果の展開状況

(i)モノのネットワークとクラウドを融合するネットワークサービス基盤の研究開発

「NICT 委託研究-1」では、スマートシティにおける市民の影響力を拡張する ClouT 基盤技術に取り組み、以下の技術を開発した。<sup>76</sup>

(a)WEB Sensorizer を開発し、自動センサライズ、分散型センサライズ機能を実装した。10 万個程度の仮想センサをセンサ化し、Web 空間の情報を容易に IoT データソースとして活用でき、各種フィールドトライアル・ハッカソン<sup>77</sup>でも使用することができた。<sup>[1]</sup>

(b)様々なセンシングリソースを統一的に表現可能とするため、AMPP<sup>78</sup>仕様を拡張した新たな Sensor-Over-AMPP 仕様を開発し、参加型センシングなどのセンシングに応用した。本仕様に基づき、様々なセンサデータが流通可能になり、他プロジェクトのデータの流通も可能となった。

(c)システムのディペンダビリティに関する非機能要求を網羅的かつ静的に分析し、その達成状況を動的に監視するシステム D-Case Monitor を開発し、大規模な「IoT+Cloud」シス

<sup>76</sup> NICT/高度通信・放送研究開発委託研究「モノのネットワークとクラウドを融合するネットワークサービス基盤の研究開発」(2013 年度～2015 年度) 2015 年度研究開発成果概要書  
[http://www2.nict.go.jp/commission/seika/h27/167a\\_gaiyo.pdf](http://www2.nict.go.jp/commission/seika/h27/167a_gaiyo.pdf)

<sup>77</sup> ハッカソン：ソフトウェア開発分野の技術者達が、集中的に作業をするソフトウェア関連プロジェクトのイベント

<sup>78</sup> AMPP：ウェブアプリケーションの実行環境、実行に必要なソフトウェアパッケージ

テムでも適用可能とした<sup>[2]</sup>。

(d)ClouT プラットフォームで得られた情報、および SNS などから得られた情報をもとに、都市内のイベントの検知と分類を行った。特に、SNS データに基づき、「そのイベントに関する情報を発信したイベント情報発信者」を抽出し、抽出されたイベント情報発信者達の属性を分析することで、そのイベントの検知だけでなく、多次元での解析に基づくイベント特性の分類を可能とした。

(ii) オープン・スマートシティを実現するソーシャル・ビッグデータ利活用・還流基盤

「NICT 委託研究-2」では、オープン・スマートシティを実現するソーシャル・ビッグデータ利活用・還流基盤に取り組み、以下の技術を開発した<sup>79</sup>。

(a) 様々なオープンデータ (Web 上の非センサデータ) を、あたかも実際に現物を検出したかのようにセンサデータとして利用すること (センサ化) を可能とするツールの構築と運用、評価を行った。Web ベースの構造に基づいて自動的にセンサ化を可能とする技術および管理インターフェースの設計を行い実装した。このツールを用いて 10,000 個以上からなるセンサデータを上位レイヤに送信し、これらのセンサデータを公開して運用している。

(b) オープンかつスケーラブルにソーシャル・ビッグデータを流通可能な SOXFire を開発し、複数機関で運用を開始した。連携認証 (フェデレーション)<sup>80</sup>機能を実装しており、異種機関における仮想センサデータの流通が可能となった。数万個の仮想センサノードが慶應義塾大学、東京大学、東京電機大学で連携認証されており、各大学共通の仮想センサデータとして活用されている。<sup>[3]</sup>

(iii) スマートシティにおける市民の影響力を拡張するビッグデータ・クラウド・IoT 融合基盤技術 Acronym BigClouT

「NICT 委託研究-3」では、スマートシティにおける市民の影響力を拡張するビッグデータ・クラウド・IoT 融合基盤技術に取り組み、以下の技術を開発した。<sup>81</sup>

(a) スマートシティアプリケーションのためのライブラリ群を整理し、Java、JavaScript、Object-C にてプログラミングが可能となった。また、同ライブラリを用い、分散ストリーム処理システム Distributed Node-RED と統合する設計を行い実装した。<sup>[4]</sup>

(b) 都市インフラの状況をカメラ画像から推定するため、オンラインかつエッジ側で画像解析が可能な手法を構築した。既存手法より小さい学習モデルを構築し、計算機資源の消費

<sup>79</sup> NICT/高度通信・放送研究開発委託研究「オープン・スマートシティを実現するソーシャル・ビッグデータ利活用・還流基盤」(2014 年度～2017 年度) 2017 年度研究開発成果概要書  
[http://www2.nict.go.jp/commission/seika/h29/178b4\\_gaiyo.pdf](http://www2.nict.go.jp/commission/seika/h29/178b4_gaiyo.pdf)

<sup>80</sup> 連携認証 (フェデレーション) : 一度認証を通れば、その認証を使って、許可されているすべてのサービスを使えるようにする仕組み

<sup>81</sup> NICT/高度通信・放送研究開発委託研究「スマートシティにおける市民の影響力を拡張するビッグデータ・クラウド・IoT 融合基盤技術 Acronym BigClouT」(2016 年度～2019 年度) 2017 年度研究開発成果概要書 [http://www2.nict.go.jp/commission/seika/h29/18301\\_gaiyo.pdf](http://www2.nict.go.jp/commission/seika/h29/18301_gaiyo.pdf)

をおさえつつ、精度を高める技術の開発を行った。また、この手法を実際のドライブレコーダーカメラ画像に適用し、評価を行った。

(c)BigClouT 基盤と連携し、市民参加型センシングの参加を促すため、プライバシーや動機づけ問題の解決に寄与するロケーションモンスター<sup>82</sup>を開発した。このロケーションモンスターを用いて、実証実験を行う各都市ごとの市民参加型のアプリケーションを作成した。

## ②科学技術の進歩への貢献

インターネットに接続する人・モノ・サービス (IoT) を、クラウドコンピューティング (Cloud) 基盤と融合した効率的な協調プラットフォームである ClouT のアーキテクチャおよびプラットフォームを確立した。ClouT では、実際のセンサデータに加え、仮想センサデータを自動的に収集できる仕組みも構築し、活用する情報の拡大を図った。

また、情報活用範囲を、従来は未利用あるいは利用度の低かった情報を含むソーシャル・ビッグデータに拡大するため、ソーシャル・ビッグデータ生成技術、ソーシャル・ビッグデータ保護技術、パターン抽出手法などを開発した。

上記の ClouT 基盤技術とソーシャル・ビッグデータ活用技術を統合し、スマートシティにおける公共ビッグデータ利活用基盤となる BigClouT 基盤を開発した。BigClouT 基盤のアーキテクチャは、インターオペラビリティ (相互運用性)、ダイナミックな IoT プラットフォーム、ビッグデータの管理という要件を満たしている。さらに、BigClouT プラットフォームの様々なレイヤに知識処理を導入することにより、都市に関するビッグデータからの知識抽出が可能となった。

## ③社会・経済への波及効果

現代の都市は、エネルギー管理の効率化、経済成長と開発、生活の質と安心安全など、多様な問題に直面している。この問題を解決する手段の一つとして ICT 技術を駆使したスマートシティがある。スマートシティを実現するため、IoT+Cloud という考えに基づく ClouT 基盤、その ClouT 基盤にソーシャル・ビッグデータ活用技術という要素を加えた BigClouT 基盤を開発した。これらの基盤により、多種多量のデータを用いた高精度実世界イベント検知・分類、都市機能の解析・可視化・変化予測などが可能となり、リアルタイム都市マネジメント機能やマネジメントサービスが可能となる。

これらの基盤を活用して、都市にあふれるデータから抽出された付加価値の高い知識を市民に還元し、交通、健康、エネルギー、サービス、防犯などの様々な分野への、効率的かつリアルタイム性を持ったスマートシティ実現を目指しており、その実証実験を行うために BigClouT 基盤を用いた市民参加型のアプリケーションを作成した。

<sup>82</sup> ロケーションモンスター：ご当地 Q&A アプリケーション <http://twibee.com/locationmOnster>

この市民参加型のアプリケーションを用いて、実際に藤沢市とつくば市で実証実験を行い、その有効性を検証した。藤沢市では多くの人が集まるイベントでの参加者の行動変容を分析し、つくば市では外国人訪問客の困りごとを収集し、リアルタイムに回答することにより、滞在中の満足度の向上を図った。

#### ④上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な論文リスト(4報以内)

- [1] Nakazawa J., Yonezawa T., Tokuda H. “Sensorizer: An architecture for regenerating cyber physical data streams from the web”, UbiComp and ISWC 2015 – Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and the Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers, 2015, 1599-1606.
- [2] Tokuda H., Yonezawa T., Nakazawa J. “Monitoring dependability of city-scale IoT using D-case”, 2014 IEEE World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2014, 2014, 6803192, 371-372.
- [3] Yonezawa T., Ito T., Nakazawa J., Tokuda H. “SOXFire: A Universal Sensor Network System for Sharing Social Big Sensor Data in Smart Cities”, Proceedings of the 2nd International Workshop on Smart, SmartCities 2016, 2016, a2.
- [4] Komamizu T., Nakazawa J., Amagasa T., Kitagawa H., Tokuda H. “Analytical toolbox for smart city applications: Garbage collection log use case”, Proceedings – 2017 IEEE International Conference on Big Data, Big Data 2017, 2018, 2018-January, 4105-4110.

#### ⑤その他

徳田は2014年に日本学術会議会員となったほか、情報処理学会では2014年度から副会長に就任している。また、2015年に情報セキュリティ大学院大学の第11回情報セキュリティ文化賞を授与された。

社会貢献活動としては、2007年に総務省「情報通信審議会」委員、2013年に総務省「ICT成長戦略会議」メンバー、内閣官房「IT利活用セキュリティ総合戦略推進部会」座長など政府関連の役職を歴任したほか、2014年には一般社団法人重要生活機器連携セキュリティ協議会(CCDS: Connected Consumer Device Security Council)会長、アイ・ロボ・ネットワーク・フォーラム会長などに就任している<sup>83</sup>。

---

<sup>83</sup> 慶應義塾大学徳田研究室 <https://www.ht.sfc.keio.ac.jp/~hxt/ht/home-jp.html>

### 3.2.4 高機能情報家電のためのディペンダブルオペレーティングシステム(中島達夫)

#### (1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

##### ① 研究のねらい

組込みシステムにおけるディペンダビリティ要素技術として、複数 OS を同時に使用するマルチコアプロセッサ環境に用いる仮想化マシンモニタ (SPUMONE) の開発に取り組んだ。さらに、この仮想化マシンモニタを DEOS の実行環境 D-RE に適用するために、仮想マシンモニタ上の D-System Monitor 実行環境、D-System Monitor ランタイム API (Application Program Interface) などの開発に取り組んだ。

##### 研究実施体制

###### ・「早稲田大学」グループ

研究代表者：中島達夫(早稲田大学理工学術院教授)

研究項目：組込みシステム向け D-Visor : SPUMONE の開発、D-System Monitor としての整合性モニタリングに関する開発

###### ・「筑波大学」グループ

主たる共同研究者：追川修一(筑波大学システム情報工学研究科准教授)

研究項目：D-System Monitor 実行環境 API の開発、D-Visor のための検証技術の開発

##### ② 期間中の研究成果

(i) DEOS の実行環境 D-RE の仮想化マシンモニタ SPUMONE (Software Processing Unit. Multiplexing ONE into two or more)<sup>[1],[2],[3]</sup>

組込みシステムでは複数 OS を同時に使用することが多いが、このためには仮想化層が不可欠である。しかし、殆どの組込みシステムでは仮想化のためのハードウェアを持っていない。そのため、ハードウェアを必要としない仮想化マシンモニタ SPUMONE を開発した。SPUMONE は、複数 OS を同時に使用するマルチコアプロセッサ環境で使用でき、ゲスト OS の変更量やオーバーヘッドを最小限に押さえられるとともに、リアルタイム OS のリアルタイム性を損なわない実用的な仮想化マシンモニタである。

DEOS の実行環境 D-RE において、システムコンテナ<sup>84</sup>を提供する仮想化マシンモニタが D-Visor である。D-Visor には用途に応じて 4 つの仮想化マシンモニタを用意しており、SPUMONE はその一つである。

<sup>84</sup> システムコンテナ：システムサービス間の影響を分離する論理パーティション

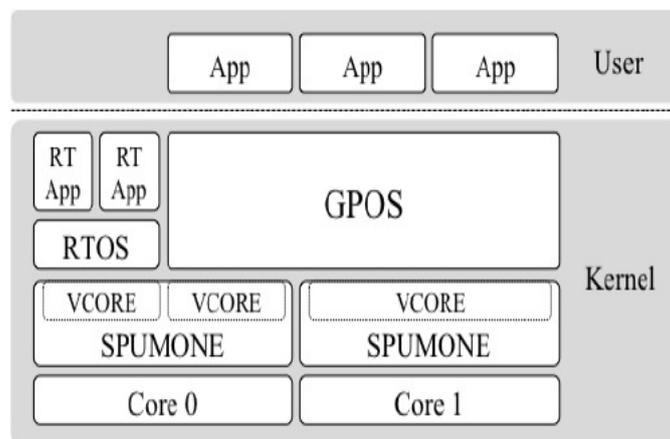


図 3-10 SPUMONE の基本構成<sup>85</sup>

(ii) SPUMONE 上の D-System Monitor 実行環境

D-System Monitor は SPUMONE と連携してシステムコンテナに対する監視を行う機能である。SPUMONE 上で動作する D-System Monitor を、仮想コアマイグレーション<sup>86</sup>を用いて時間的に切り離す技術、コアローカルメモリを用いて空間的に切り離す技術を開発した。また、D-System Monitor の一つの機能として、仮想マシンモニタ上で動作する OS の性能低下をさせることなく、OS カーネル内のデータ構造体の整合性を定期的にチェックするモニタリング機能を、SPUMONE に付与した。整合性は各データ構造体の制約として指定し、モニタが制約違反を検出するとリカバリ関数を呼び出す仕組みとなっている。

(iii) D-System Monitor ランタイム API

各チームが開発した複数の監視機能を D-System Monitor として組込む場合、それぞれの監視機能が独自のインターフェースを用いるのではなく、統一されたインターフェースを用いることができるよう、D-System Monitor ランタイム API を開発した。これにより、複数の監視機能が簡便に使えるようになり、異常の検知や原因の究明が強化された。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト(3 報以内)

- [1] Kanda W., Murata Y., Nakajima T. “SIGMA system: A multi-OS environment for embedded systems”, Journal of Signal Processing Systems, 2010, 59(1), 33-43.
- [2] Kinebuchi Y., Makijima K., Morita T., Courbot A., Nakajima T. “Composition kernel: A software solution for constructing a multi-OS embedded system”, Eurasip Journal on Embedded Systems, 2010, 458085.
- [3] Nakajima T., Kinebuchi Y., Shimada H., Courbot A., Lin T.-H. “Temporal and spatial isolation in a virtualization layer for multi-core processor based

<sup>85</sup> 本研究課題 研究終了報告書(研究終了報告書 p11 図 4.2.1 SPUMONE の基本構成)

<sup>86</sup> 仮想コアマイグレーション：マルチコア環境において、ゲスト仮想マシンを、現在のコアから他のコアに移行させること

information appliances” , Proceedings of the Asia and South Pacific Design Automation Conference, ASP-DAC, 2011, 5722268, 645-652.

## (2) 研究課題終了後の継続と発展状況

### ① 研究の継続と発展状況

本研究課題期間中には本研究課題と並行して、科研費特定領域研究「情報爆発に対応する高度にスケーラブルなモニタリングアーキテクチャ」(2006年度～2010年度)(図 3-11 の科研費特定領域研究)の研究代表者として研究を進めた。また、文部科学省/革新的・先導的教育研究プログラムの開発推進/21世紀 COE プログラム/情報・電気・電子「プロダクティブ ICT アカデミアプログラム」(2002年度～2006年度)(研究代表者：早稲田大学基幹理工学研究科 CS 専攻村岡洋一)、科研費基盤研究(B)「自己組織化・適応可能な分散システム」(2006年度～2009年度)(研究代表者：国立情報学研究所アーキテクチャ科学系佐藤一郎)、文部科学省/革新的・先導的教育研究プログラムの開発推進/グローバル COE プログラム/情報・電気・電子「アンビエント SoC 教育研究の国際拠点」(2007年度～2011年度)(研究代表者：早稲田大学基幹理工学研究科情報理工学専攻後藤敏)の共同研究者として研究を進めた。

本研究課題終了後は、科研費基盤研究(C)「パワーマネジメント・セキュリティのためのゲーム機向けミドルウェアの構築」(2012年度～2014年度)(図 3-11 の科研費基盤研究(C))の研究代表者として研究を進めた。また、科研費基盤研究(B)「柔軟な適応性をもつ分散システムの構築・管理」(2012年度～2015年度)(研究代表者：国立情報学研究所アーキテクチャ科学系佐藤一郎)の共同研究者として研究を進めた。さらに、科研費基盤研究(A)「不揮発性メモリ及び小型原子時計等を前提とした分散システム技術」(2016年度～2019年度)(研究代表者：国立情報学研究所アーキテクチャ科学系佐藤一郎)の共同研究者として研究を進めている。

研究代表者中島達夫は、現在も早稲田大学理工学術院教授として、本研究課題を発展させている。

主要な成果は、図 3-11 に示す通り、(i)実世界の仮想化技術、(ii)パワーマネジメント・セキュリティのためのゲーム機向けミドルウェアの構築、(iii)情報爆発に対応する高度にスケーラブルなモニタリングアーキテクチャであり、以下にその詳細を記述した。

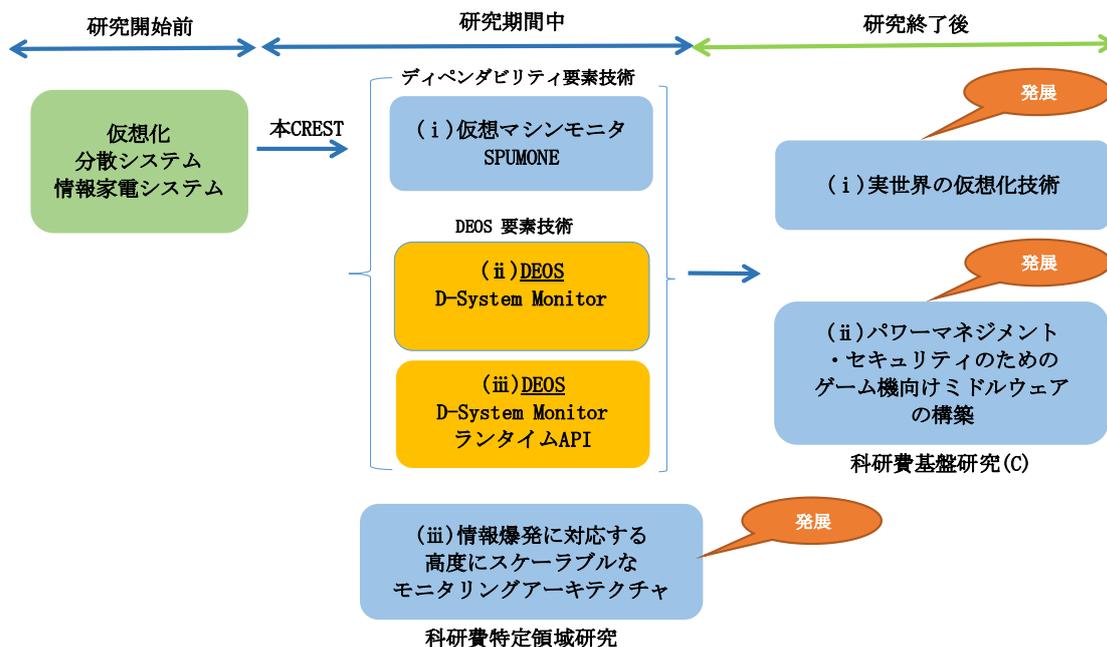


図 3-11 研究助成金と成果の展開状況

#### (i) 実世界の仮想化技術

実世界の変革を目指し、拡張現実 (AR) や仮想現実 (VR) を含む情報技術との様々なインタラクティブな研究を進めて、以下の成果を挙げた。

##### (a) 実世界と VR を組み合わせたハイブリッド現実「Alternative Reality」<sup>[1]</sup>

実世界の日常生活と VR を組み合わせ、よりよい生活を体験するハイブリッド現実「Alternative Reality」として、2つのケーススタディを行った。両ケースとも、360°カメラで実世界の画像を取り込み、ヘッドマウントディスプレイを用いてハイブリッド現実「Alternative Reality」を体験する方式である。

##### (b) VR サービスにおけるアフォーダンス (視覚的目印)<sup>[2]</sup>

ヘッドマウントディスプレイによる VR サービスでは NUI (Natural User Interface) デバイスが用いられる。NUI デバイスには多くのタイプがあり、ユーザが適切に使用できるようにするため、ナビゲーションを行うアフォーダンスを開発した。

##### (c) IoT 技術と融合した VR<sup>[3]</sup>

VR と IoT 技術との融合が VR の普及に有効であると考え、3つの軸 (IoT の分類、可視化レベル、仮想化レベル) を基にした設計の考え方を開発した。

#### (ii) パワーマネジメント・セキュリティのためのゲーム機向けミドルウェアの構築

説得技術 (Pervasive Technology) やゲーミフィケーション<sup>87</sup> (Gamification) といった

<sup>87</sup> ゲーミフィケーション：課題の解決や顧客ロイヤリティの向上に、ゲームデザインの技術やメカニズムを利用する活動

様々な手法を取り入れ、生活の質や満足度を高めるための情報技術の研究を進めた。クラウドソーシングの考え方を利用して集団行動をナビゲートすることによりエネルギーを削減することを目指して、ミドルウェアの開発に取り組み、以下の成果を挙げた。<sup>88</sup>

(a) マイクロクラウドファンディングの概念を用いたクラウドソーシングプラットフォーム「MCfund」<sup>[4]</sup>

(b) 人間をセンサとして利用するクラウドソーシングプラットフォーム「MoboQ」

(iii) 情報爆発に対応する高度にスケーラブルなモニタリングアーキテクチャ

高信頼ソフトウェアとスケーラブル分散システムの研究を進めた。システムモニタリングに適した分散システム/サービスアーキテクチャの開発と、収集した情報を分析可能とするミドルウェア/サービスの開発に取り組み、以下の成果を挙げた。<sup>89</sup>

(a) Web サービス性能解析ツール「mBrace」<sup>90</sup>

(b) カーネルログから機械学習を用いて異常検出を可能とする「Ayaka」<sup>91</sup>

(c) スケーラブルモニタリングを可能とする「IntegrityMonitor」

(d) ネットワークのモニタに基づくセキュリティ対策<sup>92</sup>

(e) モニタリングデータからのデータマイニングとシステム高速化

(f) モニタリングデータを利用した各種サービス

(g) 小型ノード向け仮想化レイヤ

(h) ハイブリッド型P2Pライブ配信アーキテクチャ「ToMo」

(i) センシング応用サービス<sup>93</sup>

## ②科学技術の進歩への貢献

(i) 分散システムの信頼性を向上させる異常検出やセキュリティ対策ソフトウェア

---

<sup>88</sup> 科研費/基盤研究(C)「パワーマネジメント・セキュリティのためのゲーム機向けミドルウェアの構築」(2012年度～2014年度) 研究成果報告書

<https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-24500047/24500047seika.pdf>

<sup>89</sup> 科研費特定領域研究「情報爆発に対応する高度にスケーラブルなモニタリングアーキテクチャ」(2006年度～2010年度) 研究成果報告書

<https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PLANNED-18049068/18049068seika.pdf>

<sup>90</sup> Zee A. V. D., Courbot A., Nakajima T. “Fine-Grained Profiling of Multi-Tier Web Applications”, International Journal of Web Service Practices, 2010, 5(1), 10-21.

<sup>91</sup> Sugaya M., Ohno Y., Van Der Zee A., Nakajima T. “A lightweight anomaly detection system for information appliances”, Proceedings of the 2009 IEEE International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing, ISORC 2009, 2009, 257-266.

<sup>92</sup> Shimada H., Courbot A., Kinebuchi Y., Nakajima T. “A lightweight monitoring service for multi-core embedded systems”, ISORC 2010 - 2010 13th IEEE International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing, 2010, 1, 5479553, 202-209.

<sup>93</sup> Kawsar F., Nakajima T., Fujinami K. “Deploy spontaneously: Supporting end-users in building and enhancing a smart home”, UbiComp 2008 - Proceedings of the 10th International Conference on Ubiquitous Computing, 2008, 282-291.

「mBrace」は、Linux カーネルが提供する細粒度タイマー機能を利用したツールで、Web アプリケーションのバグの発見やサーバのキャパシティプランニングなどのために必要となる有用な情報を抽出する機能を提供している。「mBrace」を用いることにより、極めて低いオーバーヘッドで、Web アプリケーションの性能異常の解析を行うために必要な情報の抽出が可能となった。

「Ayaka」は、各アプリケーションのカーネル内の振る舞いをログとして抽出し、機械学習機能を用いて異常検出を行うツールである。機械学習アルゴリズムを用いて正常状態の振る舞いのパターンを学習させておき、その後、学習したパターンと異なるパターンの発生を定期的にチェックすることにより、異常状態の検出が可能となった。

「IntegrityMonitor」は、Linux カーネル内のデータ構造の状態遷移をモニタリングして異常検出を行うツールである。「IntegrityMonitor」は Daikon というツールを用いて、自動的に異常な状態と正常な状態を区別する定義を生成しており、コンシューマエレクトロニクスやクラスタサーバなどでも異常検出が可能となった。

ネットワークのモニタに基づくセキュリティ対策として、Dark IP(未使用の IP アドレスに流入するパケットをモニタしてマルウェアを観測する技術)を発展させて、「仮想ハニーポット」を開発した。「仮想ハニーポット」は、「IntegrityMonitor」で未使用の IP アドレスに流入するパケットを収集し、悪意のあるパケットに応答してその返信パケットを観測することにより、セキュリティに関する多くの情報を集めることが可能となった。

#### (ii) センシング応用サービス

実世界のセンシング情報が特別な機器を使わずにセンサ機器から得られるミドルウェア、ユーザの行動をモニタリングすることによりその行動を反映する仮想現実を実際の生活環境に表示するシステム「ライフスタイルアンビエントフィールドバックシステム」、ユーザの行動をモニタリングすることにより、ユーザが様々な経済的メリットを享受することを支援するシステム「UbiPay」を開発し、ユーザの意思決定を支援するための有益な情報を提供することが可能となった。

### ③ 社会・経済への波及効果

#### (i) クラウドソーシングプラットフォーム

クラウドソーシングプラットフォームは我々の生活のあり方を大きく変革しつつある。これまでは直接知らない人同士が交流する機会はあまり多くなかったが、クラウドソーシングプラットフォームを介して新たな協力関係を構築することも一般的になってきている。

「MCfund」は、マイクロクラウドファンディングの概念を用いたクラウドソーシングプラットフォームであり、コミュニティ間の経済活動を促進することにより、社会の持続可能性を保つことの重要性を高めるためのシステムで、社会的インセンティブと、実通貨へ

の変換を前提としない経済的インセンティブを基にしている新しい試みである。「MCFund」を実際に使用し、社会的インセンティブは参加者の「高レベルの行動を促す」、経済的インセンティブは「通貨は社会持続性の重要性を認識することに貢献する」との結果を得るなど、社会行動に関する新たな知見も得られている。

「MoboQ」は、マイクロブログ上で動作する、ロケーションベースの実時間 Q&A サービスである。「MoboQ」は、質問者の質問に不特定多数の人々が実時間・実場所情報付き回答をする仕組みで、不特定多数の人々を「実世界情報を取得するためのセンサ(ヒューマンセンサ)」として用いる新しい試みである。「MoboQ」では、サービスへの参加者は、どのレストランが混んでいるのか、どの銀行が待ち時間が長いのかなどの、位置情報や時間に依存する情報を取得できるなど、社会行動に関する新たな価値が得られると考えられている。2012年に中国でリリースし、実際の環境で十分機能する可能性があることを確認した。

#### (ii)分散システムソフトウェア

情報爆発に伴い、情報システム基盤の安全性を確保するためのシステムモニタリング機能の重要性が一層増している。モニタリング機能を強化し、コンピュータシステム・ネットワークシステムを統合した、新たなスケーラブルシステムモニタリングアーキテクチャやサービス機能を構築するとともに、システム自体の安全性を向上させ、ユーザのミスや悪意のある攻撃を未然に防ぐための手法を開発し、モニタリングアーキテクチャの有効性を示した。

#### ④上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な論文リスト(4報以内)

- [1] Ishizawa F., Nakajima T. “Alternative reality: An augmented daily urban world inserting virtual scenes temporally”, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2016, 10069LNCS, 353-364.
- [2] Miura T., Yoshii A., Nakajima T. “Designing affordances for virtual reality-based services with natural user interaction”, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2016, 9748, 266-277.
- [3] Gushima K., Nakajima T. “A design space for virtuality-introduced internet of things”, Future Internet, 2016, 9(4), 60.
- [4] Sakamoto M., Nakajima T. “Micro-crowdfunding: Achieving a sustainable society through economic and social incentives in micro-level crowdfunding”, Proceedings of the 12th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia, MUM 2013, 2013, a29.

### 3.2.5 ディペンダブルシステムソフトウェア構築技術に関する研究(前田俊行)

#### (1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

##### ① 研究のねらい

静的プログラム解析技術(プログラムを数学的理論に基づいて解析することで、プログラムを実行することなく、その性質を知る技術)、特に型理論とモデル検査理論に基づき、システムソフトウェアの構築・検証技術を実現することで、システムソフトウェアの安全化・高信頼化を目指した。さらに、既存のC言語やアセンブリ言語などを対象にして、一般のソフトウェア開発者にとって実用的な検証ツールの開発にも取り組み、DEOS プロセスのシステム開発・修正の段階におけるディペンダビリティ向上(プログラム解析)、また、DEOS プロセス自体の構築に用いることにより、DEOS プロセス自体のメモリ安全性・制御フローの安全性の検証の有効な手法となることを狙いとした。

##### 研究実施体制

・「東京大学」グループ

研究代表者：前田俊行(東京大学大学院情報理工学系研究科助教)

研究項目：システムソフトウェアを記述可能な型付きアセンブリ言語の設計・実装、C言語から型付きアセンブリ言語への変換器の設計・実装、モデル検査技法に基づくシステムソフトウェアの解析

##### ② 期間中の研究成果

(i) システムソフトウェアを記述可能な型付きアセンブリ言語の設計・実装<sup>[1], [2], [3]</sup>

型付きアセンブリ言語とは、アセンブリ言語のレベルで型理論を応用することにより、メモリの安全性などを保証できる言語であるが、従来の型付きアセンブリ言語は複数のプログラムが同時に、かつ非同期に実行される環境を考慮しておらず、実用的なシステムソフトウェアに応用することは困難であった。

この課題を解決するため、複数のプログラムが同時に、かつ非同期に実行される環境においてもメモリ安全性や制御フロー安全性を保証できる、新たな型付きアセンブリ言語を設計して実装した。新たな型付きアセンブリ言語では、従来の型付きアセンブリ言語では不可能であった、システムソフトウェアの核となる部分であるメモリ管理やスレッド管理などの様々な実装に対して型検査を行うことが可能となった。また、従来の型付きアセンブリ言語では検証の対象としていなかった、複数のスレッドが同時に実行されうる実行環境での同期機構(ロックなど)そのものの検証を行うことも可能となった。

この技術により、DEOS プロセスにおけるシステム開発・修正の段階で、C言語から型付

きアセンブリ言語への変換器(後述(ii)項に記述)と組み合わせた型検査により、不用意で単純なバグの混入を防ぎ、プログラムのメモリ安全性・制御フロー安全性を継続的に保証する安定的な土台を実現した。さらに、DEOS プロセス自体の構築に用いることにより DEOS プロセス自体のメモリ安全性・制御フローの安全性を検証することが可能となる。実際に他チームの作成したいくつかのプログラムの検証ができる程度の実用性を持つ型付きアセンブリ言語の処理系を実装して検証した結果、C 言語から型付きアセンブリ言語への変換器と組み合わせることにより、他の商用検査ツールでは検出できなかったようなバグが検出できた。

#### (ii) C 言語から型付きアセンブリ言語への変換器の設計・実装<sup>94</sup>

型付きアセンブリ言語などの安全なプログラミング言語を用いてソフトウェアを構築すれば、システムは安全になるが、既存のソフトウェアをその言語で書き直さなければならない。しかし、全てのソフトウェアを新たに異なる言語で書き直すことは現実的ではない。

この課題を解決するため、既存の C 言語のソースコードをそのまま(もしくは必要であれば僅かな拡張・注釈を加えることによって)ほぼ自動的かつ低コストで、型付きアセンブリ言語へ変換する手法を設計して実装した。

C 言語から変換可能な型付きアセンブリ言語の設計には、依存型(Dependent Type)の理論を応用し、C 言語の殆どの機能(ポインタ演算、整数・ポインタ間のキャスト、構造体、共用体、可変長引数関数、関数ポインタなど)が型付きアセンブリ言語で表現可能となった。さらに、変換器に型安全性が保証された動的検査コードを挿入する手法などを開発した。

この手法を DEOS プロセスに用いることにより、C 言語から型付きアセンブリ言語への変換に伴って挿入される動的検査コードと実行時の DEOS プロセス機能(ロギングやモニタリングなど)とを連動させ、静的・動的両側面から実装の信頼性向上が図れる。

#### (iii) モデル検査技法に基づくシステムソフトウェアの解析<sup>95</sup>

型付きアセンブリ言語などの安全なプログラミング言語を用いることで、ソフトウェアのメモリ安全性と制御フロー安全性を保証することができるようになり、プログラムの不正なメモリ操作や不正なコード実行を完全に防止することができる。

しかし、現実的なシステムソフトウェアを考えると、メモリ安全性と制御フロー安全性にとどまらず、より高度で複雑な安全性(例えば、複数のプログラムが同時に実行されている場合、それらのプログラムが正しく同期機構を使っていることや、システムによって提

<sup>94</sup> Kosakai T., Maeda T., Yonezawa A. “Compiling C programs into a strongly typed assembly language”, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2007, 4846LNCS, 17-32.

<sup>95</sup> Matsuda M., Maeda T., Yonezawa A. “Towards design and implementation of model checker for system software”, Proceedings - 1st International Workshop on Software Technologies for Future Dependable Distributed Systems, STFSSD 2009, 2009, 4804583, 117-121.

供されている API をプログラムが正しく使っているかなど)を保証することが必要な場合がある。

この課題に対し、C 言語を用いて構築されたシステムソフトウェアについても現実的に適用可能なモデル検査手法・ツールの研究開発に取り組んだ。システムソフトウェア、またはそのシステムソフトウェアを利用するプログラムが満たすべき性質を、モデル検査機が直接解釈できる形式で記述し、これを用いてシステムのモデル検査を行うこととした。

実際に本研究領域の他チームが作成したプログラムや Linux カーネルのドライバの試験検証を行い、実用性を確認できた。

### ③研究成果に関連した主な成果論文リスト(3報以内)

- [1] Maeda T., Yonezawa A. “Writing an OS kernel in a strictly and statically typed language”, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2009, 5458LNCS, 181-197.
- [2] Maeda T., Yonezawa A. “Typed Assembly Language for Implementing OS Kernels in SMP/Multi-core Environments with Interrupts”, Proceedings of 5th International Workshop on Systems Software Verification, 2010.
- [3] Maeda T., Sato H., Yonezawa A. “Extended alias type system using separating implication”, TLDI’11 – Proceedings of the 7th ACM SIGPLAN Workshop on Types in Language Design and Implementation, 2011, 29-42.

## (2) 研究課題終了後の継続と発展状況

### ①研究の継続と発展状況

本研究課題終了後、科研費若手研究(B)「ゆるいメモリー貫性モデルのための簡潔で柔軟な型システムに関する研究」(2013年度～2015年度)の研究代表者として研究を進めた。

研究代表者前田俊行は、2012年4月に東京大学大学院情報理工系研究科助教を辞し、理化学研究所計算科学研究機構利用高度化研究チームのチームリーダーに就任した。その後、2016年4月には千葉工業大学人工知能・ソフトウェア開発センター(STAIR)主席研究員に就任し、本研究課題の成果を発展させている。(理化学研究所は2017年3月まで兼務)。

主要な成果は、図3-12に示す通り、(i)ゆるいメモリー貫性モデルのためのプログラム検証の理論と応用、(ii)高性能計算機向けアプリケーションプログラムの高性能化と高開発生産性化の両立であり、以下にその詳細を記述した。

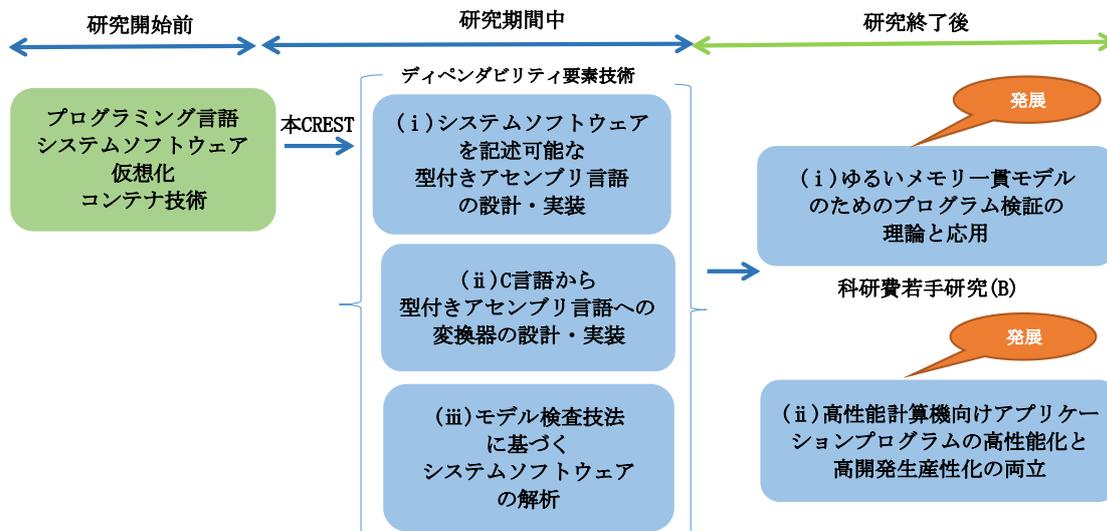


図 3-12 研究助成金と成果の展開状況

#### (i) ゆるいメモリ貫性モデルのためのプログラム検証の理論と応用

並列プログラミングにおいてミスが生じやすくなる原因の一つである「メモリ貫性モデル」、特に「ゆるいメモリ貫性モデル」におけるプログラム動作の正しさとして、プログラムが不正なメモリ操作等をしないことを検証する手法の開発に取り組んだ。<sup>96</sup>

「メモリ貫性モデル」とは、並列に実行される複数のプログラムが共有のメモリを同時に操作した場合に、そのメモリ操作の結果・影響が各プログラムにどのように観測されるかを表すモデルのことである。このうち「ゆるいメモリ貫性モデル」とは、複数のプログラムを逐次的に交互に実行した場合には起こりえない結果・影響が観測され得るモデルのことである。

従来の逐次的なモデルにおいては正しく動作するプログラムが、「ゆるいメモリ貫性モデル」では、複数のプログラムで同時に実行される処理が、従来の逐次的なメモリ処理における処理順とは異なり、逐次的なメモリ処理の挙動からは予想できない結果を生じることがある。このため、「ゆるいメモリ貫性モデル」に対応した並列プログラミングの解析・検証が重要となる。本研究では、「ゆるいメモリ貫性モデル」を簡潔に表現できるプログラミング言語の柔軟な型システムやモデル検査の理論を構築し、以下の成果を挙げた [1], [3], [4]。

#### (a) 様々なメモリ貫性モデルを統一的に表現できる抽象機械モデル

新旧各種プロセッサ、および各種分散並列プログラミング言語・フレームワークのマニュアル・仕様書などを調査し、それぞれが採用しているメモリ貫性モデルを明らかにし、

<sup>96</sup> 科研費若手研究(B)「ゆるいメモリ貫モデルのための簡潔で柔軟な型システムに関する研究」(2013年度～2015年度) 研究成果報告書

これらのメモリー貫性モデルを表現できるようなベースとなる抽象機械モデル(ベースモデル)を設計した。

このベースモデルの構造は、共有メモリを持たず、各プロセスの局所的メモリ(他のプロセスから直接アクセスできないメモリ)を仮想的な共有メモリのキャッシュとした。この構造に基づき、他のプロセスからのキャッシュの更新は、各プロセス間のメッセージ通信によって行う仕組みとしている。

また、ベースモデルでは、様々なメモリー貫性モデルをカバーするために、全てのプロセスの全ての命令実行、メモリ操作、プロセス間通信などが、ベースとなる最低限の制約を除き、任意の順序で入れ替わることを許し、さらに、複数のプロセスが異なる入れ替え順序を観測するという並列環境におけるような振る舞いも許している。

#### (b) ベースとなる抽象機械モデル上での様々なメモリー貫性モデルの表現

上記(a)のベースモデルで、調査した新旧各種プロセッサなどのメモリー貫性モデルを表現できることを確認した。

ベースモデルにおいてメモリー貫性モデルは、命令実行・メモリ操作・プロセス間通信などの順序入れ替えに対して何らかの制約を課す(メモリ操作に関する規則に従う)ことで表現される。例えば、メモリ操作の順序入れ替えは許すが、全てのプロセスで入れ替えの順序は一致させるという制約、同一アドレスへの複数のメモリ操作、特定の命令発行に伴うメモリ操作については入れ替えを許さない制約などによって、様々なメモリー貫性モデルを表現することができる。

#### (c) 様々なメモリー貫性モデルに対応した型システムやモデル検査

上記(a)のベースモデルにおける順序入れ替え、および入れ替えに関する制約条件を考慮したプログラミング言語の型システムの設計やモデル検査理論の構築を行った。

並列実行に対応した別名型(alias types)ベースの型付きアセンブリ言語をベースとし、存在型(existential types)を pack/unpack する際、またそれに関連するメモリ操作をする際の型付けにおいて、制約条件を考慮した型付けを行うよう設計した。また、ループや条件分岐に関連するメモリ操作、またそれらを跨るようなメモリ操作において、未実行の可能性のある命令の副作用(メモリ操作の順序が前後することによる不整合など)を考慮するために、ジャンプ命令・分岐命令および存在型の pack/unpack の型付けにおいて、この副作用を考慮するように事前条件などを検査するようにした。これにより、ループや条件分岐に関するメモリ操作、またそれらを跨るようなメモリ操作も柔軟に型付けすることができるようになった。またこれと並行してモデル検査理論の構築も行い、各種並行コピーガーベージコレクションアルゴリズムにおけるコピープロトコルの様々なメモリー貫性モデル下での振る舞いの検証を行った。その結果、既存のある種の並列コピーガーベージコレクションアルゴリズムに問題があることを発見することができた。

(ii) 高性能計算機向けアプリケーションプログラムの高性能化と高開発生産性の両立  
スーパーコンピュータ「京」の高度化研究の一環として、高性能計算機向けアプリケーションの開発生産性と性能の両立についての研究を進めた<sup>[2]</sup>。

従来の高性能計算機向けアプリケーションは、FORTRAN や C 言語などのプログラミング言語で作成されており、最適化コンパイラによる性能改善等の性能のチューニングを行うことで高い性能を実現しやすいという利点はあるが、一方でプログラミングの容易さや様々な機能を実現するライブラリの充実度に難があり、開発生産性が低いという問題があった。

この問題に対し本研究では、開発生産性の点から優位である動的プログラミング言語と、性能の点から優位である静的プログラミング言語でそれぞれ作成されたプログラムを結合する技術を用いて、高開発生産性と高性能を両立する技術を実現した。具体的には、量子化学の第一原理計算のプログラムを例に取り、プログラムの大部分を動的プログラミング言語である Python で作成し、性能に影響する部分だけを FORTRAN や C++ で作成することにより、高開発生産性と高性能化を両方とも実現することができた。実際、FORTRAN 等のみで作成されたプログラムと性能の面ではほとんど差が生じないことが確認でき、また新たな機能の追加や外部ライブラリの利用などのプログラム改良を Python で記述することで非常に少ないソースコードの簡潔な修正で実現できることが確認できた。

## ② 科学技術の進歩への貢献

並列プログラミングの健全性を向上させることを目的として、プログラムのメモリ安全性(プログラムが不正なメモリ操作を行わないこと)の検証手法の確立に取り組んだ。特に並列プログラミングにおいてミスが生じやすくなる原因の一つである「ゆるいメモリ一貫性モデル」におけるプログラム動作の健全性を向上させるため、プログラムが不正なメモリ操作をしないことを検証する手法を開発した。

「ゆるいメモリ一貫性モデル」に対応した従来の研究では、モデルの表現が複雑でプログラム開発者に理解しづらいという問題、また、特定のモデルにのみ対応していて他のモデルに応用が可能か自明ではなく、柔軟性に欠けるなどの問題があった。これらの問題を解決するため、「ゆるいメモリ一貫性モデル」を簡潔に表現できるプログラミング言語の柔軟な型システムやモデル検査の理論を構築した。

## ③ 社会・経済への波及効果

社会・経済への波及効果の高い最先端のアプリケーションソフトウェアの多くは、並列処理システムにおいて実行されており、その並列処理システムの安全性・高信頼化・高性能化に貢献する実用的な技術を開発した。

④上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な論文リスト(4報以内)

- [1] Abe T., Maeda T. “A general model checking framework for various memory consistency models” , Proceedings of the International Parallel and Distributed Processing Symposium, IPDPS, 2014, 6969408, 332-341.
- [2] Shimazaki T., Hashimoto M., Maeda T. “Developing a high-performance quantum chemistry program with a dynamic scripting language” , Proceedings of SEHPCSE 2015: 3rd International Workshop on Software Engineering for High Performance Computing in Computational Science and Engineering - Held in conjunction with SC 2015: The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, 2015, 9-15.
- [3] Abe T., Maeda T. “A general model checking framework for various memory consistency models” , International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 2017, 19(5), 623-647.
- [4] Ugawa T., Abe T., Maeda T. “Model Checking Copy Phases of Concurrent Copying Garbage Collection with Various Memory Models” , Proceedings of the ACM on Programming Languages, Vol. 1, Issue OOPSLA, October 2017. Article No. 53.

### 3.3 2008 年度採択研究課題

#### 3.3.1 実時間並列ディペンダブル OS とその分散ネットワークの研究(加賀美聡)

##### (1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

###### ① 研究のねらい

ロボットを始めとした実時間システムが複数 CPU コアを利用する際に、システム本体のディペンダビリティを向上させることを目的として、非実時間 SMP (Symmetric Multi-Processing) システム<sup>97</sup>と実時間 AMP (Asymmetric Multi-Processing) システム<sup>98</sup>の組み合わせによりハードウェアリソースをソフトウェア的に分割して利用する方法の開発に取り組んだ。

また、ロボットアプリケーションを用いて、システムの完全性、機能性、説明責任などについての合意形成を行う DEOS プロセスの有効性検証に取り組んだ。

###### 研究実施体制

・「加賀美」グループ

研究代表者:加賀美聡(独立行政法人産業技術総合研究所デジタルヒューマン工学研究センター副センター長)

研究項目: 複数コアを非実時間 SMP システムと実時間 AMP システムの組み合わせで利用する OS の設計と開発、アプリケーションからのディペンダビリティ機能の検証と開発した OS の実証

###### ② 期間中の研究成果

(i) 複数 CPU コアを非実時間 SMP システムと実時間 AMP システムの組み合わせ (AMP と SMP 混在システム<sup>99</sup>) で利用する OS の設計と開発<sup>[1], [2]</sup>

非実時間の OS である Linux や Windows では、プログラミングモデルの簡単さから SMP システムが一般的に用いられているが、SMP システムにおける実時間 OS には確立されたスケジュール手法が存在せず、理論的な完全性が保証できない。このため AMP システムと SMP システムの混在システムが有効な手段として考えられる。組込み系の専用 OS ではこのような混在システムが存在していたが、一般にオープンソースのソフトウェアと整合性が取れ

<sup>97</sup> SMP システム: 複数のコア上に単一の OS が存在し、メモリを共有するシステム

<sup>98</sup> AMP システム: 複数のコア上にそれぞれ別の OS が存在し、メモリも独立に用いるシステム

<sup>99</sup> AMP と SMP の混在システム: 任意の個数のプロセッサを SMP システムで、残りを別々に AMP システムが利用するシステム

ず、大規模ソフトウェア開発には向かない傾向があった。

この問題を解決するため、10 年来開発をしてきた ART-Linux(ユーザー空間から実時間タスクを実行するシステムコールを提供する OS)をベースに、複数の実時間 AMP と通常の実時間 SMP の Linux が任意の割合で混在可能な OS を開発した。x86 系で Linux 互換のシステムとしては初めてであり、特許を 1 件<sup>100</sup>出願するとともに、開発した OS を 2013 年に公開し、ダウンロード件数も多い。

(ii)アプリケーションからのディペンダビリティ機能の検討と開発した OS の実証

実時間 AMP と非実時間 SMP の混在により、単一 CPU での実時間システムやマルチコア環境での実時間 SMP システムに比較して、どのようなシステムのディペンダビリティの向上があるか研究した。

開発した ART-Linux ベースの実時間 AMP と非実時間 SMP の混在システムにより可能となるシステム構成を図 3-13 に示した。この非実時間 SMP、実時間監視 AMP、実時間制御 AMP、非常用 AMP、二重用 AMP-Linux それぞれについて、機能を確認し実証を行った。

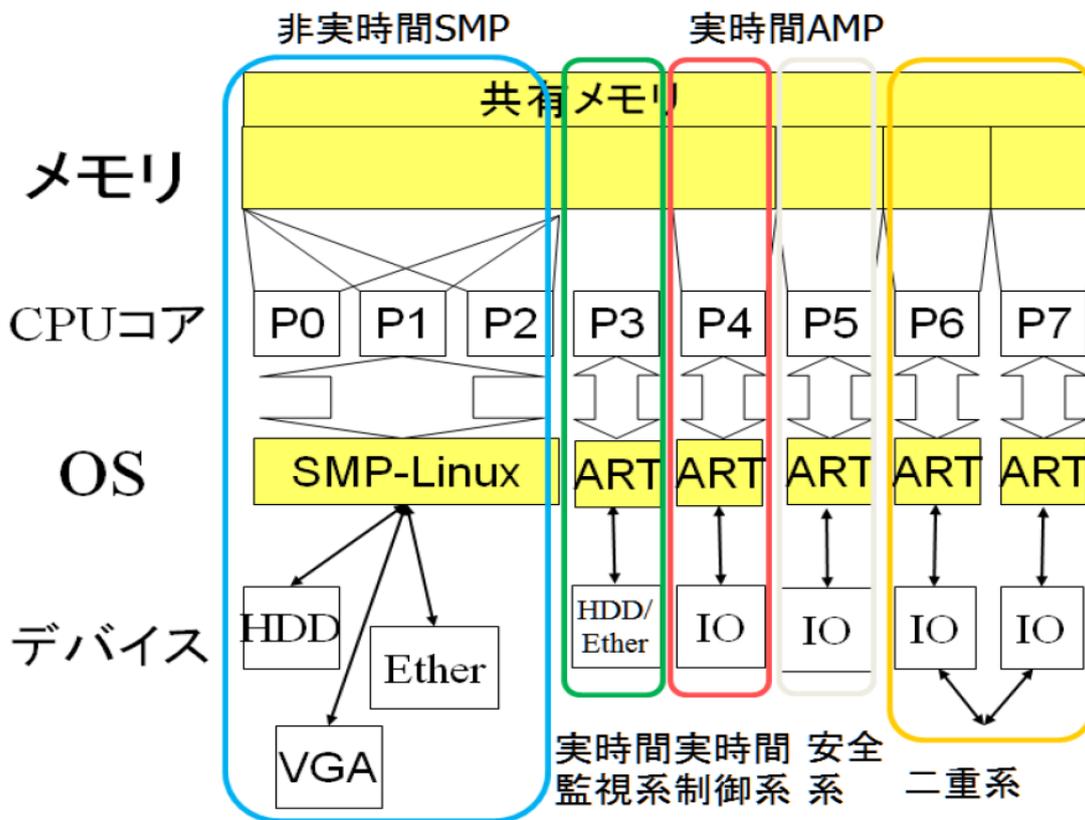


図 3-13 非実時間 SMP と実時間 AMP の混在するシステム構成<sup>101</sup>

<sup>100</sup> 「複数の OS のメモリ使用の効率化手法」, 加賀美聡, 石綿陽一, 2012年9月3日出願, 特願2012-193079

<sup>101</sup> 本研究課題 研究終了報告書(本研究課題 研究終了報告書 p10 図4)

(iii) ロボットアプリケーションを用いた D-Case の実証<sup>[3]</sup>

異なるステークホルダ間の合意について、数台のサービスロボットを例にとり、議論を進めながらシステムの完全性、機能性、説明責任などについての合意形成を行う DEOS プロセスを回すことにより、その効果を検証する実証研究を行った。

D-Case を用いたステークホルダ合意と DEOS プロセスの二重ループの切り替え、説明責任のためのログ抽出などを、ART-Linux をベースとした非実時間 SMP と実時間 AMP の混在するシステムで構築し、開発から運用(継続的な実証実験)に至るプロセスで検証を行った。この検証により、DEOS プロセスが、変化する環境やステークホルダの要求、システムの変更などにロバストに追従可能であること、また開発した ART-Linux をベースとした非実時間 SMP と実時間 AMP の混在するシステムが、これを実時間でディペンダブルに動作させるプラットフォームとして有効であるとの結果を得た。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト(3報以内)

- [1] 加賀谷聡, 石綿陽一, 西脇光一, 梶田秀司, 金広文男, 尹祐根, 安藤慶昭, 佐々木洋子, Simon Thompson, 松井俊浩 複数コアを SMP・AMP 分割利用可能な ART-Linux の設計と開発, 第 17 回ロボティクスシンポジウム予稿集, 2012, 521-526.
- [2] Kagami S., Ishiwata Y., Nishiwaki K. “ART-Linux for high-frequency system control”, 2013 IEEE 1st International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications, CPSNA 2013, 2013, 6614247, 60-65.
- [3] Sugaya M., Takamura H., Ishiwata Y., Kagami S., Kuramitsu K. “Online Kernel Log analysis for robotics application”, Journal of Information Processing, 2012, 21(1), 53-66.

(2) 研究課題終了後の継続と発展状況

①研究の継続と発展状況

本研究課題期間中から本研究課題と並行して、科研費基盤研究(A)「ロボット聴覚の実環境理解に向けた多面的展開」(2012年度)(研究代表者:京都大学情報学研究科奥乃博)、科研費基盤研究(S)「ロボット聴覚の実環境理解に向けた多面的展開」(2012年度~2016年度)(研究代表者:京都大学情報学研究科奥乃博)(図 3-14 の科研費基盤研究(S))の共同研究者として研究を進めた。

本研究課題終了後は、科研費基盤研究(A)「自動運転のための組込み情報通信技術の研究開発」(2014年度)(図 3-14 の科研費基盤研究(A))の研究代表者として研究を進めた。

研究代表者加賀美聡は、2014年3月に独立行政法人産業技術総合研究所デジタルヒューマン工学研究センター副センター長を辞し、グーグル・ジャパン株式会社において研究を進めている。

主要な成果は、図 3-14 に示す通り、(i) ロボット聴覚の実環境理解に向けた多面的展開、(ii) 自動運転のための組込み情報通信技術であり、以下にその詳細を記述した。

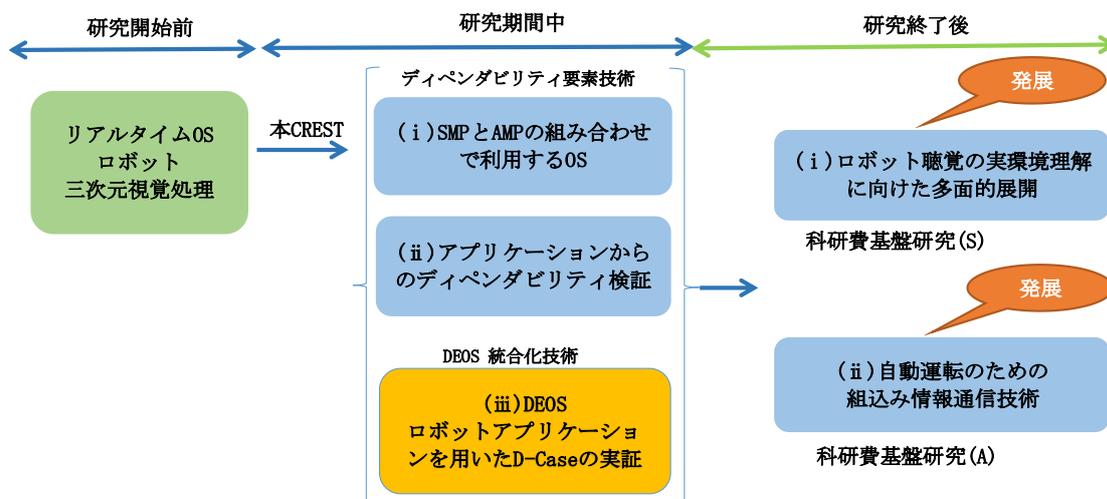


図 3-14 研究助成金と成果の展開状況

#### (i) ロボット聴覚の実環境理解に向けた多面的展開

ロボット聴覚ソフトウェア HARK の「聞き分ける技術」を基に、自然環境・災害現場でも通用するように、豊富な機能拡充・高性能化を目指し、「視聴覚情報統合による 3D 地図作成法と大規模会場・自然環境での音響データの解析」に取り組んだ。<sup>102</sup>

音は画像と比べ拡張性が強いのでロボット聴覚による音環境理解は、画像だけでは捉えきれない環境でも理解ができる一方、広域から得られる情報の活用方法が課題となる。このため、屋外の自然環境や広い屋内(大規模会場)などの実環境における音環境を把握する「聞き分ける」機能を向上させる技術が必要となる。情報活用の範囲を大きく拡大するため、この「聞き分ける」機能と視覚情報を結びつける技術の開発に取り組み、以下の成果を挙げた。

#### (a) 3D 地図作成法<sup>103</sup>

自然環境・災害現場で使用されるロボットは、センサ情報に基づき、常に変化し続ける周辺環境を正確に把握する必要がある。この周辺環境の幾何的形狀の把握を目的として、屋外定位置誤差が水平角・仰角ともに 6 度程度の統計的三角測量と、LiDAR<sup>104</sup>センサによる統計的誤差最小法とを組み合わせた 3D 地図作成法を開発した。

#### (b) 視聴覚情報に基づく位置の推定<sup>[1], [2], [3], [4]</sup>

<sup>102</sup> 科研費基盤研究(S)「ロボット聴覚の実環境理解に向けた多面的展開」(2012 年度～2016 年)(研究代表者：京都大学情報学研究科奥乃博) 研究成果報告書

<sup>103</sup> 畑尾直孝, 鮫島一平, 加賀美聡 「角度ベース複数仮説を用いた LRF による複数種類・複数個の移動体追跡手法」, 計測自動制御学会論文集, 2015, 51(5), 297-308.

<sup>104</sup> LiDAR: Laser imaging Detection and Ranging レーザー画像検出と測距(光を用いたリモートセンシング技術)

LiDAR と 32ch マイクアレイの手持ち装置を開発し、AV-SLAM<sup>105</sup>を開発した。無限音源数の音源定位と音源分離を同時推定するノンパラメトリックベイズ(BNP-MAP)処理により、音源定位・分離を組み合わせた可視化を行い、ロボットを中心座標として人の動きと音源定位結果を可視化することに応用した<sup>[4]</sup>。

#### (c) 音源分離性能の向上<sup>106</sup>

複数音源が一直線に並ぶとロボット 1 台では音源分離性能が劣化する。音源配置が既知の下での音源分離問題に対して、分離予測信号を最大化する適正配置に各ロボットが移動し、最適マイクアレイを構成するようにした音源分離法を開発した。シミュレーションでは 5.7dB、実地試験では 5.6dB の分離性能の向上を確認した。

#### (ii) 自動運転のための組み込み情報通信技術

自律走行する自動車におけるコンピュータシステムの構成法と、各自律機能の研究に取り組んだ。<sup>107</sup>

新しいシステム構築に向けたベンチマーク実験を行うため、自動走行車両に対して、レーザ距離センサ、ジャイロ、オドメトリなどの情報を統合した地図作成、位置認識、障害物発見、移動障害物追跡、経路計画、経路追従制御などの自律機能を実装した。これらの自律機能はオープンソースのロボット用ミドルウェア ROS(Robot Operating System)を用いて相互に結合されている。

実験用に 250m 角の駐車場にコーンで一周約 600m の凹状の走路を設置した。はじめに人間が車両を運転し、そこで得られた情報から、自動で走行する自律走行実験を行った。自律走行では、走路を直線では約 20~30km/h、曲線部では 10~15km/h で自動周回する。自律走行中には、環境地図の作成と経路生成を行い、それを辿りながら、歩行者や人間が運転する自動車を発見し、自動的に停車して通過を待ち、再度走行を行い、各自律機能の性能を測定した。

その結果、自律機能に影響をおよぼす課題として、ROS における時刻精度が高くないこと、データ通信のレイテンシ(送信後の返信までの遅延時間)が大きいこと、またジッター(時間軸方向の波形信号のゆらぎ)も大きいことがわかり、これらは、環境認識や車両制御に与える影響が大きいことが確認できた。

<sup>105</sup> AV-SLAM : Audio Visual Simultaneous Localization And Mapping ロボットや機械に搭載した音響および視覚情報を基に、自身の位置の推定(Localization)を行いながら、地図の作成(Mapping)を同時(Simultaneous)に行うこと

<sup>106</sup> Sekiguchi K., Bando Y., Itoyama K., Yoshii K. “Layout Optimization of Cooperative Distributed Microphone Arrays based on Estimation of Source Separation Performance”, *ibid*, 2017, 83-94.

<sup>107</sup> 科研費基盤研究(A)「自動運転のための組み込み情報通信技術の研究開発」(2014年度) 2014年度 実績報告書

## ②科学技術の進歩への貢献

### (i) ロボット聴覚の実環境理解に向けた多面的展開

ロボットなどが、屋外の自然環境や広い屋内(大規模会場)などの広域において、正確に位置情報を把握する技術として視覚情報に基づく 3D 地図作成法を開発した。音情報については、音源を分離し音源の位置を推定する機能を開発し、「聞き分ける」機能を実現した。

この「聞き分ける」機能と視覚情報を結びつけることにより、ロボットが人の動きと音源の位置の関係を正確に把握できるようになるなど、視聴覚情報活用の基盤を確立した。

### (ii) 自動運転のための組込み情報通信技術

自動運転には多くの自律機能が必要であり、その精度とリアルタイム性が重要である。ベンチマーク実験を行うことにより、精度とリアルタイム性に影響を与える要因の定量的データが把握できた。これらのデータは、自律走行する自動車におけるコンピュータシステム構成や各自律機能設計の基礎となるものである。

## ③社会・経済への波及効果

「聞き分ける」機能は、人型ロボットだけでなく、多様な分野においても需要がある。「聞き分ける」機能を向上させた視聴覚情報統合技術は、自然環境や災害現場での活用が試みられている。

3D 地図作成法は、熊本大学において熊本大震災後の益城町被災地図に活用され、また、東京工業大学では野鳥観測環境の 3D 地図作成に活用し、3D 地図上に野鳥の鳴交のデータを可視化した。視聴覚情報に基づく位置推定装置 AV-SLAM は、早稲田大学において 4 脚ロボット(ImPACT-TRC)に搭載し、瓦礫現場移動中の AV-SLAM のデモを行い、現場応用の可能性を検証した。

## ④上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な論文リスト(4 報以内)

- [1] Sasaki Y., Kabasawa M., Thompson S., Kagami S., Oro K. “Spherical microphone array for spatial sound localization for a mobile robot”, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012, 6385877, 713-718.
- [2] Sasaki Y., Yoshii K., Kagami S. “A nested infinite Gaussian mixture model for identifying known and unknown audio events”, International Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services, 2013, 6616152.
- [3] Sasaki Y., Hatao N., Tsurusaki S., Kagami S. “Classification and identification of robot sensing data based on nested infinite GMMs”, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014, 6943000, 3162-3167.
- [4] Bando Y., Otsuka T., Itoyama K., Yoshii K., Sasaki Y., Kagami S., Okuno H.G. “Challenges in deploying a microphone array to localize and separate sound sources in real auditory scenes”, ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings, 2015, 2015(August),

7178064, 723-727.

### 3.3.2 利用者指向ディペンダビリティの研究(木下佳樹)

#### (1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

##### ① 研究のねらい

従来議論されているディペンダビリティは、開発者の視点から見た色彩が濃く、要素還元主義的に構成要素を細分化し、その要素のディペンダビリティを向上させればシステム全体のディペンダビリティが向上するという、どのように作るのかといった立場での議論が主であった。ネットワークで接続され、更新も頻繁に行われるなど複雑な現在のシステムには適用し難い点がある。これに加え、コスト・納期など全要素が複雑に絡む要因を考慮しなければならない現実的な制約を考えると、従来と違った視点でディペンダビリティを議論する必要がある。

このため、「利用者」の立場からのディペンダビリティを議論し、「サービスの質」、「ユーザビリティ(使いやすさ)」、「アカウントビリティ(各ステークホルダ間の相互説明責任)」を取り入れたディペンダビリティ概念を構築しなければならない。

この考え方に基づき、DEOS(Dependable Embedded Operating Systems)の基幹となるものとして、「利用者指向ディペンダビリティの概念規定と規格策定」を目指し、利用者指向ディペンダビリティの概念規定の策定、国際的に機能する標準の構築、適合性評価法の研究、システムライフサイクル技術の研究に取り組んだ。研究領域の主題が Dependable Embedded Operating Systems から Dependability Engineering for Open Systems に発展するとともに、「利用者指向ディペンダビリティ」についてもより本質的に「オープンシステムディペンダビリティ(OSD)」に取り組むこととなった。OSDの概念規定を行い、それを反映させたシステムのライフサイクル<sup>108</sup>におけるアシュランスに関して国際標準化を図った。

#### 研究実施体制

・「木下」グループ

研究代表者：木下佳樹(神奈川大学理学部情報科学科教授)

研究項目：オープンシステムディペンダビリティの概念規定と規定策定

##### ② 期間中の研究成果

###### (i) OSD 概念規定の策定

クローズドシステムと対比したオープンシステムの性質が、(a)システムの境界が定義で

<sup>108</sup> システムのライフサイクル：新規システム開発時のステークホルダ合意形成/開発/運用/障害対応、その後に繰り返されるステークホルダ要求変化に伴うステークホルダ合意形成/開発/運用/障害対応を経て、最終的にシステムが廃棄されるまで続くシステムの生涯におけるサイクル

きない、(b)システムの機能が時間とともに変化する、(c)システムの構造(構成要素)ならびに構成要素間の関係が時間とともに変化する、(d)観測者自身がシステムに含まれるため内部観測者視点しか取りえない、(e)要素還元主義<sup>109</sup>が成り立たない、という5項目であることを明らかにした。

この性質に基づき、OSD 概念を「実環境の中で長期的に運用されるシステムが、その目的や環境の変化に対応し、システムに関する説明責任遂行を継続的に支援しつつ、利用者が期待する便益を継続的に提供し続ける能力」と規定した。

さらに、国際標準化を図るため、システムのライフサイクルに対する要件として具現化した。要件は、ライフサイクルが4つのプロセスビュー(合意形成、説明責任遂行、障害対応、変化対応)を備え、4つの性質(intra-system consistency、inter-system consistency、validity、confidence)を満足していることと表現した。

このディペンダビリティの概念は、IEEE の提示した概念や IEC TC56 Dependability の定義にはない、システム目的の経時的変化や各ステークホルダの観点の違いを考慮している点が特徴である。

## (ii)標準化

ディペンダビリティ達成のためには明文化した標準が必要であり、事実上の標準(de fact standard)ではなく、標準制定団体において制定された標準(de jure standard)とすることを目指して標準化活動を進めた。

要件標準制定の場合は、標準制定団体である ISO/IEC JTC1 SC7 Systems and software engineering および IEC TC56 Dependability とし、両団体に委員を派遣したほか、2010年からは TC56 国際委員会でプレゼンテーションなどを重ねた。その結果、TC56 国内委員会を通して提案した IEC 62853/NP Open Systems Dependability が採択され、2013年1月に、各国からの専門家派遣を得て標準策定プロジェクトが発足した。木下は IEC TC56 WG4 の convenor(主査)に就任し、この標準策定プロジェクト(WG4 PT4.8)ではリーダーを務め、OSD 関連標準の開発保守の長期的な環境を整備するとともに、3年以内に標準が発行できる見通しとなった。

また、ディペンダビリティの達成に本質的に影響するアシュランスケースに関する初めての国際標準 ISO/IEC 15026<sup>110</sup>の策定には、木下が Editor(執筆者)として貢献し、また高井利憲<sup>111</sup>(共同研究者)を Part3 の Editor として派遣したが、本研究領域終了後も貢献を続け、現在進行中の同標準改定作業では、木下が Part1、2、4 の Project Editor(執筆取り

<sup>109</sup> 要素還元主義：全体を最小単位まで分解し、そののち合成することにより問題を理解する方法。オープンシステムの場合、どこまで分解すべきかの判断が容易ではないこと、また分解した最小単位が相互に与える影響の把握が容易ではないことから、「要素還元主義が成り立たない」としている

<sup>110</sup> ISO/IEC 15026 Systems and software engineering - Systems and Software Assurance - Part 2 Assurance Case 2011年2月2日発行

<sup>111</sup> 高井利憲：産業技術総合研究所情報技術研究部門研究員

まとめ)を務めている。本標準は、米国 DoD(Department of Defense)、DHS(Department of Homeland Security)などが採用に向けて準備を進めており、今後日本にも大きな影響を与えると予想されていた。10年後の現在、アシュランスケースを中心とするアシュランス活動は、システムライフサイクルプロセスを縦貫する最も重要な活動の一つとみなされている。

ツール標準制定の場合は、規格制定団体である OMG(Object Management Group)および TOG(The Open Group)とし、OMG は木下チームが、TOG は DEOS 研究開発センターが参画した。OMG では、前述のアシュランスケースに関する国際標準 ISO/IEC 15026 について、形式に関する詳細な標準<sup>112</sup>に対してコメントを提出、さらに D-Case in Agda に関連する標準<sup>113</sup>を提案して策定を推進した。

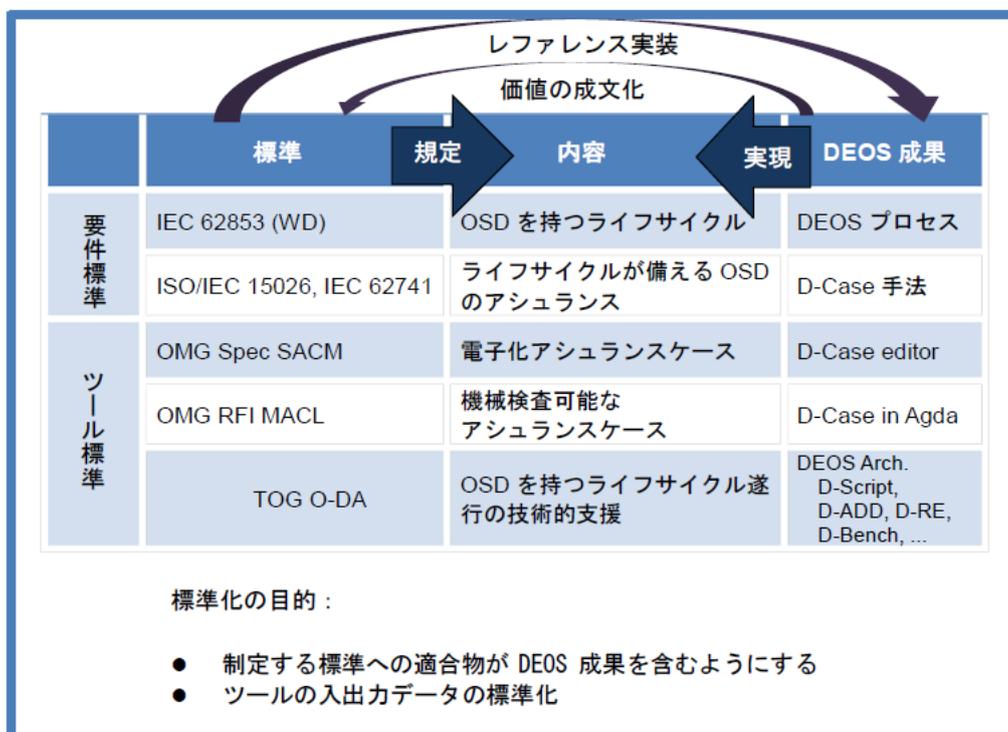


図 3-15 DEOS 標準化戦略<sup>114</sup>

(iii) アシュランスケース<sup>115</sup>

前述の通り、システムのアシュランスは、そのシステムの機能や安全性などについての

<sup>112</sup> Object Management Group Standard, “Structured Assurance Case Metamodel (SACM), Version 1.0”, OMG Document Number: formal/2013-02-01.

<sup>113</sup> Object Management Group Standard, “Machine-checkable Assurance Case Language (MACL)”, OMG CFI(Call for Information).

<sup>114</sup> 本研究課題 研究終了報告書((研究終了報告書 p6 図1 DEOS 標準化戦略))

<sup>115</sup> Kinoshita Y., Takeyama M. “Assurance Case as a Proof in a Theory: towards Formulation of Rebuttals”, Assuring the Safety of Systems Proceedings of the 21st Safety-Critical Systems Symposium, 2013, 205-230.

主張が成り立つことの正当化された納得を与える論証であり、システムアシュランス達成を記す文書がアシュランスケースである。

アシュランスケースは、主張、それを支える証拠と前提、および証拠と前提から主張がどのように導かれるかを示す議論から構成される。アシュランスケースは論証なので数理論理学が有効であり、厳格な論証のための厳密なモデル構築には数学が有効である。複雑かつ大規模で、変化し多様な姿を見せる現代のシステムの「全体的把握」と「詳細で厳格な把握」の両立を目指して、論理学・数学の応用の立場からこの問題に取り組んだ。

アシュランスケースを(a)数理論理学における形式理論、(b)そこでの命題、(c)その証明、の3組で表現する形式アシュランスケースに関する理論を構築した。それを基にアシュランスケースの整合性を機械的に検査する方法を考案し、ソフトウェア D-Case in Agda によって実装して無償公開した。また、この技術を D-Case のみならず一般の文書に適用させる特許<sup>116</sup>を出願した。

#### (iv) OSD 達成のためのガイダンス

国際標準委員会における識者との討論および D-Case 記述実験に基づき、OSD 達成のための D-Case 文書の運用・保守に関するガイダンス<sup>117,118</sup>を作成した。システムのライフサイクル全体にわたる変化対応の手順を纏めたものは世界で初めてである。

### ③研究成果に関連した主な成果論文リスト(3報以内)

- [1] Kinoshita Y., Takai T. “A field-scientific approach to clinico-Informatics: Towards general models of technology transfers”, *Synthesiology*, 2010, 3(1), 36-46.
- [2] Matsuno Y., Nakazawa J., Takeyama M., Sugaya M., Ishikawa Y. “Towards a language for communication among stakeholders”, *Proceedings - 16th IEEE Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing, PRDC 2010*, 2010, 5703232, 93-100.
- [3] Taguchi K., Yoshioka N., Tobita T., Kaneko H. “Aligning security requirements and security assurance using the common criteria”, *SSIRI 2010 - 4th IEEE International Conference on Secure Software Integration and Reliability Improvement*, 2010, 5502855, 69-77.

#### (2) 研究課題終了後の継続と発展状況

---

<sup>116</sup> アシュランス・ケース文書の整合性の機械的検査を、定理証明支援系によって行う手法、発明者：木下佳樹、武山誠、出願人：野間口有、平成 23 年 9 月 6 日、特願 2011-193452

<sup>117</sup> Hirai M., Yuasa Y., Kinoshita Y. “A chain of accountabilities in open systems based on assured entrustments”, *2013 IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops, ISSREW 2013*, 2013.

<sup>118</sup> Yanagisawa Y., Ito T., Takeyama M., Yokote Y. “A new method of consensus building for open systems dependability”, *2013 IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops, ISSREW 2013*, 2013.

## ①研究の継続と発展状況

本研究課題期間中には、JST/A-STEP「モデル化技術によるMCU仕様検証と機能検証の自動化」(2009年度～2011年度)の研究代表者として研究を進め、さらに、科研費挑戦的萌芽研究「多値モデル検査法を用いたモデリングエラーの発見」(研究代表者：筑波大学大学院システム情報工学研究科亀山幸義)(2008年度～2009年度)の研究分担者として研究を進めた。

研究課題終了後は、情報処理推進機構(IPA)/ソフトウェア工学分野の先導的研究支援(RISE)プロジェクト「オープンシステム・ディペンダビリティのための形式アシュランスケース・フレームワーク」(2014年度～2015年度)の研究代表者として研究を進めた。さらに国際共同研究 Lloyd's Register Foundation/Assuring Autonomy International Programme “Towards Identifying and closing Gaps in Assurance of autonomous Road vehicleS (TIGARS)” (2018年度～2019年度)の研究代表者として研究を進めている。

また、国内共同研究では、「議論の枠組みに関する基礎理論および応用に関する研究」(2012年度～2013年度)(共同研究先：情報学研究所・関西大学・東京大学から個人が参加)、「自動車機能安全ケースのためのフレームワークに関する研究」(2014年度～2015年度)(共同研究先：株式会社デンソー)、「平塚市地域防災計画の整合性検査方式の研究」(2014年度～2018年度)(共同研究先：平塚市)、「有機化合物のスペクトルデータベースシステム(SDBS)の帰属、および帰属決定プロセスについてのアシュランスケースの研究」(2014年度～2018年度)(共同研究先：産業総合技術研究所)、「総合信頼性(ディペンダビリティ)確保のための実用的な規範の研究」(共同研究先：株式会社 Symphony)の研究代表者として研究を進めた。

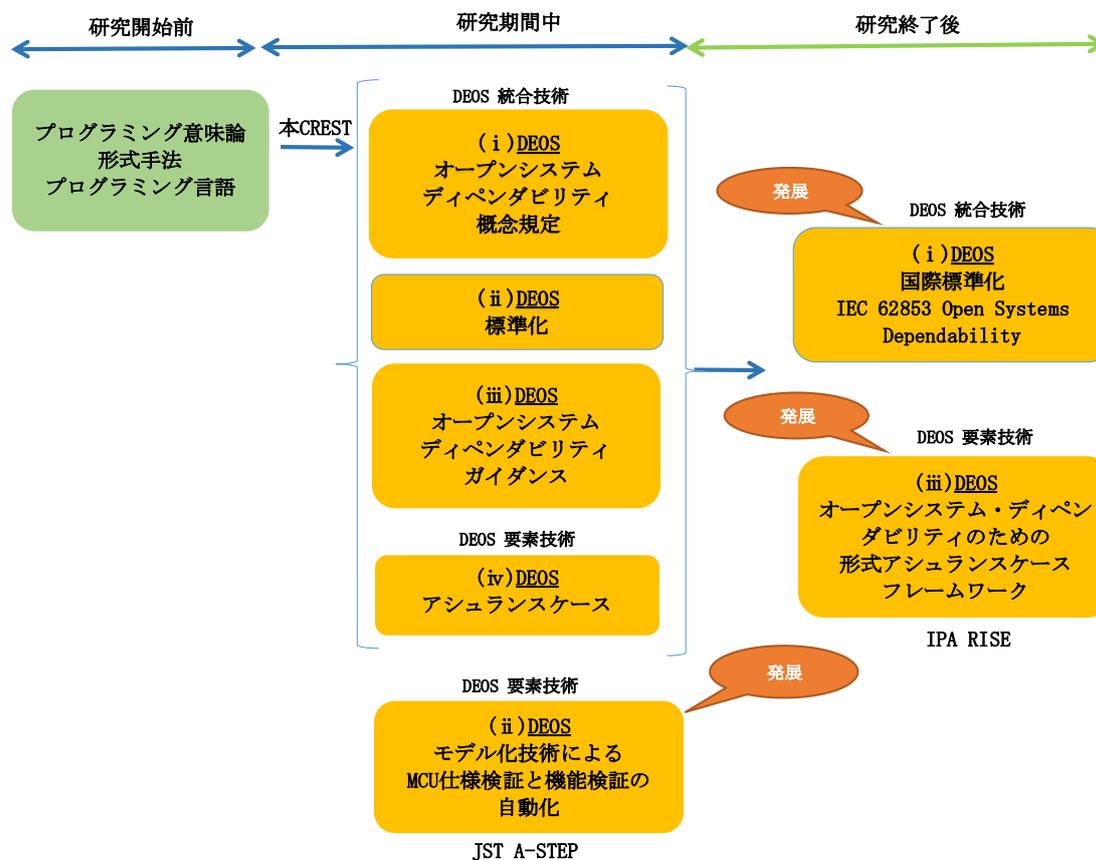


図 3-16 研究助成金と成果の展開状況

研究代表者木下佳樹は、2013年3月に独立行政法人産業技術総合研究所システム検証センター長を辞し、2013年4月より神奈川大学理学部情報科学科教授に就任し、本研究課題の成果を発展させている。

主要な成果は、図 3-16 に示す通り、(i) DEOS の国際標準化、(ii) モデル化技術による MCU (Micro Controller Unit) 仕様検証と機能検証の自動化、(iii) オープンシステム・依存ダビリティのための形式アシュランスケース・フレームワークであり、以下にその詳細を記述した。

#### (i) DEOS の国際標準化<sup>[1]</sup>

DEOS に基づく OSD 標準が、IEC 62853 Open Systems Dependability として 2018 年 6 月 13 日に発行された<sup>119</sup>。この標準の制定は、本研究課題期間中の TC56 国内委員会を通じた提案時から木下が推進してきた。木下は IEC TC56 WG4 の convenor (主査) に就任すると

<sup>119</sup> プレスリリース：「本学木下佳樹教授(理学部情報科学科・プログラミング科学研究所)プロジェクトリーダーによる『国際標準 IEC 62853 Open Systems Dependability』が、2018年6月13日に刊行！—神奈川大学」 2018年6月25日 <https://www.u-presscenter.jp/2018/06/post-39615.html>

もに、2013年に発足したIECの標準策定プロジェクト(WG4 PT4.8)ではリーダーを務めた。PT4.8には武山誠<sup>120</sup>(共同研究者)を初め、他の共同研究者も参加し、標準の刊行を実現した。

(ii) モデル化技術によるMCU仕様検証と機能検証の自動化<sup>121</sup>

MCU開発においては、高信頼性を達成するための開発技術が重要な課題であり、形式手法が有力であるといわれている。MCUに関する典型的な不具合事例に対して、形式手法を用いて分析評価を行った。その結果、信頼性達成阻害要因が同定でき、形式手法導入の有効性が確認できた。

さらに、車載システムに用いられるCAN(Controller Area Network)プロトコル制御MCUの検証を例として、形式手法による検証項目自動生成器を試作した結果、従来法では生成しない重要な検証項目が生成でき、その有効性が確認できた。

(iii) オープンシステム・ディペンダビリティのための形式アシュランスケース・フレームワーク<sup>122</sup>

アシュランスケースの整合性をコンピュータによって検査することを可能とするため、形式言語により記述する形式アシュランスケース・フレームワーク(FFO: Formal assurance case Framework for Open Systems Dependability)を開発した。

(a) FFOは、アシュランス議論の記述に必要な用語定義を与える概念体系と、議論の部品や組み合わせ方のテンプレートライブラリからなり、本研究ではFFOを、DEOS基本構造を形式言語Agdaにより形式化したFFO Basic Patternとして提供した。このFFO Basic Patternに基づき、特定目的(車載システム向けと防災システム向け)のFFOを開発した。

(b) 車載システム向けとしては、FFO/AFSCF(Automotive Functional Safety Case Framework)議論モデルを開発した。FFO/AFSCF議論モデルは、機能安全性の議論(IS026262 適合)と継続的変化対応を考慮したOSDの議論(IEC62853 適合)を枠組としている。

(c) 防災システム向けには、FFO/6W1H(Who、What、Whom、When、Where、Why、How)モデル<sup>[3]</sup>、およびFFO/DPP(Decision、Preparation、Provision)議論モデルを開発した。

(d) さらに、上記の特定目的の形式アシュランスケース・フレームワークの記述実験を行い、有効性を確認した。

## ② 科学技術の進歩への貢献

<sup>120</sup> 武山誠：神奈川大学研究員

<sup>121</sup> JST/A-STEP「モデル化技術によるMCU仕様検証と機能検証の自動化」事後評価報告書  
<http://www.jst.go.jp/a-step/hyoka/pdf/20131/AS2114073A.pdf>

<sup>122</sup> 情報処理推進機構/ソフトウェア工学分野の先導的研究支援(RISE)プロジェクト「オープンシステム・ディペンダビリティのための形式アシュランスケース・フレームワーク」成果報告書  
<https://www.ipa.go.jp/files/000052722.pdf>

前述の通り、アシュランスケースを(a)数理論理学における形式理論、(b)そこでの命題、(c)その証明、の3組で表現する形式アシュランスケースに関する理論を構築した。

DEOS プロセスでは、業務委託の際などに関係者間で行った議論を、この理論に基づいた形式アシュランスケースとして記述することとした。これにより、単に業務や成果物の要件定義だけではなく、その要件で委託者の要求が十分満足されること(合目的性)や、受託側が与えられたリソース下でその要件を満たせること(実現可能性)など、要件定義の根拠まで、後に追跡可能な形で残すことができるようになった。

### ③社会・経済への波及効果

#### (i) DEOS の標準化

従来、ディペンダビリティは開発者視点で議論されることが多く、ディペンダビリティの根拠は、システムの仕様が正しく実装されることとされてきた。DEOS では、利用者視点とシステムのライフサイクル(企画/開発/運用/改善/成長など)を重視した OSD 概念を定式化した。ディペンダビリティのこの概念は、IEEE の提示した概念や IEC TC56 Dependability の定義にはない、経時的变化や多様な価値観を考慮している。

DEOS に基づく標準 IEC 62853 Open Systems Dependability は、IEC TC56 に対して日本から初めて提案した標準であり、ディペンダビリティの根拠を説明責任の所在と遂行におき、OSD を確実に実現するためのガイダンスの役割を果たしている。

IEC 62853 はAIを使った自動運転やロボットをはじめとする自律システムを社会がどのように受容していくのか、その方針を与えうるものとして注目されている。木下が City University London、名古屋大学、Adelard LLP、ヨーク大学、Lloyd's Register Foundation と取り組んでいる自動車の AI 搭載自動運転のアシュランスに関する日英国際共同研究“TIGARS”では、標準化活動による社会展開も行おうとしており、本研究領域の活動で培った標準化のノウハウと人的資源が活用されている<sup>123</sup>。

#### (ii) 形式アシュランスケース

形式アシュランスケースを用いた「議論の枠組みに関する基礎理論および応用に関する研究」を行い、コンピュータ処理を行うための定式化(モデル化)を図り、実証実験<sup>[3],[4]</sup>により、その有効性を確認するとともに、アシュランスケースの整合性をコンピュータによって検査する形式アシュランスケース・フレームワークを開発して実用化を図った。

その結果に基づき「自動車機能安全ケースのためのフレームワークに関する研究」、「平塚市地域防災計画の整合性検査方式の研究」、「有機化合物のスペクトルデータベースシステム(SDBS)の帰属、および帰属決定プロセスについてのアシュランスケースの研究」など、

<sup>123</sup> 研究代表者木下佳樹インタビュー結果

具体的な応用に取り組み有効性を示した。

また最近では、神奈川県が政策に対する透明化や説明責任を果たすため、アシュランスケースの考えを取り入れる計画があるなど、多岐にわたる分野での活用が検討されている<sup>123</sup>。

#### ④上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な論文リスト(4報以内)

- [1] 原田文明, 木下佳樹, 武山誠 “ディペンダビリティに関する国際標準化の動向：IEC TC56 の概要と国際会議での動向(信頼性)” 電気情報通信学会技術研究報告, 2015, 115(379), 19-25.
- [2] Kinoshita S., Kinoshita Y. “The 6W1H model as a basis for systems assurance argument”, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2016, 9923LNCS, 63-74.
- [3] Kinoshita Y., Takeyama M., Hirai M., Yuasa Y. “A Formal Assurance Case for a File Sharing Service”, Science Journal of Kanagawa University, 2014, 25, 39-49.
- [4] Moriguchi S., Nakahara H., Kinoshita Y. “A Case Study of a Formal Assurance Case for Demonstration of Embedded Systems”, Science Journal of Kanagawa University, 2014, 25, 51-56.

#### ⑤その他

木下は「ISO/IEC 15026 Systems and software engineering - Systems and Software Assurance - Part 2 Assurance Case」の発行に対して、2012年度情報規格調査会(ITSCJ)国際規格開発賞を授与された。さらに、open systemに関する新国際規格開発への貢献が認められ、2018年9月にIEC(International Electrotechnical Commission)よりIEC1906賞を授与された。

また、2018年6月にDEOS協会の理事に就任している。

### 3.3.3 Security Weaver と P スクリプトによる実行中の継続的な安全確保に関する研究 (倉光君郎)

#### (1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

##### ① 研究のねらい

ディペンダビリティ要素技術開発として、組込み OS における高信頼なスクリプト言語処理系を開発し、このスクリプト言語処理系を用いて、D-Case<sup>124</sup>の運用ツールである D-Script<sup>125</sup>の実現に取り組んだ。

さらに、DEOS (Dependable Embedded Operating Systems) Process/Architecture チームのリーダーとして、各研究チームが開発した要素技術の統合、整合、実用に向けた統合システムの開発を行うとともに、DEOS 要素技術である D-Case パターンの具体化、d\*フレームワークの提案、D-ADD<sup>126</sup>の開発に取り組んだ。

#### 研究実施体制

##### ・「倉光」グループ

研究代表者：倉光君郎(横浜国立大学大学院工学研究院准教授)

研究項目：DEOS プロセス/DEOS アーキテクチャの実用化、D-Script 言語設計と実証実験

##### ・「山本」グループ

主たる共同研究者：山本修一郎(名古屋大学情報戦略室教授)

研究項目：発展型 DEOS プロセス・アーキテクチャ、D-Case パターン実証実験

##### ・「永山」グループ

主たる共同研究者：永山辰巳(株式会社 Symphony 代表取締役)

研究項目：D-ADD (Agreement Description Data Base)の研究開発、DEOS プロセス実現のための D-ADD 機能開発

##### ・「恩田」グループ

主たる共同研究者：恩田昌徳(富士ゼロックス株式会社インキュベーションセンターグループ長)

研究項目：エビデンス文書の管理支援、実証実験

##### ・「松野」グループ

主たる共同研究者：松野裕(電気通信大学情報システム学研究科助教)

研究項目：D-Case の実用化

##### ・「村井」グループ

<sup>124</sup> D-Case：ステークホルダ間の合意を形成するための方法およびツール

<sup>125</sup> D-Script：アプリケーションプログラムの動的対応スクリプト

<sup>126</sup> D-ADD：ステークホルダ間の合意の記録と、その証拠として用いられるデータベース

主たる共同研究者：村井純(慶應義塾大学環境情報学部学部長・教授)

研究項目：ディペンダブルオープンシステム創成技術

なお、図 3-17 に、「DEOS 領域全体と倉光チームの研究構想」として、倉光チーム内の研究分担グループ(倉光 G(グループ)、山本 G、永山 G、恩田 G、松野 G、村井 G)の研究課題と最終成果との関係、および他のチーム(第 1 期研究チーム、加賀美 T(チーム)、木下 T、河野 T)との関係を示した。

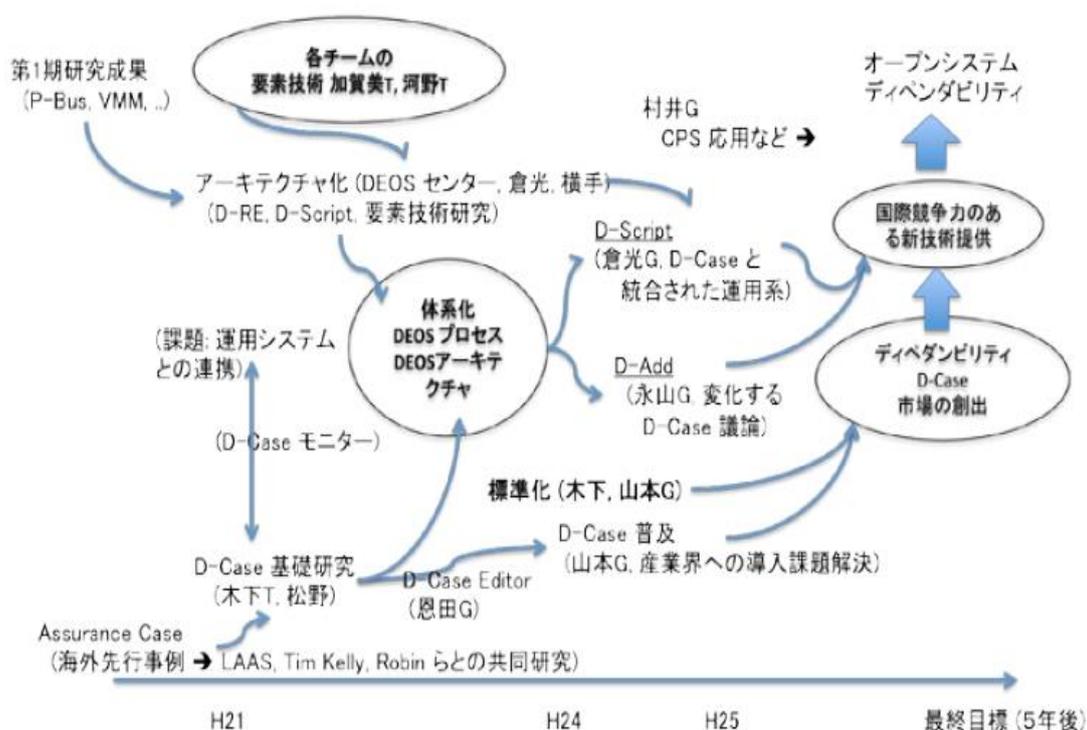


図 3-17 DEOS 領域全体と倉光チームの研究構想<sup>127</sup>

## ②期間中の研究成果

(i) 組込み OS における高信頼なスクリプト言語処理 Konoha の開発<sup>[1], 128</sup>

従来、スクリプト言語は、シェルや Perl、Ruby を含め、全て動的型付け<sup>129</sup>で実装されており、実行前に検証を行うことが出来なかった。DEOS プロセスが目指すライフサイクルにわたる品質管理を行うためには、実行前に検証ができる技術は重要である。特に OS やシステムプログラムは厳密性が求められるため、実行前にスクリプトの誤りを機械検証可能に

<sup>127</sup> 本研究課題 研究終了報告書(p5 図 1)

<sup>128</sup> 倉光君郎 “拡張性のある組込みアプリケーションを実現するスクリプティング言語の開発”，情報処理学会誌(組込みシステム特集号)，2010，51(12)，2185-2194.

<sup>129</sup> 動的型付け：変数やサブルーチンの引数などの型を、プログラムの実行前にあらかじめ決めない方式

する静的型付け<sup>130</sup>を導入した高信頼なスクリプト言語処理系の開発に取り組み、試作言語 Konoha を開発した。

(ii) D-Script の開発<sup>[2]</sup>

DEOS の合意形成ツールである D-Case の運用ツールとして D-Script の実現に取り組んだ。D-Script は合意系と運用系の 2 重構造とし、合意系ではステークホルダの合意形成に基づくディペンダビリティを満たすアクションを記述する機能を果たし、運用系では合意系で記述したアクションを実行する機能を果たすこととした。

運用系の静的型付け D-Script Engine を開発するため Konoha をオープンソース公開し、関係機関や産業界からのフィードバックに基づき、Konoha をベースとした D-Shell を開発した。D-Shell は、静的型付けだけでなく、カーネルレベルのモニタリングによるエラー解析、説明責任性を保証する対障害性のあるレポート機能などを持つ、高信頼な処理系である。

DEOS では、合意系 D-Script を用いた合意形成結果は D-ADD に格納される。運用系 D-Script は、図 3-18 に示す通り、D-RE (DEOS Runtime Environment)<sup>131</sup>上でアプリケーションプログラムを制御し、合意されたアクションを実行するとともに実行結果を D-Box<sup>132</sup>に格納し、これらのデータが再び D-Case の議論に用いられる仕組みとなっている。

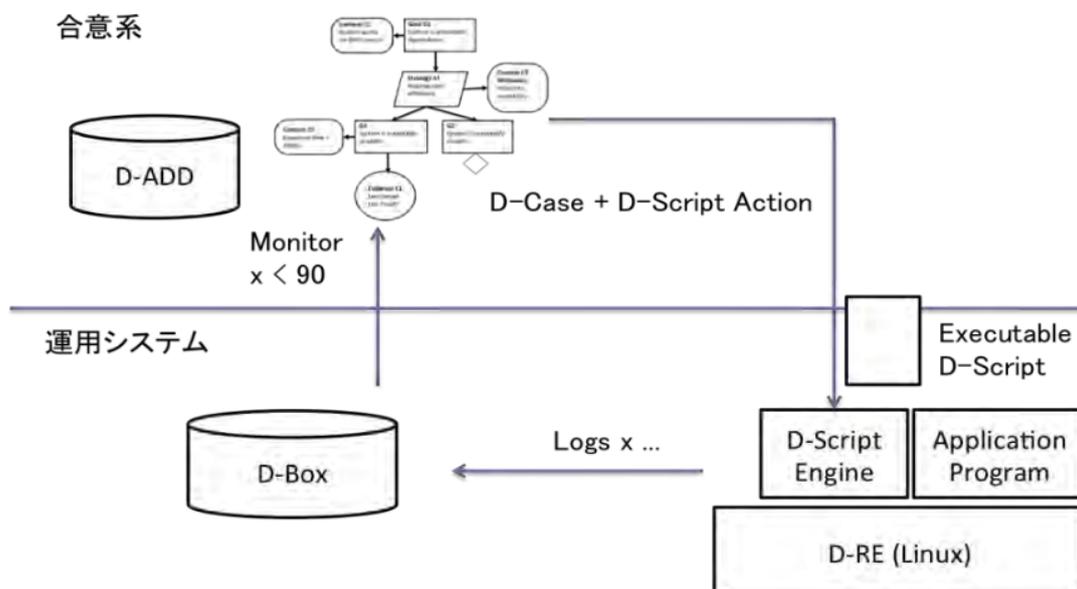


図 3-18 D-Script 全体図<sup>133</sup>

<sup>130</sup> 静的型付け：変数やサブルーチンの引数などの型を、プログラム定義時に決める方式

<sup>131</sup> D-RE：DEOS を実現するサービスを提供するための実行環境

<sup>132</sup> D-Box：D-RE 内のデータ格納領域

<sup>133</sup> DEOS プロジェクト 研究成果集 (p134 図 7-1)：

<http://www.jst.go.jp/crest/crest-os/osddeos/data/DEOS-FY2013-SS-01J.pdf>

### (iii) d\*フレームワークの提案<sup>[3]</sup>

部品調達や外部システムと連携するシステムでは、相互依存関係の管理が重要になる。このため、システムが必要とする相互依存関係のディペンダビリティならびに、システムと相互依存関係にある全てのシステムの内部のディペンダビリティを確認するための新たな手法として d\*フレームワークを提案した。d\*フレームワークは、システムと相互依存関係にある全てのシステムやモジュール、コンポーネントの相互関係を明示的に図式化できるという特徴がある。これらの有用性が国際規格制定団体である TOG(The Open Group)でも認識され、O-DA(Open Dependability through Assuredness)標準の一部として採用された。

### (iv) D-Case パターンの具体化

D-Case を産業界で普及させるため、実践的な手法として D-Case パターンを(a)表記法パターン、(b)参照モデルパターン、(c)条件パターン、(d)推論パターン、(e)証拠パターン、(f)再利用パターンの 6 パターンに分類し、約 50 種類の D-Case パターンを系統的に蓄積・活用できることを明らかにした。また、組込みシステム開発への D-Case パターンの適用実験により有効性を確認した。

D-Case パターンは、アシュランスケースにおける議論分解パターンの一種である。しかし、従来のアシュランスケースの議論分解パターンは個別的であったため数的にも不十分であった。6 パターン分類に基づく D-Case パターンはこの問題を解決するものであり、系統的なパターンの整理は世界でも初めてであった。

### (v) D-ADD(Agreement Description Database)の開発

D-ADD は、DEOS プロセス実行時のステークホルダによる合意の記録とその証拠として用いられるデータベースである。モデル部、スクリプト処理部、永続化部の 3 部から構成されており、D-Case とその付帯情報、およびそれらの関係と変化を時系列に記録する。DEOS プロセスを構成する各サブシステムに対して、プロセス間での D-Case を中心としたデータの一貫性を保証しており、DEOS プロセスを運用するために必要な情報をステークホルダに提供し、これらの情報は D-Case の議論に用いられる。

システムライフサイクルにおいて、開発や改善時の合意の記録とその証拠として用いられるだけでなく、障害発生時には、D-ADD を基盤としたツールを用いることにより、直接原因の特定を早くできること、修正すべき箇所の特定制が早くできることなどの効果もある。

### (vi) DEOS 統合技術の開発

ロボットや自動車 ACC(Adaptive Cruise Control)システムなど、多岐にわたる DEOS の実証実験を行い、DEOS プロセス、DEOS アーキテクチャ、および DEOS 要素技術である D-Case、D-RE、D-Script、D-ADD などが有効に機能することを確認した。

### ③研究成果に関連した主な成果論文リスト(3報以内)

- [1] Kuramitsu K. “Konoha: Implementing a static scripting language with dynamic behaviors”, Workshop on Self-Sustaining Systems, S3 2010 - Proceedings, 2011, 21-29.
- [2] Kuramitsu K. “D-Script with DEOS Process”, Proceedings - The 3rd International Workshop on Open System Dependability, in conjunction with ISSRE2013, 2013.
- [3] Saruwatari T., Hoshino T., Yamamoto S. “Evaluation of an assurance case development method (d\*)”, Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, 2010, 240, 72-80.

## (2) 研究課題終了後の継続と発展状況

### ①研究の継続と発展状況

本研究課題期間中には本研究課題と並行して、文部科学省/革新的・先導的教育研究プログラムの開発推進/21世紀COEプログラム/情報・電気・電子「情報通信技術に基づく未来社会基盤創生」(2007年度～2011年度)(研究代表者：横浜国立大学大学院工学研究院知的構造の創生部門電気電子と数理情報分野河野隆二)の共同研究者として研究を進めた。

2017年度からは、文部科学省/情報技術人材育成のための実践教育ネットワーク形成事業 enPit-Pro「Open IoT教育」(2017年度～2021年度)(研究代表者：東洋大学情報連携学部 坂村健)において、横浜国立大学の代表としてセキュアプログラミング講座を担当し、本研究課題の研究成果に基づき、IoT分野におけるセキュリティとディペンダビリティの発展講義を主催している。

本研究課題終了後、研究代表者倉光君郎は、D-Caseによるオープンシステムディペンダビリティを実現するためには、D-Caseに記載された日本語で書かれた技術文書の意味を理解して安全に処理する基盤技術の技術革新が必要であると考え、解析表現文法を基盤とした構文解析技術とブロックチェーン技術による契約の自動化の観点から研究に取り組んでいる。2018年9月には横浜国立大学から、日本女子大学理学部に新設された情報コースの教授に就任し、研究を継続している。また、DEOS協会の学会会員としてDEOSの普及・発展に務めている。

主要な成果は、図3-19に示す通り、(i)日本語技術文書の構文解析技術の開発、(ii)ブロックチェーンによる契約の自動化であり、以下にその詳細を記述した。

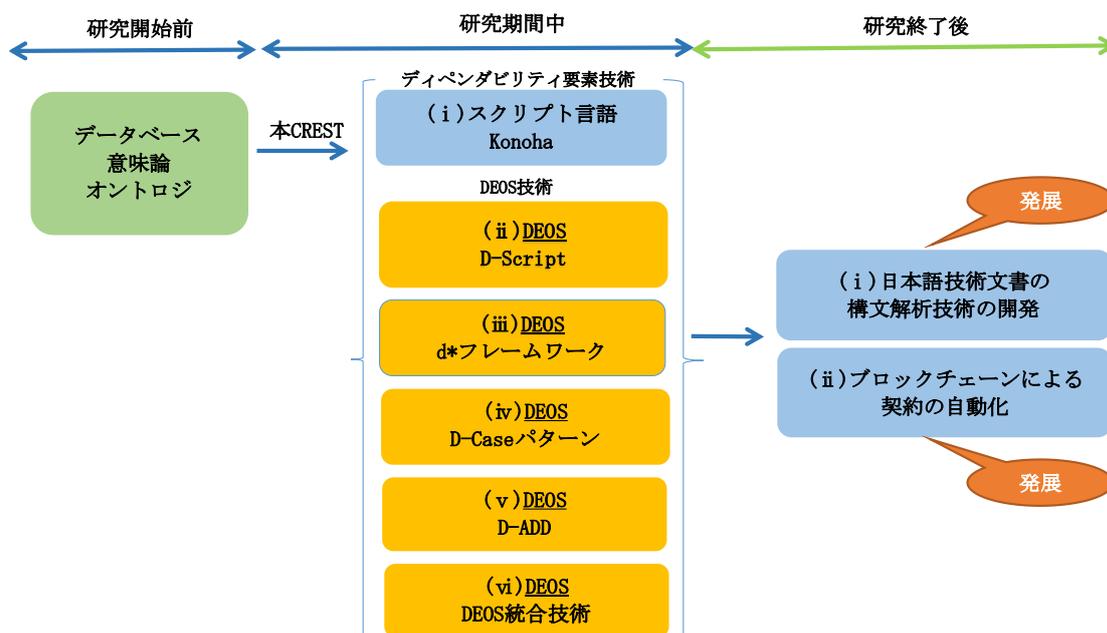


図 3-19 研究助成金と成果の展開状況

PEG (Parsing Expression Grammar) は解析表現文法と呼ばれ、曖昧さが存在しないことから、コンピュータ言語の構文解析に向いている。コンピュータ言語の構文解析は、文字列(ソースコード)から字句(トークン)の列を取り出す前処理である字句解析と、そのトークン列を受け取り、構文木(構文解析結果をツリー構造で表したもの)を作るなどの後処理の2段階に分けられるが、PEGはこの前処理と後処理を統合して行う新しい手法である。

PEGは宣言的であること、アプリケーションに用いているプログラミング言語から独立していることから、一旦作成すると他のプログラミング言語系にも転用できるなどの利点があり、多くの構文解析器(Parser)が開発されている。Packrat Parsingは、線形処理時間を保証する構文解析アルゴリズムである。

#### (i) 日本語技術文書の構文解析技術の開発

解析表現文法は、2004年に提案された新しい形式文である。2000年代後半から急速に技術開発が進んでいる。解析表現文法の特徴は、シンプルかつ表現力が高く、曖昧さがなくてコンピュータ言語の処理に向いている点である。一方、自然言語処理は曖昧さが存在し、日本語技術文書の構文解析にはそのままでは利用できない。次の方向から研究開発を進めている。

##### (a) 高速なアルゴリズムの開発<sup>[1] [4]</sup>

日本語文法の特徴は、曖昧さが含まれることである。これは、構文解析ではバックトラック処理に相当し、入力長に対し最悪指数時間処理を要する。そのため、バックトラックを回避するため、ビッグデータ解析で利用されるストリームアルゴリズムを応用した新し

い高速アルゴリズムの開発をおこなった。これにより、メモリ使用量を一定にして、線形解析時間が保証される Packrat Parsing の実現を達成した。

(b) 文脈に依存した構文解析処理 [2], 134, 135

解析表現文法は、自由文脈文法と同じく、文脈に依存しない構文解析を扱うクラスである。しかし、日本語文法は、文脈に依存して意味が変わることがよくある。このような文脈に応じた自然言語処理を行うため、解析表現文法に純宣言的なアノテーションを拡張し、扱えるようにした。これにより、解析表現によって処理できない文脈に依存する文法の解析が可能になり、C、C#、Python などの構文解析で検証された。

(c) 曖昧さを含めた PEGwUC (PEG with Unordered Choice) [3], 136

従来の PEG では、「選択の順序 (ordered choice)」が重要であり、これが文法の決定性のもとになっている。このため「選択の順序」が影響を及ぼさない拡張機能を開発し、この機能を導入した PEGwUC を構築した。さらに、一般化構文解析技法のフォレストツリーを導入することで、曖昧さを含んだ構文が書けるようになった。

(ii) ブロックチェーンによる契約の自動化

2017 年からは、D-Case/D-Add アーキテクチャの更新を考えて、ブロックチェーンによる契約の自動化プロジェクトを立ち上げている。特に、2015 年、チューリング完全な計算力を持つ「ブロックチェーン<sup>137</sup>」基盤である「イーサリアム<sup>138</sup>」が登場し、より汎用的な分散コンピューティング環境として産業界のみならず研究者からも高い関心を集めている。有名な仮想通貨は、ブロックチェーン上の「契約」アプリケーションの実装となる。

最新の進捗では、日本語による契約を記述し、「イーサリアム」上でコンピュータ言語として実行可能な厳密さを両立させる試作を報告<sup>139</sup>している。

## ② 科学技術の進歩への貢献

前述の通り、PEG は曖昧さが存在しないことから、コンピュータ言語の構文解析に向い

<sup>134</sup> Kuramitsu K. “A symbol-based extension of parsing expression grammars and context-sensitive packrat parsing”, SLE 2017 - Proceedings of the 10th ACM SIGPLAN International Conference on Software Language Engineering, co-located with SPLASH 2017, 2017, 26-37.

<sup>135</sup> Kuramitsu K. “Fast, flexible, and declarative construction of abstract syntax trees with PEGs”, Journal of Information Processing, 2016, 24(1), 123-131.

<sup>136</sup> Kuramitsu K. “Fast, flexible, and declarative construction of abstract syntax trees with PEGs”, Journal of Information Processing, 2016, 24(1), 123-131.

<sup>137</sup> 「ブロックチェーン」：インターネットなどのオープンなネットワーク上で、高い信頼性が求められる金融取引や重要データのやり取りなどを可能にする分散型台帳技術のこと。「ブロック」と呼ばれるデータの単位を一定時間ごとに生成し、鎖(チェーン)のように連結していくことにより、データを保管していくデータベースである

<sup>138</sup> 「イーサリアム」：「ブロックチェーン」の代表的なものとして「ビットコイン」と「イーサリアム」がある。「ビットコイン」は通貨の台帳であるのに対して、「イーサリアム」はプログラムの台帳ともいえるべきものである

<sup>139</sup> 渡邊庸輔、倉光君郎「日本語スマートコントラクト言語の設計と開発」情報処理学会プログラミング研究会 (PR0123), 2019 年 3 月 (予定)

ている分析的形式文法であり、一旦作成すると、他のプログラミング言語系にも転用できるなどの利点がある。Packrat Parsing は、この構文解析に多く用いられている構文解析アルゴリズムである。

従来の PEG の課題に対して、文法構成表現や文字列認識効率の向上技術、文法解読性能の向上技術、「選択の順序」を意識することなく記述できる技術、一貫性を自動的に管理できる新たな AST (Abstract Syntax Tree) 構築機構、Packrat Parsing の処理性能向上技術の開発により、機能性、利便性を向上させ、PEG 実用化の道を拓いた。

### ③社会・経済への波及効果<sup>140</sup>

D-Case を発展させるためには、D-Case で記述した日本語の文章をコンピュータが読み取れるようにすることが重要であると考えられる。一般的な自然言語には多くの曖昧さがあるが、D-Case のような業務に使う文書では、曖昧さの少ないしっかりとした自然言語が使われている。このような曖昧さの少ない自然言語の構文解析が可能になれば、自然言語と人工言語(コンピュータ言語)を一緒にして機械処理することが可能となる。

この技術を用いることにより、D-Case に限らず一般に多く使用されている仕様書を読み取って機械処理を行い、その内容の調査(機能の欠落や整合性の確認など)を自動的に行えるようになる。

また、コンピュータ言語の構文解析は、例えばプログラミング言語のコンパイルや、インターネットの Web ページやメールアドレスを表す URL の文字列解析などに用いることで、自動的な検査機能が向上するため、その応用範囲は広い。

また、「ブロックチェーン」における次の技術とされる「イーサリアム」にも取り組んでいる。現在ブロックチェーンでは、処理がプログラミング言語で記述されているが、これを自然言語に近い言語で記述することで、電子的契約の決済に関する技術を向上させる技術の開発にも取り組んでいる。D-Case や D-RE はブロックチェーンと親和性があるので、D-ADD をブロックチェーンで作成し、この技術を応用することも考えられる。

### ④上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な論文リスト(4 報以内)

- [1] Kuramitsu K. “Nez: Practical open grammar language”, Onward! 2016 - Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on New Ideas, New Paradigms, and Reflections on Programming and Software, 2016, 29-42.
- [2] Matsumura T., Kuramitsu K. “A declarative extension of parsing expression grammars for recognizing most programming languages”, Journal of Information Processing, 2016, 24(2), 256-264.
- [3] Chida N., Kuramitsu K. “Parsing expression grammars with unordered choices”, Journal of Information Processing, 2017, 25, 975-982.
- [4] Kuramitsu K. “Packrat parsing with elastic sliding window”, Journal of Information Processing, 2015, 23(4), 505-512.

<sup>140</sup> 研究代表者倉光君郎インタビュー結果

#### ⑤その他

倉光は「ユビキタス環境のためのスクリプト言語の設計」(Konoha スクリプティング言語)に対して、2008年度情報処理学会山下記念研究賞を授与された。

### 3.3.4 耐攻撃性を強化した高度にセキュアな OS の創出 (河野健二)

#### (1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

##### ① 研究のねらい

既存 OS が提供するセキュリティ機構と、実際の情報システムが求めているセキュリティ機構とのギャップを埋める高セキュア OS の創出を図るため、最新のハードウェア技術を最大限に活用した系統的かつ体系的な統合セキュリティ機構の実現を目指した。

Linux ベースの OS を対象として、OS カーネルそのものの健全性を担保するためのディペンダビリティ要素技術(マルウェアの検出機構、障害の予兆検出、健全性回復機構など)、さらに、これらの技術を用いた DEOS プロセスにおける仮想マシンモニタの開発に取り組んだ。

##### 研究実施体制

###### ・「河野」グループ

研究代表者：河野健二(慶應義塾大学准教授)

研究項目：マルウェアの検出機構、健全性回復機構、障害の予兆検出

###### ・「光来」グループ

主たる共同研究者：光来健一(九州工業大学情報工学研究院准教授)

研究項目：健全性回復機構、セキュリティ VM アーキテクチャ

###### ・「山田」グループ

主たる共同研究者：山田浩史(東京農工大学大学院工学研究院准教授)

研究項目：健全性回復機構、高速アップデート機構

##### ② 期間中の研究成果

ディペンダビリティ要素技術の開発に取り組み、以下の成果を挙げた。図 3-20 に示す通り、DEOS プロセスでは D-Visor が仮想マシンモニタであり、D-System Monitor が仮想マシン(監視 VM)である。

- (a) 仮想マシンモニタの高速なソフトウェア若化手法
- (b) OS カーネルの高速なソフトウェア若化手法
- (c) エラーの波及度に基づく OS カーネル障害の分類
- (d) 仮想マシンを用いたきめ細やかなパケットフィルタリング

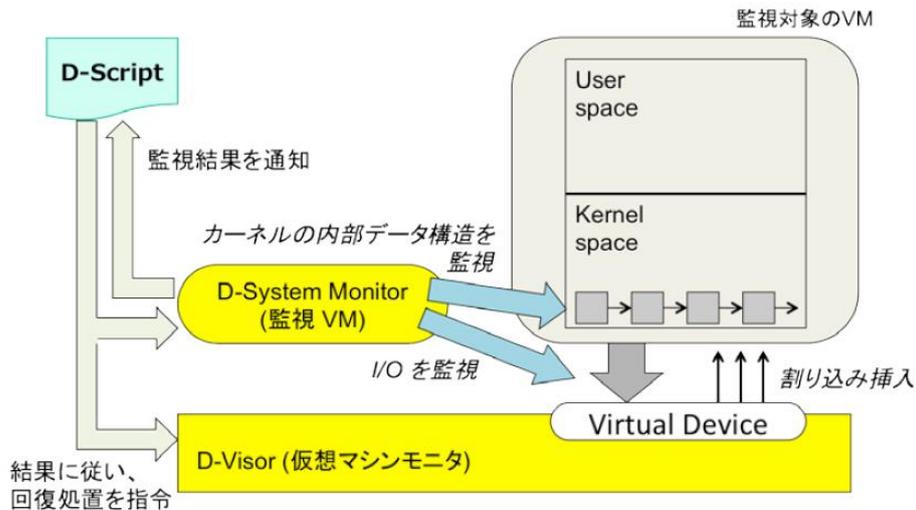


図 3-20 D-Visor と D-System Monitor<sup>141</sup>

(i) 仮想マシンモニタの高速なソフトウェア若化手法<sup>[1]</sup>

仮想マシンモニタにおけるソフトウェアエイジング<sup>142</sup>の問題を解決するために、ソフトウェア若化と呼ばれる手法が提案されている。ソフトウェア若化手法として再起動がよく用いられるが、仮想マシンモニタを再起動すると、その上で動作している多くの OS の再起動が必要になる。仮想マシンモニタ上で動作している OS のメモリ内容を維持することで、仮想マシンモニタだけを効率よく再起動する高速なソフトウェア若化手法を提案した。

仮想マシンモニタの高速な再起動を実現した先駆的な研究であり、提案手法を用いることにより、ダウンタイムを最大 74%削減でき、クラスタ環境においても仮想マシンのマイグレーションを行うより高いトータルスループットを達成できた。

(ii) OS カーネルの高速なソフトウェア若化手法<sup>[2]</sup>

OS の複雑化に伴い、OS 内のバグによるクラッシュや停止がシステムの可用性を脅かしている。OS の停止はその上で動作しているプロセス全体の停止を意味する。OS の停止から復旧する手法として、OS の再起動は単純かつ強力な手法である。この OS の再起動を高速に行う新たな手法「Phase-based Reboot」を提案した。

「Phase-based Reboot」では、OS の起動シーケンスをいくつかのフェーズに分割して状態を保存する。次の再起動の際に同じフェーズを通過する場合、実行する代わりに保存した状態を復元する。この機能を Xen 3. 4. 1 上で動作する Linux 2. 6. 18 に実装して評価した結果、OS 再起動の停止時間を通常対比 36. 3%から 93. 6%削減することができた。

<sup>141</sup> 本研究課題 研究終了報告書(研究終了報告書 p9 図1 D-Visor と D-System Monitor)

<sup>142</sup> ソフトウェアエイジング：動作しているソフトウェアの状態が次第に劣化していく現象。メモリの開放し忘れや、オープンしたファイルの閉じ忘れなどのバグのためにシステムの性能が次第に低下していく。仮想化システムは長時間連続で運用されることが多いため、ソフトウェアエイジングが発生しやすい

(iii) エラーの波及度に基づく OS カーネル障害の分類<sup>[3]</sup>

健全性回復機構を実現する上で、OS カーネルがバグを実行した際に、エラー伝播情報(どのような過程で障害に至るか)は重要な意味を持っている。カーネル内におけるエラー伝播がプロセス・コンテキストに閉じるか閉じないかという新たな視点に基づいて障害を分析し、OS カーネル全体にエラーが伝播する「カーネルグローバル」、バグを実行したプロセスのみにエラーが伝播する「プロセスローカル」に分類した。

(iv) 仮想マシンを用いたきめ細やかなパケットフィルタリング<sup>143</sup>

仮想マシン内のプロセスの通信状況を監視することで、攻撃を受けているプロセス宛てのパケットをフィルタする手法を提案した。IP やポート単位でなく、プロセス単位でパケットをフィルタすることで、被害を受けていないプロセスは通常通りのサービスを展開することができる。

### ③研究成果に関連した主な成果論文リスト(3 報以内)

- [1] Kourai K., Chiba S., “Fast software rejuvenation of virtual machine monitors”, IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2011, 8(6), 5467092, 839-851.
- [2] Yamakita K., Yamada H., Kono K. “Phase-based reboot: Reusing operating system execution phases for cheap reboot-based recovery”, Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks, 2011, 5958216, 169-180.
- [3] Yoshimura T., Yamada H., Kono K. “Is Linux Kernel Oops Useful or Not?”, Proceedings of the 8th Workshop on Hot Topics in System Dependability, 2012.

## (2) 研究課題終了後の継続と発展状況

### ①研究の継続と発展状況

本研究課題期間中には本研究課題と並行して、科研費基盤研究(C)「クラウド環境におけるメニーコア向け省電力仮想マシン・スケジューラ」(2011 年度～2013 年度)の研究代表者として研究を進めた。また、科研費特定領域研究「情報爆発に対応する新 IT 基盤研究支援プラットフォームの構築」(2006 年度～2010 年度)(研究代表者: 国立情報学研究所安達淳)の連携研究者として、科研費特定領域研究「情報爆発に対応する高度にスケーラブルでセキュアなソフトウェア構成・更新方式」(2006 年度～2010 年度)(研究代表者: 東京工業大学柴山悦哉)、総務省 ICT 重点技術の研究開発プロジェクト「クラウドサービスを支える高

<sup>143</sup> Kourai K., Azumi T., Chiba S. “A self-protection mechanism against stepping-stone attacks for IaaS clouds”, Proceedings - IEEE 9th International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing and IEEE 9th International Conference on Autonomic and Trusted Computing, UIC-ATC 2012, 2012, 6332045, 539-546.

信頼・省電力ネットワーク制御技術の研究開発(環境対応型ネットワーク構成シグナリング技術)」(2010年度)(研究代表者:慶應義塾大学山中直明)、総務省 ICT 重点技術の研究開発プロジェクト「広域災害対応型クラウド基盤構築に向けた研究開発(環境対応型ネットワーク構成シグナリング技術)」(2011年度~2014年度)(研究代表者:慶應義塾大学山中直明)の共同研究者として研究を進めた。

本研究課題終了後は、科研費基盤研究(C)「NVDIMM を用いたレジリエントなストレージの実現」(2016年度~2018年度)の研究代表者として研究を進めている。また、CREST 研究領域「イノベーション創発に資する人工知能基盤技術の創出と統合化」研究課題「完全自動運転における危険と異常の予測」(2016年度~2021年度)(研究代表者:東京大学大学院情報理工学系加藤真平)の共同研究者として研究を進めている。

研究代表者河野健二は、2015年4月に慶應義塾大学理工学部情報工学科教授に昇任し、本研究課題の成果を発展させている。

主要な成果は、図3-21に示す通り、(i)クラウド環境におけるメニーコア向け省電力仮想マシン・スケジューラ、(ii)NVDIMMを用いたレジリエントなストレージの実現、(iii)完全自動運転における危険と異常の予測であり、以下にその詳細を記述した。

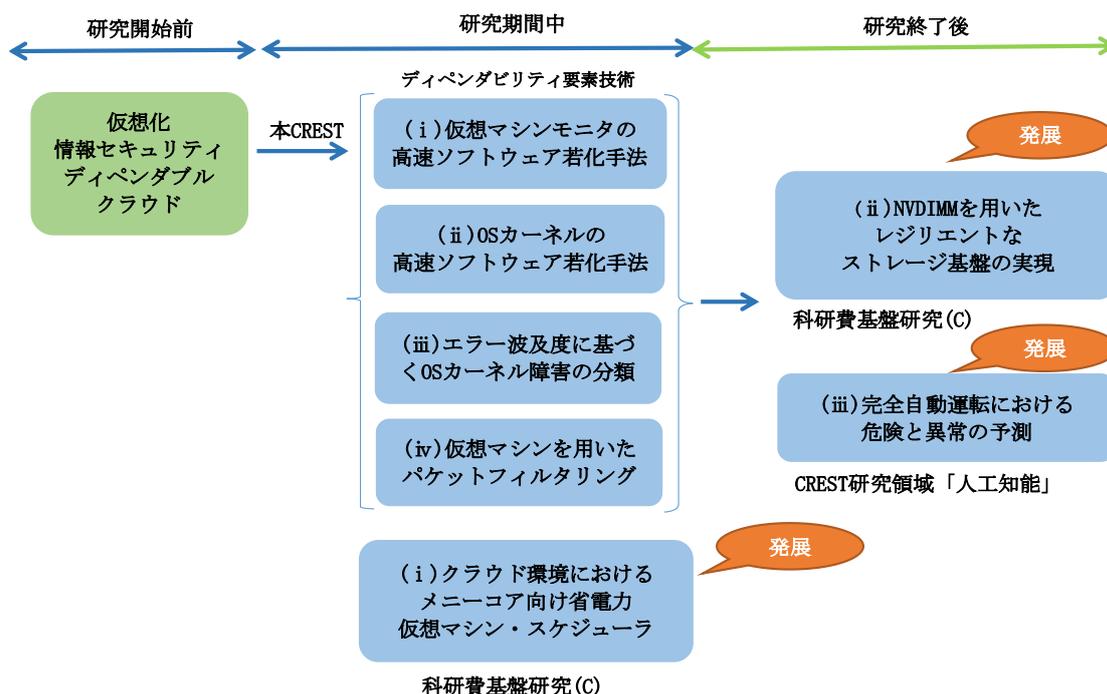


図 3-21 研究助成金と成果の展開状況

(i)クラウド環境におけるメニーコア向け省電力仮想マシン・スケジューラ

仮想マシンモニタの階層においてデータセンターの省電力化を実現するための様々な機

構の開発を行った。<sup>144</sup>

(a) ネットワーク機器も停止できるマイグレーション<sup>[1],[2]</sup>

データセンターの電力消費量を削減するために、ネットワーク機器も停止できる仮想マシンマイグレーション<sup>145</sup>方式を確立した。

この方式は、ネットワークスイッチの空きボードを利用し、ラック内に納められた物理マシンを上位のネットワークスイッチに直接接続する構成であり、ラック内で動作する全ての仮想マシンを、上位のネットワークスイッチに集約することができる。この集約によって、ネットワーク機器の冗長性を損なわずに下位のネットワークスイッチが停止できる。

(b) GPU(Graphics Processing Unit)の仮想化

メニーコア向けの省電力基盤を提供するため、GPUの仮想化を行った。GPUの仮想化は、ホストCPUがGPUとやり取りするMMIO(Memory-Mapped I/O)の仮想化、GPUチャネルの仮想化、GPUページテーブルの仮想化などで達成している。そのアーキテクチャを、図3-22に示した。

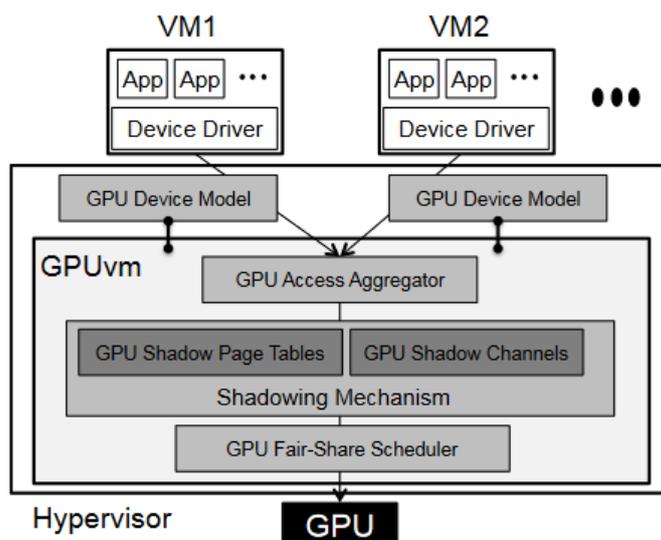


図3-22 GPUの仮想化のアーキテクチャ<sup>144</sup>

(ii) NVDIMMを用いたレジリエントなストレージの実現

NVDIMM-N<sup>146</sup>を活用したレジリエントな(障害発生などに対して強靭さや対応力のある)ス

<sup>144</sup> 科研費基盤研究(C)「クラウド環境におけるメニーコア向け省電力仮想マシン・スケジューラ」(2011年度～2013年度) 研究成果報告書(科研費基盤研究(C)「クラウド環境におけるメニーコア向け省電力仮想マシン・スケジューラ」(2011年度～2013年度) 研究成果報告書

<https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-23500050/23500050seika.pdf>

<sup>145</sup> 仮想マシンマイグレーション：マルチコア環境において、ゲスト仮想マシンを、現在のコアから他のコアに移行させること

<sup>146</sup> NVDIMM-Nという規格のNVDIMM(Non-Volatile Dual Inline Memory Module)で、DRAMと不揮発性メモリを搭載したモジュール

ストレージ基盤の実現に取り組んでいる。<sup>147</sup>

ジャーナリング<sup>148</sup>領域をハードディスクや SSD などの二次記憶上に配置するのではなく NVDIMM-N 上に配置し、さらにジャーナリング領域をカーネル内のページキャッシュと部分的に統合して相対的ジャーナル領域を大きく見せる方式を考案した。この方式により、パフォーマンスを低下させることなく、ある程度高いレジリエンスが実現できることを実験的に確認した。

### (iii) 完全自動運転における危険と異常の予測

完全自動運転を実現するアーキテクチャ開発に取り組み、GPU 仮想化のためのフレームワーク、センシングデータのためのスケーラブルかつセキュアな軽量データベース基盤、仮想デバイスの脆弱性に対する仮想マシンモニタの堅牢化の研究を進めている。<sup>149</sup>

#### (a) GPGPU アプリケーション実行ソフトウェア (GLoop)<sup>[3]</sup>

GPU は、多くの分野で GPGPU (General Purpose computing) アプリケーションに使用する有効なプラットフォームになってきている。複数の利用者があるクラウドプラットフォームにおいて GPGPU アプリケーションを使用する場合は、多く使用されている GPU の時分割 (time-multiplexing) が重要である。しかし、高機能な GPGPU アプリケーションでは非常に多くの資源を必要とし GPU を独占してしまうため、所定の実行スケジュールに反して他の GPGPU アプリケーションに資源が与えられないという問題が生じている。

GLoop は、所定の実行スケジュールの下で、非常に多くの資源を必要とする高機能な GPGPU (General Purpose computing) アプリケーションも含む複数の GPGPU アプリケーションを実行でき、かつ高機能な GPGPU アプリケーションの求める機能も損なうことはない。プロトタイプを製作して、8 つの高機能な GPGPU アプリケーションを実行させるテストを行い、所定の実行スケジュール通りに実行されることを確認した。

#### (b) 仮想マシンモニタの堅牢化 (FWinst)<sup>[4]</sup>

仮想マシンモニタの脆弱性はアタッカーには都合の良い標的である。この脆弱性の原因は、x86 CPU コンパチブルな従来の仮想マシンモニタが、不必要なほど多くのインストラクションをエミュレートするため、アタッカーの攻撃箇所を多くしていることにある。

FWinst は、エミュレートすべきコンテキストを調べ、必要不可欠なインストラクションのセットのみをエミュレートするため、アタッカーの攻撃箇所を減らし、脆弱性を少なくしている。

<sup>147</sup> 科研費基盤研究(C)「NVDIMMを用いたレジリエントなストレージの実現」(2016年度～2018年度) 2016年度実施状況報告書

<sup>148</sup> ジャーナリング：システムの管理領域を変更する際に、ジャーナル(ログとも呼ばれる)という更新履歴を自動的に記録すること。障害が発生した際に、ジャーナルの内容を参照して、障害の除去や早期の復旧が行える

<sup>149</sup> CREST 研究領域「イノベーション創発に資する人工知能基盤技術の創出と統合化」研究課題「完全自動運転における危険と異常の予測」(2016年度～2021年度)(研究代表者：東京大学大学院情報理工学系加藤真平) 2016年度実績報告書

## ②科学技術の進歩への貢献

### (i) クラウド環境におけるメニーコア向け省電力仮想マシン・スケジューラ

仮想マシンモニタの持つライブ・マイグレーションという機能を使って、仮想マシンをできる限り少ない台数の物理マシン上に集約することによって消費電力量を削減するという手法はよく知られている。現在のデータセンターでは、ネットワーク機器による電力消費量も無視できないものとなっている点に着目し、物理マシンだけでなくできるだけ多くのネットワーク機器も停止できるような形で仮想マシンのマイグレーション方式を確立した。

また、GPUの仮想化を実現することによって、GPUに対するコマンドのスケジューリングを仮想マシンモニタの階層で行うことが可能になり、複数の仮想マシンからの要求を調停し、電力要求に合わせてGPUの使用量を粗粒度に調整することができるようになった。

### (ii) NVDIMMを用いたレジリエントなストレージの実現

従来のファイルシステムやキーバリューストア<sup>150</sup>において高いレジリエンスが達成されているとはいえない理由は、高いレジリエンスと低遅延アクセスのトレードオフが存在し、性能上の理由からレジリエンスを犠牲にせざるを得ないからである。例えば、書き込み性能を向上させるため、書き込み要求ごとに同期(sync)処理を行うのではなく、同期(sync)処理を遅延させるのが一般的である。また、ジャーナリングによるレジリエンス向上を図る場合でも、メタデータのジャーナリングのみを行うことが一般的であり、システムの異常停止時にデータが失われる可能性が高い。これらの課題に対し、高いレジリエンスと低遅延アクセスのトレードオフの解決への道を拓いた。

### (iii) 完全自動運転における危険と異常の予測

完全自動運転を実現するためには、多数の車両から得られる動画データなどに対して、有効グラフ解析や深層学習をオンラインリアルタイムで実行する必要がある。GLoopは、これらの非常に多くの資源を必要とする高機能なGPGPUアプリケーションを含む複数のGPGPUアプリケーションを、所定のスケジュールに従い実行させることを可能にした。

また、完全自動運転には仮想化も不可欠であり、仮想マシンモニタの脆弱性は仮想マシン全体のセキュリティを損なってしまう。FWinstは、仮想マシンモニタの脆弱性を少なくし、高いセキュリティを実現した。

## ③社会・経済への波及効果

<sup>150</sup> キーバリューストア：膨大な情報を保存するのに適したデータ保存形式。任意の保存したいデータ(バリュー)に対し、対応する一意の標識(キー)を設定し、これらをペアで保存(ストア)する。

(i) クラウド環境におけるメニーコア向け省電力仮想マシン・スケジューラ

複数のデータセンターから構成されるクラウド環境の場合、消費電力量が同じであっても、地域によって電力価格が異なることがある。ネットワーク機器も停止できる仮想マシンのマイグレーション方式を用いることにより、電力価格の安い地域に設置されたデータセンターを積極的に利用することで、電力コストを削減できるという効果だけでなく、余剰電力を有効に活用することができるという環境上のメリットも大きい。

(ii) 完全自動運転における危険と異常の予測

完全自動運転には危険と異常の予測が極めて重要であり、その実現には多量なデータを多くのプログラムがオンラインでリアルタイムに実行でき、かつ外部からの攻撃に耐えるシステム環境の開発が求められている。GLoop および FWinst は、これらの課題を解決する試みである。

④ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な論文リスト (4 報以内)

- [1] Shirayanagi H., Yamada H., Kono K. “Honeyguide: A VM migration-aware network topology for saving energy consumption in data center networks”, IEICE Transactions on Information and Systems, 2013, E96-D(9), 2055-2064.
- [2] Sakamoto T., Yamada H., Horie H., Kono K. “Energy-price-driven request dispatching for cloud data centers”, Proceedings - 2012 IEEE 5th International Conference on Cloud Computing, CLOUD 2012, 2012, 6253610, 974-976.
- [3] Suzuki Y., Yamada H., Kato S., Kono K. “GLoop: An event-driven runtime for consolidating GPGPU applications”, SoCC 2017 - Proceedings of the 2017 Symposium on Cloud Computing, 2017, 80-93.
- [4] Ishiguro K., Kono K. “Hardening hypervisors against vulnerabilities in instruction emulators”, Proceedings of the 11th European Workshop on Systems Security, EuroSec 2018, 3193118.

⑤ その他

河野は 2009 年度および 2012 年度に情報処理学会論文賞、2013 年度に日本ソフトウェア科学会ソフトウェア論文賞、2015 年度に IBM Faculty Award、日本ソフトウェア科学会基礎研究賞を受賞している。