

### 3.4 ソフトウェア

さまざまな計算機上で動くプログラムの開発、実行、運用、保守に関わる技術分野。

ソフトウェアは、情報通信技術（ICT）を実装するために不可欠なものである。このことは、汎用コンピューターのみならず、マイクロコントローラーを内蔵するすべての機器が、ソフトウェア制御で動作している事実からも明らかであろう。そして、学術、産業などのICTに依存するあらゆる活動において、その競争力を維持・強化するためには、より優れた機能・性能を有するソフトウェアを、より迅速かつ低コストで開発する能力が必要になる。ソフトウェアの研究開発戦略が、わが国の発展のために極めて重要な意味を持つゆえんである。

逆に、ソフトウェアの研究開発戦略を立案するにあたっては、重要な応用分野で求められる要件を把握し、競争優位に結びつく新技術の開発につなげていく必要がある。本俯瞰報告書では、応用分野の新しいトレンドとして、物理システムとのインタラクション、知的でスマートな情報システム、大規模情報処理に特に注目して分析を行う。

まず、物理システムとのインタラクションに関しては、センサーやアクチュエーターを制御するソフトウェアへの需要が増大している。CPS、IoT、M2M、Trillion Sensors Universeなどのキーワードが注目され、医療、ヘルスケア、農業などへのICT応用、ロボット、自動運転車なども今後急速に発展する可能性がある。このような分野では、物理システムのモデリングや従来型ソフトウェアとは異なる安全性基準への適合などに関する研究開発が重要となる。

知的でスマートな情報システムに関しては、スマートグリッドのような社会インフラをICTにより高度に最適化するもの、スマートシティのような知的社会資本の蓄積と活用を支援するもの、高度な自然言語処理やパターン認識の技術を用いて優れたユーザー体験をもたらすものなどがある。このような分野では、高度な可用性や耐攻撃性が求められることもあれば、社会システムのモデリングが必要なこともある。また、ユーザーインタラクションの設計方法が従来とは根本的に変わる場合もある。要件定義、設計、実装、テストなどのソフトウェアライフサイクルの各段階で、このようなトレンドに対応した新しいモデルや手法の研究開発が重要となる。

大規模情報処理に関しては、ビッグデータ解析や大規模シミュレーションで従来とは異なるタイプのワークロードが発生する。また、大規模情報処理のために、多数の機器で構成される計算システムが必須となり、用途によっては広域的に分散した計算システムが用いられる。このようなワークロードやシステムの特徴を反映したプログラミングモデルやシステムソフトウェアの研究開発が重要となる。

以上のようなトレンドを考慮し、俯瞰区分「ソフトウェア」では、以下の四つの研究開発領域を設けた。

#### 1. ソフトウェア工学

ICTの斬新な応用が生まれるときには、従来とは異なるソフトウェア開発のモデルや手法が必要になる。また、ソフトウェア開発のプロセス自体もICT支援により高度化され、従来とは異なる手法が生まれる。現在のトレンドを反映しつつ、ソフトウェアライフサイクルの各段階において重要と考えられる研究開発課題を俯瞰する。

2. 組込みシステム

物理的機器に組み込まれ、その機器を制御するソフトウェア（組込みソフトウェア）の重要性が増している。組込みソフトウェアの開発において重要と考えられる研究開発課題を俯瞰する。

3. プログラミングモデルとランタイム

新しい応用分野で初期に用いられるソフトウェアのモデルや表現には、開発者から見た了解性とコンピューターによる効率的処理を両立できないものが多い。主要な応用分野において、これらの両立を高いレベルで図るために重要と考えられる研究開発課題を俯瞰する。

4. システムソフトウェアとミドルウェア

ソフトウェアが利用する各種リソースの抽象化と保護の機能は、リソースの高度な利用のためにも、またセキュリティーやディペンダビリティーの基盤としても重要である。これらの機能を提供するレイヤーのソフトウェアで重要と考えられる研究開発課題を俯瞰する。

なお、個々の応用分野の問題を解決するソフトウェアの具体的な構成については、原則として、本俯瞰区分では触れない。本俯瞰区分で取り上げるのは、安全性、信頼性、セキュリティー、利便性、実行性能、正確性などに優れたソフトウェアを開発・運用するための技術とそれを容易とするような実行環境に関する技術である。

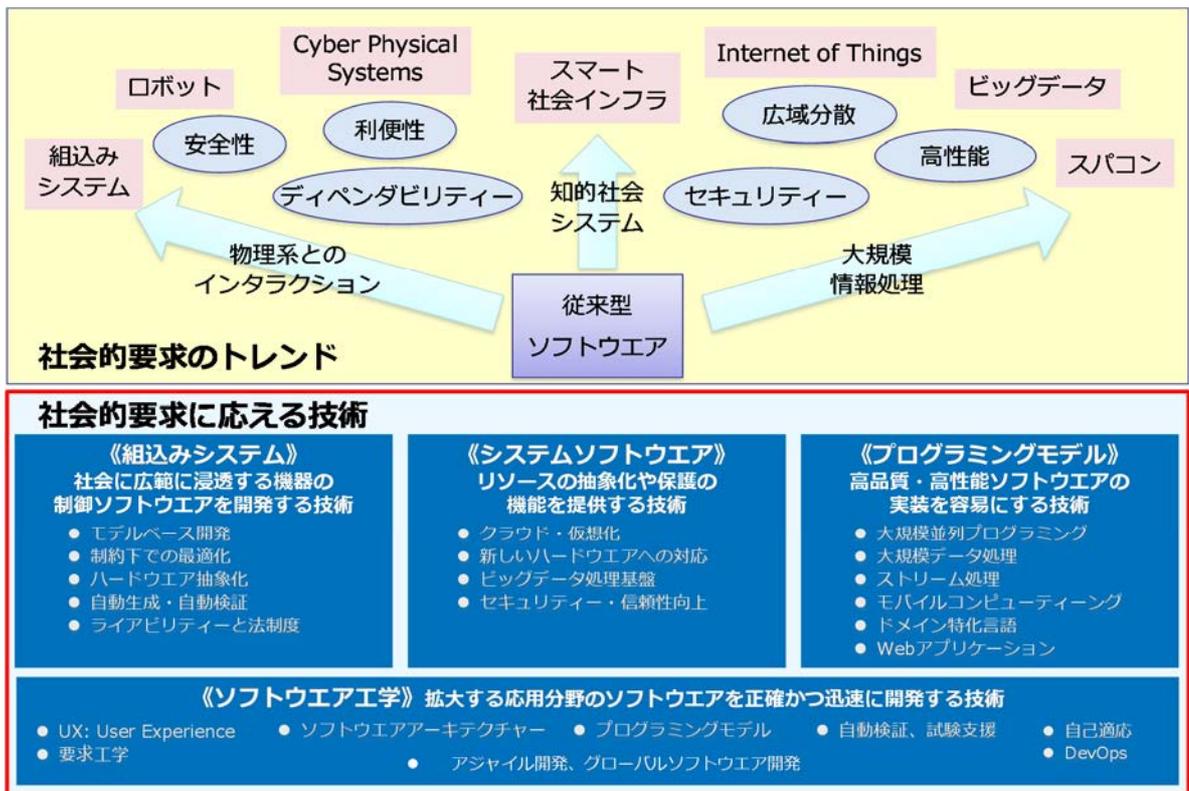


図 3.4.1 ソフトウェアの俯瞰図

### 3.4.1 ソフトウェア工学

#### (1) 研究開発領域名

ソフトウェア工学

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

ソフトウェアの要求定義、開発、利用、進化に関する諸技術

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

##### 1) 研究開発領域の動向

ソフトウェア工学はソフトウェア開発を通して、あらゆる科学技術分野の研究開発、ならびに、産業競争力の基盤となる。ソフトウェア工学は、開発対象によらない基礎技術と特定の対象の特性に着目した応用技術に大別できる。基礎技術としては、ソフトウェアで実現すべき要求を獲得する要求工学、ソフトウェア全体の構成を設計するアーキテクチャ技術、プログラムとして実現するプログラミング言語やそれを用いて開発を支援する開発支援環境、ならびに、ソフトウェアの正しさを確認する検証、妥当性確認、試験などの技術がある。この分野ではシステムの規模と複雑度の増大、顧客要求や市場の変化への俊敏な対応、安全性や信頼性の向上のために、コンピューターによる検証など、コンピューターの性能向上を生かした自動化、支援の技術の研究が活発である。

対象の特性に着目した応用研究は Web やクラウドコンピューティング上でソフトウェアの機能をサービスとして遠隔利用を可能とするサービスコンピューティング技術と自動車やスマートフォンなどのモバイル機器やウェアラブル機器などに組み込まれた組込みソフトウェアを対象とする組込みソフトウェア技術がある。また、新分野として SNS（ソーシャルネットワークワーキングサービス）のソフトウェア技術が急速に発展している。

##### 2) 国内外の動向

**米国：**基礎研究から応用研究、産業化のいずれにおいても世界をリードしている<sup>7)8)</sup>。特に、クラウドの台頭など情報処理の基盤が転換期にあり、新たな研究分野が創出され、NFSを中心に Software Infrastructure for Sustained Innovation<sup>8)</sup>などの包括的な研究の枠組みを設け、活発な研究開発が進められている。

**EU：**2014年から2020年まで The Digital Agenda for Europe (DAE)などの包括的な枠組みで、情報技術による社会へのインパクトを主題に、サービスコンピューティングなどの技術を社会生活や産業創成につなげる研究が展開されている<sup>2)3)</sup>。一方、自動車などの組込みソフトウェア分野では、産業面でも世界の主導的位置にあり、戦略的な標準化活動を通して影響力の獲得に成功している。

**中国：**急速に基礎研究力を高めており、世界トップレベルの国際会議にもわが国より多くの研究論文が採択されるまでになっている。一方、応用研究や産業化も急速な成長にある。ソフトウェア産業も高い成長を続け、市場規模は2013年に前年比23.4ポイント増の3兆元に達している<sup>1)</sup>。

**韓国：**家電や自動車などの組込みソフトウェアに研究が注力され、幾つかの分野で国際的な成果を挙げているが、ソフトウェア全体としては基礎研究、応用研究、産業化のいずれの面でも成果は限定的である。韓国政府の Ministry of Science, ICT and Future Planning では

Strategy & Vision の下でソフトウェア産業とコンテンツ産業の育成を支援している<sup>6)</sup>。

インド：インドのソフトウェア産業は欧米主要企業からのソフトウェア開発やビジネスサービスのアウトソーシングで成長し、約5兆円の規模である。今後も25%程度の成長を見込んでいるが<sup>7)</sup>、国内ソフトウェア市場は未成熟である。基礎・応用研究も発展途上であり、国際的な研究成果は乏しい。

日本：わが国では、いずれの分野でも一定の成果を挙げている。しかし、ソフトウェア工学の基礎やプログラミングなどの旧来のソフトウェア工学の研究に偏り、クラウドや SNS などの新分野では先導的な位置にあるとはいえない。ソフトウェア産業も高品質な社会基盤ソフトウェアの受託開発に強みがある。また、組込みソフトウェア分野では競争力が高いが、欧州連合（EU）やアジア諸国の研究の活発な状況に対して今後リードを保てるか予断を許さない。

#### （4）科学技術的・政策的課題

##### 1) ソフトウェア工学の研究開発戦略ビジョンの確立

米国、EU、中国では、ソフトウェア技術があらゆる産業の競争力の源泉であり、かつ、社会の生活の質の向上、ならびに、Web によるグローバルな影響力の観点から戦略的技術と位置づけられ、研究開発ならびに、当該分野の世界的な研究者の獲得と育成に多額の投資を継続的に行っている。わが国でも、このようなソフトウェア技術への戦略的ビジョンの策定と、ソフトウェア技術への戦略的な研究開発の予算化などの措置を講じる必要がある。

##### 2) 新しい計算モデルに基づく情報システム開発技術の研究

クラウド上で、ビッグデータなどの非構造データ処理に関する新たなプログラミングモデルやアーキテクチャーの研究が活発になっている。今後の情報システム開発の基礎技術として、クラウド上でのソフトウェア技術の基礎から応用へ至る幅広い研究体制の確立が必要である。

##### 3) 情報システム開発の価値を創出できる技術の研究

従来、わが国のソフトウェア工学は製造業の知見から出発し、いかに開発するかに主眼が置かれてきた。しかし、情報システムの利用が成熟するにつれ、何を提供するか、すなわち、顧客のビジネスやユーザー経験（UX: User experience）などの要求を獲得し、その価値を高める要求工学などが差別化の鍵となっている、このような要求工学や、それをシステムとして実現するためのソフトウェアアーキテクチャーの技術の組織的な研究が必要である。

##### 4) 変化に対応できる情報システムを実現するアジャイルなソフトウェア開発・提供モデルの研究

クラウドを基盤環境とすることにより、家庭でスイッチを入れると照明が点灯するように、必要なソフトウェアが必要な時に、必要なだけ提供、利用できる情報システムの構築が進んでいる。さらに、ソフトウェアの提供する機能を環境の変化に応じてアジャイル(Agile)、すなわち、俊敏に変更できる必要がある。これに対して、欧米ではアジャイル開発や、それをユーザーにおける運用まで展開した DevOps の研究開発に注目が集まり、実践における成果も上がっている。わが国でも、社会の変化に対応できるソフトウェアの新しい開発、提供、利用の基盤技術と応用技術の研究、開発を立ち上げる必要がある。

#### 5) 情報システムの高度な安全性、セキュリティを保证する技術の研究

金融、電力、交通などの社会基盤システムや自動車など、情報システムの安全性やセキュリティが社会全体に及ぼすリスクの増大への懸念が高まっている。今後、クラウドの普及により、システム障害などの影響がより広範囲に影響する。一方、自動車の自動運転など、人命にかかわるセーフティクリティカルなシステムの開発も急務である。また、このような情報システムの規模や複雑度は増大の一途である。このような点から、コンピューターを応用した情報システムの自動検証や試験支援などの高度な安全性、信頼性を実現する技術の研究を推進する必要がある。

#### 6) ソフトウェア技術の社会的インパクトに関する研究

情報システムは Web、クラウドや SNS などを介して広範な影響を及ぼす。さらに、モバイル/ウェアラブルシステム、IoT、センサー技術の進化などにより、影響はシステム、社会に深く浸透するようになってきている。このような、ソフトウェアシステムの社会への浸透を理解し、社会への影響や効果を学術的に扱う新たな学問分野の研究への組織的な取り組みが必要である。

#### (5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・ 全米科学財団(NSF)の Software Infrastructure for Sustained Innovation プログラム<sup>7)</sup>
- ・ EU の Horizon 2020<sup>2)</sup>と Networked European Software and Services Initiative<sup>2)</sup>などの活動。ドイツにおける Smart Service Welt<sup>4)</sup>などの Industrie 4.0(第4次産業革命)を実現するソフトウェア/サービスの研究戦略。
- ・ 韓国政府 Ministry of Science、ICT and Future Planning の Strategy & Vision<sup>6)</sup>

#### (6) キーワード

クラウドコンピューティング、サービスコンピューティング、ソーシャルネットワークサービス (SNS)、組込みソフトウェア、CPS (Cyber Physical Systems)、ユビキタスコンピューティング、モバイルソフトウェア、ウェアラブル、ビッグデータ、コンテキストウェア、IoT (Internet of Things) [モノのインターネット]、ビッグデータ、ユーザー経験 (UX: User Experience)、要求工学、ソフトウェアアーキテクチャー、アジャイル開発、リーン開発、DevOps、自己適応、ソフトウェアエコシステム、グローバルソフトウェア開発 (GSD: Global Software Development)、クラウドソーシング

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>プログラミングなどの従来の研究分野においては幾つか世界水準の研究成果が見られるが、クラウド、モバイル、SNSなどの新しい研究分野における基礎研究は限られている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>クラウドなどの分野において企業を中心に応用研究、開発が行われているが、米国の主要企業に比べて立ち遅れが見られる。</li> <li>自動車、家電などの分野で企業を中心に活発な応用研究、開発が行われて、世界水準の成果も見られるが、自動運転などの先進的な応用研究では競争が激化している。</li> </ul>
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>一定の国内市場がある。高品質な社会基盤システムの受託開発に強みを持つが、世界的競争力のあるパッケージソフトウェアを育成できていない。</li> <li>クラウド、SNSなどのWeb上で地域によらない分野は国内で海外企業の攻勢にさらされている。</li> <li>自動車などの組込みソフトウェア分野は、電子化と電動化があいまって需要が急増大し、かつ、世界水準の競争力を保っている。</li> <li>携帯電話分野はスマートフォンへの参入遅れから劣勢に立たされている。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>世界を主導する分野として位置づけられ、大学・公的機関における基礎研究のレベルは一貫して高い。</li> <li>PCAST (President's Council of Advisors on Science and Technology) のレポートなどで NITRD (The Networking and Information Technology Research and Development) プログラムなどにより戦略的な研究計画の推進を継続し、特に、社会と融合した研究の推進が重点テーマとして打ち出されている。</li> <li>はCIF21 (Cyberinfrastructure Framework for 21st Century Science and Engineering) などの包括的研究プログラムにより戦略的な研究を継続。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>世界を主導する企業の研究所などにおいて基礎研究に近い領域から応用研究に至る幅広い研究が進められて、世界を主導している。</li> <li>クラウドやビッグデータ処理などの新分野で世界をリードしている。</li> </ul>
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>米国内にとどまらず、世界の市場のあらゆる分野で事業を展開している。</li> <li>クラウド、ビッグデータ処理、SNSなど、新産業分野が創出され、急速に発展している。特に、Web上では国境を越えてサービスが提供できることから、世界市場で大きなシェアを占めている。</li> <li>ベンチャー企業育成システムが機能し、新技術の産業化に寄与している。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>2014年から2020年までに800億ユーロの予算で開始したHORIZON 2020において、Digital Agenda for Europe (DAE)の枠組みの下に、サービスコンピューティング、クラウドなどの新分野で積極的な研究開発が計画されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>HORIZON 2020やその中のDAEにおいては、ITの社会へのインパクトが重視され、社会の変化に対応する研究が計画されている。</li> <li>自動車に搭載されるソフトウェアアーキテクチャーの標準であるAUTOSARの標準化など、応用技術の研究、開発から標準化までを主導し、影響力の保持に成功している。</li> </ul>
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>自動車、電力、医療などの分野で世界をリードする企業が中心となって組込みソフトウェアの旺盛な開発と製品化が進められている。</li> <li>ドイツのIndustrie 4.0やSmart Service Weltなど、産官学によるソフトウェア技術の産業化へ戦略的に取り組んでいる事例が見られる。</li> </ul>

中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>近年では世界トップレベルの国際会議に研究論文が採択され、その数はわが国を上回るまでになっている。</li> <li>中国科学院、精華大学、北京大学など主要な大学・公的研究機関にソフトウェア工学のKey Laboratoryが設置され質の高い研究成果が見られる。欧米で学位を取得した研究者を呼び戻し、研究の質の組織的な向上に成功している。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>多くの大学でInstitute of Softwareを設置し、世界水準の研究成果が表れはじめている。今後、質の高い研究成果が期待される。</li> </ul>
	産業化	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>中国のソフトウェアとIT産業は高い成長段階途上にあり、2013年には前年比23.4ポイント増の約3兆元の市場規模に達した。これに伴い、ソフトウェアとIT産業のR&amp;Dへの投資も旺盛で2013年には約2.6億元に達した。</li> <li>海外からのアウトソーシングが引き続き活発である、IT特区などで海外大手企業の参画を得て、人材育成に注力している。</li> </ul>
韓国	基礎研究	×	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>組込みソフトウェアの研究で質の高い研究成果が見られるが、ソフトウェア工学全般としては、世界水準の研究は限定的である。</li> <li>KAISTや1997年に開学したICU (Information and Communications University)などで組織的な取り組みが行われ、米国で学位を取得した教員を呼び戻し、英語で講義をするなど、基礎研究の充実を図っている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>家電、自動車などの組込みソフトウェアの研究において質の高い研究成果が見られる。</li> </ul>
	産業化	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>家電、自動車、ゲームなどの分野で特定の企業が世界トップレベルに成長すると共に国内で需要も増大しているが、その分野は限定的である</li> </ul>
インド	基礎研究	×	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>IIT (Indian Institute of Technology) などにソフトウェア工学の研究者がおり、近年、国際会議への積極的な研究発表が行われておることから、今後、世界水準の研究成果が期待できる</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>世界を主導するIT企業が設置した研究所や開発部門が世界水準の研究成果を出しはじめている。研究開発が活発になっていることから、今後、世界水準の研究・開発の成果が期待できる</li> </ul>
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>幾つかのソフトウェア企業が欧米からのアウトソーシングから世界規模の企業へと成長している。今後の成長が期待されている</li> <li>欧米の世界を主導する企業が開発部門を設け、クラウドなどの最新技術をいち早く吸収し、主要な開発拠点となっている</li> </ul>

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※わが国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) China: Ministry of Industry and Information Technology, People's Republic China, China's IT industry Statistical Data 2013,  
<http://wap.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n11294132/n12858477/15974912.html>.
- 2) EU: Framework Programme for Research and Innovation, HORIZON 2020,

- <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en>.
- 3) EU: Networked European Software and Services Initiative, Software Engineering: Key Enabler for innovation, White Paper, Jul. 2014,  
[http://www.nessi-europe.eu/Files/Private/NESSI\\_SE\\_WhitePaper-FINAL.pdf](http://www.nessi-europe.eu/Files/Private/NESSI_SE_WhitePaper-FINAL.pdf)
  - 4) German National Academy of Science and Engineering (Acatech), Smart Service Welt WG, Smart Service Welt, Mar. 2014,  
[http://www.acatech.de/fileadmin/user\\_upload/Baumstruktur\\_nach\\_Web-site/Acatech/root/de/Projekte/Laufende\\_Projekte/Smart\\_Service\\_Welt/BerichtSmartService\\_engl.pdf](http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Web-site/Acatech/root/de/Projekte/Laufende_Projekte/Smart_Service_Welt/BerichtSmartService_engl.pdf)
  - 5) India: Department of Electronics and Information Technology, Ministry of Communications & Information Technology, Government of India, R & D in Information Technology,  
<http://deity.gov.in/content/r-d-information-technology>
  - 6) Korea: Ministry of Science, ICT and Future Planning, Vision & Strategies,  
<http://english.msip.go.kr/english/msipContents/contents.do?mId=Mjcw>
  - 7) US , Software Infrastructure for Sustained Innovation - SSE & SSI,  
[http://www.nsf.gov/funding/pgm\\_summ.jsp?pims\\_id=504865](http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=504865)
  - 8) US PCAST (President's Council of Advisors on Science and Technology), Report to the President and Congress, Design a Digital Future: Federally Funded Research and Development in Networking and Information technology, Jan. 2013,  
<http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-nitr2013.pdf>

### 3.4.2 組込みシステム

#### (1) 研究開発領域名

組込みシステム

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

組込みシステムを、電力、コスト、リアルタイム性、ディペンダビリティなどのさまざまな制約条件の下で効率よく動作させるためのソフトウェアおよびその設計技術に関する研究開発

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

組込みシステムとは、各種の機器に組み込まれてその制御を行うコンピューターシステムのことである。自動車、ロケット、ロボット、産業機器、携帯機器、家電機器、プラントや社会インフラシステムの制御システム、各種センサーやセキュリティ機器など日本の産業を支えるさまざまなシステムの多くは、その付加価値の重要な部分を内部に組み込まれたコンピューターシステムによって実現しており、その意味で組込みシステムは日本の電子情報通信産業を支えていると言っても過言ではない。

機器に組み込まれているコンピューターシステムという性格上、その機器の持つ機能に特化したハードウェアを追加といった最適化が可能であり、パソコンやサーバー等の汎用コンピューターシステムと比較すると、多種混在のハードウェア構成を採用可能である。また、特別に設計された計算機室に置かれるサーバー等と異なり、機器が使用される環境条件により、電力制約、リアルタイム制約、価格制約等に関して強い制約が課せられることが多く、その中で最適化していく必要があることも組込みシステムの特徴である。

近年では、CPS、M2M、IoT などと呼ばれるように、多数の組込みシステムがネットワークに接続し、大きなシステムを形成するようになった。組込みシステムは、個々人の身近に存在するものがあり、生活のさまざまな局面で利用されるものがあり、または、社会に遍在するものもある。それらがネットワークで接続され、人間との相互作用もからめて大きなシステムを構築するため、今後は、より大きなシステムの中での一機能として、組込みシステムの設計検証を考える必要がでてきている。

組込みシステム単体も高機能化、複雑化している。ソフトウェア量は増大し、従来と比較してハードウェアコストとソフトウェアコストのバランスが大きく変わっている。高い処理性能かつ省エネルギーという点では機能に特化したハードウェアが有利である一方、専用設計のハードウェアは生産台数が少なくなると機器1台あたりで考えたときに価格性能比が見合わないことがある。従って組込みシステムでは、高い処理性能かつ省エネルギーのハードウェアをソフトウェアによって多種機器で使いまわし価格性能比を最適化することが多くなる。

単体の組込みシステムにおけるソフトウェアの研究開発課題は、一般的なコンピューターシステム上のソフトウェア研究と基本的には変わるところがないが、前述した組込みシステムならではの特徴をふまえた課題が存在する。例えば、多種ハードウェアを使いこなすソフトウェアであること、そして個々の機器の動作環境に依存した多種多様な制約の下での最適化があげられる。ターゲットシステム内におけるハードウェアの種類は近年ますます多くな

ってきており、ソフトウェアは機器内において汎用 CPU 上で動作するだけでなく、グラフィックプロセッサのようなアクセラレータ上で動作する場合や、最終的にはハードウェア化されることも想定する必要がある。

基本ソフトウェアに関しても、単純な機器制御の場合には基本ソフト (OS) を使う必要がなかったが、複雑な機能や状態遷移を持つようなシステムになって OS が使われるようになり、日本では iTRON 仕様の OS が広く使われている。最近の高機能組込みシステムでは、ネットワーク接続や GUI、仮想空間によるアプリケーション保護などの技術的要望、ソフトウェアのオフショア開発との親和性等の理由により Linux のような高機能 OS が利用されるようになっている。基本ソフトウェアにおいては、今後ますます増加する複数プロセッサやアクセラレータを仮想化し、上位ソフトウェアから使いやすくする手法の研究が重要である。

そしてさらに、多数の組込みシステムにより構成される大規模システムに対する設計検証、特にモデル化が重要である。中には世界規模のものもあるが、例えば自動車業界では、以前はエンジンなど部品ごとのシミュレーションであったが、最近では車全体のシミュレーションが行われるようになり、さらには道路モデル、人間モデルなどを組み合わせてシミュレーションし、モーターのような部品から、高度道路交通システム (ITS) のような社会システムまで設計検証を行うようになってきている。

以上により、組込みシステム向けソフトウェア研究は、①ネットワーク化された複数組込みシステムによって構成されるシステムモデル化、制約下での全体最適化、設計方法論、②ターゲットハードウェア非依存のシステム要求分析やシステムアーキテクチャ設計、モデル化、制約下での最適化、③ターゲットハードウェアを抽象化した段階でのソフトウェア設計、制約下での最適化、④ターゲットハードウェアに向けての詳細化および制約下での最適化、それらの実行環境、ソフトウェア自動生成および検証等が進められている。また、プロセッサのコア数が増える中、制約条件の下での並列化や仮想化技術の研究、さらに、機器直接もしくは接続するクラウドシステムからの侵入、機器操作などに対するセキュリティー技術についても活発な研究が進められている。

今後は、ハードウェアからソフトウェア、人間や周囲環境、部品から装置レベルまで、さまざまなものがさまざまな抽象度でモデル化され、組み合わせられて大きな社会システム、情報システムとしてモデル化されると考えられる。その中で、自らの設計対象（例えばモーター制御ソフトウェア）の抽象レベルを段階的に下げ、詳細化していくことにより実装や検証が行われることになろう。

また、スマート社会や自動車の自律走行に代表されるように、組込みシステムの「判断」が人間、社会、自然に及ぼす影響がますます大きくなることが想定されており、そのための仕組みづくりが急務である。組込みシステムの「判断」に対する責任の所在に関する議論、組込みシステムの安全性（より広くディペンダビリティ）の担保、遍在する組込みシステムに対しネットワークを通じた安全な不具合対応等、多くの課題がある。

米国では 2000 年代後半より全米科学財団 (NSF) の重点テーマの一つとして、高信頼組込みシステムの活動から CPS (Cyber Physical Systems) が提案された<sup>1)2)</sup>、例えば Quadrotor やヘリコプターの自律飛行など、各大学、研究機関において活発に研究が進められており、実用化されているものと考えられる。これにスマートグリッドやクラウドシステムのベンダ

一も参加し始め、大きな研究分野となっている。

欧州では、FP5 の頃より重点領域として検討が進められており、2004 年に ARTEMIS (Advanced Research & Technology for EMbedded Intelligence and Systems)<sup>3)</sup>が発足、以来精力的に活動している。車全体のモデル化 (MODELISAR<sup>4)</sup>、FMI<sup>5)</sup>、マルチコア向け (AMALTHEA<sup>6)</sup>、ARAMiS<sup>7)</sup> 等さまざまな活動がある。

#### (4) 科学技術的・政策的課題

- ・ 組込みシステムのインテリジェンスに対する法整備

組込みシステムが持つ知能、判断の結果責任に対する考え方の整理、法的対応が急務である。上述した自律走行に関しては、例えば米国ネバダ州等において Google による自動運転車が公道で走行可能になったなど整備が進んでおり、日本は遅れていると言わざるを得ない。スマート家電やさまざまなセンサー等における個人監視問題、設置したすべての地点を巡回することがコスト的に困難な場合の問題発生時の責任、ネットワークを通じた故障監視やバージョンアップに関わる責任、不具合対応責任、技術悪用防止も含め、大きな課題である。

- ・ 先端技術の戦略的展開

組込みシステム分野は、複雑な機能を持つ携帯機器や情報家電、車載機器等のハイエンド製品・技術分野と、簡易な機器制御のようなローエンド分野が混在し、これに伴い国内企業も二極化していると考えられる。また、それぞれ出荷台数が少ない製品も多数存在し、ロングテールを形成している。

産業競争力という面からはハイエンドをより高く鋭くする方向と、ローエンドの部分を底上げしていく方向をバランスよく進めていくことが重要で、これがうまく回らないと、組込み産業の多くは体力のない中小企業であることを考えると、一部の勝ち組企業と多数の負け組企業が生まれてしまうことになる。

ソフトウェア技術においても、最先端技術を、より多くのローエンド分野や関連企業に咀嚼して持っていき、多種類製品へ展開していくための戦略が必要である。例えば技術情報共有、非競争領域のオープンソース化、プラットフォーム化を推進するコンソーシアムなどが考えられる。

- ・ 社会情報システムシミュレーションのための抽象化、モデル化

社会学、心理学など、従来は組込みシステムとの関係は認識されていても連携はあまり考えられてこなかった分野の情報化、モデル化を行い、その中に組込みシステムを位置づけ、社会情報システムとしてシミュレーション、設計していく新しい分野間連携が必須である。上述したように、例えば自動車業界では、従来の部品シミュレーションをもとに、車全体のシミュレーション、さらには道路モデル、人間モデルなどを組み合わせて、一つの小さな社会をシミュレーションするようになってきている。そのようなシミュレーションの結果、ITS (Intelligent Transport System) のような社会システムへのフィードバックもあるが、ものづくりにも生かされるようになってきている。そのためには「社会」「人間」「もの」をそれぞれ抽象化し、シミュレーション可能なモデルとした上で協調動作させることが重要であり、かつシミュレーション結果を「社会システム」「もの」に反映し、具体化できるモデルである必要がある。今後はさまざまなレベルにおける抽象化、モデル化

が極めて重要な課題となり、かつ、従来は異分野と考えられていた学問間での産学官連携が重要となる。

- モデルベース開発における支援ツールの研究開発

上述したようなモデル化をもとにした、モデルベース開発が注目されている。モデルベース開発を適用するためには、ツールによる支援が必要となり、モデルベース開発支援ツールの市場規模はますます成長していくと見られる。しかし、国内ベンダーのツール市場における位置づけは欧米のベンダーに比べるとまだ低く、市場における国内ベンダーの国際競争力の向上が課題である。

- ネットワーク連携する組込みシステムを有する工場、スマートシステム

ドイツ政府主導で行われている次世代の工場「インダストリー4.0（Industrie 4.0）<sup>8)</sup>」が注目されている。これは、従来工場内の組み込み機器が、単体で正確な動作を求められていた時代から、多数の工場内組み込み機器間、および複数の工場間にてネットワークで連携し、正確かつ堅牢に動作することを求められる時代へと変化していることを示唆している。

複数の組込みシステムがネットワークを介して協調し、サプライチェーンの最適化も併せ、高い生産性、コスト効率を実現することなど、工場のみならずさまざまなスマートシステムへの適用が可能である。複数の組込みシステムを社会情報システムと協調させるモデル化や最適化、高いセキュリティを確保した堅牢なリアルタイムシステムの応用研究、開発については、喫緊の課題である。

- クラウド連携する組込みリアルタイムシステムのリアルタイム保証

CPS (Cyber Physical Systems) においてはクラウドシステムと組込みシステムが連携する。M2M ではそのようなシステムを通して組込みシステム間で連携する。電話回線網のように特定の企業群が保証するサーバーシステムと組込みシステムとの連携は以前から存在する。これに対して、クラウドシステムが巨大化した複数のオープンシステムの複合体である場合、組込みシステムにおけるリアルタイム制約は考え方が大きく異なるため、組み合わせることは困難であるが、今後の組込みシステムにおいては、クラウドシステムの連携も前提とした組込みシステム、あるいは M2M のリアルタイム保証の仕組みを確立していくことが課題である。

- 多種ハードウェアを使いこなすソフトウェア技術

再構成可能デバイス、不揮発メモリーのような新しいデバイスが登場している。また、組込みシステムも多機能化し、SoC (System on Chip) の中に多種多様なハードウェアが搭載されることも多くなった。多種ハードウェアの性能を引き出すようなソフトウェア開発が重要であり、かつ、多種ハードウェアを管理する基本ソフトウェア技術は必須である。さらに、可能な限りハードウェア非依存のシステム設計とするための設計検証環境の研究開発は大きな課題である。

- マルチ・メニーコアプロセッサに向けたソフトウェア技術

動作周波数向上に期待できない時代となり、性能向上はプロセッサ数増加に依存するようになった。汎用 CPU では数十から数百、汎用グラフィックスプロセッサでは数千を超える計算ユニットが搭載されるようになった。当然ながら、それらのプロセッサを有効に使うことができなければ性能向上は期待できないため、ソフトウェアによる並列化技

術が重要であり、特に自動並列化が期待される。また、数百から数千ものプロセッサを管理する基本ソフトウェアも重要である。

- ・省エネルギーのためのソフトウェア技術

エネルギー削減のためには、トランジスタの消費エネルギー削減のように一様に効果のある削減方法もあるが、不要な機能の電源遮断のようなシステム的なエネルギー削減方法も効果的であると言われている。また、周波数可変、電源電圧可変のような機能を持つハードウェアもある。組み込みシステムの要求仕様、例えばリアルタイム制約を満たしながら最小エネルギーになるよう必要最小限の機能を実行させるソフトウェア技術が望まれている。

### （5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・自動車の自動運転技術について世界的に注目度が高まっており、国の威信にも関わることであり、欧米で大きな投資が始まっている。また、米国では複数の自律飛行物体の連携などにも投資されている。日本でも2020年の東京五輪を目標にSIP等で投資されようとしている。

これは利便性の向上だけではない。自動車の安全性向上のためには、コンピューター支援による自律走行に移行していく必要がある。その背景として、交通事故死亡の多くの割合が、人為的ミスが原因となっており、特に高齢者の加害、被害事故が増えていることがあげられる。

従来ドライバー責任であったものに対して、製造メーカーが事故の責任を問われることもあり、製造メーカー側は、取り組みに積極的なわけではない。国主導での法整備および開発投資が必要であると考えられる。

さらに、これを自動車のみの潮流として見るべきではないと考える。将来社会の持続可能性は、組み込みシステムの知的連携により支えられる面が大きい。社会のインフラともいえる大規模システムとなるため、一朝一夕には整備できず、投資額も大きい。逆にそのようなシステムの整備状況が将来社会の持続可能性の差となることも考えられる。将来利用可能性の低いシステムへの大規模投資は難しいが、医療・介護等の領域における、人間が関わる組み込みシステム間連携や、人間が立ち入ることのできない場所での複数ロボット、自律飛行物体連携など、今後、将来ニーズの大きい実証の場に対し、各国で投資が行われていくことが予想される。

- ・ネットワーク連携する複数組み込みシステムの動的協調：上述したドイツの Industrie 4.0<sup>8)</sup>に続き、2014年にGE、IBM、Cisco、Intel、AT&Tが産業インターネット・コンソーシアム Industrial Internet Consortium (IIC)<sup>9)</sup>を設立し、物質的な工業生産とインターネット技術との融合が急速に注目されている。

また、米国ではネットワーク連携する複数 Quadrotor の協調飛行の研究なども進んでいる。

欧米では、このように、ネットワーク連携する複数組み込みシステムの動的な協調動作についての研究を加速している。この分野で遅れると、今後の工業生産力、産業競争力に大きな影響を与えられられるため、国を挙げての取り組みが緊要である。

- ・本報告書にも項目として挙げられているように、新しいデバイス／ハードウェア技術が次々と生まれている。計算速度、消費エネルギーの源泉はデバイス／ハードウェアである

が、半導体が 10 ナノメートルの時代に向かっている中、新しいデバイス／ハードウェアをソフトウェアで使いこなすことがますます難しくなっている。従って、デバイス／ハードウェアの現在および注目動向がそのまま組込みシステム向けソフトウェアの注目動向でもある。

- ・前項同様に、IoT、M2M 時代の通信技術、特に無線、セキュリティー技術は組込みシステム向けソフトウェアの注目動向である。
- ・ソフトウェア領域に共通する諸問題、要求分析とモデルの関係、形式手法、人材育成などの動向も、当然のことながら組込みシステムにおいても重要である。

## （6）キーワード

CPS、M2M、IoT、HEMS 他、組込みシステムに関する下記のキーワード：

要求定義・分析手法、開発プロセス、設計手法、開発環境、ツール、EDA 技術、協調設計・検証、プログラミング言語。コンパイラ、低消費エネルギー技術、高信頼システム技術、検証、テスト、デバッグ手法・ツール、性能評価、アーキテクチャ、プロセッサ、DSP、リアルタイム OS、ミドルウェア、ネットワーク、通信、分散システム、セキュリティー、ユーザーインターフェース、ユーザビリティ、メディア処理・認識、開発事例、新しい応用分野、教育、技術者養成、スキル標準、産官学連携、プロジェクトマネジメント、アプリケーション（自動車、ITS、OA 機器、情報家電、産業機械、スマートシステムなど）

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	少数の研究者を除くと、基礎研究における国際的位置づけは高いとはいえない。
	応用研究・開発	○	↑	産業の強みを背景に、自動車などの分野で活発な応用研究、開発が行われており、世界水準の成果も見られる。
	産業化	◎	↑	自動車、産業機械などの分野で世界をリードする企業を中心となって組込みソフトウェアの開発と製品化が進められている。
米国	基礎研究	◎	↑	著名な国際学会は米国中心のものが多く、CMU、MIT、Stanford等トップ大学や企業の研究所が主導している。基盤研究から産業化まで軍事、航空宇宙技術がけん引している。
	応用研究・開発	◎	↑	大学や企業の研究所などにおいて基礎研究に近い領域から応用研究に至る幅広い研究が進められており、世界を主導している。
	産業化	◎	↑	米国内にとどまらず、世界市場のあらゆる分野で事業を展開している。
欧州	基礎研究	◎	↑	FPxの中の重点領域の一つと位置づけられ、米国とは独立に、組織的、精力的に進められている。国際学会の発表件数も多い。
	応用研究・開発	◎	↑	車載ソフトウェアアーキテクチャの標準であるAUTOSARの標準化など、標準化を主導し、研究・開発への影響力の保持に成功している。
	産業化	◎	↑	自動車、電力、医療などの分野で世界をリードする企業を中心となって組込みソフトウェアの旺盛な開発と製品化が進められている。
中国	基礎研究	○	↑	従来は世界トップレベルの国際会議に研究論文が採択されなかったが、近年では定常的に採択され、その数はわが国を上回るまでになっている。
	応用研究・開発	○	↑	同上
	産業化	○	↑	価格競争力を背景とし、さまざまな製品開発を進め、現場の実力は発展途上だが、特に大量生産品に関して実力を高めている。
韓国	基礎研究	△	→	KAIST Real-time and Embedded Systems Lab.等においてある程度の活動がある。どちらかと言えば応用研究の比重が高い。
	応用研究・開発	○	→	同上
	産業化	○	→	家電、自動車、ゲームなどの分野で特定の企業が世界トップレベルに成長してきたが、組込み分野に限らず、近年は産業の停滞感が広まっている。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※わが国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## （8）引用資料

- 1) 例えば国際学会 RTSS (Real-Time System Symposium)2007 に Cyber Physical Systems のセッションが見られる。  
<http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/conf/rtss/rtss2007.html>
- 2) Helen Gill: “CPS: A View from the HCSS Agencies,” CPSWeek, 2008.
- 3) ARTEMIS: [http://www.artemis-ju.eu/home\\_page](http://www.artemis-ju.eu/home_page)
- 4) MODELISAR: <https://itea3.org/project/modelisar.html>
- 5) FMI: <https://www.fmi-standard.org/>
- 6) AMALTHEA: <https://itea3.org/project/amalthea.html>
- 7) ARAMiS: <http://www.projekt-aramis.de/>
- 8) 永野: ドイツ政府の第4次産業革命 Industrie 4.0—日本のモノ作り産業へのインパクト, 日本機械学会, 2014,  
[http://www.jsme.or.jp/msd/html/92/msd\\_seminar\\_140724\\_speaker02.pdf](http://www.jsme.or.jp/msd/html/92/msd_seminar_140724_speaker02.pdf)
- 9) 産業インターネット・コンソーシアム IIC:  
<http://www.iiconsortium.org/index.htm>  
国際学会 ESWEEK (Embedded Systems Week): <http://www.esweek.org/>  
国際学会 RTSS (Real-Time System Symposium)

### 3.4.3 プログラミングモデルとランタイム

#### (1) 研究開発領域名

プログラミングモデルとランタイム

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

プログラムの表現手段およびプログラムの実行環境に関する研究開発

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

プログラミングモデルとはプログラムの構成要素とそれらの関係を規定するもので、プログラムの生産性を一義的に決定するものである。プログラミング言語、ライブラリ、フレームワーク等の形で具体化されるものである。一方、ランタイムとは、プログラミングモデルに従って表現されたプログラムの実行環境であり、プログラムの実行性能を一義的に決定するものである。一般にプログラミングモデルが高水準であればあるほどプログラムの生産性は向上するが、ランタイムに対する要求は増大しその開発にはより多くの時間と労力が必要になる。

#### 大規模並列プログラミング

プログラミングモデルとランタイムにおける革新は、新しいハードウェアおよび新しいソフトウェアの登場によって惹起されるのが常である。2003年頃よりコンピュータアーキテクチャは一大画期を迎え、いわゆるマルチコア時代に突入し、さらにはマルチコアからメニーコアへと拡大しつつあるが、これにより大規模並列プログラミングが一部の専門家だけのものではなく一般のプログラマーがなすべきものになるであろうと予測され、大規模並列プログラミングのための新しいプログラミングモデルの研究開発が活発となった。米国防総省の国防高等研究計画局 (DARPA) によるプロジェクトである High Productivity Computing Systems (HPCS) <sup>1)</sup> では、プログラミングモデルの革新は新たなプログラム言語の設計という形で追求され、IBM は X10 を、Cray は Chapel を、Sun Microsystems(当時)は Fortress をそれぞれ提案した。一方、Intel および Microsoft は、カリフォルニア大学バークレー校とイリノイ大学アーバナ・シャンペーン校のそれぞれに Universal Parallel Computing Research Center を設立し産学協同研究を推進しているが、プログラミングモデルの革新は C++ や Fortran といった既存言語を拡張する方向で追求されている。国際的に次なる大きな目標である Exascale コンピュータについては、米国ではエネルギー省の高等科学計算諮問委員会 (ASCAC) を中心に進められており、ハードウェアからランタイム、プログラミングモデル、アプリケーションに至るまでを包括した協調的アプローチが必要だとしている。

#### ビッグデータ：大規模データ処理

いわゆるビッグデータの処理のためのプログラミングモデルでは MapReduce への関心が際立っている。Google の研究員が 2004 年に論文 <sup>2)</sup> を発表したことで注目を集め、2007 年にオープンソースの実装である Apache Hadoop がリリースされたことで産学での実際の取り組みが加速した。モデルがシンプルであるにも拘わらず応用範囲は広く、転置インデック

ス作成、文書クラスタリング、機械学習、統計的機械翻訳、グラフアルゴリズム等、多くの問題の記述に使われている。より高水準のプログラミングモデルを提供するために新たにプログラム言語を設計する試みがあり、例えば、Apache Pig における Pig Latin、Apache Hive における QL、IBM 社の Jaql などであるが、いずれもランタイムは Hadoop 上で動作する。

MapReduce とは別のプログラミングモデルとしては Bulk Synchronous Parallel があり、グラフアルゴリズムを簡潔に記述できることから注目されている。Google の Pregel、Apache の Hama といった実装がある。

最後に、最近注目を集めている Apache Spark は、もともとカリフォルニア大バークレー校の AMP (Algorithms, Machines, and People) ラボで開発されたものであるが、インメモリーコンピューティングに訴えることにより、Hadoop MapReduce に比べ 10 倍から 100 倍の高速化が達成されるとしている。プログラミングモデルとしては、80 を超える高水準のオペレーターが用意されており、プログラムの記述量は 1/2 から 1/5 になるとしており、また、SQL、ストリーム処理、機械学習、大規模グラフのためのライブラリが用意されている。

#### ビッグデータ：ストリーム処理

ビッグデータのもうひとつの側面が、ストリーム処理で、時々刻々と発生するデータを即時に処理しようというものである。近年、CPS (Cyber-Physical Systems) あるいは IoT (Internet of Things) と呼ばれる研究領域が活発になり、社会インフラへのセンサー網構築が進行しているが、ストリーム処理は中核技術のひとつとして利活用されている。

ストリーム処理は、2000 年代初めに米国有力大学で研究が始まり、マサチューセッツ工科大学ブラウン大学フランダイズ大学の協同プロジェクトである Aurora、スタンフォード大学の STREAM などが知られる。プログラミングモデルとしては、両者とも SQL を拡張するアプローチを取り、Aurora では StreamSQL、STREAM では CQL (Continuous Query Language) というプログラミング言語が設計されている。今日、商用システムとしては、TIBCO の StreamBase CEP、IBM の InfoSphere Streams、日立の uCosminexus Stream Data Platform などがある。StreamBase CEP は Aurora プロジェクトを商業化したものである。InfoSphere Streams は、プログラミングモデルとして独自の言語 SPL (Streams Processing Language) を採用し、データフローグラフを宣言的に記述する。uCosminexus Stream Data Platform はプログラミングモデルとして前記 STREAM の CQL を用いている。オープンソースでは S4 (Simple, Scalable Streaming System) がある。もともとは Yahoo! のプロジェクトであったが、2011 年 9 月に Apache Incubator プロジェクトとなった。プログラミングモデルとしては、Actor モデルに基づいた API を用いて Java で記述する。さらに、最近では、PaaS (Platform as a Service) として提供される例も見られる。例えば Amazon 社は、2013 年 11 月に Amazon Kinesis を発表しているが、ストリーム処理のための API およびライブラリが提供され、Java あるいは Python にてアプリケーションを記述する。

## モバイルコンピューティング

モバイルコンピューティングでは、スマートフォンの普及が急速に進行しており、iPhone と Android が二大勢力になっている。iPhone のプログラミングモデルであるが、2014 Worldwide Developers Conference にて新しいプログラミング言語 Swift が発表された。フレームワークとしては、これまでの主力言語である Objective-C によって書かれたものをそのまま利用することができ、ユーザーインターフェース構築、オーディオ再生、地図表示のためのフレームワーク等、豊富に用意されている。Android の場合は、プログラミング言語に Java Standard Edition ベースのものを採用し、同様に豊富なアプリケーションフレームワークが提供されている。いずれも開発環境は無償で入手することができ、開発したアプリケーションを公開するマーケットがそれぞれに整備されている。

## ドメイン特化言語

ドメイン特化言語 (Domain Specific Languages) とは、特定のドメインの問題を解くために設計されたプログラム言語で、そのために特化したプログラミングモデルを提供し、汎用言語に比べ生産性は著しく高いとされる。ドメイン特化言語の歴史は古く、現存するものも多種多様であり、例えば、grep で使用される正規表現を記述するための言語、Web のドキュメントを記述するための HTML、デジタル回路を設計するための VHDL、関係データベースにおいてデータの操作や定義を行うための SQL、等々枚挙にいとまがない。先にビッグデータのプログラミングモデルのところで言及した Pig Latin、QL、JaqL、StreamSQL、CQL、SPL、などもドメイン特化言語であるといえる。最近では、IT 業界における数理科学への関心の高まりもあり、統計解析向けの R 言語、統計解析ソフトウェア SPSS で使用される言語、特に組み込み系のモデリング言語としての利用が高まっている MATLAB/Simulink、などにも産学からの注目が集まっている。また、Exascale コンピューターにおけるプログラミングの複雑さを克服するために、ドメイン特化言語を活用しようとする動きもある。

## Web アプリケーション

最後に Web アプリケーションに関して論ずれば、これは今日最も典型的なジャンルのソフトウェアであり、いくつかのプログラミングモデルが割拠しているが、いわゆる動的スクリプト言語(Dynamic Scripting Languages)の台頭が目覚ましい。プログラミングモデルの生産性が高いこと、ランタイムがオープンソースとして提供されていることがその主因であろう。例えば、PHP は 1995 年に動的 Web ページ作成のために新たに設計された言語であり、今日 80% 近い Web サイトで用いられているといわれており、著名サイトには Facebook や Wikipedia などがある。一方、Perl は汎用の言語であるが、1990 年代後半に CGI スクリプトを記述するための言語として普及が進み、Amazon.com や Priceline.com などでも利用されている。Python は、Google、Yahoo!、YouTube、Facebook などでも使用されている。Ruby は国産の汎用動的言語であり、その言語仕様は 2012 年に国際標準として採択されている<sup>3)</sup>。著名サイトでは GitHub において用いられており、今後のさらなる伸長が期待される。また、元来クライアント側の web ブラウザー中で用いられる JavaScript を、サーバー側のネットワークプログラミングに用いるフレームワーク Node.js も急速に普及しており、著名サイト

では LinkedIn、PayPal 等で使用されている。

#### （４）科学技術的・政策的課題

- ・プログラミングモデルの研究開発は、その性格上単独で実施されるべきものではなく、なんらかのアプリケーションの研究開発と一体化して実施されるものである。とすれば、見方を変えるならば、CPS (Cyber-Physical Systems)やビッグデータなどの大規模 IT 応用研究開発プロジェクトにおいては、プログラミングモデルの革新の好機であると考え、プログラミングモデルの研究開発およびそのランタイムの研究開発を包含することを常に検討すべきであろう。
- ・Exascale コンピューターについては、ハードウェア、ランタイム、プログラミングモデル、アプリケーションの各層の研究開発を包括的に実施すべきであろう。その際、アプリケーションが最も重要であり、医療・環境・エネルギーなど国家として重要な応用領域を少数決定し、それらに導かれる形でプログラミングモデルとランタイムの研究開発を行うべきであろう。
- ・ドメイン特化言語については、プログラムの開發生産性を劇的に向上させることから、わが国の産業構造上重要な組込みシステムや、CPS におけるセンサーデータの処理などの分野において、特に注目すべきであろう。新しいプログラミング言語については、良好に設計できたとしても、ランタイムの開発に要するコスト、プログラマーが習得に要する時間が技術的課題になるが、この方面の研究開発により緩和することが可能であると考えられる。
- ・今日サイバー攻撃は大きな社会問題になっているが、攻撃にはさまざまなソフトウェアの脆弱（ぜいじゃく）性が巧妙に利用されている。特に、急速に発展しつつあるスマートフォンや SNS(Social Networking Service)のプラットフォームは、攻撃者にとって魅力的な攻撃対象であり、新しい機能と共に新たな脆弱性を生み出している。こうした脆弱性をプログラミングモデルあるいはランタイムのレベルで排除しようとする試みもなされおり、例えば、Java 等のメモリーセーフ言語の設計、Perl や Ruby 等における汚染チェック (taint checking)の導入、等がある。プログラミングモデルあるいはランタイムにおいては抜本的な排除が可能であるだけに、この方面の研究開発を加速進展すべきであり、また、普及にあたっては政策的関与も検討すべきであろう。
- ・ビッグデータにおけるプログラミングモデルの研究開発については、大量のデータを所有する米国企業に勢いがあり、大きな利得となっている。他者からみればビッグデータへのアクセスが研究開発のボトルネックになっているといえる。Open Data が解消に大きな役割を果たす可能性もあるが必ずしも現時点で行方は定まっておらず、国としてもボトルネック解消に積極的に関与すべきであろう。

#### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・Exascale コンピューターの構築を視野に、米国では DARPA が 2010 年に Ubiquitous High Performance Computing <sup>4)</sup>および Ominipresent High Performance Computing <sup>5)</sup>の二つのプログラムを相次いで開始したが、前者は第 1 フェーズの 2 年間で中絶し、後者は採択決定後に中止となった。現在は、エネルギー省が Exascale コンピューターの推進主

体であり、2011年にX-Stackプログラム<sup>6)</sup>、2012年8月にFastForwardプログラム<sup>7)</sup>、2013年11月にDesignForwardプログラム<sup>8)</sup>、2014年11月には規模も大きく本格的なCORALプログラム<sup>9)</sup>を開始している。ハードウェア、ランタイム、プログラミングモデル、アプリケーションを包括したアプローチを採る。また、DOEにとって重要なアプリケーションを三つ選定し、それぞれにコデザインセンターを設立していることは注目すべきであろう。プログラミングモデルに着目すれば、例えば、X-Stackにおいてはドメイン特化言語ないしドメイン特化言語構成子が論じられており、FastForwardでは生産性高くGPUを利用するためのプログラミングフレームワークやコアモデルが追求されている。

- 日本も2020年をめどにExascaleコンピューターを構築することを目指しており、2014年10月に理化学研究所より富士通が基本設計を受託した。生命科学、社会科学、製薬等の分野における重点アプリケーションを決め、ハードウェアとソフトウェアを協調設計するとしている。プログラミングモデルでは、分散メモリー環境を対象とした指示文ベースの並列言語XcalableMPを開発しており、高性能の並列アプリケーションを容易に作成することができるとしている。
- ビッグデータにおけるプログラミングモデルについては、米国IT企業の研究開発が極めて活発であるが、こうした企業では、応用研究・開発と産業化がほぼ一体化している感があり、注目すべきである。また、先行牽引するGoogleは成果を論文として発表しているがソフトウェアをオープンソースとして公開しない場合もあるのに対して、Yahoo!は同等のソフトウェアをオープンソースとして成長させる方策を取り、エコシステムを構成して追撃している点も興味深い。モバイルコンピューティングにおける、Apple(iPhone)とGoogle(Android)の構図も同様に捉えることができるであろう。
- 動的スクリプト言語においては、ランタイムはインタープリターベースのもので普及が進んできた。PythonやJavaScriptにおいては、コンパイラーによる高速化が行われているが、それ以外の言語では実用的なコンパイラーが登場しなかった。仕様が極めて柔軟であるためコンパイラーの開発に多大なコストを要するのが理由と思われるが、そのような中、Facebook社が2010年2月にPHPからC++へのトランスレーターを公開し、さらに、2011年12月には動的コンパイラーをもつHipHop Virtual Machineをリリースしたことは注目すべきであろう。

## (6) キーワード

マルチコア、Exascale、ビッグデータ、大規模並列処理、大規模データ処理、データストリーム処理、モバイルコンピューティング、ドメイン特化言語、動的スクリプト言語

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・ある程度の規模の研究者コミュニティがあり、主要国際会議において一定の存在感を示している。
	応用研究・開発	○	→	・動的スクリプト言語に見られるように、ある程度の応用研究が行われている。
	産業化	○	↑	・ビッグデータあるいはモバイルコンピューティングにおいて見られるように、米国発のものではあるが産業化が積極的に推進されている。
米国	基礎研究	◎	→	・研究者の層は厚く、主要国際会議でも圧倒的の存在感を示している。
	応用研究・開発	◎	↑	・ビッグデータあるいはストリーム処理において特に顕著であるが、産学が主体となり応用研究レベルは非常に高く、世界を牽引している。GoogleおよびYahoo!等の新興IT企業では応用開発と産業化は一体化している感がある。
	産業化	◎	↑	・モバイルコンピューティングにおいて特に顕著であるように、産業化の水準は極めて高く、他国の追随を許さない水準である。
欧州	基礎研究	◎	→	・欧州全体で見れば、研究者の層は厚く、主要国際会議でも米国に次ぐ存在感を示している。特に、理論的研究では拮抗している。
	応用研究・開発	○	↑	・プログラム言語の設計実装に伝統的な強みを持ち、近年では、エリクソンのErlang、スイス連邦工科大学のScala等、注目すべき成果がある。
	産業化	○	↑	・上記ErlangおよびScalaといった欧州発の技術の産業展開が進行している。 ・モバイルコンピューティングにおいても産業化は高い水準にある。
中国	基礎研究	○	↑	・主要国際会議での発表が見られるようになってきた。 ・2012年にはPLDIとECOOPが北京で開催されている。
	応用研究・開発	△	→	・新たなプログラミングモデルないしランタイムということでは注目されているものはないようである。
	産業化	○	↑	・大規模SNSサイトが存在することから、ビッグデータ等において、おそらくは米国発の技術の産業応用が進行しているものと思われる。
韓国	基礎研究	○	↑	・主要国際会議での発表が見られるようになってきた。
	応用研究・開発	△	→	・新たなプログラミングモデルないしランタイムということでは注目されているものはないようである。
	産業化	○	↑	・モバイルコンピューティングにおいて顕著であるが、米国発のものであるが産業化が貪欲に推進されている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル  
 応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル  
 産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※わが国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。  
 ◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、  
 △：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）引用資料

- 1) High Productivity Computing Systems  
[http://en.wikipedia.org/wiki/High\\_Productivity\\_Computing\\_Systems](http://en.wikipedia.org/wiki/High_Productivity_Computing_Systems)
- 2) Jeffrey Dean and Sanjay Ghemawat, “MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters”, Proceedings of the 6th conference on Symposium on Operating Systems Design & Implementation (OSDI’04), <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1251264>
- 3) ISO/IEC 30170:2012 Information technology -- Programming languages – Ruby  
[http://www.iso.org/iso/iso\\_catalogue/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=59579](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=59579)
- 4) Ubiquitous High Performance Computing  
<https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&id=cbc05c86eb555a334708b570564dddca&tab=core&cvview=0>
- 5) Omnipresent High Performance Computing  
<https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&id=f9690cdd66d51b00eda9eba2e16015d6&tab=core&cvview=1>
- 6) X-Stack Program  
<http://www.xstack.org/>
- 7) FastForward Program  
<https://asc.llnl.gov/fastforward/>
- 8) DesignForward Program  
<https://www.nersc.gov/research-and-development/design-forward/>
- 9) CORAL Program  
<http://www.energy.gov/articles/department-energy-awards-425-million-next-generation-supercomputing-technologies>

### 3.4.4 システムソフトウェアとミドルウェア

#### (1) 研究開発領域名

システムソフトウェアとミドルウェア

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

アプリケーションソフトウェアの実行環境や開発環境を提供する基盤ソフトウェアに関する研究開発

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

システムソフトウェアおよびミドルウェアは基盤ソフトウェアともよばれ、あらゆるアプリケーションソフトウェアに対して動作基盤を提供するものである。基盤ソフトウェアはハードウェアとアプリケーションの間に位置し、ハードウェアの提供する諸機能を抽象化し、アプリケーションによって利用しやすい形で提供している。そのため、ハードウェアが進化すれば基盤ソフトウェアも進化する必要があり、新たなアプリケーションが出現すれば基盤ソフトウェアも変化が必要がある。ハードウェアとアプリケーション双方の変化に影響を受けるため、その研究対象となる分野は多岐に亘る。

ハードウェアの進化という視点から見れば、GPU などのメニーコア・プロセッサの出現、ストレージクラスメモリの出現などがドライビングフォースとなり、オペレーティングシステムを含めた基盤ソフトウェアのさまざまなレイヤーで著しい進化と変化が起きている。一方、アプリケーションの変化という視点から見れば、ビッグデータやそれに関連した新たな応用分野の出現により、基盤ソフトウェアそのものも大きな変革が迫られている。

多岐にわたる基盤ソフトウェア研究をまとめることは容易ではない。現在、主流となっている基盤ソフトウェア研究を分類すると、おおよそ次の4本の柱から構成されている<sup>1)</sup>。

#### クラウド環境および仮想化

クラウド環境では多数の計算機を運用・管理する必要があり、その管理・運用コストを削減するためのキーテクノロジーとして位置づけられるのが仮想化技術である。仮想化技術を用いると、複数の仮想マシンを集約し管理コストを削減したり、高負荷時には利用する計算機の台数を増加させたり、柔軟な運用・管理が可能となる。また、ライブマイグレーションを用いることによりサービスを停止せずに計算機の保守が可能となる。

仮想マシンを実現するためのソフトウェア階層を仮想マシンモニターと呼び、オペレーティングシステムより下位のレイヤーで動作する。米国 VMware 社、英国の研究プロジェクトに端を発する Xen、Linux に組み込まれている KVM など、多くの商用およびオープンソースの仮想マシンモニターが実用に供されている。従来仮想化可能ではなかったといわれていた Intel 社の x86 系 CPU の基本的な仮想化方式が 1990 年代末に確立し、2000 年以降から現在に至るまで I/O 仮想化の最適化、仮想マシン間の資源共有、ライブマイグレーションおよびその最適化といった多くの提案が活発に行われ、実用技術として次々と採用されている。

一方、PaaS (Platform As A Service) 型のクラウドではコンテナ型のオペレーティングシステムの利用も盛んになっている。さらに、クラウド環境に特化したオペレーティングシ

テムの開発も行われている。仮想マシンモニターの提供する保護機能等は、仮想マシン内のオペレーティングシステムも類似した機能を提供している。そこで、仮想マシンモニターが動作しているということを前提とし、オペレーティングシステムの機能を絞り込んだ OSv<sup>2)</sup> や Unikernels などが開発されている。

また、仮想化のためのハードウェア支援機構が他の目的に応用されている。例えば、Arrakis はネットワークサーバーに特化したオペレーティングシステムであり、デバイス仮想化のための機構を活用し、ネットワーク通信のオーバーヘッドを大きく削減することに成功している。

### マルチコア・メニーコアやストレージクラスメモリーなど新しいハードウェアへの対応

ハードウェアの進化もシステムソフトウェア研究の起爆剤のひとつである。マルチコア・メニーコアといわれるプロセッサ、相変化メモリーなどのストレージクラスメモリーなど、新しいハードウェアへの対応も活発に行われている。

従来のオペレーティングシステムもマルチコアに対応しているものの、多数のコアを搭載するマルチコア環境にはスケールしにくい。米国マサチューセッツ工科大学で開発された Corey ではオペレーティングシステム内のデータ構造を工夫しスケラビリティを向上させている。マイクロソフト・リサーチとスイス連邦工科大学チューリッヒ校で開発されている Barrel fish<sup>3)</sup> は、コア数に対するスケラビリティ、GPU などのメニーコア・プロセッサを含むヘテロジニアスな環境への対応などを目指している。

GPU や Xeon Phi のようなメニーコア・プロセッサを第 1 級の資源として抽象化する試みも活発である。通常、GPU は外部デバイスとして扱われており、GPU 上で動作するプログラムからオペレーティングシステムの機能を利用できない。Guff's では GPU からファイルシステムを直接利用可能にし、シームレスな統合を目指している。

他にも、例えばストレージクラスメモリーに適したファイルシステムの研究なども行われている。従来のファイルシステムは、バイト単位でアクセス可能な低遅延デバイスであるストレージクラスメモリーには適さない。並行性制御という古典的な課題に対して、一連の命令列を不可分に実行するトランザクショナル・メモリーによるアプローチも研究されている。

### ビッグデータの処理基盤

ビッグデータ処理では多量のデータをリアルタイムに処理する必要があり、そのための処理基盤の構築が求められている。ビッグデータ処理基盤はいくつかのソフトウェア階層から構成されており、機械学習や統計処理の並列化という上位層、そのためのプログラミング環境やプログラミング言語の整備、さらにそれらを支える大規模ストレージ、大規模分散並列処理のための資源管理、タスクのスケジューリングなどの低レイヤーでの処理もある。

システムソフトウェア研究は低レイヤーでの処理基盤から基本的なプログラミングモデルの提供までを守備範囲としており、その研究開発内容は 3.4.3 「プログラミングモデルとランタイム」で述べられている事項と大きく重なっている。そのため、この項目に関しては 3.4.3 「プログラミングモデルとランタイム」を参照されたい。

## セキュリティおよび信頼性向上技術

オペレーティングシステムやミドルウェアには高い信頼性が求められる。サンドボックスや Stack Guard などの動的な安全性対策の研究から、現在は、基盤ソフトウェアの不具合（いわゆるバグやセキュリティ・ホール）をコードレベルで検出するという手法へと研究開発の方向性がシフトしている。これはコードの検証・解析のために手法が発達してきたため、大規模ソフトウェアに対しても適用可能になってきたためである。さまざまなヒューリスティックスを併用しつつ、モデル検査、データフロー解析、ソフトウェアの疑似実行などの手法を、オペレーティングシステムなどの大規模なソフトウェアに適用するというアプローチが多い。

### （４）科学技術的・政策的課題

- ・アプリケーションの実行を支える基盤という役割ゆえ、システムソフトウェアやミドルウェアに関する研究開発の成果は第三者からは見えにくい。しかし、新たな市場開拓につながるような斬新なアプリケーションの背後には、必ずシステムソフトウェア研究のイノベーションが潜んでいると認識しておくことが重要である。例えば、Google のような検索エンジン、Facebook のようなソーシャルネットワーキングサービスの背後には、システムソフトウェアの研究開発成果があるということを明確に意識すべきである。情報産業におけるイノベーションを生み出すためには、見えやすくわかりやすいアプリケーションにばかり注力するのではなく、そのイノベーションを支えるシステムソフトウェア分野にも注力する必要がある。
- ・システムソフトウェア研究の原動力のひとつは新しいハードウェアの出現である。日本のデバイス研究は世界的に見ても高い水準にあることを生かし、実用化研究の段階に入りつつある新たなデバイスを想定した研究開発を支援する体制が必要である。ストレージクラスメモリーのためのシステムソフトウェア研究などは強く支援すべきテーマである。システムソフトウェア研究という立場からすると、実用化に至る前のデバイスを対象に研究を行うことはリスクも大きく、政策的な支援がない限り積極的には取り組みにくい。特に、秘密保持の観点から新デバイスについての詳細情報を、組織を超えて共有することは難しく、組織をまたいだ有機的な研究チームによる研究開発が難しい。
- ・システムソフトウェア分野の研究開発には、ソフトウェアに関する知識や経験だけではなくハードウェアについての深い理解も必要となる。また、高度なプログラミング・スキルを必要とするため、システムソフトウェアの研究開発に携わることのできる人材を育成することは容易ではない。システムソフトウェアの分野は技術の進歩が早く、一線で必要となるスキルを大学等の教育機関単体ですべてカバーすることは現実的ではない。企業との連携による教育はすでに部分的に行われているものの、より踏み込んだ形での連携等も検討する必要がある。例えば、高等教育機関におけるカリキュラム策定や講義内容等について企業等が積極的に関与するような方向性も考えられる。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

クラウドの基礎技術は大きく進展をとげており、OSv などの新しいスタイルのオペレーティングシステムについて注目しておく必要がある。また、国産仮想マシンモニター

BitVisor やその派生技術にも注目しておく必要がある。

ビッグデータのための基盤技術は、Hivemall などの国内動向や Apache Spark<sup>4)</sup>の今後の動向に注目しておきたい。ストレージクラスメモリーなどを利用した OLTP (online transaction processing)<sup>5)</sup> 技術も重要である。

マルチコアやメニーコア向けのオペレーティングシステムに関しては Barrelfish や GPU を活用したオペレーティングシステムやその仮想化などに注目しておきたい。

ソースコードやバイナリの解析技術は、一般のソフトウェア開発者が活用できる段階まで成熟していくにはまだ長い時間がかかると思われるものの、LLVM/Clang や S2E、Klee などのツール群の動向を見守る必要がある。

#### （6）キーワード

仮想化技術、クラウド環境、マルチコア・メニーコア、ストレージクラスメモリー、トランザクショナル・メモリー、大規模データ処理、ソフトウェア信頼性、セキュリティー

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	主要な国際会議等での発表件数等をみると、やや見劣りのする面がある。しかし、VPN Gate、Gum などの基礎研究の成果が評価の高い国際会議で発表されており上昇傾向にある。
	応用研究・開発	○	→	Linux 等のオープンソースへの貢献が著しい。公的な研究機関における Hivemall 等のオープンソース活動は活発である。国際的にも一定の存在感を示している。
	産業化	○	→	システムソフトウェアは組込みシステムや制御システムとも深い関係があり、自動車やデジタルカメラなど世界的に大きなシェアを持つ製品や、鉄道等の社会基盤における存在感は大きい。
米国	基礎研究	◎	→	基礎研究における存在感は圧倒的である。MIT、Stanford 大、Wisconsin 大、UCSD などにおける基礎研究が活発である。
	応用研究・開発	◎	↑	大学主導の研究がベンチャー企業等を通じて実用化される事例(Coverity など)や、Google、Amazon、Facebook 等の実運用経験から得られた知見に基づく応用指向の研究まで幅広い。
	産業化	◎	↑	情報産業を牽引する企業が次々と登場しており、骨太の基礎研究に支えられた新しいサービスの展開も活発である。
欧州	基礎研究	○	→	米国に比べると見劣りはするものの、国際会議等では一定の存在感を保っている。Xen や Barrelfish などの基盤ソフトウェア、S2E、Coccinelle などのツール群に強みがある。
	応用研究・開発	○	→	ソフトウェアの安全性基準策定などにおいて大きな影響力を有している。そのような背景から、ソフトウェアの検証技術に強い。
	産業化	○	→	自動車の組込みソフトウェアなどの技術開発は活発である。基盤ソフトウェア研究の成果が直接、大きな産業として成長しているようなケースはあまり見られない。
中国	基礎研究	○	↑	多くの論文が一流の国際会議に採択されるようになり存在感を増している。上海交通大学、MSRA などが強い。米国で学位を取得した研究者が帰国するようになりレベルの向上は著しい。
	応用研究・開発	△	↑	Baidu や Alibaba などのサービスが運用されており、応用研究がすすんでいる可能性は高い。上海交通大学発のソフトウェアが中国内のクラウドで利用されているという事例もある。
	産業化	○	↑	検索エンジンや電子商取引などの大規模なサービスが運用されており、産業化は順調に進んでいるといえる。
韓国	基礎研究	○	↑	最近になって急激に基礎研究のレベルが向上している。SSLShader などの論文が一流の国際会議に採択されている。Samsung からの支援もあり SSD 関連の層が厚い。
	応用研究・開発	△	→	スマートフォンなどの携帯端末向けの基盤ソフトウェア開発は活発に行われている。しかしシステムソフトウェア分野からみて特筆すべき応用研究や開発の話は特に見えていない。
	産業化	○	↑	スマートフォンなどの携帯端末に関連した産業は活発である。米国発の基盤ソフトウェアではあるものの、産業活性化のためにうまく活用している。

（註1）フェーズ

- 基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
- 応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
- 産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

- ※わが国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
- ◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗ : 上昇傾向、 → : 現状維持、 ↘ : 下降傾向

## （8）引用資料

- 1) システムソフトウェア関係の国際会議報告（ACM Symposium on Operating Systems Principles, USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation, ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, USENIX Annual Technical Conference, ACM European Conference on Computer Systems など）
- 2) OSv - the operating system designed for the cloud. <http://osv.io/>
- 3) Barrelfish. <http://www.barrelfish.org/>
- 4) Apache Spark - Lightning-Fast Cluster Computing. <https://spark.apache.org/>
- 5) OLTP Database Systems for Non-Volatile Memory .  
<http://istc-bigdata.org/index.php/oltp-database-systems-for-non-volatile-memory>