

科学技術未来戦略ワークショップ報告書
「ドメインスペシフィック・コンピューティング
～新たなコンピューティングの進化の方向性～」

2017年11月29日（水） 開催



エグゼクティブサマリー

本報告書は、国立研究開発法人 科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）が平成 29 年 11 月 29 日に開催した科学技術未来戦略ワークショップ（WS）「ドメインスペシフィック・コンピューティング ～新たなコンピューティングの進化の方向性～」に関するものである。

少子高齢化に伴う労働力不足の解消、高齢者・障がい者の介護・自立支援、安全で便利な移動手段の確保、ものづくりの効率化、社会インフラの効率的な保全、セキュリティ強化、プライバシーの確保、などの社会的課題に対し、スマートロボット、自動運転、IoT などによる Society5.0 の実現が期待されている。これを支えるコア技術の一つとして、これまで以上の高速化・低消費電力化とともに、認識・判断といったより高度な情報処理技術や人工知能（AI）技術が求められている。一方、現在の情報処理の担い手である CMOS 集積回路は微細化の限界に直面しており、従来型（フォン・ノイマン型）のロジック回路によるコンピューティングではさらなる高性能化・高効率化は困難になりつつある。このため、新たな方向性として、ビッグデータ処理や機械学習・深層学習等に適する革新的なコンピューティング技術の開発が必要になってきている。

本ワークショップは、コンピューティングを活用する応用分野のボトルネックやユーザーが抱える技術的課題や将来技術への期待、新たに必要となる科学技術、その開発を促進するための政策などの議論を行い、革新的コンピューティングに関わる科学技術の強化に有効な研究開発戦略策定の一環として開催した。ここでは、CRDS の仮説を提示し、学会や論文誌の動向、国際ロードマップ活動、日本工学アカデミーの活動など国内外の活動状況、ユーザーが直面しているボトルネックや課題および今後のコンピューティングへの期待、ソフトウェア・アーキテクチャ・ハードウェアにおける重要な研究開発領域とその取り組み方、などについて話題提供を基に、総合討論で日本のターゲットとすべき応用領域と重要な計算ドメイン、効果的な研究開発の仕組みなどについて議論した。

CRDS の仮説として、コンピューティングの重要なワークロードや日本の強みを見据え、複数の応用に共通する計算ドメインを志向した取り組みが必要であり、特定の技術レイヤーの技術開発に留まらず、ドメインスペシフィック・アーキテクトを中心に技術レイヤーを垂直統合的に取り組むことが重要であること、新たに創出される基盤技術を他のドメインへ展開し体系化して強化することを示した。また、ソフト開発・ツール開発・ハードウェア試作ができる研究環境を整備すること、産学連携のエコシステムを作ること、研究開発のファンディングに関して戦略的な府省の連携が必要なことなどを示した。

革新的コンピューティングに関する国内外の活動状況においては、国際学会、論文誌における最新の動向、ポストムーア/ポストノイマン世代に向けた国際ロードマップ活動の現状、日本工学アカデミーの「次世代コンピューティング」活動が紹介された。コンピューティング関係の国際学会、論文誌における日本の存在感が減少していることや、技術のはやりサイクルに対する注意が示された。また、これまでの国際半導体ロードマップ（ITRS）に代わり、昨年からはデバイスだけでなくコンピューティングシステムまでを考慮した国際デバイス・システムロードマップ（IRDS）の活動が説明された。日本工学アカデミーで

も産業化の視点で CRDS と同様な「次世代コンピューティング」の調査活動を行っており、グラウンドチャレンジやイノベーションエコシステムの必要性が紹介された。

ユーザー側からの革新的コンピューティングに対する要望においては、自動運転に必要なコンピューティング特性、製造・物流を中心としたロボットの最新動向と課題、内視鏡を例とした医療応用領域からの期待が紹介された。自動運転では、自動車特有の安全性と品質を確保するために汎用コンピュータとして持つ特性と品質が重要なことなどが示された。ロボット(マニピュレーション)では、画像認識への深層学習の適用が進んでいること、動作速度、作業計画、学習にはまだ課題があることなどが示された。医療応用では、内視鏡などエッジ側で多くの計算処理ができるようにプログラマブル・デバイス、ヘテロジニアス・マルチコアへの期待が示された。

重要な研究開発領域とその取り組み方においては、革新的コンピューティングを支えるソフトウェア基盤、知的情報処理時代を支える情報処理アーキテクチャの革新、ハードウェア側からの提案が紹介された。ソフトウェアでは、科学技術シミュレーションにおけるポストムーアの取り組み、データ科学との融合による低消費電力化の試みが示された。アーキテクチャでは、コンピュータ技術革新の好機であり、知的情報処理アーキテクチャやシステムウェアなハード技術が重要で、中長期的な知的情報処理研究の発展全体を見通すことの必要性が示された。ハードウェアでは、フラッシュメモリのエラー訂正 (ECC) を例にした近似計算 (AC) の有用性と、AI に高いディペンダビリティを組み合わせることの重要性が示された。

総合討論では、CRDS の骨子案や話題提供の発表と質疑、事前アンケート結果を踏まえて、日本のターゲットとすべき応用領域と重要な計算ドメイン、情報処理のボトルネックと重要なワークロード、効果的な研究開発の推進方策と人材育成に関して議論を行った。その結果、以下のような方向性が示された。

- ・競争領域よりも手前の段階で産学連携を生みうる領域として計算ドメインを考えるのは、競合他社や様々な企業が参加でき、国のプロジェクトとして合理的。
- ・信頼性、セキュリティ、リアルタイム性、精度、省電力など産業界からの要求と個別技術をマッチングさせることが重要。
- ・自動運転やアミューズメントなど、本当に新たなコンピューティング技術が必要である程度のボリュームがあるキラーアプリが必要。
- ・コア部分を共通化したプラットフォームで横展開し、ユーザー毎に味付けし差別化することが必要。
- ・要求される計算機能とボトムアップの新技术とのマッチングが重要。
- ・人材育成、スタートアップ育成の観点から設計ツールを自由に使える環境、トライアンドエラーができるエッジ用の環境・実験設備が必要。

ワークショップでの議論を踏まえ、CRDS では今後国として重点的に推進すべき研究領域、具体的な研究開発課題を検討し、研究開発の推進方法も含めて戦略プロポーザルを策定し、関係府省や関連する産業界・学界等へ提案する予定である。

1. ワークショップの開催趣旨と骨子案の説明

木村 康則、馬場 寿夫 (JST-CRDS)

今回のドメインスペシフィック・コンピューティングのテーマを選んだ理由は2つある。1つは最近のAI、ディープラーニングなどコンピューターの使われ方あるいは進歩が従来のラインからは少し違った新しい方向に行き始めていることである。これに対しては、多様な考え方をもち込まないといけない。一方で、ニューロモルフィックや量子コンピューティングといった少し先の技術と思っていたものが、個人的な予想より早く近づいてきているという感覚を持っている。このような状況では技術的に様々な変化が起き、使われ方にも変化が起きているので、そこに対して我々は何か考えておく必要がある。2つ目は人材の問題である。これまでのヒアリングの中で一番多く聞かれた。日本は分野ごとの深掘りはできていて横の連携もあるが、アプリケーションからデバイスまでを一貫して見ることができる人、広い視野で見渡せるいわゆるアーキテクトがいない。産業界あるいは学会を含めて人材が不足している。これでは、シリコンバレーの大きな会社、世界や政治を動かす政府以上の力を持っている会社の人たちとは立ち向かえない。人材育成的な仕組みの問題も含めたところにもう一つ考えるべきところがあると思っている。このようなところを議論してうまくまとめたいと思い、今回のテーマを決めた。

7月に小さな研究開発戦略検討会を開催し同じテーマで技術的な議論した。今回はユーザー側の方々にも来ていただいており、今までコンピューターの仕組みをやってこられた方々と様々な議論ができればと思っている。前回の検討会では率直な意見が飛び交ったが、今回も遠慮なく建設的な議論をしていただきたい。

背景説明、国内外の動向、検討の経緯、提案の方向性、研究開発の具体的な進め方などについて紹介する。

背景としてコンピューティングに関する現状認識を簡単に説明する。これからは社会の様々な領域で情報処理が増えていく。例えば、自動運転、ロボット、IoTなどの分野では、これまで以上の高性能化や低消費電力化が求められる。一方、半導体技術を見ると、最近になって微細化の限界が少しずつ見え始めており、半導体の微細化により情報処理能力の向上を得るのが難しくなっている。このため、従来のフォン・ノイマン型のコンピューティングに限らず新しい計算原理のものを導入して、全体として性能向上や低消費電力化を進めていく必要がある。

特に応用分野を考えたときに、今まではクラウド側が多かったが、これからはIoTや自動運転に代表されるように、エッジ側が非常に重要になってくる。このようなエッジ側でのコンピューティングに対する要求はこれまでとは少し違った形になると考えられる。例えば、リアルタイム性が必要になってくるので、このような視点も含めて新たなコンピューティングを考えていく必要がある。科学技術的な視点でも、桁違いの低消費電力性、エネルギー効率/電力効率を考えた取り組みが必要になってくる。

過去にもコンピューティングや集積回路に関する様々なプロジェクトがあったが、7月の研究開発戦略検討会では反省すべき点が指摘された。特定の技術レイヤーだけに閉じたプロジェクトでは、各技術レイヤーでの成果は出るが、そこからなかなか実用化に結びつ

かない。このため、技術レイヤー間を跨ぐ形で実際に使えるような形を考えていく必要がある、という指摘があった。

コンピューティングが要求される領域の市場規模について既存の市場調査の報告書を基に簡単にまとめたが、全体としてかなり大きな市場規模になっており、無視できない重要な領域と考えている。

どの程度のコンピューティングの革新が要求されるかという一例として、プリファード・ネットワーク社が学習に要求されるリソースを試算した例がある。現状のスパコンは10PF(ペタフロップス)程度のレベルだが、自動運転やロボットなどの実世界の学習をやっていくためには1EF(エクサフロップス)以上と桁違いの性能向上が必要となっている。

新たなコンピューティングの技術開発に関する国内外の取り組み状況を簡単に述べる。米国は5年程度前からかなり活発な活動をしている。例えば、DARPAのSyNAPSEプロジェクトが実施され、その中でIBMがニューロシナプティックチップを試作している。また、IEEEの中にRebooting Computing Initiativeが作られ、デバイスも含めた形で新しいアーキテクチャを全体的に考えていく活動も始まっている。さらに、Googleなどが専用のアクセラレータを作るという動きもあり、企業も含めてかなり活発な動きになっている。ヨーロッパにおいては、Human Brainプロジェクトで脳を模倣したコンピューティングを作っていく取り組みがあり、中国はスパコンで1位を維持するためかなり投資をしている。一方、日本では、個別には様々な取り組みはあるが、日本全体としての大きなプロジェクトや各省連携でやるようなものはまだない。我々が調べた範囲では、アルゴリズムからデバイス・材料のレベルまで幾つかのプロジェクトがあるが、個別の技術レイヤーになっており、全体の技術レイヤーをつなげる形にはなっていない。

新たなコンピューティング技術に関する論文動向を調査した結果を簡単に示す。全体的な論文数は増加傾向にあり、アメリカと中国がかなり多く、ヨーロッパや日本がそれに続いている。ニューラルネットワーク、深層学習、近似計算など、この10年程度で急激に伸びている分野も幾つか見られる。

我々として考えていくべき検討の方向性あるいは軸足について説明する。図1-1は我々の考え方を示したものである。横軸にはコンピューティングを使う場所としてエッジからクラウドをとり、縦軸には様々な技術レイヤーをとっている。従来注目されていたのは、ビッグデータ解析や機械学習などクラウド側でのソフトウェア開発あるいはアルゴリズム開発が主であった。しかし、桁違いの性能を得るためにはアーキテクチャやデバイスなど下のレイヤーまで含めて考える必要がある。また、これからはエッジ側が重要になってくる。日本としてはエッジ側にはかなり強い技術を持っていることから、これを活かしてエッジ側の様々な応用に適するコンピューティング技術をやっていくべきと考えている。

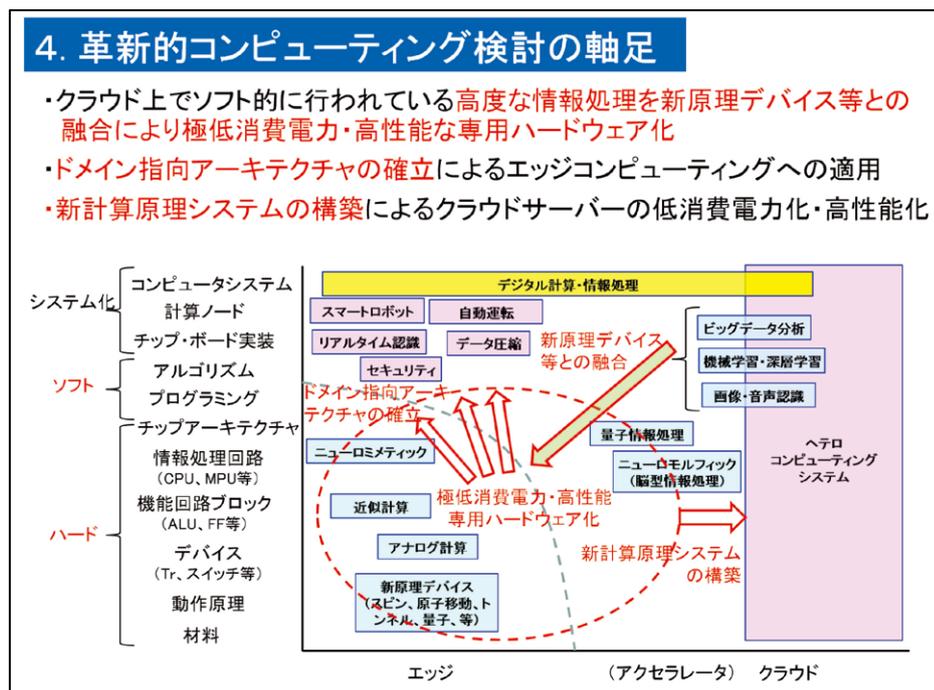


図 1-1 革新的コンピューティングの軸足

エッジ側で新たに開発した基盤技術をクラウド側にも適用し、低消費電力化・高効率化という形で展開することも考えられる。研究開発のやり方としては、いくつかの応用に共通な特定のコンピューティング技術を決めて行うドメインスペシフィックな形で行うことが必要と考えている。

これまでの調査活動について簡単に紹介する。今年の3月にCRDS シンポジウム「IoT/AI 時代にむけたテクノロジー革新 ー大変革時代の新機軸とはー」という公開のシンポジウムを行い、その後4月から調査チームを発足させた。40名以上の有識者へのヒアリングやセミナー等を開いて、コンピューティングに関わるアルゴリズム・ソフトウェア、アーキテクチャ、回路・実装技術、デバイス・材料の技術動向、学会動向、コミュニティ、ユーザー側の要望など様々な情報を集めた。これをベースに7月に研究開発戦略検討会を開催し、ここでの様々な意見を参考に中間報告資料という形で我々としての考え方をまとめた。その後、中間報告資料を基に内閣府、文科省、経産省等と意見交換を行った。今回のワークショップでの議論の結果を反映した形で、戦略プロポーザルにまとめていく予定である。

1
ワークショップの開催趣旨と
骨子案の説明

2
革新的コンピューティングに
関する国内外の活動状況

3
ユーザー側からの革新的コン
ピューティングに対する要望

4
重要な研究開発領域と
その取り組み方

5
総合討論

付
録

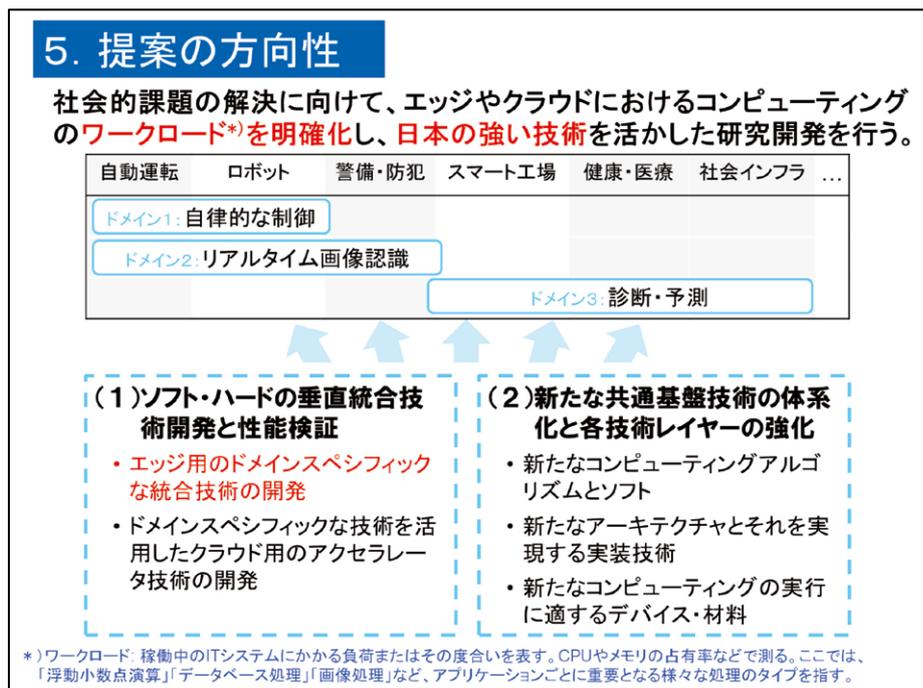


図 1-2 提案の方向性

図 1-2 は我々の提案の方向性について示したものである。社会で役立つことが重要なため、エッジやクラウドにおいて何が問題になっているのか、何が性能を律速しているのかを明確にし、それに対して日本の強い技術を生かして取り組んでいくことが必要と考えている。そこでは、自律的な制御、リアルタイムの画像認識、診断予測というように、応用そのものとは違う切り口で重要な計算ドメインを定義して、これに対して取り組むという提案である。

このためには、技術開発は垂直統合的にやるべきと考える。エッジ側は非常に重要と考えているので、エッジ用のドメインスペシフィックな統合技術開発を大きな柱とする。クラウド側もちろん重要であり、エッジ側の技術を活用してアクセラレータ用の技術開発を進めるべきと考えている。このような技術開発を進める中で、新たな基盤技術が創出されるが、これらを他の計算ドメインに横展開することや、日本の強みとなる共通基盤技術として育てていくことが必要である。ここでは、ソフト・アルゴリズム、アーキテクチャ、デバイス・材料と分けているが、これらが連携してやることを期待している。

図 1-3 はドメインスペシフィックな研究開発の一例を示したものである。自動運転やロボットなどの応用に共通する重要なコンピューティング技術の一つに「リアルタイム画像認識」がある。これまでは、この図の左端にあるシリコンのテクノロジーやフォン・ノイマン型のアルゴリズムを使って実現していた。しかし、このような技術では消費電力が大きいといった問題があり、技術の組み合わせに対して違った切り口を考えていく必要がある。どのようなルート（技術レイヤーの組み合わせ）で考えるかのオプションは様々ある。近未来的に考えれば、今の技術に近いところを選び、遠い将来を考えてアグレッシブに何桁も高効率になるルートを選択する場合もある。目的とする性能や時間軸を考慮して適切な技術を選択し、研究全体をマネジメントすることが必要である。

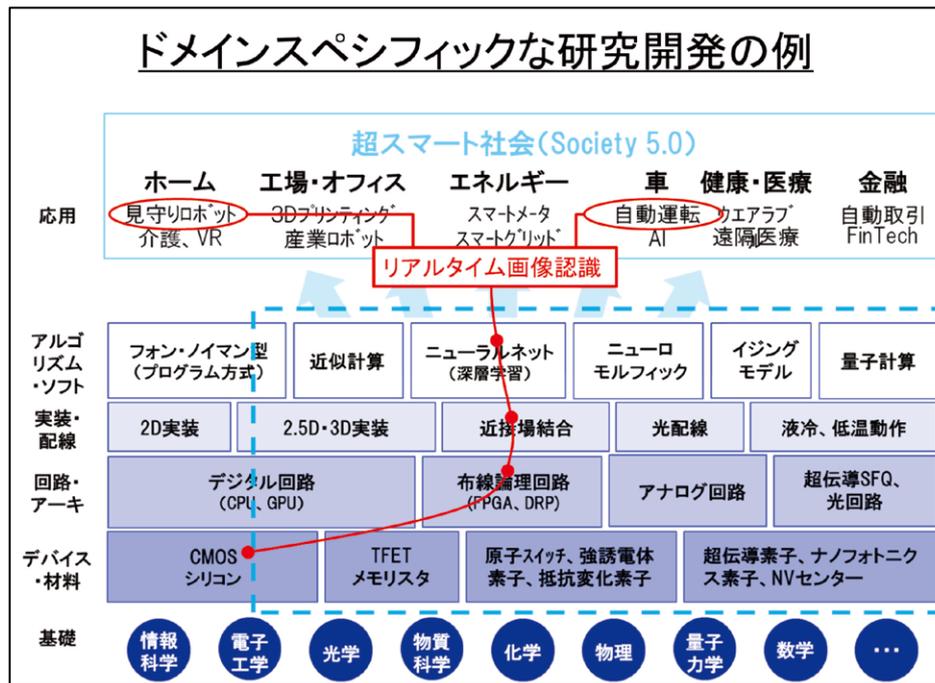


図 1-3 ドメインスペシフィックな研究開発の例

応用領域 \ ドメイン	自動運転	ロボット	警備・防犯	スマート工場	健康・医療	社会インフラ保守	VR	自動翻訳
自律制御	○	○						
リアルタイム画像認識	○	○	○				○	
診断・予測				○	○	○		
分散学習	○	○					○	○
特徴抽出	○	○	○			○		
暗号化	○		○	○	○			
データ圧縮			○			○	○	

図 1-4 エッジにおける応用領域とドメインとの関係

図 1-4 は、応用領域と計算ドメインとの関係を示したものである。通常はドメインとして応用領域で考えるのが普通と思うが、自動運転、ロボット、警備など異なる応用分野においてもコンピューティングという点では共通する項目が多いため、計算ドメインという

1 ワークショップの開催趣旨と骨子案の説明

2 革新的なコンピューティングに関する国内外の活動状況

3 ユーザー側からの革新的なコンピューティングに対する要望

4 重要な研究開発領域とその取り組み方

5 総合討論

付録

切り口で研究開発を進めるのが良いと考えている。これらが開発できれば、特定の応用だけでなく複数の応用領域に役立つ。

新たな共通基盤の体系化と各技術レイヤーの強化ということに関しては、技術レイヤー全体を統合していくという視点で、技術レイヤーの真ん中に位置し、ソフトとハードをうまく連携させて結びつけるアーキテクチャが重要である。しかし、日本の現状を聞くと、人がいない、人を育てていくが難しいという意見もあり、アーキテクチャに携わる人をどうやって強化していくかが一つの課題である。一方、上下をつなぐためには単に技術だけでなく、様々な設計ツールも重要であり、これらの開発についても考えておく必要がある。このような基盤技術の強化が非常に重要と考えている。

次に研究開発の進め方についての我々の考えを説明する。技術レイヤー間の統合的な研究開発の推進について先に述べたが、実際にやるのは容易ではない。この実現には幾つか重要な点があると考えている。ソフト開発、設計ツール開発、ハードウェア試作など全体を見ながら開発できる研究施設・環境整備が必要である。また、府省の連携も必要である。文科省では長期的なものをやり、経産省・NEDOでは5年、10年といった短・中期の技術開発をやると考えられるが、日本全体として見たときに、短期から長期まで全体として抜けないように、将来へ向かって重要な技術の開発ができる仕組みをつくることが重要である。特に技術成熟度（TRL）を考慮して適切な技術を選択していく研究開発の推進が必要である。

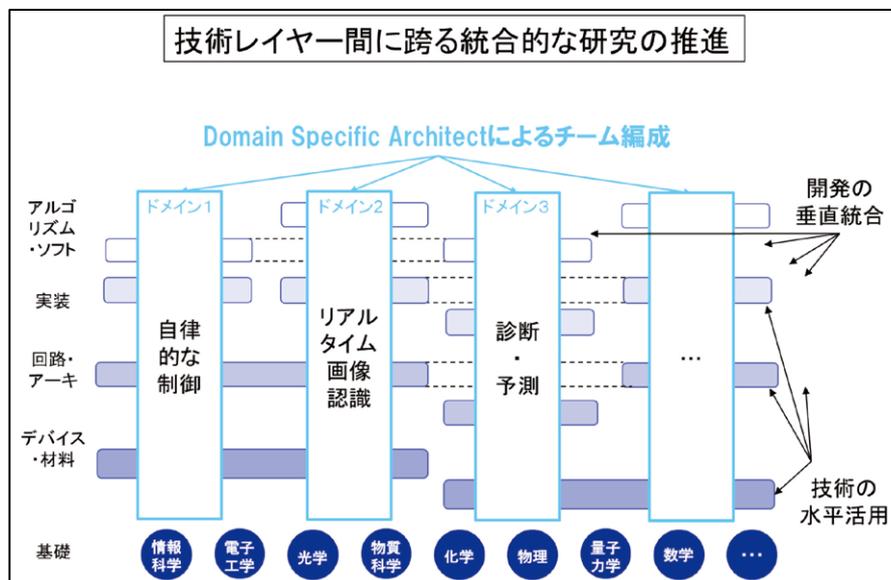


図 1-5 ドメインスペシフィックな研究開発の進め方（案）

学会や論文において日本のプレゼンスを高めながらやることも必要である。日本だけで垂直統合することは難しく、世界の優秀な技術を活用したり優秀な人や組織と連携したりしながらやっていく必要がある。このためには、日本が高い技術を持っていることを示さないと、世界の優秀な人たちも来てくれない。また、コミュニティの活性化も重要である。

アーキテクチャの人たちが少ないという話があるが、他の分野からアーキテクチャ分野に入っていけるように、コミュニティを広げていくことが必要である。さらに、人材の育成が必要である。図 1-5 は研究開発の進め方を示したものであるが、ドメインスペシフィックな研究開発を進めるためには、中核になるドメインスペシフィック・アーキテクトが全体を取りまとめていく必要がある。現状では全体をまとめられる人はあまりいないと思われるが、そのような人を育てていく必要がある。

図 1-6 はコンピューティング技術の研究開発予測を示したものである。フォン・ノイマン型のコンピューティングがなくなることはなく、今後も基幹技術として性能は伸びていくと考えられる。ただし、この伸び率は鈍ってくる。もちろんこれに対する研究開発は今後も行う必要があるが、これに加えてエンハンス技術として様々な技術を付け加えていき、全体では今後もコンピューティング性能は向上していくという形が必要と思われる。

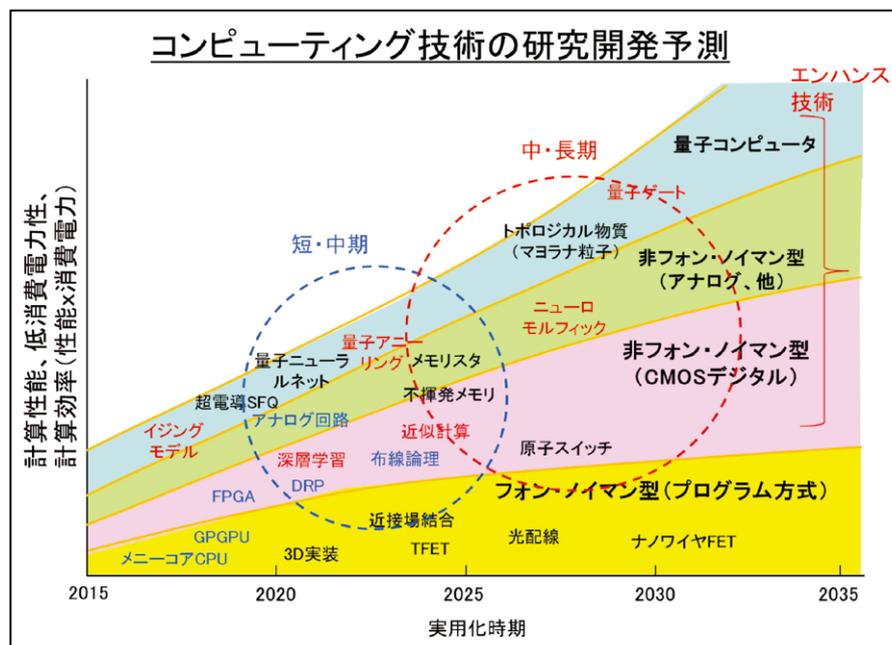


図 1-6 コンピューティング技術の研究開発予測

この図で、例えば短・中期で考えれば、青の点線で囲まれた領域を検討する必要があり、10年、20年というスケールの中・長期で考えると、赤の点線の領域を検討する必要がある。時間スケールを考慮して、本当の実用化を狙いながら実施することが重要である。

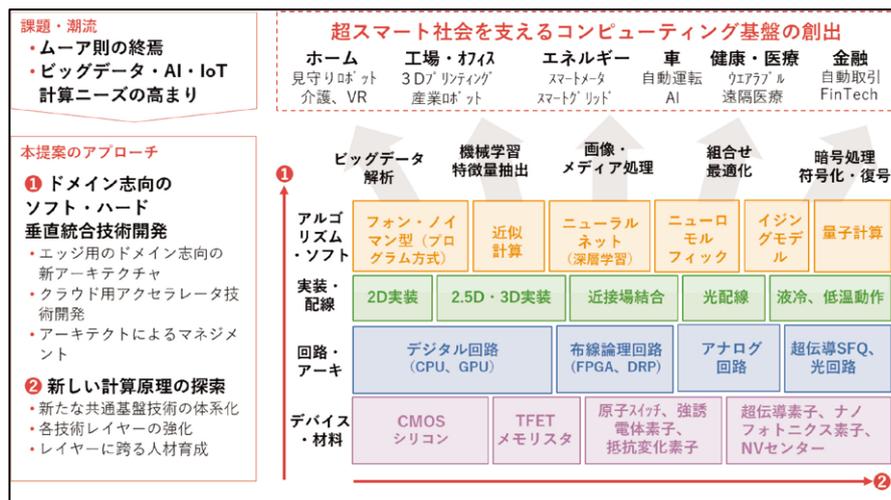


図 1-7 革新的コンピューティング研究開発に関する提案の概念図

最後に我々の提案をまとめる。図 1-7 はこれまで紹介してきた我々の考えをまとめたものである。社会の課題の解決に向けてワークロードを明確にし、日本の強い技術を生かして取り組んでいくことが重要である。そこでは、ソフトからハードまでの垂直統合的な取り組みが必要であり、特にエッジ側において計算ドメインをターゲットにして行うことが重要と考えている。また、共通的な基盤技術に関して知識の体系化、アーキテクチャ技術の強化、人材育成、府省のファンディングの連携なども重要と考えている。

【質疑応答】

- C：一番気になることは、技術の詳細について検討せずにバズワードだけが並んでいる印象を受ける。例えば、イジングマシンがどういうものであるかきちんと認識しないで書いていると思う。マックスカット問題に対しては早いですが、巡回セールスマン問題(TSP)は遅くなることが知られているが、提案者はこれを隠す。このため、バズワードだけで考えるのは非常に危険と思う。量子計算も今後 20 年で実用化するとは誰も信じていないが、これもバズワードとして入ってくる。信頼性の高い論文を読んで技術的裏づけを持って考えないといけない。できもしない計画を立てることを心配する。
- Q：このドメインスペシフィックというやり方は大前提としてすでに決まっているのか。経産省関係ではこのような形で行われている。経産省では企業が中心となるので、必ず応用のドメインスペシフィックになる。文科省系のプロジェクトに対してドメインスペシフィックと言うと、経産省と同じになると思う。
- A：このようなやり方だけが良く、他のやり方が悪いというわけではない。一つのやり方としてこのような考え方があっていいのではないかという提案である。我々の提案は文科省向けだけではない。この場は国全体として何に対してどのようなやり方で取り組んでいくべきかを議論する場であり、各府省、企業、大学、国研の関わり方も含めて考えていきたい。

2. 革新的コンピューティングに関する国内外の活動状況

2.1 国際学会、論文誌における最新の動向

平木 敬（東京大学）

原論文に当たるということは非常に大事であり、アーキテクチャやシステムという範囲の論文では年間 1,000 編から 2,000 編ほどの良質な論文が出ている。図 2-1-1 および図 2-1-2 に示すように、研究テーマというものは急に重要になるわけではなく、以下のような理由で流行がある。学生が研究する典型的なパターンとしては、学位を取得する必要性があることから、始まってから結果を得るまで 10 年経つ研究を学生のテーマにすることはできない。したがって、2 年から 3 年で論文を掲載するためには、どうしても流行を追わなければならない。流行は大体 2 年から 4 年程度続いて去っていく。2 年前に皆がそれをやろうとなった結果として急に論文数が増えているわけで、今の時点で論文が盛んだからその研究をこれから始めるのというのは、おかしな話である。3 年ほどでブームとなったテーマの論文数は減っていく。一部、流行に敏感ではない国々は遅れてやってくるので、ロングテールが生じる。ただし、伝統のテーマというものはあり、定常的に時々大変良い成果が出るということも忘れてはならないし、そこに貢献することは非常に重要である。

研究テーマというものは循環する。多くの人が既に体感していることだが、同じベースでも同じテーマでも、元になるテクノロジーが変わると焼き直しで何度も出てくる。この周期はアーキテクチャ分野では経験的に 25 年から 30 年程度であり、「昔やっていたあのテーマがまた出てきているな」とよく感じる。例えば AI や量子というのは一体何回目だろうか。今の AI は第三次ブームと言われ、量子は第二次ブームだろうか。何年かすると、そこから先の技術は難しいとなって、しばらく（20 年程度）お休みに入るのが研究テーマの循環である。このように循環することが、論文誌または学会における流行ではないかと考えている。ただし、一部の非常に重要な分野というのは持続していくものである。

最新の動向とは

- **研究テーマには流行がある（確信）**
 - 研究期間が2年平均（学位取る必要上）
 - 論文にでるのは2年前に流行りそうなテーマ
 - 経験上ブームの山は3年。ただし乗り遅れた研究は出る
 - 一部テーマはペースは遅いがコンスタントに良い成果
- **研究テーマには循環がある（経験上）**
 - 同じテーマもベースのテクノロジーが変わると新しい
 - 周期は経験的に25から30年
 - 今のAIブーム、量子ブームは何回目だろうか？
 - 今のAIは第三次ブームといわれている
 - 今の量子は第二次ブーム？（1990年代、2010年代）

図 2-1-1 研究テーマの流行と循環

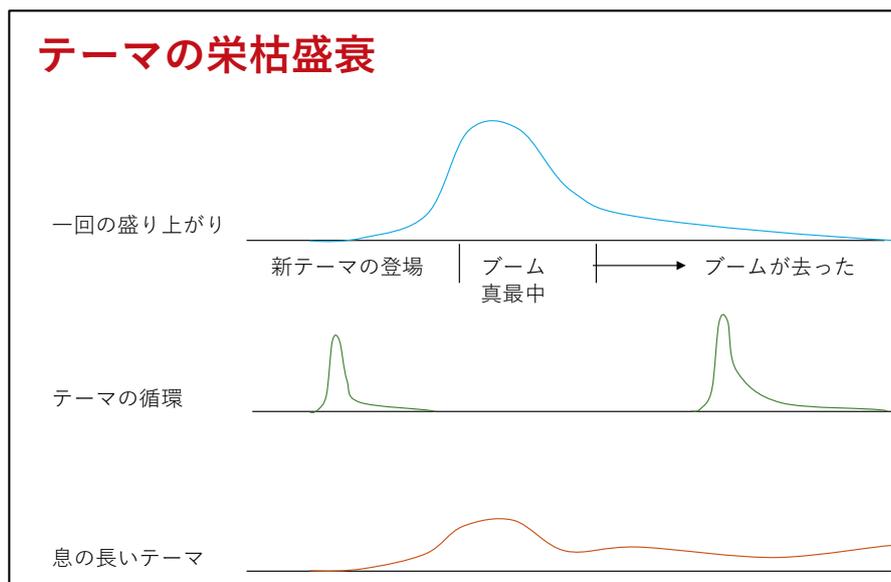


図 2-1-2 研究テーマの栄枯盛衰

昨年の論文を見て一番感じたのは、ブームが去ったテーマが再び出てきたことである。Hardware Transactional Memory というのは、数年前は盛んでアーキテクチャ学会の 3 分の 1 はこの関係と思われていたが、IBM がネガティブな論文を 3 つほど出したため、あっという間に火が消えた。しかし、2017 年には Hardware Transactional Memory は GPU と掛け合わせてはどうかということが出てきた。量子コンピューターは盛んになっているというが、論文誌を見ていると逆に下火になっている。数年前はどの学会でも量子コンピューターを入れようとセッションを設けたりしたが、残念ながらアーキテクチャが見る段階にはほど遠いという認識が定着して下火になってしまった。研究としては実はブームが去っているという直感がある。プロセッシング・インメモリはこれまで 2 回ブームがあったが、そろそろ盛り下がってきている。ハイブリッド・メモリキューブの登場によって、一番下のレイヤーにプロセッシング機能を入れたらこんなすばらしいことがあるという論文がいきなり何十件も出た時期があったが、残念ながら続かなかった。

息の長いテーマこそ面白い。1 つはネットワークのデッドロック問題で、今までとは違うアプローチでデッドロックを解決するという発表が出ている。実際にはデッドロックしたものを合理的に解消することによって、デッドロックはなかったことにするという論文だが、良い論文だと見ている。5 年に一回から 10 年に一回程度すばらしい論文が出る。分岐予測やプリフェッチやキャッシュなど、いわゆるマイクロアーキテクチャももうこれで終わりだろうと何度も思ったが、それを上回るものが出てくる。長く続く良い分野だが、日本は弱いのが心配である。

メモリの配置問題やメモリのコンシステンシー問題というのも、テーマは CPU、GPU、NVM（ノンボラタイルメモリ）など様々あるが、コンスタントに論文の出ている分野である。GPU は流行で 5 年もたてばなくなると思っていたが、なくならず論文が出ている。これは定着した分野であり、専門の国際会議は増えている。全部がアーキテクチャ系に来るわけではないが、それでも見えるほどコンスタントに続いている。ただし、

GPUの研究というのは焼き直しであり、CPUでやったものをGPUでどうかという銅鉄主義が見えるので、すごいという論文は多くはないというのが個人的感想である。

FPGAはなくならないけれども盛り上がらないという状態でずっと続いている。最近ではドメインスペシフィック・ランゲージ、デザイン・メソドロジーという論文もあり、既に国際会議も多くある。Microsoftのカタパルト (Catapult) やその後のブレインウェーブ (Brainwave) やBaiduのもの、Intelのアルテラ買収など、新しい動きがあつてなかなか目が離せない。私自身は長いつき合いで、直感的にFPGAでCPUに勝つというのはすごく大変なことだと思うが、多くの方はそれを無視している。なかなかIntelには勝てない中で頑張るといふような状況である。

AIはすごいブームになっている。昨年ぐらいから、CNNをどうするか、アクセラレータをどうするか、アナログでやるなど、多くのものが出てきた。AIを利用してアプロキシメイト・コンピューティング (AC) をやるという話も出てきている。しかし、私の見たところでは山は越えた。目ぼしいベンチャー企業は大きい企業に買われ、落ちついて製品をつくるというフェーズに入っているので、今から研究をするというのは少しつらいという印象を持っている。ディープラーニングネットワークを掛け算で単に実現することは、GPUに任せればうまくやってくれる。おもしろくするにはアナログなどを利用しなければならないが、論文はおもしろくても実現は難しいと見ている。

量子ニューラルネット、量子アニーリングの将来性には疑問を持っている。実は、イジングマシンではマックスカット問題は解けるが、他の問題はあまり解けない。マックスカット問題は産業応用がほとんどないので、せめてTSP (巡回セールスマン問題) とかナップサック問題を解いてほしい。厳密には量子マシンではないので、向こう20年ぐらいを見て、私たちが何をすべきか考える段階に来ていると思う。

アナログコンピューティングは立ち上がりかけである。伝統的な普通の演算器を使う回路だけではなく、メモリストタなど記憶機能がある二端子素子を使うものもある。まだ論文は少ないが投稿が増えているので、向こう2～3年はアナログコンピューティングは盛んになるだろう。しかし、その後は下火になると予想している。なぜなら、デジタルがアナログを滅ぼした歴史に学んでいないことと、二端子素子は歴史的に見て絶対ものにならないという教訓を無視しているためである。

ACというのは、電圧を下げたときに時々計算を間違えてしまうものでも使うとか、バンド幅を詰め込むためには意図的に精度を落としていくというものである。まだ自動ではできないので、アイデア一つで頑張っている。しかし、将来の見通しがある。特にAI関係やIoTはACと非常に親和性が良いことも有り、これから増える分野である。

データセンター関係では、コスト低減、稼働性向上、省電力などに関するアイデア中心の論文領域であり、グラフとタイトルを見ただけで内容が大体わかってしまうが、重要である。しかし、ネタが切れてきたというような印象を持つ。人工知能のアクセラレータの論文がぽつぽつ出てきているが、多くは落ちているので、もう2～3年すると通るようになるという見ている。

循環するテーマとして再びデータフローが出てきた。驚くべき事態であるが、要するにアルゴリズムとの協調や、並列性をどう記述するかというときに忘れてはいけないことで

ある。私よりも二世帯若い人たちが急速に始めているテーマであり、アクセラレータという技術のおかげである。

TOP Conferencesに関する雑感

・日本からの発表件数が極端に少ない

- ・ 投稿しなければアクセプトされない
- ・ 一回Rejectされて諦めない
 - ・ 2回目、3回目でアクセプトされた論文も少ない
 - ・ 同じ論文は同じ査読者に行くことが多い
- ・ 英語の問題で不利になっている論文を見かける
- ・ そもそも研究テーマが時宜を得てないことが多い
 - ・ 革新的論文は、最初は受け入れられない場合がある
 - ・ 世界の潮流を把握することは重要⇒ボスの勉強が足りない
- ・ 共同研究者の幅が狭い日本論文が多い
 - ・ 自省します
 - ・ いろいろな研究者を巻き込んで良くする

図 2-1-3 TOP Conferences に関する雑感

図 2-1-3 に示すように、トップカンファレンスに対しての一番重要な懸念は、日本からの発表件数が極端に少ないことである。原理原則は、投稿しなければアクセプトされないことである。日本は大学があまり投稿せず、企業からの投稿はほぼゼロである。アメリカは Intel、AMD などどこでも企業が大学と組んで投稿しているので、日本も考え直さないとはいけな。一回リジェクトされても諦めないことが重要である。私は様々な学会でレビューヤーをやっているので、同じ論文を何度も見ることがよくある。その多くは粘り強く出し続けるうちに通る。内容で1つでも良くなることを繰り返していけば、そのうちに通る。また、そもそも研究テーマが時宜を得ている必要がある。学会に参加して論文を精読しなければ流行はわからないので、これをきちんとやってほしいというのが、研究者への願いである。

【質疑応答】

Q：AC に関して、例えばアディアバティックコンピューティング、エネルギー保存する計算手法はどうか。

A：全く信じていない。

Q：データフローに関して、新世代の人になっただけでなく、どういうところで復活すると考えているのか。また、データフローの分野は、日本から一時期良い成果が多く出たが、今もう一度注目を集める中で、日本でそういう技術蓄積を持つ人やチームがこの分野の研究にあまり参入していないように見えるが、なぜか。

A：要するに資源を使えるようになったということが一番である。ある種の効率を追求するとデータフローは良いことばかりではないが、それを忘れれば結構良いことがたく

さんあるというのが、今起こってきたことの原因と思っている。しかし、全世界的に見て、下火になったときに全員散ってしまった。アメリカでは密かな野心を持っている人が、それを密かなルートでいろんな人に伝えて残っていたが、日本ではそれができなかったということがある。

Q：アーキテクチャのメジャーの学会では、ハイエンド分野でエッジ系のアーキテクチャの提案というものはあるのか。

A：ある。IoT の論文なども最近投稿が非常に増えている。

Q：量子コンピューターは最近 IBM や Google で力を入れているが、あのモチベーションは何か。

A：現状まだ宣伝的意味合いが強い。いまやっと 20 ビットとか 50 ビットで、クラスタ化している。でも、20 年間でそこまで来たので、次の 20 年で 100 ビットになるかなという感じだと思う。

Q：データフローのキラアプリは何か。

A：いわゆるリアルタイムの制御系のシステム。要するにストリームプロセッシングが簡単過ぎて実用／応用に向かなかったので、それをより複雑にグラフを書けるようにしたらデータフローになったというのがここまで来た経緯の一つ。ただ、言語が未熟なので、言語を誰か考えてくれると、次のブレークスルーを導くのではないか。

2.2 ポストムーア / ポストノイマン世代に向けた国際ロードマップ活動の現状

林 喜宏 (ルネサス エレクトロニクス)

今までは、ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) という国際組織が、Moore 則をベースとした半導体デバイスの微細化トレンドの予測をベースとして技術ロードマップを書き、その技術トレンドから実現されるであろうシステムアプリケーションのロードマップを策定してきた。そこでは、多分にインテルの意思が強く働いていた。しかし、半導体デバイスの微細化限界が近づくにつれ、その役割は終わったとして、これまで主導してきた SIA (Semiconductor Industry Association) や JEITA (Japan Electronics and Information Technology Industries Association) 等の半導体産業会が 2016 年 3 月までに手を引き、ITRS は終焉を迎えた。

これに対し、次世代コンピューター開発や次世代システムプラットフォーム開発のためのデバイスシステムのロードマップの作成、と目的を明確にした上で、IRDS (International Roadmap for Devices and Systems : <https://irds.ieee.org/>) という新しい組織が ITRS 活動を引き継いだ。図 2-2-1 に示すように、IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 側のコンピューターソサエティが米国側の背後にいて、そこが半導体のロードマップ活動とコラボレーションするという形で IRDS は動いている。

**Announcement of Collaboration
between IRDS and IEEE RCI, 2016**

<http://theinstitute.ieee.org/ieee-roundup/blogs/blog/plotting-the-course-for-semiconductor-development>

PISCATAWAY, N.J., USA, 4 MAY 2016 - IEEE, the world's largest technical professional organization dedicated to advancing technology for humanity, today announced the launch of **the International Roadmap for Devices and Systems (IRDS), a new IEEE Standards Association (IEEE-SA) Industry Connections (IC) program** to be sponsored by **the IEEE Rebooting Computing (IEEE RC) Initiative** in consultation with **the IEEE Computer Society.**



Goal: Rethink Everything; Turing & Von Neumann to now

Why IEEE? Pre-competitive, Inclusive, Worldwide





**Device IRDS
physics**

Emerging System Devices

- 1D(GAA)/3D(Vertical)-FETs
- Cross-bar memory (Memristive systems)
- etc....

2017/11/29

Y. Hayashi (SDRJ/Renesas)

5

図 2-2-1 IRDS と IEEE RCI とのコラボレーション

IRDS では、図 2-2-2 に示すように、2016-2030 年をスコープにして、ポストノイマンコンピュータやポストムーア半導体への移行を見据えた、アーキテクチャ・ネットワーク・デバイスシステムの統合技術ロードマップを議論している。どちらかという、厳密な技術の議論というよりも、様々な人々との情報交換をする場としてパブリックロードマップを議論しようという位置づけである。テーマとしては、アプリケーションベンチマーク、システムアーキテクチャ、アウトサイドシステムコネクティビティ等の少しシステム寄り

のロードマップをどう考えるかというところが新しいところである。ロードマップ形式としては、タイムテーブルとレッドブリック (Red-brick) の明示から構成される、これまでに ITRS 形式を踏襲しつつ、コンピュータアーキテクチャやシステムアーキテクチャなど、上流側技術ドメインのロードマップが新規に追加されている。

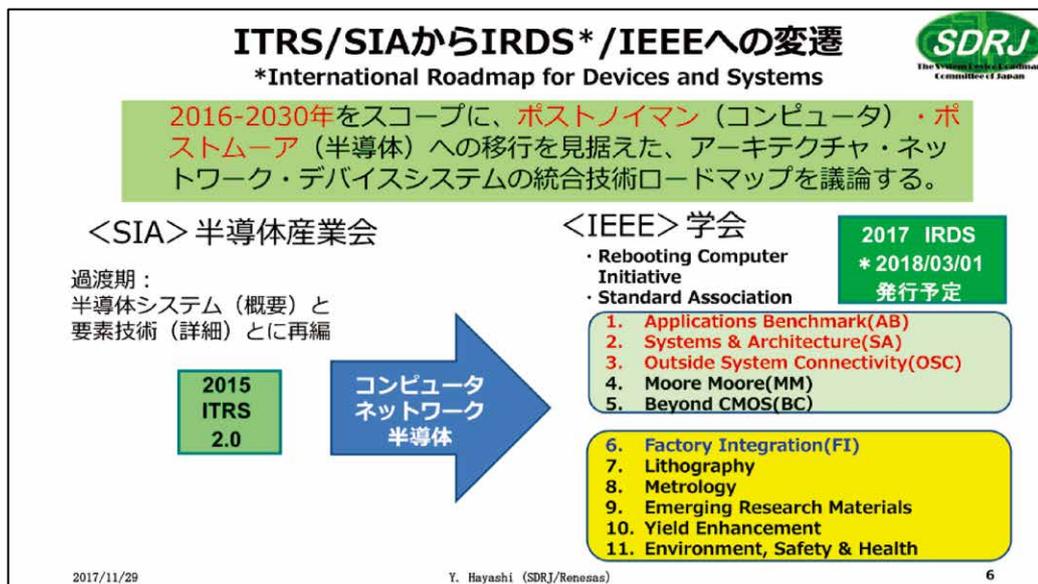


図 2-2-2 ITRS/SIA から IRDS/IEEE への変遷

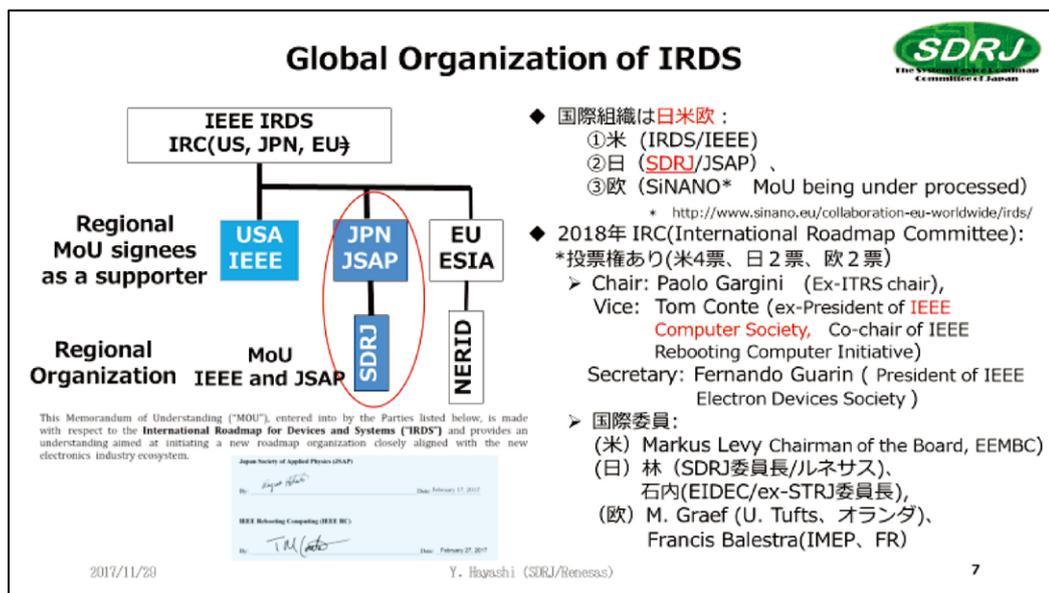


図 2-2-3 IRDS の国際組織

IRDS は、現時点では、図 2-2-3 に示すように、日本、米国、ヨーロッパの 3 極で運営しており、各極の学会やコンソーシアム等に属した人が参加するという形をとっている。日本の対応組織は、応用物理学会傘下に 2017 年に新設した SDRJ (The System Device Roadmap Committee of Japan: <https://www.sdrj.jp/>) である。その中で、国際間の協調運営・管理をすることが IRC (International Roadmap Committee) であり、現時点

1 ワークショップの開催趣旨と骨子案の説明

2 革新的コンピューティングに関する国内外の活動状況

3 ユーザー側からの革新的コンピューティングに対する要望

4 重要な研究開発領域とその取り組み方

5 総合討論

付録

では米国が 4 票、日本側が 2 票、欧州が 2 票ということになっている。主な幹部としては、ITRS のチェアであった Dr. Paolo Gargini が IRDS のチェアであり、バイスチェアとして IEEE コンピューターソサエティ前会長であり、現在リブーティング・コンピューティングのチェアである Tom Conte が入っている。ヨーロッパ側からは Mart Graef (TU Delft、オランダ) と Francis Balestra (IMEP-LAHC、フランス)、日本側からは SDRJ (System Device Roadmap Committee of Japan) 委員長である私、林喜宏 (ルネサス) と石内秀美 (ex-STRJ 委員長 / 先端ナノプロセス基盤開発センター) が入っている。

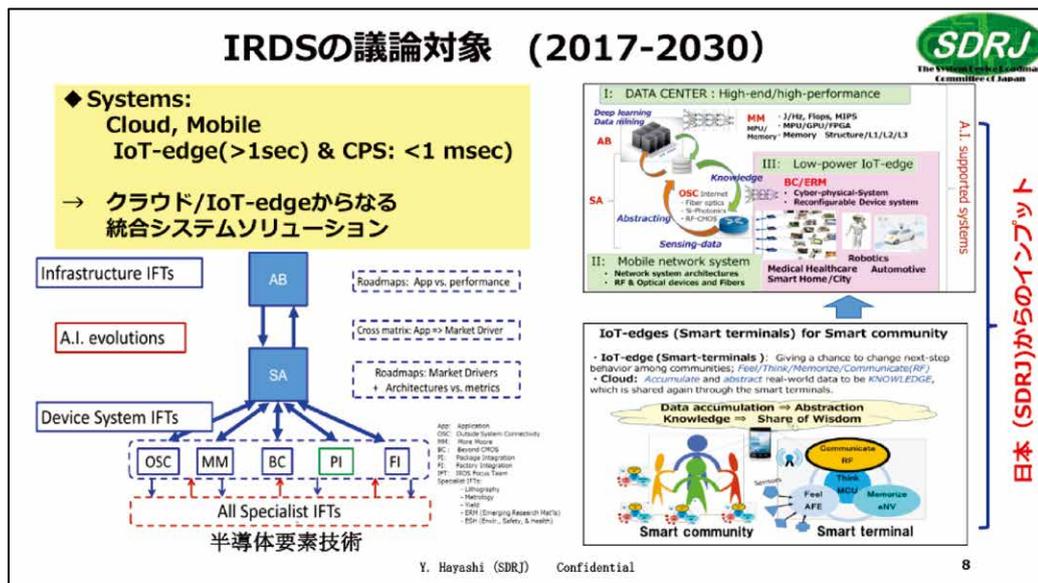


図 2-2-4 IRDS の議論対象 (2017-2030)

我々は、図 2-2-4 に示すように、基本的にはコンピュータアーキテクチャやシステムの要件から逆に半導体側のロードマップとの整合性を議論している。当初は、米国主導だったのでクラウドが中心だったが、様々な議論の結果、日本側からエッジコンピューティングも入れるように提案して、今ではクラウドとエッジコンピューティング側の連携としてどのようなシステムソリューションを考えるかというところを目標にして活動するようになっている。日本側の委員は、今のところ、デバイスに関係している人達を中心になっているが、今後はシステム側の人達にも入ってもらいたいと思っている。

図 2-2-5 に示すように、SDRJ は IRDS とのジョイント活動を精力的に行っている。具体的な活動の一つとして、2017 年 7 月に米国側と合同で行った会議では、ニューロモルフィックや AI のコンピューティングに関連する専門家を集め、活発な議論を行った。この会議は米国時間に合わせて行われたが、IEEE の協力のもとで全部 WebEX 配信された。日本側からも 10 人程度の有志が、分担して徹夜で会議に Web 参加した。日本側からは、例えば、日立の CMOS イジングに関して、米国側に対して Web プレゼンテーションを行った。この会議の内容はオープンにはなっていないが、非常に有意義な議論ができていたと思う。その他の最近の活動としては、機械学習に関する IMEC へのヒアリングを行い、少し時間をかけて 20 人程度の有識者だけで技術動向を考えるような活動も行った。

その他のワーキンググループも、それぞれの技術領域に関する国内議論を行うとともに、Web会議を活用してIRDSとのロードマップ整合性を高める活動も活発に行っている。これらの活動成果の総括として、図2-2-6に示すように、IRDSとしての初版となるIRDS2017版は2018年3月1日を目途にIEEE・IRDS側よりWeb発行予定である。

図 2-2-5 IRDS と SDRJ とのジョイント活動

図 2-2-6 IRDS 2017 Winter-meeting トピックス

1 ワーキンググループの開催趣旨と骨子案の説明

2 革新的コンピューティングに関する国内外の活動状況

3 ユーザー側からの革新的コンピューティングに対する要望

4 重要な研究開発領域とその取り組み方

5 総合討論

付録

IRDS では、例えば、アプリケーションベンチマークでは、ビッグデータ解析、フィーチャー認識、ディスクリートイベントシミュレーション、フィジカルシステムシミュレーション等のアプリケーションと、クラウドコンピューティング・モバイル・IoT 端末・CPS 端末に関するアーキテクチャとのクロスポイントがどうなるかという観点からロードマップを検討している。例えば、フィーチャー認識に関しては、今後年率 1.9 倍程度の速度で学習効率が上がってゆくと予測されているが、計算効率の観点からすれば、まだまだアーキテクチャの工夫をしないといけない。システムとアーキテクチャに関しては、IoT 端末やクラウド/フォグとの関係を特に意識したようなエッジ用の AI コンピューティングのアーキテクチャをどうやって進めていくかという議論を今後強化してゆきたい。

上記議論に際し、我々としては、やはりそのコア技術である半導体のロードマップを意識した上でシステムを考えていこうとしている。今後、微細化や 3 次元化（3D 化）のトレンドがどうなっていくのか、もっとシステム側に受け入れられやすいデバイス技術はあるのか、といったことを議論している。たとえば、究極の半導体素子構造である GAA (Gate All Around) FET は 2021 年ぐらいに、おそらく 5 nm 世代以降に実用化されると考えている。さらに、それらを縦方向に積層した 3D 構造半導体素子が 2027 年度頃に入ってくると予想されている。

今後重要になってくるのは放熱の問題である。More Moore の観点からは、3D 化により性能は上がっていくと予想しているが、放熱の問題を解決しないと、2030 年の性能の向上は約 4 倍にしかない。一方、解決されれば 40 数倍までいくと予想しており、放熱をどうするかが重要な課題である。当然のことながら、3D 構造半導体素子の製造コスト低減や歩留まり向上、さらにはそれに向けた欠陥検査技術、これらのファブシステムの開発も非常に重要ということも議論している。

微細化・3D 化以外のアプローチである Beyond CMOS (BC)・Emerging Research Materials (ERM) の議論も非常に活発である。新しいデバイスのアーキテクチャとして、ニューロモルフィック等に注力した活動が行われている。量子コンピューティングにはかなりのお金が出ており、新しくロードマップ委員を 18 名程度集めている。100 倍に演算速度を上げるにはどうしたら良いかということに関し、数年先という話ではなく、10 年、20 年先を視野に入れて地道にロードマップを書こうとしている。

国際ロードマップは、2018 年 3 月 1 日に公開される予定である。それに合わせて、「クラウドと IoT エッジの相乗作用によるスマート社会へのロードマップ ～コンピュータサイエンスと半導体物理の複眼視点からの未来予測～、<https://meeting.jsap.or.jp/special-symposium>」と題して、応用物理学会特別シンポジウムを 3 月 17 日に開催することになっている。特に、今回の特別シンポジウムでは、コンピュータアーキテクチャやアウトサイドコネクティビティに関して、IEEE の IRDS から関係者を招聘するので、興味ある人はぜひ参加してほしい。

【質疑応答】

- Q：昔のイメージだと、インテルが主導して業界全体を引っ張って、様々なエコシステムをつくらうとしていたが、現在の半導体業界では、そのようなエコシステムは変わりつつあるという認識でよいか。
- A：プレーヤーが変わっていると言った方がいいかもしれない。例えば、クアルコムやアーム、IBM と Sandia National Laboratories 等、今までのインテルとはちょっと違ったプレーヤーが入っている。なお、サムソンは、韓国としては入っていないが、サムソンアメリカの人がアメリカの委員として入っている。
- Q：TSMC（台湾集積回路製造）は入っているのか。
- A：TSMC は入っていない。
- Q：2017年11月上旬に開催された ICRC（International Conference on Rebooting Computing）2017 ではニューロモルフィックが4分の3ぐらいあり、かなり偏っている印象を受けた。このロードマップの活動として参加している人も、そのような傾向にあるのか。
- A：IEEE Rebooting Computing はそのような傾向にあるが、デバイス側の会議の方では、そういう比重にはなっていない。
- Q：DOE の方でも、ECP（Exascale Computing Project）の一環として、ポストムーアの話がエクサスケールの先の話としていろいろ出ており、例えば、液体金属で電源供給と冷却を同時にやるようなエキゾチックな話が出ているが、ICRC2017 では、そのような最先端の話は出てきたのか。
- A：今回はスポンサーに DOD が入ったからだと思うが、4分の1が量子であり、その残りがほぼニューロモルフィックであった。冷却の話は今回なかったが、かなりエキゾチックな新しいところが主であった。

2.3 日本工学アカデミーの「次世代コンピューティング」活動

金山 敏彦（産業技術総合研究所）

日本工学アカデミーの次世代コンピューティング技術プロジェクトの進捗について報告する。日本工学アカデミーは、発足以来 30 年、様々な提言活動を行っている。本プロジェクトは、現在、コンピューティング技術が様々な意味で技術的な変革点に来ていることをチャンスと捉えて、広く一般の人々や政策担当者に日本の競争力を高めることを提言することが目的である。ICT のテクノロジーは様々なところで使われており、ビジネスモデルも既に世界を席卷しつつある。その中で懸念点の一つは、クラウドあるいはクラウド上に収集したビッグデータを保有して、時価総額が通常の家計よりもはるかに大きい巨大 ICT サービスサプライヤー（グーグル、アマゾン、マイクロソフト等々）が強力な力を持って牛耳っていることである。そこが計算機のハードウェアや半導体のチップにまで影響力を及ぼし、水平分業に基づく垂直連携を行い、強力にクラウドというレイヤーから下のレイヤーに降りてきている。これらに対して我々は危機感を持って捉えており、考え方を改めてアクションを起こさないと、国力が弱体化するのではないかと懸念している。

プロジェクトの目標は、図 2-3-1 に示すように、世界の中で日本の存在感をより高めるために、計算機あるいはコンピューティングに新しい展開を打ち出すことである。内容は今回の発表から公式発表までの期間の調査で変わる可能性があるが、提言内容はここに全て表現しているつもりである。日本は CSTI も含めて超スマート社会（Society 5.0）を表明しており、革新コンピューティングは、それらを支える重要な技術である。今後、従来限界を超える計算技術の開発競争が一つの大きな柱となる。

プロジェクトの目標

コンピューティング技術の大きな転換点にあつて、2030年の社会を想定し、わが国の取り組むべき戦略に関連して以下の検討を行う。

- ・ハードウェア、アーキテクチャから見た**次世代コンピューティングの、産業的・社会的インパクト**を予測し、わが国としての投資の必要性を明らかにする。
- ・超低消費電力プロセッサ、AIチップなどの専用チップ、メモリやインターコネクトおよび、これらを統合した**ハードウェアシステムについて、産業化のための事業モデル**を提示し、それぞれの可能性と隘路を考察した上で、必要な産業政策について提案する。
- ・研究開発シナリオを作成し、**新たなイノベーションエコシステムの構築**を提案する。
- ・研究者の将来のキャリアパスについて考察し、**若い研究者が意欲的に挑戦できる体制**を提案する。

図 2-3-1 EAJ 次世代コンピューティング技術プロジェクト

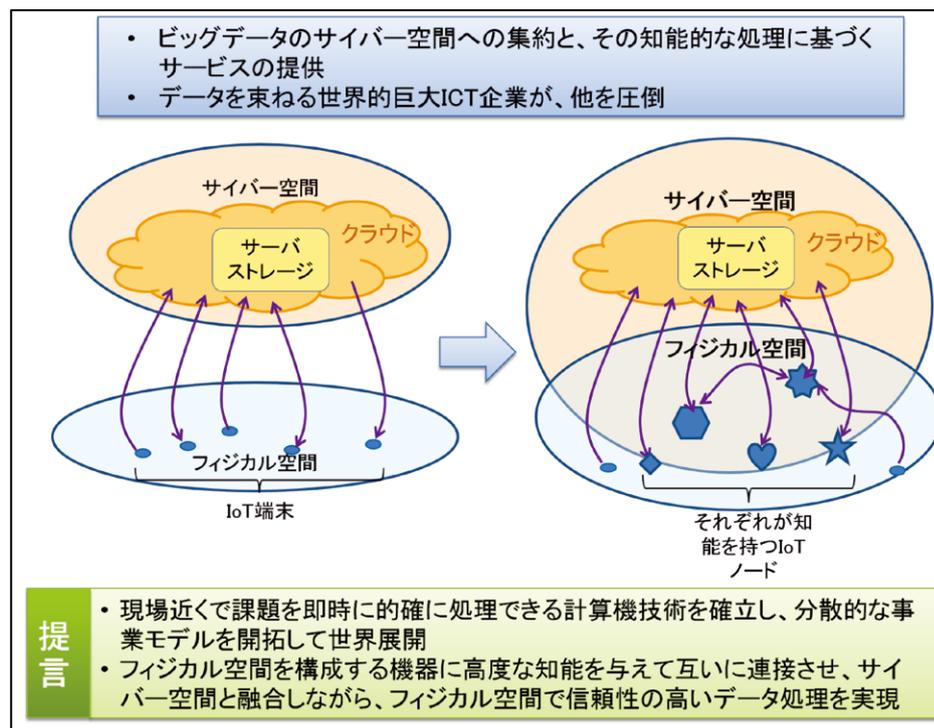


図 2-3-2 事業モデル（現状と提言する将来像）

IoTは、全てのものがクラウドにつながり、大量のビッグデータがこのレイヤーに上がっていく。そこで処理をした結果がサービスとして世の中に降りてくる、というこの仕組みが大きく発展している。このビジネスモデルは、コンピューティング技術の大きな進歩で支えられており、さらに最近のAIやディープラーニングはこれを加速するために大きな作用をしている。数年程度を考えると、これらは崩れずにより発展すると思われる。したがって、これを利用し如何にメークマネーするかということが次に考えるべきビジネスモデルと思えるが、それでは巨大ICT企業に全ての価値が集約してしまい、おこぼれをもらって活動するというモデルを助長させてしまう。

図 2-3-2 に示すように、我々としてはこれとは別の方法で、分散的に処理する可能性が今後より出てくるのではないかと提言をしたい。IoTの末端から全てのデータをクラウドに上げるだけでは、キャパシティを超えてしまう。すなわち、通信やストレージ、あるいはそれらの処理能力を既に超えつつあることが言われている。我々は、そこで単に途中でデータのクレンジングをやるということだけでなく、もっとエッジに近いところで様々な高度な処理をしながら、お互いに接続して結果を返すという技術をつくり出し、これに適合したビジネスモデルを提供し、サイバー空間とフィジカル空間を融合した社会構造ないしは産業構造に持っていけると考えている。これらを取らして取りかかる提言を出したい。

このためには、エッジの定義も様々であるが、現場に近いところにあるスペシフィックな課題に対して高度な処理を返せるシステム、それを使ったビジネスモデル展開をしていく必要がある。そのためには、様々な各レイヤーの技術をどうやって組み合わせる新しいモデルを創出していくかということが重要である。

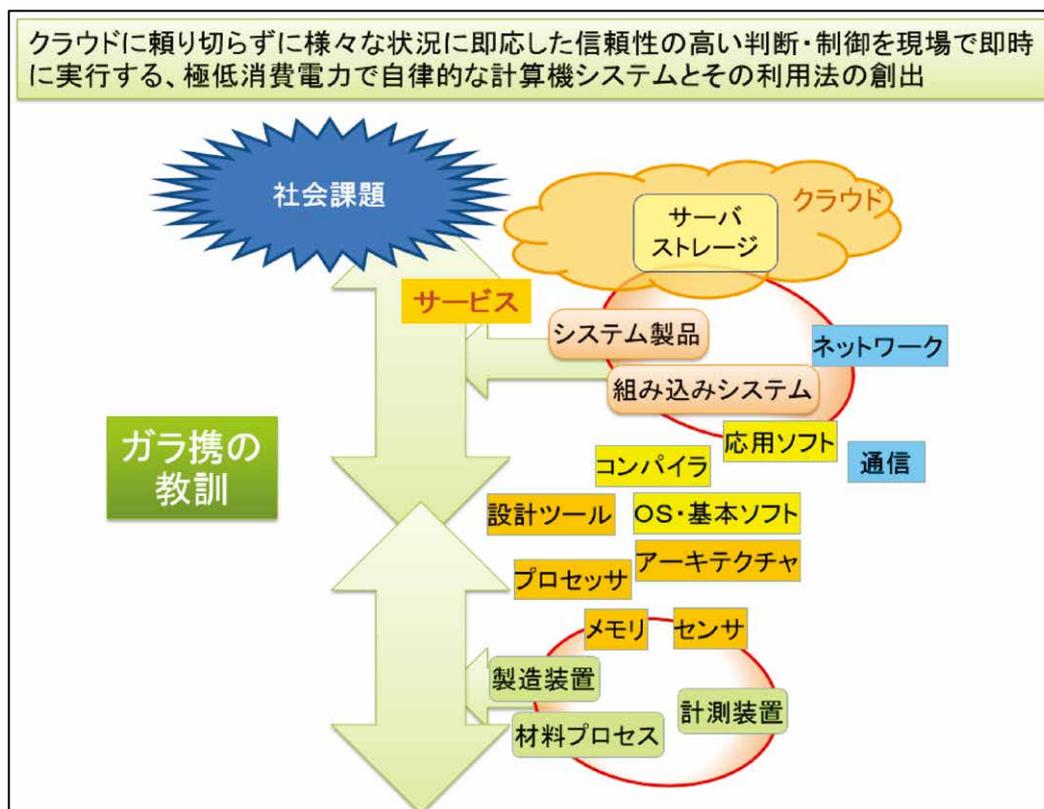


図 2-3-3 グランドチャレンジ

図 2-3-3 の赤で囲んだ箇所は従来から日本に強みがあった領域だが、現在はコンピューティング技術あるいは計算機そのものが日本で強い技術を出していこうといっても抜けてしまっている領域である。ただし、半導体製造装置や材料は、ここ数年史上最高をたたき出し世界の中でも輝いている。

一方で、特定のシステムあるいは特に自動車とか、医療機器分野については、まだ世界に冠たる技術を持っており、その中での組み込みシステムや、システムの中で処理をしているマイコンに端を発するようなコンピューティング機能というのは強みがある。これらを起点として組み合わせた垂直統合をつくり、社会課題に対応できるようにすれば、世界に打って出られる可能性があるのではないかと考える。ただし、この垂直連携を全て日本の中でやろうとしてもかなり困難である。ある強みをコアにして、世界から優秀な技術を引き込んで、全体に打って出るようなモデルを打ち出せるかどうか、というのがポイントになるだろう。

クラウドに頼り切ることなく現場で信頼性の高い判断を、レイテンシーが短い状況で実現する低消費電力システムというものを、あるスペシフィックな目的に対してつくっていくことができれば、この技術モデルが展開すると思う。そのときに、どういうドメインに適合すべきかというのは、技術のレイヤーで決めることではなく、どんなビジネスモデルか、どういう課題に対してそれを世の中に普及していきたいか、というものが無いと決まっていけないのではないだろうか。特にガラケーの教訓というのが重要である。ガラケーは、出てきた当初は世界をドライブする世界に冠たる技術であった。スマホもガラケーがあったからこそ出てきており、携帯の中にカメラを載せるなどのアイデアが世界を変革してき

た。それらが日本でガラパゴス的に消えてしまったのはなぜか、ということをよく考えてみると、新しい技術を自社で閉じ込めないで世界展開するか、そのスキームをつくっていくことが重要だということが教訓としてある。

あるスペシフィックな目的に対して必要な技術の垂直連携をつくっていくということは必要であるが、とても困難である。特に、上の領域でどのようなサービスを提供するか考えること、製造装置を考えること、新材料で新原理デバイスを考えることは、時間スケールが全く異なり、これを共通のプロジェクトにすることは、どこかに非常な無理を及ぼすだけである。

図 2-3-4 であえて実社会・市場と書いてあるのは、基本的には市場原理を入れて、様々なレイヤーの人が参加するときに、ポジティブなメリットが働くような仕組みをつくることを考えている。有力な技術を持っている人はそれを閉じ込めないでオープンにして、その周辺のレイヤーの人が入ってこられる環境をつくっていく。こういうモデルを実行できるように政策的な補助、支援、プロモーションをしていくことで、世界に展開できるのではないか。そのためにはこれらを支援する仕組みが必要である。ある技術を実証して世の中に出そうと思っても大きなコストがかかってくるので、それをシェアして下げるという仕組みを政策的につくっていくことが必要である。もう一つ重要なのは、出てきた成果は多くの場合は失敗するが、それらを閉じ込めないで流通させる仕組みを広くつくっていくということである。失敗したものが秘蔵されずに、何とかして別のドライビングフォースをかけて回し、それと同時に多くの人をひきつけて人材育成を図ることが必要である。

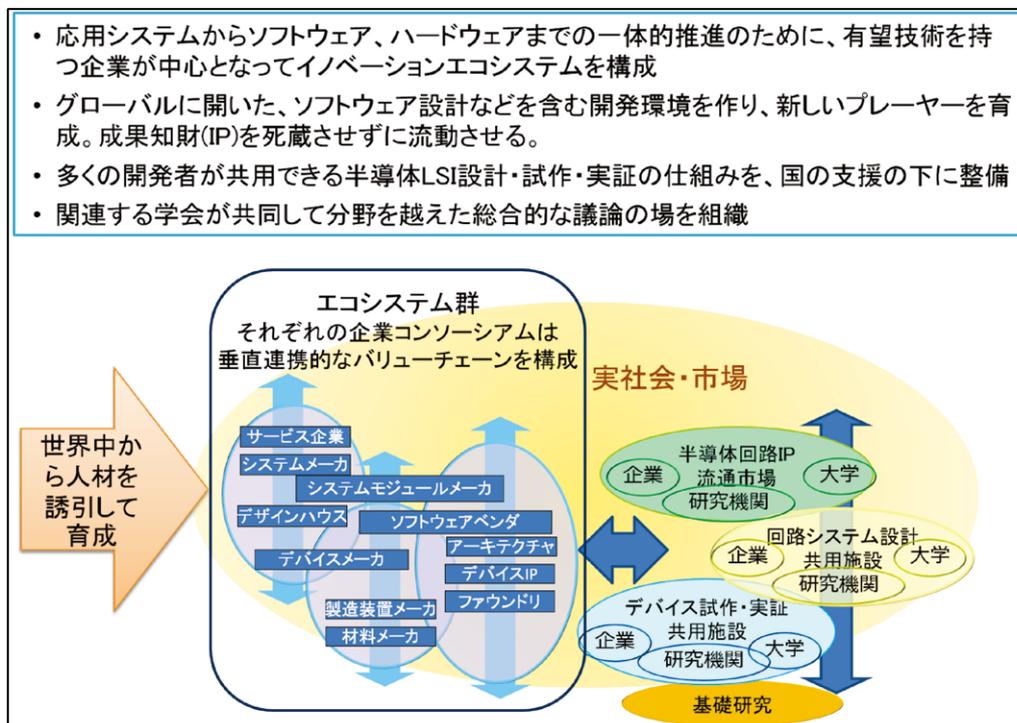


図 2-3-4 イノベーションエコシステムとその促進施策

1 ワークショップの開催趣旨と骨子案の説明

2 革新的コンピューティングに関する国内外の活動状況

3 ユーザー側からの革新的コンピューティングに対する要望

4 重要な研究開発領域とその取り組み方

5 総合討論

付録

【質疑応答】

- Q：成果をオープンにして、エコシステムをつくっていくという点が現状一番欠けている。世界一をとるためには秘密主義でないといけないというのが蔓延しているのではないか。省庁の方々をお願いとなるが、実際のアプリケーションにより世界にエコシステムをつくっていくということを大きな評価尺度とすれば、推進されるのではないか。
- A：その通りでこれは当たり前のことであり、多くのところで言われているが、うまくいっていない。国の投入資金あるいは施策が絡むようなところは、もう少しダイナミックでオープンなエコシステムができるような方向にドライブしていくよう提言したい。
- Q：どこのレイヤーに力を入れるべきか、勝つためにはどのレイヤーを中心にして進めるべきか、あるいは弱みという意味でどのレイヤーに力を入れるべきか、もう少し一段降りたようなレイヤーの話は提言の中に入るのか。
- A：明示的には入れない。ただし、個別にヒアリングした中で、きっかけになると思う実例を幾つか聞いているので、それらを想定している。自社で閉じているものを秘蔵せずオープンにして、ソフトウェアあるいはサービスレイヤー、デバイスをつくる人、周辺の開発環境等も含め、巻き込んで世の中に打ち出した例などをこの提言で複数出していければと思う。
- Q：装置メーカーが繁忙だという話があったが、その理由は中国市場が原因で、中国では半導体製品だけでなく開発も一気に進んでいると思うが、どう考えるか。
- A：一番大きな市場は中国で、どういう態度をとっていくかというのがポイントだと思う。基本的にはオープンであり、閉じたのでは意味がない。
- Q：一度世界で支配的になったところに勝つのは難しく、戦う場所を変えないといけないと思うが戦略はあるのか。
- A：当面考えやすいのは、特定の課題、例えばエッジの中で、あるビジネスモデルがあれば、ニッチで構わないのでアイデアを持っている人達をプロモートしたい。
- Q：良いアイデアだと思う。そういうのがでてきて、横展開してうまく回っていけば良くなるのではないかと思う。
- A：日本の中にはもともと中小企業の伝統があって、ある課題に対して自分たちのオリジナルなものでチャレンジしたいという伝統が脈々とある。スキルを持った年配の人達をうまく使って若手人材を教育しながら世の中に打ってでるといふ提言を書いている。
- Q：エコシステムをつくるためのソフトウェア技術にお金を投じなければいけないのではないか。ハードだけつくってもただの箱である。ガラ携はソフトで負けた。
- A：ニッチでとにかく使えるものにし、それを囲い込まないでオープンにしてソフトウェア開発環境までつくるような、そういう仕組づくりをドライブさせたい。
- Q：ハードよりもソフトのほうがわかってもらえず、各府省庁の方にどうやって説明すれば良いかわからない。
- A：成功事例として、エコシステムをつくったということを知っていただくのが重要である。声を上げて、ずっと言い続けるしかない。
- C：日本人は全体として、形のあるものには価値を見出すが、目に見えないものには価値を見出しにくいというのが本質にある。マインドセットを変えるべきである。必要に応じてモノや技術や人材について提言できるメンターのような仕組みが日本でもできるのではないか。

3. ユーザー側からの革新的コンピューティングに対する要望

3.1 自動運転時代に必要なコンピューティング特性

杉本 英樹（デンソー）

デンソーは自動車部品と性能の低いマイコンから含めると 30 年近くコンピューターを使ってきているがコンピューター自体は基本的には開発していない。自動運転の時代といっても今後どうなるかわからないが、自動車は非常に大きなシステムなので特に自動車特有の部分について説明する。まず簡単に運転の構成について、その次に特徴、そして現在から変化があるところ、最後に求められる処理特性という順番で説明する。

図 3-1-1 の例に示すように、自動運転や ADAS（先進運転支援システム）はセンサ系から操作系まで複数段階に分けて構成される。この中で、センサや操作の部分には既に車両に入っている部分であり、ある程度継続的にロードマップで変化していく。センサの細かい種類は増え性能は上がっていくが、非連続の新しい技術が急に入ってくる可能性はここ数年に限れば高くないと考えられる。

自動運転で注目されているのが「認知」の部分であり、画像認識を初めとしたセンサフュージョン等も含め、外界をいかに認知するかがホットな話題である。ここは重要な部分であり、外界を認知せずに自動運転や ADAS は機能しない。さらに認知したものをどう判断するか、検知したものに対して反応することができるかも重要である。しかも、これだけで安全に車が走れば問題ないが、実際の場面では見えてから、検知してから、反応したのでは間に合わない事象も出てくる可能性がある。それら含めて判断系をどのようにつくるか、制御モデルとしてどう組み立てていくか、ということが大きな意味での課題と考えている。具体的な構造として自動車の世界で特徴的なのは、判断、操作に近づけば近づくほど上下構造が分かれてくる。例えばセンサの部分は多くは積むことができず、センシングできるものも限られているので、一つのシステムとしてできている。認知と判断のところになると、車としての価値と、安全性やフェイルセーフ等ある程度分離した階層でつくっていかないと、安心してアプリケーションをつくれな

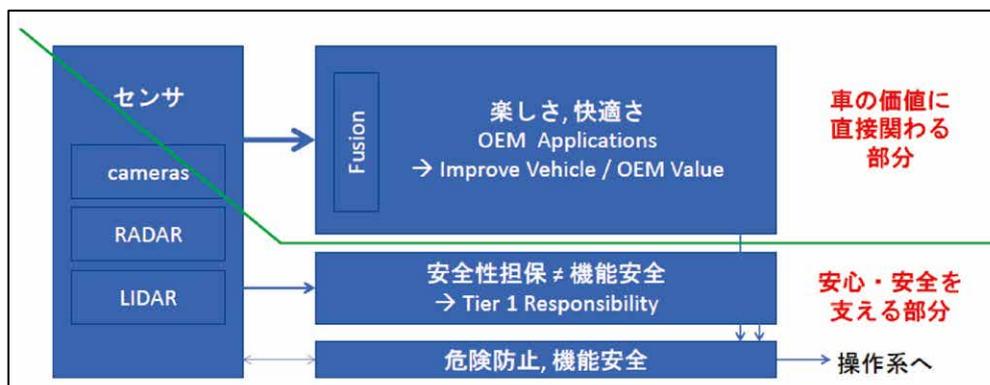


図 3-1-1 ADAS/AD の処理 フロントエンド+ 3 層構造バックエンドの 4 ブロック構成例

基本的にソフトウェアの不具合は無いようにしているが、複雑なことをやればやるほど不具合が発生する確率が高くなる。しかし、当然ながら基本となる安全性は確保しないといけない。最近の画像認識での自動運転の話題はとかく最も複雑な部分に着目されがちではあるが、高度になればなるほどその安全を支える部分も性能が上がっていかないと支えきれない。

今後、要件がどう変わっていくかを代表的な2つの例で示す。1つは、図 3-1-2 に示すように画像に限らずセンサの精度をどうやって上げていくかである。センサ自体の精度は物理限界もあってなかなか上がらない。その場合でも、例えばエンジン制御やモータ制御などセンサに入ってくる情報量と情報の元のメカニズムの特性をフィルターに加味することで、センサの精度以上の情報を取得したい。WiFi 等近年の高速通信の世界では当たり前に行われていることだが、車もやっところまで来た。単純にセンサのインターフェースをするだけでもコンピューティングのパワーが必要になる。どういう関数でフィルタリングするのが最適かは単純にはわからないので、クラウドから何らかの情報をアップデートしながらセンサをアップデートしていくということも今後必要になってくるだろう。

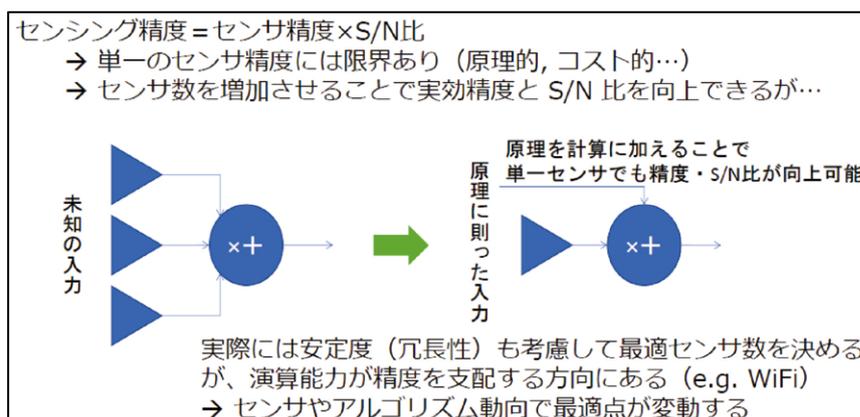


図 3-1-2 要件の特徴・変化—センサ構成と精度・角度

もう一つは、自動車としては得意な部分であり、図 3-1-3 に示すようにソフトウェアの品質をどう確保するかである。ソフトウェアは最初にアルゴリズムをラフにコーディングし、そこから最適化をしていく。アルゴリズム的にはきれいな最適化をしっかりとやる。しかし、最後にコンピューターに合わせてソースコードを最適化することは、量産でやることもあるが、極力避けたい。なぜなら、個別のターゲットに向けて行った最適化の部分で不具合を多数作りこんでしまうという事実がある。こういう不具合は検証で押さえるのが非常に難しい。もちろん車の中でも命がかかっている部分に近ければ近いほど、発生するバグは検証よりは原理原則として発生しないような開発にしたい。自動運転で様々議論がされている中で、例えば GPGPU を使ってアクセラレーションする話も総論として興味はあるが、そう簡単には普及しないのはこういう事情が影響しているのではないか。

自動車というのはシナリオを複数持っているシステムである。例えば、高速道を走っているとき、一般道を走っているとき、街中を走っているとき、でアルゴリズムが変わってくる場合がある。コンピューティングパワーが十分にあって、すべて統合したアルゴリズム

ムでやれるような時代が来るかもしれないが、少なくとも現在はこれを個別に開発していかないと現実的なハードやリソースでできない。最近のSOCはアプリケーションに特化して、専用のアクセラレータのハードウェアやハードワイヤードロジックが入っていることが多いが、マルチシナリオのシステムでそれらを使っていくと、全部別々のものを載せないといけなくなるが多い。今後シナリオは増えていく方向なので、例えばシナリオが10個あったものに対して10個載せる必要があると、稼働しているのはそのうちの1個となって効率が悪く、ある程度フレキシブルに様々な機能を切り替えながら使えることが重要になってくる。難しい点として、自動車の開発は機能ごとに開発して最後にインテグレーションすることが多いため、開発の初期で個別の要件は出てくるが、全体を積み上げてみるとどういう要件になるかは、開発後半の車両企画が決まる時期まで確定しない。この辺をいかにニーズ側とシーズ側でマージン（余力）を持っていくかというところが自動運転時代の車の一つの特徴になってくると思う。

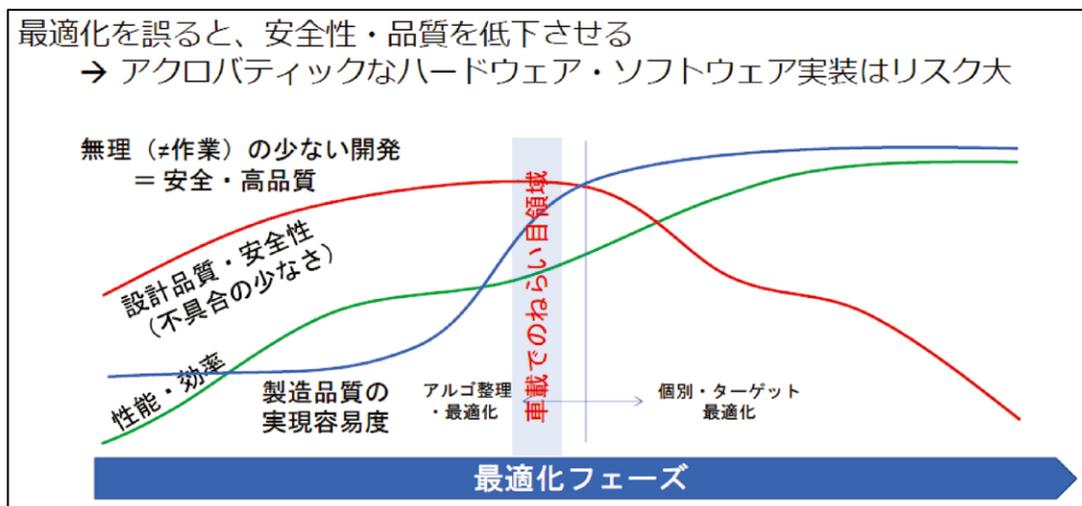


図 3-1-3 要件の特徴・変化—安全性と品質

ここからは、どういう処理特性が求められるかを説明する。マルチシナリオをやっていくには、ハードウェアのフレキシビリティが非常に大事になる。プロセッサやデータフローマシン等は専用のハードに比べると効率は落ちるが、一方、専用ハードは時間的な利用率が低いと性能が良くてもトータル効率としては上がらない。実際に我々が使っているマイコンやSOCは、様々なIPを載せているが、時間軸で見ると利用率が低いものも多い。その割に複雑で設計負荷が高く、開発期間が長期化し潜在的な不具合が増えたりするので、可能な限り汎用のプロセッサやそれに替わるものに置き換えていくことをユーザー側としても主張していかないといけないと思っている。

2つ目はスケーラビリティである。自動車は多くのバリエーションをつくる。世の中でどのくらいのバリエーションがあるかわからないが、プラットフォーム化が進んでいるとはいえ数十種類はあるであろう。しかも、メカ部はかなりプラットフォーム化による共通化が進んでいるが、逆に同一プラットフォームであっても電子系で差異化するケースも多い。そのため、電子系のシステムのバリエーションは増加傾向にあると思う。問題になるのは、低価格車と高級車で機能は違うが、全部個別に開発しきれないことである。我々は

機能部品と呼んでいるが、一度設計したものはどのグレードの車でも最低限同じソースコードを使いたい。例えば、ローエンドとハイエンドでプロセッサの方式が違ったり、ハイエンドだけ専用ハードが入っていると共通化ができない。ハイエンドの性能で競争力をつけることも大事だが、利益がでるのはミッドレンジの数が出るところであり、そのレンジの競争力が逆に弱まってしまう。欧州のようにプレミアムカーと普及帯の車でベンダーが棲み分けされているところはまだ対応しやすいが、日本や北米のように1社で全部展開している自動車メーカーでは今後クリティカルな問題になってくるだろう。

最後の特性は使いやすさである。すなわち“素直にプログラミングできる”ということである。品質のリスクは減らさないといけない。自動車のソフトウェア品質がなぜ高いかの議論はあるが、例えばセンサーでも年間に量産のコードで1件でもバグが出たら大騒ぎになり全社をあげて分析する。これは人命に関わるものをつくっていく限り、ある程度維持していく必要がある。

図 3-1-4 の俯瞰図はどのようなハードウェアが欲しいかを示している。例えば、今使っている SOC やマイコン等の位置を 2 軸で表している。実行フローで見たときに動的で複雑で直列が左側、静的で単純で対称並列が右側にマッピングして、上側にアプリケーション特化とマニアックな構成、下側に汎用・素直となっている。これまで自動車はあまり性能が要らなかったため CPU でやってきたが、外の世界も含めるようになった瞬間に様々なものを使い出し、混乱しているのが現状である。自動運転で我々が考えているのは、経路探索は素直にプログラミングしていきたいが並列度等が欠けているため、結果的に FPGA 等で個別の方式で処理することも行っている。そのような中で、今後は新しい車ならではの要求を満たすものを見つけていく必要があると考えている。

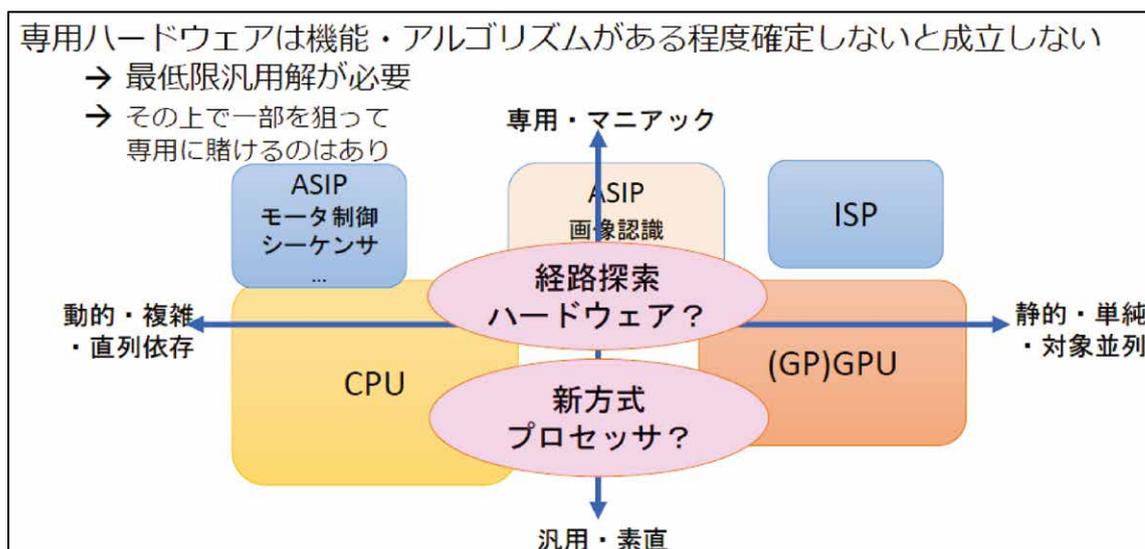


図 3-1-4 ハードウェアの現況—欲しいハード

もう一つ難しいのは、図 3-1-5 に示すように、今開発している SOC やプロセッサを自動車業界で使えるのは 2022 年か 2023 年であり、そのときにどのような機能がメジャーになるかはわからないため、ハードウェアはある程度前倒しで推定してつくらざるを得ない。

結論として、汎用コンピューターとして持つ特性と品質が車としては重要であり、CPU、マルチコア、GPU ではカバーしきれないものに対し、無理やりアルゴリズムを変えるのではなく、素直に実行できるコンピューティングの環境が欲しい。

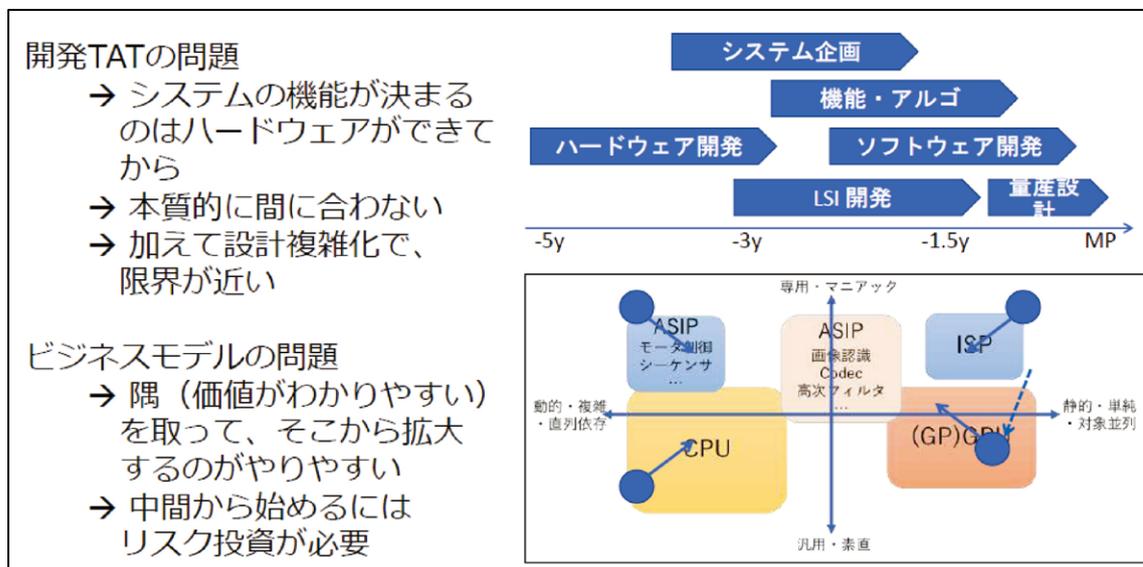


図 3-1-5 ハードウェアの現況—なぜ必要か？なぜできないか？

【質疑応答】

- Q：GPU の導入等は課題があるとのことだが、実際に計算力の要求が高くなった場合にはどのようなソリューション考えているか。
- A：短期的には GPU は使わざるを得ないと思っているが、結局マルチコア、GPU、FPGA という組み合わせ以外で自動車業界が使えるソリューションがないので、複数のベンダーと新しいものをつくれないうかが議論している。量からすると、当面は GPU と FPGA でやるが、まともにやると 200W、300W のチップになってしまい、冷却できなくはないが品質面を考えるとやりたくない。
- Q：例えば、インテルが買ったモバイルアイのような専用の認識チップ等の導入や、設計してつくるといことは考えているか。
- A：AI の部分は何らかの形で専用のものを各社やっており、比較的メモリのレイテンシに関する感度が低いので、最悪は外付けというソリューションもあるだろう。複雑な制御系のプロセッサに関しては業界内でもつくることも含めて模索中であり、ある程度自分たちで技術を牽引していくことも検討している。
- Q：どのようなシステムも近未来的には複雑なシステムにならざるを得ないと思うが、その状況でソフトウェアの品質をどうやって保証するのか。
- A：先進的なアルゴリズムを組む部分は今の品質モデルを維持したまま頑張る。逆にフェイルセーフは、従来の技術であまり複雑なハードウェアを使わずしっかりとやっていくことで、2023 年世代ぐらいまでは乗り切れると思っている。そこから先の 2023 年以降に対しては、ハードウェアとしてしっかりしたものを用意したい。
- Q：自動車業界だけでなくグーグル等の IT 企業が自動運転のプラットフォームをつくら

1 ワークショップの開催趣旨と骨子案の説明

2 革新的なコンピューティングに関する国内外的活動状況

3 ユーザー側からの革新的なコンピューティングに対する要望

4 重要な研究開発領域とその取り組み方

5 総合討論

付録

うと努力している。自動車専業会社でやられているのは本質的に新規参入組と何が違うのか。例えばデンソーがやっていることとどう違うのか。

A：大きな方向性は一緒だが、例えばピーク性能を出す方向に振るのか、ユーザビリティに振るのかという意味では異なることが多い。例えば、デンソーで開発している IP はユーザビリティに振った側を目指している。

Q：電気自動車は 100 キロワット級でそれを実際に冷却する必要がある。今でもエンジンを冷却しているし今度はモータ、バッテリーを冷却するが、何が大変なのか。

A：本質的には熱密度である。エンジンやモータは発熱するが、一定の体積があるので冷却するときの材料の収縮度合いや応力・ストレスがはるかに低い。電力自体が問題というよりは、電力が大きく熱密度が高いことによる長期信頼性の低下が一番ネックである。

Q：サーバーも水冷などしているが、何が違うのか。

A：サーバーと大きく違うのは、車は振動特性が非常に厳しいことである。この熱ひずみと振動がある中でいかに長期信頼性を確保するかが技術的にネックである。ただし、様々な議論はあり、自動運転の時代に本当に 10 年、20 年も乗るのか、というビジネス的なものはあると思う。技術的にはそこが一番ネックである。

Q：デンソーがオリジナル半導体をつくっていく上でエコシステムをどのように展開していくか、戦略はあるか。また、データフロープロセッサについてどういう観点で取り組んでいくのか。

A：エコシステムに関しては、自動車の場合、比較的小さい業界グループ内で閉じている。その内での連携は必要だが、中間層、コンパイラぐらいまでを提供すれば、そこから上はある程度やっていけるので、結果的に他の業界に対して新技術導入の面でアドバンテージになっていると思う。データフロープロセッサは、ストリーム・プロセッサの中でダイナミックなデータフローを扱うときに少なくともこれが必要ということ提案したく考えている。

Q：デバイスの品質について質問する。例えば、電力を下げようと思うと最先端の半導体を使えば良いが、それらはばらつき、長期信頼性はなく品質は悪いので、車の世界とは乖離している。最先端の半導体を使うような時代が来る気がしないが、どのように考えているか。

A：普及帯の車に関してはその通りだが、車業界もいろいろな変化の中で新規参入の圧力も強いため、一部の先端的な車に関しては、例えば現在半導体は保証で 10 年以上であるが、もっと短いサイクルで交換やメンテナンスをすることを前提でビジネス等を成り立たせる、という可能性はあると思っている。

3.2 ロボット：FA と物流を中心とした最新事例と課題

堂前 幸康（三菱電機株式会社）

近年のロボットについて、産業用ロボットの立場から、何ができて何ができないのかを紹介する。ロボットの研究開発はAI と絡みながら盛り上がりを見せている。そこには主に3つの要素がある（図3-2-1）。第一に学習技術や高度な計画技術等、技術面で大きく進展した。第二は国際的なロボット競技が開催されており、オープンイノベーションも含め実証面で盛り上がっている。第三はFA（ファクトリーオートメーション）や物流等、実用面でもかなり新しいものが出てきている。これら3つのバランスがよい形で盛り上がっていると感じている。



図3-2-1 ロボット（マニピュレーション）R&Dを取り巻く環境

当社では産業用のロボットアームを実用化している。産業用ロボットはFA向けに実現してきたが、そこに関連する技術は、多品種の部品供給、日用品のピッキング、さらには宇宙を見るための大型望遠鏡のピッキング等にも応用展開をしている。様々な事例を保有することは一つの強みである。

まず産業用ロボットの中心となるFAでの課題を紹介する。産業用の現場では、ロボットにより目が入ってきたという段階である。従来は、平らに置かれた部品を、搬送するために取り分けることができるようになったというレベルであったが、もっと難しいことができるようになってきた。

部品供給における大きな課題は、図3-2-2に示すような変種変量生産に伴う多品種の部品供給への対応である。従来のモデルベースの物体認識だけでは対応が難しかった。この問題に対するアプローチは、部品のモデルに基づいてポーズ推定をするのではなく、部品のどこをつかめばよいかを直接探すというものである。その際、計算コストの低い特徴量を設計し、置いた部品を対象とすることで部品の姿勢を有限の少数個に帰着させることで、シンプルなモデルの状態遷移グラフの探索で解けるようにしている。FAの分野でもクラウドやエッジコンピューティングが重要視されているが、現状は計算コストを少なくして、

1 ワークショップの開催趣旨と骨子案の説明

2 革新的コンピューティングに関する国内外の活動状況

3 ユーザー側からの革新的コンピューティングに対する要望

4 重要な研究開発領域とその取り組み方

5 総合討論

付録

エッジ側のコンピューターや組み込み機器でも実装可能な形で問題を解いたほうが応用が
 大きく。

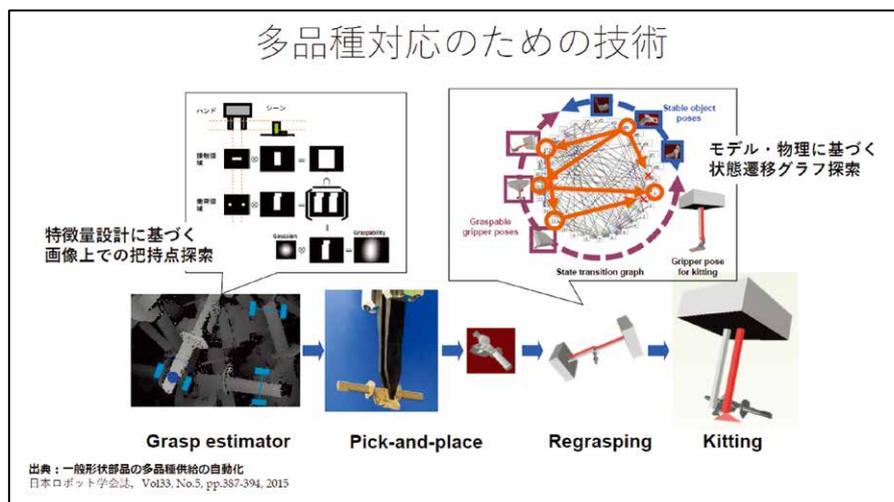


図 3-2-2 多品種対応のための技術

FA 以外に、注目される市場として物流がある。アマゾンの物流倉庫では、アマゾン・ロボティクス（キバ・システムズをアマゾンが買収）のロボットが使われている。このロボットは、オーダーが入るとすぐに棚を直接、人の前まで運んでくる。変種変量やロングテールのビジネスモデルでは、倉庫のサイズがフレキシブルであることが重要になり、このような新しいタイプの自動化が生まれた。

ただし、現状、棚からのピッキングは人間がしているため、多くのロボット（棚）が人間の前に列を作って、人間がピッキングするのを待っている。ある意味では、非人道的なシステムだとも言われる。人間をボトルネックにしてしまっているという課題があるわけで、アマゾンもそれは意識している。2015 年から「アマゾン・ピッキング・チャレンジ」という、棚からの商品ピッキングを自動化しようという競技を、世界中の研究機関を集めて実施するようになった。簡単だろうと思われるかもしれないが、アマゾンだけでは解決できない難しい課題であり、オープン競技の形で実施している。

我々は中部大学・中京大学とチームを組んで、2015 年から 2017 年、3 年連続で参加した。技術的に難しい点は、多品種ということである。アマゾンの一つの倉庫の中には、商品が 1 億種類存在するとも言われている。従来の FA 向けの部品の種類はせいぜい数十種類だったりするので、この桁違いな多品種にどう対応するかが大きな課題になる（図 3-2-3）。この課題に対して、従来は特微量ベースの画像認識での取り組みが進んでいたが、深層学習が入ってきた。競技は 3 年目になるが、2 年目から深層学習が盛んに使われるようになり、3 年目になると、ほとんどのチームが深層学習ベースになった。様子がネットにアップされた動画でも見られるように、リアルタイムに物体の位置と種類を識別でき、ロボットが棚に入っているものを識別して取り出すことができる。そのロボットの手先は、つまむタイプと吸いつけるタイプという 2 種類があるが、それらを自律的に使い分けて取り出すことができる。この一連の動作を GPU 1 台のスタンドアローン PC で実現できるところまでできている。



図 3-2-3 物流倉庫の商品捜査の課題

我々のチームは今回、アマゾン・ピッキング・チャレンジの商品取り出しタスクで世界3位に入った。さらに上位チームは、ロボット用オープンソース・ミドルウェア ROS を上手に使いこなしており、こういったオープンソースへの対応が我々のチームの課題として残った。

我々のチームに限らない全般的な課題としては、第一に、動作スピード（作業速度）が課題である。2016年のアマゾン・ピッキング・チャレンジで、ばらばらに置かれた商品を識別して取り出し、箱の中に詰めていくというタスクが実施された。その優勝チームの場合でも、ロボットにやらせると30秒くらいかかっている（ネット上でその動画を見ることもできる）。人間ならば数秒でできるタスクだが、ロボットだと30秒もかかっている。競技用に物体の識別性能を優先しているため、スピードはまだまだ向上させることは可能だが、即時性を要求されるとなると、コンピューティングに求められるものが大きくなる。

第二の課題は、作業計画に関するものである。複雑な作業を実現する計画手段は、アルゴリズムとしては様々出てきているが、コンピューティングの計算リソースが限られるため、実装の際には取捨選択になっている。例えば、商品を落としてしまった際にリカバリーする計画を実装していたチームはほとんどいなかった。実用面ではそういった対応が必要になってくる。計算リソースによって、行動計画として組み込めるものに制約が出てくる。

第三の課題は、学習の時間と手間がかかることである。深層学習が出てきて、ロボットの目はだいぶできたように言われるが、トレーニングにはかなりのコストがかかる。今回、アマゾンの競技では、30種類ぐらいの商品を識別するという問題で、我々のチームは12,000枚ぐらいの画像を学習させた。商品を箱の中にばらばらに入れて撮影して、その画像に対して、この位置にこの物があるというマークを付けていく。この大変な作業を、大学側で学生が昼夜問わず頑張ってくれた。これでようやく数十種類規模の識別である。前述したように、実際の物流倉庫には1億種類の商品が存在するとも言われている。例えば、1億種類の商品の識別を実現しようとする、コンピューティング、さらには認識アルゴリズムにも非線形的なイノベーションが求められるだろう。

FA ではシンプルな特徴量ベースの認識技術が進展してきたが、今はお客様からのニーズとしても深層学習の話が出てくる。現状、そのコンピューティングに必要な計算リソースは不足しがちになっており、できることを段階的に広げていかななくてはならない。

FA や物流という分野は、即時性が求められるため、低コストでスタンドアローンのハードウェアで実現できるのが好ましいというのが今の形だ。しかし、ビジネスでは、ロボットのようなコンポーネントビジネスを志向してきたメーカーでさえ、エッジとクラウドを使ったプラットフォームでのビジネスを考えるようになってきている。数百種類程度の識別問題には対応できる技術は実証できてきたが、爆発的に扱う商品点数が増えた場合に、いかにデータを生成して、その大規模データをクラウドに保管して、エッジ側の機器でクラウドとの即時通信に対応するかとなど、技術的課題は多い。つまりコンピューティングへの要求や期待は大きいということだ。

【質疑応答】

Q：人間並みのスピードを出せるようになるにはどれくらいかかるか。例えば、今は30秒かかるのが3秒でできるようになるのは、タイムスケジューリング的にどのくらいか。

A：ロボットの目の物体の識別率は人間の性能を超えたと言われるようになり、今回のアマゾンの競技でも識別率は高いレベルにある。一方、制御に関しては、学習だけは難しく、モデルベースの行動計画が非常に重要になる。それをすべてエッジで実現するのは、現状まだ難しい。サーバークラスターを使えば、今でも人間並みのスピードを出すのは可能だが、アマゾンの競技で想定しているような環境下で人間並みのスピードが出るまでは、数年かかるのではないかと感じる。ただ、それはあくまで今回の商品点数（数十～数百種類）に対してであって、1億種類の商品を扱う場合は、ゼロベースで取り組まなくてはならない重要課題が多いと感じる。

Q：ネットワークは既存のものを使っているのか。学習時間はどのくらいかかっているか。

A：基本は、シングルショット・マルチボックス・デテクターとそれに準じたネットワークを使っている。チェイナをベースとしているが、計算コストを減らし高速化している。学習時間は、10GPU くらいのサーバークラスターで半日程度かけている。

Q：画像枚数が少ないように思うが、実際はオーグメンテーションで数を増やしているか。

A：その通りで、位置、姿勢、明度の変化に対するオーグメンテーションをやっている。

Q：ロボット向けのプロセッサやアクセラレータを作る動きはあるか。

A：ロボット市場よりも自動運転などの市場のほうが大きいと考えられているので、ロボット業界が先導してそういうものを作るというよりは、汎用的なものを使うとか、例えば自動車のような他分野で作られたアーキテクチャをベースに横展開することが考えられていると思う。一方で、ロボット向けに特化した H/W を研究開発し、圧倒的な性能のロボットを実現することは、日本の競争力を高めるうえで、今やるべき課題であると感じる。

Q：ポストダイナミックスの宙返りするロボットで用いられているのは、また違ったコンピューティングか、あるいはコンピューティングはあまり要らないのか。

A：機構や制御理論がメインの提案であり、極端なコンピューティングレベルを要求するものではない。パソコン数台で制御していると思われる。

- Q：産業用のロボット技術をもう少し人間に近いところで使おうとした場合、現状だとどのくらいのギャップがあるか。例えば、高齢化社会でお年寄りのサポートや癒し系ロボットが注目されているが、産業用のロボット技術がどう展開できて、何が障害になるか。
- A：作業の難易度という面では、やはり産業用の方が正確さや速度の要求レベルが高い。そこに主眼のある問題に対しては、そのまま汎用的に使える可能性がある。しかし、家庭での応用には安全が重要で、産業用ロボット向けの技術をそのまま展開しようとするれば、現状では大きな壁がある。各社が人協働ロボットに取り組んでおり、徐々にこの壁は取り除かれていく。もうひとつ重要な課題は、多品種のモノを、モノの使い方に合わせて操作するプランニングである。モノの情報をクラウドから取ってきたとして、それを環境やコンテキストに適応させてどこまで対応できるかが課題である。様々な環境・モノ・コト・意図を察して適切に物体を操作したり、環境にアクションできるほど、今のAIは進化していない。ここも大きな問題であることを忘れてはならない。

3.3 医療応用領域からの期待 ～内視鏡を例に～

中野 恵一（オリンパス株式会社）

医療応用領域の中でも、全般的な話というよりは、弊社の主力事業である内視鏡を例として紹介する。安全性や商品ライフの長さという面では、3.2の自動車の話と非常に似ている。技術的に求められる特性としては、フレキシビリティ、スケーラビリティ、使いやすさが非常に重要になる。

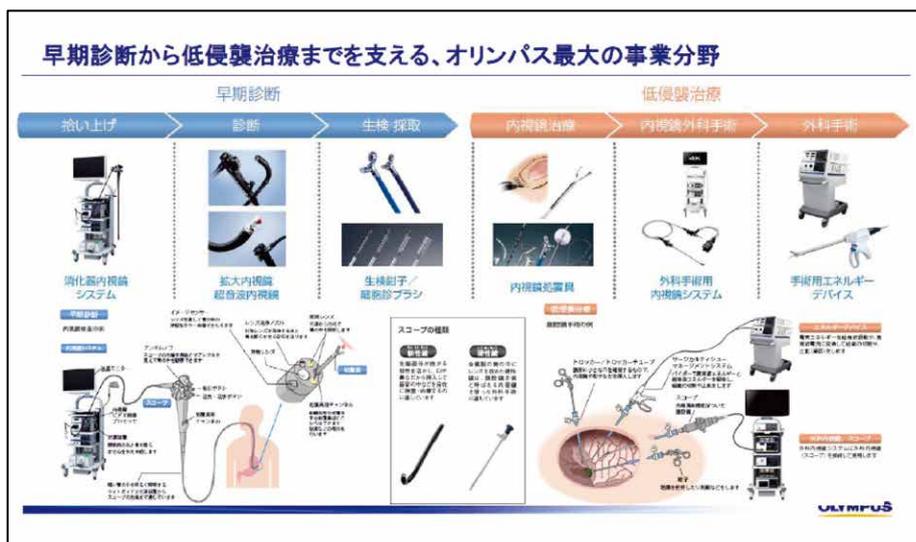


図 3-3-1 オリンパスの内視鏡事業

オリンパスの内視鏡の事業は大きくは「診断」と「治療」という2分野がある（図3-3-1）。もともと我々が得意なのは見る側の「診断」、画像処理を中心としたイメージングの装置である。一方、現在我々が力を入れているのは「治療」側の低侵襲治療である。内視鏡手術によって非常に短い入院期間で退院できるというメリットがあり、今後の高齢化社会の中で非常に重要になってくる。ただし、日本の医者は大変器用な方が多く、上手く道具を使っただけでいるので、現状、コンピューティング技術の寄与はまだ少ない。しかし、今後グローバルな展開を考えると、皆が器用なわけではなく、ロボットのテクノロジー等に置き換わっていき、制御技術等のコンピューティング技術が重要になってくる。

内視鏡は非常に狭いところや非常にセンシティブなところに入れていく必要があるため、現状は部位や目的に応じた多彩な内視鏡図（3-3-2）による形状の工夫と医者の技術がそれを可能にしている。今後それをできるだけ自動化しようとする、多様な形状に合わせた制御方法が鍵になってくる。

内視鏡の世界シェアは、見る側（観察系）の製品ならば、ほとんど日本メーカーが取っており、オリンパスはこの内7割を取っている。しかし、ビジネスとして儲かるのは手術に近い側の外科・処置具の方であり、オリンパスの世界シェアは25%程度しかない。



図 3-3-2 部位や目的に応じた多彩な内視鏡

医療機器メーカーの売上順位でいうと、オリンパスは日本でトップだが、世界では 19 位、次いでテルモが 21 位である。ペースメーカー等、生死に直結するものに対して、欧米は先進的に取り組んでおり、儲け幅が全く違う。我々も今後はより命に関わるようなところに進んでいこうと考えている。日本としても、国家戦略の中に医療が掲げられており、この方向のテクノロジーが非常に重要になってくる。



図 3-3-3 内視鏡/カプセル内視鏡の未来へ

これらを踏まえた内視鏡のこれからの方向性を図 3-3-3 に示す。できるだけ細く小さくなければいけない。その一方で、明るく見せないといけないし、軽くしなくてはならない。また、画素はできるだけ大きく、きれいに見えないといけない。内視鏡は、普通に口から入れるもののほかに、非常に細くて鼻から入れられるものがある。しかし、鼻から入れるものは画質が非常に悪くて、見落としが起きやすかった。弊社は先月、鼻から入れるものでもだいぶ性能を改善したものを発表したけど、何か見つかったときにすぐに処置できるという点で、相変わらず口から入れるものに優位性がある。できるだけ細くしながらも高画

1 ワークショップの開催趣旨と骨子案の説明

2 革新的コンピューティングに関する国内外の活動状況

3 ユーザー側からの革新的コンピューティングに対する要望

4 重要な研究開発領域とその取り組み方

5 総合討論

付録

質で明るくするという方向にはまだまだ多くの技術課題がある。「ミクロの決死圏」という映画にあったように、カプセルのようなもので人間の体の中に入っていき操作する話があったが、これは目指しているイメージに近い。

弊社の製品であるカメラは形はいろいろ変わってきたが、今は携帯に組み込まれるような時代になっている。内視鏡や弊社の創業事業である顕微鏡も、中身はほぼデジタル製品になっていて、ベンチャーからはスマホに取り付けられる顕微鏡のようなものも出てきている。また、スマホのアプリの形で医療製品のようなものも出てきている。この分野もデジタル製品、コンピューティングのテクノロジーに非常に寄ってきている。デジタルになればなるほど開発期間も短縮しないといけなくなり、設計スピードも上げなくてはならない。新興でも市場は急に立ち上がる。ここではスピード感が必要で、ハードウェアでじっくり作るというわけにもいかず、プログラマブル・デバイスを使わざるを得なくなってくる。プログラマブル・デバイスでも半導体の初期投資は非常に大きくなっているため、携帯のように多数売れるものとはともかく、弊社で扱っているような製品の個数では難しい。例えば自動車業界等で非常に使いこなされているものを使い、それをプログラマブルに医療製品に持っていくというような使い方をせざるを得ない。

その行き着く先は、図 3-3-4 に示すヘテロジニアス・マルチコアのようなものになるのではないかと考えている。今まで我々の製品の中心は FPGA である。弊社のシェアがあって何とか FPGA のコストに耐えられている。他ではおおむね ASSP を使っている会社が多い。新興国市場に出ていくには CPU や DSP、処理性能的には GPU も使わざるを得ないところがある。将来的にはこういったものが組み合わせられていくと思う。



図 3-3-4 ハードウェアからプログラマブル・デバイスへ

我々が取り扱うのは、どちらかというところエッジ側だが、クラウド側も同じようなアーキテクチャのデバイスで構成される訳であるから、どちらに持っていても大丈夫なアプリケーションの設計図ができることよ。そのため一つの手段として、図 3-3-5 に示すようなモデルベースの開発フローを考えている。コードベースだとデバイス依存性が非常に強

いので、できるだけ上流に持っていき、モデルからのダイレクトなインプリメントをしたい。その想定で、モデルから出発して、マルチ・メニーコア向けの製品コードを自動生成することができないか、早稲田の笠原先生のところと共同で検討を進めた経緯もある。

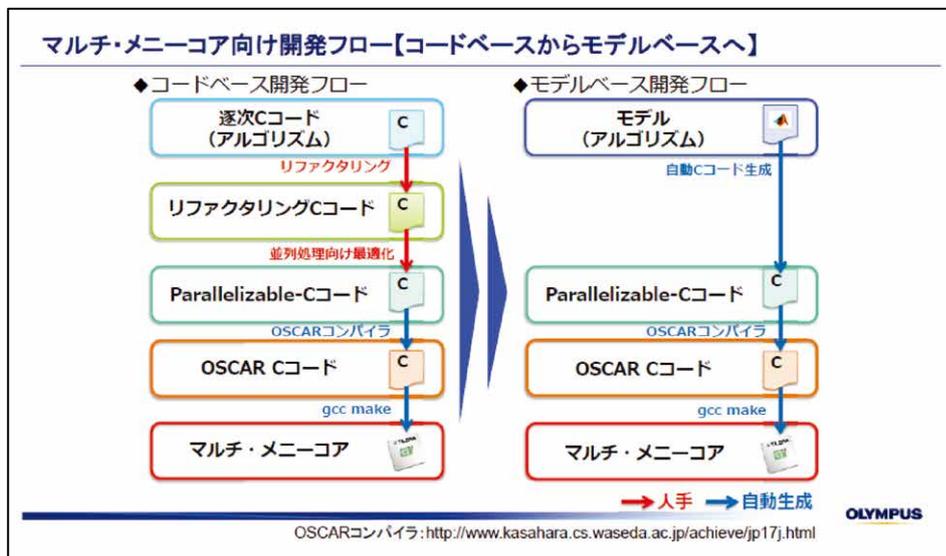


図 3-3-5 コードベースからモデルベースへ

このあたりは自動車業界が進んでいて、モデルベースのシステムズ・エンジニアリングの取り組みがある。こういったものを参考にしつつ、我々も開発効率を上げていかないと、今後のスピード感に合わないと考えている。

最後に参考として、最近のトピックスを挙げておいた。ここに挙げているものは、エッジ側に AI やインテリジェンスを載せたり、クラウドとの連携をしたりするものが多く、我々も動向を見守っている。これらが可能になれば早く使いたいので、興味を持って見ている。これは内視鏡に限らず、医療分野としてこのようなトピックスがあると見ている。また、ロボティクスの技術も医療分野において非常に重要であり、世界中で取り組みが進んでいる。

【参考】最近のトピックス

1. **FDA、デジタルヘルス機器の規制緩和を加速するプランを発表**
 - ✓ Digital Health Software Precertification (PreCert)
<https://www.fda.gov/MedicalDevices/DigitalHealth/DigitalHealthPreCertProgram/Default.htm>
2. **スマホを使って、外傷性脳傷害を”現場で”検出する技術**
 - ✓ Smartphone App to Help Diagnose Concussions Anywhere and Without Expensive Equipment
<https://www.fda.gov/MedicalDevices/DigitalHealth/DigitalHealthPreCertProgram/Default.htm>
3. **スマホで早期黄疸を検出、応用例として膵がんスクリーニングの可能性も**
 - ✓ Novel Smartphone App for Bilirubin, Pancreatic Cancer Screening
<https://www.medgadget.com/2017/08/novel-smartphone-app-pancreatic-cancer-screening-2.html>
4. **スマホのセンサーを医療機器にするスタートアップSenosis社をGoogleが買収**
 - ✓ Google buys startup that turns smartphones into health diagnostic tools
<https://www.theverge.com/2017/8/15/16148212/google-acquires-start-up-senosis-health-patel-shwetak>
5. **Google Glass、B2Bリリース開始、医療向けアプリは3社から提供**
 - ✓ Google Glass新エンタープライズ版リリース。12のパートナー企業から購入するかたちに
<https://vrinside.jp/news/google-glass-enterprise-release/>
6. **Medrobotics: 世界初のロボット支援大腸内視鏡手術に成功**
 - ✓ World's First Robotic-Assisted Scarfree™ Colorectal Surgery Successfully Completed with Medrobotics® Flex® Robotic System at George Washington University Hospital
<http://www.businesswire.com/news/home/20170830005678/en/World%E2%80%99s-Robotic-Assisted-Scarfree%E2%84%A2-Colorectal-Surgery-Successfully-Completed>
7. **インプラントVRディスプレイ: Omega Ophthalmics**
 - ✓ Omega Ophthalmics is an eye implant platform with the power of continuous AR
<https://techcrunch.com/2017/08/04/ophthalmics-is-an-eye-implant-with-the-power-of-continuous-ar>
8. **中国のカプセル内視鏡Ankon、VCから\$100M獲得**
 - ✓ SBCVC Joins \$100M Round In Chinese Capsule Endoscopy System Developer Ankon
<https://www.chinamoneynetwork.com/2017/08/15/sbcvc-joines-100m-round-in-chinese-capsule-endoscopy-system-developer-ankon>
9. **USBスティックでDeep Learningを実現 世界初AIアクセラレータ**
 - ✓ USBスティックでディープラーニングを実現 Intelが新製品「Movidius Neural Compute Stick」をリリース
<http://www.atmarkit.co.jp/ait/articles/1707/24/news066.html>
10. **GEヘルスケア:スマホ型の超音波診断装置を発売**
 - ✓ GEヘルスケアの携帯型超音波「Vscan」が“スマホ化”
<http://techon.nikkeibp.co.jp/atcl/news/16/070608265/?ST=health>
11. **Microsoftが機会学習モデルの圧縮を目指す**
 - ✓ AI's big leap to tiny devices opens world of possibilities
<https://blogs.microsoft.com/next/2017/06/29/ais-big-leap-tiny-devices-opens-world-possibilities/#0is6Avdy0PtmXmvm.99>
12. **カプセル内視鏡画像のDeep Learningで、ポリープ認識精度98%を達成**
 - ✓ Deep learning for polyp recognition in wireless capsule endoscopy images
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/mp.12147/full>
13. **大腸ポリープをリアルタイムに分類するAI内視鏡**
 - ✓ Artificial Intelligence (AI) in Endoscopy--Deep Learning for Optical Biopsy of Colorectal Polyps in Real-Time on Unaltered Endoscopic Videos
[http://www.giejournal.org/article/S0016-5107\(17\)31032-5/fulltext](http://www.giejournal.org/article/S0016-5107(17)31032-5/fulltext)
14. **誰もが子宮頸がんをスクリーニングできるスマホ接続コルポスコプ**
 - ✓ New Tech Promises Easier Cervical Cancer Screening
<https://pratt.duke.edu/about/news/ditch-the-speculum>
15. **DARPA:1000倍エネルギー効率の高いプロセッサ開発**
 - ✓ DARPA Funds Development of New Type of Processor
http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1331871&
16. **AIハードウェアを開発するスタートアップ**
 - ✓ 12 AI Hardware Startups Building New AI Chips
<http://www.nanalyze.com/2017/05/12-ai-hardware-startups-new-ai-chips/>
17. **世界初、自律制御されたロボット大腸内視鏡検査に成功**
 - ✓ Colonoscopy 'capsule robot' could make the diagnosis of bowel conditions more comfortable
<http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-4484996/Autonomous-capsule-robot-explores-colon-time.html>
18. **VRを用いたドクター向け教育アプリケーション**
 - ✓ Virtual syringe lets surgeons practise piercing skin and muscle
<https://www.newscientist.com/article/2127828-virtual-syringe-lets-surgeons-practise-piercing-skin-and-muscle/>
19. **認識機能内蔵カメラモジュール**
 - ✓ Qualcomm Wants Your Smartphone to Have Energy-Efficient Eyes
<https://www.technologyreview.com/s/603964/qualcomm-wants-your-smartphone-to-have-energy-efficient-eyes/>

【質疑応答】

- Q：画像処理が中心であれば、クラウド側の話になるか。
- A：現状は画像処理が中心だが、医療では手術等でロボティクスが入ってきている。その制御系との組み合わせを考えると、エッジ側のコンピューティングもより重要になってくる。
- Q：内視鏡というと、飲み込めるカプセルのようなものがあったと思うがどのような状況か。
- A：カプセル内視鏡は薬のカプセルと同様で、人が飲み込んだら胃腸を通して出ていくのに任せるしかない。胃のような大きな臓器の中では焦点距離がコントロールできないため、今は基本的に小腸用である。大腸にも適用されるようになってきたが、まだ適用部位は限られている。
- Q：ダヴィンチのような医療系のロボットは、世界的にどんな状況か。
- A：ダヴィンチをやっているインテュイティヴ社がほぼ全てを押さえている状況。日本でもいくつかの病院に入っている。それに対して中国・韓国あたりから、廉価版で一応は使えるレベルのものが出てきたところである。
- Q：内視鏡の先にカメラを付けたり、何か制御をするためのチップを付けたりするときに、熱の問題があって、非常に低消費電力のものが欲しいという話があった。一方、自動車等で作られた技術を応用したいという話もあった。自動車と内視鏡では要求されるレベルがかなり異なるように思えるが、それがつながってくるのか。
- A：消費電力という面では厳しい。全く違う世界だと思う。例えばカプセル内視鏡は、飲み込まれてからおよそ8～12時間出てくるが、その間、画像を秒1～2コマで撮って、そのまま送るので精いっぱいである。普通のビデオだと秒30コマ程度だが、電力消費量から見て、これは全く無理である。
- Q：医療系で日本が弱くなっている理由は何か。
- A：企業のリスクのとり方の問題で、チャレンジ精神が足りない。日本社会では、ここで失敗すると企業の存続に関わるという意識が強い。
- Q：この分野の応用の場合、エラーが許容される率はどれくらいか。つまり、事故が起こり得る確率がどれくらいまで、社会に受容されるのか。
- A：具体的な数字はケース・バイ・ケースだが、日本と欧米で許容度がかなり違うと感じている。社会的コンセンサスとして許容されるようにならないと、企業にとって、そこにチャレンジすることにリスクが生じる。対象毎に国の許容度も異なる。例えば、細胞系は韓国が比較的やりやすかった。今は経産省・厚労省の施策があり、薬系は日本がやりやすくなってきた。
- Q：医療機器の分野では新世代のセンサが様々出てきている。例えば、東工大では量子センサでポータブルのMRIを作るという話がある。カメラ等の従来のセンサではなく、何らかの新しいセンサを使って、今まで計測できなかったものを計測できるようにするという方向性はないのか。
- A：センサの技術を変えるということは、非常に新しい価値を提供できる可能性がある。内視鏡でも、色の違いが非常によくわかることが大きな価値を持って受け入れられている。ただし、医療効果があるかという視点が重要なので、ドクターと連携しながら何年もかけて、そういうエビデンスをとることが必要になってくる。

4. 重要な研究開発領域とその取り組み方

4.1 革新的コンピューティングを支えるソフトウェア基盤

中島 研吾（東京大学）

発表者のドメインは計算科学シミュレーション全般である。図 4-1-1 は、東京大学情報基盤センターが筑波大学とともに運用している Oakforest-PACS システム（図 4-1-2）における重点アプリケーション群である。計算科学シミュレーションとは偏微分方程式を有限要素法等の様々な方法で離散化し、最終的には大規模な連立一次方程式を解くところまでを含んでいる。

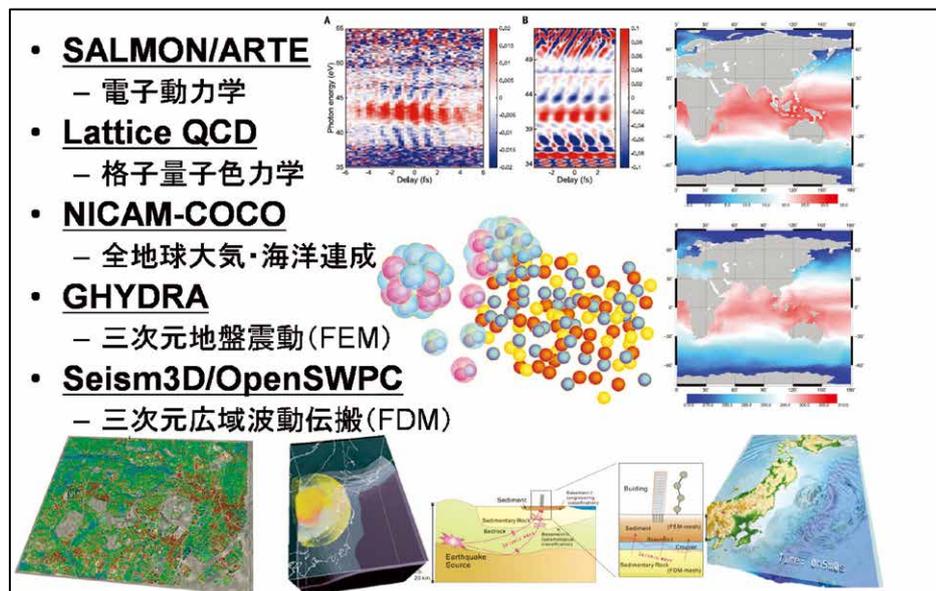


図 4-1-1 ドメインとしての計算科学シミュレーション

我が国における HPC コミュニティでは、2015 年頃からポスト・ムーア・コンピューティングに対して取り組んでいる。アーキテクチャ、ソフトウェア、アプリケーション一体となった世界に例を見ないものであり、科研費の新学術領域等にも応募している。8～9 グループで総勢 100 名近くになる。2015 年 12 月には「ポスト・ムーアに向けた計算幾何学・計算科学の新展開」というタイトルで国際シンポジウムを開催して約 160 名の参加者があった。国際会議 SC16、SC17 では「Post Moore's Era Supercomputing」というワークショップを提案するなど盛んに活動している。本年は「計算原理のカンブリア爆発的進化の推進」という名称で平成 30 年度科研費「新学術領域」に応募している。特に今回は、アプリケーション・アルゴリズムについては、最低精度・変動精度と Data Driven Approach (DDA) を中心のコンセプトとして置いている。図 4-1-2 は東大情報基盤センター（東大センター）におけるスパコンの導入状況・計画である。2020 年度導入予定の 50 ペタフロップス級の BDEC System (Big Data & Extreme Computing) は、全計算資源のうち 10% 程度が外部ノード（データ科学ノード群）で、残りの 90% が内部ノード（計算

科学ノード群、伝統的なスパコン) から構成される。外部ノードと内部ノードのアーキテクチャは異なる可能性があり、Hierarchical, Hybrid, Heterogeneous (h3) なシステムである。外部ノードではデータ処理を中心に実施するが、各ノードから外部ネットワークに直接接続し、衛星観測データなど、様々な大規模データをリアルタイムで取得、活用できるようにしようと考えている。

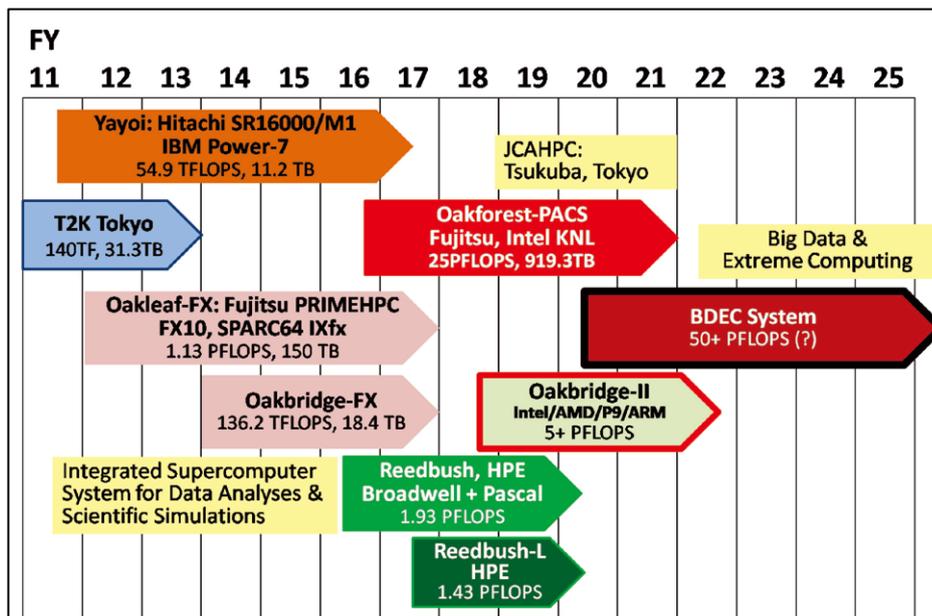


図 4-1-2 東京大学におけるスーパーコンピュータ

東大センターではエクサスケール時代、ポスト・ムーア時代の次世代スパコンによって科学的発見を持続的に促進する手法として、従来の計算科学にデータ科学の技術・知見を融合した「データ融合計算科学」を提案している。BDEC System を「データ融合計算科学」を実現するプラットフォームと位置付け、次世代スパコンの能力を最大限引き出し、最小限の計算量・消費電力でデータ融合計算科学シミュレーションを容易に実施可能とするために、高性能・省電力数値アルゴリズムと精度保証・自動チューニング、及び機械学習に基づく革新的手法である階層型 Data-Driven Approach (DDA) を研究し、成果を革新的ソフトウェア基盤「h3-Open-BDEC」(図 4-1-3) として実装する。h3-Open-BDEC を BDEC、ポスト京等のエクサスケール時代の様々なスパコンに展開し、各分野のデータ融合計算科学シミュレーションを実施し、従来型計算科学シミュレーションと同等の計算精度を保ちつつ、10 倍以上の飛躍的な計算量・消費電力削減が達成されることを目指す。また、FPGA、量子コンピュータ等の新デバイス併用による更なる省電力化を検討している。

h3-Open-BDEC は、h3-Open-APP (アプリ開発基盤)、h3-Open-MATH (高性能・省電力数値ライブラリ)、h3-Open-DATA (データ科学基盤)、h3-Open-AT (省電力・精度保証・自動チューニング基盤)、h3-Open-SYS (制御・統合基盤) の 5 つのサブ基盤から成る。各サブ基盤は複数の構成要素を含み、緊密に関連する。h3-Open-BDEC は、東大センターが平成 23 年度から JST-CREST において開発している「ppOpen-HPC: 自動チューニング機構を有するアプリケーション・開発・実行環境」を原型としている。

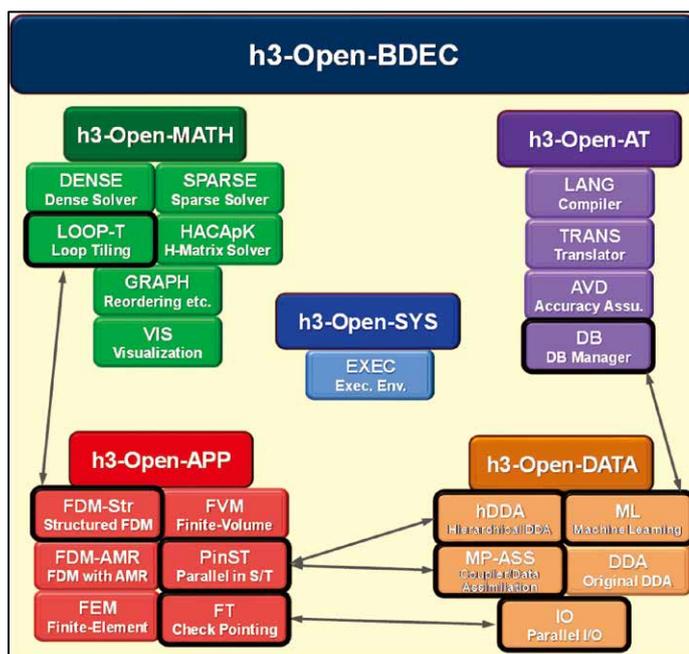


図 4-1-3 h3-Open-BDEC の構造を示した階層図

次世代スパコンでは、3D 積層技術、光ネットワーク等の技術革新によるメモリ・SSD・NVRAM（不揮発性ランダムアクセスメモリ）の容量・バンド幅、ネットワークのバンド幅増大が期待される一方で、メモリ、ネットワークの階層化は一層進み、レイテンシの影響は深刻となるため、これらの特徴を考慮した上でスパコンの能力を最大限活用する高性能アルゴリズムの開発が必須である。特に、通信、レイテンシを隠蔽する手法は重要であり、すでに様々な手法が提案されているが、時空間並列化はそのような手法の一つとして有効である。

エクサスケールシステムの消費電力は数 10MW に達し、計算効率化、低電力化による総消費電力削減が必須である。低精度・変動精度（Transprecision）演算により低消費電力を目指す Approximate Computing は、画像認識のようなそれほど厳密な計算が不要な分野での研究が中心で、数値解析にはほとんど使われていなかったが、EU の Horizon2020 のプロジェクトの一つである Open transPREcision COMPUting のように数値解析の分野でも適用されるようになってきた。Approximate Computing の発想を様々な高性能数値アルゴリズムにも導入し、劇的な計算時間・消費電力削減を実現する数値ライブラリの整備が重要である。更に最低限精度での解の精度保証手法、次世代スパコンで最大性能を実現する実装方式を動的に選択する革新的自動チューニング（Auto Tuning, AT）手法の研究も必要である。このような研究の成果を h3-Open-AT に実装することにより、様々な数値アルゴリズム、アプリケーションに対して自動チューニングの適用が可能となる。

計算科学シミュレーションの対象とする実問題の多くは非線形であり、パラメータスタディが必須である。昨今は計算科学シミュレーションに機械学習を適用する Data Driven Approach (DDA) が、パラメータスタディのケース数を減らした上で従来と同等の計算精度を達成可能な手法として注目されている。DDA において、大規模シミュレーションを繰り返して教師データを生成することは事実上困難であり、適用範囲は限定される。有

限要素法、差分法、AMR 差分法等によるシミュレーションにおいて、教師データ作成用に、計算量を削減した簡易モデルを使用する階層型 DDA により、この問題は解決可能である (図 4-1-4)。階層型 DDA における簡易モデルは機械学習によって自動生成され、階層型 DDA を複数回適用することによって更に簡易なモデルを生成することが可能である。

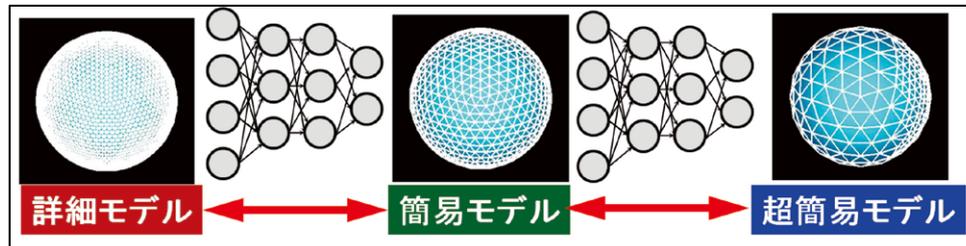


図 4-1-4 階層型 DDA 法 (Hierarchical Data Driven Approach) による階層的な簡易モデル生成

【質疑応答】

- Q: ポスト・ムーアの話はある意味良いチャンスではあるが、数値計算分野の要求で、ポスト・ムーアのように飽和して、これだけあればよいといった数字は存在しないのか。私がスパコン業界に入った 1980 年から今まで語り口がほとんど変わっていない。数値計算をやったら大きい発見ができるということが減りつつあるのではないかというのを気にしている。ポスト・ムーアにどういう意義があるのか。
- A: 私自身が実際にシミュレーションそのものを行っているわけではないが、大気や海洋の人に聞くと、基本的に大規模であればあるほど良いと言っている。例えば、予報の精度を上げるといった観点からすると、やはりケース数はある程度稼ぐ必要がある。そのため全体としての規模は変わらないにしても、一度に実行できるケース数が増えるというのは魅力的なことであると思う。
- Q: それはよく分かるが、私の印象では、やはり世の中には飽和のようなものがあるのではないかという疑問がある。例えば、人工知能関連である点 (技術的特異点) を超えると、急激に世の中の性質が変わるといった話があって、それを信じている人が多くいる。しかし、数値計算に関してはそうした時代は終わったという印象がある。新しい技術的特異点が登場する可能性はなく、メッシュを細かくしていくにすぎないのではないかと感じている。今から 10 分の 1 のメッシュでできるようになったら、研究者自身が幸せになるのは分かるが、本当に私たちは幸せになるのか。
- A: 人それぞれの考え方があって、私はそうなると思う。
- C: 以前にエクサと言いだした時は、そこまでのアプリケーションは無いのではないかという話もあったが、実際には意外とある。非線形の問題が結構ある。地震などもそうだが、非線形問題を解くことで、例えばスマートシティのホリスティックな本当のシミュレーションができる、という世界によりやく到達しつつある。このため、ポスト東京なども含めて期待は持てる。ただし、無限にこれが続くかは分からない。スピードアップのために、ポスト・ムーアで例えばフロップスはやめてバンド幅で稼ぐといったことをやって、需要が尽きるのが早いのか、それともアプリケーションの方で需要

が尽きるのが早いのかはよく分からない。

- Q** : 今から千倍どころでなく、ゼッターフロップス、ヨタフロップスになった時に地震予測が当たるようになるかという、絶対ならないのではないか。そのような原理的な壁が数値計算にもあるのではないか、それに近づきつつあるのではないかというのが、ポスト・ムーアと関連して、基本的な疑問として感じている。
- A** : chaotic な系でもアンサンブルが比較的機能する気象のようなものであればうまくいく。ただし、地震は chaotic といっても余りにも突発的なイベントなので、予測は本質的に難しい。
- Q** : 例えば、細胞 1 個を第一原理計算で解けるだろうか。これはヨタフロップスになっても無理だろう。そういった意味で、ここから先は少し良くなる程度の段階に数値計算が差しかかっているのではないかという印象があり、何かもう少し切り口を変えてやらないといけないのではないか。
- C** : データドリブンというのは正にそれに応えるものである。第一原理計算でプッシュするとフロップスが尽きるため、むしろ新しい計算も含めて、それに適したアルゴリズムやアーキテクチャをつくっていくのが大事だと思う。
- C** : 日本のスパコンで数値計算をやっている研究者は、アプリケーションをある意味、限られた領域だけで考えてしまっているように感じる。もう少し幅広く考えてみればもっと様々な知見が得られるし、計算機パワーを有効に使える部分があると思う。例えば、フィンテックとか社会とのつながりの接点に近いところでスパコンの性能をうまく使いこなす、といった視点が我々に欠けているのではないか。違った視点から今のスパコンなり数値計算なり、その辺の世界を眺めてみるのは意味があると思うし、そういう時期に来ているのではないか。
- C** : 全く同感であり、その意味でポスト・ムーアというのは良いチャンスだと思う。

4.2 知的情報処理時代を支える情報処理アーキテクチャの革新

本村 真人 (北海道大学)

6年ほど前まで企業にいたので、大学で研究を進める立場と、企業で実用化にもがいていた経験の両方を踏まえて紹介する。重要と考えている視点の一つが、深層ニューラルネット(DNN)である。図4-2-1に示すように、構造型の情報処理と言っても良く、データフロー型と同じような意味合いで使われている。つまり、大量のニューロン間の結合網にデータを流し込んで係数をアップデートしていく大規模データフローグラフの並列処理という特徴を持つ。これがワークロードとして非常に重要な位置を占めるようになってきた。それ以外にも多くの知的情報処理課題を構造型問題と考えることが出来る。

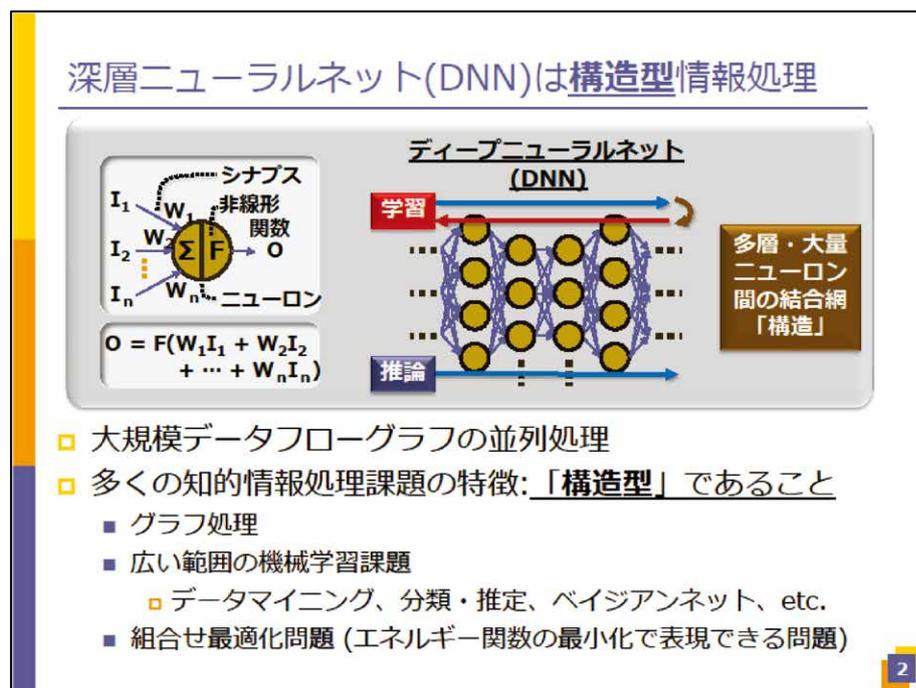


図 4-2-1 構造型情報処理である深層ニューラルネット (DNN)

このワークロードの変化を受けて、アーキテクチャも「手続き型」から「構造型」へ転換してきており、アーキテクチャのリバイバルの余地が大きく生まれているのが現況である。従来の手続き型情報処理の枠組みはコントロールフロー型であり、構造型情報処理はデータフロー型である。少し別の視点で見ると、それはリコンフィギュラブル・ハードウェア型といえる。アナロジーとしては、「手続き型」情報処理が左脳、「構造型」情報処理が右脳と考えると分かりやすい。

このため、図4-2-2に示すように、アーキテクチャの研究動向は一言でいえば「コンプリア爆発」の様相を呈している。これまでの情報処理フレームワーク（手続き型の情報処理）は、情報処理の上流と下流の間、言い換えれば、社会実装／応用／ソフトウェアからハードウェア／回路／デバイスまでの間の結節点にアーキテクチャがあると理解できる。

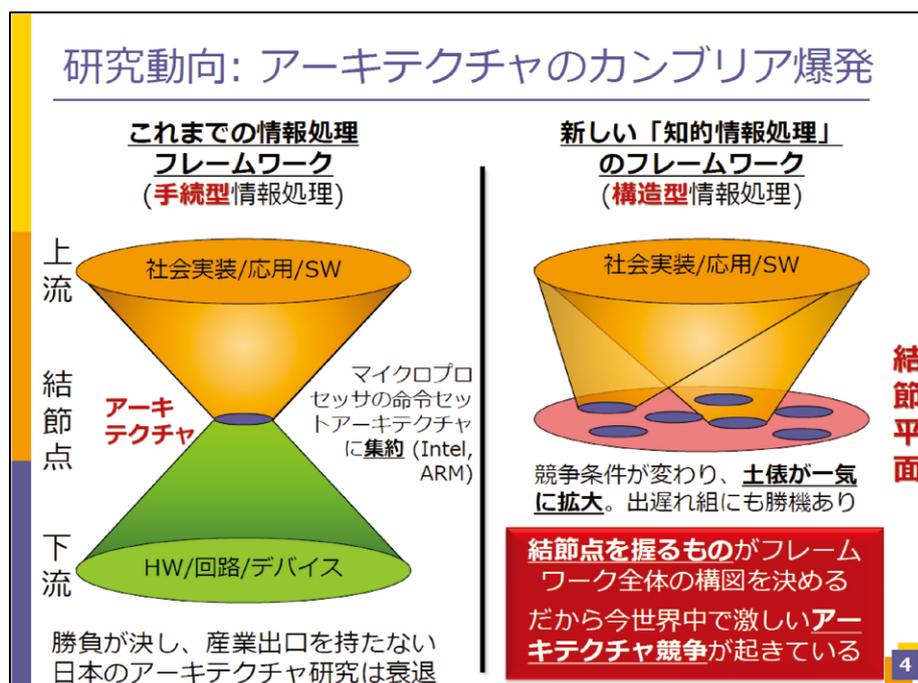


図 4-2-2 アーキテクチャ研究の動向

従来型の情報処理の場合、様々な歴史的経緯の結果、マイクロプロセッサの命令セットアーキテクチャという形で結節点に収斂ないし集約し、インテル (Intel) とアーム (ARM) が残っていると考えることができる。残念ながら、産業出口を持たない日本のアーキテクチャ研究は「衰退」の道を辿ってきたというのが実情である。

しかし現在の流れは、新しい知的情報処理のフレームワークで考えることができ、構造型の情報処理という、従来とは別の解き方ができる可能性がある。そのため競争条件が変わり、土俵が一気に拡大してきた。今起きていることは、結節点が点ではなく、「結節平面」になっていることであり、様々なアプローチの提案が出てきている。少しスタートが遅れた我々にとっても、勝機が十分あると考えられる。実際、結節点を握るものが、フレームワーク全体の構図を決めることになるため、現在は世界中で激しいアーキテクチャの開発競争が起きていると理解できる。しかし、そのようなアーキテクチャ開発競争の中で、現状は競争の中心が米国と中国であるのは間違いなく、日本の影は薄くなっている。日本の存在感が低い理由の一つは、アーキテクチャのプレイヤーが減少していることである。この意味で、アーキテクチャは、日本の「ミッシングリンク」といえる。

構造型の知的情報処理アクセラレータの描像は、図 4-2-3 に示すように 3つの重要なポイントからなる。一つは、知的情報処理あるいは人工知能 (AI) とも呼ばれているアクセラレータと大容量メモリとの高バンド幅結合である。二つ目は、そのアクセラレータ自体が超高並列の演算器アレイから成ることである。三つ目は、処理局面に応じて、アレイの構造やデータの流れを変えることが出来ることである。

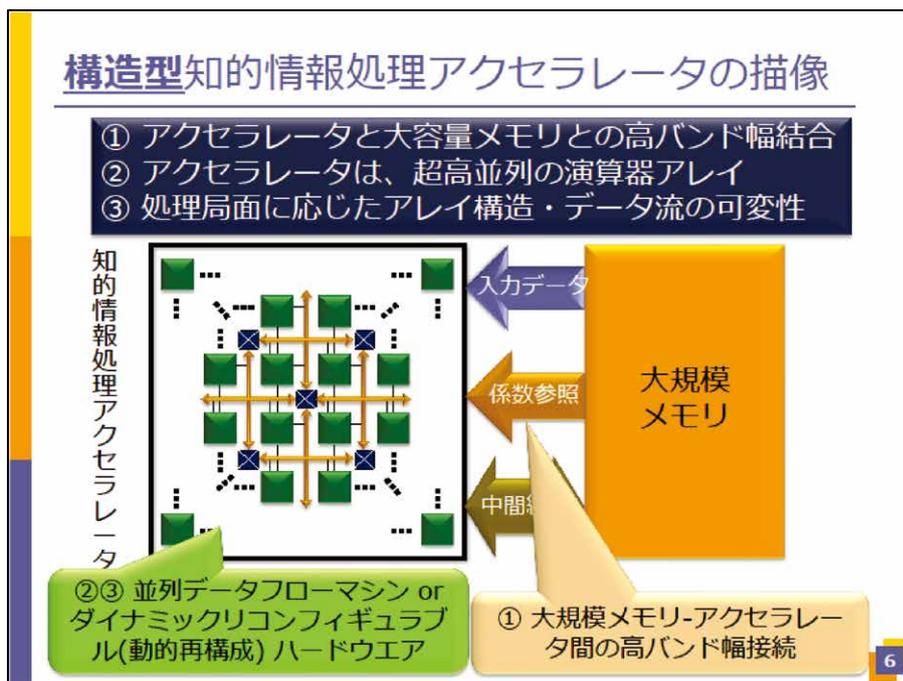


図 4-2-3 構造型知的情報処理アクセラレータの描像

日本発研究成果の事例 (1): 世界初のバイナリDNNチップ

JST ACCEL (黒田課題)

BRein Memory

(Binary/Ternary, Reconfigurable
in Memory DNN Accelerator)

2017 Symp. on VLSI
Circuitsで発表 (6月):
北大本村研・慶應黒田研

- バイナリ (情報量・計算量圧縮)
- インメモリ (外部メモリ不要)
- リコンフィギュラブル (様々なDNNに対応)
- データフロー並列 (NNの層内・層間の並列性を最大活用)

CPU等との比較 (手書き文字認識)	BRein Memory	FPGA	GPU	CPU
エネルギー効率 対CPU相対比	2.6万	33	9	1

Ando K., ..., and Motomura M., "BRein Memory: A 13-Layer 4.2 K Neuron/0.8 M Synapse Binary/Ternary Reconfigurable in-Memory Deep Neural Network Accelerator in 65 nm CMOS," 2017 Symp. on VLSI Circuits.

7

図 4-2-4 日本発の研究成果事例 (世界初のバイナリ DNN チップ)

実際にわれわれの北海道大学グループは、JSTのACCELの黒田先生(慶應大)のプロジェクトに参画しており、そこでJSTから支援を得て、ディープラーニング関係のハードウェアアーキテクチャと、そのチップ実装の研究開発を進めている。図4-2-4に示すように、2017年6月にVLSI回路シンポジウムで「ブレインメモリ(BRein Memory)」と名付けた成果を発表した。これは、日本発の研究成果であり、世界初のバイナリDNNチップ

である。バイナリでインメモリかつリプログラマブルであり、言い換えれば、データフロー並列タイプのアーキテクチャを実現したことになる。バイナリであるためエネルギー効率は非常に良い。全部のメモリがオンチップで入っており、通常のCPUに対して数万倍くらい電力効率が良いと推定される。

日本発の研究成果の事例の二つ目として、世界初の三次元積層・対数量子化DNNチップを挙げる。これもJSTのACCELプロジェクトの中で開発したもので、来年2月のISSCCで発表する予定である。北海道大学とウルトラメモリ社と慶応大学・黒田研の共同で開発したもので、「QUEST」という名前と呼んでいる。発表前なので、詳細は開示できないが、チップのイメージは、対数量子化近似に基づくDNN推論エンジンである。ここでもメモリとの高バンド幅接続が非常に重要であり、ACCELの黒田先生の開発した技術である磁界結合の三次元積層技術を使って、DNN推論エンジンとSRAMを8枚積層化したものになっている。

ISSCC2018では、AI向けのハードウェアの発表が11件ある。バイナリ、インメモリ、ミックスドシグナルを使い、アナログで処理をする論文が多く出ている。バイナリが一気に6件出てきており、さらにそれをインメモリにしてミックスドシグナルにしたものが4件出てきた。これらは、我々がVLSIシンポジウムで発表した、バイナリ、インメモリ、デジタル実装のチップをアナログで実現したものであり、発表のインパクトはかなり大きかったと思われる。

ISSCC2018にみるAIハードウェア技術動向

セッション名 →	NM.	Deep Learning and ...				Ext.	Computation in Memory ...				
↓ 技術分類項目	7.4	13.2	13.3	13.4	13.5	21.2	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5
対象ML技術	深層NN	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓
	Binary	✓	✓		✓		✓			✓	✓
	量子化	Log	線形								
	その他ML	NM						SVM	HD		
特徴	学習	汎用	汎用					学習	学習		
メモリ	インメモリ				✓		✓	✓		✓	✓
	メモリ積層		磁界								
回路/Tech.	Mixed-Signal	✓			✓	✓	✓		✓	✓	✓
	Non CMOS								CNT	ReR	
発表機関(主著者)	Georgia	北大	KAIST	KAIST	Stanford	Columbia	MIT	Illinois	Stanford	NTHU	NTHU

凡例
 汎用: CNN, RNN, MLP, 等の種々のDNNに対応可能
 NN: ニューラルネット
 NM: ニューロモルフィック
 学習: 強化学習
 Log: 対数量子化
 線形: 線形量子化
 磁界: 磁界結合データ転送
 SVM: サポートベクトルマシーン
 HD: ハイパーディメンショナルコンピューティング
 CNT: カーボンナノチューブFET
 ReR: 抵抗変化型メモリ(ReRAM)

図 4-2-5 ISSCC2018 にみる AI ハードウェア技術動向

最後にまとめると下記のようなになる。深層ニューラルネット (DNN) を中心に情報処理の分野が勃興し、コンピュータ技術革新のチャンスが生まれている。そこでは、「知的情報処理アーキテクチャ」や「システムウェアなハード技術」が重要であり、国策としての研究振興が望まれる。投資規模が限定される日本では、研究の枠組みの設定が重要である。短期的な AI ブームにフォーカスせず、中長期的な「知的情報処理」研究の発展全体を見通すことが重要であり、長期的な研究という名目に甘えた、出口の見えない研究に無駄な投資をすることは避けなければいけない。また、ドメインスペシフィックな垂直統合という意味では、トップダウンで進めていくのが重要で、ボトムアップで下から新しいものを全部取り込むのは、なかなか難しいのではないかと感じている。

【質疑応答】

- Q：バイナリネットワークのような精度が低いものと比較すると、アナログの方が精度が上がるのではないか。
- A：アナログ実装の狙いは、乗算をアナログでメモリの中でやることによりエネルギー効率をオーダーで上げることだが、実際に証明することは簡単ではない。メモリの中に回路を埋め込むと、トランジスタ（チップ）が大きくなり、かえって電力を食ってしまい、実装の状態では、うまくワークしない。また、ばらつきに関してきちんと評価をするまでに至っていない。
- Q：アナログになると、ニューロモルフィックの話とかぶるようになるが、そのあたりの最近の動向はどのようになっているのか。
- A：このようなアプローチはニューロモルフィックの分野で結構行われている。回路のテクニックの一つとしてニューロモルフィックの技術を使っている。今後は CMOS の世界で、このような技術が出来るかがポイントとなる。
- Q：人間は生まれてから目が良くなる、センサ自体が画期的に良くなることは無いが、医療現場では、ノイズレベルで 10 倍良くなったり、解像度が 100 倍改善されたりすることがある。その際、再ラーニングをすると改善するが、昔のものが確実に遺伝されるのか。つまり、再学習しても昔の状態が出来ていたことが確実にできる学習は可能なのか。
- A：転移学習のような話があるので、とりあえず標準的なデータセットで学習して、あとはカスタマイズするアプローチはある。しかし、確実に遺伝されるかはよく分からない。
- C：Verilog を書ける人を北海道大学でも量産してほしい。それが皆がハッピーになる道である。東大では多量生産しているが、まだまだ不足である。

1 ワークショップの開催趣旨と骨子案の説明

2 革新的コンピューティングに関する国内外の活動状況

3 ユーザー側からの革新的コンピューティングに対する要望

4 重要な研究開発領域とその取り組み方

5 総合討論

付録

4.3 デバイス側からの提案

竹内 健（中央大学理工学部）

「AIで日本は勝てるのか？」ということが大事な問いである。ここでは、半導体の世界における日本の現状を鑑みて、デバイス側からの戦略的な提案を行いたい。

10年程前のJST-CRESTに、ディペンダブルOSやディペンダブルVLSIといったディペンダビリティに関する戦略的研究が2件あったが、いずれも非常に先見性のある良いファンディングだったと思う。その研究に携わっていた方は、今でも第一線でやられており、そのような知見を生かすのも一つの手ではないかと思っている。最先端のデバイスは、どうしてもばらついてしまうので、デバイス単体やソフト単体で高いディペンダビリティを確保するのはだんだん難しくなってくる。システム全体で高いディペンダビリティを確保する必要がある。図4-3-1に示すように、ここに日本がAIで勝てるヒントがあると思う。IoTに関するもの、例えば、産業機械、ロボットや自動車等の場合、高いディペンダビリティが必要である。日本はばらつきの抑制も含めて、今でも結構強い分野であり、頑張ってきたところである。AIだけで勝てれば、それは素晴らしいことだが、やはり「AI×高いディペンダビリティ」といったものを目指して研究を行っていくのが良いのではないか。しかし、NTTの基幹系も結局HUAWEIを使っているように、「高品質＝高価格」という論理は通用しない。やはり、「AI×高品質×低価格」が必要要件である。

ヒント：民生用途から産業用途 (IoT) へ

- “ゼロディフェクト”の産業用途は“枯れた技術”が使われていた
- 従来の用途(スマートフォン、ゲーム機、PC、サーバー等)より遥かに高い信頼性が必要な産業用途(車、ロボット等)に最先端の技術が適用される
- LSI単体では多少のばらつき・エラーがあっても、システム全体で高信頼技術・ディペンダビリティを確保

(参考)JST CREST ディペンダブルVLSIシステムの基盤技術H19-26

1

図 4-3-1 AIで日本が勝てるヒント

AIはそもそも確率的であり、絶対的な正解を求めるものではない。推論結果が正しければ、計算途中やデバイスの少々の誤りは許容できる。そのような観点から、きちんとした結果が出るが途中は多少間違ってもよいという近似計算 (AC: Approximate Computing) に一つの糸口があるのではないかと思う。誤り訂正符号 (ECC: Error Correction Code) に関して言えば、ECC 計算すればするほど時間はかかってしまうが、

エラーはだんだん減っていく。しかし、AI 的に考えると ECC は必要ないだろうということになる。それは、我々 LSI 屋が真面目に一生懸命やってきた世界とは随分違う分野である。LSI 設計には、物理的限界というものがあり、図 4-3-2 に示すような、性能、電力、信頼性、チップサイズに起因する製造コストにはトレードオフの関係がある。例えば、低消費電力 LSI では、電力を下げれば、やはり性能も下がってしまう。今の AC は信頼性を思い切り落として、その代わりにコスト・性能・電力を良くすることである。チップ屋から見ると、新しい境界条件の中で回路の性能を出せる世界ができたと思っている。

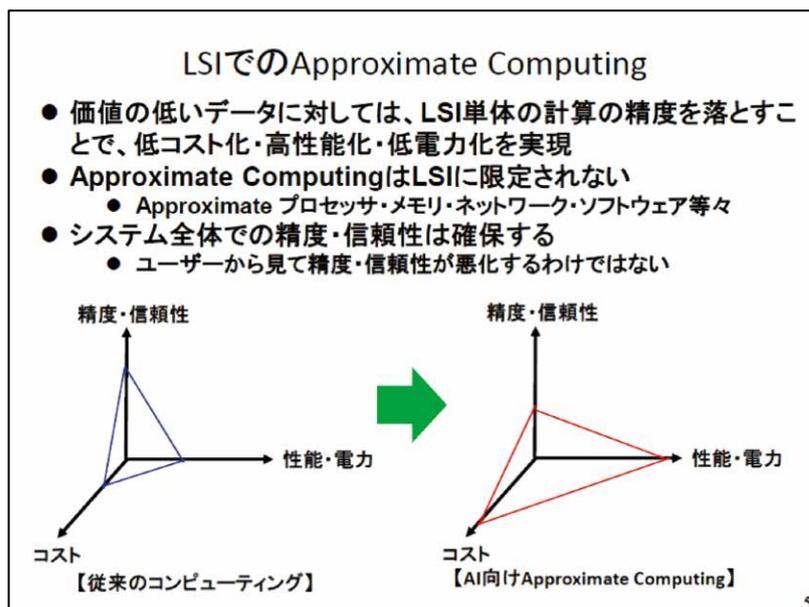


図 4-3-2 LSI での Approximate Computing (AC) におけるトレードオフの要件

図 4-3-3 に示すように、学会では、グーグルの TPU (Tensor Processing Unit) や富士通の DLU (Deep Learning Unit) のような、精度を落とす (エラーを許容する) 話が盛んである。レイヤーによって桁数を変える提案や、時々クリティカルパスが不良することを許容した斬新的な提案もある。実際の LSI 設計では、電圧、周辺の配線等のノイズや経年劣化等、様々なマージンをとってガチガチに設計している。しかし、実際にはこれらが同時に起こることはほとんどないので、その要件を下げてやれば良い。例えば、推論だったら、時々そういうことが起こってもよいと考えるスタンスである。

回路設計の手法では、ダイナミックに電圧と周波数を切り替える DVAFS (Dynamic-Voltage-Accuracy-Frequency-Scaling) が結構広く使われている。設計のパラメータとして、電圧と精度とスピードのトレードオフを考えて、最適化するものである。多少 LSI としての精度を下げれば電力も下がる。例えば、閾値電圧を上げれば電流が足りなくなるので、回路としては誤動作しやすくなるが、それでも最終的な推論の結果は変わらない。このような論文が、最近結構出てきている。我々 LSI 屋は、実装するために、ある境界条件の下でデバイスを作っているが、その境界条件は推論では随分変わってくる。NVIDIA も同じような考えである。

1 ワークショップの開催趣旨と骨子案の説明

2 革新的コンピューティングに関する国内外の活動状況

3 ユーザー側からの革新的コンピューティングに対する要望

4 重要な研究開発領域とその取り組み方

5 総合討論

付録

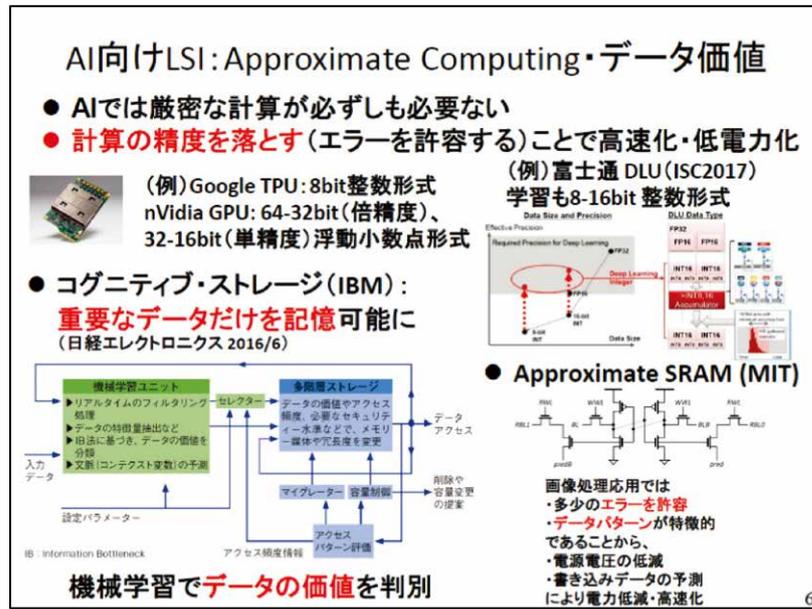


図 4-3-3 AI 向け LSI: Approximate Computing とデータ価値

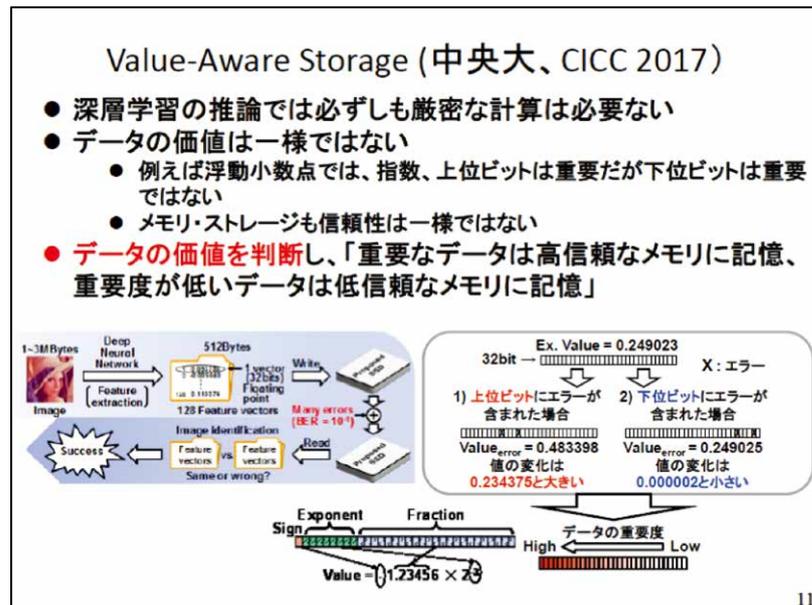


図 4-3-4 Value-Aware Storage (中央大、CICC 2017)

例えば、浮動小数点では、指数、上位ビットは重要だが下位ビットは重要ではない。そこで、図 4-3-4 に示すような我々のコンセプトに基づきデータの価値を判断して、重要なデータは高信頼なメモリ（壊れにくい上位ビット）に記憶、重要度が低いデータは低信頼なメモリ（壊れやすい下位ビット）に記憶」することができ、信頼性が 400 倍ぐらい上がる結果が得られた。また、図 4-3-5 に示すように、ECC を途中で止めても、所々起こるエラーを許容すれば 26% 高速化できること、あるいはシャノン限界を超える 10% のエラーがあっても顔認識に問題ないことが我々の研究で明らかになった。

つまり、データをうまくいじくるとデバイスの特徴をよく捉えることで、新しい価値が出せると考えている。

要約すると、自動運転車や産業用ロボット等、非常に高いディペンダビリティが要求されるものに向けた AI チップ開発が、日本の勝てる世界であると考えます。そのためには、フラッシュメモリ、プロセッサ、ネットワーク、アルゴリズム等の研究者が断片的に個別に研究するのではなく、「AI × 高いディペンダビリティ」という観点から、共に一貫した戦略的研究を行う必要があると思う。

【質疑応答】

C: AC (Approximate Computing) や深層学習だけでなく、普通のシミュレーションでも昔から精度保証という問題がある。例えば、メッシュを多く切るほうが良いのか、精度を上げたほうが良いのかという話は常にある。このため、このようなトレードオフについて、数の表現を含めて精度を落としても大丈夫にすることを、米国 DOE や我々が考え始めている。したがって、必ずしも AI に限った話ではなく、精度を落とすという方向性は、一般的なコンピューティングでも出てくると思う。

Q: フラッシュメモリは、エラー率何%ぐらいまで使えるものなのか。

A: 大体 3～4% ぐらいまでは起こっており、ほとんどシャノン限界に近いところまで訂正している。

Q: やはりエラー率が 10%、20% となると、幾ら訂正しても辛くなるのではないか。

A: 原理的に ECC ではダメである。しかし、図 4-3-5 に示した事例では、シャノン限界を超える 10% のエラーがあっても、顔認識に問題はないということである。そういう意味では 10% ぐらいデータが壊れても、顔認識の精度は大丈夫ということを示唆している。

Q: AC として、それを捉えたときには、その AC というのはどの領域を使うかというのは、使う人によって、あるいは文化によって違って来る。0.1% を直す AC もあれば、1/3 出鱈目でも使う AC もある。どの辺の AC を狙っているか。

A: 多くのエラーが起こっているところで、数% の訂正が可能なものを 10% 程度まで使えるようにしたい。

Q: 面白い話だと思うが、ディペンダビリティを最終的に保証して質の高い AI をやるという話と、途中でエラーが起きても何とかするという話は、最終的なところで結びつかないように思う。

A: 最終的な目標は、やはりディペンダビリティを確保しなければならない。全く違う原理に基づくデバイスがあれば違って来るかもしれないが、回路設計は基本的にトレードオフの線上でしかできないので、何かをゆるめないと難しいだろう。そのゆるめられるのが AC だと思う。もちろん、よく考えて AC をやらなければならぬ。経時劣化に関しては、例えば長寿命のためにやらなくてはならないところはゆるめてはいけませんが、初期ばらつきはゆるめても良い。ゆるめ方にも様々あると思っている。

Q: ゆるめ方をきちんとすれば、AC は非常に効果的だと考えてよいか。

A: そう考えている。

5. 総合討論

モデレーター 嶋田 義浩 (CRDS)

参加者には事前に質問票を送付し、回答をまとめたスライド（図 5-1 ～ 5-3）を元に議題を区切って討論した。討論を通して明らかとなった議論ポイントや重要な示唆を以下にまとめる。

(1) 計算ドメイン・応用領域

- ・ドメインと聞くと通常は応用分野をイメージする方が多い。しかしここでの「ドメイン」は競争領域よりも手前の段階で、産学連携を生み得る領域のことだろう。
- ・応用のキーワードでプロジェクトを行おうとすると、自由度が大きすぎて統一感がなくなる。やや技術寄りになるが、共通的に横展開ができそうな領域として設定すべき。
- ・「ドメインスペシフィック」はすでにある **Domain-specific Language (DSL)** を連想する。**Domain-specific Architecture** という言葉も出てきている。
- ・すべての計算に汎用的なものではなく、ある程度ターゲットを絞った技術がよい。しかし、それにしか使えない (= **Specific**) 技術ではなく、様々な横展開が可能な技術やドメイン間でのインタラクションを期待する。
- ・デバイスから回路、アーキテクチャ、アプリケーションに近いレイヤーまで細分化してゆく方向だが、アプリに応じてメモリ構成まで変えるなどカスタマイズは不可能。
- ・ICT 企業のビジネスモデルの観点からも、応用のそれぞれ全部に個別対応できない。コア部分は共通化し横展開できるようにしておき、それをお客様ごとに少しずつ味付けをしてその付加価値で差別化するようなビジネスモデルでないと生き延びられない。このコア部分が「ドメイン」に相当する。これは置き換えるなら「土俵」だろう。
- ・中間的なドメインもある。例えば、リアルタイム画像認識と音声認識は別のドメインだろうか。微妙なグラデーションの中で、ドメイン同士の横串が大事。
- ・本当に重要な計算ドメインがどこかというのは、応用を見ながら考えないと決まらない。最終的にはサービスのレイヤーまで結びつかないと価値が判断できない。
- ・「ドメイン」はコンピューティングが提供する機能だろう。トップダウンとボトムアップの両方のアプローチが必要。機能の重要性は応用からしか分からないが、それだけでは当たり前の話に止まってしまう。新技術の芽とそれによりどのようなすごい世界が広がるのかを、ボトムアップで顕在化させる必要がある。
- ・ドメイン志向の流れは計算基盤の多様化が背景。プロセッサのメニコア化で **FLOPS** を上げるといような、1つのパラメータだけを向上していればすべてが良くなる時代ではない。顕著な例は量子計算。適用範囲は非常に狭いが、量子シミュレーションというキラーアプリがあると思われているので研究開発が進む。
- ・計算特性と応用で必要な計算とのフォーマルなマッチングがとれるとよい。ハードから見た、例えば **Neuromorphic**、**In-memory computing**、**Approximate computing** は、それぞれどのような応用をアクセラレーションするのか。
- ・信頼性、セキュリティ、リアルタイム性、精度、省電力など、産業界からの要求と個別技術のマッチングに必要な共通キーワードが欲しい。

- ・キラーアプリが必要。条件は (i) 本当に新コンピューティングが必要、(ii) ある程度のボリュームがあること、である。キラーアプリを決め、そこで産学連携でシステムを作って世界に打って出て、それを横展開するアプローチが良いだろう。キラーアプリの例として、自動運転とアミューズメントを挙げる。

(2) ボトルネック・重要ワークロード

- ・環境変化が大きく、具体的な数字を挙げるのは難しい。基本的にはやってみないと分からない。エッジとクラウドの両方で技術は発展していくので、スイートスポットを最小限の労力で見つけられるかが大事。状況はどんどん変わってゆくが、その都度アプリに最適化するとコストがかかる。求仕様はなかなか分からないので、逆にそれを明らかにするようなトライ&エラーできる環境があると良い。
- ・企業の方々に使っていただくことが目的の産総研 ABCI にはエッジ側の実験設備がなく、**Requirement analysis** の際に問題になると感じる。要求のうち、ここは従来型でできる、この場合は新技術を使わなければいけない、などといったことを総合的に判断するとき、エッジ側のインフラがあるとよいだろう。
- ・エッジ側でアプリケーションも含めた検討材料のような形で **Proof of Concept** をやらなければいけない。そのときに、応用の方に引っ張ると競争領域に入ってしまう、技術的な競合他社がプロジェクトに入りづらくなると思われる。それを一段ブレイクして「計算ドメイン」として具合のいい粒度にすれば、協力はしやすいだろう。
- ・自動車業界はプラットフォームとして共通化されている部分があり、非競争・競争領域がうまく切れている。一方、医療機器は技術ごとで細かく分かれているため、自動車業界のような切り方はできない。しかし、計算ドメインのような形で、技術のかたまりにして共通化し、それをどう組み合わせるかは応用の都合で自由とすれば、医療関係の企業も参加しやすくなるのではないかと思う。
- ・自動車業界の長年の水平分業に限界が来ているのは確かだが、デバイスというのはどこかが作ってくれないと使えないというのが平均的な考え方。業界全体としてプロセッサに対する興味はほとんどない。チップを使う側としては、トータルの価値の中で決まる予算の許す範囲で最高のものを使いたいぐらいのことしか考えていない。
- ・あるプロセッシングの特徴に対し共通技術が見えてくると、応用と半導体技術との距離感が近くなり、導入障壁は下がるだろう。それを専用ロジックでやるのか **FPGA** でやるのかなどの判断は最後には必要になるが、基本的には提案任せとなるだろう。そこに踏み込んでいくためには、もう少し中間レイヤーの標準と知識を広めていくことがセットメーカーとコンピューティングのソサエティの中で行われてゆくとよい。
- ・応用側がコンピューティングに疎いのは、コスト優先であるからだろう。AI の盛り上がりでお客様からのロボットに対する要求も非常に高まっているが、実装はまだ組み込み PC レベルである。どのくらいの計算リソースでどのくらいのことができるのかという知見はもっと蓄えてゆくべきだろう。しかし、特に製造業では、計算コストに対する費用の使い方はかなりシビアであると指摘しておきたい。

(3) 推進方策・人材育成

- ・人材育成の観点から、VDEC のツールを使ってチップを作ってシステムを動かすというようなプロジェクトで公募を行うのがよいのではないか。このままいくと、日本ではアーキテクチャのアイデアをチップに落とせる人がいなくなってしまう。デジタル回路の大きなチップを作れるグループが減り、人材育成の点でピンチの状況。
- ・実際にチップを起こす1段階前で、高位合成を含めて大規模 FPGA で行う話もある。Amazon が設計ツールも含めて Virtex-7 の FPGA をクラウドで提供している。普通は自分で買ったほうが安かったりするが、この場合には設計ツールのコストまで含めるとクラウド利用の方が安い。類似のアクティビティを日本でやってもいいだろう。
- ・ソフトウェアの高位合成を含めて、新しいアーキテクチャのアイデアを簡便に試し、本当にうまくいきそうだったら今度はチップに焼いて実際に特性を確かめ、かつ実際に組込んで試す流れができるとよい。今はインフラがないので、皆個別にやっている。そのためお金がかかり、実証を強制できない。
- ・チップに落とした後の製造は、現状 VDEC ではいくつか可能性がある。たとえばネサスや ROHM などのプロセスが使える。TSMC などに出す必要がある場合にも、そのとりまとめを VDEC で行っている。既存のメカニズムを利用してほしい。
- ・現状の VDEC はツールベンダーとの契約で制限されている。米国ではスタートアップ企業も参加できる仕組み。そのまま製品というわけにはいかないが、教育目的のみという縛りはなく、企業も試作できる。アカデミアと企業との研究をスムーズにつなげる意味で、VDEC の仕組みはもう少し考え直した方がよい。VSAC の反省も必要。
- ・国際会議では大企業からの AI に関するチップの発表は皆無。いろいろなアイデアはベンチャーで生まれ、大企業はその様子を見てどこかで本物になったところで買収しようと思っている。したがって、現状をよく見ようと思ったら学会を見るよりはベンチャーを見た方がよい。産業界の方が学会に興味を失っている現状。
- ・ロボットによるピッキングチャレンジのコンテストでは、非常にいい技術が集まってきている。これからの一つのあり方と思う。世界的なコンテストを JST が主催し、産業界が「こういうものが欲しい」という課題を設定する。そこで勝った人を学会に変わる新しい評価軸で評価して欲しい。学会がそれをやるという手もある。
- ・残念ながら日本はスタートアップが米国ほど派手には動いていない。米国のスタートアップはほとんど IPO せず、Google や Amazon に買われることを目的としている。日本では大企業に依存する部分もあり、大企業の方にお金が落ちているという現実も残念ながらあるので、その構造を見つつ、我々は何をしなければいけないかというのを考える時期に来ている。
- ・ポストムーア時代ではアーキテクチャが変革し、それはアルゴリズムの変革も伴う。応用数理レベルから見て問題を分類できれば、従来型のアーキテクチャだところ解け、新アーキテクチャだところ解ける、などつなげることができる。さらに、具体的な現実問題につながられると、企業の方々が入りやすいだろう。
- ・CRDS システムユニットの数理科学についてのレポートでは、数理科学を最適化、推論、相関解析などとドメイン分けをした。アルゴリズムやアーキテクチャの観点で見直すというようなアプローチで参考になる面もあるだろう。

1 ワークショップの開催趣旨と骨子案の説明

2 革新的コンピューティングに関する国内外の活動状況

3 ユーザー側からの革新的コンピューティングに対する要望

4 重要な研究開発領域とその取り組み方

5 総合討論

付録

まとめ

総合討論では、CRDS の骨子案や話題提供の発表と質疑、事前アンケート結果を踏まえて、日本のターゲットとすべき応用領域と重要な計算ドメイン、情報処理のボトルネックと重要なワークロード、効果的な研究開発の推進方策と人材育成に関して議論を行った。その結果、以下のような方向性が示された。

- ・ 計算ドメインは競争領域よりも手前の段階で競合他社や様々な企業が参加でき、産学連携を生みうる領域として設定すべき。
- ・ 信頼性、セキュリティ、リアルタイム性、精度、省電力など産業界からの要求と個別技術をマッチングさせることが重要。
- ・ 自動運転やアミューズメントなど、本当に新たなコンピューティング技術が必要で、かつ、ある程度のボリュームがあるキラーアプリが必要。
- ・ リアルタイム画像認識と音声認識のように近い計算ドメイン同士の横串活動も必要。
- ・ コア部分を共通化したプラットフォームで横展開し、ユーザー毎に味付けをして差別化することが必要。
- ・ 要求される計算機能とボトムアップの新技术とのマッチングが重要。
- ・ スペシフィックな要求仕様はすぐには決まらないので、トライアンドエラーができるエッジ用の環境・実験設備が必要。
- ・ アルゴリズムやアーキテクチャの視点で数理科学を見直すと良い。
- ・ 人材育成、スタートアップ育成の観点から設計ツールを自由に使える環境が重要。

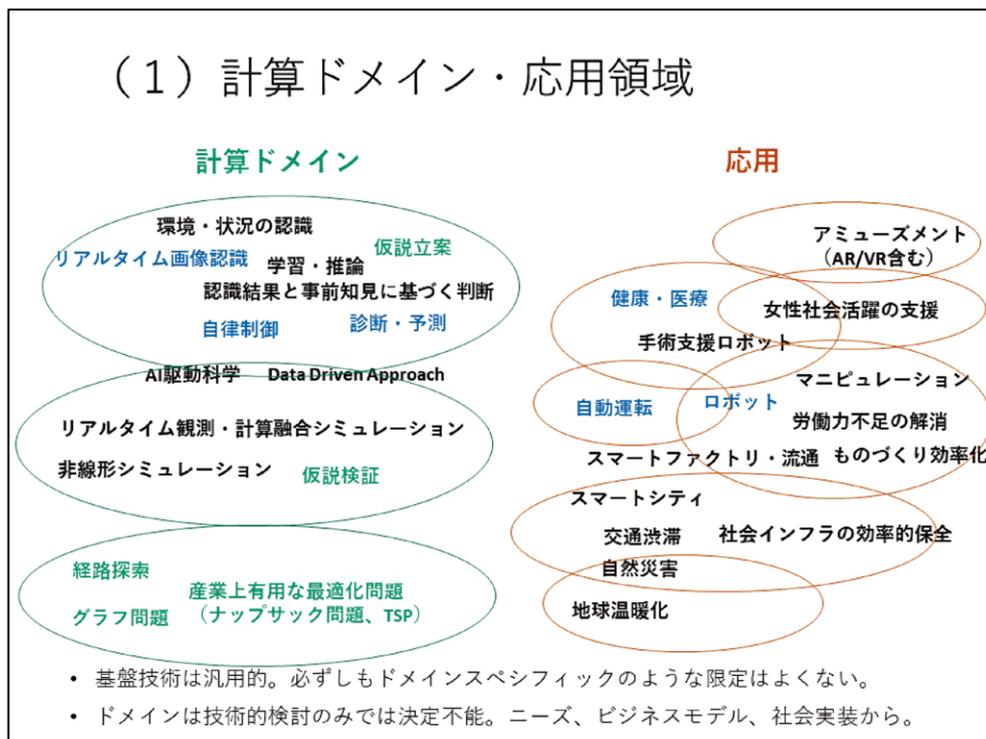


図 5-1 計算ドメイン・応用領域に対する意見のまとめ

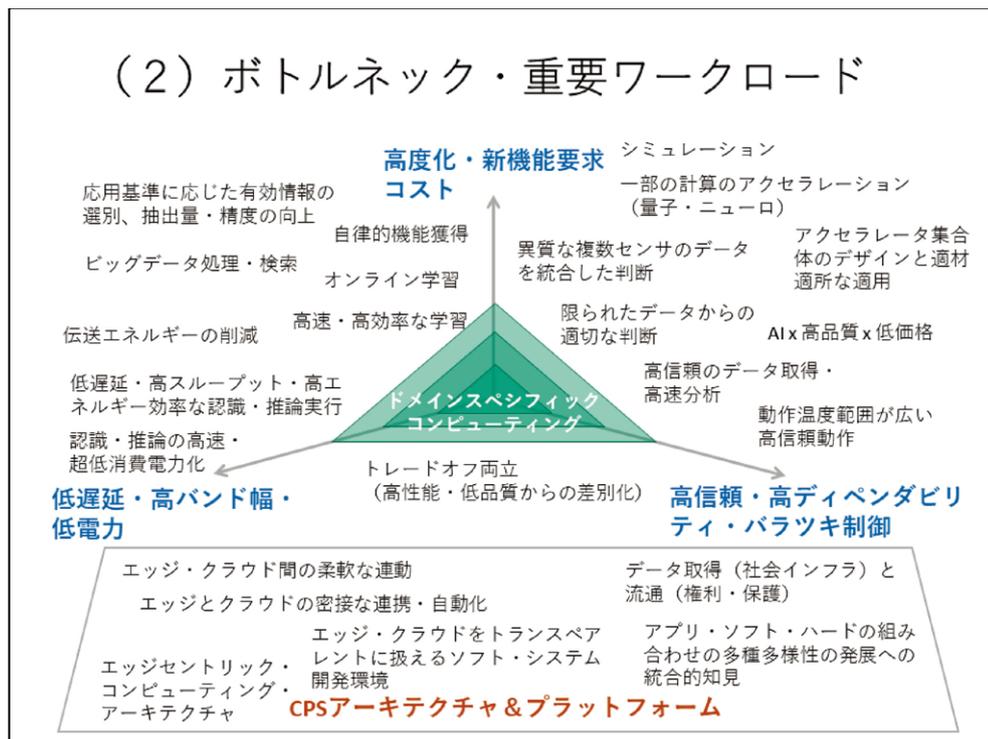


図 5-2 ボトルネック・重要ワークロードに対する意見のまとめ

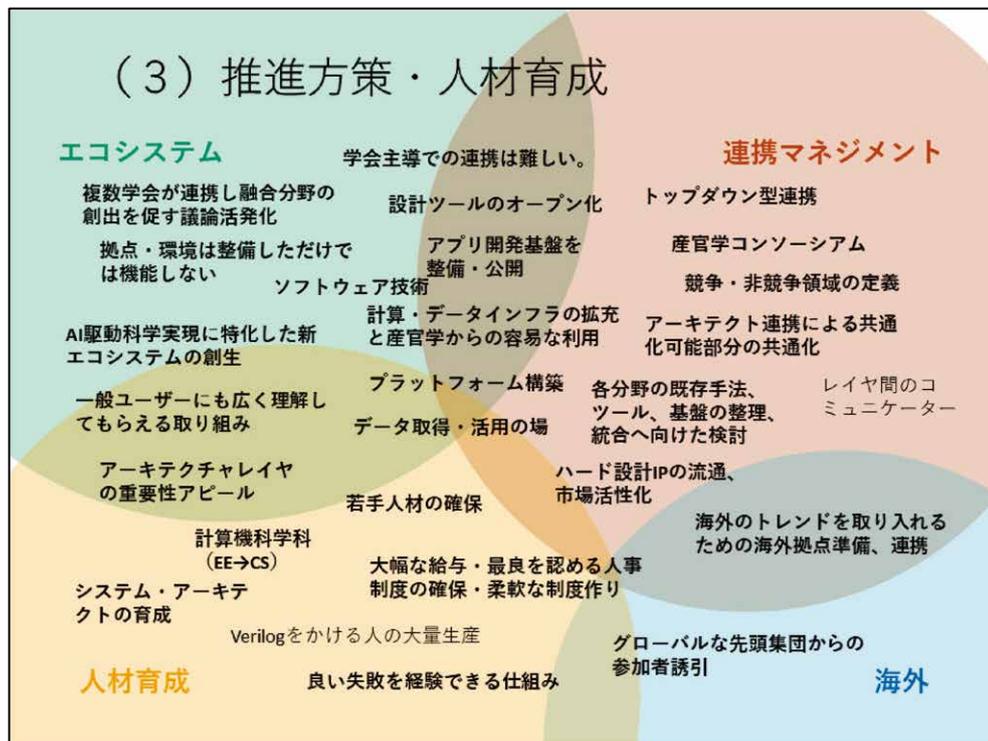


図 5-3 推進方法・人材育成に対する意見のまとめ

1 ワークショップの開催趣旨と骨子案の説明

2 革新的コンピューティングに関する国内外的活動状況

3 ユーザー側からの革新的コンピューティングに対する要望

4 重要な研究開発領域とその取り組み方

5 総合討論

付録

付 録

付録 1：開催趣旨・プログラム

開催趣旨

JST 研究開発戦略センター（CRDS）は、科学技術に求められる社会的・経済的ニーズを踏まえて国として重点的に推進すべき研究領域や課題を俯瞰の視点から系統的に抽出し、その研究開発戦略を提言する公的シンクタンクとして活動しています。活動の過程において、研究開発動向の俯瞰を目的とした「俯瞰ワークショップ」や、重要テーマの研究開発戦略を議論する「科学技術未来戦略ワークショップ」などを開催してきました。本ワークショップ「ドメインスペシフィック・コンピューティング ～新たなコンピューティングの進化の方向性～」は、上記科学技術未来戦略ワークショップの一つとして開催するものです。

少子高齢化に伴う労働力不足の解消、高齢者・障がい者の介護・自立支援、安全で便利な移動手段の確保、ものづくりの効率化、社会インフラの効率的な保全、セキュリティ強化、プライバシーの確保、などの社会的課題に対し、スマートロボット、自動運転、IoT などによる Society5.0 の実現が期待されています。これを支えるコア技術の一つとして、これまで以上の高速化・低消費電力化とともに、認識・判断といったより高度な情報処理技術や人工知能（AI）技術が求められています。一方、現在の情報処理の担い手である CMOS 集積回路は微細化の限界に直面しており、従来型（フォン・ノイマン型）のロジック回路によるコンピューティングではさらなる高性能化・高効率化は困難になりつつあります。このため、新たな方向性として、ビッグデータ処理やディープラーニング等に適する革新的なコンピューティング技術の開発が必要になってきています。本ワークショップは、コンピューティングを活用する応用分野のボトルネックやユーザーが抱える技術的課題や将来技術への期待、新たに必要となる科学技術、その開発を促進するための政策などの議論を行い、革新的コンピューティングに関わる科学技術の強化に有効な研究開発戦略策定の一環として開催するものです。

CRDS では、専門家へのインタビューやセミナー開催、および日本工学アカデミー主催のヒアリング、国内研究会や国際学会への参加などの調査活動を通して、今後取り組むべき重要な研究開発課題や、それを実施する研究開発の体制・仕組みなどについて検討し、革新的コンピューティングに対する仮説（骨子案）を作成しました。ワークショップでは CRDS の仮説を提示し、学会や論文誌の動向、国際ロードマップ活動、日本工学アカデミーの活動など国内外の活動状況、ユーザーが直面しているボトルネックや課題および今後のコンピューティングへの期待、ソフトウェア・アーキテクチャ・ハードウェアにおける重要な研究開発領域とその取り組み方、などについて話題提供いただきます。これを基に、日本のターゲットとすべき応用領域と重要なドメイン、各ドメインの具体的な技術統合、効果的な研究開発の仕組みなどについて総合討論で議論します。これらの議論を通して、革新的コンピューティングの重要な研究開発の方向性を明らかにし、取り組むべき科学技術とその推進方法、産学官連携の方策などの共通認識を得たいと考えております。

なお、本ワークショップは非公開とさせていただきますが、開催後に CRDS では、ワークショップ報告書と、さらに研究開発戦略を提言書として取りまとめた戦略プロポーザルを発行する予定であり、いずれも CRDS の web サイト上で公開する予定です。

プログラム

(敬称略)

開催日時：2017年11月29日（水）10:00～18:00

開催会場：TKP 市ヶ谷カンファレンスセンター バンケットホール 9A

10:00～10:05 開会挨拶 木村 康則 (JST-CRDS)

10:05～10:45 ワorkshopの開催趣旨と骨子案の説明 馬場 寿夫 (JST-CRDS)

10:45～12:00 (話題提供1) 革新的コンピューティングに関する国内外の活動状況

10:45～11:10 国際学会、論文誌における最新の動向 平木 敬 (東京大学)

11:10～11:35 ポストムーア/ポストノイマン世代に向けた国際ロードマップ活動の現状
林 喜宏
(ルネサスエレクトロニクス)

11:35～12:00 日本工学アカデミーの「次世代コンピューティング」活動
金山 敏彦
(産業技術総合研究所)

13:00～14:40 (話題提供2) ユーザー側からの革新的コンピューティングに対する要望

13:00～13:25 自動運転時代に必要なコンピューティング特性
杉本 英樹 (デンソー)

13:25～13:50 ロボット：製造・物流を中心とした最新動向と課題
堂前 幸康 (三菱電機)

13:50～14:15 医療応用領域からの期待 ～内視鏡を例に～
中野 恵一 (オリンパス)

14:15～14:40 スパコン/科学技術計算 (シミュレーション)
齊藤 元章
(PEZY Computing)

15:00～16:15 (話題提供3) 重要な研究開発領域とその取り組み方

15:00～15:25 革新的コンピューティングを支えるソフトウェア基盤
中島 研吾 (東京大学)

15:25～15:50 知的情報処理時代を支える情報処理アーキテクチャの革新
本村 真人 (北海道大学)

1 ワorkshopの開催趣旨と骨子案の説明

2 革新的コンピューティングに関する国内外の活動状況

3 ユーザー側からの革新的コンピューティングに対する要望

4 重要な研究開発領域とその取り組み方

5 総合討論

付録

15:50 ～ 16:15 ハードウェア側からの提案

竹内 健（中央大学）

16:25 ～ 17:55 総合討論

1. 日本のターゲットとすべき応用領域と重要なドメイン
2. 重要なドメインの具体的な技術統合
(アルゴリズム、アーキテクチャ、デバイス、ツール開発など)
3. 効果的な研究開発の仕組み（技術レイヤー統合ができる研究拠点、
設計ツールの共有化、ソフト・ハードの標準化、実効的な府省連携など）
4. その他（海外との連携、アーキテクチャ研究強化など）

17:55 ～ 18:00 閉会挨拶

木村 康則（JST-CRDS）

付録 2：参加者一覧

招聘識者

(発表者)

- ・平木 敬 東京大学大学院理学系研究科 特任研究員
- ・林 喜宏 ルネサスエレクトロニクス株式会社 インダストリアルソリューション事業本部 ホームソリューション事業部シニアスペシャリスト (システムデバイスロードマップ (SDRJ) 委員会 委員長)
- ・金山 敏彦 産業技術総合研究所 フェロワー (日本工学アカデミー)
- ・杉本 英樹 株式会社デンソー 電子基盤技術統括部 IP 開発室 室長
- ・堂前 幸康 三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 センサ情報処理システム技術部 主席研究員
- ・中野 恵一 オリンパス株式会社 人事本部教育統括部教育統括グループ 部長代理
- ・齊藤 元章 株式会社 PEZY Computing 代表取締役社長
- ・中島 研吾 東京大学情報基盤センタースーパーコンピューティング研究部門 教授
- ・本村 真人 北海道大学大学院情報科学研究科 教授
- ・竹内 健 中央大学理工学部 教授 (システム・情報科学技術ユニット 特任フェロー)

(コメンテータ)

- ・天野 英晴 慶應義塾大学理工学部 教授
- ・内山 邦男 株式会社日立製作所 研究開発グループ 技術顧問 (工学アカデミー)
- ・黒田 忠広 慶應義塾大学理工学部 教授
- ・松岡 聡 東京工業大学学術国際情報センター 教授

JST-CRDS チームメンバー

- ・木村 康則 システム・情報科学技術ユニット 上席フェロー
(チーム活動総括責任者)
- ・馬場 寿夫 ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー (チームリーダー)
- ・河村 誠一郎 ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
- ・嶋田 義皓 システム・情報科学技術ユニット フェロー
- ・永野 智己 ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー、JST 研究監
- ・福島 俊一 システム・情報科学技術ユニット フェロー
- ・藤井 新一郎 システム・情報科学技術ユニット フェロー
- ・的場 正憲 システム・情報科学技術ユニット フェロー
- ・高地 伸夫 戦略研究推進部 主任調査員

JST-CRDS

- ・中山 智弘 企画運営室長
- ・曾根 純一 ナノテクノロジー・材料ユニット 上席フェロー
- ・伊藤 聡 ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー (物質・材料研究機構 統合型材料開発・情報基盤部門情報統合型物質・材料研究拠点 拠点長)
- ・佐藤 勝昭 ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー

関係府省・機関等

- ・平山 雅章 内閣府総合科学技術・イノベーション会議事務局
産業技術・ナノテクノロジーグループ 上席科学技術政策フェロー
- ・三須 義竜 内閣府総合科学技術・イノベーション会議事務局
産業技術・ナノテクノロジーグループ 調査員
- ・大西 隆雄 文部科学省研究振興局参事官（情報担当）付 係長
- ・吉田 敬 文部科学省研究振興局参事官（情報担当）付 調査員
- ・山本 大輔 文部科学省研究振興局参事官（情報担当）付 調査員
- ・蓬萊 史昭 文部科学省研究振興局参事官（情報担当）付 研修生
- ・石田 一郎 経済産業省製造産業局 製造産業技術戦略室 重要技術管理専門職
- ・遠藤 康浩 新エネルギー・産業技術総合開発機構 IoT 推進部 主査
- ・須永 吉彦 新エネルギー・産業技術総合開発機構 IoT 推進部 主任
- ・大窪 宏明 新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター
電子・情報・機械ユニット 主任研究員
- ・川喜多磨美子 物質・材料研究機構経営企画部門経営戦略室 主任エンジニア
- ・安田 哲二 産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門 研究部門長
- ・水林 亘 産業技術総合研究所エレクトロニクス・製造領域研究戦略部 企画主幹
- ・岩田 普 産業技術総合研究所 TIA 推進センター 審議役
- ・萩島 功一 日本工学アカデミー（産業技術総合研究所）
- ・更田 裕司 日本工学アカデミー（産業技術総合研究所）

JST

- ・松尾 浩司 戦略研究推進部 ICT グループ 調査役
- ・稲上 泰弘 戦略研究推進部 ICT グループ 上席主任調査員
- ・宮田 裕行 戦略研究推進部 ICT グループ 主任調査員
- ・山崎 秀樹 戦略研究推進部 ICT グループ 主任調査員
- ・加藤 慎一 戦略研究推進部研究評価グループ 主任調査員
- ・古川 雅士 研究プロジェクト推進部 調査役
- ・平尾 孝憲 産学共同開発部事業推進グループ 部長
- ・大竹 利也 産学共同開発部事業推進グループ 調査役
- ・関谷 亮英 産学共同開発部事業推進グループ 副調査役
- ・小嶋 格 産学共同開発部事業推進グループ 主任調査員
- ・柿本 勝 産学連携展開部研究支援グループ 主任調査員
- ・宇井 賢 産学連携展開部研究支援グループ 係員

■ワークショップ企画・報告書編纂メンバー■

総括責任者	：木村 康則	上席フェロー	(システム・情報科学技術ユニット)
リーダー	：馬場 寿夫	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
メンバー	：河村 誠一郎	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
	嶋田 義皓	フェロー	(システム・情報科学技術ユニット)
	永野 智己	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
	福島 俊一	フェロー	(システム・情報科学技術ユニット)
	藤井 新一郎	フェロー	(システム・情報科学技術ユニット)
	的場 正憲	フェロー	(システム・情報科学技術ユニット)
	勝又 康弘	主任調査員	(戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ)
	高地 伸夫	主任調査員	(戦略研究推進部 ICT グループ)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願い致します。

CRDS-FY2017-WR-08

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

「ドメインスペシフィック・コンピューティング ～新たなコンピューティングの進化の方向性～」

2017年11月29日(水) 開催

平成 30 年 2 月

ISBN 978-4-88890-578-7

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
システム・情報科学技術ユニット

Systems/Information Science and Technology Unit,
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology
Agency

〒 102-0076 東京都千代田区五番町 7

電 話 03-5214-7481

ファックス 03-5214-7385

<http://www.jst.go.jp/crds/>

© 2017 JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ISBN 978-4-88890-578-7

