

高度情報処理基盤構築のための光・量子非ノイマン型計算機を用いた アナログツインコンピューティング技術の創出

① ビジョンの概要

超スマート社会の実現に向け、従来のノイマン型コンピューティングでは情報量の急増への対応が困難になることが予想されている。本提案は、光・量子技術を活用した「アナログツインコンピューティング」を開拓し、分子構造探索や時系列予測、信号処理などを光学的に実現することで、超高速かつ低消費電力な革新的計算技術の確立を目指す。

② ビジョンの内容

本構想は、電子回路の微細化限界に直面しつつある従来型計算機の課題を克服し、超スマート社会に必要な膨大かつ多様な情報処理を実現するために、光・量子技術を基盤とした非ノイマン型計算機の新しい枠組みを創出することを目指すものである。特に、物理系が本来持つ特長を最大限に活かし、デバイスレベルから計算方式を再構築するデバイスオリエンテッドコンピューティングを推進する。その中核となるアナログツインコンピューティングでは、光・量子アナログシステムを計算資源として用い、対象となる物理系を直接シミュレーションすることで、従来のデジタル計算を凌駕する効率と速度を実現する。例えば光量子コンピュータを用い、創薬物質の分子構造探索や新材料開発のための量子化学計算において対象となる量子的物理系の振る舞いを、光子の系を用いて高速にシミュレートする。また、光通信デバイスを駆使したリザバー計算機やニューラルネットワークを用い、気象・環境データ等の時系列予測や、センサデータに基づく物体認識や障害物回避といった信号処理を全光学的に実現する。さらには光デバイスのポテンシャルを最大限に発揮する新たなアナログ計算アーキテクチャの構築にも挑む。これらの計算手法の実現においては、光通信において豊富な実績を有する各種光デバイスやコヒーレント検波技術を活用することができ、シリコンフォトニクスや光電融合による集積化とあいまって、今日のデジタル回路だけでは困難な超高速かつ超低消費電力な革新的コンピューティング技術の創出が期待される。既存の光デバイスやシリコンフォトニクスを駆使した高集積アナログ計算アーキテクチャを構築し、従来のデジタル計算では到達困難な超高速・超低消費電力な計算基盤を確立する。



図1 アナログツインコンピューティング

図1 アナログツインコンピューティングの概念図。図は上下二層の構造を示している。上層は「光・量子アナログシステム(アナログツイン)」とラベルされ、内部には「光量子コンピュータ」と「光リザバー計算機・光ニューラルネットワーク」の二つのブロックがあり、これらは「シミュレーション・分析」というプロセスでつながっている。下層は「現実空間」とラベルされ、内部には「量子化学系 創薬物質」と「センサネットワーク 気象 環境」の二つのブロックがある。上層と下層の間には「マッピング」（上向き矢印）と「フィードバック」（下向き矢印）の双方向の相互作用が示されている。

③ 学術研究構想の名称

高度情報処理基盤構築のための光・量子非ノイマン型計算機を用いたアナログツインコンピューティング技術の創出

④ 学術研究構想の概要

本構想は、光・量子技術を基盤とした非ノイマン型計算機の新しい枠組みを創出することを目指すものである。特に、物理系が本来持つ特長を最大限に活かし、デバイスレベルから計算方式を再構築する。本研究により期待される成果としては以下の3つが挙げられる。

- ・光量子コンピュータにより創薬計算や量子化学計算を高速化し、分子探索や材料設計を飛躍的に短縮する。
- ・光通信デバイスを用いたリザバー計算機や光ニューラルネットワークにより、気象予測、環境解析、センサ情報処理といった時系列データ解析をリアルタイムかつ低消費電力で実現する。
- ・既存の光デバイスやシリコンフォトニクスを駆使した高集積アナログ計算アーキテクチャを構築し、従来のデジタル計算では到達困難な超高速・超低消費電力な計算基盤を確立する。

本構想は非ノイマン型計算の新たな研究領域を切り拓き、学術的には「物理系に根差した計算原理」の体系化に貢献するとともに、社会的には創薬・材料開発・環境予測・自律移動体制御など幅広い分野に革新をもたらす基盤技術の確立を目指す。その結果、光・量子アナログ計算が次世代情報処理の中核を担い、超ス

マート社会の実現に向けた強力な推進力となることが期待される。

⑤ 学術的な意義

光を用いた非ノイマン型コンピューティングの研究は、1970～80年代にかけて研究が活発化した後、2010年代に本格的に再興した。背景には、ノイマン型アーキテクチャにおけるメモリ帯域や消費電力の制約が顕在化したことに加え、シリコンフォトニクスに代表される光集積回路製造技術の成熟、コヒーレント光検波用のデジタル信号処理の高速化、そして量子科学技術の台頭がある。

しかし、従来の物理コンピューティングは、デジタル計算の弱点を担うアクセラレータとしての位置づけにとどまっており、活用する物理系のポテンシャルをフルに活用できていない。そこで本研究では、物理系の長所を部分的に利用するのではなく、物理系本来の振る舞いをそのまま計算資源として生かすアプローチを提案する。これにより、物理系がもつ長所や本質的性質を余すところなく引き出す新しい計算手法の実現を目指す。

学術的重要性として、非ノイマン型計算の研究は計算パラダイムの拡張を促し、人類が直面する様々な社会課題を解決する手段の選択肢を増やすことにつながる。さらに本研究の目指すアナログツインコンピューティングにおいては、デジタル計算の枠組みを前提とした置き換えではない点に新規性がある。従来はデジタル計算機との比較が様々な論じられてきたが、本研究ではデジタルを一旦離れ、物理系で別の物理系を直接表現する計算に挑戦し、物理コンピューティングの潜在力を最大限に引き出すことを試みる。期待される成果として、対象とする物理系を、その特徴に最も近い物理系で模擬することにより、計算精度と効率を飛躍的に高め、従来困難であった現象の理解や設計の最適化などを可能にする。物理系の長所を間接的ではなく直接的に利用することで、量子系や複雑系の効率的なシミュレーションが実現される。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

近年、光・量子技術を活用した非ノイマン型コンピューティングの研究が世界的に急速に活発化している。それらはいずれもデジタル計算を補完する形で物理系の一部特性を利用する試みであるが、本構想はさらに一歩進め、物理系本来の振る舞いを計算資源として直接利用することで、潜在能力を最大限に引き出すアナログツインコンピューティングを提案する。

⑦ 社会的価値

本構想は、光・量子技術を活用した非ノイマン型計算によって、産業界の革新を牽引する大きな社会的価値を持つ。第一に、創薬や新材料開発において、従来膨大な計算コストが必要であった分子構造探索や量子化学計算を高速化し、医薬・材料産業の研究開発効率を飛躍的に向上させる。第二に、光通信技術を応用したリザバー計算や光ニューラルネットワークは、気象予測や環境モニタリング、センサーデータ処理においてリアルタイム性と低消費電力性を実現し、インフラ・モビリティ産業に新たな価値をもたらす。第三に、シリコンフォトニクスや光電融合による高集積化は、次世代情報通信基盤やデータセンターに不可欠な超高速・超省電力計算を可能とし、ICT産業全体の競争力を強化する。本構想は、学術的意義にとどまらず、医療・材料・環境・通信といった幅広い分野で実用的価値を創出し、持続可能で競争力ある産業社会の基盤を築くものである。

⑧ 実施計画等について

・実施計画・スケジュール

2026～2028年度：材料・デバイスの検討及び設計

2029～2031年度：アナログツインコンピューティングシステムの構築

2032～2033年度：プロトタイプシステムの実証および実用化に向けた取り組み

2033～2034年度：アナログ計算アーキテクチャの構築と標準化への取り組み

・実施機関と実施体制

東北大学電気通信研究所の光・量子デバイス研究者が中心となり、学内関連部局とともに実施する。

・総経費 25億円

⑨ 連絡先

松田 信幸、廣岡 俊彦（東北大学電気通信研究所）