

(4) 数物・情報領域

研究課題名	複雑系数理モデル学の基礎理論構築とその分野横断的科学技术応用
中心研究者名	合原 一幸
研究支援担当機関名	独立行政法人科学技術振興機構

<研究課題からの報告>

1. 研究課題の目的及び意義

脳、生命、健康、がん、免疫、感染症、環境、エネルギー・電力、情報・通信、交通、経済、安全、地震など、21世紀の最重要課題の多くは、多面的アプローチを必要とする広義の「複雑系(多数の要素と全体が階層的に相互作用するシステム)」の問題としてとらえることができる。

中心研究者は、「複雑系」の諸問題を数理モデル化して理論的に研究しているが、本研究課題では、現実の諸問題を対象として数理的に理解・解決・最適化・制御・予測するために、我が国の工学分野から生まれた数学である「数理工学」(図1)や、中心研究者が提唱した「カオス工学」の観点から、複雑システム科学技術の諸問題を解くための「複雑系数理モデル学」の基礎理論の構築と、その具体的な分野横断的科学技术への応用研究を目的として研究開発を実施した。

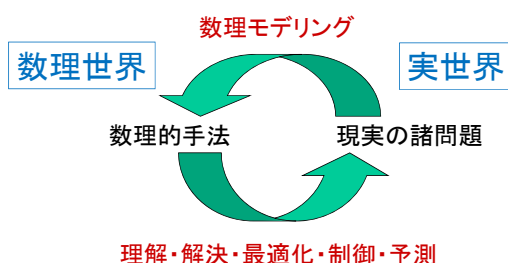


図1. 数理工学の方法論

研究課題全体としては、「複雑系数理モデル学の基礎研究」、「複雑系数理モデル学の工学応用研究」、「基礎研究と応用研究の融合による複雑系数理モデル学の体系化」の3つのサブテーマを構成し、具体的な研究目標として、

- ① 基礎理論研究では、これまで別々に研究が進められてきた数学分野の力学系理論と工学分野の制御理論を、様々な応用研究の基盤となり得る新しい「複雑系制御理論」として融合し、さらには「複雑ネットワーク理論」、「非線形データ解析理論」を加えた3理論を柱とする複雑系数理モデル学体系化のための理論的プラットフォームの構築を目指すこと、
- ② 応用研究では、ライフ・グリーンイノベーション、電力システム、通信システム、交通システム、地震データ解析、低放射線被曝問題など、社会的緊急性や経済、産業上の重要性・必要性の高い様々な分野の複雑な諸問題に対して、複雑系数理モデル学の応用を行うこと、
- ③ これらの基礎理論研究と応用研究の両面から複雑系数理モデル学の研究手法を確立することによって、世界トップ水準の複雑システム科学技術の本格的基盤の構築を目指すこと、

を設定した。

2. 研究成果の概要

本研究課題の基礎理論研究では、数学分野の力学系理論と工学分野の制御理論を、応用研究の基盤となり得る新しい「複雑系制御理論」として融合し、「複雑ネットワーク理論」、「非線形データ解析理論」を加えた3理論を柱とする複雑系数理モデル学体系化のための理論的プラットフォームを構築した(図2)。

また、応用研究では、この複雑系数理モデル学の理論的プラットフォームに基づき、ライフイ

ノベーションに関するがんや新型インフルエンザ、HIV、バイオマーカー、数理脳科学、グリーンイノベーションに関する再生可能エネルギーや気象解析(風況、太陽光量、北極振動など)、震災後に重要性を増した電力システム、通信システム、交通システム、地震データ解析、低放射線被曝問題、電気電子応用技術の基盤となるA/D変換、脳型ハードウェアなど、社会的緊急性や経済・産業上の重要性・必要性の高い様々な分野の複雑な諸問題に対して、複雑系数理モデル学を応用した。

応用研究の主な成果としては、以下が挙げられる。

- ・ 複雑ネットワーク制御のための低次元化とネットワーク不安定化の基礎理論を構築し、それらを基に全く新しい動的ネットワークバイオマーカー(Dynamical Network Biomarkers: DNB)の概念を提案して、その多様な応用可能性を示した(図3)。また、様々な応用を拓くロバスト分岐解析理論や超ロバスト制御手法、準周期不変トーラスの分岐解析理論などを構築した。

- ・ 電気電子応用技術の基盤となるA/D変換に着目し、 β 写像の基礎理論とそれに基づく β -A/D変換器を提案・実装した。これは、厳密な $\beta=2$ を実現しようとする従来の設計指針に対して、 β

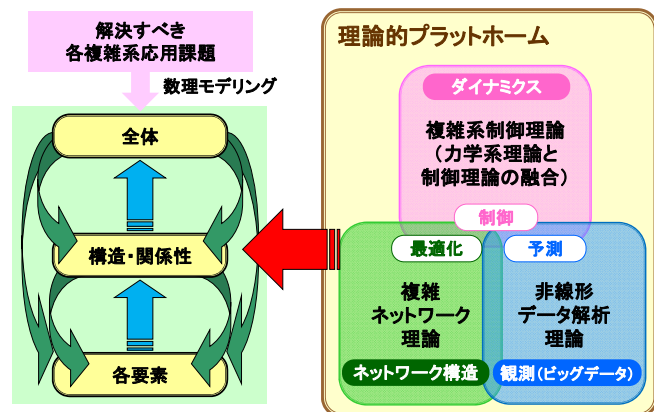


図2. 3つの基礎理論からなる複雑系数理モデル学の理論的プラットフォーム

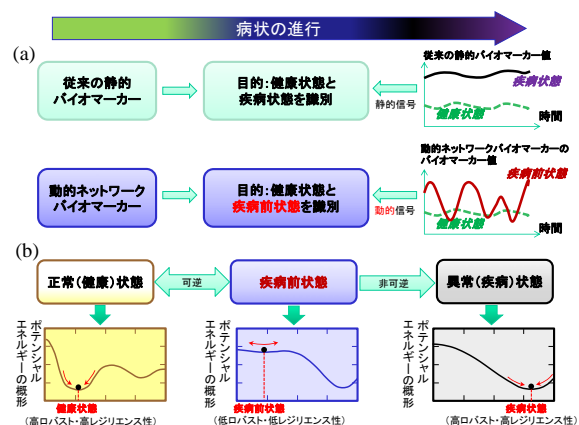
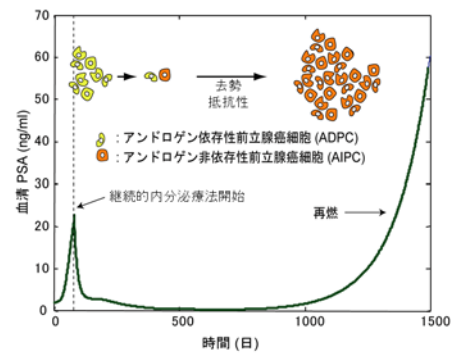


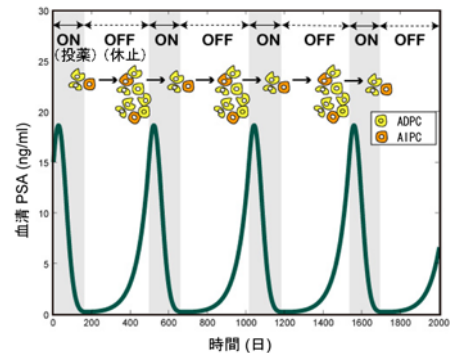
図3. 動的ネットワークバイオマーカー(a)、病状進行時のポテンシャルエネルギーの概形(b)

∈(1,2]と制限を緩和することにより、回路素子やパラメータのバラツキを許容して数理的に精度を回復する新しい「超ロバストな設計指針」への転換であり、微細化が極限まで進みつつある現代の電子回路技術の新しい方向性を示すものである。また、 β -A/D 変換理論は、カオスをめぐる実数値と離散値の問題、アナログ計算とデジタル計算のハイブリッド構成理論の数理的基盤となるものである。

- 数理モデルに基づく前立腺がんのテーラード内分泌療法研究は、多くの症例解析と新しい数理手法を加えて世界をリードする実用化レベルに達した(図4)。また、同様の疾病数理モデルの HIV などへの応用研究も進展した。さらに、震災後の重要課題として、高精度の余震予測手法の開発、低放射線長期被曝による発がん過程の数理モデル化や再生可能エネルギー大量導入時の電力システムの安定化に関する研究も進展した。



(a) 継続的内分泌療法 (CAS) の下での前立腺がんの再燃



(b) 間欠的内分泌療法 (IAS) による再燃の回避

図4. 前立腺がんマーカーである血清 PSA 値の時間変化

そして、これらの基礎理論研究と応用研究の両面から複雑系数理モデル学の研究手法を確立することによって、世界トップ水準の複雑システム科学技術の本格的基盤を築いた。(図5)

さらに、研究成果を広く社会に公開し、本研究課題終了後も幅広く活用できるように、Webからのアクセスが可能な、成果の体系化・公開Webデータベース“Nonlinia” (<http://www.sat.t.u-tokyo.ac.jp/first/nonlinia/>) (図6)を構築し、Web データベ

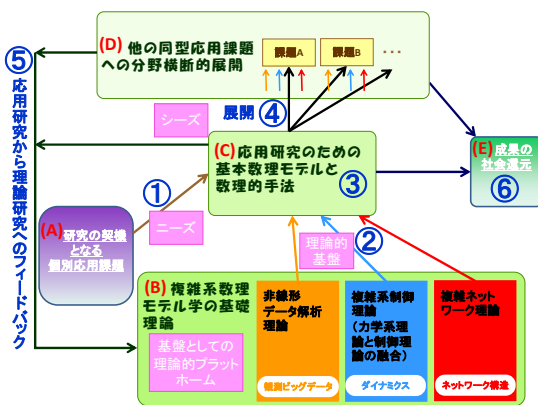


図5. 研究プロセスの基本構造



図6. “Nonlinia” の画面例

ス上で各理論研究と応用研究における3つの基礎理論と複雑系の3つの階層レベルの関係を、個々の内容ごとに公開した。

なお、これらの成果は、Scientific Reports 誌 18 報、Nature 姉妹誌 4 報を含む論文 333 報に発表した。

<評価小委員会による所見>

1. 研究目標の達成状況

基礎理論として、力学系理論と制御理論を融合した「複雑系制御理論」を構築するとともに、これに「複雑ネットワーク理論」、「非線形データ解析理論」を加えた3理論を柱とする「理論的プラットフォーム」を構築したこと、また、応用研究においては、個々の課題解決のため、この理論的プラットフォームから、課題に特有な知識を新たに引き出し、特に、標準モデルを個別課題に適用するのではなく、個別の数理モデルと数的手法を、各課題の複雑性にうまく合うように「再構築」を行うという、プロセスの基本構造を確立したことは大きな成果と言える。

結果として、例えば、前立腺がんのテーラーメイド内分泌療法研究に用いられた数理モデリングを HIV や免疫応答に水平展開したり、また、動的ネットワークバイオマーカーによる超早期診断、劣特性の素子でも稼働する高性能 β -A/D 変換器など、個別の応用課題における多数の特筆すべき成果が得られている。

また、これらの応用研究において得られた結果は、基礎理論研究にフィードバックすることで、基礎理論の更なる改良が進み、重要な成果の社会還元につながっていくことは高く評価される。

さらに、質・量ともに十分な学術誌等における成果発表や、著名な国際会議での基調講演・招待講演なども行っており、学術的にも国際的にも高く評価されたと考えられる。

2. 研究推進・支援体制の状況

中間評価以降、研究プロセスの基本構造を踏まえて、サブテーマの様々な研究テーマの整理が行われた結果、例えば、前立腺がんの研究成果は実用レベルに達するなど、研究推進体制は適切に機能したと判断される。

また、毎週1回のヘッドクォーターミーティングや、毎月1回の各研究員と中心研究者との1対1での進捗報告会などの適切なサポートの実施が、プロジェクトメンバーの活発な成果創出につながったと評価される。

さらに、国際アドバイザリーボードを設立して外部の意見を取り入れたことは、国際的なベンチマークも意識しつつ世界トップレベルの研究が推進されたと判断される。

3. 研究成果の今後の展開

本研究課題の成果のうち、数理脳科学に関する研究成果は、内閣府の革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）「量子人工脳」において、研究を進めることとしている。また、半導体理工学研究センター（STARC）や、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）や独立行政法人科学技術振興機構（JST）の事業、厚生労働科学研究委託費事業等、多くの事業において展開していくこととしており、今後の発展と波及効果が期待できる。

また、本研究課題のような基礎研究分野の成果の特許化については、権利確保の取組が困難な場合も多いが、本研究課題では、発明者所属機関に権利が承継されない場合は、支援機関の JST が出願を実施するなど、基礎研究分野における成果の特許化に係る筋道を切り拓いたことは、今後、他の基礎研究分野に対する波及効果は大きいと考えられる。

なお、物理学における基礎方程式などとは異なり、本プロジェクトで構築した複雑系理論プラットフォームの諸問題への適用には、具体的な適用事例に応じた創意工夫の内在が想定されることから、新たな知の創造のためにも、データベース“Nonlinia”を継続的に更新していくことが期待される。

4. 総合所見

本研究課題は、現実の諸問題を解くための「複雑系数理モデル学」の基礎理論の構築と、その具体的な分野横断的科学技術への応用研究を目的として研究開発を実施した。その結果、「複雑系制御理論」、「複雑ネットワーク理論」、「非線形データ解析理論」の3理論を柱とする理論的プラットフォームを構築するとともに、応用研究として、理論的プラットフォームをグリーン・ライフイノベーションの諸問題等に対して適用し、一部の課題については実用化レベルに達するなど、基礎理論と実社会を橋渡しする「複雑系数理モデル学」という新たなパラダイムを確立したことは高く評価される。

以上のことから、本研究課題は目標を達成しており、世界をリードする世界トップ水準の研究成果が得られたと判断される。

今後、本研究課題の成果を実社会における様々な問題の解決に応用展開していくこととしているが、個々の課題に対し、理論構築、実測、検証、フィードバックといったサイクルを回し続けることで、実際の現場において利用できるインターフェースの開発が期待されることから、引き続き、そのパラダイムを展開・周知・深化していくことを期待する。

研究課題名	フォトニクス・エレクトロニクス融合システム基盤技術開発
中心研究者名	荒川 泰彦
研究支援担当機関名	技術研究組合光電子融合基盤技術研究所（PETRA）

<研究課題からの報告>

1. 研究課題の目的及び意義

インターネット上の通信量の増大、また IT 機器による国内の電力消費量が急増している。コンピューターシステム上で考えると、チップ間の伝送帯域も平成 32（2020）年頃には 10Tbps/chip 間の伝送帯域が必要と試算されている。現在、集積回路（LSI）チップ間や LSI チップ内のデータ転送は、銅配線を用いた電気的な伝送が行われているが、電気配線では電磁誘導や電磁干渉の問題のため、システム全体の高速化の際のボトルネックになっている。

このため、本研究課題では、従来の集積回路では限界とされている省電力化、高速化、小型化等の産業技術を構築するため、光を LSI に導入し、光子と電子が協調・融合した従来にない光電子集積化技術基盤（フォトニクス・エレクトロニクス融合システム）の確立を目指し、研究開発を実施した。また、平成 37（2025）年頃にオンチップサーバを実現することを目標に、その技術障壁を突破するための研究開発を実施した（図 1）。

研究課題全体としては、「光電子集積化技術開発」と「先端デバイス技術開発」という 2 つのサブテーマを構成し、具体的な研究目標として、光電子集積回路の超高集積化（伝送帯域密度：10Tbps/cm²）を設定した。なお、当該目標を一年前倒しで達成することができたため、追加の目標として、光電子集積回路の高温動作実証を設定した。

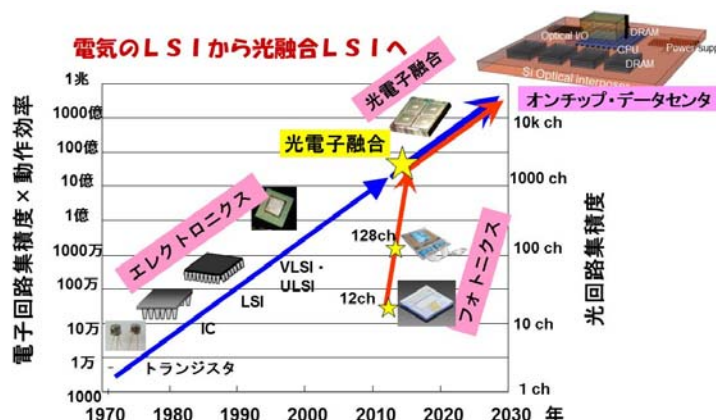


図 1. LSI の変遷

2. 研究成果の概要

・光電子集積回路の超高集積化と高温動作特性確保

目標とした“光電子集積回路の超高集積化（伝送帯域密度 10Tbps/cm²）”については、平成 22 年度には 3.5Tbps/cm²、平成 23 年度には 6.6Tbps/cm²、と順調に進捗し、平成 24 年度末に目標である 10Tbps/cm² を大幅に超える 30Tbps/cm² の性能を、1 年前倒しで達成した。これは、変調器、受光器、光導波路、光源実

装など、本研究課題の研究対象である各光デバイス要素技術において 50Gbps 級の性能と高効率化を図ることに成功し、光デバイスの世界最高性能を持続的に更新することができたためである（図 2）。

光電子集積回路の $30\text{Tbps}/\text{cm}^2$ は、光回路（一方向性）の特性を考慮すると、電子回路の $10\text{Tbps}/\text{cm}^2$ に相当する性能であり、2020 年頃に CPU-CPU 間や CPU-メモリ 間の LSI チップ間伝送に必要な伝送容量を実用化技術として確保することが可能になった。

さらに、平成 25 年度には、光電子集積回路の高温動作特性確保（ $\sim 125^\circ\text{C}$ ）について、量子ドットレーザアレイを搭載（かつ全デバイスの動作を波長 $1.3\mu\text{m}$ で最適化）し、 125°C の高温まで無調整で動作可能な温度特性に優れた光電子集積回路を実現した。これらは、2025 年頃のオンチップサーバ実現に見通しを与える基盤技術として、極めて大きなステップと言える。

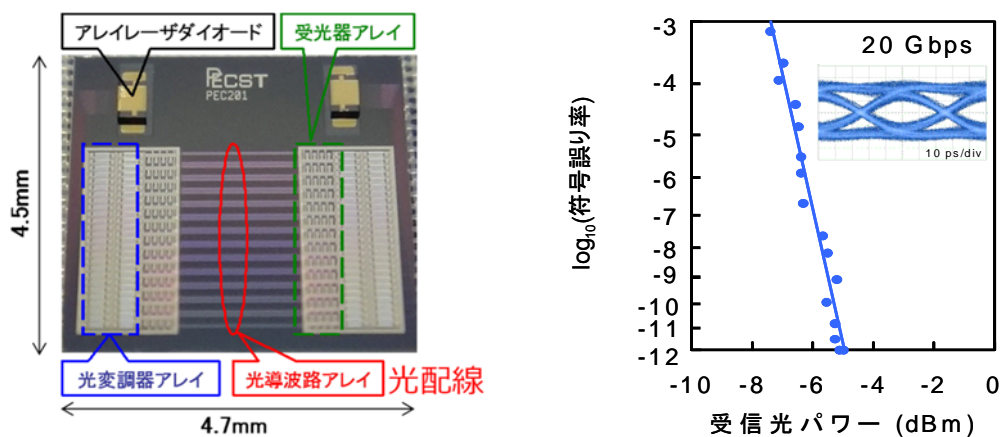


図 2. シリコン基板上に光電子集積回路を実現し、チャンネル当たり 20Gbps、 $30\text{Tbps}/\text{cm}^2$ の伝送帯域密度を実証

・革新技术の探求

シリコン・ナノレーザ（含量子ドットレーザ）、シリコン直接光源、フォトニック・ナノ構造光変調器、シリコン・ゲルマニウム光変調器の研究開発を進め、新材料や新構造に注目した革新的デバイスのアイデア実証を進め、将来の飛躍（オンチップサーバの実現）に向けた布石を打つことができた。

・研究開発成果の達成水準（ベンチマーク）

現在、Intel 社や IBM 社をはじめ Luxtera 社や IMEC 等、世界各国の主要研究開発機関において、シリコンフォトニクスを用いた光電子集積回路の研究が凌ぎを削りながら進められている。本研究課題が達成した「光源搭載型の光電子集積回路で $30\text{Tbps}/\text{cm}^2$ 」、さらには、「量子ドットレーザアレイを搭載した、 125°C の高温まで無調整で動作可能な、温度特性に優れた光電子集積回路の実現」を達成す

ることにより、他を圧倒的に凌駕する世界最高の技術を創成することができた(表1)。

機関名	PECST	Luxtera	Intel	Kotura	IMEC	IBM
国名 (プロジェクト名)	日本 (PECST)	米国	米国	米国 (UNIC)	ベルギー	米国 (UNIC)
応用先	チップ間	ラック間(AOC)	チップ間、ボード間	ラック間、ボード間	チップ間	チップ間
光電子集積方法	ハイブリッド集積 (フリップチップ)	モノリシック(フロントエンド)/ ハイブリッド集積	チップ横置き	チップ横置き (ワイヤボンディング)	ハイブリッド集積 (ウエハボンディング)	モノリシック集積
光源集積方法	オンチップ (ベアチップボンディング)	オンチップ (サブアセンブリ)	オンチップ (ベアチップボンディング)	オフチップ	オンチップ	オフチップ
リンク実験	20Gbps×4split×13ch (Bidirection) 25~125℃動作	28Gbps×4ch	12.5Gbps×4λ (Individual Tx/Rx)	25Gbps×4ch with EDFA (Individual Tx/Rx)	未	— (20Gbps×6ch)
伝送帯域密度	30Tbps/cm ²	~310Gbps/cm ²	~40Gbps/cm ²	—	未	1Tbps/cm ² (光源を除く)
発表年	2013	2012	2010	2012	2012	2011
参考文献	Y. Urino et al., Vol. 2, No. 3, Photon. Res. (2014)	P. De Dobbelaere et al., ECOC 2012, We.1.E.5.(2012)	A. Alduino, Hot Chips 22, Session 3 (2010)	S. Jatar et al., Group VI Photonics 2012, ThA4. (2012)	P. Dumon et al., ECOC 2012 (2012)	S. Assefa et al., 69th Ann. Dev. Res. Conf, pp. 253-256 (2011)

表1. 海外の研究機関との比較 (PECSTが本研究課題の成果、平成25年11月作成)

<評価小委員会による所見>

1. 研究目標の達成状況

平成24年度末に、1年前倒しで、所期の目標である10Tbps/cm²を大幅に超える30Tbps/cm²の性能を達成した。特に、30Tbps/cm²というデータは、現時点でIntel社やIBM社等の世界的機関を凌駕するデータであり、高く評価される。

2つのサブテーマについても、「先端デバイス技術開発」においては、世界最高動作温度110℃を実現したシリコン基板上の量子ドットレーザの開発や、シリコンの代わりにゲルマニウムを導入することにより小型化・高性能化を実現した光変調器の開発、さらには世界初のSOI (Silicon on Insulator) 基板上のゲルマニウム電流注入発光素子の作成による光源の開発などの革新技術が確立された。

また、「光電子集積化技術開発」については、アモルファス3次元配線、光ナノ構造配線、光配線基板において、主に材料やナノ構造の視点から革新的な技術開発が行われ、新規レジストを適用することにより世界最高水準の伝搬損失を実現した光配線導波路の確立や、フォトンクス特有の高段差対応のプロセスや高速動作に向けた低抵抗コンタクト等、多くの集積プロセス課題の解決が図られた。

これら2つのサブテーマの成果が融合することにより、量子ドットレーザを搭載し、125℃の高温まで無調整で動作可能な温度特性に優れた光電子集積回路を実現したことは、高く評価される。

2. 研究推進・支援体制の状況

本研究課題では、2つのサブテーマに対して、14のグループが協働して研究に

取り組んだ。各グループは、産業技術総合研究所、企業5社から構成される技術研究組合光電子融合基盤研究所、国内4大学、海外3大学のメンバーから構成されており、多くの組織が関わっている中で、各要素技術の研究開発が効率的に行われ、目標の達成に結実したことは、中心研究者の優れたリーダーシップが発揮されたことを端緒に示している。

例えば、平成25年度に達成した量子ドットレーザを搭載した125°Cの高温まで無調整で動作可能な温度特性に優れた光電子集積回路の実現に当たっては、光電子集積回路の波長を1.55 μm から1.3 μm に変更する必要があったが、1年という短期間に設計変更と動作実証を実現できたことは、研究計画を柔軟に変更できるというFIRSTの機動力の高さを実証したものであり、中心研究者のリーダーシップの高さが伺える特筆すべき成果である。さらに、これらの技術を事業部に移転する過程で、若手研究者や技術支援者の育成がなされたことも評価される。

知的財産権に関する取組については、プログラム期間中に多数の特許出願（115件）が行われただけでなく、プロジェクトで得られた知的財産については、外部の中立的専門機関による事業適合性判定を行って、特許の強さの裏付けを行うなど、先進的な取組が行われたことは評価される。

3. 研究成果の今後の展開

本研究課題の成果は、経済産業省の未来開拓研究プロジェクト「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発（平成24年度～平成33年度）」に継承され、オンチップサーバの開発・実用化を目指すこととしている。また、光電子集積回路の市場化において、新会社の設立も視野に入れるなど、実用化に向け、今後の展開・計画や構想が具体化されている。

なお、未来開拓型研究開発プロジェクトにおいて、国際標準化フォーラムへの参加等の標準化活動が行われているが、実用化を目指すに当たっては、フォーラム標準だけでなく、革新的技術についてはデジュール標準を目指して進めていくことが期待される。

4. 総合所見

本研究課題は、平成37（2025）年頃のオンチップサーバの実現を目指し、革新的技術の探求とそのシステム実証を目的として研究開発を実施した。その結果、現時点で世界最高の伝送帯域密度を達成するとともに、125°Cという高温においても無調整で動作可能な光電子集積回路を実現するなど、オンチップサーバ実現に見通しを与える革新的技術の開発・実証が行われたことは高く評価される。

以上のことから、本研究課題は目標を達成しており、世界をリードする世界トッ

プ水準の研究成果が得られたと判断される。

また、本研究課題において、多数の企業や大学を束ねた形で、世界最高性能のデータが生み出されたことは、特に、中心研究者のリーダーシップ、マネジメント能力の高さによるものであり、FIRSTの制度がうまく機能した結果と言える。

今後、本研究課題の成果は、経済産業省のプロジェクトなどに引き継がれ実用化を目指すこととしているが、本研究分野は国際競争が非常に激しい分野であることから、世界の競合する研究機関の動向を常に踏まえ、戦略的に活動展開を行うとともに、次へのステップを整理した上で、事業化を進めていくことを期待する。