

ERATO 河原林巨大グラフプロジェクト事後評価（予備）報告書

【研究総括】河原林 健一（国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系／教授）

【評価委員】（敬称略、五十音順）

有村 博紀（北海道大学 大学院情報科学研究科／教授）

宇野 裕之（大阪府立大学 大学院工学研究科／准教授）

岡本 青史（富士通研究所 知識情報処理研究所／センター長）

武田 朗子（統計数理研究所 数理・推論研究系／教授）

西浦 廉政（委員長；東北大学 原子分子材料科学高等研究機構／教授）

評価の概要

現代社会においては極めて多様で複雑かつ巨大なネットワークが存在し、我々の生活で重要な役割を果たしている。人々の活動に伴い情報量は増え続けており、これらのネットワークを含むデータ量の爆発的増加は、ハードウェアの進歩を凌駕しているため、超大型コンピュータを使用しても解析が困難となりつつある。このような問題を解決するためには、アルゴリズムの革新が必要不可欠であり、計算モデルと数理の探求に基盤をおく革新的アルゴリズム設計技法の構築や体系化は、科学の共通基盤として最優先の意義を持つ。

ERATO 河原林巨大グラフプロジェクトは、大規模化、多様化、複雑化する現在の実世界のネットワークにおいて発生する諸問題を、数理科学や情報科学の観点から理論的に解決することに挑戦している。本プロジェクトの研究体制は、①グラフマイニング & WEB&AI グループ、②複雑ネットワーク・地図グラフグループ、③グラフネットワークにおける理論と最適化グループ、④ネットワークアルゴリズムグループで構成され、河原林研究総括の強力なリーダーシップのもと、各グループが有機的に連携を図り研究を推進している。

本プロジェクトでは、データの爆発的増加の原因が、情報がリアルタイムに流通し蓄積されていること、および情報が適切に加工されない生データとして保存されている状態であることに着目し、様々なネットワークの指標となる高速アルゴリズムの開発や、Web 検索、ネットワーク情報検索に関する新しいアルゴリズムを提案した。さらに、巨大グラフネットワークの解析における理論的研究に繋がる、コンピュータサイエンスや理論計算機科学の諸問題に取り組んだ。これらの一連の主要な研究は、国際会議が重視されるコンピュータサイエンス分野において、トップの国際会議採択論文数が 90 本に及ぶなど、日本の研究可視性（Visibility）向上に値する高い国際的評価の実績を挙げており、将来の科学技術で大きな成果を挙げていくことが期待できる。

また、数理的なアプローチによりコンピュータサイエンス分野の基盤的な課題解決を目指すだけでなく、人工知能、機械学習、データマイニング等コンピュータサイエンス全般に及ぶ広範囲な研究領域を対象に、数理研究を展開した本プロジェクトの構想は極めて挑戦的である。10 年後の日本の情報科学、計算機科学を世界第一線に引き上げることを見据えた構想、4 年半という短期間に将来的展望が見渡せるほどに成長させたことは、研究総括の学問的・組織的リーダーシップによるところが大きい。

本プロジェクトの研究成果である大規模ネットワークを対象にした理論的解析と革新的高速処理手法、リアルタイム処理への拡張に関する基盤的研究は、今後、通信、バイオ、創薬、Mobile Internet、金融など幅広い応用分野への適用が期待される。

以上のことから、ERATO 河原林巨大グラフプロジェクトは、卓越した研究水準を示し、戦略目標「人と調和する情報環境を実現する基盤技術の創出」に資する成果が得られるであろうと評価する。

1. 研究プロジェクトの設定および運営

1-1. プロジェクトの全体構想

現代社会においては極めて多様で複雑かつ巨大なネットワークが存在し、我々の生活の中で重要な役割を果たしている。特に、Web 構造や Facebook、Twitter など、我々の身近にある複雑ネットワークは日々成長を続けており、巨大ネットワークの解析における理論的研究の重要性はますます高まっている。これらのネットワークを構成するデータの量は爆発的に増加しており、その増加速度はハードウェアの進歩を凌駕しているため、多くのアルゴリズムはこのようなビッグデータの処理に適切に対応できていないのが現状である。

本プロジェクトは、これら大規模化、多様化、複雑化する現在の実世界のネットワークにおいて発生する諸問題を、数理学や情報科学の観点から理論的に解決することに挑戦するものである。具体的には、時間とともに変化する大規模データをリアルタイムに処理し行動に反映させるアルゴリズムを開発し、大規模データからの有用な情報抽出手法と、そのための検索可能なデータベース構築することを目指している。

学問的側面においては、巨大ネットワークおよびビッグデータ解析における数学的理論研究の重要性を国内外に強く発信し、コンピュータサイエンス分野の学術的な日本の Visibility を向上させることを目標として掲げている。数理的なアプローチによりコンピュータサイエンス分野の課題解決を目指す研究は過去に数多く存在するが、個別ではなく、コンピュータサイエンス全般に及ぶ広範囲な研究領域（人工知能、機械学習、データマイニング、自然言語処理、データベース、ネットワーク等）を対象に数理研究を追求する本プロジェクトの構想は極めて創造的である。特に、様々な強みを持った研究者でグループを作り、今までの専門分野に固執せずに新しい分野に参入し成功をおさめるというのは、既存の研究の単なる延長や大規模化で成し遂げられないことである。新しい視点による挑戦的・融合的なアプローチによる成果だと評価できる。

また、このプロジェクトの構想における最大の強調点は、世界的に競争が激しい最先端の学問分野において、世界的に競争可能な顕著な研究業績を目に見える形で挙げることを目的・目標としたことである。誰もが認める世界的にトップの国際会議および学術論文誌に採択され、網羅的に論文発表するという学術的構想も極めて挑戦的で評価に値する。

次に、研究プロジェクトの構成であるが、特に研究人材の形成に関する構想が秀逸である。数学、理論情報科学、統計物理学、離散最適化等の数理学分野の研究者と、プログラミング能力に優れているだけでなく数理的アルゴリズムを理解している大学院生を中心とした研究者の集団を形成し、研究者同士がお互いに刺激を与えながら最先端の研究成果を出す拠点形成を構築している。また、国立情報学研究所（NII）の共同利用機関としての特性を十二分に活用し、様々な所属の優秀な研究員や大学院生を円滑に受け入れる構想も特筆すべきポイントである。さらに、新進気鋭の若手研究者を中心とし、コンピュータサイエンス分野での研究実績のない数理学の研究者が、同分野での高い成果を挙げる「ゼロからのプラス実績」を目標に掲げている点、10年後の日本の情報科学、計算機科学を世界第一線級に引き上げることを見据え、世界レベルのスーパーエリートとなる若手人材を輩出することを目指している点は、極めて挑戦的であり高く評価できる。

また、複数の民間企業と共同研究を実施し、データの源泉を確保、かつ社会貢献へつなげる結果を生み出す連携は極めて重要で高く評価できる。

1-2. プロジェクトの目標・計画

ビッグデータアルゴリズム開発と知識抽出という根本課題を基盤に据え、有用な情報をどう効率的に抽出するか、数理的手法を駆使し従来手法を一新する計画を立てている。具体的には、ネ

ネットワーク科学およびビッグデータアルゴリズムを中心とする世界的に競争が激しいこれらの最先端の研究分野において顕著な研究成果を挙げることを目標としている。関係者の誰もが認める世界的にトップの国際会議や学術雑誌に研究成果が受理され掲載・公表されるということが具体的な目標設定になっておりきわめて明解である。

その目標を達成するための計画も分かり易く、しかも挑戦的である。具体的には、優秀な若手研究者やさらにはその卵となる研究者を見出し、彼らを育成しながら研究成果を挙げるというアプローチをとっている。短期的視野で瞬間風速的な成果を挙げる計画ではなく、数理学の若手研究者を世界的スーパーエリートに育成することも視野に入れた長期的かつ継続的な成果を挙げるための計画となっている。一般にこのような大規模なプロジェクトは、一定の研究成果を保証するために安全策としてシニアの研究者を配置することが多い。しかしながら本プロジェクトは、シニア研究者に頼ることなく、若手のみで成果を挙げることを目指した。

以上のような研究成果目標を達成するために海外の研究機関における成功例を緻密に分析し、優秀な研究成果は問題を発見する力、それを解く理論的な力、理論を実装する力による総合力から得られることに着目し、若い力の中でも実装力に注目し人材を集めようとした着眼点はすばらしい。ERATO 研究期間内に非常に多くの優れた研究業績が生み出された。これは、Big Lab を日本に作り、博士課程学生は卒業時にトップ国際会議に3～5本の論文を持ち日本人研究者の研究力の底上げを狙うという研究総括の目標が非常に明確で分かり易いため、優秀な人材が集結して達成できたと思われる。以上、離散数学や理論計算機科学の分野を国際的に先導し、極めて高い評価を得ている研究総括が、世界的視野での客観性に基づく日本の現状認識に基づいた計画であり、まぎれもなく日本の学術界の発展に資する計画と言える。

1-3. プロジェクトの運営

本プロジェクトは、実社会上のビッグデータから社会現象の抽出や有用な情報の抽出および瞬時のデータ検索・アップデートの研究をする「グラフマイニング & WEB&AI グループ」、実社会のグラフ、特に複雑ネットワークの構造の解析を目標とする「複雑ネットワーク・地図グラフグループ」、組合せ最適化やグラフ理論という基盤技術を強化し、さらにそれらの応用分野の研究に取り組む「グラフネットワークにおける理論と最適化グループ」、幾何学的アプローチでネットワークの諸問題を研究する「ネットワークアルゴリズムグループ」で構成されている。

グループ内の研究員は、数理学の若手研究員を国内外から招集するだけでなく、実装力実現のために各種プログラミングコンテストで実績を持つ現役大学院生・大学生が多数 RA として参加し、新進気鋭の若手研究者集団を作っている。プロジェクトのメンバーは、国内の数理学分野における優秀な若手研究者の多くが集積していると言っても過言ではない。各チームリーダーは、当該分野で世界的に活躍するトップレベルの優秀かつ柔軟な若手研究者であり、研究総括のリーダーシップの下で融合的運営に貢献している。

サイトビジットにおける若手メンバーとのディスカッションを通して、研究総括からのトップダウン型のメッセージが ERATO 構成メンバーに行きわたっている様子を覗えた。特にグループリーダーや研究総括が頻繁に若手研究者といろいろ話す機会が多く、風通しのよい組織運営がされていると感じた。また、グループを超えた合宿、研究集会開催、共同研究などを実施し、理論情報科学、最適化、人工知能などの異なる分野の若手が活発に交流するための仕掛けも工夫されており効果をあげている。研究費は人件費・旅費の執行が多いが、研究構想・目的から鑑みるに適切であると判断する。

さらに、我が国の情報科学分野における主要学会や、代表的な研究プロジェクトと合同で、各種の研究集会開催を積極的に行っており、それらの会議には学術界および産業界からの参加数も多く有効に機能している。特に学会やプロジェクトの枠を超えて学際的な研究交流を行なう Winter Festa では、情報科学分野、数理学分野の結集と若手人的ネットワークの形成とその活性化にも注力しており、ERATO のスケールメリットを効率的に運用している。国外に関しては、世

界のトップレベル国際会議やトップ学術誌への研究成果発表を通じて、我が国の理論およびビッグデータ科学技術関連の visibility 向上に極めて大きく貢献しており、このことを通じた国外有力研究機関と研究者との共同研究も進んでいる。特に「ネットワークアルゴリズムグループ」では世界的な国際共同研究組織を確立し、世界 30 か国のハブとなる国際共同研究活動を行っており極めて高い成果を収めている。

知財に関しては他分野と比較すると多いとは言えないが、アルゴリズム特許に関しては産業界でも秘匿特許による防衛的権利化が促進しつつある状況であり、情報分野の固有の特性とも言えるので、知財戦略を含めて今後の課題としたい。

2. 研究の達成状況および得られた研究成果

2-1. グラフマイニング&WEB&AI グループ

実社会のビッグデータから有用な社会現象を抽出し、時間とともに変化する大規模データをリアルタイムに処理し将来の状態の予測を可能とする数理モデルの構築、アルゴリズムの開発を行っている。特に既存アルゴリズムの高速化と、新しいデータ形式や問題設定への取り組みの二つの観点から要素技術の開発を行っている。

既存アルゴリズムの高速化においては、産業応用の期待も高いテンソル分解に対し、高速なオンライン学習アルゴリズムを提案しており、人工知能分野のトップ国際会議 AAI (Association for the Advancement of Artificial Intelligence) で発表している。また、その基本アルゴリズムを Twitter 解析へ応用し、データマイニング分野のトップ国際会議 KDD (ACM Conference on Knowledge Discovery and Data Mining) で発表している。さらに、計算量が入力データのサイズに依存しない最適化アルゴリズムを提案し、機械学習のトップ国際会議 NIPS (Annual Conference on Neural Information Processing Systems) で発表している。また、検索クエリからのパターン抽出に関し企業との共同研究を行い、キーワードの組み合わせからクエリテンプレートを効果的に表現するモデルを提案し、Web データマイニング分野のトップ国際会議 WSDM (ACM International Conference on Web Search and Data Mining) で発表している。アルゴリズムの高速化については、具体的には 1000 万ツイートのデータに対し、スパム、広告の自動削除を実践的に検証している。

新しいデータ形式や問題設定への取り組みにおいては、流行を先取りする観測者の検知を企業との共同研究で取り組み、流行アイテムの早期発見を流行に敏感なユーザの検知問題として定式化し、人工知能分野のトップ国際会議 IJCAI (International Joint Conference on Artificial Intelligence) で発表している。また、与えられたテンソルからスカラー値を予測する新しい非線形モデルを提案し、機械学習分野のトップ国際会議 ICML (International Conference on Machine Learning) で発表している。巨大データからの情報クラスタリングと抽出については多くの成果が得られた。実際、検索クエリからのパターン抽出、流行情報の事前発見、ノンパラメトリックなテンソル回帰などにより、医療、感染予測など今後の展開への期待が高まっている。その他、分散制約最適化アルゴリズムを人工知能分野のトップ国際会議 AAI で発表しており、さらに、ベイズ推論の漸近評価を機械学習分野のトップ国際会議 ICML で発表している。

以上、本研究グループの研究成果は AAI 16、KDD 15、NIPS 16、WSDM 16、IJCAI 16、ICML 16、AAI 16、ICML 15 など、これまでは日本人研究者が 1 本の論文を受容されることさえ困難だった人工知能、機械学習、データマイニングのトップ国際会議で論文発表しており、極めて高いレベルの質と量の研究成果を世界に示している。また、変化の早いこれらの研究分野において、テンソル分解等うまくテーマを絞り、効率的に高い研究業績を達成するチーム構成がなされている様子が窺える。さらに、ゲストスピーカーを中心とした定例セミナーを既に 71 回開催しており、プロジェクト内外の研究交流を促進している。幾つかの研究課題では広い数理的視野と機械学習、データマイニングなど多彩な方法論を有する企業との連携も深く、産業界の発展へ貢献する姿勢も見られ評価に値する。すでに、グラフマイナー理論やハミルトン閉路の問題に対し大きな成果

を出しているが、今後はこれに見られるような理論の深化と応用の両輪で大きな成果が期待できる。

2-2. 複雑ネットワーク・地図グラフグループ

実社会のグラフ、特に1億辺以上の巨大なネットワークに対する高速・高精度なアルゴリズムの開発を目指し、大規模データからの情報抽出手法とそのための検索可能なデータベース構築を行っている。具体的には、ネットワーク科学で必要とされるさまざまな不変量の計算をするアルゴリズムの高速化を実現している。それらは最短距離、ネットワークの媒介中心性、その他の中心性、SimRank（シムランク）、影響度最大化など重要な指標となる。このような不変量の計算に対して、その性能に理論的な保証があるアルゴリズムを提案し、それに加えて実装による確認も行っている。

複雑ネットワーク上の最短距離の高速計算に関しては、世界的にも極めてインパクトの高い、複雑ネットワークの構造（コアとフリンジ）を活用した、既存手法の10倍以上のスケラビリティを持つ厳密解法を提案し、データベース分野のトップ国際会議 SIGMOD（Special Interest Group on Management of Data）で発表している。また、上記提案手法に基づき、動的更新、Top-k 距離、ラベル付きの課題へと拡張し、それぞれ Web 関連分野のトップ国際会議 WWW（ACM World Wide Web Conference）、人工知能分野のトップ国際会議 AAI、データベース分野のトップ国際会議 SIGMOD で発表している。

数多くのネットワーク科学における重要課題である、頂点の中心性の高速計算に関しても、乱択アルゴリズムの技術を利用した高速近似アルゴリズムを提案し、既存手法と同精度で10~100倍の高速化を実現している。適応的媒介中心性、媒介中心性の動的更新、全域木中心性、近接中心性などの研究に発展を見せしており、IJCAI、AAAI、KDD、VLDB（International Conference on Very Large Data Bases）などの人工知能、データマイニング、データベースの各分野のトップ国際会議で発表を行っている。

また、ネットワークの二点間の類似度を測る指標である SimRank の高速計算手法、影響最大化問題、スペクトラルグラフ理論などの広範な研究分野の課題を数理的アプローチで解決し、AAAI、WWW、WSDM、VLDB などの数多くのトップ国際会議で発表している。

本研究グループは、高いプログラミング能力を有する研究者と計算機科学の理論家が集結したグループであり、実世界のグラフの研究において理論と実装の両輪をうまく機能させている。また、内外の講師による約100回のセミナーを開催しており、プロジェクト内外の研究交流を促進している点も評価できる。グループリーダーを中心に、他のグループにおける研究プロジェクトにも積極的に参加して成果を出しており、縦割りのグループ構成ではなく横の結びつきも強いことが感じ取れた。

以上、本研究グループでは実世界のグラフを対象とし、様々なヒューリスティックな方法論の数理的基盤を与え、さらに計算機科学の知見を最大限に生かし、効率的アルゴリズムの開発を行い大きな成果を挙げた。巨大実世界グラフに関する計算可能な指標、最短距離クエリ、媒介中心性など高速計算とするアルゴリズム開発を実施した。既存研究が、有名問題を焼き直したヒューリスティックな問題設定、理論保証のないヒューリスティックなアルゴリズム提案に留まっている点に着目し、ネットワーク科学と理論計算機科学を活用した新しい研究アプローチをとっている点は非常に興味深く、当該分野におけるトップレベルの国際会議における発表実績は極めて高い評価に値する。今後、時間を含む動的ネットワークに対するアルゴリズム開発は要請も大きく、大きな成果が期待できる。また、研究成果はソフトウェアの公開などオープンデータ化されることを期待する。

2-3. グラフ・ネットワークにおける理論と最適化グループ

本研究グループでは、さまざまな応用分野にあらわれるネットワーク科学や機械学習に関する最適化問題に対して、組合せ最適化や離散数学における最先端の数学的理論を駆使して解決することを目指している。具体的には、通信ネットワーク上の最適化問題と、人工知能・機械学習分野の組合せ最適化問題に焦点を当て、組合せ最適化問題やグラフ理論という基盤技術を強化し、さらにそれらの応用分野の研究に取り組んでいる。

理論基盤の強化では、組合せ最適化、近似アルゴリズム設計、グラフ理論、計算量理論で成果を挙げている。特に、深さ定数の回路計算量に関する研究成果は、30年来の未解決問題を世界で初めて解決したものであり、理論計算機科学のトップ国際会議 FOCS (IEEE Symposium on Foundations of Computer Science) で Best Paper Award を受賞している。この研究成果をもとに世界の研究拠点で様々な研究の進展を見せており、世界的インパクトが極めて大きく、高い評価に値する。

理論と応用のインタラクションでは、劣モジュラ性を有することが膨大な離散データの効率的処理を可能にする点に着目している。古くから研究されている劣モジュラ理論を現代社会の諸問題に活用する研究は独創性が高く、理論と応用のインタラクションで世界的な研究業績を上げることを目指している。また、機械学習における組合せ最適化問題に対し、劣モジュラ関数最大化アルゴリズムを整数格子状へ拡張する理論研究、並びに広告の予算配分の応用研究に展開し、機械学習分野のトップ国際会議 ICML で論文発表を行っている。この研究は様々な発展を見せており、劣モジュラ関数最大化アルゴリズムに関する理論研究では、整数格子上の適応性を考慮した劣モジュラ関数に関する結果を得て、人工知能分野でのトップ国際会議 IJCAI で論文発表を行っている。また応用面でも、より実用的な状況下での予算配分問題に対して、機械学習、人工知能のトップ国際会議 (ICML、AAAI、IJCAI) で論文発表を行っている。

本研究グループでは、現時点で多くの研究員、リサーチアシスタントが参加しており、非常に活発な研究成果が生み出されている。また、週1回のセミナーを開催しており、海外の若手研究者の招聘（のべ9名）、JST News や研究普及ビデオ制作など、プロジェクト内外の研究交流を促進している点も評価できる。最適化分野における研究成果の豊富さ、質の高さはもちろんのこと、機械学習分野における成果には目を見張るものがある。機械学習分野のトップ国際会議では、本プロジェクトが発足してまもなく、プロジェクトメンバーによる研究成果が採択されるようになり、今では日本人による採択論文のうち高い比率を本プロジェクトによって占めていると言っても過言ではないだろう。

また、本研究グループでは、組合せ最適化分野の研究者が多く参加し、機械学習やネットワーク科学で出現する問題を想定して理論基盤の強化を目指している。しかしながら理論系の研究なのでやむを得ない側面はあるが、問題適用はボトムアップ的アプローチが見受けられ、今後の課題となっている。

以上、本研究グループでは、組合せ最適化分野の研究者が多く参加し、ネットワーク科学や機械学習で出現する最適化問題を想定して理論基盤の強化を行った。数理的保証のあるアルゴリズムは計算時間や解の精度と共に「信頼性」という計算の本質に関わるものであり、それを正面から取り組み重要な成果を挙げた。通信ネットワークにおける損傷が与えられた時の信頼性評価、機械学習分野での劣モジュラ関数の最適化アルゴリズムなど数理的にも深く、信頼性が高い手法を用いることで、機械学習や人工知能における研究の新たな流れを作ったことを高く評価する。

2-4. ネットワーク・アルゴリズムグループ

幾何学的なネットワーク上の重要問題における先進的アルゴリズムの開発、次世代ネットワークにおけるモデルとアルゴリズムの開発基盤の研究、ならびに世界的な国際共同研究組織の確立を目標としている。

創造的・融合的・挑戦的な研究を展開しており、以下は顕著な成果として評価に値する。計算幾何と幾何学的グラフ理論の研究では、低メモリ環境でビッグデータ処理を行うという IoT 時代の重要課題である、省メモリ計算における計算時間と領域のトレードオフ問題に挑み、重要な学術的成果を得ている。また、計算機科学の基本問題である平面上点集合のボロノイ図に関し、高度な乱択手法と省メモリ再起計算を利用し、頂点 n 個のボロノイ図を省計算領域で高速計算できる手法を提案している。さらに、高次ボロノイ図へ拡張し、理論計算機科学のトップ国際会議 STACS (Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science) で発表予定である。そして、トレードオフ限界に関する研究を追求し、世界で初めて指數的トレードオフの一般手法の提案に成功している。

また、ルーティングの研究では、ネットワークの競合ルーティングの理論的研究に関し、平面三角形分割のルーティング可能性における未解決問題の肯定的解明を与えた。また、障害物のある平面上の局所ルーティングでは世界初の理論解析の成果を挙げている。複数の部分グラフによる被覆問題でも、最長辺最短化全域木での被覆に関する理論的結果を得ており、論文発表を行っている。

さらに、各年度 20 名程度の海外研究者の招聘、国際ワークショップの開催・援助等による国際研究交流の成果も評価に値する。外国人研究者を多く雇用し、また彼らを中心に海外から研究者が集まりやすい環境づくりをされている。また、国際共同研究組織の確立では、世界 30 か国のハブとなり、世界的にオープンに開かれた国際拠点を実効的かつ有効に運営し、海外共同研究のパートナーシップを展開している点は特筆に値する。今後は、日本人、海外研究者による共同研究など積極的な交流の成果が得られるものと期待している。

以上、本研究グループでは、計算幾何と幾何学的アルゴリズムにより先進的アルゴリズム開発を目指し、本 ERATO における国際共同研究拠点としての位置づけにも貢献した。省メモリ計算における計算時間と領域のトレードオフ、競合ルーティングの理論的解明、部分グラフによる被覆理論などの分野で大きな成果を挙げた。今後は上の成果の発展と共に、より低メモリアルゴリズムによる巨大データ処理も目指す計画は期待できる。さらに国際連携体制の維持発展も重要であり国際的ハブ形成が期待できる。

以上に基づき研究成果を俯瞰すると、離散数学、特にネットワーク理論分野で世界的に著名な研究総括による理論情報科学分野における論文発表の貢献も極めて大きい。同時に、2000 年以降の情報科学分野の世界的な潮流である離散数学と、最適化、人工知能（機械学習）の融合研究において、異なる分野からのチームリーダー、研究者と RA の混成チームによる若手中心の研究体制を作り、大規模グラフデータ処理からビッグデータ、人工知能におけるトップレベルの国際会議での研究成果発表につながっていることは、非常に高く評価できる。本プロジェクトが関係する現在の情報科学分野は、北米・欧州の研究機関と企業が研究開発を牽引しているが、本プロジェクトが発足以来の 4 年間で、世界トップレベルの研究体制を作り上げた点は、驚くべき成果であるといえる。

研究総括がターゲットとして挙げた STOC (Annual Symposium on the Theory of Computing)、FOCS、SODA (Symposium on Discrete Algorithms) などのアルゴリズム&理論分野から実装システムに近い分野まで、トップ国際会議や学術雑誌に掲載されたものだけでも 90 本に及び、これは各々のトップ国際会議における日本人全体の掲載数の 1/4~1/3 を占めている。特に人工知能、機械学習、データベース、自然言語処理等のトップ国際会議の採択数はプロジェクト発足前の 5 本に対し、この 4 年間で 53 本に引き上げており、純粋な底上げに大きく成功している。また、理論的計算機科学のトップ国際会議の SODA'13、SODA'15、FOCS'15 で Best Paper Award を受賞しており、これを含めた受賞の総数は 35 件に及ぶ。さらに、Journal of the ACM、SIAM Journal on Computing、Journal of Combinatorial Theory Series B など、代表的な学術雑誌に 60 本以上の論文を掲載している。以上の代表的実績に示される通り、研究成果は量的にも質的にも極めて高い評価

に値する。本プロジェクト発足からの短い期間でこのような目を見張るような成果が得られたことを高く評価する。日本人理論研究者が数理の汎用性に基づいた研究を行ってどこまでの成果を達成できるかという可能性を示し、プロジェクトとして十分に成功しているものと評価する。グループごとに成果の現れ方に多少のばらつきはあるものの、これらの研究成果の量と質は圧倒的でありインパクトはきわめて大きい。プロジェクトの構想どおりかそれ以上の成果を挙げているということができる。研究成果は文句なく十分であり、関連する国内外の研究分野の勢力地図を塗り替えたということもできる。このような成果は、残りのプロジェクト期間でさらに伸びることが期待できる。

プロジェクト構想の柱でもある若手研究者の発掘および育成に関しても、大きな成功を収めているということができる。その真価はこのプロジェクトに携わった研究者が、プロジェクトを離れ独立した後でどれだけ成果を挙げられるかにかかってもいるが、一部はすでにその地位を築き始めている。

国際性、国際化については、外国人研究者との共著による研究成果が少ない。応用系の研究者をプロジェクトメンバーとしてリクルートすることは難しいというものの、プロジェクト外の外国人研究者との共著論文が増えることが望ましい。また、国内での研究成果発表であるが、プロジェクトが目指しているところが世界に打って出るということをやむを得ない部分もあるが、最先端の研究成果を国内で同業者向けに発表される機会がきわめて限定的であったことが残念である。プロジェクトの残りの期間ではその点が考慮されることに期待する。

また、チーム全体としてのシナジー効果が出ている。国立情報学研究所という学術的にも地理的にもハブである研究所において、一つ屋根の下、若手育成と最新のトップ研究達成を同時進行で遂行し、多くの実績を残せたことは極めて高く評価できる。予測精度の向上も重要であるが、より本質的には「なぜその予測結果が正しいのか」というデータ解析の信頼性という大きな問題にそれぞれのチームが立ち向かったことは重要である。数学的にも深い視点から、現代社会が直面する巨大データ問題に、現場を忘れず正面から立ち向かう姿勢は中長期的に極めてインパクトが大きいものとなる。その結果、とりわけ理論研究において、グラフ彩色問題、カット問題、グラフ構造定理など多くのすばらしい研究成果が出た。

また、本プロジェクトの研究成果に基づき、以下の発展が期待される。アドホックではなく理論的な裏付けのあるアルゴリズムが提案されており、従来手法では対応できなかった大規模グラフ、ビッグデータの諸問題の根本的解決が期待できる。数理科学、計算機科学の個別分野で開発されたアルゴリズム手法の整備、標準化が進み、学際的研究の発展が期待される。実問題から派生した課題に基づき、新しい数学理論の確立・新展開が期待できる。

3. 研究成果の科学技術、社会・経済への貢献

3-1. 科学技術への貢献

本プロジェクトで得られた研究成果の多くが、当該分野でも一般にトップとみなされる国際会議や学術雑誌に多数採択され、科学技術上のインパクトは質量ともに、国際的評価に値する十分に先導的かつ独創的であると判断する。また、従来のヒューリスティック解法を超える新たな理論基盤を構築し、実用上重要なリアルタイム処理に発展させ、効率的情報抽出・情報検索へ応用するという新しい学術的流れの形成も十分に期待される。

これらの成果は、情報科学の先端フロンティア分野で競合他者と競争的な研究を行った結果であり、きわめてすぐれていると言いうことができ、既存の分野に十分大きなインパクトを与えた。さらに今後、新しい科学技術分野やそのもとになる潮流の創出には、本プロジェクトから輩出された多くの優秀な人材が、科学技術の先端分野を開拓し研究のすそ野を広げるなどの波及効果が期待される。

以上、2000年以降、今世紀の情報環境とそれを支える次世代情報技術については、現在、大規

模ネットワーク、IoT、人工知能などその端緒が見えてきたばかりであるが、本プロジェクトは、プロジェクト開始時の 2012 年頃からの巨大ネットワーク処理への数理と大規模情報処理の融合研究や、プロジェクト中期の 2015 年頃から世界的に認識されるようになった人工知能（機械学習）に対する機械学習と最適化の融合研究など、世界的な次世代情報科学の潮流を先取りする形で、世界的にトップレベルの成果をあげており、科学技術イノベーション創出に寄与する卓越した成果が得られていると考える。

3-2. 社会・経済への貢献

大規模ネットワークを対象にした理論的解析と革新的高速処理手法の提案、リアルタイム処理への拡張に関する基盤的研究は、通信、バイオ、創薬、Mobile Internet、金融など幅広い応用分野への適用が期待される。今後、研究成果であるアルゴリズムやプログラム等をオープンソースソフトウェアとして一般に公開するなど、研究成果の社会・経済への適用をより一層加速・拡大させるための施策と実行に期待したい。

また、21 世紀の情報技術の特徴として、理論と実際の急速な接近にあることが各所で指摘されている。これは学術成果の産業界への適用だけでなく、例えば学術分野の理論研究者の現代の巨大最先端情報産業での活躍に見られるように、学術的人材の産業界への参加が特徴的である。この意味で、本プロジェクトは、主要な研究メンバーの情報分野最先端の企業での研究開発への参加など、学術のみならず世界水準のトップ研究開発者を社会に登場させており、長期的には非常に大きい良い影響を与えるものと考えられる。

4. その他特記すべき事項

4-1. 若手研究者支援

研究総括の卓越したリーダーシップのもとで、異分野融合、若手主導、チームの有機的な運用により、効果的なキャリアパス支援と、人材育成に成功している。大学、国の研究機関へは、トロント大学助教、NII 助教（2 名）、東京大学助教（5 名）、京都大学助教、東京工業大学助教、大阪大学助教、東北大学助教、情報通信研究機構（NICT）テニュアトラック研究員、産業技術総合研究所 AI センターテニュアトラック研究員（2 名）など、民間企業へは NEC 研究所、日立研究所、富士通研究所、Google、リクルートなど多数、RA から日本学術振興会特別研究員（DC）は 14 名など、RA、PD の過去 3 年間の主なポジション取得としての実績は目を見張るものがある。

さらに、コンピュータサイエンスの諸領域における数理的アプローチによる世界的な研究成果を日本で発表する感謝祭や、学会やプロジェクトの枠を超えて学際的な研究交流を行なう Winter Festa の開催は、若い研究者の質の高い交流と人材育成の場を提供しており評価に値する。また、本プロジェクトの 28～32 歳の若手研究者が著名なプログラムコンテストの世界大会に出場し、日本学術振興会育志賞、井上奨励賞、船井奨励賞など受賞している。

4-2. アウトリーチ活動

研究総括の卓越したリーダーシップのもとで、世界に注目される質量ともに高い研究レベルを武器として、日英・日仏のビッグデータ会議など、世界とパートナー国から見える質の高い国際アウトリーチ活動を行なっている。主な活動としては、安倍首相のインド訪問に合わせて開催された「科学技術関連セミナー」の出席・講演、日英 Big Data 交流における日本側代表団委員長、日英 Big Data Workshop、日仏 Big Data Workshop の日本側代表、国内での基調講演（日本数学会、産総研 AI 研究センターキックオフ、IBIS (Information-Based Induction Sciences)、MIRU (The Meeting on Image Recognition and Understanding) など特筆に価する。特に日英 Big Data Workshop では、ウィリアム王子来日記念における日本の情報系の顔としての国際交流に尽力した。

国内に関しては、情報科学関連プロジェクトとの共同開催集会など、我が国の情報科学分野を牽引するトップ・中堅・若手研究者たちが一堂に会する機会を数多く作り、今後我が国に必要な情報科学分野の横の連携を実現する端緒となっている。これは、オープンなチーム構成と研究総括の高い見識と学術成果の対外評価があって実現されたことであり、プロジェクトの重要な成果といえる。

研究総括の立場から、外国大使館レベルでの交流などハイレベルな活動の一方で、一般の市民や中学高校生、大学生や専門外の研究者に対する活動が数少なく限定的であった。実態をイメージしやすい他の自然科学分野とは異なり、情報科学の研究成果を分かり易く専門分野外の人々に伝えることは容易ではないが今後の活動に期待したい。ただし、河原林 ERATO プロジェクトに、各種プログラミングコンテストでの成績優秀者であるプログラミングの達人が集結していることは、関連のコミュニティには知られており、競技プログラミングを目指す大学院学生や大学生、さらに彼らが出身の一部の高校生にとってあこがれの場所と認識されており、そのような意味では間接的ではあるが、長期的な観点では有効なアウトリーチとみなすことができる。

また、研究内容を分かり易く紹介するビデオ「アルゴリズムが世界を変える」シリーズの公開、研究状況を報告する Newsletter の発刊、NII オープンハウスでのブース展示、多くの招待講演など着実に実施されており評価できる。

5. 総合評価

現代情報科学技術分野（巨大グラフ、ビッグデータ、人工知能）の新しい科学技術の創出に関して、その中核分野である理論情報科学、最適化、人工知能（機械学習）の我が国トップ若手からなる異分野混成チームを組織し、異分野融合研究を有機的かつ効果的に推進して、プロジェクト期間中に質・量ともに正解トップレベルの研究成果を輩出し、世界の研究の潮流に至らしめたことを高く評価する。プロジェクトの全体構想は、学問的側面と研究拠点構成の両面において、挑戦的、創造的、融合的な構想である。

構想のひとつのコンセプトとして、プロジェクトの成果を実績のあるシニア研究者に頼るのではなく、必ずしも実績や経験は多くはないが、潜在能力を持つ優秀な若手を発掘し育てながら優れた研究成果を出せるように導いたことが挙げられる。若手中心で基盤作りを行ったことは、中長期的観点からこれからの日本を牽引する若手研究者ネットワーク形成の基盤を構築したことになり、日本の学術界の底上げにも貢献する適切な計画であると判断する。もうひとつの構想のコンセプトとして、問題を提供する研究者、問題を解決する研究者（理論に明るい研究者）、解決方法を実装する研究者の三者が揃うことが重要であることを考え、若手の世代で理論に強いメンバーを集めたことにある。同時に、数理科学の理論的研究を応用・実用段階に推し進めるために、実装力のある若手の重要性を認め、そのような学生を RA として集めることにも成功した。

プロジェクトの運営に関しては、研究総括がリーダーシップを発揮して、研究体制の構築と運営、研究費の執行、国内外の研究者や産業界との連携など着実にやっている。また、Winter Festa 等、情報科学分野、数理科学分野の結集と若手人的ネットワークの形成とその活性化にも注力しており、ERATO のスケールメリットを効率的に運用している。知的財産権利化の活動は低調であるが、日本のコンピュータサイエンス分野の Visibility 向上を重視した運営を行っており、大きなマイナスにはならないと判断する。

研究の達成状況および得られた研究成果に関しては、国際雑誌よりも国際会議が重視されるコンピュータサイエンス分野において、トップの国際会議採択論文数は 90 本に及び、純粋な底上げに大きく成功しており、研究成果は量的に極めて高い評価に値する。また、理論的計算機科学のトップ国際会議で 3 本の Best Paper Award を含む、35 件の受賞実績を挙げており、質的にも高い成果を挙げておりと評価する。また、ビッグデータ時代に求められている 2 つの要請、膨大なデータをすばやく、正確に処理、分類、解析するという方向と膨大なデータからの本質の縮約とい

う困難な問題に正面から立ち向かう姿勢は好ましい。そのときに重要なことは「信頼性」であり、そのために一見遠回りに見えるが、きちんとした数学者をテーマ毎に配置している。これはデータホルダーとの連携による現場感覚をもって取り組むことと共に極めて本質的であり、世界を牽引していくための基本姿勢として高く評価したい。

研究成果の科学技術、社会・経済への貢献に関して、本プロジェクトはコンピュータサイエンス分野の日本の Visibility 向上に値する、高い国際的評価の実績を挙げており、将来の科学技術で大きな成果を挙げていくことが期待される若手研究者集団の育成に成功している。欲をいえば、産業界にインパクトを与えるような物やサービスを提供できたかもしれないが、複数の民間産業界と共同研究を実施し、データの源泉を確保し、かつ社会貢献へつながる結果を生み出す連携は極めて重要あり、短期間でこれら産業界との連携や社会に向けてのアウトリーチ活動を進めているということの評価する。日本人理論研究者が数理の汎用性に基づいた研究を行って、どこまでの成果を達成できるかという可能性を示し、プロジェクトとして十分に成功しているものと評価する。

4 年半のプロジェクト期間において、これだけの国際的に「見える」研究プロジェクトを立ち上げ、質・量ともに高い研究成果をあげる異分野融合・若手人材を我が国から創出せしめたことは、我が国の情報科学分野における快挙である。これは研究総括の学問的・組織的リーダーシップ、極めて優秀な 20 代から 30 代の若手研究者を集結したオープンな運営が相乗効果をあげて初めて実現したことである。今後は、このプロジェクトで育成された貴重な人材を、この分野の発展にどのようにつなげていくかが重要になる。プロジェクトが扱う研究分野は世界中の研究者がこぞって研究する競争の激しい分野であるが、本プロジェクトに参画した人材が新たな学術領域を拓くことができれば、日本の情報科学分野の研究が好循環していくであろう。

これらのことから、ERATO 河原林巨大グラフプロジェクトは、卓越した研究水準を示し、戦略目標「人と調和する情報環境を実現する基盤技術の創出」に資する成果が得られるであろうと評価する。

以上