

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560447

研究課題名(和文) ロバストな次世代光・無線統合ネットワークのトポロジ設計とトラフィック制御

研究課題名(英文) Topology Design and Traffic Engineering in Robust Optical and Wireless Integrated Networks

研究代表者

橘 拓至 (Takuji, Tachibana)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20415847

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、次世代光・無線統合ネットワークにおいて、障害や故障に強いロバスト性を考慮したネットワークトポロジの設計法とトラフィックエンジニアリング技術を確立する。トポロジ設計法では、ロバスト性が高くなるような波長多重数と無線端末配置を導出する。トラフィックエンジニアリング技術では、ロバスト性の低下が最小限となる経路を積極的に利用する。

本研究の成果から、無線ネットワークと光ネットワークに対してロバストなトポロジ設計が可能になり、ロバストなトラフィック伝送も実現できた。さらに、次世代光・無線統合ネットワークにおいてもロバストなトポロジ設計とトラフィックエンジニアリングの実現が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this research project, for next-generation optical and wireless networks, we propose a robust topology design and traffic engineering based on network robustness. In the proposed topology design, we derive the number of wavelengths at each link and the position of each wireless node to improve the robustness. Moreover, in the proposed traffic engineering, the route of packet forwarding is utilized aggressively to maintain the network robustness.

From our results, we show that the topology design of optical and wireless networks can be performed based on network robustness. Moreover, by using the traffic engineering based on network robustness, the robustness in those networks are improved. It is expected that the next-generation optical and wireless networks can be designed and used based on robustness by using the proposed methods.

研究分野：通信・ネットワーク工学

キーワード：通信方式 ネットワーク設計

1. 研究開始当初の背景

現在、WDM 技術を用いた光ネットワークとマルチレート無線ネットワークを統合した次世代光・無線統合ネットワークの構築・利用が期待されている。本統合ネットワークでは、2つの異なるネットワークを介してデータを高速伝送するために、両ネットワークの連携方式および新しい伝送方式の研究が盛んにおこなわれている。

また近年は、自然災害時にも通信手段を確保できるように、障害や故障に強いロバストな通信ネットワークの構築が必須であり、世界中で様々な研究が行なわれている。2010年にはグラフ理論に基づくロバスト性評価手法が提案され、従来法と比較して、大規模ネットワークのロバスト性の厳密な評価も可能となった。

通信ネットワークは、すでに日常生活に欠かせないライフラインになっているため、光・無線統合ネットワークのロバスト性向上も必要不可欠であるが、未だにそのような技術は確立されていない。

この主な理由としては、先行研究が比較的新しいという点以外に、性質の異なる光ネットワークと無線ネットワークを同時に考慮しなければならないため方式の確立が困難であるという点が挙げられる。

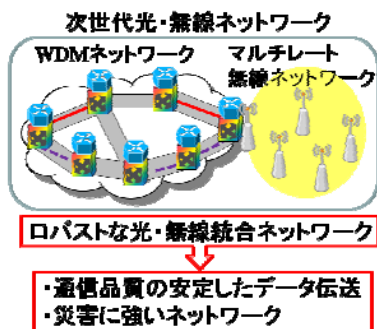


図1 ロバストな次世代光・無線統合ネットワーク

2. 研究の目的

本研究では、次世代光・無線統合ネットワークにおいて、障害や故障に強いロバスト性を考慮したネットワークトポロジの設計法とトラヒックエンジニアリング技術を確立する(図1参照)。トポロジ設計法では、ロバスト性が高くなるような波長多重数と無線端末配置を導出する。一方、トラヒックエンジニアリング技術では、ロバスト性の低下が最小限となる経路を積極的に利用することができる。両方式を本統合ネットワークで利用することにより、自然災害時などによる故障・障害に強いロバストな統合ネットワークを構築・利用することが可能となり、将来の利用が期待される。

以上のことから、特に下記3点を研究目的とする。

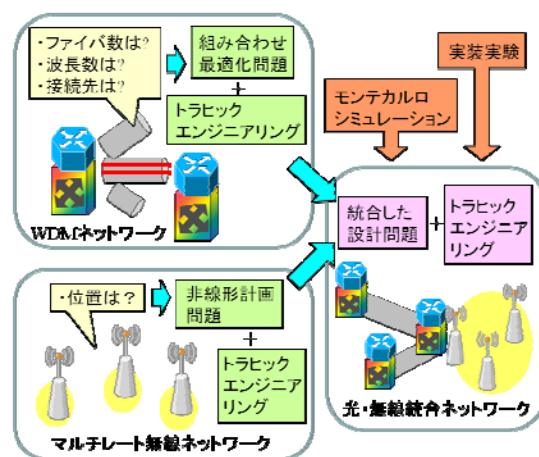


図2 提案するトポロジ設計法とトラヒックエンジニアリング技術

(1) ロバスト性を考慮した光・無線統合ネットワークのトポロジ設計法の確立

大規模ネットワークのロバスト性は、各リンクの伝送帯域を基に評価されるが、光・無線統合ネットワークでは、伝送帯域がファイバ内の波長多重数と無線ネットワークの無線端末位置に大きく影響されてしまうため、従来の評価方法を用いることが出来ない。

そこで本研究では、光・無線統合ネットワークに適応可能なトポロジ設計法を確立する(図2参照)。

(2) 光・無線統合ネットワークに対するトラヒックエンジニアリング技術の確立

次に、光・無線統合ネットワークのロバスト性を維持するためのトラヒックエンジニアリング技術を確立する。

本技術では、ロバスト性が悪化しない経路を検出するために、無線ネットワークではダイクストラアルゴリズムを用い、光ネットワークでは巡回セールスマン問題の近似解を導出する。得られた経路を利用することで、本統合ネットワークが故障や障害への耐性を持つことが期待できる。

(3) 確立した方式の性能評価・実装実験

最後に、上記(1)と(2)で確立したトポロジ設計法とトラヒックエンジニアリング技術の性能を、シミュレーションと実装実験によって調査する。

これらの研究目的を達成することで、次世代光・無線統合ネットワークにおいて、障害や故障に強いロバスト性を考慮したネットワークトポロジの設計法とトラヒックエンジニアリング技術の確立が期待できる。

3. 研究の方法

本研究では、前述の3つの研究目的を達成するために、以下の方法で研究を進める。

(1) ロバスト性を考慮した光・無線統合ネットワークのトポロジ設計法の確立

最初に、光・無線統合ネットワークのロバスト性評価手法を検討する。

本統合ネットワークにおいて、光ネットワークに対しては、各リンクの伝送帯域を波長多重数と1波長あたりの伝送帯域から計算する。一方の無線ネットワークに対しては、ノード間の距離によって各リンクの伝送帯域を導出する。

各リンクの伝送帯域が得られた後、隣接行列からラプラシアン行列 L を計算する。

最後に、ラプラシアン行列の擬似逆行列 L^+ から、既存の評価指標 τ を利用して、ロバスト性を評価する。本評価手法を用いると、指標 τ が小さいほどロバスト性の高いネットワークとなる。

次に、指標 τ を用いて、ロバスト性を考慮したトポロジ設計法を確立する。前述のように、指標 τ は小さいほどネットワークがロバストになる。それゆえ本設計法では、指標 τ が最小となるトポロジを、非線形計画問題を解くことで設計する。

非線形計画問題の近似解は、遺伝的アルゴリズムや焼きなまし法などの発見的解法を利用して導出する。遺伝的アルゴリズムを用いて無線ノードの配置を決定する場合には、ノードの座標位置を遺伝子型で表現し、選択・交叉・突然変異を経て、 τ が小さくなる遺伝子、すなわちノードの座標位置が導出される。

確立したトポロジ設計法の性能は、モンテカルロシミュレーションで評価する。シミュレーションでは、障害や故障がランダムに発生した場合の性能を入念に調査して、提案法の有効性を明らかにする。もし結果が不十分であれば、発見的解法の再検討やパラメータの再調整を行なう。

(2) 光・無線統合ネットワークに対するトラヒックエンジニアリング技術の確立

上記(1)で確立したトポロジ設計法によって、ロバストな光・無線統合ネットワークの構築が可能になる。しかしながら、統合ネットワークのトラヒックが増加するたびに、ロバスト性が悪化することになる。

そこで次に、ロバスト性をできるだけ悪化させないトラヒックエンジニアリング技術を確立する。

本技術ではまず、各リンクに対して、単位資源量あたりの指標 τ の増加率を計算する。この増加率が高いほど、ネットワークのロバスト性は低下するため、増加率の低いリンクを使うことが望ましい。

そこで、無線ネットワークに対しては、 τ の増加率をコストとしたダイクストラアルゴリズムを行ない、ロバスト性を低下させない経路を導出する。

一方、光ネットワークに対しては、 τ の増加率をコストとした巡回セールスマン問題として定式化し、迂回経路を含んだ経路を導出する。

両ネットワークの経路が得られると、エンドツーエンドの経路も容易に導出できる。しかしながら、それぞれのネットワークで得られた経路が必ずしも、エンドツーエンドの経路として最適とは限らない。そこで、両ネットワークを同時に考慮した経路探索アルゴリズムの構築を目指す。

両ネットワークを同時に考慮したアルゴリズムが確立できない場合には、前述の2つの経路を組み合わせる方式を採用する。

トラヒックエンジニアリング技術の性能はシミュレーションで評価し、探索経路の有用性を調査しながら方式の改良も行なう。

(3) 確立した方式の性能評価・実装実験

最後に、上記(1)と(2)で確立したトポロジ設計法とトラヒックエンジニアリング技術の性能を、シミュレーションと実装実験によって調査する。

具体的には、3ノードの光ネットワークと数ノードの無線ネットワークで簡単な統合ネットワークを構築し、提案方式の故障・障害に対する有効性を評価する。また、シミュレーションによる評価と、方式の改善も行う。

4. 研究成果

(1) ロバスト性を考慮した光・無線統合ネットワークのトポロジ設計法の確立

まず、無線ネットワークに関して、ロバスト性の高いマルチホップ無線ネットワークを構築するために、SINRとSpatial Reuseを考慮したノード配置法を提案した。本方式では、各ノードの送信電力とノード間距離を基に、各ノードペア間のSINRを計算する。さらに、IEEE 802.11 DCFのパラメータとSpatial reuseを考慮して、各ノードの仮想伝送時間を計算する。

本方式は、仮想伝送時間の導出、ラプラシアン行列の構築、ノード接続性の評価、最適化問題の定式化から構成されている。図3は、中心に位置するノードが他の端末と干渉するモデルを示しており、さらに図4は、仮想伝送時間を示している。これらの図から、各ノードの仮想伝送時間を導出する。

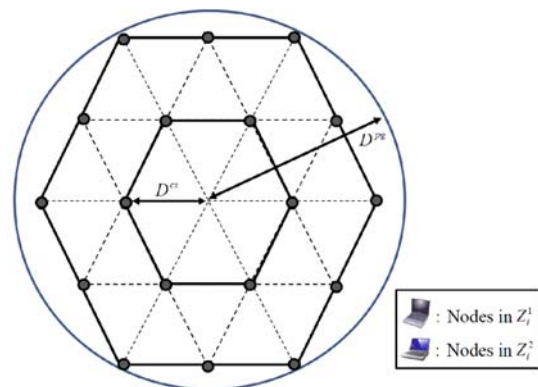


図3 六角形モデル

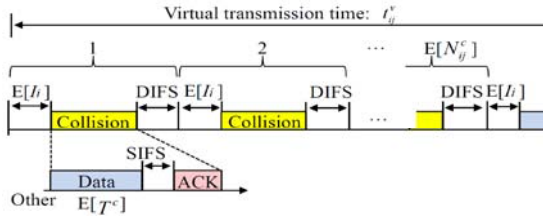


図4 仮想伝送時間

さらに、各ノードが衝突する場合も考慮することで、他ノードのデータ伝送時間が以下の式で導出される。

$$E[T^c] = \frac{\gamma_{ij} \cdot t_{slot}}{1 - \prod_{k \in \mathcal{H}_j} (1 - p_k^a) + \sum_{k \in \mathcal{H}_j} p_k^a \prod_{l \in \mathcal{H}_j, l \neq k} (1 - p_l^a)}$$

$$\times \left[\sum_{h=1}^{\infty} \{ h [\prod_{k \in \mathcal{H}_j} (1 - p_k^a q^h) - \prod_{k \in \mathcal{H}_j} (1 - p_k^a q^{h-1})] \} \right]$$

$$- \frac{\sum_{k \in \mathcal{H}_j} p_k^a \prod_{l \in \mathcal{H}_j, l \neq k} (1 - p_l^a)}{1 - q}$$

さらに、平均データ伝送時間を導出することで、平均仮想伝送時間が下記の式で計算できる。

$$t_{ij}^v = E[N_{ij}^c] \cdot [E(T_c) + DIFS + SIFS + ACK]$$

$$+ (E[N_{ij}^c] + 1) \cdot E[I_i] + E[S_{ij}].$$

上式で計算した仮想伝送時間を使って各ノードの伝送帯域を導出し、ラプラシアン行列を生成する。それから、生成したラプラシアン行列を使って、ネットワークのロバスト性を最大にするノード配置を下記の最適化問題によって導出する。

$$\min \quad \tau$$

subject to:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N R_{ij} = N(N-1).$$

この最適化問題の解導出には、遺伝的アルゴリズムを利用する。

数値例では、提案法を使ってノード配置を決定した場合のネットワークのロバスト性を評価する。さらに、ランダム配置を行なう場合と性能比較を行なう。

図5および図6は、500×500の平面上に9個のアクセスポイントを配置した結果を示している。ここで、緑色の点は固定のアクセスポイントを示し、赤色の点は位置を自由に変更できるアクセスポイントを示している。

ここで、図5は比較対象のランダム配置の結果を示しており、図6は提案方式の配置結果を示している。これらの図から、提案方式を用いることによって均等な配置が実現できていることが分かる。

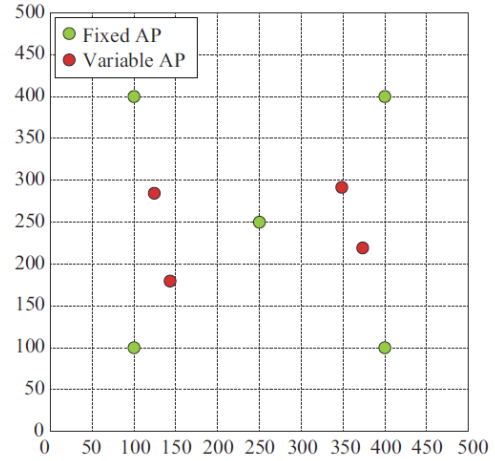


図5 ランダム配置の結果

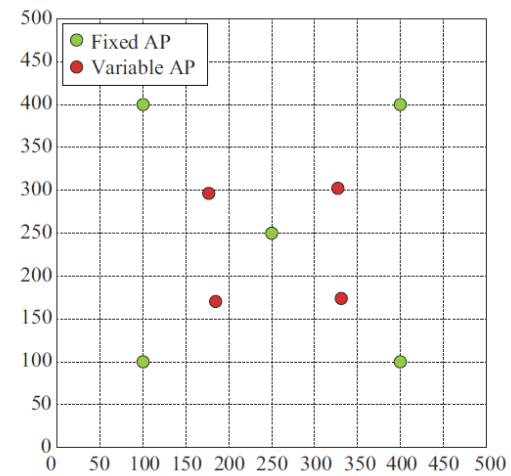


図6 提案方式による配置結果

表1 ロバスト性の比較

| | Proposed method | Random method |
|------------------------|-----------------|---------------|
| $N = 9, D^{cs} = 200$ | 12.016033 | 16.398895 |
| $N = 12, D^{cs} = 200$ | 14.009132 | 23.247823 |

また、表1はロバスト性を比較した結果を示している。この表から、ノード数が9と12のどちらの場合でも、提案方式を用いることでロバスト性が改善できることが分かる。

次に、大容量のデータ伝送が可能な大規模光パス網に対するトポロジ設計法を確立する。ここで、大規模光ネットワークでは、ドメインの異なる送受信ノード間設定され、複数のドメインを経由してデータが伝送される。このとき、この光パスをより多く設定するためには、適切な光パス設定経路を決定することに加えて、多くの光パスが設定できるようにあらかじめドメインの接続形態（トポロジ）を設計することが期待される。

しかしながら、適したトポロジを設計する場合でも、各ドメインのあらゆる内部情報を使用することができない。

そこで、大規模光パス網に対して、限られ

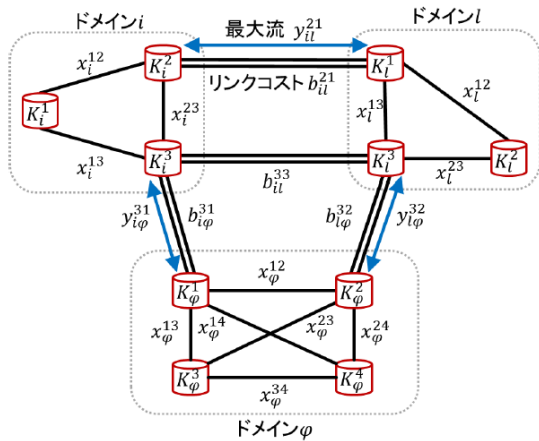


図7 提案方式によるトポロジ設計

たドメイン内部情報を用いたトポロジ設計法を提案した。

提案法では、まず、各ドメインが他ドメインと接続されるエッジノードを事前に決定する。それから、各ドメインは、エッジノード間の最大流を最大流問題によって導出し、エッジノード情報と最大流情報をネットワーク設計者に提供する (図7参照)。

ネットワーク設計者は、取得した内部情報を基に、各ドメインをエッジノードのみで構成されたフルメッシュネットワークとして表す。それから、各フルメッシュネットワークのリンクコストを、取得した最大流情報から導出する。

導出したリンクコストを各ドメインのリンクに付与した後、各ドメインのノードを他ドメインの全ノードと境界リンクで接続する。そして、ドメイン内の境界リンクに対するコストを変数とした以下の最適化問題を定式化する。

この最適化問題の解を導出することで、多くの光パスが設定でき、耐障害性も高いトポロジを設計できる。

数値例では、提案法によって設計したトポロジとノード間距離を考慮したトポロジを比較し、提案法の有効性を評価する。

図8は提案方式を用いた場合のロバスト性と従来方式を用いた場合のネットワークのロバスト性を比較した結果を示している。このグラフでは、値が1を超えている場合に提案方式が有効であることを示し、1未満の場合は従来方式が優れていることを示している。この図から、最適化問題の重みパラメータの値によらず、提案方式の値が常に1以上になっていることが分かる。これは、パラメータの値によらず常に提案方式が有効であることを示している。

以上のことから、提案するトポロジ設計法を利用することで、ロバストな光ネットワークを構築できることが分かる。

(2) 光・無線統合ネットワークに対するトラフィックエンジニアリング技術の確立

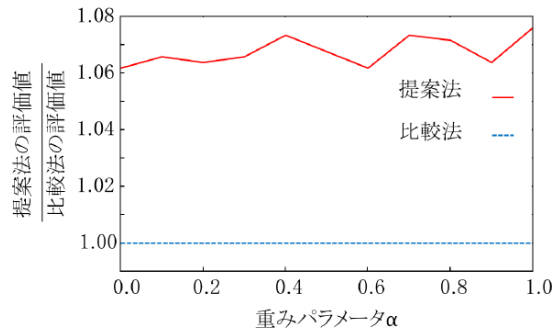


図8 提案方式の効果

次に、通信ネットワークに対するロバストなトラフィックエンジニアリング技術を確立する。特に、機器の故障や通信障害に強いロバストなデータ通信を実現する確率的経路選択法を提案する。

提案法では、ソースルーティングとホップバイホップルーティングに対して、それぞれ異なる最適化問題を解くことで耐障害性を考慮した経路制御を行う。

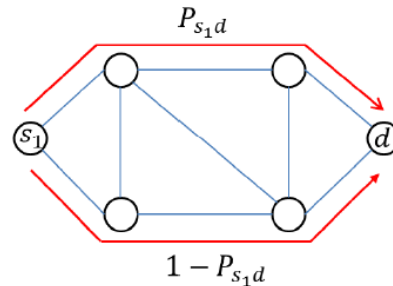


図9 ソースルーティングに対するトラフィックエンジニアリング技術

図9は、ソースルーティングの場合におけるトラフィックエンジニアリング技術を示している。この図のように、ソースノードは確立によって送信経路を変更するが、この確立を最適化問題によって導出することでロバストなトラフィックエンジニアリングが実現される。

また図10は、ホップバイホップルーティングにおけるトラフィックエンジニアリング技術を示している。この図から、本技術では、ノードごとに転送確率が設定されており、ソースルーティングよりもロバスト性を向上することが期待できる。

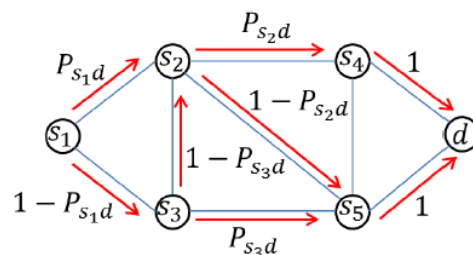


図10 ホップバイホップルーティングに対するトラフィックエンジニアリング技術

ここで、各ノードの転送確率は、下記の最適化問題によって導出される。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \max \eta_{mn} \\ & \text{subject to } 0 \leq P_{ij} \leq 1 \end{aligned}$$

両方式の性能は、シミュレーションで評価する。

図 11 は、ホップバイホップルーティングに対して、提案方式を用いた場合の有効性を示している。本図から、提案方式を用いることで、各リンクの最大通過トラフィック量が減少していることがわかる。それゆえ、提案方式を用いることでロバストなトラフィックエンジニアリングが実現できる。

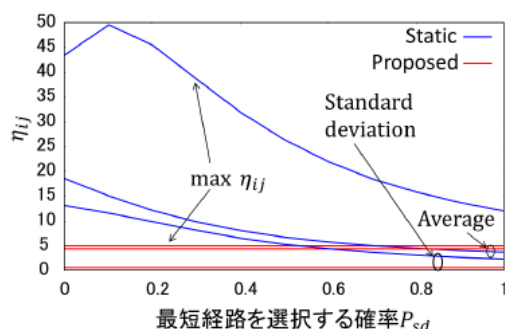


図 11 ホップバイホップルーティングに対するトラフィックエンジニアリング技術の効果

(3) 確立した方式の性能評価・実装実験

上記の (1) 及び (2) で確立した方式をネットワークシミュレータ ns-3 で評価した。評価結果から、提案方式を用いることで、無線ネットワークおよび光ネットワークでロバストなデータ伝送が可能になることが期待できる。

なお、統合ネットワークに対するシミュレーション評価については、現時点では完成していないが、これまでに得られた結果から提案方式が有効であることが想定される。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 6 件)

[1] 筒井 竜乃介, 橘 拓至, ドメイン情報を制限した大規模光パス網のトポロジ設計法, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 2013 年 3 月.

[2] Noritsugu Handa, Takuji Tachibana, Toshikazu Hori, Robustness-based Topology Design with SINR and Spatial Reuse in Multi-hop Wireless Network, 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, 2013 年 06 月.

[3] 畑中 崇志, 橘 拓至, 高速障害復旧を実現する省電力な複数ルーティング構成法, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 2014 年 3 月.

[4] 山内 俊英, 橘 拓至, 木下 和彦, 高速障害復旧を実現する省電力な複数ルーティ

ング構成法, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 2014 年 3 月.

[5] 浦山 康洋, 橘 拓至, ネットワーク資源の有効利用を実現するロバスト性と資源量に基づいた仮想網構築スケジューリングの検討, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 2015 年 4 月.

[6] 浦山 康洋, 橘 拓至, 収益と遅延を考慮した最適仮想網構築スケジューリング, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 2015 年 11 月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橘 拓至 (Takuji Tachibana)
福井大学・工学研究科・准教授
研究者番号：20415847

(3) 連携研究者

平田 健太郎 (Kentaro Hirata)
岡山大学・自然科学研究科・教授
研究者番号：00293902