

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 28 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420308

研究課題名(和文)フレキシブルグリッド用高精度波長安定化半導体レーザ光源の研究

研究課題名(英文) Study of high-accuracy wavelength semiconductor laser source for flexible-grid network

研究代表者

加藤 和利 (Kato, Kazutoshi)

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号：10563827

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：フレキシブルグリッド光伝送用の高精度レーザ光源の実現に向けて、基準光からの波長誤差をマイクロ波帯バンドパスフィルタを用いて検出する波長安定化手法を考案し、制御系の構成とアルゴリズムの研究を行った。その結果、システム要求を満たす ± 0.01 GHz以下の波長精度を実現した。また将来の光パケットネットワークへの展開を目指して波長切替高速化も研究し、レーザ出力波長が所望の変化をするように求めたフィードフォワード関数をコントローラに実装しレーザ駆動電流を制御することで60nsの波長切替時間を達成した。本研究に関する外部発表は、学術論文4件、会議発表29件であり、計画時の目標をはるかに上回る成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：To realize a high-accuracy wavelength laser for the Flexible-Grid Network, we proposed a novel method of detecting wavelength deviation from reference wavelengths by using a microwave band-pass filter and constructed the control system. The experimental results showed a wavelength accuracy within 0.01 GHz which meets a requirement at the optical communication system. For a future optical packet network, we also studied a fast wavelength switching at a laser. Our devised current controller based on the transfer function of the laser reduced the wavelength switching time down to 60 ns. As for the outputs, the number of the published article has been four as well as twenty-nine presentations.

研究分野：光通信デバイス

キーワード：波長可変レーザ 波長制御 フィードフォワード制御 フレキシブルグリッド ビート信号

1. 研究開始当初の背景

情報通信の多様化、大容量化が急加速で進展し、データトラフィックは指数関数的に増大の一途をたどっている。伝送の光化による大容量化、低消費電力化はすでに大きく進展してきた。例えば日本の基幹伝送ネットワークにおいては40ギガビット毎秒の信号を40波の波長多重によって1.6テラビット毎秒を伝送することが可能となっている。

波長多重技術をさらに効率化するための技術として日本が提案したフレキシブルグリッドが2012年にITU-T SG15において標準化された。フレキシブルグリッドを用いればビットレートや光伝送距離に応じて各波長チャンネルのスペクトル幅を柔軟に増減するエラスティック光ネットワークが実現できるため、ネットワークのさらなる周波数利用効率向上、消費電力削減、復旧性能向上が可能となる。総務省の情報通信審議会情報通信技術分科会産学官連携強化委員会(平成21年度～)においては、エラスティック光ネットワークが今後の情報化社会に必須の重点研究開発課題として挙げられている。海外では欧州連合の第7次研究枠組計画のSTRONGEST project(2010年1月～2012年12月)のもとで研究が進められている。総務省ICTグリーンイノベーション推進事業「フレキシブル・グリッド型光ノードシステムの研究開発(平成23～25年度)」においては将来のフレキシブルグリッド実現のためのハードウェアの研究開発が行われている。フレキシブルグリッドは光周波数193.1THzを基点とし、ここから6.25GHzの整数倍離れた光周波数を中心周波数として定義されている。中心周波数を中心に帯域粒度12.5GHzの任意の幅のスロットを配置することができるためビットレートや変調方式を混在した波長多重伝送が可能となる。

2. 研究の目的

フレキシブルグリッドを実現するための最優先のデバイス技術は波長可変レーザの高精度波長安定化である。6.25GHz間隔のグリッドに対しては ± 0.1 GHz以内の精度で波長を安定化させることが必要となる。波長可変レーザの波長安定化には従来より、エタロンフィルタなどの光学フィルタを用いフィルタの透過率波長依存性から波長を検出する方法が一般的に用いられてきた。この方法では波長検出精度が光学フィルタの透過率波長依存性で決まるため原理的に ± 0.5 GHz以下とすることが難しい。高精度で波長検出を行う方法として、基準光との差周波を電気周波数として生成し電気処理によって光波長を算出する方法が注目され始めている。本研究代表者が現在取り組んでいる科研費研究活動スタート支援(H24～25年度)においては、差周波電気周波数からの光波長検出技術、加えて150ns以内の波長可変半導体レーザの波長安定化デジタル制御技術を確認し、国際会

議(査読有)2件、国内学会3件(査読なし)を発表した。

本研究では、研究活動スタート支援の成果を進展させ、フレキシブルグリッドに必須の ± 0.1 GHz以内の波長誤差に加え、フレキシブルグリッドをベースにした新たな通信方式の可能性を拓く50ns以内での波長切替可能な高速高精度半導体レーザ光源の実現を目的とする。

3. 研究の方法

(A) マルチステージデジタル制御技術

(A-1) 高速電流駆動回路の設計、製作

注入する電流量によって大きな波長変化が得られる波長可変レーザの電流駆動回路において、レーザ自身の持つ回路定数をモデル化する。次に様々な電流駆動波形の場合の波長変化を回路シミュレーションで比較する。その結果、波長変化の初期過程(0～100ns)における応答高速化の観点で最も適した回路構成と電流駆動波形の組み合わせを明らかにし、その回路を製作する。

(A-2) 波長可変レーザの波長変化メカニズムの伝達関数表現

波長変化特性の測定データを時間領域ごとに分割し、それぞれの領域で解析、伝達関数として定式化した後に伝達関数を時間多重する手法を開発する。特に時間多重制御のシミュレーション法を研究し、汎用的なシミュレータで計算可能であることを示す。得られた手法で波長変化をシミュレーションし、目標性能である50ns以内での ± 0.1 GHzの波長安定化を計算上で確認する。

(A-3) 時系列切替制御のプログラム化とデジタル回路への実装

初年度に導出した各時間領域における波長変化の伝達関数をプログラム化し、5ns周期で信号入出力可能な高速デジタル回路に実装する。なおこの高速デジタル回路技術は研究活動スタート支援(H24～25)の成果として確立済である。さらに初年度に製作した高速電流駆動回路を接続し、切替直後(50ns～100ns)中期(100ns～10 μ s)および長期(10 μ s以上)のすべての時間領域で任意の電流形状を5nsの時間分解能で生成する制御回路を実現する。

(B-2) 高精度波長検出系の構築

波長誤差検出の新たな手法として、図1下部に示すような、フォトミキサで生成した差周波を高周波フィルタに通し電力検出器で電圧値として検出する系を提案、構築する。本系の動作原理は、図2上部に示すように、被測定光がフレキシブルグリッドからずれている場合、被測定光と基準光群との差周波が、図2下部に示したようにフォトミキサの出力となる。これを中心周波数3.125GHzの高周波バンドパスフィルタに透過させることで、波長誤差が小さいほど大きな電圧が出力される。本研究では汎用部品の組み合わせで高精度波長誤差検出系を構築しその実用

性を示す。そして精度 $\pm 0.1\text{GHz}$ 以内での波長誤差検出に必要な各構成部品の特性の要件を明らかにする。

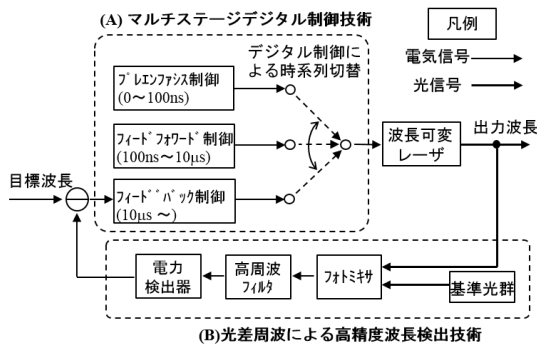


図1 本研究で構築する半導体レーザー光源の構成

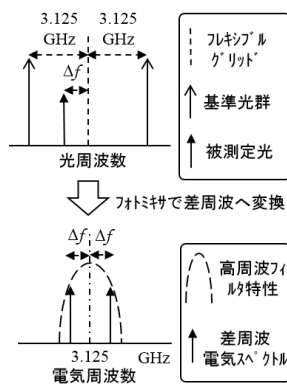


図2 被測定光がフレキシブルグリッドから Δf 離れた状態

(C) $\pm 0.1\text{GHz}$ 精度、 50ns 以内の波長安定化半導体レーザー光源の実現

(A), (B)で確立した技術を統合し図1に示す半導体レーザー光源を構築する。制御系では、切替直後 ($50\text{ns} \sim 100\text{ns}$) に回路応答を加速するプレエンファシス制御、中期 ($100\text{ns} \sim 10\mu\text{s}$) に熱平衡状態を加速するフィードフォワード制御、および長期 ($10\mu\text{s}$ 以上) には高精度検出した波長誤差を修正するフィードバック制御をデジタル回路で時系列に切り替える。実験により 50ns 以内に精度 $\pm 0.1\text{GHz}$ の波長安定化を実現する。さらに理論値との相違の解析から、さらなる高性能化の方策、本手法の理論限界値を明らかにし、将来の光通信方式研究の方向性策定に寄与する。なお安定化、低ノイズ化のため最終形態では各構成部品をモジュール化するが、モジュール化による特性変化などのリスクを考慮して、(A), (B)で構築した系をバラックで統合した実験も準備する。

(B) 差周波電気処理による高精度波長誤差検出技術

(B-1) 基準光群の生成

6.25GHz の正確な間隔でフレキシブルグリッドから正確に半周期 (3.125GHz) ずらした基準光群を得るために、アンカーとなる波長安定化光源と 6.125GHz 光変調器とを組み合わせ、

光変調器を非線形領域で動作させることによりアンカー光から 6.125GHz およびその整数倍の高調波を生成する光源系を立ち上げる。本方法は広範囲な大量の基準光群ではなく必要な範囲内で複数本の基準光源群を生成させるには極めて安価で効果的な方法であり、将来の実用化の観点での基準光の実用可能性の検証も兼ねる。

4. 研究成果

初年度である H26 年度に動作原理の確認を行った、基準光からの波長誤差をバンドパスフィルタ(BPF)を用いて検出する手法について、H27 年度はフィルタ透過後の電力が最小となるように、すなわち波長誤差が最少となるようにレーザーの光周波数を制御する制御系を構築した。この実験系は、光周波数間隔が 6.25GHz の光コム状の基準光群との差周波のビート信号を用いるという新しい手法によるもので、図2に示すように被測定光がフレキシブルグリッドから Δf ずれている場合、被測定光と基準光群の差周波 $3.125 \pm \Delta f$ がフォトダイオード(PD)によりビート周波数として検出される。これを中心周波数 3.125GHz のバンドパスフィルタ(BPF)に透過させることで、周波数のずれ量を透過電力として測定した。バンド幅 0.1GHz の BPF を用いて波長ずれを $\pm 0.05\text{GHz}$ 以下の精度で安定化制御できることを実験により示した。H28 年度は制御アルゴリズムの研究にも着手し、ハードウェアはそのまま高精度制御プログラムの開発により波長ずれ精度を $\pm 0.01\text{GHz}$ 以下まで縮小することに成功した (図3)。

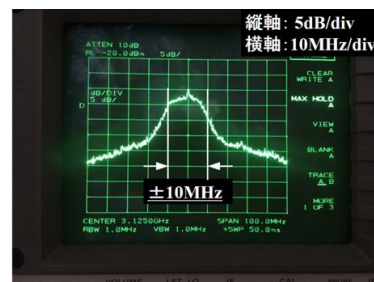


図3 ビート信号を1分間重ね書きしたスペクトル (ピークの幅が周波数のゆらぎを示している)

さらに、波長精度が高いほど波長キャプチャチャレンジ (波長安定化制御可能な初期波長ずれの範囲) が狭くなるというトレードオフが本手法の欠点であることを見出し、これを改善するために図4に示すような複数種類のBPFを併用した手法を提案、動作確認実験を行った。加えてその結果、波長精度と波長キャプチャチャレンジを独立に設定可能であることが実証され、波長精度 $\pm 0.01\text{GHz}$ 以下と波長キャプチャチャレンジ 6GHz を同時に実現することができた。以上の成果により、本提案手法でフレキシブルグリッド用としての要件を満たし、また波

長切替時に目標波長にキャプチャ可能であるという実用性を併せ持ったレーザ波長が実現できることを明らかにした。

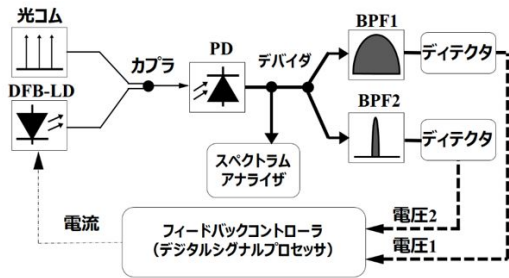


図4 波長安定化の実験構成

波長切替高速化の研究では、波長可変分布活性(TDA: Tunable Distributed Amplification) DFBレーザを用いて研究を行った。TDA-DFBレーザは共振器方向に沿って交互に配置された活性層と波長制御層から成り、波長制御層への電流注入量変化(キャリアプラズマ効果の変化)で屈折率を変化させ波長を数ナノ秒で高速に切り替えることが可能である。しかしキャリアプラズマ効果の他にこれよりも時定数の大きい電流注入量変化による発熱量変化により実際の波長安定化に要する時間は数ミリ秒となっている。そこで図5に示すようなレーザ波長制御モデルを考案した。実験結果からTDA-DFBレーザのシステム関数を同定し、これを用いてレーザ出力波長が所望の変化をするようにフィードフォワード関数を求めた。

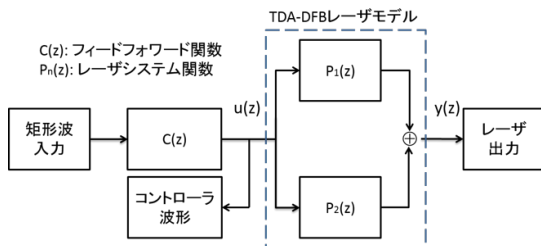


図5 制御モデルのブロック図

このフィードフォワード関数をコントローラに実装してレーザの波長切替を制御した。図6に195.0THzから195.4THzへ400GHz(3.2nm)幅の波長切替を行った時の実験結果を示す。ここで、波長切替時間は目標波長からの乖離が $\pm 1\text{GHz}$ 以内に収まる時間と定義した。なお横軸は波長を切り替えた瞬間からの時間 t を表している。図6の短時間領域(拡大図)では、波長切替直後に生じていた30GHz程度のオーバーシュート量をフィードフォワード制御によって4GHzまで抑制することで60nsの波長切替時間が達成されている。以上の結果から、レーザのモデル化(伝達関数の導出)により、100ns以下での高速波長切替および切替後の長時間波長安定化制御が達成できることが示された。

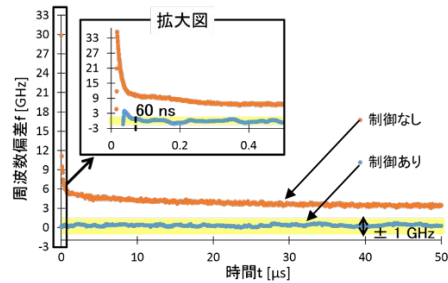


図6 波長切替時の波長変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

- (1) 木村凌河、久保木猛、加藤和利、波長可変レーザの400GHz(3.2nm)幅高速高安定波長切替、電子情報通信学会論文誌C、査読有、Vol. J100-C, No.4, pp.-, 2017-04.
- (2) R. Kimura、Y. Tatsumoto、K. Sakuma、H. Onji、M. Shimokozono、H. Ishii、K. Kato、Sub-microsecond wavelength stabilization of tunable lasers with the internal wavelength locker, the Japanese Journal of Applied Physics、査読有、55, 08RB07, 2016
- (3) J. Tsuboi、T. Kuboki、K. Kato、Wide-capture-range, high-precision wavelength stabilization within $\pm 50\text{ MHz}$ for flexible-grid wavelength division multiplexing by photomixing technique, the Japanese Journal of Applied Physics、査読有、55, 8S3, 2016
- (4) H. Onji、S. Takeuchi、Y. Tatsumoto、N. Nunoya、M. Shimokozono、H. Ishii、K. Kato、Fast wavelength switching with tunable distributed amplification distributed feedback laser by feedforward control technique, the Japanese Journal of Applied Physics、査読有、Vol.53, 08MB11, 2014

[学会発表](計19件)

- (1) 福田浩規、木村凌河、山口健太、久保木猛、加藤和利、分布活性DFBレーザの活性層電流注入時の波長変化特性評価、2017年電子情報通信学会総合大会、C-4-4、2017
- (2) R. Kimura、Y. Tatsumoto、H. Onji、R. Kuboki、K. Kato、Internal-wavelength-locker based feedforward/feedback co-operative wavelength control for 100 ns wavelength switching, 21st Microoptics Conference、査読有、13C-10、2016
- (3) J. Tsuboi、T. Kubok、K. Kato、Optical frequency stabilization within $\pm 20\text{ MHz}$ of distributed feedback laser controlled by novel feedback algorithm, 21st Microoptics Conference、査読有、13C-18、2016
- (4) 木村凌河、立本雄大、佐熊一輝、恩地裕和、

- 久保木猛、加藤和利、フィードフォワード/フィードバック併用型制御の提案とこれを用いた波長可変レーザの高速波長切替の実現、平成 28 年度電機・情報関係学会九州支部連合大会、05-2P-12, 2016
- (5) 坪井淳、久保木猛、加藤和利、制御パラメータ可変化による DFB-LD 周波数安定制御の高精度化、2016 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-4-30, 2016
- (6) 山口健太、木村凌河、立本雄大、久保木猛、加藤和利、DFB レーザの注入電流制御によるサブミリ秒波長切替、2016 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-4-29, 2016
- (7) K. Yamaguchi, Y. Tatsumoto, R. Kimura, T. Kuboki, K. Kato, Sub-millisecond Wavelength Switching of Tunable DFB Laser Array (TLA) with Injection Current Control, The 25th International Semiconductor Laser Conference (ISLC2016)、**査読有**、WE38, September 14, 2016
- (8) 山口健太、木村凌河、立本雄大、久保木猛、加藤和利、光通信用 DFB レーザの注入電流制御による波長切替高速化、電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会、2016.
- (9) 木村凌河、立本雄大、佐熊一輝、恩地裕和、下小園真、石井啓之、加藤和利、モジュール内蔵汎用波長ロックによる波長可変レーザの 110ns 高速波長切替、2016 年電子情報通信学会総合大会、C-3-1, 2016
- (10) 山口健太、立本雄大、木村凌河、久保木猛、加藤和利、フィードフォワード制御による光通信用 DFB レーザの波長切替時間の短縮、2016 年電子情報通信学会総合大会、C-3-2, 2016
- (11) 坪井淳、三井農太郎、久保木猛、加藤和利、高精度広キャプチャレンジ DFB-LD 波長安定化制御、2016 年電子情報通信学会総合大会、C-3-7, 2016
- (12) 三井農太郎、坪井淳、久保木猛、加藤和利、基準光とのビート信号直接計数による DFB レーザの高精度波長安定化 2016 年電子情報通信学会総合大会、C-14-24, 2016
- (13) 立本雄大、木村凌河、下小園真、石井啓之、加藤和利、フィードフォワード制御による波長可変レーザの波長切替高速化、電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会、2015
- (14) R. Kimura, Y. Tatsumoto, K. sakuma, H. Onji, M. Shimokozono, H. Ishii, K. Kato, Fast Wavelength Stabilization of Tunable Lasers With the Internal Wavelength Locker, 20th Microoptics Conference (MOC) 2015、**査読有**、H64, 2015
- (15) J. Tsuboi, T. Kuboki, K. Kato, Wavelength Stabilization within 0.05 GHz with Photomixing Technique and Laser Current Controlling, 20th Microoptics Conference (MOC) 2015、**査読有**、H67, Oct. 2015.
- (16) 坪井淳、久保木猛、加藤和利、基準光とのビート信号を用いた ± 50 MHz 以内の DFB レーザの電流制御波長安定化、2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-3-44, 2015
- (17) 立本雄大、木村凌河、下小園真、石井啓之、加藤和利、フィードフォワード制御による TDA-DFB レーザの 400 GHz 間隔波長切替の高速化、2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-4-25, 2015
- (18) 木村凌河、立本雄大、佐熊一輝、恩地裕和、下小園真、石井啓之、加藤和利、TDA-DFB レーザにおけるモジュール内蔵波長ロックを用いた FF/FB 併用型制御による高速波長切替、2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-4-26, 2015
- (19) Y. Tatsumoto, H. Onji, R. Kimura, H. Ishii, M. Shimokozono, K. Kato, High-speed, High-Accuracy 400-GHz Wavelength Switching at Tunable Distributed Amplification (TDA-) DFB Laser using Feedforward Control, OECC 2015、**査読有**、JThC.26, 2015
- (20) 木村凌河、立本雄大、佐熊一輝、恩地裕和、布谷伸浩、下小園真、石井啓之、加藤和利、モジュール内蔵波長ロックを用いたフィードバック制御による TDA-DFB レーザの高速波長切替、2015 年電子情報通信学会総合大会、C4-22, 2015
- (21) A. Saeki, K. Kato, Fine wavelength stabilization of the DFB laser by photo-mixing with reference wavelengths, The Third International Japan-Egypt Conference on Electronics, Communications and Computers、**査読有**、March 17, 2015
- (22) A. Saeki, K. Kato, Fine wavelength stabilization of the DFB laser at the flexible grid by photo-mixing with reference wavelengths, 2014 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC) 2014、**査読有**、FG1G-43, Sendai, 2014
- (23) 恩地裕和、立本雄大、武内翔太、布谷伸浩、下小園真、石井啓之、加藤和利、フィードフォワード制御を用いた波長可変レーザの波長切替応答高速化に関する研究、信学技報、vol.114, no.282, OPE2014-92, pp.33-36, 2014
- (24) 佐伯淳、加藤和利、基準光との光差周波を用いた半導体レーザの高精度波長安定化、電子情報通信学会 2014 ソサイエティ大会、C-4-18, 2014-09
- (25) 佐熊一輝、武内翔太、布谷伸浩、下小園真、石井啓之、加藤和利、フィードフォワード/フィードバック切替型制御による波長可変レーザの高速波長安定化、電子情報通信学会 2014 ソサイエティ大会、C-4-27, 2014
- (26) 恩地裕和、立本雄大、布谷伸浩、下小園真、石井啓之、加藤和利、TDA-DFB レーザの波長切替応答高速化の検討、電子情報通信

学会 2014 ソサイエティ大会, C-4-28, 2014
(27) 立本雄大、恩地裕和、武内翔太、布谷伸造、下小園真、石井啓之、加藤和利、フィードフォワード制御による TDA-DFB レーザの波長切替高速化と光スイッチ動作”、

電子情報通信学会 2014 ソサイエティ大会, C-4-29, 2014

(28) H. Onji, S. Takeuchi, Y. Tatsumoto, K. Kato, N. Nunoya, M. Shimokozono, H. Ishii, Stable Wavelength Switching within 50 ns using Tunable Distributed Amplification (TDA-) DFB Lasers”、

The 12th International Conference on Optical Internet (COIN) 、査読有、TC1-3, Jeju, Korea, 2014.

(29) H. Onji, Y. Tatsumoto, S. Takeuchi, N. Nunoya, M. Shimokozono, H. Ishii, K. Kato, 35 ns Wavelength Switching with +/- 1 GHz Wavelength Accuracy using Tunable Distributed Amplification (TDA-) DFB Lasers, Photonics in Switching, Advanced Photonics for Communications, 査読有, WPW4B.3, San Diego, USA, 2014

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
研究室ホームページにて研究成果公開
<http://optoele.ed.kyushu-u.ac.jp/outreach.html>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

加藤和利 (KATO, Kazutoshi)

九州大学・大学院システム情報科学研究院・
教授

研究者番号：1 0 5 6 3 8 2 7

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

()