

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13478

研究課題名（和文）光周波数の分周を基盤とする極限光波制御

研究課題名（英文）Continuous generation of arbitrary optical waveform based on the optical frequency division

研究代表者

大饗 千彰（OHAE, CHIAKI）

電気通信大学・量子科学研究センター・助教

研究者番号：80787664

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：光周波数の分周の技術を土台として5本の高調波光(1w-5w)を生成し、それらの位相振幅関係を自在に操作することで、125THzの非常に高い繰り返しレートを持った多様な光波形、sineパルス列、cosineパルス列、のこぎり波を連続的に生成した。さらに、実際に光波形を測定してターゲット光波形の再現性や光波形の安定性を評価し、十分に実用可能な性能を達成していることを確かめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光周波数分周を用いて生成した光は、周波数領域ではその単一周波数性と広帯域性から広帯域に広がる単一周波数レーザー群として、時間領域ではその高い繰り返し性から超高速通信や超高速光演算などに応用が期待される。また、光周波数分周によって生成した光は絶対位相を含めて安定であることから、強度波形だけでなく振幅波形（光電場・磁場）を含めて任意の光波を生成することが可能である。この特徴を用いることで、電場・磁場に敏感な現象（例えば物質中の荷電粒子運動など）を自在に連続的に制御することが可能となる。

研究成果の概要（英文）：Five phase-locked harmonics (1w-5w) are generated by utilizing the divide-by-3 optical frequency division. By freely manipulating the phase and amplitude relation among the five harmonics, various optical waveforms, sine-pulse, cosine-pulse, and sawtooth, are continuously generated. Furthermore, the optical waveform was measured to evaluate the reproducibility of the target optical waveform and the stability of the optical waveform, and it was confirmed that the performance was practically usable.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：光の周波数分周 超高速光波制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光周波数分周の技術をもとに生成される高品質の光は、中赤外・可視・紫外域において互いに位相が同期された高調波光系列 **1, 2, 3, …** を形成し、それらの位相・振幅関係を操作すると、**100 THz** を超える非常に高い繰り返しレートを持つ任意の光波形（矩形波、のこぎり波、パルス列など）を連続的に生成することができる。このような高繰り返しレートの極限といえる光波制御技術が確立できれば、新奇な光が創出され、新たな光科学の分野が拓かれると期待される。例えば、周波数領域ではその単一周波数性と広帯域性から広帯域に広がる単一周波数レーザー群として、時間領域ではその高い繰り返し性から超高速通信や超高速光演算などに応用が期待される。また、光周波数分周によって生成した光は絶対位相を含めて安定であることから、強度波形だけでなく振幅波形（光電場・磁場）を含めて任意の光波を生成することが可能である。この特徴を用いることで、電場・磁場に敏感な現象（例えば物質中の荷電粒子運動など）を自在に連続的に制御することが可能となる。

2. 研究の目的

光周波数分周を用いて生成された位相同期された高調波光系列 **1, 2, 3, …** の位相・振幅関係を操作することで、**100 THz** を超える非常に高い繰り返しレートで任意の光波形（矩形波、のこぎり波、パルス列など）を連続的に形成する光領域の任意波形発生器を実現する。

3. 研究の方法

光周波数分周を用いて生成した位相同期された**5**本の高調波光 $1\omega - 5\omega$ （それぞれ波長が**2403, 1202, 801, 600, 481 nm**）の位相・振幅関係を自在に操作することで多様な光振幅波形を連続的に生成する光波形の連続生成システムを構築する。

光波形の連続生成システムの構築は**2**つのステップを踏んで達成した。まず、位相・振幅操作の系を構築することで光波形を自在に制御し、その時の相対位相・絶対位相・振幅関係を測定することで実際の光波形を決定する。位相・振幅の測定結果から、ターゲット波形の再現性や光安定性を評価する。その後、実用的な光パワーや波形の安定性が得られるように、光周波数分周に用いるレーザーや非線形光波長変換のシステムの改良を行った。

4. 研究成果

【光周波数の分周】 任意光波形の連続生成の基盤となる技術である光周波数分周を用いて**5**本の位相同期された高調波光系列（ $1\omega - 5\omega$ ）を実用的な強度を持って生成した。土台はプロジェクト開始前に構築済みであったが、出力パワー、ビーム品質、位相安定性の向上を行った。図**1**はシステム全体の概要図である。図**2**は光周波数分周システムのフィードバックを行った際に得られた $2\omega - 2\omega$ 間のビート信号のパワースペクトルである。位相同期時に見られるピークが現れていることから、光周波数分周によって**3**本の高調波光（ $1\omega - 3\omega$ ）が位相同期されたことがわかる。図**3**は光周波数分周で得られた**3**本の位相同期高調波光を元により高次の高調波光（ $4\omega, 5\omega$ ）を生成することで得られた**5**本の高調波光のビーム形状を示したものである。

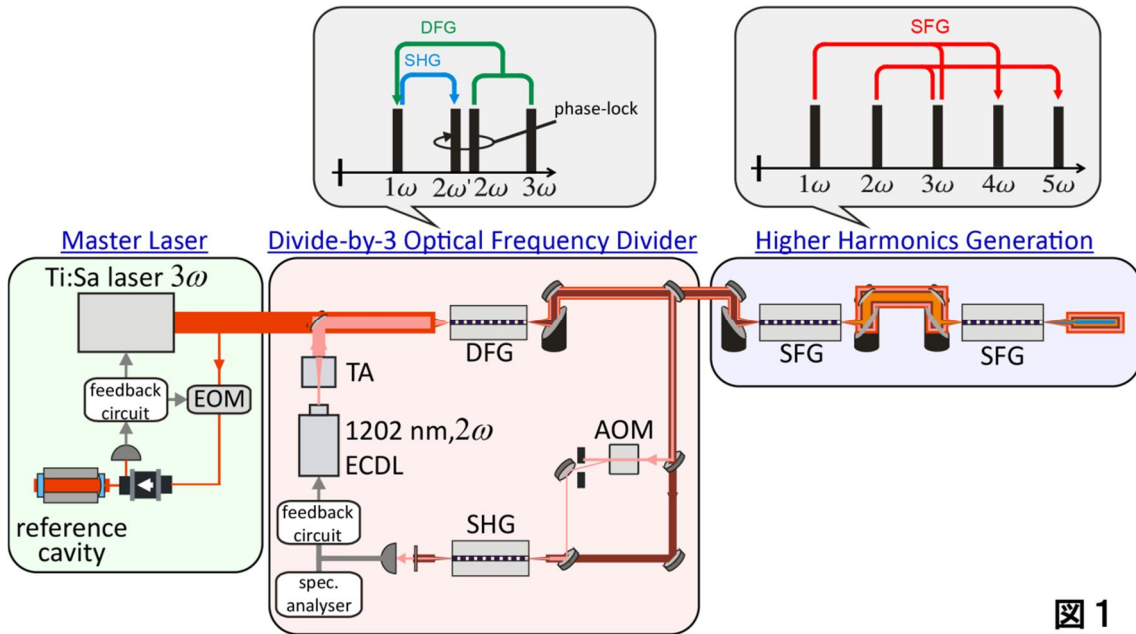


図 1

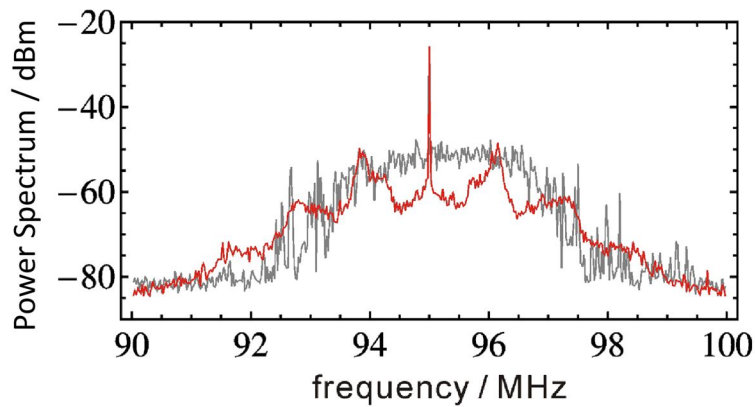


図 2

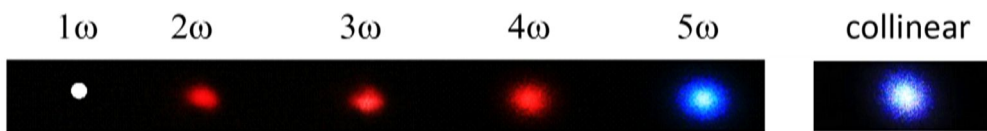


図 3

【任意光波形の連続生成】 生成した 5 本の位相同期高調波光系列の位相・振幅関係を操作することで、パルス列 (**sine-like, cosine-like**) やのこぎり波の 3 種類の光振幅波形を生成し、波形の安定性についても評価した。図 4 は光波形の生成システムの概要図である。波形生成は光波形の操作部と光波形の測定部で構成されている。波形操作部では光路上に挿入した分散性媒質の厚みを制御するという簡便な手法によって、位相・振幅関係を自在に操作し、多様な光波形を生成する。波形測定部では操作した光の位相振幅関係を実際に測定し、その結果から光波形を再構築する。図 5 は測定した振幅関係 (図 5 左) 位相関係 (図 5 中) そこから再構築した光波形 (図 5 右) を示したものである。図 5 右の黒線はターゲットの光波形であり、赤線は実際に生成した光波形である。**sine-pulse, cosine-pulse, sawtooth** の 3 種の光振幅波形を生成できた。このときの **cosine-pulse** のパル幅は **830** アト秒であった。図 6 は測定した波形の安定性を示したものである。**1** 時間の間隔で **2** 度、強度波形を測定した結果、ほとんど波形は変化していないことから、非常に安定して光波形を生成できていることがわかる。

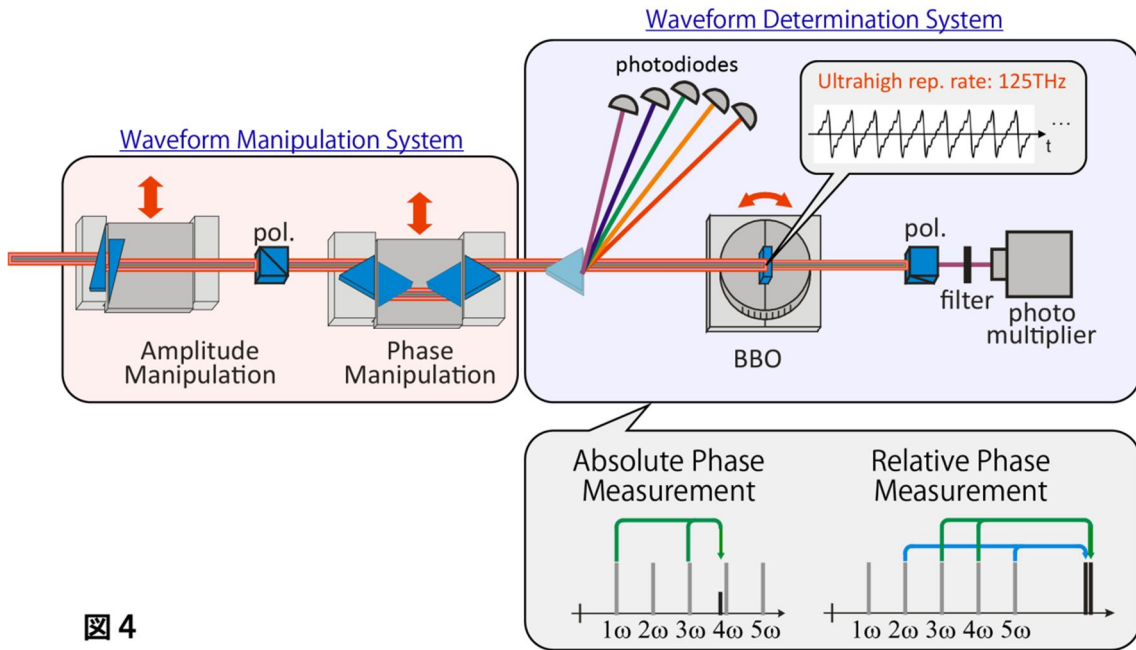


图 4

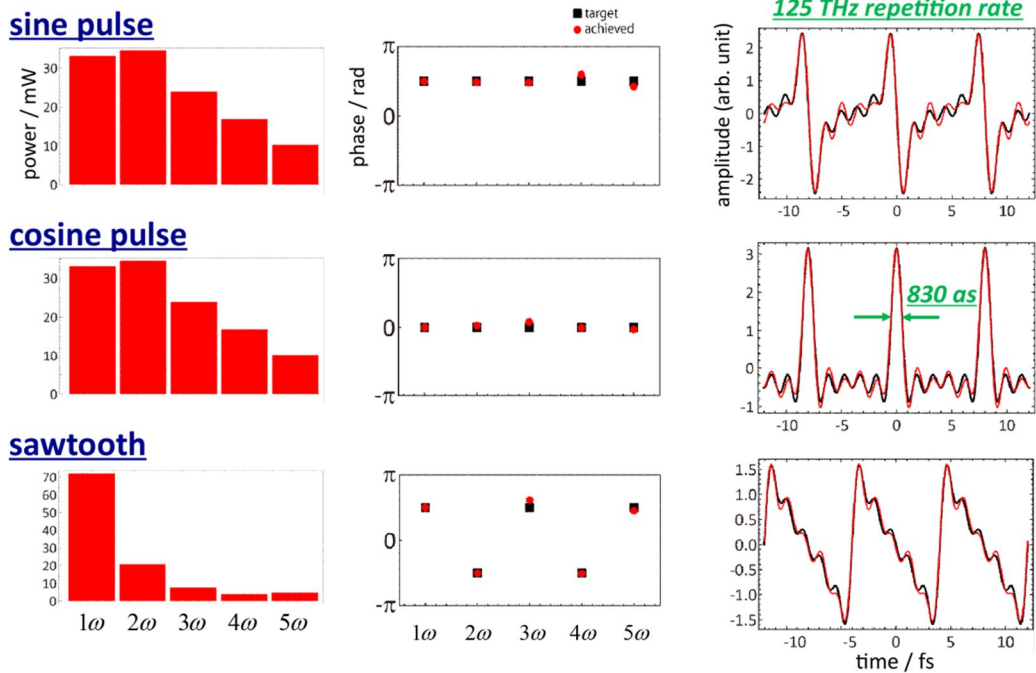


图 5

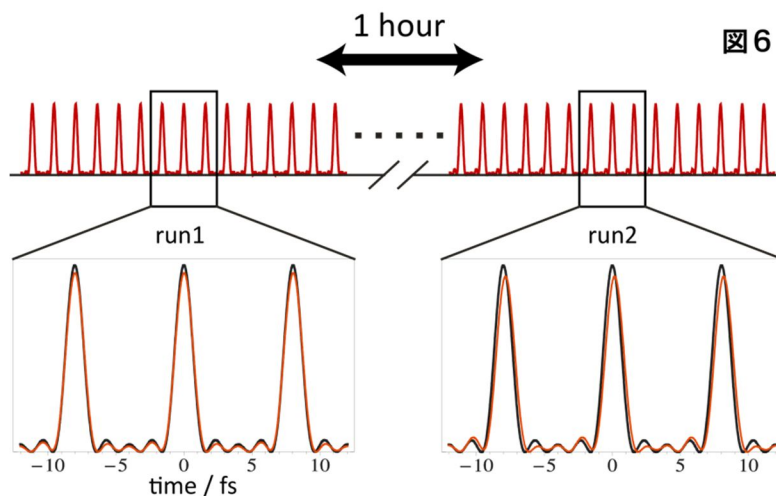


图 6

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 C. Ohae, J. Zheng, K. Ito, M. Suzuki, K. Minoshima, and M. Katsuragawa	4. 巻 26
2. 論文標題 Tailored Raman-resonant four-wave-mixing processes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 308869
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 C. Ohae, J. Zheng, M. Suzuki, K. Minoshima, and M. Katsuragawa	4. 巻 CLEO Technical Digest
2. 論文標題 Tailor-made Raman-resonant four-wave-mixing processes and their applications to optical devices	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The 2018 CLEO	6. 最初と最後の頁 FW4E.6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 C. Ohae, T. Gavara, K. Minoshima, and M. Katsuragawa	4. 巻 CLEO Technical Digest
2. 論文標題 Continuous Generation of Ultrafast Arbitrary Optical Waveform with a Repetition Rate exceeding 100 THz	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The 2018 CLEO	6. 最初と最後の頁 JTh2A.159
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 C. Zhang, K. Yoshii, D. Tregubov, C. Ohae, M. Suzuki, K. Minoshima, and M. Katsuragawa	4. 巻 CLEO Technical Digest
2. 論文標題 Generation of 1.4-fs ultrafast single-cycle pulses with a repetition rate exceeding 100 THz by arbitrarily manipulating amplitude and phase	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The 2018 CLEO	6. 最初と最後の頁 SF3N.3
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計20件(うち招待講演 6件/うち国際学会 12件)

1. 発表者名 W. Liu, C. Ohae, J. Zheng, M. Suzuki, K. Minoshima, M. Katsuragawa
2. 発表標題 Tailored generation of a highly-discrete Raman type comb
3. 学会等名 OPTICS & PHOTONICS International Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 C. Ohae, J. Zheng, K. Minoshima, M. Katsuragawa
2. 発表標題 Tailored nonlinear optical frequency mixing and its application to optical devices
3. 学会等名 Anacapri 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 C. Ohae, T. Gavara, K. Minoshima, and M. Katsuragawa
2. 発表標題 Continuous Generation of Ultrafast Arbitrary Optical Waveform with a Repetition Rate Exceeding 100 THz
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Tomura, C. Ohae, T. Gavara, K. Minoshima, and M. Katsuragawa
2. 発表標題 Arbitrary optical waveform at 125THz repetition rate and its application to ultrafast phenomena
3. 学会等名 International Conference on Ultrafast Optical Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Tomura, C. Ohae, and M. Katsuragawa
2. 発表標題 Arbitrary optical waveform generation at 125THz repetition rate
3. 学会等名 The fifth MIPT-LPI-UEC Joint Workshop on Atomic, Molecular, and Optical Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 D. Tregubov, C. Zhang, W. Liu, C. Ohae, M. Suzuki, K. Minoshima, M. Katsuragawa
2. 発表標題 Generation of ultrashort pulses by arbitrarily manipulating amplitudes and phases
3. 学会等名 the International Conference on Ultrafast Optical Science (UltraFastLight) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 C. Zhang, K. Yoshii, D. Tregubov, C. Ohae, M. Suzuki, K. Minoshima, and M. Katsuragawa
2. 発表標題 Generation of 1.4-fs ultrafast single-cycle pulses with a repetition rate exceeding 100 THz by arbitrarily manipulating amplitude and phase
3. 学会等名 The 2018 CLEO, CLEO Technical Digest (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Weiyong Liu, Chiaki Ohae, Jian Zheng, Masaru Suzuki, Kaoru Minoshima, and Masayuki Katsuragawa
2. 発表標題 Nonlinear Optical Process Tailored by Arbitrarily Manipulating Relative Phases among Relevant Electromagnetic Fields
3. 学会等名 10th international conference on photonics and applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Katsuragawa, C. Ohae, J. Zheng, W. Liu, M. Suzuki, and K. Minoshima
2. 発表標題 Tailored nonlinear optical frequency conversion; Toward high resolution spectroscopy in the vacuum ultraviolet wavelength region
3. 学会等名 the International Conference on Ultrafast Optical Science (UltraFastLight) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 C. Ohae, J. Zheng, K. Minoshima and M. Katsuragawa
2. 発表標題 Tailored optics with a highly-discrete optical frequency comb; toward high resolution nonlinear spectroscopy in the vacuum ultraviolet wavelength region
3. 学会等名 the VIII International Symposium on Modern Problems of Laser Physics (MPLP-2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Katsuragawa, J. Zheng, and C. Ohae
2. 発表標題 Novel route in nonlinear optical process
3. 学会等名 Quantum and Nonlinear Optics (QNO2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Katsuragawa, J. Zheng, C. Ohae
2. 発表標題 Tailor made nonlinear optical frequency mixing and its application to optical devices
3. 学会等名 48-th Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics (PQE-2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 隈元清哉, 長谷川健司, 渡邊哲人, 大饗千彰, 古川裕介, 桂川 眞幸
2. 発表標題 高品質に単一横モードを維持したレーザーの高出力化
3. 学会等名 レーザー学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大饗千彰, 鄭健, 劉衛永, Tregubov Dmitrii, 鈴木勝, 美濃島薫, 桂川眞幸
2. 発表標題 人為位相制御による非線形光波長変換の自在な操作
3. 学会等名 レーザー学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田原壯馬, 大饗千彰, Weiyong Liu, 桂川 眞幸
2. 発表標題 高ビーム品質高効率光パラメトリック増幅器の開発
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊 哲人, 長谷川 健司, 隈元 清哉, 大饗 千彰, 桂川 眞幸
2. 発表標題 LIDAR計測用二波長注入同期パルスレーザー
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Tomura, C. Ohae, T. Gavara, K. Minoshima, and M. Katsuragawa
2. 発表標題 任意連続光波形の生成とその応用
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Weiyong Liu, Chiaki Ohae, Jian Zheng, Masaru Suzuki, Kaoru Minoshima, and Masayuki Katsuragawa
2. 発表標題 Simple Technology to Freely Manipulating Nonlinear Frequency Conversion Processes
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 隈本清哉, 大饗千彰, 古川祐介, 桂川眞幸
2. 発表標題 単一縦横モード発振を維持したレーザーの高出力化
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大饗千彰, 吉井一倫, Gavara Trivikramarao, 美濃島薫, 桂川眞幸
2. 発表標題 光周波数の分周を軸にした光の極限制御
3. 学会等名 レーザー学会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

電気通信大学_教員基本データベース
<http://kjk.office.uec.ac.jp/Profiles/70/0006921/profile.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----