

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656054

研究課題名(和文) 反射型テラヘルツ偏光顕微鏡の開発

研究課題名(英文) Development of the reflection-type terahertz polarizing microscope

研究代表者

渡邊 紳一 (Watanabe, Shinichi)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：10376535

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、新しい非破壊検査技術として注目されているテラヘルツ波・イメージングについて、従来技術である「振幅」「位相」情報に加えて「偏光」情報を利用したイメージング装置を開発し、物質表面形状計測など新しい応用例を示すことに成功した。また研究代表者が発明した回転電気光学結晶法を改良し、装置の小型化、CCDカメラを用いた高速電場ベクトルイメージング、計測エラーの評価など、実用化に向けた様々な課題を克服することに成功した。

研究成果の概要(英文)：In the present study, we succeeded in the development of the imaging system of the terahertz wave using its polarization information in addition to its amplitude and phase information, and showing a new application of the surface topography measurement of materials. Moreover, we succeeded in the improvement of the spinning electro-optic sensor method that we invented, and overcoming various problems for the practical use such as downsizing the device, the high-speed imaging system using a CCD camera, and the evaluation of the measurement error.

研究分野：応用光学・量子工学

科研費の分科・細目：画像・光情報処理

キーワード：テラヘルツ/赤外材料・素子 計測工学 画像 リモートセンシング

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) を用いたイメージング技術は、可視光を透過しないプラスチック箱等の内部を観察できるため、振幅・位相スペクトル情報を用いた非破壊検査に活用されている。また、エネルギーが可視光よりも低く生体分子振動の共鳴周波数に近いことから、スペクトル計測で高感度に分子構造を特定できる手法としても利用されている。

ここでさらにテラヘルツ波の「偏光」情報が利用できれば、物質内部に存在する未知の物体表面にある細かい傷による散乱を利用した凹凸イメージング等が可能になることから、非破壊検査の有用性が高まると考えられた。さらに基礎科学計測においても、磁性体の歳差運動観察や、旋光性の違いを利用した生体分子観察など、テラヘルツ波の偏光情報を利用して得られる情報は多い。しかしながら、高い信号-ノイズ比 (S/N) をもった偏光イメージング計測系の構築が遅れており、満足いくイメージング評価技術として確立するには至っていなかった。

一方、研究代表者らは、本研究の開発開始前までに、高速・高精度でテラヘルツ波の偏光方向を決定できる手法 (「回転電気光学 (EO) 結晶法」) を発明し、従来の偏光決定手法に比べて圧倒的に速く計測できることを実証した (N. Yasumatsu, and S. Watanabe, Rev. Sci. Instrum. **83**, 023104 (2012).)。さらに「振幅」と「偏光」の情報を分離して計測できるため、テラヘルツ光の「振幅」がゆらいでも、「偏光」の決定精度は全く変わらないことも見出した。研究代表者らが実現した革新的な「速さ」と「安定性」を持った偏光決定手法を用いて、「実用的なテラヘルツ偏光イメージング装置」の開発が出来るのではないか、という着想が生まれ、本課題を提案し、開始することになった。

2. 研究の目的

本課題の目的は、研究代表者の発明した技術を活用し、テラヘルツ波の「偏光」情報の利用によって、従来の「振幅」・「位相」の変化情報を利用したイメージング装置では捉えられなかった材料情報を抽出すること、また、「使える反射型テラヘルツ偏光顕微鏡」を実現しテラヘルツ分析手法の一つとして定着させることを目的として開発を始めた。

3. 研究の方法

(1) 反射型テラヘルツ偏光顕微鏡の構築

フェムト秒レーザー再生増幅器を用いて反射型のテラヘルツ偏光顕微鏡の構築を行った。構築した装置の模式図を図 1 に示す。フェムト秒レーザー光源をビームサンプリ

ーによってポンプ光とプローブ光の二つのビームに分ける。ポンプ光を ZnTe 非線形光学結晶 (ZnTe1) に照射することでテラヘルツ波を発生させる。発生したテラヘルツ波は 1/4 波長板 (QWP) を透過することで楕円偏光となり、試料 (Sample) に照射される。サンプルから反射したテラヘルツ波は放物面鏡を介して検出用の ZnTe 結晶 (ZnTe2) に集光される。サンプルは X-Y ステージに取り付けられており、ラスタースキャン方式によってイメージング計測を行うことができる。

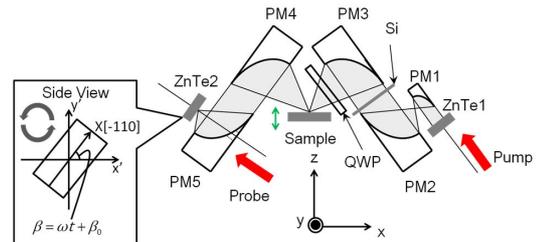


図 1 : 反射型テラヘルツ波偏光顕微鏡の実験装置模式図(産業財産権[1])。

研究代表者の方法の特徴は ZnTe2 をモーターに貼り付け回転させることで、プローブ光が ZnTe2 を透過した時に生じる偏光回転の様子を、ZnTe2 結晶角度の関数として解析することでテラヘルツ波の電場ベクトルの「大きさ」と「方向」の二つの情報を抽出することができることである。本方法を利用して、サンプルを反射したあとのテラヘルツ波の偏光回転の様子をイメージング計測した。

(2) 高繰り返しパルスレーザー光源を用いたテラヘルツ波偏光計測

実用的なテラヘルツ偏光イメージング装置を開発するために、高繰り返しフェムト秒レーザーをテラヘルツ波の発生と検出光源として用いることでテラヘルツ波電場ベクトル計測を行った。

(3) CCD カメラを用いたテラヘルツ波電場ベクトルイメージング装置の開発

高速なテラヘルツ波電場ベクトルイメージングを達成するために、CCD カメラと組み合わせたテラヘルツ電場ベクトルイメージング光学系の構築を行った。

(4) 回転電気光学結晶法の原理についての詳細な解析と検証実験

研究代表者の発明した手法の精度を詳しく検証するために、実験系を構築する際に用いる各種光学素子の角度合わせエラーが計測にどのように影響するかを調べた。また本手法の波動光学的な定式化を行うことで、テラヘルツ波検出時に常に問題となるテラヘ

ルツ波とプローブ光の位相不整合の効果が生じ、計測にどのように影響するかを理論と実験の両側面から詳細に研究した。

(5)電気光学変調器を用いた超高速テラヘルツ偏光スペクトル計測装置の開発

電気光学結晶を回転させる「回転電気光学結晶法」では、計測スピードは結晶の回転速度（およそ 100 Hz）で律速される。我々は回転速度に律速されない、電気光学変調器を用いたテラヘルツ波偏光スペクトル計測装置の開発を進めている。

4. 研究成果

(1)反射型テラヘルツ偏光顕微鏡による表面精密凹凸計測（参考文献[3],[5]：なお、本節の記述は研究代表者らが公表論文[3]において記述した内容を一部再録する。）

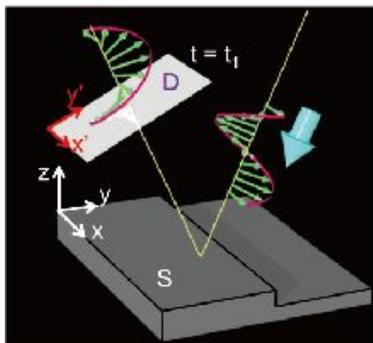


図2：反射型テラヘルツ波イメージング装置による凹凸計測の概念図[5]。

本項の成果を解説する前に、まずはテラヘルツ電場ベクトル計測による凹凸計測の原理について、図2を用いて説明する。凹凸のある試料表面に楕円偏波したテラヘルツ波パルス照射した場合、高さの違う2点から反射した電磁波の、ある決められた時刻における偏波方向はそれぞれ異なる。この偏波方向の違いを、電磁波の振動周期よりも短いパルス幅を持つレーザーパルスを用いて高精度に計測することで、試料の高さ情報を抽出することができる。

図3に、慶應義塾大学のペンマークのロゴを彫刻したアルミニウム板の深さ形状を計測した結果を示す。左図は、サンプルをデジタルカメラで撮影した画像であり、各点に記した数値は接触式厚み計で計測した相対深さを表す。一方、右図は、サンプルを反射した楕円偏波テラヘルツ波の偏波計測を通して得られた、各点における相対的な深さ情報を二次元イメージプロットしたものである。黒色の色の濃さが相対深さを表し、そのスケールはカラーバーで示されている。右図の二つの対角線構造の黒色の

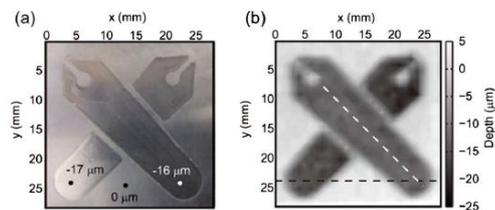


図3：アルミニウム切削加工部品の凹凸計測結果[5]。

濃さの違いから、1 μm 程度の切削深さの違いを明瞭に検出できていることがわかった。使用したテラヘルツ光の中心波長は $\lambda=600 \mu\text{m}$ であるが、最も感度の高い部分ではこの 1/1000 以下の精度の $\pm 250 \text{ nm}$ で試料の深さの違いを計測できていることが分かった。これは従来のテラヘルツ時間領域分光法によるテラヘルツ電場振幅の波形解析で実現する精度に比べ 10 倍程度高い精度であり、また干渉計の技術を用いて実現された精度とほぼ同程度である。

更に曲率をもつサンプルについても、同装置を用いて正しく凹凸計測ができることが分かった。

(2)高繰り返しパルスレーザー光源を用いたテラヘルツ波偏光計測装置の開発（参考文献[1],[4]：なお、本節の記述は研究代表者らが公表論文[4]において記述した内容を一部再録する。）

研究代表者らが 2012 年に「回転電気光学結晶法」を発表した時には、その実験デモンストレーション用の光源として、発生するテラヘルツ電場振幅の大きな再生増幅器を用いていた。しかしながら再生増幅器は極めてサイズが大きく可搬式の装置にすることができないため、将来的な応用展開に向けて弊害となっていた。申請者らは、小型テラヘルツ偏光イメージング装置の実現を目指し、本手法がファイバーレーザーなど小型の高繰り返しフェムト秒レーザーを用いても実現可能かについて検証した。

小型テラヘルツ波偏光計測装置の開発にあたり障害と考えられたのは、EO 結晶に残存する残留複屈折の影響であった。なぜならば、この方法で発生するテラヘルツ波の電場振幅の大きさは極めて小さく、観測される信号が残留複屈折に起因する信号に比べて 1/400 程度しかないためである。そこで研究代表者らは、Jiang らにより提案された差分信号処理方法[Z. P. Jiang, X. G. Xu, and X.-C. Zhang, Appl. Opt. **39**, 2982 (2000).]を参考に、テラヘルツ波が存在するときとしないときの差分信号処理を施した結果、微弱な信号を抽出することに成功し、再生増幅器で実験したときとほとんど変わらない精度で電場ベクトル計測ができることを確認した。

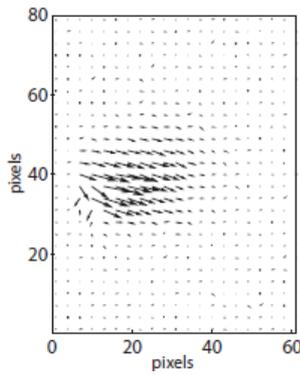


図4: CCD カメラを用いたテラヘルツ電場ベクトルイメージング(学会発表[10]の予稿より)。

(3) CCD カメラを用いたテラヘルツ波電場ベクトルイメージング装置の開発(学会発表[3],[7],[10]。なお、本節の記述は研究代表者らの発表[10]の予稿において記述した内容を一部再録する。)

テラヘルツ波偏光イメージング計測の高速化を図るため、CCD カメラを用いたテラヘルツ電場イメージング装置の開発を行った。光源に Ti:Sapphire 再生増幅器を用い、ZnTe 結晶の光整流法によって発生させたテラヘルツ光を 2 枚の Tsurupica レンズを通して検出用の ZnTe 結晶に導き、電気光学サンプリング法により検出を行った。検出用の ZnTe 結晶はモーターに固定して一定速度で回転させており、回転に伴ったテラヘルツ電場の検出強度変化を解析することで、テラヘルツ電場ベクトルを計測した。本装置による計測結果を図4 に示す。矢印の長さが電場の大きさを表し、その向きと併せて、検出用 ZnTe 結晶上におけるテラヘルツ電場ベクトルの二次元空間分布を表している。本装置の特徴は検出器に CCD カメラを用いている点にあり、その結果、80 × 61 ピクセルの電場ベクトルイメージングを最速 22 ミリ秒で実現することが可能となった。

(4) 回転電気光学結晶法の原理についての詳細な解析と検証実験

(4-1) 検出結晶中の残留複屈折のベクトル計測に与える影響についての考察と実験(参考文献[2],[4]：なお、本節の記述は研究代表者らが公表論文[4]において記述した内容を再録する。)

結晶角度に依存する残留複屈折の効果を取り入れた E0 サンプリング信号の定式化を行い、以下の結論を得た。

(1) E0 結晶に残留複屈折があるとき、E0 サンプリング法で用いる 1/4 波長板(QWP)の屈折率固有軸とウォラストンプリズム

(WP) 透過後のプローブ光偏光面のなす角度を 45° に正確に合わせた上で差分信号処理を行えば、残留複屈折に起因する偏波計測誤差はゼロとなる。

(2) 偏波計測誤差は、上記角度の 45° からの偏差と E0 結晶中の残留複屈折の大きさに依存すること。ただし大切なことは計測するテラヘルツ波の電場強度には依存しないことである。従って発生するテラヘルツ波の電場強度が小さい高繰り返しフェムト秒レーザーを用いたテラヘルツ偏波計測を行ってもデメリットは生じない。

(3) E0 結晶に残留複屈折が存在しなければ、QWP や WP の角度あわせを特に行わなくても、正確にテラヘルツ偏波計測ができる。

要約すると、「E0 サンプリング法で用いる QWP と WP の角度あわせを正確に行えば、残留複屈折に起因する信号は差分信号処理で完全に消し去ることができる。角度あわせが若干不正確でも、残留複屈折が小さい結晶を利用すれば偏波計測誤差を小さくできる。この結果はテラヘルツ電場の大きさによらない。」ということである。

(4-2) 検出結晶中の残留複屈折のベクトル計測に与える影響についての考察と実験(学会発表[1],[4]：なお、本節の記述は研究代表者らの発表[4]の予稿において記述した内容を一部再録する。)

回転電気光学結晶法と遅延ステージを組み合わせると波形計測を行えば、偏光スペクトル計測ができる。しかし、一般に非線形光学結晶中では、プローブ光(波長800 nm)の群屈折率とテラヘルツ波の屈折率が異なるために計

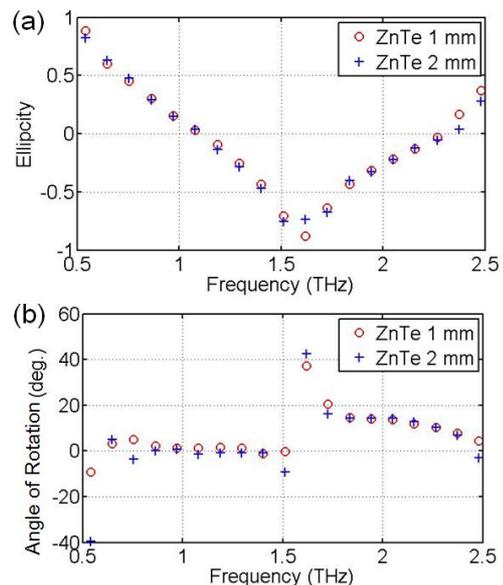


図5: 回転電気光学結晶法で計測した、1/4 波長板を透過させたテラヘルツ波の楕円率(a)と旋光角(b) (学会発表[4]の予稿の図を一部改変)。

測される電場波形が歪む。回転電気光学結晶法では偏光子を用いず楕円偏光のテラヘルツ波を直接結晶に入射するので、この位相不整合の効果が偏光スペクトル計測にどのような影響を与えるかについての考察を加える必要があった。そこで研究代表者らは周波数領域での光波混合から本手法の再定式化を行い、その結果、位相不整合があっても、計測されるテラヘルツ波の周波数ごとの楕円率と旋光角を正確に導くことができることを示した。

図5に実験検証の結果を示す。本実験では、まず直線偏光のテラヘルツ波を石英の複屈折を利用した0.5 THz用の1/4波長板に透過させた。透過したテラヘルツ波について、厚さの異なる2種類の(110)ZnTe結晶(1 mmと2 mm)を用いて回転EO結晶法による波形計測を行い、楕円率と旋光角を調べた。ZnTe結晶中では、プローブ光の群屈折率とテラヘルツ波の屈折率が異なるため、位相不整合の効果によって波形が歪み、厚さ1 mmと2 mmの検出信号は異なる波形となった。しかし、その場合でも同様の楕円率スペクトルと旋光角スペクトルが得られたことから、位相不整合の効果があっても楕円率スペクトルと旋光角スペクトル測定には影響を与えないことが分かった。

(5)電気光学変調器を用いた超高速テラヘルツ偏光スペクトル計測装置の開発(学会発表[2]: なお、本節の記述は研究代表者らの発表[2]の予稿において記述した内容を一部再録する。)

結晶の回転速度に律速されない新しいテラヘルツ電場ベクトル計測技術について開発を進めている。本手法では検出EO結晶は回転させずに固定し、EO結晶を透過したプローブ光を周波数 F で屈折率変調をかけたEO変調器に透過させ、更に1/4波長板とウォラストンプリズムを通すことでバランス信号検出を行う。また光学チョッパーを用いてテラヘルツ電場信号を周波数 f で変調する。私たちは、適切なEO結晶角度と変調条件の下で上記計測を行うと、バランス検出信号の $F \pm f$ 振動成分、および $2F \pm f$ 振動成分を抽出することで、テラヘルツ電場ベクトルの二つの直交する電場成分の大きさを求めることができ、その結果電場ベクトル計測ができることを見出した。

(6)まとめ

本研究は、研究代表者らが発明した「回転電気光学結晶法」を用いた実用的なテラヘルツ偏光イメージング装置を開発し、その応用研究を加速させるために始めた課題である。本挑戦の萌芽研究を通して、

- ・精密凹凸計測装置の実現(応用事例)
- ・小型装置の開発(手法)
- ・CCDイメージング装置の開発(手法)

- ・偏光計測の基礎理論の確立(理論)
- ・電気光学変調器を用いた更なる高速化(手法)

が達成され、世界に類を見ないテラヘルツ偏光計測装置・イメージング装置の実現が達成された。

今後は、本研究課題で開発した装置を活用し、などさまざまな物性計測に活かす研究を展開する。

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6件)

[1] S. Watanabe, N. Yasumatsu, K. Oguchi, M. Takeda, T. Suzuki, and T. Tachizaki, "Real-time terahertz time-domain polarization analyzer with 80-MHz repetition-rate femtosecond laser pulses," *Sensors* **13**, 3299-3312 (2013). (査読有)

[2] N. Yasumatsu, and S. Watanabe, "Robustness of electric field vector sensing of electromagnetic waves by analyzing crystal angle dependence of the electro-optic effect," *J. Opt. Soc. Am. B* **30**, 2940-2951 (2013). (査読有)

[3] 渡邊紳一、安松直弥、"テラヘルツ電磁波の偏波情報を用いた超高感度凹凸イメージング手法の開発," *検査技術* 3月号, 6-9 (2013). (査読無)

[4] 渡邊紳一、安松直弥、"回転電気光学結晶法によるテラヘルツ波の電場ベクトル計測技術," *テラヘルツテクノロジーフォーラム通信*, **11**, 2-5 (2013). (査読無)

[5] N. Yasumatsu, and S. Watanabe, "T-ray topography by time-domain polarimetry," *Opt. Lett.* **37**, 2706-2708 (2012). (査読有)

[6] 渡邊紳一、安松直弥、"回転検出結晶法によるテラヘルツ光の高速・精密偏光計測法の開発," *固体物理*, **47**, 737 (2012). (査読無)

[学会発表](計14件)

[1] 小口研一, 安松直弥, 渡邊紳一, "電気光学検出における楕円偏光テラヘルツ波の位相整合の検証", 日本物理学会第69回年次大会(東海大学) 29pPSA-59(2014年3月29日).

[2] 安松直弥, 渡邊紳一, "電気光学変調器

を用いた高速テラヘルツ電場ベクトル計測手法の開発", 第 61 回応用物理学会春季学術講演会 (青山学院大学) 18p-E17-3(2014 年 3 月 18 日).

[3] 佐々木学, 安松直弥, 立崎武弘, 渡邊紳二, "高ダイナミックレンジ CCD テラヘルツ電場ベクトルイメージングに向けた光学素子の角度最適化", 第 61 回応用物理学会春季学術講演会 (青山学院大学) 18p-E17-2(2014 年 3 月 18 日).

[4] 小口研一, 安松直弥, 渡邊紳一, "位相整合条件を考慮した回転電気光学結晶法の理論と検証実験", 第 61 回応用物理学会春季学術講演会 (青山学院大学) 18p-E17-1(2014 年 3 月 18 日).

[5] 渡邊紳一, "テラヘルツ偏波イメージング技術の開発と応用", 理研シンポジウム「先端光源と画像化・可視化技術の展開」(独立行政法人理化学研究所)(2013 年 12 月 11 日).

[6] 安松直弥, 渡邊紳一, "回転 E0 結晶法によるテラヘルツ電場ベクトル計測の口バラスト性の検証", 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 (同志社大学) 18a-A14-6(2013 年 9 月 18 日).

[7] M. Takeda, T. Tachizaki, N. Yasumatsu, S. Watanabe, "Terahertz electric-field vector camera," CLEO:2013 (San Jose, USA), CW1K.1 (June 12, 2013).

[8] K. Oguchi, N. Yasumatsu, M. Takeda, T. Tachizaki, and S. Watanabe, "An oscillator based real-time terahertz time-domain polarization measurement system with a spinning electro-optic crystal," International Workshop on Terahertz Science and Technology 2013 (OTST2013) W3C-4 (Kyoto, Japan), (April 1-5, 2013).

[9] 小口研一, 安松直弥, 竹田雅俊, 立崎武弘, 渡邊紳一, "高繰り返しフェムト秒レーザーを用いたテラヘルツ波偏光計測装置の開発", 第 60 回応用物理学会春季学術講演会 (神奈川工科大学) 29a-D1-3(2013 年 3 月 29 日).

[10] 竹田雅俊, 立崎武弘, 安松直弥, 渡邊紳一, "CCD カメラを用いたテラヘルツ電場ベクトルイメージング", 第 60 回応用物理学会春季学術講演会 (神奈川工科大学) 29a-D1-4(2013 年 3 月 29 日).

[11] N. Yasumatsu, and S. Watanabe, "Precise polarization measurements of terahertz electromagnetic waves with a

spinning electro-optic crystal: theory, experiments, and applications," International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT 2012) (Nara, Japan), (November 27-29, 2012).

[12] 安松直弥, 渡邊紳一, "テラヘルツ時間領域偏波分析による表面形状計測", 神奈川県ものづくり技術交流会 (神奈川県産業技術センター) (2012 年 11 月 8 日).

[13] 渡邊紳一, "テラヘルツ偏光情報を用いた高精度表面トポグラフィ画像計測", 日本光学会年次学術講演会 Optics and Photonics Japan, シンポジウム「偏光とイメージング」(タワーホール船堀) (2012 年 10 月 24 日).

[14] N. Yasumatsu, and S. Watanabe, "Terahertz profilometer by time-domain polarimetry," CLEO:2012 (San Jose, USA), CTu3B.7 (May 8, 2012).

〔産業財産権〕
出願状況 (計 1 件)

[1] 名称: 偏波解析装置、偏波解析方法、物性測定装置、及び物性測定方法
発明者: 渡邊紳一、安松直弥
権利者: 慶應義塾大学
種類: 特許
番号: PCT/JP2012/076146
出願年月日: 2012 年 10 月 9 日
国内外の別: 国外

取得状況 (計 0 件)

該当なし

〔その他〕
ホームページ等

<http://www.phys.keio.ac.jp/guidance/labs/watanabe/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者
渡邊 紳一 (WATANABE SHINICHI)
慶應義塾大学・理工学部・准教授
研究者番号: 10376535

(2) 研究分担者
該当なし

(3) 連携研究者
該当なし