

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560036

研究課題名(和文) テラヘルツ・スタンダードコム内蔵型周波数カウンターの開発

研究課題名(英文) Frequency counter based on terahertz standard frequency comb

研究代表者

横山 修子 (YOKOYAMA SHUKO)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・特任研究員

研究者番号：30437363

研究成果の概要(和文)：本研究では、独自に開発した『多周波ヘテロダイン光伝導検出』を用い、マイクロ波帯からテラヘルツ(THz)帯の広帯域に亘り絶対周波数が高精度に値付けされた『THz周波数の物差し』を生成し、これを内蔵する超精密なTHz周波数カウンターの開発を行った。装置は小型・安定・ロバスト等の実用性を重視しファイバーレーザーを光源として用いた。装置評価では、 2.4×10^{-11} の測定精度、1THzの測定帯域、数百nWのパワー検出限界を確認出来良好な結果を得た。

研究成果の概要(英文)：We have developed a high-accuracy and high-resolution terahertz(THz) electromagnetic wave frequency counter based on THz standard frequency comb, which consists of many accurate frequency lines extending from microwave region to THz region, utilizing our previously developed “multifrequency heterodyning photoconductive detection”. The system adopted a fiber laser as a light source to be small-size, stable and robust instrument for a practical use. Measurement precision of 2.4×10^{-11} , bandwidth of 1THz and minimum power limitation of a few hundreds of nanowatt have been achieved.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用光学・量子光工学

キーワード：光計測、テラヘルツ、光周波数コム、周波数標準、ファイバーレーザー

1 研究開始当初の背景

光波と電波の周波数境界に位置するテラヘルツ帯(THz帯：周波数=0.1～10THz、波長=30 μ m～3000 μ m)は、これまで良質なレーザー光源と高感度検出器が無かったため、未開拓な電磁波領域とされてきた。しかし、最近の安定な超短パルスレーザーの出現と超高速光技術の発達により、この領域の超短パルスの発生及び検出が常温で可能になり、

この領域の研究開発『THzテクノロジー』が加速している。国家基幹技術10大戦略に選定され今後10年で2兆円を超す経済波及効果が見込まれているTHzテクノロジーにおいて、その発展・拡大に伴いさまざまな測定量のトレーサビリティの整備が急がれている。中でも周波数は電磁波の計測において最も基本的な測定量であるが、光波や電波領域では確立された技術である周波数計測も、

THz 帯では十分に成熟した技術が無い。例えば、10THz 以上の領域に対しては干渉計測などの光学的手法を用い、またサブ THz (500GHz 以下) の領域に対してはヘテロダイン法など電気的手法を用いて対応してきた。しかし、近年の THz テクノロジーの急速な発展に伴い従来法での対応が困難になりつつあり、THz 帯全ての領域をカバーする THz 周波数計測技術、更には THz 周波数標準が強く望まれている。

一方、光波の領域ではフェムト秒レーザーの出力である『光周波数コム』(10THz 以上の広帯域に亘り一定間隔で櫛(コム)状に並んだ 10 万本以上の高安定な光周波数モード列)を正確に値付けされた『光周波数の物差し』と見立て、この物差しを『光周波数標準』とする事で広帯域に亘り超精密に周波数計測を行う研究が非常に注目されており、2005 年には関連技術を開発した研究者がノーベル物理学賞を受賞している。フェムト秒レーザーによる『光周波数コム』は非線形光学結晶等の様々な非線形過程を通して THz から紫外 (EUV) に亘るさまざまな帯域に変換する事ができ、それぞれの帯域において分光等の分野で新しい展開を見せつつある。研究代表者らは、光伝導アンテナを用いて『光周波数コム』を THz 領域に変換し『THz 周波数コム』を生成する事により高精度・高分解で THz 分光・計測を行い一定の成果を得た。

[1,2] 本研究では、これを更に発展させ、光の領域で成功をおさめた『光周波数標準』の概念を THz 領域に拡張し、マイクロ波帯から THz 帯の広帯域に亘り、絶対周波数が高精度に値付けされた『THz 周波数の物差し』による『THz 周波数標準』を確立し、これを内蔵する事によりマイクロ波帯から THz 帯の広帯域を一挙にカバーする超精密な THz 周波数カウンターの開発を行った。

[1]S.Yokoyama, T.Yasui and T.Araki "Terahertz spectrum analyzer based on a terahertz frequency comb", Opt. Express, Vol.16, No.17,13052(2008)

[2]T.Yasui, S.Yokoyama and T.Araki "Terahertz frequency comb by multifrequency-heterodyning photoconductive detection for high-accuracy, high-resolution terahertz spectroscopy", Appl. Phys. Lett., Vol.88,241104(2006)

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者らが独自に開発した『多周波ヘテロダイン光伝導検出』[1,2]を用いることにより、マイクロ波帯から THz 帯の広帯域に亘り絶対周波数が高精度に値付けされた『テラヘルツ (THz) 周波数の物差し』を生成し、これを内蔵する超精密な THz 周波数カウンターの開発を行う。

ここで、レーザー光源にモード同期ファイバーレーザーを用いることにより、光源部分

の小型化が可能になる。さらに、レーザーと THz 検出用光伝導アンテナを光ファイバーで直接カップリングすることにより、計測装置に小型・安定・ロバスト・メンテナンスフリー等の特徴を付与することが可能となる。そこで、本研究では THz 周波数カウンターの光源にファイバーレーザーを用いる事により実用的な装置化を目指す。

3. 研究の方法

(1) 測定原理

『多周波ヘテロダイン光伝導検出』の測定原理を図 1、2 に示す。多周波ヘテロダイン光伝導検出ではフェムト秒レーザー光でトリガされた光伝導アンテナ (PCA: photoconductive antenna) 内に誘起されるフォトキャリア THz コム (PC-THz コム) を THz 領域の周波数物差しとする。PCA は被測定 CW-THz 波の検出器兼ミキサーとして用いられ、PC-THz コムは TH 領域をフルカバー可能な多周波局部発振器として機能する。このようにヘテロダイン検出器として PCA を利用することにより、室温環境下での高感度・広帯域のスペクトル感度が可能となる。

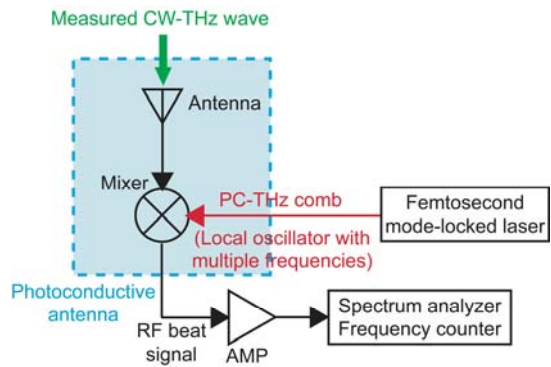


図 1 THz 周波数カウンターの等価回路

図 2(a) に示すように、フェムト秒レーザー光が PCA アンテナギャップに入射される際の PCA 内でのスペクトルの様子を図 2(b) に示す。モード同期周波数 f のフェムト秒レーザー光から出力されたプローブ光パルス列は周波数領域では図 2(b) 上図の様な間隔 f の光周波数コムを構成する。PCA がこのパルス列でトリガーされると、フォトキャリアが瞬時的に PCA 内に生成・消滅するが、その時間関数を $N(t)$ と定義すると、 $N(t)$ のフーリエ変換である $N(\omega)$ もまたコムスペクトル (PC-THz コム) を示す (図 2(b) の中段)。PC-THz コムの生成は PCA を介した光コムの超広帯域復調と見なされるので、光コムのコム間隔 f は間隔の変化なく THz 領域までダウンコンバートされる。その結果の PC-THz コムはオフセット周波数を有しない高調波コムとなり、モード同期周波数の基本波成分 f と高調波成分群 $2f, 3f, \dots, nf$ から構成される。これが、オフセッ

ト周波数を有する光コムとの大きな違いであり、THz コムの安定化も含めて単純かつ実用的な THz 周波数標準の構築を可能にする。

次に、プローブ光によって PC-THz コムが誘起された PCA 検出器に被測定 CW-THz 波(時間関数: $E_{THz}(t)$ 、周波数関数: $E_{THz}(\omega)$)が入射される場合を考える。フォトキャリア $N(t)$ は $E_{THz}(t)$ によって加速され、 $N(t)$ と $E_{THz}(t)$ の積で表される過渡光電流 $J(t)$ が検出される。時間領域における $J(t)$ の、 $N(t)$ と $E_{THz}(t)$ の積の関係は、周波数領域ではコンボリューション関係になるので、 $J(t)$ をフーリエ変換した $J(\omega)$ は、図 2(b) 下段で表されるように、CW-THz 波 $E_{THz}(\omega)$ と PC-THz コム $N(\omega)$ のコンボリューションで与えられる。これを光伝導ミキシングと呼ぶ。このような PCA における光伝導ミキシング過程は、CW-THz 波と PC-THz コム間のビート信号群を RF 帯に生成する。ここで、最も低周波のビート信号に注目する。ビート信号(周波数 f_b) は CW-THz 波(周波数 f_x) とそれに最隣接した m 次のコムモード(周波数 mf) のミキシングによって生成しているため、 f_b 値は以下のように与えられる。

$$f_b = |f_x - mf| \quad (1)$$

それ故、 m の次数と $f_x - mf$ の符号が測定できれば、 f_x が決定できる。 m の次数と $f_x - mf$ の符号を決定するためには、レーザー共振器長の調節によりモード同期周波数を f から $f + \delta f$ に変化させる。この結果、ビート周波数は $f_b + \delta f_b$ に変化する。 δf_b と $m \delta f$ は等しいので、 m の次数は下記のように決定される。

$$m = \frac{|\delta f_b|}{|\delta f|} \quad (2)$$

$\delta f_b / \delta f$ の符号は、 $f_x - mf$ の符号の反転となる。最終的に、被測定 CW-THz 波の絶対周波数は、下記の式から、 f 、 f_b 、 δf_b 、 δf を測定することによって決定できる。

$$f_x = mf + f_b \quad (\delta f_b / \delta f < 0) \quad (3a)$$

$$f_x = mf - f_b \quad (\delta f_b / \delta f > 0) \quad (3b)$$

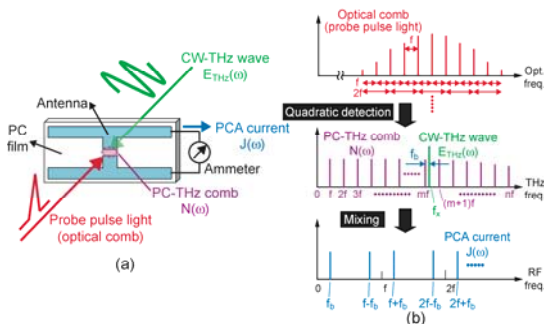


図 2 『多周波ヘテロダイン光伝導検出』の測定原理 (a) 光伝導アンテナ模式図 (b) 入出力信号スペクトル

(2) 実験装置

図 3 に、THz 周波数カウンターの装置図を示す。

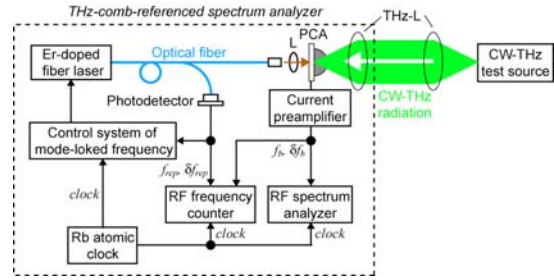


図 3 THz 周波数カウンター装置

PCA 内に PC-THz コムを生成するため、プローブレザーとしてモード同期フェムト秒ファイバレーザを用いる。モード同期周波数 f は、ルビジウム原子時計を基準としたレーザー制御システムによって、ルビジウム原子時計と同程度まで安定化されている。その結果、ルビジウム原子時計と等価な PC-THz コムが PCA 内に生成される。

テストソースからの被測定 CW-THz 波は、プローブ光入射方向と反対に取り付けられた半球シリコンレンズを介して、PCA に入射される。CW-THz 波と PC-THz コム間での光伝導ミキシングにより、PCA から微弱電流信号が出力される。出力電流信号はアンプで増幅された後、RF スペアナで周波数値とスペクトル形状を測定する。モード同期周波数 f が周波数カウンターで測定される。RF スペアナと周波数カウンターにはルビジウム原子時計を外部基準として与えている。

4. 研究成果

THz 周波数カウンターの性能を評価するため、既知の THz 周波数生成が可能な (1) アクティブ周波数通倍器を用いたテストソース、変動する THz 周波数観測の為 (2) 中赤 CW レーザーのフォトミキシングによるテストソース、及び観測可能な周波数帯域を調べる為 (3) THz コムテストソースの 3 つを用い実験を行った。

(1) アクティブ周波数通倍器テストソース

THz 周波数カウンターの測定精度を評価する為、マイクロ波周波数シンセサイザーの出力をアクティブ周波数通倍器で 6 通倍した既知の THz 周波数生成可能なテストソースを用いた。周波数シンセサイザーはルビジウム原子時計に同期させている。PCA から出力された電流信号は広帯域アンプで増幅され、RF スペアナで測定された。図 4 は、テストソース周波数を 100,000,000,000Hz、レーザーモード同期周波数を 56,122,206Hz に設定した時の CW-THz 波と PC-THz コム間のビート信号 f_b である。

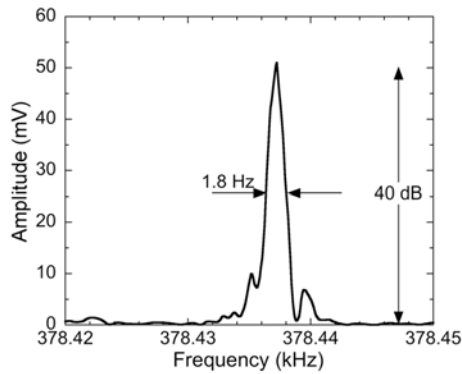


図4 テストソース CW-THz 波と PC-THz コム間のビート信号 fb

ビート信号の線幅は 1.8Hz であった。これより、PC-THz コムの各モードの線幅が十分に狭く、これを用いた高精度周波数計測が可能である事が分かった。一方、ビート信号の測定 SN 比は 40dB が得られている。テストソースの平均パワーが 2.5mW(4dBm)であるので、検出限界パワーは 250nW(-36dBm)と考えられる。

テストソースの絶対周波数を決定するためには、モード同期周波数をチューニングしながらビート周波数の変化を測定する必要がある。初期モード同期周波数を 56, 122, 206. 03Hz に設定した時の最低次ビート信号を RF スペアナで計測した結果を図 5 に青色で示す。この時のビート周波数は 356, 156. 00Hz であった。次に、モード同期周波数を、レーザー制御システムを用いて図 5 の赤色で示すごとく $\delta f_{rep}=25\text{Hz}$ だけ変化させ 56, 122, 231. 03Hz に設定した。これによりビート周波数は $\delta f_b=44, 549. 00\text{Hz}$ 変化した。これらの値を式(2)に代入する事によりモード次数 m は以下の様に求められる。

$$m = \frac{|\delta f_b|}{|\delta f|} = \frac{44,549.00}{25.00} = 1781.96 \approx 1782 \quad (4)$$

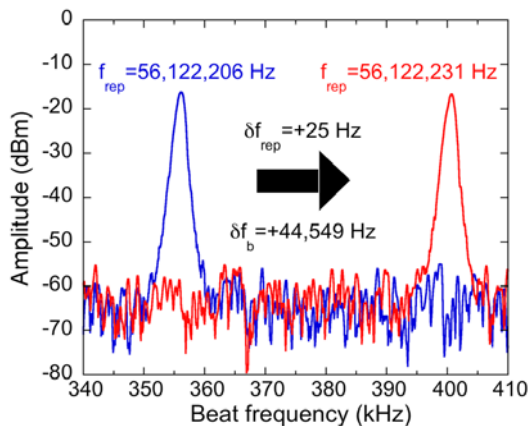


図5 モード同期周波数チューニング時のビート周波数の変化
また、 $\delta f_b / \delta f$ の符号が正である事より

テストソースの絶対周波数 f_x は、式 3(a) を使って、以下のように決定された。

$$\begin{aligned} f_x &= mf + f_b \\ &= 1782 \times 56, 122, 206. 03 + 356, 156. 00 \\ &= 100, 009, 414, 989. 46 \text{ Hz.} \quad (5) \end{aligned}$$

テストソースの設定周波数は 100, 009, 414, 988. 90Hz であるので、測定値のエラーはわずか 0. 56Hz である。

次に、テストソースの周波数を 75GHz から 110GHz まで 5GHz 刻みでチューニングしながら絶対周波数を測定した。THz スペアナの測定精度を設定値に対する測定誤差と定義すると、各周波数における測定精度は図 6 の様になった。75GHz から 110GHz までの平均測定精度は $2. 4 \times 10^{-11}$ であった。

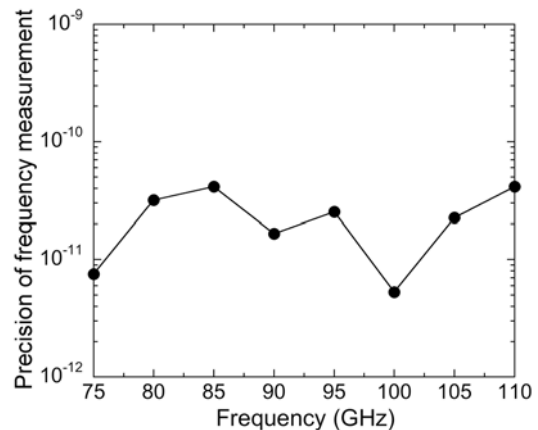


図6 各周波数における測定精度

(2) 中赤 CW レーザ-フォトミキシングテストソース

THz 周波数カウンターでの変動する THz 周波数観測の為、1550nm 外部共振器型周波

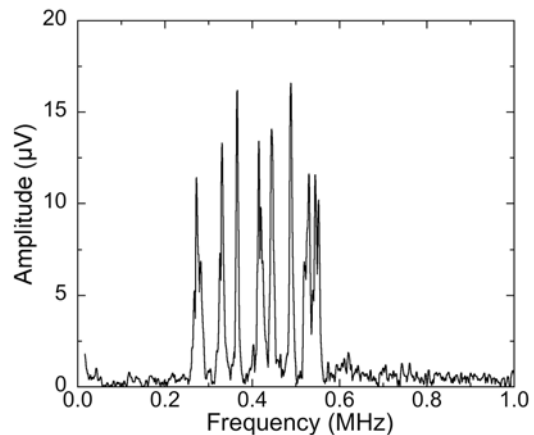


図7 実時間観測された THz 波の周波数変動

数可変半導体レーザー-2 台の出力を単一行キャリアフォトダイオード(UTC-PD)でフォトミキシングしたテストソースを用いて実験を行った。2 台の半導体レーザーは周波数制御されておらず、生成された

THz 波は周波数約 120GHz, 出力 $100\mu\text{W}$ であった。観測されたビート信号の変動を図 7 に示す。1MHz の範囲で激しく変動するスペクトルを実時間で観測する事が出来た。

(3) THz コムテストソース

THz 周波数カウンターの観測可能な周波数帯域を調べる為、サブ THz~THz 領域において広帯域な櫛の波状離散マルチスペクトルを有する電磁波 THz コムの計測を行った。電磁波 THz コムは、別途準備したフェムト秒ファイバーレーザーから出力された光コムを、非線形光学結晶で波長変換した後、THz 発生用光伝導アンテナに入射することにより発生させた。測定の結果、開発した THz 周波数カウンターが少なくとも 1THz まではスペクトル感度を有することを確認した。

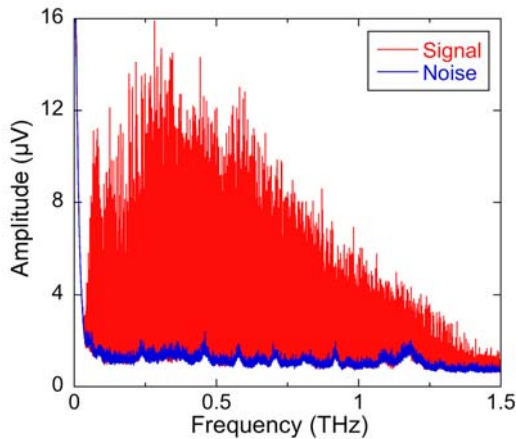


図 8 電磁波 THz コム

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① T. Yasui, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, T. Nagatsuma, and T. Araki, “Terahertz frequency metrology based on frequency comb”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 17, 191-201, 2011, 査読有.
- ② T. Yasui, Y. Kabetani, Y. Ohgi, S. Yokoyama, and T. Araki, “Absolute distance measurement of optically rough objects using asynchronous-optical-sampling terahertz impulse ranging”, *Applied Optics*, 49, 5262-5270, 2010, 査読有.
- ③ T. Yasui, M. Nose, A. Ihara, K. Kawamoto, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, and T. Araki, “Fiber-based, hybrid terahertz spectrometer using dual fiber combs”, *Optics Letters*, 35, 1689-1691, 2010, 査読有.
- ④ T. Yasui, H. Takahashi, Y. Iwamoto, H. Inaba, and K. Minoshima, “Continuously tunable, phase-locked, continuous-wave terahertz generator based on photomixing of two continuous-wave lasers locked to two independent optical combs”, *Journal of Applied Physics*, 107, 033111, 2010, 査読有.
- ⑤ T. Yasui, R. Nakamura, K. Kawamoto, A. Ihara, Y. Fujimoto, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, T. Nagatsuma, and T. Araki, “Real-time monitoring of continuous-wave terahertz radiation using a fiber-based, terahertz-comb-referenced spectrum analyzer”, *Optics Express*, 17, 17034-17043, 2009, 査読有.
- ⑥ S. Yokoyama, T. Yokoyama, Y. Hagihara, T. Araki, and T. Yasui, “A distance meter using a terahertz intermode beat in an optical frequency comb”, *Optics Express*, 17, 17324-17337, 2009, 査読有.

[学会発表] (計 5 件)

- ① T. Yasui, M. Nose, K. Kawamoto, S. Yokoyama, H. Inaba (AIST), K. Minoshima (AIST), T. Araki, “Observation of Terahertz Frequency Comb by Fiber-Based, Asynchronous-Optical-Sampling THz-TDS”, CLEO/QELS and PhAST, 2010 May 16-21, San Jose, USA
- ② T. Yasui, Y. Ohgi, Y. Kabetani, S. Yokoyama, and T. Araki, “Absolute Distance Measurement with Asynchronous-Optical-Sampling Terahertz Impulse Radar”, CLEO/QELS and PhAST, 2010 May 16-21, San Jose, USA
- ③ M. Fujio, R. Nakamura, S. Yokoyama, T. Yasui, and T. Araki, “Phase measurement of tunable CW-THz radiation at multiple frequencies based on photoconductive mixing with terahertz frequency comb”, 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz2009), 2009 Sep. 21-25, Busan, Korea
- ④ Y. Ohgi, Y. Kabetani, T. Yasui, S. Yokoyama, and T. Araki, “Asynchronous optical sampling, terahertz impulse radar”, 8th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Pacific Rim 2009), 2009 Aug. 30th - Sep. 3, Shanghai, China,

- ⑤ T. Yasui, R. Nakamura, A. Ihara, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, and T. Araki, "Terahertz spectrum analyzer for precise frequency measurement of CW THz source", International Workshop on Terahertz Science and Technology (OTST2009), 2009 March 7-11, Santa Barbara, USA

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

①

名称：超高分解テラヘルツ分光計測装置
発明者：安井武史，荒木勉，横山修子，野瀬昌城，北岸恵子
権利者：大阪大学，大塚電子
種類：特許
番号：特願 2010-112723
出願年月日：2010/5/16
国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

http://sml.me.es.osaka-u.ac.jp/araki_lab/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山 修子 (YOKOYAMA SHUKO)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・特任研究員
研究者番号：30437363

(2) 研究分担者

安井 武史 (YASUI TAKESHI)
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授
研究者番号：70314408

荒木 勉 (ARAKI TSUTOMU)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
研究者番号：50136214