



光コムを用いた新しい分光エリプソメトリー法を開発 ～高速・精密・堅牢な薄膜分析が可能に～

ポイント

- 薄膜は、物質に電氣的・機械的・光学的な機能や付加価値を与えるため注目されているが、その特徴を明らかにするには精密な薄膜分析が求められている。
- 本研究では、産総研が開発した高性能な光コム装置と、徳島大学が考案した光の偏光を計測する新しい方法を組み合わせ、これまでになく高速・精密で再現性の良い薄膜解析法を実現した。
- 機能性薄膜や光学材料の静的・動的特性の評価などへの応用が期待される。

科学技術振興機構（JST）の戦略的創造研究推進事業において、徳島大学の南川 丈夫 講師、安井 武史 教授、および産業技術総合研究所（産総研）の大久保 章 主任研究員、稲場 肇 研究グループ長らの研究グループは、高い制御性を持ち、光の波長、強度、位相が精密に定まったレーザー光源（光コム）を用いた新しい薄膜分析法を開発しました。

薄膜（注1）は、物質に電氣的・機械的・光学的な機能や付加価値を与えるため注目されていますが、それらの特徴を明らかにするには高精度な薄膜分析が必要です。そのためさまざまな手法が提案されていますが、その中でも光の特徴（波長、強度、位相、偏光など）を利用した分光エリプソメトリー法（注2）が広く応用されてきました。しかし従来の分光エリプソメトリー法では、光の特徴を計測するために機械的・電氣的な光の変調が必要であり、機械的振動や温度特性などの影響で、計測時間、安定性、堅牢性、精度などに制限が生じるという課題がありました。また、薄膜分析では、波長が異なる多数の光を用いることで分析可能な情報が飛躍的に増えますが、従来法では光検出装置の波長分解能、変調器の波長依存性などによる制限が生じ、改善が求められていました。

そこで研究グループは、産総研が開発した高性能な光コム光源と、徳島大学が考案した光の偏光を計測する新しい方法を組み合わせ、機械的・電氣的な光の変調を必要としない、光学材料や薄膜を解析・評価するための新たなエリプソメトリー法を開発・実証しました。本手法は、機能性薄膜や光学材料の高精度な特性評価、高速性を生かした材料の動的特性評価など幅広い応用が期待されます。

本研究成果は、2017年9月20日（英国時間）にネイチャー・パブリッシング・グループ（NPG）の電子ジャーナル「Nature Communications」で公開されます。

本成果は、以下の事業・研究プロジェクトによって得られました。
科学技術振興機構（JST） 戦略的創造研究推進事業 総括実施型研究（ERATO）

研究プロジェクト：「徳島知的光シンセサイザプロジェクト」

研究総括：美濃島 薫（電気通信大学 情報理工学研究科 教授）

研究期間：平成25年10月～平成31年3月

光波の時間、空間、周波数、位相、強度、偏光など全てのパラメーターを自在に操作でき、さまざまな応用に使えるところまで進化した知的光源を開発し、その未踏な応用分野を開拓することを目標としています。

<研究の背景と経緯>

薄膜分析は、薄膜の特徴を明らかにし、その機能を制御する上で重要です。そのため、高精度な薄膜分析を実現するさまざまな手法が提案されていますが、その中でも光の特徴（波長・強度・位相・偏光など）を利用した分光エリプソメトリー法が広く利用されています（図1）。この方法では、薄膜に光を入射し、入射光と反射光が作る面（入射面）に平行な偏光（注3）成分（p 偏光）と垂直な偏光成分（s 偏光）で生じるわずかな光の特徴の違いを精密に分析することで、薄膜の特性を明らかにします。

従来の分光エリプソメトリー法では、各偏光成分の光の特徴を得るために機械的、あるいは電氣的な光の変調が必要となります。この変調には、機械的振動や温度特性などの影響で、計測時間・安定性・堅牢性・精度などに制限があるという課題がありました。また、分光エリプソメトリー法では光の波長情報を用いることで分析可能な薄膜の特徴が飛躍的に増えますが、従来法では光検出装置の波長分解能、変調器の波長依存性などによる制限が生じ、改善が求められていました。

<研究の内容>

本研究グループは、光の波長や位相が高度に制御され、広い波長帯域を持つレーザー光源（光コム）を活用することで、分光エリプソメトリー法で計測する光の特徴を機械的・電氣的変調を行わずに高速、精密、かつ堅牢に計測可能な新たな手法を開発しました。

光コムは、非常に波長幅の狭い光が等間隔に櫛の歯状に並んだ広帯域のスペクトル群で構成される光源です（図2）。光コムの櫛1本1本の波長やその位相関係は極めて高精度に制御され、その強度も安定しています。そのため、光コム光源を2台用意し、空間的に重ね合わせてうなり信号（注4）を計測することで、それぞれの波長、位相、強度といった光の特徴を、機械的・電氣的変調を加えることなく得ることが可能です（図3）。

そこで本研究グループは、これまでに産総研が開発してきた高精度な光コム光源を利用し、徳島大学が考案した分光エリプソメトリー解析法に適用する新たな手法の開発に取り組みました。その結果、従来の分光器を用いた分光エリプソメトリー法では0.1～0.01ナノメートル程度であった波長分解能が、本手法により1.2x10

⁻⁵ ナノメートルに向上し、より精密な分光エリプソメトリー法が実現できることが示されました。さらに本研究では、原理検証実験として、複屈折性光学材料（図4）および光学薄膜（図5）の計測をし、機械的・電気的変調を行わなくても高速・精密に分光エリプソメトリー法による分析が可能であることを明らかにしました。

本研究のポイントは、分光エリプソメトリー法で必要な光の特徴（特に光の位相）を2台の光コムのような信号として計測した点にあります。光は、非常に高い周波数（数百テラヘルツ）であることから、従来法では光の時間波形を直接計測できません。そのため、光の位相に相当する情報を光の強度に変換することで計測しており、その過程で機械的・電気的変調を必要としていました。本研究で用いた光コムは、光の周波数を光のうなりという電氣的に計測可能なRF周波数（数十メガヘルツ）に変換するため、光の時間波形を直接計測することが可能です。これにより、分光エリプソメトリー法で必要な光の強度や位相などの特徴を、直接取得することに成功しました。この光コムを用いた光周波数からRF周波数への周波数リンク（注5）を活用することにより、分光エリプソメトリー法を飛躍的に進化させる光学的手法の開発に成功しました。

<今後の展開>

光コムを用いた新しい分光エリプソメトリー法には、機械的・電気的変調を必要としないため堅牢性がある、波長分解能が高い、高速で測定できるなどの特徴があります。そのため、これらの特徴を生かして機能性薄膜や光学材料の静的・動的評価などの応用が可能です。また、本手法は原理的にさまざまな波長領域に展開することができるため、本手法の波長分解能が高いことを利用して、紫外線、赤外線、テラヘルツ領域など、材料の特性が鋭敏に変化する波長領域での応用も期待されます。さらに材料表面性状評価などへの応用も期待されます。このように、本研究成果は材料特性評価のための基礎技術となり、今後の機能性薄膜を含む材料開発へ大きく寄与するものと期待されます。

<参考図>

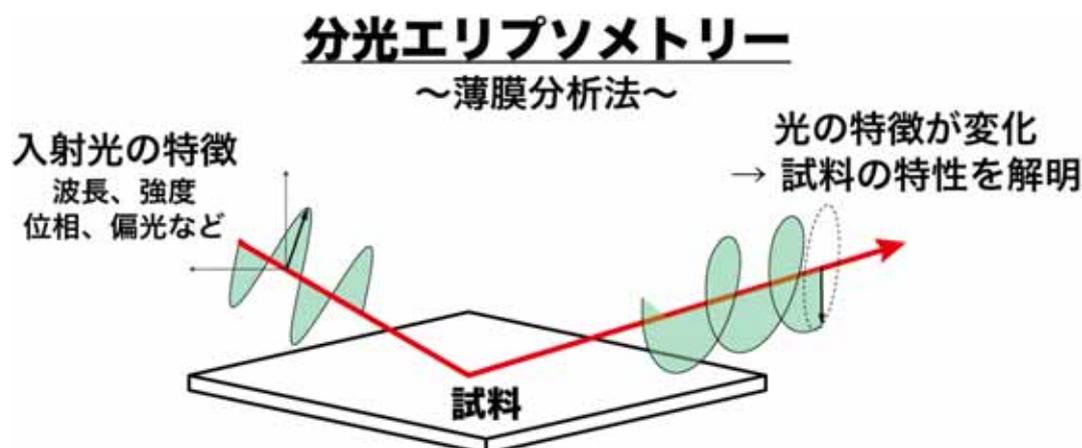


図1 分光エリプソメトリー法 ～薄膜分析法～

入射光の偏光状態をさまざまに変化させ、試料を通った光の偏光状態の変化から、試

料の特性を解析して解明する分析法で、膜厚値（単層膜、多層膜）、屈折率と消衰係数（注6）など、薄膜の物理特性を取得できる有用な計測手段です。

光コム

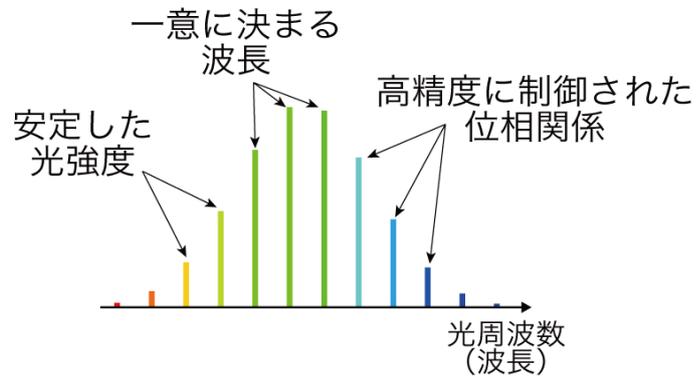
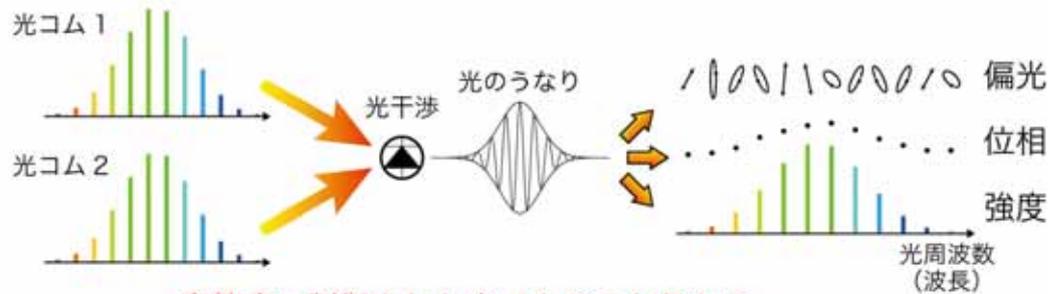


図2 光コム ～高度に制御された極限的光源～

光コムのスペクトル（周波数領域における波形）は櫛（Comb : コム）のような形をしています。櫛の間隔と位置は、原子時計や高安定レーザーの周波数を基準とすることで高い精度で制御されているので、櫛1本1本の周波数は安定で、かつ一意に定められます。

光コムで「光の特徴」を得る



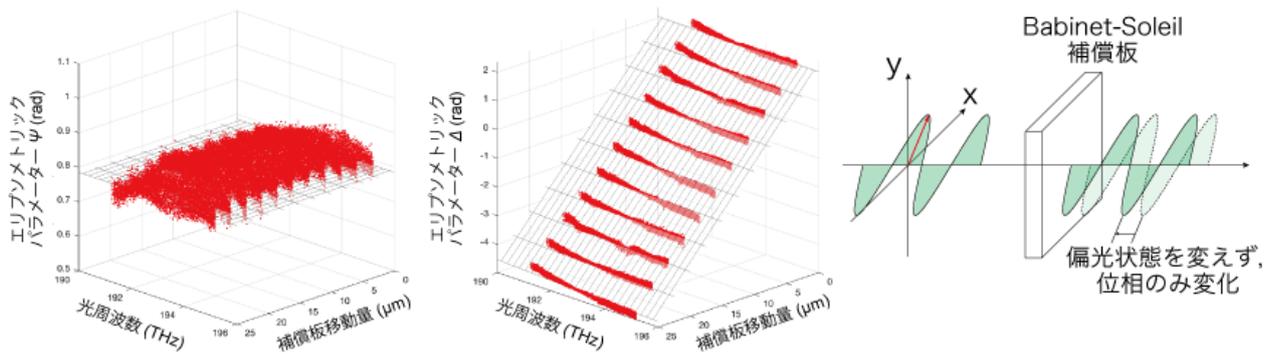
高精度に制御された光コムのうなりから、
光の特徴（波長・強度・位相・偏光）が得られる

この光の特徴から薄膜分析（分光エリプソメトリー法）を行う

図3 本技術の原理：光コムを用いた光の特徴の取得原理

この光の特徴を用いて分光エリプソメトリー法を行います。

a. Babinet-Soleil 補償板



b. 高次波長板

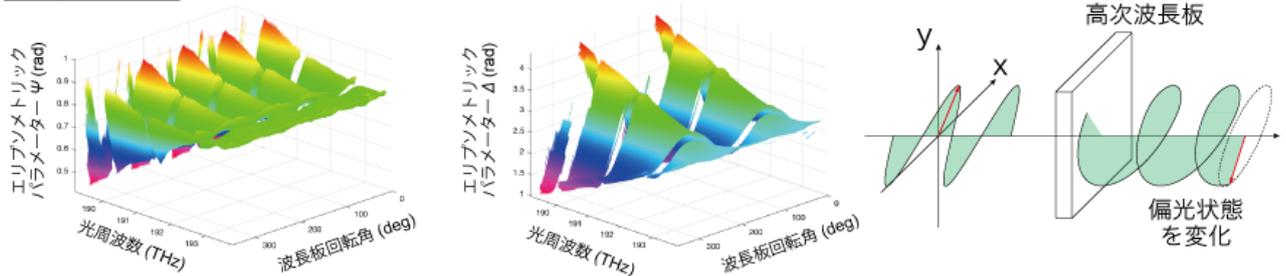


図4 特性がわかっている光学素子を用いた本技術の妥当性評価

光が薄膜を透過すると、入射面に平行な偏光成分（p 偏光）と垂直な偏光成分（s 偏光）とで強度率や位相変化量は異なり、それらは薄膜の厚さや素材によって変化します。ここでは、あらかじめその特性がわかっている薄膜を用いて、本技術の妥当性を評価しました。

(a) 本手法による Babinet-Soleil（バビネソレイユ）補償板の評価。Babinet-Soleil 補償板は、光の位相にのみ変化を与え、光の強度には変化を与えない光学素子です。そのため、本手法で得られる偏光成分の強度比に関連したエリプソメトリックパラメーター ψ は、光周波数や補償板の移動量に依らずに一定です。一方、各偏光成分の位相変化量差に関連したエリプソメトリックパラメーター Δ は、補償板の移動量（位相の付加量）に応じて変化しています。

(b) 本手法による高次波長板の評価。高次波長板は、光の偏光状態を変える素子で、その波長依存性（光周波数依存性）が非常に高いという特徴を持ちます。そのため、各偏光成分の強度比や位相変化量に関連したエリプソメトリックパラメーター ψ や Δ が、光周波数や波長板の回転角に依存して大きく変化しています。既存のエリプソメトリック法では、エリプソメトリックパラメーターを取得するのに機械的・電氣的な光の変調が必要でした。本手法では光コムを用いることで機械的・電氣的な光の変調を不要とし、高速、安定、堅牢、かつ高精度な分光エリプソメトリック法を実現可能という特徴を有しています。このように、光学的な特徴を持った素子による光の変化を、本手法を用いることで、低速で再現性に乏しい機械的・電氣的変調を行うことなく、高速、精密、かつ堅牢に計測可能であることを実証しました。

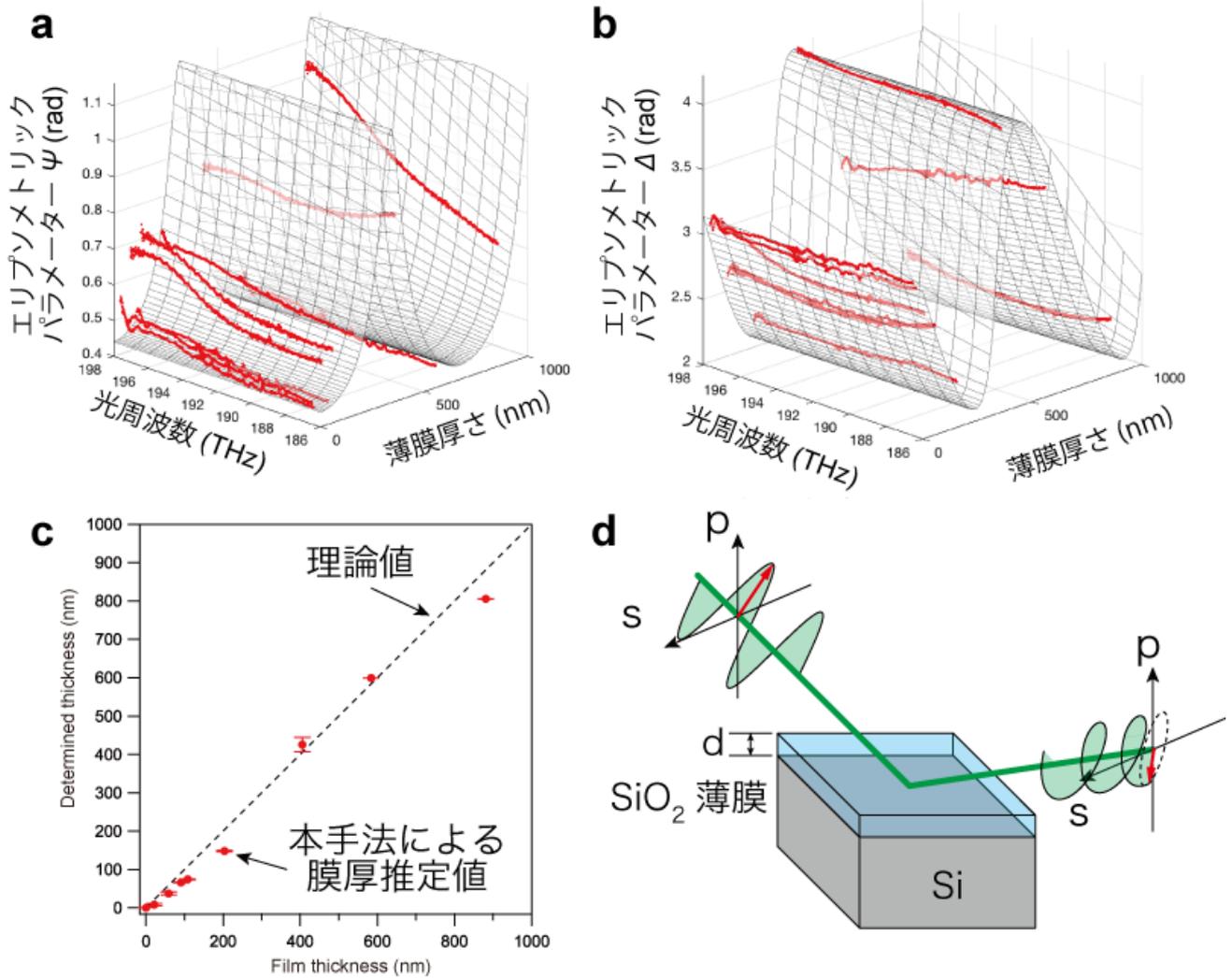


図5 本技術による薄膜の評価

光が薄膜を反射する時も、入射面に平行な偏光成分 (p 偏光) と垂直な偏光成分 (s 偏光) とで強度や位相変化量は異なり、それらは薄膜の厚さや素材によって変化します (d)。膜厚があらかじめわかっている薄膜を本手法で計測したところ、偏光成分の強度比に関連したエリプソメトリックパラメーター ψ (a) や、各偏光成分の位相変化量差に関連したエリプソメトリックパラメーター Δ (b) が、膜厚によって変わっている様子が観察できました (b)。また本手法では、光周波数に応じて ψ や Δ が変化している様子も同時に計測することができます (a) (b)。さらに、その変化から推定される膜厚は、実際の膜厚とよく一致しました (c)。

<用語解説>

注1) 薄膜

固体表面の上に蒸着、スパッタリング法、スピンコーティング法などにより形成された、さまざまな材料（金属・半導体・酸化物・レジストなどの有機物）の層。レンズのコーティングに用いる光学薄膜、集積回路製造における微細加工で多用されるレジスト薄膜などがある。作製する材料によって、物質に電氣的・機械的・光学的な機能や付加価値を与えることができる。

注2) 分光エリプソメトリー法

入射光の偏光状態をさまざまに変化させ、試料を通った光の偏光状態の変化から、試料の特性を解析し解明する分析法。現在、薄膜の膜厚や光学定数を求める一般的な手法となっており、誘電体・半導体・金属・有機膜など、さまざまな物質解析に用いられている（図1）。

注3) 偏光

光は電磁波の一種であり、電場（または電場と直交する磁場）が電磁波の進行方向（z軸方向）と垂直（x軸、およびy軸方向）に振動する横波である。偏光とは、電場ベクトルがxy平面上でどのように振動しているかを示し、電場ベクトルが直線的に振動している「直線偏光」、光の伝播に伴って円を描く「円偏光」などが良く知られている。

注4) うなり信号

周波数がわずかに異なる2つの波（本稿では光）が重ね合わされたとき、低い周波数で振幅が変化する合成波を生じる。合成波の周波数は2つの波の周波数の差に等しい。この低い周波数信号を「うなり（信号）」と呼ぶ。

注5) 周波数リンク

ある周波数帯の情報（強度・周波数・位相・精度・確度・不確かさなど）を、別の周波数帯につなげる方法。光コム技術により、光の周波数と電波（マイクロ波）の周波数を直接リンクすることが可能になった。これにより、直接計測が困難な光周波数（数百テラヘルツ）の情報を、電波（マイクロ波）の周波数（数十メガヘルツ）で計測でき、光周波数の情報に関する計測性能が飛躍的に向上した。

注6) 消衰係数

屈折率は、真空中の光速を物質中の光速（より正確には位相速度）で割った値である。この屈折率の定義を光吸収のある物質に対して拡張するために複素屈折率という物理量が定義されている。複素屈折率 m を実部と虚部に分解して $m=n-ik$ と表記したとき、実部 n は通常の屈折率を表し、虚部 k は消衰係数と呼ばれ、光吸収の度合いを表す。

<論文情報>

タイトル: "Dual-comb spectroscopic ellipsometry" (デュアルコム分光エリプソメトリー)

著者: Takeo Minamikawa, Yi-Da Hsieh, Kyuki Shibuya, Eiji Hase, Yoshiki Kaneoka, Sho Okubo, Hajime Inaba, Yasuhiro Mizutani, Hirotsugu Yamamoto, Tetsuo Iwata, Takeshi Yasui

雑誌名: Nature Communications

doi: 10.1038/s41467-017-00709-y

お問い合わせ先

<研究に関すること>

機 関 徳島大学大学院社会産業理工学研究部
理工学域機械科学系

責 任 者 教授 安井 武史 (ヤスイ タケシ)

住 所 〒770-8506
徳島県徳島市南常三島町二丁目1番地

電話番号・FAX 088-656-7377

E-mail yasui.takeshi@tokushima-u.ac.jp

U R L <http://femto.me.tokushima-u.ac.jp>

機 関 産業技術総合研究所
物理計測標準研究部門
周波数計測研究グループ

責 任 者 研究グループ長 稲場 肇 (イナバ ハジメ)

住 所 〒305-8563
茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第3

電話番号 029-861-6807

E-mail h.inaba@aist.go.jp

U R L <https://unit.aist.go.jp/ripm/>

<JSTの事業に関すること>

機 関 科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部

責 任 者 古川 雅士 (フルカワ マサシ)

住 所 〒102-0076
東京都千代田区五番町7 K's五番町

電話番号 03-3512-3528 FAX 03-3222-2068

E-mail eratowww@jst.go.jp

<広報に関すること>

機 関 徳島大学 常三島事務部
理工学部事務課総務係

住 所 〒770-8506
徳島県徳島市南常三島町二丁目1番地

電話番号 088-656-7204 FAX 088-656-7328

E-mail st_soumuk@tokushima-u.ac.jp

機 関 産業技術総合研究所
企画本部 報道室

住 所 〒305-8560
茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第1

電話番号 029-862-6216 FAX 029-862-6212

E-mail press-ml@aist.go.jp

機 関 科学技術振興機構 広報課

住 所 〒102-8666
東京都千代田区四番町5番地3

電話番号 03-5214-8404 FAX 03-5214-8432

E-mail jstkoho@jst.go.jp