

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420082

研究課題名(和文) 指先の摩擦と触感を制御したタッチパネルディスプレイ表面保護分子膜の開発

研究課題名(英文) Development of surface-protected molecular film for a touch panel display by controlling finger friction and touch feeling

研究代表者

青木 才子 (Aoki, Saiko)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：30463053

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)：本研究では、指のすべり動作における力学データの計測を可能とする平板型摩擦測定装置を試作し、分子膜被覆されたタッチパネル用ガラス試験片における指の摩擦特性について、摩擦係数の荷重および速度依存性を示す相関式を提案した。また、分子膜厚の増大に伴い界面のせん断強さが減少することを明らかにした。さらに、タッチパネル操作時におけるディスプレイ応答時間と指のすべり動作における力学データの関連性について、応答時間の差により被験者は“重い”という擬似的触覚情報を知覚し、その擬似知覚が指のすべり速度など指の動作に変化を与えることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The friction characteristics of an index finger slid on a molecular-layer-coated surface was investigated using the laboratory-made tribometer that can measure friction force, normal load, and positional information simultaneously. Both a normal load and a speed dependencies of friction coefficient was represented as one approximated curve surfaces. Besides, the shear strength decreased with increasing film thickness on the Si surface, indicating that the surface state is a dominant factor in determining the friction characteristics of the finger.

As for a correlation between a response time of touch panel display and the mechanical data of the finger slid on the display, the delay of the response time probably induced the heavy feeling of the subjects, and this could be brought about a change to the mechanical data of the finger manipulation such as sliding speed.

研究分野：トライボロジー，化学工学，潤滑油

キーワード：指の摩擦 分子膜 トライボロジー タッチパネル 人間工学

1. 研究開始当初の背景

近年、タブレット PC やスマートフォン の急速な普及により、次世代型タッチパネルディスプレイの開発が求められている。タッチパネルディスプレイは透明電極を配したガラス平板が使用されており、その表面には、耐擦傷性、防汚対策（指紋の目立ち対策）、干渉縞、ギラツキ抑制、高透過率、反射防止、耐候性などの諸特性を付与するコーティングが施されている。初期の機器では、表面保護の観点から厚さ μm オーダーの高分子樹脂被膜が主流であったが、機器の高性能化に伴い、表面保護性だけでなく機器の動作性や指先での操作性の向上も必須となり、動作応答性の高めるため十分に薄く、さらに指先の感覚と摩擦が制御された分子膜の開発が鍵となる。

一般的に、有機化合物の吸着分子膜では、固体表面エネルギーを低下させ、表面の防汚性や撥水性などの特性を付与することが出来る。例えば、タッチパネルガラス表面の指紋付着防止用に施されているパーフルオロポリエーテル (PFPE) 基を有するフッ素分子膜コーティングは、表面エネルギーを低下させ、油・指紋などの汚れの付着を低減すると同時に、付着した場合でも容易に拭き取ることが出来る。

一方、有機分子膜は防汚性や撥水性などの静的特性だけでなく、動的現象である摩擦抵抗も大幅に減少することができる。例えば、直鎖アルキル基を有する自己組織化単分子膜は、化学吸着した分子の凝集により形成された高配向性の分子膜であり、高摩擦を示す固体の直接接触を防止し低摩擦を示す有機分子同士との接触に置き換えるため摩擦摩耗を低減することができる。このような動的現象は、タッチパネルディスプレイ表面のすべりやすさやさわ心地（質感など）といったユーザビリティの観点で重要である。

ところで、指とタッチパネルディスプレイ表面との摩擦を研究するにあたり、実際のタッチパネル操作を想定した場合、単純な押す動作（タッチ操作）から、指をすべらせる動作（フリック操作やスワイプ操作）へと多様化していること、人間の指の摩擦現象は汗などの表面状態や湿度などの雰囲気の影響を受けること、指の摩擦現象は一連のすべり動作の過程で指先の弾性変形を考慮する必要があることなどの理由から、明確な評価方法が確立されていないのが現状である。さらに、ユーザビリティの追求という観点から、指先の摩擦による信号入力操作に対して、指先での実操作性（指先の摩擦制御）と操作感（人間の感性）を同時に評価する必要があり、分子膜の

摩擦と人間の感性の関連性に基づいた分子膜の最適設計が重要となる。

そこで、本研究では、フッ素系や直鎖アルキル基を有する自己組織化単分子膜などの吸着分子膜のトライボロジー特性解明を基に有効な分子構造探索の情報を与える手法を確立すると同時に、感性工学の観点から、操作時に指先に感じる摩擦の感覚と実際の摩擦特性の関連性を明らかにする。

2. 研究の目的

本研究では、高分子化合物の吸着分子膜の分子構造と指先の分子膜とのトライボロジー特性を明らかにして、タッチパネルディスプレイ表面保護膜としての最適な分子設計の検討を目指す。

(1) 指先による実際のタッチにおけるトライボロジー特性評価

指先による実際のタッチにおける摩擦力の計測への試みとして、指先操作の3軸動的測定を可能とする圧電型3分力センサによる平板型摩擦測定装置を試作する。試作した装置により、実際の指先での操作時の荷重・摩擦特性を計測し、トライボロジー特性と実操作との関連を明らかにする。

(2) 実スケールでの摩擦計測に基づいた分子膜の最適設計

指先による摩擦は複雑な現象であり、現実に適した分子膜の設計をするためには複雑な摩擦現象の要素因子を洗い出す必要がある。ハードディスク用潤滑剤であるフッ素系高分子化合物（末端シラン化 PFPE）や直鎖アルキル基を有する自己組織化単分子膜 (SAM) をモデル分子膜として、指の摩擦特性に及ぼす分子膜の形成状態の影響を明らかにする。膜厚や分子構造などを分子膜の形成状態を表すパラメータとし、指の摩擦特性との関連性を明らかにして、分子膜の最適化の検討を行う。

(3) 指先の操作感と摩擦抵抗における皮膚感覚の相関性の評価

実際のタッチにおける指先の摩擦と指先の操作感のとの関連性を明らかにすることを目的として、複数の被験者を対象として、タッチパネルディスプレイ操作時におけるディスプレイ応答時間と指のすべり動作での荷重、摩擦力、すべり速さなどの力学的データの関連性について調査する。定量化された感性アンケートの統計データと指先の摩擦特性の相関関係を基に、コーティング分子膜の最適設計指針を提案する。

3. 研究の方法

(1) 指先による実際のタッチにおけるトライボロジー特性評価

指先による実際のタッチにおける摩

擦力の計測を目指し、指先による、たたく、擦るなどの操作時における3軸(x, y, z 方向)の力の動的測定を可能とする圧電型3分力センサを中心に設置した平板型摩擦測定装置を作製した(図1)。この平板型摩擦測定装置の上部に汎用のAndroid®タブレット端末を設置し、右手第二指で表面をすべらせて荷重と摩擦力を測定した。タブレット端末には端末操作における指の接触点座標と時刻を取得する自作のアプリケーションが組み込まれており、指の接触から離れるまでの一連の動作(指を固定→すべり(速度一定)→停止→指を離す)の位置データ(すべり距離)と摩擦測定装置より得られる力学データ(荷重および摩擦力)を同期して取得することが出来る。ガラス基板、分子膜被覆されたガラス基板の両方をそれぞれ用いて指の摩擦測定を実施した。得られた結果より、垂直荷重とすべり速さを相関因子として指の摩擦係数を重回帰分析により評価し、モデル分子膜被覆表面において摩擦係数の荷重および速さ依存性について検討した。

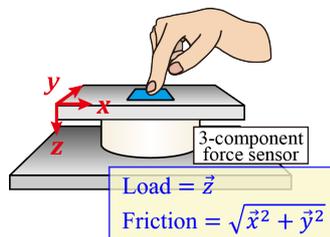


図1 平板型摩擦測定装置

- (2) 実スケールでの摩擦計測に基づいた分子膜の最適設計

分子膜の形成状態やその分子構造が指のトライボロジー特性に及ぼす影響を明らかにするために、直鎖アルキル基を有する自己組織化単分子膜(SAM)をそれぞれ使用し、分子膜厚を変化させながらSi基板に被覆させることにより膜厚をパラメータとして分子膜の形成状態が及ぼす影響を調査した。SiウェハをOctadecyltrichlorosilane(OTS)溶液に浸漬し、その浸漬時間を変化させることで膜厚の異なる6種類の試験片を作製した。図1の平板型摩擦測定装置上にSi試験片を設置し、右手の人差し指をすべり速度約2 cm/sで右方向にすべらせ、荷重および摩擦力を測定した。

- (3) 指先の操作感と摩擦抵抗における皮膚感覚の相関性の評価

タッチパネル操作時の力学データと擬似的な知覚の関連性を調査するため、タッチパネルディスプレイの応答時間に遅れを生じさせ、被験者が特定のタスクに取り組むときの荷重、摩擦力、すべり速さを測定し、応答遅れの度合いと力学的な数値との相関を調べた。

Windows®端末において動作する、ディスプレイの応答時間を遅らせるアプリケーションを作成した。本アプリケーションにより、16 ms刻み、16~160 msの10段階の応答遅れ時間を発生させる。試験者は画面左側に表示されている緑の円を右側へ動かす操作を2回連続で実施した後、1回目の操作と2回目の操作のどちらが重く感じたか、画面上に表示される「1」および「2」の番号をタッチして選択する。この一連の作業を「1試行」とし、連続した21試行を「1セット」とし、このセットを20回連続で行い、1回の「応答遅れ試験」とした。1回の応答遅れ試験中には、20回のセット、420回の試行、840回の操作が含まれている。各試行の1回目と2回目の作業のどちらか一方のみに応答遅れを生じさせる。発生させる応答遅れ時間は、アプリケーションによって10段階からランダムに選ばれ、1セット中に、10段階の応答遅れ時間が2回ずつ出現し、2回の作業のどちらにも応答遅れ時間を発生させない試行が1回出現する。他タブレット端末上にガラス試験片を設置し、その上で摩擦測定も同時に実施した。

4. 研究成果

- (1) 指先による実際のタッチにおけるトライボロジー特性評価

ガラス表面において指をすべらせたときの力学データおよび位置データの測定例を図2に示す。任意のすべり時間におけるすべり距離の変化は最小二乗法により線形近似が可能であり、この傾きはこの時間範囲における平均の滑り速さと定義できる。また、同時間範囲において荷重および摩擦力はほぼ一定であることから、同様に平均して荷重および摩擦力の代表値とし、摩擦係数を算出した。

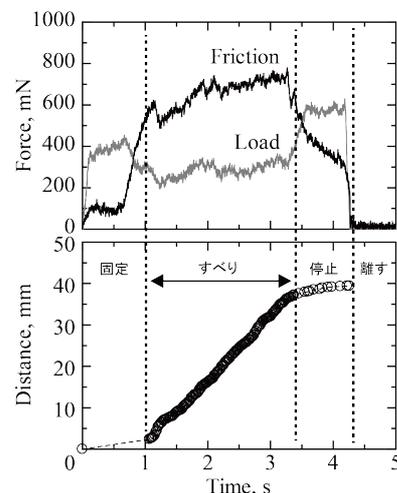
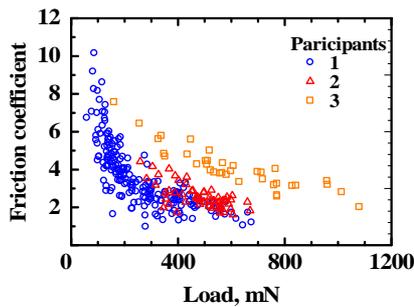
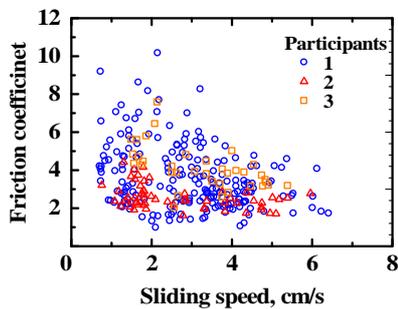


図2 指のすべり動作における力学データおよび位置データの測定例

ここで、3名の被験者により同様の摩擦試験を実施し、得られた摩擦係数を荷重およびすべり速度に対してプロットした結果を図3に示す。全ての被験者において、荷重と摩擦係数には負の相関が僅かに観察された。一方、すべり速度と摩擦係数には荷重ほど顕著な傾向は観察されなかったが、全ての被験者のプロットがほぼ同じ領域に存在することから、摩擦係数は荷重およびすべり速度と何らかの相関をもつことが伺える。



(a) 荷重



(b) すべり速度

図3 摩擦係数と(a)荷重, (b)すべり速度の関係(被験者3名, ガラス基板)

摩擦係数に対する荷重とすべり速度の影響を同時に評価するため、それら3つを軸として三次元空間に結果をプロットした。その結果、摩擦係数と荷重およびすべり速度には何らかの相関があることが示唆されたため、フィッティングモデル式を選択して、最小二乗法により相関式を算出することを試みた。

フィッティングのためのモデル式として、応答曲面法, Hertz の接触理論, S. Derler らによる接触理論[1]を用いて近似を実施した結果, S. Derler らによる接触理論による近似式が最も決定係数が大きくなった。その結果を図4に示す。S. Derler らは、人の指とガラス表面との摩擦において摩擦係数が荷重の-0.4乗に比例することを示し、指の摩擦係数は荷重の累乗で表せるものの指数の値はHertz の接触理論とは異なることを示唆している。図4に示された近似面の式は下式で表される。

$$\mu = -1.6 - 1.2 \cdot 10^{-2} \cdot v^{2.4} + 108 \cdot w^{-0.57} + 3.8 \cdot 10^{-4} \cdot v \cdot w$$

この近似式を用いて、すべり速度を一定としたときの荷重と摩擦係数の関係、および荷重を一定としたときのすべり速度と摩擦係数の関係を算出し、分子膜の有無による比較を行った。その結果、摩擦係数の荷重依存性は分子膜の有無にかかわらず現れ、低荷重域で顕著であった。一方、摩擦係数の速度依存性は分子膜被覆された表面で顕著であり、かつその依存性は分子膜の種類により異なることが明らかになった。

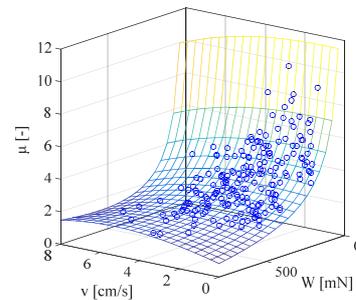


図4 摩擦係数の三次元プロット

(2) 実スケールでの摩擦計測に基づいた分子膜の最適設計

膜厚が異なる分子膜被覆された Si 表面を作製して、それぞれの表面に対して指をすべらせたときの摩擦試験結果を図5に示す。図5より、膜厚が増大するに伴い摩擦係数は減少する傾向が観察された。そこで、指のすべり動作における摩擦面での現象を詳細に考察するために、インクスタンピングによる指の接触面積の測定を行った。平板型摩擦測定装置上に設置した白紙にインクをつけた指を押し付け、任意の押し付け荷重における指の接触面の画像を取得した。得られた画像を2値化処理して得られたピクセル数から面積を算出し、接触面積と押し付け荷重の関係を得た。

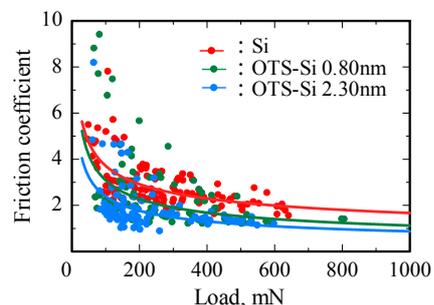


図5 膜厚の異なる分子膜被覆された表面における指の摩擦試験結果

ここで、指をすべらせている間、接触面積は一定であると仮定し、荷重と接触面積の関係式を用いて、接触面積と摩擦力の関係式を算出した。いずれの試験片においても接触面積と摩擦力はおおよそ線形関係であることが分かり、単位面積当たりの摩擦力である界面のせん断強さは一定であることが明らかになった。また、膜厚が大きくなるほど傾きが小さくなり、すなわちせん断強さは小さくなることが分かった。

分子膜厚の異なる6種類の試験片に対して摩擦試験を実施した結果、いずれの試験片においても接触面積と摩擦力には線形関係が見られた。各試験片の結果からせん断強さを算出し、膜厚とせん断強さの関係を図6に示す。この結果より膜厚が大きいくほどせん断強さは小さくなった。これより、指のすべり動作において、指をすべらせている間、接触面積は一定であると仮定した場合、界面のせん断強さは試験片の表面状態により決定し、表面状態が指の摩擦特性に影響を与えることが明らかになった。

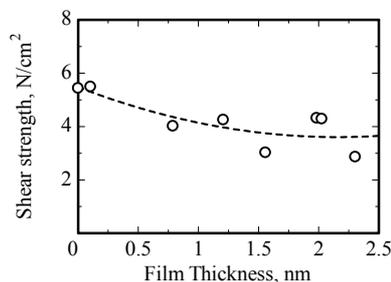


図6 分子膜厚とせん断強さの関係

(3) 指先の操作感と摩擦抵抗における皮膚感覚の相関性の評価

1 試行のうち、2 回の作業の応答遅れ時間の差分および力学データ(荷重およびすべり速度)の差分を以下のように定義した。

$$\Delta d = (2 \text{ 回目の試験の応答遅れ時間}) - (1 \text{ 回目の試験の応答遅れ時間}),$$

$$\Delta W = (2 \text{ 回目の試験の荷重}) - (1 \text{ 回目の試験の荷重})$$

$$\Delta v = (2 \text{ 回目の試験のすべり速度}) - (1 \text{ 回目の試験のすべり速度})$$

また、1 試行において 2 回目を“重い”と答えた割合を r とした。ここで、擬似的な重さの知覚が本実験の画面の応答遅れによって誘起されていることを確かめるため、“重い”という認識と画面の応答遅れ度合いとの相関を調べた。2 名の被験者について Δd に対して r をプロットした結果を図7に示す。なお、ガラス基板および PFPE 分子膜被覆されたガラス表面のそれぞれを使用して得られた結果である。図7より、概ね $\Delta d > 0$ (2 回目に応答遅れあり) では $r > 0.5$ (2 回目を“重い”と答えやすい)、 $\Delta d < 0$ では r

< 0.5 となり、応答遅れがあるほど“重い”と答える傾向があった。これより、“重い”という擬似知覚と画面の応答遅れの度合いには定量的な相関があることが示唆される。

また、タッチパネルの操作中におけるディスプレイの応答時間の遅れに対して、操作者が擬似的な触覚情報を知覚したときの指先の動作の変化を力学的な数値により観測可能かどうかを検証した。1 試行において 1 回目と 2 回目の力学データの差 ΔW , Δv に対して、2 回目を“重い”と答えた割合 r にプロットし、図8に示す。図8より、 ΔW と r の間には明確な相関は見られない一方で、 Δv と r の間には、 $\Delta v > 0$ (2 回目の方が遅い) では $r > 0.5$, $\Delta v < 0$ (2 回目の方が速い) では $r < 0.5$ となり、“重い”と答える割合が多いほど指のすべりを減速させる傾向にあった。これより、“重い”という擬似知覚により指先の動作に変化を与える可能性があることが示された。

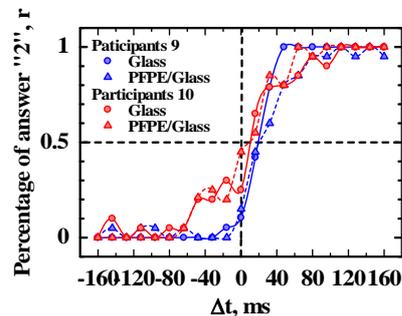
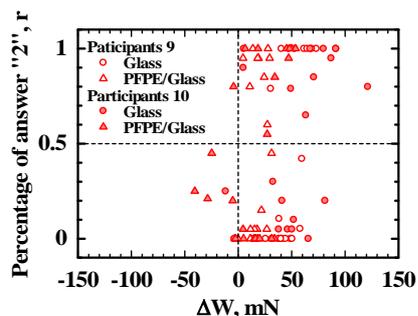
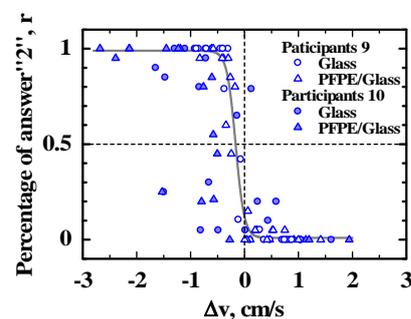


図7 応答時間遅れと“重い”と回答する割合の関係



(a) 荷重



(b) すべり速度

図8 力学データと擬似知覚との相関

(4) 研究成果の国内外における位置づけと今後の展望

指先による摩擦の研究に関して、報告事例には限りがあり未解明の部分が多い。特に、指先の摩擦と操作感の関連性に言及した研究はこれまでになく、本研究で得られた成果は国内外においても非常に独創的である。一方で、金属などの固体と異なり、人の指には個体差があるため、指の摩擦現象を一般化するためには被験者の数を増やして検証することが求められる。本研究ではいずれの実験においても被験者数が少なく、未だ予備試験の域を超えていない。今後の展望として、被験者数を増やし、さらに試験方法を改良して、本研究で得られた成果を一般化することが求められる。

引用文献

- [1] S. Derler et al., Stick-slip phenomena in the friction of human skin, *Wear*, 301, 2013, 324-329

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Rina Yanagisawa, Saiko Aoki, Masabumi Masuko, Friction Characteristics of Fingertips Slid on the Molecular-Layer-Coated Solid Surfaces with Different Layer Formation State, *Tribology Online*, 査読有, 11, 2 (2016) 396-402.

〔学会発表〕(計10件)

小室翔吾 他, タッチパネル操作を想定した分子膜被覆された固体表面における指のトライボロジー特性, トライボロジー会議 2013 秋福岡, 2013 年 10 月 24 日, アクロス福岡(福岡県・福岡市)

小室翔吾 他, タッチパネル操作を想定した分子膜被覆された固体表面における指のトライボロジー特性(第2報), トライボロジー会議 2014 春東京, 2014 年 5 月 21 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都・渋谷区)

Saiko Aoki et al., Evaluation of Sliding Friction Characteristic of a Fingertip in Flick and Swipe Gestures with One Finger on an Organic Molecular Film-coated surface, 41th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, 03.09.2014, Leeds (UK)

小室翔吾 他, タッチパネル操作を想定した分子膜被覆された固体表面における指のトライボロジー特性(第3報), トライボロジー会議 2014 秋盛岡, 2014 年 11 月 6 日, アイーナいわて県民情報交流センター(岩手県・盛岡市)

柳澤理奈 他, 成膜状態が異なる分子膜が被覆された固体表面における指のトライボロジー特性, トライボロジー会議

2014 秋盛岡, 2014 年 11 月 6 日, アイーナいわて県民情報交流センター(岩手県・盛岡市)

柳澤理奈 他, 成膜状態が異なる分子膜が被覆された固体表面における指のトライボロジー特性(第二報), トライボロジー会議 2015 春姫路, 2015 年 5 月 29 日, 姫路商工会議所(兵庫県・姫路市)

Saiko Aoki et al., The Correlation between Perceptual Stimuli and Friction Characteristics of Finger slid on the Molecular-Film-Coated Solid Surface, 42th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, 09.09.2015, Lyon (France)

Rina Yanagisawa et al., Friction Characteristics of a Fingertip Slid on the Molecular-Layer-Coated Solid Surfaces with Different Layer Formation State, International Tribology Conference, Tokyo 2015 (ITC 2015 Tokyo), 16.09.2015, Tokyo (Japan)

Seongmin Kwon 他, 視覚と触覚のマルチモーダルな情報処理と作動記憶, 2016 年 2 月度聴覚研究会(H)・VR 心理学研究委員会(VR)共催研究会, 2016 年 2 月 20 日, 那覇市 IT 創造館大会議室(沖縄県・那覇市)

山岡真悟 他, 視覚と触覚のマルチモーダルな情報処理と作動記憶, 2016 年 2 月度聴覚研究会(H)・VR 心理学研究委員会(VR)共催研究会, 2016 年 2 月 20 日, 那覇市 IT 創造館大会議室(沖縄県・那覇市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

青木 才子(AOKI, Saiko)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 30463053

(2)研究分担者

葭田貴子(YOSHIDA, Takako)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 80454148