

令和 3 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03565

研究課題名(和文) 摩耗現象における巨大過渡応答メカニズムの解明

研究課題名(英文) Understanding giant transient responses in wear phenomena

研究代表者

山口 哲生 (Yamaguchi, Tetsuo)

東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・准教授

研究者番号：20466783

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、アクリル樹脂を用いた摩擦・摩耗実験、および、高分子ゲルを用いた摩擦実験に取り組んだ。とくに後者では、すべり速度が物体の弾性波速度の同程度となる超高速条件で摩擦実験を実施した。その結果、2つの異なる特徴的な摩擦挙動を発見した。アクリル樹脂を用いた実験では、実験条件は一定であるにもかかわらず、ある時点で定常状態から逸脱し、摩擦力が急激に上昇して焼付きに至る挙動が観察された。また、高分子ゲルによる実験では、すべり速度を変化させ、摩擦係数や摩擦挙動を調べたところ、S波速度(15m/s程度)を超えるとともに摩擦係数が急上昇する現象が見出された。

研究成果の学術的意義や社会的意義
まず、できる限り単純な実験系を構築することで、通常の実験で見られる複雑な挙動をシンプルに理解することが可能であることを示すことができた。また、摩擦挙動のその場観察によって、摩擦状態の適切な把握ができることを示すことができた。さらに、実験と理論を併用した研究アプローチにより、現象の詳細な理解が可能であることを確認できた。これらの成果は、今回取り組んだ摩擦・摩耗現象に限らず、さまざまな系に対しても適用可能であると考えられ、広範な現象、分野への波及効果が期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we conducted two different types of friction and wear experiments using two different materials; acrylic resin and compliant polymer gels. In the latter case, we applied large sliding velocities comparable to the sound velocity of a material. As a result, we succeeded in discovering unconventional frictional behaviors; in the first series of experiments, we observed transient frictional response even under constant experimental conditions. In the second series of experiments, friction coefficient exhibits an abrupt increase and deformation of gels becomes abnormal when the sliding velocity exceeds S wave velocity. Through these studies, we were able to demonstrate giant responses in frictional behavior.

研究分野：ソフトマター物理学

キーワード：摩擦 摩耗 巨大応答 焼付き ゲル 超音速 すべり 動的接触理論

1. 研究開始当初の背景

摩擦は、固体同士の接触のもとで互いに相対運動を引き起こす現象であり、摩耗とは、摩擦によって固体がすり減っていく現象である。摩擦・摩耗現象においては、摩擦発熱によって物性変化や化学反応が誘起され、ある条件では焼付き（後述）のような、系の破局に至る巨大過渡応答を示すことが知られていた。しかしながら、工学分野における膨大な実験研究にもかかわらず、現象のメカニズムを整理し、シンプルな理解を目指した研究は非常に乏しかった。また、メカニズムの詳細な理解のもとに、動力学の制御を行い、摩擦や摩耗の抑制を行うという状況からはほど遠かった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、摩擦・摩耗の挙動に明確かつ劇的な変化をもたらす現象に着目し、以下のような2つのタイプの研究を行った。1つ目は、アクリル樹脂同士の摩擦実験における摩耗および摩擦力の過渡的応答に関する研究、2つ目は、やわらかい固体の超高速摩擦における摩擦挙動の遷移に関する研究である。いずれにおいても、動的過程の可視化により、メカニズムに関する詳細な理解を目指した。また、実験と併せて、超高速摩擦を記述するための理論の開発を行うことで、現象を定量的に理解するための枠組みを構築することを目的とした。

3. 研究の方法

3-1. アクリル樹脂の摩擦における巨大過渡応答に関する研究

試料

アクリル樹脂製のブロックと円筒を用いた。各試料の寸法は図1に示した。

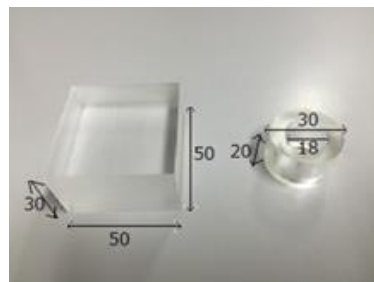


図1:アクリル樹脂試料。

実験装置

概略図を図2に示した。この原理で荷重を負荷しながら、リング試料をブロックに対して一定角速度で回転させた。そのときの接触面の様子を、上面および側面からカメラで撮影した。とくに側面からの撮影では、全反射条件で照明を行うことによって、明暗のコントラストから真実接触状態を可視化した。また、放射温度計を用いて、接触面近傍の温度を計測した。

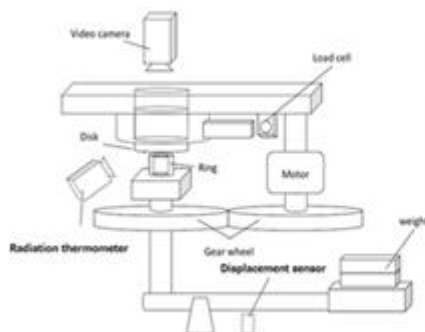


図2:摩擦実験装置の模式図(左)および写真(右)。

3-2. シリコーンゲルの超高速摩擦

試料

やわらかい固体としてシリコーンゲルを用いた。せん断弾性率は $G=226$ [kPa]、密度は $\rho=980$ [kg/m³]であった。これらの値からS波速度を計算すると、 $V_s=15.2$ [m/s]となった。

実験装置

概略図を図3に示した。摩擦力を低減するため、潤滑剤としてシリコーンオイル(KF-96-1000cs)を用いた。荷重 $F_N=5$ [N]を負荷し、すべり速度は $V=0.1-19.1$ [m/s]の範囲で実験した。摩擦力 F はアルミブロックに取り付けられたひずみゲージで測定した。また、すべり摩擦の挙動は側面から高速度カメラを用いて観察した。

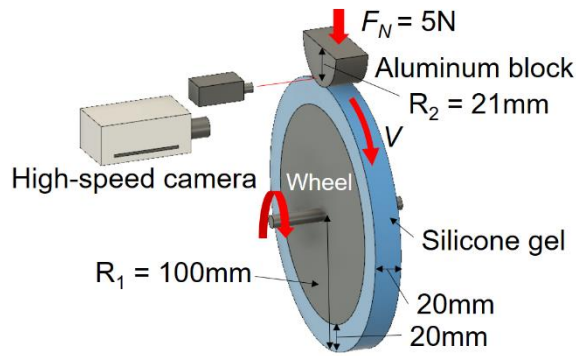


図 3: 実験装置の概略図.

4. 研究成果

4-1. アクリル樹脂の摩擦における巨大過渡応答に関する研究

典型的な実験結果を図 4 に示す. ここで, リング試料表面は実験前に粗さ 80 番の紙やすりで研磨し, 摩耗実験においては荷重 $F_N=3000$ [N], すべり速度 $V=6.3$ [mm/s] を設定した. 以前の結果と同様に, 摩擦力はほぼ定常 (700 [N] 程度) となった後, $t = 800$ [sec] あたりで急激に上昇したが, このとき, 接触面温度はゆるやかに上昇を続け, 焼付きとともに急激に上昇した. また, 真実接触面積もゆるやかに増加する傾向を示した.

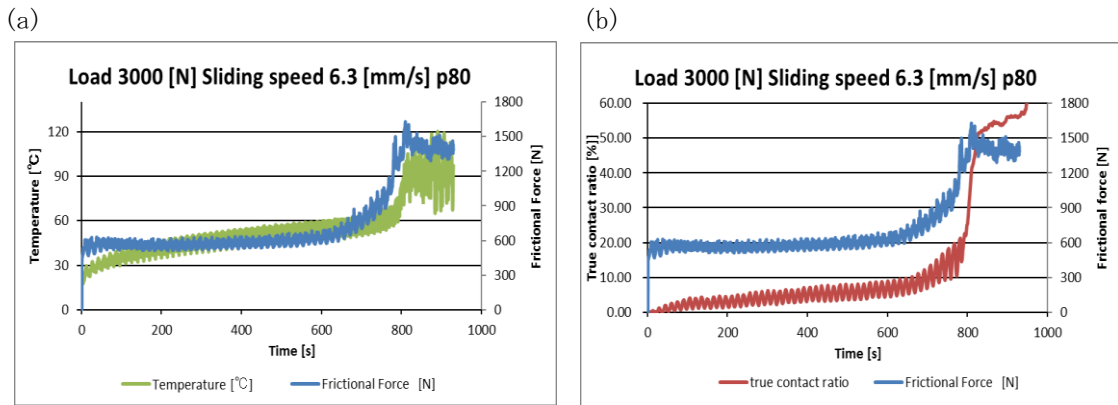


図 4: 荷重 $F_N=3000$ [N] およびすべり速度 $V=6.3$ [mm/s] における実験結果. (a) 接触界面温度 (緑実線) および摩擦力の時間変化 (青実線), (b) 規格化された真実接触面積 (赤実線) と摩擦力 (青実線).

次に, 接触面温度と摩擦力との関係を理解するため, 温度を制御しながら最大静止摩擦力を測定する実験を行った. その結果を図 5(a) に示す. 最大静止摩擦力は, 温度とともに増加した. また, 高温になるにつれて上昇の程度が大きくなることが分かった. そこで, 最大静止摩擦力を温度の 2 次関数としてフィッティングを行い, 摩耗実験中に計測された接触面温度のデータを用いて, 最大静止摩擦力の値から各時刻における摩擦力を推定し, 摩耗実験での摩擦力と比較してみた. 図 5(b) をみるとわかるように, 最大静止摩擦力の温度依存性から推定された摩擦力のふるまいは, 実際の摩耗実験でのそれとよく一致した. これは, 摩擦状態が温度によって支配されていることを意味している.

この結果から, 次のようなメカニズムが示唆された. まず, 摩擦発熱によって接触面温度が上昇する. すると, 摩擦力が増加し, それによって発熱がさらに起こり, 接触面温度の増加によってますます摩擦力が増加する. このように, 系にはポジティブフィードバックが働き, 摩擦力や接触面温度は加速的に増加することになる. ところが, 接触面温度がアクリル樹脂の軟化点 (ガラス転移温度) に達すると樹脂の流動が発生し, 摩耗粉とともに発熱も排出されてしまう. これが, 焼付き後に接触面温度や摩擦力が一定になる理由であると考えられる.

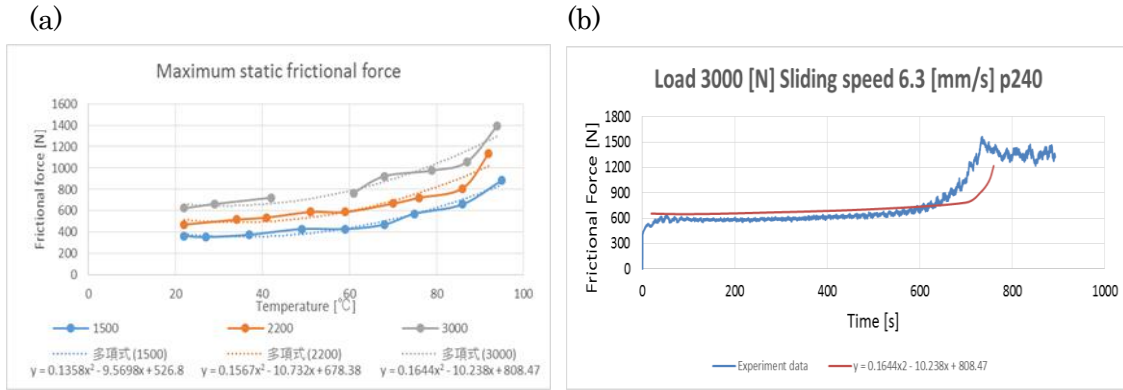


図5: (a)異なる3つの垂直荷重における最大静止摩擦力の界面温度依存性, (b)摩擦力の実測値 (青実線), および, 実験で計測された界面温度および(a)の関係をもとに推定された摩擦力の時間変化 (赤実線).

4-2. シリコンゲルの超高速摩擦

摩擦係数のすべり速度依存性の結果を図6(a)に示した. すべり速度 V がS波速度 V_s を超えると, 摩擦係数が急上昇する結果が得られた. また, 図6(b)(c)で示されるように, すべり速度が亜音速から超音速に遷移すると, 変形挙動に大きな違いが見られた. 超音速状態において接触開始部分(左端)で応力集中していることから, 接触域入口(左側)での潤滑膜の破断により, ゲルとブロックとの直接接触が起こった結果, 摩擦係数の急激な増加を招いたと考えられた.

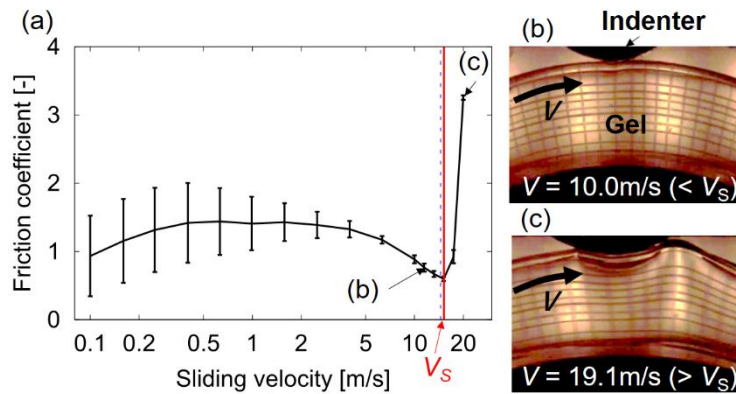


図6: (a)摩擦係数のすべり速度依存性, (b) $V=10.0$ [m/s], および(c) $V=19.1$ [m/s] におけるゲルの変形状態. V_s を超えると, 異常な変形が生じる.

また, 現象を記述する理論の構築にも取り組んだ. 界面にかかるせん断応力としてクーロンアモントン則 $q(x) = \mu p(x)$ (μ は摩擦係数) を仮定すると, 接触圧力分布 $p(x)$ と界面での垂直変位 (の微分) $w'(x)$ との間に, 以下の式が成り立つ.

$$p(x) + \frac{\lambda}{\pi} \int_a^b \frac{p(s)}{x-s} ds = \alpha w'(x), \quad (1)$$

ここで, a, b は接触領域端部の位置を表す. また, $V \ll V_p$ とすると, 係数 λ, α は以下のように表される.

$$\lambda = \frac{M_s^2(2 - M_s^2)(2 - M_s^2 - 2\mu\sqrt{M_s^2 - 1})}{4M_s^2\sqrt{M_s^2 - 1} + \mu\{(2 - M_s^2)^3 + 8(M_s^2 - 1)\}} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{G\{(2 - M_s^2)^4 + 16(M_s^2 - 1)\}}{4M_s^2\sqrt{M_s^2 - 1} + \mu\{(2 - M_s^2)^3 + 8(M_s^2 - 1)\}}$$

ここで、 G はゲルの弾性率、 $M_s = V/V_s$ である。(1) 式を解くことで、接触圧力分布 $p(x)$ は以下の式で与えられる:

$$p(x) = \frac{|\lambda|}{\sqrt{1+\lambda^2}} \frac{C}{\pi \sqrt{(x-a)(b-x)}} \left(\frac{x-a}{b-x}\right)^\gamma + \frac{\alpha w'(x)}{1+\lambda^2} - \frac{\alpha \lambda}{1+\lambda^2} \frac{1}{\pi \sqrt{(x-a)(b-x)}} \left(\frac{x-a}{b-x}\right)^\gamma \times \int_a^b \sqrt{(s-a)(b-s)} \left(\frac{b-s}{s-a}\right)^\gamma \frac{w'(s)}{x-s} ds, \quad (3)$$

ここで、 $C = \int_a^b p(x) dx$ 、 $\gamma = \tan^{-1}(\frac{1}{\pi \lambda})$ である。半径 R_1 および R_2 の 2 つの円筒の接触においては、変形は $w'(x) = -x/R$ となる(ここで、 $R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$)。接触領域端部の位置 a, b は、 $p(b) = 0$ かつ $C = F_N/W$ が満たされるように数値的に求めた。

実験結果との比較を行うため、実験から得られた $V = 19.1$ [m/s] および $\mu = 3.25$ を適用し、圧力分布を求めた結果を図 7(a) に示す。通常のヘルツ型(図中の $V = 0, 10.0$ [m/s] のとき)とは大きく異なり、非対称な圧力分布が得られた。また、この圧力分布を式(3)に代入することで、接触域外の垂直変位分布 $w(x)$ を求めることもできる。その結果を図 7(b) に示す。接触域前端でのキंक上の変形など、実験で観察された振る舞いを概ね再現することが分かった。

このように、いずれの場合においても、摩擦力の急激な増加を伴う摩擦現象が新たな発見された。また、実験によって現象を特徴づける物理量が得られた。さらに、理論的な研究によって、現象を記述することにも成功した。これらの取り組みによって、摩擦摩耗現象における機構の詳細な理解に基づく定量的な解析の枠組みを提案することができた。今後は、これらのアプローチを足掛かりにして、メカニズムの詳細が不明で、定量的な理解に困難をきたしているさまざまな系にも基礎的な検討を行っていきたい。

参考文献:

- [1] T. Yamaguchi, C. Hunt, T. Morita, Y. Sawae, in preparation.
- [2] T. Yashiki, T. Morita, Y. Sawae, T. Yamaguchi, Subsonic to Intersonic Transition in Sliding Friction for Soft Solids, Physical Review Letters **124**(23), 238001 (2020).

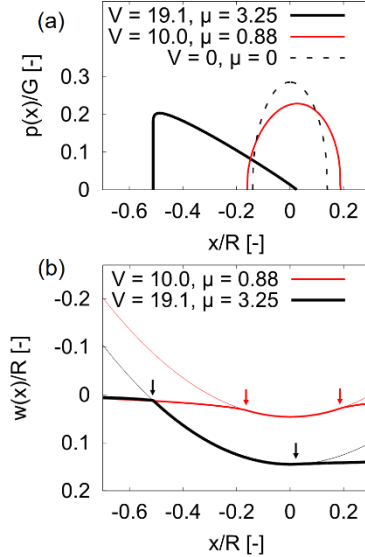


図 7: (a) $V=19.1$ [m/s], $\mu = 3.25$, $V=10.0$ [m/s], $\mu = 0.88$, および $V=0$ [m/s], $\mu = 0$ における接触圧力分布. (b) $V=10.0$ [m/s], $\mu = 0.88$, および $V=19.1$ [m/s], $\mu = 3.25$ における垂直変位分布.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Yamaguchi Tetsuo, Onoue Yudai, Sawae Yoshinori	4. 巻 124
2. 論文標題 Topology and Toughening of Sparse Elastic Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 68002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.068002	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 Kusaka Yasuyuki, Mizukami Makoto, Yamaguchi Tetsuo, Fukuda Nobuko, Ushijima Hirobumi	4. 巻 29
2. 論文標題 Patterning defects in high-speed reverse offset printing: lessons from contact dynamics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Micromechanics and Microengineering	6. 最初と最後の頁 045001 ~ 045001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6439/ab024b	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 Itagaki Nozomi, Kawaguchi Daisuke, Oda Yukari, Nemoto Fumiya, Yamada Norifumi L., Yamaguchi Tetsuo, Tanaka Keiji	4. 巻 52
2. 論文標題 Surface Effect on Frictional Properties for Thin Hydrogel Films of Poly(vinyl ether)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 9632 ~ 9638
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.9b01786	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 Yashiki Takuya, Morita Takehiro, Sawae Yoshinori, Yamaguchi Tetsuo	4. 巻 124
2. 論文標題 Subsonic to Intersonic Transition in Sliding Friction for Soft Solids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 238001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.238001	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 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 山口 哲生
2. 発表標題 やわらかい粘弾性体の粘着・剥離・摩擦
3. 学会等名 日本機械学会 A - T S O 1 - 1 5 研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口 哲生
2. 発表標題 やわらかい高分子の粘着・剥離・破壊動力学と可視化実験を援用したお手軽モデリング
3. 学会等名 MathAM-OIL企業連携ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口 哲生
2. 発表標題 エラストマーの破壊・摩擦・摩耗
3. 学会等名 日本ゴム協会 第51回エラストマーの補強研究分科会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yamaguchi Tetsuo
2. 発表標題 Topology and toughening of sparse elastic networks
3. 学会等名 Polymers and networks via topology and entanglement（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yamaguchi Tetsuo
2. 発表標題 Sliding friction of polymer gels at various sliding speeds
3. 学会等名 Okinawa Colloids 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yamaguchi Tetsuo
2. 発表標題 Rupture nucleation processes accompanying tremor and slow slip in gel friction experiments
3. 学会等名 jpGU 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yamaguchi Tetsuo
2. 発表標題 Rupture Nucleation Processes Accompanying Tremor and Slow Slip in Laboratory Experiments
3. 学会等名 IUGG 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yamaguchi Tetsuo
2. 発表標題 Slow to Fast Slip Transition in Stick-Slip Friction of Polymer Gels
3. 学会等名 International Tribology Conference Sendai 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口 哲生
2. 発表標題 生きものに学ぶ低摩擦と高摩擦
3. 学会等名 日本ゴム協会 秋季ゴム技術講習会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口 哲生
2. 発表標題 表面突起による摩擦挙動の制御とすべり素過程の可視化
3. 学会等名 次世代固定砥粒加工プロセス専門委員会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口 哲生
2. 発表標題 粘着・剥離現象の可視化とモデリング
3. 学会等名 ガラス科学技術研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tetsuo Yamaguchi
2. 発表標題 Visualization and mathematical modeling of scuffing of polymers
3. 学会等名 PolyTrib 2018（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tetsuo Yamaguchi
2. 発表標題 In-situ visualization of transient frictional behavior between Plexiglass
3. 学会等名 ICETAT2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山口 哲生
2. 発表標題 超音速すべり摩擦：解析解の導出と実験結果との比較
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口 哲生
2. 発表標題 高分子ゲルを使って巨大地震を理解する
3. 学会等名 高分子討論会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yamaguchi Tetsuo	4. 発行年 2019年
2. 出版社 CRC Press	5. 総ページ数 8
3. 書名 Reduction and Control of Friction in Hydrogels, in Surfactants in Tribology	

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京大学大学院農学生命科学研究科生物材料科学専攻生物素材科学研究室HP
<http://www.fp.a.u-tokyo.ac.jp/lab/sozai/index.html>
山口哲生のウェブサイト
http://www.fp.a.u-tokyo.ac.jp/lab/sozai/index_tyama.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
研究分担者	波多野 恭弘 (Hatano Takahiro) (20360414)	大阪大学・理学研究科・教授 (14401)	
研究分担者	宮元 展義 (Miyamoto Nobuyoshi) (80391267)	福岡工業大学・工学部・准教授 (37112)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------