

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13671

研究課題名(和文) 切削過程のin-situ観察による工具-被削材界面の摩擦現象の理解と応用

研究課題名(英文) In-situ observation of friction-induced deformation in cutting process

研究代表者

杉原 達哉 (Sugihara, Tatsuya)

大阪大学・工学研究科・講師

研究者番号：90637539

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、切削加工における工具-切りくず界面の摩擦の理解を目的に、界面の摩擦摺動に起因する材料の塑性変形挙動を可視化するとともに、それらに基づいた摩擦現象の理解・モデル化を試みた。そして、インデンタによる押し込み試験とPIV解析の結果から、摩擦界面近傍において塑性変形が集中する塑性境界層が形成されること、塑性境界層における材料の変形挙動は、材料をビンガム塑性体としてモデル化することで記述できること、界面の摩擦状態については、ビンガム塑性体の動粘度の値によって表現できることなどを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、極めて過酷な環境下における摩擦について、摩擦摺動にともなう材料の塑性変形を可視化を試みるという挑戦的な課題であり、さらにその塑性変形挙動から摩擦現象そのものの深い理解を目指すという点において、学術的意義は極めて大きい。また、本研究で得られた知見は、例えば生産加工分野などの発展に貢献するものであり、極めて多大な社会的波及効果を有している。

研究成果の概要(英文)：We study plastic flow in the vicinity of a toolchip interface in cutting process with indentation experiments using high speed in situ imaging and particle image velocimetry (PIV) analysis. Displacement and strain fields in the indentation zone are obtained at high-resolution for different indenter angles and two lubrication conditions. These fields can be used to demarcate essential features of the material flow phenomena. The deformed layers close to the indenter wall fit a classical boundary layer profile in the framework of a Bingham-solid. Equivalent Bingham viscosities and boundary layer scaling relations are obtained. The viscosity values appear to reflect the nature of the friction interaction at the indenter-material interface and can potentially be used as a discriminating parameter for evaluating contributions to deformation and dissipation arising from interface friction.

研究分野：加工学

キーワード：切削加工 トライボロジー 摩擦 PIV 塑性変形

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年の切削加工の分野においては、被削材の難削材化、切削速度の高速化、加工のドライ化などが進み、加工中の切削工具は極めて過酷な熱的・機械的負荷に晒されている。このような状況下において、工具寿命や加工精度の維持・向上のために重要となるのが、工具-被削材間の摩擦・摩耗・潤滑といったトライボロジー特性を理解し、改善することである。特に、工具すくい面-切りくず間の摩擦の低減は、せん断角の増加→切りくず厚さの低減→すくい面接触長さの減少→垂直応力増大にともなう摩擦角の減少、という循環を促すことから、加工力の大きな減少をもたらす極めて重要な要素であることが知られている^[1]。

(2) 一方で、切削加工中における工具すくい面-被削材切りくずの界面の摩擦は、極めて高温（数百℃～千数百℃）・高圧（数 GPa～十数 GPa）な過酷な環境に晒され、かつ常に活性な新生面と摺動するという特異な摩擦条件であることから、Coulomb-Amonton の摩擦法則に従わないことが知られており、すくい面における摩擦力の値やその分布は、切削加工現象における不確定な要素として残された大きな課題となっている^[2]。そこで今日までに、工具すくい面-切りくず界面の摩擦応力分布を記述する様々なモデル^[2-6]が提案されているが、これらはいずれも様々な仮定のもとで経験的に記述された式であることから、実験や解析で得られた摩擦応力分布とは依然として乖離することが指摘されているほか、モデル中の定数部分を決める物理的因子は何なのか、摩擦を減らすためには工具表面・形状はどうあるべきなのか、加工条件の違いが摩擦応力分布にどう影響するのか、といった様々な『問い』が残存している。その結果、工具すくい面-被削材間の摩擦力の低減を目的とした工具デザイン、加工方法の提案は、トライ&エラーの繰り返しに依然として依存しており、理論に基づいた合理的な設計手法の確立が強く求められている。

2. 研究の目的

(1) 過酷な環境下における摩擦現象の理解やモデル化を妨げた来たる要因の一つは、これまでは伏せられた目に見えない状態にある摩擦摺動面に対して、「“investigate the resultants of the contact system at various stages and attempt to reconstruct a picture of what is going on.” (D. Taylor, 1977)」という“post-mortem”的なアプローチに頼らざるをえなかった点にあると考えた。

(2) そこで本研究では、切削加工分野における上述の現状を打破することを目指し、(i) 工具-切りくず界面のような過酷な摩擦環境を再現し、界面の摩擦摺動にともなう材料の塑性変形挙動を可視化する手法を構築すること、(ii) 可視化した材料の動的な塑性変形挙動から、界面の摩擦状態を記述するための新たな方法論・モデルを提案すること、(iii) 得られた知見に基づいた新たなトライボロジー技術を構築すること、を目的としている。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、工具-切りくず界面の過酷な摩擦にともなう材料の塑性変形挙動を再現し、可視化するための具体的な手法として、くさび状圧子（インデンタ）による押し込み試験を活用した装置を開発した。図 1 に示すように、ガラス面に沿って平面ひずみ状態の変形を実現した状態で、押し込み試験中のインデンタ近傍の材料の変形挙動を高速度カメラで撮影する。そして、撮影した画像に対して PIV 解析を行うことで、インデンタ近傍における材料内部の変位分布、ひずみ/ひずみ速度分布、すべり線場の獲得を目指した^[7]。

(2) さらに本研究では、(1)で構築した可視化装置によって得られた“摩擦界面近傍における材料の塑性流動現象”に着目し、界面の摩擦現象の理解を試みた。著しく大きな垂直・せん断応力が発生する極限的な摩擦の界面においては、摩擦応力によって材料内部に塑性変形が生じる。この摩擦応力に起因する塑性変形は、摩擦界面近傍に集中し、流体力学分野で議論される境界層に類似した、“塑性境界層”を形成する（図 2）。そして、極限摩擦による材料の塑性流動は、界面で生じた摩擦応力が帰結した結果であることから、この塑性境界層に関する特定の特徴・情報を抽出することによって、界面の摩擦状態を的確に、逆問題的に明らかにすることが期待できる。

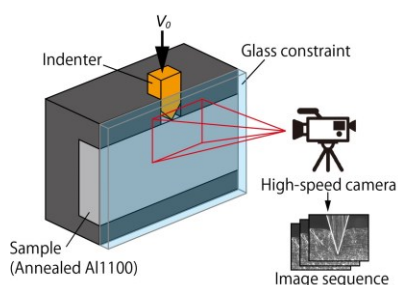


図 1：極限摩擦の In-situ 観察装置

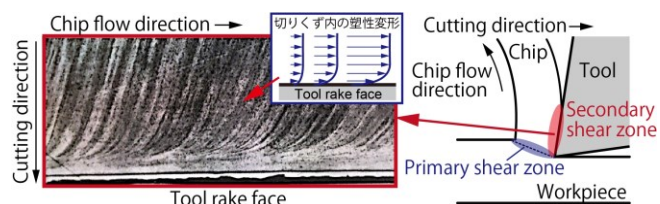


図 2：切削加工の二次塑性域で生じる塑性境界層

4. 研究成果

(1) 図3は、開発した可視化装置を用いて獲得した連続画像に対し、PIV解析を実施することによって得られた、材料の変形場である（インデンタ角 $\alpha_0 = 30^\circ$ 、押し込み速度 $V_0 = 1.0 \text{ mm/s}$ 、材料: Aluminum 1100、インデンタ: 高速度工具鋼）。同図(a)において、青色のグリッド線は材料の初期位置を仮想的に示したものであり、インデンタ側面に対して垂直に置かれている。また、 x 座標、 y 座標は、それぞれインデンタ先端を原点として、インデンタ側面と平行および垂直方向の位置を示している。同図に示すように、インデンタによる押し込みが進行することとともなって、インデンタ側面-材料間の摩擦摺動によって、インデンタ近傍の材料がインデンタ側面に引きずられるようにして塑性変形していることがわかる。

さらに、 n 番目のグリッド線の各点の座標を $U_n(y, t)$ で定義し、各グリッド線の $U_n(y, t_0 + 0.5 \text{ s})$ における変位場（図3(d)）を示したものが図4である。さらに、これらを

$$U_n(y, t)/U_{n \max}(t) \quad (1)$$

によって正規化したものを、図5に示す。ここで、(1)式中の $U_{n \max}(t)$ は各グリッド線における最大変位量であり、 $U_n(\infty, t) - U_n(0, t)$ によって与えられる。同図は、 $t_0 + 0.1 \text{ s}$ （図3(b)）、 $t_0 + 0.3 \text{ s}$ （図3(c)）、 $t_0 + 0.5 \text{ s}$ （図3(d)）における正規化後の変形場を示しているが、いずれの時刻における変形場もほぼ同様のカーブを描いており、インデンタによる押し込みの過程中、ほぼ均一な速度場をもって変形していることがわかる。

これらの図に示すように、過酷な摩擦界面近傍における材料内部には、流体力学分野で議論される境界層に酷似した塑性変形場が存在しており、“塑性境界層”の存在を明確に示している。なお、図3(d)には、 $t_0 + 0.5 \text{ s}$ において $U_n \sim 90\%U_{n \max}$ となる点を示しているが、本研究ではこの点を“塑性境界層”の厚さとして定義することとした。

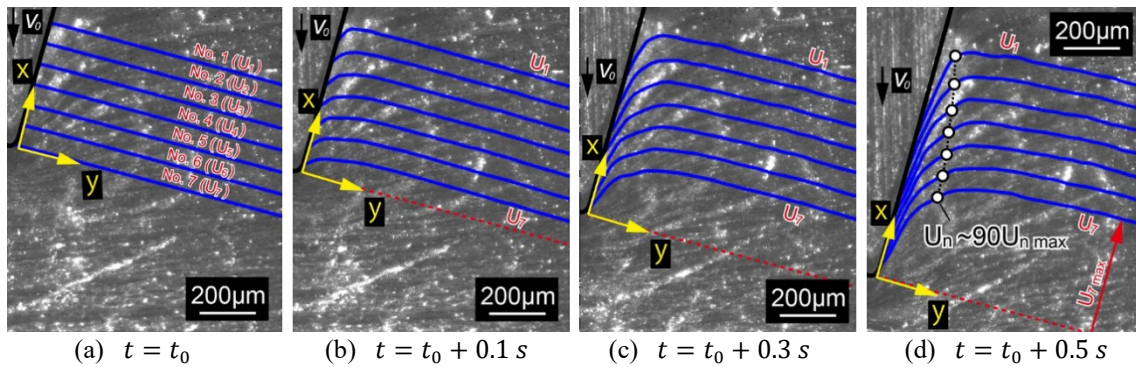


図3：インデンタによる押し込み試験における材料の塑性変形場

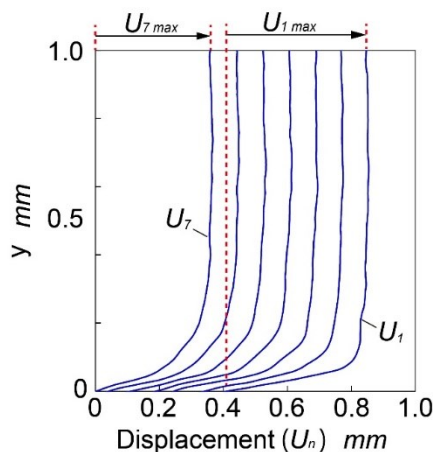


図4：インデンタ近傍における材料の変位

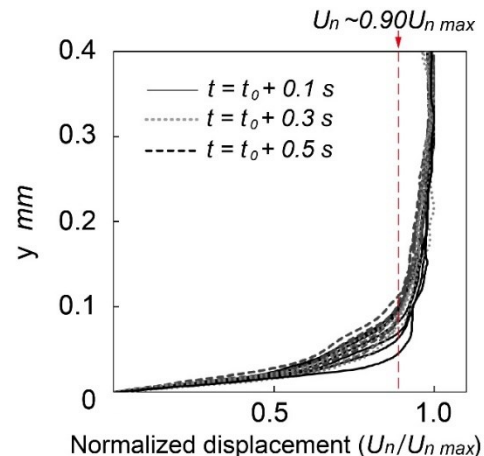


図5：正規化した材料の塑性変形場

(2) 図6は、インデンタ角度 60° （図6(a)）、 90° （図6(b)）、 120° （図6(c)）を用いた場合の、 $t_0 + 0.5 \text{ s}$ における材料のグリッド線、ならびに、正規化した塑性変形場を示している。同図からわかるように、インデンタ角度 60° および 90° の場合、インデンタ角度 30° （図3）のときと同様に、材料の塑性変形はインデンタ-材料界面近傍に集中しており、特にインデンタ近傍のグ

リッド線はインデント側面と平行になっていることがわかる。これは、材料がインデント-材料界面の摩擦に引きずられるようにして、塑性変形していることを示している。一方で、インデント角度 120° においては、そのほかの条件とは異なり、インデント近傍のグリッド線はインデント側面に直行した状態を維持しており、正規化した塑性変形場も S 字状のカーブを描いている。これらの違いは、インデント角度が小さい場合は、材料はインデントによってせん断されているのに対して、インデント角度が大きくなることによって、材料はインデントによる圧縮が支配的となって変形していることが原因であると考えられる^[8]。

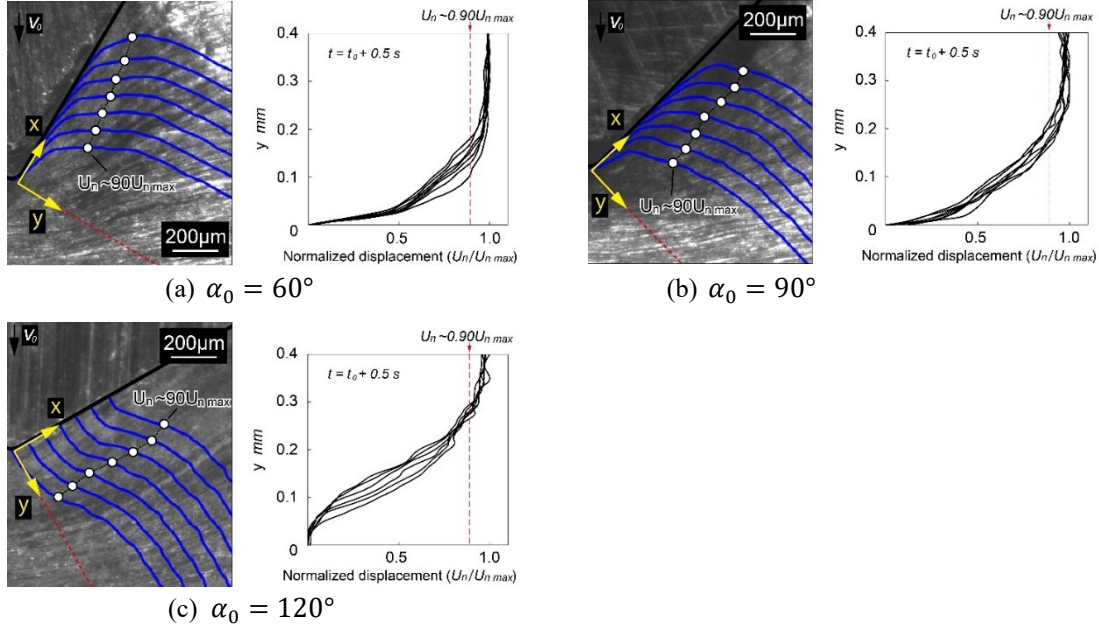


図 6：インデント角度の変化にもなう塑性変形場の違い

(3) インデント-材料界面の摩擦にもなう塑性変形が支配的となるインデント角度 30° の結果について、インデントの押し込み速度を変化させた場合の塑性境界層厚さの違いを示したものを、図 7 に示す。同図に示すように、インデントの押し込み速度、すなわち、インデント-材料界面の摺動速度の上昇にもなう、塑性境界層厚さが小さくなっており、塑性変形がより摩擦界面近傍に集中していることが分かる。この結果は、平板上を流れる粘性流体が形成する典型的な境界層に見られる傾向であり^[9]、摩擦摺動によって形成される塑性境界層と流体力学分野で議論される境界層に、類似点が存在していることを示唆していると言える。

ここで、ひずみ速度が比較的大きい条件下 ($> 10^3/s$) においては、金属材料は以下の式で表現されるビンガム塑性体としてふるまうことが知られている。

$$\tau = \theta + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2)$$

ここで、 θ はせん断降伏応力、 μ は粘性係数を示している。そして、 $t = t_0$ において材料はインデントに対して静止しており、 $t_0 < t < t_0 + t_f$ の間、インデントが一定の速度 (V_0) で押し込まれた場合、 $t = t_0 + t_f$ における変位場 $U(y, t_0 + t_f)$ は、次式で記述することができる。

$$\frac{U}{U_{max}} = -2\eta^2 e f t c(\eta) + e f t(\eta) + 2 \frac{\eta}{\sqrt{\pi}} \exp(\eta^2) \quad (3)$$

ここで、 $\eta = y/\sqrt{4vt}$ は無次元量、 $e f t(\eta)$ ならびに $e f t c(\eta)$ は、それぞれ誤差関数と相補誤差関数である。

図 8 は、 $\eta = y/\sqrt{4vt}$ の関数として、実験で得られた変位場 (図 5) と (3) 式で与えられた理論値を比較した結果である。同図において、理論値は (3) 式内で唯一未知の値である動粘度 ($\nu = \mu/\rho$) の値を調整することによって、フィッティングを試みている。同図からわかるように、(3) 式で与えられた理論値は実験で得られた変位場とよく一致しており、界面の摩擦によって生じた塑性変形場 (“塑性変形層”) は、(2) 式で表現されるビンガム塑性体としてふるまう流体の変形挙動とよく一致していることが示されたと言える。

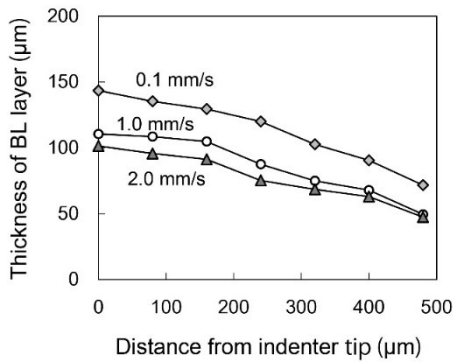


図 7：押し込み速度の境界層厚さへの影響

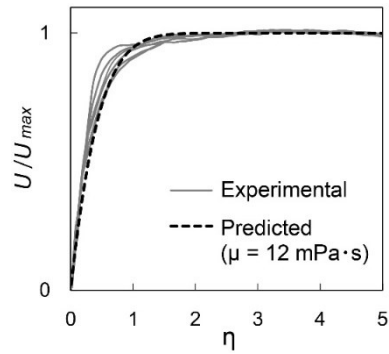


図 8：理論値と実験値との比較

(4) 図 9 は、インデンタ角 $\alpha_0=30^\circ$ 、押し込み速度 $V_0=1.0 \text{ mm/s}$ の条件において、潤滑剤（パラフィン油）の有無による押し込み抵抗の違いを示したものである。同図に示すように、潤滑剤を供給することによって、インデンタ-材料界面の摩擦が低減し、押し込み抵抗が約 30%程度小さくなっていることがわかる。さらに、図 10 は潤滑剤供給時における材料の変形場に対して、(3)式によって求められる理論値との比較を行った結果であるが、無潤滑時（図 8）と比較して、変形場と一致する動粘度の値が、 $12 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ から $7 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ に小さくなっている。この結果は、潤滑剤を供給することによって、インデンタ-材料界面の摩擦にともなう材料の塑性変形が、より摩擦界面近傍に集中していることを示しており、摩擦にともなう塑性変形によるエネルギーの消失が抑制されていることを示している。

さらに、界面の摩擦状態の変化にともなう塑性変形場への影響は、(2)式内における粘性係数の値によって表現することができることから、同値は界面の摩擦状態を表現するパラメータとなる可能性を示唆していると言える。

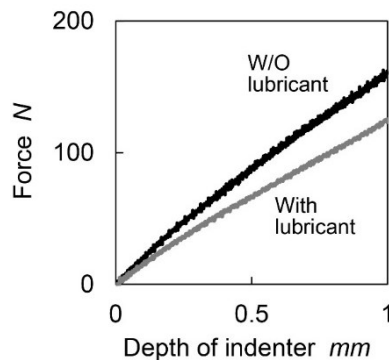


図 9：押し込み抵抗の比較

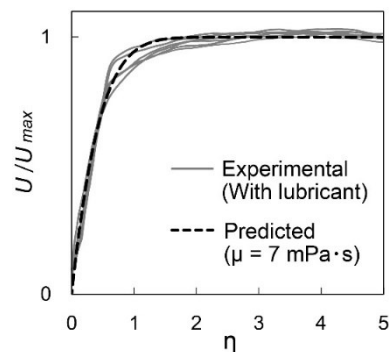


図 10：理論値と実験値との比較（潤滑剤供給時）

<引用文献>

- [1] 中村 隆, 切削加工におけるトライボロジー, 電気製鋼, Vol. 78, No. 3, pp. 241-248, 2007
- [2] P. J. Arrazola, T. Özel, Investigations on the effects of friction modeling in finite element simulation of machining, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 52, No. 1, pp. 31-42, 2010
- [3] A. Svoboda, D. Wedberg, LE. Lindgren, Simulation of metal cutting using a physically based plasticity model, Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, Vol. 18, 075005, 2010
- [4] A. Malakizadi, K. Hosseinkhani, E. Mariano, AD. Prete, L. Nyborg, Influence of friction models on FE simulation results of orthogonal cutting process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume Vol. 88, pp. 3217-3232, 2017
- [5] H. Bil, SE. Kılıç, AE. Tekkaya, A comparison of orthogonal cutting data from experiments with three different finite element models, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 44, No. 9, pp. 933-944, 2004
- [6] THC. Childs, Friction modelling in metal cutting, Wear, Vol. 260, No. 3, pp. 310-318, 2006
- [7] H. Yeung, K. Viswanathan, WD. Compton, S. Chandrasekar, Sinuous flow in metals, PNAS, Vol. 112, No. 32, pp. 9828-9832, 2015
- [8] AG. Atkins, D. Tabor, Plastic indentation in metals with cones, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 13, No. 3, pp. 149-164, 1965
- [9] G. Batchelor, An Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge University Press, Cambridge, 2000

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sugihara Tatsuya, Udupa Anirudh, Viswanathan Koushik	4. 巻 60
2. 論文標題 A Plastic Boundary Layer in Wedge Indentation of Aluminum	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 1436-1441
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.2320/matertrans.MD201907	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 該当する

1. 著者名 Udupa Anirudh, Sugihara Tatsuya, Viswanathan Koushik, Chandrasekar Srinivasan	4. 巻 11
2. 論文標題 Altering the Stability of Surface Plastic Flow via Mechanochemical Effects	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 014021-1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.014021	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 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Sugihara Tatsuya, Udupa Anirudh, Viswanathan Koushik
2. 発表標題 Boundary layer structures in indentation studies of aluminium
3. 学会等名 The 6th International Indentation Workshop (IIW6) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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
---------------------------	-----------------------	----