

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04149

研究課題名(和文) マイクロフィードミリングによる切削油剤の機上評価および仕上げ面あらさの推定

研究課題名(英文) On the machine estimation of Cutting fluid and prediction of surface roughness by micro feed milling

研究代表者

田中 隆太郎 (TANAKA, Ryutaro)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・准教授

研究者番号：60361979

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)：アップカットの切削開始直後の切削抵抗を用いて使用した切削油剤の工具-被削材間における摩擦特性評価を行った。また、刃先丸みと同程度の切込みによる切削では、摩擦係数が小さい切削油剤を用いたときにスティックスリップが起こりやすく、送りマークが明瞭に表れる切削条件では刃先の転写精度が低下することが分かった。刃先丸み程度の切込みにおける工具摩耗特性を調べ、摩擦係数が小さい切削油剤を用いたときに仕上げ面生成領域の工具摩耗が大きくなることが分かった。仕上げ面生成領域における被削材の変形領域の深さは切削油剤を用いたときに乾式より小さいため硬い被削材と工具が接触することが工具摩耗の要因と考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ユーザーが入手可能な切削油剤の特性値は常温におけるデータであることがほとんどであるため、切削条件による油剤の効果が変化する理由を説明できない場合が少なくないが、提案した手法は工具動力計さえあれば切削油剤にユーザーが切削状態に近い状態で特性を評価できる。得られた成果は、工具寿命の判断に用いられる横逃げ面摩耗の抑制効果が高い油剤が、刃先形状の転写精度の低下や仕上げ面生成領域の工具摩耗を促進させる可能性も示しており、最適な油剤の特性を見極める際に、提案した手法の活用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Cutting force just after start of one cut in up-cut was used to estimate the friction characteristic of cutting fluid at contact between tool and work material. When the depth of cut was around edge roundness, the cutting fluid of lower coefficient of friction easily occurred stick-slip, and the higher transfer error occurred at the cutting conditions where the relatively clear feed mark formed. The lower coefficient of friction cutting fluid caused larger tool wear at the surface formation area. The depth of deformed work material when cutting fluid used was smaller than that in dry cutting. Therefore, it was thought as a one of reason of increase of tool wear that the higher hardness work material rubbed the tool surface.

研究分野：機械加工学

キーワード：切削加工 切削油剤 仕上げ面粗さ 工具摩耗

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

既存の様々な摩擦試験方法が存在するが、先端が球形など特殊形状の試験片が必要であることが多く、切削工具を対象とした摩擦試験では工具素材そのものが高硬度であるため、ユーザー自身が試験片を作成すること自体が容易ではなく、近年最も使用されているコーテッド工具では特注せざるを得ない。また、高温下では試験片が容易に変形するため接触応力を高く保つことが困難であり切削加工特有の高温・高応力を同時に実現することは容易ではない。そのため切削実験のデータから摩擦特性値を推定する「逆解析」に拠るのが現状である。また、工具摩耗の抑制、仕上面粗さの向上を目的に工具と被削材の接点近傍へ切削油剤を供給しながら切削されることが多い。しかし、ユーザーが入手可能な切削油剤の特性値は常温におけるデータであることがほとんどであるため、切削条件による油剤の効果が変化する理由を説明できない場合が少なくない。メーカーから提供される油剤の摩擦係数は、振子式試験で求められるが、極低速ですべり状態のときの摩擦係数が得られる。切削中の工具と被削材の接点は高温・高圧下にさらされるため、その温度における切削油剤の特性値を知ることは加工現象を解明するうえで重要である。油剤の特性の温度依存性に関して、添加物を含有していない基油については絶対温度と粘度の関係を示す実験式が報告されているが、極圧添加剤、界面活性剤など含有する場合にはこの適用は難しい。さらに他の摩擦特性値についてはこのような実験式すら見当たらない。また、水溶性切削油剤の特性は、その濃度、希釈に用いる水の特性、経時変化などの影響を受けるため特性の把握はかなり難しい。

2. 研究の目的

実機上で切削油剤の特性評価を行う方法として、工具1回転あたりの送りが $\sim 10\mu\text{m}$ と非常に小さいマイクロフィードミリングにおいてアップカットの切削開始直後の切削挙動に着目した机上評価方法を考案した。この方法の最大の長所は、実際の切削速度で摩擦試験を行うことが出来ることにある。予備実験において切削速度と同一の摩擦速度で工具-被削材間の摩擦特性を定量評価できる見込みが立ったので、この手法の詳細について詰め高い精度、再現性を有するレベルに引き上げる。また、比較的送りマークが明瞭で粗さの数値が近いあらさ曲線間に違いが生じる原因について、得られた切削油剤の特性値から検討を行い、切削条件(切削速度、送り)に加え、油剤の種類、切れ刃稜線の丸み、仕上面生成領域内の切り取り厚さ、切り取り領域内に占める仕上面生成領域の割合などの項目から、いくつかの被削材を切削するときの最適条件についてその材料特性と関連付けながら検討する。本研究における良好な切削とは、単に仕上面あらさの数値の大小ではなく、切れ刃の輪郭形状に近い仕上面形状を得る状態をいう。この判断については申請者らによる刃先の輪郭形状の転写誤差による方法も用いる。切削加工における現象解明において特に切削油剤の特性を論じる際に、研究者自身が切削油剤の特性値を評価して議論することが現象の解明につながり、本手法がその標準的な評価法となることに期待したい。

3. 研究の方法

3.1 アップカットの切削開始直後の切削抵抗を用いた工具-被削材間の摩擦特性評価

アップカットでは切り取り厚さが0から始まり弾性接触域(切れ刃が被削材上を上滑りしている状態)、塑性接触域(切れ刃前方の被削材が塑性変形して盛り上がっている状態)、切削域(切りくずを生成している状態)と状態が変化してゆく(図1)。このとき、2次元切削において主分力/背分力は、弾性接触状態ではほぼ一定の値を示し、塑性変形の状態になると増加に転じる。本研究では、この変化の中で弾性接触域に注目する。使用したインサートの切れ刃は約 $4\mu\text{m}$ の丸みを持つが、この丸み先端部だけが被削材と弾性接触状態ですべり運動することになる。 x - y 座標系で測定した工具と被削材が接触した直後の切削抵抗から、回転している工具の接線方向 F_c とこれに垂直な半径方向の成分 F_n を求め、さらに $\mu_{\text{MFM}} = F_c/F_n$ と定義する。(MFM: Micro Feed Milling)

3.2 刃先丸みと同程度の切込みを想定したスティックスリップ特性の評価

切削抵抗の変動はスティックスリップによって生じるものと仮定し、時間 t における切削抵抗の接線方向成分を $F_t(t)$ 、工具と被削材が接触してから時間 t に至るまでの F_t の最大値を $F_{t_{\text{max}}}(t)$ 、最初に被削材に接触した切れ刃が被削材から離れる時間を t_0 として(図2)、切削抵抗の変動率を以下の式のように定義した。

$$\text{Cutting force instability rate: CFIR} = \frac{\int_0^{t_0} \{F_{t_{max}}(t) - Ft(t)\} dt}{\int_0^{t_0} F_{t_{max}}(t) dt}$$

3.3 刃先転写性とスティック-スリップ特性の関係

理想的な加工がなされた場合は、工具刃先の幾何形状が一山ごとに転写され、連続した山谷が理論粗さとなる。一方加工システムに不安定性がある場合は、刃先は正確に転写されるものの、振動や剛性不足による変形あるいは工作機械の送り精度・回転精度の不良などから、刃先半径の中心位置が送り方向や切り込み方向にずれ、この結果表面粗さは理論値よりも大きくなる。したがって、粗さ曲線から、一刃（一山）のごとの輪郭形状からのずれを定量的に計算することにより加工現象の不安定性を、隣り合った山谷から工具刃先半径の中心位置のずれを定量的に求めることによりシステムの不安定性を推定することが可能である。一つ一つの送りマーク毎に工具の理想輪郭形状を X 方向に少しずつシフトさせたのち両者の Y 方向の二乗誤差の総和が最小となるような Y 位置を探索する。この最小二乗誤差が最小となる X に刃先輪郭形状を固定し評価値を算出する。 τ が平均転写誤差(μm)、 τ_f が平均送り誤差(μm)、 τ_D が平均送り誤差(μm)を示す。(図 3)

横軸にエンドミル加工において求めた CFIR、縦軸に旋削加工において求めた刃先転写誤差 τ を取り両者の関係性を評価するとき、エンドミル加工における刃先丸み に対する送り f の比と、旋削加工における刃先丸みに対する仕上げ面生成領域における最大切り取り厚さを対応させた。

3.4 刃先丸み程度の切込みにおける工具摩耗特性

ノーズ付き工具で旋削するときの仕上げ面生成領域における切削油剤の種類やその有無による工具摩耗の違いを調べ、その原因について検討するために、1 回の切削中の半径方向切り取り厚さの変動を極力抑えた条件下におけるエンドミル加工で、半径方向切り取り厚さを刃先丸み程度である数 μm から慣用程度である $100\mu\text{m}$ まで変化させ切削油剤の有無やその種類が工具摩耗 1 回の切削中における切削抵抗の変動を調べた。また、仕上げ面生成領域における被削材の挙動を調べるために、エンドミル加工において被削材出口側の変形へおよび刃先丸み に対する仕上げ面生成領域の最大切り取り厚さの比がおよぼす影響を調べるために、送りを変化させて実験を行った。(図 4)

4. 研究成果

図 5 に、アップカットにおいて工具と被削材が接触した直後の接線方向抵抗 F_t 、法線方向抵抗 F_n および切削抵抗比 F_t/F_n を示す。切れ刃はねじれ角があるため、軸方向切込み内で作用する切れ刃が全て接触したのちごく短い時間であるが切削抵抗比 F_t/F_n が一定となる時間帯がある。このときの切削抵抗比 F_t/F_n を摩擦係数 μ_{MFM} として工具-被削材間の摩擦特性ととして用いた。MFM は Micro Feed Milling を示す。なお、乾式でこのパターンを得るために多くの試行回数を必要としたことが今後の課題である。

図 6 に、刃先丸みに対する切込みが変化するとき切削抵抗の変動率がどのように変化するか調べた結果を示す。刃先丸みに対する切込みの比が小さくなると、切削抵抗の変動率が大きくなるのが分かる。また、工具-被削材間の μ_{MFM} が小さいほど切削抵抗の変動率が大きい。

図 7 に、切削抵抗の変動率が変化するときの刃先転写誤差の違いを示す。同じプロットが 3 個ずつあるが、刃先丸みに対する仕上げ面生成領域における最大切り取り厚さが同じで潤滑条件が異なる 3 条件で実験したことを示している。仕上げ面生成領域における最大切り取り厚さが刃先丸みとほぼ同じ程度のときは、切削抵抗の変動率が大きくなると刃先転写誤差が大きくなることが明らかである。刃先丸みに対して同切込みが十分に大きいときは、潤滑状態が変化しても切削抵抗の変動率や刃先転写誤差はあまり変化しない。

図 8 に、切削距離 $L=7000\text{m}$ における逃げ面摩耗の分布を示す。角度が小さい方が、前切れ刃側で、角度が大きい方が横切れ刃側である。逃げ面摩耗幅とともに切り取り厚さも示した。いずれの条件においても、切り取り厚さが減少しても逃げ面摩耗幅は単調に減少するのではなく、仕上げ面生成領域(θ : $-3.29^\circ \sim 3.29^\circ$)に近づくにつれて増加に転じている。乾式と比べると切削油剤を用いた場合は、切り取り厚さが大きい横逃げ面側で工具摩耗の抑制が見られるが、逆に切り取り厚さが小さい領域では工具摩耗が増加していることが分かる。この傾向は、潤滑特性が高い油剤の方が強い。

図9に示す方法で、仕上げ面生成領域の最大切り取り厚さを変化させるために、送りを変化させて実験を行った。その結果を図4に示す。水溶性および油性切削油剤ともに、刃先丸みよりも切込みが小さいときの変形幅がほぼ同等か潤滑性が高いときにやや小さいようである。特に切込みが刃先丸みよりも小さいときに水溶性油剤の方が油性切削油剤よりも変形幅が小さいのは、水溶性切削油剤の冷却作用が大きいことが理由として考えられる。切込みが刃先丸みと同じ程度になると潤滑性が高いときに変形幅がやや大きくなっている。さらに切込みが大きくなると潤滑性が高いときの変形幅が小さい。したがって、切込みが刃先丸みよりも十分に小さい場合や安定して切りくずが生成されるような状態においては、切削油剤の潤滑効果が良い方向へ働くが、刃先で塑性変形により切りくずが生成され始めるような状況においては、切りくずの生成により効果をおよぼさないように考えられる。したがって、切削油剤を供給すると、乾式より硬い材料と接触すること、切りくずが安定して生成されるために必要な刃先丸みに対する切り取り厚さの比が大きくなり刃先に滞留した被削材の一部が逃げ面側へ流出して逃げ面を擦過する頻度が高くなるために、乾式の場合と比べると仕上げ面生成領域の逃げ面摩耗が増加したと考えられる。この仕上げ面生成領域の工具摩耗の進行によって初期の切れ刃形状とは異なる輪郭の転写により刃先転写誤差が増加することが考えられる。

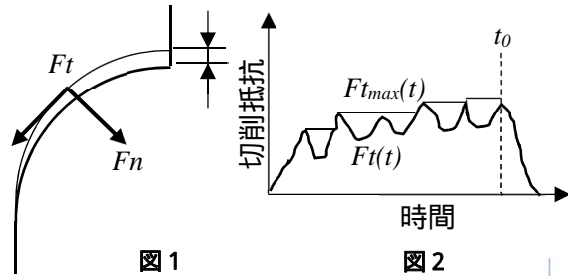


図1

図2

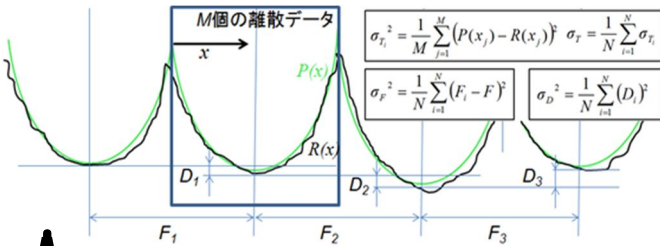


図3

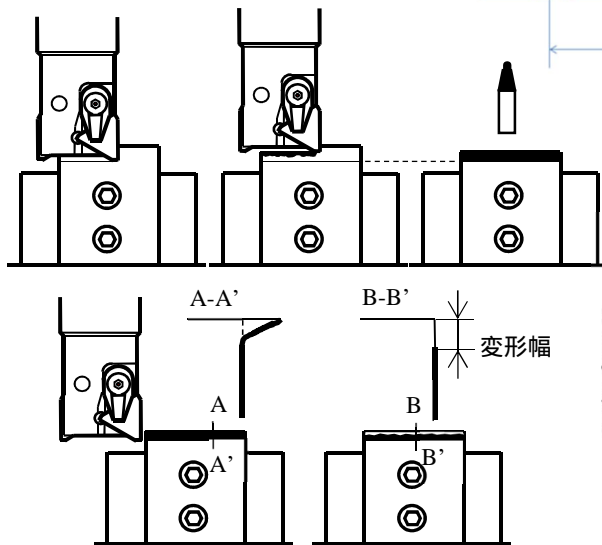
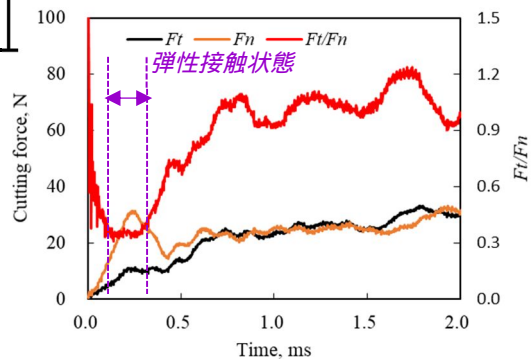
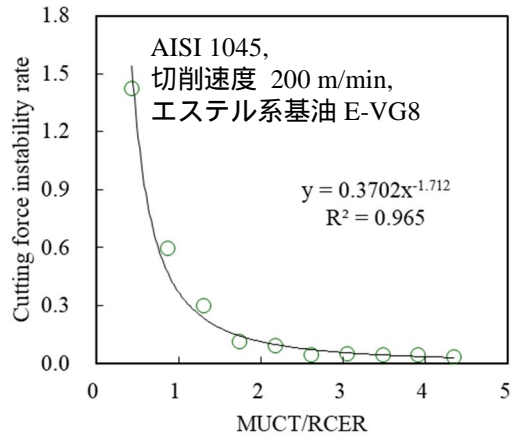
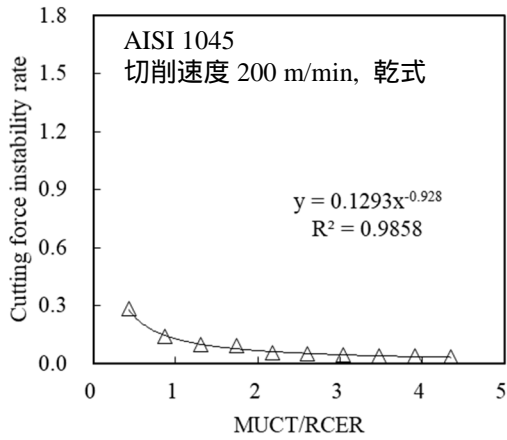


図4



工具径 35mm, アップカット, 送り: 10 μm
 切削速度: 200 m/min,
 切削油: エステル系基油 E-VG8,
 被削材: S45C

図5



※MUCT：最大切り取り厚さ，RCER：刃先丸み

図6

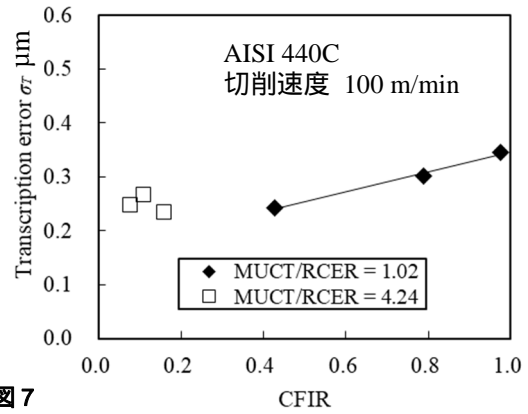
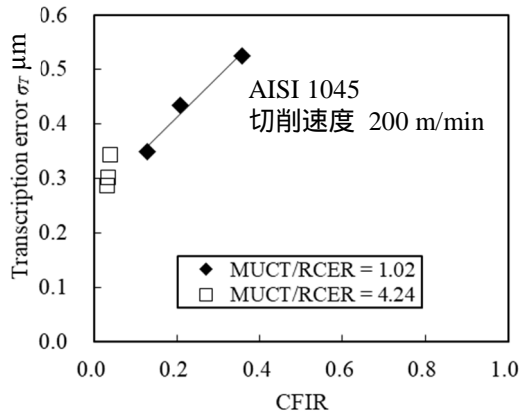


図7

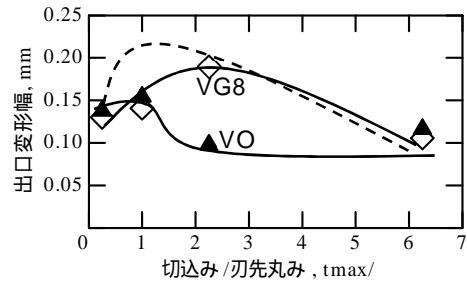
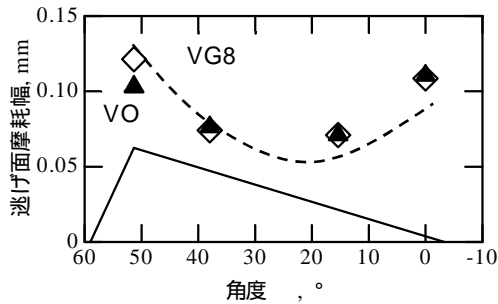
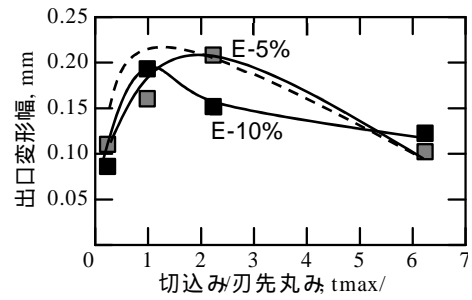
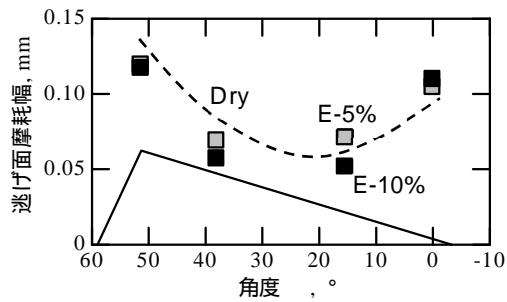


図8

図9

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 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tomohiko Kitamura, Ryutaro Tanaka, Yasuo Yamane, Katsuhiko Sekiya, Keiji Yamada	4. 巻 62
2. 論文標題 Performance evaluation method for cutting fluids using cutting force in micro-feed end milling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 232-243
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.precisioneng.2019.12.007	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 Ryutaro TANAKA, Tai-Yi YEH, Kota MATSUDA, Katsuhiko SEKIYA and Keiji YAMADA	4. 巻 14
2. 論文標題 Tool wear mechanism in up-cut end milling of AISI 1050 at different feed rates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jamdsm.2020jamdsm0042	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hayashida Takahide, Tanaka Ryutaro, Yamada Keiji, Sekiya Katsuhiko
2. 発表標題 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing Technologies in 21st Century, LEM 2021
3. 学会等名 Effect of lubricant on tool wear in finished surface formation area of rounded nosed tool (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林田 孝秀, 田中隆太郎, 松田 孝太, 關谷 克彦, 山田 啓司
2. 発表標題 旋削加工におけるノーズ R 付き工具の仕上げ面生成領域の工具摩耗
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第58期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今田晃樹, 田中隆太郎, 松田 孝太, 關谷 克彦, 山田 啓司
2. 発表標題 送りマークが不明瞭な粗さ曲線における工具刃先転写誤差の算出
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第58期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tai-Yi YEH, Ryutaro TANAKA, Kota MATSUDA, Katsuhiko SEKIYA and Keiji YAMADA
2. 発表標題 Influence of Friction Characteristic of Cutting Fluid Evaluated by Cutting Force in Micro Feed End Milling on Surface Roughness
3. 学会等名 The 8th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryutaro TANAKA, Tai-Yi YEH, Kota MATSUDA, Katsuhiko SEKIYA and Keiji YAMADA
2. 発表標題 Effect of Feed Rate on Tool Wear in Up Cut End Milling of AISI 1050 at Different Cutting Speed
3. 学会等名 The 8th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (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

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