

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21110

研究課題名（和文）人間動作模倣を導入した攪拌・混合操作論の新機軸確立への挑戦

研究課題名（英文）Challenge of Establishing a New Theory of Stirring and Mixing Operations by Introducing Human Motion Imitation

研究代表者

大村 直人（Ohmura, Naoto）

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：50223954

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：裏千家の抹茶を点てる動作に着目し、きめ細かい泡立ちに必要な要素を抽出するために、動作解析を行った。工業プロセスへの展開として、人間の攪拌動作を模倣した旋回型攪拌翼の混合性能を評価した。また、アイスクリームのフリージングに着目し、攪拌・混合によってアイスクリームの内部構造の制御に挑戦した。これらの研究を通じて、泡だてのを目的とする攪拌動作では液表面により剪断がかかるような往復運動、物質を均一に混ぜるには円形運動が有効であることを見出した。また、攪拌対象の物性の変化に応じて攪拌速度を変化させることが、生産物の物性制御にとって重要であることも見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、化学プロセスを設計・操作するための学問である化学工学における攪拌・混合の研究および、技術開発は、化学装置である攪拌槽と攪拌を行うための攪拌翼を起点としてなされており、学問の体系化もこれらをベースにしてなされてきたが、本研究において、人間の攪拌動作の基礎要素として往復運動、旋回運動に着目して、これらの運動が攪拌に性能に及ぼす効果を明らかにすることができた。これらの知見が今後の新規な混合方法の開発に繋がることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Focusing on the Urasenke's action of preparing matcha (powdered green tea), a motion analysis was conducted to extract the elements necessary for fine frothing. As an application to industrial processes, we evaluated the mixing performance of a swirling agitator blade that mimics human stirring motion. Focusing on ice cream freezing, we also tried to control the internal structure of ice cream by stirring and mixing. Through these studies, we found that a reciprocating motion that shears the surface of the liquid more is effective for the stirring motion aimed at creating foam, while a circular motion is effective for mixing the substance uniformly. We also found that changing the stirring speed in response to changes in the physical properties of the agitated object is important for controlling the physical properties of the product.

研究分野：移動現象論

キーワード：攪拌・混合操作 人間動作模倣 動作解析 攪拌動作 調理プロセス

## 1. 研究開始当初の背景

従来、化学プロセスを設計・操作するための学問である化学工学における攪拌・混合の研究および、技術開発は、化学装置である攪拌槽と攪拌を行うための攪拌翼を起点としてなされており、学問の体系化もこれらをベースにしてなされている。近年発達してきたカオス混合理論や異常輸送理論により、循環渦流を持つ流動場に対して、循環流動の周期、流動場に与える摂動の強さおよび、その周期を最適化すれば、極めて微小な動力で、迅速に混合でき得ることが示されているが、従来の攪拌翼をベースにした攪拌プロセスの開発においては、攪拌翼の回転によりこの3つのパラメータが決まってしまうため、このパラメータを独立に制御できず、性能に限界があることがわかった。そこで申請者は、革新的な攪拌装置の開発のためには、これまでの攪拌槽、攪拌翼を出発点とするのではなく、理想の混合状態を出発点として考え、人間の攪拌動作における暗黙知に着目した。人間は長年の経験の積み重ねで、理想の混合状態を得るための攪拌動作を暗黙的に修得しており、特に熟練した職人においては、優れた所作を身につけているからである。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、日常生活で頻繁に攪拌動作が行われている「調理」を中心として、熟練者の攪拌動作を詳細に調べ、非熟練者の攪拌動作とも比較することで、化学工学の攪拌・混合の分野に人間動作模倣 (Human Motion Mimetics) という新しい概念を導入することにより、まったく新しい攪拌・混合操作論の体系を構築することを目的とし、調理など人間が行っている様々な攪拌動作の運動と理想混合状態の分類、それぞれの攪拌動作の動作解析による攪拌に有効な動作の抽出、攪拌媒体の物性変化に対応した攪拌動作の変更と人間のセンシング機能の解明、工業プロセスにおける攪拌プロセス強化への展開について検討する。

## 3. 研究の方法

### 1) 調理など人間が行っている様々な攪拌動作の運動解析

調理を中心として、人間が日常生活で行っている攪拌動作を調査し、リストアップする。その中から攪拌動作によって、味や外観などのでき栄えが大きく変化するものを選び、動作解析を行う。熟練者により得られた混合状態を一つの理想状態として、このときのレオロジー特性や混合媒体の微細構造をレオメーターや顕微鏡で調べ、物性面から理想混合状態の分類を行う。まず、攪拌動作を伴う調理について、攪拌が担う機能を分類し、その機能の充足度を評価するための評価項目と基準を策定するとともに、分類された攪拌機能を代表する調理過程を選定する。つぎに、熟練調理師による攪拌動作を CCD カメラに撮影記録する。調理後に攪拌の機能を、策定した評価基準に従い、評価するとともに、撮影された攪拌動作を、動作解析ソフトを用いて解析し、機能充足度と攪拌動作の関係を明らかにする。本研究では、茶道の歴史は長く攪拌における暗黙知の集積であると考えたので、研究対象の系として抹茶を選択した。抹茶の表面がきめ細かい泡で覆われている状態を目指す裏千家の泡立ちを研究対象とした。泡立ちに必要な要素を抽出するために、通常茶筌に加え、内穂のみ、外穂のみの茶筌の3パターンに分類した。また、攪拌動作による泡立ちへの影響を調べるために熟練者と非熟練者それぞれの肘、手首、中指の第二関節の3点に印をつけ前から撮影し、動作解析を行なった。

### 2) 旋回型攪拌翼の流動・混合特性の調査

人間の攪拌動作で頻繁に現れる旋回動作に注目し、旋回型攪拌翼である SWINGSTIR® (株式会社神鋼環境ソリューション) に着目し、流動・混合特性を調べることで、人間の攪拌動作の工業プロセスへの実装可能性について検討を行った。この攪拌翼は他の攪拌翼と比較して低せん断でかつ高い混合性能を示すことが明らかとなっている。しかし、この攪拌翼の旋回径や翼幅、パッフルの枚数といった攪拌装置の幾何学的パラメータが攪拌性能に及ぼす影響については、ほとんど研究がなされていない。そこで本研究では、実験的手法と数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 的手法によって、旋回型攪拌翼自体の幾何学的パラメータが攪拌槽内に及ぼす動力・混合・流動特性について詳細に調査した。

SWINGSTIR®の旋回径と翼幅、パッフルの枚数を変え、各条件における動力特性や混合特性、流動特性の評価を行った。動力特性と混合特性の評価には実験的手法を用いた。動力特性を評価するためにトルクの測定を行い、動力線図を作成した。混合特性の評価にあたり、ヨウ素でんぷん溶液の呈色をチオ硫酸ナトリウムで還元脱色する脱色法により、混合時間の測定を行った。また、流動特性の評価には CFD による数値解析的手法を用いた。

### 3) 食品プロセス強化への展開

食品加工においても攪拌・混合は頻繁に用いられるが、食品は多様な成分が混じり合った複雑な物質であり、モデル流体で検証されてきた知見が当てはまらないケースが多々ある。また加工中の物性変化も頻繁に起こり、合理的なプロセス設計が難しい。そこで本研究では、アイスクリームのフリージングに着目し、攪拌・混合によってアイスクリームの内部構造の制御に挑戦した。

このフリージングプロセスはあらかじめ調整した原料(アイスクリームミックス)をフリーザに投入し、冷却・攪拌を行うプロセスであり、アイスクリームの内部構造形成に大きく関わる。ここでは水相の凍結、通気、および脂肪球の凝集が起こる複雑現象である。まず、モデル流体としてスクロース水溶液を用いて、攪拌・混合操作が凍結現象にどのような影響を与えるかを、流動観察および温度・トルク測定を行い検討した。続いて、市販のアイスクリームミックスを用いて、回分式フリーザ中でアイスクリームを製造した。フリージング後のアイスクリーム中に含まれる気泡数の計測や気泡径の測定、および脂肪球の粒度分布測定を行った。また、フリージング後のサンプルを冷凍庫中で24時間さらに凍結させたものについて、レオロジー測定を行った。

#### 4. 研究成果

##### 1) 調理など人間が行っている様々な攪拌動作の運動解析

図1の二値化画像処理により得られた細かい泡立ちのない部分の面積の比較から、通常の茶筌と比較して、内穂のみと外穂のみの茶筌を用いた攪拌実験では、抹茶の泡立ちは裏千家の仕上げのようなきめ細かいものにはならなかった。この結果は非熟練者において顕著であったが、熟練者も同様であった。抹茶を攪拌する上で、外穂と内穂の両方が存在してこそ、きめ細かい泡を立てられるとわかった。また、外穂の方が内穂よりも良い泡立ちであったので、内穂よりも外穂の方が起泡性に富み、更に泡を細かくする役割があるのではないかと考えられる。図2に示すとおり、動画解析を行なった結果を原点からの距離の経時変化で示すと、熟練者全員と非熟練者のうち1名が手首と中指の位相が同じで、肘の位相が逆であることがわかった。また、これに該当しない非熟練者の位相は手首と中指の位相はほぼ同位相であるが、肘の位相が1/4周期遅れていることがわかった。これは、前者が肘を軸として中指、手首を同時に動かしているのに対し、後者は指先が先に動き、その運動に連動して肘が動いているとわかった。この運動の違いは泡立ちに大きく影響しており、前者は裏千家のようなきめ細かい泡立ちに近かったが、後者は泡の立っていない部分が多く見受けられた。これは、後者の運動が抹茶表面にせん断がかかりにくく、空気が取り込まれなかったためであると考えられる。

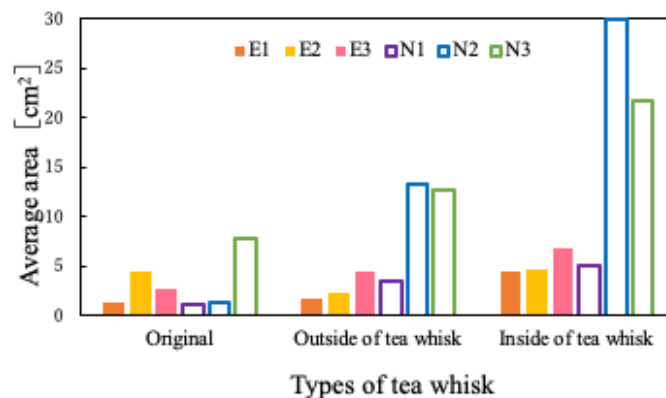


図1 茶筌による被泡立ち部の面積に及ぼす影響; E1~E3: 熟練者、N1~N3: 非熟練者

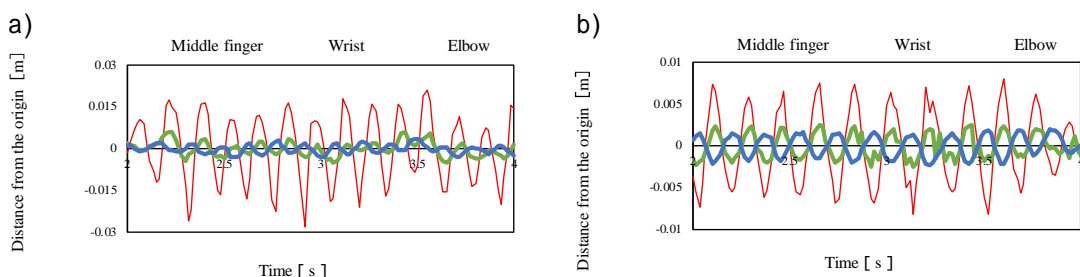


図2 動作解析による中指、手首、肘の位置の変位の時系列データ; a) 熟練者、b) 非熟練者

##### 2) 旋回型攪拌翼の流動・混合特性の調査

動力特性評価において、攪拌レイノルズ数 $Re$ に対して動力数 $N_p$ をプロットした動力線図を作成した。翼旋回投影直径の最大値を攪拌翼代表径に用いて動力線図を作成すると、旋回径一定条件下では動力線図が一致したが、翼幅一定条件下では旋回径の増加に伴い $N_p$ も増加し、動力線図は一致しなかった。旋回攪拌では、翼の軌道が通常の攪拌翼とは異なる。そのため翼幅を大きくすると抵抗が増加する一方で、翼旋回投影直径の最大値と実際に攪拌翼の描く軌道とのずれが大きくなると考え、攪拌翼代表径を再定義した。また定義式に立ち返って $Re$ 、 $N_p$ を再定義し

することで、巡回径一定条件下では動力線図の一致度は若干減少したが、翼幅一定下では動力線図の一致度は増加し、全体的にみると図3に示すとおり、動力線図のバラつきは改善された。

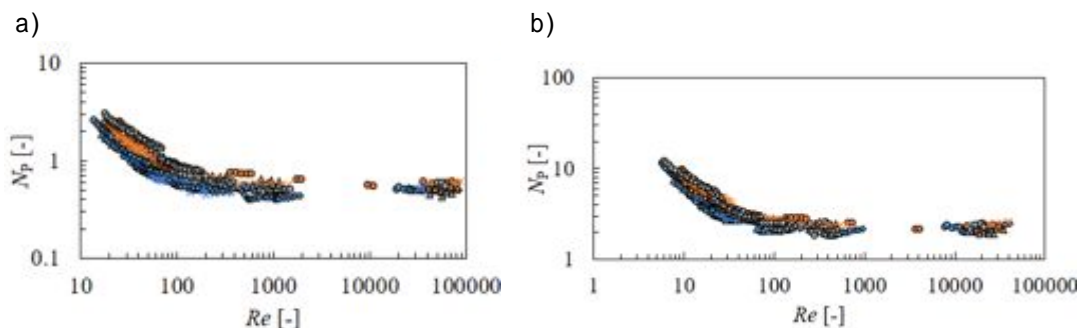


図3 動力線図; a) 攪拌翼代表径の再定義前、b) 攪拌翼代表径の再定義後

つぎに、動力特性を踏まえ、脱色法から脱色時間および脱色過程の確認を、CFD から槽内の流動状態の可視化を行った。その結果、槽下部に形成される循環流の大きさは翼幅に比例するため、翼幅が大きいと混合性能が低下すること、そして巡回径が大きくなると槽内の乱流強度が増加し、槽内の流動の非定常性が増加するため、混合性能が高くなることがわかった。また、巡回径と翼幅の相互作用に着目すると、各条件で攪拌翼先端が描く軌道が混合性能に影響を及ぼす傾向が見られた。翼幅が増加すると軌道の形状が円形から離れ、巡回径が増加すると攪拌槽断面を攪拌翼が通過する領域が槽壁側に近づく、これらの影響を加味すると、攪拌翼先端が描く軌道の形状が円形に近く（円形度が1.0に近い）攪拌槽断面を攪拌翼先端が描く軌道内部の領域と外部領域の面積比（ $\beta$ ）が等しいほど、攪拌槽内で上下流が発達しやすく、混合性能が向上すると考えられる。

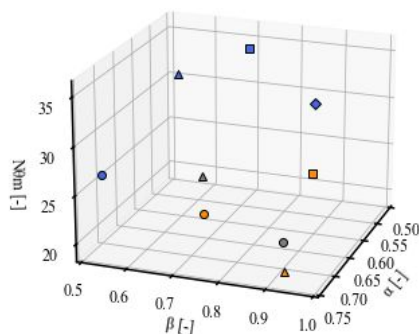


図4 攪拌翼先端軌道の円形度  $\beta$  と攪拌翼先端が描く軌道内部の領域と外部領域の面積比  $\alpha$  が無次元混合時間  $N\theta_m$  に及ぼす影響

### 3) 食品プロセス強化への展開

食品の凍結において、しばしば過冷却状態を経るが過冷却度（過冷却状態における最低温度と実際の凍結温度の差）が大きい方が、氷結晶のサイズが小さく、食感に優れた凍結物になる。そこで本研究では、スクロース水溶液を用いた際の攪拌速度と過冷却度に着目した。攪拌翼には壁面（冷却面）に形成される凍結層を掻き取るため、アンカー翼を用いた。攪拌速度については攪拌レイノルズ数で無次元化し、攪拌レイノルズ数（ $Re$ ）と攪拌速度の関係を図5に示す。低濃度である10 wt%スクロース水溶液では  $Re$  によらず過冷却度はほぼ一定であった一方、濃度25 wt%以上においては、 $10^3 < Re < 10^4$  で過冷却度は増加した。濃度に対する依存性は今後詳細に検討すべきであるが、 $10^3 < Re < 10^4$  で過冷却度が増加したことから、凍結のような熱力学的に不安定な現象と流動に相関があることが示された。攪拌速度を増加させることで冷却面の掻き取り頻度が上がることが一つの要因と考えられ、今後、掻き取りの時間スケールと掻き取られた氷結晶核がバルク中に輸送される時間スケールの比率と過冷却度の関係について考察する。

アイスクリームのフリージング実験において用いた実験システムを図6に示す。攪拌翼にはアンカー翼と似た形状でありながら中央部には流体混練を促進する機能を有した形状のものを用いた。なお、この攪拌翼は市販の回分式フリーザ（ICE100、Cuisinart社）に付属のものである。攪拌に伴う温度およびトルク変化について、代表例として攪拌速度30 rpmの結果を図7に示す。過冷却状態を経て、凍結が起こった瞬間にトルクが急増していることが確認でき、また、凍結後、見かけの粘度増大に伴いトルクが指数関数的に増加することがわかった。このトルク変化と Metzner-Otto 法により、見かけの粘度変化を算出した（図8）。図8より、攪拌速度が大きい

くなるほど見かけ粘度の増大が抑えられることがわかった。これは高撹拌速度であるほど自由表面が乱され、空気を取り込み量が大きくなり粘度が低くなったためと考えられる。この傾向はオーバーラン測定結果とも一致した。また、詳細は割愛するが、撹拌速度が大きいほど脂肪球の凝集も促進され、融解試験の結果、融点以上において形状保持に優れたアイスクリームが製造できた。以上より、撹拌速度をパラメータとしてフリージング中の諸現象を制御でき、アイスクリームの内部構造さらには物性の制御が可能となった。

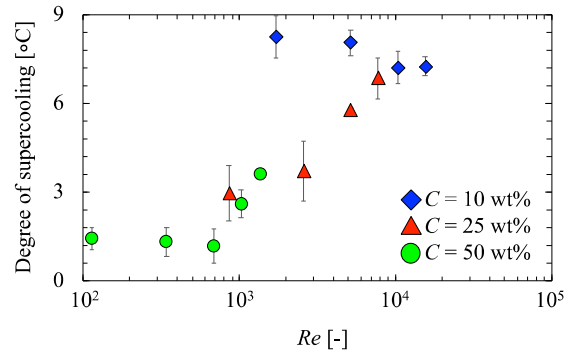


図5 過冷却度と撹拌レイノルズ数の関係

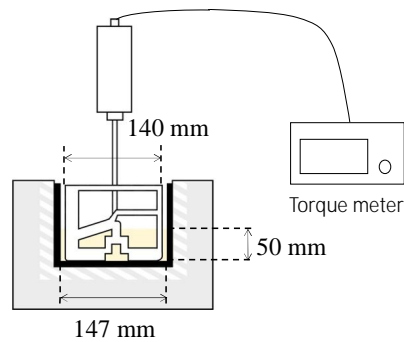


図6 回転式フリーザおよび撹拌システム

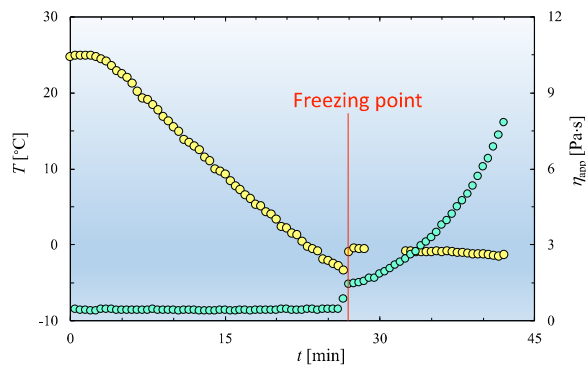


図7 温度およびトルクの経時変化 (撹拌速度: 30 rpm)

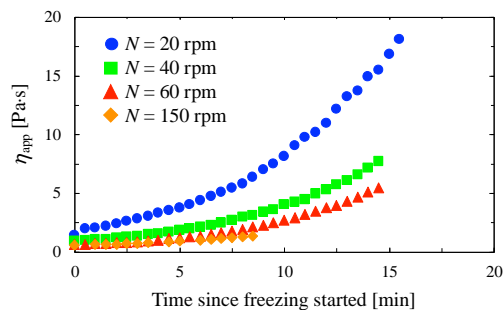


図8 凍結後の見かけ粘度の経時変化

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 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hayato Masuda, Takafumi Horie, Hiroyuki Iyota, Naoto Ohmura	4. 巻 19
2. 論文標題 Chemical process intensification from the viewpoint of vortex dynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Trends in Chemical Engineering	6. 最初と最後の頁 111-120
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Masuda Hayato, Ryuzaki Tomohiro, Iyota Hiroyuki	4. 巻 330
2. 論文標題 Role of agitation in the freezing process of liquid foods using sucrose aqueous solution as a model liquid	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Food Engineering	6. 最初と最後の頁 111100 - 111100
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jfoodeng.2022.111100	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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 洲戸 歩、白杉（片岡）直子、本多 佐知子、祇園 景子、増田 勇人、大村 直人
2. 発表標題 茶道における抹茶攪拌の動作解析
3. 学会等名 2022年度大会（一社）日本調理科学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 龍崎友弘, 増田勇人, 伊與田浩志, 下山田真
2. 発表標題 リージング中におけるアイスクリームの内部構造形成過程に及ぼす攪拌操作の影響
3. 学会等名 化学工学会第53回秋季大会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 増田 勇人, 澤野 桃子, 伊與田 浩志, 下山田 真
2. 発表標題 フリージング中における攪拌速度がアイスクリーム内の気泡/脂肪球サイズ変化に及ぼす影響
3. 学会等名 混相流シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増田 勇人, 澤野 桃子, 下山田 真, 伊與田 浩志
2. 発表標題 アイスクリームのフリージングプロセスにおける脂肪球ダイナミクスに及ぼす攪拌速度の影響
3. 学会等名 日本食品工学会第23年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田 紗也, 山上 典之, 加藤 知帆, 小川 智宏, 堀江 孝史, 菰田 悦之, 大村 直人
2. 発表標題 旋回型攪拌翼の巡回径および翼幅が流動・混合特性に及ぼす影響
3. 学会等名 化学工学会第52回秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Ogawa, N. Yamagami, T. Kato, S. Yamada, N. Ohmura
2. 発表標題 Mechanical structure and mixing characteristics of SWINGSTIR reactor
3. 学会等名 The 10th International Symposium on Mixing in Industrial Processes (ISMIP10) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Yamada, N. Yamagami, T. Kato, T. Ogawa, N. Ohmura
2. 発表標題 Effect of geometry of a stirring rod rotating agitator SWINGSTIR on mixing performance
3. 学会等名 The 10th International Symposium on Mixing in Industrial Processes (ISMIP10) (国際学会)
4. 発表年 2021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
研究分担者	白杉 直子 (Shirasugi Naoko) (80243294)	神戸大学・工学研究科・非常勤講師  (14501)	
研究分担者	本多 佐知子 (Honda Sachiko) (60514916)	神戸大学・工学研究科・非常勤講師  (14501)	
研究分担者	増田 勇人 (Masuda Hayato) (90781815)	大阪市立大学・大学院工学研究科・講師  (24402)	
研究分担者	祇園 景子 (Gion Keiko) (70533404)	神戸大学・バリュースクール・准教授  (14501)	

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