

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20972

研究課題名（和文）拡張潤滑理論による分散混相流中の非平衡輸送問題への展開

研究課題名（英文）Development of lubrication model for non-equilibrium transport problems in dispersed multiphase flows

研究代表者

竹内 伸太郎（Takeuchi, Shintaro）

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50372628

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：粒子を高数密度に含む流れの中では、粒子間の狭い領域における潤滑現象に強い影響を受けた熱や物質の輸送が至る所で起こる。本課題では、狭隘な流路において潤滑に由来する圧力勾配を駆動力とする輸送現象の現象解析を目指し、従来の潤滑流れのモデリングに対して高次の影響を考慮し、すべり壁・粗さ面および膜透過物質流束を考慮する潤滑モデルへ発展させた。また膜透過問題では潤滑圧駆動の溶媒・溶質透過の数値解析法も実施し、非圧縮流体の圧力ポアソン方程式において、膜表裏における溶質濃度の不連続も考慮した形式を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

狭隘流路を構成する壁面が相対運動によって発生する潤滑圧は雨滴間や細胞間などで輸送現象を誘起するが、数値計算・実験とも狭隘流路を解像することが難しく、そこでの流れ現象の詳細を十分に理解できていない。本課題では、様々な壁面境界条件（すべり壁、粗さ壁、透過壁）の場合に対して、狭隘流路の壁面上の圧力分布から壁面垂直方向の圧力分布を再構成する数理モデルを提案し、潤滑流れの解像度を補う新しい手法と位置付けた。さらに、潤滑下に置かれた透過膜構造物を含む流れの問題で、膜表裏における圧力と物質濃度の不連続性を考慮した数値解析手法も提案し、低解像度環境下における輸送現象を解析するための基礎をつくった。

研究成果の概要（英文）：In flows containing a high number density of particles, heat and mass transport occurs everywhere, which is strongly influenced by lubrication phenomena in the narrow regions between particles. In this project, the aim is to analyse the phenomena of transport driven by pressure gradients originating from lubrication in narrow channels, and to develop a lubrication model that takes into account higher-order effects on conventional lubricated flow modelling, including slip walls, roughness surfaces and permeation of membrane material fluxes. For the membrane permeation problem, a numerical analysis of solute and solvent permeation driven by lubrication pressure was also carried out, and we proposed a form of the pressure Poisson equation for incompressible fluids that also takes into account discontinuities in solute concentration across the membrane.

研究分野：流体力学

キーワード：潤滑

## 1. 研究開始当初の背景

自然界や生体内および工学的応用においては、分散的に存在する界面間における流れにおいて熱や物質の輸送を伴う現象がしばしばみられる。雨滴や生体細胞、微生物が高数密度で相対的に運動する流れにおいて、雨滴成長による降雨や細胞間酸素輸送などは代表例である。そのような問題では、分散要素の接近が輸送現象に重要な影響を与えと言われ、防災、医療や工業プロセスに関連して重要な現象である。

相対運動する物体間もしくは界面間の狭い領域(狭隘領域)に発生する流れは、機械要素の潤滑の問題に関連して古くから着目されてきた。潤滑流れの特徴である狭隘領域における大きな圧力の発生は、摩擦低減の目的だけにとどまらず、上述のように、高数密度下における分散要素間の狭隘隙間における非平衡な熱・物質輸送問題の駆動力として着目されている。しかし、流れを数値的あるいは実験的に解析しようとする、流路が狭隘であるがために空間解像度がしばしば不足し、潤滑に由来する輸送現象を正確に捉えることが難しくなる。そこで報告者は狭隘領域が至る所に発生する流れをターゲットにして、輸送現象を正確に予測する研究に着手した。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、流体中に分散的に存在する粒子(液滴や気泡も含む)が接近する際や、透過膜が狭い流路を通過する際に発生する潤滑流れが、界面間における輸送現象に強く影響を及ぼすことを、数理モデルおよび数値計算を通じて解析する。数値計算については(粒子群周囲の流れに加え)狭隘領域における流れの解像そのものが高計算負荷である上に、表面粗さや輸送現象の考慮はさらに解析を難しくする。そこで研究の第一段階として、潤滑流れの数理モデルを新たに構築してそれを基盤として輸送現象のモデリングへ発展させ、第二段階において数値計算の負荷を減らす手法へ発展させることを目的とする。

## 3. 研究の方法

潤滑のモデリングでは、代表者が以前に提案した高次潤滑モデル(引用文献)を、輸送現象へ発展させる数理モデルを構築し、高精度数値解析の結果と比較する、というスタイルで進めた。高次潤滑モデルとは、古典的な潤滑方程式(Reynolds潤滑方程式)の導出において無視される高次の項を考慮に入れ、適当な仮定の下で微分方程式を解くことにより、狭隘路における壁面上の圧力分布(低次情報)から壁垂直方向の圧力分布(高次情報)を再構成する数理モデルである。

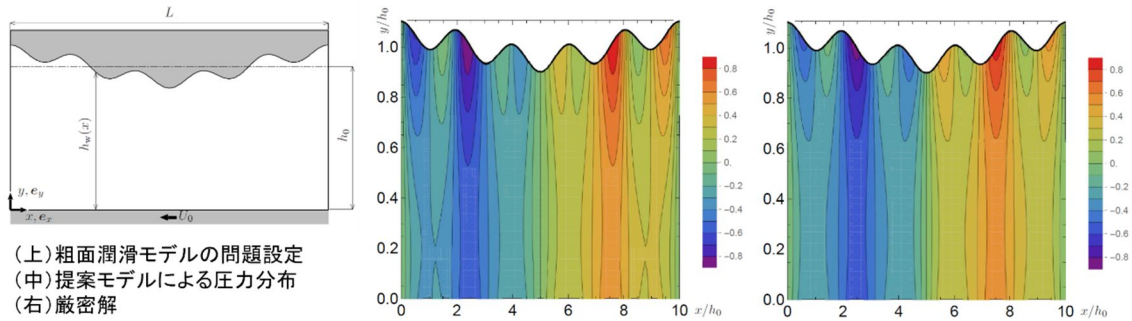
本課題では、さまざまな境界条件に対応した高次潤滑モデルおよび輸送現象とのカップリングを実施した。具体的には、滑り速度/粗さ/物質透過性を有する固体壁における潤滑モデルの構築であり、それらに基づき、潤滑の強い影響下における膜透過物質輸送などの数理モデリングおよびより広いパラメータ範囲をカバーする数値解析法を実施した。

なお、膜透過問題では透過流束と駆動力とを線形に結びつける現象論的モデルを用いる際に、潤滑に由来する高次圧力成分が発散する傾向があるため、それを抑制する数理手法を取り入れた新しい膜透過流束モデルを構築した。また、それに対応する数値計算を実施する際には、整合性のとれた直接離散化のアイデア(基盤研究(B), No.17H03174; 引用文献)に現れる圧力方程式を、膜表裏における圧力と物質濃度の二種類の不連続分布を含む離散形式に変更することで、溶媒・溶質の膜透過流れの問題にも適用できるように変更した。

以下では研究成果の一例として、粗面潤滑流れの数理モデルに関する代表的な結果、および狭隘路における溶媒・溶質の膜透過に関する数値解析結果について報告する。

## 4. 研究成果

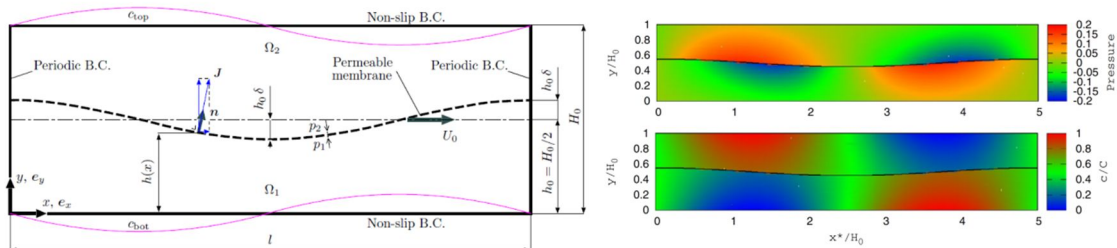
狭隘路を構成する面が正弦波で表される粗さを含む場合について、高次の潤滑モデルを構築する基本アイデアを紹介する。粗面要素が十分小さく流線の剥離がない場面に限定する。粗面近傍は複数の長さスケールがあり、Reynolds潤滑方程式をそのまま適用することができないが、粗面から十分離れた領域では流線の空間的変動が小さくなるため、その幾何学形状と流線上の流速の情報を用いたReynolds潤滑方程式の構築をとおして、公称面における圧力から壁垂直方向の圧力分布を再構築することができる。これによって得られる



解を、移動平板と粗面との流れを例にとって上の図に示す。左図の問題設定に対して、提案手法で得られる圧力分布（中図）を厳密解（右図）と比較し、粗面狭隘路の壁垂直方向分布の特徴を再現することを確認した。

さらに、興味深い問題設定として、速度滑りを有する固体壁で囲まれた狭隘路における潤滑のモデルを構築したところ、従来の no-slip 壁に対するモデルと比べて、あたかも no-slip 壁が壁垂直方向にシフトした頂を加えることによってすべり壁の影響を取り込むことができる、という特徴も見出し、モデルの有効性と適用範囲を示した。

輸送現象への応用例として、溶媒と溶質を透過させる膜が液体中の潤滑が支配的な環境に置かれた問題設定において、溶媒・溶質の膜透過流束を高精度に解く数値解法を開発した。ユニークな点は、流れ場の圧力方程式に膜上における圧力と濃度の不連続量を取り入れたことである。狭い流路内において溶媒と溶質を透過する膜が流路壁と相対速度をもって運動する問題を設定し、波状および円形の膜に対して膜透過流束（溶媒・溶質）が潤滑から受ける影響を解析した。波状膜については、膜透過流束成分の高次成分を含む数理モデルにより、膜のパラメーターが溶媒・溶質の流束に及ぼす効果を特定した。さらに数値解析解との比較を通して、潤滑が輸送現象に与える影響、特に膜と壁との距離について数理モデルの有効範囲を明らかにした。下に問題設定（左図）と定常状態における数値解析結果の一例（右図上段：圧力分布、右図下段：濃度分布）を示す。



また潤滑が支配的な環境下で、可変形セル状粒子の表面における膜透過流束を解く数値解法を開発した。狭隘路を通過する際に発生する潤滑に由来する圧、膜形状の変形、および膜透過流束が互いに影響を及ぼすことを示し、潤滑が平衡輸送現象に与える影響の一端を明らかにした。

#### <引用文献>

S. Takeuchi and J. Gu, “Extended Reynolds lubrication model for incompressible Newtonian fluid”, *Physical Review Fluids* Vol.4 (11), No. 114101 (2019)

DOI: <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevFluids.4.114101>,

研究機関アーカイブ: <http://hdl.handle.net/11094/76916>

S. Takeuchi, H. Fukuoka, J. Gu and T. Kajishima, “Interaction problem between fluid and membrane by a consistent direct discretisation approach”, *Journal of Computational Physics* Vol. 371, pp. 1018-1042 (2018)

DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jcp.2018.05.033>,

研究機関アーカイブ: <http://hdl.handle.net/11094/77254>

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Fukada T., Takeuchi S., Kajishima T.	4. 巻 946
2. 論文標題 Particle subgrid stress models for large Stokes numbers in particle-laden turbulence	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2022.593	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 Takeuchi Shintaro, Miyauchi Suguru, Yamada Shuji, Tazaki Asahi, Zhang Lucy T, Onishi Ryo, Kajishima Takeo	4. 巻 53
2. 論文標題 Effect of lubrication in the non-Reynolds regime due to the non-negligible gap on the fluid permeation through a membrane	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 035501 ~ 035501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1873-7005/abf3b4	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 該当する
1. 著者名 Yamada Shuji, Takeuchi Shintaro, Miyauchi Suguru, Kajishima Takeo	4. 巻 25
2. 論文標題 Transport of solute and solvent driven by lubrication pressure through non-deformable permeable membranes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Microfluidics and Nanofluidics	6. 最初と最後の頁 83 ~ 83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10404-021-02480-5	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 Takeuchi Shintaro, Fukada Toshiaki, Yamada Shuji, Miyauchi Suguru, Kajishima Takeo	4. 巻 6
2. 論文標題 Lubrication pressure model in a non-negligible gap for fluid permeation through a membrane with finite permeability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 114101 ~ 114101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.6.114101	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 Miyachi Suguru, Yamada Shuji, Takeuchi Shintaro, Tazaki Asahi, Kajishima Takeo	4. 巻 141
2. 論文標題 Flow Rate Prediction for a Semi-permeable Membrane at Low Reynolds Number in a Circular Pipe	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transport in Porous Media	6. 最初と最後の頁 185 ~ 199
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11242-021-01716-w	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 Tazaki Asahi, Takeuchi Shintaro, Miyachi Suguru, Zhang Lucy T., Onishi Ryo, Kajishima Takeo	4. 巻 36
2. 論文標題 Fluid Permeation Through A Membrane With Infinitesimal Permeability Under Reynolds Lubrication	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Mechanics	6. 最初と最後の頁 637 ~ 648
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jmech.2020.38	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 該当する

1. 著者名 Fukada Toshiaki, Takeuchi Shintaro, Kajishima Takeo	4. 巻 105
2. 論文標題 Anisotropic Reaction Force Model in Two-way Coupling Simulation for a Smaller Particle Than Grid Spacing Based on Volume Averaging	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Flow, Turbulence and Combustion	6. 最初と最後の頁 1017 ~ 1034
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10494-020-00142-0	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 松田歩, 田川義之	4. 巻 35, No. 1
2. 論文標題 移動壁面上の大容量浮遊液滴	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 混相流	6. 最初と最後の頁 176 ~ 184
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 Okazaki Haruki、Takeuchi Shintaro	4. 巻 28
2. 論文標題 Fluid lubrication model over sinusoidal roughness with streamline-based approach	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Microfluidics and Nanofluidics	6. 最初と最後の頁 30 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10404-024-02721-3	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 Takeuchi Shintaro、Omori Takeshi、Fujii Takehiro、Kajishima Takeo	4. 巻 27
2. 論文標題 Higher order lubrication model between slip walls	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Microfluidics and Nanofluidics	6. 最初と最後の頁 46 ~ 46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10404-023-02644-5	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 Yee Jingzu、Igarashi(五十嵐大地) Daichi、Miyatake(宮武駿) Shun、Tagawa(田川義之) Yoshiyuki	4. 巻 4
2. 論文標題 Prediction of the morphological evolution of a splashing drop using an encoder-decoder	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Machine Learning: Science and Technology	6. 最初と最後の頁 025002 ~ 025002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2632-2153/acc727	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 Haruhi Matsuyama、Takehiro Fujii、Suguru Miyauchi、and Shintaro Takeuchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical study of pressure response to action potential by water permeation with ion transports	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ASME Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 -
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23件(うち招待講演 5件/うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Renon Shigeru, Suguru Miyauchi, Shintaro Takeuchi, Kenichi Funamoto
2. 発表標題 Data assimilation method for estimating membrane permeability based on the Lagrange multiplier method: effect of signal-to-noise ratio on estimation accuracy
3. 学会等名 The 19th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Suguru Miyauchi, Shintaro Takeuchi, Kenichi Funamoto
2. 発表標題 Data Assimilation Method for Estimating Membrane Permeability Based on the Langrange Multiplier Method: Formulation and Fundamental Examination
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 祝峻太郎, 竹内伸太郎
2. 発表標題 界面垂直方向圧力分布を考慮した潤滑モデルを埋め込む粒子流れ解法
3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂本智彦, 竹内伸太郎, 宮内優, 梶島岳夫
2. 発表標題 潤滑が狭隘流路中の弾性透過膜の変形と透過流束に与える影響
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永松紘汰, 竹内伸太郎, 田川義之, 梶島岳夫
2. 発表標題 移動壁面上を浮遊する液滴界面の擾乱発達に関する解析
3. 学会等名 第35回数值流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大西領, 柳康太, 竹内伸太郎
2. 発表標題 粒子解像数值流体計算によるマルチスケール大気雲物理の解明
3. 学会等名 混相流学会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柳康太, 大西領
2. 発表標題 接近物体間に働く潤滑力の数值補正手法
3. 学会等名 流体力学学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田川義之, 松田歩
2. 発表標題 移動壁面上を浮遊する大容量液滴
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 永松 紘汰, 竹内 伸太郎, 梶島 岳夫
2. 発表標題 体積補償法を組み込んだfront-tracking法 を用いた移動壁面上を浮遊する液滴の非 定常界面変化の解析
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大西領
2. 発表標題 マイクロスケール気象に対する大規模熱流体シミュレーション
3. 学会等名 熱物質流体工学セミナー (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田川義之
2. 発表標題 拡張潤滑理論に基づく浮遊液滴計測手法の開発
3. 学会等名 第4回海洋地球科学シミュレーションワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Haruhi Matsuyama, Suguru Miyauchi, Shintaro Takeuchi
2. 発表標題 Study of the mechanical effects of solvents acting on neuronal membranes using the permeation flux model of multicomponent electrolyte solutions
3. 学会等名 Asme-Jsme-Ksme Fluids Engineering Division (AJK FED 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shuntaro Hourai, Shintaro Takeuchi
2. 発表標題 Numerical method for inter-particle flow with immersed pressure solution of lubrication
3. 学会等名 Asme-Jsme-Ksme Fluids Engineering Division 2023 (AJK FED 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Haruhi Matsuyama, Takehiro Fujii, Suguru Miyauchi, Shintaro Takeuchi
2. 発表標題 Computational simulation of the intracellular pressure response to action potentials using the permeation flux model for multicomponent electrolyte solutions
3. 学会等名 American Physics Society Division of Fluid Dynamics (APS DFD) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryo Onishi, Keisuke Sumitomo, Keita Okabe, Masaya Iwashima, Keigo Matsuda
2. 発表標題 Microscopic simulations using Lagrangian Cloud Simulator (LCS) for investigation into inherent uncertainties in macroscopic cloud development
3. 学会等名 3rd International workshop on Cloud Turbulence, NITECH (名工大) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yokoyama Y., Ichihara S., Maruoka H., Tagawa Y.
2. 発表標題 Stress field in a soft substrate during droplet impact
3. 学会等名 IUTAM Symposium on Dynamics and Interface Phenomena of Bubbles and Droplets at Multiple Scales (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yokoyama Y., Ichihara S., Tagawa Y.
2. 発表標題 Unsteady stress field measurement during droplet impact on soft materials using photoelastic tomography
3. 学会等名 American Physics Society Division of Fluid Dynamics (APS DFD) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yee J., Igarashi D., Miyatake S., Yamanaka A., Tagawa Y.
2. 発表標題 Critical morphological features of a splashing drop extracted through video classification using an explainable feedforward neural network (FNN)
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Fluids Engineering Division 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Miyatake S., Yee J., Tagawa Y.
2. 発表標題 Automation of drop impact experiment
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Fluids Engineering Division 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yee J., Igarashi D., Miyatake S., Tagawa Y.
2. 発表標題 Prediction of Deformation of a Drop during an Impact on a Solid Surface using an Encoder-Decoder
3. 学会等名 11th International Conference on Multiphase Flow (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究会「乱流中の輸送現象を伴う粒子群の集団挙動」  
<https://www.turb.gsic.titech.ac.jp/event/Seminar20240312.pdf>

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	大西 領  (Ryo Onishi)  (30414361)	東京工業大学・学術国際情報センター・教授   (82706)	
研究分担者	田川 義之  (Yoshiyuki Tagawa)  (70700011)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授   (12605)	
研究分担者	梶島 岳夫  (Takeo Kajishima)  (30185772)	大阪大学・工学研究科・教授   (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究会

〔国際研究会〕 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
---------	---------