

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02084

研究課題名（和文）光熱ナノ粒子周りの熱流動現象を利用した高度ナノ物質濃縮

研究課題名（英文）Concentration of nanomaterials using thermofluidic phenomena around photothermal nanoparticles

研究代表者

元祐 昌廣（Motosuke, Masahiro）

東京理科大学・工学部機械工学科・教授

研究者番号：80434033

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：環境、生化学を始めとした様々な分野において、センシング対象の微小化が進み、ナノ物質計測の重要性は増している。そのなかで、本研究は、対象ナノ物質の濃縮によってセンシングの高感度化を実現するために、金属ナノ粒子または構造体に光を放射してプラズモニクスと呼ばれる電磁波の増幅現象を引き起こし、ナノ物質を集積させる技術について研究を行った。結果として、集光部への濃縮や、温度分布を用いた輸送、気泡を用いた集積が可能であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナノ粒子は、環境科学、生化学をはじめとして今後も利用価値や重要性が増大することが予想され、その操作技術や検出手法も高度化が期待される。その中で、分散するナノ粒子を集積することができる本研究は、微量なナノ物質の高感度検出技術の創出に大きく貢献するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The importance of nanomaterial characterization has been increasing with recent advances of nanotechnology and related technologies. In this study, we investigated a technique to accumulate nanomaterials by emitting light onto metallic nanoparticles or nanostructures to induce an amplification of electromagnetic waves called plasmonics, in order to realize improved sensitivity through the concentration of the target nanomaterials. As a result, it was found that concentration in irradiated location of a laser light, transport using temperature gradient, and accumulation using bubbles are possible.

研究分野：マイクロ・ナノ熱流体工学

キーワード：金属ナノ粒子 濃縮 プラズモニクス 界面流れ 光放射圧 熱泳動

1. 研究開始当初の背景

金や銀のナノ粒子やナノスケール構造体に光を照射すると、伝導電子と光の相互作用である表面増強プラズモン共鳴が起き、強い光熱効果を示すことが知られており、ラマン散乱強度の増幅や温熱療法など、広く研究されている。金属のナノ粒子やナノスケール構造体に光を照射すると、伝導電子と光の相互作用である表面増強プラズモン共鳴が起き、強い光熱効果を示すことが知られており、ラマン散乱強度の増幅や温熱療法など、広く研究されている。しかしながら、加熱源である金属ナノ粒子周辺の流体や物質の移動などについては理解が不十分で、工学的な応用を見出すに至らない。プラズモン加熱を用いたナノ物質移動を体系的に理解し、その特性を活かした物質輸送デバイスの設計へとつなげる必要がある。

2. 研究の目的

環境、生化学を始めとした様々な分野において、センシング対象の微小化が進み、ナノ物質計測の重要性は増している。そのなかで、本研究は、対象ナノ物質の濃縮によってセンシングの高感度化を実現することに着目する。課題では、プローブとしての金属ナノ粒子をプラズモニクスを用いて局所加熱して極めて微小な温度分布を形成し、温度分布に起因した複数の輸送現象を体系化することで、ナノ物質センシングを高度化させるための物質操作技術を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 金属ナノ粒子集合体への光照射に伴う光熱現象の区分
- (2) 集積ナノ物質のサイズ依存性評価およびプラズモン基板の開発
- (3) 光熱気泡によるナノ粒子集積メカニズムの考察
- (4) 多様なナノ物質集積による適用範囲の確認

4. 研究成果

(1) 金ナノ粒子、あるいは金ナノ構造体に光を照射すると表面プラズモン共鳴が起き、その増強光電場による光放射圧、並びに光熱効果による熱泳動、そして気泡発生が起きる。直径 20nm の金ナノ粒子を固定化・パターンニングしたガラス基板に波長 650nm のレーザ光を集光照射すると、照射光エネルギーが弱い場合には光放射圧が、続いて熱泳動が卓越化し、強い場合には微細気泡が発生し、一連の現象が起きることを確認した。このとき、液中に分散する蛍光ポリスチレン粒子の輝度解析より、時系列ダイナミクスを計測した。光放射圧や熱泳動の場合には粒子力がナノ物質に作用して搬送が行われ、微細気泡の場合には界面流れに追従する形でナノ物質が輸送されることを明らかにした (図 1)。

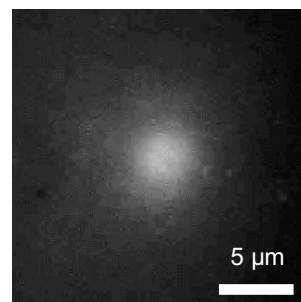


図 1 濃縮されるナノ粒子の様子

(2) 金属ナノ粒子集合体の増強光電場によるプラズモン光放射圧、熱泳動から気泡発生までの一連の現象について、液中に分散するポリスチレン粒子のサイズ依存性について評価を行った結果、サイズが大きい方が集積性能が高いことが明らかになった。集積可能な粒子サイズの下限を探ったが、市販の中で最小である直径 30nm 粒子においても集積が確認され、非常に小さなナノ粒子の操作が可能であることがわかった。続いて、基板の吸収エネルギーを分光的に評価したところ、単一粒子に起因するピークと、粒子が 2 個並んだ状態である 2 量体に起因すると思われるピークの 2 種類が存在することがわかり、この結果は数値シミュレーションの結果と一致した。また、同一基板内でも場所によって粒子の固定化密度が大きく異なり、光吸収も大きく異なるため、結果として発生する各種粒子集積現象の閾値も一貫しないことが明らかとなった。そのため、電子線描画装置を用いて 100nm 程度の金の周期構造をリフトオフを用いて製作した (図 2)。この基板を用いて粒子集積実験を行った結果、安定してプラズモニクス誘起の粒子操作を実現することができた。これにより、異なる操作対象や基板においても評価できるようになった。また、プロセスの最適化により、金構造体間のギャップは最小 20nm まで製作することができた。

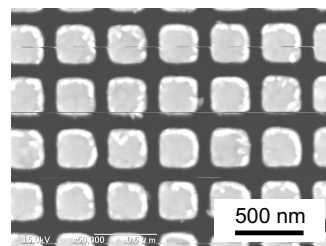


図 2 金ナノ構造体

(3) 50mW 程度の強いレーザ光を照射した際に発生する微小気泡を用いたナノ粒子輸送に関して、底面からと側方からの顕微観察を行って粒子移動のダイナミクスを評価した結果、気泡発生から 10ms 前後において大きく流動パターンが変化していることが明らかになり、これまで理論的

に説明されていた気泡の界面全体が動くような流動様相は 10ms までしか維持できていおらず、それ以降は気泡の上部界面はほぼ移動せずに下部のみが動く様子を確認した (図 3)。

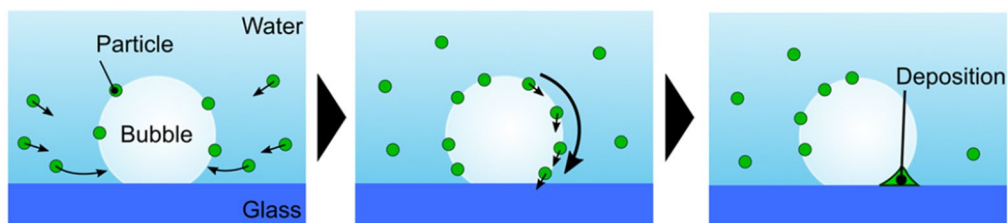


図 3 ナノ粒子が光熱気泡周囲に集積されるメカニズム

(4) 金属ナノ構造体を用いて、タンパク質や DNA などの生体ナノ物質についても輸送実験を行い (図 4)、各種サンプルに応じて現象の差異は見られるものの、全てのサンプルについて集積可能であることを示し、本研究が提案するプラズモン誘起の熱流動の有効性を明らかにした。

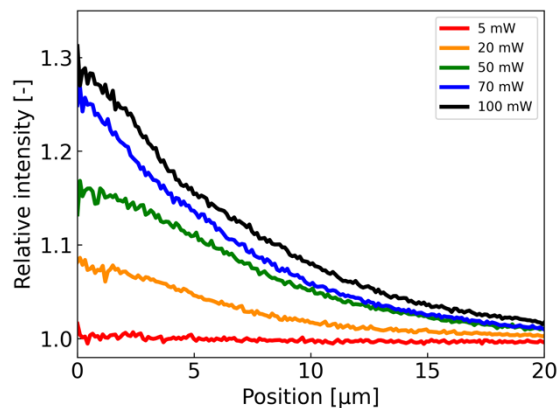


図 4 タンパク質の集積の様子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Puneet Jain, Takuya Aida, Masahiro Motosuke	4. 巻 12
2. 論文標題 Fluorescence anisotropy as a temperature sensing molecular probe using fluorescein	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 1109
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/mi12091109	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 Koki Okada, Kento Kodama, Ken Yamamoto, Masahiro Motosuke	4. 巻 23
2. 論文標題 Accumulation mechanism of nanoparticles around photothermally generated surface bubbles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Nanoparticle Research	6. 最初と最後の頁 188
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11051-021-05305-2	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 Puneet Jain, Masahiro Motosuke	4. 巻 61
2. 論文標題 Temperature sensitivity of BODIPY dye (pyrromethene 597) over different linear organic solvents	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 56504
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac5fc9	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 Puneet Jain, Masahiro Motosuke	4. 巻 32
2. 論文標題 Fluorescence anisotropy studies on BODIPY (pyrromethene 546) dye as a novel thermal probe	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Fluorescence	6. 最初と最後の頁 737-743
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10895-021-02868-0	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 Yoshiyasu Ichikawa, Ryota Kikuchi, Ken Yamamoto, Masahiro Motosuke	4. 巻 60
2. 論文標題 Determining particle depth positions and evaluating dispersion using astigmatism PTV with a neural network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 6538-6546
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.427571	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 Koki Okada, Kento Kodama, Ken Yamamoto, Masahiro Motosuke	4. 巻 23
2. 論文標題 Accumulation mechanism of nanoparticles around plasmonic surface bubbles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Nanoparticle Research	6. 最初と最後の頁 188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11051-021-05305-2	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 Puneet Jain, Takuya Aida, Masahiro Motosuke	4. 巻 12
2. 論文標題 Fluorescence anisotropy as a temperature sensing molecular probe using fluorescein	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 1109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/mi12091109	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 Shunsuke Fujimura, Ken Yamamoto, Masahiro Motosuke, Takahiro Tsukahara	4. 巻 51
2. 論文標題 Numerical study of thermocapillary-driven flow of a micro bubble on locally heated wall	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Heat Transfer Research	6. 最初と最後の頁 1087-1104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1615/HeatTransRes.2020032916	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 Takuya Hirose, Munetoshi Sakai, Ken Yamamoto, Masahiro Motosuke, Toshihiro Isobe, Sachiko Matsushita, Akira Nakajima	4. 巻 273
2. 論文標題 Droplet motion by Leidenfrost phenomenon on Zn plate surfaces with and without ZnO nanorods	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 125123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matchemphys.2021.125123	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 Ken Yamamoto, Ryosuke Sakurai, Masahiro Motosuke	4. 巻 14
2. 論文標題 Fully-automatic blood-typing chip exploiting bubbles for quick dilution and detection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biomicrofluidics	6. 最初と最後の頁 24111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0006264	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 Ryosuke Sakurai, Ken Yamamoto, Masahiro Motosuke	4. 巻 144
2. 論文標題 Concentration-adjustable micromixer using droplet injection into a microchannel	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Analyst	6. 最初と最後の頁 pp. 2780-2787
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8AN02310G	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 寛澤 駿, 牛島 邦晴, 元祐 昌廣	4. 巻 85
2. 論文標題 オープンセル構造体の伝熱特性および圧力損失に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 880
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00214	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26件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 14件）

1. 発表者名 Masahiro Motosuke, Reiya Ono, Kosuke, Shigeta, Ken Yamamoto
2. 発表標題 All-PDMS cytometer chip with embedded fiber waveguide and optimized 3D hydrodynamics focusing
3. 学会等名 The 32nd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keigo Katayama, Takumi Kawakami, Chihiro Ichikawa, Ryosuke Fujita, Ken Yamamoto, Hiroyuki Takao, Yuichi Murayama, Masahiro Motosuke
2. 発表標題 Visualization of flow structures inside the patient specific aneurysm model
3. 学会等名 15th International Conference on Fluid Control, Measurements and Visualization (FLUCOME) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Motosuke, Sakie Takeda, Ken Yamamoto
2. 発表標題 Microfluidic thermometry based on fluorescent polarization analysis
3. 学会等名 Gordon Research Conference on Physics and Chemistry of Microfluidics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Motosuke, Ken Yamamoto, Kensuke Fujita, Masumi Serita, Keisuke Kurita
2. 発表標題 Microfluidic handling and evaluation of nanoparticles in water
3. 学会等名 International Workshop on Environmental Engineering 2019 (IWEE2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kensuke Ono, Ken Yamamoto, Takahiro Tsukahara, Hiroyoshi Kawamoto, Satoko Tahara, Kentaro Tanaka, Sunao Nakamura, Masahiro Motosuke
2. 発表標題 Flow measurement in stented left coronary artery models
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME 2019 8th Joint Fluids Engineering Conference (AJKFluids2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazushi Fujimoto, Takahiro Tsukahara, Ken Yamamoto, Masahiro Motosuke, Hiroyoshi Kawamoto, Satoko Tahara, Kentaro Tanaka, Sunao Nakamura
2. 発表標題 CFD study of implanted-stent impacts on blood flows in left coronary artery branch models
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME 2019 8th Joint Fluids Engineering Conference (AJKFluids2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shunsuke Fujimura, Ken Yamamoto, Masahiro Motosuke, Takahiro Tsukahara
2. 発表標題 Numerical simulation of thermocapillary-driven flow of a micro vapor bubble on locally heated wall
3. 学会等名 7th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow 2019 (ASCHT2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Motosuke
2. 発表標題 Electrokinetic microfluidic modulation of interfacial flow and reaction
3. 学会等名 Special Mini-Symposium on Dynamic Fluid Interfaces (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Yamamoto, Ryosuke Sakurai, Masahiro Motosuke
2. 発表標題 Fully-automated sensitive blood-typing chip
3. 学会等名 23rd International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Science (micro-TAS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuto Sasaki, Mio Mizoguchi, Ken Yamamoto, Masahiro Motosuke
2. 発表標題 Dielectrophoretic cancer-type sorting chip as advanced liquid biopsy
3. 学会等名 23rd International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Science (micro-TAS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Motosuke
2. 発表標題 Cell assay for evaluation of initial action of cell-cell adhesion using microfluidic platform
3. 学会等名 SelectBIO Microfluidics & Organ-on-a-Chip Asia 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo Ota, Ken Yamamoto, Masahiro Motosuke
2. 発表標題 Measurement of pressure field in microchannel flow from velocity data obtained from micro-PIV
3. 学会等名 72nd Annual Meeting of the American Physical Society 's Division of Fluid Dynamics (APS-DFD) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Motosuke
2. 発表標題 Blood flow characterization for advanced diagnostics
3. 学会等名 Materials Research Meeting (MRM) 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sakie Takeda, Ken Yamamoto, Masahiro Motosuke
2. 発表標題 Characterization of liquid film temperature distribution based on fluorescent anisotropy
3. 学会等名 2nd Pacific Rim Thermal Engineering Conference (PRTEC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栗田 啓佑, 藤田 健介, 山本 憲, 元祐 昌廣
2. 発表標題 金ナノ粒子濃縮デバイスの開発
3. 学会等名 化学とマイクロ・ナノシステム学会 第39回研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武田 咲希恵, 山本 憲, 元祐 昌廣
2. 発表標題 固体接合面間の液膜厚さ分布測定に関する検討
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 元祐 昌廣
2. 発表標題 マイクロ流体プラットフォームによる高度ナノバイオアッセイ
3. 学会等名 グリーンインキュベーションコンソーシアム 2019年度 第62回研究セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 元祐 昌廣
2. 発表標題 光加熱される金ナノ粒子周りの物質輸送現象
3. 学会等名 第2回先進的ながれ研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市川 拓哉, フォン チュンリ, 山本 憲, 元祐 昌廣
2. 発表標題 接着分子結合量が白血球ローリングに与える影響の解明
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 片山 圭吾, 藤田 涼亮, 山本 憲, 高尾 洋之, 村山 雄一, 元祐 昌廣
2. 発表標題 流量変動と血管壁面の弾性が脳動脈瘤内の血流解析に与える影響の実験的検証
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 太田 慎吾, 山本 憲, 元祐 昌廣
2. 発表標題 マイクロ流れにおける速度場から圧力場を求める手法に関する検討
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竇澤 駿, 牛島 邦晴, 元祐 昌廣
2. 発表標題 選択的レーザ溶融法で作製したラティス構造の伝熱特性に関する研究
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木勇斗, 溝口美生, 山本憲, 元祐昌廣
2. 発表標題 異種血中循環がん細胞分離回収デバイスの開発
3. 学会等名 化学とマイクロ・ナノシステム学会 第40回研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 元祐 昌廣
2. 発表標題 微粒子挙動とせん断応力場の3次元評価
3. 学会等名 第29回日本MRS年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 七海, 星 芳直, 四反田 功, 元祐 昌廣, 松井 弘之, 時任 静士, 板垣 昌幸
2. 発表標題 流路を用いた汗中のイオン濃度の同時測定のためのウェアラブルデュアルセンサ
3. 学会等名 第29回日本MRS年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三本 将也, 星 芳直, 四反田 功, 元祐 昌廣, 辻村 清也, 美川 務, 板垣 昌幸
2. 発表標題 流路を有する印刷型バイオセンサによる汗中乳酸塩の連続モニタリング
3. 学会等名 第29回日本MRS年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 マイクロ・ナノ熱工学の進展 編集委員会	4. 発行年 2021年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 808
3. 書名 マイクロ・ナノ熱工学の進展 (担当: 第5編 計測, 第1章 光計測)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究室webページ (日本語) http://www.rs.tus.ac.jp/motlab/jp/index.html 研究室webページ (英語) https://www.rs.tus.ac.jp/motlab/en/index.html</p>
--

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	市川 賀康 (Ichikawa Yoshiyasu) (00825060)	東京理科大学・工学部機械工学科・助教 (32660)	
研究 分 担 者	山本 憲 (Yamamoto Ken) (70749100)	東京理科大学・工学部機械工学科・助教 (32660)	

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