

機関番号：12608

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20681004

研究課題名（和文） 柔軟性を持つ中空ガラスファイバーを用いたマイクロビーム  
細胞照射装置の開発研究課題名（英文） Development of a Microbeam Cell Irradiation System  
Using Micro Glass Tubes

研究代表者

長谷川 純 (HASEGAWA JUN)

東京工業大学・原子炉工学研究所・助教

研究者番号：90302984

研究成果の概要（和文）：

テーパガラスキャピラリーによる MeV イオンの集束メカニズムについて、実験及び数値シミュレーションによる詳細な研究を行い、キャピラリー内壁での入射イオンの散乱がこの集束現象の支配的な物理過程であることを初めて明らかにした。この集束法により得られたマイクロビームは、異なる発散角を持つ直進成分と散乱成分から構成されるが、2次元元素マッピング等のマイクロビーム分析を行うには十分な品質を有することが分かった。

研究成果の概要（英文）：

This study performed experiments and numerical simulations on MeV ion focusing by tapered glass capillaries and revealed at the first time that small-angle scattering of incident ions on the capillary inner wall is the predominant physical process of this focusing phenomena. Although the microbeams obtained by this focusing method consists of two components having different divergence angles, their qualities were found to be satisfactory for microbeam analyses such as a two-dimensional element mapping.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2009年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	16,500,000	4,950,000	21,450,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・放射線・化学物質影響科学

キーワード：マイクロビーム，ガラスキャピラリー，イオン散乱

## 1. 研究開始当初の背景

本研究を開始した当初、絶縁体キャピラリーによるイオンビームのガイド効果や集束効果が複数報告され、それを利用したマイクロビーム発生技術が注目を集めつつあった。絶縁体キャピラリーに入射するイオンのエネルギーが keV 程度の場合、帯電したキャピラリー内壁が作る静電場がイオンの軌道を曲げることで、ガイド効果がもたらされる

ことが実験等からほぼ明らかにされていた。

また、MeV 程度のエネルギーのイオンを先端がミクロンサイズのテーパガラスキャピラリーを入射することで、増倍率が  $10^4$  程度の非常に強い集束効果が得られる可能性が当時報告されていたが、ガラスキャピラリー内でのイオンの輸送メカニズムについては十分に理解されていなかった。キャピラリー内壁による入射イオンの小角散乱がビー

ム輸送過程に関与することが指摘されていたが、散乱過程だけで観測された高いビーム集束率を説明できるかは明らかになっていなかった。

一方、テーパガラスキャピラリーを用いたイオンビーム集束法は、コンパクトで安価な装置構成でマイクロビームを発生できることから、従来のマイクロビーム発生装置に代わる選択肢としての期待が高まり、大気PIXE分析や核反応分析等へ試験的に応用した結果がすでに報告されていた。特に、放射線の生物影響研究において、マイクロビームによる細胞照射技術が注目されており、蓋付きのテーパガラスキャピラリーを利用した細胞核へのイオンビーム直接照射法の開発も進められていた。しかし、テーパガラスキャピラリーで集束されたビームの品質、エネルギー分布等については未知の部分が多く、これらを明らかにすることが照射線量を正確に見積もる上でも必要不可欠であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、まず、テーパガラスキャピラリー中でのMeVイオンの輸送メカニズムを実験および数値シミュレーションにより明らかにすることを目指した。キャピラリー内壁によるイオンの小角散乱過程に注目し、イオンビームのガイド効果や集束効果に対し、キャピラリーの形状等が与える影響について定量的に調べることを目的とした。

次に、可撓性をもつ中空ガラスファイバーによるイオン輸送の可能性を探ることを目指した。ガラスキャピラリーの先端がミクロンサイズになると、ある程度の可撓性を持たせることが可能となり、これを中空ガラスファイバーとして用いることで、MeVイオンをガイドしながら曲げつつ、輸送すること可能かどうかを調べた。

## 3. 研究の方法

東工大タンデム加速器施設ビームラインに本研究専用の大型真空散乱槽を新設し、その内部にテーパガラスキャピラリーを用いたイオンビーム集束装置を構築した。タンデム加速器により発生した2 MeV陽子ビームをキャピラリーに入射し、直径が10-30  $\mu\text{m}$ 程度の先端出口からマイクロビームとして取り出した。このマイクロビームを下流に配置した測定装置により分析した(図1)。

マイクロビームの分析にあたっては、①イメージングプレートを用いたビーム強度分布測定、②シリコン荷電粒子検出器(SSD)を用いたエネルギー分布および強度分布測定、の二つの測定を行った。①では、イメージングプレートをキャピラリー出口から十分離して配置することでマイクロビームを拡大

し、その強度分布を画像化した。一方、②では、まず、キャピラリー出口直後にSSDを配置し、キャピラリーを抜けたすべての陽子を検出してそのエネルギー分布を調べた。その後、SSDの前面に直径100  $\mu\text{m}$ のアパーチャーを配置し、キャピラリーから十分離れた位置でSSDをビーム軸に垂直な方向に動かしながら、各位置での陽子のエネルギー分布を測定した。また、検出された陽子の総数から各位置でのビーム強度を求めた。

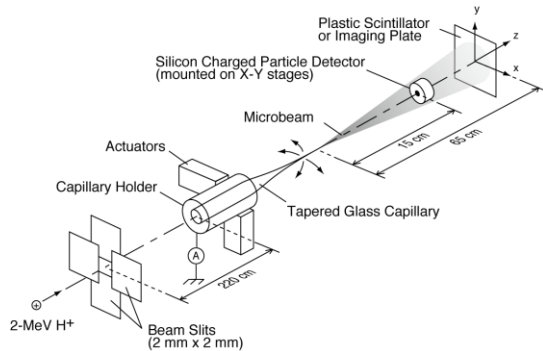


図1：実験装置の概念図。

一方、実験と並行して、数値シミュレーションを行い、キャピラリー内でのイオンの挙動をより詳細に調べた。計算に用いたのは、本研究の下で新たに開発された3次元モンテカルロコードである。モンテカルロ計算を行う素過程としては標的原子による入射粒子の弾性散乱のみを考慮した。原子との非弾性散乱による入射イオンのエネルギー損失の計算には、SRIMの阻止能データを利用した。実際のテーパガラスキャピラリーの形状を数値データとして読み込むことで、実験との詳細な比較を行った。初期条件ごとに $10^6$ - $10^7$ 回の試行回数のモンテカルロ計算を行い、十分な統計精度を得た。

## 4. 研究成果

図2にイメージングプレートを用いて測定した典型的なビーム強度分布を示す。この測定で用いたキャピラリーの出口径(20  $\mu\text{m}$ )は、イメージングプレートとキャピラリー間の距離(65 cm)に比べて無視できるほど小さいので、図2は、キャピラリーから出た陽子の発散角分布を示している。

図2から明らかのように、キャピラリーで集束されたマイクロビームは、発散角が非常に小さい高強度の成分(コア)と、その周囲にリング状に分布する発散角が比較的大きい低強度の成分(ハロー)から構成されている。ハロー成分の最小発散角(リングの内側境界)はキャピラリーの出口付近のテーパ角にほぼ等しい。このことは、ハロー成分を構成する陽子がキャピラリーの内壁のごく近

傍で偏向を受けたことを意味している。一方、コア成分に含まれる陽子は、キャピラリー内を直進し、キャピラリー内壁と相互作用することなしに出てきたと考えるのが自然である。

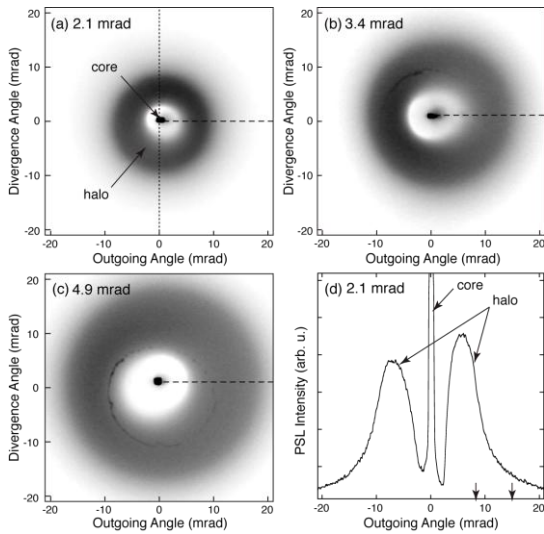


図 2 : 典型的なマイクロビーム強度分布。

SSD を用いて測定した全陽子エネルギースペクトルを図 4 に示す。入射エネルギー (2 MeV) に相当する位置に非常に強いピークがある反面、入射エネルギーより低いエネルギーを持つ成分も相当量存在することが分かる。ここで、イメージングプレート測定から得られた洞察を元に、鋭いピークは直進成分 (コア) に依るもの、低エネルギーテールは偏向成分 (ハロー) に依るものと仮定し、ビーム集束率を見積もると、約 2.7 であった。これは従来報告されていたビーム集束率 ( $10^3$ - $10^4$ ) に比べると非常に小さな値である。

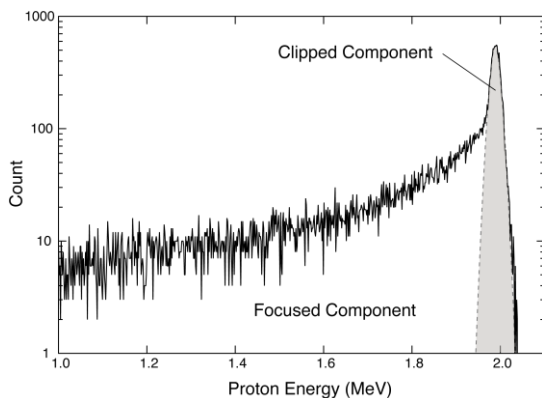


図 3 : エネルギースペクトル。

一方、SSD 測定の間分解能を上げて、エネルギースペクトルの発散角依存性を調べた結果を図 4 に示す。発散角が 0 の時 (コア成分) のエネルギースペクトルは、ほとんどが入射エネルギーに等しいエネルギーを持

つ陽子から構成されている。発散角が大きくなるに従って (ハロー成分)、ピーク位置が低エネルギー側にシフトし、低エネルギー成分の割合も増加する。この結果は、イメージングプレート測定の結果から得られた予測を裏付けるものである。つまり、コア成分は直進した陽子、ハロー成分はキャピラリー内壁で散乱された陽子から構成されていることをこの測定から初めて証明したといえる。

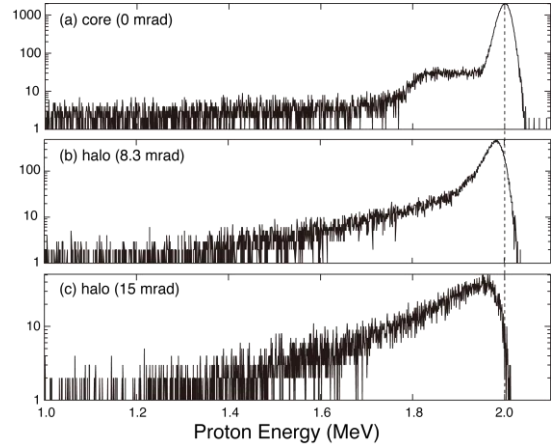


図 4 : エネルギースペクトルの発散角依存性。

キャピラリー中を輸送される陽子の軌道について、モンテカルロシミュレーションから得られた結果を図 5 に示す。この図では、最終的にキャピラリーを通過した陽子についてのみ、その軌道をプロットした。図 5 から、キャピラリーの入口 (直径  $0.8 \mu\text{m}$ ) に対し、一様に陽子を入射したにもかかわらず、通過した陽子の軌道は、キャピラリーの中心軸付近に集中していることが分かる。このことは、ビーム集束に寄与しているのは、キャピラリーの先端付近のテーパのみであることを意味している。

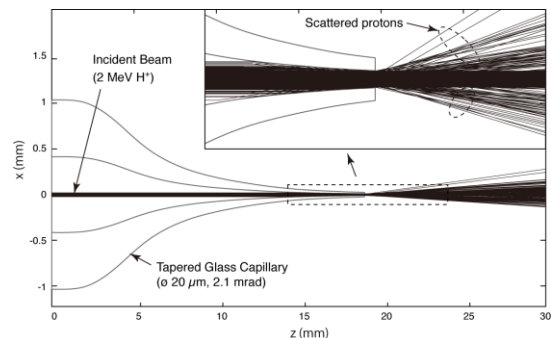


図 5 : キャピラリー中の陽子の軌道。

図 5 の右上にある拡大図から、キャピラリーから出るマイクロビームは、キャピラリー中を直進した成分と壁で散乱を受けた成分から構成されている様子が分かる。これは、イメージングプレート実験で得られた知見

を裏付けるものである。

図6に、様々な出口径のキャピラリーに対しモンテカルロシミュレーションを行い、ビーム集束率を評価した結果を示す。図中の実線は、キャピラリーの出口アパーチャーから出た陽子のみを考慮した場合、点線は、それに加えて出口付近の壁を貫通した陽子も考慮した場合の結果である。前者の場合、ビーム集束率は高々1.6程度にとどまっている。一方、貫通成分を考慮すると、入射ビームのエネルギーによっては最大200程度の集束率が得られた。出口径が小さくなるほど、ビーム集束率が大きくなるのは、キャピラリーの出口付近の壁が薄くなり、陽子が貫通しやすくなったためであると考えられる。

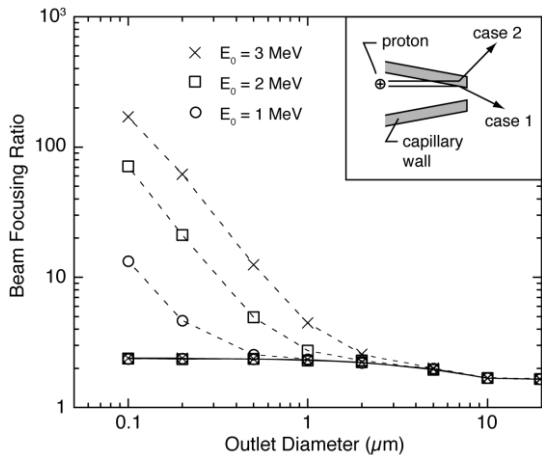


図6：ビーム集束率の出口径依存性。

以上の結果から、次のことが明らかになった：

- ① テーパーガラスキャピラリーによるビーム集束効果は主にキャピラリー内壁での入射イオンの散乱によりもたらされる。
- ② 得られるビーム集束率は、キャピラリーの形状に依るが、およそ2-3倍であり、従来報告されていた値より非常に小さい。
- ③ 集束効果をもたらす散乱成分は、散乱やガラス壁内でのエネルギー損失し、その度合いは発散角と相関がある。
- ④ キャピラリー出口径が1 μmより小さくなると、壁を貫通する成分が支配的となる。

テーパーガラスキャピラリーにより集束されたマイクロビームを利用するに当たっては、ビーム品質の劣化につながる③と④の要因について特に注意する必要があることが分かった。

テーパーガラスキャピラリーにより集束されたマイクロビームを細胞内組織の元素マッピング等へ応用することを念頭に、図7の実験セットアップのもと、マイクロPIXE測定の実験を行った。キャピラリー先端から1 mmの位置に銅メッシュを試料として置き、

陽子ビームを照射した際に発生するX線のスペクトルをシリコン半導体検出器により測定した。銅メッシュは二軸ステージ上に固定されており、ビーム軸に対して垂直方向に数 μmの精度で位置を変えることができる。この機構により、マイクロビームによるメッシュ標的のスキャンを行い、銅の2次元分布画像をPC上で再構成した。ビーム電流の時間変動の影響を補償するためにラザフォード後方散乱した陽子をSSDで検出し、その積算カウント数を用いて特性X線強度の規格化を行った。

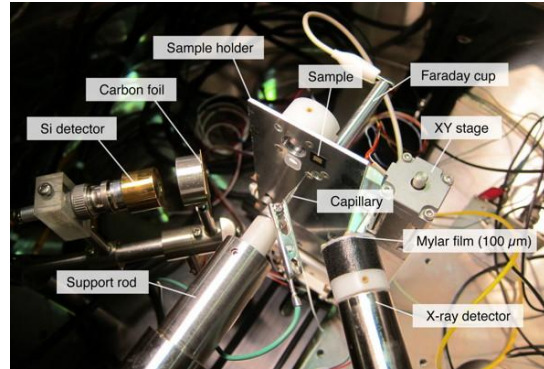


図7：マイクロPIXE分析実験セットアップ

図8に得られた典型的なX線スペクトルと元素マッピングの結果を示す。特性X線の強度から銅の分布を再構成した画像は、銅メッシュの構造を良く再現しており、テーパーガラスキャピラリーにより集束されたマイクロビームを用いても、従来と同程度の空間分解能を容易に実現できることが分かった。標的をキャピラリー出口の直後に置くことで、ハロー成分の発散を抑え、マイクロビームとして十分に利用できることが分かった。

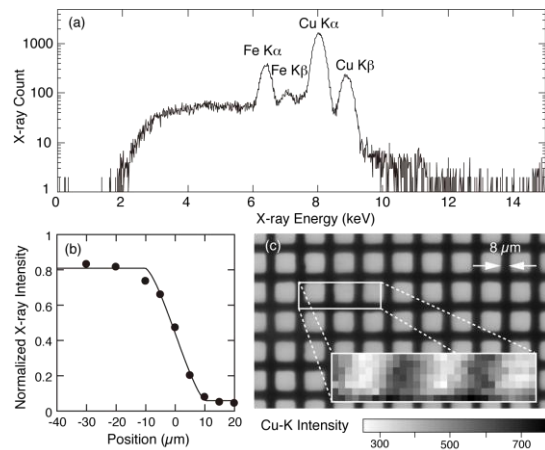


図8：マイクロPIXE法による元素マッピング。

最後に結論をまとめると以下のようになる。第一の目的であったテーパーガラスキャピラリー中のMeVイオンの輸送メカニズムについては、実験及び数値シミュレーションに

よる詳細な解析により、ほぼ明らかになったといえる。つまり、キャピラリー内壁における入射イオンの小角散乱が輸送を担う最も重要な物理過程であることが、本研究により初めて実証された。散乱成分を増やすことがビーム集束率の向上に必要なが、それと同時に、壁面形状を最適化することでいかにビーム品質の低下を防ぐかが重要な課題である。今後、さらに詳細な数値シミュレーションを行うことで、様々な応用に特化したテーパガラスキャピラリーのデザインの最適化を進めていく予定である。

一方、本研究で明らかになった重要な知見は、キャピラリーに入射したイオンが内部で多重散乱を受けて出口まで輸送される確率が非常に低いことである。つまり、ハロー成分を構成するイオンは、そのほとんどすべてがキャピラリー内で1回のみ散乱されたものであることが、数値シミュレーションにより示唆された。従って、MeV イオンを中空ガラスファイバー内で多重散乱させながら輸送するという本研究開始当初のアイデアは現時点では、実現が非常に難しいことが分かった。しかし、壁面へのイオンの入射角が数 mrad 程度になると、表面チャネリング現象により前方散乱の確率が増えることが知られており、この現象を利用したイオンビームのガイド法や集束法について検討することは非常に興味深い課題である。本研究で構築した実験装置等のインフラを利用し、様々な素材・形状のテーパキャピラリーを用いたビーム集束実験を今後も継続する予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 6 件)

① J. Hasegawa, S. Jaiyen, C. Polee, Y. Oguri, Development of a micro-PIXE system using tapered glass capillary optics, Nucl. Instr. and Meth. B, in press, 2011, 査読あり

② J. Hasegawa and Y. Oguri, Development of Micro-PIXE Analysis System Based on Tapered Glass Capillaries, Bull. Res. Lab. Nucl. Reactor., 34, 32-34, 2008, 査読なし

③ J. Hasegawa and Y. Oguri, Monte-Carlo Simulation of MeV Ion Focusing by Tapered Capillary Optics, Bull. Res. Lab. Nucl. Reactor., 33, 17-17, 2009, 査読なし

④ J. Hasegawa and Y. Oguri, Investigation of MeV-Ion Transport Mechanism in Tapered

Micro-capillaries, Bull. Res. Lab. Nucl. Reactor., 32, 27-27, 2008, 査読なし

⑤ J. Hasegawa and Y. Oguri, Development of Micro-PIXE Analysis System Based on Tapered Glass Capillaries, Bull. Res. Lab. Nucl. Reactor., 32, 28-28, 2008, 査読なし

⑥ J. Hasegawa, S. Shiba, H. Fukuda, Y. Oguri, A Compact Micro-Beam System Using a Tapered Glass Capillary for Proton-Induced X-ray Radiography, Nucl. Instr. and Meth. B, 266, 2125-2129, 2008, 査読あり

〔学会発表〕(計 13 件)

① 長谷川純, Sarawut Jaiyen, 福田一志, 小栗慶之, キャピラリー生成マイクロビームの品質評価と  $\mu$ -PIXE 分析への応用, 第 27 回 PIXE シンポジウム, 2010 年 11 月 18 日, 京都大学宇治キャンパス

② 長谷川純, Sarawut Jaiyen, 小栗慶之, テーパーキャピラリーによるイオン集束とビーム品質の評価, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 26 日, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス

③ J. Hasegawa, S. Jaiyen, Y. Oguri, Development of a  $\mu$ -PIXE System Using Tapered Glass Capillary Optics, 10th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology, 14 Sep. 2010, Athens, Greece

④ J. Hasegawa, Y. Oguri, S. Jaiyen, Monte-Carlo Simulation of Ion Beam Focusing Using Glancing-Angle Scattering, The 18th International Symposium on Heavy Ion Inertial Fusion, 30 Aug. 2010, Darmstadt, Germany

⑤ 長谷川純, Sarawut Jaiyen, 小栗慶之, ガラスキャピラリー内イオン輸送における標的及び入射イオン原子番号依存性, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 20 日, 岡山大学津島キャンパス

⑥ 長谷川純, 福田一志, 小栗慶之, テーパーキャピラリーによる MeV イオン輸送の数値解析 II, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009 年 9 月 25 日, 熊本大学黒髪キャンパス

⑦ J. Hasegawa, C. Polee, H. Fukuda, Y. Oguri, A Micro-PIXE Analysis System Based

on Taper Capillary Optics, 20th International Congress on X-ray Optics and Microanalysis, 16 Sep. 2009, Karlsruhe, Germany

⑧長谷川純, 福田一志, 小栗慶之, ガラスキャピラリーを用いた  $\mu$ -PIXE 装置の開発, 第 22 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会, 2009 年 7 月 17 日, 筑波大学

⑨長谷川純, 福田一志, 小栗慶之, テーパーキャピラリーによる MeV イオン輸送の数値解析, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 27 日, 立教大学

⑩J. Hasegawa, C. Polee, S. Shiba, Y. Oguri, Focusing of MeV Ions Using Tapered Insulator Tubes, 11th US-Japan Workshop on Heavy Ion Fusion and High Energy Density Physics, 18 Dec. 2008, San Francisco, USA

⑪長谷川純, C. Polee, 福田一志, 小栗慶之, 絶縁体キャピラリー内における MeV イオンの輸送過程 II, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 21 日, 岩手大学上田キャンパス

⑫長谷川純, C. Polee, 福田一志, 小栗慶之, ガラスキャピラリーを用いたマイクロ PIXE 装置の開発, 第 25 回 PIXE シンポジウム, 2008 年 9 月 11 日, 群馬大学医学部

⑬C. Polee, 長谷川純, 福田一志, 小栗慶之, Preliminary Micro PIXE Analysis Using Glass Capillaries, 日本原子力学会 2008 年安芸の大会, 2008 年 9 月 4 日, 高知工科大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長谷川 純 (HASEGAWA JUN)

東京工業大学・原子炉工学研究所・助教

研究者番号：90302984

### (2) 研究協力者

小栗 慶之 (OGURI YOSHIYUKI)

東京工業大学・原子炉工学研究所・教授

研究者番号：90160829