

研究種目：特定領域研究

研究期間：2004～2008

課題番号：16077205

研究課題名（和文） 系外黄道光観測に向けた赤外線検出器技術の開発

研究課題名（英文） Infrared technology development toward the search of extrasolar zodiacal light

研究代表者 村上 浩 (MURAKAMI HIROSHI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 教授

研究者番号：40135299

研究成果の概要：研究成果の概要：太陽系外惑星系の塵の放射（太陽系の黄道光や黄道放射に対応）の観測は、系外惑星自身の観測と並んで重要である。従来の赤外線観測は、結晶質ケイ酸塩の塵が観測できる波長 $30\text{--}50\ \mu\text{m}$ 、及び、惑星系外縁部の塵の温度や量を知るのに重要な $200\text{--}300\ \mu\text{m}$ の観測が、検出器の実用化の遅れにより抜け落ちていた。本研究では、日本初の $30\text{--}40\ \mu\text{m}$ 帯を含む測光器を試作すると共に、これも日本初となる波長 $200\text{--}300\ \mu\text{m}$ 帯の光伝導型検出器を開発し、これを用いた大気球搭載望遠鏡を製作して、近い将来の観測を可能にする技術を確立した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成16年度	28,600,000	0	28,600,000
平成17年度	51,900,000	0	51,900,000
平成18年度	60,900,000	0	60,900,000
平成19年度	33,200,000	0	33,200,000
平成20年度	19,400,000	0	19,400,000
総計	194,000,000	0	194,000,000

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：

キーワード：光学赤外線天文学、テラヘルツ／赤外材料・素子、惑星起源・進化

1. 研究開始当初の背景

系外惑星系の観測では、惑星自身の直接観測と共に、塵円盤の観測が重要である。太陽系において黄道光の原因となっている惑星間塵、あるいは Edgeworth-Kuiper Belt に存在すると予想されている塵と同様の塵の放射が観測されれば、惑星形成活動の存在を示すだけでなく、惑星系の規模や組成、惑星位置等の情報をもたらす。

塵の組成や量を求めるのには近赤外線からサブミリ波までの広い波長帯の観測が有用であるが、結晶質シリケートや（水の）氷

の放射が見られる波長 $30\text{--}50\ \mu\text{m}$ 、また低温の塵の温度や量を見積もるのに必要な $200\text{--}300\ \mu\text{m}$ 帯の検出器は、開発が遅れており、観測データも非常に不足している。

2. 研究の目的

上記の背景のもと、 $30\ \mu\text{m}$ 帯、及び $300\ \mu\text{m}$ 帯に感度を持つ検出器を開発し、それによる観測装置を試作して、これらの波長帯での観測技術を確立することを目的として研究を行った。

3. 研究の方法

(1) 日本初の 30 μm 帯測光装置の開発

米国の DRS Technologies Inc. より、Si:Sb 半導体を用いた 128 \times 128 画素の Blocked-Impurity-Band 型検出器を購入し、日本で初めて 30 μm 帯の観測波長を持つ測光器 MAX38 を開発した。ここでは検出器の最適動作条件を探るだけでなく、初めての観測波長帯に対するフィルターの新規開発、極低温で動作するチョッパーの開発を行った。

波長 30 μm 帯の観測は、地上では地球大気の放射が強く観測環境が良くないが、一方大気球や観測ロケットに搭載する望遠鏡は、観測装置の回収が保証されない。検出器が高価なことを考慮して、本研究では東京大学の TAO プロジェクトとの共同研究を行い、チリの高山での観測を目指すこととした。

(2) 300 μm 帯光伝導検出器の開発

300 μm 帯は、光伝導検出器が 200 μm 以下の波長でしか実用化されておらず、ボロメータは使うことができるが 0.1K 以下の低温が必要である。本研究では GaAs 半導体中の浅いドナー準位を利用した、高感度で 1~2 K での動作が可能な 300 μm 帯用光伝導検出器の開発を目指した。現有の液相エピタキシャル装置により超高純度の GaAs 結晶を製作し、これを用いて検出器の試作、評価を行った。

(3) 大気球搭載望遠鏡の開発

上記の新規開発検出器を用いた 300 μm 帯の観測は、大気球搭載望遠鏡により進めることとした。この望遠鏡では、ゴンドラ全体の姿勢制御の精度・安定性を求めるのではなく、副鏡の位置と角度の調整により対象天体を追尾して長時間の積分を可能にする方式を採用した。(2) 項に述べた新規開発の検出器システムについては、小型の測光器を開発し、大気球実験のピギーバック装置として一足先に実用化試験を行うこととした。

4. 研究成果

(1) 30 μm 帯測光器 MAX38 の開発

地上の望遠鏡を用いて 30 ミクロン帯の観

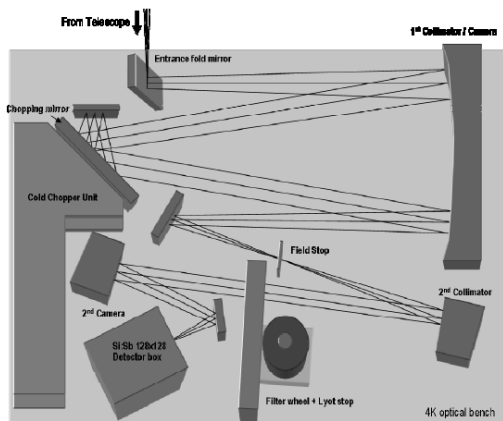


図 1. MAX38 の光学系

測を実現するためのカメラを開発した。このカメラは地上の観測サイトの中で 30 ミクロン帯の観測が可能な標高 5600m のアタカマサイトで使用するべく開発したもので Si:Sb の BIB 型検出器を用い、38 ミクロンまでの撮像観測と波長分解能 100 の低分散分光が出来る装置である。この波長帯は透過材料としてよいものが無いため、光学系は図 1 のように反射光学系を用いた。

Si:Sb 検出器の駆動には、リアルタイム Linux を用いたアレイコントローラを開発した。従来は専用の回路を組んで対応していた部分を汎用の DMA デジタル入出力ボードとソフトウェアの組合せで実現することで、安価で汎用性のあるシステムとなっている。また、この中間赤外波長域では大気および望遠鏡からの熱放射が大きく、これを差し引いて天体からの信号を得るためにチョッピングと呼ばれる手法が用いられる。従来は望遠鏡の副鏡の向きを交互に切り替えることで実現してきたが、この方法では望遠鏡側で特別に工夫した副鏡が必要になり、実現が難しかった。そこで我々は装置内部の光学系の中に数ヘルツで駆動できる鏡を搭載することにより、このチョッピング観測を実現することにした。観測装置内部の光学系は熱背景放射を出さないように 4K 程度まで冷却されているが、この環境下で動作するアクチュエータとしてピエゾ素子を用いたものを開発してチョッピング観測を実現できるようにした。

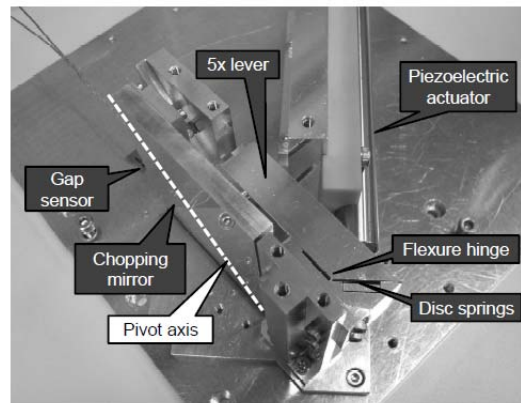


図 2 がその機構である。

図 2. 極低温動作チョッピング機構

実際にこの冷却チョッピング機構を用いた観測の試験を広島大学の「かなた」望遠鏡で行い、十分な性能が得られることを確認した。

図 3 はその試験観測で得たオリオン星雲の BN-KL 領域の画像で、チョッピングによる差し引きに加えて、望遠鏡を少し移動して同様の観測を繰り返して差し引きし、都合 4 通りのプラス・マイナス画像が現れるようにした

ものである。
今後、この装置をチリのアタカマに建設中の
東京大学の望遠鏡に持ち込んで観測を進め
ていく予定である。

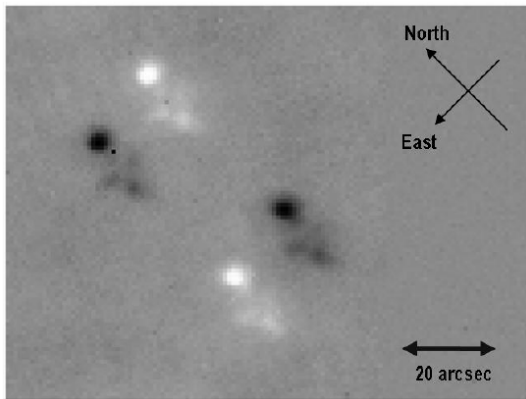


図 3. チョッピング画像例 (Orion BN-KL)

(2) 300 μm 帯用 GaAs 検出器の開発

GaAs 半導体中のドナー準位を利用した 300 μm 帯光伝導検出器の開発を行った。高い効率を持つ検出器を実現するためには、

- ・量子効率 (入射光子の吸収効率) を高めるための十分な厚み (数 100 μm)
- ・光伝導利得 (作られたキャリアの収集効率) を高めるための十分低い少数不純物密度 (ここではアクセプタ密度)

が必要である。これらを満たすために、液相エピタキシーを用いた GaAs 半導体の高純度結晶成長を行った。

結晶の厚みは 200 μm 程度が成長でき、また複数回成長させることで、さらに厚いものも可能であることを確認した。

不純物密度は、最も高純度の結晶では、アクセプタ密度 3.8×10^{13} 個/cc を達成した (非ドープの結晶であり、ドナー密度は 6.3×10^{13} 個/cc)。

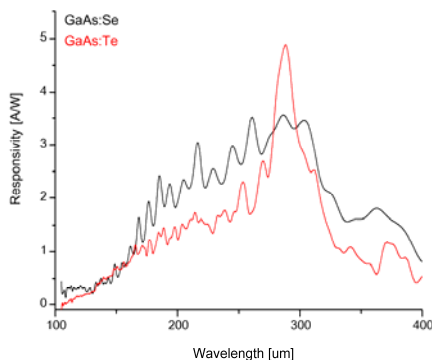


図 4. GaAs 検出器の波長感度特性

試作結晶を用いて、0.5mm 角の受光面を持つ検出器を試作した。GaAs 結晶は、ドープ無しでドナー密度が 10^{14} 個/cc 台のもの、意図的にテルル、あるいはセレンをドープしたものを用いた。結果として得られた検出器は、波長 300 μm において約 3 A/W の Responsivity を持ち、Noise-Equivalent Power は暗電流の揺らぎにより制限されており $10^{-16} \text{ W} \cdot (\text{Hz})^{-1/2}$ 程度である。これは人工衛星を用いた低背景光下では不満足ではあるが、大気放射が残る気球高度での観測では十分な性能である。図 4 に試作検出器の波長感度特性を示す。この検出器は日本では初めての 300 μm 帯光伝導検出器であり、世界でも 2 例目となる。

試作結晶中に混入するアクセプタ不純物は、結晶成長に用いる石英製の反応管に起因すると考えられ、これを低減するため、アルミナセラミックスの反応管を使用する世界でも例がない試みも行った。この実験では (装置が枯れきっていないため) 全体の不純物密度は非ドープの場合でも 10^{14} 個/cc 台であるが、アクセプタ密度はドナー密度の 1/10 程度に減っており、さらに高感度の検出器が得られる見通しを得た。また将来 Blocked-Impurity-Band 検出器の試作に道を開くものとして期待できる。

本研究ではアレイ検出器を実現するため、8 個のホーンを並べた前置光学系も製作した。また高純度シリコンが、300 μm 帯で高い透過率を持つ良好な光学材料であることを確かめし、シリコンレンズアレイも前置光学系として有望であることを確認した。

検出器の実用化試験として、口径 16mm のシリコン製レンズを持つ非常に単純で小型の測光装置を試作した。これは大気球実験のピギーバック装置として、2009 年にフライト予定である。天文学的観測は望めないが、気球高度での 300 μm 帯での観測条件 (大気放射の強度や変動) の評価を行うことができる。

(3) 300 μm 帯用大気球搭載望遠鏡の開発

遠赤外領域 50~300 μm での観測のために気球搭載望遠鏡の開発を行った。従来の気球望遠鏡ではゴンドラ姿勢制御系による指向制御を行っており、その安定性と精度はそれほど高くないためにサーベイ的な観測は可能であったが、一つの天体を長時間積分することが難しかった。そこで我々の開発したシステムでは望遠鏡の指向方向を可視光でモニタし、指向ずれを副鏡の駆動で補正してやるという方式で、高精度の指向観測を実現するものである。

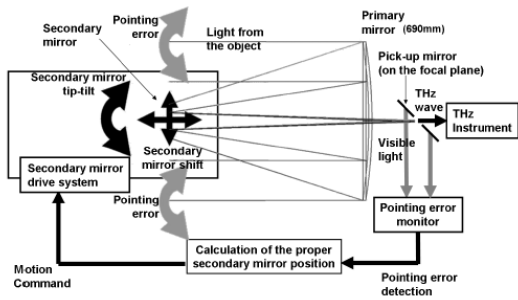


図 5. 像安定化機構のブロック図

この方式を実現するために望遠鏡の光学系は広視野を必要とする。そこで我々は製作と検査の容易な球面主鏡でありながら、副鏡の移動によって広い範囲で指向安定化が可能な光学系を設計し、超精密切削加工で口径 69cm の主鏡と高次の非球面の副鏡を製作した。主鏡の波面誤差が図 5 に示されている。300 μm 帯の望遠鏡としては問題ない精度を実現している。

さらに副鏡の駆動メカニズムとコントロール系を開発して望遠鏡システムを完成させた。副鏡駆動による像安定化機能も正しく機能していることが確認されている。この望遠鏡は、2010 年に最初の天体観測に用いることを予定している。

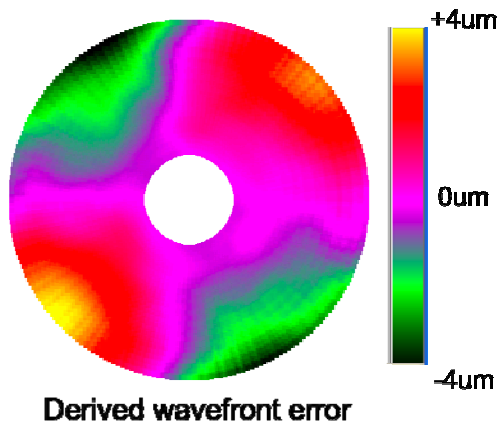


図 6. 超精密切削で製作した球面主鏡の波面誤差の評価結果

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 10 件)

1. T. Miyata, S. Sako, T. Nakamura, T. Onaka, H. Kataza, A new mid-infrared camera for ground-based 30 micron observations: MAX38, Proceedings of the SPIE, vol. 7014, pp. 701428-701428-8, 2008年、査読

有

2. S. Sako, T. Miyata, T. Nakamura, K. Motohara, Y. K. Uchimoto, T. Onaka, H. Kataza, Developing Infrared Array Controller with Software Real Time Operating System, Proceedings of the SPIE, Vol. 7021, pp. 702128-702128-8, 2008年、査読有
3. T. Nakamura, T. Miyata, S. Sako, T. Onaka, K. Enya, H. Kataza, H. Takahashi, Y. Obuchi, Cold Chopper System for Mid-infrared Instruments, Proceedings of the SPIE, Vol. 7018, pp. 70184H-70184H-9, 2008年、査読有
4. S. Sako, T. Miyata, T. Nakamura, T. Onaka, Y. Ikeda, H. Kataza, Developing metal mesh filters for mid-infrared astronomy of 25 to 40 micron, Proceedings of the SPIE, Volume 7018, pp. 701853-701853-10, 2008年、査読有
5. K. Watanabe, M. Ueno, M. Wakaki, O. Abe, H. Murakami, GaAs:Se and GaAs:Te Photoc conductive Detectors in 300 μm Region for Astronomical Observations, Japanese Journal of Applied Physics, 47, Issue 11, p. 8261-8264, 2008年、査読有
6. K. Watanabe, K. Yamashita, H. Murakami, et al., GaAs extrinsic photoconductors for the terahertz astronomy, Proceedings of the SPIE, vol. 6840, pp. 68401-68408, 2008年、査読有
7. H. Kataza, T. Kamizuka, K. Watanabe, H. Murakami, T. Wada, Optical design of image stabilizing Cassegrain-like balloon-borne telescope, Proceedings of the SPIE, vol. 7012, pp. 70123S-70123S-8, 2008年、査読有
8. K. Watanabe, K. Yamashita, H. Kataza, T. Kamizuka, et al., Fabrication of the GaAs based terahertz photoconductors and the photometer for Tera-GATE, Proceedings of the SPIE, vol. 7020, pp. 702020-702020-10, 2008年、査読有
9. T. Kamizuka, H. Kataza, K. Watanabe, T. Wada, H. Murakami, THz balloon-borne telescope: Tera-GATE project, Proceedings of the SPIE, vol. 7012, pp. 70123R-70123R-8, 2008年、査読有
10. K. Watanabe, H. Murakami, T. Ohata, M. Wakaki, O. Abe, Development of GaAs photoconductors for far-infrared/submillimeter astronomy, Proceedings of the SPIE, vol. 5498, pp. 637-646, 2004年、査読有

[学会発表] (計 25 件)

1. 上塚貴史、テラヘルツ帯大気球観測プロジェクトTera-GATEにおける搭載望遠鏡開発：指向エラー補正機構の現状と可視モニター光学系の結像性能、日本天文学会2009年春季年会、2009年3月25日、大阪府立大学
2. T.Kamizuka, Image stabilized balloon-borne telescope developed for 'Tera-GATE', The 2nd Subaru International Conference, 9-12 March 2009, Keauhou Beach Resort
3. K.Watanabe, Development of the GaAs based THz photoconductor and balloon-borne experiment module 'TG-ZERO', The 2nd Subaru International Conference, 9-12 March 2009, Keauhou Beach Resort
4. 渡辺健太郎、村上 浩、片坐宏一 等、Tera-GATE 計画へ向けた大気球テラヘルツ背景放射の観測実験、日本天文学会春季年会、2008年3月27日、国立オリンピック記念青少年総合センター
5. 上塚貴史、片坐宏一、村上 浩 等、テラヘルツ帯天文観測計画 Tera-GATE にむけた気球望遠鏡開発、日本天文学会春季年会、2008年3月27日、国立オリンピック記念青少年総合センター
6. 酒匂重行、片坐宏一 等、アタカマ 30um 帯中間赤外線カメラ MAX38、日本天文学会春季年会、2008年3月25日、国立オリンピック記念青少年総合センター
7. 廣本宣久、村上 浩 等、4K 冷凍機を用いる地上センシング用テラヘルツ光伝導半導体検出器 II、第 55 回応用物理学関係連合講演会、2008年3月28日、日本大学理工学部船橋キャンパス
8. 青木 誠、望月賢人、サロジトリパティ、廣本宣久、渡辺健太郎、村上 浩、若木守明、4K冷凍機を用いる地上センシング用テラヘルツ光伝導半導体検出器の振動雑音、応用物理学会2008年秋季学術講演会、2008年9月3日、中部大学
9. 渡辺健太郎、大規模素子テラヘルツカメラへ向けたSiレンズアレイの検討、日本天文学会2008年秋季年会、2008年9月13日、岡山理科大学
10. 上塚貴史、大気球観測における星像安定化機構の開発、日本天文学会2008年秋季年会、2008年9月13日、岡山理科大学
11. 山下恭平、渡辺健太郎、村上 浩、若木守明、アルミナ反応管 (A1203) を用いたLPE成長によるサブミリ波検出器用低補償比GaAsの試作、応用物理学会2008年秋季学術講演会、2008年9月2日、中部大学
12. 渡辺健太郎、片ざ宏一、和田武彦、村上 浩、上塚貴史、榎坪宏展、若木守明、大気球搭載テラヘルツ望遠鏡Tera-GATEの開発、大気球シンポジウム2008年度、2008年9月26日、宇宙航空研究開発機構
13. 渡辺健太郎、片ざ宏一、和田武彦、村上 浩、上塚貴史、若木守明、大気球搭載テラヘルツ望遠鏡Tera-GATE計画、大気球シンポジウム2007年度、2007年12月14日、宇宙航空研究開発機構
14. 中村友彦、宮田隆志、酒向重行、尾中 敬(東京大学)、塩谷圭吾、片ざ宏一、中川貴雄、高橋 英則、大淵 喜之、TAO 望遠鏡グループ、かなた望遠鏡グループ、SPICA ワーキンググループ、中間赤外線観測用冷却 Chopper の開発および試験観測による性能評価、日本天文学会秋季年会、2007年9月28日、岐阜大学
15. 渡辺健太郎、村上 浩、片坐宏一 等、テラヘルツ帯天文観測計画(Tera-GATE 計画)に向けた検出器開発、日本天文学会秋季年会、2007年9月27日、岐阜大学
16. 上塚貴史、片坐宏一、村上 浩 等、テラヘルツ帯天文観測計画(Tera-GATE 計画)に向けた気球望遠鏡開発、日本天文学会2007年秋季年会、2007年9月27日、岐阜大学
17. 渡辺健太郎、村上 浩、片坐宏一、上塚貴史、若木守明、北川英和、山下恭平、阿部 治、日本天文学会秋季年会、2007年9月27日、岐阜大学
18. 廣本宣久、村上 浩 等、4K 冷凍機を用いる地上センシング用 THz 光伝導半導体検出器、第 68 回応用物理学会秋季学術講演会、2007年9月7日、北海道工業大学
19. 酒向重行、宮田隆志、尾中 敬、池田優二、片ざ宏一、30 μ m 帯マルチ・メタル・メッシュフィルタの開発、日本天文学会2007年春季年会、2007年、2007年3月29日、東海大学
20. 上野真樹、若木守明、北川英和、渡辺健太郎、村上 浩、阿部治、遠赤外/サブミリ波 GaAs 光電導検出器の開発、日本天文学会2007年春季年会、2007年、2007年3月30日、東海大学
21. 酒向重行、宮田隆志、高橋英則、塩谷圭吾、大淵喜之、赤外線観測用冷却チョッピング鏡の開発、日本天文学会2005年秋季年会、2005年10月8日、北海道大学
22. 渡辺健太郎、片ざ宏一、村上 浩、佐藤麻美子、上野真樹、若木守明、阿部 治、GaAs 半導体を用いた遠赤外線検出器の開発及び観測計画、日本天文学会2005年秋季年会、2005年10月8日、北海道大学
23. 渡辺健太郎、村上 浩、大畑拓郎、佐藤麻美子、若木守明、阿部 治、GaAs 半導体を用いた高感度遠赤外線検出器の開発(3)、日本天文学会2005年春季年会、2005年3月28日、明星大学
24. 渡辺健太郎、村上 浩、大畑拓郎、若木守明、阿部 治、GaAs 半導体を用いた高感度

遠赤外線検出器の開発 II、日本天文学会
2004 年秋季年会、2004 年 9 月 22 日、岩手
大学

25. 渡辺 健太郎、大畑 拓郎、若木森明、阿
部 治、村上 浩、金田 英宏、GaAs 半導体
を用いた高感度遠赤外線検出器の開発、日
本天文学会 2004 年春季年会、2004 年 3 月
23 日、名古屋大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 浩 (MURAKAMI HIROSHI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究本部・教授

研究者番号：40135299

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

片坐 宏一 (KATAZA HIROKAZU)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究本部・准教授

研究者番号：70242097

和田 武彦 (WADA TAKEHIKO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究本部・助教

研究者番号：50312202

松浦 周二 (MATSUURA SHUJI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究本部・助教

研究者番号：10321572

金田 英宏 (KANEDA HIDEHIRO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究本部・助教

研究者番号：30301724

平尾 孝憲 (HIRAO TAKANORI)

名古屋大学大学院 ・ 理学研究科 ・ 助教

研究者番号：00293689

渡部 豊喜 (WATABE TOYOKI)

名古屋大学 ・ 大学院理学研究科

技術専門職員

研究者番号：20402422