

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760157

研究課題名（和文） マイクロ磁気冷凍システムの構築とその最適化

研究課題名（英文） Development and Optimization of a Micro Magnetic Refrigerator

研究代表者

川南 剛 (KAWANAMI TSUYOSHI)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20281793

研究成果の概要（和文）：磁気冷凍法は、ある種の磁性材料に磁場変化を付与した際に生ずる磁気熱量効果を利用した冷凍技術である。本研究は、小型磁気冷凍システムを構築し、冷熱を生ずる磁気作業物質と熱輸送媒体との間の熱交換特性を把握することに加え、熱交換向上技術を確立することを目的としている。本研究の結果、大きな磁場環境下ではより大きな温度差が得られ、流動条件によって温度差が最大値を示すことが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：Magnetic refrigeration is a cooling technology based on the magnetocaloric effect, which is a temperature-changing phenomenon caused under the magnetic field alteration. The primary objectives of this study are to construct a small-type demonstrator of magnetic refrigerator, and to evaluate the heat transport characteristics from/to magnetocaloric materials to/from fluid. As results from the experiment and numerical simulation, the maximum temperature is obtained with larger magnetic intensity. In addition, the existence of optimum operating conditions is shown under the condition of appropriate flow volume and volumetric flow rate.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：冷凍

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：磁気冷凍、磁気熱量効果

1. 研究開始当初の背景

ある種の磁性材料に磁場を加えると、原子の対電子に起因する磁気モーメントが磁力線の方向へ規則的に揃えられ、エントロピーの減少分を熱として放出する。逆に磁性体より磁場を取り去ると磁気モーメントの方向は不規則になり、エントロピーの増加分を周囲からの熱で補う。この現象を磁気熱量効

果と呼び、この磁場変化に基づく磁性体の吸発熱を、熱サイクルにより低熱源および高熱源へ移動させることで冷凍機およびヒートポンプとして作動させることが可能になる。磁気冷凍機は、フロンを全く使用せず、駆動動力も小さく、さらに容積の小さい「低環境負荷・超小型冷凍システム」を実現可能なことから、空調用またはモバイル用途の小型冷

凍システムへの展開が期待されている。しかし、常温域においては冷媒に相当する磁気作業物質の熱容量が極低温域に比べ大きくなるため、磁場変化によって得られる磁気作業物質の温度変化が極めて小さくなり、現状では十分な冷却能力を得るのが困難である。従って、磁気作業物質の小さな温度変化を効率的に熱輸送媒体に伝える熱移動制御が重要であり、伝熱工学の観点からの検討が不可欠である。

本申請課題は、申請者が平成 15 年度から取り組んでいる「空調を目的とした常温磁気冷凍機の開発」および、平成 18 年度～平成 19 年度の研究期間で採択された科学研究費補助金・若手研究 (A)「磁気熱量効果を利用した高効率ノンフロン冷凍空調システムの開発」の成果を発展・応用展開させるものであり、本研究期間では、磁気冷凍システムの特性を支配する基礎現象に対して、熱工学的アプローチから検討を加え、超小型磁気冷凍・ヒートポンプシステムの構築およびその性能向上を目指す。

2. 研究の目的

本研究の目的は、小型磁気冷凍システムを構築し、システムに使用される磁気作業物質と熱輸送媒体との間の熱交換特性を把握することに加え、磁場の付与により連続的に生じる磁気作業物質からの吸発熱量を、素早く移動させる熱交換向上技術を確立することである。目的達成のためには、室温磁気冷凍システムに使用される磁気作業物質と熱輸送媒体との間の熱交換特性を把握することに加え、磁場の付与により連続的に生じる磁気作業物質からの吸発熱量を、素早く移動させる熱交換向上技術を確立することが重要である。従って、本研究期間内においては特に以下の 2 項目について重点的に研究を遂行する。

(1) 連続的に吸発熱を繰り返す磁気作業物質と熱輸送媒体との間の基礎的な熱交換特性に及ぼす、磁気作業物質の形状、充填率、および熱輸送媒体の諸物性に関して実験および数値解析により検討を行う。

(2) 永久磁石と多孔質磁気作業物質からなる小型磁気冷凍システムを構築し、システムの運転特性を予測するとともに、定量的かつ普遍的な磁気冷凍システムの設計指針の獲得および最適運転条件の把握によるシステム COP の向上を図る。

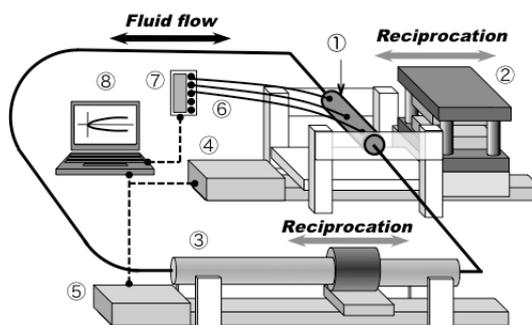
3. 研究の方法

磁気冷凍システムは、磁性体に励磁および消磁を繰り返すことにより、磁性体そのものが吸発熱し、その熱を高熱源と低熱源に振り

分け冷凍の作用を生じさせる仕組みである。この熱の振り分けを効率良く高速に行うことが、システムのエネルギー輸送特性および成績係数 COP を大きく左右する。以下に具体的に研究項目と方法を述べる。

(1) 磁気冷凍システムの運転特性を評価するための実験装置の製作：

システムの核となる、磁気作業物質充填層の熱移動特性、および COP 等のシステムの性能を評価するための実験装置を製作する。本実験装置は主に、永久磁石を用いた磁気回路、磁気作業物質を封入した試験部、熱交換媒体駆動系、および各測定系から構成されている。磁場集中が生じる磁気回路の中心部には、磁気作業物質が封入されたセルを配置した試験部が設置される。磁気回路は PC 制御されたスライダ上に設置されており、あらかじめ設定された周期および移動距離にて駆動し、試験部内の磁気作業物質に付与する磁場を変化させることが可能である。なお、各温度データの収集には温度計測収集システムを用いる。図 1 に実験装置の系統図を、図 2 に試験部の写真をそれぞれ示す。



- ① 磁気作業物質充填層
- ② 磁気回路
- ③ 熱交換媒体駆動系
- ④ 電動スライダ #1
- ⑤ 電動スライダ #2
- ⑥ 測温抵抗体
- ⑦ 温度計測収集システム
- ⑧ コンピューター

図 1 実験装置系統図

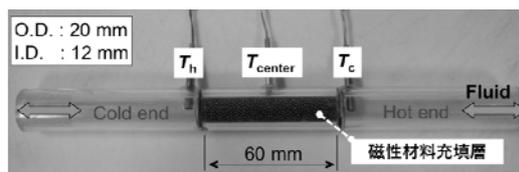


図 2 磁気作業物質充填層詳細図

(2) 磁気作業物質の選定：

磁気作業物質に求められる性質として、磁気熱量効果が大きいこと、キュリー点が室温近傍にあることが挙げられる。本研究では、磁気熱量効果が大きくキュリー点が 20°C であるガドリニウム (Gd) を主な磁気作業物質として用いる。加えて、ガドリニウムの数倍の磁気エントロピーを有することから、磁気冷凍システムの有望な磁気作業物質として注目されている、ランタン系材料に関しても、材料の基礎的特性評価も含め試験装置の磁気作業物質として採用する。

(3) 熱移動特性の実験：

制作した実験装置を用い、磁性体と周囲熱媒体との間の熱移動特性を検討する。実験パラメータとして、励磁・消磁の周期、周囲流体の流量等を変化させることに加え、磁性体の形状が熱移動挙動に及ぼす影響も検討する。図 3 に、運転の周期を模式的に示す。

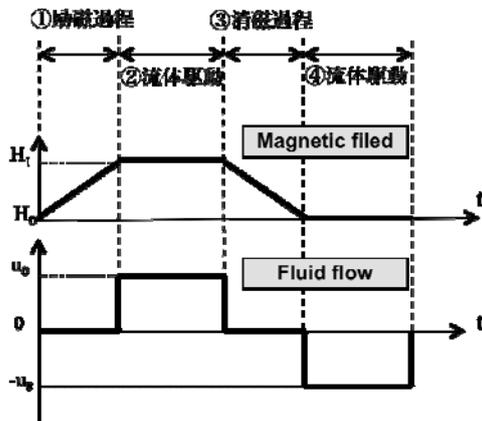


図 3 運転の周期

(4) 数値解析による磁気冷凍システムの性能予測：

磁気冷凍機の熱移動過程に関して、磁気作業物質充填層からの噴出流れを考慮した数値解析モデルを構築し、作業物質層内の基礎的熱移動特性、磁気冷凍システムの運転特性、および成績係数に関する数値解析をワークステーションを用いて行う。また、数値解析で得られたシステムの性能予測結果と実験結果の比較検討を行い、本研究で構築した数値解析モデルの妥当性の評価を行う。

4. 研究成果

以下に、研究成果の一部を抜粋して示す。

(1) 磁気作業物質の温度変化：

磁気熱量効果 (Magnetocaloric Effect: MCE) による温度変化の大きさは、磁気冷凍システ

ムの冷凍能力に最も大きな影響を与える因子である。一般に強磁性体の磁気熱量効果は材料のキュリー点 (キュリー温度) でピーク値を持つことが知られている。よって、室温磁気冷凍機に用いる磁性体は、室温付近にキュリー点を持ち、かつ大きな磁気熱量効果を示すものが好ましい。本研究ではまず、代表的な磁気熱量効果材料であるガドリニウム (Gd) の磁気熱量効果に関する考察を加えた。なお、ガドリニウムのキュリー点は、20°C であることがすでに知られている。

図 4 に、ガドリニウムに磁場変化を付与した場合の磁気熱量効果による温度変化の測定結果を示す。図の横軸はガドリニウムの消磁前温度 T_i [°C]、縦軸は消磁 (断熱条件) によって生じた温度変化 ΔT_{ad} [°C] であり、付与した磁場の強さは、1.0 テスラおよび 2.0 テスラである。図に示されるとおり、 ΔT_{ad} は、初期温度が 20°C 付近 (材料のキュリー点) で最大となり、その値は 1.0 テスラにおいて約 2.6°C、2.0 テスラにおいては約 4.2°C であることがわかる。

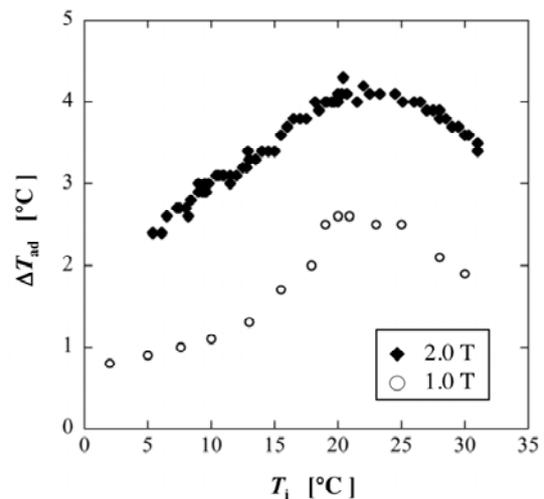


図 4 磁気熱量効果によるガドリニウムの温度変化

(2) 冷凍特性の実験結果：

①連続運転時の温度変化 図 5 に、水を熱交換媒体とし、磁気冷凍サイクルを連続運転した場合の高温側温度 T_h [°C] および低温側温度 T_c [°C] の推移を示す。図の横軸は実験開始後の経過時間 t であり、実験開始温度は 20°C である。なお、 V^* および F^* はそれぞれ、磁気作業物質充填層の空隙体積を基準として規格化した、標準流動体積および標準流量であり、磁場強度は 2.0 テスラの条件である。図より、時間の経過に伴って T_h と T_c の温度差が徐々に拡大し、最終的に熱的平衡状態に達していることがわかる。また、800 秒経過後

の温度差は、図4に示した一度の励磁または消磁による磁気熱量効果によって得られる温度差 ΔT_{ad} よりも大きくなっていることがわかる。これより、本冷凍サイクルが、有効に機能していることが確認できる。なお、熱的平衡状態に到達後の T_h と T_c の温度差を ΔT と定義し、以降、これを冷却特性の評価に用いる。

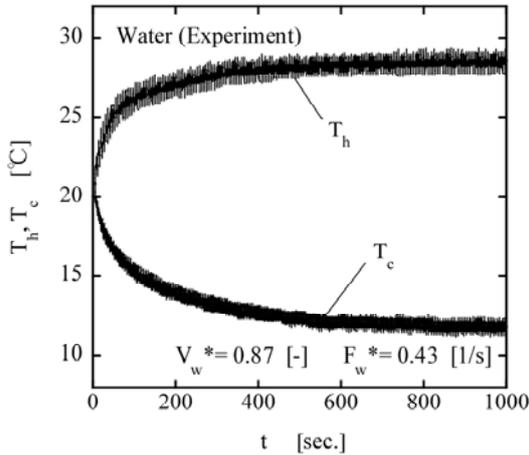


図5 実験による温度変化 (2.0 テスラ)

一方、図6に、磁場強度 1.0 テスラの磁石を用いた場合の結果を示す。図5と図6の結果を比較すると、それぞれ時間の経過に伴い温度差が拡大しているが、800 秒経過時点の温度差は、2.0 テスラの磁場における場合、1.0 テスラの場合の約 1.7 倍となっていることがわかる。これは、付与される磁場強度の増大によって、図4に見られるように、一度の励磁または消磁による磁気熱量効果によって生じる 20°C 近傍の温度変化量 ΔT_{ad} も約 1.7 倍と大きくなり、その結果、1 サイクルの温度変化が増大したためと考えられる。

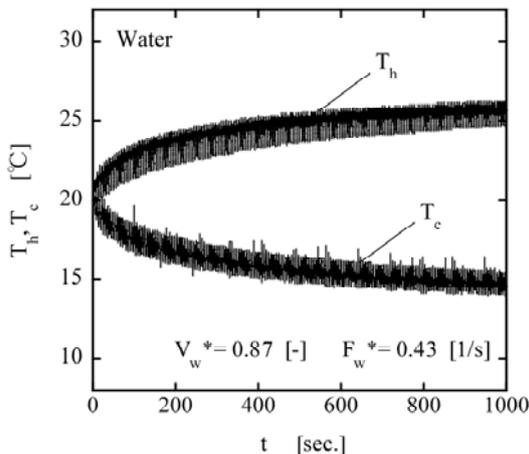


図6 実験による温度変化 (1.0 テスラ)

②熱交換媒体の流動体積および流量の影響 図7に、熱交換媒体の標準流動体積 V^* および標準流動速度 F^* と、その条件における定常後の最大温度差 ΔT の関係を示す。図より、 V^* が 0.4, F^* が 1.3 の条件において、 ΔT が最大となることがわかる。また、その際の最大到達温度差は約 22°Cであった。磁気冷凍サイクルでは、熱交換媒体流動過程時に、十分に磁気作業物質と熱交換媒体との間の熱交換を行うことが重要である。しかしながら、熱交換媒体の流動体積が小さい場合、一度の流動での熱交換量が減少し、サイクルの蓄熱・再生熱量が低下するものと考えられる。一方、流動体積および流動速度がある程度大きくなると、熱交換媒体の熱容量が大きくなり、熱交換媒体の温度変化がつきにくくなる。このため、流動体積および流動速度が小さい場合と同様に、蓄熱・再生の効果が低下し、 ΔT も小さくなったものと考えられる。

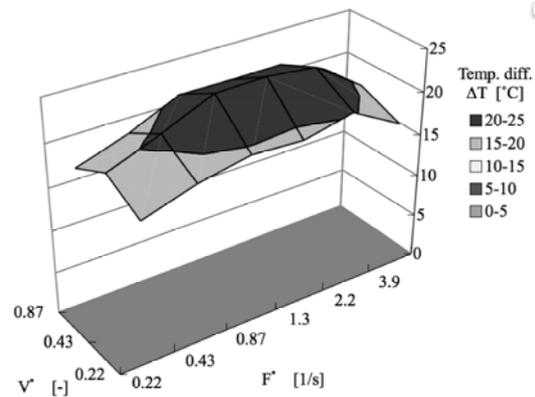


図7 最大温度差が得られる条件

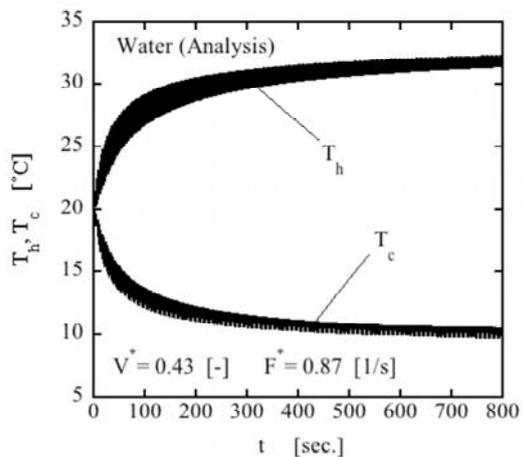


図8 解析による温度変化 (2.0 テスラ)

(3) 数値解析結果：

①連続運転時の温度変化 図 8 に、2.0 テスラの場合における試験部高温側温度 T_h および低温側温度 T_c の解析結果を、横軸に運転時間 t をとり示す。図より、解析値は、図 5 に示す実験値と同様に、時間 t の経過に伴って高温側と低温側の温度差 ΔT が拡大し、定常状態に近づく傾向がわかる。また、実験経過をよく表しており、本解析で構築した解析モデルは磁気冷凍サイクルによる温度推移を定性的に再現できていると考えられる。

②流動条件と最大温度差の関係 図 9 に、熱輸送媒体の標準体積流量 F^* を 1.3 とした条件における、高温端と低温端の熱輸送媒体の温度差 ΔT を、横軸に熱輸送媒体の標準流動体積 V^* をとり実験結果とともに示す。図より、本結果からも、解析値と実験値の双方が V^* に対して最適値を持つことがわかり、 $F^* = 1.3$ の本条件の場合、噴流モデルの導入により、磁気冷凍装置の冷却性能を定性的および定量的に予測できているといえる。

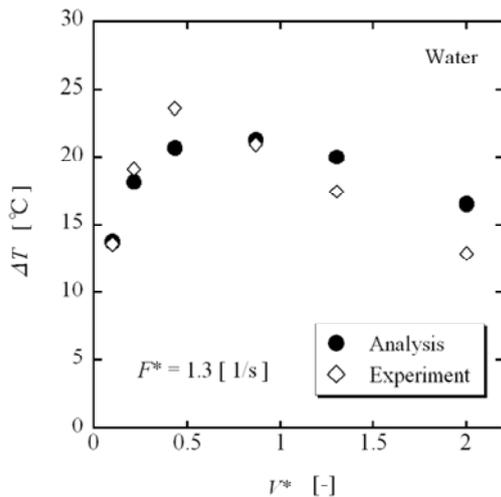


図 9 標準体積と温度差の関係

(4) 流体駆動力に関する考察：

①圧力変動 図 10 に、空気を熱交換媒体とした場合の、運転中における試験部両端の圧力変動と、電磁弁開閉状態を示す。駆動圧力 P_{add} は 200 kPa である。図より、電磁弁の開閉切り替えに対して、空気流動の駆動力となる試験部両端での圧力勾配の発達にはタイムラグが見られることから、流動開始から 1 秒程度では、圧力駆動による熱輸送媒体の流動が十分に行われずに次の流動方向の切り替えに至り、結果として温度差 ΔT が十分に得られないと考えられる。また、運転中の高压側圧力が印加駆動圧力に対して、低下していることから、実験装置の圧力損失によって流動駆動に対する印加圧力のロスがある

ことがわかる。

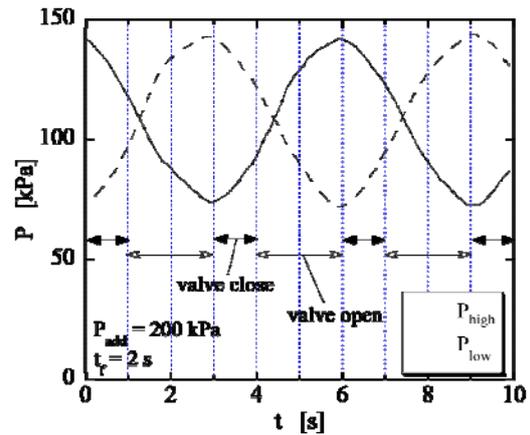


図 10 試験部両端の圧力変動

②圧力の影響の影響 図 11 に、流動時間 1, 2, および 3 秒において、印加圧力 P_{add} を 100kPa, 200kPa, 300kPa, 400kPa に変化させた場合の、高温側および低温側の最大温度差 ΔT を示す。いずれについても、 P_{add} の増加に伴って温度差 ΔT が大きくなることがわかる。これは流動する空気量が増加することで、磁気作業物質とより多くの熱交換が行われているためと考えられる。また高压になるにつれ、圧縮性を有する空気は圧縮され、密度が増加し、熱伝達率が大きくなることで、より効率よく熱交換が行われたと考えられる。

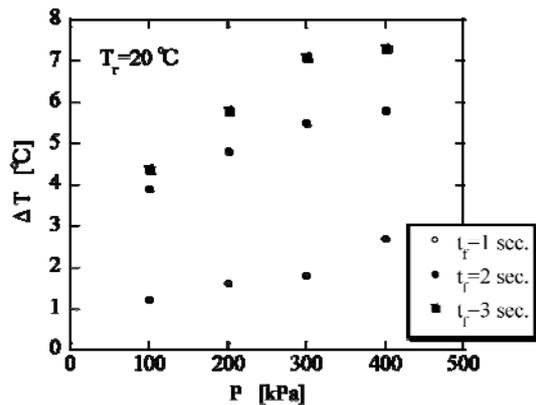


図 11 試験部両端の圧力変動

(5) まとめ

本研究では、室温小型磁気冷凍システムの特性を支配する基礎現象に対して、熱工学的アプローチから検討を加え、システムの構築およびその性能向上を目指すことを提案した。本申請課題は、特に以下に示す点において学術的な特色と今までの研究にはない独

創性を有している。

- ①直接空気冷却を目指した、小型磁気冷凍システムの構築を目指すこと。
- ②磁場を付与する磁気回路として小型高性能永久磁石を用いること。
- ③磁気冷凍システムの冷凍特性を、熱交換技術の開発を含めた熱工学的なアプローチから飛躍的に向上させること。

以上、本研究で得られた成果は、熱工学に関する物理面での基礎的資料の収集だけでなく、永久磁石を用いたエネルギー効率がよく、かつフロンを全く使用しない超小型冷凍システムの構築の可能性を示すものと期待される。このことは、例えば従来冷凍機の適用が困難であった、CPUの冷却システムに本研究で提案した方式によって、ハードディスクユニットサイズの磁気冷凍システムを搭載することにより、飛躍的に冷却性能を向上させた超高速なコンピューターシステムの構築が実現可能であるという重要かつ現実的な意義を有していると思われる。

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2件)

- ① T. Kawanami, S. Hirano, M. Ikegawa, K. Fumoto, Performance Estimation of Regenerative Magnetic Refrigeration with Particle-packed Bed, ASME Journal of Heat Transfer, 査読有, Vol.133, Issue 6, 2011, 060903 (8 pages).
- ② 平野繁樹, 川南剛, 池川昌弘, 麓耕二, 平澤茂樹, 蓄熱再生型磁気冷凍サイクルの特性解析, 日本冷凍空調学会論文集, 査読有, Vol.27, No.1, 2010, pp.39-47.

[学会発表] (計3件)

- ① T. Kawanami, Development and Fundamental Characteristics of Prototype Magnetocaloric Heat Pumps, Materials Research Society Fall Meeting 2010, Boston, U.S.A., 2010.
- ① 宮岡優, 川南剛, 平澤茂樹, Elyas Fauzi Bin Salleh Fauzi, 蓄熱再生型磁気冷凍機の数値解析モデルの検討, 日本機械学会関西支部第85期定時総会講演会, 2010.
- ① 宮岡優, 川南剛, 平野繁樹, 麓耕二, 平澤茂樹, 蓄熱再生型室温磁気冷凍法の最適運転条件に関する考察, 2009年度日本冷凍空調学会年次大会, 2009.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川南 剛 (KAWANAMI TSUYOSHI)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20281793