

平成22年 6月17日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2005～2009

課題番号：17071009

研究課題名（和文） 超流動ヘリウム3の異方的秩序変数とその制御

研究課題名（英文） Control of Anisotropic Order Parameters of Superfluid ^3He

研究代表者

石川 修六 (ISHIKAWA OSAMU)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：90184473

研究成果の概要（和文）：

実験研究では、スピン三重項 p 波超流動の秩序変数を、制限空間という外部環境や不純物という内部環境によって制御して、新奇な渦の創出、新しい超流動相や新奇な相転移現象の提案、さらにエネルギーの新しい損失機構を明らかにした。理論研究では、準古典的グリーン関数法の定式化を行い、超流動ヘリウム3の表面束縛状態が多様な現象の原因であることを指摘した。近接効果として不純物中での奇周波数三重項 s 波のペアの存在を予想した。

研究成果の概要（英文）：

In the experimental study of anisotropic superfluid ^3He , we observed a new vortex in a narrow tube, a new superfluid phase, a new phase transition and a new energy dissipation mechanism in impurities by controlling the order parameters of spin triplet p-wave superfluid ^3He with using a confined space as the external circumstance and impurities as the internal circumstance. In the theoretical study, we established a quasi-classical Green's function method and pointed out that the surface bound state in superfluid ^3He causes many interesting phenomena. And we also expected the possibility of the existence of odd frequency pair in impurities as a proximity effect.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	22,700,000	0	22,700,000
2006年度	10,000,000	0	10,000,000
2007年度	10,400,000	0	10,400,000
2008年度	10,400,000	0	10,400,000
2009年度	9,800,000	0	9,800,000
総計	63,300,000	0	63,300,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：超流動ヘリウム3・異方的超流動・エアロジェル・不純物効果・固有角運動量・量子渦・Keldysh形式準古典的グリーン関数法・アンドレーエフ束縛状態・奇周波数ペア

1. 研究開始当初の背景

(1)実験研究では、制限空間内にある回転する超流動ヘリウム3と不純物として機能するエアロ

ジェル中の超流動ヘリウム3について興味深い事実が得られつつあった。前者ではバルク液体中では不可能な新しい渦構造 (Mermin-

Ho渦) を創出することが出来たことであり、後者ではバルク液体とは異なる秩序変数を持つと考えられる相を観測したことである。この新しい量子渦を実現し、その渦構造、渦のダイナミクスを明らかにすることは世界で初めてとなる研究であった。また、不純物による強い制約により出現が期待される新奇秩序状態や、相図の全貌はまだ確定されていない状況であった。

(2)理論研究では、超流動ヘリウム3の秩序パラメータの集団励起や境界近傍の表面束縛状態の存在についての理論的な取り組み方法が確立しつつあり、具体的な実験結果を説明する準備が整い始めた。この方法は超流動のみならず超伝導系をも対象とするものであることは重要であった。

2. 研究の目的

実験、理論の両面から研究を進め、回転する一様超流動ヘリウム3中の新しい“一次元欠陥”と、エアロジェル中の非一様超流動ヘリウム3での新しい“秩序状態”を実現しこれらの秩序変数を明らかにすることを目的とする。(1)実験研究。回転冷凍機による細い円筒容器内での「回転する制限空間環境」と、不純物という「内部環境」とが制御する超流動秩序変数に着目した研究を行う。制限空間環境により超流動ヘリウム3の秩序変数が制約を受ける結果、秩序変数が支配する速度場が制約を受ける。その結果、回転環境下では、新しい渦構造をもつ量子渦(新しい“一次元欠陥”)が出現すると考えられている。液体外の環境が制御する新しい量子渦を実現し、その渦構造、渦のダイナミクスを明らかにすることが目的である。また、不純物環境による強い制約により出現が期待される新奇秩序相を実現し、不純物環境による相図の全貌や新奇な動的な振る舞い(音波、流れ)を実験で明らかにし、新奇秩序変数を確定することが目的である。

(2)理論研究。境界を有する超伝導、超流動系の動的性質を明らかにする目的で Keldysh 形式の準古典的グリーン関数法の定式化を行い、境界面近傍での凝縮状態の理解を深めること、また、超流動ヘリウム3の不純物効果を考察することが目的である。

3. 研究の方法

(1)実験研究。回転する超流動ヘリウム3中の新しい量子渦に関する実験は東大物性研究所内の回転冷凍機を用いて行う。測定手段は核磁気共鳴(NMR)法である。1本の細い円筒容器(直径が0.1mmと0.2mm)を製作し測定試料セルとする。回転軸と平行になるようにこの試料セルを設置し、外部磁場を回転軸に平行に作用させ、回転下でのcw-NMR法により、容器内の渦構造を調べる。M-H渦の観

測、回転時にバルク液体から侵入する渦の観測、さらに、M-H渦とは異なる渦構造の可能性が指摘されている(図3参照)渦の観測を行う。また、古くから知られている「超流動ヘリウムA相の固有角運動量の問題」の解決を図る(図4参照)。円筒容器とは別のタイプの制限空間である、狭い隙間の平行平板内の超流動ヘリウム3の渦に関する測定を行う。平板に垂直に外部磁場を作用させNMR法で測定する。このセルでは異方的超流動・超伝導状態に特徴的な「半整数量子渦」の観測を試みる。不純物環境下での実験ではエアロジェルを不純物に用い、転移温度や超流動密度、エネルギーギャップの抑制をNMRや音波の測定より調べる。新奇超流動相の同定を行うとともに、超流動相関の相転移現象に着目し相の安定性についても測定を行う。また第4音波のエネルギー損失測定を詳細に行い、提案されている理論考察と比較する。

(2)理論研究。

準古典的グリーン関数法の定式化を行い、境界を持つ超伝導、超流動に適用し、超音波測定実験や第4音波測定実験などの動的振る舞いを明らかにする。また、超伝導研究者らとの交流、議論を行い、異方的超伝導で明らかになりつつある“奇周波数ペア”の効果について調べる。同じ異方的超流動ヘリウム3でも新奇超流動状態としての“奇周波数ペア”超流動の可能性を探る。

4. 研究成果

(1)実験研究。

①回転冷凍機での実験では、0.2mmの直径の円筒容器1本のからなる測定セルで実験を行った。同時に回転冷凍機の回転部の改良を本科研費で行い、毎秒約2回転(12[rad/s])の角速度での安定した回転が可能となり、世界最速での回転実験が出来る実験装置が完成した。図1に示したのは、NMR主信号が回転角速度に対して変化の様子である。信号強度はバルク液体からの渦(循環=2)が侵入する毎に階段状の変化を示している。P=1の

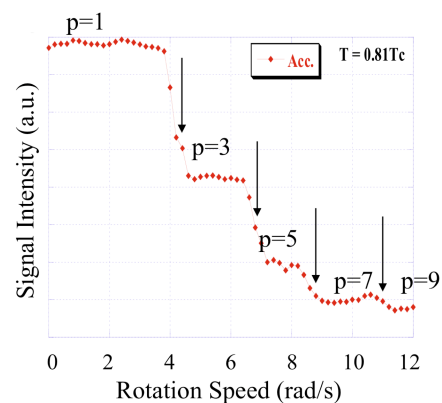


図1. バルク渦の侵入によるNMR主信号変化

ときは M-H 渦 (循環=1) だけであり、 $P=9$ のときは、4つのバルク渦 (循環=2) と M-H 渦が混ざっている。これは A 相での 1~数個の渦の存在を示す世界で初めての測定である。バルク渦が侵入する様子を詳細に測定したものが図 2 である。簡単な計算では渦は侵入が始まるとその先端は検出コイルの中に留まることはなく、図 2 の階段状の中間の状態は存在しない。しかし、現実には渦の侵入開始からコイル全長に渦が侵入するには有限の角速度が必要である。渦が位相変化だけでなく軌道角運動量の空間変化も伴うために、軌道運動の摩擦が関与していると考えられる。臨界角速度に幅が生じるのは異方的超流動ヘリウム 3 の本質的な現象である。

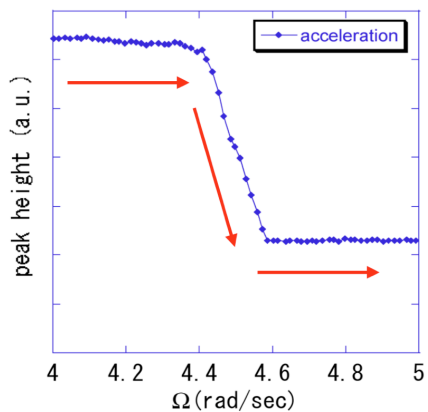
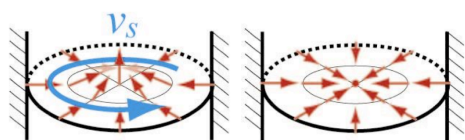


図 2. $p=1$ から $p=3$ へ変化する部分の詳細

細い円筒容器内で互いに近いエネルギーを持つテクスチャー構造は 2 つある (図 3)。M-H 渦と RD (Radial Disgration) 構造である。M-H 渦は非常に安定であり、一度出来ると RD 構造へ転移しないが、最初に RD 構造を生成すると回転による M-H 渦への転移することが理論計算により示された。回転実験により $n=0$ の RD 構造から $n=1$ の M-H 渦への転移を観測した。転移の角速度の温度依存性を図 4 に示す。計算結果から予想された臨界角速度の約半分の角速度で渦構造の転移が観測された。冷却しながら超流動に転移するとき、外部磁場と回転角速度の相対向きを調整すると $n=1$ の RD 構造の渦を作ることが出来る



Mermin-Ho $n=1$ Radial Disgration $n=0$

図 3. 2つのテクスチャー ; M-H 渦と RD 構造
赤矢印は軌道角運動ベクトル。n は循環量子数を表す。

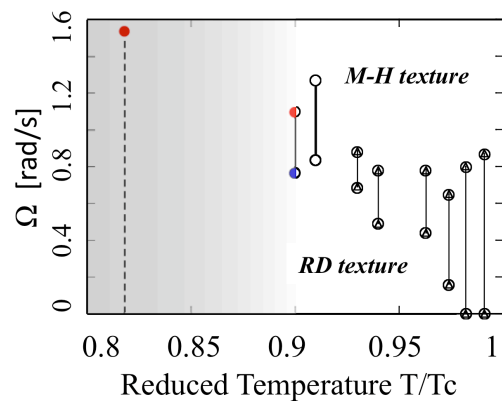


図 4. RD 構造から M-H 渦への転移の角速度の温度変化

ことがわかった。この渦状態から M-H 渦への転移が起こるかどうか調べたがそのようなことは全く起こらなかった。中心に特異点があるにも拘わらず $n=0$ か $n=1$ かに応じて RD 渦は非常に頑固となることがわかった。

平行平板空間での測定では半整数量子渦の観測には至らなかった。A 相での巨視的固有角運動量の問題に関する測定のために新たに試料セルを作製した。回転冷凍装置への設置や実験に向けてのいくつかの準備は全て完了したが、研究期間内に本実験を開始できなかった。図 5 に以前のセルでの測定結果を示す。角速度に対するサテライト信号の NMR 共鳴周波数の振る舞いが右下がりの傾向がある。これが巨視的固有角運動量の存在を示すと考えられている。

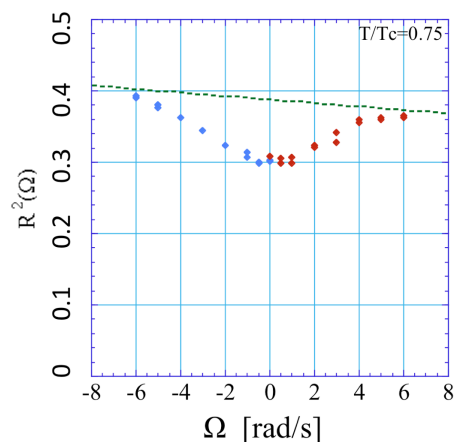


図 5. M-H 渦中心に励起されるスピン波の共鳴周波数の回転角度による変化。

②不純物環境下での実験では、エアロジェル (数 nm の太さのシリカの細い紐が絡み合い、非常に空間占有比が少ない (2~3%) 物質である) を不純物として用いた。紐同士は超流動ヘリウムのコヒーレンス長程度の間隔であり、全く純粋なヘリウム中でランダムに存

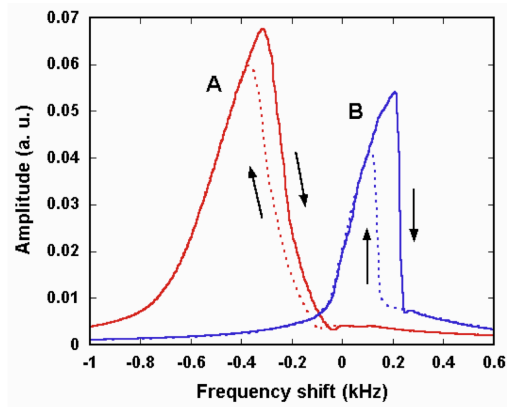


図6. 赤; A-like 相でのコヒーレント運動による NMR 信号。青; B-like 相での HPD による NMR 信号。

在する唯一の不純物として振る舞う。液体の圧力を変えるとコヒーレンス長の変えることが出来るため、1つの種類のアエロジェルで不純物間隔依存性を調べることが可能となる利点がある。超流動 B-like 相の集団励起現象であるスピナー様歳差運動領域 (HPD) のアエロジェル中での観測に成功した。また、アエロジェルにほんの僅かな空間異方向性を加えると超流動 A-like 相の異方軸の方向を制御でき、この性質を利用して A 相で初めてコヒーレントスピナー歳差運動の観測に成功した。図6に空孔率 98.5% のアエロジェル中の2つの相でのコヒーレント信号を示す。

またガラス円筒容器内で直接アエロジェル (空孔率 97.5%) を生成したセルでは、超流動転移温度の大きな抑制を観測し、また約 8 bar 以下の圧力では超流動転移しない (臨界圧力の存在) ことを観測した。さらに2つの超流動相間の相転移時に安定な共存現象を引き起こすこと、ある温度範囲内では相の存在比が変化しないことを観測した。前者は低圧力でコヒーレンス長が長くなり不純物散乱による対破壊が起こることが原因である。後者はバルク液体では観測されない現象であり、相境界の運動がアエロジェルに邪魔されるためであると考えられる。磁気共鳴イメージ法を応用し、2つの超流動相が容器内の中央部分と縁部分に大局的に相分離して共存することを世界で初めて観測した。冷却時は最初、全体が A-like 相となり、冷却とともにガラス容器の中央部に B-like 相が出現し、相転移が進行するにつれて、ガラス容器の壁側の A-like 相が縮小していく。全部が B-like 相から昇温すると最初にガラス容器の壁側に A-like 相が出現し、中央部の B-like 相が縮小していく様子が観測された。アエロジェルがない場合でも相転移がこの様に進行していると思われるが、通常は相転移が短時間の間に進むため観測されない。アエロジェル

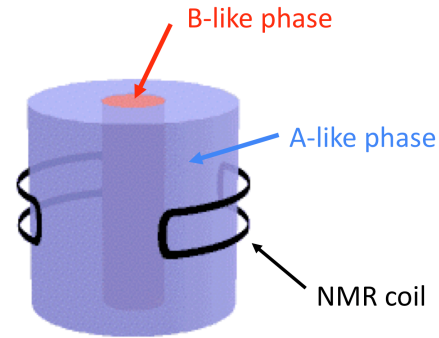


図7. アエロジェル中の共存状態 (イメージ図)。赤; B-like 相。青; A-like 相。

が相境界の運動に強い制限を加えるために初めて観測できたと考えられる。冷却時、昇温時とも共存状態は図7のようになっている。

焼結銀中にアエロジェルを生成した試料セルで第4音波減衰の新しい機構を発見した。通常の音波では粘性によるエネルギー散逸が起こり、音波信号は微弱となることがしばしばである。しかしアエロジェル中では比較的強度の強い信号が観測されており、エネルギー減散機構の理解は十分ではなかった。不純物による準粒子散乱が通常の粘性を実効的に小さくし、速度分布がハーゲン-ポワズイユ型からドゥルーゼ型へ大きく変化する。その結果、不純物と常流動成分との摩擦が音波減衰の主機構になることがわかった。これは理論班との共同研究による結果である。図8に実験で得られた摩擦緩和時間と理論計算結果を示す。また、超流動成分が抑制されるために絶対零度でも常流動成分として振る舞うものの正体は、エネルギーギャップの中に出現した準粒子束縛状態であることがわかった。

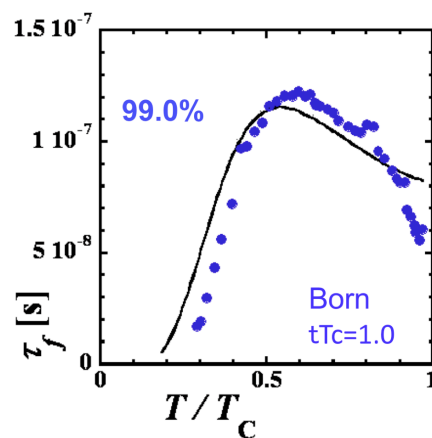


図8. アエロジェル (空孔率 99%) 中の常流動成分に対する摩擦の緩和時間。実線; 理論計算結果。丸印; 第4音波法で得られた緩和時間。

(2)理論研究

当初はエアロジェル中の超流動ヘリウム3の秩序パラメータの集団励起とその超音波吸収への寄与について調べ、実験とよく一致する結果を得ることに成功したところだった。次に境界を有する超伝導、超流動系の動的性質を明らかにする目的でKeldysh形式の準古典的グリーン関数法の定式化を行った。具体例として超流動ヘリウム3のB相の音響インピーダンスの計算を行い、境界近傍の表面束縛状態の存在が音響インピーダンスの温度依存性を支配していることを明らかにした。図9に東工大グループの超音波測定結果と理論計算で得られた音響インピーダンスの温度変化を示す。また、p波超伝導体であるSr₂RuO₄を対象に電子ラマン散乱のスペクトルを計算し、秩序パラメータの集団運動が観測可能であることを示し、さらに不純物効果について考察した。

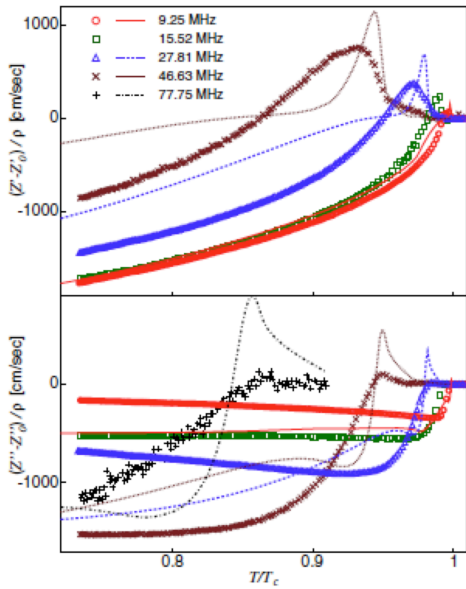


図9. B相の表面束縛状態の存在を示した超音波測定結果(シンボル)と理論計算(曲線)

超流動ヘリウム3のB相での横波音響インピーダンスの理論計算を進展させ、振動子表面を超流動ヘリウム4の薄膜で覆うことで表面の境界条件で鏡面反射が増加した場合を考察した。ヘリウム3準粒子に対する境界条件を変えると表面束縛状態の状態密度が変化し、横波音響インピーダンスに明確に反映されていることを明らかにした。この結果は、最近の東工大グループの超音波を用いた実験結果と一致している。さらに計算を進めて、対励起に加え、熱励起されている準粒子の散乱による異常が現れることを予言した。これは東工大グループの実験で見事に確認された。

さらにこの定式化した方法を進展させて、超伝導と正常金属の接合部やエアロジェルがバルク液体に接する超流動界面部について考察した。特に近接効果に着目した。クーパ対への遅延ポテンシャル効果を調べ、“奇周波数ペアリング”を詳細に扱う計算を行った。特にエアロジェル中の液体ヘリウム3と

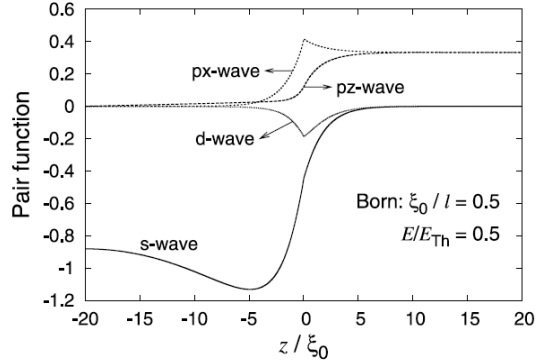


図10. エアロジェル中に浸みだした奇周波数s波三重項ペア関数。zが負の領域に不純物がある。正の領域はバルク超流動状態。

純粋な超流動ヘリウム3の間の近接効果を調べ、秩序パラメータの奇周波数成分の振舞を明らかにした。p波三重項状態であるバルク液体から、エアロジェル中へp波三重項状態が浸み出すことはほとんどないが、s波三重項状態のペア振幅が大きな浸みだしとなることがわかった。図10に奇周波数ペア関数の浸みだしの計算結果を示す。この結果はあたかも奇周波数s波超流動のように振舞うことを予言している。ここに表面束縛状態が形成されると帯磁率の増大という変化が引き起こされると予想した。さらに超流動ヘリウム3-B相のアンドレーエフ束縛状態が磁場の方向に依存した特異な磁気応答を示すことを示した。超流動ヘリウム3-B相薄膜の帯磁率は表面束縛状態の存在によって極めて異方的になり、薄膜に垂直方向の帯磁率が大幅に増強されることを明らかにした。

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40件)

- ① R. Ishiguro, M. Kubota (4番目), O. Ishikawa (5番目), 他3名, *Growth of a Single Vortex lin of ³He-A in a Narrow Cylinder under Rotation*, 【査読有】 *J. Phys.: Conf. Ser.* **150**, 032033(1-4) (2009).
- ② Y. Nagato, K. Nagai (3番目), 他1名, *Strong Anisotropy in Spin Suceptibility of Superfluid ³He-B Film Caused by Surface Bound States*, 【査読有】 *J. Phys. Soc. Jpn.* **78**, 123603(1-4) (2009).

- ③ S. Higashitani, Y. Nagato and K. Nagai, *Proximity Effect between a Dirty Fermi Liquid and Superfluid ^3He* , 【査読有】 J. Low Temp. Phys. **155**, 83–97 (2009).
- ④ R. Kado, K. Obara (3 番目), O. Ishikawa (5 番目), 他 3 名, *A-B phase conversion and coexistence of superfluid ^3He in aerogel*, 【査読有】 J. Low Temp. Phys. **150**, 472–475 (2008).
- ⑤ M. Yamashita, O. Ishikawa (5 番目), M. Kubota (7 番目), 他 5 名, *Spin Wave and Vortex Excitations of Superfluid ^3He -A in Parallel-Plate Geometry*, 【査読有】 Phys. Rev. Lett. **101**, 025302(1-4) (2008).

〔学会発表〕 (計 101 件)

- ① 東谷誠二 (代表), “超流動ヘリウム 3 におけるアンドレーエフ束縛状態の理論”, 日本物理学会第 65 会年次大会 (シンポジウム講演), 2010 年 3 月 20 日～23 日
- ② 石黒亮輔 (代表), “回転下の ^3He -A ～一本の量子渦のダイナミクス～”, 日本物理学会 2009 年秋季大会 (シンポジウム講演), 2009 年 9 月 25～28 日, 熊本大学
- ③ O. Ishikawa, “Pulsed NMR Measurements in Superfluid ^3He in Aerogel of 97.5% Porosity”, the 24th International Conference on Low Temperature Physics (invited talk), Aug. 10-17, 2005, Orland Florida, USA
- ④ R.Kado, “In Globally Isotropic Aerogel, A-B Phase Separation of Superfluid ^3He in Radial Direction”, the 25th International Conference on Low Temperature Physics, Aug. 6-13, 2008, RAI convention centre, Amsterdam, Netherlands

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 修六 (ISHIKAWA OSAMU)
 大阪市立大学・大学院理学研究科・教授
 (H21 年度より教授)
 研究者番号：9 0 1 8 4 4 7 3

(2) 研究分担者

久保田 実 (KUBOTA MINORU)
 東京大学・物性研究所・准教授
 研究者番号：6 0 1 9 2 3 0 5
 (H20～H21：連携研究者)

永井 克彦 (NAGAI KATSUHIKO)
 広島大学・大学院総合科学研究科・名誉教授
 (H20 年度より名誉教授)
 研究者番号：9 0 0 3 4 7 4 3

(3) 連携研究者
 なし