

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05195

研究課題名（和文）楕円量子群のGelfand-Tsetlin基底と幾何学的表現

研究課題名（英文）Gelfand-Tsetlin basis and geometric representations of elliptic quantum groups

研究代表者

今野 均（Konno, Hitoshi）

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：00291477

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：楕円量子群 $U_{\{q,p\}}(\mathfrak{sl}_N)$ の繋絡頂点作用素を用いて重み関数を導出し、それが Okounkovらが定式化した一般旗多様体の余接束 X に対する同変楕円コホモロジー $\text{Ell}_T(X)$ 上の楕円安定包絡射 (stable envelop) と同一視できることを示した。また、楕円安定包絡射が定める $\text{Ell}_T(X)$ 上の安定包絡類を用いて固定点類を定め、上の同一視の下で、 $U_{\{q,p\}}(\mathfrak{sl}_N)$ の Gelfand-Tsetlin 基底上の有限次元表現が $\text{Ell}_T(X)$ 上の固定点類上の幾何学的表現に持ち上げられることを明らかにした。楕円量子トロイダル代数への拡張とその表現の幾何学的解釈の予想も得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Ginzburg-Vasserot や Nakajima らによって、アフィンリー環やトロイダル代数あるいはそれらの量子変形代数の表現が、対応する旗多様体 X に対する同変コホモロジーあるいは同変 K -理論上に幾何学的に構成されたことを受けて、これらの楕円コホモロジー上への拡張の存在が予想されていた。本研究ではこの予想を裏付ける例を具体的に構成した。最近、楕円量子群の（幾何学的）表現と3次元の超対称ゲージ理論における鏡対称性やもっと一般に錐的特異多様体のシンプレクティック双対性との関連が指摘されており、本研究の結果を足掛かりとして、今後この方向の研究が加速されると期待される。

研究成果の概要（英文）：Elliptic weight functions have been derived by using the vertex operators of the elliptic quantum group $U_{\{q,p\}}(\mathfrak{sl}_N)$, and identified with Okounkov's elliptic stable envelopes on the equivariant elliptic cohomology $\text{Ell}_T(X)$ for the cotangent bundle X of the partial flag variety. Defining the fixed point classes on $\text{Ell}_T(X)$ in terms of the stable classes and basing on this identification, we have shown that the finite dimensional representation of $U_{\{q,p\}}(\mathfrak{sl}_N)$ on the Gelfand-Tsetlin basis can be lifted to the geometric representation on the fixed point classes. Furthermore a formulation of the elliptic quantum toroidal algebras and a construction of their representations have been done. A conjecture on their geometric interpretation has also been obtained.

研究分野：数理物理学，表現論

キーワード：楕円量子群 楕円コホモロジー weight function stable envelope Gelfand-Tsetlin基底 楕円超幾何積分 楕円q-KZ方程式 幾何学的表現

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

楕円量子群とは、ヤン・バクスター方程式の楕円関数解（楕円 R 行列という）を構造関数とする関係式によって定まる無限次元の双代数である。特に、申請者らが導入した楕円量子群 $U_{q,p}(\mathfrak{g})$ (\mathfrak{g} : アフィン リー環) は, Drinfeld 型生成子によって定式化されるホップ亜代数であり, \mathfrak{g} のループ代数による実現の自然な量子・楕円変形になっている。これまでの研究により, 有限次元, 無限次元の表現や $U_{q,p}(\widehat{\mathfrak{g}})$ -加群の繋絡作用素 (頂点作用素) の構成, 変形 W 代数との関係の解明, 楕円関数型可解格子模型の代数解析的定式化や, 楕円超幾何級数 ${}_{12}V_{11}$ の表現論的導出, 楕円量子行列式の定式化などを行ってきた。

量子群の幾何学的表現は, 中島 [1] の仕事に代表されるように, アフィン量子群 $U_q(\mathfrak{g})$ の有限次元表現が旗多様体の同変 K -理論上に実現され, 従来の表現論では手に負えない問題を解明する手法として多くの研究者の注目を集めている。例えば, 物理学における超対称ゲージ理論のインスタントン配位のモジュライ空間は $A_{N-1}^{(1)}$ 型の旗多様体の同変コホモロジーと同一視できるが, それと共形場理論との対応を主張する Alday-Gaiotto-Tachikawa (AGT) 対応は, 同変コホモロジーへのヴィラソロ代数やアフィン リー環の作用の存在という形で幾何学的表現論の問題として定式化され, 数理物理学における研究の一つの潮流を成している。

幾何学的表現論においては, Grojnowski[2] や Ginzburg ら [3] により早くから楕円関数的な量子代数 (楕円量子代数) の同変楕円コホモロジー上の構成が予想されていたが, 厳密に定式化がなされるまでには至っていなかった。最近になり, AGT 対応の拡張として 5次元や 6次元の超対称ゲージ理論のインスタントン配位と量子可積分系の対応の研究が活発化し, Okounkov らによる stable envelop を用いた量子代数 (有理関数型 $Y(\mathfrak{g})$ (ヤンギャン) や三角関数型 $U_q(\mathfrak{g})$) の幾何学的構成 [4], さらに同変楕円コホモロジーにおける楕円 stable envelop の定式化や楕円 R 行列の幾何学的導出 [5] が行われ, 楕円量子代数の幾何学的構成を目指す研究の機運が高まっている。

2. 研究の目的

本研究では, 代数的に定式化された楕円量子群 $U_{q,p}(\mathfrak{g})$ から出発してその有限次元表現の同変楕円コホモロジー上の幾何学的表現を構成することを目指す。鍵となるのは, Tarasov, Varchenko らによる先行研究 [6] である。彼らは, q -KZ 方程式の積分表示解に現れる重み関数と stable envelop とが同一視できることを見出し, この対応を用いて有理関数型と三角関数型の量子代数の場合に, Gelfand-Tsetlin 基底上の既知の表現を同変コホモロジーや同変 K -理論上の幾何学的表現に持ち上げることに成功した。本研究では, このアプローチの楕円関数型の場合への拡張に取り組む。そのために楕円関数型の重み関数の導出や Gelfand-Tsetlin 基底の定式化及びその上の有限次元表現の構成を行い, それが楕円 stable envelop によって同変楕円コホモロジー上の幾何学的表現に持ち上げられることを明らかにする。さらに, Jordan 旗多様体や $A_{N-1}^{(1)}$ 型旗多様体に対応する楕円量子代数として, 楕円量子トロイダル代数の定式化とその表現を構成し, それらの幾何学的理解を試みる。

3. 研究の方法

(i) 楕円 q -KZ 方程式の積分表示解と重み関数の導出

$U_{q,p}(\widehat{\mathfrak{sl}}_N)$ の繋絡頂点作用素を用いて楕円 q -KZ 方程式の積分表示解を構成し、重み関数を導出する。これにより、 $U_{q,p}(\widehat{\mathfrak{sl}}_N)$ の有限次元表現のテンソル積に現れる諸量と一般旗多様体の余接束の諸量との対応関係を明らかにし、表現論で得られる結果の幾何学的解釈を進める。楕円 stable envelop が満たすべき楕円 R 行列による変換性やトーラス作用に関する固定点での表示式との比較により、重み関数と楕円 stable envelop の同一視を確立する。

(ii) $U_{q,p}(\widehat{\mathfrak{sl}}_N)$ の Gelfand-Tsetlin 基底とその上の有限次元表現の構成

楕円 R 行列を用いて、 $U_{q,p}(\widehat{\mathfrak{sl}}_N)$ の有限次元表現のテンソル積空間上に対称群の作用を構成し、それを用いて同空間上に Gelfand-Tsetlin 基底を構成する。その上への L -作用素の作用を構成し、 $U_{q,p}(\widehat{\mathfrak{sl}}_N)$ のハーフカレントや楕円カレント (Drinfeld 生成元の母関数) の作用を導出する。

(iii) $U_{q,p}(\widehat{\mathfrak{sl}}_N)$ の幾何学的表現の構成

(i), (ii) の結果に基づいて、 $U_{q,p}(\widehat{\mathfrak{sl}}_N)$ の Gelfand-Tsetlin 基底上の有限次元表現を、一般旗多様体の余接束に対する同変楕円コホモロジー上の幾何学的表現へと持ち上げる。

(iv) 楕円量子トロイダル代数 $U_{q_1, q_2, p}(\mathfrak{g}_{tor})$ の定式化と q -Fock 表現

$\mathfrak{g} = \mathfrak{gl}_1$ と \mathfrak{gl}_N の場合に楕円量子トロイダル代数 $U_{q_1, q_2, p}(\mathfrak{g}_{tor})$ を定式化し、ベクトル表現の半無限テンソル積を帰納的に定めて、所謂 q -Fock 表現を構成する。また、得られた q -Fock 表現の Jordan 簾多様体 (ヒルベルト概形) や $A_{N-1}^{(1)}$ 型簾多様体に対する同変楕円コホモロジー上の表現としての理解を試みる。

4. 研究成果

(1) 楕円 q -KZ 方程式の積分表示解と重み関数の導出

楕円量子群 $U_{q,p}(\widehat{\mathfrak{sl}}_N)$ の表現を用いて、楕円 q -KZ 方程式の楕円超幾何積分解を導出した。特に被積分関数の一部として現れる楕円重み関数の明示式を得、 R 行列による変換性や直交性、擬周期性などの性質や組合せ論的構造の一般旗多様体との関係を示した。

(2) $U_{q,p}(\widehat{\mathfrak{sl}}_N)$ の Gelfand-Tsetlin 基底とその上の有限次元表現の構成

$U_{q,p}(\widehat{\mathfrak{sl}}_N)$ のベクトル表現のテンソル積上に Gelfand-Tsetlin 基底を構成し、その上に有限次元最高ウェイト既約表現を構成した。この表現は、一般旗多様体の余接束のトーラス作用に関する固定点の情報を用いて純粋に組合せ論的に記述され、その構造は、Ginzburg-Vasserot や中島による量子アフィン代数 $U_q(\widehat{\mathfrak{sl}}_N)$ の同変 K 理論上の幾何学的表現の自然な楕円関数的拡張になっている。また、楕円重み関数のある種の特特殊化は、テンソル積空間の標準基底から Gelfand-Tsetlin 基底への変換行列を与えることを示した。

(3) 楕円重み関数と楕円 stable envelop の同一視

Aganagic-Okounkov[5] によって, 一般に旗多様体のトーラス同変楕円コホモロジーに対して楕円 stable envelope という Schubert 基底のある種の拡張の存在が示されている. アーベル化の方法を用いて, 一般旗多様体の余接束の場合の楕円 stable envelope を具体的に構成することにより, 上述の楕円重み関数はこの楕円 stable envelope に一致することを示した. また, (2) での楕円重み関数の特殊化は, 同変楕円コホモロジー上の固定点への制限を与えることを示した.

(4) **同変楕円コホモロジー上の $U_{q,p}(\widehat{\mathfrak{sl}}_N)$ の表現の構成**

(3) で構成した楕円 stable envelope は, 一般旗多様体の余接束に対する同変楕円コホモロジー上に楕円 stable 類を定める. (3) での同一視と楕円 stable envelope の定義に基づいて, この同変楕円コホモロジー上に楕円 stable 類から固定点類を定めた. これにより, $U_{q,p}(\widehat{\mathfrak{sl}}_N)$ のベクトル表現のテンソル積空間上の Gelfand-Tsetlin 基底と標準基底はそれぞれ, 同変楕円コホモロジー上の固定点類と stable 類に対応することを明らかにした. また, (2) で得た Gelfand-Tsetlin 基底上の有限次元最高ウェイト既約表現は同変楕円コホモロジー上の固定点類への作用という形で幾何学的表現にそのまま持ち上がることが示された.

(5) **楕円量子トロイダル代数 $U_{q_1, q_2, p}(\mathfrak{g}_{tor})$ の定式化と q -Fock 表現**

量子トロイダル代数の楕円関数的かつダイナミカルな変形として, 楕円量子トロイダル代数 $U_{q_1, q_2, p}(\mathfrak{g}_{tor})$ を定式化した. これは, Drinfeld 型生成元による定式化であり, Drinfeld 余積による Hopf 亜代数構造を備え, 上述の楕円量子群 $U_{q,p}(\mathfrak{g})$ (\mathfrak{g} はアフィン リー代数) の \mathfrak{g} がトロイダル リー代数の場合への拡張になっている. $\mathfrak{g} = \mathfrak{gl}_1$ 型と \mathfrak{gl}_N 型の場合に, ベクトル表現を構成し, これを Drinfeld 余積によってテンソル積表現に持ち上げ, さらに帰納的に半無限テンソル積を定めることにより, q -Fock 表現を得た. 得られた楕円カレントの作用が, $U_{q_1, q_2, p}(\mathfrak{g}_{tor})$ の定義関係式を満たすことも直接示される.

(6) **q -Fock 表現の幾何学的解釈の予想**

(2) で得た楕円量子群 $U_{q,p}(\widehat{\mathfrak{sl}}_N)$ の標準余積に基づく Gelfand-Tsetlin 基底上の有限次元テンソル積表現は, Drinfeld 余積に基づく標準基底上のテンソル積表現と同型になることを見出し, Okounkov らの楕円 stable envelope は, 少なくとも有限次元表現のレベルで, $U_{q,p}(\widehat{\mathfrak{sl}}_N)$ の標準余積から Drinfeld 余積への準 Hopf 変形のツイスターと同一視できることを示した. この結果と (2)-(4) で得た $U_{q,p}(\widehat{\mathfrak{sl}}_N)$ の Gelfand-Tsetlin 基底上の有限次元表現と一般旗多様体の余接束に対する同変楕円コホモロジー上の幾何学的表現との対応や, 三角関数型への退化極限と同変 K-理論上の幾何学的表現 [7, 8, 9] との対応を総合して, (5) で得た q -Fock 表現は, トロイダル \mathfrak{gl}_1 や \mathfrak{gl}_N 代数に対応する Jordan 旗多様体 (ヒルベルト概形) や $A_{N-1}^{(1)}$ 型旗多様体に対する同変楕円コホモロジー上の固定点類への作用に対応する幾何学的表現を与えるという予想を得た.

(7) **$U_{q_1, q_2, p}(\mathfrak{gl}_{1, tor})$ の繫絡頂点作用素の構成**

(5) で定式化した楕円量子トロイダル代数 $U_{q_1, q_2, p}(\mathfrak{gl}_{1, tor})$ に対して, レベル $(1, N)$ 表現を構成し, その q -Fock 表現とのテンソル積表現の Drinfeld 余積に関する繫絡作用素として, 頂点作用素を導出した. また, その作用素積展開係数として通常の Nekrasov 関数の p -無限積が得られることを観察した.

- (8) $U_{q_1, q_2, p}(\mathfrak{gl}_{1, tor})$ の表現に基づく Jordan 籠多様体型変形 W 代数の構成の試み
 代表者の先行研究として, 楕円量子群 $U_{q, p}(\mathfrak{g})$ (\mathfrak{g} : アフィンリー環) のレベル 1 表現とベクトル表現とのテンソル積表現上の繋絡頂点作用素の合成積として変形 W 代数 $W_{p, p^*}(\bar{\mathfrak{g}})$ ($\bar{\mathfrak{g}}$: \mathfrak{g} に対応する有限次元単純リー環, $p^* = pq^{-2}$) の生成母関数が得られること, 及び, $U_{q, p}(\mathfrak{g})$ の楕円カレントたちは $W_{p, p^*}(\bar{\mathfrak{g}})$ の遮蔽作用素を与えることが分かっている. 上で求めた $U_{q_1, q_2, p}(\mathfrak{gl}_{1, tor})$ の繋絡頂点作用素に対して同様の合成積を作ることにより, \mathfrak{gl}_1 トロイダル代数型の変形 W 代数の生成母関数を得た. 結果は複素 2 次元平面上のヒルベルトスキームに対するヒルツェブルフの χ_y -種数 ($y = 1/p^*$) の p -無限積を係数とするある作用素の分割 λ に渡る和となる. これを木村-Pestun[10] が提案する Jordan 籠多様体型の変形 W 代数と比較すると, 遮蔽作用素も含めて作用素の部分は, p, p^* と q, t 間の双対変換の下で, 完全に一致するが, 係数の部分のみが一致しないことを観察した. 木村-Pestun では係数としてはヒルツェブルフの χ_y -種数そのものが現れる. また, p, p^*, q, t は Nekrasov[11] が提唱する $SU(4)$ Ω -変形パラメータと同一視できることを観察した. 我々の代数的な枠組みでは, p -無限積が現れるのは自然であるので, 変形 W 代数の生成母関数と遮蔽作用素の可換性まで立ち返って整合性を調べる必要がある.

参考文献

- [1] H. Nakajima, “Quiver Varieties and Finite Dimensional Representations of Quantum Affine Algebras”, *J.AMS* **14** (2000) 145-238.
- [2] I. Grojnowski, Delocalised Equivariant Elliptic Cohomology, In *Elliptic Cohomology*, vol. **342** of *London Math. Soc. Lecture Note Ser.* (2007) 114–121.
- [3] V. Ginzburg, M. Kapranov and E. Vasserot, “Elliptic Algebras and Equivariant Elliptic Cohomology I”, arXiv:q-alg/9505012, (1995).
- [4] D. Maulik and A. Okounkov, “Quantum Groups and Quantum Cohomology”, arXiv:1211.1287, (2012).
- [5] M. Aganagic and A. Okounkov, “Elliptic Stable Envelopes”, arXiv:1604.00423, 2016.
- [6] V. Gorbounov, R. Rimányi, V. Tarasov and A. Varchenko, “Quantum Cohomology of the Cotangent Bundle of a Flag Variety as a Yangian Bethe Algebra”, *J. Geom. Phys.* **74** (2013) 56-86; R. Rimányi, V. Tarasov and A. Varchenko, “Trigonometric Weight Functions as K-theoretic Stable Envelope Maps for the Cotangent Bundle of a Flag Variety”. *J. Geom. Phys.* **94** (2015), 81-119.
- [7] B. Feigin and A. Tsymbaliuk, Heisenberg Action in the Equivariant K-theory of Hilbert Scheme via Shuffle Algebra, arXiv:0904.1679, (2009).
- [8] M. Varagnolo and E. Vasserot, On the K-Theory of the Cyclic Quiver Variety, *Int. Math. Res. Notices* **18** (1999) 1005–1028.
- [9] K. Nagao, K-Theory of Quiver Varieties, q -Fock Space and Nonsymmetric Macdonald Polynomials, *Osaka J. Math.* **46** (2009) 877-907.
- [10] T. Kimura and V. Pestun, Quiver W -algebras, arXiv:1608.04651 (2016).
- [11] N. Nekrasov, BPS/CFT Correspondence: Non-perturbative Dyson-Schwinger Equations and qq -characters, *JHEP* **1603** (2016) 181.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Hitoshi Konno	4. 巻 3
2. 論文標題 Elliptic Stable Envelopes and Finite-dimensional Representations of Elliptic Quantum Group	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Integrable Systems	6. 最初と最後の頁 1-43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/integr/xyy012	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 Hitoshi Konno	4. 巻 2
2. 論文標題 Elliptic weight functions and elliptic q-KZ equation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Integrable Systems	6. 最初と最後の頁 1-43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/integr/xyx011	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 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Hitoshi Konno
2. 発表標題 Elliptic Quantum Groups, Representations and Geometry
3. 学会等名 Elliptic Cohomology Days, Univ. of Illinois, Urbana-Champaign, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Konno
2. 発表標題 Elliptic Quantum (Toroidal) Algebras and Their Representations
3. 学会等名 Elliptic Integrable Systems, NORDITA, Stockholm (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Konno
2. 発表標題 Elliptic Quantum Groups and Deformed W-algebras
3. 学会等名 Representation Theory and Integrable Systems, ETH, Zurich (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Konno
2. 発表標題 楯田量子群の表現と関連する幾何学
3. 学会等名 東京大学数理科学研究科集中講義 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Konno
2. 発表標題 E, E & E
3. 学会等名 q, q & q, 神戸大学数学教室 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hitoshi Konno
2. 発表標題 Elliptic stable envelopes and finite-dimensional representation of elliptic quantum group of type gl_N
3. 学会等名 Quantum Integrability and Quantum Schubert Calculus, The Royal Society at Chicheley Hall, UK (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Konno
2. 発表標題 Elliptic stable envelopes and finite-dimensional representation of elliptic quantum group
3. 学会等名 Symmetry and Integrability of Difference Equations, Fukuoka, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Konno
2. 発表標題 Elliptic Quantum Group and Elliptic Stable Envelopes
3. 学会等名 京都表現論セミナー, 京都大学 理学部 数学教室 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Konno
2. 発表標題 Representations of the Elliptic Quantum Group and Related Geometry
3. 学会等名 Mathematical Physics Seminar, Perimeter Institute for Theoretical Physics, Waterloo, Canada (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Konno
2. 発表標題 Elliptic Quantum Toroidal Algebras
3. 学会等名 表現論と特殊函数セミナー2019沖縄, 琉球大学 理学部 数学教室 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Konno
2. 発表標題 Elliptic Weight Functions and Finite Dimensional Representations of the Elliptic Quantum Group
3. 学会等名 Topological Field Theories, String Theory and Matrix Models, ITEP, Moscow (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Konno
2. 発表標題 Elliptic weight functions and finite-dimensional representation of elliptic quantum group
3. 学会等名 Geometric R-Matrices: From Geometry to Probability, Univ.of Melbourne, Australia (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今野 均
2. 発表標題 楕円量子群と楕円重み関数
3. 学会等名 日本数学会秋季総合分科会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今野 均
2. 発表標題 楕円量子群の Gelfand-Tsetlin 基底上の有限次元表現
3. 学会等名 日本数学会秋季総合分科会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 H.Konno, H.Sakai, J.Shiraishi, T.Suzuki and Y.Yamada	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Mathematical Society of Japan	5. 総ページ数 541
3. 書名 Advanced Studies in Pure Mathematics 76, Representation Theory, Special Functions and Painleve Equations - RIMS 2015	

1. 著者名 Hitoshi Konno	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 in press
3. 書名 Elliptic Quantum Groups -Representations and Related Geometry-	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
連携研究者	神保 道夫 (Michio Jimbo) (80109082)	立教大学・理学部・教授 (32686)	
連携研究者	野海 正俊 (Masatoshi Noumi) (80164672)	神戸大学・理学研究科・教授 (14501)	
連携研究者	伊藤 雅彦 (Masahiko Ito) (30348461)	東京電機大学 ・未来科学部・教授 (32657)	現在, 琉球大学 理学部 教授

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	大島 和幸 (Kazuyuki Oshima) (30547980)	愛知工業大学・工学部・准教授 (33903)	
連携研究者	茂木 康平 (Kohei Motegi) (30583033)	東京海洋大学・学術研究院・助教 (12614)	現職は准教授