

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04008

研究課題名（和文）星間ガス質量の高精度な導出とそれを用いた銀河の大局的星生成過程の定量的理解

研究課題名（英文）Study of star formation in galaxies based on precise measurement of mass of interstellar gas

研究代表者

俎徠 和夫（Sorai, Kazuo）

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：80344464

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）：本研究は、銀河内部において恒星の材料となる星間ガスの質量を空間分解した上で正確に測定し、星生成率、ガス質量、星質量の間の関係を定量化することを目的とした。複数の銀河の観測データを用いて調べた結果、ミリ波の一酸化炭素分子のスペクトル線強度から水素分子の量を推定する変換係数が銀河内部の領域によって異なること、その結果、星の生まれやすさの指標となる星生成効率が、従来知られていたよりも分散が小さくなることが明らかになった。また、分子ガスのうち、分子雲を取り巻く希薄な成分は星生成には直接寄与せず、分子ガス全体に対する分子雲成分の割合が星生成効率を規定している可能性があることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の最大の学術的意義は、銀河におけるガスの質量をより精度よく測定することで、これまで知られていた銀河の諸量の相関関係の分散を小さくすることができ、背景にある本質的な過程により迫ることができた点にある。その結果はガスから星が生成される過程は銀河の内部で大局的には大きく異なることを示す一方で、ガスが希薄な状態から分子雲と呼ばれるような重力的に束縛された状態になる過程が、相関関係の分散を作り出していることを示した。これらの結果は、銀河がガス雲から進化して現在の宇宙に見られる銀河に進化していく過程を明らかにする上で、重要な制限を与えていると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to measure precise interstellar gas mass which is ingredient of stars in galaxies at various positions and to quantify a relation among star formation rate, gas mass, and stellar mass. Observational data for several galaxies made clear that the conversion factor, through which the amount of molecular hydrogens is estimated from intensity of a carbon monoxide spectral line in millimeter wavelength, varies within a galaxy. Applying the derived conversion factors to each galaxy position, star formation efficiency, an index how easy stars form, within a galaxy shows smaller dispersion than previously estimated. Moreover, diffuse molecular gas component surrounding molecular clouds are found not to be directly contribute to star formation. This indicates that the fraction of molecular cloud component to the whole molecular gas is possible to control star formation efficiency.

研究分野：銀河天文学

キーワード：銀河 星間ガス 星生成

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙の基本構成要素である銀河において、ガスから恒星が生成される過程を詳細に明らかにすることは、銀河の進化ひいては宇宙の進化を解き明かす上で重要である。銀河は多数の恒星と星間物質、そして暗黒物質から構成される天体で、その内部で星間ガスから恒星を生成しながら進化してきた。これまでの研究から、銀河の星生成効率(単位時間あたりに生成される恒星の総質量)は銀河の恒星質量(銀河を構成する恒星の総質量)の冪乗で変化することが明らかになっている。しかし、「星生成の主系列」と呼ばれるこの関係には散らばりがあり、その散らばりの要因が星生成効率(単位ガス質量あたりの星生成率)に依るのか、ガス分率(恒星質量に対するガス質量の比)に依るのか、断定的な理解は得られていない。明確な解答を得るためには、星生成効率とガス分率を正確に推測することが必要であり、そのためには、恒星の材料となる分子ガスの質量の測定精度を上げること、さらに分子ガスの元になる原子ガスも加えて評価することが不可欠である。

2. 研究の目的

本研究は、近傍銀河について恒星の材料となる分子ガス質量を高い精度で測定し、原子ガスも加えた上で星生成効率やガス分率を導出することで、星生成率-ガス質量-恒星質量の間に見られる関係を正確に導出し、銀河における星生成の過程を明らかにすることを目的とする。分子ガスについては、一般的な観測から推定する際に用いられる「変換係数」の銀河内部での違いを調べるとともに、この変換係数を用いずにガスの密度からも求める。また、これまでの観測では検出されていない暗黒ガスの観測を行い、この成分の存在量を定量化する。さらに、分子ガスの元となる原子ガスの情報も加えた上で、星生成率、恒星質量、ガス質量の間の関係を精査し、銀河における大局的な星生成過程の解明を試みる。

3. 研究の方法

本研究は、

- (1) 近傍銀河内部の領域ごとの高精度な分子ガス質量の導出
- (2) 近傍銀河内部の領域ごとの原子ガス質量及び暗黒ガスの質量の導出
- (3) 星質量-星生成率-ガス質量の関係の定量化と大局的な星生成過程の解明

という3つの観点から進めた。

(1) では、分子ガスの探査針として用いられる一酸化炭素 ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}$) 分子のスペクトル線について、複数の回転遷移に伴う輝線のデータを用いることで励起解析を行い、分子ガスの密度を求めて、質量を導出する。また、一酸化炭素分子、水素原子ガス、ミリ波から遠赤外線に渡る連続光のスペクトルエネルギー分布から星間塵の量とガスの総量を推定することでも導出することができる。

(2) では、分子ガスに加えて、水素原子の 21 cm 線のデータを用いて水素原子ガスの量を推定するとともに、一酸化炭素分子のスペクトル線では検出できない暗黒ガスと呼ばれる成分をサブミリ波帯の中性炭素原子のスペクトル線の観測から推定する。

(3) では、赤外線のデータから導出した星質量、紫外線と赤外線のデータから導出した星生成率、そして上記(1)、(2)の方法で導出した中性ガスの質量を比較することから、相互の関係を定量化する。なお、当初予定はしていなかったが、より多数の銀河について分子ガス質量を推定することを目指し、赤外線観測衛星 WISE で取得された波長 12 μm のデータから一酸化炭素分子の光度を推定する方法を確立するために、既存の一酸化炭素分子のスペクトル線強度との比較を行った。

4. 研究成果

(1) 一酸化炭素分子の複数の遷移スペクトル線による励起解析

近傍銀河 13 天体について、一酸化炭素分子の $J=1-0$ 、 $2-1$ 、 $3-2$ (J は回転量子数) 及び同位体 $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ の $J=1-0$ スペクトル線の強度を数 100 pc スケールの同心円環並びに銀河の構造ごとに平均して求め、励起解析ツール RADEX (van der Tak et al. 2007) を用いて分子ガスの物理状態を推定した。観測誤差が大きかったため、分子ガスの温度及び密度について詳細な結果を得ることはできなかったが、これらの物理量の銀河の動径方向の有意な変化は見られないこと、分子ガスの励起状態は分子雲ごとあるいはその内部で局所的に変わっていること、一成分での解析が困難であること等を明らかにした。

次いで、近傍の棒渦巻銀河 M 83 の中心 1 kpc 付近について、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計のアーカイブデータを用いて、同様の解析を実施したところ、銀河内部の構造によって付随する分子ガスの多くが圧力平衡にあることが明らかになった。一方で、星生成活動を伴う構造と伴わない構造があり、その差異が分子雲同士の衝突の有無に起因している可能性を明らかにした。本結果については、本報告書執筆時点で論文としてまとめているところである。

(2) 一酸化炭素分子と水素分子の変換係数の導出

近傍銀河 22 天体について、一酸化炭素分子の $J=1-0$ 輝線、水素原子の 21 cm 線、波長 250 μm の赤外線を用いて、一酸化炭素の強度と水素分子の柱密度の変換係数 (CO-H_2 変換係数) とガス-ダスト比を銀河全体について (このうち、4 銀河については銀河を光学半径の 20% より内側と外側に分けて) 導出した。変換係数は銀河の外側の方が 2-5 倍程度高く、この変換係数が金属量及び星生成率面密度と負の相関を持つことを明らかにした (図 1)。

次いで、これらの天体のうち紫外線から赤外線に渡る多波長のデータが揃う天体について、スペクトルエネルギー分布の詳細なフィッティングから星間塵の量を求め、銀河内を空間分解した CO-H_2 変換係数を求めた。この変換係数を適用して星生成率面密度と分子ガス面密度の相関を取ると、その散らばりが有意に小さくなる銀河があることが明らかになった。なお、この変換係数の他の物理量への依存性等については、本報告書執筆時点で継続して調査している。

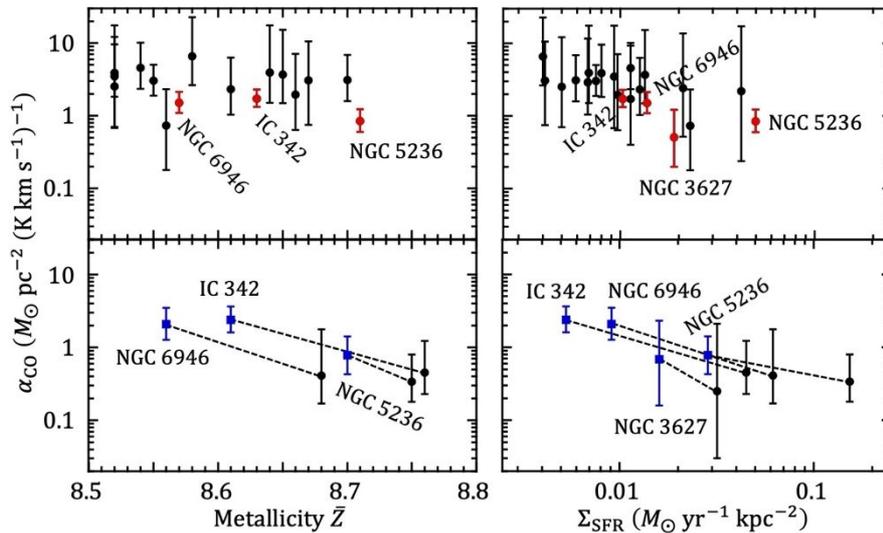


図 1 近傍銀河の CO-H_2 変換係数の金属量に対する関係 (左) と星生成率面密度に対する関係 (右)。いずれも上段は銀河全体を積分した値。下段は上段の図で赤色で示した銀河について銀河の内側 (黒丸) と外側 (青色四角) に分けて積分した値。銀河を空間分解すると、変換係数が金属量、星生成率面密度と相関を持つことがわかる。(Yasuda et al. 2023 を元に作成)

(3) 近傍銀河内部の分子ガスと原子ガスの割合の調査

近傍銀河約 40 天体について、一酸化炭素分子の $J=1-0$ 輝線、水素原子の 21 cm 線の撮像データから、分子ガス及び原子ガスの面密度の動径分布を導出した。両面密度が等しくなる半径を境としてそれより内側の領域と外側の領域に分けると、分子ガスに対する星の生成効率は両領域で同程度であるのに対して、原子ガスを含めて導出した星生成効率は内側の領域の方が数倍高いことが明らかになった。一方で、それぞれの領域の恒星質量を星生成率で割った比星生成率には違いが見られなかった。比星生成率の逆数は星生成の継続時間の目安となるため、以上の結果は、銀河の内側と外側で見られる星生成活動の違いが、原子ガスが分子ガスに転換する過程に起因している可能性が考えられる。この結果については、本報告書執筆時点で継続して精査している。

(4) 近傍銀河の暗黒ガスの質量の導出

一酸化炭素分子のスペクトル線の観測では検出できない暗黒ガスの量は、サブミリ波帯の中性炭素原子のスペクトル線観測から推定できるが、現状でほぼ唯一観測が可能なアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計のサイトでも観測条件がかなり厳しく複数の銀河の観測が現実的でないことが判明した。加えて、新型コロナウイルス感染症拡大に伴う諸制限の中で、研究の優先度を下げざるを得なくなり、やむを得ず断念した。

(5) 近傍銀河の金属量測定と CO-H_2 変換係数への適用

兵庫県立大学西はりま天文台のなゆた望遠鏡の共同利用観測に応募・採択され、2 銀河の観測を試みた。銀河円盤内の 3 つの電離水素領域に対して禁制線の強度を測定し、 N_2 指数 (Storchi-Bergmann et al. 1994) から金属量を導出した。技術的にやや困難さが伴ったもののある程度観測の目処は立ったが、人手不足もあり、残念ながらその後進められていない。

(6) 中間赤外線データを用いた一酸化炭素分子スペクトル線光度の推定

銀河における星生成が銀河団や銀河群、孤立した銀河といった銀河環境によってどのように異なるのかということを明らかにするためには、多数の銀河を統計的に調べる必要がある。しかし、個々の銀河の分子ガスの質量を正確に測定するには複数輝線の観測が必要となり、多数の銀

河のデータを揃えることは必ずしも容易ではない。そこで、多数の銀河のデータが入手可能な赤外線衛星 WISE の波長 $12\ \mu\text{m}$ のデータから近似的に分子ガス質量を求める方法を確立することを目指した。近傍銀河約 50 天体について、一酸化炭素分子の $J=1-0$ 輝線と $12\ \mu\text{m}$ の光度を比較したところ、先行研究 (Gao et al. 2019, 2022) に示される関係の分散が、銀河内部の構造や銀河円盤の傾きに依存している可能性を見出した。この結果については、本報告書執筆時点で継続して研究している。

(7) 分子ガスの成分と星生成効率の関係

近傍銀河 Maffei 2 について、国立天文台野辺山宇宙電波観測所 45 m 電波望遠鏡の共同利用観測により、高感度の $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ $J=1-0$ 輝線及び $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ $J=1-0$ 輝線の撮像を実施した。銀河内で $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ 輝線が検出された位置・速度の $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 輝線と、 $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ 輝線が検出されていない $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 輝線に分けて、前者を分子雲成分、後者を希薄な成分とみなすと、分子雲成分について求めた星生成効率は銀河内部の領域ではほぼ一定の値を取ることを、これまで星生成効率の違いとされていた差は、分子ガス成分と希薄な成分の割合の違いであることが明らかになった (図 2)。他の近傍銀河 34 天体についても、星生成率は分子ガス全体よりも分子雲成分との相関が良い、つまり星生成効率の違いが少ないことがわかる (図 3)。このことは、星生成効率の違いは分子ガスが重力的に束縛されているかどうかで決まることを示している。

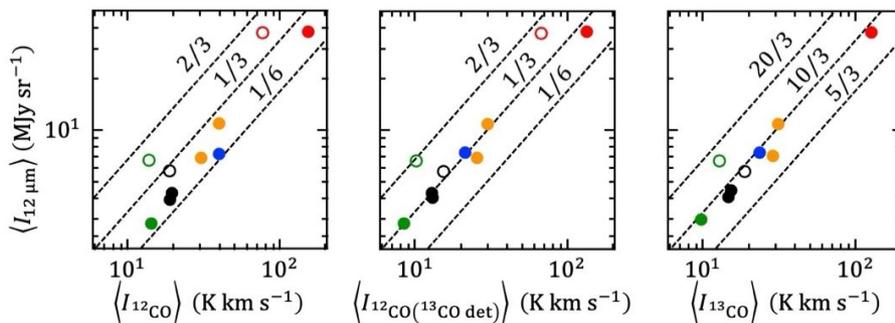


図 2 近傍銀河 Maffei 2 内の各領域での赤外線強度と一酸化炭素分子スペクトル線強度。縦軸は赤外線衛星 WISE で撮られた波長が $12\ \mu\text{m}$ の赤外線強度で、星生成率に比例する観測量。横軸は、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ の強度 (左)、 $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ が検出された位置・速度での $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ (分子雲成分) の強度 (中)、 $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ の強度 (右)。色の違いは銀河内部の場所の違いを表す。点線は星生成効率が一定の値を示し、数値は強度比を示す。左の図に比べて、真ん中の図ではデータのばらつきが小さく、星生成効率があまり変わらないことを示している。(Yajima & Sorai 2022 を改変)

以上のように、近傍銀河における分子ガス量を高精度に測定する意義とその結果を用いた銀河の星生成過程の解釈について、本研究は方向性を示すことができた。しかし、データの質や観測されている銀河の個数がまだまだ不十分であることも併せて突き付けられた現実である。新規のデータ取得も含め、今後も継続して本課題に取り組む予定である。

< 引用文献 >

van der Tak, F.F.S. et al. 2007, “A computer program for fast non-LTE analysis of interstellar line spectra”, *Astronomy & Astrophysics*, 468, pp.627-635

Yasuda, A. et al. 2023, “CO multi-line imaging of nearby galaxies (COMING). XII. CO-to- H_2 conversion factor and dust-to-gas ratio”, *Publication of the Astronomical Society of Japan*, 75, pp.743-786

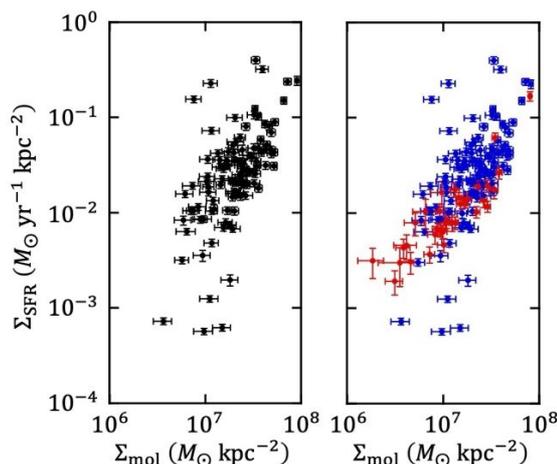


図 3 近傍 34 銀河の星生成率面密度 (縦軸) と分子ガス面密度 (横軸) の相関。左は $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ の全強度から導出した分子ガス面密度でスピアマンの順位相関係数は 0.62。右は分子雲成分の分子ガス面密度 (赤色) と希薄な成分 (青色) の分子ガス面密度。相関係数はそれぞれ、0.87 と 0.62 で、分子雲成分の方が星生成効率の違いが小さいことを示している。(Sorai 2022 を改変)

Storchi-Bergmann, T. et al. 1994, "Ultraviolet to Near-infrared Spectral Distributions of Star-forming Galaxies: Metallicity and Age Effects", *The Astrophysical Journal*, 429, pp.572-581

Gao, Y. et al. 2019, "Estimating the Molecular Gas Mass of Low-redshift Galaxies from a Combination of Mid-infrared Luminosity and Optical Properties", *The Astrophysical Journal*, 887, pp.172:1-18

Gao, Y. et al. 2022, "The Correlation between WISE 12 μm Emission and Molecular Gas Tracers on Subkiloparsec Scales in Nearby Star-forming Galaxies", *The Astrophysical Journal*, 940, pp.133:1-13

Yajima, Y. & Sorai, K. 2022, "Key factor affecting molecular gas properties and star formation determined by decomposition of CO emission in Maffei 2", submitted to *Publication of the Astronomical Society of Japan*

Sorai, K. 2022, "Molecular Gas Contents and Star Formation Efficiency in Local Galaxies", *IAU Symposium 373: Resolving the Rise and Fall of Star Formation in Galaxies*

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yasuda Atsushi, Kuno Nario, Sorai Kazuo, Muraoka Kazuyuki, Miyamoto Yusuke, Kaneko Hiroyuki, Yajima Yoshiyuki, Tanaka Takahiro, Morokuma-Matsui Kana, Takeuchi Tsutomu T, Kobayashi Masato I N	4. 巻 75
2. 論文標題 CO multi-line imaging of nearby galaxies (COMING). XII. CO-to-H2 conversion factor and dust-to-gas ratio	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 743 ~ 786
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psad034	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13件（うち招待講演 1件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 K. Sorai, Y. Yajima, and the COMING members
2. 発表標題 Molecular Gas Contents and Star Formation Efficiency in Local Galaxies
3. 学会等名 IAU Symposium 373: Resolving the Rise and Fall of Star Formation in Galaxies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Suphapolthaworn, K. Sorai, and D. Salak
2. 発表標題 Molecular gas physical conditions in the central kpc of M 83
3. 学会等名 East Asian Young Astronomers Meeting 2024 (EAYAM 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 S. Suphapolthaworn, K. Sorai and D. Salak
2. 発表標題 Molecular gas physical conditions in the central kpc of M 83
3. 学会等名 35th URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Suphapolthaworn, K. Sorai and D. Salak
2. 発表標題 Molecular gas physical conditions in the central kpc of M 83
3. 学会等名 2023 Asia-Pacific Regional IAU Meeting (APRIM 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 瀧元健伸, 徂徠和夫, Dragan Salak
2. 発表標題 NGC 4945 の分子ガスアウトフローの複数輝線解析
3. 学会等名 日本天文学会2024年春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 瀧響子, 徂徠和夫
2. 発表標題 近傍銀河における分子ガス-原子ガス比と星生成の関係
3. 学会等名 日本天文学会 2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水一揮, 徂徠和夫
2. 発表標題 渦巻銀河における形態学的特徴の検出手法の開発
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水一揮, 徂徠和夫
2. 発表標題 近傍渦巻銀河の構造同定および分子ガスの速度分散と星生成効率の多様性
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Suphapolthaworn, K. Sorai, K. Shimizu, D. Salak, Y. Yajima
2. 発表標題 Probing physical conditions of molecular gas in nearby galaxies with CO multi-line excitation analyses
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 保田敦司, 久野成夫, 徂徠和夫, 宮本祐介, Dragan Salak, 竹内努, 諸隈佳菜, 矢島義之, 他 COMING
2. 発表標題 NRO レガシープロジェクト COMING (31): 近傍銀河における星形成活動に対する渦巻腕の影響に関する観測的研究
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢島義之, 徂徠和夫, Dragan Salak
2. 発表標題 スターバースト銀河 NGC 1808 における巨大分子雲の性質 II. Atacama Compact Array による広がった分子ガスの有無の影響
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢島義之, 徂徠和夫
2. 発表標題 棒渦巻銀河 Maffei 2 における 12CO(J=1-0), 13CO(J=1-0) を用いた分子ガスの2成分解析
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水一揮, 徂徠和夫, 矢島義之, Suphakorn Suphapolthaworn, 村岡和幸, Dragan Salak, 他 COMING メンバー
2. 発表標題 NRO レガシープロジェクト COMING (30): 近傍銀河における分子ガスの速度分散と星形成効率の関係
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔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
研究協力者	保田 敦司 (Yasuda Atsushi)		
研究協力者	矢島 義之 (Yajima Yoshiyuki)		
研究協力者	清水 一揮 (Shimizu Kazuki)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	スパポルターウォン スパコーン (Suphapolthaworn Suphakorn)		
研究協力者	濱 響子 (Hama Kyoko)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関