

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：23903

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H05730

研究課題名(和文)大質量形成領域の磁場構造の研究

研究課題名(英文) Study of Magnetic Field Structure in Massive Star-forming Regions

研究代表者

杉谷 光司 (Sugitani, Koji)

名古屋市立大学・大学院システム自然科学研究科・教授

研究者番号：80192615

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,500,000円

研究成果の概要(和文)：如何にして大質量星が形成されるのかは、現在の天文学研究における重要な問題の一つであるがよく理解されていない。特に、星間磁場が巨大分子雲における大質量星の形成とどのように関連しているかは明らかではない。そこで、大質量星が形成されている巨大分子雲と大質量星が形成されていない巨大分子雲の磁場構造を近赤外偏光観測により広範かつ詳細に調べ、磁場構造と密度構造の比較研究を行った。その結果、分子ガスの柱密度に対して磁場が相対的に弱い領域では大質量星が形成されるのに対し、磁場が相対的に強い領域では低・中質量の星のみが形成されることが分かった。これは、磁場が形成される星の質量を制御していることを示唆する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

天文衛星「プランク」により全天域でサブミリ波偏光観測で星間磁場が調べられているが、その角分解能は十分でなく巨大分子雲の局所的な磁場構造を調べるのに十分でなかった。より高い角分解で磁場構造を調べることができる近赤外線偏光観測は従来から行われていたが観測範囲が狭く、巨大分子雲の全体を詳細に調べた例はほとんどなかった。本研究では、いくつかの巨大分子雲の全体の磁場構造を近赤外線偏光観測で詳細に調べることで、星間磁場が星形成に重要な影響を与えていることを観測的に示した。このことは、星形成の研究分野に重要な知見を与えたと考えられる。

研究成果の概要(英文)：How massive stars are formed is one of the important issues in current astronomy research, however it is not well understood. In particular, it is not clear how the interstellar magnetic field is related to the formation of massive stars in giant molecular clouds. Therefore, the magnetic field structures of giant molecular clouds with massive stars and those without massive stars were investigated by near-infrared polarization observations, in order to examine their magnetic field structures in comparison with their density structures. As a result, we found that massive stars are formed in the region where the magnetic field is relatively weak with respect to column density, whereas only low- and intermediate-mass stars are formed in the region where the magnetic field is relatively strong. This suggests that the magnetic field controls the mass of the star formed.

研究分野：赤外線天文学

キーワード：星間磁場 大質量星形成 分子雲 近赤外線偏光観測

1. 研究開始当初の背景

太陽の約10倍以上の質量の大質量星は、光度が大きく大量の紫外線や星風を放出するだけでなくその終末に大爆発（超新星爆発）を起こすため、その周囲に存在する星の材料である水素分子ガス（分子雲）に大きな影響を与えるだけでなく銀河スケールに及ぶ影響を与える。このため、大質量星は天文学の重要な研究ターゲットとなっている。特に、太陽のような小質量星の形成メカニズムは観測的にかなり明らかになった現状により、大質量星の形成メカニズム解明の研究が特に注目されるようになってきている。しかし、大質量星は進化の速度が速く太陽系から離れた領域に存在するだけでなく、誕生して間もなく周囲の分子雲を紫外線により電離・破壊するため、大質量星の誕生の初期条件や形成メカニズムは観測的に明らかでなかった。特に、巨大分子雲における大質量星形成に星間磁場がどのように関係しているのかが明らかでなかった。

このような状況において、我々は大質量星形成にどのように星間磁場が関係するのか或いは関係しないのかを明らかにする必要があると考えた。幸い、3の研究の方法で述べるように、巨大分子雲の全体の磁場構造を調べる環境が我々にはあったので本研究を計画・立案した。

2. 研究の目的

大質量星形成と星間磁場の関係を調べるために以下の3つのカテゴリーの巨大分子雲に分けて観測を開始することにした。(1) 分子ガスの質量が十分であるにも関わらず大質量星形成の兆候のない巨大分子雲、(2) 分子雲ガスに埋もれた大質量星候補天体を持つ巨大分子雲、(3) 大質量星をメンバーに持つ若い星団が付随する巨大分子雲である。これらのカテゴリーを選択したのは、これらが巨大分子雲の進化段階や大質量星形成の初期条件・環境の違いを明らかにするのに適していると考えたからである。これらのターゲットの観測により、磁場構造と分子雲構造の関係、磁場の強度、磁束密度とクランプの自己重力との比などが大質量星形成とどのような関係にあるかを観測的に明らかにし、大質量星形成の磁気的条件を探ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 分子雲の星間磁場構造を調べる手法としては、分子雲に含まれる星間ダストからの熱放射の偏光をサブミリ波で調べる方法と分子雲の背景の星の光が分子雲のダストで偏光されるのを近赤外線や可視光で調べる方法が代表的である。これらは、いずれも非対称形状（縦長）星間ダストが星間磁場の方向に対して垂直に整列をする現象による偏光を検出することで磁場方向を調べる手法である。天文衛星「プランク」は、全天域でサブミリ波偏光観測を行い、高い感度で星間磁場が調べているが、その角分解能は十分でなく巨大分子雲の局所的な磁場構造を調べるのに十分でなかった。地上望遠鏡でもサブミリ波偏光観測が行われているが、その角分解能は高いが分子雲の密度が高い領域に限られ、巨大分子雲全体を観測するような観測は行われていない。近赤外線では従来から偏光観測が行われていたが、その観測範囲は狭く、巨大分子雲の全体を詳細に調べた例はほとんどなかった。このような状況に対して、我々の研究グループは近赤外線で効率的に偏光観測ができる専用の赤外線望遠鏡を設置・運営しており、巨大分子雲全体を観測して上記目的の研究を遂行できた。偏光観測に用いた望遠鏡は南アフリカ天文台サザランド観測所に設置しているIRSF 1.4m望遠鏡で、赤外線カメラは7.7分角の視野で近赤外線J/H/Ks 3バンド（波長1.2/1.6/2.2ミクロン）を同時観測ができる赤外線カメラSIRPOL (Nagashima et al. 1999; Nagayama et al. 2003)、3バンド同時偏光測定用のアタッチメントはSIRPOL (Kandori et al. 2006) を使用した。観測をした主な巨大分子雲は、M17 SWex（大質量星形成の兆候がない巨大分子雲）、RCW 106（大質量星候補天体を多く持つ巨大分子雲）、M17（若い大質量星の星団が付随する巨大分子雲）の3つである。その他の大質量星形成領域もこれら天体が観測できない時間帯を利用して観測を行った。M17 SWexは本研究が始まる前から観測を開始していたが本研究により観測を完了することができた。

(2) 目的の研究を行うためには、分子雲の構造や密度・質量などのデータと星間磁場の観測データと比較する必要がある。このため、分子輝線（COなど）スペクトル・データや遠赤外線連続波データを得る必要が

ある。遠赤外線連続波データはHerschel 宇宙望遠鏡の500/350/250/160ミクロンのアーカイブ・データ (Science Archival SPIRE/PACS) を利用した。M17 SWexとM17の分子輝線データは最近ようやく公開された野辺山45m望遠鏡の星形成レガシー・プロジェクトのアーカイブから取得した (Nakamura et al. 2019)。RCW 106の分子輝線データはUltimate Mopra Milky Way Survey (Barnes et al. 2015)のデータを利用した。

4. 研究成果

(1) RCW 106 巨大分子雲

2017~2018年にIRSF/SIRPOLを用いて合計54視野の偏光観測を行った (図1)。この結果、星間磁場は分子雲の伸長方向に対してほぼ平行となっており、以下に示すM17SWexやM17とは異なった大局的な磁場構造であることが明らかになった。また、遠赤外線連続波データから柱密度図を作成したところ、クランプ構造が顕著であることが分かった。そのため、分子雲の中で星が誕生する場所と考えられているクランプ (分子ガスの塊) の検出を行って、その (柱) 密度や質量などを算出し、分子輝線スペクトルデータからクランプの速度幅も見積もった。また、これらのクランプの磁場の強度、星形成の有無および星の光度 (質量) も中間赤外線アーカイブ・データから調べた。さらに、偏光角度 (磁場方向) のばらつきから磁場の強度を算出し、磁束密度とクランプの自己重力の比 (質量磁束比) も見積もって磁氣的安定性を調べた。その結果、大質量星が誕生しているクランプは磁氣的に不安定であり重力で潰れやすいが、中小質量星が誕生しているものは磁氣的には安定で潰れにくいことを明らかにした。これにより、理論的に予想されている大質量星形成の小質量星形成との磁気環境の違いを観測的に明快に立証し、星間磁場が形成される星の質量と深く関わっていることを示した。この結果は、Astrophysical Journal Letters で公表した (Tamaoki, Sugitani et al. 2019)。

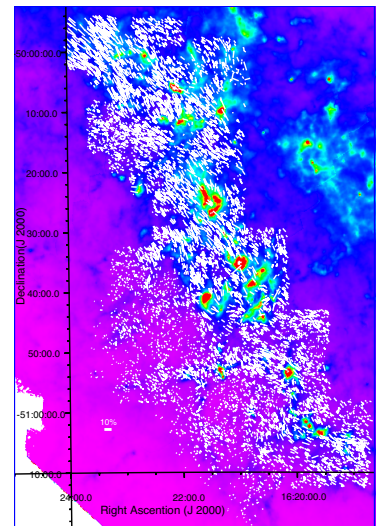


図1 RCW106巨大分子雲の磁場構造。カラーイメージが分子雲の柱密度、短い白線が分子雲の背景の星の光の直線偏光方向 (分子雲の磁場の方向) と偏光度 (%) を示す。

(2) M17 SWex 巨大分子雲

この分子雲のほぼ全域をカバーするため、IRSF/SIRPOLを用いて合計26視野の偏光観測を2016年までに行った。図2は、野辺山45m望遠鏡の ^{13}CO 輝線の積分強度図の上にHバンドで得られた偏光データを用いて平均的な磁場方向を求めた結果をベクトル線で示している。M17 SWexの密度の高い各フィラメントと全体の伸長方向に対しては、大局的な磁場はほぼ垂直になっている。一方、分子雲の密度が高い部分から密度の低いエンベロープに飛び出しているフィラメントは、磁場に沿っている。このことは、先行研究で密度の高いフィラメントは磁場に垂直であるのに対して密度の低いフィラメントは磁場に平行になる傾向にあることの報告 (Sugitani et al. 2011; Chapman et al. 2011) と一致しており、磁場が分子雲の構造形成に関与していることが示唆された。

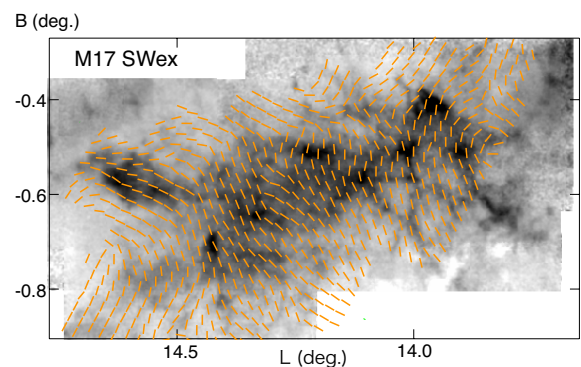


図3 ^{13}CO ($J=1-0$)積分強度図+Hバンド偏光ベクトル (平均)

分子雲の中で密度の高いフィラメントやクランプの磁氣的安定性を調べるために、遠赤外線連続波データから求めた水素分子の柱密度図上で9個のフィラメントと3個のクランプを選定した。これらの選定した領域は密度の高い場所なので、Hバンドより波長が長く透過力の高いKsバンドの偏光データを用いて、偏光ベクトルのばらつきと分子ガスの速度幅から磁場強度を見積もる手法で解析を行った。その結果、これらの領域では磁場は自己重力に対して相対的に強いために、一気に収縮が起きる状況にないことを明らかにした。先に記したようにM17 SWexは大質量星が誕生していない領域であり、磁場が相対的に強い状態が維持されてい

るために領域内のクランプが磁氣的に安定な状態にあることが示唆された。しかしながら、中小質量の星は活発に形成されていることが報告されている。このことは、局所的に磁場の散逸が起きて磁場が弱まり中小質量の星は誕生しているが、領域全体が一気に収縮して激しい星形成（大質量星の誕生）が起きるほどではないこと、つまり、磁場は大質量星の形成を抑制していることを強く示唆する。この結果は、RCW106で得られた結果を支持するもので、Publication of Astronomical Journalで公表した（Sugitani et al. 2019）。また、この結果と関連するM17 SWexの研究論文を紹介する天文月報の記事も執筆した（天文月報、2020年7月号）。

(3) M17 巨大分子雲

2018年からM17巨大分子雲の偏光観測に着手して2019年まで観測を続け、この分子雲のほぼ全域をカバーする観測を遂行することができた。図3には、野辺山45m望遠鏡の ^{13}CO 輝線の積分強度図にHバンドで得られた偏光ベクトルが示されている。観測が終了してからまだ解析を行う十分な時間が確保できていないため予備的解析の段階であるが、以下のような示唆・知見が得られるのではないかと考えている。

図から分かるように、大局的な磁場方向はWNW-ESEであるのに対して分子雲の分子雲全体の伸長方向NNE-SSWで、磁場と分子雲は垂直になっているが、各所で磁場方向は大きく乱れている。北部（N）ではフィラメント構造が顕著であり、フィラメントに沿って速度勾配があることが分子輝線データから示されている。これは、フィラメントの分子ガスが磁場を凍結したままで分子雲中央の大質量星団や南部（S）の大クランプの方へ強い重力で引き込まれた結果、磁場がU字型に曲げられている可能性が高い。また南部の大クランプには磁場に沿った薄いフィラメントが連結しているが、これは磁場に沿ってガスが落ち込んでいる様子を示している可能性が高い。さらに、M17の巨大分子雲の個々のクランプとM17SWex巨大分子雲のクランプを野辺山45m望遠鏡のCO輝線データを用いて比較研究した結果によると、M17のクランプはサイズが小さいものが柱密度が高いものが多いと報告されている（Nguyen-Luong et al. 2020）。これらのことを総合すると、M17SWex巨大分子雲に比べて磁場が重力に対して相対的に弱いためにクランプは磁氣的に不安定であり、その結果として大規模な大質量星の星団が形成され、現在も大質量星の形成が続いているのではないだろうか。

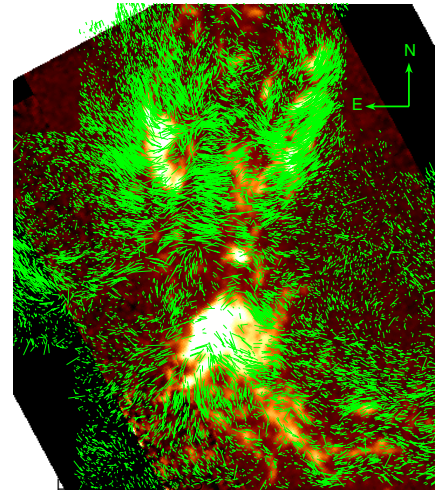


図3 ^{13}CO (J=1-0) 積分強度図+Hバンド偏光ベクトル

<引用文献>

- [1] Nagashima, C., Nagayama, T., Nakajima, Y., et al. 1999, in Star Formation 1999, ed. T. Nakamoto (Nobeyama: Nobeyama Radio Observatory), 397
- [2] Nagayama, T., Nagashima, C., Nakajima, Y., et al. 2003, Proc. SPIE, 4841, 459
- [3] Kandori, R., Kusakabe, N., Tamura, M., et al. 2006, Proc. SPIE, 6269, 159
- [4] Nakamura, F., Ishii, S., Dobashi, K., et al. 2019, PASJ, 71, Sp1, id.S3
- [5] Barnes, P., Muller, E., Indermuehle, B., et al. 2015, ApJ, 812, 6
- [6] Tamaoki, Sugitani, Nguyen-Luong, Q., et al. 2019
- [7] Sugitani, K., Nakamura, F., Shimoikura, T., et al. 2019, PASJ, 71, Sp1, id.S7
- [8] 杉谷、天文月報7月号、印刷中
- [9] Nguyen-Luong, Q., Nakamura, F., Sugitani, K., et al. 2020, ApJ, 891, id.66

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 杉谷光司	4. 巻 113（印刷中）
2. 論文標題 大質量星形成領域 M17 野辺山星形成レガシープロジェクト	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 天文月報（7月号）	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kinoshita, S. W., Nakamura, F., Nguyen-Luong, Q., Wu, B., Shimoikura, T., Sugitani, K., Dobashi, K., Takemura, H., Sanhueza, P., Kim, K.-T., Kang, H., Evans, N. J., White, G. J., Fallscheer, C.	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Cloud structures in M17 SWex : Possible cloud-cloud collision	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Tamaoki, S., Sugitani, K., Kusune, T.	4. 巻 -
2. 論文標題 Near-IR imaging polarimetry of the RCW 106 cloud complex	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy in Focus XXX, presented at IAU XXX General Assembly, Vienna, Austria. Proceedings of the IAU, 2020	6. 最初と最後の頁 pp. 109 - 109
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/S1743921319003648	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sugitani, K., Nakamura, F., Shimoikura, T., Dobashi, K., Nguyen-Luong, Q., Kusune, T., Nagayama, T., Watanabe, M., Nishiyama, S., Tamura, M.	4. 巻 71, SP1
2. 論文標題 Near-infrared imaging polarimetry toward M 17 SWex	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 S7 (21pp.)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psz072	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kusune, T., Nakamura, F., Sugitani, K., Sato, S., Tamura, M., Kwon, J., Dobashi, K., Shimoikura, T., Wu, B.	4. 巻 71, Sp1
2. 論文標題 Magnetic Field Structure in Serpens South	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 S5 (12pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tamaoki, S., Sugitani, K., Nguyen-Luong, Q., Nakamura, F., Kusune, T., Nagayama, T., Watanabe, M., Nishiyama, S., Tamura, M.	4. 巻 875
2. 論文標題 Magnetic Stability of Massive Star-forming Clumps in RCW 106	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L16 (7 pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab1346	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kusune, T., Sugitani, K., Nakamura, F., Watanabe, M., Tamura, M., Kwon, J., Sato, S.	4. 巻 830
2. 論文標題 Magnetic Field of the Vela C Molecular Cloud	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L23 (7pp.)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8205/830/2/L23	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 杉谷光司、中村文隆、下井倉ともみ、土橋一仁、Nguyen-Luong, Quang、楠根貴成、永山貴宏、渡 遼誠、西山正吾、田村元秀
2. 発表標題 星形成レガシープロジェクトIII: M17 SWex分子雲の磁場構造
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tamaoki, S, Sugitani, K., Kusune, T.
2. 発表標題 Near-IR imaging polarimetry toward RCW106
3. 学会等名 XXXth General Assembly of the International Astronomical Union, Focus Meeting FM4:Magnetic fields along the star-formation sequence (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 玉置捷平, 杉谷光司, 楠根貴成 他
2. 発表標題 大質量星形成領域 RCW106 分子雲の近赤外線偏光観測
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 楠根貴成、中村文隆、土橋一仁、下井倉ともみ、杉谷光司、SIRPOL チーム
2. 発表標題 Serpens South Cloudの近赤外線偏光観測
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 玉置 捷平 他
2. 発表標題 大質量星形成領域RCW106分子雲の近赤外線撮像偏光観測
3. 学会等名 IRSF勉強会、名古屋大学理学部、2019年3月
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 楠根貴成、中村文隆、杉谷光司、SIRPOLチーム
2. 発表標題 Vela C 分子雲の近赤外線偏光観測
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shohei Tamaoki, Koji Sugitani, Takayoshi Kusune
2. 発表標題 Near-IR imaging polarimetry toward RCW 106
3. 学会等名 East Asia Young Astronomers Meeting EAYAM2017, Ishigaki Island, Japan, Nov. 13-16, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 玉置捷平、杉谷光司、楠根貴成、Quang Nguyen、他
2. 発表標題 RCW106分子雲のSIRPOLによる偏光観測
3. 学会等名 IRSF勉強会、名古屋大学理学部、2018年3月
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉谷光司、楠根貴成、中村文隆、西山正吾、SIRPOL チーム他
2. 発表標題 赤外線暗黒星雲 “ネッシー” 星雲の近赤外線偏光観測
3. 学会等名 日本天文学会2016年秋季年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 楠根貴成、杉谷光司、中村文隆、SIRPOL チーム他
2. 発表標題 Vela C 分子雲の磁場構造
3. 学会等名 日本天文学会2016年秋季年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Sugitani, K., Kusune, T., Nakamura, F., Nishiyama, S., and SIRPOL Team
2. 発表標題 Near-Infrared Polarimetric Observations of the Nessie Nebula
3. 学会等名 Star Formation in Different Environments (国際学会)
4. 発表年 2016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
連携研究者	中村 文隆 (Nakamura Fumitaka) (20291354)	国立天文台・理論研究部・准教授 (62616)	
連携研究者	渡邊 誠 (Watanabe Makoto) (10450181)	岡山理科大学・理学部・准教授 (35302)	
連携研究者	永山 貴宏 (Nagayama Takahiro) (00533275)	鹿児島大学・理工学域理学系・准教授 (17701)	

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	西山 正吾 (Nishiyama Shogo) (20377948)	宮城教育大学・教育学部・准教授 (11302)	
連携研究者	佐藤 修二 (Sato Shuji) (50025483)	名古屋大学・理学研究科・名誉教授 (13901)	