

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400231

研究課題名(和文) 銀河団の形成進化におけるエネルギー収支の解明

研究課題名(英文) Study of energy budget in the evolution of galaxy clusters

研究代表者

太田 直美(Ota, Naomi)

奈良女子大学・自然科学系・准教授

研究者番号：40391891

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)：銀河団は衝突合体を繰り返し、今もなお成長を続ける天体である。衝突の莫大な運動エネルギーは、銀河団中のガスを激しく加熱したり、複雑な運動を生んだりすることに使われる。このような銀河団形成に伴うエネルギー収支を理解することを目指して、主に「すざく」衛星のX線データを系統的に分析し、超高温ガスや非熱的ガスの存在に制限をつけた。また、近傍銀河団のガス運動探査を行い、規則型・不規則型銀河団の両方にガス運動が存在する兆候やガスと銀河の分布の違いを新たに見つけた。また、ASTRO-H衛星搭載X線カロリメータによる精密分光のシミュレーションを行い、ガス運動や銀河団質量が精度良く再現できることを示した。

研究成果の概要(英文)：Clusters of galaxies grow into the present shape via collisions and mergers of smaller objects. If clusters collide with each other, a huge amount of kinetic energy may be released and a certain fraction is expected to heat the gas and generate high-energy particles, and induce bulk and turbulent motions. To reveal the energy budget in the cluster evolution, we constrained the existence of very hot/non-thermal gas in clusters using the Suzaku satellite. From a systematic search for gas motions, we discovered the sign of large bulk motions in both regular and irregular clusters and a significant offset between the spatial distributions of gas and galaxies. Furthermore, we carried out simulations of spectral observations using high-resolution X-ray calorimeter onboard the ASTRO-H satellite and showed a possibility that we can measure the turbulent gas motion and the cluster mass with high accuracy.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線天文学 宇宙物理学 銀河団 高温プラズマ 衝突合体现象 非熱的放射 乱流 宇宙構造形成

### 1. 研究開始当初の背景

標準宇宙モデルによると、宇宙最大の天体である銀河団は、ダークマターの重力を引き金として小さな銀河団同士が衝突合体を繰り返すことで現在の姿まで成長してきた。これまで多くの場合、銀河団中の高温ガスはすでに重力ポテンシャルと緩和し、静水圧平衡にあると記述されてきた。ところが、そう単純では無く、驚くほど動的な系であることがわかってきた。銀河団衝突の莫大な運動エネルギーは、主に銀河団ガスの加熱や加速、ガス運動の生成に使われると予想されるが、そのエネルギー収支は謎のままである。

(1)過去に、複数の銀河団中で衝突による激しいガス加熱を支持する温度構造が見つかったり、粒子加速の存在を裏付ける電波シンクロトロン放射が観測されたりしている。このことから、高エネルギー電子と宇宙背景放射とが相互作用して逆コンプトン放射を出すはずであるが、まだ確かな検出例はない。

(2)また、数値計算から衝突合体によりガスのバルク運動や乱流が引き起こされると予想されているが、まだ観測例が少ない。

### 2. 研究の目的

銀河団の形成過程に伴って起こるガス加熱や運動を詳細に観測することは、銀河団進化の理解にとどまらず、天体の持つダークマター総量を正確に見積もる上でも重要である。

(1)本研究では、主に「すざく」衛星を用いて、銀河団中の超高温ガスや非熱的ガスの存在に制限をつける。実際に検出された場合には、ショック加熱の起きている領域を特定し、ガスの温度や光度などの物理量を決定する。

(2)「すざく」衛星を用いて、近傍銀河団のガスバルク運動の探査を行う。加えて、ASTRO-H 衛星の超高分解能 X線カロリメータによるガス乱流測定の実現を目指す。以上の二種類の解析を総合して、銀河団形成におけるエネルギー収支問題の解決を目指す。

### 3. 研究の方法

銀河団は衝突合体を経験すると、その運動エネルギーはガス加熱・加速、バルク運動や乱流のエネルギーに配分される。やがて十分時間が経つと、重力ポテンシャルへの緩和が進んで静水圧平衡に至ると予想される。また、銀河団の形態は、規則型と不規則型に大別される。上記のシナリオにおいては、衝突によってダークマターやガス分布がかき乱されて一旦は形態が不規則で動的な系になるが、やがて規則的で静的な系へ進化していくと予想される。この説を検証するため、様々な形態を持つ銀河団をターゲットとして以下の測定を行う。

(1)銀河団ガスの温度は典型的に数千万から1億程度であり、熱的な X線放射を出す。その強度が弱まる硬 X線領域に注目すると、非熱的 X線放射が観測できる可能性がある。但し、非熱的放射は非常に弱いと予想される

ため、数億度の超高温ガスからの熱的放射と区別するかが鍵になる。そこで、ニュートン衛星のデータから詳細な多温度モデルを構築し、「すざく」衛星の広帯域 X線スペクトルと組み合わせた独自の解析を行って、超高温ガス・非熱的ガスに制限をつけた。

(2)ガスのバルク運動は、鉄輝線スペクトルのドップラーシフトから直接的に測定できる。今回は、規則型・不規則型両方の銀河団について、「すざく」衛星 CCD 検出器の X線スペクトルを用い、1000km/s を超えるようなガス運動があるかどうかを調べた。ここで、検出器の較正線源スペクトルや較正天体の解析も合わせて行い、系統誤差を評価した。さらに、鉄輝線スペクトルから数 100km/s のバルク運動や乱流を検出するためには、CCD より数 10 倍高いエネルギー分解能を持つ X線カロリメータが必要となる。そこで、カロリメータによる乱流測定可能性についてシミュレーションを行った。

### 4. 研究成果

(1)まず、代表的な高温の銀河団である A2163 について、「すざく」とニュートンによる広帯域 X線スペクトルの解析結果を、査読付き論文として発表した。この論文では、ニュートン衛星データから構築した多温度モデルを用いると、「すざく」で検出された硬 X線放射は数億度のきわめて温度の高いガス成分を含む熱的放射で再現できること、一方で、非熱的放射は顕著でないことを高い精度で示した。この結果を RXTE 衛星, BeppoSAX 衛星, INTEGRAL 衛星, Swift 衛星, 「すざく」衛星で観測された計 12 個の天体と比較し、非熱的硬 X線放射の測定の現状について、総まとめを行った。

次に、「すざく」衛星で新たに取得した 2 つの衝突銀河団 A2255, A2744 の X線スペクトル解析から、衝突合体によって形成されたと考えられる電波レリッック領域に注目してガス温度分布を調査した。その結果、A2255 については顕著な温度構造は見られなかった一方、A2744 銀河団の北東部には数億度の超高温ガスがあり、ガス温度が不連続な分布を持つことを検出した。また、A2744 の X線観測から見積もられるマッハ数は電波観測の値とも一致することから、天体外縁分で衝撃波加熱が起きたと解釈できる。

さらに、銀河団中の超高温ガス・非熱的ガスの探査を系統的に行うため、同様の手法による解析を国際共同研究のもとで進めた。A2219 をはじめ複数の衝突銀河団中に超高温ガスが存在する一方、非熱的硬 X線放射は有意でないことがわかった。以上の結果を電波観測とも比較し、投稿論文を準備中である。

(2)「すざく」衛星の最新の検出器較正データベースを反映して、様々な形態を持つ 8 つの近傍銀河団中のガスバルク運動探査を行い、成果を査読付き論文として発表した。本研究ではまず、ケンタウルス座銀河団中のサ

ブクラスターの持つガスの視線速度(もしくは赤方偏移)が可視光で得られた視線速度より有意に小さいことを初めて示した(図 1)。これは、衝突合体によってガスと銀河の空間分布にずれが生じたことを示唆する。

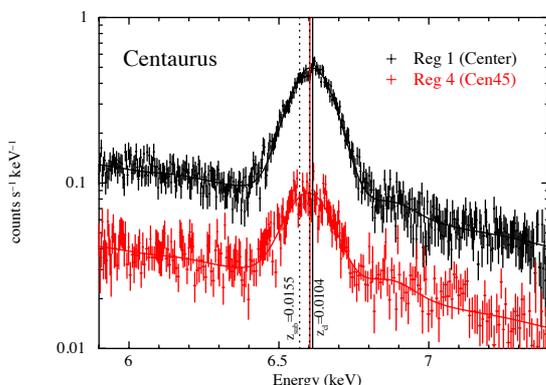


図 1: 「すざく」衛星によるケンタウルス座銀河団の中心(黒)とサブクラスター領域(赤)の鉄輝線スペクトル (Ota & Yoshida 2016)。

次に、規則型銀河団において検出器の系統誤差を超えるガスの視線運動があることも新たにわかった。このことはガスバルク運動の有無が必ずしも銀河団形態とは単純な相関関係にないことを示唆する。

加えて、宇宙論的シミュレーションを利用して、ASTRO-H 衛星搭載 X 線カロリメータの観測手法や期待される銀河団ガスの速度構造測定について詳細に検討を行い、規則型銀河団では典型的に数%の精度で銀河団質量分布の再構築が可能であるという結果を得た。

## 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 14 件)

- ① N. Okabe, K. Umetsu, T. Tamura, Y. Fujita, M. Takizawa, K. Matsushita, Y. Fukazawa, T. Futamase, M. Kawaharda, S. Miyazaki, Y. Mochizuki, K. Nakazawa, T. Ohashi, N. Ota, T. Sasaki, K. Sato, S. I. Tam, “Central mass profiles of the nearby cool-core galaxy clusters Hydra A and A478”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 査読有, 2016, 456, 4475-4487, DOI: 10.1093/mnras/stv2916
- ② N. Ota, H. Yoshida, “Search for gas bulk motions in eight nearby clusters of galaxies with Suzaku”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 査読有, 2016, 1-14, DOI: 10.1093/pasj/psv128
- ③ S. Yamada, T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, N. Miyazaki, K. Kuwabara, G. Kuromaru, S. Suzuki, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, Y. Takei, K. Sakai, K.

Nagayoshi, R. Yamamoto, T. Hayashi, H. Muramatsu, Y. Tawara, I. Mitsuishi, Y. Babazaki, R. Nakamichi, A. Bandai, T. Yuasa, N. Ota, “Future Japanese X-ray TES Calorimeter Satellite: DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)”, *Journal of Low Temperature Physics*, 査読有, 2015, 1-6, DOI: 10.1007/s10909-015-1362-2

- ④ T. Kitayama, N. Ota, (他 24 名, 8 番目), “ASTRO-H White Paper - Clusters of Galaxies and Related Science”, 査読無, 2014, arXiv:1412.1176, <http://arxiv.org/abs/1412.1176>
- ⑤ N. Okabe, K. Umetsu, T. Tamura, Y. Fujita, M. Takizawa, Y.-Y. Zhang, K. Matsushita, T. Hamana, Y. Fukazawa, T. Futamase, M. Kawaharda, S. Miyazaki, Y. Mochizuki, K. Nakazawa, T. Ohashi, N. Ota, T. Sasaki, K. Sato, S. Tam, “Universal profiles of the intracluster medium from Suzaku X-ray and Subaru weak-lensing observations”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 査読有, 2014, 66, id. 9914, DOI: 10.1093/pasj/psu075
- ⑥ K. Mitsuda, N. Ota (他 51 名, 35 番目), “Soft x-ray spectrometer (SXS): the high-resolution cryogenic spectrometer onboard ASTRO-H”, *SPIE*, 査読無, 2014, 9144, id. 91442A, DOI: 10.1117/12.2057199
- ⑦ T. Takahashi, N. Ota (他 246 名, 159 番目), “The ASTRO-H X-ray astronomy satellite”, *SPIE*, 査読無, 2014, 9144, id. 914425, DOI: 10.1117/12.2055681
- ⑧ T. Tamura, N. Y. Yamasaki, R. Iizuka, Y. Fukazawa, K. Hayashida, S. Ueda, K. Matsushita, K. Sato, K. Nakazawa, N. Ota, & M. Takizawa, “Gas Bulk Motion in the Perseus Cluster Measured with Suzaku”, *Astrophys. J.*, 査読有, 2014, 782, 38, DOI: 10.1088/0004-637X/782/1/38
- ⑨ N. Ota, K. Nagayoshi, G. W. Pratt, T. Kitayama, T. Oshima, & T. H. Reiprich, “Investigating the Hard X-ray Emission from the Hottest Abell Cluster A2163 with Suzaku”, *Astron. Astrophys.*, 査読有, 2014, 562, article id. A60, DOI: 10.1051/0004-6361/201322878
- ⑩ Y. Ibaraki, N. Ota, H. Akamatsu, Y.-Y. Zhang, & A. Finoguenov, “Suzaku Study of Gas Properties along Filaments of A2744”, *Astron. Astrophys.*, 査読有, 2014, 562, article id. A11, DOI: 10.1051/0004-6361/201322806

- ⑪ N. Ota, Y. Fujino, Y. Ibaraki, H. Böhringer, & G. Chon, “Suzaku observations of the low surface brightness cluster A76”, *Astron. Astrophys.*, 査読有, 2013, 556, article id. 21, DOI: 10.1051/0004-6361/201321676
- ⑫ N. Ota, K. Onzuka, & K. Masai, “Density Profile of a Cool Core of Galaxy Clusters”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 査読有, 2013, 65, 47, DOI: 10.1093/pasj/65.2.47
- ⑬ E. Pointecouteau (他 47 名, 39 番目), “The Hot and Energetic Universe: The evolution of galaxy groups and clusters”, 査読無, 2013, arXiv:1306.2319K, <http://arxiv.org/abs/1306.2319>
- ⑭ Ichikawa, K. Matsushita, N. Okabe, K. Sato, Y.-Y. Zhang, A. Finoguenov, Y. Fujita, Y. Fukazawa, M. Kawaharada, K. Nakazawa, T. Ohashi, N. Ota, M. Takizawa, T. Tamura, & K. Umetsu, “Suzaku Observations of the Outskirts of A1835: Deviation from Hydrostatic Equilibrium”, *Astrophys. J.*, 査読有, 2013, 766, article id. 90, DOI: 10.1088/0004-637X/766/2/90

[学会発表] (計 34 件)

- ① N. Ota, “Prospects of Cluster Observations with ASTRO-H”, *Astroparticle View of Galaxy Clusters*, Hiroshima University, Japan, 2015 年 3 月 26 日
- ② N. Ota, “Search for very hot/non-thermal emission and gas motions in clusters”, *Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe*, Ehime University, Japan, 2014 年 2 月 22 日
- ③ E. Pointecouteau, S. Allen, N. Ota, “Evolution of Groups and Clusters of Galaxies with Athena”, *Proceedings of a conference Exploring the Hot and Energetic Universe: The first Scientific Conference dedicated to the Athena X-ray Observatory*, 2015 年 9 月 8 日
- ④ 服部詩穂, 太田直美, 赤松弘規, Y.-Y. Zhang, A. Finoguenov, “すざく衛星による Abell 2744 銀河団周辺のミッシングバリオン探査”, 日本天文学会春季年会, 首都大学東京, 2016 年 3 月 14 日
- ⑤ 板花まどか, 滝沢元和, 赤松弘規, R. van Weeren, 河原創, 深沢泰司, J. Kaastra, 河原田円, 中澤知洋, 大橋隆哉, 太田直美, H. Röttgering, J. Vink, F. Zandane, “すざく衛星による RXC J1053.7+5453 の電波レリック周辺領域の解析”, 日本天文学会春季年会, 首都大学東京, 2016 年 3 月 14 日
- ⑥ 伊東雅史, 松下恭子, 佐藤浩介, 太田直美, “「すざく」衛星による Abell2163 銀河団による銀河団外縁部までの観測”, 日本天文学会 2015 年秋季年会, 甲南大学, 2015 年 9 月 9 日
- ⑦ 太田直美, 水野真梨子, 服部詩穂, 赤松弘規, “すざく衛星による衝突銀河団 A2255, A2744 の温度構造の研究”, 第 15 回宇宙科学シンポジウム, 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部, 2015 年 1 月 6-7 日
- ⑧ 赤松弘規, van Weeren Reinout, 河原創, 深沢泰司, Kaastra Jelle, 河原田円, 中澤知洋, 大橋隆哉, 太田直美, Roettgering Huub, 滝沢元和, Vink Jacco, Zandanel Fabio, “「すざく」衛星による電波レリック領域の X 線観測: 銀河団における粒子加速機構の理解に向けて”, 第 15 回宇宙科学シンポジウム, 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部, 2015 年 1 月 6-7 日
- ⑨ 大橋隆哉, Richard Mushotzky, 松下恭子, 上田佳宏, 久保田あや, 太田直美, 内山泰伸, Randall Smith, 馬場彩, 山田真也, 湯浅孝行, 辻本匡弘, 河原田円, 小高裕和, 中島真也, 高橋忠幸, “ASTRO-H の目指すサイエンス”, 第 15 回宇宙科学シンポジウム, 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部, 2015 年 1 月 6-7 日
- ⑩ 新郷沙耶, 太田直美, H. Böhringer, G. Chon, G. W. Pratt, “すざく衛星による低表面輝度銀河団 A1631 のエントロピー分布の研究”, 日本天文学会 2014 年秋季年会, 山形大学, 2014 年 9 月 11 日
- ⑪ 栗山翼, 佐藤浩介, 松下恭子, 赤松弘規, 大橋隆哉, 藤田裕, 河原田円, 田村隆幸, 中澤知洋, 岡部信広, 太田直美, 滝沢元和, “銀河団外縁部のエントロピー異常の原因の検証”, 日本天文学会 2014 年秋季年会, 山形大学, 2014 年 9 月 11 日
- ⑫ Y. Ibaraki, N. Ota, H. Akamatsu, Y.-Y. Zhang, A. Finoguenov, “Exploring Gas Properties along Filaments of the Pandora’s Cluster with Suzaku”, *Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe*, Ehime University, Japan, 2014 年 2 月 19-22 日
- ⑬ H. Yoshida, & N. Ota, “Search for gas bulk motions in eight nearby clusters with Suzaku”, *Suzaku-MAXI 2014: Expanding the Frontiers of the X-ray Universe*, Ehime University, Japan, 2014 年 2 月 19-22 日

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.phys.nara-wu.ac.jp/~ota/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

太田 直美 (OTA, Naomi)  
奈良女子大学・自然科学系・准教授  
研究者番号：40391891

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：