

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400235

研究課題名(和文)高温ガスの重元素分布から探る星の初期質量関数

研究課題名(英文)X-ray study of metal distribution in the hot gas and stellar initial mass function

## 研究代表者

松下 恭子 (Matsushita, Kyoko)

東京理科大学・理学部・教授

研究者番号：50366423

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)：銀河団は莫大な暗黒物質の重力により重力的に束縛された宇宙最大の天体であり、バリオンのほとんどは数千万度の高温ガスとして銀河団を満たしており、一部が銀河団銀河の星となっている。すざく衛星はバックグラウンドが低いため、銀河団の外縁部の高温銀河団ガスの放射を銀河団の端であるビリアル半径まで検出し、宇宙最大の構造である銀河団の成長現場をとらえることが可能になった。銀河団ガスには、銀河の中で合成された大量の重元素が含まれている。すざく衛星によって、銀河団全体の重元素量が求まり、その結果重元素の合成時期や銀河団銀河の星の初期質量関数も議論できるようになった。

研究成果の概要(英文)：Clusters of galaxies are the largest gravitationally bound systems in the Universe. At the same time, clusters can be used as the laboratory for the study of thermal and chemical evolution of the universe in which baryons play the most important role. X-ray observations give us valuable information about the structure formation, gas heating and cooling, and metal enrichment of clusters of galaxies. Thanks to the low and stable background, the Suzaku satellite has enabled us to unveil intracluster medium (ICM) beyond a half of the virial radius. We studied the distributions of metal abundances and metal-mass-to-light ratios and gas-mass-to-light ratios and discussed the origin of metals, slope of initial mass function of stars, and early-metal enrichment in these systems. In addition, we compared the results from the Suzaku data with those from the Planck satellite and weak-lensing observations and discussed the entropy flattening at cluster outskirts.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線 銀河 銀河団 化学進化 構造形成

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 銀河団では、バリオンのほとんどは数千万度の高温ガス(銀河団ガス)として、銀河団を満たしている。銀河団ガスにはさまざまな重元素が含まれており、その量は銀河団中の銀河の星に含まれる重元素の全質量よりも多い。鉄は、重力崩壊型超新星だけではなく、炭素爆燃型超新星によっても合成される。我々は、これまで、多数の銀河団の銀河団ガスに含まれる鉄の量を求めてきた。特にすざく衛星は、2005年に打ち上げられた日本のX線天文衛星であり、低く安定したバックグラウンドを誇る。ただし、研究当初では銀河団の端まで鉄の総量が求められた天体は2天体にすぎなかった。

(2) 銀河団よりも小さな銀河集団を銀河群と呼ぶ。これまでの観測では大きな銀河団ほど全質量に対するガスの割合が大きく、逆に星の割合が小さいことが報告されている。素直に解釈すると、大きな銀河団ほど、バリオンに対して星を少ししか形成せず、銀河群や小さな銀河団ほど星を多く形成してきたことになる。ただし、銀河群の端まで観測し、全質量とガスの総量を求めた観測は当初存在しなかった。また、星が合成した重元素量との関連は調べられていなかった。

(3) 銀河団全体のガス、重元素の質量を求める際に、銀河団ガスの密度にむらが大きいと、質量を過大評価してしまう。すざく衛星により、我々は銀河団の境界であるピリアル半径までのガスの温度、密度分布を調べてきた。その結果、外縁部の銀河団ガスの物理量、特にエントロピーが理論的予測からずれてきていることが問題になってきており、ガスの密度むらやガスが運動エネルギーを保持していることが、ずれの原因として提案されている。

## 2. 研究の目的

(1) 銀河の形態は環境に依存し、銀河密度が高い銀河団中心領域では楕円銀河やS0銀河など早期型銀河が多く、銀河団の外部のフィールド領域では、渦巻銀河が多い。銀河の星の初期質量関数や銀河団や銀河群でのバリオンの星になる割合は、環境に依存するのだろうか。本研究では、銀河団や銀河群、銀河の高温ガスの重元素の分布を手がかりに、星の初期質量関数や元素の合成時期、星形成率を調べ、星から銀河団に至るまでのバリオンの進化を理解する。

(2) 銀河団は銀河群などの合体や降着により成長すると考えられているため、銀河団には、最近降着してきた暗黒物質塊が残っているはずである。すざく衛星による銀河団外縁部のエントロピー異常の原因を探るため、ガス塊を直接探査することによりガスの密度むらの有無を検証する。さらに、銀河団ガスに

よる逆コンプトン効果の観測や重力レンズによる質量測定との比較し、密度や温度測定について検証する。

## 3. 研究の方法

(1) すざく衛星により観測された銀河団、銀河群のデータを解析することにより、銀河団に存在する鉄の総量を求める。近赤外線全天サーベイのデータを用いて、銀河の星の光度を求め比較する。銀河団、銀河群の鉄の分布と星の光度の比から、Ia型超新星爆発による元素合成や系の大きさとの依存性を調べる。

(2) すざく衛星により観測された銀河団、銀河群のデータを解析し、銀河団ガスのマグネシウム、ケイ素の組成を求め、鉄の組成と比較することにより、それぞれの元素の起源を調べる。銀河団、銀河群全体のケイ素の量に制限をつけ、星の初期質量関数について議論を行う。

(3) すざく衛星により観測された複数の銀河団について、ピリアル半径まで銀河団ガスの温度、密度、エントロピーを求め、宇宙背景放射の観測衛星であるPlanck衛星によって得られた銀河団ガスの圧力、重力レンズの観測から得られた銀河団の重力質量と比較した。

(4) すばる望遠鏡による重力レンズ観測によって発見されたかみのけ座銀河団外縁部の暗黒物質塊をすざく衛星により観測した。暗黒物質塊に付随する高温ガスからのX線放射を検出することにより、銀河団ガスとの相互作用によるガスの加熱や剥ぎ取りの様子を検証した。

## 4. 研究成果

(1) 銀河団では銀河の星で合成された鉄のほとんどは、銀河の中ではなく、銀河団ガス中に存在していることを発見した。さらに、鉄の多くは銀河団形成後ではなく、銀河形成後まもなく銀河の外に放出されたと結論した。一方、銀河群はピリアル半径まで観測しても、系統的に高温ガスや高温ガス中の鉄の総量が、暗黒物質や銀河光度に対して低いことを発見した。銀河群は銀河団に比べバリオンから星を形成する割合が多かったとすると、鉄などの元素も大量に合成したはずである。よって、バリオンからは銀河団でも銀河群でも同じような割合で恒星が形成され、同じように銀河間空間のガスを元素で汚染し、エネルギーも供給したため、重力ポテンシャルの浅い銀河群では、ガスを十分に集められなかったのではないかと解釈することができる。

(2) 中規模銀河団、銀河群ガスの中心からピリアル半径の半分までの酸素やマグネシウム

ム、ケイ素と鉄の比は太陽の比に近いことがわかった。すざく衛星の観測から得られたより外縁部の銀河団ガスの密度や鉄の組成値から銀河団中のケイ素の総量を制限することができ、太陽近傍と同一の星の初期質量関数で説明できることを示した。

(3) すざく衛星により測定された高温ガスの温度、密度から求めた圧力と Planck 衛星により測定された銀河団ガスの圧力はおおむねよく一致していた。銀河団ガスでは電子とイオンの相互作用により X 線が放射されるため、放射エネルギーは銀河団ガスの密度の二乗に比例する。つまり、Planck 衛星とすざく衛星の結果を比較することにより、銀河団ガスの密度の一様性は大きくないことになる。さらに、銀河団外縁部では重力レンズにより求められた質量が静水圧質量より系統的に大きいことがわかった。ガスが銀河団の外から落ちてくることによって解放された位置エネルギーの全部がガスの加熱に使われるのではなく、まだガスの流れのエネルギーとなっているとすると、銀河団外縁部のガスは理論予測ほど加熱されておらず、エントロピーが低いままであると解釈できる。

(4) 暗黒物質塊がもともと持っていた高温ガスが銀河団ガスにより剥ぎ取られていること、暗黒物質塊の前方で、銀河団ガスの加熱が起こっていることを発見した。銀河団の成長過程と銀河団ガスの加熱過程の検証につながる結果である。

## 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)

Okabe, N., Umetsu, K., Tamura, T., Fujita, Y., Takizawa, M., Matsushita, K., Fukazawa, Y., Futamase, T., Kawaharada, M., Miyazaki, S., Mochizuki, Y., Nakazawa, K., Ohashi, T., Ota, N., Sasaki, T., Sato, K., and Tam, S. I., Central mass profiles of the nearby cool-core galaxy clusters Hydra A and A478, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 456, 2016, 4475-4487, DOI:10.1093/mnras/stv2916 査読有 Terukina, A., Yamamoto, K., Okabe, N., Matsushita, K., and Sasaki, T., Testing a generalized cubic Galileon gravity model with the Coma Cluster, Journal of Cosmology and Astro-Particle Physics, 10, 2015, 064- DOI: 10.1088/1475-7516/2015/10/064 査読有

Sasaki, T., Matsushita, K., Sato, K., and Okabe, N., Suzaku Observations of Subhalos in the Coma Cluster, The Astrophysical Journal, 806, 2015, 123- DOI: 10.1088/0004-637X/806/1/123 査読有 Minezaki, T. and Matsushita, K., A New Black Hole Mass Estimate for Obscured Active Galactic Nuclei, The Astrophysical Journal, 802, 2015, 98- DOI: 10.1088/0004-637X/802/2/98 査読有 Okabe, N., Umetsu, K., Tamura, T., Fujita, Y., Takizawa, M., Zhang, Y.-Y., Matsushita, K., Hamana, T., Fukazawa, Y., Futamase, T., Kawaharada, M., Miyazaki, S., Mochizuki, Y., Nakazawa, K., Ohashi, T., Ota, N., Sasaki, T., Sato, K., and Tam, S., Universal profiles of the intracluster medium from Suzaku X-ray and Subaru weak-lensing observations, Publications of the Astronomical Society of Japan, 66, 2014, 99- DOI:10.1093/pasj/psu075 査読有 Sato, K., Matsushita, K., Yamasaki, N. Y., Sasaki, S., and Ohashi, T., Temperature and entropy profiles to the virial radius of the Abell 1246 cluster observed with Suzaku, Publications of the Astronomical Society of Japan, 66, 2014, 85- DOI:10.1093/pasj/psu061 査読有 Konami, S., Matsushita, K., Nagino, R., and Tamagawa, T., Abundance Patterns in the Interstellar Medium of Early-type Galaxies Observed with Suzaku, The Astrophysical Journal, 783, 2014, 8- DOI: 10.1088/0004-637X/783/1/8 査読有 Tamura, T., Yamasaki, N. Y., Iizuka, R., Fukazawa, Y., Hayashida, K., Ueda, S., Nakazawa, K., Ota, N., and Takizawa, M., Gas Bulk Motion in the Perseus Cluster Measured with Suzaku, The Astrophysical Journal, 782, 2014, 38- DOI: 10.1088/0004-637X/782/1/38 査読有 Sasaki, T., Matsushita, K., and Sato, K., Metal Distributions out to 0.5 r180 in the Intracluster Medium of Four Galaxy Groups Observed with Suzaku, The Astrophysical Journal, 781, 2014, 36- DOI: 10.1088/0004-637X/781/1/36 査読有 Simionescu, A., Werner, N., Urban, O., Allen, S. W., Fabian, A. C., Mantz, A., Matsushita, K., Nulsen, P. E. J., Sanders, J. S., Sasaki, T., Sato, T.,

Takei, Y., and Walker, S. A.,  
Thermodynamics of the Coma Cluster  
Outskirts, *The Astrophysical Journal*,  
775, 2013, 4- DOI:  
10.1088/0004-637X/775/1/4 査読有  
Akamatsu, H., Inoue, S., Sato, T.,  
Matsusita, K., Ishisaki, Y., and  
Sarazin, C. L., *Suzaku X-Ray  
Observations of the Accreting NGC  
4839 Group of Galaxies and a Radio  
Relic in the Coma Cluster*,  
*Publications of the Astronomical  
Society of Japan*, 65, 2013,  
DOI:10.1093/pasj/65.4.89 査読有  
Ichikawa, K., Matsushita, K., Okabe,  
N., Sato, K., Zhang, Y.-Y., Finoguenov,  
A., Fujita, Y., Fukazawa, Y.,  
Kawaharada, M., Nakazawa, K.,  
Ohashi, T., Ota, N., Takizawa, M.,  
Tamura, T., and Umetsu, K.,  
*Suzaku Observations of the Outskirts  
of A1835: Deviation from Hydrostatic  
Equilibrium*, *The Astrophysical  
Journal*, 766, 2013, 90- DOI:  
10.1088/0004-637X/766/2/90 査読有

〔学会発表〕(計 27 件)

「すざく」による渦巻銀河 M31 中心部のアバダンス比と星/ガスの分布, 日本天文学会 2016 年春季年会, 首都大学東京(東京都八王子市), 長谷川俊介, 松下恭子, 佐藤浩介 (東理大理), 小波さおり (首都大理工), 高橋弘充 (広島大理), 2016, 3, 14,

銀河団方向の X 線源の数と銀河団観測への影響, 日本天文学会 2016 年春季年会, 首都大学東京(東京都八王子市), 栗山翼, 松下恭子, 佐藤浩介, 佐々木亨 (東京理科大学), 2016, 3, 14,

「すざく」で観測した銀河団・銀河群のガス質量と鉄質量-銀河光度比, 日本天文学会 2016 年春季年会, 首都大学東京(東京都八王子市), 佐々木亨, 松下恭子, 佐藤浩介, 栗山翼, 菅野祐 (東京理科大学), 2016, 3, 14,

「ASTRO-H」SXS による観測シミュレーションを用いた銀河団中心部における共鳴散乱の影響の評価, 日本天文学会 2016 年春季年会, 首都大学東京(東京都八王子市), 古川愛生, 松下恭子, 佐藤浩介 (東京理科大学), 深澤泰司, 枝廣育実(広島大学), 2016, 3, 14,

「すざく」衛星で観測されたピリアル半径までの Abell 262 銀河団の鉄質量-銀河光度比, 日本天文学会 2015 年秋季年会, 甲南大学(兵庫県神戸市), 菅野祐, 松下恭子, 佐々木亨, 佐藤浩介 (東京理科大学), 一戸悠人 (ISAS/JAXA), 2015, 9, 9,

「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(兵庫県神戸市), 伊東雅史, 松下恭子, 佐藤浩介 (東京理科大学), 太田直美 (奈良女子大学), 2015, 9, 9,

かみのけ座銀河団の弱い重力レンズサブハロー周辺の温度構造, 日本天文学会 2015 年秋季年会, 甲南大学(兵庫県神戸市), 佐々木亨, 松下恭子, 佐藤浩介 (東京理科大学), 岡部信広 (広島大学), 2015, 9, 9,

Suzaku Observations of Subhalos in the Coma Cluster, *Astroparticle View of Galaxy Clusters*, Hiroshima University(広島県東広島市), Toru Sasaki, Kyoko Matsushita, Nobuhiro Okabe, Kosuke Sato, 2015, 3, 25,

Chemical evolution of galaxy clusters and groups observed with Suzaku, *Astroparticle View of Galaxy Clusters*, Hiroshima University(広島県東広島市), Kosuke Sato, Kyoko Matsushita, Toru Sasaki, 2015, 3, 25,

Suzaku observations of cluster outskirts, *Astroparticle View of Galaxy Clusters*, Hiroshima University (広島県東広島市), Kyoko Matsushita, 2015, 3, 25,

活動銀河核の中性 FeK $\alpha$  輝線幅の系統的解析による放射領域推定と時間変動性の発見, 日本天文学会 2015 年春季年会, 大阪大学(大阪府吹田市), 伊藤由裕, 松下恭子, 佐藤浩介 (東京理科大学), 峰崎岳夫 (東京大学天文学教育研究センター), 2015, 3, 21,

「すざく」による大規模フィラメント上の銀河団 AWM 7 の鉄質量-銀河光度比の方向依存性, 日本天文学会 2015 年春季年会, 大阪大学(大阪府吹田市), 横田佳奈, 松下恭子, 佐藤浩介, 佐久間絵理, 佐々木亨, 阿部雄介, 栗山翼 (東京理科大学), 石崎欣尚 (首都大学東京), 星野晶夫 (立教大学), 2015, 3, 18,

「すざく」による NGC 1550 銀河群のピリアル半径付近までの鉄質量-銀河光度比とエンタロピー分布, 日本天文学会 2015 年春季年会(大阪府吹田市), 大阪大学, 佐々木亨, 松下恭子, 佐藤浩介, 阿部雄介, 横田佳奈 (東京理科大学), 2015, 3, 18,

「すざく」衛星を用いた銀河団外縁部でのアバダンスの不定性の評価, 日本天文学会 2015 年春季年会, 大阪大学(大阪府吹田市), 阿部雄介, 松下恭子, 佐藤浩介, 佐々木亨 (東京理科大学), 2015, 3, 18,

「すざく」衛星によって観測された渦巻銀河 M31 中心部の重元素組成比, 日本天文学会 2014 年秋季年会, 山形大学(山形県山形市), 長谷川俊介, 松下恭子, 佐

- 藤浩介 (東理大理), 小波さおり (首都大理工), 高橋弘充 (広島大理), 2014, 9, 12,  
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(山形県山形市), 栗山翼, 佐藤浩介, 松下恭子 (東京理科大学), 赤松弘規 (SRON), 大橋隆哉 (首都大学東京), 藤田裕 (大阪大学), 川原田円, 田村隆幸 (ISAS/JAXA), 中澤知洋 (東京大学), 岡部信広 (IPMU), 太田直美 (奈良女子大学), 滝沢元和 (山形大学), 2014, 9, 11,  
かみのけ座銀河団に見つかったサブハローの「すざく」による観測, 日本天文学会 2014 年秋季年会, 山形大学(山形県山形市), 佐々木亨, 松下恭子, 佐藤浩介 (東京理科大学), 岡部信広 (東京大学/Kavli IPMU), 2014, 9, 11,  
ASTRO-H, Future Directions in Galaxy Cluster Surveys, Paris (France), Kyoko Matsushita, 2014, 6, 23,  
巨大銀河団のピリアル半径までのガス質量、鉄質量と銀河光度の比, 日本天文学会 2014 年春季年会, 国際基督教大学 (東京都三鷹市), 佐々木亨, 松下恭子, 佐藤浩介, 阿部雄介, 横田佳奈, 2014, 3, 19,  
Metal distributions out to 0.5 r180 in the intracluster medium of four galaxy groups observed with Suzaku, Suzaku-MAXI 2014 Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, 愛媛大学 (愛媛県松山市), Sasaki, T., Matsushita, K., Sato, K., 2014, 2, 19,
- 21 Abundance patterns in the Interstellar Medium of early-type galaxies observed with Suzaku, Suzaku-MAXI 2014 Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, 愛媛大学 (愛媛県松山市), Konami, S., Matsushita, K., Tamagawa, T., 2014, 2, 19,
- 22 Suzaku observations of cluster outskirts, Suzaku-MAXI 2014 Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, 愛媛大学 (愛媛県松山市), Kyoko Matsushita, 2014, 2, 19,
- 23 Entropy and pressure profiles of Abell 478 out to the virial radius with Suzaku, Suzaku-MAXI 2014 Expanding the Frontiers of the X-ray Universe, 愛媛大学 (愛媛県松山市), Y. Mochizuki, K. Matsushita, K. Sato, K. Ichikawa, N. Okabe, T. Sasaki, A. C. Fabian, S. Walker, Y. Fujita, Y. Fukazawa, M. Kawaharada, Y. Kato, K. Nakazawa, T. Ohashi, N. Ota, T. H. Reiprich, T. Tamura, M. Takizawa, and K. Umetsu, 2014, 2, 19,
- 24 「ASTRO-H 衛星搭載 SXS による銀河団観測の展望」, 「銀河団の物理」ワークショップ, 東京理科大学 (東京都新宿区), 松下恭子, 2013, 12, 28,
- 25 「すざく」による M87 の重元素分布の観測 (2), 日本天文学会 2013 年秋季年会, 東北大学 (宮城県仙台市), 飯島律子, 三石郁之, 大橋隆哉 (首都大学東京), 松下恭子, 佐藤浩介 (東京理科大学), 2013, 9, 12,
- 26 「すざく」で観測された AWM7 銀河団外縁部の方向依存性と鉄の分布, 日本天文学会 2013 年秋季年会, 東北大学 (宮城県仙台市), 横田佳奈, 松下恭子, 佐藤浩介, 佐久間絵理 (東理大), 石崎欣尚 (首都大), 星野晶夫 (立教大), 2013, 9, 12,
- 27 「すざく」衛星によって観測されたケンタウルス座銀河団の重元素分布と鉄質量-銀河光度比, 日本天文学会 2013 年秋季年会, 東北大学 (宮城県仙台市), 阿部雄介, 松下恭子, 佐藤浩介, 佐々木亨 (東京理科大学), 2013, 9, 12,

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松下 恭子 (MATSUSHITA, Kyoko)  
東京理科大学・理学部第一部・教授  
研究者番号: 50366423

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

佐藤 浩介 (SATO, Kosuke)  
東京理科大学・理学部第一部・助教  
研究者番号: 50453840

### (4) 研究協力者

佐々木 亨 (SASAKI, Toru)  
市川 和也 (ICHIKAWA, Kazuya)  
小波 さおり (KONAMI, Saori)