

「すざく」で見た銀河団とその外縁部

松下 恭子

〈東京理科大学理学部第一部物理学科 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3〉

e-mail: matusita@rs.kagu.tus.ac.jp



すざく衛星はバックグラウンドが低いいため、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捉えることが可能になりました。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ます。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りました。

1. はじめに

銀河団は銀河が数百個から数千個集まった天体として発見されました。しかし、この銀河団のうち銀河はごく一部にすぎません。銀河と銀河の間を銀河の質量の数倍にもなる高温のガスが満たしており、強いX線を放射しています。このガスの温度は数百万度から1億度とひじょうに高いものです。このガスを銀河団ガスと呼びます。銀河団では原子のほとんどは、星ではなく銀河団ガスとして存在しているのです。このような大量のガスがかつて銀河の中に存在したとは考えられませんが、つまり、銀河団ガスのほとんどは一度も星にも銀河にもなったことのない宇宙のはじまりのときそのままの原始ガスなのです。さらに驚くべきことに、銀河団の質量は銀河や銀河団ガスよりもずっと大きいことがわかっています。銀河団ガスは銀河団に重力によって閉じ込められています。したがって、ガスの温度や密度を測定すれば銀河団の質量を求めることができます。その結果、銀河団には、大量のガスでも星でもない暗黒物質が含まれていることがわかります。この暗黒物質が重力により集まり銀河や銀河団のような天体を形成すると考えられています。本記事では、すざく

衛星により銀河団を観測して得られたさまざまな成果を紹介します。

2. 銀河団外縁部のエントロピー問題

銀河団は、重力で集まっている天体としては宇宙で最大の構造です。宇宙の中では、銀河は蜘蛛の巣のように分布していますが、銀河団はこの蜘蛛の巣の結節点にあります。現在の宇宙論では、暗黒物質の重力により小さい天体が最初に形成され、その後、小さな天体が集まって大きな天体が形成されると考えられています。蜘蛛の巣の糸状の領域から物質が結節点にある銀河団に落ちてきたり、銀河団同士が合体したりしながら銀河団が成長していくと予想されていました。銀河団のような巨大な天体が形成されるためにはとても長い時間、宇宙の年齢と同じぐらいの時間がかかり、ゆえに、銀河団外縁部は現在も形成過程にあることになります。このように、銀河団外縁部は、銀河団の進化を理解するうえでひじょうに重要な領域ですが、これまでは観測が困難でした。すざく衛星打ち上げ以前から活躍してきたアメリカのChandra衛星やヨーロッパのXMM-Newton衛星は太陽風などの高エネルギー粒子によるバックグラウンドが高く、しかも、その強度が激しく時間

変動する問題がありました。一方、すぎく衛星が地球を周回する軌道は低高度のため、地球の磁気圏に守られバックグラウンドが低くなっています。その結果、銀河団外縁部の微弱なX線放射を検出できるようになり、銀河団の形成現場を直接調べることができるようになりました。

この研究に重要な物理量がエントロピーです。銀河団ガスの温度や密度は膨張や圧縮により変化しますが、エントロピーは可逆過程の場合には変化しません。エントロピーが上昇するのは衝撃波などにより加熱が起こったときということになります。つまり、銀河団ガスのエントロピーの測定により銀河団ガスの熱史を探ることができるのです。銀河団に物質が落ちてくれば衝撃波が発生し、銀河団ガスが加熱されます。銀河団が成長し巨大化するに従い、この衝撃波は強くなるはずで、そのため、銀河団形成初期に形成された銀河団中心部に比べ、最近形成された銀河団外縁部のほうが、強い衝撃波によって加熱されたことになり、エントロピーは上昇すると予想されています¹⁾。つまり、銀河団中心からの距離が大きくなればなるほど、エントロピーは大きくなるはずなのです。

観測的には、銀河団のエントロピーを反映するパラメーター K を(ガスの温度)/(ガスの密度)^{2/3}と定義します。 K は熱力学的な理想気体のエントロピーから対数や定数を除いたものと一致します。すぎく衛星以前の観測では、中心領域を除き r_{500} までは、観測されたエントロピーパラメーター K は理論予測とよく一致していました²⁾。ここで、 r_{500} とは、内側の平均密度が宇宙の臨界密度の500倍である半径を意味します。銀河団の場合、端であるビリアル半径はおおよそ $2r_{500}$ あたりになります。

すぎく衛星により、ビリアル半径まで銀河団ガスのエントロピーを求めることができました³⁾⁻¹³⁾。その結果、図1のように、 r_{500} より外側ではビリアル半径に近づいてもエントロ

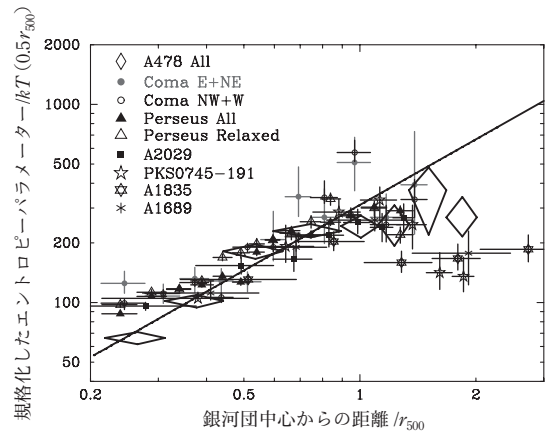


図1 すぎく衛星により観測された銀河団のエントロピーパラメーター K の空間分布^{4), 8)-13)}。縦軸は、 $0.5r_{500}$ での温度、横軸は、 r_{500} で規格化。銀河団の端にあたるビリアル半径は $2r_{500}$ あたり。実線は数値シミュレーションによる予測。

ピーパラメーターが上昇しないという結果が得られることになりました。理論予測と反する結果になります。銀河団が巨大化するに従い解放されたはずの重力エネルギーは一体どこに消えたのでしょうか。観測されたエントロピーを過小評価している^{6), 8), 9), 11), 12)}、電子の温度がイオンの温度に比べ低い⁵⁾、銀河団ガスの運動エネルギーになっているなど^{3), 4), 7), 10), 13)}、そもそもすぎくによる測定が間違っているなど、さまざまな議論が起きました。

すぎく衛星の成果の後、Planck衛星の成果が出てきました¹⁴⁾。銀河団では銀河団ガスの高温の電子と宇宙背景放射の光子の散乱により、宇宙背景放射のスペクトルが歪みます。この効果は銀河団ガスの温度と密度の積、すなわち、銀河団ガスの圧力を反映します。すぎ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ました^{10), 13), 15)}。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2乗に比例します。つまり、Planck衛星と

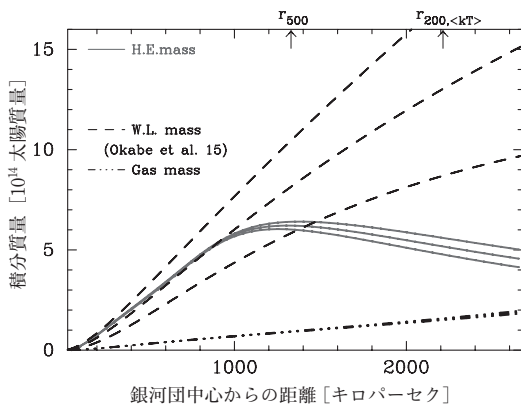


図2 Abell478銀河団の質量分布¹³⁾。破線が重力レンズにより求められた重力質量の範囲。実線は、すざく衛星による静水圧平衡質量。三点破線は、積分ガス質量。

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なども調べることができます。

もし、銀河団ガスが重力のもとで静かに釣り合っているとすると、銀河団ガスの圧力の傾きと重力の釣り合いから重力すなわち、銀河団全体の重力を担う物質の質量分布を求めることができます。この質量を静水圧平衡質量と呼びます。また、銀河団はとても巨大なために背後にある銀河からの光を重力により曲げてしまいます。この効果を重力レンズと呼びます。すばる望遠鏡は銀河団の重力レンズの測定に威力を発揮します。銀河団外縁部、 r_{500} より外では重力レンズにより求められた質量が静水圧平衡質量より系統的に大きいことがわかりました^{4), 10), 13), 15)} (図2)。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のかもしれませんが。その結果、銀河団外縁部のガスは理論予測ほど加熱されておらず、その結果としてエントロピーが低いままなのかもしれません。

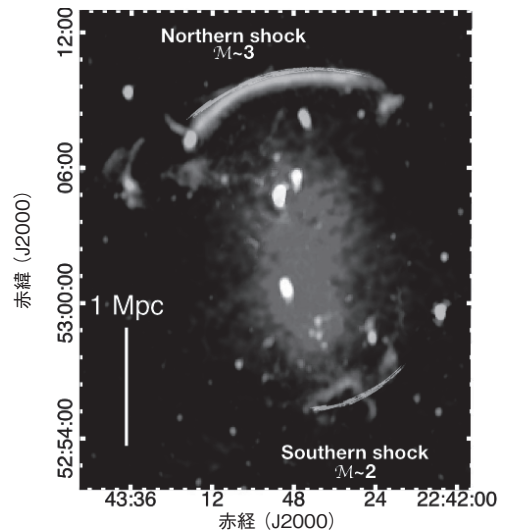


図3 CIZA2242銀河団の電波画像¹⁹⁾。巨大な円弧状の構造が電波レリク。

3. 衝撃波と粒子加速

銀河団の成長に伴い解放される莫大な重力エネルギーの行方は物理的にも天文学的にも非常に興味深い問題です。特に、巨大銀河団同士の合体は宇宙最大のエネルギー現象になります。一部は銀河団ガスの加熱に使われ、一部はまだ大規模な運動のエネルギーとして存在し、さらに一部は粒子の加速に使われているのかもしれませんが。

一部の銀河団外縁部には、図3のように円弧状の電波放射領域（電波レリクと呼ぶ）が存在することがあります。このような電波を放射するためには非常に高エネルギーの荷電粒子と強い磁場が必要になります。銀河団同士の合体により強い衝撃波が発生すると、衝撃波により磁場が圧縮され粒子が加速されると予想されます。そのため、電波レリクは銀河団の成長に伴う衝撃波ではないかと考えられていました。しかし、この電波レリクは銀河中心からの距離が1-2 Mpcと銀河団外縁部に位置しているため銀河や銀河団ガスの密度が低く、これまで可視光、X線による観測は困難でした。そのため、高エネルギー粒子の起源

に関して直接的な観測的証拠は得られていませんでした。

XMM-Newton衛星により、Abell3667銀河団の電波レリックの位置の銀河団ガスに温度と密度の不連続面があることが初めて発見されました¹⁶⁾。この不連続面は衝撃波面の存在を示しています。さらに衝撃波において粒子加速が起きていることも示唆することになります。その後、すぎく衛星により、Abell3667銀河団をはじめ複数の銀河団の電波レリックの位置に衝撃波が存在することが確認されました¹⁷⁾⁻¹⁹⁾。それだけではなく、そのうち四つの電波レリックでは電波観測とX線観測から求められた衝撃波のマッハ数もよく一致していました。ただ、一部のレリックでは単純な衝撃波加速モデルでは電波観測とX線観測から求められたマッハ数が一致しない問題も残っています。この問題を解決するためにすぎく衛星と低周波電波望遠鏡における共同観測も進んでいます。銀河団で観測されるような低マッハ数 ($M < 5$) の衝撃波による粒子加速はまだ未解明の部分も多く、今後の研究が期待されます。また銀河団における粒子加速のみならず、星間現象や太陽風による加速の研究にもつながっていき、他の分野にもインパクトを及ぼしうることになります。

銀河団によっては、円弧状ではなく大きく広がった電波放射が観測されることがあります。電波放射を出すような高エネルギー粒子が存在すると、宇宙背景放射の光子と衝突して、高エネルギーのX線（硬X線と呼ばれます）をも放射することになります。電波放射の強度は高エネルギー粒子の量と磁場の強さに比例し、一方、硬X線の強度は高エネルギー粒子の量に比例するために、ある観測された電波放射に対し、硬X線放射が明るければ磁場は弱く、逆に硬X線放射が暗ければ磁場が強いということになります。これまでいくつかの硬X線天文衛星により、この硬X線放射を検出したという報告がなされてきました。すぎく衛

星にも硬X線望遠鏡が搭載されています。すぎく衛星で電波ハローを観測したところ硬X線は検出できず、これまでに検出されたと報告された値に比べても低い上限値が得られました²⁰⁾⁻²²⁾。この結果は銀河団の磁場がかなり強いことを意味します。実は、すぎく衛星硬X線望遠鏡により衝突銀河団から検出されたのは、20億度を超える超高温のガスでした^{22), 23)}。最近、巨大な銀河団同士が激しく衝突した結果ではないかと考えられています。

4. 銀河団ガスの重元素とその起源

銀河団ガスに鉄などの元素が大量に含まれているという発見は大変驚くべきものでした。図4はすぎく衛星で観測したケンタウルス座銀河団の中心部のスペクトルです²⁴⁾。酸素、鉄、マグネシウム、ケイ素、硫黄、アルゴン、カルシウムからの輝線がはっきりと検出されています。ガスの温度が数千万度になると酸素や鉄などは高階電離され、特定のエネルギーのX線を強く放射します。X線スペクトルでは鉄の輝線が最もよく目立ちます。その結果、これまで銀河団ガスの鉄の量がよく調べられてきました。すぎく衛星以前の観測からは、およそ $\sim 0.5r_{500}$ より内側だけでも、銀河団ガス中の鉄の質量は、銀河の星に含まれる元素の

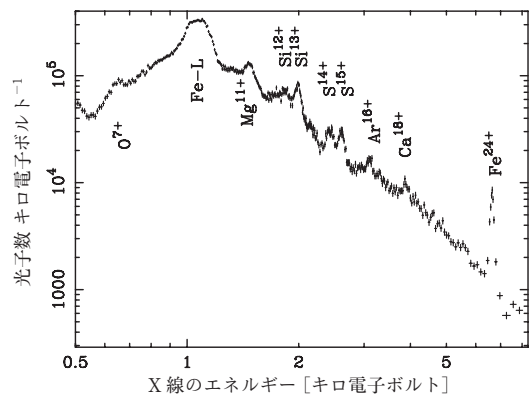


図4 すぎく衛星により観測されたケンタウルス座銀河団の中心領域のX線スペクトル²⁴⁾。

質量に匹敵することがわかっていました²⁵⁾。銀河団では、銀河の中で超新星により合成された元素の数割が新たに生まれる星に取り込まれるのではなく、銀河内に星間ガスとしてとどまるのではなく、銀河の重力ポテンシャルから銀河間空間へと脱出したこととなります。そもそも私たちの体を作っている元素や地球を作っている元素はいったいどのようにして合成されたのでしょうか？酸素、鉄のようなわれわれの身の回りにある元素のほとんどは超新星爆発によって合成され宇宙空間にまき散らされたものです。超新星爆発とは夜空に突然明るく輝く星であり、ある種の恒星が死ぬときの大爆発です。太陽よりもずっと重い恒星が寿命を迎えたときには重力崩壊型の超新星爆発を起こし、白色矮星が限界質量に達したときにIa型超新星爆発を起こします。重力崩壊型超新星は鉄に比べて大量の酸素、マグネシウム、ケイ素などの元素を、Ia型超新星爆発は大量の鉄やケイ素などを星間空間にばらまきます。宇宙にどのような元素がどれだけ存在するのかがわかれば、今までにどのような超新星がどれだけ起こったのか、つまり、どのような星がどれだけ生まれて死んでいったのかの手がかりを得ることができます。

4.1 銀河団全体の鉄の総量

すざく衛星により銀河団の端であるピリアル半径まで鉄の分布を調べることが可能になり、銀河団ガス中の鉄と水素の比は銀河団外縁部でもあまり低下していないことがわかってきました^{6), 11), 26)-28)}。図5はペルセウス銀河団における、ある半径より内側の銀河団ガス中の鉄質量と銀河光度の比（鉄質量-銀河光度比）をプロットしたものです²⁸⁾。この図において鉄質量-銀河光度比は銀河団の中心から離れるほど増加していることは、鉄が銀河団中の銀河に比べはるかに外側にまで広がっていることを意味します。合成された鉄が合成した銀河の周辺にとどまっているとすると、鉄質量-銀河光度比は半径によらず一定になるはずですが。さらに、現在のIa超新星の爆発

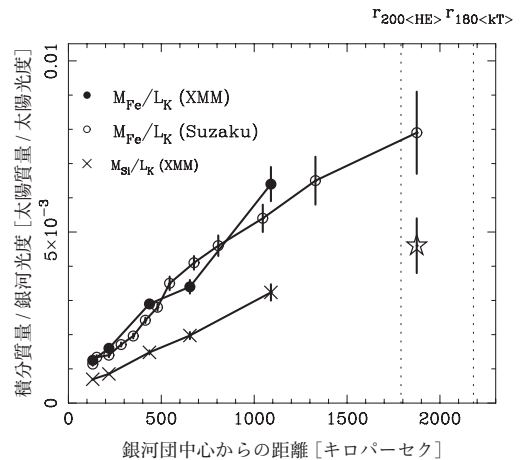


図5 ペルセウス銀河団ガス中の積分鉄質量（○または●）とケイ素の質量（×）とKバンドの積分銀河光度の比²⁸⁾。☆は、すざく衛星により観測された鉄の組成と、ガス密度から、ケイ素の質量/銀河光度比を推定した値。

率を宇宙年齢かけて積分しても銀河団ガスに含まれる鉄の量の1割にもなりません。一方、重力崩壊型超新星により鉄が合成されたとすると、われわれの銀河系よりもはるかに大量の大質量星が形成されたことになってしまいます。おそらく、銀河団の鉄は銀河の星形成後まもなく、現在よりもはるかに数が多かったIa型超新星爆発によって大量に合成さればらまかれ銀河間ガスを汚染したのでしょう。その後、銀河団形成に伴い銀河が中心に集中すれども、圧力をもった銀河団ガスは銀河より広がって分布しているのではないのでしょうか。

4.2 重力崩壊型超新星の重元素への寄与と星の初期質量関数

現在の銀河団の銀河の多くは渦巻銀河であるわれわれの天の川とは違い楕円銀河やレンズ状銀河です。これらの銀河では、近年星形成はあまり行われておらず、寿命の長い小質量星がほとんどです。このような楕円銀河はこれまでどのようにして進化してきたのでしょうか。われわれの銀河系と同じような歴史をたどってきたのでしょうか。

特に、星形成時の質量分布を示す星の初期質量関数は銀河によって違うのか普遍的なのかは天文学の主要な課題の一つです。初期質量関数が近似的にべき関数で表されるとして、その傾きを求めることを考えてみましょう。

星形成活動の直後には寿命の短い大質量星が重力崩壊型超新星を起こし、主に酸素、マグネシウム、ケイ素などの重元素をばらまきます。一方、現在の銀河の光度は主に寿命の長い小質量星によります。つまり、銀河団に含まれる酸素やケイ素などの質量と銀河の光度の比はかつて存在した大質量星とまだ生き残っている小質量星の数の比、すなわち、星の初期質量関数を反映することになるのです。初期質量関数のべきの傾きが1異なると、ケイ素や酸素の質量／銀河光度比は20倍違うと推定されています²⁹⁾。鉄はIa型超新星により大量に合成されるため、重力崩壊型超新星により合成された重元素を調べるためには、酸素やマグネシウム、ケイ素など重力崩壊型超新星により大量に合成される元素の量の測定が必要です。

明るい銀河団の中心部を除き、すざく衛星により初めて銀河団ガスの酸素やマグネシウムの元素の分布の測定ができるようになりました^{24), 30)-38)}。0.5 r_{500} までは、酸素やマグネシウム、ケイ素と鉄の比は、太陽の比に近いことがわかってきました³⁰⁾⁻³²⁾。最も明るい銀河団であるペルセウス銀河団では、XMM-Newton衛星をも用いてケイ素と鉄の比を求めた結果、 r_{500} まではやはり太陽の比に近い結果となりました²⁸⁾。 r_{500} より外側のケイ素の量を求めることはできませんが、すざく衛星によって求められたガスの密度や鉄の組成から、値を制限することができます。その結果、ペルセウス銀河団全体の銀河団ガスケイ素の質量は、銀河団銀河中に含まれるケイ素の質量の数倍もありました。さらに、銀河団全体のケイ素質量-銀河光度比は、星の初期質量関数をわれわれの銀河系と同じと仮定した値に比べ大きな矛盾はないことがわかりました。われわれの銀河系でも

銀河団でも、同じ星の初期質量関数の場合Ia型超新星を含め多くの超新星がすでに爆発済であれば、元素組成比はほぼ同じであると予想されず。銀河団ガス中に含まれる元素を合成した重力崩壊型超新星とIa型超新星の数の比は、われわれの銀河系とあまり変わらないことがわかります。このように、銀河団ガスの元素の分布は銀河団の主要メンバーである楕円銀河でも、星の初期質量関数はわれわれの銀河系と同じであるとしたときと大きな矛盾はないことがわかってきました。

参考文献

- 1) Tozzi P., Norman C., 2001, ApJ 546, 63
- 2) Pratt G. W., et al., 2006, A&A 446, 429
- 3) Bautz M. W., et al., 2009, PASJ 61, 1117
- 4) Kawaharada M., et al., 2010, ApJ 714, 423
- 5) Hoshino A., Henry J. P., et al., 2010, PASJ 62, 371
- 6) Simionescu A., et al., 2011, Science 331, 1576
- 7) Sato T., Sasaki T., Matsushita K., et al., 2012, PASJ 64, 95
- 8) Walker S. A., et al., 2012, MNRAS 424, 1826
- 9) Walker S. A., et al., 2012, MNRAS 422, 3503
- 10) Ichikawa K., et al., 2013, ApJ 766, 90
- 11) Simionescu A., et al., 2013, ApJ 775, 4
- 12) Urban O., et al., 2014, MNRAS 437, 3939
- 13) Mochizuki Y., Matsushita K., et al., 2015, PASJ, submitted
- 14) Planck Collaboration, et al., 2013, A&A 550, A131
- 15) Okabe N., et al., 2014, PASJ 66, 99
- 16) Finoguenov A., et al., 2010, ApJ 715, 1143
- 17) Akamatsu H., et al., 2012, PASJ 64, 49
- 18) Akamatsu H., Kawahara H., 2013, PASJ 65, 16
- 19) Akamatsu H., et al., 2015, A&A, in press
- 20) Kawano N., et al., 2009, PASJ 61, 377
- 21) Wik D. R., et al., 2009, ApJ 696, 1700
- 22) Nakazawa K., et al., 2009, PASJ 61, 339
- 23) Ota N., et al., 2008, A&A 491, 363
- 24) Sakuma E. et al., 2011, PASJ 63, 979
- 25) Makishima K., et al., 2001, PASJ 53, 401
- 26) Fujita Y., et al., 2008, PASJ 60, 343
- 27) Werner N., et al., 2013, Nature 502, 656
- 28) Matsushita K., et al., 2013, ApJ 764, 147
- 29) Renzini A., 2005, The Initial Mass Function 50 Years Later 327, 221
- 30) Matsushita K., et al., 2007, PASJ 59, 327
- 31) Sato K., et al., 2007, PASJ 59, 299
- 32) Sato K., et al., 2007, ApJL 667, L41
- 33) Sato K., et al., 2008, PASJ 60, 333

- 34) Sato K., et al., 2009, PASJ 61, 353
- 35) Sato K., et al., 2009, PASJ 61, 365
- 36) Komiyama M., et al., 2009, PASJ 61, 337
- 37) Matsushita K., et al., 2013, PASJ 65, 10
- 38) Sasaki T., et al., 2014, ApJ 781, 36

Suzaku Observations of Clusters of Galaxies

Kyoko MATSUSHITA

Department of Physics, Tokyo University of Science, 1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8601, Japan

Abstract: Thanks to the low and stable particle background of the X-ray Imaging Spectrometer *Suzaku* has enabled us to unveil the intracluster medium (ICM) beyond r_{500} . Since the cluster outskirts are located around the boundary of the cosmological environment, the gas in the outskirts would be significantly affected by structure formation. With *Suzaku*, we discuss thermal and dynamical structure of the ICM. We constrained the ratio of the iron-mass and Si-mass in the ICM to the stellar light out to the virial radius. We discuss the early Fe enrichment of clusters of galaxies and initial mass function of stars in cluster galaxies.