

遠方銀河団の銀河種族とAGN活動性

田中賢幸

〈国立天文台 〒151-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: masayuki.tanaka@nao.ac.jp



宇宙で最も巨大な重力的に束縛された系である銀河団は、宇宙論はもとより銀河進化を探るうえでも興味深い天体の一つである。近年の多波長サーベイにより、赤方偏移1.5を超えるような銀河団の探査が可能になった。われわれの遠方銀河団探査から得られた知見を、銀河進化の観点から簡単に紹介し、今後の展望をまとめたいと思う。

1. 宇宙の初め

日本最古の歴史書である古事記が編纂されてから実に1,300年になる。それにかこつけたのか、最近はその現代語訳が書店で平積みされていることもある。原書は3巻にわたり、日本創造を記した書物と言えるのだと思うのだが、恥ずかしながら私は一度も読んだことがなかった。先日、偶然立ち寄った書店で現代語訳の一冊が目にとまり、ぱらぱらとページをめくってみた。序文の冒頭で手が止まった。「そもそも遠い昔の事、造化の気がしだいに凝り固まっても、いまだに外に現れてくるには至らず、したがって名前もなければ動きもない、誰もその形を知らないというそもそもの宇宙の初めに、天と地とが別れ…(中略)…三柱の神が宇宙造化の緒(いとぐち)を作り…」¹⁾。いわゆる天地創造である。この「天地(あめつち)」が当時の人々にとって世界のすべてなのだが、このようによくわからないところからその天地は生まれてきたというのである。これは当時の宇宙論とも言えるかもしれない。その現代語訳では序文に続いて天地創造を詳しく記した最初の章題に「宇宙の初め」とあてられていた。

私が天文学というものを志し始めた頃の、私自身の宇宙観はまさにこのようなものではなかった

か。宇宙とはなんとなくぼんやりしたもので、わかることとわからないことの区別すらなかっただろう。幸か不幸か、その後、天文学で理学博士を取得し、学問を生業とするようになってしまった。2013年春季年会で研究奨励賞の賞状を受け取る際、当然緊張はしていたのだが、頭の中ではなぜか冷静に昔の自分を思い起こしていた。まさかこのようなことになろうとは、天地創造のような宇宙像をもっていた昔の自分では全く想像できなかっただろう。

その受賞は私が近年行っていた遠方銀河団研究によるものである。ここではその内容をかいつまんでまとめてみたいと思う。今までに何度かEU-REKAへ投稿して、その都度書いてきたことではあるが、専門家以外の方にもわかるように内容を簡単にすると、科学的な正確性が多少失われることもある。今回も語弊のない表現を心掛けたつもりであるが、専門家の方々には細かい点において広い心で見てくださいと思う。

2. 遠方銀河団概観

さて、まずは銀河団をおさらいしたい。宇宙初期に存在した小さな密度揺らぎが重力的に時間とともに成長し、もともと密度の高かった場所はより密度が高くなり、もともと低かった部分は密度

の高い部分へ引っ張られるように成長する。こうして蜘蛛の巣のような宇宙の大規模構造を形成するのであるが、この構造の中には重力的に束縛された個々の系（ハロー）が多く存在している。こういった系の中に銀河が存在していると思われていて、重力的に束縛された系の最も巨大なものが銀河団である*1。銀河団は蜘蛛の巣の糸と糸の結び目にしばしばあり、ダークマター、高温プラズマ、それと多くの銀河がその主な構成要素である。銀河が高速で運動する強い重力場や、銀河を取り囲む高温プラズマは銀河にとって「厳しい環境」と言える。これが銀河団が銀河進化の観点からおもしろい理由の一つであろう。

銀河団には赤い早期型銀河が多くいることが、近傍銀河団の観測から知られている^{2),3)}。これは銀河団に属していない、いわゆるフィールドの銀河がしばしば星形成を活発に行っている晩期型銀河であることと比べると、顕著な違いである。この観測結果は銀河団という環境が銀河進化に影響を与えたことを如実に示している。上で述べたように銀河団は厳しい環境であるので、これはある意味当然なのかもしれないが、いつ、どのようにして銀河進化に影響を与えたのか、という定量問題ははまだ未解決の難問で、これはハッブル系列の起源に直結する重要問題である。

これに対する観測的アプローチの一つとして、銀河団を時間の関数として調べ、その進化を明らかにすることが考えられる。実際、私はさまざまな赤方偏移にある銀河団を調べてきたが、ここでは最遠方の銀河団に着目したい。

銀河団はさまざまな手法・波長で探査することができるが、ROSATやXMM-Newton, ChandraといったX線衛星が遠方銀河団をリードしてきたと言ってよい。これは高温プラズマの熱制動放射

で銀河団がX線で明るいことによる。しかしながら、遠方銀河団がまれな天体であるうえ、浅い露出では検出できないことや、X線だけでは銀河団を同定することは難しく、可視や近赤外でフォローアップ観測が必要になることから、2006年に $z=1.45$ の銀河団が発見されて以降⁴⁾、しばらくの間はそれが最遠方であった。そこでわれわれは視点を変えて、いわゆるディープフィールドにおいてすでに存在している非常に深いX線と可視・近赤外データをすべて組み合わせて用いることで、 $z=1.62$ 銀河団を発見しその膠着状況を打開した。詳細はすでにEUREKAで報告しているのでそちらを参照されたい^{5),6)}。その後、さらに別の遠方銀河団を発見するのだが、これが予想外におもしろい天体であった。

3. もう一つの遠方銀河団

われわれ人類が手にした最も深いX線データはChandra Deep Field Southという領域にある。ここには現在までに実に4 Ms（約1,100時間）というChandra衛星の時間が投入されていて、さらにXMM-Newtonでも3 Ms観測されている。当然のようにハッブル宇宙望遠鏡による深い撮像データもあり、その他の大望遠鏡でも多くのデータが撮られている。X線のみに限らず、現在最も豊富な観測データのある領域であると言ってよいだろう。

前回発見したSubaru/XMM-Newton Deep Fieldの $z=1.62$ 銀河団と同様、まずは空間的に広がったX線原を探すことから始まった。宇宙にはX線を出す天体が何種類か存在するが、大きく広がって見えるX線を出す天体のほとんどは銀河団である。次にその広がったX線の対応天体を可視・近赤外データで同定するという作業から、一つの候補天体が浮かび上がった。測光的赤方偏移*2から

*1 こういった銀河集団を考える場合、 10^{14} 太陽質量を超えるような系を銀河団と呼び、それより小さい系を銀河群と呼ぶことがある。本稿では混乱を避けるためすべて銀河団と統一したい。

*2 多色の撮像データを用いて、銀河の見た目の色から距離を推定する手法。分光赤方偏移に比べて精度は劣るが、一度に多くの天体の距離を見積もれるのと、分光観測では届かないような暗い天体に対しても適用できるのが特徴である。

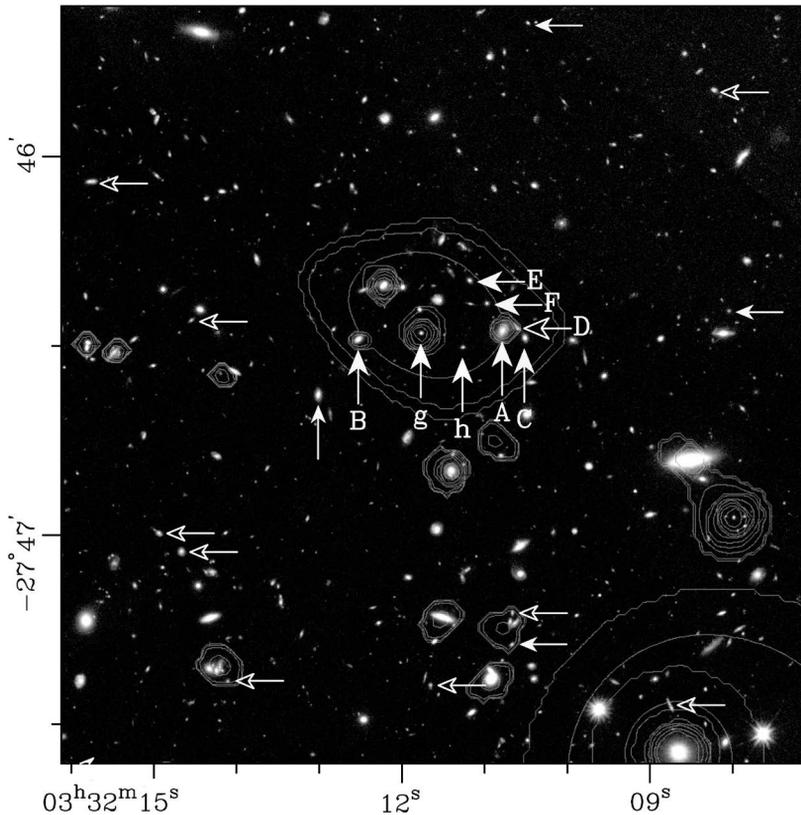


図1 銀河団周辺の画像⁷⁾。測光的赤方偏移から $z=1.6$ 付近に居るとおぼしき比較的明るい銀河($H<24$)に矢印を付けてあって、銀河団に属すると考えられる天体にアルファベットをふってある(大文字、小文字の違いはここでは無視してよい)。塗りつぶした矢印で赤い銀河、中抜き矢印で青い銀河を示す。等高線でX線強度を表して、中央に広がったX線が確認できる。

$z=1.6$ 前後と推測されたのであるが、何とその銀河団候補にある最も明るい銀河は、すでにとある分光サーベイで分光観測されていて、 $z=1.61$ ということがわかったのだ。ほかにも、信頼度が劣るのも含めて、もう二つの分光赤方偏移が同じ距離に確認できた。以下に述べる赤い銀河の集中と合わせて、これは銀河団であることは間違いなく、新しい遠方銀河団の発見となった。われわれ自身が何の観測をすることもなく、遠方銀河団を発見できるのは痛快であった。

その銀河団の絵を図1に示す。カラーの絵を論文で見ていただかないとわからないのだが、赤っぽい色をした銀河が広がったX線の周辺に群れている⁷⁾。驚くべきはその銀河団質量で、X線から

見積もると 3×10^{13} 太陽質量程度であることがわかった。これはこのような遠方で知られている銀河団の中で最も小質量のもので、統計的には現在の宇宙の典型的な銀河団の祖先である。すなわち、現在の銀河団銀河を理解しようとするにはうってつけの天体といえる。

そういった祖先には、すでに赤い銀河が多く存在していたことが図2に示した色等級図から明らかになった。銀河団に属するとおぼしき銀河のうち、明るいものはほぼすべて赤い色をしている。図で天体Dのみ多少青く、実際星形成の兆候が見られるが、他の天体は活発な星形成はしていないと思われる。図中で赤い銀河が一つの系列をなすように見えているが、これは色等級関係という

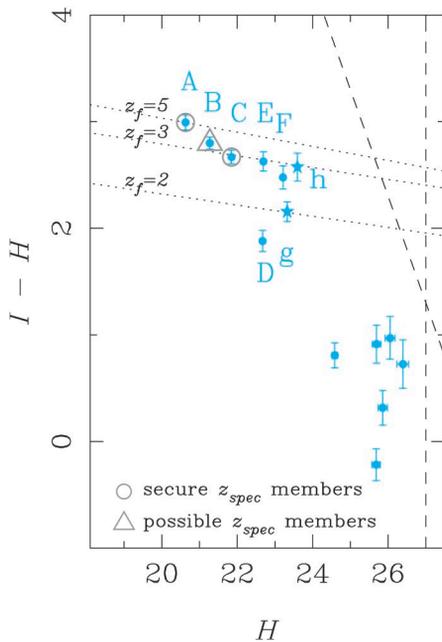


図2 $I-H$ vs. H の色等級図⁷⁾。ハッブル宇宙望遠鏡のCANDELSというサーベイのデータを用いている^{8),9)} 青で測光的赤方偏移から選んだ銀河団銀河、丸と三角で分光赤方偏移のある天体を示す。長い点線で 5σ 限界の等級と色を表し、短い点線で色等級関係のモデルを銀河形成時期を変えて描いてある。 $z_f \sim 3$ 付近に赤い銀河が集まっているが、これは(いくつかの仮定をおくと)これらの銀河が $z \sim 3$ で生まれたことを示している。

もので、近傍銀河団でははっきりと見えるが、このような祖先の系で、これほど見事な色等級関係が見えることに、私は非常に驚いた。これは銀河団銀河の少なくとも一部は、早い時期に星形成を止めて、静的な進化をしていたことを示している。冒頭で挙げた、銀河がいつどのように星形成を止めたのか、という問題をさらに深くするような結果であった。

4. 形成途中の銀河団へ

そこでわれわれはさらに遠方にある系を調べることにした。現在までにより遠方の銀河団はいくつか知られているのだが^{10), 11)}、われわれは現在

形成途中にあると思われる、いわゆる「原始銀河団」を調べた。巷には多くの原始銀河団と呼ばれる天体があふれているが、その中で最も信頼できるものの一つにPKS1138 ($z=2.16$)がある。それは中心に明らかな銀河の密度超過があり¹²⁾、現在形成過程にあるようである。

その領域をすばる望遠鏡のMOIRCS^{13), 14)}を用いて近赤外分光観測を行った¹⁵⁾。原始銀河団銀河の静止系可視光がちょうど観測では近赤外に対応するからである。近赤外観測での最大の問題は夜光の明るさで、7時間という積分時間にもかかわらず、得られたスペクトルは非常に質の低いものであった。しかし、それらのスペクトルを測光データと組み合わせることで、銀河の性質に強い制限を与えることができた。興味深いことに、この原始銀河団には星形成をしている巨大銀河と、していない巨大銀河が共存していることがわかった。これはより低赤方偏移の銀河団(例えば前章で述べたもの)とは異なる点である。さらに、星形成をしていない銀河が弱いながらも色等級関係をなしていることがわかり、赤い銀河は銀河団の形成時期にすでに現れることが今回初めて分光的に明かになった。これは興味深い点で、銀河団ガスや銀河団内部での重力相互作用が働く前から、一部の銀河はすでに赤かったのである。いつ星形成を止めたのか、という問いに対する一つの答えがここにあるのかもしれない。しかし、これらの銀河はなぜ星形成を止めてしまったのか。

そこで、個々のスペクトルを足し合わせて平均化することで、銀河の星形成をさらに調べた。図3に星形成を活発にしている銀河と、星形成をしていない銀河を平均化したスペクトルをそれぞれ示す。星形成をしている銀河は全体的に青いスペクトルで強い輝線を出しており、その輝線比から活動銀河核(AGN)の兆候が見られた。対照的に、星形成をしていない銀河は輝線を出さずに赤いスペクトルをしている。さらに、よく見るとCa II H+Kの吸収があるようにも見える。検出、

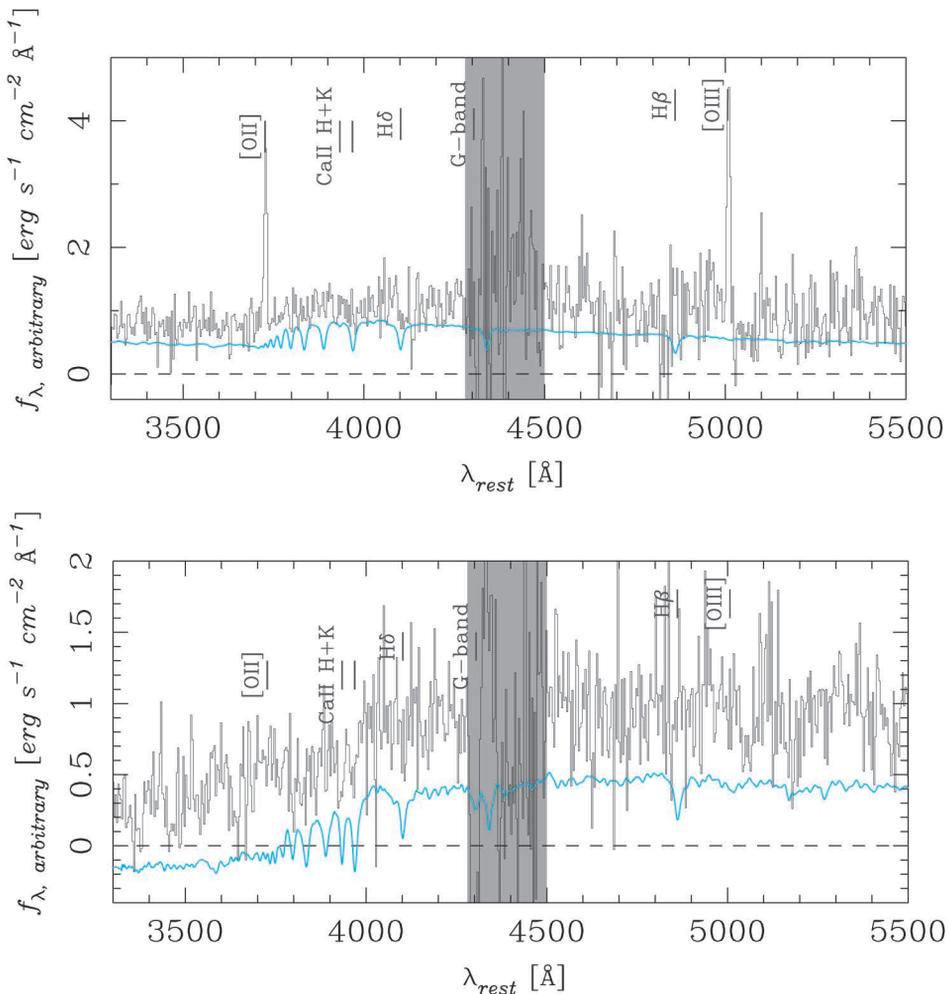


図3 $z=2.16$ の星形成銀河（上図）と星形成をしていない銀河（下図）の平均スペクトル¹⁵⁾。波長は静止系波長をとっている。黒が観測スペクトルで、青でベストフィットのモデルスペクトルを表す。影になっている部分は大気吸収でS/N比が悪い波長帯である

とまではいかないが、もし本物だったとするとこういう遠方の原始銀河団銀河で初めてその吸収線が見えたことになり、恒星種族が古い（つまり長い間星形成をしていない）ことを示唆している。

この星形成をしていない銀河のスペクトルを詳しく解析すると、これらの銀河がどう形成されたのかヒントを得ることができる。種族合成モデルというものをを用いて解析するのだが、煩雑になるので詳細は省く。結果だけ述べると、これらの銀

河は星形成がおおよそ5億年より短いタイムスケールで終わったことが示唆された。今回観測したような星質量で 10^{11} 太陽質量という巨大銀河を考えたとき、これは短いタイムスケールである。この短いタイムスケールがなぜ星形成を止めてしまったのか、という問題の大きなヒントになるはずである。

5. 活動銀河核

まず、どのようにしたら銀河の星形成を止める

ことができるのか。多少乱暴な言い方をすれば、ある程度の密度のガスというのは放っておけば冷えていつしか星を作ってしまうので、銀河の中に存在するガスを吹き飛ばすか、温めるかする必要はある。そのようなフィードバック機構はいくつか提案されていて、一つに超新星のフィードバックがある。しかしながら、これは主に低質量銀河で有効な機構である（重力ポテンシャルが浅いほどガスを吹き飛ばしやすいため）。今回観測したのは星質量で 10^{11} 太陽質量程度の巨大銀河で、これらを説明するのは難しい。こういった大質量銀河で近年注目されている機構がAGNによるフィードバックである。多くの巨大銀河の中心には超巨大ブラックホールが存在すると考えられているが、それらの活動によるエネルギーでガスを温めたり、クエーサーのような非常に活発な状態ではガスを吹き飛ばすこともあると言われている。こういう現象が実際に起これば、短いタイムスケールで星形成を止めることも可能かもしれない。私の個人的な意見では、銀河スケールでの観測的な証拠はまだ乏しいのだが、見逃してはならない可能性である。

このことに注目をして、銀河団銀河のAGNの割合を調べてみた。上で述べた $z=1.61$ の銀河団と $z=2.16$ の原始銀河団で、深いX線データを用いて巨大銀河にAGNが存在する割合を求めると、実に40%であった*³。これは非常に高い割合で、同じ赤方偏移のフィールド銀河ではおおよそ20%である¹⁹⁾。この高いAGN割合はAGNフィードバックが銀河団銀河の星形成を止めたことを想像させるものであり、直接的な証拠でないものの、人によっては“smoking-gun evidence”と前向きにとらえるかもしれない。強いAGN活動は銀河同士の衝突合体により引き起こされるのがしばしば期待されるが、そういった衝突合体

は銀河密度が高い方が頻繁に起こるわけで、形成中の銀河団で効率よくAGNフィードバックが働いたことは、考えられなくもないのである。

6. 次の一手

遠方銀河団に属する多くの巨大銀河がAGNをもっていることは非常におもしろい結果であるが、この結果には一つ大きな問題がある。統計が非常に悪いのだ。上の40%に実は20%(!)もの誤差がついている。これではフィールド銀河と比べ、銀河団銀河にAGNが多いとは言えず、AGNフィードバックが星形成を止めたとは主張できない状況である。また、この機構は具体的なプロセスが必ずしも明瞭ではなく、さらに他の物理機構が大きく寄与している可能性も否定できない。まだ視野を広く保つ必要があり、今後まずは統計を高めていく必要があるだろう。上で述べたように、ようやく近年になって $z>1.5$ の銀河団が多少見付き始めたので、今後改善が期待される。個人的には、これからすばるで始まろうとしているHyper Suprime-Cam (HSC)による大規模撮像サーベイが状況を一変させてくれると思っている。サーベイの一環で約30平方度を深く掃くのだが、この一部が既存の近赤外サーベイとかぶっていて、HSCの深い可視データと合わせると遠方銀河団探査に絶好のデータとなる。こういった広さの領域には十分に深いX線データはほとんどないので、X線を基にした探査手法から、銀河の密度超過を探す手法へと転換を必要とする。現在知られているすべての $z>1.5$ 銀河団で赤い銀河の密度超過が見られていることから、赤い銀河の集中を探す手法（いわゆるred-sequence finder）が有効であるかも知れない。HSCのデータを基に作り上げた銀河団カタログから、分光フォローアップも経て遠方銀河団の統計サンプルを作り上

*³ 実はここに至るには、 $z=0$ で新しいAGN検出方法を開発し^{16),17)}、それを遠方宇宙で適用し、 $z=1$ にかけて銀河団でのAGNの割合が上昇している示唆が得られ¹⁸⁾、さて $z>1.5$ の最遠方銀河団ではどうか?という経緯があって、それなりにおもしろいのだが長くなるので割愛する。

げることができる、ここで議論したような物理機構に十分な統計精度で挑むような仕事ができるのではないかと思っている。それは大きな一歩であらう。

7. 天地の理解

偶然立ち寄った書店で目にしたその古事記の現代語訳は、しばらくページをめくった後、購入して帰った。暇を見つけては少しずつ読んでいる。まだ八俣の大蛇が出てきたあたりであるが、遅ればせながら私の天地の理解は進みつつある。現実の宇宙の理解も、遅々としてではあるが、ここにまとめたように進みつつある。まだまだやることが山積している状況ではあるが、1,300年前に太安万侶が古事記を書いたのと同様に、宇宙の歴史を綴る仕事は何となく感慨深いものがあるように感じ始めた。古事記は天地の創造に続き天皇家の歴史へと脈々と続くのだが、銀河の進化史はどこまで綴れるのだろうか。私一人で何とかなる問題では全くないが、一研究者としてどこまで貢献できるか楽しみではある。

謝 辞

この仕事は長い間多くの方々にお世話になったおかげで現在まで続けることができた。この場を借りて感謝を申し上げたい。とりわけ大学院での指導教員であった岡村定矩氏からは多くのことを学んだ。是非これからもご指導いただきたい。また、共同研究で児玉忠恭氏にもたいへんお世話になった。Alexis Finoguenov, Sune Toft両氏にも現在に至るまで多くの議論をすることができて感謝している。これらの方々に限らず、今まで重ねてきた多くの方々との議論が私の研究の礎となっていて、私が過ごしてきた研究所での日々の会話がたいへん貴重なものであった。そして最後に、私の仕事に理解（我慢？）をしてくれている妻に感謝の言葉を捧げたい。

参考文献

- 1) 福永武彦, 現代語訳古事記, 河出出版
- 2) Dressler, A., 1980, ApJS 42, 565
- 3) Tanaka, M., Goto, T., Okamura, S., Shimasaku, K., Brinkmann, J., 2004, AJ 128, 2677
- 4) Stanford, S. A., Romer, A. K., Sabirli, K., et al., 2006, ApJ 646, L13
- 5) 田中賢幸, 天文月報2010年12月号
- 6) Tanaka, M., Finoguenov, A., Ueda, Y., 2010, ApJ 716, L152
- 7) Tanaka, M., Finoguenov, A., Mirkazemi, M., et al., 2013, PASJ 65, 17
- 8) Grogan, N. A., Kocevski, D. D., Faber, S. M., et al., 2011, ApJS 197, 35
- 9) Koekemoer, A. M., Faber, S. M., Ferguson, H. C., et al., 2011, ApJS 197, 36
- 10) Gobat, R., Daddi, E., Onodera, M., et al., 2011, A&A 526, A133
- 11) Stanford, S. A., Brodwin, M., Gonzalez, A. H., et al., 2012, ApJ 753, 164
- 12) Koyama, Y., Kodama, T., Tadaki, K.-i., et al., 2013, MNRAS 428, 1551
- 13) Ichikawa, T., Suzuki, R., Tokoku, C., et al., 2006, SPIE 6269, 38
- 14) Suzuki, R., Tokoku, C., Ichikawa, T., et al., 2008, PASJ 60, 1347
- 15) Tanaka, M., Toft, S., Marchesini, D., et al., 2013, ApJ 772, 113
- 16) Tanaka, M., 2012a, PASJ 64, 37
- 17) Tanaka, M., 2012b, PASJ 64, 36
- 18) Tanaka, M., Finoguenov, A., Lilly, S. J., et al., 2012, PASJ 64, 22
- 19) Xue, Y. Q., Brandt, W. N., Luo, B., et al., 2010, ApJ 720, 368

Stellar Populations and AGN Activities in Distant Clusters

Masayuki TANAKA

*National Astronomical Observatory of Japan,
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Galaxy clusters are the most massive gravitationally bound systems in the Universe. They are the key objects not only for cosmology, but for galaxy evolution as well. Recent multi-wavelength surveys have made it possible to identify clusters above redshift of 1.5. I will briefly describe our recent results from a galaxy evolution point of view and discuss future prospects of the field.