

銀河団におけるハロー・アセンブリ・バイアスの検出

宮 武 広 直

〈カリフォルニア工科大学 1200 E California Blvd, Pasadena, CA 91125, USA〉

e-mail: miyatake@caltech.edu



銀河・銀河団の空間分布と暗黒物質の空間分布はどのような関係があるのだろうか？ この関係、つまりハロー・バイアスを正確に理解することは、将来の銀河サーベイにおいて宇宙論パラメーターを精密に測定するために不可欠である。ハロー・バイアスは銀河・銀河団がすむハローの質量のみに依存すると考えられていたが、理論的研究ではそれらの形成史にも依存することが指摘されてきた。これをハロー・アセンブリ・バイアスという。筆者らは、Sloan Digital Sky Surveyのデータを用いて、銀河団による弱重力レンズ効果と2点相関関数を測定することにより、世界で初めてハロー・アセンブリ・バイアスを検出した。この結果は、将来の宇宙論パラメーターの精密測定に向けた第一歩となるのみではなく、銀河団の形成史をひも解く糸口となる。さらに、銀河団スケールにおけるハロー・アセンブリ・バイアスは宇宙初期揺らぎの性質と関係があることが指摘されており、初期宇宙の物理を探ることができる可能性がある。

1. 宇宙の大規模構造

銀河の赤方偏移サーベイから、銀河は空間的にランダムに分布しているのではなく、鎖状、フィラメント状、もしくは面状に互いに連なって分布し、これらの構造が交わる場所では数千個の銀河からなる銀河団が存在していることがわかった。また、これらの構造が取り囲むように数十メガパーセク (Mpc) にわたって銀河が観測されない領域 (ボイド) が存在し、銀河の空間分布はいくつもの泡が積み重なっているように見える。これを宇宙の大規模構造という。

宇宙の大規模構造は1977年に始まったCfA赤方偏移サーベイにより初めて系統的に調べられた。その後、Sloan Digital Sky Survey (SDSS) が全天の4分の1 (約10,000平方度) にわたって約100万個の銀河の赤方偏移 z を測定し、 $z \sim 0.7$ までの大規模構造を明らかにした。2019年頃から始まる

予定のすばる望遠鏡Prime Focus Spectrograph (PFS) によるサーベイは、1,400平方度というSDSSに比べると狭い領域ではあるが、 $0.8 < z < 2.4$ という高赤方偏移宇宙について、SDSSを凌駕する3次元体積を分光サーベイし、大規模構造を調べる野心的な計画である。

宇宙の大規模構造は、インフレーション中の量子揺らぎを起源とする初期揺らぎが、重力不安定性によって成長することによってできたと考えられている^{1), 2)}。宇宙の物質の約84パーセントを占める冷たい暗黒物質 (cold dark matter; CDM) によって、小さい構造が先に形成される。この暗黒物質ハローの中でガスが収縮し、銀河が形成される。さらに、これらのハローが重力で集まることによって、大きな構造、つまり銀河団が形成されていく。

宇宙の大規模構造は、暗黒物質による重力と暗黒エネルギーによる加速膨張のせめぎ合いの下で

形成される。逆に、宇宙の大規模構造を調べることによって、暗黒物質や暗黒エネルギーの性質をはじめとする、宇宙論的情報を引き出すことができる。ただ、次に述べるように、銀河や銀河団の分布から宇宙論的情報を引き出すのは簡単ではない。

2. ハロー・バイアスと宇宙論

暗黒物質は宇宙の物質の大部分を占めるので、宇宙の構造形成においては暗黒物質が主要な役割を果たす。暗黒物質による構造形成は長波長スケールでは線形近似を用いて、短波長スケールでは N 体シミュレーションを用いることによって精度よく予言することができる。一方で、銀河や銀河団の形成過程を宇宙論スケールで正確に予言することは、バリオンによる複雑な物理過程を理解し、それを高い分解能で計算する必要があるため、非常に難しい。よって、理論予言としては、暗黒物質の空間分布を用意し、それを観測と比較することになる。

ところが、実際にわれわれが観測できるのは銀河や銀河団の空間分布であって、暗黒物質の空間分布ではない。ここで図1を見てみよう。簡単な

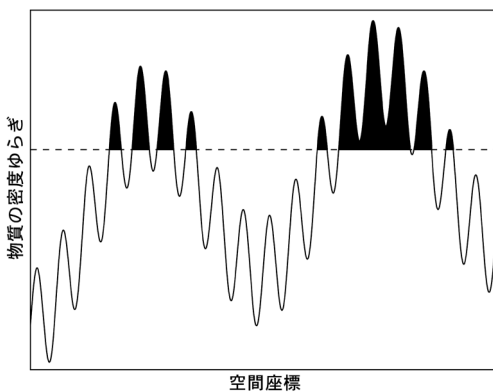


図1 暗黒物質分布と銀河・銀河団分布の関係。横軸は空間座標、縦軸は物質の密度揺らぎである。密度揺らぎが破線で示された臨界点を超えると、暗黒物質ハローができ、さらに銀河や銀河団が形成される。

モデルでは、暗黒物質の密度揺らぎがある臨界点を超えると暗黒物質ハローが形成され、その中で銀河や銀河団が生まれる。よって、銀河や銀河団を使って、この点だけを見ていては、臨界点以下の暗黒物質分布を調べることができない。つまり、銀河や銀河団は暗黒物質分布をバイアスしてなぞっていることになる。このような、銀河・銀河団分布と暗黒物質分布の関係を、一般にハロー・バイアスという。銀河・銀河団の空間分布から宇宙論的情報を引き出すには、何らかの方法で銀河・銀河団の空間分布を物質の空間分布に焼き直す必要がある。これは、宇宙から真夜中の地球を見たときに大都市の街明かりから大陸の地形を予想するような、非常に困難な作業であると言える。

具体例として、揺らぎの2点相関関数を用いて、観測データと理論を比較することを考えよう。揺らぎの2点相関関数は、ある位置での揺らぎ $\delta(r)$ に対して

$$\xi(r_{12}) = \langle \delta(\mathbf{r}_1) \delta(\mathbf{r}_2) \rangle \quad (1)$$

と定義される。ここで $r_{12} = |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|$ である。 $\xi = 0$ は一様分布、 $\xi > 0$ は一様分布に比べて凸凹した分布、 $\xi < 0$ は一様分布に比べて物質の密度が薄い、ポイドのような領域が支配的な場合を表している。物質の密度揺らぎの2点相関関数の振幅は、相関関数の振幅を決める密度揺らぎの分散 σ_8 に敏感なのはもちろんのこと、密度揺らぎの線形成長因子を通して物質および暗黒エネルギーのエネルギー密度 Ω_m 、 Ω_{de} や暗黒エネルギーの状態方程式パラメーター w にも依存する。

ハロー・バイアスの簡単なモデルとして、線形理論が良い近似となるような長波長スケールで、銀河もしくは銀河団がすんでいる暗黒物質ハローの数密度揺らぎと物質の密度揺らぎが $\delta_h = b\delta_m$ のように、ある定数 b を介して関係づけられると仮定する。この場合、ハローの2点相関関数は密度揺らぎの2点相関関数と

$$\xi_{hh}(r) = b^2 \xi_{mm}(r) \quad (2)$$

のように関連づけられる。銀河や銀河団の空間分布からの測定量はハローの2点相関関数であるので、この式はバイアス・パラメーター b が決まらないと、密度揺らぎの2点相関関数の振幅がわからないということを示している。

ここで、図1をもう一度見てみよう。暗黒物質の非一様分布はさまざまな波長の密度揺らぎの重ね合わせと考えることができる。図からわかるように、長波長成分の振幅が大きい領域にあるピークのほうが、臨界点を超えやすく、多くの暗黒物質ハローを形成する。ピークが高いほうが質量の大きいハローを形成するので、大きい質量のハローほど密集しており、 b が大きいことがわかる。これは2点相関関数の計算に用いている銀河・銀河団サンプルの質量が大きいほど、物質の密度揺らぎの2点相関関数からの乖離が大きいことを意味している。

さて、このバイアスによる影響はどのようにして補正できるのであろうか？ いくつかの方法があるが、ここでは弱重力レンズ効果を用いて補正する方法を例として挙げる。弱重力レンズ効果は、遠方銀河からくる光が、観測者と光源との間にある質量構造によって曲げられ、銀河の形が歪んで観測される効果である。よって、銀河や銀河団の背景にある銀河の歪みを観測すれば、これらがすむハローおよびその周辺の（暗黒物質を含む）物質分布を測定することができる。これはハローと物質の相関関数を測定していることにはかならず、これは密度揺らぎの2点相関関数と

$$\xi_{hm}(r) = b \xi_{mm}(r) \quad (3)$$

のように関連づけられる。よって、弱重力レンズ効果から $\xi_{hm}(r)$ を測定できれば、これを銀河・銀河団の2点相関関数と組み合わせることによって、バイアス・パラメーターを打ち消して密度揺らぎの2点相関関数を得ることができる。ちなみ

に、この式はバイアスが大きい銀河・銀河団ほど暗黒物質が多くある環境に存在することを示している。

このアイデアに基づいた宇宙論パラメーターの測定は現在までにいくつか報告されている。銀河サンプルとして、SDSS-I/IIサーベイによるMain銀河サンプルを用いたもの³⁾、Main銀河サンプルとLuminous Red Galaxyサンプルを用いたもの⁴⁾と、筆者らによるSDSS-III BOSSサーベイによるCMASS銀河サンプルを用いたもの⁵⁾がある（銀河の相関関数をモデル化するには、暗黒物質ハローの中に銀河がどのように分布するかを考える必要があるが、本稿では簡単のため省略する。詳しくは過去の解説記事などを参照していただきたい⁶⁾）。それぞれのサンプルは赤方偏移が異なり、 $z \sim 0.1$ から $z \sim 0.6$ までの領域をカバーしている。図2に示すように、今までの観測ではWMAP衛星による観測と無矛盾な結果が得られている。将来的にはすばる望遠鏡SuMIReサーベイによって、PFSで観測された銀河サンプルによる2点相関関数と、Hyper Suprime-Cam (HSC)で観測された遠方銀河の形状を用いて測定した弱

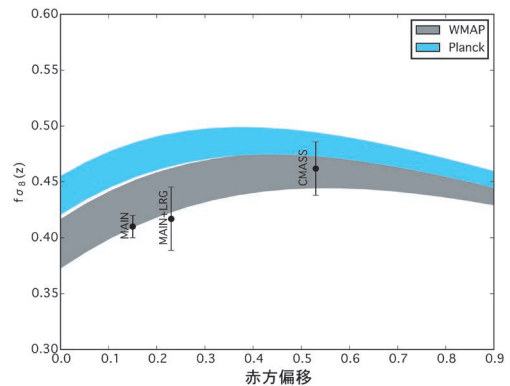


図2 銀河2点相関関数と弱重力レンズ信号の組み合わせによって得られた宇宙論パラメーターの制限。横軸は赤方偏移、縦軸は線形成長率と密度揺らぎの分散の積を示す。帯はWMAP衛星およびPlanck衛星による宇宙マイクロ波背景放射の観測による制限を示す。

重力レンズ信号を組み合わせ、より高赤方偏移で、より小さい統計誤差で、宇宙論パラメーターを制限することができるかと期待される。

3. ハロー・アセンブリ・バイアス

前節でハロー・バイアスはハローの質量に依存すると述べた。バイアスは質量以外の性質には依存しないのだろうか？ 銀河や銀河団は色や年齢、質量降着率、中心集中度など、その形成過程に応じて実にさまざまな性質をもつ。ハロー・バイアスが銀河・銀河団のこのような性質に依存すると考えるのは自然なことである。このようにハローの質量以外の性質に依存するバイアスを一般的にハロー・アセンブリ・バイアスという。

理論的な、もしくは数値シミュレーションに基づいたアセンブリ・バイアスの研究は、ここ10年ほどの間に活発になされてきた。N体シミュレーションを用いた研究では、暗黒物質ハローの中心集中度とハロー・バイアスの間に関係があることがわかった⁷⁾。アセンブリ・バイアスはハローの質量に依存し、銀河団程度の質量をもつハローは中心集中度が大きいほどバイアス・パラメーターが小さくなる。銀河スケールのハローはこの関係は逆になり、中心集中度が大きいほどバイアス・パラメーターが大きくなる。

これは以下のように説明できると考えられている⁸⁾。まず、銀河団スケールではインフレーション直後の初期密度揺らぎの性質がアセンブリ・バイアスとして現れていると考えられる。初期密度揺らぎのピークの中でとがったものは、図1にあるような長波長成分の振幅が大きいところにピークがなくても臨界点を超えるので、周辺の暗黒物質の環境によらず暗黒物質ハローを形成する。一方、そうでないピークは、長波長成分の振幅が大きいところがないと臨界点を超えることができず、暗黒物質ハローを形成できない。よって、とがっていないピークのほうが互いにより近くに集中していることになり、バイアスが大きくなる。

銀河団スケールでは暗黒物質ハローは進化の過程で周囲の影響をあまり受けず、銀河団形成後でも初期密度揺らぎの性質を記憶しており、とがったピークは中心集中度が大きく、そうでないピークは中心集中度は小さくなる。また、中心集中度の大きいハローは周囲の環境からの暗黒物質の供給が少なく、質量降着率が小さい。逆に中心集中度の小さいハローは質量降着率が大きくなる。よって、質量は同じだが中心集中度が違う銀河団に着目すると、中心集中度が大きい銀河団のほうがバイアスが小さく、昔に形成されたことになる。なお、初期密度揺らぎの統計的性質はすでに1986年にBBKS⁹⁾によって指摘されたことを付け加えておきたい。

一方、銀河スケールでは暗黒物質ハローは周辺により質量の大きいハローの影響を受け、初期密度揺らぎの性質をそのまま反映していない。質量が大きいハローの近くの銀河は自身の暗黒物質ハローを引き剥がされ、中心集中度が大きくなる。これが銀河スケールでは、銀河団スケールとは別に中心集中度が大きくなるほど、バイアス・パラメーターが大きくなる理由である。

アセンブリ・バイアスを無視して、バイアスを質量のみの関数として扱うと、宇宙論パラメーターの制限に系統誤差が入る。数パーセント程度の系統誤差であっても、現在進行中のSuMIReサーベイや、将来のLSST, WFIRST, Euclidといったサーベイでは影響が出てしまうと考えられている。よってアセンブリ・バイアスを理解し、適切にモデル化して系統誤差を小さくすることが重要になる。

今までにアセンブリ・バイアスの観測的な研究が行われてきたが、どれも決定的な証拠を得るには至っていない。次章ではわれわれによる銀河団におけるアセンブリ・バイアスの初検出¹⁰⁾について詳しく解説する。

4. 銀河団におけるハロー・アセンブリ・バイアスの検出

本研究におけるアセンブリ・バイアス検出のための解析の流れを図3に示す。まず、銀河団サンプルを、メンバー銀河の中心集中度に着目して二つのサブサンプルに分ける。次に、バイアスの質量依存性を取り除くために、二つのサブサンプルの質量が同じであることを確認する。そのうえで、銀河団の空間分布がサブサンプル間で違うことが観測されれば、アセンブリ・バイアスが検出されたことになる。以降、この解析を詳しく解説する。

銀河団サンプルにはSDSS DR8に基づいて作られたredMaPPer銀河団カタログ¹¹⁾を用いた。これは、red sequenceを利用して年齢が古く相対的に赤い早期型銀河の空間的な集中度から銀河団を

見つける銀河団発見アルゴリズムを用いて作られたカタログで、メンバー銀河のカタログも用意されている。本研究ではメンバー銀河数 $20 < \lambda < 100$ 、赤方偏移 $0.1 < z < 0.33$ の範囲の8,648個の銀河団を用いた。

メンバー銀河の中心集中度の指標として、銀河団の中心銀河とその他のメンバー銀河の平均距離 $\langle R_{mem} \rangle$ を用いた。個々の銀河団に対し $\langle R_{mem} \rangle$ を計算し、 $\langle R_{mem} \rangle$ の中央値に対する個々の銀河団の $\langle R_{mem} \rangle$ の大小で親サンプルを二つのサブサンプルに分けた。つまり、 $\langle R_{mem} \rangle$ が大きいサブサンプルは中心集中度が小さく、 $\langle R_{mem} \rangle$ が小さいサブサンプルは中心集中度が大きいサンプルである。サブサンプル間の $\langle R_{mem} \rangle$ の違いは典型的には1.2倍程度である。

次に、サブサンプルのハローの質量が同じであることを確認する必要がある。このために弱重力

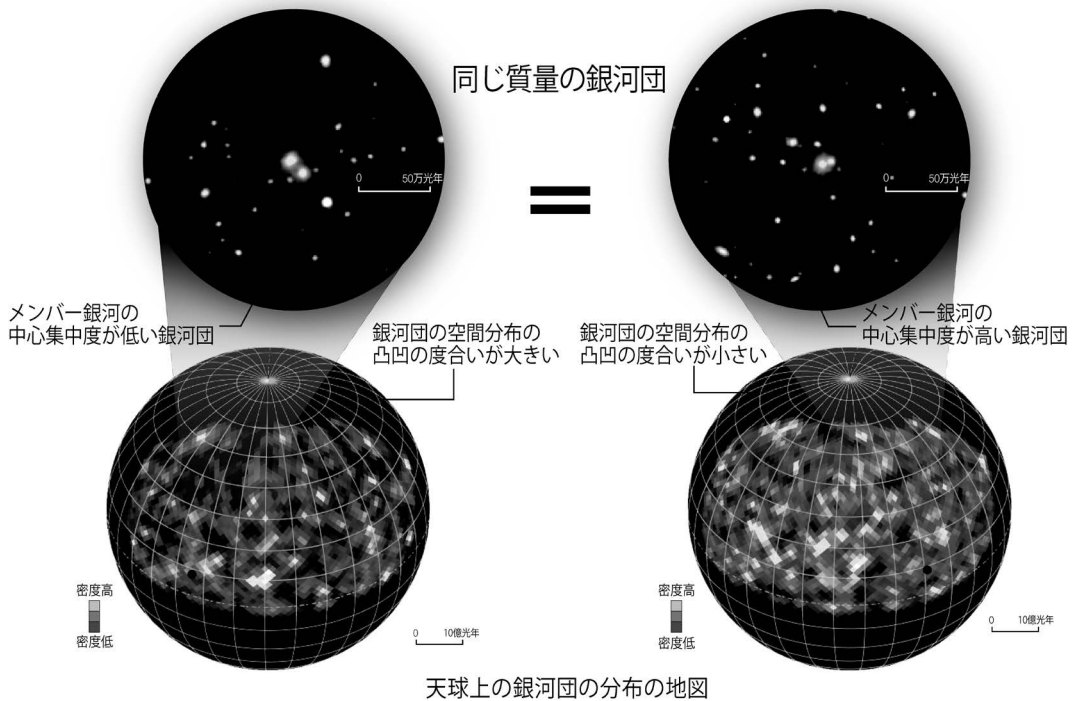


図3 銀河団におけるハロー・アセンブリ・バイアス検出のための解析の概念図 (Credit: Sloan Digital Sky Survey, Kavli IPMU).

レンズ効果を用いた。個々の銀河団の周りの弱重力レンズ効果を測定しスタックすれば、銀河団周りの平均的な（暗黒物質を含む）物質の柱質量密度プロファイル測定することができる。弱重力レンズ効果は力学平衡などの物理的仮定を介さずに暗黒物質を直接的に見ることができるという点で非常に強力である。星形成率などに基づいて銀河サンプルをサブサンプルに分け、アセンブリ・バイアスの検出を報告した例は過去に複数あるが^{12), 13)}、光度-質量関係などを仮定しており、説得力に欠けるものであった。実際、われわれの報告とほぼ同時期に銀河群スケールにおいて重力レンズを用いてハローの質量を検証した報告によると、アセンブリ・バイアスは検出されなかった¹⁴⁾。

各サブサンプルの弱重力レンズ信号を図4に示す。この図からまず読み取れることは、10 Mpc/h以下の小スケールにおいて、サブサンプル間の違いがほとんどないということである。10 Mpc/h以内の質量分布では銀河団自身の暗黒物質ハローが支配的なので、これは二つのサブサンプルの暗黒物質ハローの質量が同程度であることを示している。次に読み取れることは、10 Mpc/h以上の大スケールにおいて、有意に重力レンズ信号が異なることである。このスケールでは、自分以外のハローの平均的暗黒物質分布が支配的であり、これはまさにアセンブリ・バイアスが存在し、中心集中度が小さいサンプルでは銀河団の周辺の暗黒物質が多く、中心集中度が大きいサンプルでは銀河団の周辺の暗黒物質が少ないことを示唆している。

弱重力レンズ信号から示唆されるハローの質量とアセンブリ・バイアスを定量的に調べるために、ハローモデルに基づいた弱重力レンズ信号のモデルをフィットした。ハローの質量は、銀河団の重力ポテンシャルに束縛されている（自己重力系の）暗黒物質からの寄与（1ハロー項）をフィットすることによって求めることができる。また、バイアスは銀河団周りに分布するフィラ

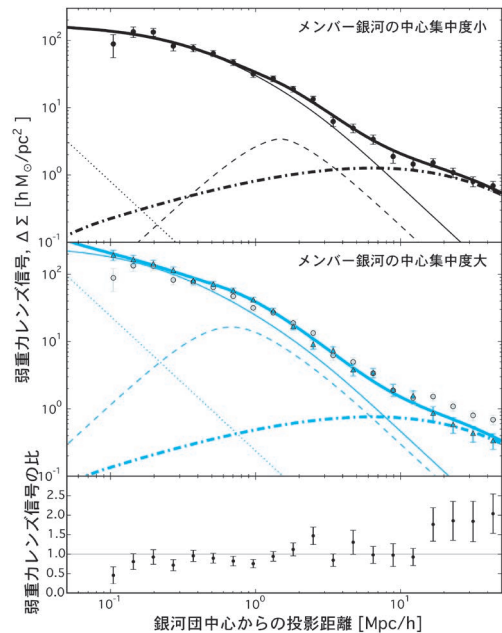


図4 銀河団サブサンプルの弱重力レンズ信号。比較のため、メンバー銀河の中心集中度が小さいサブサンプルの信号は、中心集中度が大きいサブサンプルのパネルにも示してあり、サブサンプル間の信号の比を下のパネルに示してある。約10 Mpc/h以下の小スケールでは似たような信号を示している一方で、約10 Mpc/h以上の大スケールでは振幅が異なり、これはアセンブリ・バイアスの存在を示唆している。図中の線はフィットに用いたモデルを表している。細い実線は銀河団の中心銀河と重力ポテンシャルの最小点とのオフセットがない銀河団の暗黒物質プロファイルを、破線はオフセットがある銀河団の暗黒物質プロファイルを示す。オフセットした銀河団を考えるのは、銀河団の中心銀河が必ずしも重力ポテンシャルの中心にあるわけではないからである。点線は、中心銀河を点源とみなしたときのバリオンの寄与を、1点鎖線は銀河団周辺の暗黒物質の寄与を示す。太い実線はこれらすべての寄与の合計である。

メント、ポイド領域の暗黒物質を考慮した解析的なモデル（2ハロー項）の振幅から求めることができる。これらのモデルを同時フィットした結果、メンバー銀河の中心集中度が小さいサブサンプルと大きいサブサンプルの質量はそれぞれ $M_{200m} =$

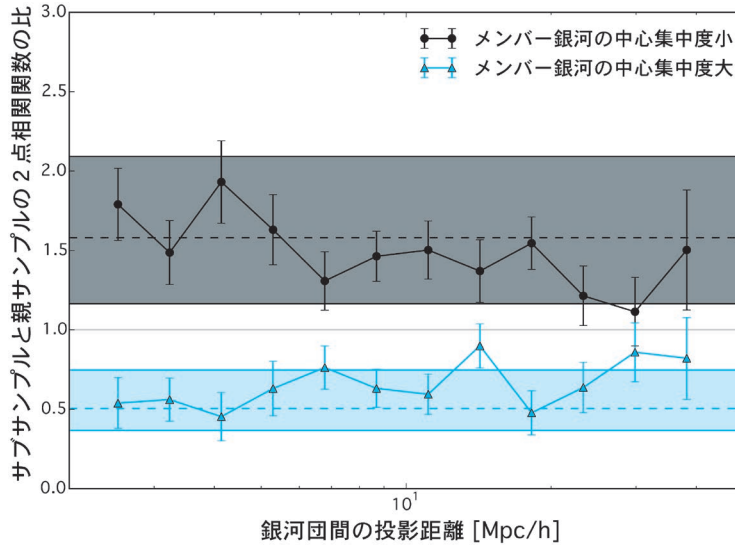


図5 銀河団サブサンプルと親サンプルの2点相関関数の比。すべてのスケールにおいて違いがはっきり見て取ることができ、これはアセンブリ・バイアスの存在を強く示唆している。帯は弱重力レンズ信号から得られたバイアス・パラメーターの制限を示す。

$1.88_{-0.18}^{+0.16} \times 10^{14} M_{\odot}/h$, および $M_{200m} = 1.87_{-0.14}^{+0.12} \times 10^{14} M_{\odot}/h$, であり、誤差の範囲で一致することがわかった。一方、2ハロー項から得られるバイアスは、それぞれ $b = 3.67_{-0.37}^{+0.40}$, および $b = 2.17 \pm 0.31$ であった。その比は $b_{\text{中心集中度小}} / b_{\text{中心集中度大}} = 1.64_{-0.26}^{+0.31}$ であり、 2.5σ の有意度でサブサンプル間のバイアス・パラメーターの違いを検出した。

次に銀河団の2点相関関数を測定した。本研究では赤方偏移歪みの影響を取り除くため、式(2)を視線方向に投影したもの

$$w_p(R) = 2 \int_0^{\Pi_{\max} = 100 \text{ Mpc}/h} d\Pi \zeta_{hh}(R, \Pi) \quad (4)$$

を用いた。図5にサブサンプルと親サンプルの w_p の比を示す。全スケールで中心集中度が小さいサブサンプルは親サンプルよりも w_p が大きく、逆に中心集中度が大きいサブサンプルは親サンプルよりも w_p が小さいことがわかる。これは中心集中度が小さいサンプルは、図3に示したように、より凸凹した銀河団空間分布をもつこと示している。サブサンプル間のバイアス・パ

ラメーターの違いは2点相関関数の比の平方根 $\zeta_0 = \sqrt{w_p^{\text{中心集中度小}} / w_p^{\text{中心集中度大}}}$ から求めることができ、 $\zeta_0 = 1.40 \pm 0.09$ となった。 4.4σ の有意度でサブサンプル間のバイアス・パラメーターの違いを検出することができた。

5. まとめと今後の展望

前章で述べたように、われわれはメンバー銀河の中心集中度に基づいてSDSS redMaPPer銀河団を二つのサブサンプルに分け、弱重力レンズ効果の小スケール信号からこれらの質量が一致することを確かめた。そのうえで、弱重力レンズ効果の大スケール信号と2点相関関数において、サブサンプル間の違いを発見した。これはハロー・バイアスが銀河団の質量以外の性質に依存することを示しており、ハロー・アセンブリ・バイアスの存在を強く示唆している。ちなみに、観測されたサブサンプル間のバイアスの違いを質量の違いで説明するには、サブサンプル間で約3倍の質量差が必要である。

本研究におけるアセンブリ・バイアスの発見

は、100万光年程度の銀河団の内部構造のスケールと、銀河団間の典型的距離である1億光年程度のスケールが互いに連絡を取り合っているかのよう、宇宙が進化してきたことを示唆している。先に述べたように、これは宇宙初期の揺らぎの性質に起因していると考えられる。つまり、われわれが現在観測できる銀河団を用いることによって、初期揺らぎの非ガウス性など、初期宇宙の物理を探ることができる可能性がある¹⁵⁾。

第2章で述べたように、今までの宇宙論パラメーターの測定ではバイアスはハローの質量のみに依存すると仮定してきた。アセンブリ・バイアスを無視すると、将来のすばる望遠鏡SuMIRE計画などの大統計データでは系統誤差として表れる可能性がある。そこでアセンブリ・バイアスを理解したうえでモデル化し、測定の系統誤差を減らすことが当面の目標となる。

本研究の結果を受け、さらなる研究が進んでいる¹⁶⁾。この結果はまだ出版されていないので、簡単に紹介する程度にとどめる。SDSSの測光データを用いて、本研究で用いた銀河団の周りに存在する銀河を数え上げ、その信号を比較することで、アセンブリ・バイアスを 7σ 程度の有意度で検出することができた。アセンブリ・バイアスの大きさは弱重力レンズと2点相関関数の測定結果と誤差の範囲で一致している。

また、この測定では、銀河団のスプラッシュバック半径を初めて検出した。スプラッシュバック半径は暗黒物質が銀河団に降着する際に初めて通過する遠日点で定義され、これによって銀河団の境界を物理的に決めることができると考えられている。スプラッシュバック半径は銀河団の形成史を反映しており、質量降着率が大きいハローのほうのスプラッシュバック半径が小さくなることがわかっている。観測的には、スプラッシュバック半径は密度プロファイルのべきが急激に小さくなる半径と一致することが知られている^{17), 18)}。われわれの測定によって、サブサンプル間のスプ

ラッシュバック半径が異なることがわかり、われわれが発見したアセンブリ・バイアスと銀河団の形成史の間に関係があることが明らかになった。

しかしながら、 Λ CDM宇宙論に基づいた暗黒物質のシミュレーションの予言に比べて、観測されたスプラッシュバック半径が20-30%程度小さく、アセンブリ・バイアスは2倍程度大きいことがわかった。サブハローの力学的摩擦や、投影効果、弱重力レンズから求めた質量の系統誤差など、さまざまな効果を検討したが、この違いを説明することはできていない。小さいスプラッシュバック半径を説明できる物理としては、バリオンによる影響や自己相互作用する暗黒物質による影響が考えられる。後者については、小散乱角における散乱断面積を制限できる可能性があり、現在われわれのグループで研究を進めている。アセンブリ・バイアスを大きくする原因としては、揺らぎの長波長成分の振幅を大きくするような物理を考えることができる。例えば、ニュートリノは大スケールの揺らぎの成長にのみ寄与するので、ニュートリノの全質量に制限を付けることができるかもしれない。

以上のように、アセンブリ・バイアスの研究を通して、銀河団や銀河の形成史、宇宙の大規模構造、ダークマターやダークエネルギーの性質、ニュートリノ質量、初期宇宙の物理など、実に多くの謎に迫ることができる。これからの研究の広がり期待したい。

謝 辞

本稿の科学的な内容は筆者らの投稿論文に基づいたものです。高田昌広氏、Surhud More氏、David N. Spergel氏をはじめとする共同研究者には多大な協力をいただきました。また、高田氏には本稿に丁寧に目を通していただきました。本研究の一部は、日本学術振興会特別研究員(PD)として行ったものです。最後に、本稿の執筆を薦めてくださった大栗真宗氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Press W. H., Schechter P., 1974, ApJ 187, 425
- 2) Kravtsov A. V., Borgani S., 2012, ARA&A 50, 353
- 3) Cacciato M., van den Bosch F. C., More S., Mo H., Yang X., 2013, MNRAS 430, 767
- 4) Mandelbaum R., Slosar A., Baldauf T., et al., 2013, MNRAS 432, 1544
- 5) More S., Miyatake H., Mandelbaum R., et al., 2015, ApJ 806, 2
- 6) 日影千秋, 2014, 天文月報 107, 163
- 7) Wechsler R. H., Zentner A. R., Bullock J. S., Kravtsov A. V., Allgood B., 2006, ApJ 652, 71
- 8) Dalal N., White M., Bond J. R., Shirokov A., 2008, ApJ 687, 12
- 9) Bardeen J. M., Bond J. R., Kaiser N., Szalay A. S., 1986, ApJ 304, 15
- 10) Miyatake H., More S., Takada M., et al., 2016, PRL 116, 041301
- 11) Rykoff E. S., Rozo E., Busha M. T., et al., 2014, ApJ 785, 104
- 12) Yang X., Mo H. J., van den Bosch F. C., 2006, ApJ 638, L55
- 13) Wang L., Weinmann S. M., De Lucia G., Yang X., 2013, MNRAS 433, 515
- 14) Lin Y.-T., Mandelbaum R., Huang Y.-H., et al., 2016, ApJ 819, 119
- 15) Reid B. A., Verde L., Dolag K., Matarrese S., Moscardini L., 2010, JCAP 7, 013
- 16) More S., Miyatake H., Takada M., et al., 2016, arXiv: 1601.06063
- 17) Diemer B., Kravtsov A. V., 2014, ApJ 789, 1
- 18) Adhikari S., Dalal N., Chamberlain R. T., 2014, JCAP 11, 019

The Evidence of Halo Assembly Bias in Massive Galaxy Clusters

Hironao MIYATAKE

California Institute of Technology, 1200 E California Blvd, Pasadena, CA 91125, USA

Abstract: What is the relationship between the spatial distribution of galaxies or clusters and dark matter? Understanding this relationship, the so-called halo bias, is the key to achieve precision cosmology with future galaxy surveys. Although it has been assumed that the halo bias solely depends on halo mass, several numerical and theoretical studies showed that it also depends on the assembly history of galaxies and clusters, which is called halo assembly bias. We report the first observational evidence of assembly bias in massive clusters by combining weak gravitational lensing and cluster auto-correlation measurements with the Sloan Digital Sky Survey data. Our findings are not only the first step towards precision cosmology but also the clue to reveal cluster assembly history. Furthermore, since assembly bias of galaxy clusters is connected with the nature of initial matter density fluctuation, we might be able to explore the physics of early universe.