

銀河赤方偏移サーベイによる 宇宙論的距離の精密測定



羽田 龍一郎

〈東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 〒277-8583 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉
e-mail: ryuichiro.hada@ipmu.jp

銀河の3次元分布に刻まれたバリオン音響振動（BAO）パターンは、宇宙論的距離の測定に「ものさし」として用いられ、宇宙の加速膨張の起源とされる暗黒エネルギーの性質の解明に向けて重要な役割を担ってきました。このBAOパターンは銀河の固有運動によって薄められてしまうのですが、物質分布の再構築を通して復元することにより、悪化した距離測定の精度を改善できることが知られています。本稿では、次世代の銀河赤方偏移サーベイにおいて距離測定の精度・信頼性を高めるために、新たな物質分布の再構築法を紹介し、従来の方法との比較を行います。

1. 銀河クラスタリングと宇宙論

銀河赤方偏移サーベイとは、その名の通り、広い天域にわたって多数の銀河の赤方偏移を測定することを目的とした分光観測のことです。この赤方偏移という銀河の奥行き的情報を天球上の位置の情報と合わせることで、宇宙空間における銀河の位置を知ることができます。一方で、銀河は宇宙空間にただランダムに散らばっているわけではなく、集まっている場所もあれば、ほとんど存在しない場所もあります。つまり、銀河赤方偏移サーベイを通して、この銀河の集まり具合（クラスタリング）を調べることができるわけです。では、この銀河のクラスタリングからどのような興味深い知見を得ることができるのでしょうか？

1.1 バリオン音響振動と銀河クラスタリング

宇宙初期は非常に高温であったため、電子や陽子（バリオン）は光子と強く結合し、一つの流体プラズマとして存在していました。この流体は圧力を持つため、密度分布の凸凹（揺らぎ）は音波（密度波）として伝搬します。そのため、物質（暗黒物質+バリオン）の密度が高い領域を考え

ると、暗黒物質がその地点に留まっているのに対し、バリオンは密度波として全方向に伝搬していきます。しかし、宇宙膨張に伴い温度が下がり、バリオンと光子の結合が切れてしまうため、ある時点（宇宙の晴れ上がり）で密度波の伝搬は止まり、バリオン密度が高い領域がリング状に残されます。この現象は一般に、バリオン音響振動（BAO）と呼ばれています [1, 2].

BAOにより、リング状の領域（バリオン）とその中心（暗黒物質）において物質密度が高いというパターンが宇宙のいたるところに現れるわけですが、銀河は物質密度の高い領域で多く作られるため、結果的に銀河のクラスタリングにも同じようなパターンが見られます（図1）。このリングの半径に対応するスケール（BAOスケール）は、宇宙の晴れ上がりまでに密度波が伝搬した距離に対応し、およそ150メガパーセク（Mpc）であることが分かっています。

このBAOパターンを調べるには銀河のクラスタリングを定量的に測る必要がありますが、その際に最も基本的な統計量となるのが二点相関関数です。二点相関関数は、任意に選んだ二つの銀河

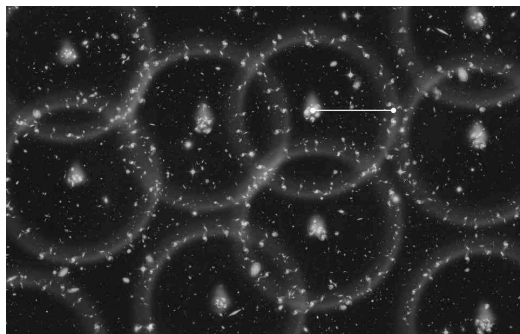


図1 銀河クラスタリングに現れるバリオン音響振動 (BAO) パターンの概念図。BAOにより、リング状の領域とその中心において銀河の数が多いというパターンが宇宙のいたるところに現れる様子を表しています。このリングの半径 (白線) がBAOスケールに対応します (Credit: Zosia Rostomian, Lawrence Berkeley National Laboratory)。

のペアを二点間の距離 r で分類した際の、各 r ごとのペアの数を表していて、ペアの数が多いほど相関が強いということを表しています。図2は、銀河分布の二点相関関数の単極子 (左図) と双極子 (右図) を表していて、それぞれ銀河分布の等方成分と非等方成分に対応します。BAOのパターンは、BAOスケールだけ離れた領域の銀河の数密度に特に相関があることを意味しているわけですが、実際、BAOスケール ($r=100 h^{-1} \text{Mpc}^*$) 周辺で二点相関関数の単極子に特徴的なピーク (BAOピーク) が見られるのが分かります。

1.2 BAOによる距離測定と暗黒エネルギー

ところで、前述の二点相関を計算するには任意の二つの銀河の間隔が分かっている必要があるわけですが、そのためには各銀河の三次元座標を決めなければなりません。つまり、実際の赤方偏移サーベイで得られる銀河の赤方偏移 (一次元) と天球上の位置 (二次元) のそれぞれの情報を、距離に変換する必要があるわけです。もし距離の変

換を間違えると、本来のBAOパターンから銀河がずれて配置されるため、二点相関に現れるピークの位置がずれてしまいます。しかし、BAOスケールそれ自体は宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測から非常に精度よく決定されるため、ピークの位置を「ものさし」として用いることで、逆に、正しい距離 (の変換則) を推定することができます。

では、その距離の情報から何が得られるのでしょうか? 一般相対性理論の基礎方程式であるアインシュタイン方程式は、重力場、すなわち時空の幾何学的構造が、物質の分布によって決められることを表しています。これは、ある赤方偏移に位置する銀河までの距離や、ある角度スケール離れた二つの銀河間の距離は、宇宙を満たしている物質の種類や性質、その割合によって決められることを意味しています。現在の宇宙は、その9割以上が暗黒物質や暗黒エネルギーという未知の物体で満たされていることが分かっています。特に、宇宙の加速膨張の鍵を握る暗黒エネルギーは、エネルギーの一種ということ以外はほとんど何も分かっておらず、そのエネルギー密度と圧力との関係 (状態方程式) を明らかにすることが目下の課題となっています。

スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) によって、銀河の二点相関にBAOピークを初めて検出して以来 [4], BAOを用いた距離測定は、暗黒エネルギーを始めとする宇宙論パラメータの測定において重要な役割を担ってきました。さらに、すばる超広視野分光観測プロジェクト (Prime Focus Spectrograph; PFS [5]) や Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI [6]) といった、次世代の銀河赤方偏移サーベイプロジェクトが現在進行中です。これらのプロジェクトでは、サーベイの赤方偏移範囲や領域のサイズがこれまでにない規模のものになるため、宇宙膨張が

*¹ h は宇宙の膨張率を表す定数 (ハッブルパラメータ) で、最新のCMBの結果では $h=0.68$ となっています [3]。

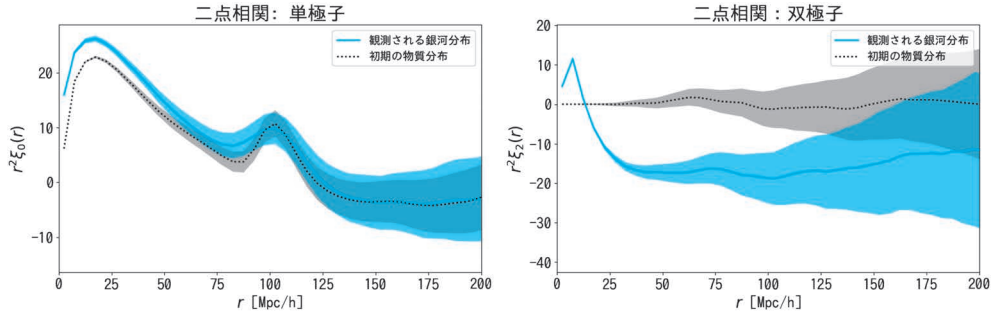


図2 銀河（物質）分布の二点相関関数. N 体シミュレーションから得られた、初期の物質分布 ($z=49$; 黒の点線) と観測される銀河分布 ($z=0.5$; 青の実線) の二点相関関数を示しています（規格化については4.2節を参照のこと）. 単極子（左図）と双極子（右図）はそれぞれ、分布の等方成分と非等方成分に対応します. また、色付き領域は二点相関のエラー（標準偏差）を表しています.

減速から加速に転じる宇宙の膨張史にわたって、これまでにない精度の距離測定が行えると期待されています.

2. 銀河の固有運動に伴う問題点

宇宙膨張に伴い銀河同士の間隔は次第に広がっていきませんが、銀河の数は物質密度に対応しているため、宇宙の晴れ上がりの時点で物質密度の分布に刻まれたBAOパターンは、現在の銀河分布に残っているはずですが、しかし、実際には、それぞれの銀河は固有運動によって元々の位置から移動するため、いくつかの問題が生じてしまいます.

2.1 BAOピークの減衰

重力は、暗黒物質や銀河に対して引力として働くため、密度が高い場所には周囲の物質が集まり、反対に、密度が低い場所からは物質が無くなっていきます. そのため、元々BAOパターンを形作っていた銀河がその周辺の密度分布に応じて動く（固有運動）ことで、結果的にBAOパターンが薄められてしまいます. 実際、図2から、観測される銀河分布は初期の密度分布に比べて、二点相関に現れるBAOピークが均ざれていることが分かります.

また、宇宙初期においては密度の揺らぎの振幅は非常に小さなものでしたが、上記のように物質

の集中が局所的に進むことにより、小スケールのものから徐々に増大していきます. 密度の揺らぎは、大きさが十分に小さいとみなせる場合は線形的に成長していきますが、ある程度の大きさになると異なるスケールの揺らぎが互いに影響を及ぼし合うため、その成長は非線形的になっていきます. これに伴い、二点相関のエラー（図2の色付き領域）が大きくなることが分かっています.

2.2 赤方偏移歪み（カイザー効果）

銀河の固有運動に起因するもう一つ別の問題としては、視線方向に沿った運動が赤方偏移の測定に影響を与えてしまうという点が挙げられます. 銀河からやってくる光の波長は宇宙膨張によって引き伸ばされるため、より遠方に位置する銀河ほど波長の伸び具合（赤方偏移）が大きくなります. しかし、銀河が固有運動により遠ざかって（近づいて）いる場合、赤方偏移は実際よりも大きく（小さく）観測されるため、そこから推定される銀河までの距離も実際より長く（短く）になってしまうわけです. この影響を受けた座標系を、通常座標系（実空間）と区別して赤方偏移空間と呼びます.

赤方偏移空間では、視線方向に沿った固有運動が実際よりも大きく見えてしまうため、先述したBAOパターンの弱体化や密度揺らぎの成長の非線形化をより進めることとなります. また、それ

らに加えて、視線方向を特別な方向にしてしまう、つまり、銀河のクラスタリングが非等方的になってしまう（赤方偏移歪み（カイザー効果 [7])), という新たな問題が出てきます。実際、図2の右図から、銀河クラスタリングの非等方性を表す二点相関関数の双極子成分が0から大きく外れていることが分かります。

2.3 距離測定の精度の悪化

実際の距離測定は、観測から得られた銀河の二点相関関数を理論モデルと比較し（フィッティング）、モデルに含まれるパラメータを決定することにより行います。これまで、銀河の固有運動が二点相関関数へ与える影響について見てきましたが、肝心のBAOピークの位置はほとんど変化せず、ずれが0.3%程度であることが分かっています [8]。では、上記の問題は距離測定にどのような影響を及ぼすのでしょうか？

まず一つ目に挙げられるのは、ピークが均されるといふ効果と二点相関関数のエラーが大きくなるという効果が重なることで、観測結果と理論モデルがずれやすくなってしまい、結果的に距離測定の精度が下がってしまうということです。二つ目としては、密度揺らぎの成長を考える際に非線形効果を考慮する必要が出てくるため、二点相関関数の理論モデルの計算が困難になるという問題が挙げられます。そのため、より精密な距離測定に向けて、銀河の固有運動を系統的に扱う必要が出てくるわけです。

3. 物質分布の再構築

では、銀河の固有運動をどのようにして調べれば良いのでしょうか？ 実際に私たちが赤方偏移サーベイから得られる情報は赤方偏移空間の銀河分布なわけですが、銀河の固有運動がその周辺の密度勾配に応じて決まるということを押さえると、この観測された銀河（物質）分布が利用できそうです。しかし、先述したように、密度揺らぎの時間発展は非線形的であるため、それに起因す

る銀河の固有運動は、様々なスケールの揺らぎが互いに影響を及ぼし合う中で決められていきます。そのため、観測された銀河の分布から各銀河の軌跡（変位ベクトル）を推定することは、非線形方程式を逆に解く必要があるという意味で、一見すると不可能に見えます。

しかし、ここで思い出してもらいたいのは、私たちが対処すべきなのは銀河の「二点相関」のピークの減衰とエラーの増大という問題であるということです。二点相関に現れるこれらの変化は、個々の銀河の変位ベクトルというよりも、あるスケール離れた二つの銀河の変位ベクトルの「差」によって生じます。つまり、各銀河の固有運動を完璧に推定できなくても、二つの銀河の相対的な運動を推定できれば良いということになります。特に、BAOスケール程度離れた銀河の相対運動は、主に、比較的大きなスケール ($0.02 < k < 0.2 h \text{ Mpc}^{-1}$; 波数 k はスケールの逆数に対応) の密度揺らぎによって決められることが分かっています [9]。つまり、銀河の固有運動が様々なスケールの密度揺らぎによって引き起こされる一方で、その中の大スケールの揺らぎに起因する成分のみが距離測定の精度に関わってくるわけです。

3.1 標準再構築法

以上のことを念頭に置き、過去の銀河赤方偏移サーベイでは、標準再構築法と呼ばれる手法を用いて銀河（物質）分布を再構築することにより、距離測定の精度を改善してきました [9, 10]。この標準再構築法は、ラグランジュ摂動論と呼ばれる、物体の変位ベクトルに注目してその運動を記述する理論に基づいているため、銀河の固有運動を推定しようとしている私たちにとても非常に都合が良いわけです。特に、ピークの減衰やエラーの増大に効いてくる大スケールの密度揺らぎは、小スケールに比べると振幅が小さく、非線形効果が弱いため、線形近似であるゼルドビッチ近似 [11] が良く成り立つことが知られています。

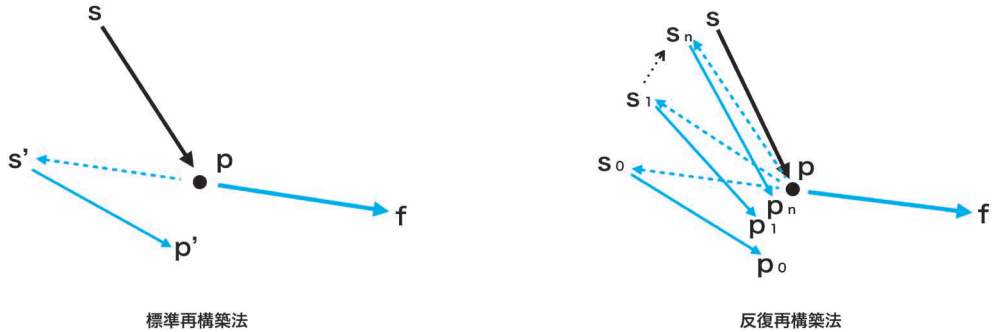


図3 再構築法のイメージ図。周辺の密度勾配に応じて決まる物質や銀河の固有運動を実線の矢印で示しています。特に、初期位置（点 s ）から現在位置（点 p ）までの実際の軌跡が黒、その他は青で色付けされています。また、点線の矢印は実際の再構築のステップに対応します。

標準再構築法（図3の左図参照）では、具体的には以下のように再構築を行います。まず、観測された銀河を格子状（グリッド）に配置し、同じグリッドにその数十倍程度の数の粒子をランダムに配置します。このランダムに配置された粒子（ランダム粒子）は、銀河クラスタリングの基準としての役割を担っていて、このランダム粒子に対して銀河がどの程度集まっている、または離れているかによって密度の揺らぎを定義します。そして、振幅が大きい小スケールの揺らぎの影響を除去するために、平滑化フィルタを適用し、あるスケール（平滑化スケール Σ ）以下の揺らぎの平滑化を行います。次に、ゼルドビッチ近似を用いることで、密度揺らぎ場から各銀河の変位ベクトル（ベクトル pf ）を推定します。最後に、そのベクトルと逆向きに（ベクトル ps' ）銀河とランダム粒子を移動します。この非常にシンプルな行程によって物質分布の再構築を行うことで、距離測定のエラーが2/3~1/2倍まで小さくなることが分かっています [8, 12]。

しかし、この標準再構築法にはいくつかの問題点があります。まず一つ目は、図3の左図からも分かるように、再構築後の密度分布（点 s' に対応する）に対して再度推定された変位ベクトル（ベクトル $s'p'$ ）は、一般に、再構築に用いた変位ベクトル pf と一致しないため、ずれ（点 p と p' ）が

生じてしまうという点です。本来であれば、実際の銀河の軌跡であるベクトル sp を使いたいわけですが、そのためには、銀河が点 s にいた時点における密度分布が必要になります。しかし、それこそが正に私たちが再構築しようとしている初期の物質分布に他ならないため、観測された銀河分布から推定できる変位ベクトル pf で代用しているわけです。

二つ目の問題は、銀河とランダム粒子を移動する際に「偽の密度揺らぎ」が生まれる可能性があるということです。赤方偏移歪みの説明で述べたように、観測される銀河の固有運動は視線方向に沿って伸びて見えるため、再構築の過程で銀河を移動する際にはその分余計に移動させる必要があります。すると、視線方向に沿って動かす大きさが銀河とランダム粒子で異なるため、結果的に、本来存在しないはずの密度の揺らぎが意図せずして生み出されてしまうこととなります。特に、将来的な赤方偏移サーベイプロジェクトでは、高赤方偏移 ($z > 1$) に及ぶ銀河の分光観測を念頭に置いているため、大気光の影響により検出可能な銀河の数密度が視線方向に沿って急激に変化することが懸念されています [5]。そのため、共に視線方向に関連した問題である、偽の密度揺らぎの生成と数密度の急激な変化という二つの影響が組み合わせることで、より複雑化した問題になってし

まう危険性があるのです。

標準再構築法は、線形近似を採用することにより小スケールからの非線形効果をきちんと取り扱えていないため、そもそも完璧なものではありません。しかし、上記の問題は、非線形効果を見逃していることに起因するものではないため、再構築の結果に何らかの系統的な影響を及ぼしてしまう可能性があるわけです。

3.2 反復再構築法

これらの標準再構築法の問題点を解決するために、私たちは、本稿のメインテーマである「反復再構築法」という新たな再構築法を提唱しました [13]。この反復再構築法は、約20年前に提唱された反復的な再構築法 [14] に基づいているのですが、当初は特にBAOによる距離測定を念頭に置いていたわけではありませんでした。そこで、密度揺らぎの二点相関関数を復元するという文脈に沿うように改良を加え、以下のような手法を考案しました (図3の右図参照)。

まず、標準再構築法と異なる点としては、変位ベクトルから初期の密度揺らぎ場を推定する際に、流体に対する連続の式 (質量保存則を表す) を用いるという点です。ここでいう連続の式とは、宇宙初期と成長した後期の物質密度場の関係を変位ベクトル場によって表したものです。ポイントとしては、密度場は常にグリッド上で定義されているため、銀河とランダム粒子を別々に動かすことによって生じる「偽の密度揺らぎ」の問題に煩わされることがないということです。また、平滑化フィルタを用いて小スケールの密度揺らぎの影響を除去していることを考慮して、平滑化スケール以下の揺らぎについては既に存在していたものと仮定し、連続の式を修正しました。

そしてもう一つの相違点は、反復再構築法という名の通り、再構築を「反復」ということです。具体的には以下のように行います。まず、標

準再構築法と同様に、ゼルドビッチ近似を用いて変位ベクトル (ベクトル pf) を求め、連続の式を用いて初期の密度場 (点 s_0 に対応する) を推定します。そして、その再構築後の密度場に対して、再度変位ベクトル (ベクトル s_0p_0) を求め、同様に初期の密度場 (点 s_1 に対応する) を推定します。このプロセスを何度も繰り返し、推定される変位ベクトルが変化しなくなるまで ($s_{n-1} \simeq s_n$) 続けます。この手法においても、小スケールからの影響を除去していたり、ゼルドビッチ近似を使っていたりするため、実際の変位ベクトル (ベクトル sp) と推定された変位ベクトルは完全には一致しないでしょう。しかし、再構築された密度場と変位ベクトルがきちんと対応しているという点で、標準再構築法の (一つ目の) 問題が解決されていると言えます。

4. N体シミュレーションを用いた評価

本研究では、反復再構築法の性能評価、そして標準再構築法との比較を行うために、N体シミュレーションによって作成された物質・銀河分布の擬似カタログに再構築法を適用しました。今回は特に、Abacusと呼ばれるN体シミュレーションコードを採用し [15]、一辺のサイズが $1100 h^{-1}$ Mpcの独立したシミュレーションボックス20個を対象としました。また、シミュレーションの初期条件 ($z=49$) としてCMBの観測プロジェクトであるPlanck Collaboration [3] から得られた各種パラメータを採用しました。そして、シミュレーションによって物質分布を成長させ ($z=0.5$ まで)、それに基づいて赤方偏移空間における銀河分布の擬似カタログを作成しました*2。

4.1 変位ベクトルの再構築

まず、物質分布の再構築において鍵となる、変位ベクトルの再構築に注目してみます [13]。そのために、銀河の擬似カタログの元となる、赤方偏

*2 まず、Rockstarハローファインダー [16] によって物質の集合体である「ハロー」の同定を行い、その後、GRAND-HOD [17] と呼ばれる、各ハロー内の銀河の分布を表したモデルを用いて、銀河分布を推定しました。

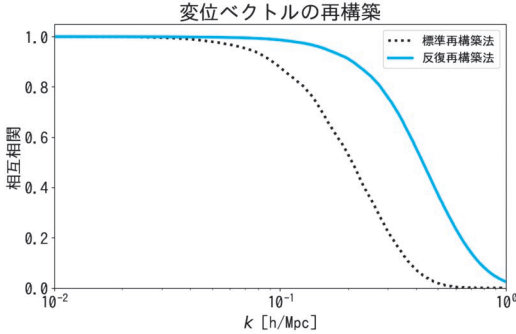


図4 再構築された変位ベクトルと実際の物質粒子の軌跡との相互相関。標準再構築法（黒の点線）と反復再構築法（青の実線）の二種類の手法が示されています（ $\Sigma=5 h^{-1} \text{ Mpc}$ ）。横軸の波数 k はスケールの逆数に対応します。

移空間における成長した物質分布 ($z=0.5$) に対して再構築法を適用し、再構築された変位ベクトルを実際の物質粒子の変位ベクトル（粒子の軌跡）と比較しました。図4は、両方の変位ベクトルをフーリエ変換したものの相互相関を表している、横軸の波数 k はスケールの逆数を表し、 k が小さく（大きく）なるほど大（小）スケールに対応します。80%以上の相関が見られるスケールを比べてみると、標準再構築法が $k < 0.13 h \text{ Mpc}^{-1}$ であるのに対し、反復再構築法は $k < 0.28 h \text{ Mpc}^{-1}$ となっています。つまり、反復再構築法の方がより小さいスケールまで、変位ベクトルを正確に推定できていることが分かります。

4.2 二点相関関数の復元

次に、二点相関関数が再構築によってどの程度復元されるのか見てみましょう [18]。図5は、再構築前後の銀河分布と初期の物質分布の二点相関関数の差を取り、20個のボックスで平均したも

のを表しています*3。この差が0に近いほど、再構築が成功していることを示しているわけです。まず、単極子と双極子いずれにおいても、再構築前（黒の点線）に比べて再構築後（色付きの線）の方が全体的に0に近いことが分かります。つまり、標準再構築法と反復再構築法のいずれの再構築法も、二点相関の復元において一定の成功を取っているとと言えます。一方で、両方の再構築法を比べてみると、反復再構築法の方が、広い r の値にわたって正確に二点相関を復元できていることが分かります。特に、反復再構築法が平滑化スケールの違いにほとんど影響されないのに対し、標準再構築法はピーク周辺においても大きく影響を受けているのが分かります*4。上述したように、BAOピークの減衰は主に大スケールの密度揺らぎに起因しているため、本来ならば、平滑化スケールの違い ($5 < \Sigma < 15 h^{-1} \text{ Mpc}$) という小スケールの効果はBAOピークにほとんど影響を与えないはずです。つまり、先述した標準再構築法の問題点が、このような系統的な違いを生み出してしまっていると考えられます。

4.3 二点相関関数のエラー

では、距離測定の精度に直接関わってくる二点相関のエラーは、再構築によってどのように改善されるのでしょうか？ 二点相関関数 ($\xi(r_i)$) のエラーは、一般に共分散行列 ($\text{cov}[\xi(r_i), \xi(r_j)]$) によって表されますが、特に、その対角成分がいわゆる分散 ($\sigma^2[\xi(r_i)]$) に対応します。図6は、前節で計算した二点相関関数に対して、その標準偏差 ($\sigma[\xi(r_i)]$) を示しています*5。まず、2.1節で述べたように、密度揺らぎの非線形成長が進むことにより、再構築前の銀河分布（黒の点線）

*3 銀河分布の密度揺らぎの振幅 (δ_g) は、成長した物質分布のもの (δ_m) と比例関係にあるため ($\delta_g = b\delta_m$; b は銀河バイアス)、シミュレーションから推定された銀河バイアスで割りました。また、初期の物質分布の密度揺らぎ場についても、赤方偏移 ($z=0.5$) を合わせるために、線形の密度揺らぎの成長度合いを表す線形成長因子を掛けています。

*4 反復再構築法では、平滑化においても赤方偏移歪みの影響を考慮するために、視線方向とそれに垂直な方向で異なる平滑化スケールを用いていて、それにより双極子が小スケール ($r < 40 h^{-1} \text{ Mpc}$) においてわずかに改善されています。

*5 ショットノイズの影響を抑えるために、各シミュレーションボックスを $3^3=27$ 等分に分けたサブボックスの中で二点相関を計算し、共分散行列の推定を行いました。

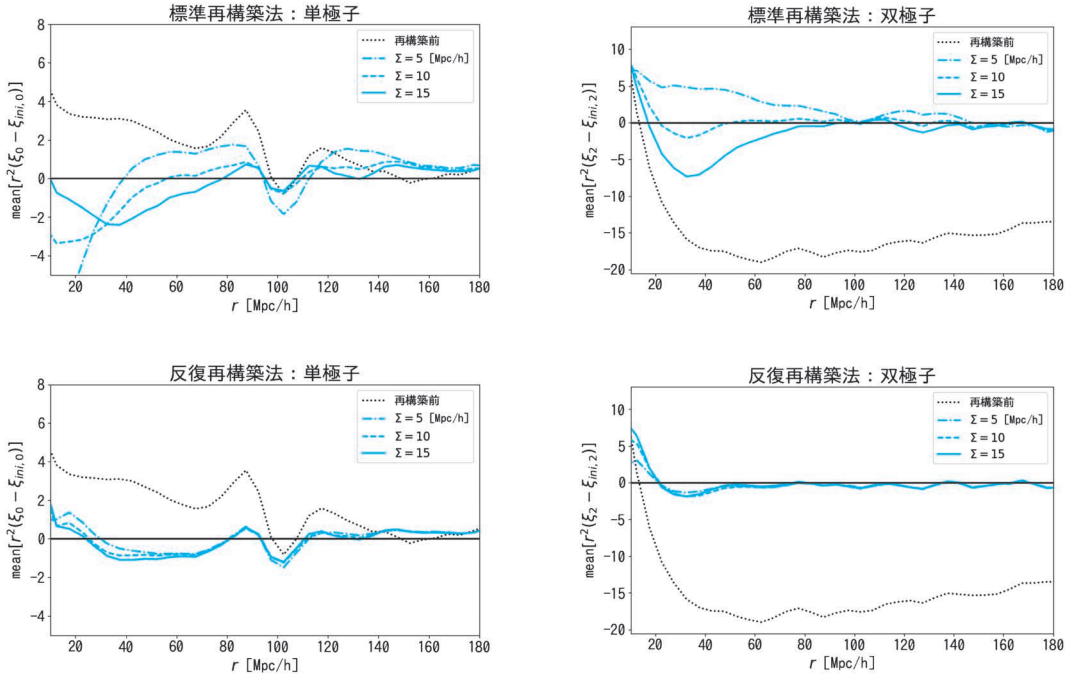


図5 再構築前後の銀河分布と初期の物質分布の二点相関関数の差。標準再構築法（上図）と反復再構築法（下図）のそれぞれについて、二点相関の単極子（左図）と双極子（右図）を示しています。また、各ケースにおいて、再構築前（黒の点線）と3種類の平滑化スケール ($\Sigma=5, 10, 15 h^{-1} \text{ Mpc}$) を用いた再構築後（それぞれ青の一点鎖線、破線、実線）の結果を載せています。

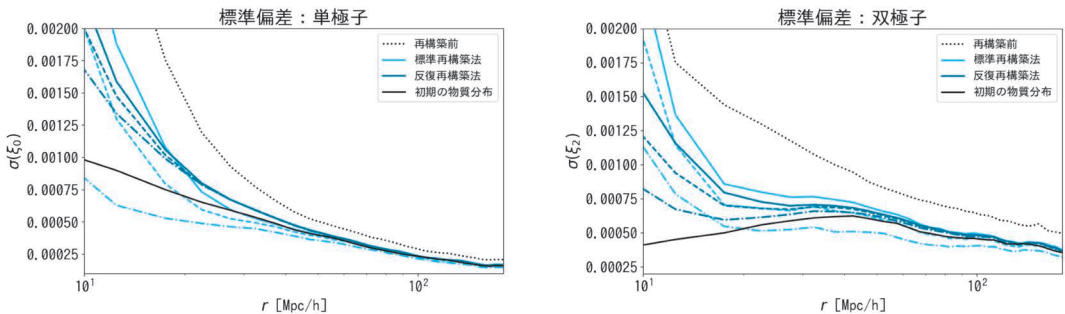


図6 再構築前後の二点相関関数の標準偏差。二点相関の単極子（左図）と双極子（右図）のエラーを、銀河分布の再構築前（黒の点線）、標準再構築後（青）、反復再構築後（紺）、そして初期の物質分布（黒の実線）、それぞれについて示しています（その他の線の種類については図5と同様）。

は、全ての r の値にわたって初期の物質分布（黒の実線）よりもエラーが大きくなっています。そして、単極子と双極子のどちらにおいても、再構築法を適用することで増大したエラーを減らすことに成功しているのが分かります。また、二種類

の再構築法の両者とも、 r の値が小さくなるにつれて三つの平滑化スケール間の差が広がっていきますが、標準再構築法の方が差が見え始めるのが早く、またその度合いも大きくなっています。最も留意すべき点としては、特に単極子において、

標準再構築法を適用した場合の二点相関のエラーが、初期の物質分布の場合を下回っているということが挙げられます。なぜなら、この結果は、標準再構築法を適用すると距離測定の精度を過剰に良く見積もってしまう可能性があることを意味しているからです。

5. まとめと今後の展望

本稿では、次世代の銀河赤方偏移サーベイにおいてBAOによる距離測定の精度や信頼性を高めることを念頭に置き、新しい物質分布の再構築法である「反復再構築法」を紹介しました。まず、これまで広く採用されてきた標準再構築法は、1) 推定された変位ベクトルと再構築された物質分布が首尾一貫していない、また、2) 偽の密度揺らぎが生成されてしまう危険性がある、という問題を抱えていました。そこで、反復再構築法では、推定された変位ベクトルから再構築をする際に連続の式を使い、その行程を何度も繰り返すことで、それらの問題の解決を図りました。実際に、 N 体シミュレーションによって作成された模擬カタログに適用してみたところ、標準再構築法に比べて、より小スケールまで正確に変位ベクトルを推定できることが分かりました。

さらに、距離測定に直接関わってくる二点相関関数やそのエラーについても、反復再構築法の方が、より首尾一貫して初期の密度分布のものを復元できることが確かめられました。特に、理論モデルとのフィッティングで重要となるBAOピーク周辺 ($50 < r < 150 h^{-1} \text{ Mpc}$) において、再構築の結果が平滑化スケールの値にほとんど左右されないということは、重要な改善点と言えます。なぜなら、平滑化スケールは小スケールの密度揺らぎの影響を除去するために導入され、本来、平均的な銀河間距離やグリッドのサイズによって決まるものであるため、大スケールの揺らぎの効果であるピークの減衰には影響しないはずだからです。つまり、反復再構築法は、「より信頼できる

形で」距離測定の精度を向上させることができるわけです。

次世代の銀河赤方偏移サーベイであるPFSやDESIでは、3%以下の精度で距離測定を行うことを目指しているため、再構築法をはじめ、解析の中で生じる系統的な誤差をいかに減らせるか、ということが鍵となってきます。特に、実際のサーベイ領域の形や観測される銀河数密度の赤方偏移依存性などにより、標準再構築法の問題点により顕著に現れる可能性が出てきます(3.1節を参照のこと)。また、それに伴い、二点相関関数の復元が不正確で、不安定になるほど、フィッティングに用いる理論モデルのパラメータを増やす必要が出てくるため、モデルが複雑化してしまうという懸念もあります。今後はそれらを踏まえ、実際のサーベイに近い現実的な状況において、反復再構築法の利点がどのように生かされるか、また、距離測定や宇宙論パラメータの制限がどのように変化・改善するのか、といった問題を引き続き調べていくことで、得られたデータを最大限に有効利用できる解析手法を探っていきたいと考えています。

謝辞

本稿の内容は、筆者の博士論文[19]、及び査読論文[13, 18]に基づいています。共同研究者であるDaniel Eisenstein氏とグループのメンバーには、研究の遂行はもちろんのこと、CfAの滞在期間を通して様々な形で支えていただきました。また、修士・博士課程の指導教官である二間瀬敏史氏、千葉柎司氏には、長期間にわたってご指導いただきました。そして、Kavli IPMUでは、高田昌広氏、日影千秋氏、砂山朋美氏をはじめ、スタッフや研究員、大学院生の皆様と数多くの議論をしていただきました。以上の方々に深く感謝いたします。

最後に、本稿の執筆を依頼して下さった岡部信広氏、そしてお世話になった編集部の皆様に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Peebles, P. J. E., & Yu, J. T., 1970, ApJ, 162, 815
- [2] Sunyaev, R. A., & Zeldovich, Y. B., 1970, Ap & SS, 7, 3
- [3] Planck Collaboration, et al., 2016, A&A, 594, A13
- [4] Eisenstein, D. J., et al., 2005, ApJ, 633, 560
- [5] Takada, M., et al., 2014, PASJ, 66, R1
- [6] DESI Collaboration, et al., 2016, arXiv:1611.00036
- [7] Kaiser, N., 1987, MNRAS, 227, 1
- [8] Seo, H.-J., et al., 2010, ApJ, 720, 1650
- [9] Eisenstein, D. J., et al., 2007, ApJ, 664, 675
- [10] Padmanabhan, N., et al., 2012, MNRAS, 427, 2132
- [11] Zel'dovich, Y. B., 1970, A&A, 5, 84
- [12] Seo, H.-J., & Eisenstein, D. J., 2007, ApJ, 665, 14
- [13] Hada, R., & Eisenstein, D. J., 2018, MNRAS, 478, 1866
- [14] Monaco, P., & Efstathiou, G., 1999, MNRAS, 308, 763
- [15] Garrison, L. H., et al., 2018, ApJS, 236, 43
- [16] Behroozi, P. S., et al., 2013, ApJ, 762, 109
- [17] Yuan, S., et al., 2018, MNRAS, 478, 2019
- [18] Hada, R., & Eisenstein, D. J., 2019, MNRAS, 482, 5685
- [19] 羽田龍一郎, 2019, 博士論文 (東北大学)

Precision Measurements of the Cosmological Distance with Galaxy Redshift Surveys

Ryuichiro HADA

Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI), UTIAS, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8583, Japan

Abstract: The baryon acoustic oscillation (BAO) pattern found in the late-time galaxy distributions is widely used as a standard ruler to measure the cosmological distance scale and understand the property of dark energy. While the peculiar velocities of galaxies smear out the BAO pattern, reconstructing the initial matter distribution regains the precision of distance measurements. In this article, we introduce a new reconstruction method, with the intent of improving the precision and reliability of distance measurements in upcoming galaxy redshift surveys, and compare it with the traditional method.