

# すばる望遠鏡を用いた130億光年 彼方での一般相対性理論の検証

奥村 哲平<sup>1</sup>・舎川 元成<sup>2</sup>・  
戸谷 友則<sup>3</sup>・日影 千秋<sup>1</sup>

〈<sup>1</sup> 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；<sup>2</sup> 国立清華大学 台湾新竹市光復路 2 段 101 番；<sup>3</sup> 東京大  
学大学院理学系研究科天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

<sup>1</sup>e-mail: tepei.okumura@ipmu.jp



奥村



舎川



戸谷



日影

宇宙の加速膨張の起源は現代宇宙論の最大の謎の一つであり、銀河サーベイをトレーサーとした宇宙大規模構造の観測は、その解明のための強力なツールである。宇宙の加速膨張の性質を理解するには、宇宙の膨張率あるいは構造の成長率の時間進化を調べる必要がある。われわれは、FMOS分光器を取り付けたすばる望遠鏡による銀河サーベイ、“FastSound”を用いて、約130億光年彼方の大規模構造が生み出す銀河の運動の速度場を世界で初めて詳細に調べた<sup>\*1</sup>。その結果、このような遠方宇宙においても銀河の運動はアインシュタインによって提唱された一般相対性理論を前提とし、宇宙定数を含む標準宇宙モデルの予言とよく一致することがわかった。宇宙の加速膨張の原因は宇宙定数である可能性をさらに支持する結果である。本稿では、FastSoundサーベイの概要と、得られた宇宙論的結果について解説する。

## 1. はじめに

### 1.1 宇宙の加速膨張

ビッグバンから続いている宇宙の膨張は、宇宙の大きさが現在の約半分だった頃から加速膨張に転じている。この加速膨張を引き起こす源はダークエネルギーと呼ばれ、宇宙背景放射、Ia型超新星、宇宙大規模構造、宇宙論的重力レンズなどの観測から、宇宙のエネルギー成分の約70%を占めることがわかっているが<sup>1)</sup>、その正体は明らかになっていない<sup>2)</sup>。

ダークエネルギーの代表的な候補は、アイン

シュタインによって導入された宇宙定数である。これはアインシュタイン方程式の左辺に許される自由度であり、文字どおり時間とともにエネルギー密度が変化しない。これを右辺 (=物質項)に移項することにより、負の圧力をもつ新たな物質とみなすことができる。一方、このような項を左辺 (=重力項)に残しておくことも許される。これは加速膨張を、宇宙を支配する重力の法則が一般相対性理論からずれていることによる見かけの効果と見なすことに対応している(修正重力理論)。これまで、宇宙論的スケールで宇宙定数や一般相対論で説明できない観測は報告されてい

<sup>\*1</sup> この距離は共動距離であるので、130億年前の宇宙を見ているわけではないことに注意していただきたい。約90億年前の宇宙に対応している。

いが、まだ誤差が大きく、さらなる天文学的観測が必要となる。

## 1.2 宇宙大規模構造と銀河サーベイ

では、具体的にどのような観測によって加速膨張の起源に迫るのか？ アインシュタイン方程式の右辺を変更することと左辺を変更することは、数学的には同等であるが、上で述べたように物理的な意味は大きく異なり、それぞれを調べる観測的手法も異なる。ダークエネルギーを制限するには宇宙の膨張率、すなわちハッブルパラメータを測る必要がある。一方、宇宙の構造形成は重力場によって成長するため、異なる重力理論の元では構造の成長する速度が異なる。例えば、アインシュタイン・ヒルベルト作用の曲率 $R$ を一般化させた $f(R)$ 重力模型のもとでは、 $\Lambda$ CDM (lambda cold dark matter) モデルからのずれが大きくなる宇宙後期に構造が速く成長する。一方、重力が余剰次元にも伝播するブレーンワールド模型のもとでは逆に成長は遅くなる。すなわち、修正重力理論を制限するには膨張宇宙における構造の成長する速度を測る必要がある。

このような背景において、銀河分布をトレーサーとした宇宙大規模構造の観測、すなわち銀河サーベイが加速膨張の起源を探る最も強力な手法の一つと考えられている。宇宙の膨張率は、銀河分布から観測できるバリオン音響振動を標準ものさしとして<sup>3)</sup>、さらにはその非等方性から宇宙の幾何学を決定することによって<sup>4)</sup> 測ることができる。また、構造の成長速度についても、銀河分布から観測できる赤方偏移変形効果を用いて直接測ることができる<sup>5)</sup>。つまり、銀河サーベイの情報をもっとく用いることによって、二通りの可能性を同時に調べることができる。バリオン音響振動については本稿では取り扱わないため、例えば筆者の過去の解説記事<sup>6)</sup>を参照していただきたい。

## 2. 赤方偏移変形効果

本稿では、赤方偏移変形効果を用いた重力理論の検証に着目する。この効果についても筆者らの過去の記事で解説しているため<sup>6), 7)</sup>、詳細はそちらを参照していただくことにして、ここでは簡潔に説明する。

宇宙論的スケールにおいて、個々の天体までの距離を直接測ることはできない。銀河サーベイでは、代わりに赤方偏移を測ることによって宇宙の膨張速度を求め、それを距離に変換する。しかし、銀河は膨張宇宙空間で静止しているわけではなく、周りの銀河との重力相互作用によって絶えず運動している。そのため、赤方偏移から求めた距離は、実際の銀河までの距離に銀河の固有速度の視線方向成分を加えたものになる。十分に大スケールでは、宇宙は一様等方であることが知られている（宇宙原理）が、銀河サーベイでは視線方向が特別な方向となり空間に非等方性が生まれる。このようにして決める三次元空間を赤方偏移空間と呼ぶ。この非等方性は、銀河の速度場によって引き起こされるため、非等方性を統計的に解析することによって、密度ゆらぎの成長率を決定することができる。冒頭で述べたように、一般相対論に比べて強い重力モデルの元では構造の成長が速く進み、逆に弱い重力モデルでは構造の成長は遅くなる。すなわち、赤方偏移変形を観測することによって、修正重力理論を直接制限することができる<sup>8)</sup>。

赤方偏移変形効果は、スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) などさまざまな観測によって検出されているが、異なる重力理論を観測から精度良く区別するには大規模なサーベイが必要となる。さらに重要な点は、後半の図8に見るように、これまでの観測は赤方偏移で1以下の比較的近傍宇宙に限られている\*2。しかし、われ

\*2  $z > 1$ の唯一の先行研究として、 $z \sim 3$ での測定が報告されているが、 $2\sigma$ の有意度（エラーの大きさが50%）で、検出と報告するには至っていない<sup>9)</sup>。

われは宇宙の構造の時間進化を見る必要があるの  
で、高赤方偏移から広い範囲にわたって観測をす  
る必要がある。

### 3. FastSound 銀河サーベイ

このような背景から、赤方偏移1を超える遠方  
宇宙における重力理論の検証を目的とした銀河  
サーベイが、本稿で紹介する FastSound サーベイ  
である。これまで、FastSound の観測に基づい  
て、サーベイの概要<sup>10)</sup>、観測量である輝線銀河  
の性質と銀河カタログ<sup>11)</sup>、輝線銀河の質量-金属  
量関係<sup>12)</sup>、宇宙論的解析と一般相対性理論の検  
証<sup>13)</sup>、という4本の論文が出版されている。本節  
ではサーベイの概要とカタログについて解説し、  
宇宙論的解析と結果は次章以降で紹介する。

#### 3.1 ファイバー多天体分光器 FMOS

Fiber Multi-Object Spectrograph (FMOS ;  
ファイバー多天体分光器) は、すばる望遠鏡に取  
り付けられた近赤外帯 (0.9-1.8  $\mu\text{m}$ ) の多天体同  
時分光装置で、京都大学を中心に、日本とイギリ  
ス、オーストラリアの共同で製作された<sup>14)</sup>。主  
焦点には約15 cm 四方に約400本のファイバー先  
端が配置されていて、天体の座標を入力すると自  
動でファイバー先端が10ミクロンの精度で天体  
の位置へ向かう。ファイバーに入射した光は二台  
の分光器に導かれる (図1)。ファイバー配置装  
置エキドナはオーストラリアの開発によるもの  
で、整然と並んだファイバー先端がオーストラリ  
アに生息するエキドナ (ハリモグラ) のように見  
えることからこう名づけられている (図1左)。  
すばるの武器である主焦点を生かし、直径30分  
角という広い視野で400もの天体を同時に分光で  
きるのである。観測の視野と深さ、観測する銀河  
数が重要となる宇宙論サーベイに適した装置とい  
える。図1の右側は分光器と検出器からなる光学

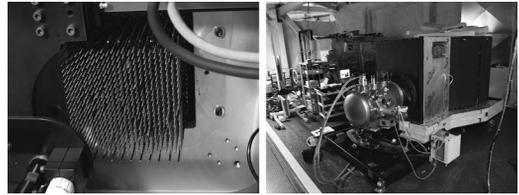


図1 (左) 主焦点に取り付けられたファイバー駆動機  
構 (エキドナ)。各ファイバーの中に挿し込まれ  
た針を制御することで、ファイバー先端をター  
ゲットへ向ける。(右) FMOS分光器と検出器を  
含む大型冷凍庫 (写真は秋山正幸氏提供)。

系の外観で、熱放射によるノイズを抑えるため光  
学系は大型冷凍庫の内部に収納されている。

FMOSは近赤外線の波長域で遠方宇宙の銀河  
を観測するため、一般的に暗い天体をターゲット  
とする。近赤外帯では、OH夜光と呼ばれる地球  
大気の上層部の放射が非常に強いため、そのま  
までは天体のシグナルは埋もれてしまう。FMOSの  
装置の内部には、OH夜光輝線に対応する波長以  
外の部分のみコーティングしたOHマスクミラー  
と呼ばれる鏡があり、OH夜光部分のみを吸収す  
ることによって除去している。

#### 3.2 ターゲット選択

われわれの観測の目的は、すばる望遠鏡の分光  
装置FMOSを用いて赤方偏移1.4付近の銀河を分  
光し、 $\text{H}\alpha$ 輝線の波長から赤方偏移を得て三次元  
銀河地図を作成することである。分光を行うター  
ゲットの銀河は、すでに存在する撮像データから  
選択することになる。この目的のため、われわれ  
は広い角度領域をカバーし、測光精度も良好な  
Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey  
(CFHTLS<sup>\*3)</sup> のデータを用いて測光的赤方偏移  
を求めた。FMOSのカバーする赤方偏移が1.2-  
1.6であるため<sup>\*4</sup>、測光的赤方偏移の不定性を踏  
まえ、この赤方偏移に入ってくると考えられる天  
体を分光ターゲットとして選択した。

<sup>\*3</sup> <http://www.cfht.hawaii.edu/Science/CFHTLS/>

<sup>\*4</sup> FMOSの波長域は低分散モードで0.9-1.8  $\mu\text{m}$ 、高分散モードでその約4分の1である。FastSoundは光の透過率が高い  
高分散モードを使っており、1.45-1.7  $\mu\text{m}$ を観測する。これを $\text{H}\alpha$ 輝線 (6,563 Å) の赤方偏移に直すと1.2-1.6になる。

また、近赤外撮像データ UKIRT Infrared Deep Sky Survey Deep Extragalactic Survey (UKIDSS DXS) のデータを追加することによって測光的赤方偏移の精度が向上するか、2011年9月のFMOS試験観測で確認した。UKIDSS DXSはFastSoundの予定するサーベイ面積すべてをカバーしていないため、解析が複雑化し、系統誤差の原因になりうる。試験観測の結果、ターゲット選択の精度は多少向上するが、系統誤差のリスクを補う程度ではないことがわかったため、CFHTLSのデータのみを用いることになった。

本観測は2012年4月から2014年7月の間に35晩かけて行い、CFHTLSの四つのフィールドから合計で20平方度、33,547個の銀河の分光を行った。

### 3.3 観測データのリダクション

解析の第一段階として、Fiber-pac<sup>15)</sup> と呼ばれる整約ソフトを用いて、FMOSの観測データを処理した。このソフトは、分光観測で行われる基本的な画像処理（波長較正、背景光引き、波長感度補正など）を行う。

図2は、実際に観測された銀河のスペクトルの例で、上端のパネルはその元となったFMOS画像の一部分である。観測が始まった当初は、観測されたターゲット一つひとつに対して、輝線であるか否かを画像やスペクトルから目で判断していた。しかし、費やす労力や判断の正確性などの問題から、これらの判断を自動化する専用のソフトウェアを開発した（FMOS Image Emission Line Detection; FIELD<sup>16)</sup>）。このソフトウェアは、一次元化されたスペクトルではなく、画像データ上の明るい部分の形状や明るさ（輝線検出のS/N比）の情報から、輝線を選び出す。こうすることで、一次元化の際に失われてしまう情報も探索に用いることができ、輝線以外の要因でS/N比が大きくなってしまった部分（地球大気からのOH夜光や

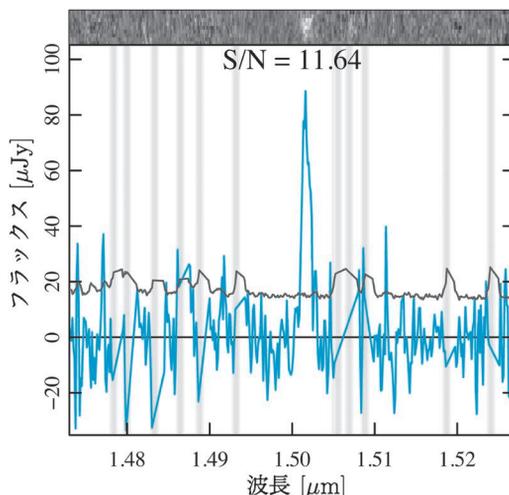


図2 FMOSで得た銀河のスペクトル例。上端のパネルは画像処理を終えた状態の、一つの銀河の分光画像（横が波長分散方向、縦がファイバーの拡がり）。中央に輝線が映っている。下のパネルでは、上のパネルの縦方向を積分し、一次元化したスペクトルを青い線で示している。グレーの線はバックグラウンドノイズで、見やすくするために5倍して表示してある。垂直方向のグレーの帯は、FMOSのマスクミラーで隠された波長に対応している。

宇宙線)を誤って検出する可能性を低く抑えることに成功した。

このようにして得た輝線を赤方偏移に直し、CFHTの四つのフィールドに対して銀河の三次元的な位置情報をまとめたカタログを作成した<sup>\*5</sup>。表1に、FastSoundにおける四つのフィールドの面積と、観測された輝線のうちS/N比が3以上の数をまとめた。ここには、実際に銀河ではないノイズが誤検出として含まれているが、FMOS画像の正負を逆転させた状態で輝線検出ソフトを用いて検出数を調べることで、全体としての誤検出率を見積もることができる（ノイズはこの状態でも輝線として現れるため）。7,840個の輝線のうち半分以上がノイズであり、実際の銀河の数はカッコの中の数値（約3,530個）である。

\*5 なおこのカタログには、銀河の位置だけでなく、他の物理量（星形成率など）も記録されており、現在はFastSoundのウェブページから取得することができる（<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/Fastsound/index-j.html>）。

表1 サーベイの個々のフィールドの面積と、観測された輝線の数 ( $S/N > 3$ ), 実際に解析に用いた輝線の数 ( $S/N > 4.5$ ). カッコの中は、誤検出を除いた銀河の数の期待値.

CFHT フィールド	面積 [平方度]	観測された 輝線の数	解析に用いた 銀河の数
W1	1.81	700	197
W2	6.62	3,125	1,165
W3	9.10	3,191	1,145
W4	3.10	824	276
合計	20.61	7,840 (3,530.2)	2,783 (2,582.4)

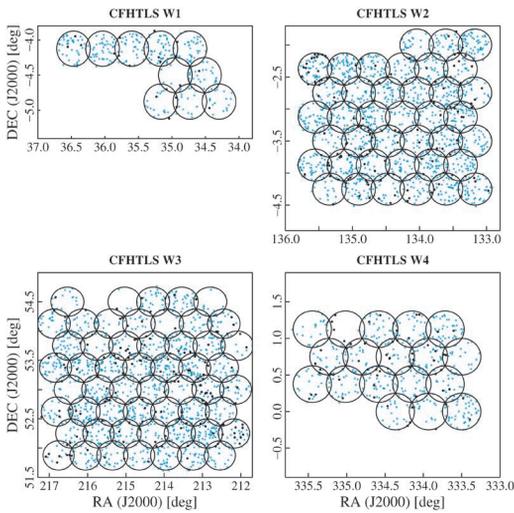


図3 FastSoundで赤方偏移が得られた銀河の角度分布. 青の点は通常のFMOSスペクトルで輝線が発見されたもの, 黒はスペクトルに-1を乗じた状態で輝線検出ソフトウェアが反応したもので, 偽輝線の混入率の指標となる.

本サーベイでは,  $S/N$ 比が4.5より大きいものを解析に用いた. このしきい値では, 誤検出率を完全にゼロにすることはできないが, 4.1%まで小さくすることができる. また, FastSoundの波長帯を考えると, 多くの場合一つの銀河に一つの輝線しか検出されないため, これが本当に  $H\alpha$  であるかについても検討する必要がある. 一部の銀河は輝線が複数 ( $H\alpha + [N II]$ ,  $H\alpha + [O III]$  など) 検出されており, 二つの輝線の波長比から輝

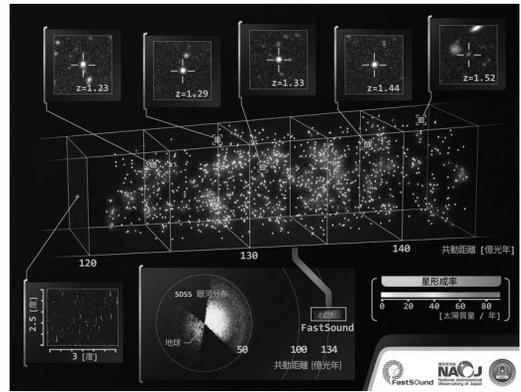


図4 FastSoundサーベイによって明らかになった三次元銀河地図. 四つのCFHTフィールドのうち最も大きいW3フィールドを表している (過去の国立天文台のプレスリリースより). この図のカラー版及び動画はFastSoundのウェブページから取得可能である.

線の種類を同定することができる. われわれはこの統計を用いて, 一つの輝線が検出された場合に, それが  $H\alpha$ 以外の輝線である確率を見積もった<sup>11)</sup>. その結果, 他の輝線の混入として最も多いものは  $[O III]$  であり, その割合は3.2%であることがわかった. 先のFIELDによる誤検出を合わせると, 自動検出した銀河のうち  $H\alpha$ 銀河でないものは約7.1%となった. これらの銀河がクラスタリング解析に与える影響については5章で議論する. 図3は, われわれの銀河サンプルの天球面上の分布である. 図4は, 図3の四つのCFHTフィールドのうち最も大きいW3フィールドの三次元銀河分布を表している.

#### 4. 赤方偏移1.4の輝線銀河の相関関数

FastSoundで得られた銀河サンプルの重力クラスタリングを定量化する統計量として, 銀河の二点相関関数 $\xi(r)$ を用いる. これは, 三次元共動距離 $r$ における銀河分布のランダム分布からのずれとして定義される:

$$\delta P(\mathbf{r}) = \bar{n}^2 \delta V_1 \delta V_2 [1 + \xi(\mathbf{r})]. \quad (1)$$

ここで、 $\bar{n}$ は銀河の平均個数密度、 $\delta P(\mathbf{r})$ は距離 $\mathbf{r}$ だけ離れた微小体積 $\delta V_1, \delta V_2$ の両方に銀河が存在する確率である。 $\xi > 0$ はランダム分布より銀河が多い場合で、 $\xi < 0$ はランダムより過疎化しているスケールである。2章で述べたように、宇宙原理から銀河分布は等方的になるべきであるが、赤方偏移変形効果により非等方性が生まれる。 $\mathbf{r}$ のピンの取り方は任意であるが、クラスタリングの非等方性を見るには、銀河ペアの視線に垂直方向の距離 $r_p$ と視線方向の距離 $r_\pi$ の2変数を取るのが一般的である( $r = |\mathbf{r}| = \sqrt{r_p^2 + r_\pi^2}$ )。

図3の四つのフィールドの銀河分布から測定した、赤方偏移空間の相関関数 $\xi(r_p, r_\pi)$ を図5に示す。この図はカラーコントアになっており、相関関数の値は右のカラーバーに表されている。縦軸が視線方向の銀河間の距離、横軸がそれに垂直方向の距離となっている。式(1)からわかるように、例えば、相関関数の値が1となっているスケール $\mathbf{r}$ は、「間隔 $\mathbf{r}$ に銀河のペアを発見する確率は完全にランダムな分布の場合の2倍」というこ

とを表している。

このコントアマップをよく眺めると、コントアの形が視線方向にひしゃげていることが見て取れる。これが、2章で述べた銀河の固有速度による赤方偏移変形効果である。非等方相関関数は、赤

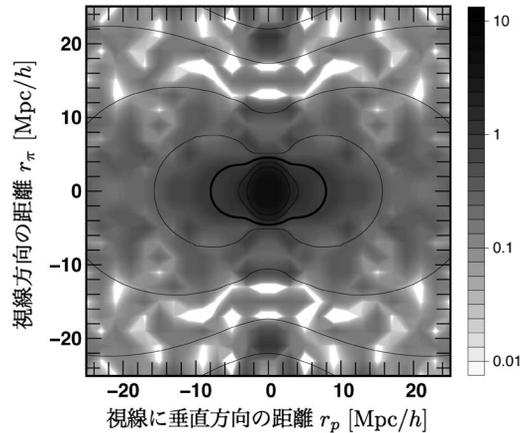


図5 FastSoundサーベイの輝線銀河カタログから求めた非等方相関関数のカラーコントアプロット。相関関数の値は右のカラーバーの数値に対応している。実線のコントアはベストフィットの相関関数の理論モデルであり、 $f\sigma_8 = 0.478, b\sigma_8 = 0.818$ を仮定している。

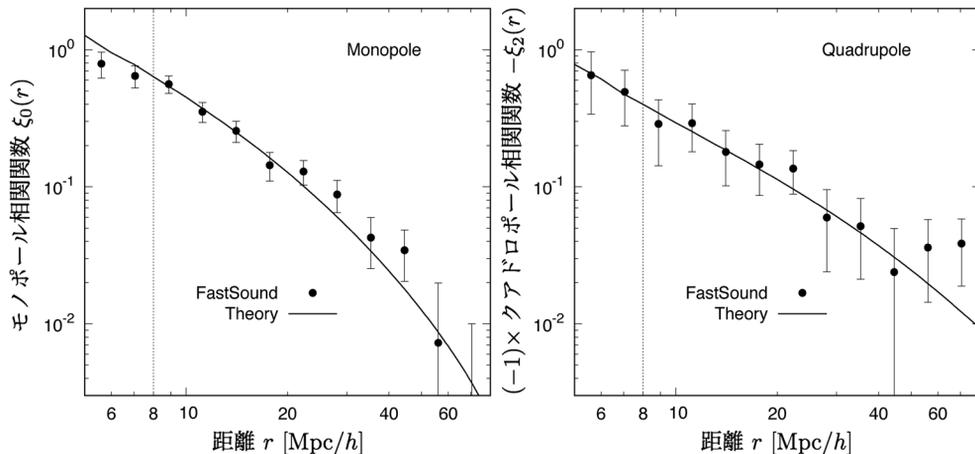


図6 FastSoundサーベイの輝線銀河カタログから求めた相関関数の多重極成分。左図がモノポール、右図がクアドロポール。プロットした全スケールにおいてクアドロポールは負の値を取るため、縦軸に(-1)がかかっている。垂直の点線は $r_{\min} = 8h^{-1} \text{ Mpc}$ を表しており、解析ではこれより大きいスケールのデータを用いた。黒の実線はベストフィットの理論モデル( $f\sigma_8 = 0.478, b\sigma_8 = 0.818$ )を表している。

方偏移空間変形を含めた銀河クラスタリングを表す最も一般的な統計量であり、二点相関の宇宙論的情報はすべてこの関数に含まれている。しかし実際は、この関数は $r_p$ と $r_\pi$ の二次元関数であり、データの自由度が大きく、このままでは解析が複雑になる。

そこで、宇宙論的情報をあまり損なわずに自由度を下げるために、相関関数の多重極成分を用いることにする。これは、相関関数にルジャンドル関数をかけて積分することによって得られる<sup>7), 17)</sup>。多重極成分の最低次の項はモノポール(単極子)であり、これは非等方相関関数を角度方向に平均したものである。図6の左のパネルのデータ点は、FastSound銀河サンプルのモノポールを表している。大スケールにおいて宇宙の構造は等方であるので、本来、モノポールより高次の多重極はゼロとなる。赤方偏移変形効果による非等方性が最も顕著に現れる項はクアドロポール(四重極)であり、銀河の特異速度によって構造が視線方向に引き伸ばされたり押しつぶされたりすることで、ゼロではない値を持つ(前者の場合は正、後者の場合は負の値)。図6の右のパネルは測定されたクアドロポールである。赤方偏移が1を超える深宇宙で、赤方偏移変形効果によるクアドロポールがこのような高精度で測定されたのは本解析が初めてである。

## 5. 赤方偏移変形効果の理論モデル

前章で測定したFastSoundのデータを用いて宇宙モデルをテストするには、赤方偏移変形効果を含んだ銀河の相関関数の理論モデルが必要である。最も簡単な近似は、密度ゆらぎの線形摂動論に基づいたものである。これは、赤方偏移効果の線形モデルを導出した論文の著者の名前をとって、カイザーの公式と呼ばれている<sup>5)</sup>。ダークマターのパワースペクトルの形を固定した場合、すなわち、ダークマター密度 $\Omega_m$ 、バリオン密度 $\Omega_b$ 、等の宇宙論パラメータを固定した場合、カイザー

の公式に現れるフリーパラメータは $b(z)$   $\sigma_8(z)$ 、 $f(z)$   $\sigma_8(z)$  の二つである。 $\sigma_8$ は密度ゆらぎを $8h^{-1}$  Mpcスケールで均した分散、 $b$ は銀河バイアスパラメータで、 $b\sigma_8$ の組み合わせは銀河パワースペクトルの振幅を決定する。一方で、 $f$ は密度ゆらぎの線形成長率と呼ばれる量で、密度ゆらぎ( $\delta$ )のスケールファクター( $a$ )微分(時間微分)を用いて、 $f=d \ln \delta / d \ln a$ と定義される。あるいは、 $f\sigma_8=d\sigma_8/d \ln a$ とも書ける。この量が赤方偏移変形によるクラスタリングの非等方性から決定される量であり、重力理論を直接制限しうる量である。例えば $f$ を一般相対性理論が予言する値、 $\sigma_8$ を最新の宇宙背景放射の非等方性から決定したベストフィット $\Lambda$ CDMモデルの値を採用すると、赤方偏移1.4付近では $f\sigma_8 \sim 0.392$ となる。われわれがFastSoundデータを用いて制限する値がこれより大きくなれば、1.2節で述べた $f(R)$ 模型のような強い重力理論を好む制限となり、逆に小さくなれば余剰次元モデルのように弱い重力理論を好む結果が得られたということになる。

十分に大スケールではこの線形理論が良い近似となっているが、ダークマターハローの内部のようにゆらぎの非線形性が無視できない小スケールでは、銀河の大きなランダム運動によって、銀河の位置が視線方向に引き伸ばされる。これは神の指効果と呼ばれている<sup>7), 18)</sup>。このような非線形赤方偏移変形効果は、理論モデルに正しく取り入れて解析しなければ間違った結果を引き起こしてしまうため、注意深くモデルする必要がある<sup>19), 20)</sup>。そのため、銀河の非線形クラスタリングの精密な理論モデルはこれまでに精力的に研究されている(例えば文献21)。しかし、今回のわれわれの解析は、高赤方偏移、すなわち昔の宇宙を見ており、ゆらぎの非線形性は小さいと考えられる。そのため、神の指効果は無視した解析を主要な結果として示す。さらに、簡単なテストとして、非線形速度分散パラメータ $\sigma_v$ がガウス分布に従うという単純な非線形モデルを採用して同様の解析を行

う。

解析に進む前に、もう一点、3.3節で述べた誤検出された7.1%の輝線の影響をモデルに取り入れる必要がある。最も簡単な方法は、“これらの輝線はランダムに分布しており、残り93%の真の銀河分布と相関しない”という仮定することである<sup>22)</sup>。この場合、真の相関関数を $\xi_{\text{true}}$ 、偽銀河の割合を $f_{\text{blund}}$  ( $=0.071$ ) とすると、観測される相関関数は、 $(1-f_{\text{blund}})^2 \xi_{\text{true}}$ と表される。この仮定は厳密には正しくないが、偽の銀河の割合は7.1%なので、たとえ相関が存在したとしてもその相関関数の振幅は、13%に抑制される。そもそも偽銀河の相関がゼロに限りなく近いため、今回の測定のエラーの範囲ではこのシンプルなモデルで十分である。

## 6. 一般相対性理論のテスト

本章では、4章で測定したFastSound銀河の相関関数を、5章で解説した理論モデルを用いて統計解析を行い、重力理論のテストを行う。

### 6.1 構造の線形成長率の制限

まず、 $N$ 体シミュレーションを用いてFastSoundサーベイを似せて作ったモックカタログを使い、どのスケールのデータを使えば正しい制限を得られるかを調べた。その結果を踏まえ、 $8 < r < 80 [h^{-1} \text{Mpc}]$ のスケールにおける相関関数のみを用いることにした。下限の $8h^{-1} \text{Mpc}$ は、図6の垂直の線に対応している。大スケールほどクラスタリングのシグナルは小さくなるので、上限の $80h^{-1} \text{Mpc}$ を変更しても結果は変わらない。

図7に、われわれの最も興味のあるパラメータである $f\sigma_8$ と、クラスタリングの振幅を表す $b\sigma_8$ の制限を示す。フリーパラメータは $(f\sigma_8, b\sigma_8, \sigma_v, f_{\text{blund}})$ の四つであるが、前述のとおり $f_{\text{blund}}=0.071$ は固定してある。速度分散パラメータ $\sigma_v$ については、擬似カタログの解析から $\sigma_v=0$ が好まれているため、このように固定した結果をメインの結果とする。 $\sigma_v$ をパラメータ空間で積分した場

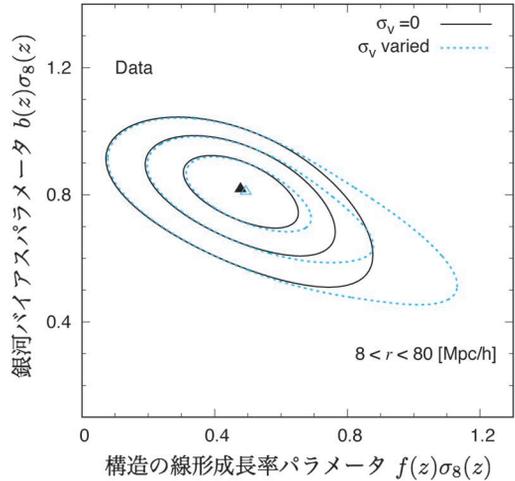


図7 構造の成長率 $f\sigma_8$ とクラスタリングの振幅 $b\sigma_8$ への制限。コンタは内側から1, 2, 3- $\sigma$ 信頼区間を表している。実線と点線はそれぞれ、速度分散パラメータ $\sigma_v$ を0に固定した場合とパラメータ空間で積分した場合に対応している。三角の点はベストフィットの値を示している。

合の結果は、後ほど議論する。パラメータ $f$ と $b$ の間には強い縮退があり、銀河クラスタリングの振幅の情報を用いると、 $b \times f \sim \text{一定}$ という方向に縮退をもつ。一方で、赤方偏移変形は $fb$ という組み合わせを制限するので、異なる縮退をもつ。図7で制限の縮退が解けているのはそのためである。バイアスパラメータ $b\sigma_8$ を積分することにより、 $f\sigma_8=0.482 \pm 0.116$  (エラーは1- $\sigma$ の信頼区間)という制限が得られた。これは、クラスタリングが等方である場合を $4.1\sigma$ で排除したことになり、赤方偏移空間変形効果による大規模構造の成長速度を99.997%の統計的有意度で検出したことに対応する。赤方偏移が1を超える遠方宇宙でこのような高い精度でゆらぎの成長速度を検出したのは世界で初めてのことである。また、 $\Lambda$ CDMモデルと一般相対性理論を仮定すると $f\sigma_8 \sim 0.392$ が予言されるので、FastSoundの銀河サンプルの解析結果は、一般相対性理論の予言と一致する結果となった。図5の実線のコンタと図6の実線は、このベストフィットの理論モデルをプロット

している。

図7の点線のコントアは、 $\sigma_v$ の値を固定せずに積分した場合の結果である。予想通り、 $f\sigma_8$ ,  $b\sigma_8$ の制限は弱くなるが、ベストフィットの値はほとんど変わらず ( $f\sigma_8=0.494^{+0.126}_{-0.126}$ )、 $\sigma_v$ のベストフィットの値も0となった。

### 6.2 修正重力理論との比較

本小節では、今回のFastSoundサーベイから得られた $f\sigma_8$ の制限と過去に得られた低赤方偏移における結果を組み合わせることで、修正重力理論のモデルにどのような示唆が得られるかを議論する。しかしどのモデルがより好まれるかを調べるのではなく、遠方宇宙の赤方偏移変形効果の観測が異なる重力理論を区別するのに役立っていることを定性的に概観するのが目的である。

図8の誤差棒付きの黒い点は、2dF Galaxy Redshift Survey, SDSS, WiggleZサーベイなど、過去の銀河サーベイの赤方偏移効果の解析によって得られた $f\sigma_8$ の制限である。青の点は、FastSoundデータの解析によってわれわれが得た制限である。左図と右図のデータ点は同じものである。

これらのデータ点を用いて、修正重力理論の議論をする。考える状況は、いくつかの重力理論モデルを仮定し、その構造の成長速度 $f\sigma_8$ の振幅を、宇宙背景放射による密度ゆらぎの振幅 $\sigma_8$  ( $z=0$ )の情報を用いずに赤方偏移変形だけを用いて制限できるか、である。すべてのデータ点は独立ではないので、この解析では左図の黒い点のみを用いる。まず、左図の青色の実線は、 $\Lambda$ CDMモデルを仮定した $f\sigma_8$ で、その振幅をデータ点から $\chi^2$ を計算して最小にすることにより決定している。

次に、修正重力理論モデルの一つである、 $f(R)$ 重力を考える。これは、一般相対性理論と比べて強い重力を予言する。すなわち、宇宙の構造がより速く形成されることを意味している。このモデルの $f\sigma_8$ の振幅を銀河サーベイから決定すると、昔、すなわち高赤方偏移では一般相対論より $f\sigma_8$ の値が小さくなる。これは、図8の左のパネルの短い鎖線に示したように見て取ることができる。一方で、長い鎖線で表されたDGP (Dvali-Gabadadze-Porrati) 模型は一般相対論より弱い重力を予言するため、大規模構造のデータで振幅

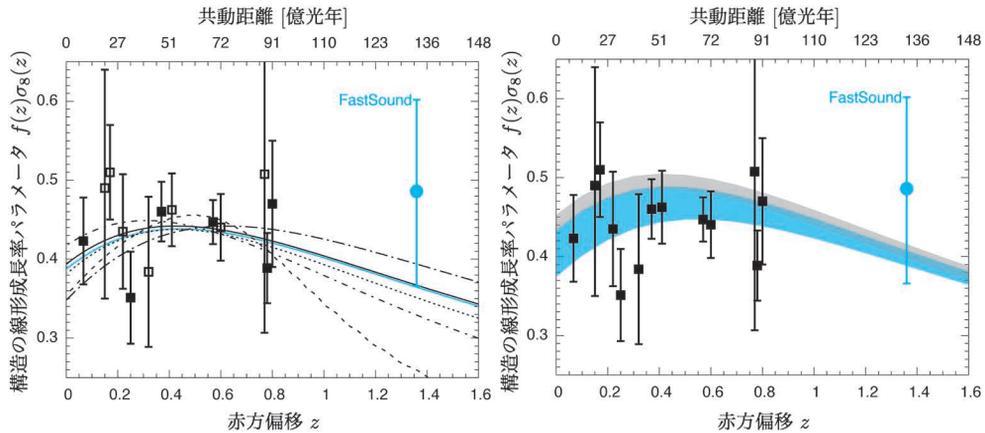


図8 ささまざまな銀河サーベイから得られた、 $0 < z < 1.55$ における $f\sigma_8$ の制限。FastSoundから得られた結果は青の点で表してあり、先行研究で得られた結果は黒の点で表してある。(左図)それぞれの線は、異なる重力理論モデルを表しており、振幅はこれらのデータ点のうち黒塗りの点を用いて決められている。青の実線が一般相対論の予言、黒の短い鎖線が $f(R)$ 重力モデル、長い鎖線がDGPモデルである。ほかの線については文献13を参照。(右図)色のついたバンドは、宇宙背景放射による $1-\sigma$ の制限を表しており、灰色がPlanck<sup>1)</sup>、青色がWMAP<sup>23)</sup>である。

を決めると、高赤方偏移では相対論の予言より  $f\sigma_8$  の値は大きくなる。点線や破線は、ガリレオンと呼ばれるモデルである。

図8の左のパネルの個々の修正重力のモデルは、すべてのモデルパラメータを動かしてフィットしたわけではないため、どの重力理論が観測をよりよく説明するかをテストしたものではない。この結果で着目すべき点は、高赤方偏移で赤方偏移変形効果を精度良く観測すれば、先行研究ですでに得られている低赤方偏移の結果と組み合わせることにより、宇宙背景放射の情報を用いずに修正重力理論の独立なテストができるということである。

### 6.3 宇宙背景放射の観測との比較

最後に、われわれがFastSoundサーベイから得た  $f(z) \sigma_8(z)$  の制限と、宇宙背景放射の非等方性の観測による  $\sigma_8(z=0)$  の制限との整合性を確かめておく。図8の右のパネルに、二つの宇宙背景放射の非等方性探査の観測、WMAP<sup>23)</sup> と Planck<sup>1)</sup> のデータから得られた  $f\sigma_8$  の  $1-\sigma$  の制限を、それぞれ青と灰色の帯で示している。われわれのFastSoundの結果も含め、ほとんどの赤方偏移変形効果から得られた  $f\sigma_8$  の制限は、この2種類の  $\Lambda$ CDMモデルの予言と  $1-\sigma$  の信頼区間でよく一致していることがわかる。

## 7. おわりに

本稿では、すばる望遠鏡を用いたFastSoundサーベイによって観測された三次元銀河分布を解析し、130億光年彼方における重力理論の検証を行った。最後に、今後の展望について述べる。

宇宙の密度ゆらぎは、宇宙を支配する重力法則が異なると、異なった進化をする。そのため、今回のわれわれの赤方偏移1.4における構造成長率の測定は、低赤方偏移における先行研究の結果と組み合わせることにより、宇宙背景放射の観測とは独立に修正重力理論を制限するのに有用であることを示した。現在、日本が主導する、すばる望

遠鏡を用いたさらなる大規模サーベイ、Subaru Measurement of Images and Redshifts (SuMIRe) 計画が進行中であり、Prime Focus Spectrograph (PFS) という分光器を用いて、FastSoundと同じ深宇宙をさらに深く広くサーベイする予定である<sup>24)</sup>。このサーベイでは、宇宙の構造成長率が5%以上の精度で制限できることが期待されており、広い赤方偏移にわたってより詳細に修正重力理論の検証を行うことができる。PFSを含む将来の銀河サーベイは、FastSoundと同じ輝線銀河をターゲットとしている。そのため、今回の研究で得られた宇宙論的制限や解析手法は、このような将来のサーベイに非常に有用であると期待できる。

最後に、銀河サーベイを用いた宇宙大規模構造の研究における、理論的研究の重要性について述べる。サーベイが広く深くなっていくにつれて、ダークエネルギーや修正重力理論の制限もより強くなっていき、それに従って解析する理論モデルに対しても高い精度が要求されるようになる。理論の精度は、密度ゆらぎの摂動論や  $N$  体シミュレーションを用いて、ここ10年ほどで劇的に進展してきた<sup>25)-27)</sup>。最新の結果では、例えば文献21は、ハロー内部という小スケールまで、1-2%の精度に到達した。しかし、5章で簡単に触れた神の指効果など、解析的なモデリングが困難な効果を含んでいる。一方で、観測された銀河分布からサテライト銀河を取り除き、神の指効果を含まないダークマターハロー分布を再構築するという手法も提案されており<sup>28)</sup>、これを精密宇宙論に適用するための定式化も精力的に研究されている<sup>29)</sup>。今回行った解析は、 $\Lambda$ CDMと一般相対論を仮定したうえで、結果が相対論からずれるかを検証した、いわゆる整合性 (consistency) テストと呼ばれるものである。個々の修正重力モデルを正しく制限するには、同じモデルに基づく理論を用いて解析を行う必要がある。こういった先行研究はまだ数少なく<sup>30)</sup>、今後の研究が待たれるところである。

銀河サーベイによる大規模構造の観測を用いた宇宙加速膨張の探求は、観測・理論の両側面において非常にエキサイティングな時期にあるといえる。

## 謝辞

本稿の内容は、2015年から2016年にかけて発表したFastSoundサーベイに関する投稿論文のうち、サーベイの概要<sup>10)</sup>、輝線銀河サンプル<sup>11)</sup>、そして宇宙論的解析<sup>13)</sup>を取り扱ったものに基づいているので、詳しくはそちらをご覧ください。FastSoundサーベイは、すばる望遠鏡にFMOS分光器を搭載して行った観測です。これらの開発および観測にかかわったすべての方々、および論文の共著者の方々に感謝いたします。最後に、本稿の執筆を助めてくださった東京大学の大栗真宗氏に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Planck Collaboration, 2016., A&A 594, A13
- 2) 辻川信二, 2007, 天文月報100, 462
- 3) Eisenstein D. J., et al., 2005, ApJ 633, 560
- 4) Okumura T., Matsubara T., Eisenstein D. J., Kayo I., Hikage C., Szalay A. S., Schneider D. P., 2008, ApJ 676, 889
- 5) Kaiser N., 1987, MNRAS 227, 1
- 6) 奥村哲平, 2008, 天文月報101, 589
- 7) 日影千秋, 2014, 天文月報107, 163
- 8) Guzzo L., et al., 2008, Nature 451, 541
- 9) Bielby R., et al., 2013, MNRAS 430, 425
- 10) Tonegawa M., et al., 2015, PASJ 67, 81
- 11) Okada H., et al., 2016, PASJ 68, 47
- 12) Yabe K., et al., 2015, PASJ 67, 102
- 13) Okumura T., et al., 2016, PASJ 68, 38
- 14) Kimura M., et al., 2010, PASJ 62, 1135
- 15) Iwamuro F., et al., 2012, PASJ 64, 59
- 16) Tonegawa M., et al., 2015, PASJ 67, 31
- 17) Hamilton A. J. S., 1992, ApJ 385, L5
- 18) Jackson J. C., 1972, MNRAS 156, 1
- 19) Soccimarro R., 2004, PhysRevD 70, 083007
- 20) Okumura T., Jing Y. P., 2011, ApJ 726, 5
- 21) Okumura T., Hand N., Seljak U., Vlah Z., Desjacques V., 2015, PhysRevD 92, 103516
- 22) Blake C., et al., 2010, MNRAS 406, 803
- 23) Hinshaw G., et al., 2013, ApJS 208, 19
- 24) Takada M., et al., 2014, PASJ 66, 1
- 25) Matsubara T., 2008, PhysRevD 77, 063530
- 26) Taruya A., Nishimichi T., Saito S., 2010, PhysRevD 82, 063522
- 27) Okumura T., Seljak U., McDonald P., Desjacques V., 2012, JCAP 02, 010
- 28) Reid B. A., Spergel D. N., 2009, ApJ 698, 143
- 29) Okumura T., Takada M., More S., Masaki S., 2016, arXiv: 1611.04165
- 30) Song Y.-S., et al., 2014, PhysRevD 89, 103541

## New Test of Einstein's General Relativity by Deepest Galaxy Survey with Subaru Telescope

**Tepei OKUMURA,<sup>1</sup> Motonari TONEGAWA,<sup>2</sup> Tomonori TOTANI,<sup>3</sup> and Chiaki Hikage<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Kavli IPMU (WPI), UTIAS, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8583, Japan*

<sup>2</sup> *Institute of Astronomy, National Tsing Hua University, Hsinchu, 30013 Taiwan*

<sup>3</sup> *Department of Astronomy, The University of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

**Abstract:** The origin of the accelerating expansion of the universe is one of the complete mysteries in cosmology, and observation of large-scale structure of the universe traced by galaxy surveys is a powerful tool to probe it. In order to understand the nature of the cosmic acceleration, one needs to study the time evolution of the expansion or growth rate of the universe. We use a galaxy survey called "FastSound," which uses the Fiber Multi-Object Spectrograph (FMOS) mounted on the Subaru Telescope, and analyze the velocity field of galaxies in the large-scale structure of the universe at 13 billion light years from us. As a result, we, for the first time, find Einstein's general theory of relativity stands true as a law of gravity at such distant universe. In this article, we present an overview of the FastSound survey and obtained cosmological results.