

統計的摂動解析理論に基づく 観測的宇宙論の開拓



松原 隆彦

〈名古屋大学大学院理学研究科 〒464-8602 名古屋市千種区不老町1〉

e-mail: taka@kmi.nagoya-u.ac.jp

最近の著しい観測的進展に牽引され、宇宙論の研究分野は大きく様変わりしてきました。今後もしばらくこの変化は続くでしょう。林 忠四郎賞受賞記事ということで、この稿では私の研究経験について振り返ってみたいと思います。私の個人的な視点から見た宇宙論研究分野の変化についても述べてみたいと思います。研究内容の詳細を紹介するよりも、研究分野の背景や自分の研究課題の着想過程などを、多少ランダムに思いつくまま綴ってみます。

1. 量子重力から宇宙論へ

このたびは、林 忠四郎賞というたいへんに榮譽ある賞をいただきました。どうもありがとうございました。まずは天文学会員の皆様に感謝の気持ちをお伝えしたいと思います。大学院生やポストクの頃は指導者や受け入れ研究者などに研究内容を評価されて褒められるということもありますが、いったんプロの研究者になると、目上の人から研究を褒められるような機会はほとんどなくなります（叱られるということもほとんどなくなります）。厳しい競争社会である研究の世界では、自分で自分を奮い立たせて研究を進めていかなければなりません。ときには心折れることもままあります。受賞というのは公式に「研究を褒められる」という不思議な体験で、殺伐とした荒野に一輪の花が咲いているのを見つけたような不思議な感覚にとらわれつつも、大いに励みになりました。

受賞講演でもお話ししましたが、私はもともと物理学の基礎的なところで興味がありました。基礎的な物理学と言えば、究極の物理法則を追求する素粒子論の研究がすぐに連想されます。ありがち

なことですが湯川秀樹に憧れ、学部生の頃は漠然と素粒子論を志望していました。しかし素粒子論の標準理論はすでにほとんど完成されていて、残された大きな基本的課題は重力と量子論の統合、つまり量子重力理論の完成であると思われました。量子重力へのアプローチとしては超弦理論が流行しているようでした。これは素粒子の統一理論を追求する中で出てきた（ある意味で変則的な）流れですが、それとは別に時空間の量子化という問題にまともに取り組む（正統的な）流れも別がありました。また1990年前後は宇宙論の分野がとても活性化してきた頃でもありました。学部を卒業する頃には、基礎的な物理学といっても狭い意味での素粒子論だけではないことがわかってきました。

当時、広島大学理論物理学研究所（以下、理論研）というユニークな研究所がありました（図1）。広島県竹原市の海岸に3階建ての研究施設がポツンとあるような、非常に環境のよい（辺鄙な？）場所で、素粒子論、場の理論、相対論、宇宙論といった濃い理論物理の研究が行われていました。かなり魅力的な研究所であり、そこへ大学院生として入学しました。しかし私が入るとき



図1 旧 広島大学理論物理学研究所の建物（現 瀬戸内圏フィールド科学教育研究センター竹原ステーション）。2005年ごろ筆者撮影。

には、理論研と京都大学基礎物理学研究所が合併することが決まっております。私は理論研の最後の大学院生となってしまいました。

理論研の大学院生は、修士課程の1年間を広島大学の素粒子論研究室の一員として過ごし、大学院の講義やゼミを取るようになっていました。そこで基礎的な勉強をした後、2年めから竹原市にある研究所へ移ることになっていました。しかし私が入学した年の夏には研究所ごと京都大学へ移転してしまったため、竹原市に行ったのは数回だけでした。現在では京都市内の基礎物理学研究所に完全に統合されていますが、当初は旧理論研のメンバーだけ京都大学宇治キャンパスにある建物に入っていました。このため、しばらくは旧理論研の雰囲気がある程度残っていたと思います。私は修士課程の2年めからこの宇治キャンパスに通うことになりました。

修士課程では、量子重力を研究することになりました。量子重力の問題はとても難しいので、当時は空間を2次元に落として単純化した3次元時空モデルの量子化がよく研究されていました。この3次元モデルに加えて時空間を離散化して扱うレッジエ計算と呼ばれる格子重力理論について勉強・研究しました。修士論文の作成に当たって、格子場の理論で有名な二宮正夫先生に指導してい

ただきました。研究内容もさることながら、研究とはどのように進めるものなのかという方法論を教えていただいたことは、その後の私に大きく影響しました。研究テーマこそ現在とはだいぶ違いますが、研究者としてやっていくための基礎的な力はこのときに身に付いたと思います。

修士論文¹⁾を仕上げたのち、自分の中で研究分野に対する悩みが生まれてきました。それは量子重力の理論が正しいかどうかを実験や観測で直接確かめることがすぐにはできそうもないということです。そもそも重力の量子化という課題自体があまりに難しく、60年以上も超優秀な研究者が大勢取り組んで完成に至らない問題に、自分がどれほど貢献できるのかも疑問でした。この分野には数理物理的な面白さはあるものの、結局私は実際の実験や観測の結果と直接比較しつつ進めるような理論研究をしたかったのだということに気がつき始めました。

そして私が研究分野を宇宙論へシフトするのに決定的だった出来事がありました。1992年に宇宙背景放射の温度ゆらぎがCOBE DMRにより初めて発見された²⁾のです。この出来事はかなり衝撃的であり、宇宙論が観測に基づいた定量科学として大きく発展する可能性をはっきりと示していました。それまでの宇宙論は非常に大まかな数値に基づいた定性的な理論しか展開できないという印象でしたが、それが大きく変わりつつあることはもはや明らかでした。宇宙論の分野が観測と理論の交差する魅力的な分野になってきました。

結局、博士課程1年の夏頃、本格的に研究分野を宇宙論へ移行することにしました。宇宙背景放射の研究も面白そうでしたが、近くに専門家がいなかったことや、すでに本格的な理論研究が進んでいるので後追いの研究しかできそうにないと思いました。宇宙背景放射の分野で著名な杉山直氏は旧理論研大学院出身の先輩ですが、私が入学したときにはすでに大学院を修了して転出していました。

一方、宇宙の大規模構造の研究が須藤 靖先生を中心として基研宇治キャンパスで活発に行われていました。宇宙の大規模構造も宇宙論にとっては重要な情報源であることが当時から明らかでしたが、まだ十分な観測データが出揃っていないこともあり、大規模構造から宇宙論の情報をいかに引き出すのかという基本的な問題が研究されている最中でした。私はその研究グループに拾ってもらう形で、杉之原立史氏や須藤先生などが開発した宇宙論的 N 体シミュレーション³⁾で得られたデータの数値解析をすることから始めました。

2. 宇宙論的 N 体シミュレーションの解析

現在でこそ、宇宙論的なシミュレーションのコード開発と、シミュレーション結果を解析する作業は別々に行われることが多いですが、当時はまだシミュレーションのコード開発とその結果の解析は同時に行うことが一般的だったと思います。現在ではGADGET-2⁴⁾などの公開コードがありますが、当時そのようなものはなく、杉之原氏や須藤先生が中心になって開発した最先端のツリー・コードによる N 体シミュレーションのデータを使わせていただけたことは幸運でした。私は須藤先生の指導の下で3点相関関数や4点相関関数という高次の統計量を用いた解析を行いました。現在では高次統計量を使って宇宙論の解析をすることが一般的に行われていますが、このときにはほとんど先行研究がなく、手探りで解析手法を開発する必要がありました。それだけに、世界に先駆けて新しい発見が得られたときの喜びはとても大きいものでした。

長らく宇宙論の「標準モデル」と呼ばれていたのは $\Omega=1, \Lambda=0$ のインシュタイン＝ド・ジッター宇宙モデルです。1990年代初頭までにはこの「標準モデル」にほころびが見えていました。観測の進展により、標準モデルのように空間曲率を平坦にするには物質密度が足りない、というこ

とがわかってきたためです。世界的には、宇宙項なしで物質の支配的成分がコールド・ダークマター (CDM) であるとする Open Cold Dark Matter (OCDM) というモデルが有力視されることが多かったと思います。しかし当時の基研における須藤グループでは、宇宙項入りのコールド・ダークマターモデル (Λ CDM) を主に調べていました。このモデルは現在の宇宙論において標準となっていますので、とても先見性が高かったと思います。当時 Λ CDMは一つの可能性にしか過ぎませんでした。解析を進めるうちに Λ CDMモデルがとても有望であることを実感するようになりました。

2011年のノーベル賞は超新星観測のチームによりなされた宇宙加速膨張の発見に対して与えられましたが、彼らの発見は1998年前後に行われたものでした。この発見は Λ CDMモデルが広く受け入れられていくきっかけとなりました。宇宙の加速膨張を直接的に示したと言えるのは確かに彼らの観測が初めてですが、 Λ CDMが最も現実に合っているようだということは、宇宙の大規模構造を解析する中では、それより以前から徐々にわかってきていました。ただ、宇宙項の存在が理論的に不自然なので、特に理論研究者への受けが悪かったと思います。理論的に不自然であっても、先入観にとらわれず観測事実を虚心坦懐、客観的に見つめることが、いかに重要であるかということをお話していると思います。

3. 構造形成における非線形摂動論

指導者や先輩たちに恵まれ、宇宙論の分野への移行は比較的スムーズにでき、博士課程の1年目の終わりまでにはシミュレーションの数値解析による新しい結果をいくつかの論文として発表できました。博士課程の2年目になると、指導していただいた須藤先生が東京大学へ移動することになりました。私はそれを期にして、自分の研究課題を自分自身で開拓しようと考えました。そうして

始めたのが宇宙の構造形成における、準非線形領域の解析的な研究です。

宇宙論で数値シミュレーションを行う大きな理由は、非線形性による力学的成長を解析的に扱うのが難しいことにあります。数値シミュレーションを行えば必ず結果が出るものの、それだけで現象を理解したことにはなりません。結果を物理的に理解するための理論的解釈が必要です。それでも定量的な説明がつかないまま残されてしまう問題も生じます。非線形問題について解析的に完全な解を得ることが難しいことは衆知のとおりです。

しかし非線形性があまり強くない領域に注目すれば、摂動論の手法によって解析的に取り扱うことができます。当時、大規模構造の観測領域は比較的狭く、その性質を理解するには非線形性の強い領域の理解が必要でした。宇宙の構造形成に関する準非線形摂動論は理論的に研究されていたものの、それを直接観測と比較できる状況ではありませんでした。

大規模構造の観測においては、赤方偏移サーベイにより銀河の3次元分布を求めることが有力な方法ですが、1990年代前半当時はまだゲラーやハクラたちの有名なCfAサーベイが赤方偏移サーベイとしては最大のデータでした（奥行き方向の距離の情報をもたない二次元銀河分布も用いられていました）。CfAサーベイの観測領域は奥行きが $150 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$ 程度の薄いスライス状をしていて、銀河数もたかだか数千個程度でした。それでも予想外の大きな構造がはっきりと見えたため、宇宙論に大きなインパクトをもたらしました。

銀河サーベイでは、サーベイの大きさと同じ長さスケールの力学を調べることはできません。統計が足りず十分な精度が得られないからです。銀河の群れ集まり方を定量化するのに相関関数 $\xi(r)$ やパワースペクトル $P(k)$ が用いられますが、CfAサーベイの場合、 $r \leq 10 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$ 程度の

スケールにしか有意な情報は含まれません。パワースペクトルは相関関数のフーリエ変換で、 k は波数を表しますから、このスケールはほぼ $k \geq 0.1 \text{ h Mpc}$ に対応します。この領域は非線形性が強いために、準非線形摂動論の近似は悪くなり、数値シミュレーションとの比較がどうしても必要でした。

このCfAサーベイの成功に刺激されて、大規模な赤方偏移サーベイが計画されるようになりました。2000年代に大きな成果を上げたスローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) も1990年代前半に計画されています。当時こそ準非線形領域の研究はあまり有用だとは思われていませんでしたが、来るべき大型赤方偏移サーベイの時代では状況が変わるであろうと思いました。

膨張宇宙における密度ゆらぎ進化の非線形方程式を摂動論によって調べようとする研究は、早くも1967年に、理論研のスタッフでもあった富田憲二氏により開拓されました⁵⁾。私の先輩大学院生であった牧野信義氏と理論研の佐々木 節氏および須藤先生による摂動論的非線形パワースペクトルの先駆的研究も当時行われていました⁶⁾。しかし当時はまだこれらの研究を観測と比較できる状況でなかったため、非線形摂動論の研究は細々と進められ、それほど注目を浴びているとは言えなかったと思います。

宇宙論において理論を観測と比較するには、必ず統計的な処理が必要です。発展方程式の解は初期条件を与えることで解くことができますが、宇宙の初期条件は統計的にしか与えられないからです。例えば、宇宙のここにわれわれの天の川銀河系ができて、そこにアンドロメダ銀河系ができるべきである、ということをインフレーション理論のような初期宇宙の理論から予言することはできません。そこで、観測量をどのように統計処理して理論と比較するのかという自由度が生じます。

観測可能な統計量の中でも、理論との比較が容易、かつ簡単な統計量が相関関数やパワースペク

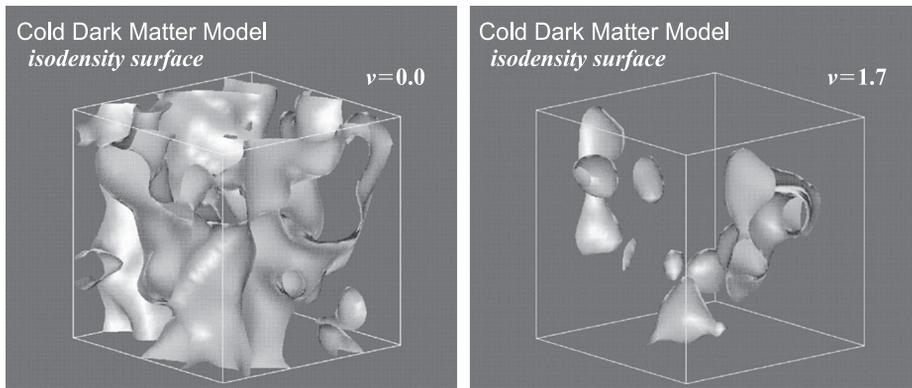


図2 宇宙の大規模構造における等密度面⁸⁾。一辺 $100 h^{-1} \text{Mpc}$ の数値シミュレーションを用いて ΛCDM モデルの予言する非線形密度場から求めたもの。左図は密度場の値がちょうど平均密度と等しい値をとる面を表し、右図は平均密度からのずれが標準偏差の1.7倍 (1.7σ) だけ大きな値をとる面を表している。

トルです。これらは2点統計量とも呼ばれ、一般に2点間の距離（フーリエ空間では波長に対応）だけの関数として空間分布を特徴づけようとするものです。宇宙論においてこの統計量がゆらぎの分布に関する完全な情報をもつのは、

- A) 初期ゆらぎが多変数ガウス分布に従う。
- B) ゆらぎの時間発展が線形理論に従う。

の二つの条件を同時に満たす場合です。これは多変数ガウス分布が2点統計量で完全に特徴づけられ、さらに線形理論による時間発展はゆらぎのガウス性を保つという性質があるためです。

宇宙マイクロ波背景放射温度ゆらぎの研究では、観測できる主要な効果が上の二つの条件を満たすため、角度パワースペクトル C_l という統計量からほとんどの情報を得ることができます（ただし、近年流行している初期ゆらぎ中に非ガウス性を見つけようとする研究などを除く）。ところが、宇宙の大規模構造の観測においてB)の条件を満たすためには、よほど大きなスケールの構造に着目しなければなりません。精密なレベルで理論と観測を比較しようと思えば、たとえば $100 h^{-1} \text{Mpc}$ を超えるようなかなり大きなスケールにおいても非線形性の影響が入り込んできます。

このため、たとえば初期ゆらぎが多変数ガウス分布に従っていたとしても、大規模構造の観測量は

ガウス分布でなくなります。CfAサーベイに奇妙な人の形をした構造が見られるのは、銀河の空間分布がガウス型でないことの現れです。このような構造を2点統計量である相関関数やパワースペクトルで特徴づけることはできないことが知られていました。

4. 大規模構造の位相幾何学

そこで考え出されたのが大規模構造の形を数学的なトポロジーによって特徴づけるという手法です。これはプリンストン大学のリチャード・ゴット三世たち⁷⁾により提案された方法で、当初はCfAサーベイによる観測データと数値シミュレーションを組み合わせで解析していました。

銀河の数密度を用いて大規模構造の密度場を推定し、その密度場に一定のしきい値を設定すると、そのしきい値をもつ点の集合は3次元空間において2次元面を構成します。これを等密度面と言います（図2）。2次元面がどのようにつながり合っているかというトポジカルな情報はジーナスという量で特徴づけることができます。2次元面のジーナスとは簡単に言えば穴の数に対応し、球面はジーナスが0、ドーナツの表面はジーナスが1と対応します。複雑に入り組んだ大規模構造では、これを統計的に扱って単位体積当たりの

ジーナス数という概念を用いることになります。

このジーナス統計の大きな特徴は、密度場が多変数ガウス分布に従うときに必ず満たされる普遍的な性質があることです。具体的には、ジーナス統計量 $G(v)$ をしきい値 v の関数とするとき必ず $G(v) \propto (1-v^2)e^{-v^2/2}$ という関数形をもち、比例定数はゆらぎのパワースペクトルの形によって決まります。ここで v はしきい値を特徴づける変数で、密度ゆらぎ δ がその標準偏差 $\sigma = \sqrt{\langle \delta^2 \rangle}$ の何倍であるかを表します。すなわち、 $\delta = v\sigma$ を満たす場所が対応する等密度面になります。

ジーナス統計の関数形が多変数ガウス分布の予想からずれるかどうかは、パワースペクトルや相関関数などの2点統計量には含まれていない情報です。ところが、具体的にどのような非ガウス性の情報がジーナス統計量に含まれているのか当時は未解決問題として知られていました。そこで数値シミュレーションにより非線形場を作り出し、それを数値的に調べるという方法がとられていました。

この頃、私は独力で銀河バイアス（質量の空間分布と観測量である銀河の空間分布が違うという効果）の効果を統計的に取り扱う一般的な方法を開発したところでした。そこで開発した方法はバイアスという問題に限らず、一般に密度場の空間分布における統計量の扱いにおける普遍的な計算手法として応用できることも示しました。この一般的な方法を用いると、非ガウス分布に対するジーナス統計の解析式を非線形摂動論に基づいて導出できることに気がつきました。

こうして、非ガウス性の弱い準非線形領域の密度場に対して、ジーナス統計を理論的に表す一般的な解析的公式を初めて導出できました⁹⁾。大規模構造の解析手法としてジーナス統計が提唱されてから10年来の未解決問題が解けたのです。当時は、この問題が解析的に解けるとは思われていなかったため、以前からこの分野を研究している著名な研究者に「驚いた」と言われて嬉しかった

ことを記憶しています。

その後、ジーナス統計の一般化であるミンコフスキー汎関数という統計量にも同じ手法を応用しました。そして宇宙マイクロ波背景放射における非ガウス性の研究や、大規模構造の弱重力レンズ効果における非ガウス性の研究などにも有用であることがわかり、現在でもよく用いられています。

もし初めからジーナス統計の研究していたなら、やはり他の研究者と同様に解析的に取り組むことが困難であることを認識していたと思います。最初は銀河バイアスという別の問題を解くために開発した手法でしたが、最初の意図とは異なる問題を解くのに本質的な有用性をもっていました。これは研究全般において、他の研究者とは異なる視点をもつことが特に重要である、という教訓になりました。他の研究者も使っている既存の方法に頼って研究するだけでは、漸近的な進展は見込めるとしても、本質的な進展には結びつきにくいと思います。

5. 大規模構造によるダークエネルギー探査

草創期の赤方偏移サーベイで調べられた銀河の赤方偏移は比較的小さかったため、近傍の大規模構造しか観測できませんでした。しかし、十分遠方の大規模構造が観測できるようになると、密度ゆらぎそのものとは別に、物理量の時間変化などの情報が得られるようになります。

これについて、以前から宇宙定数の有無を判定することのできる潜在的な方法として、アルコック・パチンスキーテスト（APテスト）というものが知られていました。これは十分に遠方の宇宙に巨大な球の形状をもつものがあり、かつそれが重力的に緩和せずに宇宙膨張の影響を受けているとき、それが見掛け上楕円体になって観測されることを用いる方法です。これは1979年に Alcock と Paczyński により提案されました¹⁰⁾。遠方宇宙

の観測では多くの方法が進化効果による深刻な不定性をもちますが、この方法には進化効果の不定性がないという大きなメリットがあります。

しかし、現実的には直接APテストに用いることのできる具体的な天体は存在しません。当初から大きな超銀河団やボイドの形を使う方法や、銀河の空間相関を使う方法も示唆されていました。しかし銀河の特異速度の存在がこのテストにとって問題となることが認識されていました。

SDSSなど大規模な赤方偏移サーベイが計画されるようになると、十分遠方の銀河サーベイの可能性が視野に入ってきました。SDSSにおいてもキューサーのサーベイにより大量の天体が高赤方偏移 ($z=1-2$) でカタログ化されることになっていました。1990年代中頃には宇宙論にとって宇宙定数の有無を明らかにすることが重要な課題であり、宇宙定数の存在の示唆も得られていましたが、決定的な結論が出ていませんでした。

そこで、東京大学において須藤先生とともにAPテストを赤方偏移サーベイによる宇宙の大規模構造の観測に応用する可能性を考えました。そのためには銀河の特異速度の影響を処理しなければなりません。銀河サーベイでは銀河の奥行き方向の位置を赤方偏移によって推定し、銀河の3次元分布の情報は赤方偏移空間と呼ばれる空間に投影されます。銀河の特異速度は赤方偏移空間における見掛け上の位置を視線方向へずらしてしまうので、赤方偏移空間における銀河分布は実際の実空間における銀河分布とは系統的に異なります。

赤方偏移サーベイにおける銀河の空間相関に対する特異速度の影響については、Kaiserによって調べられていて、線形理論に基づいてパワースペクトルを与えるカイザーの公式と呼ばれる有名な公式がありました¹¹⁾。この公式を高赤方偏移の銀河分布に適用できるようにすれば、APテストにおける特異速度の問題を回避できることに気がつきました。そして、高赤方偏移における赤方偏移空間の銀河相関関数の解析的公式を初めて導き

ました。簡単なアイデアと計算だったので、当時はまだ観測的にそのようなことが可能だということが認識されていなかったために、まだ誰も行ったことがありませんでした。われわれとほとんど同時にパワースペクトルを用いた同様の仕事がいギリスのグループによっても発表されました。

現在では、宇宙の大規模構造の観測において、バリオン音響振動 (Baryon Acoustic Oscillations; BAO) を用いてダークエネルギーの性質を探ろうとする研究が花盛りです。この方法は銀河の空間相関に刻み込まれたBAOの痕跡を標準ものさしとして宇宙の加速膨張を測定するものです。BAOのスケールを使うという観点がわれわれにはありませんでしたが、それを別にすれば測定手法の根本にはわれわれの導いた原理が使われています。

最初はこれほど広く使われる手法になるとは想像もしていませんでした。当初は大規模構造の観測により精密に宇宙論パラメータを決めるという概念すら、理解されないことがありました。これは当時の大規模構造の観測データが近傍宇宙に限られていたこととも関係しています。銀河の空間相関が見掛け上変形したとしてもその割合はわずかなので、適当な宇宙論モデルを用いて変形を補正するということが行われていました。宇宙論パラメータを仮定してそれが観測の大まかな性質を説明できるかどうかを調べるという方法が主流であり、パラメータの精密測定という概念は一般的ではなかったのです。

6. 大規模構造データの解析

1990年代における宇宙論の進展の雰囲気は、1999年に書かれたBahcallらのレビュー論文¹²⁾を読むと感ずることが出来ます。宇宙の支配的な物質成分がCDMであることはほぼ確実でしたが、まだ $\Omega=1$, $\Omega_\Lambda=0$ の「スタンダード」CDMモデル (SCDMモデル) と $\Omega \simeq 1/3$, $\Omega_\Lambda=0$ のOCDM

モデル、および $\Omega \simeq 1/3$, $\Omega_{\Lambda} \simeq 2/3$ の Λ CDMモデルのどれが現実の宇宙を表しているのかという議論が続いていました。1999年ごろまでにはいろいろな観測を組み合わせると Λ CDMモデルがどうも有利そうだと認識されつつありましたが、上にも述べたように、このモデルは特に理論家に嫌われる傾向にありました。

宇宙の加速膨張発見で有名な遠方超新星の観測もこのころに行われましたが、最初は観測の系統誤差の取扱いについて疑いの目を向ける人も多くいました。また、BOOMERanGなど宇宙マイクロ波背景放射の小角度温度ゆらぎの観測も相次いで行われて、理論的に予言されていた音響振動ピークが発見され、宇宙論の精密科学化が進みました。

1998年から2000年までアメリカのメリーランド州にあるジョンズ・ホプキンス大学で研究員として過ごしました。ジョンズ・ホプキンス大学は、一般の日本人にはほとんど知られていないため、私が行くことになったとき「どこにある大学？」などとよく聞かれましたが、天文学ではよく知られた大学なので読者のなかには馴染みがある方も多いと思います。

受け入れ研究者のアレクサンダー・サレイ氏とは、彼が東京大学に短期滞在していたときに知り合いました。ハンガリー人の彼はアイディアにあふれたとてもユニークな研究者で、若い頃はハンガリーでPanta Rheiというバンドを結成しCD(レコード)も出しています(YouTubeで当時の彼らの演奏が見られます)。彼の研究姿勢には大きな影響を受けました。宇宙の構造形成に関する理論家としても有名ですが、当時のサレイ氏はSDSSを中心とする新しい天文データの解析ソフトウェア開発にエネルギーを注ぎ込んでいました。私は彼と理論的な方面で多数の共同研究を行いましたが、どちらかというデータ解析に関係する研究が多くなりました。

ジョンズ・ホプキンス大学に滞在していた頃は

SDSSの観測が始まる直前でした。SDSSなど、大規模な銀河赤方偏移サーベイによる精密な銀河の位置データから宇宙論的な情報を取り出すには、そのための理論的研究が必要です。この方面の研究は当時まだ手つかずの分野が多く、その時期にSDSSの解析の現場とも言える場所で研究できたのは幸運でした。

ジョンズ・ホプキンス大学では、理論だけでなく実際のデータを解析することも行いました。当時の赤方偏移サーベイとしては最大規模のラス・カンパナス赤方偏移サーベイをKahunen-Loève変換(KL変換)という手法に基づいて初めて解析し、宇宙論パラメータの推定に用いました。

この方法はもともとサレイ氏が宇宙論への応用を考えて導入したもので、観測領域の形状が複雑な銀河サーベイにおいて威力を発揮します。この方法を実際の赤方偏移サーベイのデータの解析に用いたのはわれわれが最初でした¹³⁾。銀河の特異速度の影響をこの解析に取り入れるところは新しく理論的に開発する必要がありました。また、観測の不均一性や観測領域の形に応じた処理なども、これまでの伝統的な方法とは違う細かなテクニックが必要だったため、とても苦労しました。このKL変換の方法やその変形版(pseudo-KL method)は、その後SDSSのデータ解析にも用いられて宇宙論パラメータの決定に使われました。

7. フィッシャー行列と宇宙論

2000年以降は超新星の観測などによって宇宙の加速膨張が確実にようになってきたため、宇宙定数の有無についての問題は徐々に収束しました。そして理論的に不自然な宇宙定数以外の方法で加速膨張を説明できないか、という問題意識が宇宙論の分野に広がってきました。いわゆるダークエネルギーの問題です。ダークエネルギーは宇宙定数を一般化した概念ですが、正体のわかっていないものに名前だけが付けられているという現状です。

それまで大規模構造から宇宙定数に制限を付け

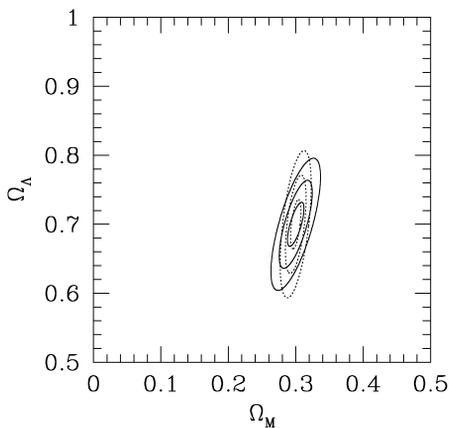


図3 遠方の大規模構造が宇宙論パラメータに強く制限を与えることを、フィッシャー行列を用いて具体的に初めて示した図¹⁴⁾。当時まだ観測が始まったばかりのSDSSを想定した制限予想を与えたもので、銀河バイアス b の値により2種類の予想(点線: $b=1.5$, 実践: $b=2$)を与えた。中心値を仮定することにより、予想される誤差の程度を示している。

ることを念頭に研究を行ってきたため、ダークエネルギーの性質に制限を加えるのにも大規模構造が有用であることは明らかに思われました。そこで、将来的な観測がどのくらいモデル・パラメータを制限できるかを調べるのに、情報理論でよく知られていたフィッシャー行列を応用しました。

現在、フィッシャー行列の方法は宇宙論において常用される方法ですが、われわれがこれを用い始めたときは宇宙論への応用例は限られていて、基本的なところから研究しなければなりません。将来の赤方偏移サーベイによってダークエネルギーがどれほど制限できるようになるのか、フィッシャー行列を用いて初めて系統的に調べていきました。その例が図3に示してあります。その後BAOを用いてEisensteinたちが同様の研究を始めました。彼らはパワースペクトルに基づく簡便なフィッシャー行列の評価法を採用していました。これに対してわれわれの方法は相関関数に基づくもので、サーベイ領域の複雑さを正確に取り入れられるなどの利点がありましたが、多少複

雑な計算を要するせいか、彼らの方法が広く使われるようになっていきました。よほど利点が際立つのでなければ、正確な方法よりも簡単な方法が広く受け入れられるという教訓でしょうか。いずれにしても、宇宙論分野での先行研究の少ないなか、情報統計理論に関する他分野の文献などを調べながら研究を行ったのはよい思い出です。

8. バリオン音響振動

2000年ごろから本格的にSDSSが稼働し始め、これまでに知られていなかった大規模な銀河の空間分布が徐々に明らかになっていきました。そのなかで大規模構造の精密な宇宙論的解析が現実的になってきたため、これまでの大規模構造の理論研究にも、さらなる精密化が求められるようになりました。特にBAOによってダークエネルギーに制限を付けるため、理論的な基盤を固めておく必要がありました。

当初はEisensteinたちが銀河パワースペクトルを用いる方法を研究していましたので、私はそれまでに自分で蓄積した研究の流れから相関関数に対してBAOがどのような効果を及ぼすかを調べてみました¹⁵⁾。パワースペクトルと相関関数はお互いにフーリエ変換の関係にあって数学的には同じものですが、実際の観測では有限サンプリングの効果、観測の非一様性の効果、赤方偏移空間の変形や視線方向の変化する効果などにより、それほど単純ではありません。

まず実空間で相関関数に対するBAOの影響を単純に計算してみたところ、驚いたことにBAOのスケールがくっきりと一つのピークとなって現れました。パワースペクトルではBAOスケールが周期的な振動パターンとなって現れるのに比べると、とても対照的でした。相関関数にBAOピークが一つ現れることは現在では常識ですが、当時はパワースペクトルだけしか調べられていなかったため、これを思わず最初に発見してしまいました。注意深くデータ解析を行えば、パワース

ペクトルの解析も相関関数の解析も同様の結果を与えるはずですが、相関関数のBAOピークは視覚に訴えます。パワースペクトルに含まれるBAOの痕跡は、滑らかな成分に微妙な振動が乗っかっているという現れ方をするので、実際の誤差つきのデータを見ただけではあまりはっきりと見えません。相関関数には $100 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$ のあたりに一つのピークとなって、BAOの効果がわかりやすく現れます。

2005年にSDSSのLRG (Luminous Red Galaxies) を用いた解析により、実際にBAOが検出されました¹⁶⁾。このBAOの解析には私の調べていた相関関数が効果的に用いられました。この後BAOの解析には相関関数もパワースペクトルもどちらも広く用いられるようになりました。

9. 次世代の大規模構造解析

SDSSの成功が大きな後押しとなり、宇宙の大規模構造の観測によってダークエネルギーの性質を調べる将来計画が数多く検討されるようになりました。大口径の地上望遠鏡を使う計画は貴重な望遠鏡時間を大量に消費するので、伝統的な天文観測とどちらが大事かという政治的な問題も持ち上がるほどになりました。その流れの中で、日本のすばる望遠鏡を使ってBAO観測を行う計画が出てきたため、日本の光赤外線天文学コミュニティには衝撃をもって迎えられました。またアメリカとヨーロッパでは衛星による大規模構造サーベイが計画されました。こうして大規模構造の精密観測は次世代の観測的宇宙論における目玉として大きく期待されるようになりました。国際協力が必須の予算規模をもつ、とても大きなプロジェクトになってきました。

ほとんど線形理論で十分な解析のできる宇宙マイクロ波背景放射と異なり、宇宙の大規模構造の解析では非線形性の影響を無視できません。原則的には十分大きなスケールで線形理論が成り立っていると考えられていますが、BAOの精密な解

析においても線形理論だけでは不十分であることが知られています。また、銀河サーベイにはバイアスの問題が存在し、宇宙論モデルの理論的な予想量である質量の空間分布を観測量である銀河の空間分布から推定しなければなりません。さらに銀河の特異速度による赤方偏移空間変形の影響も考慮する必要があります。

線形理論において、バイアスや赤方偏移空間変形の効果の影響を取り込むことは比較的単純です。しかし、これらの効果を非線形領域で正しく扱うことは難しい課題だとされてきました。非線形性の大きな領域では、数値シミュレーションや観測そして理論的モデルを総合的に用いて明らかにしなければならないでしょう。ただ、準非線形領域に対しては、ある程度解析的に取り扱うことも可能になります。

私は最近、準非線形領域におけるバイアスや赤方偏移空間変形の効果の整合的取り扱いを可能にする「統合摂動論」(integrated Perturbation Theory; iPT) の定式化を行い、興味深い進展を得ています¹⁷⁾⁻¹⁹⁾。大規模構造における準非線形効果は、最近のおもしろい研究分野の一つです。これらの研究についても触れたいところですが、すでに予定の紙数が尽きてしまいました。

この記事では研究内容について詳しく述べることができませんでした。大規模構造と宇宙論に関する一般的な解説とともに、準非線形解析研究に関するもう少し詳細な解説を、共立出版の物理学最前線シリーズに現在執筆中です。大規模構造による宇宙論の詳細に興味ある方は、そちらが出版された折にご覧いただければ幸いです。

謝 辞

指導者であり共同研究者である須藤 靖先生には、これまでに数多くの場面でお世話になりました。修士課程で指導していただいた二宮正夫先生からは、研究者としての心構えを学びました。共同研究者のアレックス・サレイさんからは、宇宙

論を心底楽しむことを学びました。所属研究室における宇宙論のスタッフとして佐藤勝彦さん、池内 了さん、杉山 直さん、杉之原立史さん、白水徹也さん、吉田直紀さん、市来浄興さん、日影千秋さんをはじめとする方々には日常のお世話になりました。以上の皆さん、そしてすべての共同研究者や学生の皆さんに感謝します。ここにお世話になったすべての方々のお名前を挙げられない非礼をお許してください。

参考文献

- 1) 松原隆彦, 1992, 素粒子論研究 85(6), 136
- 2) Smoot, G. F., Bennett, C. L., Kogut, A., et al., 1992, ApJL 396, L1
- 3) Suginothara, T., Suto, Y., Bouchet, F. R., Hernquist, L., 1991, ApJS 75, 631
- 4) Springel, V., 2005, MNRAS, 364, 1105
- 5) Tomita, K., 1967, Progress of Theoretical Physics 37, 831
- 6) Makino, N., Sasaki, M., Suto, Y., 1992, PRD 46, 585
- 7) Gott, J. R., III, Dickinson, M., Melott, A. L., 1986, ApJ 306, 341
- 8) Matsubara, T., Suto, Y., 1996, ApJ 460, 51
- 9) Matsubara, T., 1994, ApJL 434, L43
- 10) Alcock, C., Paczynski, B., 1979, Nature 281, 358
- 11) Kaiser, N., 1987, MNRAS 227, 1
- 12) Bahcall, N. A., Ostriker, J. P., Perlmutter, S., Steinhardt, P. J., 1999, Science 284, 1481
- 13) Matsubara, T., Szalay, A. S., Landy, S. D., 2000, ApJL 535, L1
- 14) Matsubara, T., Szalay, A. S., 2001, ApJL 556, L67
- 15) Matsubara, T., 2004, ApJ 615, 573
- 16) Eisenstein, D. J., Zehavi, I., Hogg, D. W., et al., 2005, ApJ 633, 560
- 17) Matsubara, T., 2008, PRD 77, 063530
- 18) Matsubara, T., 2011, PRD 83, 083518
- 19) Matsubara, T., 2013, ArXiv: 1304.4226

Pioneering Observational Cosmology Based on a Statistical Perturbation Theory

Takahiko MATSUBARA

*Department of Physics, Nagoya University, 1
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan*

Abstract: Recent progress in observational cosmology has been inducing a variety of changes in the research fields of cosmology. In this article, receiving the Hayashi Chushiro award, I would like to look back my experiences as a researcher in cosmology, and describe the changing trends of cosmological research. I focus on the background of my research activity and describe how I have obtained ideas in studying cosmology.