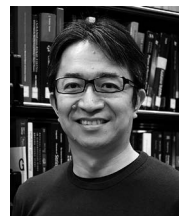


# すばる精密宇宙論の実現までの道のり

## 高田 昌広

〈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: masahiro.takada@ipmu.jp



ハワイ島マウナケア山頂のすばる望遠鏡は大口径、広視野、高い結像性能を有し、世界の8 m級の望遠鏡と比較しても極めてユニークな望遠鏡である。この威力をさらに強化させるのが、広視野カメラHyper Suprime-Cam (HSC) および広視野多天体分光器Prime Focus Spectrograph (PFS) である。この記事では、私の視点からみたHSC・PFSの国際共同研究プロジェクト、すばるHSCデータによる精密宇宙論の実現までの道のり、またPFSによるさらなる発展の展望を述べたい。

## はじめに

この度は2023年度日本天文学会林忠四郎賞を受賞させていただき、大変光栄です。推薦して下さった先生方、選考に関係された先生方、これまでご指導頂いた先生方、また多くの共同研究者の皆様に感謝いたします。

いつの間にか人生の折り返し地点を過ぎていました。折角の機会ですので、紙面をお借りし、私のこれまでの研究人生を紹介したいと思います。紹介のなかで、私の視点から見たすばるHSC・PFS国際共同研究プロジェクト、すばるデータによる精密宇宙論の実現までの道のりにも触れ、そしてすばる宇宙論の今後の展望についての個人的な意見もご紹介したいと思います。今後の天文学を担う若い方々の参考になれば幸いです。

## 1. 東北大学時代：宇宙論を志す

まず、私の観測的宇宙論の研究との出会いから紹介したいと思います。高校時代に数学、物理が

比較的得意なほうで（と思い込んでおり）、大学入試では何となく「格好よい」物理ができそうな東北大学の理学部物理学科に入学しました。東北大では大学3年生のときに専門の専攻に配属されます。もともと天文少年というわけではなかったのですが、これも何となく一番人気の天文学専攻を希望し、運よく配属されました\*1。さらに運がよかったのは、私が4年生になったときに指導教員の二間瀬敏史先生が東北大に着任し、先生の東北大での最初の学生になれたことです。二間瀬研究室の教科書読みゼミでは、いわゆる「京都スタイル」\*2の方式をとっており、午前中から始まり、昼食をはさみ、終わりは学生らの気力・体力が続くまで、という体育会系ゼミでした。また、指導教員の興味（？）に従い、発売されたばかりの教科書、例えば佐藤文隆さんの宇宙物理の教科書、ワインバーグの場の理論の教科書など、分野に関係なく、最先端の学問に触れる機会を（強制的に）与えられました。天文学教室に所属しながら、ファインマン・ダイアグラムをホワイトボードに

\*1 志低い私のために配属がかなわなかった方にこの場をお借りしてお詫びいたします。今後とも精進いたします。

\*2 私の知っているゼミが本当に京都大学のスタイルなのかは、当大学で働いたことがない私には勿論知る由もありません。

描き、悪戦苦闘していたのも今になってはとてもよい思い出です。また、同期、前後の学年に元気で、気の合う、多くの優秀な学生・院生に恵まれました。談話会・セミナーなどでは、院生同士で質問する回数を競争したり、物理、天文を夜遅くまで議論することができました（例えば、図1）。

二間瀬研究室の話に戻りますが、学部+大学院のあいだに宇宙物理、宇宙論の基礎を習得することができました。特に、宇宙の現象が物理の法則で記述され、数学で定式化され、その理論が観測によって検証されるというプロセスを通じて、宇宙物理学や宇宙論が進展していることを学びました。また、在学中には、超新星観測による宇宙の加速膨張の発見や、BOOMERanGなどの地上宇宙背景放射実験によるインフレーションを支持する観測結果、宇宙構造による弱い重力レンズ効果の観測結果など、宇宙論がめまぐるしい速さで進展する様子を目の当たりにしました。博士を取得する頃にはすっかり宇宙論にはまっていました。

さらに、当時では珍しかったと思いますが、二間瀬先生は早くから海外を意識させる環境を整えてくれました。海外から著名な研究者を招聘して下さったり、海外出張の際に同行する機会を与えて下さったり、博士号取得後は海外に行くことを強く勧めて下さりました。このため、自然と博士課程修了後に海外に行くことを目指すようになりました。



図1 二間瀬先生の60歳記念研究会の懇親会に撮った集合写真。

## 2. UPenn 博士研究員時代：己を知る

### 2.1 米国での博士研究員

幸いなことに学振DC2に採用され、博士取得の後にも一年のあまり学振の保険があったので、博士課程3年生のときに海外の研究員のポストに応募しまくりました。（記憶が正しければ）30ぐらいのポストに応募しましたが、当然現実には厳しく、ほとんどオファーは貰えませんでした。それでも、米国フィラデルフィアのペンシルバニア大学にちょうど翌年から着任予定のBhuvnesh Jain氏（ブブネッシュ ジェイン、以後ブブ=Bhuvと呼ぶことにします）から、彼が募集していた博士研究員ポストのショートリストに残っているという連絡を受けました。日本時間の夜中に国際電話で面接があったのですが、全然英語が話せず、「I will do my best」と連呼しまくったのを覚えています。電話を切ったあとのあの苦い敗北感は一生涯忘れられません。それでも幸運（奇跡的）にも、最終的にBhuvから研究員のオファーを貰うことができました。

同時多発テロで渡米が2ヵ月ほど遅れましたが、何とか2001年10月に米国フィラデルフィアに引越することができました。Bhuvはマサチューセッツ工科大学で博士を取得し、その後ドイツマックスプランク研究所で研究員を務め、そのあいだの宇宙論的重力レンズ効果の理論的研究などのよい仕事が評価され、東海岸の名門ペンシルバニア大学のテニユアトラック助教授に着任したところでした。私はBhuvの博士研究員第一号でした。ご存知の方も多いと思いますが、着任したばかりの新任の助教授は、最初の5年ぐらいのあいだに業績（研究、教育、科研費獲得など）を挙げなければ、テニユア（tenure、終身在職権）を貰えません。このため、Bhuvも例に漏れずやる気に満ちており、英語ができない私との研究に多くの時間を割いてくれました。私も必死でしたので、宇宙論的重力レンズ効果を用いた宇宙論手法に関す

る論文を数編発表することができました [1].

米国での3年間の研究員生活のあいだに、Bhuvの計らいもあり、宇宙論業界の多くの研究者と出会うこともできました。米国には世界中からハングリー精神のある優秀な研究者が集まっており、彼らとの交流は非常に刺激的でした。自分もこの業界でやっていけるかもと思うこともあれば、到底敵わないと思う優秀な研究者にも遭遇し、その経験を通じて最終的には自分の能力に適した研究スタイルを見つけることができたように思います。

当時から、加速する宇宙膨張の発見は大きな注目を集めており、何が引力である重力に打ち勝ち、宇宙膨張を後押ししている（加速させている）のか大きな問題になっていました。アインシュタインの重力理論で現宇宙の加速膨張を説明する場合には、物質の重力に打ち勝つ、実質的に万有斥力を引き起こす例えばアインシュタインの宇宙定数 ( $\Lambda$ ) を付け加える必要があります。宇宙の始まりにも、宇宙の大きさが時間とともに指数関数的に大きくなる加速膨張（インフレーション）があったと思われていますが、インフレーションは終わり、膨張は減速膨張に変わり、光や物質が熱平衡にある熱的な宇宙へと変遷しました。現宇宙の加速膨張が、 $\Lambda$ によるものではなく、動的な謎のエネルギー、つまりダークエネルギーによるもので、現宇宙の加速膨張にも終わりがあるのか、あるいはもっと膨張が速くなったりするのかを調べることの重要性が活発に議論されていました。「ダークエネルギー」という名前は、そのキャッチーさから科学界だけでなく一般社会にも強い印象を与え、広く知られるようになりました。この名称は、当時シカゴ大学の研究者だったマイケル・ターナー氏が名付けたものです。

## 2.2 米国での大型プロジェクトの進め方：理論・観測・技術開発の連携

ダークエネルギーを調べる方法としては、Ia型超新星、宇宙論的重力レンズ、銀河分布を用いたバリオン音響振動の測定、そして銀河団の個数統計を利用する手法が有力視されていました。米国での大型プロジェクトの進め方は、理論、観測、ハードウェアおよびソフトウェアの開発が一丸となって進められることが特徴です。米国のDecadal Survey<sup>\*3</sup>でも明らかのように、まずはその時点で最も重要な科学的な問題が定義され、その解決に向けた技術、装置の開発が議論されます。その後の予算もこのDecadal Surveyの方針に沿って、基本的には推薦されたプロジェクトが実現されるまで配分されます。ダークエネルギーの解明を目的とした大型プロジェクトの例で言えば、2000年および2010年のDecadal Surveyで推薦されたRubin Observatory LSSTやRoman Space Telescopeが予算化され、開発・建設が進み、いよいよ実現の段階にまできています。

フェルミ研究所やバークレー国立研究所などの国立研究所と大学の関係もバランスがよく、前者は技術的およびインフラの研究を支え、後者は人材育成およびサイエンスの推進において主要な役割を果たしています。米国の研究者コミュニティには、「自分たちが世界の最先端を走り、研究分野のフロンティアを切り開いている」という自負が浸透しており、研究を進めるうちに「何とかできるのではないか」という雰囲気は自然に生まれてきます。宇宙論的重力レンズ効果を用いた精密宇宙論の例でも、当時は重力レンズ効果の信号が非常に微弱で、測定に伴う系統誤差の影響に大きな懸念が示されていました。しかし、このような状況でも、最初から「どうせ無理だ」「難しい」と諦めるのではなく、米国的なアプローチでは難題を「チャンス」と捉え、「面白い！難しい問題だ

<sup>\*3</sup> 2024年のレポートは<https://nap.nationalacademies.org/resource/26141/interactive/>にある。

けど、どうやったら解決できるか？」という前向きな姿勢で取り組みます。同じ目標に向かって、その実現に必要な理論が進展し、ハードウェア・ソフトウェアの開発が行われ、実際に重力レンズを用いた宇宙論研究が大きく発展しました。また、チャレンジングで前向きな考え方が根づいており、新しいアイデアを受け入れる準備ができていことも特徴です。例えば極めて優秀な人材を歓迎し、さらに成長させる環境を提供する文化も確立されています。このため、キャリアの浅い研究者でも大型プロジェクトで主要な役割を果たすことが多くあります。

もちろん、よいところばかりではないとは思いますが、米国の大型プロジェクトの進め方、特に理論・観測・技術開発の連携などについては参考になる点が多いと思います。博士研究員として研究に没頭できる環境にあったこともあり、3年間の研究生活で米国式の研究スタイルにすっかり染まり、影響を受けやすい私は自然とポジティブ思考の研究者になっていました。米国での教員公募にも応募しましたが、残念ながら米国でキャリアを築くという目標は叶いませんでした。それでも、幸運にも2004年に東北大学の助教（当時は助手）のオファーをいただき、日本に戻ることができました。

### 3. Kavli IPMU: 役割を知る

#### 3.1 HSCプロジェクト開始およびIPMUの発足

米国にいる間、当然のことですが、日本を客観的に見ることができ、すばる望遠鏡の主焦点装置のユニークさとその威力を再認識することができました。この理由で、2004年に東北大学天文学教室に助教として戻ってきたあとは、すばるデータを用いた重力レンズの観測的研究にも注力しまし

た。宇宙の最大自己重力天体である銀河団について、X線で明るい無バイアスに選んだ銀河団のサンプルのすばる望遠鏡データを取得し、その重力レンズ効果から銀河団領域における平均的なダークマターの分布を調べ、構造形成モデルの予言を検証しました [2]。

さらに、研究人生の転換となったのは、現国立天文台ハワイ観測所長の宮崎聡さんを中心に、唐牛宏先生、東京大学の相原博昭先生、須藤靖先生らが2006年頃に立ち上げていたHyper Suprime-Cam (HSC) プロジェクトに参加できたことです。助教だった私にも相原先生と須藤先生が声をかけてくださり、米国時代に培った楽観的な思考もあって、二つ返事で参加を決めることができました。

また、その直後、日本に世界トップレベルの国際研究所を設立することを目指したWPI (World Premier Initiative: 世界トップレベル研究拠点) プログラムの下で、数学、物理、天文を組み合わせる宇宙の謎を解明することを目的とした数物連携宇宙研究機構（現在のカブリ数物連携宇宙研究機構: Kavli IPMU）が東京大学に設立されました。創立機構長が村山斉先生（以後、村山さん）です\*4。HSCプロジェクトに関わり始めていた私に声をかけていただき、幸運にも初代メンバーの一人として2008年3月にIPMUに採用されました。村山さんの第一印象は非常に強烈で、まさに「日本語がそこそこ上手なアメリカ人」という感じでした。採用プロセスの村山さんとの面接で、開口一番に「高田さん、何が面白いと思いますか？」と質問されました。私も必死で、すばるHSCのユニークさや、米国での経験から重力レンズ効果による精密宇宙論の展望について熱く語りました。村山さんはいろいろと質問されましたが、その後「それは面白い！ぜひ一緒にやりま

\*4 いつもHitoshiとか村山さんと呼んでいるので、変な感じです。村山さんは英語での議論は極めて鋭く、直接的で、迫力満点ですが、日本語で話す少しマイルドになります。政治、難しい話、お願いするときには日本語で話しかけることにしています。私の秘密の攻略法です。

しょう！」と言ってくださったのを今でも鮮明に覚えています。これは今も変わらないのですが、村山さんはサイエンスへの情熱に溢れており、質問は鋭いのですが、ポジティブな発言が多く、いつのまにかこちらが勇気づけられます。村山さんは素粒子論が専門で、素粒子実験など他のプロジェクトを推進する可能性も十分にあったと思いますが、物理学分野における重要な問題やIPMUの将来にとって有望なプロジェクトを大局的な視点から客観的に判断し、IPMU発足当初からすばるプロジェクトをIPMUの旗艦プロジェクトとして推進していただきました。観測的宇宙論の分野では、当時は日本は明らかに後れをとっていたので、村山さんにはどんなに感謝してもしきれません。

IPMUは2007年10月にゼロからスタートしましたが、村山さんのリーダーシップと熱すぎる情熱は圧倒的で、村山さんの下でメンバー全員が「世界に並ぶ国際研究所を作るんだ！」という共通の目標に向かって、必死に研究に取り組んでいました。公用語は英語、国際基準の公募、メンバーの6割は海外出身のメンバー、何もかもがゼロからスタートということで、活気に溢れ、日本にいながら外国（国際的な環境）で研究しているような雰囲気でした。また、「国際的に優れた研究を行うことが最優先」という理念のもと、村山さんは多くの困難を乗り越え、研究環境や組織、システムの改革も実行し、現在のKavli IPMUを築き上げました。

すばるHSCプロジェクトは、すばる主焦点装置の広視野を活かし、広い天域に渡り、遠方（暗い）の銀河まで多色フィルターでイメージング観測を行うというプロジェクトです。この大規模データから宇宙の重力レンズ効果を精密に測定し、膨張する宇宙の標準模型である $\Lambda$ CDMモデルを徹底的に検証するとともに、ダークエネルギーの性質を調べる、というのが当初からの主目的でした [3]。装置の開発は第一に重要ですが、

HSCサーベイはすばる史上最大のプロジェクトであり、大型プロジェクトの運営、データ解析、データ配布、そしてサイエンスの確実な実行は、すべてが挑戦でした。これについても、相原先生、須藤先生などのリードにより、Sloan Digital Sky Surveyを率い、経験豊富で、日本の研究者とも友好関係にあったプリンストン大学との国際共同研究がまとまり、2008年にプリンストン大学の研究者がHSCプロジェクトに参加したことが大きかったと思います。また同時期に、国立天文台と台湾の中央研究院天文及天文物理研究所 (ASIAA) の協定も結ばれ、ASIAAのHSCプロジェクト参加により、現在の形となるHSC国際共同研究プロジェクトが発足しました。

これら多くの偶発的な事象が重なり、HSCプロジェクトは、今思えば奇跡的にスムーズに進んだと言えます。宮崎さんの強いリーダーシップの下で装置開発 [4-6] が進められました。Kavli IPMUは、資金的なサポートを行っただけでなく、国際共同研究の運営においてハブとして機能し、国内外の研究者間の人材交流や共同研究会議の開催などで大きな役割を果たしました (図2)。Kavli IPMUがなければ、HSC国際共同研究プロジェクトの成功はなかったと言えると思います。

大型国際共同研究プロジェクトを実行する際には、誰がデータ権を持つか、サイエンスプロジェクトを立ち上げる時の手順、進め方、論文の執筆・発表の手順、誰が著者になるべきか、などの共同研究のルールを決めることが極めて重要です。経験豊富な須藤先生、プリンストン大学のEd Turner先生、Michael Strauss氏らのリードの下、HSC共同研究の初期に国際共同研究ルールを策定しました。メンバーはこのルールに従って研究を進めればよく、問題が起こった際にも、このルールに立ち戻り、それに従って調整することで、これまでスムーズに国際共同研究を進めることができています。当時の私は、このルール策定の重要性に全く気づいていませんでしたが、現在



図2. 上の写真は2017年に東北大で開催したHSC共同研究会議の集合写真. 下の写真は, 2017年にプリンストン大学で行ったHSC重力レンズワーキンググループの会議の集合写真.

ではその重要性を経験に基づき, 身にしみて認識しています. 先生方の先見性に敬意を表するとともに, 今後のプロジェクトにもぜひ活かしていただきたいと思っておりますので, ここで強調させていただきます.

私の役割は, HSCプロジェクトの主要機関の一つのKavli IPMUのメンバーということもあり, サイエンスワーキンググループの共同議長(もう一人はプリンストン大学のMichael Strauss氏)として, すばる戦略枠プログラムであるHSC-SSPのサーベイデザイン, 主要科学目標の定義, HSC-SSPプロポーザルの執筆のリード, 電話会議, 共同研究会議の運営, また国際共同研究の様々な調整などを行いました [7]. HSCプロジェクトは装置開発, サイエンス, ソフトウェア開発など, 観測・理論・技術開発が連携して成功・実現した大型プロジェクトだと思います. 日本で他のプロジェクトがどのように進められているかはほとんど知りませんが, 日本での将来計画を議論する際に, HSCの経験は非常に参考になると思います. HSCプロジェクトの発足当初からメン

バーとして関わり, 大規模な国際共同プロジェクトで役割を担うことができたこと, また国際的な経験を積むことができたことは, 本当に幸運だったと言えます.

正直なところ, もしHSC共同研究の発足時や運用時期に戻れるなら, 「ああしていればよかった」と思うことがたくさんあり, 反省点や至らなかった点も多くあります. HSCプロジェクトに関わったメンバーの皆様には, この機会にぜひ忌憚のないご意見やフィードバックをお寄せいただければと思います. いただいたご意見は, 可能な限り今後の活動に活かしたいと考えています.

#### 4. HSC-SSP: 日本主導の観測的宇宙論の実現

資金難など色々なことがありましたが, HSC装置が完成し, 2014年にHSCすばる戦略枠観測プログラム(HSC-SSP)を開始することができました. サーベイ初年度は, 同僚の安田直樹さんが各ランの観測スケジュールを組み, また観測マニュアルを作成し, 大学院生を含む多くの研究者がシフト制で交替しながら, 三鷹のリモート室から観測を行いました. 国立天文台の古澤久徳さんを中心とするグループは, 取得したHSCデータの品質を即座に評価するシステムを開発し, その後, 自動的に観測条件を判断できるようになりました [8]. Rubin Observatory LSSTのために開発されていたデータ処理解析パイプライン [9] がHSCデータにも用いられ, 大規模なHSCデータを均一かつ高精度に処理し, 各天体の物理量(大きさ, フラックス, 形状など)の測定量を含んだ天体カタログから, 研究者は即座にサイエンスを行うことが可能になりました. 国立天文台の田中賢幸さんが中心になりデータベースを開発し, HSC生データ, 処理済みデータ, また天体カタログが世界に公開されました [10, 11]. ここではすべてのお名前を挙げることはできませんが, 多くの研究者の活躍により, 日本主導のすばる

HSCサーベイが実行され、さらに天文学の貴重な財産となるHSCデータカタログが提供されました。これにより、天文学の多くの分野において大きな貢献を果たしたと言えると思います。

私が主に関わっていた重力レンズ宇宙論のサイエンスグループも、例えば競合する米国のDark Energy Surveyのチームと比較すると極めて小さなグループで、データ取得、データ解析、重力レンズ測定のためのカタログ作成、理論、物理解析など多くの研究過程について十分な経験はありませんでした。それでも、大学院生などの若手研究者の大活躍もあり、世界の第一線に並ぶ宇宙論の研究成果を出すことに成功しました [16, 17]。直近では、2023年には3年間分のデータを用い、重力レンズ効果を精密に測定し、宇宙の標準模型 $\Lambda$ CDMモデルにおける現宇宙の構造形成の進行度合いを表す物理パラメータ $S_8$ を数%の精度で測定することに成功しました [13-15, 18, 19]。特にHSCチームは、業界では初めて重力レンズ宇宙論の最大の懸念である測光的赤方偏移の不定性の影響を最大限保守的に考慮し、宇宙論パラメータを測定しました。しかし、すばるHSCの得た $S_8$ の値は、精密宇宙論を実現した高精度なCMBデータが示唆する $\Lambda$ CDMを現在まで進化させた(外挿した)宇宙の $S_8$ の値と矛盾を示し、これが「 $S_8$ 不一致問題」として大きな議論を巻き起こしています。この不一致が観測の系統誤差のためではなく、物理的であれば、 $\Lambda$ CDMを超える宇宙の新しい物理を示唆している可能性があり、大発見に繋がるかもしれません。

最近でも、宇宙背景放射の重力レンズ効果と、赤方偏移分布がよくわかっている明るい、古い銀河(Luminous Red Galaxies)の分布を組み合わせた宇宙論解析の結果が発表されました [12]。この結果は、測光的赤方偏移の不確かさなど観測的な系統誤差が影響を及ぼす余地がほとんどなく、極めてロバスタな結果と言えます。この独立した結果は、上記のHSCの結果とよい一致を示

しており、 $S_8$ の不一致がいよいよ本当である可能性が高まってきました(図3)。私の宇宙論業界の友人たちも真剣になってきており、ますます期待が高まっている状況です。

こうして振り返ってみると、HSC重力レンズ宇宙論の成功は、各メンバーがそれぞれの役割をしっかりと果たし、その結果として全体の大きな成果へと繋がったチームプレーの賜物であったと改めて実感します。当時HSCプロジェクトで活躍していた大学院生や博士研究員の多くが、現在では研究職に就いていることは非常に喜ばしいことです。大型プロジェクトにおいては、サイエンスに限らず、ハード・ソフト開発やプロジェクト運営に貢献した人材を、コミュニティ全体で支えることが重要であり、それが日本の天文学や宇宙物理学の長期的な発展に繋がると思います。

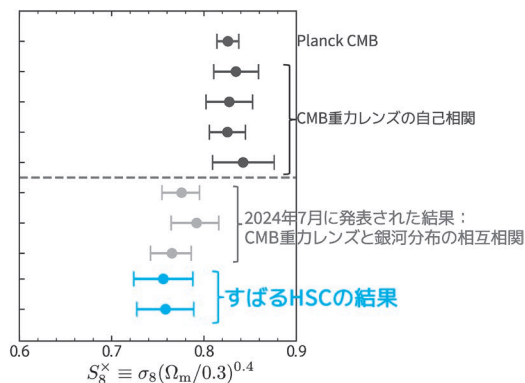


図3 現宇宙の構造形成の進行度合いを表すパラメータ $S_8^x$ の測定結果( $S_8^x$ が大きいほど構造形成が進んだ宇宙に対応)。一番上はPlanck CMBの結果、その次の複数の結果はCMBデータから測定した重力レンズ自己相関の結果(中心値と68%信頼区間を示す)。薄いグレーの結果は2024年7月に発表された新しい結果 [12] を示し、赤方偏移分布がよく分かっている銀河分布とCMB重力レンズ効果の相互相関の結果。一番下の青い結果は、すばるHSCデータの重力レンズ効果の測定を使った結果 [13-15]。Planck CMBとHSC重力レンズ効果などの測定結果が一致しない、つまり $S_8$ 不一致問題を示している。

## 5. PFS：新たな挑戦

広視野多天体分光器 Prime Focus Spectrograph (PFS) がいよいよ始動します。PFSはHSCとほぼ同じ視野(約1.3平方度)にある約2400個の天体を、広い波長帯380-1260 nmで同時に分光観測できる強力な装置です(図4)。現在試験観測を行っており、設計仕様の性能をほぼ達成できていることを確かめています。同じサイト・望遠鏡で、同じ天域の天体を、HSCとPFSでイメージング、分光観測することで、さまざまな相乗効果のサイエンスを創出できます。8 m級望遠鏡の広視野多天体分光器は南天のVLT MOONS(2025年から運用予定)もありますが、MOONSはPFSの約10分の1の視野しか持たず、PFSは圧倒的な

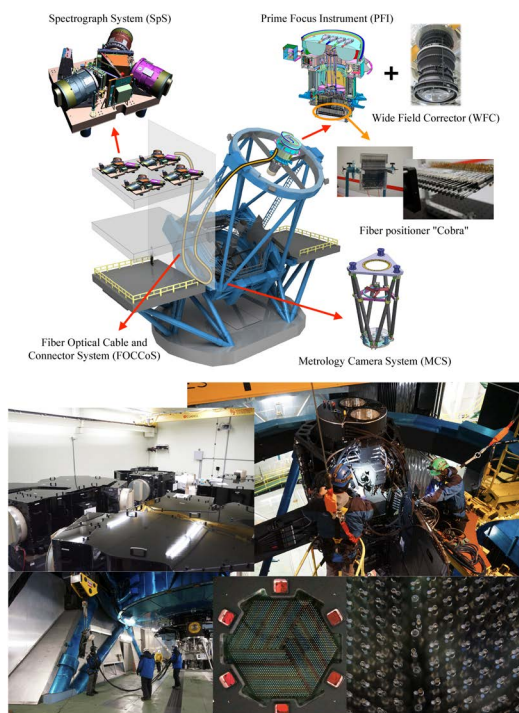


図4 上のイラストはPFS装置の概要図。下は、PFS主焦点装置(PFI)、ファイバー「Cobra」ポジショナー、4台の分光器モジュール(12台の分光器カメラ)、ファイバーケーブルなどの写真(国立天文台ハワイ観測所森谷友由希氏からの提供)。

サーベイ分光能力を有しています。世界からも注目されており、Euclid衛星、RO LSST、Roman衛星との連携観測も期待されています。PFSは、既存のすばる望遠鏡に新たな機能を追加することができ、2030年代にもすばるをユニークで世界第一線級の望遠鏡であり続けることを可能にする装置です。

PFSは装置も複雑ですが、日本、台湾だけでなく、米国、フランス、ドイツ、中国、ブラジルの研究機関が参加する、HSCと比較して、さらに複雑な大型国際共同研究プロジェクトで進められています。村山さんを筆頭に、国立天文台の田村直之さん、森谷友由希さん、矢部清人さん、田中賢幸さんなど、多くの研究者が甚大な労力を費やし、それぞれの役割を責任をもって果たし、マネジメント、ハード・ソフト開発をリードしています[20]。PFS国際共同研究チームは2011年に発足しましたが、すべての装置のサブシステムがすばる望遠鏡サイトに到着し、組み上がりました。私の役目は、PFSサーベイの立案、サイエンスの検討、そして国際共同研究を円滑に進める環境を整えることです。HSCで十分な経験を積んだはずですが、まだまだ至らず、苦労が続いています。

PFSは非常に強力なため、精密宇宙論だけでなく、138億年の宇宙史にわたる銀河進化や、天の川銀河および近傍銀河を詳細に調べる銀河考古学など、さまざまな分野で飛躍的な進展をもたらすことができます。PFS国際共同研究チームでは、宇宙論・銀河進化・銀河考古学のサイエンスを3本柱とするPFS-SSPプログラムを策定しており、ユニークかつインパクトのあるサイエンスを実現する準備を進めています[21]。PFS国際共同研究ポリシーに同意することが条件ですが、日本の研究機関に所属する方はどなたでも、PFS-SSPプロジェクトに参加し、データ権を取得することができます。少しでも興味のある方は、この機会にぜひご検討ください。また、疑問点があれば、お気



軽にお問い合わせください。個人的には、すばる HSC+PFS データを用いて、 $S_8$  不一致問題の解決、つまり宇宙の新しい物理の真偽の決着、あるいはニュートリノ質量和の測定など、宇宙論において重要な貢献を実現したいと考えています。新たなチャレンジですが、「何事もポジティブに、為せば成る」をモットーに、チームが一丸となって確実に成功に繋がりたいと思います。とても楽しみです！

## 6. まとめ

こうして振り返ってみると、多くの先生方からのご指導や多くの共同研究者との研究を通じて、とても運に恵まれた幸せな研究人生を過ごせたことを改めて認識しました。Kavli IPMU の立ち上げ、進展、確立、またすばる HSC・PFS の立ち上げ、進展、実現に現場の一員として関わることができました。もう一度研究人生をやり直しても、おそらく得られない機会だったと思います。皆さんも機会やチャンスがあれば、ぜひどんどん挑戦してほしいと思います。

私の研究の原動力は共同研究者の皆さんとの議論です。研究の議論をしているときが一番楽しく、時間が経つのも忘れてしまいます。特に、皆さんとの素朴な質問や議論を通じて新しいアイデアが生まれ、それを定式化し、実際のデータからその効果を探るというプロセスは、私が最も好きな研究スタイルです。これまで共同研究にお付き合いいただいた皆さんに、この場をお借りして感謝の気持ちをお伝えしたいと思います。皆さん、どうぞ見捨てずに、今後ともよろしく願います。

天文学の研究は単なる点の集合ではなく、ひとつひとつの点が線として繋がり、進展していることを改めて実感しています。すばる望遠鏡は先輩方の大変な努力によって建設され [22]、そのユニークな主焦点装置の機能を強化することで、天文学のさらなる発展に繋がりました。HSC・PFS

の進展が次世代の天文学に繋がることを期待して、この記事締めくくりたいと思います。

## 謝辞

今回、名誉ある林忠四郎賞を受賞させていただいたのは、すばる HSC・PFS チームを代表していただいたものだと思います。プロジェクトを牽引して下さった、村山斉教授、須藤靖教授、相原博昭教授、宮崎聡教授、唐牛宏教授のご指導をありがとうございました。また、HSCサイエンスチームの共同議長である Prof. Michael Strauss, PFSサイエンスチームの共同議長である Prof. Richard Ellis, さらにチームのメンバーの皆さまに感謝いたします。

宇宙論の基礎を教えてくださいました指導教員の二間瀬敏史教授、また重力レンズ宇宙論の指導をしてくださいました博士研究員のボスである Prof. Bhuvnesh Jain にも深く感謝いたします。いつも悩みの相談に乗ってくださる千葉柁司教授、佐々木節教授にも感謝いたします。多くの同僚、友人にも感謝いたします。

私のグループの院生の皆さん、国内、海外の共同研究者の皆さんには、大変な思いをさせたかもしれないかもしれませんが、一緒に研究ができて本当に楽しかったです。どうぞこれからも変わらずよろしく願います。

私の最高の家族は、研究の原動力です。超可愛い娘と超面白い息子が私の支えです。これまでずっと支えてくれ、私を見捨てなかった妻には、最大の感謝の気持ちを送ります。

最後に、PFS プロジェクトに大きな貢献をした高遠徳尚教授、Olivier Le Fèvre 教授には、PFS を必ず成功させることを約束し、この場をお借りして心よりご冥福をお祈り申し上げます。

## 参考文献

- [1] Takada, M., & Jain, B., 2004, MNRAS, 348, 897
- [2] Okabe, N., et al., 2010, PASJ, 62, 811

- [3] 須藤靖・高田昌広・相原博昭, 2007, 日本物理学会誌, 62, 83
- [4] 宮崎聡, 2019, 天文月報, 112, 80
- [5] 小宮山裕, 2018, 天文月報, 111, 93
- [6] Kawanomoto, S., et al., 2018, PASJ, 70, 66
- [7] 高田昌広, 2019, 天文月報, 112, 89
- [8] 古澤久徳・高田唯史, 2019, 天文月報, 112, 97
- [9] Bosch, J., et al., 2018, PASJ, 70, S5
- [10] 古澤久徳・高田唯史, 2019b, 天文月報, 112, 105
- [11] Aihara, H., et al., 2018, PASJ, 70, S8
- [12] Kim, J., et al., 2024, arXiv e-prints, arXiv:2407.04606
- [13] Miyatake, H., et al., 2023, Phys. Rev. D, 108, 123517
- [14] Li, X., et al., 2023, Phys. Rev. D, 108, 123518
- [15] Dalal, R., et al., 2023, Phys. Rev. D, 108, 123519
- [16] Hikage, C., et al., 2019, PASJ, 71, 43
- [17] 日影千秋, 2019, 天文月報, 112, 720
- [18] Sugiyama, S., et al., 2023, Phys. Rev. D, 108, 123521
- [19] 杉山素直・高田昌広・宮武広直, 2024, 天文月報, 117, 305
- [20] Tamura, N., et al., 2016, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 9908, 99081M
- [21] Takada, M., et al., 2014, PASJ, 66, R1
- [22] 高橋慶太郎, 2022, 天文月報, 115, 263

## The Road to Subaru Precision Cosmology from My Point of View

Masahiro TAKADA

*Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI), The University of Tokyo Institutes for Advanced Study (UTIAS), The University of Tokyo, Chiba 277-8583, Japan*

Abstract: The Subaru Telescope at the summit of Maunakea is extremely unique among 8-metre class telescopes in the world because of its large aperture, wide field of view and high image quality. The wide-field imaging camera, Hyper Suprime-Cam (HSC), and the wide-field multi-object spectrograph, Prime Focus Spectrograph (PFS) can further enhance the unique wide-field capability of Subaru. In this article, I would like to describe the international HSC and PFS projects from my point of view, the path towards the realisation of precise cosmology with Subaru HSC data, and the prospects for further development with PFS.