

「スピン誘起マルチフェロイクスの発見と開拓」
“Discovery and Exploration of Spin-Induced Multiferroics”

有馬 孝尚、木村 剛

業績要旨

磁性と誘電性はともに物質の基本的な性質である。木村・有馬両氏は 2003 年に、 TbMnO_3 という磁性体において長周期磁気秩序と強誘電状態が共存し、更に磁場を印加して磁気構造を変化させると電気分極の方向がスイッチするという現象を見出した。フェロイクスとは、固体中の原子やイオンのミクロな磁気双極子や電気双極子がマクロなスケールでそろった強磁性状態や強誘電状態などを指す総称であるが、両氏の発見は二つの異なるフェロイクスの間の未知の結合機構を示すものであり、これを契機としてマルチフェロイクスという物性物理学の新しい分野が急速に発展した。その後、有馬氏は放射光 X 線や中性子を用いた精密な結晶構造およびスピン（磁気）構造の解析によって、非共線的スピン構造の一種であるスピンスイクロイド構造が自発的な電気分極を誘起するという理論予測を実証し、また別のマルチフェロイクス物質（ CuFeO_2 ）においては、これと異なるメカニズム（配位子混成とスピン軌道相互作用の相乗効果）を提案するなど、マルチフェロイクスの基礎学理の発展に大きく貢献した。木村氏は、マルチフェロ状態を室温で実現し弱磁場で電気分極の制御が可能な物質を始めとする様々な新奇物質を開拓し、マルチフェロイクスの普遍性と応用への可能性を開拓した。

業績の詳細

磁性と誘電性はともに物質の最も基本的な性質である。多くの物質では磁場をかけることにより電子のスピン分布に偏りが生じて磁化が発生する。また電場をかけることにより金属では電子の流れ（電流）が生じ、絶縁体では電子やイオンの電荷分布に偏りが生じて電気分極が発生する。さらにある種の絶縁体では、1960 年代から電気磁気効果と呼ばれる磁場印加によって電気分極が、また電場印加によって磁化が発生する現象が知られていた。しかしこの効果は非常に微弱であり、大きな研究分野とはならなかった。

今世紀に入ってこの状況は大きく変わった。木村・有馬両氏を含む研究グループは 2003 年に、 TbMnO_3 という絶縁磁性体において磁気構造の変化が強誘電状態を誘起することを発見した [1]。この物質は $T_N=41\text{ K}$ 以下の温度で、 Mn^{3+} イオンの電子スピンが結晶格子と不整合な長周期構造を形成して配列する。また $T_C=27\text{ K}$ を境にスピン構造の変化が示唆されていたところ、図 1 に示すように、ゼロ磁場下において T_C 以下の温度領域で自発的な電気分極が結晶の c 軸方向に発生することが観測された。さらに、結晶の b 軸方向に磁場を印加すると、 c 軸方向の電気分極が抑制され、代わりに a 軸方向の電気分極が成長した。フェロイ

クスとは、固体中の原子やイオンのミクロな磁気双極子や電気双極子がマクロなスケールでそろった強（反強）磁性状態や強（反強）誘電状態などを指す総称である。有馬・木村両氏の発見は二つの異なるフェロイクスの間の未知の結合機構を示すものである。

磁気秩序が誘起する強誘電状態を説明するために、桂一永長-Balatsky は非共線的スピン構造が自発的な分極を誘起する機構を提案した（図2）。TbMnO₃の結晶ではスピンを持つ二つのMnイオンが酸素を介して隣り合っているが、Mn-O-Mnの結合に関わる電子軌道の形状は、相対論的なスピン軌道相互作用のためにスピンの方向に依存する。二つのスピンの方向が異なる非共線的な配置を取る場合、スピン面と二つのMnイオンを結ぶベクトルが垂直でない限り、電子軌道に非対称な偏りが生じて、図2に示すような分極を発現することが理論的に予測された。有馬氏等は、中性子回折実験によってDyをドーブしたTbMnO₃単結晶の

スピン構造を精密に解析した結果、図3に示すように、強誘電転移温度（T_c）以上では全てのMnスピンの方向が同一で、大きさや向きが長周期の変調を示す共線的構造を取るのに対し、T_c以下ではスピンの方向がある面内で回転しながら伝搬する非共線的サイクロイド構造に変化することを見出し、理論予測を実証した [2]。

非共線のスピン構造は、フラストレートしたスピン間相互作用を持つ磁性体において普遍的に見られる構造

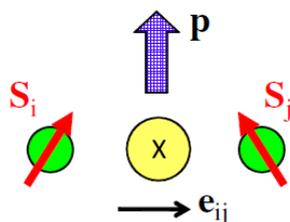


図2. 非共線的磁気構造が分極を誘起する機構。隣り合うスピン S_1 、 S_2 が互いに傾いた（非共線な）配置を取ると、スピン面に平行でかつ二つのスピンを結ぶベクトルに垂直な方向に電気分極 P が発生する。

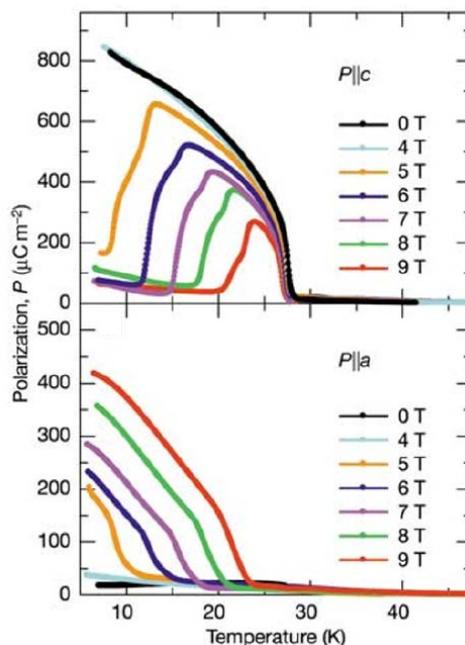


図1. ゼロ磁場およびb軸方向の磁場下におけるTbMnO₃のc軸方向（上）およびa軸方向（下）の電気分極の温度依存性。

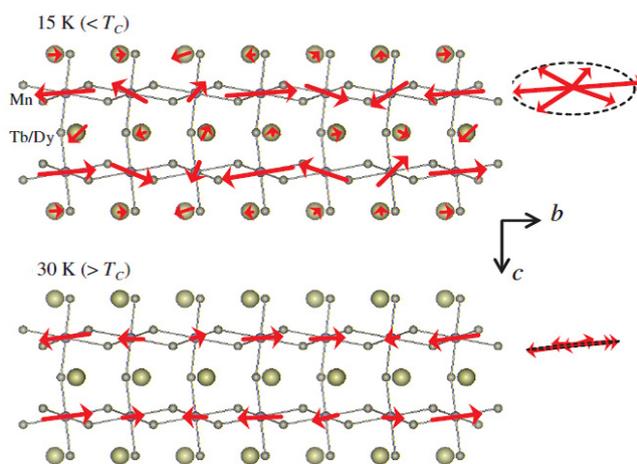


図3. DyをドーブしたTbMnO₃のスピン構造。T_c（強誘電転移温度）以上ではスピンの方向が同一の共線的構造を取るが（下図）、T_c以下では非共線的サイクロイド構造を示す（上図）。

であり、有馬・木村両氏の発見に続いてこの機構によって強誘電性を示す磁性体が次々と見つかった。また磁場によって磁気構造を変えることにより電気分極の方向を制御する、あるいはその逆に電場によって電気分極の方向を変えることにより磁気構造を制御するという応用上も重要な現象が確立し、マルチフェロイクスという物性物理学の新しい分野が急速に発展した。

その後、有馬氏は多くのマルチフェロイクス物質について放射光 X 線や中性子による（磁気）構造解析を進め、同じ非共線構造でもサイクロイドとは異なるスクリュー構造を取る CuFeO_2 に対して、上記とは異なる分極発生機構（配位子混成とスピン軌道相互作用の相乗効果）を提案するなど、マルチフェロイクスの基礎学理の発展に大きく貢献した [3,4]。木村氏は、マルチフェロイック状態を室温で実現し、弱磁場で電気分極の制御が可能なヘキサフェライト型の物質を始めとする様々な新奇物質を開拓し、マルチフェロイクスの普遍性と応用への可能性を開拓した [5-7]。

参考論文

- [1] T. Kimura, T. Goto, H. Shintani, K. Ishizaka, T. Arima, and Y. Tokura, “*Magnetic control of ferroelectric polarization*”, *Nature* **426**, 55 (2003).
- [2] T. Arima, A. Tokunaga, T. Goto, H. Kimura, Y. Noda, and Y. Tokura, “*Collinear to Spiral Spin Transformation without Changing the Modulation Wavelength upon Ferroelectric Transition in $\text{Tb}_{1-x}\text{Dy}_x\text{MnO}_3$* ”, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 097202 (2006).
- [3] K. Taniguchi, N. Abe, T. Takenobu, Y. Iwasa, and T. Arima, “*Ferroelectric Polarization Flop in a Frustrated Magnet MnWO_4 Induced by a Magnetic Field*”, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 097203 (2006).
- [4] T. Arima, “*Ferroelectricity Induced by Proper-Screw Type Magnetic Order*”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **76**, 073702 (2007).
- [5] T. Goto, T. Kimura, G. Lawes, A. P. Ramirez, and Y. Tokura, “*Ferroelectricity and Giant Magnetocapacitance in Perovskite Rare-Earth Manganites*”, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 257201 (2004).
- [6] T. Kimura, J. C. Lashley, and A. P. Ramirez; “*Inversion-symmetry breaking in the noncollinear magnetic phase of the triangular-lattice antiferromagnet CuFeO_2* ”, *Phys. Rev. B* **73**, 220401(R) (2006).
- [7] Y. Kitagawa, Y. Hiraoka, T. Honda, T. Ishikura, H. Nakamura, and T. Kimura, “*Low-field magnetoelectric effect at room temperature*”, *Nat. Mater.* **9**, 797 (2010).

「サブ PeV ガンマ線天文学の創始と銀河宇宙線の起源の解明」

瀧田 正人

業績要旨

瀧田正人氏は、中国チベット（標高 4,300m）に設置された宇宙線の空気シャワー観測装置を改造し高エネルギー宇宙ガンマ線観測を行い、世界で初めてサブ PeV (10^{14} 電子ボルトから 10^{15} 電子ボルト = 100 TeV から 1 PeV) のガンマ線を検出するとともに、PeV 領域宇宙線の起源が銀河系内にあることを解明した。これはサブ PeV ガンマ線天文学の創始につながる業績である。宇宙線は電荷を持っており銀河磁場で曲げられてしまうため、その起源解明の手段として加速された宇宙線が星間物質と衝突した際に放出される高エネルギーガンマ線が注目されてきた。瀧田氏は 65,700 平方メートルの空気シャワー観測装置である「Tibet AS γ 実験」に大面積の水槽からなる水チェレンコフ型のミュオン検出器を設置し、宇宙線起源とガンマ線起源の事象を分離する手法を提案・適用した。そして 2019 年、カニ星雲から史上初めて 100 TeV を超えるガンマ線を 5.6 シグマの有意度で検出したことを皮切りに、他の複数の天体からも 100 TeV を超えるガンマ線を観測した。更に 2021 年、銀河面に沿って、既知の TeV ガンマ線源と離れた場所から多数の 400 TeV 以上のガンマ線が飛来していることを 5.9 シグマの有意度で発見した。これは銀河系内の宇宙線源から放出された宇宙線が銀河面にある星間物質と衝突して生成されるガンマ線であり、理論的な予言とも矛盾しない。これにより、1958 年頃から信じられてきた数 PeV 以下の宇宙線が銀河系内起源であることを世界で初めて実証した。これらの研究成果は、日中国際共同の Tibet AS γ 実験グループとしての成果ではあるが、グループを指揮する瀧田氏はこれらの発見に本質的な役割をしており、その貢献は十分に大きいと判断される。

業績の詳細

宇宙線は 1912 年に発見されて以来、その起源と加速メカニズムの解明を目指して多くの研究がなされてきた。1958 年、エネルギーが数 PeV (10^{15} 電子ボルト) を超えるところで強度が急激に減少していることが発見された。この事実と理論的考察から、数 PeV 以下の宇宙線は銀河系内で生成されていると考えられてきたが、その観測的な証拠はなかった。宇宙線は主として陽子やヘリウム原子核などであるが、電荷を持っており 3 マイクロガウスの銀河磁場で曲げられてしまうため、宇宙線の起源を探るためには銀河磁場中を直進するガンマ線やニュートリノが重要である。瀧田氏の研究では、加速された宇宙線が星間物質と衝突した際に生成される π^0 起源の高エネルギーガンマ線に着目した。そうしたガンマ線は宇宙線の約 1/10 のエネルギーを持つため、PeV 領域の宇宙線を探るためにはサブ PeV (10^{14} 電子ボルトから 10^{15} 電子ボルト = 100 TeV から 1 PeV) のガ

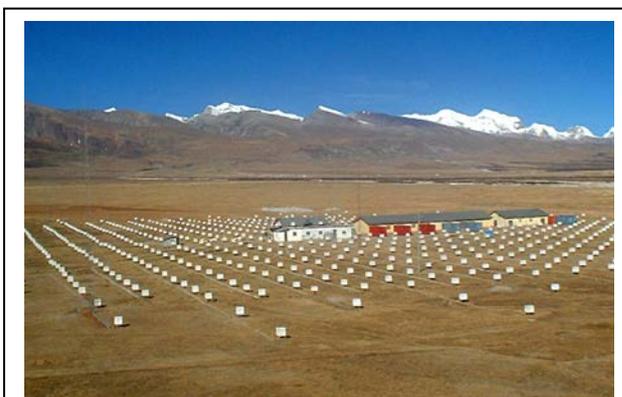


図 1. Tibet AS γ 実験装置の地表検出器
(東京大学宇宙線研究所より)

ンマ線を観測する必要があった。

瀧田氏は中国チベット（標高 4,300m）に設置された 65,700 平方メートルの空気シャワー観測装置を用いた実験（Tibet AS γ 実験）（図 1）を率いてきた。特に、伝統的な宇宙線空気シャワー装置である地表検出器に加え、地下 2.4m の深さに 50cm 直径の光電子増倍管と大面積の水槽からなる水チェレンコフ型のミュオン検出器を設置し、ミュオン数が多い場合は宇宙線起源、ミュオン数が少ない場合はガンマ線起源と分離する手法を瀧田氏が提案した。2007 年には小さな（7.2m \times 7.2m \times 1.5m 深さ）試験用ミュオン検出器を設置し、それが原理的にうまく働くことの確認を行ったうえで、2014 年までに全表面積 3400 平方メートルの本格的な水チェレンコフ型地下ミュオン検出器（図 2 参照）を建設、稼働させて実験を行った。

2017 年までの 719 日分のデータを解析し、ミュオン数の少ない空気シャワーを選ぶことで、100TeV 以上では、ガンマ線を 90%以上の効率で残し、宇宙線を 0.08%まで落とした。その結果、2019 年に世界で初めて 100TeV 以上のガンマ線がかに星雲の方向から飛来していることを 5.6 シグマの有意性で検出した（図 3）（文献[1]）。なお、これらのガンマ線の生成メカニズムについては、この論文では、電子と光子の逆コンプトン散乱として低エネルギー側のデータを外挿したモデルでよく説明できるとしている。

更に 2021 年には、はくちょう座方向の 2 点（TASG J2019 + 368 及び TASG J2032 + 414）から 100TeV を超えるガンマ線を観測し（文献[2]）、また、超新星残骸 G106.3+2.7 からも 100TeV を

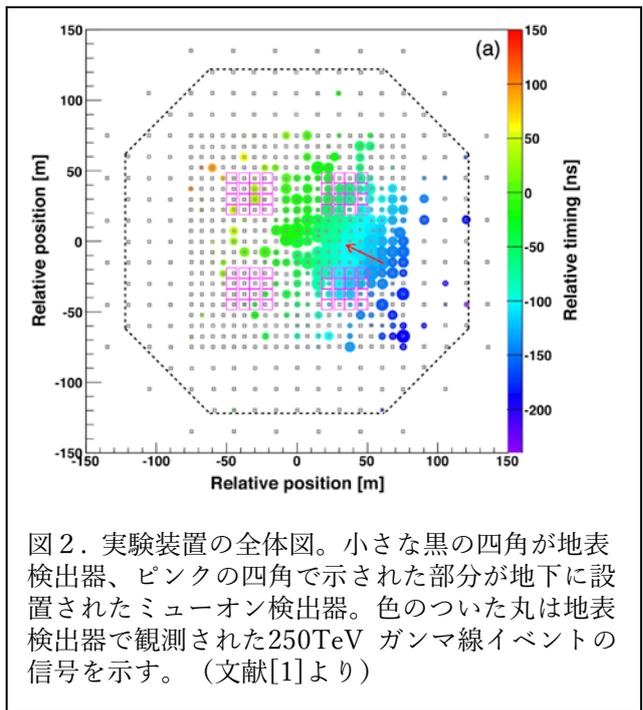


図 2. 実験装置の全体図。小さな黒の四角が地表検出器、ピンクの四角で示された部分が地下に設置されたミュオン検出器。色のついた丸は地表検出器で観測された 250TeV ガンマ線イベントの信号を示す。（文献[1]より）

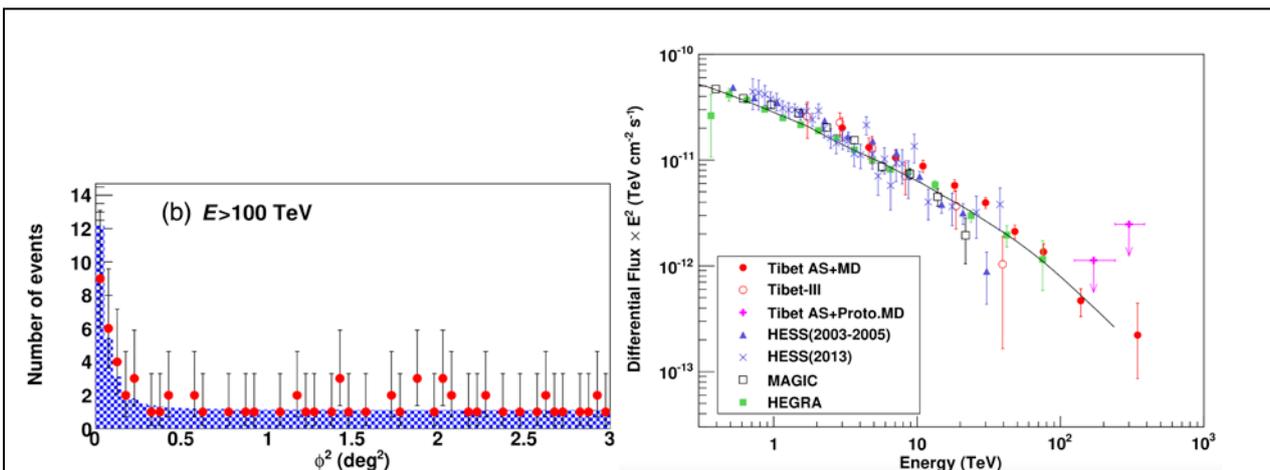
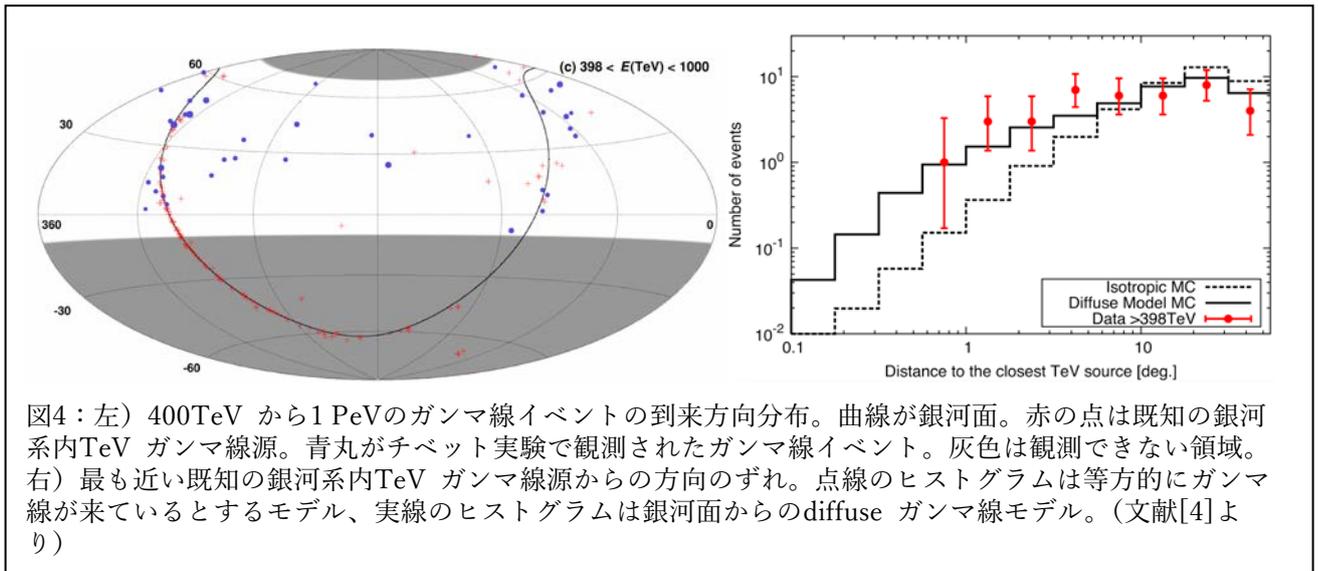


図 3：左）Tibet AS γ 実験で観測された 100TeV 以上のガンマ線候補イベントの到来方向とかに星雲の方向との相関。右）かに星雲の方向からのガンマ線のエネルギースペクトル。初めて 100TeV を超えるエネルギーのガンマ線が観測された。（文献[1]より）



超えるガンマ線を観測した(文献[3])。この際、後者について、ガンマ線がパルサーからではなく周辺の分子雲から来ていることを示し、他波長観測データやエネルギー収支の整合性等の観点から電子起源ではなく、宇宙線が分子雲と衝突して π^0 を生成したガンマ線の可能性が高い、すなわち PeV まで加速される銀河宇宙線の起源天体候補の1つとなりうることを初めて示した。

2021年春に、地下のミューオン装置を用いて厳しいカットを採用し、400TeVのイベントについて、ガンマ線の検出効率を約30%まで落とすことと引き換えに、通常の宇宙線を100万分の1の非常に低いレベルまで落とした。残ったガンマ線候補のデータを調べたところ銀河面に沿って、400TeV以上のガンマ線が来ていることを5.9シグマの有意性で発見した。そして更に重要なことには、これらのガンマ線の到来方向は既知のTeVガンマ線源と離れた方向からであった(図4)。PeVのエネルギーを持った電子は加速源の近くでシンクロトン放射等によりすぐにエネルギーを失ってしまうため、既知のTeVガンマ線源から離れたところから来ているガンマ線は銀河面内の宇宙線源から放出された宇宙線が銀河面にある星間物質と衝突して生成される π^0 起源のガンマ線と考えられ、1958年頃から言われていたPeVエネルギー領域以下の宇宙線の加速源が銀河系内に存在する決定的な観測的証拠を世界で初めてとらえたものである(文献[4])。

参考文献リスト

- [1] M. Amenomori et al. (Tibet AS γ collaboration), "First Detection of Photons with Energy beyond 100 TeV from an Astrophysical Source", Phys. Rev. Lett. 123, 051101 (2019).
- [2] M. Amenomori et al. (Tibet AS γ collaboration), "Gamma-Ray Observation of the Cygnus Region in the 100-TeV Energy Region", Phys. Rev. Lett. 127, 031102 (2021).
- [3] Tibet AS γ collaboration, "Potential PeVatron supernova remnant G106.3+2.7 seen in the highest-energy gamma rays", Nature Astronomy 5, 460 (2021).
- [4] M. Amenomori et al. (Tibet AS γ collaboration), "First Detection of sub-PeV Diffuse Gamma Rays from the Galactic Disk: Evidence for Ubiquitous Galactic Cosmic Rays beyond PeV Energies", Phys. Rev. Lett. 126, 141101 (2021).

2021 年度仁科記念賞業績要旨

「すばる望遠鏡広視野カメラの開発による観測的宇宙論の展開」

“Observational Cosmology through the Development of
Wide Field Cameras for Subaru Telescope”

宮崎 聡

業績要旨

銀河分布に見られる大規模構造の形成と進化の観測は、ダークマターとダークエネルギーの解明につながる観測的宇宙論の重要なテーマである。宮崎聡氏は、多くの観測成果を産み出したすばる望遠鏡広視野カメラ Suprime-Cam 開発の中核メンバーとしてその完成に貢献した。この実績に基づき、7 倍の超広視野をもつ Hyper Suprime-Cam (HSC)の製作に取り組み、2013 年に完成させた。これは世界に類を見ない広域天体探査機能を備えたカメラである。

宮崎氏は、2014 年から国際共同研究チームによるレガシープロジェクトの代表者として、いくつかの天域を多色フィルターで 330 夜かけて HSC で撮像し、測光学的赤方偏移推定を併用して、銀河分布の 3 次元地図データベースをつくり、観測的宇宙論のさまざまな研究に提供した。2018 年には多岐にわたる研究成果を 40 編の初期成果論文として発表した。

さらに宮崎氏らは、背景の遠方銀河の形状に見られる「弱い重力レンズ効果」の系統的ゆがみの測定から、ダークマター分布のピークが実際に暗い銀河団に対応することを確認し、ダークマターの探査法を確立した。また、その 3 次元空間分布の数十億年間の時間進化からダークマターの合体集合の様子も明らかにした。さらに、赤方偏移 1 程度までの多数の銀河の分布から求めた膨張宇宙モデルの定数が、赤方偏移 1000 の時代の宇宙背景放射の分析から得られた値とずれている可能性があることも指摘した。

これらはいずれも共同研究としての成果であるが、宮崎氏が一連の技術開発を主導し完成させた HSC によって得られた大規模データの賜物である。HSC を用いた研究は国際的にも高い評価を受けており、宮崎氏の観測的宇宙論研究の発展への貢献は極めて大きい。

業績の詳細

ダークマター（暗黒物質）とダークエネルギー（暗黒エネルギー）は 21 世紀の物理学・宇宙論に突き付けられた大きな謎となっており、大規模な宇宙探査からその分布や時間変化を調べることがその解明への手掛かりを与えると期待されている。

1990 年代に、宮崎氏は大型 CCD 素子の開発を、マサチューセッツ工科大学のリンカーン研究所 (MIT/LL) と共同で開始した。遠宇宙の観測では赤方偏移のため近赤外域の感度が高いことが重要な利点となる。宮崎氏らは波長 950nm で従来の CCD の 4 倍の感度を有し、長方形素子の 3 方向ではその縁まで撮影に使用、ほとんど隙間なく隣接配置することが可能な背面照射型大型 CCD 素子を開発することに成功し、この CCD 素子 10 個を敷き詰めた広視野カメラ (Suprime-Cam) を、すばる望遠鏡のファーストライトに合わせて 2000 年に完成させた。このカメラは世界中で他の追随を許さぬ観測装置 [文献 1] となり、初期宇宙の銀河探査や宇宙再電離期の特定などで大きな成果を挙げた。この開発業績で同氏は 2007 年に日本天文学会欧文報告論文賞を受賞した。

宮崎氏は Suprime-Cam 完成の実績を基に、その 7 倍の視野を持つ野心的な Hyper Suprime-Cam (HSC) の開発構想を打ち出し、これを 2013 年に完成させた [論文 2]。HSC の製作は、1) 空乏層の厚みを格段に増すことで波長 1 ミクロンの感度をさらに 2 倍にした CCD の開発、2) 広画角にわたり解像度の高い結像を実現する補正レンズ系と大気分散補正機構の開発、3) すばる望遠鏡に搭載可能な軽量セラミックス鏡筒の開発、など宮崎氏の主導により実現した (図 1)。



図 1. すばる望遠鏡の主焦点に搭載された超広視野カメラ HSC

2001 年に打ち上げられた宇宙背景放射観測衛星 WMAP は、標準的宇宙進化モデルとみなされている Λ CDM モデルの妥当性を検証した。だが、そのモデルから予想される銀河団数は、X 線で同定された銀河団

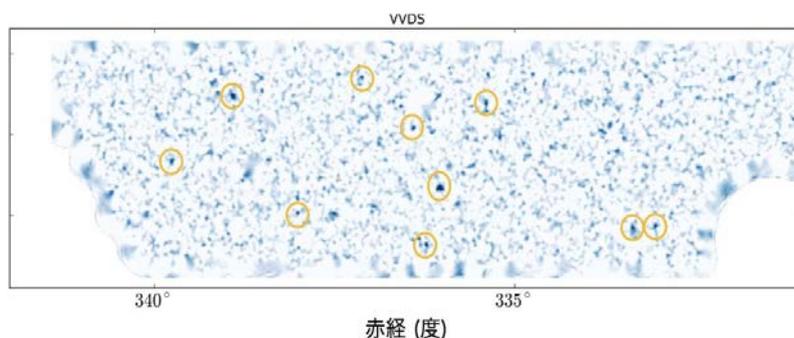


図 2. 弱重力レンズ効果により求めた暗黒物質分布 (青色) と同定された銀河団 (黄色○)

数よりも遙かに多いという矛盾があった。宮崎氏は銀河団の暗黒物質の重力場が引き起こす「弱い重力レンズ効果」を系統的に測定して、暗い銀河団を探す計画を提唱し、Suprime-Cam の高画質画像データから暗黒物質の分布同定を世界で初めて行った[論文 3] (図 2)。第二世代のカメラ Hyper Suprime-Cam (HSC)を用いた最新の研究では、検出した暗黒物質ハローの 95%が実際に暗い銀河団に対応することが確認されている。しかし、それでも銀河団数は理論的な予想数より少なく、標準的宇宙進化モデルに見直しが必要となる可能性があるとして注目されている。

2014 年から、宮崎氏は暗黒物質や暗黒エネルギーの観測的解明を期し HSC を用いた延べ 330 夜にわたる遠宇宙の戦略的な観測計画を、国立天文台、カブリ数物連携宇宙研究機構、プリンストン大学などの国際共同観測事業の代表者として提案し、実行している。2022 年までの観測が計画されているが、最初の 90 夜分のデータからすでに、40 本の成果論文が日本天文学会欧文報告 PASJ の HSC 特集号として 2018 年 1 月に出版されている。

前述の弱い重力レンズ効果を利用した暗黒物質ハローの同定の研究に加えて、宮崎氏のグループは弱い重力レンズ効果から暗黒物質ハローのより大規模な三次元空間分布を数十億年にわたり時代ごとに明らかにした。その結果、暗黒物質ハローが宇宙時間の経過とともに合体して集団化した様子を浮き彫りになった[論文 4] (図 3)。

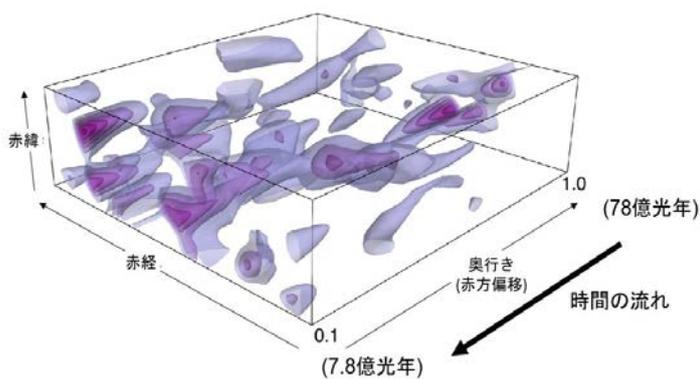


図 3. 弱い重力レンズ効果から求めた暗黒物質の分布には合体する時間進化の様子が見てと

さらに宮崎氏のグループは赤方偏移 1 程度までの宇宙で HSC のデータに見られる弱い重力レンズ効果のパワースペクトルの解析から宇宙進化モデルの定数を求めることに初めて成功した。その結果は、赤方偏移 1000 の時代の宇宙背景放射の分析から得られた標準宇宙モデル(Λ CDM)の定数と有意なズレが存在する可能性を示唆しており (図 4)、この研究[論文 5]も大きな注目を集めている。

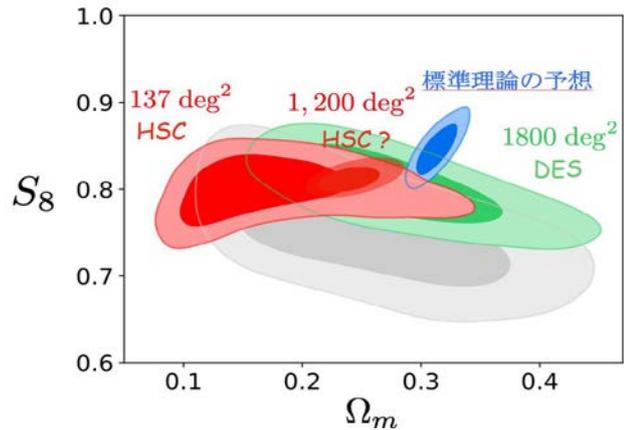


図 4. 宇宙モデル定数 Ω_m と S_8 。HSC (赤)と標準理論 (青) の値にずれがある。

これらどの研究も共同研究成果であるが、宮崎氏による HSC 画像の系統誤差を最小にする綿密な工夫により、世界最高画質で最大感度の大量データが得られたことによるものであり、宮崎氏の貢献無くしては得られなかった成果である。宮崎氏はモザイク CCD カメラの製作を主導しただけでなく、自らさまざまなデータ較正の解析を行い、高品質の画像データを公開して、世界中の天文学者に、すばる望遠鏡によるサイエンスの機会を提供した。これにより、日本の多くの若手研究者が欧米では入手できない画像データを得て、様々な科学的成果を産み出している。ダークマターやダークエネルギーの解明に迫る戦略的観測計画を率いて、欧米に先駆けて日本の宇宙物理学・天文学の発展を牽引した功績は極めて大きい。

参考文献

- [1] “Subaru Prime Focus Camera – Suprime-Cam”, Miyazaki, S. et al. 2002a, PASJ, 54, 833
- [2] “Hyper Suprime-Cam: System design and verification of image quality”, Miyazaki, S. et al. 2018a, PASJ, 70, 1
- [3] “A large sample of shear-selected clusters from the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program S16A Wide field mass maps”, Miyazaki, S. et al. 2018b, PASJ, 70, 27
- [4] “Two-and three-dimensional wide-field weak lensing mass maps from the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program S16A data”, Oguri, M., Miyazaki, S., Hikage, C. et al., 2018, PASJ, 70, 26.
- [5] “Cosmology from cosmic shear power spectra with Subaru Hyper Suprime-Cam first-year data”, Hikage, C., Oguri, M., Hamana, T. et al. 2019, PASJ, 71, 43,