

## 令和4年度(第68回)仁科記念賞 受賞者

令和4年10月27日に開催された第40回理事会において、本年度の仁科記念賞を以下の2件、2氏に授与することを決定いたしました。

### 1) 齊藤英治 Eiji Saitoh

東京大学大学院工学系研究科 教授



業績題目:

「スピン流物理学の開拓」

“Pioneering contribution to the physics of spin current”

### 2) 小松英一郎 Eiichiro Komatsu

Max Planck Institute for Astrophysics, Director



業績題目:

「宇宙背景放射を用いた標準宇宙論への貢献」

“Contribution to the standard cosmology based on cosmic microwave background”

業績の要旨と詳細は次ページ以降にあります。

齊藤 英治 東京大学大学院工学研究科・教授

## スピントロニクス物理学の開拓

### Pioneering contribution to the physics of spin current

スピントロニクスの分野では、固体素子中の伝導電子により運ばれるスピン角運動量を積極的に利用して新しい機能を引き出す取り組みが行われ、2000年代初頭からスピントロニクスという概念が注目を集めるようになっていた。

齊藤氏は、2006年にスピントロニクスの直接的な検出方法となる逆スピントロニクス効果を発見し、同分野に大きな影響を与えると同時に、その後のスピントロニクス物理学の発展の礎を築いた。物質中のスピン軌道相互作用を利用してスピントロニクスをそれと垂直な方向の電荷の流れに変換し、電気信号としての検出を可能にするこの効果は、スピントロニクスの詳細な測定を初めて可能にし、その研究の急速な発展に貢献した。さらに齊藤氏はそれを応用して、スピントロニクス効果をはじめとしたスピントロニクスに関わる多彩な物理現象を明らかにすると同時に、スピントロニクスの概念を伝導電子スピントロニクスから角運動量の流れへと一般化し、それが絶縁体中のスピントロニクス励起によっても効率的に運ばれ新しい効果をもたらすことを示すなど、物性科学の新たな領域を切り拓いてきた。以上のことから、齊藤氏の業績は、従来のスピントロニクスの概念を超えた、より広範なスピントロニクス物理学の展開を導いたものといえる。

電子の持つ電荷とその流れである電流は、エレクトロニクス分野で常に主要な物理量として扱われてきた。一方で、電子の持つもう一つの基本的な物理量である角運動量すなわちスピンは、配向により磁化をもたらす、磁性体の物理および磁気工学において重要な役割を担ってきた。この電子のスピンを利用・制御して新しい物理現象や機能を求める研究として生まれてきたのがスピントロニクス分野である。中でも電流に代わるものとしてスピン流が注目されている。

通常、伝導電子のスピンは半々の割合で上向きか下向きの状態にあり、その流れに伴うスピンの移動は平均化されて零となる。しかし、磁性体中でスピン偏極した電子の流れや、物質中のスピン軌道相互作用により電子がスピンの向きに依存して電流方向に垂直な力を受ける「スピンホール効果」によって、上向きスピンと下向きスピンの流れのバランスが崩れ、それらの差分として「スピン流」が生じる。しかしながら当初は、スピン流を外部に取り出して直接的に計測する方法が見つからず、実験ではスピン流により試料端に生じる「スピン蓄積」の観測などを通じた間接的な評価に留まっていた。

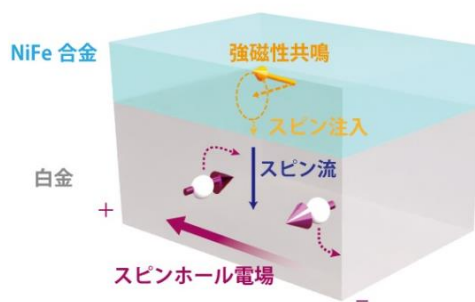


図 1. 逆スピンホール効果の模式図

スピン流の直接的な計測手法が強く求められていたところ、齊藤氏は2006年に「逆スピンホール効果」を発見した(図1) [1]。強磁性合金パーマロイ( $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ )と白金(Pt)の2層膜において、強磁性共鳴を用いてパーマロイ層にスピン励起を生成し、界面を通じてプローブとしてのPt層に注入すると、Pt中での強いスピン軌道相互作用によりスピン流が電

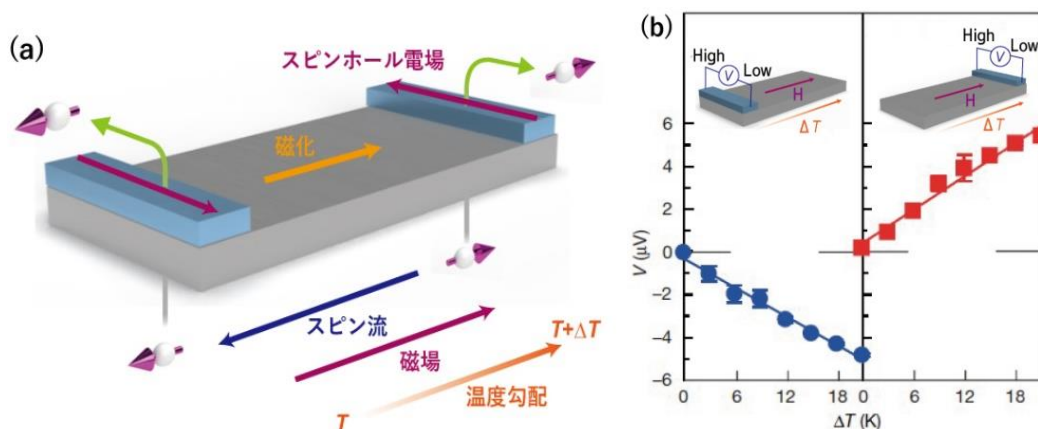


図 2. (a) スピンゼーベック効果の模式図。(b) 実験結果。試料両端の温度差に比例した電圧が発生している。電圧の符号は低温側と高温側で逆になっている。

(a) 伝導電子スピン流

(b) スピン波スピン流

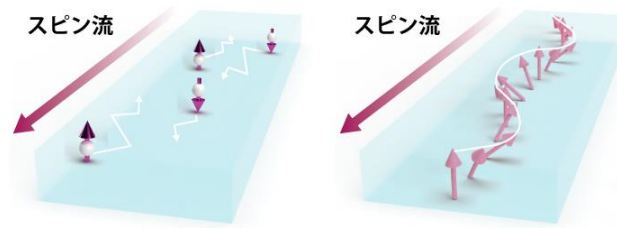


図 3. (a) 金属中を伝導電子によって運ばれるスピン流。(b) 絶縁体中をスピン波によって運ばれるスピン流。

流に変換され、磁場と直交する方向の両端に電圧信号が検出された。これにより初めてスピン流を直接的に測定することが可能になり、この成果がその後の関連研究の飛躍的な発展をもたらした。

齊藤氏らはその後、上記のスピン流検出手法を用いて、スピン流の関わる多様な物理現象を見出してきた。その中の主要な成果である「スピンゼーベック効果」では、磁性体に印加された温度勾配によりスピン流が生成され、それを Pt などのプローブ電極に注入することにより、逆スピンホール効果を利用して電圧を得る (図 2) [2]。通常ゼーベック効果に基づく熱電効果素子では、熱勾配のもとで 2 つの異なる導電体を並列に組み合わせ、それぞれにおける伝導キャリアの状態密度や散乱過程の違いによって電圧を取り出しているところを、単一磁性体中の電子の 2 つのスピン状態における振舞いの違いで置き換えるという巧みなアイデアであった。

齊藤氏らは続いて、スピン流の物理を導電体から絶縁体へと展開した。固体中の角運動量の流れとしてのスピン流が、伝導電子のみならず、絶縁体中のスピン素励起によっても運ばれることを示し、スピントロニクス概念を大きく拡張した。イットリウム鉄ガーネット (YIG) に代表されるような強磁性絶縁体酸化物では、秩序化した局在電子スピンの集団励起モードであるスピン波あるいはその素励起としてのマグノンが、伝導電子による散乱を受けることなく長距離を伝搬する (図 3)。齊藤氏らは 2010 年の論文で、Pt 電極中のスピンホール効果を用いて YIG 薄膜にスピン流を注入し、別の Pt 電極中の逆スピンホール効果を用いてスピン流の伝搬を観測したことを報告した[3]。この結果は同時に、金属電極中の伝導電子と絶縁体中のスピン素励起の間で、界面における交換相互作用を通じて角運動量が転送されるということも明らかにした。また齊藤氏らは、YIG 関連酸化物を用いたスピンゼーベック効果も観測し[4]、絶縁体材料を用いた熱電デバイス研究の先鞭をつけた。その後も、強磁性体中のマグノンだけでなく、反強磁性体中のマグノン、量子スピン液体中のスピノン[5]、核スピン波モードのマグノン[6]、マグノンとフォノンが結合した磁気ポーラロンなど、固体中の様々な素励起がスピン流を運ぶことを実験的に明らかにし、物性研究のプローブとしてのスピン流の幅広い可能性を示している。

## 主要論文

- [1] E. Saitoh, M. Ueda, H. Miyajima, and G. Tatara, "Conversion of spin current into charge current at room temperature: inverse spin-Hall effect", *Applied Physics Letters* **88**, 182509 (2006).
- [2] K. Uchida, S. Takahashi, K. Harii, J. Ieda, W. Koshibae, K. Ando, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Observation of the spin Seebeck effect", *Nature* **455**, 778 (2008).
- [3] Y. Kajiwara, K. Harii, S. Takahashi, J. Ohe, K. Uchida, M. Mizuguchi, H. Umezawa, H. Kawai, K. Ando, K. Takanashi, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator", *Nature* **464**, 262 (2010).
- [4] K. Uchida, J. Xiao, H. Adachi, J. Ohe, S. Takahashi, J. Ieda, T. Ota, Y. Kajiwara, H. Umezawa, H. Kawai, G. E. W. Bauer, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Spin Seebeck insulator", *Nature Materials* **9**, 894 (2010).
- [5] D. Hirobe, M. Sato, T. Kawamata, Y. Shiomi, K. Uchida, R. Iguchi, Y. Koike, S. Maekawa, and E. Saitoh, "One-dimensional spinon spin currents", *Nature Physics* **13**, 30 (2017).
- [6] Y. Shiomi, J. Lustikova, S. Watanabe, D. Hirobe, S. Takahashi, and E. Saitoh, "Spin pumping from nuclear spin waves", *Nature Physics* **15**, 22 (2019).

小松 英一郎 Max Planck Institute for Astrophysics, Director

## 宇宙背景放射を用いた標準宇宙論への貢献

### Contribution to the standard cosmology based on cosmic microwave background

初期宇宙のインフレーション的膨張は、宇宙の大域的・等方性をみごとに説明するが、それを標準宇宙論の主要な要素と見なすには、宇宙空間の平坦性、ほぼスケール不変でガウス分布に従う断熱曲率揺らぎの生成、などの予言の定量的検証が重要である。

小松氏は、プリンストン大学の Spergel 教授との共同研究を通じて、揺らぎの統計性に注目し、非線形パラメーターという量を導入してガウス分布からのズレを三点相関関数によって定量的に評価する方法論を着想した。それを宇宙マイクロ波背景放射探査衛星 COBE (Cosmic Background Explorer) の観測データに実際に適用し有効性を検証するとともに、同 WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) の初年度観測データの解析に用いた。その結果、非線形パラメーターは有意な有限値を持たず、曲率揺らぎはガウス分布と無矛盾であることを世界で初めて定量的に検証した。また、同時に揺らぎのスペクトルの詳細解析も行い、断熱曲率揺らぎのスペクトルを測定し、標準的なインフレーション宇宙論の予言を検証した。その後の WMAP のデータの解析グループにおいて、小松氏は中心的な役割を果たし、曲率揺らぎのスペクトルのスケール不変性からの僅かなズレを  $5\sigma$  の有意度で検出してインフレーションモデルの選定に資するとともに、平坦な空間のもとでバリオン 5%、コールドダークマター 3 割弱、ダークエネルギー 7 割弱という物質組成を持つ  $\Lambda$ CDM モデルを標準宇宙論と見なす考えに貢献した。

古典ビッグバン宇宙論では説明のできない宇宙の大域的・等方性を説明する理論として、初期宇宙の元素合成よりずっと前に宇宙が指数関数的加速膨張を経験したとするインフレーション宇宙論は、非常に魅力的な考え方である。しかし、インフレーション宇宙論が正しいことを示すためには、こうした定性的観測事実を説明するだけでなく、その予言を定量的に検証することが重要である。そのような予言としては、宇宙が空間的に平坦であること、量子ゆらぎを起源とするほぼスケール不変なスペクトルを持ち、ほぼガウス統計に従う断熱曲率揺らぎとテンソルゆらぎ(量子的重力波)が生成されること、などが挙げられる。

小松氏は、東北大学の大学院生時代より宇宙マイクロ波背景放射を用いた観測的宇宙論を志し、プリンストン大学の Spergel 教授の門戸を叩いた。そして同教授と共に揺らぎの統計性に注目し、ガウス分布からのズレを宇宙マイクロ波背景放射を用いて定量的に評価する方法論を開発した。ガウス分布は振幅と分散だけで特徴付けられる一方、非ガウス分布は無限の可能性があるため、ガウス分布からのズレを定量的に評価するのは困難である。彼らは非線形パラメータ  $f_{NL}$  というたった一個のパラメータにそのズレを押し込め、それを宇宙マイクロ波背景放射の観測によって制限することを提唱したのである[1]。なお、 $f_{NL}$  は非ガウス性パラメータとも呼ばれる。小松氏はそれを宇宙マイクロ波背景放射の3点相関(バイスペクトル)の観測データによって測定する方法論を確立し、宇宙マイクロ波背景放射探査機 COBE (COsmic Background Explorer)の観測データに適用した[2]。

そして当時進行中であった宇宙マイクロ波背景放射探査機 WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)のデータ解析チームに参画し、初年度観測データに応用し、非線形パラメータは有意な有限値を持たず、曲率揺らぎはガウス分布と無矛盾であることを世界で初めて定量的に検証した[3]。また、同時に揺らぎのスペクトルの詳細解析も行い、標準的なインフレーション宇宙論の予言通り、ほぼスケール不変な断熱曲率揺らぎが存在することを突き止めた。

その後、WMAP は宇宙の空間曲率が測定限界以下であることを示し、宇宙空間がインフレーション宇宙論の予言通り平坦であることを検証した。さらに光速よりずっと小さな速度で運動する冷たい暗黒物質(コールドダークマター)と宇宙膨張を加速する原因となる暗黒エネルギー(ダークエネルギー)の存在量を誤差の評価を含めて測定し、現在の宇宙がバリオン約5%、コールドダークマター約22%、ダークエネルギー約73%という配合比を持つことを明らかにするとともに、宇宙膨張率を表すハッブルパラメータの値も精密に測定し、宇宙が

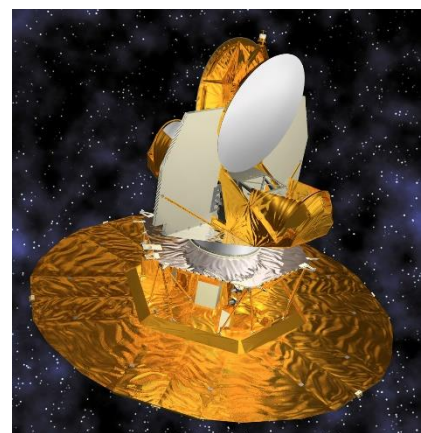


図1 宇宙マイクロ波背景放射探査機 WMAP (写真提供: NASA/WMAP Science Team)



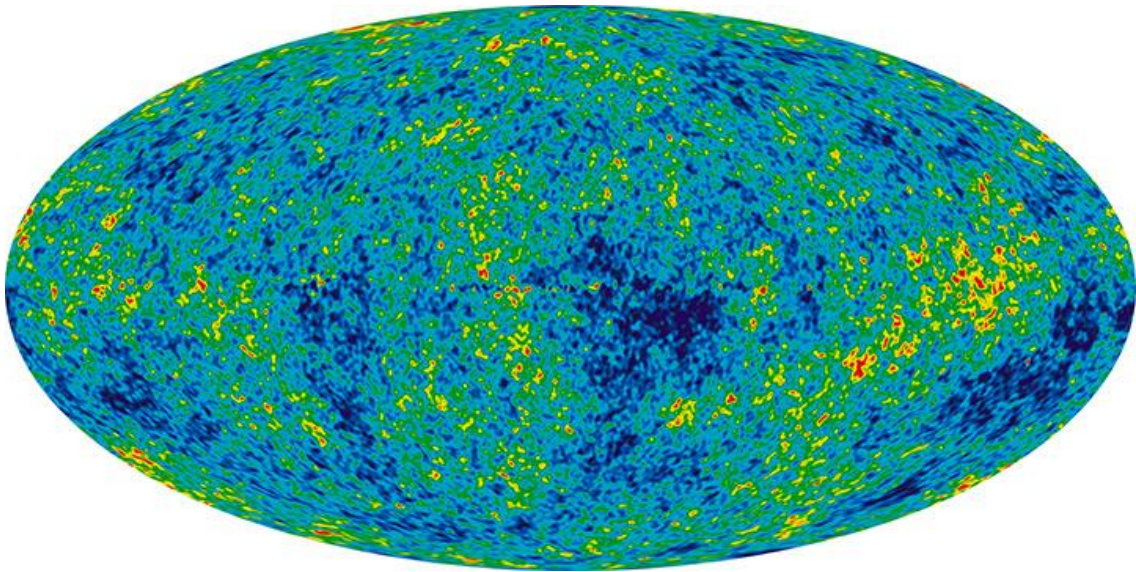


図2 WMAP の描いた宇宙マイクロ波背景放射の全天地図 (写真提供: NASA/WMAP Science Team)

137 億年の年齢を持つことを初めて明らかにした (なお、これらの値は新しい宇宙探査機 Planck の解析によって若干変更されている)。この結果は 20 世紀終盤にさまざまな観測事実を包括して得られた宇宙項入りコールドダークマターモデルの正当性を確認した。WMAP はその後データの集積とともに隔年ごとに新たな結果を発表していったが、小松氏は 3 年目論文で初年度の担当分野に加え、偏光の解析も担当し、5 年目からは全解析を統括する責任者となった。

測定される各宇宙論的パラメータの精度は徐々に向上し、とくに曲率ゆらぎのスペクトルのスケール不変性からのズレを表すスペクトル指数  $n_s$  について、有意な値が測定されるようになった。ゆらぎの波長を  $\lambda$  とすると曲率ゆらぎの振幅の 2 乗は  $\lambda^{1-n_s}$  に比例し、 $n_s = 1$  の場合がスケール不変な場合に相当する。理論的には、標準的な単一場スローロールインフレーションモデルはスペクトル指数が 1 よりわずかに小さいことを予言し、その値はモデルを特定する大きな手がかりとなる。スペクトル指数が 1 からずれていることの兆候は、WMAP の 5 年目のデータから見え始め、7 年目のデータでは 99.5% の統計的信頼度で  $n_s = 1$  を棄却した[4]。さらに 9 年目のデータ解析では、WMAP と他の実験のデータを同時解析することで  $n_s = 0.9608 \pm 0.0080$  (誤差は 68% の信頼領域) を得、5 シグマの統計的信頼度でスペクトル指数が 1 より小さいことを確立した。また曲率ゆらぎの統計分布に関する非線形パラメータについても最終的に  $f_{NL} = 37 \pm 40$  というガウス分布と無矛盾な結果を得、標準的なインフレーションモデルの予言を検証した[5]。

以上のように、WMAP は、ほぼスケール不変でガウス分布に従う曲率ゆらぎを初期条件とし、コールドダークマターとダークエネルギーで満たされた宇宙で構造形成が起こった、というインフレーション宇宙論の正しさを示すのに大きく貢献した。小松氏はそのデータ



解析の面で主導的な役割を果たした。

[参考文献]

- [1] E. Komatsu and D. N. Spergel “Acoustic signatures in the primary microwave background bispectrum”, *Physical Review D* **63**, 063002 (2001).
- [2] E. Komatsu, B. D. Wandelt, D. N. Spergel, A. J. Banday and K. M. Górski “Measurement of the cosmic microwave background bispectrum on the COBE DMR sky maps”, *Astrophysical Journal* **566**, 19 (2002).
- [3] E. Komatsu, et al. “First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Tests of Gaussianity”, *Astrophysical Journal Supplement Series* **148**, 119 (2003).
- [4] E. Komatsu, et al. “Seven Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological interpretation”, *Astrophysical Journal Supplement Series* **192**, 18 (2011).
- [5] C.L. Bennett et al., “Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Final Maps and Results,” *Astrophysical Journal Supplement Series* **208**, 20 (2013).