

研究課題名	強相関量子科学
中心研究者名	十倉 好紀
研究支援担当機関名	独立行政法人理化学研究所

## ＜研究課題からの報告＞

### 1. 研究課題の目的及び意義

20 世紀後半の科学技術革命（半導体、レーザー、計算機、液晶など）の背景には、常に時代を先取りする新鮮な物理概念がある。特に、エレクトロニクスの進展には、独立粒子の近似が可能となる固体電子バンド理論が果たした役割が大きい。20 世紀の終盤には、これらの延長上では律しきれない物理概念—強相関電子（固体中で強く相互作用する多電子系）—が登場し、創発性に満ちた新現象・新機能（高温超伝導、巨大磁気抵抗、マルチフェロイクス、量子スピンホール効果など）を創出しつつある。これらは、将来の持続可能社会の形成に不可欠な、省エネルギー・創エネルギー科学技術にも新原理（超室温超伝導、巨大熱電効果、非散逸性スピン流エレクトロニクスなど）に基づく革新（飛躍）をもたらす可能性が高い。

このため、本研究課題では、強相関電子のもつ多自由度の絡み合いと、「波動」の持つ非局所性・剛性・敏感性を、よくデザインされた「電子の感じる時空構造」の中で巧みに生かすことによって、省エネルギー・創エネルギー・送エネルギーに関係した夢の極限的機能、すなわち、超低消費電力エレクトロニクス、超低損失エネルギー輸送、超高効率エネルギー変換等の実現への道程を学術的に明らかにすること、また、固体中の強相関量子の概念を深化し革新的な量子機能原理を提案すること、さらに、強相関量子が生み出す創発特性を体系づけるとともに、これらを未来のエネルギー技術・環境技術の革新のための淵源とすることを目的として研究開発を実施した。

研究課題全体としては、「モットロニクス基礎」、「強相関創発物性」、「エネルギー非散逸性電子技術原理」という 3 つのサブテーマを構成し、具体的な研究目標として、以下を設定した。（図 1）

#### ①モットロニクス基礎

光・電場制御モット転移、強相関光発電、電界誘起超伝導を到達目標として、強相関電子系の金属—絶縁体相転移（モ



図 1. 本研究課題の研究期間内の目標 (A~C) とその後の極限機能実現に至る工程表。

ット転移)を高速の状態変数スイッチとして活用する電子技術学理を構築する。

## ②強相関創発物性

新原理熱電材料、巨大電気磁気効果、電荷・軌動秩序の動的機能を到達目標として、強相関電子の多自由度(電荷、スピン、軌道)による創発性によって、電気-熱-光の作用と応答の相関を巨大化するための物質学理を構築する。

## ③エネルギー非散逸性電子技術原理

トポロジカル電流機能、量子多重秩序の完全解析、超構造超伝導を到達目標として、散逸を伴わないトポロジカルカレント(スピン流、分極流)に基づく量子状態操作の原理を構築する。

## 2. 研究成果の概要

最終的に3つのサブテーマの成果を融合し、出口を見据えた5つの技術課題「スキルミオニクス」「モットロニクス」「トポロジカリエレクトロニクス」「マルチフェロイクス」「エネルギー変換」という個別の成果を得た。主な研究成果は以下のとおりである。

### ・「スキルミオニクス」に関する成果

スキルミオン(ナノスケールのサイズを持ち、トポロジカルに安定で、かつ超低電流密度で駆動できるスピン構造)の特性を生かし、次世代磁気メモリを含む「超低消費電力エレクトロニクス」の重要な一分野として「スキルミオニクス」の学理を発展させた。磁性体(Fe,Co)Siの薄膜におけるローレンツ電子顕微鏡を用いた磁場下でのスキルミオン結晶、スキルミオン気体の実空間観測、FeGeにおける室温付近でのスキルミオン結晶観測、スキルミオンによるトポロジカルホール効果の理論と実験的観測、絶縁体のスキルミオン結晶と電気磁気効果の発見など、基礎科学の成果に加え、メモリ素子の実現に向けたスキルミオンの外場駆動の研究を行った。スキルミオンの超低電流密度での駆動を理論的に明らかにし(図2)、ナノデバイスのような微小領域中では、バルク試料中と大きく異なった挙動を示すこと、また電流印加によってスキルミオン

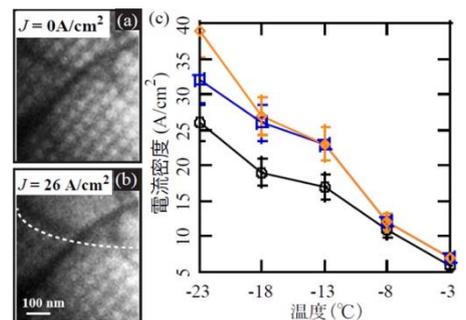
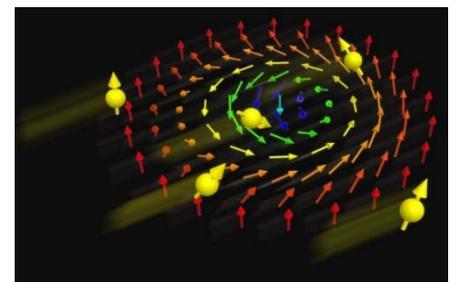


図2. スキルミオンの微小電流駆動

が生成されることを示した。物質開発では、(Mn,Fe)Geにおいて、スキルミオンのサイズや巻き方がMnとFeの組成比に応じて変化することを電子顕微鏡によって明らかにし、デバイスに向けてホール素子の作製にも成功した。

・「モットロニクス」に関する成果

電子同士が反発して動けない状態（絶縁相）と辛うじて動ける状態（金属相）を、わずかな刺激で高速にスイッチする現象を機能化する研究を通して、従来の半導体では不可能なデバイスを構築し「超低消費電力エレクトロニクス」及び「超低損失エネルギー輸送」に資する基礎研究を行った。金属絶縁体転移のナノスケール評価を通じて、強相関酸化物では対称性の高い結晶軸に沿った金属フィラメントの生成を、強相関有機結晶では電荷がクラスター状に局在してガラス転移を示すことを初めて見出し、スイッチングデバイスの新機構を提案した。また、超強電界の印加が可能な電気二重層トランジスタを用いて、わずか 1V の電圧を表面に印加することでバルクの電子相転移を室温で誘起することに成功した（図 3）。有機モットロニクスデバイス作製プロセスとして、インクジェット法による単結晶薄膜合成や高結晶性ポリマー膜の作製が可能なプッシュコート法を考案し、後者は特許成立前に企業への実施許諾の契約を締結した。

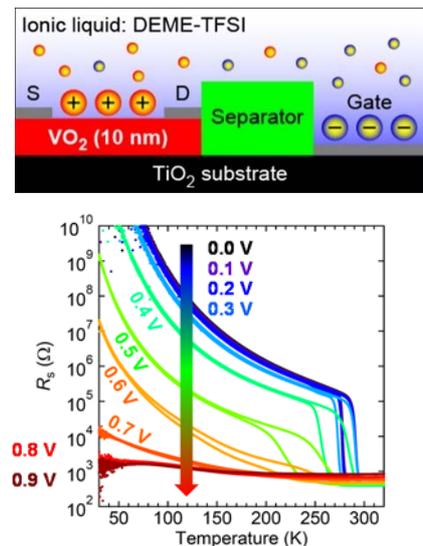


図 3. 電気二重層モットトランジスタ

・「トポロジカルエレクトロニクス」に関する成果

トポロジカルに非自明な電子状態を持つ物質群は、特にその表面・界面状態が量子力学的に保護されるため、非散逸性電流、スピン流の舞台を提供する。これを用いた「超低消費電力エレクトロニクス」と「超低損失エネルギー輸送」に向けて、表面・界面電子状態の観測と設計・制御の学理を構築した。トポロジカル絶縁体の表面状態の電子局在のスケーリング理論の構築と、電界効果によるキャリア数制御とほぼ量子化した異常ホール効果の観測に続き、通常半導体とトポロジカル絶縁体との清浄界面の作成に成功し、磁場下でのトンネル電流の観測によりディラック粒子の存在を突き止めた。また、トポロジカル絶縁体表面状態の量子閉じ込め効果を理論・実験から明らかにし、表面状態のトポロジカルな保護に関する理論を発展させた。パイロクロア磁性体においては新しいトポロジカル状態であるワイル金属相が存在することを光学スペクトルで突き止め、ラシュバ相互作用を含む系のトポロジカル超伝導及びマヨラナフェルミオンの出現の理論研究も進展し、トポロジカル物質とそれに付随した非散逸性電流の研究を大幅に進展させた。これらは、非散逸性電流のデバイス応用への道を切り拓く基礎研究成果である。

・「マルチフェロイクス」に関する成果

研究成果を電場による磁気情報操作が可能なデバイスとして応用し、「超低消費電力エレクトロニクス」の構築につなげるため、中間評価までに達成した電場のみを用いた磁化反転、印加磁場や光の進行方向によって旋光性や透過率の異なる物質

の発見、コニカル磁気秩序の室温化などの成果の上に、更なる物質機能の拡大を目指した。電場磁化反転を実現した鉄酸化物 ( $\text{Dy}_{0.7}\text{Tb}_{0.3}\text{FeO}_3$ ) において、磁場で PE 曲線を電場軸方向にバイアスするという新機能を発見した。また、2 つの電気活性磁気励起間の干渉による THz 光の巨大な方向二色性(光の進行方向により透過率が異なる)を実証した。さらに、ピエゾ応答力顕微鏡を用い、室温で有機強誘電体のドメイン構造を可視化し、ドメイン構造のトポロジーそのものが反転可能な分極を決定する要因となることを発見した。

#### ・エネルギー変換に関する成果

超高効率エネルギー変換を目指し、FIRST の研究内容を太陽光発電と熱電変換技術へと収斂させるべく研究を展開した。太陽光発電としては、モット転移を活用して一つの光子から多数の電子正孔対を外部に取り出す多重キャリア生成機構に関して研究を進めた。大規模計算が可能な強相関量子シミュレーターを構築し、多重キャリア生成に必要な物質パラメータを明らかにするとともに、増幅電流として外部に取り出すために必要な接合のエネルギー準位相関を明らかにした。

熱電変換関連では、性能指数の増大のための新原理構築を目指して研究を進めた。中間評価までに達成した強相関極限の熱電特性の観測、高易動度下でのキャリア数制御、3次元ディラック電子の熱電能の増大などに加え、層状遷移金属セレン化物において高易動度と低熱伝導率の両立に成功し、室温付近で実用化されている  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  と同程度の高い電力因子を実現し、強相関材料への応用に大きく前進した。

### <評価小委員会による所見>

#### 1. 研究目標の達成状況

本研究課題では、物性物理分野を先導してきた中心研究者らの理論・実験両面からのアプローチによって、新原理・新現象の予測・解明、実証・観測といった飛躍知を創出する研究開発に取り組んでおり、その結果、以下のような学術的に高いインパクトをもつ成果が得られている。

- ・電子スピンの作るナノ粒子であるスキルミオンの特性を生かし、次世代磁気メモリを含む超低消費電力エレクトロニクスの重要分野として「スキルミオニクス」の学理を発展させたこと。
- ・絶縁相と金属相をわずかな刺激で高速にスイッチする現象を機能化する研究を通して、超低消費電力エレクトロニクス及び超低損失エネルギー輸送に資する基礎研究を行ったこと。
- ・トポロジカル量子物質を用いて、超低消費電力エレクトロニクス及び超低損失エネルギー輸送に向けた設計・制御学理を構築したこと。
- ・巨大電気磁気効果による物質状態の制御を通じて、超低消費電力エレクトロニクスの構築につながる原理の開発を行ったこと。

・強相関材料を用いた新原理熱電・光電変換材料の開拓を通じて、超高効率エネルギー変換の学理を発展させたこと。

これらの成果は、Nature 及びその姉妹誌 39 報、Science 誌 10 報を含む論文 410 報に発表され、さらに、被引用回数トップ 1%論文が 22 報と、この「強相関量子科学」の分野で、他を圧倒的に凌駕する世界最高の技術が創成できたことは特筆すべき成果であり、高く評価される。

また、中心研究者は、平成 26 年の「トムソン・ロイター引用栄誉賞」を再受賞しており、この意味でも、世界における我が国のプレゼンスの向上や国民への夢や希望の付与に資する成果が得られたと判断される。

## 2. 研究推進・支援体制の状況

本研究課題では、独立行政法人理化学研究所（理研）及び共同研究機関 4 機関（2 大学、2 独立行政法人）を中心に、協力研究機関 4 企業が参画して研究を実施した。

グループ体制としては、類似した専門性を持つ 3 つのテーマとしたが、相互の議論を活性化し、個々の研究課題については、必要なグループが人を出し合って、理論から最先端の計測に至るまで、共同で一つの仕事を行うことが常態となるように運営が行われた。垣根を取り払った運営によって、各グループでの専門性は維持しながら創造的な研究を推進することができており、これは中心研究者のリーダーシップによって可能となったと評価される。

若手研究者の育成状況については、「理研東大連携講座」を設置し、若い准教授クラスの研究者 12 人を FIRST で新たに雇用し、理研の最先端の設備を使って研究に参加させつつ、学生の指導も行うというスキームを構築した。また、22 名が大学・研究所の上級ポストを得て転進しており、極めて回転の速い人材育成と人事流動性を実現し、新しい学術リーダーを生み出している。若手教員が学生指導する際にメンターを配置し、その若手教員と大学院生の両方の成長を支える仕組みを構築した点も評価される。

また、理研または東京大学において、ほぼ毎週 1 回以上（年間 70 回程度）行った「ディスカッションミーティング」は、国籍、所属（大学、理研、企業）を問わずに、実験・理論の結果を集中的に議論する全体会議であり、これらの取組は、研究推進面だけでなく、人材育成面でも非常に効果的であったと高く評価される。

さらに、FIRST 外村課題とのスキルミオンの三次元観測や FIRST 山本課題とのディスカッションなど、分野として近い FIRST の他の研究課題と研究協力を行っており、FIRST ならではの効果が得られている。

## 3. 研究成果の今後の展開

本研究課題の成果は、平成 25 年に理研内部に新設された「創発物性科学研究センター」（中心研究者がセンター長）に継承され、研究開発成果の社会還元を目指すとともに、更なる積極展開のために、競争的資金の獲得と、民間企業との実用化に向けた共同研究を発展させた委託研究費の獲得を目指すこととしている。

全ての物理現象はある種のデバイスに利用できるが、実用的でかつ既存のデバイスに対して優位性を持つものはごくわずかであり、強相関電子系が革新的なデバイスに使われるためには、今後解決すべき課題が多いことも事実である。例えば、スキルミオンが真の高密度メモリに使われるためには、動作温度、記憶素子のサイズ（10nm 以下）、書き込み／読み込み特性（データ保持特性や駆動電流密度、速度等）、ばらつき耐性、入出力特性、スケーラビリティ、周辺回路、設計技術、等々を規定し、既存デバイスに対する優位性が確保されることを証明する必要がある。そのため、デバイス工学の専門家等と協力し、まずはディスクリート半導体レベルでの実用化を狙い、強相関電子系の潜在的な価値を引き出した上で、極微細化デバイスを狙うなど、研究開発の成果の実用化に向けて戦略的に進めることを期待する。

#### 4. 総合所見

本研究課題は、強相関電子のもつ多自由度の絡み合いを制御して、エネルギー高効率変換やエネルギー消費を伴わない量子状態の制御など、未踏かつ革新的な電子物性機能を創成することを目的として研究開発を実施した。その結果、得られた研究成果は Nature 誌等のインパクトの高い学術誌に数多く掲載されるとともに、被引用回数トップ 1%論文が 22 報と圧倒的な数の引用もされており、高く評価される。

以上のことから、本研究課題は目標を達成しており、世界をリードする世界トップ水準の研究成果が得られたと判断される。

また、本研究課題において、国籍や所属といった枠にとらわれず、グループ全体で密なディスカッションに取り組んだ結果、数多くの顕著な成果が得られたことは、特に中心研究者のリーダーシップの高さによるものであり、高く評価される。

今後、本研究課題の成果は、理研内部に設立された「創発物性科学研究センター」を中心に、深化・実用化を目指すこととされているが、中心研究者の提唱する「イノベーション“4”（※）」への道のりも、現時点ではまだ全貌が見えるところまでには至っていない。基礎学理の更なる深化を目指すとともに、産業界と密に連携し、実用デバイスの実現に向けた研究開発を戦略的に進め、我が国経済への貢献が具体的に示されていくことを期待する。

※イノベーション“4”：実現すれば、社会に大革命をもたらす持続可能な社会を築くことができる目指すべき目標。①太陽電池の発電効率を 40%以上にする。②熱を電力に、電力を熱に変換する熱電変換の性能指数（ZT）を 4 以上にする。③電気抵抗がゼロとなる超伝導が起きる温度を室温を十分に超える 400K（約 127°C）以上にする。④蓄電池のエネルギー密度を 400Wh/kg 以上にする。

研究課題名	宇宙の起源と未来を解き明かす -- 超広視野イメージングと分光によるダークマター・ ダークエネルギーの正体の究明 --
中心研究者名	村山 斉
研究支援担当機関名	東京大学

## <研究課題からの報告>

### 1. 研究課題の目的及び意義

宇宙の起源と未来への興味は、有史以来、人類の最も根源的な知的探求の源である。宇宙では、我々の知っている物質（原子）は5%も無く、残りの90%以上は、正体不明のダークマター（暗黒物質）とダークエネルギー（暗黒エネルギー）という物質が占めている。ダークマターは、その存在により、銀河や星が生まれたことが分かっており、宇宙の起源・人類の誕生に関わる重要な成分と考えられている。一方、ダークエネルギーは、宇宙の膨張を加速させているものであり、このエネルギーの増え方によっては、膨張速度が無限大になり、宇宙がバラバラに引き裂かれ、終焉を迎えてしまう、といった考えもある。

このため、本研究課題では、このダークマターとダークエネルギーの正体を究明し、宇宙の起源と未来を解き明かすことを目的として研究開発を実施した。

具体的な研究目標として、米国ハワイ島のすばる望遠鏡に、超広視野の新型カメラ（Hyper Suprime Cam : HSC）と、自動制御で2,400銀河を同時に観測できる分光器（Prime Focus Spectrograph : PFS）を開発・設置し、遠方銀河の精密計測からダークマターの三次元地図を完成させ、その地図からダークエネルギーの増加する割合を測定すること、を設定し、その実現に当たって、①超広視野分光によるダークマター・ダークエネルギーの研究、②超広視野イメージングによるダークマター・ダークエネルギーの研究、の2つのサブテーマを構成した。

### 2. 研究成果の概要

#### ① 超広視野分光によるダークマター・ダークエネルギーの研究

宇宙の物差し（Baryon Acoustic Oscillation : BAO）までの距離を測るために、100万個規模の銀河を分光観測する装置（PFS）の製作を、具体的な目標として取り組んだ。

国際共同研究のパートナー構築に時間を要し、詳細設計の完成が約1年半遅れることとなったが、概念設計の仕様段階で調達可能なリーディングタイムの長い部位を先行発注し、装置製作の工程を確保することで遅れを挽回した。結果として、分光器の光学素子、マイクロレンズ、光ファイバー、検出器など、装置の根幹を成す主要部位については、所定の仕様を満たしFIRST事業期間内で完成した

ものの、装置の組立調整・据付工程は未着手となった。(図 1)

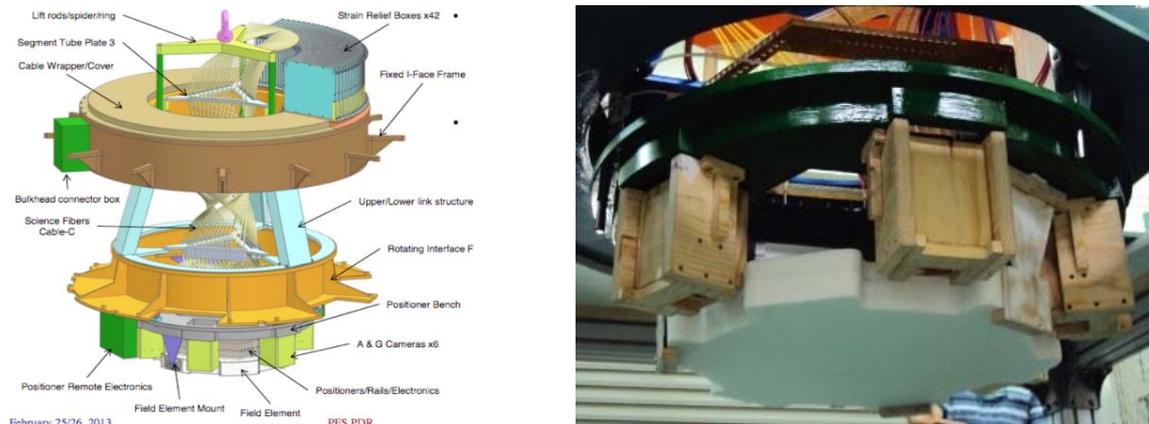


図 1. PFS 分光器：主焦点枠体の詳細設計（左）と、その原寸大の模型を作製し、組立手順を確認・実証しているところ（右）

## ② 超広視野イメージングによるダークマター・ダークエネルギーの研究

超広視野イメージングの主要ツールであるすばる望遠鏡搭載の超広視野カメラ HSC が完成し、その初期性能は国際的に高く評価され、Nature 誌にも取り上げられた（図 2）。

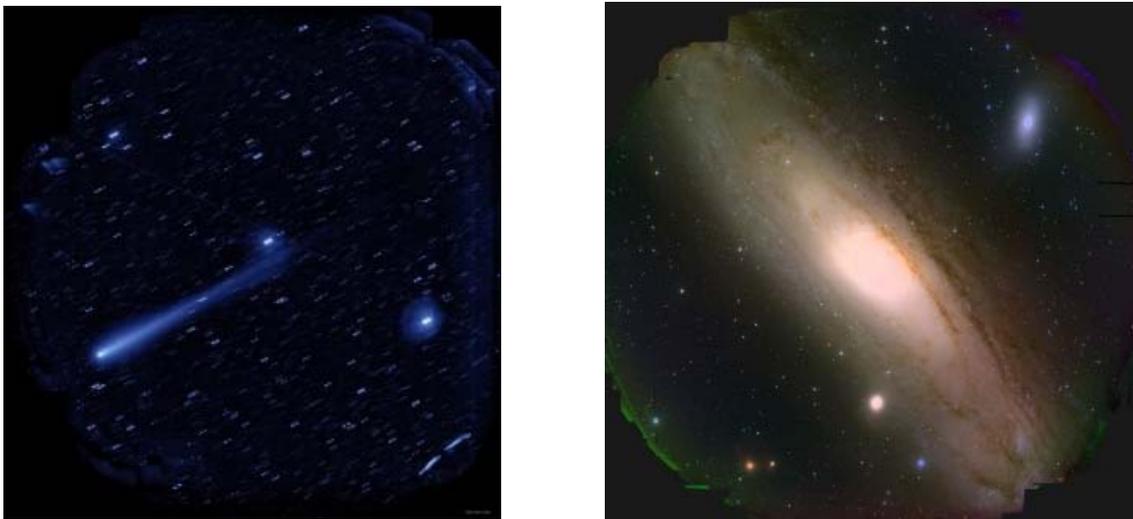


図 2. HSC カメラの試験観測画像：アイソン彗星（左）とアンドロメダ銀河（右）

完成した HSC カメラによる観測は、すばる戦略枠観測で 300 夜の観測計画が採択されたものの、不可抗力の外的要因（日本とハワイにおける地震、すばる望遠鏡の不具合など）によって遅れが生じ、実際には、1 回目の広域宇宙イメージング探査観測が、平成 26 年 3 月 24 日～4 月 2 日間の 4.5 夜で行われた。

FIRST 事業期間終了後となったが、ここで観測した画像より、世界最高広域となる 3 度×4 度のダークマターの三次元地図の作成に成功した（図 3）。

今後、予定されている残りの観測や、取得したデータの解析により、最終目標である、ダークエネルギーの研究・解明という科学成果を得ることが、近い将来必ず達成できるという見通しを得ることができた。

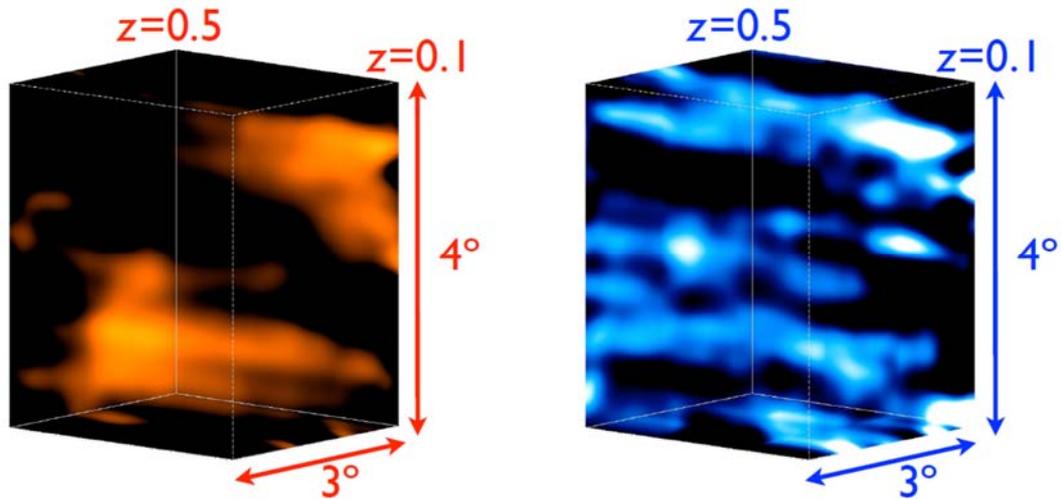


図 3. HSC カメラによる取得画像から作成した三次元像銀河分布（左）とダークマター分布（右）

以上のことを踏まえ、「FIRST 事業期間内の成果」として、PFS 分光器と HSC カメラの優位性について、ベンチマークした結果を表 1, 2 に示す。

PFS 分光器の製作では、設計と主要部位の製作が完了し、所定の性能が担保されており、また HSC カメラでも、実機で以下の性能が実測されていることから、所期の目標を達成できれば、世界トップに出られる優位性を保っている。

表 1. 開発中の PFS 分光器と他の同様な機能を有する装置とのベンチマーク結果

望遠鏡&装置名 (国または機関)	口径 (m)	視野直径 (度角)	ファイ バー数	透過率	観測効率 (主鏡面積×装置透過率×ファイ バー数：本計画を 1 とする)
すばる/本計画 PFS (日本)	8.2	1.3	2,400	0.20	1
VLT/ FLAMES (欧州)	8.2	0.4	132	0.20	0.055
MMT/ HECTSPEC (米国)	6.5	1.0	300	0.17	0.066
WHT/ AutoFib2 (英国)	4.2	0.8	150	0.05	0.004
AAT/2dF (オーストラリア)	3.8	2.0	392	0.20	0.035
WIYN/ HYDRA (米国)	3.5	1.0	90	0.15	0.005
Mayall/ Big Boss* (米国)	4.0	3.0	5,000	0.24	0.59
LAMOST** (中国)	4.0	5.0	4,000	0.20	0.40

注： \* 予算を模索中の計画

\*\* 天候等の観測条件が劣悪で実験望遠鏡・装置と位置付けられる

表2. 開発したHSCカメラと他の同様な機能を有する装置とのベンチマーク結果

望遠鏡&装置名 (国または機関)	口径 (m)	視野直径 (度角)	$A \times \Omega$ *	深さ **	$A \times \Omega \times$ 深さ ***
すばる/本計画 HSC (日本)	8.2	1.5	1	1	1
すばる/Suprime Cam (日本、既存)	8.2	0.5	0.11	0.5	0.055
CFHT/ Mega Cam (仏/加/ハワイ)	3.6	1.0	0.34	0.29	0.099
Blanco 望遠鏡 (米国等)	4.0	2.2	0.5	0.35	0.175
LSST**** (米国等)	8.4(有効 6.7)	3.5	3.63	0.7	2.541

注：\* 主鏡×視野を表し、観測効率の指標の一つ；本計画を1とする。

\*\* 探査の限界、暗さ；本計画を1とする。

\*\*\* 主鏡×視野×深さは最終的な観測性能の指標；本計画を1とする。

\*\*\*\* 総経費1,000億円規模の次期計画。完成は2020年代。

## <評価小委員会による所見>

### 1. 研究目標の達成状況

PFS分光器については、個々の装置作製までは終えたものの、組立調整・据付工程が未着手であり所期の目標には達していない。しかし、他のシステムとのベンチマーク結果より、所期の目標を達成すれば、世界トップの性能が見込め、さらに、国際協力体制が敷かれ、平成31(2019)年の科学観測開始に向けてロードマップが描けていることから、装置完成とその後の成果創出が十分に期待できるものとなっている。

HSCカメラについては、装置を完成させ、その試験観測の段階においてNature誌に取り上げられたり、すばる戦略枠観測で、通常では考えられない300夜の観測計画に採択されたりと、高い期待が寄せられている。実際に完成したカメラによる広域観測は、FIRST事業期間終了後の平成26年度に掛かったものの、世界最高広域の3度×4度のダークマター三次元地図のマッピングに成功した。これは、従来の取得画像に比べ、桁違いの空域を、非常に短時間で観測したものであり、本研究課題で開発されたシステムの圧倒的優位性を示した結果と言える。

### 2. 研究推進・支援体制の状況

研究推進体制については、中心研究者のリーダーシップの下、国際的な参画機関を束ねるように組織設計が行われたことは特筆すべき点であり、高く評価される。HSCカメラの開発と観測計画の策定では、「国際共同観測チーム」が組織され、研究全体をリードする役割を担い、また、PFS分光器の開発では、「国際共同研究チ

ーム」が構築されるとともに、「プロジェクトオフィス」が立ち上げられ、観測研究課題の整理、科学的要求仕様の確定、各装置への仕様の反映など、装置設計・製作の中心的な役割を担っていた。これらのサブ組織は、国際共同開発を推進する上で有効な体制であったと判断される。

研究支援体制については、国際連携の強化として研究支援統括者を補佐する専門職員や、英語による TV・電話会議等の各種会議を記録にとどめる専門職員の配置などの工夫が見られた。

知的財産権に関する取組については、システム全体、あるいはハードとハードのインターフェースなどの知財も重要と思われるが特許化されていない。広視野分光、広視野イメージングとも光学・信号処理に関し、多様な知財発掘の可能性があると考えられ、開発技術の中から更なる特許出願を進めることが期待される。

若手研究者の育成状況については、「プロジェクトオフィス」に属した若手研究者が、世界の大学・機関と協同してプロジェクトを主導する、という得難い経験をしており、将来、国際的な活躍が期待される人材の育成につながっていることは評価される。

### 3. 研究成果の今後の展開

ダークマター、ダークエネルギーの解明に向けた観測は、必要な機材・設備が整い、その実現性を三次元ダークマターの地図で示すことに成功したものの、ようやく始まったばかりであり、本格的な観測は今後委ねられている。すばる戦略枠観測で 300 夜の観測を確保していること、今後の組織体制や資金も整いつつあることから、世界最高精度でのダークマターの地図づくり、そのダークマターの地図に含まれるダークエネルギーに対する研究体制ができており、社会への大きなインパクトが期待される。

また、産業界へのインパクトとしては、世界最高精度を要求するカメラ、高い仕様の分光器が国内産業に発注されたことにより、国内産業の技術開発力の向上に大きく貢献したと認められる。

### 4. 総合所見

本研究課題は、すばる望遠鏡に超広視野カメラと超広視野分光器を開発・設置し、宇宙を広範囲に観測することで、宇宙の 9 割以上を占めているダークマター、ダークエネルギーを解析し、宇宙の起源と未来を明らかにすることを目指して研究開発を実施した。その結果、HSC カメラを完成させ、世界最高広域のダークマター三次元地図の作成に成功し、システムの圧倒的優位性を示した。PFS 分光器については、個々の装置作製までは終えたものの、組立調整・据付工程が未着手となった。

しかし、国際的な協力体制が敷かれ、科学観測開始に向けてのロードマップが描かれていることから、装置完成とその後の成果創出が十分に期待できるものとなっている。

以上のことから、本研究課題は一部目標に達していないものの、世界をリードする高精度な観測を行うための礎ができており、世界における我が国のプレゼンス向上や、国民への夢や希望の付与に資する成果が得られる大きな一歩を踏み出すことができたと評価される。

一方で、限られた期間で、今回のような国際的な広がりのあるビッグサイエンスをいかに迅速かつ効率的に展開するかという課題も明らかになった。ビッグサイエンスを支える技術開発と、経済効果の関連性を考える上でも、事業終了後の研究の進展のみならず、どのような形で社会還元されていくかを注目したい。