

研究課題名	原子分解能・ホログラフィー電子顕微鏡の開発とその応用
中心研究者名	外村 彰（代行：長我部 信行）
研究支援担当機関名	独立行政法人科学技術振興機構

## ＜研究課題からの報告＞

### 1. 研究課題の目的及び意義

光（可視光）を用いて試料の拡大像を見る光学顕微鏡は、原理的に可視光に制限され、可視光の波長より小さなものを見ることは困難である。一方で、電子波を利用する電子顕微鏡は、光よりはるかに短い波長を有するため、100nm 以下の高い分解能を有し、基礎科学から産業応用に至るまで幅広い用途に使われている。

本研究課題の中心研究者である（故）外村博士らは、試料に当てた電子の波（物体波）と、試料に当てない電子の波（参照波）を干渉させてホログラムを作り、それを光の波に変換するホログラフィー電子顕微鏡を考案し、微小領域の電場、磁場への観察に応用してきた。

本研究課題では、この電子線ホログラフィー技術を用い、原子レベルでの電場、磁場といったゲージ場（ベクトルポテンシャル）を可視化する世界初の観察装置の開発と、その応用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、以下を設定した。

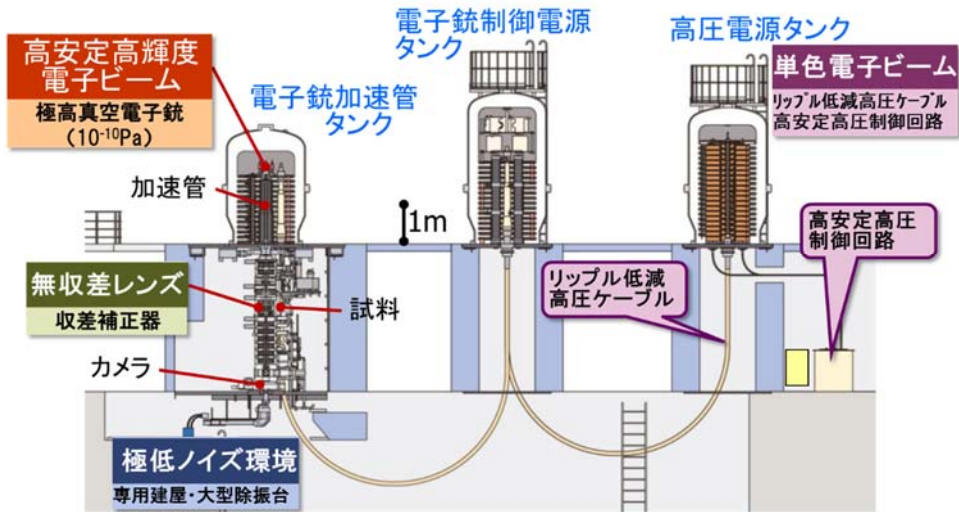
- ① 数Åの原子の姿を捉える世界最高の空間分解能を持つ電子顕微鏡
  - ▶ 加速電圧 1.2MV、点分解能：0.040nm
- ② 微細な3次元電磁場分布を電子の位相情報により可視化する電子線ホログラフィー解析手法の高度化
  - ▶ 高精度位相計測法：位相検出精度：1/1,000 波長
  - ▶ 3次元構築可能なホログラフィー機能開発
- ③ 将来の装置活用に向けた応用実験
  - ▶ 電子線ホログラフィーによる実サンプルのナノ領域電磁場観察

### 2. 研究成果の概要

#### ① 数Åの原子の姿を捉える世界最高の空間分解能を持つ電子顕微鏡

世界最高の分解能を有するホログラフィー電子顕微鏡を開発するために、安定性の高い高輝度電子銃や、1.2MV の高電圧でも安定に動作する電源を開発した。また、電子レンズの球面収差をほぼゼロに抑える収差補正器や、外部からの雑音や振動を抑える設置環境を実現し（図 1）、FIRST 事業期間の平成 26 年 3 月末時点で 1.2MeV の電子ビームによる金の結晶格子像の観察に成功し、電子顕微鏡としての基本機能を確認した。さらに平成 26 年度にかけて、世界最高の点分解能

である 0.043nm を達成することができた。



高い安定性を有する、高圧電源を分離した 3 タンク方式の 1.2MV 超高压電子顕微鏡

図 1. 開発装置の概要

② 微細な 3 次元電磁場分布を電子の位相情報により可視化する電子線ホログラフイー解析手法の高度化

既存の 1MV 電子顕微鏡を用いて、1.2MV 電子顕微鏡に適用可能な 3 次元ホログラフイー機能を開発し、磁性体内部の磁場分布計測手法を確立した (図 2)。

また、ホログラムの連続取り込みと、位相データ積算で位相ノイズを軽減し、1/1000 波長に相当する位相変化を検出する技術を開発した。

さらに、これまで試料エッジ近傍の領域しか観察できなかったホログラフイー法を改良し、観察視野の制限を緩和し、適用分野の拡大が期待できる分離照射法を開発した (図 3)。

③ 将来の装置活用に向けた応用実験

将来の極低電力デバイス材料として期待される磁性薄膜 (スキルミオン) の計測、磁気ヘッドの内部磁

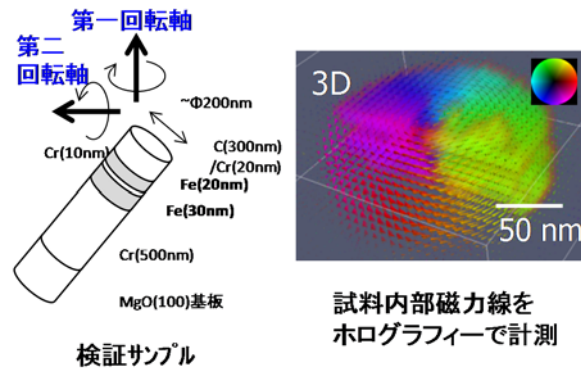


図 2. 磁性体内部の磁場分布計測手法

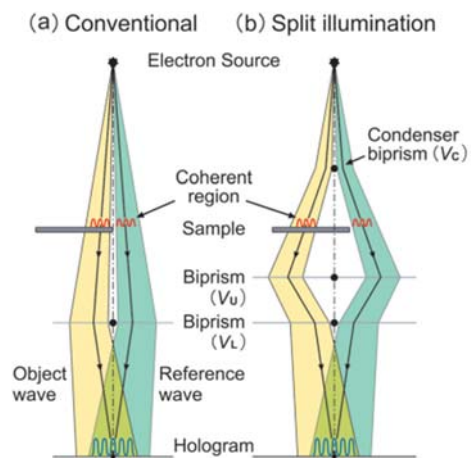


図 3. 従来のホログラフイー法 (左) と分離照射法 (右)

区構造解析、NdFeB 磁石結晶界面内部の磁束計測等最先端のインパクトある成果が得られた（図 4）。これにより、今後の超高压ホログラフィー電子顕微鏡の応用への布石を打つことができた。

以上より、目標とする 0.040nm の分解能には及ばないものの、世界最高性能の点分解能 0.043nm を達成し、電子線ホログラフィー解析手法の高度化及び応用実験に関しても、当初計画以上の成果を得られたと考える。

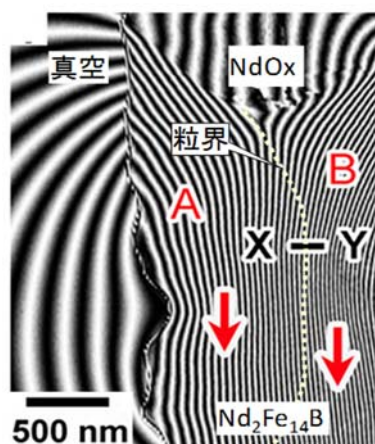


図 4. NdFeB 磁石内部磁力線

## <評価小委員会による所見>

### 1. 研究目標の達成状況

電子顕微鏡の開発に関しては、所期の目標とほぼ同じレベルである世界最高の空間分解能 0.043nm を加速電圧 1.2MV の下で達成した意義は大変に大きい。加えて、装置の製作に当たって、要素技術の改良による積み重ねで得られた技術やノウハウにも大変に価値があると考えられる。これらの要素技術を、今後の電子顕微鏡開発に活用することはもとより、他の応用分野に発展・展開することも期待される。

電子顕微鏡による観察手法の高度化についても、3次元像再構成法の開発、高精度位相計測法の確立、分離照射法の開発など、大きな進展が見られており、高く評価される。また、応用実験の例として挙げられている、NdFeB 磁石の粒界部磁束の計測やスキルミオンのスピン構造の計測などは特筆すべき成果であり、今後の発展と成果が大いに期待される。

一方で、観察手法の高度化や応用実験で報告されたデータには、今回開発した 1.2MV の超高压電子顕微鏡により観察されたものがまだ示されておらず、ホログラフィー像も報告されていない。これらの像に、1.2MV の電子顕微鏡で観察された像が含まれていれば、更にインパクトの高い研究成果になったと考えられ、継続した研究が期待される。

### 2. 研究推進・支援体制の状況

研究推進体制に関しては、日立製作所が主として電子顕微鏡の装置作りを担当し、独立行政法人理化学研究所（理研）が主として応用面である顕微鏡利用の観点からサブテーマを構成し、両者の得意分野を生かした体制で研究開発を推進した。中心研究者の急逝や、震災の影響等数々の困難を乗り越え、目標を達成した努力は評価

される。

研究支援体制に関しては、日立製作所と理研の担当者が、電子顕微鏡の開発現場である日立製作所中央研究所基礎研究サイトの支援室に常駐して支援に当たる体制が組み立てられており、これに JST からの支援が効率的に得られるように組織されていた。中心研究者の急逝にもかかわらず、研究が継続できたことは、適切な支援による部分も大きいと考えられる。

知的財産権に関する取組については、特許件数のみで判断すると十分とは言えないが、特許化するものと、ノウハウ化するもののどちらで対応すべきかを考慮した戦略的な権利確保が行われており、評価できる。

若手研究者の育成状況については、世界最高峰の技術を用いた新しい装置作りを経験できたことは、若手研究者にとって貴重な経験の場となったと考えられる。一方で、研究開発に参加した多くの若手研究者のほとんどが企業内の研究者であり、ポスドクや博士課程の学生は少なく、しかもポスドクで就職した人のほとんどが外国人であり、企業への雇用につながらなかったことは、我が国の若手研究者育成という観点からは残念である。

### 3. 研究成果の今後の展開

本研究課題で開発された電子顕微鏡は、世界でオンリーワンの高性能ホログラフィー電子顕微鏡装置であり、報告された解析手法の高度化や応用実験は、本装置ならではのインパクトのある研究成果が期待でき、その波及効果は大きいと考えられる。

研究成果の今後の展開として、先端計測分野の拠点形成という体制が構想されているが、公的資金を投入して開発されたものであることから、装置利用の体制や運営について、開かれた形で議論できる体制の構築が期待される。また、理研あるいは第三セクター方式の組織に移管して管理運営する方法など、今後の装置の利用のあり方について多面的に検討していくことを期待する。

また、今後、世界最高性能の 1.2MV 電子顕微鏡を生かした電子線ホログラフィーによる評価結果や解析を行い、レベルの高い論文誌を含め社会に広くアピールし、日本の科学技術のプレゼンス向上に寄与していくことを期待する。

### 4. 総合所見

本研究課題は、原子レベルでのゲージ場を可視化する 1.2MV の超高圧ホログラフィー電子顕微鏡の開発及びその解析手法や装置活用に向けた応用研究の検討を行うことを目的として研究開発を実施した。その結果、世界最高の空間分解能 0.043nm を有する 1.2MV の電子顕微鏡の開発に成功し、観察手法の高度化や応用実験に関しても、3 次元像再構成法の開発、高精度位相計測法の確立、分離照射法

の開発など、多くの進展が見られた。

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する。

ただし、観察手法の高度化、応用実験で開発した手法や得られた像は、1.2MVの電子顕微鏡で撮られたものではないことから、今後、1.2MV電子顕微鏡による新しい観察手法への適用など、更にインパクトの高い研究成果を得ることを期待する。

また、公的な予算を使って得られた世界最高性能を持つ電子顕微鏡を、これまでに蓄積されたノウハウや基盤技術を含め、いかに持続的かつ有効に活用していくかが今後の課題である。利用方法については、これまでも問われてきたことであるが、引き続き公共化を含めて多面的な検討を行い、世界最高の技術と成果を生かして、各方面の要望にも対応できるシステムを作り上げていくことを期待する。

研究課題名	日本発の「ほどよし信頼性工学」を導入した超小型衛星による新しい宇宙開発・利用パラダイムの構築
中心研究者名	中須賀 真一
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

これまでの人工衛星の開発は、究極の性能・信頼度を確保するため、1基あたり数百億円を超える費用と、5年以上の開発期間が必要とされてきた。このため、国家予算で進められる大型プロジェクト等に利用・開発が限られ、利用拡大や産業化・商業化の大きな障害となっていた。

このため、本研究課題では、中心研究者が提唱する、ほどよい信頼性で、安く、早く設計・開発する「ほどよし信頼性工学（図1）」を基にして、これまでの常識を打ち破る開発費3億円以下、開発期間2年未満、50kg級の超小型衛星の技術を確認し、新しい宇宙開発・利用のパラダイムを切り拓くことを目指して研究開発を実施した。

具体的な研究目標として、以下を設定した。

- ① 超小型衛星に適した「ほどよし信頼性工学」や開発プロセスの構築
- ② その開発を支える国内のサプライチェーンネットワークの構築と人材育成
- ③ サイズ比の性能が世界レベルの要素機器・先進的地上局の研究開発
- ④ それらの超小型衛星により、従来にない新しい宇宙利用コミュニティ及び利用方法を開拓し、衛星開発・利用産業につなげる

### 2. 研究成果の概要

本研究課題の大きな成果は、世界競争力のある50kg級の超小型衛星の技術的・インフラ的基盤を日本国内にしっかりと確立し、また、利用方法の開拓を進めた結果、このサイズの衛星を実用的に利用して、低コストで迅速な宇宙開発利用を行う準備が整ったことにある。今後始まる超小型衛星の実利用は、これまでの宇宙開発の概念を大きく変え、新しい世界を開拓すると考えられる。

これまでに、衛星開発方法の革新、先進的要素技術の開発及び利用開拓の成果の実証を目的として、4基の「ほどよし衛星」の研究開発を進めた。1号機は、低コ

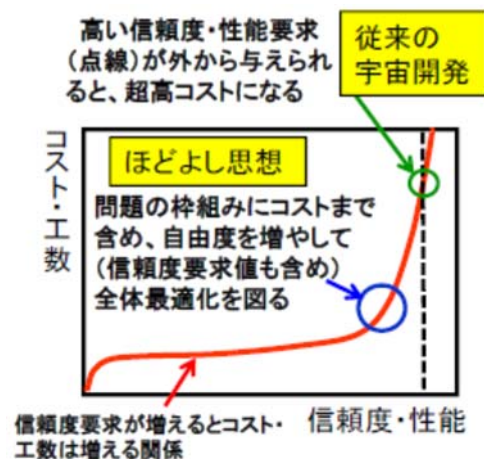


図1. 性能・コスト線図

ストで行える地球画像による新しいリモートセンシングビジネスの実証を目的とし、平成 24 年度末にフライトモデルが完成した。6.7m の地上分解能を持つ光学系やリアクションホイール等の新規開発コンポーネントも搭載され、ビジネス実験を行うリモートセンシング画像利用会社の公募・選定や、実際的な画像処理技術や配信・アーカイブ方法及び具体的な利用計画の検討を進めた。2号機では、国内外7つの研究機関からの宇宙科学ミッションを搭載する衛星として、平成 25 年度末に完成した。3、4号機では研究課題の成果を統合して実証する場として、短期・低コスト開発を実証するとともに、新規の搭載機器を研究・開発して軌道上で実証すること、新規の衛星利用を実験すること等が目的であり、平成 25 年度末に完成した。3号機で 40m、200m、4号機で 5m の分解能（高度 500km）のカメラを、さらに超小型衛星では初となる、機器搭載スペース（衛星内の空間を顧客に与え自由利用するスペース）、ストア&フォワード受信機（地上のセンサ等のデータを衛星が電波で収集）、イオン推進機を搭載し、新しい分野の利用開拓を進めてきた。

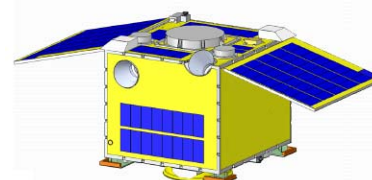
各衛星は、外的要因等により予定した平成 25 年度内での打ち上げが遅れ、3、4号機は平成 26 年 6 月に、1号機は同年 11 月にロシアでドニエプルロケットを使って打ち上げられた。2号機は平成 27 年以降に日本の H-IIA ロケットで打ち上げられる予定となっている。

打ち上げられた 1、3、4号機は、いずれも順調に初期運用、開発したバス機器（人工衛星の基本的な機能として必要な機器）の実証、画像取得が進んでおり、「ほどよし信頼性工学」による設計理論の高さを示している。今後、要素技術と利用の実証を進める予定となっている。



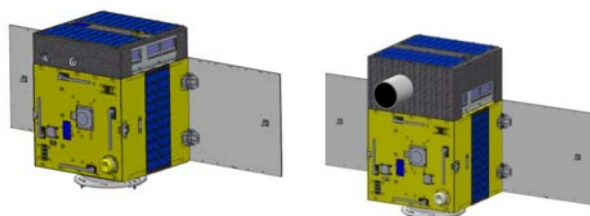
地球観測ミッションの遂行と、超小型衛星によるリモートセンシング事業の可能性の実証

ほどよし 1 号 : 光学リモートセンシング衛星



宇宙と地球を観測する理学ミッションのほか、対地上レーザー通信技術の実証

ほどよし 2 号 : 国際理学観測衛星



光学カメラによる地球観測ミッション、地上のセンサーデータを集めるミッション（ストア&フォワード）のほか、10cm 立方の機器搭載スペースにユーザーの希望に応じた機器を積み込み、レンタルビジネスの可能性を実証

ほどよし 3 号(左)、ほどよし 4 号(右) : マルチミッション衛星

図 2. 開発したほどよし衛星 1 号機~4 号機の概略



スリランカ



九州



千葉県勝浦市周辺

図3. 打ち上げられた「ほどよし3、4号」により取得された画像  
(左：分解能 240m、中：分解能 40m、右：分解能 6m)

## ＜評価小委員会による所見＞

### 1. 研究目標の達成状況

50kg 級衛星で、分解能 2.5m の画像取得技術、光通信装置搭載等の設定目標は世界最高水準であり、性能から見たコストや開発期間の短さも世界に例を見ないものである。本研究課題の集大成ともいえるべき「ほどよし3号・4号」は、平成26年6月に打ち上げられ、開発したバス機器の実証と画像取得が順調に進められている。また「ほどよし1号」も平成26年11月に打ち上げに成功し、順次成果の実用化が証明されつつある。

自前での宇宙開発が困難な国々や企業に対して、宇宙関連ビジネスや研究開発への新たな道を拓き、我が国の宇宙関連技術の高さを世界へアピールすると同時に、我が国のプレゼンス向上にも寄与したことは高く評価される。

一方で、「ほどよし信頼性工学」の考え方を、衛星開発だけでなく、信頼性工学の一つの方法論として確立することも重要な視点である。他の応用例における有用性の検討など、今後の一般化、体系化を期待したい。

### 2. 研究推進・支援体制の状況

研究推進体制については、複数の大学、宇宙航空研究開発機構（JAXA）、企業など多くの参加組織を適切に管理し、衛星開発を成功させた中心研究者のマネジメント力や、中小企業を中心としたサプライネットワークの構築は高く評価される。

研究支援体制については、多岐にわたる研究課題を、様々な組織で取り組むため



の体制に整備されており、また個々の目標の達成状況からも、中心研究者が研究開発に専念する体制が構築できていたと判断される。

知的財産権に関する取組については、特許化するもの、ノウハウ化するもののバランスを考慮して、国内特許出願意識の醸成を先行させ、国内出願の中から取捨選択して国際出願していくなど、適切な配慮がされたと考えられる。

学術関係では、多くの学会発表が見られるが、衛星の打ち上げが遅れたこともあり、残念ながら論文数が少ない。今回、衛星が打ち上げられ、その成果の蓄積が予想されるので、特に英文誌、しかもレベルの高い学術誌を対象とした論文の投稿を期待する。

### 3. 研究成果の今後の展開

衛星が打ち上がったことで、その成果が目に見える形で得られつつあり、国内外に成果をアピールする機会が得られた。特に、自然災害や国土の利用評価、ビジネスへの展開など、比較的低価格で貴重な情報が得られる機器が提供できる状況になってきたことは、成果の波及効果や社会還元の意義が大きい。また、今回確立した超小型衛星の方法論により、低コストでタイムリーな打ち上げが容易になれば、国内の関連産業の活性化にも大いに資する可能性もある。

さらに、対ベトナム ODA による衛星開発教育用の衛星の受注や、JAXA との共同プロジェクトによる深宇宙探査機 PROCYON へのバス機器の提供等、国内外を問わず、多様な成果の展開も進められており、今後ますますその重要性や意義が増してくると考えられる。

宇宙開発や人工衛星は、若年世代、特に中・高生にとって大きな夢を抱かせる取組である。ほどよし衛星打ち上げの際の報道の多さから見ても、国民の関心も高く、その成果も注目されている。今後とも継続的な成果公表への努力を期待する。

### 4. 総合所見

本研究課題は、「ほどよし信頼性工学」に基づき、低コストで短期間での超小型衛星の研究・開発を目的として研究開発を実施した。その結果、4基の人工衛星を開発し、これまでに3基の打ち上げに成功し、順次成果の実用化がなされている段階である。宇宙開発が困難な国々や企業に、宇宙関連ビジネスへの新たな道を切り拓き、我が国の宇宙関連技術の高さをアピールすると同時に、プレゼンス向上にも寄与している。

以上のことから、見事にその方法論を確立し、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。

研究推進体制に関しても、多数の大学や JAXA、企業が適切に協力し、世界トッ

プ水準の成果が生み出されたことや、国内中小企業を利用したサプライチェーンの構築など、FIRST ならではの中心研究者のリーダーシップや、高いマネジメント能力が伺えた。

宇宙開発や人工衛星は、国民の関心も高いため、打ち上げに成功した人工衛星からの実証報告だけでなく、著名な論文への投稿、ビジネスへの展開等、社会還元を考慮して、広く成果をアピールしていくことを期待する。また、今後は、衛星開発の成果を踏まえ、「ほどよし信頼性工学」の考え方を、一般化、体系化していくことを期待する。