

ERATO 百生量子ビーム位相イメージングプロジェクト事後評価（予備評価）報告書

【研究総括】百生 敦（東北大学 多元物質科学研究所／教授）

【評価委員】（敬称略、五十音順）

佐藤 岳志（株式会社日立ハイテクノロジーズ 科学・医用システム事業統括本部／主任技師）

田和 圭子（関西学院大学 理工学部環境・応用化学科／教授）

豊川 弘之（産業技術総合研究所 計量標準総合センター／研究グループ長）

羽石 秀昭（千葉大学 フロンティア医工学センター／教授）

鷲尾 方一（委員長；早稲田大学 理工学術院・先進理工学研究科／教授）

評価の概要

ERATO 百生量子ビーム位相イメージングプロジェクトは位相イメージング（＝位相コントラスト撮影とその関連技術）を冠とした種々の計測手法群（画像処理を含む）を多岐にわたる量子ビーム（種々の X 線、中性子線、電子線）を用いて開発することがその大目標となっている。この中で、まずそれぞれの量子ビーム及び応用に対する装置開発を実施し、それを用いた応用研究へと橋渡しを行うことが主な構想である。さらに、これまでの技術で実現できなかった新奇のイメージング、すなわちマルチスケール（1 nm～100 μm 以上）、マルチディメンジョン、マルチモダリティーで可視化を行うプラットフォームの形成を目指しており、その構想と実現した時のインパクトの大きさは、非常に大きなものとなると想定される。

本プロジェクトは、百生研究統括の強力なリーダーシップのもとで挑戦的・創造的・融合的な構想実現を期待させるに見合った研究体制を構築し、効果的に運営されている。また研究グループ間で共通技術は縦横に利用するとともに、独自の開発についてはグループリーダーに運営を任せるなど、適切に計画が実施されている。一部の装置開発に遅れが見られるものの、順調に成果を挙げており、目標の達成と今後の大きな進展を期待できる状況にある。

社会・経済への貢献は今後の研究継続を経てさらに顕在化されるものと思われるが、生体に関する詳細情報（診断など）を得ることができ、人類の QOL を格段に向上させることができるようになることが期待される。また、材料開発分野では、今まで試行錯誤でモノづくりをしていたものが、原理的な解明（物性はどこから発現しているのかなど）が可能となり、より良いモノづくり、より良い社会（環境負荷の少ない）が実現できると考えられる。したがって、本プロジェクトで開発された種々の技術が実用化された場合は、経済効果も大きく、医療費の低減、モノづくりにおけるコスト削減や環境負荷の低減などへの貢献が見込める。

以上を総合し、本プロジェクトは戦略目標「選択的物質貯蔵・輸送・分離・変換等を実現する物質中の微細な空間空隙構造制御技術による新機能材料の創製」の達成に資する成果が得られていると評価する。

1. 研究プロジェクトの設定および運営

1-1. プロジェクトの全体構想

本プロジェクトは位相イメージング（＝位相コントラスト撮影とその関連技術）を冠とした種々の計測手法群（画像処理を含む）を多岐にわたる量子ビーム（種々の X 線、中性子線、電子線）を用いて開発することがその大目標となっている。この中で、まずそれぞれの量子ビーム及び応用に対する装置開発を実施し、それを用いた応用研究へと橋渡しを行うことが主な構想である。X 線、中性子線、電子線の 3 つの実験グループでは個々の量子位相イメージング技術において多くの挑戦的な課題を設定していると同時に、位相画像解析グループが加わることで、位相イメージングデー

タの処理において3つのグループを束ねて情報科学の最先端技術を取り入れ、ハードとソフトを融合させる枠組みとなっており、4つのグループとして取り組む意義を明確にした構想といえる。

これまでの技術で実現できなかった新奇のイメージング、すなわちマルチスケール（1 nm～100 μm 以上）、マルチディメンジョン、マルチモダリティーで可視化を行うプラットフォームの形成を目指しており、その応用先は生体、高分子、金属など、先端的な技術開発において注目される種々の物質に対する新しいイメージングを実現することにあり、その構想と実現した時のインパクトの大きさは、非常に大きなものとなると想定される。

1-2. プロジェクトの目標・計画

X線位相イメージンググループについては、まず技術開発として、①四次元位相 CT (computed tomography)、②顕微位相 CT、③超解像 X線イメージング (KIT: Karlsruhe Institute of Technology にて実施) の3つのカテゴリーを挙げている。また、これらにかかわる装置開発目標として、①顕微位相 CT 装置、②高エネルギー位相イメージング装置を挙げ、これらを有機的につなげ、顕微位相 CT においては原理的にナノメートル単位の解像度を持つ CT 開発が可能であることを示すなど、目標計画の達成に大きな追い風を吹かせている。これまでなかなかめど立たなかった高エネルギー位相イメージング装置についても、線源開発に問題が残っているものの、近いうち実現可能であることが予想され、大きな問題はないと考える。なお、X線位相イメージングの技術開発に関わるものについては、順調に成果を挙げており、こちらも大きな進展を期待できる状況にある。

中性子線位相イメージンググループについては、①位相イメージング、②スピン偏極位相イメージングの2つのカテゴリーを挙げ、その技術開発を目標に計画を実施している。この計画の実現には高強度の中性子源が必要であるが、幸い J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex、大強度陽子加速器施設) が稼働し、実質的な研究が可能となったことと相まって、その目標設定、計画に高い具体性があるものとなった。またこの計画において位相格子の作成 (Gd: ガドリニウム) での高アスペクト・大面積化を可能とする大きなブレークスルーもあり、これからの大きな進展が期待できる。

電子線位相イメージンググループについては、像コントラストを最大化し、定量性のある画像を得ることのできる3つの新規位相差電子顕微鏡 (①FZP (Fresnel zone plates) 位相差 STEM (Scanning Transmission Electron Microscope)、②レーザー位相差 TEM (Transmission Electron Microscope)、③ミラー位相差 TEM) の開発を目指したが、現実的に実現が約束されているシステムとしては、①FZP 位相差 STEM のみと考えられる。多くの分野の専門家の技術を結集すれば与えられた期間である程度の達成を見ることができたかもしれないが、体制から見てその計画は過大であったと言わざるを得ない。しかし①FZP 位相差 STEM の実用化だけでもこの ERATO 研究の大きな柱となり得るものであり、このイメージングに注力してもらえれば十分な成果を挙げると考えてよいと思われる。

位相画像解析グループについては、①スパースビューCT、②インテリア CT、③位相イメージング画像処理の大きな3つの研究開発を推進している。それぞれ数理学的手法や境界条件の変更などを駆使し、極めて高速に画像の再構成を可能とするなど、目標設定とその実施については、ほぼ計画通りに進んでいる。

上記のドイツ KIT との共同研究においては、世界でも唯一といえる格子作成技術を持つ KIT と、本プロジェクトが開発中の世界最先端の位相イメージング技術との相互補完であり、極めて効果的・効率的な国際共同研究といえる。また、この国際共同研究により世界への発信も期待できる。全体の計画としては、異なる量子ビームや装置においてそれぞれの特長を生かしつつ、異なる技術開発フェーズであっても研究目標を達成できるように設計されている。また、新規な位相イメージング計測手法を確立させることが第一義的であるため、研究グループは第一に装置開発を行い、装置完成後に共同研究を経て応用研究へと接続させる計画となっており、妥当な研究計画であると評価できる。一方で応用研究については、X線、中性子線、電子線の各位相イメージングが得意とする具体的な研究ターゲットを例示したほうが、プロジェクトの推進に効果的であったと考えられる。

全体としてはプロジェクトの目標・計画の設定は適切である。

1-3. プロジェクトの運営

百生研究総括らのもつ格子作成の技術が中性子線に転用されるなど、共通技術はグループ間で縦横に利用されるとともに、独自の開発についてはグループリーダーに運営を任せるなど、適切に計画が実施されていることを確認した。

百生研究統括の強力なリーダーシップのもとで、地理的に離れていることが弱点にならないよう、定期開催される全体会議や適宜 Web 会議などを活用してプロジェクト体制の維持や進捗状況のチェックに尽力しており、挑戦的・創造的・融合的な構想実現を期待させるに見合った研究体制を構築し、効果的に運営されている。

電子線位相イメージンググループに関して、高額な機器導入と研究成果が現時点では結びついていないようであり、研究費の執行状況は「効果的」とは言い難い面がある。しかしながら、このような基礎科学の研究では短期間では研究成果を望めないこともあり、そのことで全体を否定的に捉える必要はないと考える。

知的財産に関しては、プロジェクト知的財産委員会を開催して、研究過程で得られる発明についても特許を出願するよう運営している。また、全研究員が参加する全体会議を2カ月に1度開催し、さらに Web 会議等を適宜活用して、プロジェクト体制の維持や進捗状況のチェックに尽力している。プロジェクトヘッドクォーターにおける研究支援や知的財産の権利化などの活動は効果的・効率的であった。

以上、研究プロジェクトの設定および運営は十分に的確かつ効果的である。

2. 研究の達成状況および得られた研究成果

2-1. X線位相イメージング

(1) 放射光顕微位相イメージング

東北大学と高輝度光科学研究センター（JASRI）のグループにより順調に計画が進行している。ここでは通常の Talbot 干渉計のみでは、空間分解能の不足が明らかとなったため、FZP を用いた結像型の X 線顕微鏡に Talbot 干渉計を組み合わせ、大視野（ $>300\mu\text{m}$ ）でサブミクロンの空間分解能を達成し高感度の高分解能三次元観察を可能にした。このイメージング手法を利用して慶應義塾大学医学部との共同研究を行い、マウス耳小骨の骨形成過程の観察画像が得られたことなど、生物学に対する新しい知見を数多くもたらすものと期待されている。なお、ここには位相画像解析グループの大きな寄与がなされていることも見逃せない。

(2) 実験室 X 線顕微位相イメージング

Carl Zeiss Microscopy 社の Ultra800 に Lau 干渉計を融合し位相イメージング機能を追加し、これに更に電子線位相イメージンググループの協力により顕微位相 CT が実施できるようになっている。原理的には非常に難易度の高いシステムであるが、着実にその成果を挙げる段階に来ている。具体的には生体（ホヤ）やタイヤ用のゴム、毛髪など多岐にわたる計測が始まっているとともに、Carl Zeiss X-ray Microscope 社の装置に本技術が搭載される可能性もある。また、このイメージング技術開発および装置開発についてはすでに論文発表されており、プロジェクト早期に実現できた装置として高く評価できる。

(3) 高エネルギー X 線位相イメージング

本開発では、高エネルギー X 線源として、構造化 X 線源を設計し製作を行ってきたが、初号機では不具合が起り、現実的な実験には至っていない。しかしこのシステムが実用化されれば、大きな構造物中に生成したボイドや密度の低い部分など構造物更新の正確な判断などにも応用が可能に

なるため、早期に原理確認を進めるべきものとする。開発の達成度は高くないが、当初目標の達成は期間内に十分可能と考える。

（４）四次元位相 CT イメージング

東北大学と JASRI のメンバーにより、順調に成果を挙げている。具体的には、軽元素からなる物質の動的変化を 3 次元的に可視化するピンクビーム 4D 位相 CT を開発し、レーザー加工（アブレーション）中の高分子の動的画像の取得に成功している。一般の装置では切断しなければ見ることのできない高分子材料の内部の変質を 3D 動画として可視化できる。従来からの X 線によるイメージングにはある程度の時間がかかるものというのが実感であったが、この技術では、秒単位で画像を解析でき、光誘起反応の詳細（熱的過程と非熱的過程の判別など）を解析するための基礎データを取れる状況となっており、その展開は今後の科学技術発展の基礎研究としてのデータを与えるとともに、化学工業分野における産業へ大きな貢献をもたらすものと高く評価できる。

（５）格子開発

KIT と東北大学により、超解像度 X 線位相イメージングの発案がなされ、それに必要なパラボラ位相格子が製作されており、原理実証に向けた段階に入っている。東北大学が開発した Gd 格子については、中性子線位相イメージングの実現を可能としたものとして重要なブレイクスルーであった。また、J-PARC における活用という主目的に加え、小型の中性子源（理研 RANS (RIKEN Accelerator-driven Neutron Source)) を用いたイメージングへのチャレンジも計画されており、中性子線位相イメージングへのさらなる貢献が期待できる。

全体としてまとめると、各グループとの横串の連携をもって計画通りに開発を推進し、上記（１）～（４）の主要テーマ毎の進捗状況についても、本プロジェクトの目的を満足するプロジェクトならではの成果を挙げており、残りの期間でのインパクトの高い論文投稿、データアウトプットおよび企業との連携による産業貢献が多く期待できる状況である。

2-2. 中性子線位相イメージング

（１）パルス中性子の特徴を活かした中性子線位相イメージング

格子開発および基本技術開発として J-PARC 螺鈿からの中性子ビームに特化した Gd 製の G2 吸収格子の高精度製作技術に関し、多くのチャレンジの結果、斜め蒸着法によるピッチ $9\mu\text{m}$ の 64mm 角 G2 吸収格子、および、金属ガラスのインプリント技術によるピッチ $9\mu\text{m}$ の 10mm 角 G2 吸収格子を実用化できるレベルに到達できたことは大きなブレイクスルーであったといえる。

未だ十分な LER (Line Edge Roughness) を確立できていないが、更に高精度な吸収格子を製作することを期待したい。また飛行時間 (TOF、Time of flight) 分析が可能な画像検出器において、中性子計数率を 10 倍向上させ、世界最高の性能を実現したことは優れた成果である。

中性子波長分析型位相イメージング開発として J-PARC からのパルス中性子を用いて、TOF 微分位相型位相イメージング法の開発を行い、優れた波長分解能での撮像を行い位相測定の精度を向上させて定量性の高い計測技術を開発している。この際には $1.5\sim 8.5\text{ \AA}$ の波長帯域において Visibility として 0.60 ± 0.04 の値を得て、これまでに他の中性子実験施設で得られた値 ($0.1\sim 0.23$) と比較して非常に高い Visibility を確保していることを確認でき、干渉計が機能することを実証している。この技術を使い、アルミニウム及びチタンの原子核が作る光学ポテンシャルを計測し、波長分析型において高い精度（定量性）を確保していることが確認されるなど、実用材料への応用も確実に視野に入る状況となっている。

（２）磁気有感型中性子線位相イメージング

磁気有感型位相イメージング技術開発として、偏極中性子を用いた磁気有感型位相イメージングに成功している。具体的には、J-PARC において、G0 吸収格子の前に中性子偏極素子とスピン反転

器を配置し、更に G0 吸収格子と G1 位相格子の間に減偏極を防ぐためのガイド磁場を挿入するなどして、システムの高度化を実施しており、これによりサンプルに対し、偏極の向きを変えてそれぞれの差（磁気ポテンシャル計測）と和（核ポテンシャル計測）から微分位相の情報を分離したイメージを獲得できている。これらから物質内部の磁気イメージングに利用可能であることが分かった。また偏極中性子を用いた磁気有感型位相イメージングについて、中性子波長分析による磁気ポテンシャルの定量評価ができる状況に到達している。

磁性材料研究への応用として方向性電磁鋼板試料についての計測が試された。この材料の磁区構造を明らかにすることに挑戦して、特に熱処理の効果について、いくつかの特徴的なデータを得ているが、定量的議論にはもう一步の検討が必要なようである。

（3） 中性子線位相イメージング技術の小型・中型中性子源への展開

本課題では、京都大学の研究用原子炉 KUR の低速中性子線評価用ポート（CN-3）において中性子線位相イメージングにチャレンジし、J-PARC の 1/10 程度の中性子強度であるにもかかわらず、約 1 時間の測定で微分位相画像の取得に成功しており、今後更に撮像時間の短縮による実用化を目指す段階にある。

全体としてまとめると、中性子 Gd 吸収格子の開発に成功した後、J-PARC 螺鈿を使ったパルス中性子線位相イメージングおよび磁気有感型位相イメージングに速やかに取り組み、これに成功した。当初計画では位相イメージングおよび CT を実証し、引き続いてスピン偏極位相イメージングに取り組む予定であり概ね計画に沿って進んでいる。研究成果は高い水準にあると思われる。

中性子イメージングは X 線イメージングと比較すると空間分解能や画質において良質な値を得ることが原理的に難しい。また J-PARC が稼働するまで国内には先端的な中性子線位相イメージング研究を実施できる施設及び装置が非常に限られていたことから、X 線位相イメージングと比較すると研究フェーズは原理実証に近い状態である。そのような状況で、当該研究グループは良く健闘していると評価する。今後、中性子線位相イメージング研究のパイオニアとしての活躍が期待される。

なお、プロジェクト期間内の技術的達成度もさることながら、本プロジェクトが目指す所であるマルチスケール量子ビーム位相イメージングプラットフォームの実現に向けた道筋を示し、そのための布石をどのように打つかという点にも注目したい。デバイス開発や磁石開発など比較的市場規模の大きな分野や戦略的に国際競争力を育成すべき分野へ向けて、残された研究期間で当該技術の良い応用例を多くアピールして欲しい。

2-3. 電子線位相イメージング

電子線を用いた位相イメージングは、本プロジェクトで推し進めるマルチスケールでの位相イメージング手法の中で、最も高い分解能での材料の可視化技術を担っている。生命科学の分野において、生体組織に代表される軽元素材料で構成された対象物を、より簡易的に高コントラストでイメージングする手法確立への期待は高い。本グループは、プロジェクトの性格に即し、電子顕微鏡をベースに全く新しい技術発想を基とした三つの装置開発（①FZP 位相差 STEM、②レーザー位相差 TEM、③ミラー位相差 TEM）を計画し、独自の位相制御法による定量性の高い高コントラスト観察法の確立に取り組んだ。

（1） FZP 位相差 STEM

FZP 位相差 STEM では、相反定理に基づき、位相変調のための FZP を照射系に挿入することで、電子顕微鏡のポールピース形状（ギャップ）によるメカ的な制限を回避し、参照波と透過波の強度をバランスさせた「像コントラスト最大化」を特徴とする電子顕微鏡の開発をおこなった。この過程で世界初の FZP を用いた位相差 STEM 像の獲得に成功している。この技術においては、位相板を照射系に配置し部分的に位相を変調してグラフィットの像を STEM で撮影し、その高低に対応

したコントラストを可視化できている。ただしこのデータに関しては未だ定量性のある評価ができていない。

一方、CCD カメラを用いて SiN 膜のエッジ情報について、FZP 像をもとに反復位相回復を実行し SiN 膜エッジの STEM 像を得ることに成功している。ここではその位相変化の値に対して、定量性が確認されている。

現在、高感度・高速カメラを用いた、試料上のプローブ走査位置での FZP 像の収集と反復位相計算を組み合わせた「二次元定量位相再生像」のイメージング手法の条件設定を行う段階に至っている。プローブ位置での電子回折パターンを計測し四次元のデータを取得する方法は、diffraction imaging や 4D-STEM と呼ばれるが、本開発は、各プローブ位置での FZP 像について、特に感度の高い高速カメラ（Gatan 社製 K2 カメラ）を使用した取得法の確立に挑んでいる。Gatan 社製の K2 カメラは、ダイナミックレンジや感度（検出量子効率）について特に高い性能を有することから、本手法は、電子線に対して特に脆弱な試料への積極的な応用も十分に期待できる構成である。

これらの経緯から、現行のシステムの最適化、解析アルゴリズムの変更など多くの開発課題が残されているが、方針は明らかにされており、比較的短い期間で実用的なデータを獲得できる見込みがある。

他方、本技法で得られる定量化の物理的意義については、先行技術である電子線ホログラフィーなどとの比較検討を踏まえた、十分な議論や実験的検証がプロジェクト期間内に必要と考える。例えば、電子線ホログラフィーでは、観察試料の表面近傍の真空領域を基準とした試料内部の静電ポテンシャルを観測する。定量には、試料膜厚（試料加工に伴うダメージ層の考慮を含む）の高精度測定や試料のディフラクションなど位相差を与える要素を考慮したイメージング手法が必要である。一方、本プロジェクトで開発中の顕微法による電子波と透過波との干渉による位相コントラスト像から得られる位相差像において、観察対象物の定量的な位相像が即座に取得できるとすれば、本技法の物理的意義は特に優れたものになり得ると考える。また、本技法は、既存の STEM 装置（構成）の大きな改造なく、開発要素のインストールが可能であること、FZP の耐性（物理的な劣化やチャージアップ）の向上、操作の簡便性（既存 STEM 装置に高コントラストモードのファンクションとして付加可能）などの観点から、学術分野はもとより生体医療の分野での活用が期待される。

（2） レーザー位相差 TEM

このシステムはレーザーの電場を用いて電子ビームの位相をコントロールするというもので、その発想は先駆的かつ斬新であり、装置の構成を本プロジェクトより特許化した。

しかしながら、レーザー電場による電子ビームの位相変調については、すでにビーム物理の世界で古くからチャレンジされているものの十分な制御性が確保できない状況が続いており、開発を完了するには多くの解決すべき問題が存在する。当初設計通りに電子集束化が達成できているかを実験的に検証してから、今後の継続の是非を判断しても良いのではないかと思われる。低エネルギー電子のバンチングは高度な技法が要求されるため、低エネルギー電子を扱っている電子加速器の専門家や電子銃開発を行っている研究者などにアドバイスを求めることも一案であろう。そのため、このシステムの構築には今後 5 年を単位とした計画を立案して欲しい。

（3） ミラー位相差 TEM

このシステムは電子ビームを静電ミラーで反射し位相差を使ったイメージングを実現しようというものである。あたかも電磁波に対するマイケルソン干渉計のごときシステムに近い。しかし、フェルミ粒子である電子については、通常一方的に散乱過程が支配的になるため、静電レンズで位相を自在にコントロールすることは極めて困難かと思料する。この困難をどのように乗り越えるのが課題であり、難易度が高いため、いち早く開発を断念したことは決して悪い判断ではなかった。他方、実験を開始するためのデバイス、器材などの準備立てに得たノウハウや知見は、以後の装置開発への気づきとなる要素を多く含むことから、ドキュメント化するなど後世に残すべき成果であると考えられる。

全体としてまとめると、新たな課題にチャレンジする姿勢が伺え、本プロジェクトの推進に対する気概もあり好ましいと感じるが、研究テーマ設定の大きさに対して研究体制が十分でなく、道半ばの印象は否めない。非常にチャレンジングな研究をしているがゆえの現状と思われる。X線位相イメージングや中性子線位相イメージングでは光学素子の配置にある程度の自由度が許されていたが、完成度の高い市販の電子顕微鏡を改造することは非常に難しいことは理解できる。(1)～(3)のうち(1) FZP 位相差 STEM 開発は比較的順調に進んでおり、研究成果は高い水準にあると思われる、残された研究期間内に目標を達成すべく尽力頂きたい。

なお、研究の大きな進展がなかったため論文発表は十分でないようだが、特許の出願は多数行っており、その点は評価できる。

2-4. 位相画像解析

(1) スパースビューCT

圧縮センシングを用いて、少ない方向数の投影データで CT を実現することを目標として開発を実施した。この中には3つの方法が含まれる。

①高速 Total Variation(TV)正則化技術は、新しいアイデア (Filtered Back-Projection (FBP) 法組み込み型反復法、Row Action 型反復法) を組み込むことで収束速度 100 倍を達成している。②第2世代圧縮センシングに基づく画像再構成で、正則化項に任意の非線形平滑フィルターを用いた圧縮センシング(数理工学的手法を極めて巧みに持ち込むこと)により画質性能の向上に成功している。③確率アトラス CT は確率アトラス MAP 法という機械学習法を導入し新しい圧縮センシング法を提案し、いくつかの画像取得を実現している。

(2) インテリア CT

本手法は ROI (region of interest) のみに X 線を照射して CT を実現する方法で、この中で3つの先駆的画像再構成法を開発している。

①ROI の周辺部で区分的に一樣な先験情報を利用し画像を再構成する方法で特許申請済みである。この方法は ROI 内の任意小領域で区分的に一樣であれば解が一意に決まることを証明し、ROI の縁のみに区分的に一樣な制約をかけ、滑らかな濃度変化やテクスチャーを保存し高精度で ROI 画像再構成を可能とした。②部分的な完全投影データを利用する厳密解法で特許申請済みである。この方法では、通常のインテリア CT 投影データと、ある角度範囲から物体全体をカバーする完全投影データを測定し、これらを組み合わせることで厳密な画像再構成を行うものである。この開発に際しては、角度範囲がゼロでない限りいくら小さくとも画像再構成問題の会は一意に決まるという数学的に極めて興味深い事実も明らかとなっている。③ハーフインテリア CT では数学的に厳密な画像再構成を可能にする別方法として開発を実施した。通常のインテリア CT のみでは厳密な ROI 画像再構成は不可能であるが、この方法では検出器の右側あるいは左側を拡大して測定を行うことで、投影データの右端 (あるいは左端) をカバーするようにして、物体の短軸方向の角度で投影データ右端 (あるいは左端) が完全に映るように拡大することで解が一意に決まることを証明している。

(3) 位相イメージング画像処理

位相復元、位相アンラップ、縞走査法、位相 CT 同時再構成法などの位相復元の新手法を、最新の情報数理の手法を導入して開発している。

①干渉縞画像からの位相復元法については一枚の干渉画像から高精度の位相復元を可能とする数理モデルを確立した。②位相アンラップ法については高い厳密性と実装性を確保した。③位相 CT 同時画像再構成法については位相 CT において、測定データから位相回復を行わずに吸収・位相・ビジビリティ画像を直接再構成する方法を開発した。

これらすべてにおいて当初の予定通りあるいは当初予定を超える速度で達成した。

全体としてまとめると、非常に高速に収束する逐次再構成アルゴリズムや、ごく限られた投影デ

ータからの高画質な画像再構成法の考案など、極めて大きな進展があり、目標を超える達成度と言える。さらに位相 CT 装置のデータへの適応を図り、効果の検証まで至っている。以後の評価実験の積み重ねにより、飛躍的な装置性能の向上はもとより、材料の超高度且つ、高信頼性の評価解析を実現するに余りある成果であると評価でき、数多くの論文発表と受賞が優れた成果であることを証明している。当該グループの研究成果を、他の量子グループから今後出てくるデータに適用することで、一層の発展が期待できる。

なお、論文および学会・会議での発表や知的財産権の取得という点でも、十分行われたと言え高く評価できる。

2-5. プロジェクト全体

(1) X線位相イメージングについて

このX線位相イメージングではまず技術開発として、次の3つのカテゴリーを挙げた。①四次元位相 CT、②顕微位相 CT、③超解像 X線イメージング (KITにて実施)、また、これらに関わる装置開発目標として①顕微位相 CT 装置、②高エネルギー位相イメージング装置を挙げ、これらを有機的につなげ、顕微位相 CT においては原理的にナノメートルの解像度を持つ CT 開発が可能であることを示すなど、目標計画の達成に目途をつけている。これまでなかなか目途の立たなかった高エネルギー位相イメージング装置についても、線源開発に問題が残っているものの、近いうちに実現可能であるので大きな問題はないと考える。なお、X線位相イメージングの技術開発に関わるものについては、順調に成果を挙げており、こちらも大きな進展を期待できる状況にある。

(2) 中性子線位相イメージングについて

この中性子線位相イメージングでは、①位相イメージング、②スピン偏極位相イメージングの2つのカテゴリーを挙げ、その技術開発を目標に計画を実施した。実現には高強度の中性子源が必要であったが幸い J-PARC が稼働し、実質的な研究が可能となったことと相まって、その目標設定、計画に高い具体性があるものとなった。またこの計画において吸収格子の作成 (Gd) での高アスペクト・大面積化を可能とする大きなブレイクスルーもあり、実材料の磁性情報獲得と材料開発に必要な定量性のあるデータ取得などについて大きな進展が期待できる。

(3) 電子線位相イメージングについて

この電子線位相イメージングでは、像コントラストを最大化し、定量性のある画像を得ることのできる3つの新規位相差電子顕微鏡 (①FZP 位相差 STEM、②レーザー位相差 TEM、③ミラー位相差 TEM) の開発を目指したが、現実的に実現が約束されているシステムとしては、①FZP 位相差 STEM のみと考えられる。多くの分野の専門家の技術を結集する必要があったと思われるが、その体制を実現できなかったことが悔やまれる。

FZP 位相差 STEM の実用化だけでもこの ERATO 研究の大きな柱となり得るものであり、このイメージングに注力してもらえれば十分な成果を挙げると考えてよいと思料する。

(4) 位相画像解析について

この位相画像解析では、①スパースビューCT、②インテリア CT、③位相イメージング画像処理の大きな3つの研究開発を推進している。それぞれ数理学的手法や境界条件の変更などを駆使し、極めて高速に画像の再構成を可能とするなど、目標設定とその実施については、ほぼ計画通りに進んでおり、その成果は高く評価できる。この位相画像解析グループの存在抜きに本プロジェクトの成功は無かったと思料する。位相解析グループの研究成果を、他の量子グループから今後出てくるデータに適用することで、一層の発展が期待できると考える。

(5) イメージングプラットフォームについて

当初構想では1つの試料系におけるマルチスケールイメージング計測およびプラットフォーム形

成を目指していたが、各種量子ビーム位相イメージング技術の完成度は現状では様々なレベルにあり、限られた期間内で全体構想を具現化するには多くの不確定要素がある。残された研究期間内でマルチ量子ビーム位相イメージング装置開発と位相イメージング技術の実証を加速し、当初構想の具現化に向けて尽力して欲しい。

一方で、イメージングプラットフォームの実現に向けて様々な工夫を重ねて取り組んでいる様子が見られ、研究総括の真摯な姿勢が感じられることを高く評価したい。本プロジェクトのプラットフォーム化は、電子線、X線、中性子線を用いた位相イメージング法の相互的理解を深め、各プローブの強みを十分に活用した解析領域（サイズ・分解能・解析次元・時間スケール含む）の範囲を、ユーザに提示できる体制の構築であり、意義深い取り組みであると評価できる。今後は位相再生をキー技術とした材料のマルチスケール計測のアプリケーションの発信に期待したい。

全体としてまとめると、4つの研究グループによって進められている本プロジェクトは、概ね、百生研究総括のリーダーシップによって順調に進展しており、研究の達成状況および得られた研究成果は高い水準にある。

3. 研究成果の科学技術、社会・経済への貢献

3-1. 科学技術への貢献

X線位相イメージング技術については、開発項目それぞれにおいて極めて多くの先駆的なデータ取得に成功している。①放射光顕微位相イメージングでは、高い空間分解能で高感度3次元観察を可能とできるFZPとTalbot干渉計を組みわせるなど、医療応用への道を拓いている点は高く評価できる。また高分子化学への新たな寄与（ポリマーの性能発現のメカニズム解明など）も考えられる。②実験室X線顕微位相イメージング技術開発では、空間分解能50nmのX線位相顕微鏡を開発し、実験室X線顕微鏡としてこれまでにない高空間分解能の装置であり、これはX線を用いた材料分析を行う上で学術的に非常に重要な顕微鏡である。すでにCarl Zeiss Microscopy社との共同研究で、この分野に新しい装置導入がなされようとしており、成果の素晴らしさを明確に示している。③高速放射光位相イメージングでは、これまで現象論と理論解析しか行えなかった、高分子のレーザーアブレーションを例にとり、その状態変化を秒単位で確認できる手法を確立したことは、関連量子ビーム技術の発展に大きな寄与をするものと考えられる。④格子開発ではドイツKITとの共同研究により超高解像度X線位相イメージングのためのパラボラ位相格子を製作するなど、新たな展開を狙える状況にある。また、中性子用Gd格子の製造にも成功し、中性子線位相イメージングに一層の支援がなされるようになっており、プロジェクト全体の成果を最大化できる状況にあり、新しい分析技術への期待が高まっている。

中性子線位相イメージング技術については、①中性子波長分析型位相イメージング開発では、5Åを中心に高いVisibilityを達成し、金属の原子核が作る光学ポテンシャルの計測に成功するなど実材料への応用も確実に視野に入っている。②磁気有感型中性子線位相イメージングでは、中性子をスピン偏極することで、材料の磁気ポテンシャルと核ポテンシャルを計測し、物質内部の磁気イメージングを可能としている。また更に、中性子の波長分析による磁気ポテンシャルの定量評価も可能となっている。これらの技術により、種々の磁性材料の精密な測定（例えば磁区構造）が可能となり、種々の磁性体の開発などへの貢献が期待できる。

中性子吸収格子の開発に成功したことや装置の優位性もあり、我が国の中性子線位相イメージング研究の中核となるべく、引き続き積極的に研究を牽引して欲しい。

電子線の位相変調を活用したイメージング技術については、先行開発として電子線ホログラフィー（Electron holography, EH）がある。EHは、材料固有の内部電位の計測や試料内外の電場・磁場情報を二次元に可視化する手法として、種々材料の機能の評価に活用されているが、専用性の高

い電子顕微鏡を用いるほか、干渉縞（ホログラム）の撮影と像再生（ホログラムから位相像を得ること）の二段階のプロセスを踏む必要がある。また、観察目的によっては、極めて均一で且つ、観察領域の近くに真空領域を保持した試料作製が必要となる。一方、本プロジェクトで開発中の位相差 STEM は、一般に広く普及している汎用 STEM 装置への導入が可能であること、観察する対象材料への特殊な加工などを必要としないことなど、EH による位相計測に比べて利便性が高い。FZP についても、装置への導入後は長期に渡り安定して使用可能とのことで、本開発は、STEM 装置の使用目的（観察対象物）を広げている。これは、顕微鏡装置メーカーの十分なシーズになり得る。また、高コントラスト観察手法としてツール化も十分に期待できる重要な要素開発である。

ソフトマテリアルに代表されるような、基本的に電子線に対してコントラストが付き難い材料の観察に対して、最近、微分位相コントラスト法（Differential Phase Contrast, DPC）の活用がみられる。これは電子線の偏向を多分割された検出器で受け差分を取るもので、すでに STEM 装置へ取り付けられる製品として市販されている。今後、本開発と対比され得る可視化技術と考えらえるが、ポリマー材料の高コントラスト観察などにおいての定量性の検討は皆無で、本開発で目標としている定量性を保持した技法に大きなアドバンテージがある。

FZP 位相差 STEM のもたらす情報がまだ確実でないので、評価できる状況にないが、電子線位相イメージンググループは、本手法の三次元解析への拡張も念頭に組み、高分解能像観察などの STEM 本来の特長と本開発の優位性を最大限に活かすことでのみ達成され得る「三次元定量位相イメージング」ができれば、本プロジェクトでの電子線位相イメージングの主目的の達成はもとより、生命科学の進展における大きな貢献に寄与するものと期待される。

位相画像解析技術については、本プロジェクトが開発した技術は国内外の先行研究の成果をはるかに凌駕しており、これらの技術は日本の CT 技術の基盤となるだろう。このグループが生み出している CT 技術は位相画像にとどまらず、一般的な、投影からの再構成問題に適用可能と思われ、すべての領域に共通化できるもので、今まで見られなかった画像が瞬時に取り出せるなど、医療の分野や材料科学の分野で、物体の照射ダメージを最小化した状態でデータを取り込むなど、その実用性には疑いの持ちようがない。

3-2 社会・経済への貢献

実験室 X 線顕微位相イメージング装置は既に製品化を目指した研究フェーズに入っており、本プロジェクト成果の材料開発分野における社会・経済への貢献が顕在化する時期も遠くないであろう。世界の X 線装置に大きな飛躍をもたらすことが期待される。

中性子線位相イメージングにおいても実験室 X 線顕微位相イメージング装置開発をロールモデルとして、成果の社会実装に向けた取り組みなどの良い点を踏襲していくことを期待したい。研究フェーズがやや基礎寄りであることと、現状の小型中性子源は未だラボサイズとは言えず、多くの点で X 線とは状況が異なるのは確かである。しかし様々な応用事例を示しつつ、アウトリーチ活動と人材育成にも意識を向けて、研究を継続することが社会貢献につながることもまた確かであり、引き続き尽力して欲しい。

電子線位相イメージングにおいては社会・経済への貢献の一つとして、病理検査への適用が期待できる。ウイルスなどの電子顕微鏡観察では、染色によりコントラストを増強させる手段が取られるのが一般的であるが、無染色で簡便に高コントラスト像が取得できれば、染色によるアーティファクトや特に前処理が不要となり、検査業務における高効率化、高精度化に寄与できる可能性がある。

本研究で開発した要素技術や装置は現時点では最先端の物であることから、今後暫くは社会実装のための汎用化研究を、民間企業と共同で継続することが必要となる。社会・経済への貢献は今後の研究継続を経てさらに顕在化されるものと思われるが、上記以外にも、生体に関する詳細情報（診断など）を得ることができ、人類の QOL を格段に向上させることができるようになることが期待される。また、材料開発分野では、今まで試行錯誤でモノづくりをしていたものが、原理的な解明（物性はどこから発現しているのかなど）が可能となり、より良いモノづくり、より良い社会（環

境負荷の少ない）が実現できると考えられる。

したがって、本プロジェクトで開発された種々の技術が実用化された場合は、経済効果も大きく、医療費の低減、モノづくりにおけるコストの削減や環境負荷の低減などへの貢献が見込めるだろう。

4. その他特記すべき事項

KIT に若手研究者を派遣し、実際に X 線を用いた微細加工（LIGA）プロセスによる格子開発を実現するなど、人材育成に寄与している。しかしながら、大学でなく研究所が主体となったグループが多いことから、若手研究者の参画が少なく、結果として若手研究者育成は十分には進んでいないように見受けられる。百生研究統括をはじめとした、世界的に著名な研究者が参画する本プロジェクトは、研究に身を投じる（投じたい）若手研究者の卵たちにとって間違いなくこの上ない、エンカレッジされる「場」でもある。今後も人材育成に取り組むことを期待する。

研究に関し、過去 2 度のシンポジウムを開催し、また、2019 年秋には国際学会を主催するなど、技術の発信を行っている。また展示会や展示会併設の講演会などでも技術発信を行っており、相当な努力が認められる。今後更に国内外にこの優れた技術の発信が望まれる。本プロジェクトにしかできない素晴らしい装置開発の成果を分野外の研究者あるいは一般の人々に理解できるような解説ができる場を増やして欲しい。

KIT との国際共同研究や、Carl Zeiss との機器開発を通じ、広く海外にも当該研究の素晴らしさを示し、世界から注目される技術開発を構築しつつある。格子開発にカールスルーエの KIT を取り込んだことは研究活動における国際化の必要性に対する意識の高さが表れている。KIT の参画によって研究チーム全体に広がりが出てきてチームの活性化に効果があったものと察する。

5. 総合評価

5-1. このプロジェクトが達成した成果の素晴らしい点・特筆すべき点とその理由

まず、考えられないほどのアスペクト比の大面積格子の作成を実現し、種々の位相イメージングを実現していることは、基礎的な技術開発であるとはいえ高く評価したい。更にこれらを用いることで、これまで実現できなかった種々の画像を容易に取得できるようになった。これらにはそれぞれ次のような特筆すべき点がある。

X 線位相イメージング技術では、X 線位相差顕微鏡において、放射光施設だけでなく実験室顕微鏡においても空間分解能 50 nm の画像獲得に成功した。これにより、学術的な利用が広まり、材料研究においてはこれまでにない発展が見込まれる。また高時間分解能で 4D 位相差顕微鏡の開発にも成功していることは特筆すべき成果である。生体の軟組織の精密 CT 画像が容易に取得できるようになり、病気の診断、問題個所の早期発見から、高分子化学への新たな情報獲得（高分子構造の 3D 画像やレーザーアブレーションメカニズム解明など）と、情報が十分に取れなかったソフトマター研究において、従来では取り扱えなかった情報を正確に我々の手元にもたらすという画期的な成果を挙げている。

中性子線位相イメージングでは、これまで正確な 3D 情報が得られなかった、物資中の磁区構造を分析できる可能性が出てきており、種々の磁性材料の磁化などに関する詳細情報の獲得から、新材料開発へとつながる基礎ができ始めたと考える。物を動かす際には基本磁場が大きな役割を果たしており、今後の動力関係技術の高度化につながる技術として、さらに発展が期待される。

電子線位相イメージングでは、FZP を用いた位相差 STEM が実現できる目途がついており、これまで計測できなかった極めて微細な構造を特定できる可能性が出てきた。この技術がどこまで実用的なデータを与えるのか不明確ではあるが、この技術革新により、ナノメートル構造の科学に新しい視点を与えるかもしれない。そのような観点からこの技術の熟成を期待したい。

位相画像解析グループの成果は極めて高度な情報数理、数理科学の手法を駆使して、従来法よりも 100 倍以上収束速度を高速化し、短時間で精度の高い CT 画像を取得するアルゴリズムを確立し、

ごく限られた投影データからの高画質な画像再構成法を考案し、実際に画像データに適用して実証している点は見事な成果といえる。この技術の転用先は極めて広く、医療の現場、モノづくり、科学実験など社会の発展を支える広範な分野に大きな波及効果を持つものと考えられる。

なお、今現在想像もできていない応用もあるかと思うので、成果を広く発信し、種々の分野におけるブレイクスルーにつなげる努力が更に成果の最大化につながると思われる。

X線や中性子、電子線など、各種量子ビームを用いた位相イメージング研究はこれまで個別に行われてきたが、本プロジェクトではこれを統合してマルチスケール量子ビーム位相イメージング計測プラットフォームの形成を目指した。また、産業利用を目指して、大型施設で開発した技術をラボへ実装する研究を並行して進めた。これらの研究活動はこれまで科学技術界の個別要素技術であったものをパッケージして研究分野に格上げする動きとなった。研究グループの構想力と先駆者としての行動力を評価する。

5-2. このプロジェクトの社会的・経済的インパクトとその理由

市場規模と競争力を考えると、実験室顕微位相 CT 装置が社会・経済へ最も大きなインパクトを与えるものと思われる。実験室 X 線位相差顕微鏡の企業への技術移転も検討されているが、これが進めば、開発装置が広範に利用され、材料分析において理解が進み、材料開発の飛躍的な進歩が期待できる。

中性子線位相イメージングが社会・経済に与えるインパクトは現時点ではやや不透明であるが、磁性やスピン偏極を利用した位相イメージングおよび分析技術の産業応用を目指すことが正道であろう。スピンドバイスやバルク磁石などの、製品に近い状態の試料を、実際に稼働させた状態で可視化して、同時にその性質を分光や粒子計測によって分析する技術を確立できれば、産業界から多くの関心を得るであろう。電子線位相イメージングは生物試料の空間空隙構造を高いコントラストで可視化できるため、安定して画像取得できる装置開発に成功すれば大きな市場を確保できる可能性がある。

新しい画像取得が可能となったことで、今まで診断もできなかった体の不具合が何によって引き起こされているのか、といったことや、物理・化学反応の進行がどのように進むのかといったミクロな現象からマクロな効果への橋渡しのような未解明の事象解析など、社会が要請している諸問題をこのプロジェクトによって解決できると考える。すなわち、医療においては、明確な治療方針を打ち出せるだけでなく、その治療に必要なソフトマターの設計などへも転嫁が期待され、更に社会インフラとしての種々の構造物の非破壊検査の精度の圧倒的な向上により、航空機の安全性確認や発電施設、橋梁、建築物の健全性確認や輸送・交通システムの安定維持を目指した検査にも標準的な方法として取り入れることが可能であるため、社会・経済へのインパクトは極めて大きい。

上記以外にも、社会的・経済的インパクトをもたらすものと期待されるが、本研究は物理系の基礎研究に分類され、また用いる光子（エネルギー）もある程度特殊なものであるため、現時点で明示的に記述することは困難である。しかしながら、ノーベル賞級の基礎研究の成果がやがては社会に影響を与えていくように、本研究もまた、その可能性は十分にあると考える。

5-3. このプロジェクトが達成できなかった点（今後期待する点）とその理由

電子線位相イメージング技術については極めて高度な電子線制御技術の確立が必要である。この技術の実用化には更に人材を追加して多くの知識と経験をもとに開発を進めてもらいたい。当初の計画から大幅な遅れがあり、残り期間のラストスパートでの成果に期待する。電子顕微鏡の位相抽出は、まだまだ一般解析技術として受け入れられている状況ではなく、本プロジェクトを機に、位相変化を捉える技術の革新性と重要性、簡便性、利便性が、より汎用化技術として広く普及する大きな「芽」になることを期待する。

位相画像解析グループは目ざましい成果を示したが、他のグループのデータにその技術を適用していくことで、ERATO のグループ研究として進めた意味がより明確化できると考える。

一つの試料系におけるマルチスケールイメージング計測およびプラットフォーム形成については、

意義や有用性、他技術に対する優位性などを示すなど、残された研究期間内でマルチ量子ビーム位相イメージング装置開発と位相イメージング技術の実証を加速し、当初構想の具現化に向けて尽力して欲しい。

また、今後の研究発展を担うのは先駆者の意思を受け継ぐ後継者の質と量と思われる。研究プロジェクトにおける人材育成は非常に難しいハンドリングが必要とされる上、それに専念できる時間的余裕がほぼないものと思われるが、残された期間内でなるべく多くの若手研究者に参画する機会と刺激を与えることを希望する。

5-4. 上記以外の全体所見

非常に優れた成果を多数挙げており、この研究体制を更に続けて維持して欲しい。プロジェクト終了後も本プロジェクトでの成果を国内外に積極的に発信し、各種プローブと材料との相互作用による位相変調がもたらす革新的成果を、より世の中に一般化させる方向で技術還元することが期待される。

これまで、装置開発に重きを置いてきたため、現時点での論文数が若干少ないように感じられるが、これからの期間で、開発装置を用いた応用研究による論文数の著しい増加が見込まれる。

以上を総合し、本プロジェクトは戦略目標「選択的物質貯蔵・輸送・分離・変換等を実現する物質中の微細な空間空隙構造制御技術による新機能材料の創製」の達成に資する成果が得られていると評価する。

以上