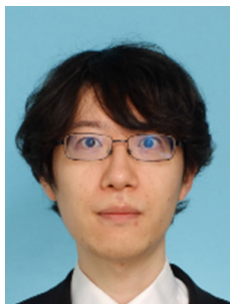




<第 10 回>

微細加工準結晶パターンを利用した超高分解能計算機ホログラム技術の実証 ～ナノテクノロジープラットフォームにおける大学を移籍したばかりの若手研究者支援～

北見工業大学 工学部 電気電子工学科 杉坂 純一郎,
同大学 研究推進機構 産学官連携推進本部 知的財産センター 三井 良一
北海道大学 NPJ 微細加工プラットフォーム 大西 広, 松尾 保孝
ナノテクノロジープラットフォームセンター 産学官連携推進マネージャー 北海道・北東北担当 科学技術振興機構 (JST) 東 陽介



(左から) 北見工業大学 杉坂 純一郎, 三井 良一, 北海道大学 大西 広, 松尾 保孝, JST 東 陽介



1. はじめに

ナノテク分野の最先端装置を企業や大学研究者に分け隔てなく利用できるようにする機器共用事業・文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業（以下、NPJ）がスタートして5年が経過した。全国各地をネットワークで結んだ26実施機関[1]の装置利用の利便性は益々向上し、NPJは広く認知されている。私自身は科学技術振興機構（JST）の産学官連携推進マネージャーとして担当地域で活動し、現場の声に耳を傾けニーズを把握し、地域の他機関と連携してNPJ事業の啓発に努めてきた[2]。地域中小企業や若手研究者から「大学の先生は敷居が高く話にくいイメージがあるが、中立的な立場であるJSTのマネージャーが仲立ちしてくれると話しやすい」、「自大学以外の装置をJSTのような第三者のマネージャーから紹介してもらえると非常に安心だ」等々の言葉をいただき、大きな励みとなっている。

利用増進活動を通して見ると地域ごとに歴史的経緯や地理的特性に合わせて、それぞれの事情に即したイノベーションエコシステム[3]が構築されつつある事がわかる。私が活動をしている北海道・北東北地域では必然的に遠隔地とのやり取りが多くなり、潜在ユーザーとこまめに

会うことは難しい。そこで、JSTがこれまでの地域活動で蓄積してきたノウハウを活かして各地域のイノベーションエコシステムを構成する機関のキーパーソンとの連携関係を深めることで潜在ユーザーの掘り起こしを行ってきた。

本稿はNPJ支援の中で地域大学知財担当者との連携により若手研究者を支援した事例で、大学を移籍したばかりの若手研究者が、実験環境が充分整わない中、NPJを活用する事で迅速に実証データを得て特許出願に至ったものである。



2. 地域大学知財部門との連携

これまでの活動では、大学研究者に研究内容を直接確認してNPJを紹介する機会を作る以外に、企業との共同研究に重要な要素となる特許出願を扱う大学知財部門とも意見交換をしてきた。その中で、「最先端の材料や手法の発明に関する特許出願時に、実施例データが必要であるにもかかわらず、自大学の装置では十分なデータが取れない場合がある。そのような際にNPJ利用を検討したい」との話を耳にする事が多かった。例えば、新規開発した特殊なナノファイバー材料の物性評価や、最新の微

細加工や微小領域の検査手法に関する理論を考案した際、その理論が正しいかどうかを実証するためには実装置を使った検証が必要である。特に微細加工関連の研究開発ではクリーンルームが不可欠であるが、そのような高価な装置とその維持には莫大な経費がかかるため、地域大学で関連設備を保持するのは難しい場合が多い。そのため、装置を持つ他大学と共同研究が組めなければアイデアのみで終わってしまうケースもあるとの事であった。

そんな中、北見工業大学の知財部門で活躍されている三井氏より「微細加工関係の新しい理論に関する発明届がでている。しかし、理論のみなのでNPJの微細加工装置を使って、実験的に特許の実施例データを取る事は可能だろうか？」との相談があった。その発明届の届出者、杉坂氏は関東の大学から北見工業大学に赴任してきたばかりの若手研究者で、実験設備が整わない中、光の回折限界を超える超微細加工手法について理論を中心に研究を進めていた。



3. ホログラムを用いた光の回折限界に匹敵する微細加工技術の可能性

杉坂氏は、効率的な光・電磁界解析手法の開発、フォトマスク・回折光学素子・光導波路の設計、散乱光計測システムの設計等に関する研究を手掛けている。その中で、ホログラムを使った微細加工技術に関する研究で発明届を出していた。ホログラムは、物体の3次元像を記録し、再生表示する技術である。図1に示すように、計算機内で設計されたホログラム（計算機合成ホログラム）を用いることにより、現実には存在しない任意の物体の像を作り出すこともできる。そのため、単に物体形状の記録にとどまらず、その集光効果を使って微細加工等、幅広い分野への応用が期待されている。

現在、ホログラム技術を用いて微細な像を生成し、微小物体を操作する光ピンセット技術[4]や、物体に複雑な形状を加工する技術[5]の開発が進んでいる。これらの技術も含め、実験的に像を高分解能にするためには、大型対物レンズとの併用が必須となっており、装置の大型化・

高コスト化が問題となる。そこで、杉坂氏はホログラムを用いて微細な像を生成できる新しい技術の開発を行ってきた。その中で、準結晶の幾何学パターンが光を特異な分布に回折させる性質を利用して新しい計算機合成ホログラム（準結晶ホログラム）を考案した（図2）。この準結晶ホログラムは、金属薄膜に微細な円形開口を加工するだけで作製でき、ホログラム単独で光の回折限界に匹敵する分解能で任意の像を生成できる。杉坂氏は既に数値シミュレーションにより、像が生成できることを確認している。しかし、数値シミュレーションのみによる実証には限界が懸念された。例えば、光（電磁場）と金属薄膜の近接場相互作用、円形開口の形状・サイズのばらつきが像生成に及ぼす影響などであった。杉坂氏と三井氏の要望は、NPJにある最先端の微細加工装置を用いて準結晶ホログラムを実験的に試作し、設計した構造が、装置の加工精度の範囲内で正しく像形成できることを確認できないかという事であった。

十分に高い解像度の計算機合成ホログラムが開発できれば、様々なシステムの高精度化・軽量化が期待できる。図3には期待される応用例を示した。例えば、フォトリソグラフィに应用することで、マスクや数十枚のレンズ系が不要となり、任意の微細な回路パターンを、1枚の計算機合成ホログラムで生成できる可能性がある。また、

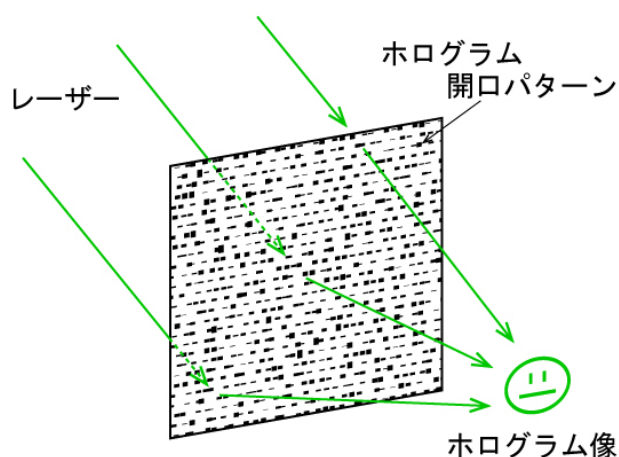
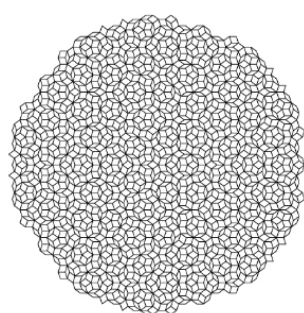


図1 ホログラムの原理



準結晶パターン (上面)

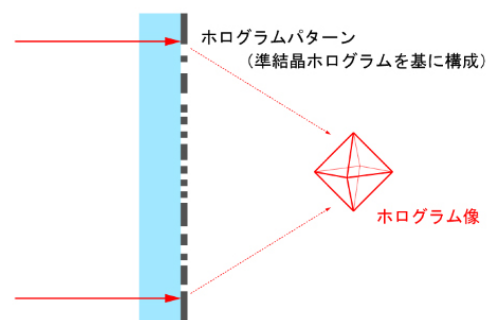
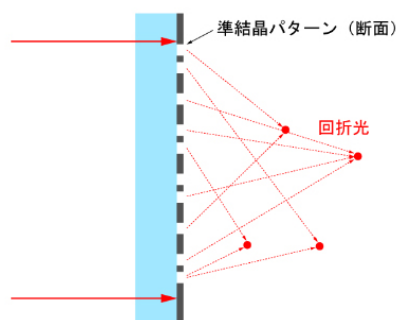


図2 計算機合成ホログラム（準結晶ホログラム）の概念図

準結晶ホログラムの特長の一つに、可視光以外の電磁波（例えば、マイクロ波、テラヘルツ光、X線）のホログラムが容易に作製できるという点がある。準結晶ホログラムは、レンズのように透明な物質を使って、光を屈折させる必要がないためである（電磁波の波長帯によっては、透明な物質が存在しない）。さらには、光集積回路内の膨大な数の光配線を数枚のホログラムで集積化し、光ディスクから並列データを読み出したり、微小な生体細胞や化学物質の複雑な領域に合わせて光照射するなど様々な応用が期待される。



4. 北海道大学微細加工 PF への相談と試行的利用（FS）の活用

杉坂氏の計算結果をそのまま実現するためには、10nm精度で数万個の円形開口を約1mm四方内というかなり広い面積に正確に加工する必要がある、トップレベルの微細加工技術が要求されると思われた。その一方で、杉坂

氏は、前任地で微細加工関連の装置の経験があり、必要なデータやプログラムを自身で書くこともできるとのことであった。そこで、まずは北見工業大学から最も近く、類似構造の加工経験があるNPJ 北海道大学・微細加工プラットフォームの松尾氏に相談した。様々な予備検討を行った結果、最終的に同大の大西氏が管理している加工装置（スパッタ成膜装置、電子線描画装置、ドライエッチング装置）での実施提案を受けた。

上記提案を受け、1回の面談の後、メールのやり取りに加えて北海道大学が持つWeb会議システムを使って（図4）実験の進め方等について相談した。

技術的な側面以外にも問題はあった。当時、杉坂氏は大学を移籍したばかりで科学研究費補助金（通称：科研費）への予算申請も考えられたが、より短時間でスタートを切るためNPJの事業である「試行的利用制度（以下FS）」^[6]を紹介した。FSは、提案内容が実施機関の了解を得て第三者審査委員会の審査を通過すれば、旅費や機器利用料が補助される制度である。資金が不足する若手研究者や地域企業にとっては非常に有益な制度である。本件は、松

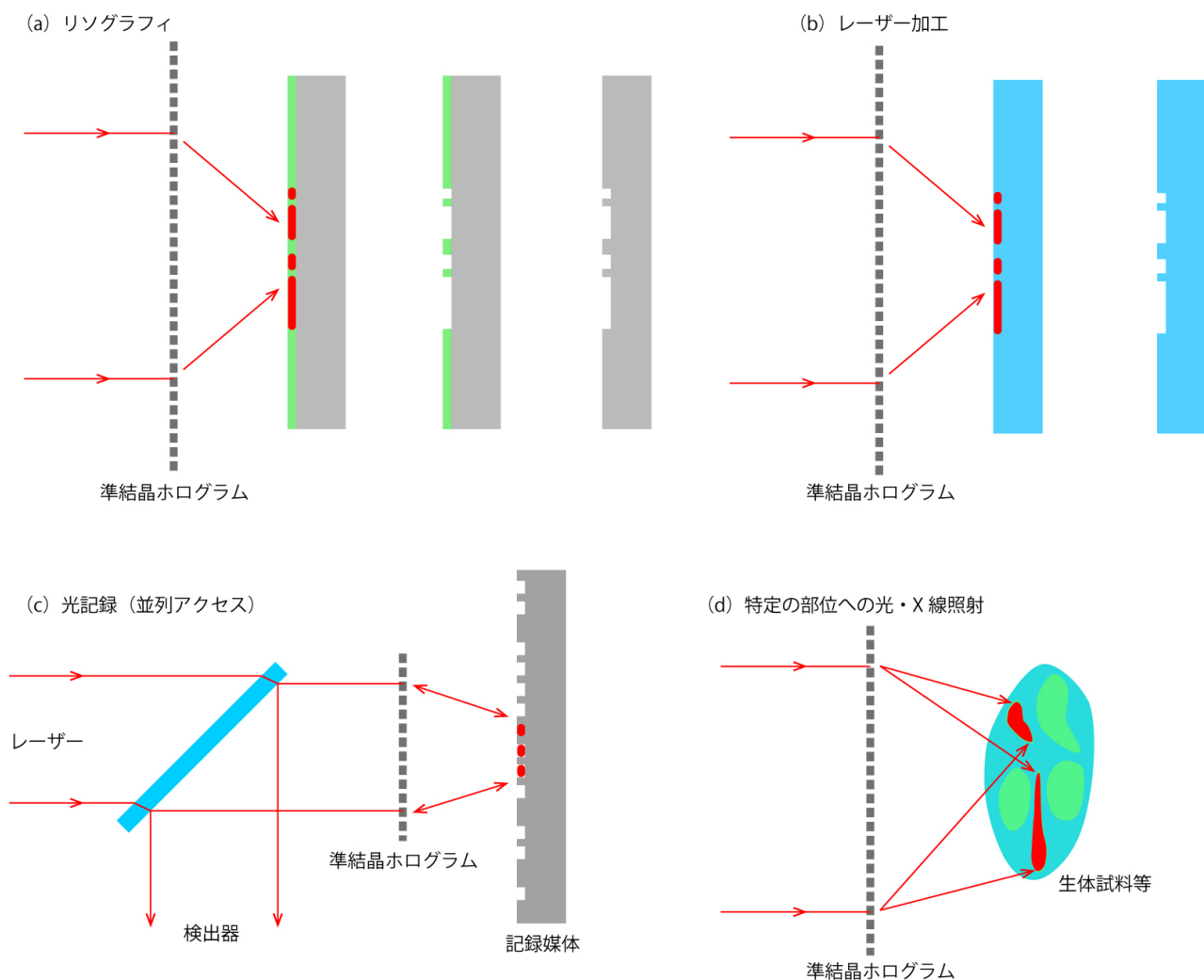


図3 計算機合成ホログラムの応用可能性

尾氏や機器利用をサポートしてくれる大西氏と共同で提案書を作成し、無事 FS に採択された。



5. 北海道大学での実験の進め方 ～支援機関技術職員が持つノウハウの重要性～

FS 採択後、杉坂氏が北海道大学に来学し、関係者と打合せを行ったあと実験に入った。微細加工の作業は松尾氏の助言のもと、大西氏が可能な範囲で予備検討を行っ

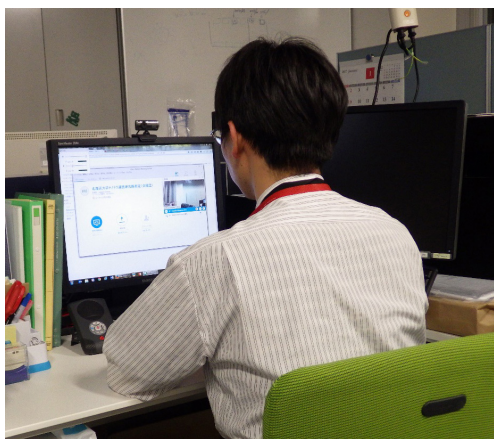
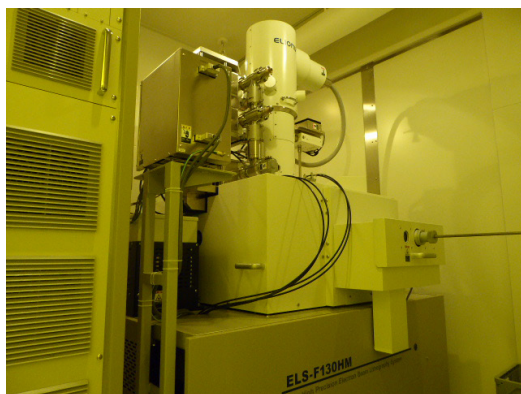


図4 北海道大学 Web 相談会の様子

た上で杉坂氏が作成した設計プログラムやデータを使用した。3人それぞれの能力を活かした協業の結果、比較的短時間でホログラムの加工を開始できた。作製にあたって使用したスパッタ成膜装置、電子線描画装置、ドライエッチング装置のうち電子線描画装置を図5(a)に、加工状態を SEM で確認する大西氏と杉坂氏の様子を図5(b)に示す。北海道大学スタッフは専門的な視点から作製物の材料特性や構造等を考慮した上で支援を行った。このほかにも、実施時に必要となった周辺関連装置については柔軟な対応が可能であったため、様々な装置の組合せによる効率的な支援が行われた。また、FS の制度により北見市から北海道大学に杉坂氏本人が訪れ、共同で実験を行うことで、さらに効果的な実験となった。

微細加工分野ではどれだけ高性能の装置があっても実際には非常に沢山の困難が待ち受けている。作製にあたっては、機器操作への慣れが必要になるだけでなく、参考文献だけでは伺いしれないノウハウ要素が非常に多いからである。今回の支援を例に、以下に具体的に述べる。

- ①フォトレジスト使う際、作製した構造を「現像」する行程がある。振とう機に漬けて振とうさせながら現像するのだが、振とう機の部位の違いによる揺れ具合の違いが現像の再現性に大きな影響を持つ。大西氏は振とう機のどの部分におけば良い現像状態が得られるかをこれまでの経験とデータを基に見つけ出しており、緻密な支援を行なった。



(a)



(b)

図5 利用した電子線描画装置 (a) と走査型顕微鏡で作製構造を確認する大西、杉坂両氏 (b)

②材料によって削り具合も全く異なるため、穴が斜めになっていたり、バリが出て綺麗に加工できないといった事態も起こった。本来なら、この条件出しには長時間が必要となる。しかし、NPJでは松尾氏の助言の元、大西氏がこれまで蓄積したノウハウと、最低限の条件検討を行った上で、適切な材料選定を行い、問題を乗り越えた。

③前述のように、微細加工で広い面積を均一に加工する事も簡単ではない。今回はEB描画装置を使用した。面積が広くなると、加工ビームの発射位置と加工位置との距離が変わるため、描画パターンの周辺部ほど出来具合の差や誤差が発生しやすい。そのため、装置はある程度のエリアを描画するとステージを動かして次のエリアを描画する。この際、移動前と移動後の継ぎ目をどこにするか、正確に継ぎ目を合わせられるかが問題となる。杉坂氏の過去の経験に加え、大西氏から得た装置特性の情報を考え合わせて継ぎ位置を決定した。さらに、比較的短時間で目的の面積を加工することができたのは、北海道大学の最先端加工装置の精度が高かった事や大西氏が装置の歪み補正機能の調整を駆使したことなどが大きく貢献していた。

これらのきめ細かい支援のおかげで、短時間（4～5日間）で目的構造の完成にこぎつける事ができた。これらは北海道大学微細加工プラットフォームの充実した設備とノウハウを蓄積した熟練の技術者やアドバイザーがいて初めて実現できたという事を再度強調したい。



6. 実験結果

目的の構造ができているかを確認するために、走査型電子顕微鏡（SEM）を使って作製したマスクを観察した

結果を図6に示す。穴の構造が真っ直ぐになっているか、バリが無いかなど確認すると同時に、SEM写真から求めた作製誤差が約5nm以内であることを確認した。北見工業大学に戻って実際にレーザー光を使って加工状態が予想できるX線回折の状況を見た結果を図7に示す。少々わかりづらいが、この回折像はすなわち、ホログラムの生成像も理論通りの像になっている事を証明している。このことから、当初懸念していた問題について、①ホログラムが大面積になると、電子線描画の仕様で加工精度が多少低下するが、その影響はみられなかった。②遠方回折像の分布から、ホログラム像を直接観測するための光学系の設計ができた。③遠方回折像の強度（明るさ）から加工すべき円形開口の寸法などの設計指針が得られるなど、特許の実施例用のデータばかりでなく、他にも検討用データなど多くの成果を得る事ができた。

杉坂氏からは「これまでの微細加工装置の利用経験から、通常であれば何度も装置を利用し、加工条件を決定する作業が必要であると理解していました。ところが、今回は試行的利用の1回目で期待していた加工を行う事ができました。北海道大学には準結晶ホログラムに近い構造の加工実績があったこと、いつでも装置を利用できるように、日頃から装置のメンテナンス、クリーンルームの環境整備が徹底されていたこと、そして、なにより熟練の技術職員の的確な支援があったのが実験に成功した第一の要因だったと思います。当日の利用講習でいただいた資料から、北大スタッフの方々が事前に随分時間をかけて準備されていたことが伺えました。ご協力いただいた皆様に感謝申し上げます。」のコメントをいただいた。

実際の作製を支援した大西氏からは「北海道大学には、対象素材や構造にもよりますが、ある程度加工ノウハウが蓄積されています。これらのノウハウで作製物の条件検討に必要な時間を大幅に削減できる事もあります。私

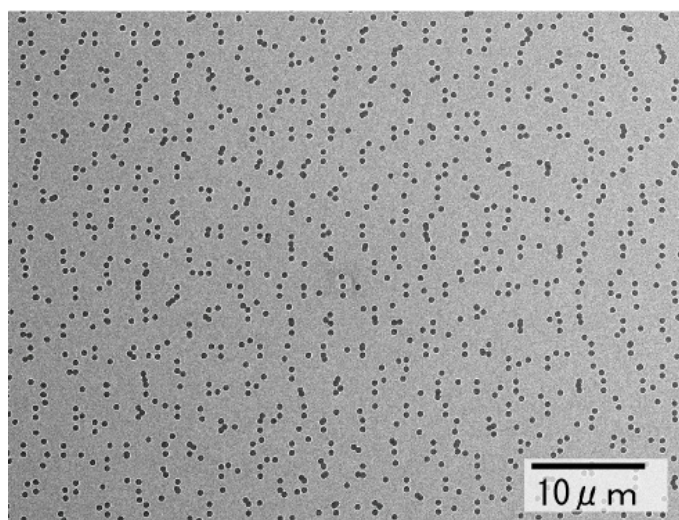


図6 作製した準結晶ホログラムの表面 SEM 写真

も一緒になって作業を行いますので、装置操作に自信のない方でも気軽にお声がけください」との温かい言葉をいただいた。

全体の作業方針を助言いただいた松尾氏からは「当初考えていた材料や加工方法では実際にはうまくいかないケースもあります。北海道大学は随時稼動している多様な微細加工装置が揃っていると同時に、自ら提案できる経験豊富な技術職員が一緒になって支援しますのでご相談ください」とのコメントをいただいた。



7. 迅速な特許出願や競争的資金応募への足掛かり

杉坂氏は得られたデータを基に、同大・知財部の三井氏と議論の上、発明届を修正し、強化した内容で大学の発

明委員会に提出した。その結果、大学内の特許出願が認められ、無事出願 [7] の運びとなった。また、企業との共同研究や許諾が期待される有望な知財ということで、JST の海外特許化支援制度応募 [8] に向けて、JST 特許化支援調査員のヒアリングを受けるなど今後のロードマップを構築しつつ、早い段階から周辺特許の強化を初めている。大学特許はなかなか実用化に繋がらないケースが多いと言われる中、初期段階で専門家の様々なアドバイスを受けつつ、着実に産学連携に向けた歩みを進めている。

三井氏からは「初めは理論のみで実現可能性を重視する日本の特許に実施例なしで認められるか不安だったが、実データを得られ説得力のある特許出願になった事を感謝しています」との言葉があった。

杉坂氏は特許出願と並行して今回のデータを組み込んで科研費等の競争的資金応募も行っている。同時に、北海道大学電子科学研究所が実施している共同研究拠点利

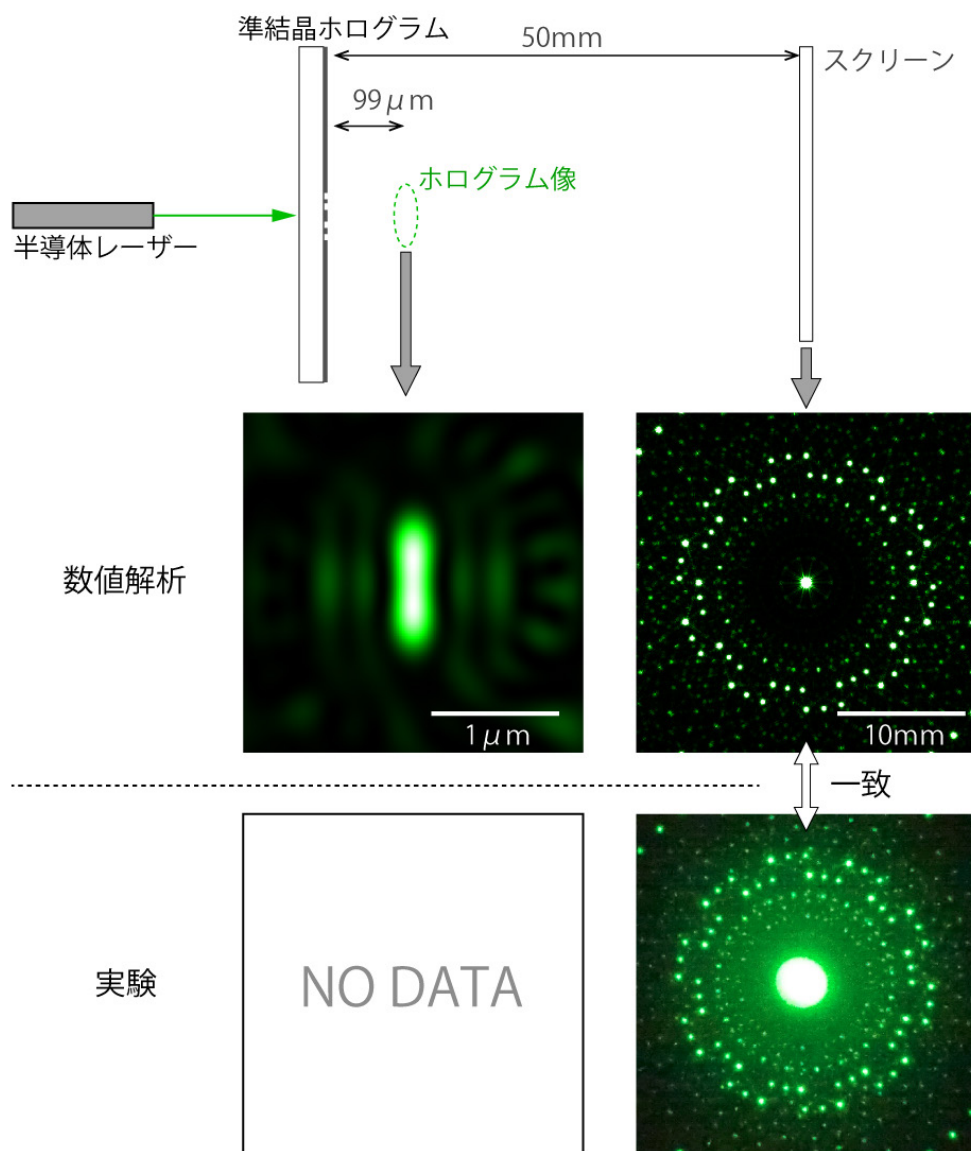


図7 作製した準結晶ホログラムに関する数値シミュレーションと実データの比較

用申請も受理され、同研究所の関連分野で卓越した業績を残している研究者陣とネットワークを構築する準備を始め、研究を加速している。NPJ を利用する事により、最先端装置を使ったデータが加わり、説得力の増した申請書となり、競争的資金を確保しつつ、上記ロードマップにあった研究開発が進展する事を期待したい。



8. 結び

～若手研究者にむけた NPJ と JST の多様な産学官連携促進支援～

今回の事例のように、NPJ 事業を活用すれば、自前の装置が整わない状況でも、様々なチャレンジが可能になる。研究室設備が整わなくて実験が進まないと思こんでいる若手研究者は是非お声掛けいただきたい。そして①経験豊富な NPJ 関係者との議論によって自身のアイデアを短時間でより強固かつ客観性のあるものにすると同時に、②最先端の装置から得られたデータを駆使して競争的資金や企業との共同研究を勝ち取ってもらいたい。NPJ の基本は実施機関に訪れ、自身で手を動かす事である。その熱意さえあれば、NPJ の実施機関は装置のみならず、そのノウハウやその道のプロの中で流通する最新情報、技術支援員の人的支援を駆使して皆様を支援してくれるはずである。

JST は NPJ の啓発や利用窓口支援に加えて、新技術説明会 [9] のような企業との出会いの場の提供、さらにはマッチングプランナープログラム [10] 等のような企業との共同研究を促進する資金で産学官連携を支援している。JST の産学官連携推進マネージャーは声が掛ければ、NPJ の利用にとどまらず、さらなる展開に向け関係各所に橋渡しを行う。産学官連携推進マネージャーの活動を通して、若手研究者飛躍の一助になれば幸いである。



参考文献

- [1] 文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム HP
<http://nanonet.mext.go.jp/>
- [2] ナノテクノロジープラットフォーム JST 産学官連携推進マネージャー 紹介 HP
<http://www.jst.go.jp/nanotechpf/manager.html>
- [3] 文部科学省 日本の強みを活かした元気の出るイノベーションエコシステムの構築に向けて
http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/kenkyu_kaihatu/20fy-pj/kyouka.pdf
- [4] J. E. Curtis, B. A. Koss, and D. G. Grier, "Dynamic Holographic Optical Tweezers," Opt. Commun., vol. 207, pp. 169-175 (2002).
- [5] H. Takahashi, S. Hasegawa, and Y. Hayasaki, "Holographic femtosecond laser processing using optimal-rotation-angle method with compensation of spatial frequency response of liquid crystal spatial light modulator", Appl. Opt., vol. 46, pp. 5917-5923. (2007).
- [6] ナノテクノロジープラットフォーム事業 研究設備の“試行的利用”事業（注：年度により HP の URL が変わります）
<http://nanonet.mext.go.jp/shikou/h28/>
- [7] 特願 2016-244003
- [8] JST 大学特許海外支援制度
http://www.jst.go.jp/chizai/pat/p_s_02shinsei.html
- [9] JST 新技術説明会
<https://shingi.jst.go.jp/>
- [10] JST マッチングプランナープログラム
<http://www.jst.go.jp/mp/>

（東 陽介）

お問い合わせ

ナノテクノロジープラットフォーム事業では、産学官による先端共用設備の利用促進を図るため、全国の5地域（北海道・北東北、南東北・関東甲信越、東海・北陸、関西・四国、中国・九州）に産学官連携推進マネージャーを配置しています。設備利用や技術相談など、お近くの産学官連携推進マネージャーにお気軽にご相談ください。

☎ お電話での問合せはこちら
➡ **03-6272-4732 (共通)**

産学官連携推進マネージャー

北海道・北東北	南東北・関東甲信越	東海・北陸	関西・四国	中国・九州	分野融合連携推進 マネージャー
					
東 陽介 yousuke.higashi @jst.go.jp	菊地 博道 hkikuchi @jst.go.jp	松山 豊 yutaka.matsuyama @pb.jst.jp	吉川 昭男 akio.yoshikawa @jst.go.jp	西ヶ野 政宏 masahiro.saigano @jst.go.jp	吉原 邦夫 npj-koubo @ml.nims.go.jp