

X線結像光学ニューズレター

No. 37 2013年4月発行

★Joseph Fraunhofer Award/Robert M. Burley Prize 受賞研究報告★

— 極端紫外線リソグラフィー開発を振り返り —

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所

教授 木下博雄

研究の進め方には様々な手法がある。いわゆる、Seeds 研究から、Needs にマッチして実用化に至るもの、X線天文学など国家的事業の要請から研究開発を進めるものなど。私の場合は、後者的な手法で、自らが将来のリソグラフィー手段を憂い、すなわち、従来の屈折レンズ系によるリソグラフィー装置開発の限界を察し、次に来るべきものは何かを考え、反射型光学系による縮小リソグラフィー技術の構築を提案した。このため、自らの専門性も顧みず、無謀なスタートを切ってしまった。

1984年ごろから高エネルギー物理学研究所のBL-1BのX線等倍リソグラフィービームラインに縮小光学系を構築し実験を進めた。

1986年秋の応用物理学学会にて波長11 nm近辺での4 μmほどの1/10に縮小された露光パターンを報告した[1]。当時はまだ、“X線を曲げて像を作る”なんてことが出来る訳がないということで、悲観的な見方が大勢であった。当時、私の専門は空気軸受ステージの設計・制御技術であり、X線プロクシミティ露光機用高速・高精度ステージとして、空気軸受を案内に、駆動にリニアモーターを用いた完全非接触ステージを開発していた[2]。このステージも海に浮いた小舟のようで、如何に止めるかなど議論があった。しかし、これもコイルを巻くボビン部に発生した制動力を利用することで、停止させることができた。そんな訳で、困難な仕事に対する警戒心が欠除

していたようだ。

X線領域での縮小露光系を構築するには、反射光学系の設計、非球面加工、高反射率を有する多層膜形成技術開発が必要となるが[3]、私自身この分野にはど素人だったから、困難の度合を推測できず、相談される相手が啞然とした顔をされたのを記憶している。素人だから何でも言えたように思う。今思えば、目標とするスペックに対して比較的鈍感な楽観的な仲間を見つけて開発を進めてきたようだ。

その一つが、非球面加工であった。1989年当時、国プロで計測しながら加工するという研究開発がスタートしていた。当時の加工精度は7 nmほどであり、光学メーカーに1 nm以下のお願いに上がると、原器性能を超えた加工精度が出来る訳がないと断られた。彼らは、いわゆる計測できれば加工できる派であった。一方、当時の日本の加工屋は平面加工を中心としており、計測しなくても加工できる派が主流であった。計測できる装置がない状況で、ある光学測定器販売会社に開発を依頼したところ、“1 nmを切る精度の計測器を作るのに1億円以上かかります。何台売れるとお思いですか？ペイできない仕事はしません。”とこれもあっさり断られた。当時の日本はレンズ加工に対する評価が高く、高価な日本製カメラがたくさん売れた時代であったが、技術者の高齢化とともに、技術の伝承が十分機能されず、神話が崩れかけていた。いや、これこそが日本の物づくりの

伝統なのか、未だに検査機は外国品に依存している。そこで、私は日本での非球面加工に見切りをつけ、米国を訪問した。当時阪大のレーザー研にいた吉田國男先生からサジェスチョン頂き、Tinsley 社を訪問した。Tinsley 社は 1990 年頃 Hubble 望遠鏡の補正レンズの加工を請け負い、丁度、搭載した前後で、また、スターウォーズ計画が中断した時期でもあり、軍から民需というタイミングも良かった。最初の訪問時の加工精度は日本と同様 7nm が現状であったが、挑戦したいと言ってくれた。そこで、放射光用のトロイダルミラーを試しにお願いした。Tinsley 社では数mもある天体望遠鏡ミラーの加工は、背面に無数の分銅をぶら下げ非球面を形成させ、表面は平面加工を中心に様々な大きさの砥石を用い、計測しては加工するという手法で進めていた。

Tinsley 社は試作したトロイダルミラーの粗さ測定に光学式非接触装置を用い、評価した。2本のミラーいずれも 0.3nm 以下と、どうにも完璧すぎる値だった。そこで、当時(1991)購入したばかりの AFM を用い評価したところ、光学式の結果と異なる数値を示した。要するに測定プローブの大きさの差が出てしまった。また、多層膜の基板の表面粗さを光学式と AFM で評価し、膜形成後の反射率から求めた Debye-Waller Factor と照合したところ、AFM 値が正しく、光学式では合わないことが分かった。このことから放射光などの短波長用ミラーの粗さ評価には AFM 測定が妥当であることを示した。後に空間周波数との関係が明らかになり、粗さに対する測定法が理論的にも整備された。

その後、Tinsley 社に非球面ミラーの加工をお願いした。これ以前に国内の加工メーカーに非球面ミラーの作製を依頼したところ、非球面ではなく、完璧な球面ミラーを提供くださったこともあり、如何に両者でその性能を確認するかを契約時議論した。この結果、Tinsley 社での形状評価に立ち会い、また、国内に持ち込んだ後も同様なレーザー干渉計で評価し、測定値を相互評価する方法で確認することとした。最初の試作では、レーザー干渉計の測定限界もあり、形状精度 1.8nm であった。当時、Dan Bajuk

氏はさらなる高精度ミラー開発には Computer Generated Hologram (CGH) による評価系の構築が必要と述べていた。我々は、この非球面 2 枚ミラーを用い、また大面積照明光学系と同期走査ステージとにより、1995 年春には 10mm 角の領域で 0.1 μ m のパターン形成に成功した[4, 5]。

2 度目の製作は 1995 年に NTT を退職し、姫路工業大学への異動後に行った。1 億ほどの講座開設費の大半を使い、3 枚の非球面ミラーを Tinsley 社にお願いした。当時、粗さ評価の中で中間の空間周波数での測定結果がパターンの解像性に影響することが分かり、この領域の精度を上げるための検討がなされていた。当然のことながら中間領域の形状性能を評価する検査機が必要となった。米国では、この装置の開発を NIST にお願いした。Tinsley 社は同時並行で米国の国家プロジェクト EUV-LLC 用と姫路工大用の製作を進めていたが、EUV-LLC のは NIST で評価してよいが、木下のオーダー品には NIST の装置を使てはいけないとのお達しがあったようだ。そこで、Tinsley では CGH により評価系を自前で構築し、形状精度 0.3nm 以下のミラー光学系を 1997 年には導入してくれた[6]。Tinsley 社は 2001 年の秋には中間周波数領域でも 0.15nm を切る性能を有する optics を EUV-LLC に納品し、世界をリードする非球面加工の会社となった。

多層膜ミラーの開発は NTT の竹中久貴氏と二人三脚で進めてきた。武蔵野研で製作し、PF で実験する日々が続いた。平面ではなく球面での膜形成のため、応力の影響が残り、経時変化により膜が剥がれることを経験した。また、急かしたときには、スパッタ後十分試料が冷めないうちに、大気に曝したため、膜表面に水分が吸着し、PF に持ち込んだ時には表面に細かなボイドが生じたこともあった。膜厚を制御するために試料回転機構に速度計を取り付け、速度制御を図り、また、膜の汚れを防ぐために初期はスロー排気にするなど、様々な工夫を進めていった。この結果 67%ほどの反射率が定常的に得られるようになった。

竹中氏はもともと関西学院大で X 線回折の研究者

であったため、膜評価を XRD で進めて、反射率を云々していた。素人の私には直入射で使うミラーの評価を斜入射で行うことに納得できず、1992 年頃 PF に反射率計を設置した。2 θ 系のセンサーには当初浜ホトの光電子増倍管を用いていたが、これがまた厄介な代物で、光電陰極部への入射光の場所・角度の違いで測定値が大きく変わってしまった。当時すでに波岡先生を会長とする X 線結像光学研究会が発足しており、そんな状況を説明すると、柳原先生に可視域でのフォトダイオードが使えると紹介していただいた。お陰様で、高い反射率が実証できた。多層膜の開発では、波岡先生、山本先生、山下先生に大変お世話になり、お陰様で EUV 領域での様々な応用研究が進んだ。

EUVL は現在、製造前露光装置が ASML から出荷され、試作の準備が進められている。光源のパワーに問題があるものの、解像度などは ArF に比べても格段に優れており、15 nm の解像度を実現している。2014 年度から量産が始められる。

ニュースバルでは 2002 年から EUVL のインフラ整備としてマスク検査機の開発と 10 nm 台のレジスト開発を進めている[7-10]。2008 年から CREST として進めている高次高調波を光源としたマスク検査機は、従来の光学系利用による微細化のパラダイムを超えた革新的な計測手法であり、レンズレスな計測システムである。すなわち、Ti:Sapphire レーザー光と He ガスとの相互作用により奇数次の高次高調波光を発生させ、59 次 (13.5 nm) の光を多層膜ミラーと Zr フィルターとにより分光する。現状での開き角度は 0.17 mrad と世界一小さく、EUV 光のパワーは 1 μ W ほど得られている。この光を EUV マスクに照射すると、パターンに応じた散乱パターンが得られ、それを EUV-CCD カメラにて検出する。マスクパタンの線幅 (CD) はパターンから得られた 0 次光と ± 1 次光を利用して Fraunhofer 回折の式から決められる。マスクパタンの欠陥は、2 チップ間の同一パタンの散乱パタンの比較により行い、欠陥がある場合は像再生を行う。EUV-CCD カメラにはマスクパタンの散乱信号の強度情報が検出されるが、位相情報はない。この

ため、位相情報を回復するためのフーリエ計算を多数回行う。これにより像再生可能となる。これまでに、22 nm 世代のマスク上のブリッジ欠陥、ホールの抜けなどの欠陥、線幅が変化した欠陥などの検査が可能となっている。また、この方式により、多層膜形成基板の凹凸に起因する位相欠陥を観察したところ、微細な位相欠陥が検出でき、3 次元的な像再生を可能とした[11, 12]。

このように、将来の微細なパタン計測に向けて、レンズレスという革新的ではあるが、光学の原理原則を利用した装置開発を実現した。

冒頭に申し上げたように、将来のリソグラフィー構想を立て、知的バックグラウンドなしの状態の研究開発を進めてすでに 30 年近くにもなるが、未だに専門性がない思いである。これからも、新しい分野への挑戦を続けていきたい。

最後に、EUVL の開発への貢献として昨年 10 月 Joseph Fraunhofer Award/Robert M. Burley Prize を The Optical Society から戴いた。波岡先生をはじめとする東北大学関係者、X 線結像光学関係者、NTT の同僚、現兵庫県立大学の同僚・学生に心よりの感謝の意を表します。



【著者紹介】

兵庫県立大学教授、高度産業科学技術研究所極端紫外線リソグラフィー研究開発センター長、74 年慶應義塾大学工学部大学院機械工学専攻修了、74 年電電公社武蔵野研究所入所、95 年から現職、工学博士、09 年 Lifetime Achievement Award (米国 EUVL 協会)、

10 年応用物理学会 Fellow、10 年山崎貞一賞、11 年
文部科学技術大臣賞受賞、12 年 Joseph Fraunhofer
award/Robert M. Burley Prize (OSA)。

参考文献

- [1] 木下博雄、金子隆司、武井弘次、竹内信行、石原直、「X 線縮小投影の検討 (その 1)」応用物理学会講演会 1986. 10.
- [2] 木下博雄、金井宗統、出口公吉、斉藤忠雄、空気浮上式 XY ステージの試作、精密機械 52 巻 10 号 (1986) 1713.
- [3] H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii, and Y. Torii, “Soft x-ray reduction lithography using multilayer mirrors”, J. Vac. Sci. Technol. B7 (6) (1989) 1648.
- [4] T. Haga and H. Kinoshita, “An illumination system for extreme ultraviolet lithography”, J. Vac. Sci. Technol. B13 (6) (1995) 2914–2918.
- [5] T. Haga, M. C. K. Tinone, H. Takenaka, and H. Kinoshita, “Large-field ($> 20 \times 25 \text{ mm}^2$) replication by EUV Lithography”, Microelectronic Engineering 30 (1996) 179–182.
- [6] K. Hamamoto, T. Watanabe, H. Tsubakino, H. Kinoshita, T. Shoki, and M. Hosoya, “Fine Pattern Replication by EUV Lithography”, J. Photopolym. Sci. and Technol. 14 (4) (2001) 567–572.
- [7] H. Kinoshita, T. Haga, K. Hamamoto, S. Takada, N. Kazui, S. Kakunai, H. Tsubakino, T. Shoki, M. Endo, and T. Watanabe, “Actinic mask metrology for extreme ultraviolet lithography”, J. Vac. Sci. Technol. B22 (1) (2004) 264–267.
- [8] K. Hamamoto, Y. Tanaka, T. Yoshizumi, N. Hosokawa, N. Sakaya, M. Hosoya, T. Shoki, T. Watanabe, and H. Kinoshita, Jpn. J. Appl. Phys. 45 (2006) 5378.
- [9] T. Watanabe, Y. Fukushima, H. Shiotani, M. Hayakawa, S. Ogi, Y. Endo, T. Yamanaka, S. Yusa, and H. Kinoshita, “CA Resist with Side Chain Pag Group for EUV Resist”, J. Photopolym. Sci. Technol. 19 (4) (2006) 521–524.
- [10] T. Urayama, T. Watanabe, Y. Yamaguchi, N. Matsuda, Y. Fukushima, T. Iguchi, T. Harada, and H. Kinoshita, “EUV Interference Lithography for 1X nm”, J. Photopolym. Sci. Tech. 24 (2) (2011) 153–157.
- [11] T. Harada, J. Kishimoto, T. Watanabe, H. Kinoshita, and D. G. Lee, J. Vac. Sci. Technol. B27 (2009) 3203.
- [12] M. Nakasuji, A. Tokimasa, T. Harada, Y. Nagata, T. Watanabe, K. Midorikawa, and H. Kinoshita, “Development of Coherent Extreme-Ultraviolet Scatterometry Microscope with High-Order Harmonic Generation Source for Extreme Ultraviolet”, Jpn. J. Appl. Phys. 51 (2012) 06FB09 (DOI: 10.1143/JJAP.51.06FB09).

“3D 原子イメージング”は究極の構造解析技術であり、これを実現することができれば材料や生体における多くの問題が解決する筈である。蛍光X線ホログラフィーや光電子ホログラフィー等の総称である原子分解能ホログラフィー[1]を用いれば”平均像”ではあるが3D原子像を取得することができる。X線回折法なども結晶の単位格子内の原子配列を決定できる手法であるが、原子分解能ホログラフィーは、結晶だけでなく不純物周辺の構造解析にも利用できる。

原子分解能ホログラフィーにおける試料の条件は、測定対象の“方位対称性”である。例えばタンパク分子であれば、結晶のように並進対称性を有する必要はないが、個々の分子が全て同じ方位を向いている必要がある。但し、現状では、このような試料はなかなか存在しないので、結晶、結晶中の不純物、結晶表面上の吸着物が測定対象になっている。

原子分解能ホログラフィーは、蛍光X線や光電子を発する原子の周辺構造を再生するために、局所構造解析法とも捉えることができる。これに対し、試料にX線を照射して得られる吸収スペクトルや、電子線を照射して得られるエネルギー損失スペクトルを解析することにより、特定元素周辺の局所構造解析を行うことができる技術として、XAFS (X-ray Absorption Fine Structure) や EELFS (Electron Energy-Loss Fine Structure) が知られている。液体や、場合によっては気体も計測できる汎用性の高い手法であるが、これらの方法では、第二、三近接原子までの1次元的な動径分布構造の情報に限られてしまう。一方、原子分解能ホログラフィーは、特定原子周辺の3D原子配列を数nmの範囲に亘って再構成させられる。

近年、盛んに材料探索が行われている磁性半導体や高温超電導物質等の新規材料は、単結晶やエピタ

キシャル膜である場合が多く、このような物質を測定対象とする場合には、非常に有益な情報を提供することができるであろう。

ホログラフィーとは、1948年にGaborが発明した、物体からの散乱波を強度だけでなく位相も記録できる撮像技術のことである[2]。その後、Szöke[3]によって、光電子や蛍光X線の干渉を測定することにより、原子分解能を有するホログラフィーの可能性が指摘された。これまでに、電子線[4]やX線[5]、 γ 線[6]、中性子線[7]等を用いた原子分解能ホログラフィーが報告され、吸着物質の周辺環境[8]や準結晶の構造[9]、ドーパント周辺の局所構造[10]、形状記憶合金の相転位[11]、混晶材料の局所格子歪み[12]に関連する研究が行われている。しかしながら、これら原子分解能ホログラフィーでは、エネルギー可変かつ、高輝度な線源を必要とするため、必然的に放射光実験施設や原子炉等の大型実験施設が必要になる。それゆえ、一般研究者に対する利用の広がりが大きく制限されてきた。そこで、そのような大型実験施設を必要としない原子分解能ホログラフィーとして、我々は、逆光電子ホログラフィー[13, 14]を提唱した。

図1に光電子ホログラフィー(a)と逆光電子ホログラフィー(b)の原理図を示す。光電子ホログラフィー(a)において、単色軟X線を試料に照射すると、試料内部の標的原子から光電子が発生する。そして、光電子の一部が隣接する原子に散乱し、散乱しない光電子と遠方で干渉する。この時、散乱した光電子が物体波、非散乱の光電子が参照波としてふるまい、試料周りにホログラムとしての強度分布を形成する。観測されたホログラムをフーリエ変換することにより、その目的原子周辺の3D原子配列を再生できる。

一方、図1(b)に示す逆光電子ホログラフィーは、光電子ホログラフィーの時間反転定理を用いている。試料に照射された電子線の一部が試料内部のある原

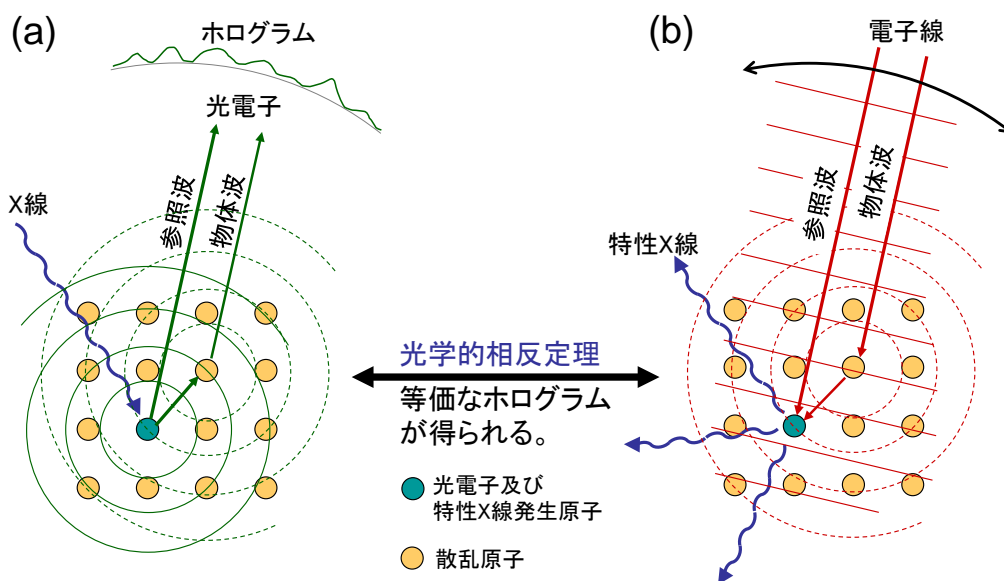


図1 (a) 光電子ホログラフィーと (b) 逆光電子ホログラフィーの原理。

子と散乱し、その散乱電子は物体波としてふるまう。一方、散乱せずに、直接、特性 X 線を発生する原子に到達する入射電子線は参照波としてふるまう。物体波と参照波の干渉パターンは入射方向に依存するので、標的原子から発生する特性 X 線にも、電子線の入射方向に依存した強度変化が生じる。この場合、測定されるホログラムは、基本的に、従来の光電子ホログラフィーによって得られるものと等価である。

逆光電子ホログラフィーの実験は、走査電子顕微鏡 (SEM) を改造した装置で行った。図2に、その実験装置を示す。電子線の線源には SEM 内部の電子銃を用い、純 Ge 型半導体検出器と Digital X-ray Pulse Processor を用いて、発生する特性 X 線のスペクトルの測定を行った。試料である SrTiO₃ から発生する Ti-K 特性 X 線強度の試料方位変化を測定することにより、ホログラムを得ることができる。ここでは、図2に示す入射角 θ と回転角 ϕ を変えることによってホログラム測定を行った。PCでSEM内部の自動ステージの制御を行い、 $0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$ ($\Delta\phi = 1.1^\circ$)、 $0^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ ($\Delta\theta = 1.0^\circ$) の角度範囲で走査させつつ、各ポイントで特性 X 線のスペクトルを取得した。最終的に 24600 点のスペクトルデータを得た。得られた各点のスペクトルに対して、Ti-K α 、K β 特性 X 線の正確な強度を、ガウシアンフィッティングにて求

め、Ti 原子周辺の原子配列を記録したホログラムパターンを作成した。

SEMの加速電圧は、6.00、6.08、6.15、6.22、6.30 keV の 5 つのエネルギーを用いた。各点での測定時間は 250 ms である。約 2 時間で一つのエネルギーのホログラムが測定される。

6 keV の電子線を用いたときのホログラムパターンを図3 (a) に示す。ホログラム振動は約 10% あり、十分に強い振幅でホログラムが測定できることが分かる。このホログラムパターンには、従来の光電子ホログラフィーにおいても特徴的に観察される、電子の前方多重散乱に由来するフォワードフォーカシングピークと、電子回折に起因する電子定在波線が観察されている。電子定在波線は、通常の光電子ホ

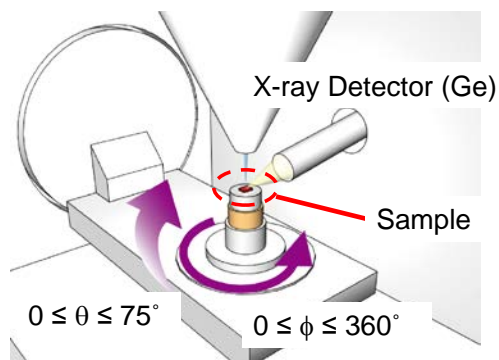


図2 逆光電子ホログラフィーの実験装置。

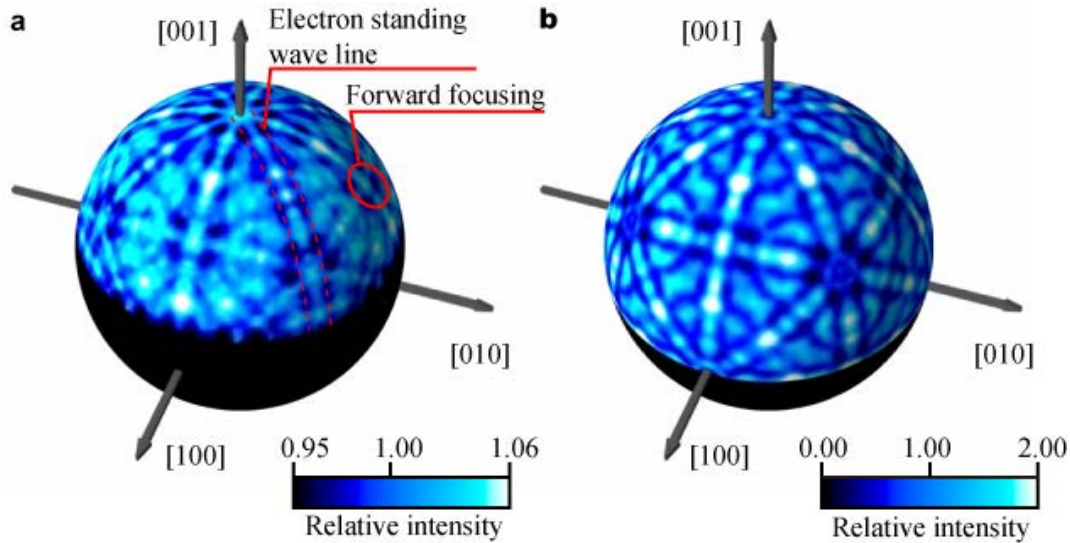


図3 SrTiO₃のTi周りのホログラム。(a) 実験データ。(b) 計算データ。電子線のエネルギーは6 keVである。

ログラフィーの菊池線に相当する。また、図3 (b)に、電子線のエネルギーを6 keVとし、5457個の原子からなるクラスターを用いて、シミュレーションから求めたホログラムパターンを示す。図3 (b)のホログラムパターンにおいても、上記のフォワードフォーカシングや電子定在波線は観察されており、理論と実験の一致が良いことが分かる。

得られたホログラムパターンから、SPEA-MEM (scattering pattern extraction algorithm using maximum entropy method) と呼ばれる原子像再生アルゴリズムを用いて、SrTiO₃のTi周辺の原子配列を再生させた[15]。SPEA-MEMとは、理論計算と実測データとのフィッティングをベースに再生させるアルゴリズムであり、アーティファクトを抑え、正確な原子位置に像を再生できる。実際に、6.00、6.08、6.15、6.22、6.30 keVのエネルギーで記録した5つのホログラムから原子像を再生させた。図4は、その原子像である。これから分かるように、アーティファクトもほとんど無く、SrTiO₃に含まれる全ての元素が理論位置に再生されている。なお、0の散乱断面積はTiやSrと比較するとかなり小さいが、は

っきりと再生されている。図4 (b)、(c)に、SrTiO₃の原子配列におけるSr-O面とTi-O面の断面図を示す。原子番号の最も大きいSr原子に対する像の半値幅が0.6 Åであり、空間分解能がかなり良いことが分かる。また、酸素原子が円盤状に再生されていることも分かるが、これは酸素原子の揺らぎ[16]によるものである。

市販のSEMを改造し、逆光電子ホログラフィー装置を試作した。SrTiO₃パルクの測定を行い、ペロブスカイト構造を再生することができた。逆光電子ホログラフィーは、数ある原子分解能ホログラフィーの中で最も若い技術であるが、本稿で示してきたように、そのポテンシャルは非常に高い。大型実験施設を利用せずに、市販の電子顕微鏡、電子銃を用いても簡便に測定できるために、早く広く普及されることが期待される。また、電子ビームはX線に比べて、容易にnmオーダーにまで収束させることができるために、ステージ制御を工夫すれば数ミクロンの微結晶を測定することも可能であろう。また、薄膜試料に対しても有効であるために、LSIにおける単一素子の評価にも利用できる可能性がある。

一方、現状の装置では、電子ビームの強度や検出器が試料に見込む立体角が十分とは言えず、不純物の測定に対しては、実用的な時間で測定を完了させることはできない。より、本格的な装置の開発を行うことによって、材料開発の現場に役立ててもらいたいと考えている。

本稿で紹介した研究は、(株)堀場製作所の上坂彰朗氏、新井重俊氏、そして(財)高輝度光科学研究センターの松下智裕博士との共同研究である。本研究の一部は、NEDO 及び JST から研究補助を受けて実施されたものである。

参考文献

- [1] K. Hayashi, N. Happo, S. Hosokawa, W. Hu, and T. Matsushita, *J. Phys.: Condens. Matters* **24**, 093201 (2012). (Topical Review)
- [2] D. Gabor, *Nature* **161**, 777 (1948).
- [3] A. Szöke, in *Short Wavelength Coherent Radiation: Generation and Applications*, ed. D. T. Attwood and J. Bokor (AIP, New York, 1986) AIP Conf. Proc. No. 147, p. 361.
- [4] G. R Harp, D. K. Saldin and B. P. Tonner, *Phys. Rev. B* **42**, 9199 (1990).
- [5] M. Tegze, and G. Faigel, *Nature* **380**, 49 (1996).
- [6] P. Korecki, J. Korecki and T. Slezak, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 3518 (1997).
- [7] B. Sur, R. B. Rogge, R. P. Hammond, V. N. P. Anghel and J. Katsaras, *Nature* **414**, 525 (2001).
- [8] D. - A. Luh, T. Miller, and T. - C. Chiang, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 4160 (1998).
- [9] S. Marchesini, F. Schmithüsen, M. Tegze, G. Faigel, Y. Calvayrac, M. Belakhovsky, J. Chevrier, and A. S. Simionovici, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 4723 (2000).
- [10] K. Hayashi, M. Matsui, Y. Awakura, T. Kaneyoshi, H. Tanida, and M. Ishii, *Phys. Rev. B* **63**, R041201 (2001).
- [11] W. Hu, K. Hayashi, T. Yamamoto, N. Happo, S.

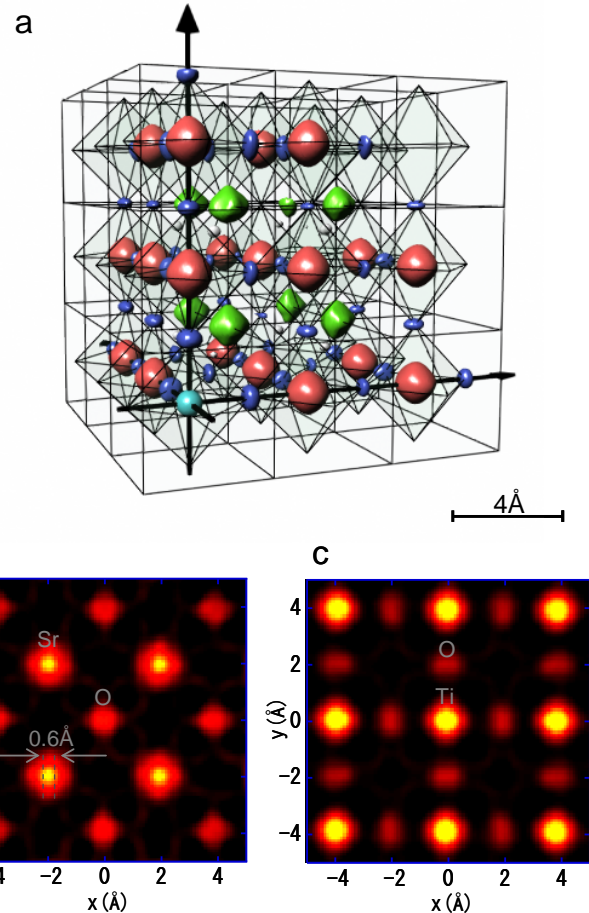


図4 SrTiO₃原子像。(a)はSrTiO₃の原子配列の全体像を示し、緑がSr、青がO、赤がTi、水色が目的原子としてのTiを示す。また、(001)面に対して、(b)が $z=2\text{Å}$ のSr-O面を、(c)が $z=4\text{Å}$ のTi-O面をそれぞれ示す。

- Hosokawa, T. Terai, T. Fukuda, T. Kakeshita, H. Xie, T. Xiao and M. Suzuki, *Phys. Rev. B* **80**, 060202(R) (2009).
- [12] S. Hosokawa, N. Happo and K. Hayashi, *Phys. Rev. B* **80**, 134123 (2009).
- [13] K. Hayashi, T. Matsushita, and E. Matsubara, *J. Phys. Soc. Jpn* **75**, 053601 (2006).
- [14] A. Uesaka, K. Hayashi, T. Matsushita, and S. Arai, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 045502 (2011).
- [15] T. Matsushita, F. Z. Guo, M. Suzuki, F. Matsui, H. Daimon, and K. Hayashi, *Phys. Rev. B* **78**, 144111 (2008).
- [16] E. A. Zhurova and V. G. Tsirelson, *Acta Crystallogra. B* **58**, 567 (2002).

DISCUSSION MEETING ON “Taking x-ray phase contrast imaging into mainstream applications” および SATELLITE MEETING “Real and reciprocal space X-ray imaging” に参加して

東北大学多元物質科学研究所 矢代航

2013年2月11～12日にイギリスのLondonで開催されたRoyal Society主催のDISCUSSION MEETING ON “Taking x-ray phase contrast imaging into mainstream applications” [1]、およびそのサテライトミーティングとして13～14日にBuckinghamshire州Chicheleyで開催された“Real and reciprocal space X-ray imaging” [2]に参加した。オーガナイザーは両者ともUniversity College LondonのIan Robinson教授とAlessandro Olivo博士で、私は後者のサテライトミーティングに招待講演者として招いていただいた。

イギリスのRoyal Society（日本語訳は「王立協会」が一般的）といえば、1660年に設立された世界で最も古い学会である（前身は1640年代半ばに始まったan ‘invisible college’ of natural philosophers）。およそ350年という長い歴史の中で多くの偉大な科学者を輩出してきた。1660年といえば、現在の意味でのScienceという言葉や科学者という職業はまだ存在しなかった時代である。同学会が現在も発行しているPhilosophical Transactionsも世界で最も古くから出版されている学術雑誌として知られている。

前半二日間のDISCUSSION MEETINGは、London市内のThe Royal Society, London（Carlton House TerraceのNo. 6～9）で行われた。会場は地下鉄のPiccadilly Circus駅から歩いて5分くらいのアクセスのよいところで、Carlton House Terrace付近の偉人の像が立ち並ぶ道をさらに

南に進むと、St. James’s Parkに行き当たる。Carlton House Terraceの白い建物は、国王George IV世の命を受けて数百年前に建築家John Nashにより建てられた歴史あるもので、現在ではGrade 1 [3]に指定されている。内装は建築当初からかなり改造が加えられてきたが、コリント様式のファサードに代表される建物の外観は当時のままで、権威と伝統ある学会にふさわしい美しさがある。もっともRoyal Societyがこの建物に移ってきたのは1967年のことで（以後99年間の契約）、Royal Societyの権威を示す目的で建てられたものではない。Royal Societyがモットーとするのはむしろ‘Nullius in verba’（ラテン語、英語では‘Take nobody’s word for it’）、つまり権威者の言葉に支配されず、実験的な事実に基づいて真実を検証することで、一人の研究者としては、Royal Societyが聖書や教会、古典哲学などの権威の中にあって、科学的な態度を一貫して保ってきた長い歴史の方にむしろ尊敬の念を禁じ得ない。

さて余談はこれくらいにして、本題のDISCUSSION MEETINGの内容に移ろう。このワークショップの趣旨はタイトルの通りで、今まさに応用フェーズに入らんとしているX線位相コントラストイメージング [4]の展望について議論することである。X線の位相を利用したイメージングは、1990年代半ばに世界的に注目を集めたが、当初は第三世代放射光源を用いた原理実証的な実験が主であった。最近では実験室X線源の利用が盛んに行われるようになり、医療診断や工業製

品検査などへの応用が急速に広がりつつある。本ワークショップでは、これまでどのような研究がされてきて、来るべき応用フェーズに向けて今何が必要なのか、今後どのように展開されるのか、といったテーマについて議論することが趣旨であった。

講演は Carlton House Terrace 内の Welcome Trust Lecture Hall で行われた。広い会場を埋め尽くすおよそ 150 名の参加があった。プログラムは、全二日間の日程が 4 つのセッションに分けられ、1 セッションあたり 4 講演（講演時間：30 分、ディスカッション：15 分）、全 15 講演（実際はキャンセルが 1 件出たので 14 講演）+ 1 ポスターセッションという構成であった。セッション 1 は主に基調講演で、三つの代表的な方法、すなわち伝播ベース法、回折格子ベースの方法、および Diffraction Enhanced Imaging (DEI) について、発展の歴史的な経緯から最先端の研究に至るまでのまとまった話が聞けるという趣向であった。伝播ベース法については、オーストラリアの Steve Wilkins 博士が、また回折格子ベースの方法については、ドイツの Franz Pfeiffer 教授と日本の百生敦教授が、というように、世界をリードしてきた錚錚たる研究者が招待された。

セッション 2 とセッション 4 は、X 線位相コントラストイメージングの応用についての講演で、医療診断や工業製品検査など、この分野がまさに今応用フェーズにあって、発展著しいことがうかがえた。ほとんどが医療診断応用で、リウマチ診断、マンモグラフィー、肺気腫診断、小動物用 CT など多くの話題があった。また Han Wen 博士からは、回折格子ベースの Bonse-Hart 型干渉計という新しいタイプの干渉計による X 線位相イメージングの結果も報告された。

一方でセッション 3 は、位相コントラストイメージングに使用される実験室 X 線源が話題の中心で、回転陽極式 X 線源の近年までの発展やその応用、液体金属ジェット式 X 線源、プラズマ加速型のコンパクト X 線源についての講演があった。

応用の裾野を広げる上で、実験室の汎用でコンパクトな X 線源のさらなる高度化は、今後ますます重要なテーマになると考えられる。

全体を通して、伝播ベース法についての講演：5 件、回折格子ベースの方法についての講演：8 件、DEI についての講演：1 件であった。回折格子を用いた X 線位相イメージングが近年いかに注目を集めているかを物語っている。

二日目の夕方に DISCUSSION MEETING が閉幕した後、London から貸切バスで二時間ほど移動して、SATELLITE MEETING の会場である Buckinghamshire 州の Chicheley に到着した。Chicheley はチチェリーと表記するのがネイティブスピーカーの発音にいちばん近いようである。辞書でみつけるのも難しい London の北西方向にある小さな村で、近くには Northampton や Bletchley といった街がある。Bletchley は第二次世界大戦中に暗号解読が秘密裏に行われたことで有名な Bletchley Park がある [5]。

会場に到着したときには、すでに午後 8 時頃で、まわりには民家や街頭の明かりがほとんどなかったため、真っ暗な道を一つの大きな建物を目指してひたすらバスが前進していくという印象だった。敷地の中のいちばん大きな三階建ての建物 (Chicheley Hall [6]、図 1) の前でバスが止まり、まずはこの建物でチェックインを行った。この建物の正面に向かって左側にも二階建ての宿泊施設 (図 2) が二棟あり、全体として、T の字を縦方向につぶして左に 90° 回転し、T 字の交点付近を空き地にしたような配置になっている。二階建ての宿泊施設のさらに向こう側に、Kavli Royal Society International Centre と呼ばれている、Kavli 財団によって建てられた平屋の会議場があり、SATELLITE MEETING はこの建物で行われた。そのさらに向こうには St. Laurence 教会がある。

宿泊部屋にはそれぞれ Born、Bragg、Rutherford など偉大な科学者の名前がつけられていて、私が宿泊した部屋は数学者 Ramanujan

の部屋であった。室内には Ramanujan の肖像と日本人の作と思われる花の絵がいくつか飾られていた。

SATELLITE MEETING は次の日の朝から二日間行われた。講演会場は教会の内部を彷彿させる縦長の直方体で、壁には窓もなく、朝から晩までこの部屋に籠もってじっくりディスカッションを行うために作られたような部屋だった。

SATELLITE MEETING では、London でのワークショップと異なり、応用よりもむしろ X 線イメージング法（主に X 線顕微イメージング法）そのものに主眼がおかれ、タイトルの通り、実空間イメージング（トモグラフィー、X 線顕微鏡）、逆空間イメージング（Coherent Diffraction Imaging (CDI)）、およびそれらのハイブリッドとも位置づけられるタイコグラフィーについての講演で構成された。

SATELLITE MEETING のプログラム構成については、London でのワークショップ同様、4 つのセッションから構成された。各セッション 4 講演（15 講演+1 ポスターセッション）で、それぞれセッション 1：X 線顕微鏡、セッション 2：CDI、セッション 3：トモグラフィー、セッション 4：タイコグラフィーというサブタイトルがつけられた。X 線顕微鏡のセッションでは、Janos Kirz 教授の司会のもと、世界の最先端をいく Gerd Schneider 博士、Chris Jacobsen 教授、John Spence 教授という錚錚たる顔ぶれの中で、私も発表させていただいた。その他のセッションの講演者は、London でのワークショップに比べるとやや平均年齢が若い印象で、X 線イメージングの分野ではおなじみの Peter Cloetens 博士、4DCT で昆虫が飛行する際の筋肉の動きを観察することに成功した Marco Stampanoni 教授、世界で初めてタイコグラフィーの原理を実証した John

Rodenburg 教授、30 歳前後の世代では、2011 年 1 月に日本の放射光学会で講演していただいた Manuel Guizar-Sicairos 博士、X 線タイコグラフィーの分野で最近頭角を現しつつある Pierre Thibault 博士など、たいへん興味深い発表が続いた。



図 1 Chicheley Hall。食堂および宿泊施設があり、会議や結婚式などにも利用される[6]。18 世紀の建物で Grade 1[3]に指定されている。



図 2 筆者が宿泊した建物（二階最右の Ramanujan の部屋に宿泊）。右奥には St. Laurence 教会が見える。



図3 後半二日間の SATELLITE MEETING における全体集合写真 (Martin Bech 博士のご厚意による)。

総括して、4 日間にわたって、X 線イメージング分野における世界の最先端の話題を、かなりまとまった形で聞いたワークショップであった。最先端の現場で活躍する研究者が今後目指していく方向性を感じたり、まだ誰も行っていない研究の着想を練ったりと、非常に有意義な時間を過ごすことができた。X 線位相コントラストイメージングについては、コンパクトな大強度実験室 X 線源の利用、高エネルギー X 線の利用、S/N の改善、被曝量のさらなる低減といった研究が今後さらに推し進められるであろう。X 線顕微イメージングについては、高感度化、高空間分解能化はもちろんのこと、いかに測定対象を広げていくか、さらには 3D から 4D へ、といった流れの中にある。後半の SATELLITE MEETING は、参加者およそ 70 名中、日本人 2 名という環境であったが、これまでの友人に加えて、多くの若手の友人を得ることができたことも収穫だった。個人的には、最近出版した翻訳本 [7] の原著者である Copenhagen 大学名誉教授の Jens Als-Nielsen 教授とお会いで

きたこともたいへん光栄であった。

なおタイコグラフィーについては、今年の 5 月に Pierre Thibault 博士らがホストとなって、国際会議 (PTYCH02013) が開かれる。また、回折格子を用いた X 線位相イメージングについても、2012 年 3 月に東京で行われた国際ワークショップ X-ray and Neutron Phase Imaging with Gratings (XNPIG) の第二回 (XNPIG2014) が、2014 年 1 月 21-23 日にドイツで開催される予定である。今後の本分野のさらなる発展を祈って、本報告を終えたい。

参考文献

- [1] <http://royalsociety.org/events/2013/x-ray-phase-contrast/>
- [2] <http://royalsociety.org/events/2013/x-ray-imaging-satellite/>
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Listed_builing
- [4] なお「X 線位相イメージング」という用語は、

- ×線の位相シフトを定量的に画像化すること
を積極的に意味する目的で用いられる。
- [5] サイモン・シン「暗号解読」(新潮文庫) .
- [6] <http://www.deverevenues.co.uk/locations>

- </chicheley-hall.html>
- [7] J. Als-Nielsen、D. McMorrow「X線物理学
の基礎」(講談社サイエンティフィック) .



編集部より

【第十二回X線結像光学シンポジウム開催のご案内】

会期：平成 25 年 11 月 18 日（月）～20 日（水）（サテライトミーティング：17 日（日））
 場所：大坂大学中之島センター (<http://www.onc.osaka-u.ac.jp/others/map/index.php>)
 問い合わせ先：<mailto:xio12th@prec.eng.osaka-u.ac.jp>
 HP：http://www-up.prec.eng.osaka-u.ac.jp/xio/12thX10_Sympo/index_final.htm

【メーリングリスト】

本研究会のメーリングリスト (xio-nl@prec.eng.osaka-u.ac.jp) が立ち上がりました。研究会のお知らせなど、会員全員に情報を配信したいときなどに便利です。ぜひ積極的にご活用ください。

【登録メールアドレスの変更などについて】

本ニューズレターは原則メール配信となっております。メールアドレス変更などの際には、お手数ですが、編集部 (xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp) までご連絡ください。

X線結像光学ニューズレター
No. 37 (2013 年 4 月)

発行 X線結像光学研究会
(代表 東北大学 柳原美廣)
 編集部 山内和人 (大阪大)、齋藤彰 (大阪大)、矢代航 (東北大)
 E-mail: xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp

『平成 25 年度 X線結像光学研究会運営組織』

- ・ 代表者：柳原美廣 (東北大)
- ・ 副代表者：籠島靖 (兵庫県立大)
- ・ 事務局担当者：豊田光紀 (東北大)
- ・ 編集局責任者：山内和人 (大阪大)
- ・ 編集局委員：齋藤彰 (大阪大)、矢代航 (東北大)、柳原美廣、籠島靖、豊田光紀
- ・ 幹事：

伊藤 敦 (東海大)	太田 俊明 (立命館大)	籠島 靖 (兵庫県立大)、
木下 博雄 (兵庫県立大)	國枝 秀世 (名古屋大)	鈴木 芳生 (JASRI)、
田原 譲 (名古屋大)	常深 博 (大阪大)	難波 義治 (中部大)、
西村 博明 (大阪大)	羽多野 忠 (東北大)	兵藤 一行 (KEK)、
牧村 哲也 (筑波大)	百生 敦 (東北大)	森田 繁 (核融合研)、
山内 和人 (大阪大)	柳原 美廣 (東北大)	渡辺 紀生 (筑波大)
- * 新任：
 - 加道雅孝 (原研)
- ・ 特別顧問：
 - 波岡武 (東北大名誉教授) 山下広順 (大阪大名誉教授) 青木貞雄 (筑波大名誉教授)