

## 4<sup>th</sup> Conference on X-ray and Neutron Phase Imaging with Grating (XNPIG2017) 会議報告

公益財団法人高輝度光科学研究センター  
利用研究促進部門 星野 真人

### 1. はじめに

今回で4回目の開催となった、X-ray and Neutron Phase Imaging with Grating 国際会議 (XNPIG2017) が、スイス・チューリッヒで開催された。本会議はまだ歴史の浅い会議であり、第1回目は2012年に日本・お台場で開催された。その後、第2回目は2014年にドイツ・ゲーミッシュパーテンキルヒェン、第3回目は2015年にアメリカ・ベセスダのNIHで開催された。会議の会場となったのは、世界的な名門大学であるスイス連邦工科大学チューリッヒ校 (ETH Zurich) である。お城のような重厚な外観、博物館のような内観の建物であり、チューリッヒの旧市街地からやや高台に位置しているため、大学前の広場からは、チューリッヒ旧市街の様子や、遠くには雪に覆われたアルプスの山々を見ることができた。会議は、2017年9月12日から15日の日程で開催され、日本はまだ暑さの残る気候であったが、チューリッヒは日中でも20度を下回る温度であり、特に朝晩は厚手の上着が必要なほど冷え込む日もあった。

第1回目の会議に比べると、参加者数も徐々に増えてきており、主催者の発表によると、参加者(登録者)は112名(14カ国)で、13報の招待講演、35報の口頭発表、36報のポスター発表が行われた。プログラムは、12個のプレナリーセッションで構成され、各セッションタイトルは、“Source and Metrology”、“Fabrication Method”、“Instrumentation 1, 2, 3, 4”、“Materials Science 1, 2”、“Signal Retrieval”、“Clinical Application 1, 2”、“Industrial Application”と、装置開発からアプリケーションまで多岐にわたる。会議2日目の昼食時にはポスターセッション、さらに同日午後には、半日をかけて Swiss Light Source (SLS) や Swiss FEL を含む Paul Scherrer Institut (PSI) の見学ツアーが組まれた。また、見学ツアーの最後には、PSI サイト内のレストランにおいてカンファレンスディナ

ーも催され、会議参加者同士のコミュニケーションの場となった。



図1 (上) ETH Zurich の旧市街地側建物外観 (シンボルのドーム状建造物はこの反対側となる)。(中) ETH Zurich 前の広場から眺めたチューリッヒ旧市街の様子。(下) 口頭発表(メイン)会場の様子。

## 2. 会議報告

では本題である会議報告について、会期中の口頭発表を中心に、最近の当該研究分野の動向や、研究トピックスについて報告する。そもそも XNPIG は、透過型回折格子を用いた X 線干渉計 (XGI) \* にまつわる研究内容を中心に議論が行われる会議として位置づけられている。XGI は、2000 年代前半に開発された手法であるが、その原理となっているタルボ効果\*の発見に関しては 1800 年代にまで遡る<sup>[1-3]</sup>。上記のセッションタイトル一覧でご紹介したように、XGI に関する研究は、干渉計を利用した装置開発や、干渉計用光学素子である透過型回折格子の製作について、また、医学、物質科学、産業利用への応用に関するものまで幅広く含まれる。また、この XGI の特徴として、放射光 X 線のような部分コヒーレントな高輝度 X 線光源だけではなく、実験室レベルの X 線光源 (インコヒーレント光源。ただしこの場合は線源格子が必要。論文などでは Low-brilliance source と表現されることもある) に対しても適用できることから、放射光施設では実施することが困難な臨床応用へ向けた研究も展開されている。また、本報告書では内容の詳細については触れないが、会議名にも含まれるように、中性子に対しても同様の干渉計原理が適用可能であり、装置開発や物質科学応用に関する報告も何件が見られた。応用事例としては、試料バルクの磁区形成の調査に関する話題などが提供された。

以下では、セッションごとに筆者が気になった発表について、簡素ではあるが記述していきたい。まず、“Source and Metrology”のセッションでは、新規 X 線光源として、Munich Compact Light Source (MuCLS) に関する話題が提供された。コンセプトは、“How to shrink a SR?”であり、高エネルギー電子と赤外レーザーの相互作用によって生じる逆コンプトン散乱を利用した X 線発生装置である。詳細については、筆者が「XRM2016」の会議報告において記述しているので、そちらを参照されたい<sup>[4]</sup>。MuCLS では、バイオメディカルイメージングを中心に X 線イメージング実験が行われているとのことであり、Technical University of Munich の R. Gradl 氏からは、Particle image velocimetry を用いた小動物肺の動的観察や、Liquid delivery の観察など、これまで放射光施設を用いなければ困難であったダイナミック

計測への展開可能性が紹介された。ただし、ベンチレータ (人口呼吸器) 同期の動的観察時においても、200 ms 程度の露光時間を要しているようであるので、時分割あるいはダイナミック計測への応用については、放射光光源にアドバンテージがあるように感じられた。また、Metrology としては、XGI の原理として知られるタルボ効果を用いて、入射 X 線の波面計測への展開が紹介された。タルボ効果を用いた波面計測では、2次元格子パターンを用いた方法や、スペクトルトラックングといった方法が用いられるようである。DESY の P. Vagovic 氏は、XFEL における波面計測によって得られる情報により、Coherent Diffraction Imaging (CDI) や Serial femtosecond crystallography (SFX) 実験へのフィードバック、X 線光学素子のアライメントへの応用など、XGI による波面モニタリングの可能性と必要性について解説を行った。実際に波面計測例として、2次元の Diamond Check Board 型の格子 (周期) パターンを用いて、X 線導波路からのビーム強度分布および位相分布に関する計測結果が紹介された。今後の展望として、2次元フーリエ変換を含む位相回復処理演算を、GPU 処理系へ移行することにより、オンラインでのデータ処理系の構築を行っていくことなどが紹介された。一方、PSI の F. Koch 氏は、XGI を用いた X 線屈折レンズにおける波面計測 (形状測定) への応用について紹介した。XGI によって得られる微分位相コントラストでは、レンズを構成しているベリリウムの残存厚やボイドを可視化することが可能なようである。レンズ形状における局所的な Angular deviation を測定することができることにより、従来から光学素子の評価に用いられてきた光学干渉計やフォーコーテストと並ぶ評価手法の一つになっているようである。

XGI を行う上で必要となるのが、透過型の回折格子であり、製作方法はいくつか存在するが、その中でも現在の主流となっているのが、X 線リソグラフィーを用いた LIGA プロセスといえるだろう。“Fabrication Method”のセッションでは、最先端のディープ X 線リソグラフィーについて、Karlsruhe Institute of Technology (KIT) の P. Mayer 氏より報告があった。基本的な XGI は 2 枚の透過型回折格子によって構成されるが、光学系下流側に設置される 2 枚目の格子 (吸収格子と呼ばれる) については、格子パターンに

においてできるだけ X 線を止めるような構造が求められる。また、細かい格子ピッチの方が位相感度に優れるという要求もあるため、必然的にアスペクト比の高い格子の製作技術が重要となる。また、以下でも述べるように、物質科学応用において、特に高エネルギー X 線を用いた小角散乱 (暗視野) コントラスト計測の需要が増えてきていることから、格子の製作難易度は高くなる一方であるのが現状である。高アスペクト比の格子では、格子パターンがよれたり、崩れてしまったりするという課題もある中、ブリッジデザインや、Sun-ray と呼ばれる補強用デザインの採用により、高アスペクト比格子の安定性を高める工夫などが紹介された。また、XGI では、撮像視野は格子面積によって制限されるという点から、特に臨床応用を目指す場合、より描画面積の大きな格子パターンが必要となる。現状の製作技術では、単一格子として 10 cm × 10 cm までの格子が製作できるとのことであり、さらに Dynamic exposure LIGA と呼ばれる方法を用いることで、複数枚の格子をつなぎ合わせることで 1 枚の大面积格子を製作するといった取り組みなども紹介された。実際に製作された大面积格子は、4 × 4 枚で構成された Tiled grating であり、実効描画面積 200 mm × 200 mm、格子ピッチ 4.8 μm で、XGI を構成するのに十分な性能が得られているとのことである。また、同手法を用いることで、最大 400 mm × 400 mm サイズの回折格子の製作の可能性についても触れられた。

このような高アスペクト比の吸収格子開発に関する取り組みの一方で、最近の XGI の装置開発としては、シングルショットあるいはシングル位相格子の利用 (吸収格子を用いない光学系) というのがキーワードとなってきているようである。“Instrumentation” のセッションにおいて、NIH の H. Miao 氏は、X 線干渉計が 3 枚の位相格子で構成されるというユニークな光学系開発について報告を行った。位相格子であるので、高アスペクト比は要求されないため (一般的に位相格子は入射 X 線エネルギーに対して  $\pi/2$  もしくは  $\pi$  の位相シフトを与えられれば良い)、その製作は比較的容易であり、3 枚の位相格子すべてがサブミクロンの格子ピッチを持つことが条件という制約はあるが、従来の実験室系 XGI である X 線タルボ・ロー干渉計と比べて、提案手法の方が、位相感度が 1 桁

以上高いといった特性が紹介された。一方で、従来の周期的な回折格子を用いた位相コントラストイメージングに対して、紙やすりのようなランダムパターンを利用したスペckルベースイメージングの報告例も増えてきた。スペckルイメージングの場合、X 線光源にある程度の空間コヒーレンスが要求されるため、放射光に適した測定法ともいえる。スペckルベースイメージングも、XGI 同様に、試料の吸収像、微分位相 (屈折) 像、小角散乱像の取得が可能である。Diamond Light Source の H. Wang 氏は、従来の回折格子を用いた手法と、スペckルベースイメージングに関して、走査方法における観点、Angular sensitivity に関する観点、空間分解能の観点から定量的な比較を行い、計測目的に応じて使い分けるための指針について解説した。また、同じく Diamond Light Source の M.-C. Zdora 氏は、スペckルベースの位相コントラストイメージングにおいて、波面変調器としてフレキシブルに信号感度や空間分解能、測定時間を調整することができる Unified modulated Pattern Analysis という解析手法について紹介した。同手法を用いることで、スペckルベースの生体試料の位相コントラストイメージングに加えて、metrology として X 線屈折レンズの性能評価へ適用できることも紹介された。

XGI において、吸収格子を用いない光学系、すなわち位相格子のみで構成される光学系の場合、位相格子の自己像 (格子ピッチは数ミクロン程度) を解像するために、画像検出器に高い空間分解能が要求される。この課題に対して、検出器側を工夫することによるアプローチも紹介された。その一つの例が、自己像を解像できるほど空間分解能が高くない画像検出器でも、フォトンカウンティングモードで使用することにより、光電変換によって生じた電荷の広がりをサブピクセル補間により詳細に解析することで、本来の空間分解能では解像することができない自己像の直接検出を可能にしたという研究結果である。25 μm/pixel の画像検出器を用いて、格子ピッチ 6 μm の位相格子によって生成された自己像を検出し、位相コントラストイメージングを行ったという事例が紹介された。

会議では XGI に関する話題だけではなく、類似した計測手法に関する発表も見られた。その一つが、Edge-illumination 法 (EI) である。原理としては、試

料によって屈折した信号を効果的に取り出す計測になるため、XGI より Diffraction Enhanced Imaging (DEI) に近い計測法といえるだろう。EI 法の開発者である University College London (UCL) の A. Olivo 氏は、XGI と EI の違いについて述べた上で、撮像視野、X 線エネルギー、撮影速度の観点から、EI 法のメリットについて紹介した。大きな特徴としては、EI 法における計測条件は、試料での X 線の屈折のみに依存し、X 線光源にコヒーレンスは必要とされない。つまり、放射光のような部分コヒーレントな光源よりは、実験室系光源に適した計測法であるといえる。EI 法では、位相コントラストイメージングを行うために、2 枚の入力画像が必要とのことであるが、同じく UCL の P. Diemoz 氏は、EI 法におけるシングルショット計測法の開発に関する報告を行った。シングルショットイメージングの原理としては、今日では Propagation-based phase imaging として多くのアプリケーションで用いられている D. Paganin 氏の位相回復アルゴリズム<sup>6)</sup>と同様に、試料における X 線複素屈折率の  $\delta/\beta$  の比を一様と仮定して計算しているようである。

今回の会議の特徴として、“Materials Science”や“Industrial Application”のセッションに代表されるように、物質科学や産業利用への応用に関する発表が多数みられた。物質科学応用では、特に近年高い強度と軽さを併せ持つ材料として産業界で広く用いられている Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) への適用例が多い印象を受けた。本稿でも記述するように XGI やスペckルベースイメージングでは、吸収像や位相像に加えて、試料による散乱コントラスト画像（小角散乱像もしくは暗視野像と呼ばれる）を計測することができる。この散乱コントラストを利用することで、例えばインパクトダメージを受けた CFRP におけるクラックの可視化へ応用が可能なのである。また、散乱コントラストを用いたユニークな発表としては、空港などにおける手荷物 X 線検査において、散乱イメージングを粉末のような検査装置の分解能以下のテクスチャの検出に適用することで、Explosives（爆発物）の検出に利用できるのではないかという提案が行われた。一方で、セメントベース材料への応用に関する話題もいくつか見られ、散乱情報を用いることで、セメントの硬化過程の評価への応用

例も紹介された。産業応用としては、東北大学の百生氏や、共同研究者の株式会社リガクの影山氏により、位相スキャナーの開発に関する話題が提供された。ベントコンベアー上を動く試料に対して、従来の吸収コントラストでのスキャンに加えて、微分位相コントラスト、散乱コントラストでの測定を可能とした検査装置である。ベルトコンベアーのような振動がある条件下において位相計測を実現するために、Robust Phase Stepping という計測手法が紹介され、振動に伴う計測エラーデータを効率的に除外し、位相回復計算へ展開できるとのことである。スキャナーの性能としては、現状で 10 mm/秒の速度で動く試料に対して、視野サイズ 220 mm、スキャン方向の長さ 500 mm で測定が可能とのことであり、CFRP への応用例などが紹介された。

物質科学応用や産業応用に関する研究成果が発表されるようになってきた一方で、やはり位相コントラストイメージングの応用として外すことができないのが、医学応用である。“Clinical Applications”のセッションでは、XGI とマンモグラフィ測定を組み合わせ、臨床用の XGI ベースのマンモグラフィ装置の基礎研究や開発に関する話題が多く見られた。これは、XGI の散乱コントラストイメージングが、微小石灰化領域を可視化するのに力を発揮できることによるものであり、現状臨床の現場で用いられている Breast MRI から、Breast CT へ展開する際に、XGI ベースの位相コントラストイメージング・CT の可能性について言及する発表も見られた。散乱コントラストイメージングと医学応用というキーワードでは、胸部（肺）のラジオグラフィに関する報告もいくつか見られた。臨床レベルの検出器分解能では、肺胞はサブピクセル構造体としてみなせるため、散乱コントラストによる可視化が可能である。Technical University of Munich の A. Fingerle 氏は、マウスの肺気腫モデルを利用した測定を行い、コントロールモデルと比較することで、肺気腫の病態がより深刻なほど、小角散乱強度が弱くなる（散乱コントラストが弱くなる）ことを紹介した。また、同じく Technical University of Munich の K. Willer 氏からは、in-vivo 計測として、生きた子ブタを用いた胸部ラジオグラフィへの応用例が紹介された。撮像視野は 30 cm × 30 cm で、XGI の視野を広げるために、上述の Tiled grating を

用いたとのことで、肺気胸のような肺疾患の高度診断技術への展開が期待できるというコメントも見られた。

### 3. おわりに

本稿では紹介しきれなかったが、会期中には、他にも XGI に関する様々な研究報告が行われた。また、今回の会議から、優れた研究成果を発表した若手研究者に送られる William H. F. Talbot Award が導入された。賞の名前にもなっている H. F. Talbot 氏 (1800 年 2 月 11 日-1877 年 9 月 17 日) は、写真技術の先駆者であると同時に、XGI の根本的な原理であるタルボ効果を発表した人物である。第 1 回目の受賞者となったのは、PSI の M. Kragos 氏で、全方位散乱に対して感度を持つ XGI の開発や、現状の XGI の制約を打破するための装置開発に対する取り組みが評価された。贈呈されたメダルも独特なもので、Si ウェハーに LIGA プロセスで文字を刻印したもので、まさに本会議の賞に送られるメダルとしてうってつけのものであった。

次回の XNPIG 国際会議は、再度日本へ場所を移し、2019 年 10 月に仙台で開催される予定である。

### 参考文献

- [1] A. Momose *et al.*: *Jpn. J. Appl. Phys.* **42** (2003) L866-L868.
- [2] T. Weitkamp *et al.*: *Optics Express* **13** (2005) 6296-6304.
- [3] H. F. Talbot: *Philos. Mag.* **9** (1836) 401-407.
- [4] 星野真人: *SPRING-8/SACLA 利用者情報* **21** (2016) 289-292.
- [5] D. Paganin *et al.*: *J. Microscopy* **206** (2002) 33-40.

### ※用語説明

#### \*タルボ効果について

タルボ効果とは、回折格子のような周期的パターンに (部分) コヒーレントな光を照明したときに、周期パターンからある特定の距離に、そのパターンと同じ周期をもった強度パターン (自己像) が形成される現象である。なお、自己像には、試料を透過した際などに生じる波面の歪みが反映される。

#### \*回折格子を用いた X 線干渉計について

空間的にコヒーレントな X 線を用いた場合、回折格子を用いた X 線干渉計 (タルボ干渉計) は、位相格子 (G1) と吸収格子 (G2) によって構成される。概略図を図 2 に示す。X 線タルボ干渉計は、試料と検出器の間に設置され、G1-G2 間の距離は、格子ピッチと X 線エネルギー (波長) によって決定される。G2 を導入する理由は、G1 の自己像の格子ピッチは数ミクロンであるので、一般的な画像検出器での自己像の直接検出は困難である。そこで、G2 を自己像が生じる位置に設置することで、モアレ縞を生成することができる。試料による自己像の歪みは、モアレ縞にも反映されるため、モアレ縞を縞走査法などを用いて解析することにより、位相計測へ展開することができる。

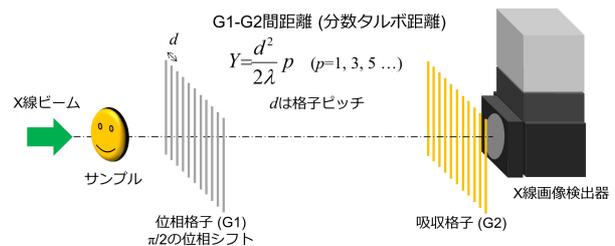


図 2 透過型回折格子を利用した X 線干渉計 (Talbot 干渉計) の概略図。

#### 星野 真人 HOSHINO Masato

(公財) 高輝度光科学研究センター 利用研究促進部門  
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1  
TEL : 0791-58-0833  
e-mail : hoshino@spring8.or.jp