

放射光の時空間構造とその応用の可能性

加藤 政博 広島大学 教授／分子科学研究所 特任教授



かとう・まさひろ

KEK Photon Factoryで14年間、分子研UVSORで19年間お世話になり（現在もクロスアポイントメントでお世話になっています）、広島大学放射光科学研究センターHiSORへ移って半年以上経ちました。Photon Factory以来、放射光源加速器の運転当番から外れたことがありません。UVSORでは施設長を務めた数年間も運転当番をやっていました。現在もHiSORの運転当番に加えてもらっています。定年まであと数年、最近は制御用ディスプレイの小さい字がちょっと見えにくいのですが、ここまで来たら最後まで続けさせてもらおうと思っています。ご迷惑にならない限りはですが……。

放射光は、今日、レーザーと並び基礎学術から産業応用まで幅広い領域で分析用光源として利用されている。一様な磁場で高エネルギーの自由電子がローレンツ力を受けて放射するいわゆるシンクロトロン光は帯域の広い白色光であり、テラヘルツ波からX線に至る幅広い波長域で高い指向性と強度を兼ね備えている。これを分光することで、良質な光源の限られている真空紫外線から硬X線の領域で高品質な光が得られる。一方、最近の放射光リングではアンジュレータと呼ばれる装置を用いてより輝度の高い光を生成し利用している。アンジュレータの原理は図1に示す通りであるが、周期的に向きの反転する磁場の中を高エネルギー電子が蛇行運動し準単色の光を放射する。磁場の強さを変えることで光の波

長を連続可変にできる。アンジュレータ光のスペクトルは基本波と呼ばれる光子エネルギーとその整数倍（高調波と呼ばれる）のエネルギーにピークを持つ。図1からもわかる通り、電子はアンジュレータ中で磁場の周期数（以下N周期とする。通常、Nは10から100程度）だけ蛇行運動し、正確にNサイクル振動する電磁波を放射する。スペクトル幅はサイクル数の逆数の $1/N$ 程度となる。したがって、数10周期のアンジュレータでは数%のスペクトル幅となる。通常はこれをさらに分光して研究に用いる。なお、電子の速度はほぼ光速に近いことから、電子は自身の出した電磁波を追いかけるように走る。このことが相対論的な圧縮効果を生み、放射波長はアンジュレータの磁場の周期長よりもはるかに短くな

る。例えばUVSORでは数cm周期のアンジュレータから波長数10nm程度の放射光が出る。

このようにアンジュレータを用いると、正確にある決まった周期数だけ振動してぴたりと止まる電磁波を真空紫外やX線の領域で簡単に作り出せる。もう少し踏み込んでいえば、原理的には電子の運動を制御することで放射場の波形を自在に制御できるのである。このような観点から、我々の研究グループは、ここ数年間、放射光を波として捉え、その波の時間的・空間的構造（位相構造）を理論的・実験的に検証し、さらに放射光利用者と連携して、その時空間構造を活かした新しい研究手法を探求している。この記事では分子科学研究所の放射光源UVSOR（図2）を用いて行った最近のいくつか

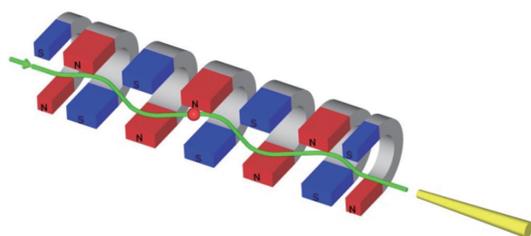


図1 アンジュレータ概念図。



図2 UVSOR実験ホール。

の成果についてご紹介したい。

最初に紹介するのは、光渦やベクトルビームと呼ばれる、波面や偏光が特異な空間構造をもつ光を作り出す実験である。アンジュレータには図1に示すような電子ビームが水平方向に蛇行運動するもの以外に、円偏光を作り出すためのアンジュレータがある。技術的な詳細は省略するが、そのようなアンジュレータの中では電子はらせん状の軌道を描いて運動する。UVSORの円偏光アンジュレータからの放射光の基本波及び高調波に対してダブルスリットを用いた干渉実験（いわゆるヤングの干渉実験）を行った結果を図3に示す^[1]。基本波はきれいな直線状の縞模様の干渉を示すのに対し、2次高調波では、左右で明暗の位置がずれ、ビーム中心で縞模様に断裂が観測される。この結果は、基本波が平面波であるのに対し、2次高調波は波面が平面ではなく図4に示すようならせん状になっていることを示している。別な実験手法で3次高調波は二重らせん波面を持っていることも示せた^[1]。

このようならせん状の波面を持つ光は光渦と呼ばれ、軌道角運動量を運ぶ光として近年活発に研究されている。レーザー分野では様々な光学素子を用いて光渦を生成する手法が確立されているが、アンジュレータを用いると真空紫外線やX線の領域で光渦が生成できるのである。ところで何故高エネルギーの自由電子がこのような奇妙な電磁波を放射するのだろうか。面白いことに、円運動する自由電子からの放射という極めて基本的な放射過程にその起源がある^[2]。光渦のようならせん波面を持つ電磁波の放射は実は極めて一般的な物理現象であり、例えば宇宙における高エネルギー現象などでもこのような電磁波が自然に放射されているはずなのである^[3]。

話は放射光に戻るが、この研究のひとつの展開として、ベクトルビームと呼ばれる光の生成にも成功した。この実験では直列に配置された2台のアンジュレータのそれぞれから左右反対回りの光渦を生成し、これをクロスアンジュレータと呼ばれる手法で重畳させ

た。その結果、偏光の向きが場所に依存して変わるベクトルビームと呼ばれる光を生成できた（図5）^[4]。これら光渦やベクトルビームはStructured Lightとも呼ばれレーザー分野を中心にその応用へ向けた研究が活発に行われている。そのような研究が真空紫外線やX線の領域へ展開できる状況となりつつある。

次にアンジュレータ放射の時間構造に関する研究成果を紹介する。この実験では直列に配置した2台のアンジュレータを用いた（図6）。アンジュレータの間には位相子（Phase Shifter）と呼ばれる電子の軌道を少しだけ蛇行させることで光に対して電子を遅延させる装置が挿入されている。電子はこの2つのアンジュレータを続けて通過し（古典論的には）ダブルパルス構造を持つ電磁波を放射する。ダブルパルス間の遅延時間は上記の位相子の磁場を変えることで制御できる。面白いことに、電子のエネルギーが高く遅延の大きさが非常に小さいことから通常の加速器用の電磁石や励磁電源を用いても遅延

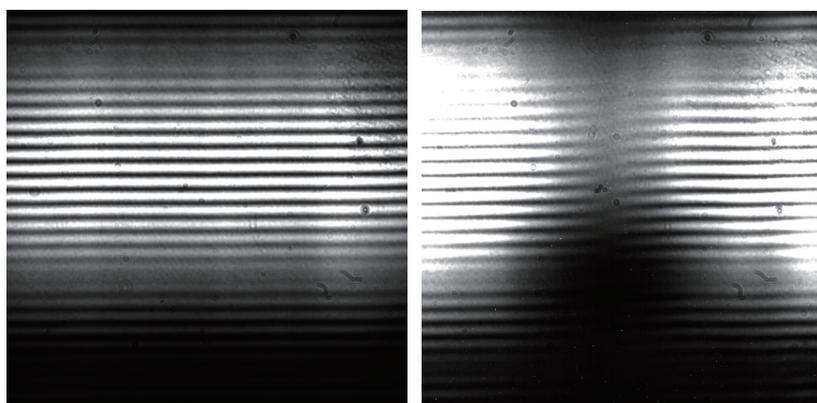
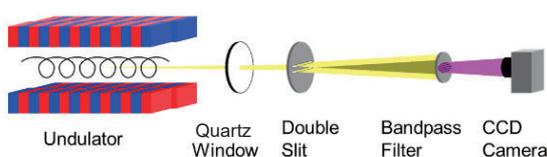


図3 円偏光アンジュレータからの放射光のダブルスリット干渉実験。実験配置（上）、測定結果（下左：基本波、下右：2次高調波）

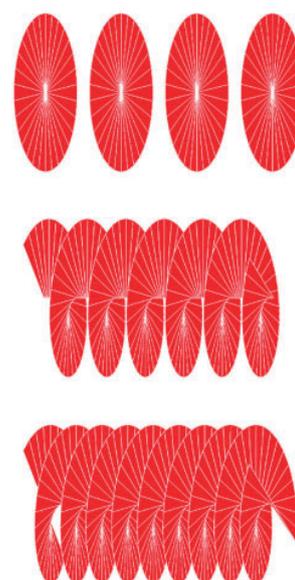


図4 アンジュレータ基本波（上）、2次高調波（中）、3次高調波（下）の波面構造の模式図。

時間をアト秒のオーダーで制御できる。このような時間構造を持つ光をヘリウム原子に照射すると、ダブルパルス間の遅延時間を変えることで、原子を特定の状態に選択的に励起できるという結果を得た^[5]。また、別な実験では、片方のアンジュレータから右回り円偏光、もう片方からは左回り円偏光を放射させ、同じく遅延時間を変えることで励起状態の原子の電子雲の向きが制御できた^[6]。極めて高精度に制御されたレーザーでのみ可能と思われていた量子状態制御が放射光でも可能であることがわかった。これらの結果の興味深い点は、時間的にコヒーレントではない多数の電子からの自然放射である放射光を用いて原子の量子状態制御（コヒーレント制御）ができていた点にある。このあたりの議論は紙面の関係で

省略せざるを得ないが、ご興味のある方は参考文献をお読みいただきたい。

シンクロトロン放射を始めとする荷電粒子からの電磁放射は放射光科学分野だけでなく宇宙物理学など幅広い分野で重要であるが、これを教科書で取り扱う場合、計算の早い段階で電場や磁場はその絶対値の二乗に置き換えられ、位相項は消されてしまう。観測するにも利用するにも、どの波長にどのくらいの強度（光子数）で放射されるか、すなわちスペクトル強度が重要であるためであろう。我々の研究は、これまでほとんど無視されてきた電磁放射の位相の時間・空間構造に注目し、その制御方法や利用方法を探求するものである。光科学の新しい領域を切り拓くという意気込みで研究を続けているので、ご興味があれば是非ご参加いただきたい。

最後になるが、これらの研究は、分子研の施設利用、協力研究などの共同利用システムや客員などの共同研究の仕組みを最大限活用して進めてきた。共同研究者は数が多いため紙面の制約もあり、名前をあげることはできないが、参考文献をご覧いただければと思う。実験に用いたUVSORのBL1Uは光源及び利用技術開発専用のビームラインであり、文部科学省の量子ビーム基盤技術開発プログラムの支援により建設された。実験装置の整備には分子研の特別研究費や科研費その他の競争的資金を用いた。研究の遂行に際して、分子研内の多くの技術職員、特に極端紫外光研究施設、メゾスコピックセンター、装置開発室の方々に様々な形でご支援いただいた。この場を借りてお礼を申し上げる。

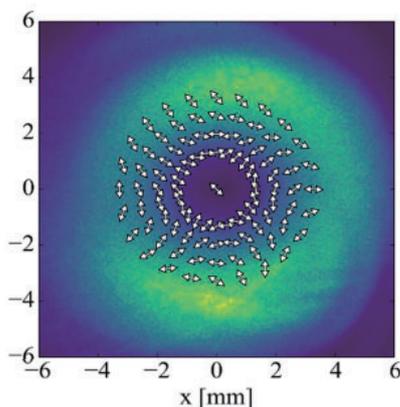


図5 直列アンジュレータを用いて生成したベクトルビーム。矢印は偏光の方向。偏光方向が中心軸のまわりで回転している様子がわかる。

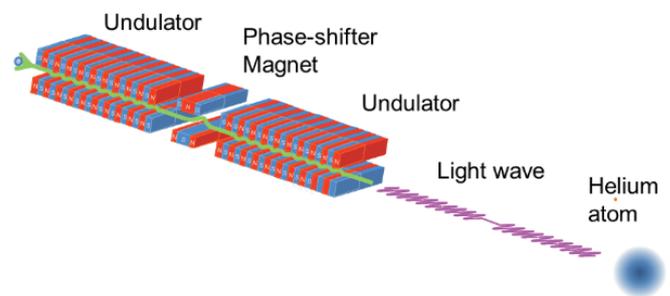


図6 直列アンジュレータからの放射光による量子状態制御実験。

参考文献

- [1] M. Katoh, M. Fujimoto, N. S. Mirian, T. Konomi, Y. Taira, T. Kaneyasu, M. Hosaka, N. Yamamoto, A. Mochihashi, Y. Takashima, K. Kuroda, A. Miyamoto, K. Miyamoto, S. Sasaki, *Sci. Rep.* **7**, 6130 (2017)
- [2] M. Katoh, M. Fujimoto, H. Kawaguchi, K. Tsuchiya, K. Ohmi, T. Kaneyasu, Y. Taira, M. Hosaka, A. Mochihashi, Y. Takashima, *Phys. Rev. Lett.* **118**(9) 094801 (2017)
- [3] Y. Taira, M. Katoh, *Astrophys. J.* **860**(1) 45 (2018)
- [4] S. Matsuba, K. Kawase, A. Miyamoto, S. Sasaki, M. Fujimoto, T. Konomi, N. Yamamoto, M. Hosaka, M. Katoh, *Appl. Phys. Lett.* **113**, 021106 (2018)
- [5] Y. Hikosaka, T. Kaneyasu, M. Fujimoto, H. Iwayama, M. Katoh, *Nat. Commun.* **10**, 4988 (2019)
- [6] T. Kaneyasu, Y. Hikosaka, M. Fujimoto, H. Iwayama and M. Katoh, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 233401-1-5 (2019)