

## 軟 X 線ビームラインにおける分光器分解能の評価

吉村大介、小林英一、瀬戸山寛之、岡島敏浩

九州シンクロtron光研究センター ビームライングループ

九州シンクロtron光研究センターにおける 2 本の軟 X 線ビームライン(BL10 及び BL12)では、どちらも不等刻線間隔平面回折格子を用いた分光器によってシンクロtron光の波長選別を行っている。これら分光器の性能評価(分解能、光子フラックス等)や波長校正を定期的に行うことは、ビームラインの性能を維持し、質の高い実験環境を提供し続けるために重要な事項である。

本発表では、2 本の軟 X 線ビームラインにおける分光器分解能の比較及び再評価の結果について報告する。これまで分解能の評価については、諸々の制限によって簡易的な方法でしか行えない状況であったが、最近になってより正確に分解能を評価できる検出方法での測定に対応可能となった。そこで、各ビームラインの現状の把握と今後の整備方針を定めることを目的として再評価を行った。また、BL10 については分解能評価と同時に行った、分解能の偏角依存性や波長再校正の結果についても報告する。

---

# 軟X線ビームラインにおける分光器分解能の評価

## 吉村大介 九州シンクロトロン光研究センター (SAGA Light Source)



### Outline

SAGA-LSでは、現在2本の県有ビームライン(BL10及び12)が軟X線領域の実験に供されている。軟X線用のビームラインにおいては、シンクロトロン光を平面回折格子を用いて分光するのが一般的である。ビームラインの性能を評価する上では、エンドステーション実験装置と共に分光器の分光性能(光の分解能及びフラックス)が非常に大きな要素となる。本発表では、2本の軟X線ビームラインの分光器分解能に関して、両者の比較や設計性能との差について報告する。また分解能評価と並行してBL10分光器の再波長校正も行ったので報告する。

### 軟X線ビームラインの概要と分解能評価

#### SAGA-LSの軟X線ビームライン仕様

SAGA-LSの軟X線ビームラインBL10及びBL12の仕様のうち、主に分光器に関する項目を右表にまとめた。光源の種類や平面回折格子の中心刻線密度等にも差異があるが、今回の報告で重要となるのは、回折格子に入射する光の角度と回折光の出射角(ずれも法線方向からの角度)の和であらわされる「**偏角(2θ)**」で、分光器が定偏角型か可変偏角型であるかによって状況がかなり異なる。

#### 分光器の分解能評価法について

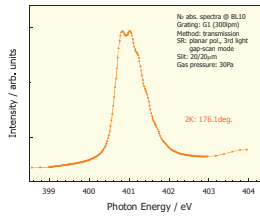
分光器の分解能は、建設したビームラインの性能を示す重要な項目であり、これまでに何度か評価を行ってきた。しかし、装置等の制約から随時的なセッアップを用いていたため、正確な評価が出来ていなかったことが多かった。最近になり電子/イオン収量法での測定が可能になったため、改めてBL10、12共に再評価することにした。下表はこれまでの測定法(透過法)と新しい方法との比較である。

#### ・ガス吸収スペクトルの測定法比較

測定法	装置&検出器	導入ガス圧	測定精度
透過法	筒筒型ガスセル/フォトダイオード	1~50Pa	低い、ガス圧に依存。
電子/イオン収量法	ボイストド型真空室/検出器(電子/イオン/MCP)	~10 <sup>-4</sup> Pa	高い、ガス圧に依存せず。

#### ・BL仕様比較

	分光器及び回折格子	エネルギーと偏角範囲	光源
BL10	可変偏角型不等刻線回折格子 中心刻線密度300G(1,200)G2(Hres/nm)	40-600eV/168-176.5° G1 200-1200eV/170-175.5° G2	アンジュレータ光
BL12	定偏角型不等刻線回折格子 中心刻線密度 600Ines/nm	40-200eV/167° M23 200-550eV/172° M22 500-1500eV/174° M21	ペンディング光

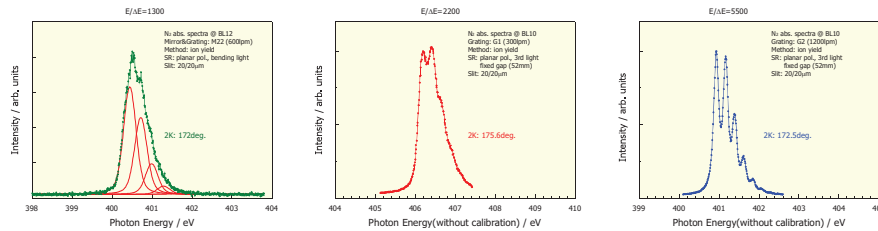


【N<sub>2</sub>ガスの吸収スペクトル(透過法)】  
左図はBL10において、低エネルギー領域用の回折格子G1を使用して測定した、空素ガスの吸収スペクトルである。H13年度に行った光学素子洗浄後の結果で、透過法による測定を行っている。その他の測定条件は図中に示す。導入ガス圧は30Paとした。ガス圧を減らすとSNが低下するが、分解能はやや向上する。これは、X線のエネルギーが低いため、散乱等の影響でスペクトルが鈍ってしまうのが原因と考えられる。

#### 本研究の動機及び目的

ビームラインの建設後から、その性能評価や経年変化の確認は定期的に行ってきたが、特にBL12において分光器分解能の実測値が設計値に対してかなり悪い結果を示す状況であった。  
しかしながら我々が行っていた吸収測定のやり方は、かなり簡易的な方法であったため、最近になってセッアップが出来る様になった電子/イオン収量法による測定での再評価を行うことで、測定手法の違いが、実際に分解能評価へ影響を及ぼすのかを確認し、分解能の低下がビームライン由来であるならば、その原因に関する何かからの知見を得ることを今回の研究の目的とした。

### BL10/BL12分光器分解能の比較



#### 【N<sub>2</sub>ガスの吸収スペクトル(イオン収量法)】

上に示す3つのスペクトルは、左からBL12、BL10(低エネルギー用回折格子G1)、BL10(高エネルギー用回折格子G2)を用いて空素ガスの吸収測定を行った結果である。いずれもイオン収量法で測定を行っている。また、その他の測定条件や偏角(2θ)の測定は図中に示す。BL10のスペクトルに関しては後述のエネルギー校正完了前のデータであるため、横軸が未校正の表示となっている。それぞれのスペクトルはピーク分離を行った上で解析を行い、それぞれの上に示すような分解能(ΔE)の値を得た。

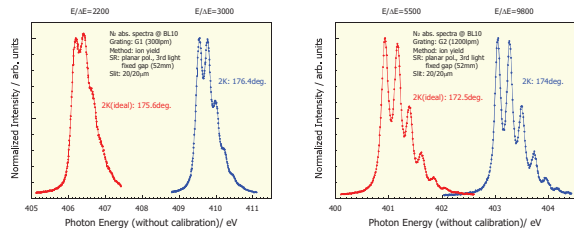
#### ガス吸収スペクトルによる分解能評価

得られた吸収スペクトルは、Voigt関数によるピーク分離を行った上で、Gaussian成分を分光器の分解能、Lorentzian成分をホルの自然寿命として解析した。その際のパラメータは加藤らの文献(M. Kato et al. JESR 160 (2007) 39-48)を参考にしている。

#### 測定法及びBL間で分解能の比較

上に示した中央のスペクトルと、上のセクションに示したスペクトルが測定法の比較に对应し、明らかにイオン収量法の結果が高い分解能を示すのがわかる。BL間の比較としては、BL12の分解能が回折格子の刻線密度が高いにも関わらず、BL10の低刻線密度の場合の分解能よりも悪いことがわかる。ちなみにこのエネルギーにおける理論分解能は左から約5500、5400、14000eVであり、やはり特にBL12の結果が悪い。この原因としては光学素子のアライメントに何かしら問題があるのではないかと考えられる。

### BL10分光器分解能の偏角依存性



#### 【N<sub>2</sub>ガスの吸収スペクトル(イオン収量法)】

上に示すスペクトルは、N<sub>2</sub>ガスの吸収スペクトルを低エネルギー用回折格子(G1)と高エネルギー用回折格子(G2)それぞれに対して理論最適偏角と、より大きい偏角に対して測定した結果である。各スペクトルに対する分解能の値を対応するスペクトルの上に示した。横軸は未校正の測定したままの値で表示している。

#### 分光器分解能の偏角依存性

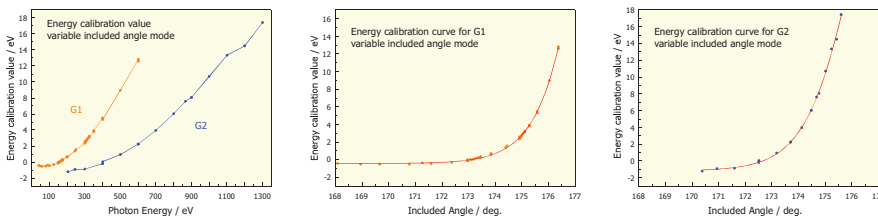
上に示した結果から、より偏角が大きい条件において分光器分解能が向上することがわかる。また今回は結果を示さなかったが、より小さい偏角条件で測定すると、分解能は低下し、エネルギーは低い方にずれ、BL10の場合、回折格子及び偏角を制御するミラーの角度はロータリーエンコーダーを用いて読み取っているため、偏角の値は正確であり、アライメント等の問題で理論値とのずれが生じることはない。また、BL12は定偏角分光器であるため、このような偏角依存性について調べるとは非常に困難である。

上のセクションで、BL12の分解能が悪い理由としてアライメントの問題を挙げたのは、ここで示した結果のように、分光器の分解能は「偏角」によって非常に大きな影響を受けるためである。しかも、必ずしも理論値で最良の分解能が得られるわけではなく、より高分解能を目指す際には注意を要する。

#### 偏角とエネルギー軸について

可変偏角型の分光器の場合、エネルギーと偏角は連動して変化するため、左図の結果のような任意の偏角に固定した条件でのエネルギー軸に對して横軸がずれるのは当然である。より高分解能な光を利用したい場合は、定偏角モードでの適用が対応できるが、その条件でエネルギー軸を合わせるためには、個別にエネルギー校正を行う必要がある。  
次のセクションで報告するが、可変偏角型分光器のエネルギー校正に関して言えば、定偏角型分光器の場合には回折格子の角度のみを補正すれば良いのに対し、可変偏角型の場合は補正した角度によって偏角が変化してしまい、理論値からずれてしまう点が非常に厄介である。

### BL10分光器の再波長校正



#### 【光エネルギー及び偏角とエネルギー校正の関係】

上に示したのは、エネルギー校正と光エネルギー、エネルギー校正と偏角(低エネルギー用回折格子(G1)及び高エネルギー用回折格子(G2))の関係をプロットしたものである。エネルギー校正は、金の4fレベルの位置を光電子分光法で測定し、その結果に基づいて決定している。校正値は光エネルギー又は偏角が大きくなると非線形に増加する。右2つのプロットで赤色で示した実線は今回新規に作成した校正曲線で、校正値の分布をシグモイド関数でフィッティングすることで得た。

#### BL10分光器エネルギー(波長)再校正

BL10ではH24年度に光学素子の洗浄を実施した。その際に光学素子アライメント/波長校正を行ったが、うまく校正ができておらず、誤差が大きい領域が存在したり、G1-G2間で光エネルギーの絶対値が大きく異なっていたため、再度校正を行うこととした。BL10の分光器は可変偏角型であるため、回折格子の角度で補正するのではなく、偏角に対しての校正値を求める必要がある。前回の校正では数種類の不活性ガスを測定することで校正点としたが、絶対的に点数が不足で、正しい波長領域をカバーすることが難しかった。今回は金4f軌道の光電子ピーク位置の光エネルギー依存性からエネルギー校正値を求めた。新校正式により、全領域にわたって誤差0.2%未満を達成した。

#### まとめ

- ・イオン収量法によるN<sub>2</sub>ガスの吸収測定を行ない、2本のビームライン分光器の分解能を再評価した。
- ・イオン収量法によって、より高い分解能の評価が可能になった。データを示して報告しなかったが、分解能の非常に悪いBL12については、測定手法で分解能に差が出なかったことを付け加えておく。
- ・測定方法とは別に、分光器の分解能は「偏角」によって大きく影響されるため、設計分解能よりも極端に性能が出ないような場合には、光学素子アライメントのずれ等によって、最適な条件がでていない可能性がある。
- ・BL10の波長再校正を行ない、設定値にわたってかなり高精度で光エネルギーの測定を行うことが可能となった。