

MOSTAB による放射光 X 線ビームの安定化

工藤統吾^{1*}, 西野吉則², 鈴木基寛¹, 谷田 肇¹,
古川行人¹, 広野等子¹, 石川哲也^{1,2}

¹財団法人高輝度光科学研究センター*, ²理化学研究所播磨研究所

Stabilization of Synchrotron Radiation X-ray Beam by MOSTAB

Togo P. KUDO¹, Yoshinori NISHINO², Motohiro SUZUKI¹, Hajime TANIDA¹,
Yukito FURUKAWA¹, Toko HIRONO¹ and Tetsuya ISHIKAWA^{1,2}

¹SPring-8/JASRI, ²SPring-8/RIKEN

Abstract

Monochromator stabilization (MOSTAB) is a feedback control system to stabilize an x-ray beam of synchrotron radiation. It applies a feedback voltage to a piezo electric transducer attached to a double-crystal monochromator. We developed MOSTAB modules and examined their performances using SPring-8 beamlines. The x-ray beam position stabilization using MOSTAB was realized simultaneously with the x-ray beam intensity stabilization. As an example of its application, we performed EXAFS measurement with MOSTAB.

1. はじめに

近年のマイクロビーム技術やコヒーレント光利用技術などの進歩により、放射光 X 線ビームの安定化は重要性を増している。安定な光源を得るため、蓄積リングにおいては軌道安定化の試みが行われている¹⁾。それに加え、輸送チャンネルにおける X 線光学系の安定化は重要な課題である。特に分光器は光源からの放射パワーを直接受けるため、結晶ひずみによるドリフトや冷却系による振動に対して適切な安定化策を施す必要がある。熱負荷による結晶ひずみの対策として、SPring-8 ではピンポスト水冷²⁾や液体窒素冷却³⁾などが成果を挙げている。二結晶分光器の振動は二結晶の平行度の不安定性を引き起こし、下流の実験ハッチにおける X 線ビームの強度、位置およびエネルギーに影響を及ぼす。

1983年に Krolzig らにより monochromator stabilization (MOSTAB) を用いた分光器下流の放射光 X 線ビーム強度の安定化が報告された^{4,5)}。MOSTAB は分光器の二結晶平行度を閉ループフィードバックで制御して、分光器下流での X 線ビームの安定化を行うシステムである。この制御は分光結晶に取り付けた平行度微調整用のピエゾ素子にフィードバック電圧をかけることにより実現される。MOSTAB は第三世代を含む世界各国の放射光施設で開発され利用されている⁶⁻⁹⁾。国内でも類似の手法で放射光 X 線ビーム位置の安定化に取り組んだ例がある¹⁰⁾。しかし MOSTAB そのものは普及していないのが現状である。本

稿では MOSTAB の基本原理および SPring-8 で製作した DSP 搭載型 PID 制御 MOSTAB を使った放射光 X 線ビーム安定化の実例を示す。

2. MOSTAB による X 線ビーム強度安定化

Krolzig らの開発した MOSTAB の構成を Fig. 1 に示す⁴⁾。このシステムでは、分光器の上下流に置かれた 2 台の電離箱により X 線ビーム強度を測定し、上流の強度 U_1 で下流の強度 U_2 を規格化した値 U_0 を安定化させる。この規格化は、蓄積リング電流の減少に伴う X 線ビーム強

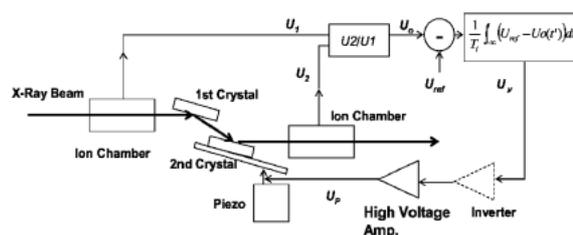


Figure 1. A diagram of the MOSTAB system reported by Krolzig *et al.*⁴⁾. X-ray beam intensities before (U_1) and after (U_2) the monochromator are measured using two ionization chambers. The normalized x-ray beam intensity ($U_0 = U_2/U_1$) is compared to a reference value (U_{ref}), and the difference is fed to an integration circuit. The output (U_v) is inverted/non-inverted and amplified by a high voltage amplifier. The feedback voltage (U_p) is applied to a piezo electric transducer attached to the 2nd crystal of the double-crystal monochromator.

* 財団法人高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1
TEL: 0791-58-1810 FAX: 0791-58-1805 E-mail: kudo@spring8.or.jp

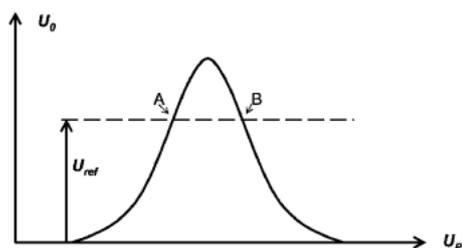


Figure 2. A schematic rocking curve of a double-crystal monochromator: the normalized intensity U_0 as a function of the piezo voltage U_p . MOSTAB stabilizes the U_0 at the reference value U_{ref} and higher (A) or lower (B) side of the rocking curve is selectable.

度の減少を補正するためである。この補正により MOSTAB は分光器の二結晶平行度を一定に保つ。ピエゾ素子へのフィードバック電圧 U_v は、

$$U_v(t) = \frac{1}{T_i} \int_{-\infty}^t (U_{ref} - U_0(t')) dt' \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 T_i は積分回路時定数。 U_{ref} は X 線ビーム強度目標値、 $U_0(t')$ は時刻 t' における X 線ビーム強度である。偏差 $U_{ref} - U_0(t')$ の積分値に適切なゲインをかけてフィードバック電圧を計算する積分型 (I) 制御が採用されている。また、式(1)の U_0 を U_2 に置き換えると、蓄積リング電流減少にかかわらず分光器下流のビーム強度を一定にするフィードバック電圧を得る。この場合 U_1 の測定は不要である。

Fig. 2 は、ピエゾ電圧をスキャンして得られる回折強度曲線の模式図である。ピエゾ電圧を変化させることにより、分光器のデチューニング角 $\Delta\theta$ (二結晶の平行位置からの相対的ずれ角) が変わる。二結晶が完全に平行な場合 ($\Delta\theta=0$) 回折強度は極大となる。 U_{ref} 値を示す点線が回折強度曲線と交わる A 点または B 点においてフィードバック系は安定する。A 点または B 点の選択は、**Fig. 1** における反転アンプ (Inverter) によりフィードバック出力極性を切り換えることにより行う。更に Krolzig らは如何なるピエゾ電圧初期値であっても、安定点を自動的に見つけ出すように工夫した⁴⁾。

Fig. 3 は、SPring-8 BL29XU での MOSTAB による分光器下流の X 線ビーム強度安定化試験の結果である。蓄積リング電流の減少にかかわらず分光器下流のビーム強度を一定にする方法を採用した。X 線ビーム強度時間変動は、MOSTAB を用いない場合標準偏差で 6.1×10^{-3} であったが、MOSTAB を用いることにより 3.3×10^{-4} に改善した。MOSTAB を用いない場合に見られる周期 400 秒程度の X 線ビーム強度変動は分光結晶の冷却系の温度変化に起因すると考えられる。

ここで用いたアナログ I 制御型 MOSTAB 用 NIM モジ

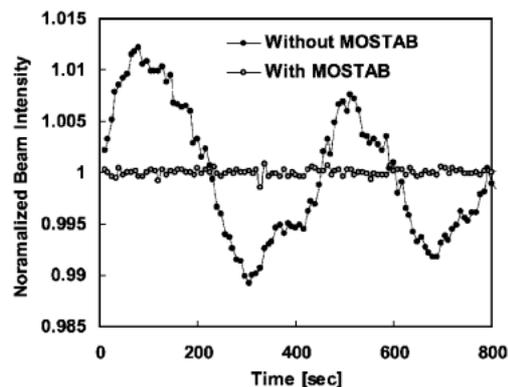


Figure 3. The long-time stability of the x-ray beam intensity with and without MOSTAB. The values were normalized by their averaged value. The standard deviations of the x-ray beam intensities were 6.1×10^{-3} without MOSTAB and 3.3×10^{-4} with MOSTAB.

ュールは、株式会社帝国電機製作所¹¹⁾により製作された。

3. MOSTAB による X 線ビーム位置安定化

MOTAB と X 線ビーム位置モニターを組み合わせたことにより、X 線ビーム位置の安定化も可能である¹²⁾。X 線ビーム位置安定化は、例えば、ピンホールによるマイクロビームを用いた実験、不均一試料を用いた実験、X 線のコヒーレンスを要する実験に有効であると考えられる。

更に X 線ビーム位置を制御対象とした MOSTAB には別の意義もある。X 線ビーム強度を制御対象とした MOSTAB は、 $\Delta\theta$ に対して X 線ビーム強度が単調増加または単調減少する領域のみで実現可能である。従って回折強度曲線の極大点 ($\Delta\theta=0$) に目標値を設定することが困難である。回折強度極大点での安定化ができないことは、X 線フラックスを最大限生かすべき実験において不利である。一方、X 線ビーム位置を制御対象とした場合、下に示すように $\Delta\theta=0$ を含む任意の $\Delta\theta$ での安定化が可能である。従って X 線ビーム位置の安定化、X 線ビーム強度の最大化と安定化という複数の利点が得られる。

通常の二結晶分光器では、垂直方向の X 線ビーム位置は、

$$2l\Delta\theta \quad (2)$$

で与えられる。ここで l は分光器から X 線ビーム位置検出器までの距離を表し、 $\Delta\theta=0$ での X 線ビーム位置を原点にとっている。この場合 X 線ビーム位置は $\Delta\theta=0$ 近傍において単調増加なので、 $\Delta\theta=0$ に目標値を設定できる。

Fig. 4 は、X 線ビーム強度および位置の $\Delta\theta$ 依存性測定の結果を示す。測定は SPring-8 BL29XU で行った。X 線ビーム強度は電離箱で測定し、位置は位置敏感電離箱 (PSIC)¹³⁾ で測定した。X 線ビーム位置は $\Delta\theta$ に対して線型に変化し、その傾きは式(2)から得られる値と矛盾しな

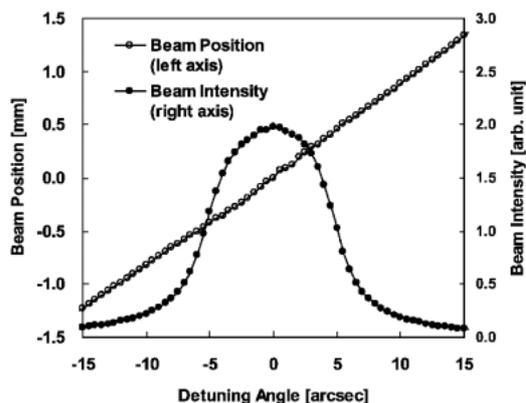


Figure 4. The vertical position and the intensity of the x-ray beam as a function of the detuning angle. The measurement was performed at 9 m downstream from the Si(111) double-crystal monochromator. The x-ray energy was 10 keV.



Figure 5. A MOSTAB module developed at SPring-8. This NIM 2 unit module includes a DSP and a microprocessor which is remote-controllable through an Ethernet using the TCP/IP protocol. The module was designed and manufactured by TEIKOKU DENKI SEISAKUJO Co., Ltd.

い結果を得た。

我々は、X線ビーム位置安定化を実現するため、PID制御演算型MOSTAB用NIMモジュールを開発した(Fig. 5)。製作は株式会社帝国電機製作所に依頼した。本モジュールはPSICの信号からX線ビーム位置演算を行う機能を備えている。更に、蓄積リング電流値をSPring-8データベースシステムからLAN経由で取り込んで、蓄積リング電流値で規格化されたX線ビーム強度を演算する機能も有する。これら各種演算方式の充実と、パラメータ設定精度やユーティリティ向上のためにDSPを用いた。

我々は、このMOSTABをFig. 6に示す構成で用い、SPring-8 BL29XUにおいて、X線ビーム位置安定化実験を行った。回折強度極大($\Delta\theta=0$)に対応する位置にX線ビームを安定化させた。Fig. 7(a)はMOSTABにより

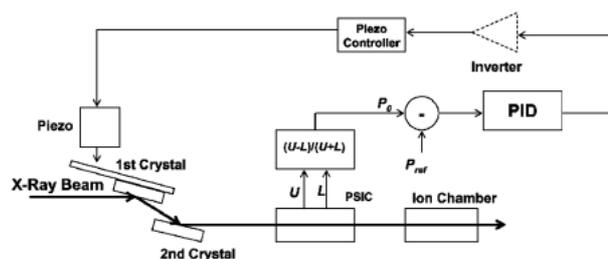
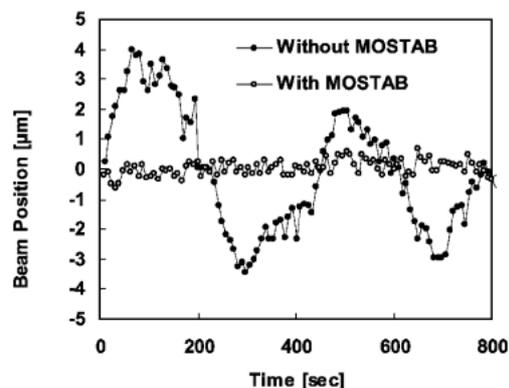
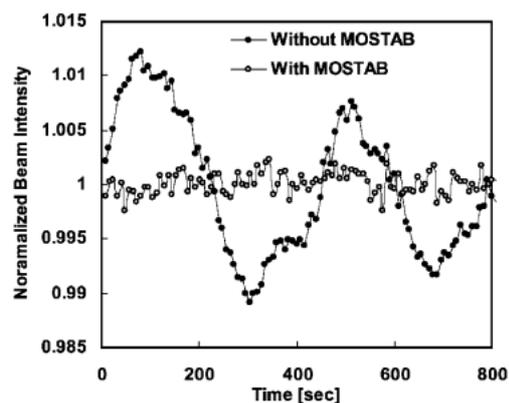


Figure 6. A diagram of MOSTAB system for stabilizing x-ray beam position. PSIC gives two signals from its upper (U) and lower (L) electrodes. A vertical beam position signal (P_0) is computed by subtracting the L signal from U signal, and then dividing by their sum. The difference between P_0 and a reference value (P_{ref}) is fed to a PID control circuit. The output is inverted/non-inverted and applied to the piezo controller. A piezo electric transducer can be optionally attached to the first crystal of the SPring-8 standard monochromator.



(a) X-ray beam position



(b) X-ray beam intensity

Figure 7. (a): The long-time stability of the vertical x-ray beam position with and without the x-ray beam position stabilization using MOSTAB. The standard deviations of the x-ray beam positions were $1.9 \mu\text{m}$ without MOSTAB and $0.25 \mu\text{m}$ with MOSTAB. (b): The long-time stability of the normalized x-ray beam intensity. The standard deviations of the normalized x-ray beam intensities were 6.1×10^{-3} without MOSTAB and 9.7×10^{-4} with MOSTAB. Measurements with or without MOSTAB of Fig. 7(b) was done simultaneously with the measurement of Fig. 7(a).

X線ビーム位置のドリフトが顕著に抑制されたことを示している。**Fig. 7(b)**は**Fig. 7(a)**と同時に測定されたX線ビーム強度の時間変動データを示す。X線ビーム位置安定化と同時にX線ビーム強度の安定化も達成された。

4. XAFS 測定での MOSTAB の利用

我々は MOSTAB の応用例として XAFS 測定を行った。XAFS 測定においては X 線エネルギーの安定性も問題となる。 $\Delta\theta$ の変化は分光器下流の X 線ビームエネルギーの変化をもたらすため、MOSTAB はエネルギーの安定化にも貢献する。エネルギー変化は第一結晶の $\Delta\theta$ の関数として、

$$\frac{3}{2} \Delta\theta E \cot(\theta_B) \quad (3)$$

で与えられる。ここで E は X 線のエネルギー、 θ_B はブラッグ角である。**Fig. 8** は、SPring-8 BL29XU で測定された、 $\Delta\theta$ とエネルギー変位の関係を示す。エネルギー変位は白金の L_m 吸収端のエネルギー位置を測定することにより決定した。(理論から予想される通り) エネルギーは $\Delta\theta$ に関して線型に変化し、その傾きは(3)式から計算される

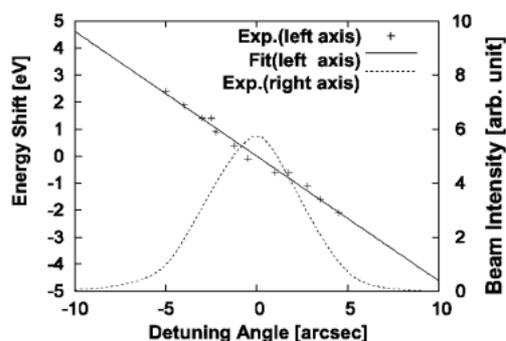


Figure 8. The energy shift of a monochromatic x-ray beam as a function of the detuning angle, compared with the rocking curve profile. The energy shifts were determined from the platinum L_m absorption edge positions measured at a different detuning angle.

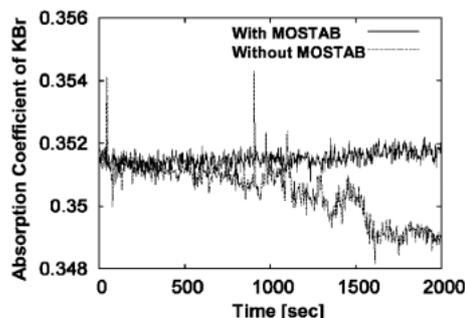


Figure 9. The long-time stability of the KBr absorption coefficient measured at the bromine K absorption edge with and without the x-ray beam position stabilization using MOSTAB.

値とほぼ一致した。

Fig. 9 に KBr 粉末試料に対する X 線吸収係数の時間変化を示す。測定は、SPring-8 BL38B1 において臭素 K 吸収端 (13.478 keV) に X 線のエネルギーを固定して行った。吸収測定は、2 台の電離箱を試料の上下流に配置した透過法を用いて 1 秒積算で行った。MOSTAB を用いた測定では、垂直方向の X 線ビーム位置モニターに PSIC を用いて $\Delta\theta=0$ に対応する位置に X 線ビームを安定化させた。KBr 粉末の吸収係数の 10 分間におけるドリフトは安定化を行わない場合 4.0×10^{-3} であったが、MOSTAB を用いることにより 2.2×10^{-4} へと改善された。これは不均一試料の吸収測定において、MOSTAB による X 線ビーム位置およびエネルギーの安定化が有効であることを示す。

SPring-8 標準分光器¹⁴⁾でエネルギーキャンを行う場合、分光器の Z カムステージの加工誤差のため、異なるエネルギー (分光器の θ) に対し、二結晶平行度がわずかにずれることがある。この対策として、エネルギーを変える毎に $\Delta\theta$ を調整し、二結晶平行度を保つ操作が広く行われている。MOSTAB を用いれば、フィードバック系がこのエネルギー毎の平行度のずれを自動補正し、平行度を維持したエネルギーキャンが可能となる。

Fig. 10 は、SPring-8 BL38B1 で行われたタングステン粉末試料の EXAFS 測定結果を示す。測定は透過法を用いて 0.1 秒積算で行った。**Fig. 10(a)** は、各エネルギー一点でピエゾ電圧スキャンによる二結晶平行度最適化を行う従来型の測定、**Fig. 10(b)** は MOSTAB を用い自動的に二結晶平行度最適化を行った測定を示す。MOSTAB を用いることにより、ピエゾ電圧スキャンに要する時間が節約できるため、従来の方法と同等の精度での EXAFS 測定より短い総測定時間で行うことが可能となった。

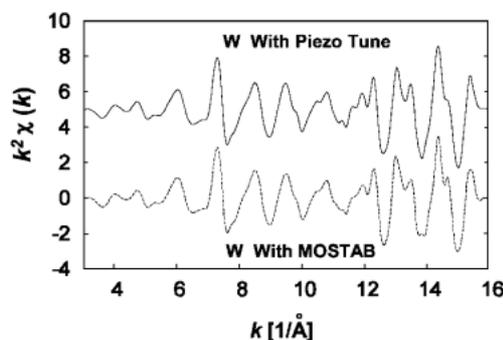


Figure 10. EXAFS (multiplied by k^2 and a hanning function) of a tungsten powder sample. The solid line is for measurement with the two-crystal parallelism optimization of monochromator by a rocking scan using piezo at each energy point (piezo tune), and the dashed line is for measurement with MOSTAB. The data with piezo tune is vertically shifted for better display.

5. 使用上の留意点

これまでの我々の MOSTAB の評価実験により明らかになった、MOSTAB を使用する上での留意すべき点を以下にまとめる。

(1) MOSTAB は、X 線ビームの強度や位置の変動が分光器に起因する場合にのみ有効である。このため他の光学系や光源（加速器）の安定性の向上が併せて重要である。

(2) 高エネルギー X 線では回折角度幅が狭くなるので、 $\Delta\theta$ がわずかにずれると X 線ビーム強度が急激に減少する。従って PSIC での X 線ビーム位置計測と安定化が困難になる。

(3) MOSTAB を SPring-8 標準分光器と組み合わせ用いた場合、5 Hz 以下の周波数成分への振動抑制が有効であった。現状では、ピエゾ素子が数 100 kg と見積もられるステージ類をも含め動かす仕組みとなっており、この大きな慣性質量により速いフィードバック応答が困難である。より高周波成分の振動抑制には、分光器におけるピエゾ素子の取り付け位置の変更などが必要となる。

謝 辞

榊帝国電気製作所の大竹英二氏、及び榊三菱電機エンジニアリングの森本一郎氏に DSP 型並びにアナログ型 MOSTAB モジュールを設計製作していただきました。また、SPring-8 スタッフの玉作賢治氏、矢橋牧名氏には BL29XU での実験で諸々支援いただきました。大端通氏は DSP 型 MOSTAB の制御仕様につき相談にのっていただきました。井上忍氏は LabView による DSP 型

MOSTAB 制御プログラムを工夫していただきました。宇留賀朋哉氏、坂田修身氏からは、BL01B1 及び BL13XU での MOSTAB 使用により貴重なコメントをいただきました。皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 2nd Workshop on Beam Orbit Stabilization, SPring-8, Japan, (December 4-6, 2002) etc.
- 2) T. Ishikawa, H. Yamazaki, K. Tamasaku, M. Yabashi, M. Kuroda and S. Goto: Proc. SPIE 3448, 2 (1998).
- 3) K. Tamasaku, M. Yabashi, D. Miwa, T. Mochizuki and T. Ishikawa: Proc. SPIE 4782, 132 (2002).
- 4) A. Krolzig, G. Materlik, M. Swars and J. Zegenhagen: *Nucl. Instr. Meth.* **219**, 430 (1984).
- 5) A. Krolzig, G. Materlik and J. Zegenhagen: *Nucl. Instr. Meth.* **208**, 613 (1983).
- 6) <http://www.aps.anl.gov/xfd/SRI-1ID/Mostab.html>
- 7) http://www.esrf.fr/exp_facilities/ID1/user_guise/opthutch/mostab.html
- 8) <http://www.chess.cornell.edu/Operations/Hardware/MoStab/MoStab.htm>
- 9) http://www.embl-hamburg.de/researchactivities/brief_guide.html
- 10) A. Koyama, S. Sasaki and T. Ishikawa: *Rev. Sci. Instr.* **60**, 1953 (1989).
- 11) 株式会社帝国電機製作所 〒679-4395 兵庫県揖保郡新宮町平野60番地 TEL: 0791-75-0471
- 12) R. F. Fischetti, R. Heurich, D. Perry, S. Stepanov and E. Kondraskina: *Rev. Sci. Instr.* **73**, 1518 (2002).
- 13) K. Sato, H. Toyokawa, Y. Kohmura, T. Ishikawa and M. Suzuki: Proc. SPICE 3774, 114 (1999).
- 14) M. Yabashi, H. Yamazaki, K. Tamasaku, S. Goto, K. Takeshita, T. Mochizuki, Y. Yoneda, Y. Furukawa and T. Ishikawa: Proc. SPIE 3773, 2 (1999).