

# SACLA アンジュレータの狭ギャップ化に向けた機械駆動部の強化

## IMPROVEMENTS OF THE SACLA UNDULATOR DRIVING SYSTEM TOWARD A NARROW GAP OPERATION

長谷川照晃<sup>#, A)</sup>, 鏡畑暁裕<sup>B)</sup>, 清家隆光<sup>B)</sup>, 備前輝彦<sup>B)</sup>, 久間正之<sup>B)</sup>, 金城良太<sup>A)</sup>, 貴田祐一郎<sup>A)</sup>, 田中隆次<sup>A)</sup>  
Teruaki Hasegawa<sup>#, A)</sup>, Akihiro Kagamihata<sup>B)</sup>, Takamitsu Seike<sup>B)</sup>,  
Teruhiko Bizen<sup>B)</sup>, Masayuki Kuma<sup>B)</sup>, Ryota Kinjo<sup>A)</sup>, Yuichiro Kida<sup>A)</sup>, Takashi Tanaka<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN SPring-8 Center

<sup>B)</sup> JASRI

### Abstract

Towards wider tunability and higher peak power, which bring great advantages for user experiments, a narrower gap operation of in-vacuum undulators is being seriously considered at SACLA. For this purpose, the mechanical frame should be enforced not only to support stronger attractive forces, but also to improve the long-term mechanical stability; this is because the magnetic field evaluation using SAFALI revealed that the magnetic performances, after one year of operation, have degraded in comparison to the initial condition. After many inspections regarding the problem, it has become clear that lock nuts which fix magnetic arrays have been loosened under many load cycles brought by the gap operation. In order to improve the long-term mechanical stability, we designed additional parts which strongly fixed lock nuts without a major modification of undulator structure, and applied those to all BL3 undulators. After the problems being fixed, commissioning toward a narrow gap operation of around 2.7mm will start from September, 2016.

### 1. はじめに

アンジュレータの狭ギャップ化により、同じ電子ビームパラメーターにおいても発振波長の広帯域化とレーザーパルスの高出力化が期待され、これにより利用者の利便性は大きく向上する。しかし、SACLA 供用開始から1年経過したところより、ビームライン(BL)3 に設置された数台のアンジュレータで、自発放射光のスペクトルバンド幅に広がりが見られ、SAFALI[1]によるアンジュレータの磁場評価でも製造当初と比較して性能の悪化が確認された。定期的に磁場調整を行っており、直ちに利用運転に影響することはないが、狭ギャップ化に向けて、まずこれらの原因を特定し、対策することが急務となった。

### 2. アンジュレータ架台の問題

#### 2.1 アンジュレータ架台構造

アンジュレータの架台構造を Figure 1 に示す。アンジュレータは1つの基礎躯体とその上にある磁石列を支える3つの構造体から成る。各磁石列は、リニアガイドとベローズシャフトを介して上下にあるクロスビームに固定され、2本の支柱でそれらの両端を支持する。クロスビームと支柱の間には、上下に駆動するためのボールネジが配置されている。通常、この6つのクロスビームが連動し、アンジュレータ全体の磁石列ギャップは均一に変化する。

#### 2.2 原因調査

当時製造中であった BL2 アンジュレータ架台を対象に原因を調査した。BL3 アンジュレータの最小ギャップは3.5 mm であるが、いち早く症状を表面化させるため、ギャップを10 mm から仕様限界に近い2.5 mm まで開閉して、磁気吸引力による過負荷を繰り返し与えた。そ

の間、恒久的にギャップを測定するリニアゲージを各クロスビーム支持点の磁石列近傍に6箇所設置し、特定ギャップでの変位を観測した。リニアゲージは、上下クロ

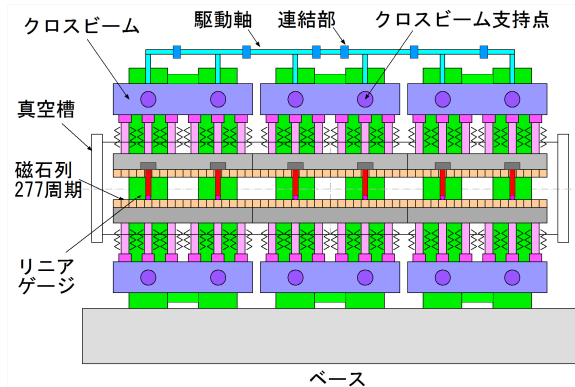


Figure 1: Schematic view of an undulator.

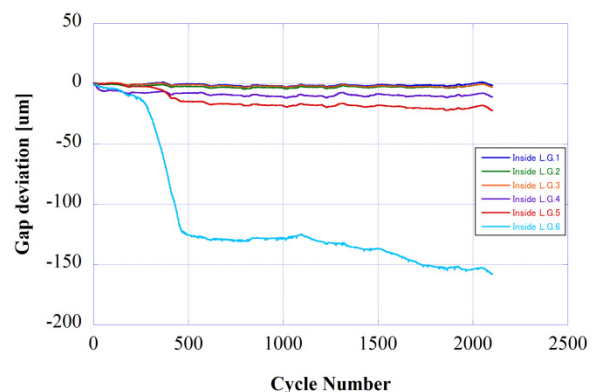


Figure 2: Result of load cycle test.

スピームの相対位置を測定していることに注意されたい。

試験結果を Figure 2 に示す。横軸はギャップ開閉回数で、10 mm から 2.5 mm まで閉じ、10 mm まで開く操作を 1 回と定義している。縦軸は、ギャップ 2.5 mm におけるリニアゲージの変化量で、ギャップ閉方向をマイナスとする。理想的には、ギャップ操作を繰り返しても機械的な位置は同じであり、試験前の状態 (=ゼロ) を保つ。しかし、ある架台でギャップ開閉を 2200 回繰り返した結果、リニアゲージ No.1 で -158  $\mu\text{m}$ 、No.2 で -22  $\mu\text{m}$ 、No.4 で -11  $\mu\text{m}$  の変化が確認された。

さらにボールネジ部を分解して、各部品との嵌め合いやギャップ開閉試験前後の部品位置をマークキングするなどして調べた結果、ボールネジ固定端にある精密ロックナットと呼ばれる部品が徐々に緩むことが分かった。開閉試験を 500 回行ったあたりで緩むスピードが緩やかになっているのは、この精密ロックナットが座面から離れたためである。

上段クロスビームのボールネジ固定端の構造を Figure 3 に示す。ハウジングには回転を補助するベアリングが組み込まれ、そこにボールネジシャフトが通る。シャフトに切られたネジと精密ロックナットを締めることで、ボールネジがハウジングに固定され、これに繋がる磁石列の位置が精度良く決まる。

精密ロックナットが緩んだ場合、下方方向に働く磁気吸引力に従ってクロスビームが下がり、磁石列の平行性は失われる。このボールネジ固定端は、アンジュレータ 1 台あたり 12 箇所あり、1 か所でもこの症状が出ると、アンジュレータ全体の磁場性能は劣化する。この試験を BL2 アンジュレータ 18 台で実施し、少なくとも 1 箇所 10  $\mu\text{m}$  以上変化したアンジュレータは 8 台あった。BL2 ア

ンジュレータと同じ仕様で製造した BL3 アンジュレータについても、同程度の発生数が見込まれる。

ちなみに、SPring-8 のアンジュレータでこの症状は確認されていないが、これは吸引力の差によると推測される。

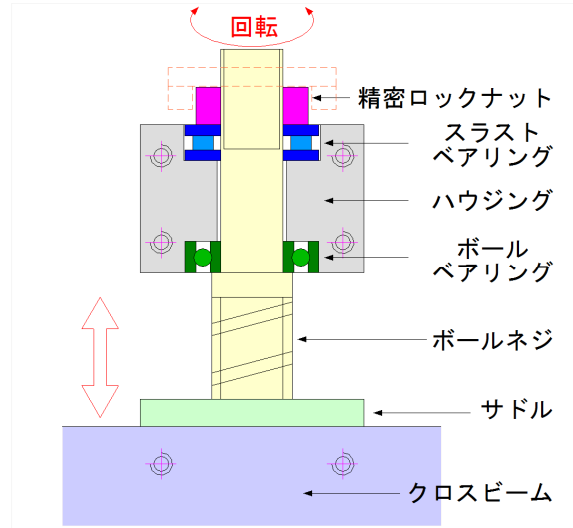
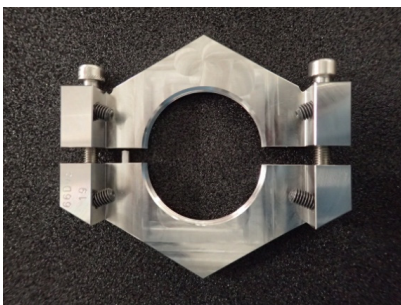


Figure 3: Schematic view of a driving system.

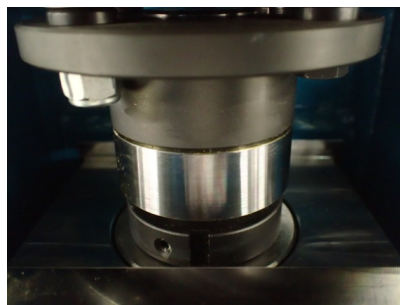
### 2.3 ネジ緩みの原因

一般的にネジが緩む主な動的要因として、次の 4 つが挙げられる。

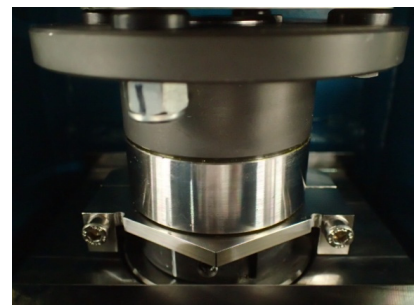
- 軸直角方向の振動
- 軸の回転運動による慣性トルク
- 軸方向への荷重変化



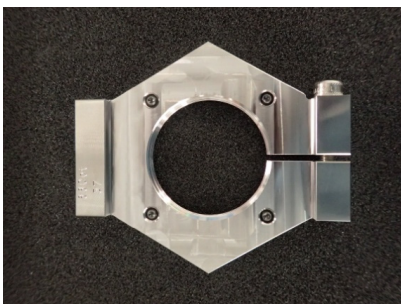
(a) Topside additional nut



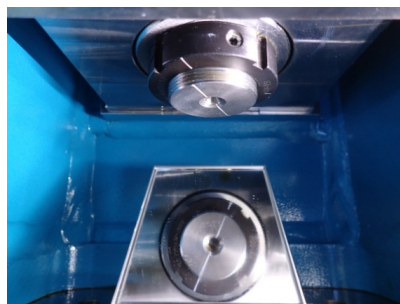
(b) Topside lock nut



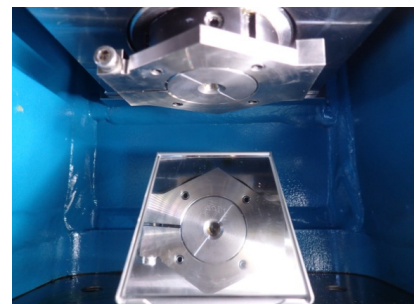
(c) Topside status of use



(d) Downside additional nut



(e) Downside lock nut



(f) Downside status of use

Figure 4: Lock nuts and additional nuts.

### ● 軸の回転運動

アンジュレータの機械駆動部におけるこれらの要因について考察する。1 つ目の要因は、固定端を構成する部品同士のクリアランスは小さく、軸直角方向にボールネジシャフトが振動する可能性は低い。2 つ目は、ボールネジの回転速度が遅いので回転開始/停止時に生じる慣性トルクも小さい。3 つ目は、ギャップを 2.5 mm まで閉じると磁気吸引力は約 12 トンにも及び、1 軸あたり 2 トンの荷重が軸方向に加わる。このギャップ開閉操作による負荷振幅が緩みを誘発したと推定する。4 つ目についても、ナット緩みを助長した可能性がある。

精密ロックナットには、緩みを防止するセットスクリューがあるが、これらの要因により一部の部品において機能しなくなったと考えられる。

## 3. 機械駆動部の強化

### 3.1 強化部品

SACLA で運用しているアンジュレータに対し、速やかに機械駆動部を強化する必要がある。そこで機械駆動部の分解や改造を伴わず、簡単に付加できる部品で、ボールネジシャフトと精密ロックナットを一体化する強化部品を考案した。ボールネジ固定端の周辺構造が上下で異なるため、強化部品も 2 種類製作した。上側のボールネジ固定端の精密ロックナットに適用する強化部品を Figure 4(a) に示し、適用前後の様子を Figure 4(b) および Figure 4(c) に示す。また、下側のボールネジ固定端のそれらを Figure 4(d)、Figure 4(e)、Figure 4(f) に示す。

強化部品の中心にはボールネジシャフトに適合するタップ加工が施され、精密ロックナットに隣接するまで強化部品をシャフトにねじ込む。ただし、上側のボールネジシャフトは、先端がモーター駆動軸に連結されており、これが障害となって別の部品をねじ込むことができない。このため、強化部品は分割された状態でシャフトを挟む構造となっている。次に、ネジ穴の径方向にはスリットがあり、サイドにあるクランプボルトを締めることで中心のネジ径が小さくなり、強くシャフトを挟み込む。最後に強化部品から内側に突き出した止めネジで精密ロックナットをしっかりと固定する。

### 3.2 評価結果

問題のあったアンジュレータに強化部品を適用し、原



Figure 5: Result of load cycle test with additional nuts.

因調査と同じ方法で効果を確認した。評価結果を Figure 5 に示す。強化部品を付加することにより、精密ロックナットに緩みが発生した固定端でも、3000 回のギャップ開閉試験では症状が現れず、磁石列の機械的位置は保たれていることが確認できる。

また、同一部品で組み上げた駆動部モデルを用いた負荷試験によっても検証し、強化部品を付加した場合には、精密ロックナットの締め付けトルクが不十分かつセットスクリューを使用しない厳しい条件でも、精密ロックナットは緩まないことを確認した。

## 4. まとめ

SACLA アンジュレータでは、ギャップ開閉に伴う負荷サイクルによって、磁石列を保持する機械駆動部を構成する部品の一つで磁石列ギャップを規定する精密ロックナットが徐々に緩み、磁場性能を劣化させることが確認された。そこでアンジュレータ本体に大きな構造変更を伴わず、現地で簡単に付加できる強化部品を考案して、ビームライン 3 の全てのアンジュレータに適用した。これにより、架台構造に起因する問題を解決し、架台精度の長期信頼性を改善した。2016 年 9 月からの利用運転では、これまでの最小ギャップ 3.5 mm (K 値 2.1) から 2.7 mm (K 値 2.7) へと狭ギャップ化を図り、発振波長の広帯域化とレーザーパルスの高出力化を実現するための試験を開始する。

## 謝辞

アンジュレータ機械駆動部を強化するにあたり、住友重機械ファインテック株式会社のみなさまに多大なるご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] T. Tanaka *et al.*, "In-situ Undulator Field Measurement with the SAFALI System", Proceedings of the 29th Free Electron Laser Conference, Novosibirsk, Aug. 26-31, 2007.