

# シンクロトロン用ビームダクトの渦電流の磁場への影響の数値的評価

## NUMERICAL EVALUATION OF EDDY CURRENT EFFECT ON MAGNETIC FIELD IN SYNCHROTRON BEAM DUCT

川口秀樹<sup>A)</sup>、加藤政博<sup>#, B, C)</sup>

Hideki Kawaguchi<sup>A)</sup>, Masahiro Katoh<sup>#, B, C)</sup>

<sup>A)</sup> Muroran Institute of Technology

<sup>B)</sup> HiSOR, <sup>C)</sup> UVSOR

### Abstract

Booster synchrotrons, which are often used as injectors for synchrotron light sources, accelerate a low-energy electron beam provided from a pre-injector in a short time of around one second and provide it to the light source accelerators. The rapid increase in the magnetic field strength in the bending magnets during acceleration induces eddy currents on the surface of the beam duct, which can cause secondary magnetic fields which would produce unacceptable effects on the electron beam. The booster synchrotron at the UVSOR synchrotron light source was built about 40 years ago and had been using bellows-type beam ducts to reduce the effects of the eddy currents. Previously we reported the results of a numerical evaluation of the eddy current suppression effect of a bellows structure using three-dimensional analysis based on the current vector potential method. This year, we present the results which include the magnet iron core in the evaluation.

### 1. はじめに

分子科学研究所の UVSOR は周長 53 m、ビームエネルギー 750 MeV の小型低エネルギー放射光源である[1]。ストレージリングについては、過去に大規模な高度化改造も行われ、入射器も電子銃については更新されているが、15 MeV ライナック本体や 750 MeV ブースターシンクロトロン本体については 40 年以上更新なしで稼働してきた。この中でブースターシンクロトロンについては真空ダクトでのリークが多発するようになり、2025 年 4 月にダクトは全面更新された[1]。

建設当初、このシンクロトロンは最大エネルギー 600 MeV、繰り返し約 3 Hz で運転されていたが、2000 年代後半にストレージリングへのフルエネルギー入射を可能とするための電源増強が行われ、これによりトップアップ運転が可能となった。750 MeV 運転時の繰り返し周波数は 1 Hz である。シンクロトロンでは偏向磁石の磁場強度は電子エネルギー増加に同期しながら上昇する。この磁場の時間変化により真空ダクトに渦電流が発生し、この渦電流により 2 次的に生成される磁場が電子軌道に悪影響を及ぼす可能性がある。UVSOR のブースターシンクロトロンでも設計段階でこの点は検討されており、渦電流を抑制するために蛇腹構造の真空ダクトが採用されている。渦電流に対する抵抗を実効的に大きくするという考え方である。この渦電流の抑制効果は、これまで近似解析的には評価されていたが[2-4]、電磁場シミュレーションに基づいた高い精度での定量的評価に関する報告は見当たらなかった。

我々は、今後の装置設計や運転の基礎となるデータとすべく、蛇腹構造が渦電流発生に与える影響を、電流ベクトルポテンシャル法 (T法) による薄板近似渦電流数値解析を用いて評価することを試みた[5]。このときの報

告は、基本的にダクトに生ずる渦電流の評価を行ったものであった。最終的な磁場への影響を評価するには磁石の鉄芯の存在を考慮して計算をする必要がある。前回の報告以降、磁石鉄芯の存在下での電磁場シミュレーションを進めているが、今回はその最新の状況を報告する。

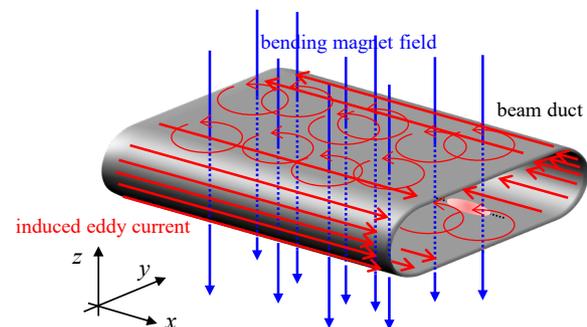


Figure 1: Schematic drawing of Eddy current induced on beam duct by an external magnetic field that rapidly changing in time.

### 2. ビームダクトの渦電流

断面がレーストラック形状のダクトに時間変動する空間的に一様な外部磁場が印加された場合に発生する渦電流の様子を Fig. 1 に示す。渦電流は、ダクト壁で外部磁場の磁力線に巻き付くように生じるものの、渦電流のビーム軸に垂直方向の成分は打消し合い、ビーム進行方向の成分のみが残る。結果として渦電流は主にダクトの側壁を左右逆方向に流れる。この渦電流の作る二次的な磁場は外部磁場を弱める方向に作用するが、ダクトの側面部分に電流が集中することから一様でなく六極磁場成分などの非線形磁場成分を含む。それらは周回ビームを不安定化させる要因になり得る。

# mkatoh@hiroshima-u.ac.jp

### 3. 渦電流に関する数値解析

渦電流解析については前回報告した通りであるが、あらためて概略を述べておく[5]。ビームダクトの数値モデルは Fig. 2 に示す通り。偏向電磁石中の軌道長 1,885 mm に対し、1つの蛇腹構造の進行方向長さ  $\varphi$  が 5.1 mm と非常に小さいため、1つの蛇腹構造のみを数値モデル化し、ビーム方向に対し周期境界条件を課した近似モデルで解析した。電磁石の磁場は 0.5 秒で 0 T から 1 T まで増大することを仮定した。なお蛇腹構造との比較のため平坦構造も解析したが、この場合、ダクト面は蛇腹モデルの内側と同じサイズとした。このようなモデルに対して行った渦電流解析結果は前回の報告に詳しい[5]。蛇腹構造モデルの渦電流は平坦構造に比べておよそ 1/3 程度と小さく、磁場鉛直方向 (z 方向) 成分も同程度に小さく、蛇腹構造により渦電流とダクト内部に生じる磁場が抑制されるという結果を得た。

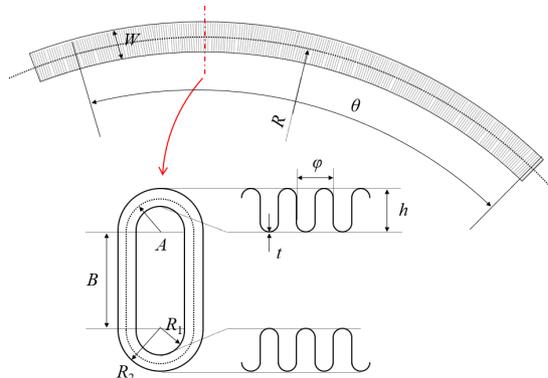


Figure 2: Bellows structure duct of UVSOR booster synchrotron. Here,  $A=20$  mm,  $R_1=17$  mm,  $R_2=23$  mm,  $B=74$  mm,  $\varphi=5.1$  mm,  $h=5.7$  mm.

上記の解析では鉄芯の存在は無視していたが、今回はそれを取り入れて磁場への影響を評価することを試みた。数値解析は T 法で得られた渦電流分布から有限積分法を用いて鉄芯存在下での磁場分布を求めることを行った。解析結果を Fig. 3 に示す。鉄芯のない場合に比べて渦電流による磁場強度は 3 倍程度に大きくなるのが分かる。ダクト側面に流れる渦電流により非線形磁場が生じる様子がよく分かる結果となっている。

### 4. まとめ

分子科学研究所の UVSOR 放射光施設のブースターシンクロトロンに用いられている蛇腹構造のビームダクトによる渦電流の抑制効果に関する数値シミュレーションを行った。昨年度の報告で、電流ベクトルポテンシャル法により渦電流抑制効果の定量的評価を試みた結果、平坦構造に比して発生する渦電流強度はおよそ 1/3 に抑制されること、また、この渦電流により軌道上に二次的に発生する磁場も同程度に抑制されることを示した。しかし、渦電流に依る磁場の計算において磁極の存在を無

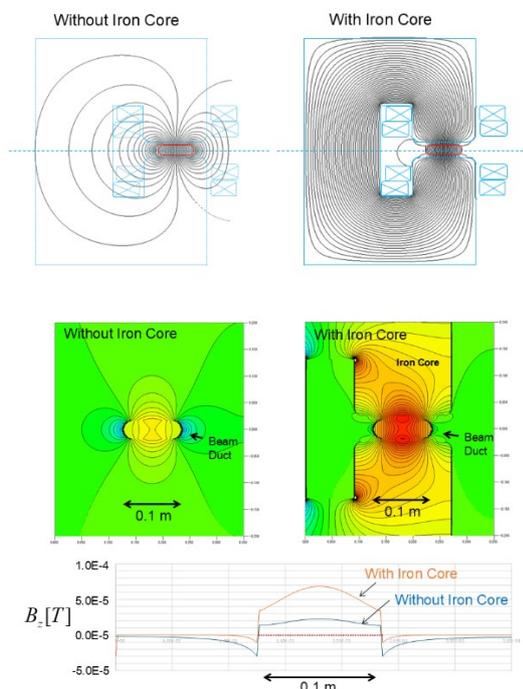


Figure 3: Magnetic field generated by eddy current. Field lines (upper) and field strength (lower). Without iron core (left) and with iron core (right).

視していたことが宿題として残っていた。今回は、前回の数値評価で求めた渦電流分布から二次元の有限積分法により磁場への影響を評価した。鉄芯の存在を取り入れることで渦電流による二次的な磁場強度はおよそ 3 倍大きくなるという結果を得た。今後、こういった数値的評価と従来用いられてきた簡便な解析的な評価を比較し、後者の有効性を確認したいと考えている。

### 謝辞

本研究の遂行にあたり UVSOR 施設職員の皆さんに真空ダクトや電磁石に関する情報収集でご協力をいただいた。この場をお借りして感謝いたします。

### 参考文献

- [1] 金安達夫他, in these proceedings.
- [2] 渡辺誠他, 「入射用シンクロトロンの設計」, UVSOR-7 (1981).
- [3] A. Asner, CERN-MPS-INT-MA-67-11 (1967).
- [4] S. Krinsky, BNL-25464 (1973).
- [5] H. Kawaguchi, M. Katoh, “Numerical evaluation of eddy current suppression effect of bellows-structured beam duct for synchrotron”, Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 - August 3, 2024, Yamagata, pp. 72-75.