

# THE PROPOSAL FOR THE COMPACT ACCUMULATOR THAT HAS A LONG ORBIT AND MANY STRAIGHT SECTIONS

Atsushi Miyamoto<sup>#</sup>, Shigemi Sasaki

HSRC; Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima University  
2-313 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-0046

## Abstract

We proposed a ring that a beam orbit is not closed with one turn and return to starting point after multiple turns around the ring. The idea of this new accumulation ring was inspired based on the torus knot theory. This ring has a long length of the total closed orbit in comparison with a conventional ring which has the orbit of one turn. Therefore this ring can have many straight sections and is advantageous to installation of insertion devices.

We are designing a new ring based on the shape of a (3,11) torus knot for our future plan 'HiSOR-II'. This ring has 11 long straight sections and can place undulators effectively by placing elements such as quadrupole magnets at the place near bending magnet, outside of the orbit crossing section. Furthermore, this ring has about 3 times longer circumference in comparison with the conventional ring, the diameter of the ring is as compact as 15 m, but its circumference is as long as 130 m. On the other hand, this ring must achieve low emittance to operate as the 3rd generation light source ring. Therefore we designed lattice of this ring in reference to MAX-III and achieved low emittance by using bending magnets with combined function.

## 軌道長が長く直線部を多く持つ小型蓄積リングの提案

### 1. はじめに

小型放射光源リングにとって、挿入光源を導入できる直線部を多く確保することは非常に重要な課題であるが、現実には電磁石や RF 系、モニタ等によって占められてしまい、リングの周長に対して挿入光源等に利用できる直線部の総長はそれほど多くない。そこで、トーラス結び目(Torus-knot)の形状をヒントにして、複数周回で軌道が閉じるリングを考案し<sup>[1]</sup>、AMATELAS と命名した。

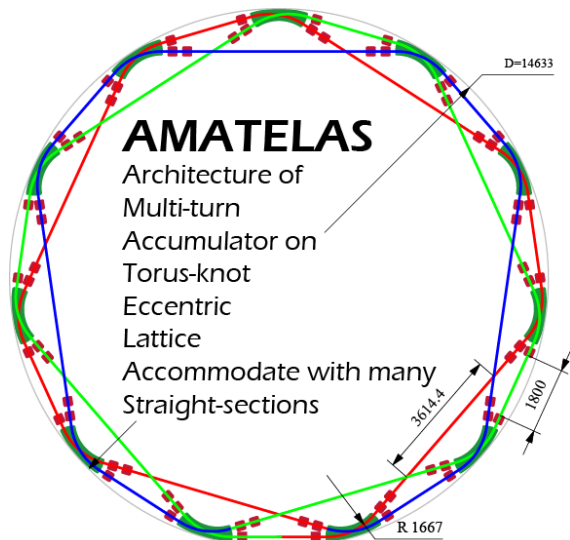


図 1: HiSOR-II 向けに設計された(3,11) AMATELAS

今回、具体的な加速器としてのラティスを検討するにあたって、広島大学放射光科学研究センターの将来計画 HiSOR-II<sup>[2]</sup>として採用することも視野に入れ、外周が 45 m 程度で 3 周回の軌道を持つ(3,11)トーラス結び目型のリングとした。図 1 に HiSOR-II 向けに設計した(3,11) AMATELAS の平面図を示す。

本来 3 次元的な立体であるトーラス結び目から加速器へ採用可能な形状にするために、平面への射影と円弧と直線だけで構成するようにした。また、4 極電磁石は直線同士が交差する部分の外側へ配置することで、内側の長直線部をより効率的に利用できる配置となっている。

### 2. 小型放射光リングとして

#### 2.1 低エミッタンスラティス

一般的に放射光リングなどに用いられる低エミッタンスとして、Double Bend Achromat (DBA)がよく知られているが、近年では直線部へ分散を導入したラティスも多く見られ、DBA より低エミッタンスを実現している。

エミッタンスは radiation integral を用いて以下のように表される<sup>[3]</sup>。

$$\varepsilon_x = C_q \gamma^2 \frac{I_5}{I_2 - I_4}$$

ここで、 $C_q$ は電子の古典半径、 $I_2, I_4, I_5$ はそれぞれ

$$I_2 = \oint \frac{1}{\rho^2} ds, I_4 = \oint \frac{D}{\rho} \left( \frac{1}{\rho^2} + 2K \right) ds, I_5 = \oint \frac{\mathcal{H}}{|\rho|^3} ds$$

である。

<sup>#</sup> a-miyamoto@hiroshima-u.ac.jp

MAX-lab.の MAX-III<sup>[4]</sup>などでは、偏向電磁石を QD との機能複合型として、 $I_4$  中の  $K$  に負の値を入れたラティスを採用し、非常に小さなエミッタンスを達成している。そこで、MAX-III 型ラティスの AMATELAS リングへの採用の可否を検討した。

## 2.2 磁場勾配を持つ偏向電磁石内での軌道交差

MAX-III 型のラティスには機能複合型の偏向電磁石が必須であるが、AMATELAS の偏向電磁石内部ではビーム軌道が交差している。しかしながら、交差する 2 つの偏向部それぞれに磁場勾配を与えることは不可能である。(図 2 (a))

そこで、交差点を通り 2 つの軌道の間を通る仮想的な中心軌道とその軌道に沿った磁場勾配を持つ 1 つの大きな電磁石を考える。(図 2 (b)) 交差する軌道はこの gradient magnet を斜めに通過することと同じとなる。偏向電磁石を直線と考えると、4 極電磁石を斜めに通過する場合と同じ (図 2 (c)) であるが、偏向電磁石の場合には磁場強度の変化によって軌道半径が変わり、さらに仮想中心軌道との角度も変化することから収束力も変化することを考慮する必要がある。

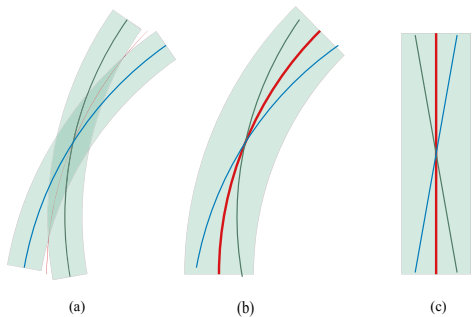


図 2: 磁場勾配を持つ偏向電磁石内での軌道交差

図 3 は交差する軌道のうちの片方のみについて、偏向電磁石に磁場勾配がない場合とある場合での軌道の変化を示した図である。図中青点線が磁場勾配がない場合の軌道半径 1667 mm の円弧の軌道である。幾何学的条件から仮想中心軌道は赤線の半径 1838 mm の円弧となり、それを中心軸として磁場勾配  $-1.0$  T/m を与えた場合に 700 MeV のビームは緑線の軌道を通る。

これからもわかるように、円弧の軌道と比べて軌道半径がやや小さくなり偏向角も変化してしまうが、偏向電磁石の長さを調節して必要な偏向角を与えるようにすればよい。

また、この実際の軌道に沿ってビームが受ける収束力の変化を計算したものを図 4 に示す。仮想中心軌道上では  $-1.0$  T/m の磁場勾配としているが、実際のビーム軌道は入口で  $9.44$  度傾いているためにビームが感じる磁場勾配は小さくなる。さらに磁石中を進むにつれて仮想中心軌道との角度が変化するため、ビーム軸上での磁場勾配も変化するが、磁石中での収束力の変化は 1% 程度であることがわかった。

これらにより、磁場勾配のある偏向電磁石を採用しても、円弧の軌道を持つ単純な場合から若干の補正をすればよいと考えられる。

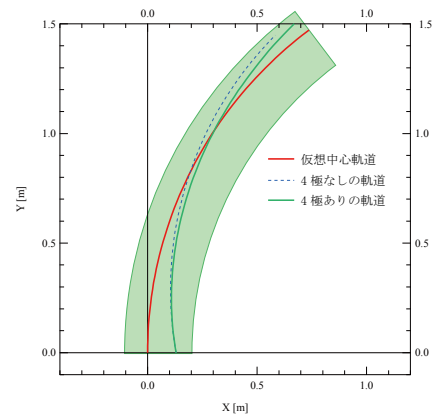


図 3: 磁場勾配による軌道の変化

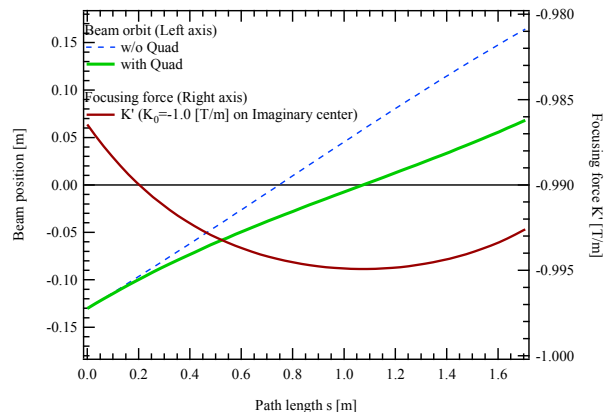


図 4: 電磁石中でビームが受ける収束力の変化

## 2.3 動作点の決定と光学関数

AMATELAS の直線部は長短 2 種類があり、それぞれ偏向電磁石をはさんで交互にあることから、Double Bend 系を採用することができる。そこで、偏向電磁石には先に述べた機能複合型を採用すると共に、3 ファミリーの 4 極によって DBA と MAX-III 型の 2 種類のラティスの切り替えが可能な電磁石配置とした。

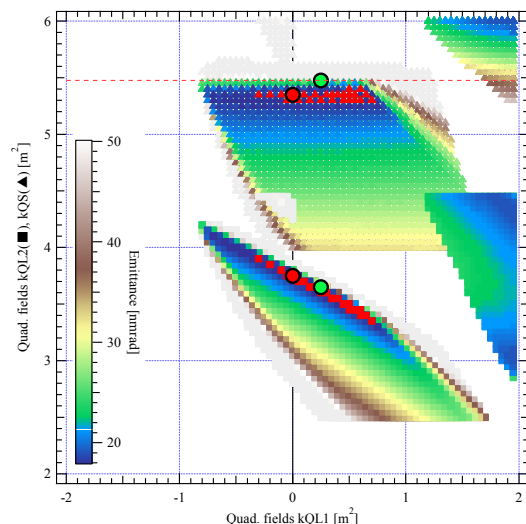


図 5: 4 極の強度とエミッタンス

偏向電磁石の磁場勾配は、磁石中での磁場の飽和の観点からの上限-1.0 T/m とした。3種の4極の強さとエミッタンスの関係をプロットしたものを図5に示す。図中の赤い領域はエミッタンスが18 nmrad以下になる条件で、赤丸を low emittance mode の動作点として採用した。また、赤点線は DBA ラティスとなる QDS の条件を表し、緑丸を DBA mode として選択した。それらの動作点の場合のリング1/3周の光学関数を図6に示し、主なパラメータを表1に示す。

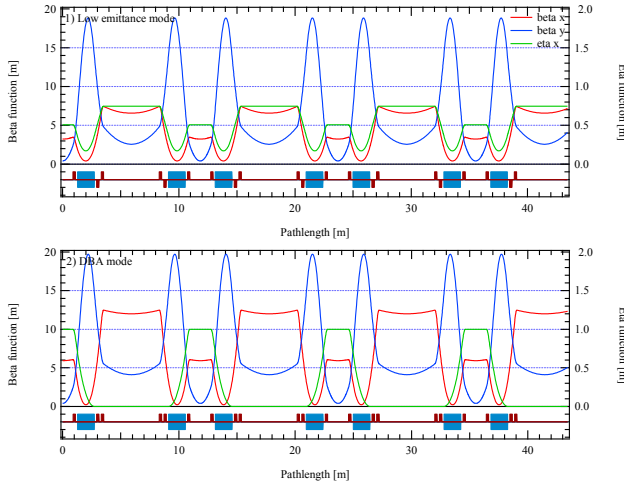


図 6: それぞれの動作点での光学関数

表 1: (3,11) AMATELAS の主なパラメータ

外周長	45.97 m
軌道形状	(3,11) Torus knot
軌道長	130.3 m
ビームエネルギー	700 MeV
チューン ( $\nu_x, \nu_y$ )	(10.54, 6.60)
(DBA mode)	(10.78, 6.92)
エミッタンス	17.7 nmrad
(DBA mode)	34.6 nmrad
クロマチシティ	(+1.0, +1.0)
直線部	3.6 m $\times$ 11
	1.8 m $\times$ 11

### 3. 直線軌道交差部でのビーム衝突

AMATELAS では直線部と偏向部において軌道が交差する。電荷密度をそれほど高くしなければビーム損失に至るほどの影響はないと考えられるが、意図的にアンジュレータ光と電子バンチまたは電子バンチ同士を衝突させることも考慮に入れ、ビームが衝突する条件について検討した。

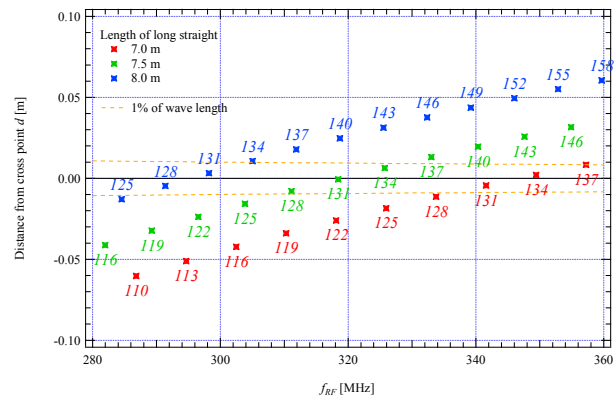


図 7: 加速高周波と交差点から最寄りバンチまでの距離の関係

AMATELAS の各部の長さは幾何学的条件で決められてしまうため、偏向部の軌道半径を  $\rho = 1667$  mm と決めて、長直線部の長さ（ただし、両端偏向部の頂点間の距離）と加速高周波の周波数を変えた場合に、交差点から最寄りの位置にいるバンチまでの距離  $d$  を求めたものを図7に示す。

図中の数値はリングのハーモニック数  $h$  であり、3周回するリングであるため3の周期性が見られる。実際のバンチ長はゼロではないので、 $d$  がバンチ長より小さくなる条件で衝突が起こり、今回検討した中では  $f_{RF} = 320$  MHz 付近にのみ衝突が起こる条件があり、それ以外の周波数では衝突はリング全体で起こらないことがわかった。

### 4. まとめ

小型蓄積リングに有効な、トーラス結び目を元にした新しいリングの提案を行った。複数周回して元に戻る軌道を持つ蓄積リングは多くの直線部を持ち、放射光リングとする場合には挿入光源を多く導入できる利点を持つ。また、軌道が交差する偏向電磁石にも磁場勾配を与えて、低エミッタンスを実現できる可能性を見いだした。さらに、軌道交差部においてビームが衝突する条件を示した。

また、このリングは1周回のリングと比べて軌道長が長いため、より多くの粒子を蓄積することが可能で、粒子線治療用加速器などへの応用も期待できる。

### 参考文献

- [1] S. Sasaki, et. al., "Fascinating relation between torus knots and accelerator lattices", in this proceedings.
- [2] A. Miyamoto, et. al., "Future Plan of Hiroshima Synchrotron Radiation Center - HISOR-II", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan (2010), pp.732-734.
- [3] S. Y. Lee, Accelerator Physics, World Scientific (1999).
- [4] G. LeBlanc, et al., "MAX-III, a 700 MeV Storage Ring for Synchrotron Radiation", EPAC2000, Vienna (2000).