Study on end field structures and radiation phase errors of insertion devices

概要

強磁場多極ウィグラーと円偏光アンジュレータについ てそれぞれ3次元磁場解析を行って端部磁気構造の最適 化を行った。多極ウィグラーは強磁場発生のために特殊な ハイブリッド構造をしているが、最適化によってギャップ に対する積分磁場の変化を160 G·cm まで抑えることがで きた。円偏光アンジュレータ(APPLE-2)では磁石の困難 軸方向の磁化変化を考慮した結果、位相及びギャップに対 する積分磁場の変化を20 G·cm以下に抑えることができた。 また、アンジュレータ光、特に高次光の質を高める上で重 要となる放射位相について、アンジュレータ磁場の測定デ ータからその位相誤差を評価し、光束密度との関係につい て議論した。

1 序

挿入光源において端部の磁気構造は、軌道の歪みを生じ させる積分磁場(field integral)を補正する役割を果たす。 近年では単純なハルバック型の直線偏光アンジュレータ だけでなく、強磁場や円偏光を発生させるためにより複雑 な構造を持つ挿入光源が増えて、端部の構造にも工夫が必 要となっている。一方、アンジュレータ磁場の質を表す figure of merit として放射位相誤差が着目され[1,2]、多くの 放射光施設では位相誤差を評価してそれを極力小さくす るような磁場調整が行われ始めている。ここでは、強磁場 多極ウィグラーと APPLE-2 タイプの円偏光アンジュレー タについて端部磁気構造を最適化した結果を示すととも に、日本で製作されたハルバック型アンジュレータ磁石列 の放射位相誤差の評価とそれに深く関係する光束密度の 計算結果についても報告する。

2 端部磁気構造

2.1 強磁場多極ウィグラー

強磁場多極ウィグラーの基本パラメータと構造を表1 及び図1に示す。これは、従来のハイブリッド型ウィグラ ーと異なり、磁場強度を高めるためにポールピースの両脇 にサイド磁石があって永久磁石がポールピース(磁極)を 取り囲む構造になっている[3,4]。ポールピースは強磁性体 のFeCo(パーメンダー、飽和磁化Bs=2.3T)製、永久磁石 はNdFeB(残留磁化Br=1.23T)製である。ただし、今回は 両端のポールピースの材質は、SS400(鉄)とした。これ は、パーメンダーに比べてSS400では飽和磁化が小さく、 積分磁場のギャップ依存性を小さくできるためである。ま た、ウィグラーの両端にエンド磁石つけ、SS400の飽和を さらに助ける効果を期待した。端部構造の最適化は、磁極 部のサイド磁石とポールピースの z 軸方向の長さを 18mm (ハーフポールの長さに相当)を基準としてそれぞれ独立 に加減することによって行われた。ただし、それぞれの磁 石(サイド、メイン)とポールピースの高さと幅はすべて 同じ寸法とした。

表1:多極ウィグラーのパラメータ

周期	200 mm	
周期数	5	
ピーク磁場	2.37 T (gap=20mm)	
ポールピース寸法	幅 50 x 高さ 132 x 長さ 36 mm	
メイン磁石寸法	幅 220 x 高さ 150 x 長さ 64 mm	



図1: 強磁場多極ウィグラーの構造

図2に積分磁場の計算結果を示す。エンド磁石 20mm (em20)の場合での計算結果からわかるように、両端のサ イド磁石の長さを変えると、積分磁場はそのギャップ依存 性の形を大きく変えずに全体的に上下する傾向があり、ポ ールピースの長さを変えると、ギャップ依存性の形まで大 きく変わることがわかる。最終的にエンド磁石を 30mm と して最適化を行った結果、図2において黒丸と実線で示し た積分磁場を持つ端部構造 (sm-0.8,p3,em30) が得られた。 ギャップによる積分磁場の変化は約160 G·cm に抑えられ、 ウィグラーの両端に設置される補正電磁石コイルによっ て容易に補正できる範囲に収まった。期待されたようにエ ンド磁石をつけることによってギャップによる積分磁場 の変化は小さくなった。加えて、図3に示すように電子軌 道を表す第2積分磁場(2nd field integral)もエンド磁石を つけない場合に比べて半分程度抑えられ、リング軌道中心 と光源点のずれが小さくなった。磁場計算には3次元磁場 解析ソフトである ELF/MAGIC (積分要素法)を用いた。



図2:積分磁場のギャップ依存性。図中の smxx と pxx で、 xx は 18mm を基準とした時のサイド磁石及びポールピー スの超過分の長さ(単位は mm)を示す。また、emxx の xx はエンド磁石の長さそのものを示している。



2.2 円偏光アンジュレータ

利用者からの円偏光に対する要請は近年強くなってお り、それを発生する円偏光アンジュレータの中で APPLE-2 は多くの放射光施設で使用されているものの1つである [5]。これは、4つのハルバック型の磁石列を組み合わせた もので、斜めに対向する2つの磁石列同士の位相を固定し、 残り2つの磁石列とその位相を変えることで、円偏光のみ ならず水平、垂直、楕円偏光を作り出すことができる。従 来の端部構造は、通常のハルバック型と同じく両端にハー フポールの磁石を置く構造であったが、ギャップ及び位相 変化とともに垂直方向の積分磁場が少なからず変化する ことが確認された[6]。この主な原因は、磁石の透磁率が1 から少しずれていることによって困難軸方向の磁化が変 化するためであり、これを考慮した端部構造の設計が近年 行われ始めている[7]。ここでは、周期 60mm の APPLE-2 の端部磁石構造について最適化を試みた。すべての磁石は 幅 40mm、高さ 35mm で、最小ギャップは 20mm とした。 使用磁石は、NdFeB (Br=1.23 T) で、その透磁率は容易軸 方向 1.05, 困難軸方向 1.17 である。図4に従来の端部磁石 構造と最適化された端部磁石構造を示す。また、それぞれ の構造に対する積分磁場の計算結果をそれぞれ図5,図6 に示す。これらの図からわかるように、位相及びギャップ の変化に伴う積分磁場の変化は端部磁石構造の最適化に より大幅に改善され、20 Gem 以下に収まった。



図4:円偏光アンジュレータ(APPLE-2)の(a)従来の端部構 造、(b)最適化された端部構造(図中の寸法の単位は mm)。



図5:従来の端部構造での積分磁場のギャップ及び位相依 存性。



図6:最適化された端部構造での積分磁場のギャップ及び 位相依存性。

3 位相誤差

ここでは、日本で実際に製作されたアンジュレータの磁 石列がどの程度の位相誤差を持っているかを調べてみた。 このアンジュレータのパラメータを表2に示す。測定デー タは磁場調整後のものである。磁場調整は、各ピーク磁場 のばらつき、磁場の各半周期積分のばらつき、電子軌道の 理想軌道からのずれ、積分磁場を補正するように行われた が、位相誤差を直接補正しようとしたものではない。

表2:アンジュレータのパラメータ		
タイプ	ハルバック	
周期	48 mm	
周期数	50	
ピーク磁場	0.25 T	
ギャップ	33 mm	
磁石サイズ	幅 80 mm x 高さ 35 mm	

アンジュレータの中心軸方向(z 方向)での放射位相 *o* は次式で定義される。

$$\phi(z) = \frac{2\pi}{.} \left\{ \frac{z}{2.^2} + \frac{1}{2} \int_0^z x^2 dz_1 \right\}$$
(1)

$$x = \frac{e}{mc.} \int_{0}^{z_1} Bdz_2$$
⁽²⁾

ここで、..., c, m, e, B, x'は、それぞれアンジュレータ光の 波長、ローレンツ因子、光速度、電子の質量と電荷、アン ジュレータ磁場、電子軌道の傾きである。アンジュレータ 光の波長は、アンジュレータの周期. u と次のような関係に ある。

$$L = \frac{L}{2.2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right), \quad K = \frac{eB_{0.u}}{2\pi mc}$$
(3)

ここで B_0 はアンジュレータのピーク磁場である。磁場測定 データと式(1)から各ポール位置での放射位相を求めて、そ れを直線でフィットした。各ポールでの放射位相とフィッ トした直線との差を図7に示す。ただし、各端のハーフポ ールとそれに続く各3つのポールについては除いてある。 図7は位相誤差を表しており、理想正弦磁場では位相誤差 は全てのポールでゼロになる。このアンジュレータ磁場の 放射位相誤差の標準偏差 σ_0 は2.3°であった。



ここで得られた位相誤差によるアンジュレータ光への 影響を評価するために、測定された現実の磁場と理想磁場 (正弦磁場)についてそれぞれn次光 (n = 1, 3, 5, 7)の光 束密度 (flux density)を計算してそのピーク強度の比を求 めた。一方、Walker は位相がランダムな誤差 (標準偏差 σ_{ϕ}) を持つ場合に、アンジュレータn次光の光束密度Iは理想 的な磁場 (位相誤差がゼロ)での光束密度 I_0 に対して

 $I \mid I_0 = exp\left(-n^2 \sigma_{\phi}^2\right)$

となることを近似的に示したが[2]、この式を使って同様に 光束密度のピーク強度比を求めた。表3にそれらの結果を 示す。表からわかるように、2つの方法で求めた1-7次 光の強度比の値に大きな差はなく、Walkerの式が有効であ ることが示された。また、2.3°程度の位相誤差であれば、 7次光程度までの高次光の強度の減少も大きくないこと がわかる。

今回、位相誤差を直接に調整対象としなかったにもかか わらず、位相誤差があまり大きくならなかったのは、単に ピーク磁場のばらつきだけでなく、半周期ごとの積分磁場 など複数のパラメータの調整を行ったことにより、間接的 に位相誤差を抑えることができたためと考えられる。しか し、アンジュレータでかなり広範囲の波長を高次光でカバ ーする場合や次数のかなり高い高次光を利用する場合に は、位相誤差を直接補正する磁場調整を行うことがより有 効と言えよう。

表3:アンジュレータ光の光束密度の強度比 I/I。

	計算結果	Walker の式
1 次光	0.998	0.998
3 次光	0.986	0.981
5 次光	0.961	0.952
7 次光	0.924	0.861

4 結論

強磁場多極ウィグラーの端部構造の最適化では、端部の ポールピースを飽和磁化の低い SS400 にし、さらにエンド 磁石を追加することでその飽和効果を強めた。端部のポー ルピースとサイド磁石の長さを調整することで積分磁場 の変化を 160 G·cm まで抑え込んだ。また、円偏光アンジ ュレータ(APPLE-2)では透磁率が1でないことや困難軸 方向成分も考慮することで、ギャップ及び位相の変化に対 して 20 G·cm まで抑えられる端部磁石構造を得た。これら の方法は、他の種類のハイブリッド型挿入光源や円偏光ア ンジュレータにも応用できるものである。ハルバック型の アンジュレータ磁場の放射位相誤差を磁場測定データか ら評価し、2.3°という結果を得たが、理想磁場と測定磁場 から計算された7次光までの光束密度の比は、位相誤差か ら求められる Walker の式の結果と大きく矛盾しないこと がわかった。より高次の光を利用する場合には、位相誤差 を直接抑えることが有効である。

参考文献

- [1] B. L. Bobbs, et al., Nucl. Instr. and Meth. A296 (1990) 574.
- [2] R. P. Walker, Nucl. Instr. and Meth. A335 (1993) 328.
- [3] N. Nakamura, *et al.*, Proceedings of the 1st Asian Particle Accelerator Conference, Tsukuba, 1998, p. 689.
- [4] 小林秀樹他、 マグネティックス研究会資料 MAG-01-180, 2001.
- [5] S. Sasaki et al., Nucl. Instr. and Meth. A331 (1993) 763.
- [6] K. Kakuno, *et al.*, Proceedings of the 6th European Particle Accelerator Conference, Stockholm, 1998, p. 2243.
- [7] J. Chavanne, *et al.*, Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York City, 1999, p. 2665.