

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

澁谷孝^{A)}、中村典雄^{A)}、高木宏之^{A)}、阪井寛志^{A)}、藤澤正美^{A)}、小林秀樹^{B)}

^{A)} 東京大学物性研究所・軌道放射物性研究施設 〒277-8581 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

^{B)} 信越化学工業(株)・磁性材料研究所 〒915-8515 福井県武生市北府 2-1-5

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 $B_s=2.3T$) 製、永久磁石は NdFeB (残留磁化 $B_r=1.23T$) 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

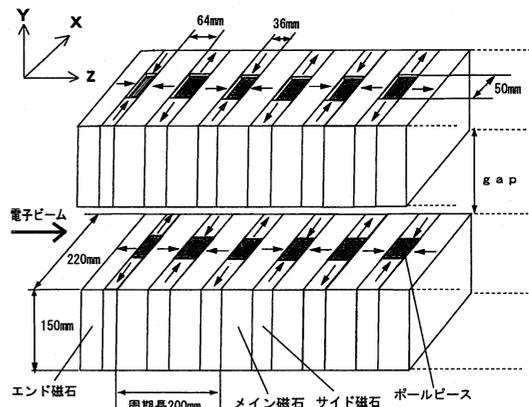


図1: 強磁場多極ウィグラーの構造

図2に積分磁場の計算結果を示す。エンド磁石 20mm (cm20) 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。

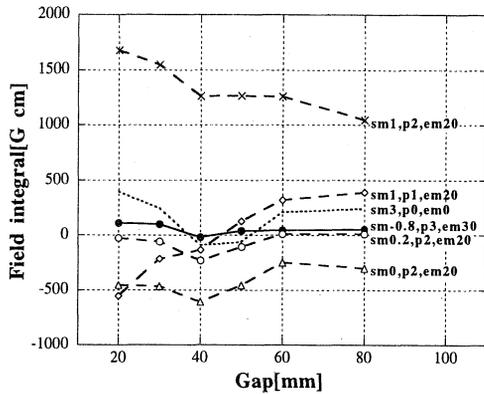


図2：積分磁場のギャップ依存性。図中の smxx と pxx で、xx は 18mm を基準とした時のサイド磁石及びポールピースの超過分の長さ (単位は mm) を示す。また、emxx の xx はエンド磁石の長さそのものを示している。

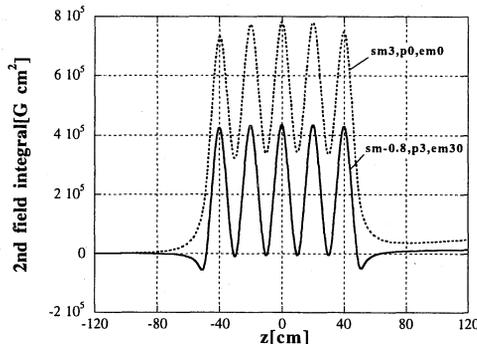


図3：第2積分磁場 (ギャップ 20mm の場合)。

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 G·cm 以下に収まった。

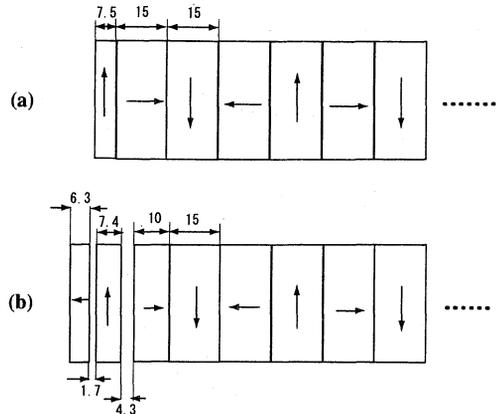


図4：円偏光アンジュレータ (APPLE-2) の (a) 従来の端部構造、(b) 最適化された端部構造 (図中の寸法の単位は mm)。

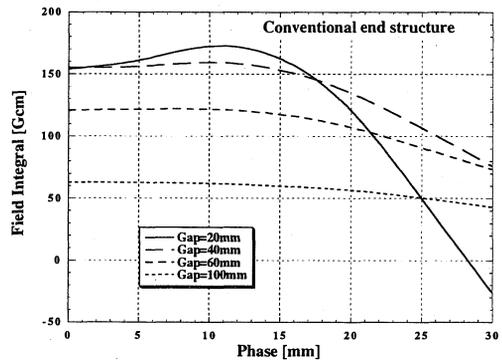


図5：従来の端部構造での積分磁場のギャップ及び位相依存性。

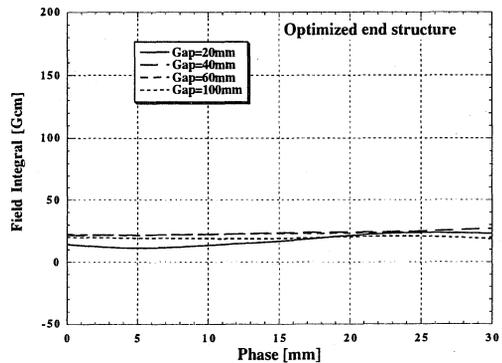


図6：最適化された端部構造での積分磁場のギャップ及び位相依存性。

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、各ビーム磁場のばらつき、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 ϕ は次式で定義される。

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

$$x' = \frac{e}{mc\gamma} \int_0^z B dz_2 \quad (2)$$

ここで、 λ , γ , 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、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 λ_u と次のような関係にある。

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right), \quad K = \frac{eB_0\lambda_u}{2\pi mc} \quad (3)$$

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_ϕ は 2.3° であった。

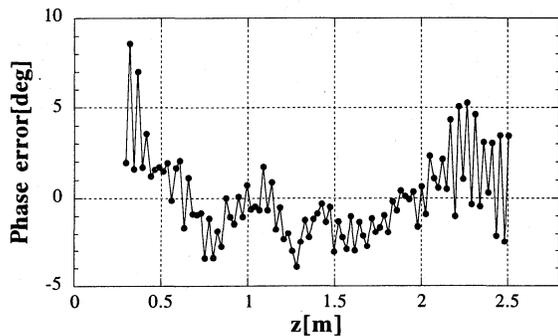


図7：各ポールでの位相誤差

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

$$I/I_0 = \exp(-n^2\sigma_\phi^2)$$

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_0

	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.