

収差補償を導入したレーザーコンプトン散乱用光学共振器の設計 OPTICAL ENHANCEMENT CAVITY WITH ASTIGMATISM CORRECTION FOR LASER COMPTON LIGHT SOURCE

本田洋介 *A)

Yosuke Honda*^{A)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Energetic photon beam produced via Laser-Compton scattering is expected to have variety of applications. An optical enhancement cavity with a small spot size at the collision point is a key to realize a high average flux. It is known that astigmatism arising from finite incident angle on the concave mirror limits the smallest spot size in the case of conventional 4-mirror ring cavity. We discuss a design of an optical cavity with astigmatism compensation utilizing additional convex mirrors. It improves the ellipticity of beam profile at the focus point and can realize a smaller spot size.

1. はじめに

加速器の電子ビームにレーザー光を衝突させることで、電子の運動量の一部を光子に受け渡すことができる(レーザーコンプトン散乱)。この手法は、比較的小型の装置で、準単色で指向性の良い、高エネルギー光子を生成出来ることから、様々な応用が期待されている^{[1][2]}。

光源としての利用を考えるうえで、最大の課題はフラックスである。限られたレーザーのパワーで平均フラックスを稼ぐ為に、レーザー光を光学共振器に蓄積して実効的な強度を増大し、共振器中で電子ビームと衝突させる構成の開発が進められている。衝突のルミノシティを稼ぐためには、電子ビームとレーザー光を衝突点において小さなスポットサイズに設計する必要がある。レーザー光は、共振器の固有モードで決まる形状になるので、出来るだけ絞られた固有モードを持つ安定な共振器を設計することが開発課題である。

ここでは、ミラーの組み合わせで収差を補償する手法を採用し、小さなスポットサイズを実現できる光学共振器の設計について議論する。

2. 収差の効果と共振器の設計

共振器は、衝突点で小さなスポットサイズを実現すると同時に、周回するレーザーのパルス間隔を電子ビームのバンチ間隔に合わせるように調整できる必要がある。これら2つの機能は独立に導入するのが望ましく、通常は、Fig.1に示す凹面ミラー2枚と平面ミラー2枚による4枚ミラーリング型の共振器設計が用いられる。収束の効果は凹面ミラーが担い、その外側ではほぼ平行光で伝搬させ、平面ミラーにより周長を調整する。

凹面ミラーは斜入射で使用されることになるため、入射面に依存した光学設計の非対称性、つまり、収差が発生する。安定に実現できるスポットサイズの下限は、収差によって決まることになる。この制限を克服するため、ミラー自体の形状に非対称性を導入する方法などが検討されている^[3]。ここでは、ミラー自体は製作技術が確立している球面の形状とし、ミラーの枚数を増やして補償光学系を構成する方式を検討する。

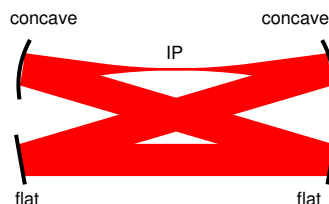


Figure 1: 通常の4枚ミラーリング型共振器。

2.1 原理

Fig.2に示すように、曲率半径 ρ のミラーを入射角 $\alpha/2$ で用いる場合、球面ミラーは、紙面内の方向 (tangential) と紙面に垂直な方向 (sagittal) で異なる焦点距離 f_t, f_s を持つ働きをし、それぞれ、

$$f_t = \frac{\rho}{2} \cos(\alpha/2) \quad (1)$$

$$f_s = \frac{\rho}{2 \cos(\alpha/2)} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、凹面ミラーの場合は $\rho > 0$ 、凸

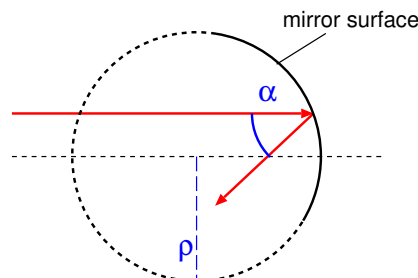


Figure 2: 球面ミラーにおける斜入射。

面ミラーの場合は $\rho < 0$ となるだけで、表式は変わらない。凹面ミラーと凸面ミラーで符号が異なることから、これらを組み合わせることで、全体としての収差を補償する光学系を設計することが出来る。

* yosuke@post.kek.jp

2.2 収差補償部の設計

まず、幾何光学の手法で組み合わせミラー部の収差の補償を検討し、その後で改めてガウスビームでの計算を行い、微調整する。

Fig.3のような凹面ミラーと凸面ミラーの組み合わせで収束作用を持たせるとする。凹面ミラーの曲率半径を ρ_1 、凸面ミラーの曲率半径を ρ_2 とし、それぞれ、入射角を $\alpha_1/2, \alpha_2/2$ で使用する配置とする。収束点から凹面ミラーまでの距離は L 、凹面ミラーと凸面ミラーの距離は D である。基本的には、これら6つのパラメータで記述できる。

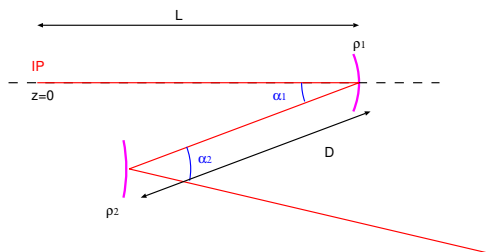


Figure 3: 収束部のレイアウト.

Fig.4に示すように、収束点を起点として発散した光線が、収束部の外側では2平面共に平行光となること、収差補償の条件である。光路を決める空間的なパラメータは、構造的な条件から予め決めてしまい、 ρ_1, ρ_2 の良い組み合わせの解を探した。

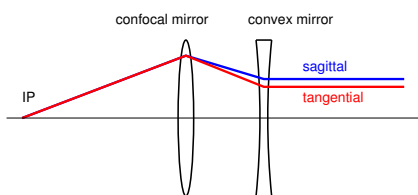


Figure 4: 幾何光学による収差補償の概念.

$L = 0.5\text{m}, D = 0.2\text{m}, \alpha_1 = 0.15\text{rad}, \alpha_2 = 0.275\text{rad}$ の条件で、2平面についてそれぞれ、上記の条件を満たす ρ_1, ρ_2 を計算した結果をFig.5に示す。2平面で同時に成立する点が、収差の補償を意味する。構造的な条件の決め方によっては、2本の線が重なる点が存在しなかったり、1点で交差したりするが、この場合は、広い領域で2本の線が緩やかに接するような状態で、許容幅が大きいと考えられる。 $\rho_1 = 0.5\text{m}, \rho_2 = -0.65\text{m}$ が解であることが分かる。

2.3 収差補償部の設計

前節で決めた収差補償の収束部を対称に配置し、6枚のミラーから成るリング共振器を、Fig.6のように設計した。

固有モード解析により、共振器の各点におけるビームサイズを計算することが出来る。具体的には、任意の点を起点として一周の伝搬行列を計算し、その固有ベクトルからビームサイズが得られる。Fig.7は、共振器半周のビームサイズの伝搬の様子である。Fig.8は、収束点近傍の拡大である。

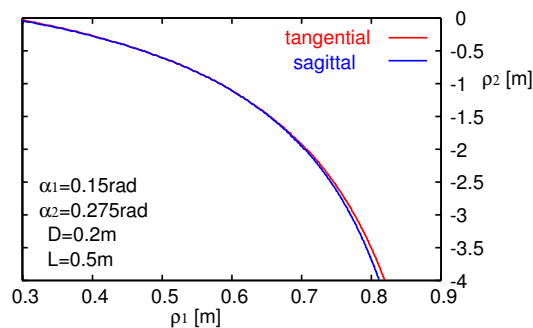


Figure 5: 収差を補償するパラメータの探索.

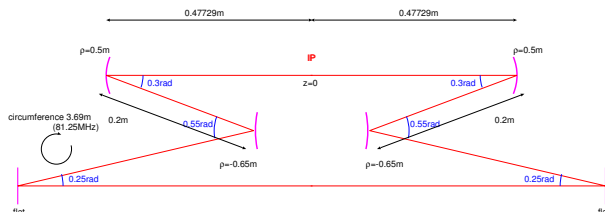


Figure 6: 収差を補償するパラメータの探索.

収束点でのサイズは、凹面ミラーから収束点までの距離 L によって微調整することができる。Fig.9、Fig.10に、 L と収束点でのビームサイズの関係を示す。 L を小さくするに従って、ビームサイズが絞られ、 $L = 0.47725\text{m}$ において、安定解が無くなる。収差が補償されているおかげで、2平面はほぼ同じ振る舞いになり、真円のプロファイルになることが分かる。

2.4 収差補償の無い場合との比較

比較の為、収差補償を行わない、単純なFig.1の形状の場合の計算を示す。周長4mで、凹面ミラーへの入射角は $\alpha/2 = 0.131\text{rad}$ とした場合である。Fig.11は、共振器一周のビームプロファイルの伝搬の様子である。収束点で $20\mu\text{m}$ まで絞ろうとすると、扁平なプロファイルになってしまう。Fig.12は、凹面ミラー間の距離を調整したときの、収束点でのビームサイズの応答である。できるだけ絞るように調整しようとする、一方の平面が先に不安定領域に入ってしまうため、両平面を同時に絞っていくことが出来ない。

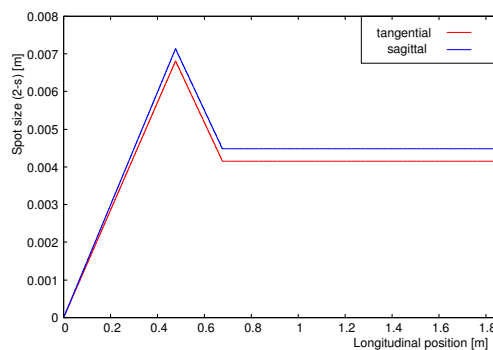


Figure 7: 共振器半周のビームプロファイル.

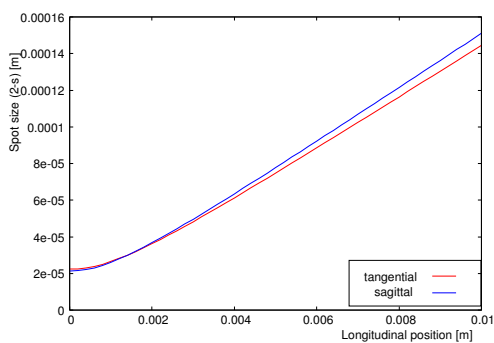


Figure 8: 収束点付近のビームプロファイル.

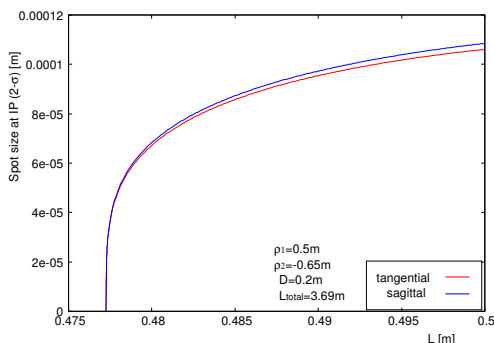


Figure 9: 収束点サイズの調整.

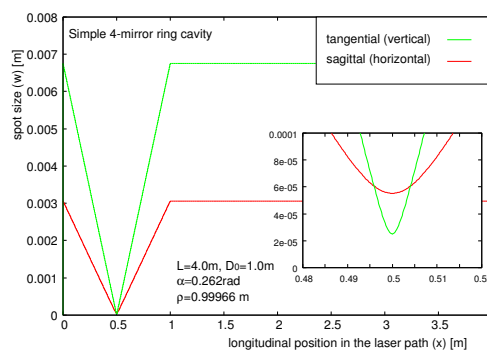


Figure 11: 通常の4枚ミラーリング共振器の場合の共振器一周のビームプロファイル.

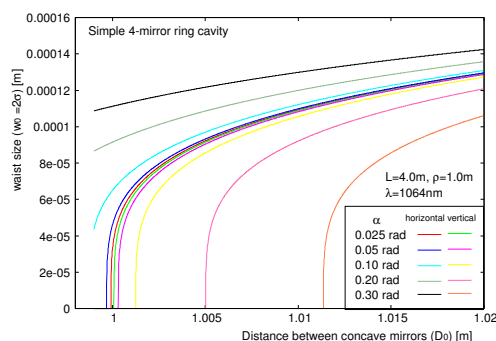


Figure 12: 通常の4枚ミラーリング共振器の場合の収束点サイズの調整.

3. 共振器構造体の概念設計

共振器の実装の概念図を Fig.13 に示す。Fig.6 に従った、基本周波数 81.25MHz の共振器である。ミラーの枚数が増え、多少複雑になるが、従来の構造体の設計思想を引き継いだ構成として考えた。この図には描かれていないが、共振器の共鳴を制御するためのピエゾ駆動機構など、必要に応じて備える必要がある。この構造体全体を真空チェンバに収容して、加速器のビームラインに設置することになる。なお、この設計には、冗長性を持たせるため、2つの独立した共振器が一つの構造体に収められている。

4. まとめ

単純な4枚ミラーリング型の共振器の場合は、凹面ミラーを斜入射で使用することにより収差が発生し、こ

れが実現できるスポットサイズの限界を与える。凹面ミラーと凸面ミラーを組み合わせる事で、収差を打ち消すことが可能である。6枚ミラーリング型の構成によって、 $2\sigma = 20\mu\text{m}$ のサイズまで真円を保って収束することができることを示した。

参考文献

- [1] H.Shimizu, et al., "X-ray generation experiment in STF accelerator on quantum beam technology program", 第10回加速器学会年会プロシーディングス
- [2] K. Sakaue, "Development of a compact X-ray source via laser-Compton scattering using an optical super-cavity", 第10回加速器学会年会プロシーディングス
- [3] H.Shimizu, et al., "Laser Stacking Cavity Development for Quantum Beam STF Collision Experiment", 第9回加速器学会年会プロシーディングス

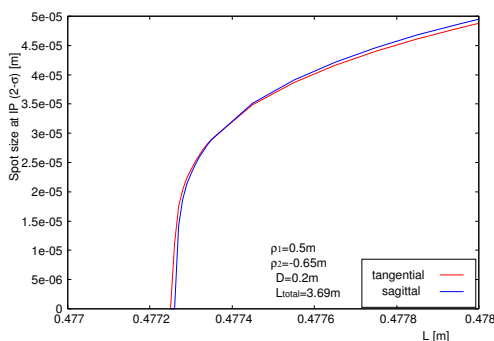


Figure 10: 収束点サイズの調整 (拡大).

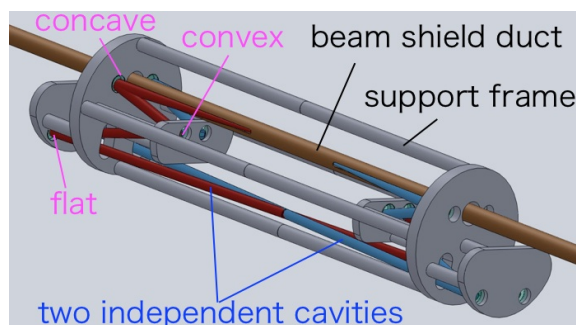


Figure 13: 6枚ミラーリング共振器の構造体の概念設計.