

LCS ガンマ線源単色化のための非対称ファブリペロー光共振器の レイトレイス法による評価

EVALUATION BY A RAYTRACE METHOD OF AN ASYMMETRIC FABRY-PEROT OPTICAL RESONATOR FOR A MONOCHROMATIC LCS GAMMA RAY SOURCE

永井良治 *A)、羽島良一 A)、
Ryoji Nagai* A), Ryoichi Hajima A),
A)Japan Atomic Energy Agency

Abstract

Non-destructive measurement systems of nuclear material are under development in our group. The measurement systems are based on monochromatic γ -ray generated from laser Compton scattering (LCS) based on energy-recovery linac accelerator technologies. The accuracy improvement of the non-destructive measurement systems and the exploration of the precise excitation state in an atomic nucleus are attained by further developing a pure monochromatic LCS- γ -ray source. The energy spread of a mode-locked short pulse laser restricts the monochromaticity of the LCS- γ -ray source. Therefore, an ultra-narrow band width laser should be used for instead of the short pulse laser. We have proposed an asymmetric confocal Fabry-Perot optical resonator as a supercavity of the pure monochromatic LCS- γ -ray source. The influences due to the distortion and the misalignment of the mirrors were evaluated by a raytrace method. We present R&D status and the evaluation results for the optical resonator.

1. はじめに

われわれのグループでは ERL 加速器技術を基盤としたレーザーコンプトン散乱 γ 線源 (LCS- γ 線源) [1] を用いた非破壊核種分析システム [2] の開発をおこなっている。LCS- γ 線源をさらに高度化し単色化を進めることで、 γ 線非破壊分析システムの精度向上や核内励起状態の探求が可能になる。LCS- γ 線の単色性を向上するには、電子ビーム、レーザー光、双方のエネルギー広がり小さくする必要があるが、ここでは、特にレーザー光のエネルギー広がりについて考える。

LCS- γ 線源では電子ビームと効率よく衝突させるために、光共振器内に蓄積されたピコ秒のモードロックレーザーが用いられている [3]。レーザー光の時間形状とエネルギー (波長) スペクトルはフーリエ変換の関係にあるので、ピコ秒レーザーのエネルギー広がりはずいぶん 0.3% 程度である。従って、LCS- γ 線の単色性を向上するにはピコ秒レーザーに代えて狭帯域レーザーを用いる必要がある。従来の LCS- γ 線源で用いられる光共振器は半透過ミラーを用いてレーザー光を共振器内に入射している。共振器内にレーザー光を十分に蓄積するには共振器の損失が十分に小さくしなければならないので、この結合度は大きくできない。このために共振器内にレーザー光が蓄積されるまでには多くのレーザー光パルスを入射する必要があるが、ピコ秒モードロックレーザーの繰返しは 100 MHz 程度であるので問題にならない。しかしながら、代表的な高出狭帯域レーザーである注入同期レーザーの繰返しはせいぜい数十 kHz なので、次のパルスが入射されるまでに蓄積光が減衰してしまい、レーザー光を十分に蓄積出来ない。

低繰返し狭帯域レーザーを蓄積するためには、半透過鏡を用いずに、入射光全量を入射できる非対称共焦点型ファブリペロー共振器 [4] によりレーザー光を蓄積すればよいと考えられる。しかし、この共振器を従

来通りに球面ミラーで構成したのでは、球面収差により十分に収束できないこと、周回距離に差が生じてしまい収束点での位相整合がとれないという問題があった。この問題を解決するために放物面鏡を用いることを提案し、レイトレイス法により簡単な評価を行ったところレーザー光蓄積が可能であることが分かった [5]。本報告では、この光共振器を実現するために必要とされる面精度およびアライメント精度を明らかにするために、レイトレイス法を用いて面精度 (加工誤差) およびミスアライメントの影響についての評価を行ったので、その結果について報告する。

2. 放物面鏡形状の加工誤差による影響

提案した光共振器でのレーザー光の蓄積実験および次世代光源のために開発した電子銃からの電子ビームを利用したコンプトン散乱実験のために Figure 1 に示す光共振器を試作した。このミラーは基板に BK7 を用い 830nm 全反射の誘電体多層膜をコートしたものであり、ミラーの形状は軸対称回転放物面である。ミラーの形状はフィゾー干渉計 [6] を用いて計測した。計測の結果得られた放物面からのずれ (加工誤差) を Figure 2 に示す。×は計測データであり、実線は 6 次の偶関数で近似した結果である。ここで得られた誤差関数を用いてレイトレイス法により蓄積される光のシミュレーションを行った。

その結果、試作した放物面鏡では集光点でのプロファイルが Figure 3 左に示すように、加工誤差による収差のために縦 (y 方向) に長く伸びてしまうことが分かった。試作した放物面鏡の加工誤差は約 $2 \mu\text{m}(\text{rms})$ であった。

そこで、その誤差関数をスケールして加工誤差がレーザー波長 λ の 1/1000 までの場合についてレイトレイスを行った。加工誤差が $\lambda/30$ (約 $0.03 \mu\text{m}(\text{rms})$) まで小さくなると Figure 3 右に示すように、きれいなプロファイルでの集光が得られた。また、加工誤差に対する集光プロファイルの rms サイズの変化の様子を Figure 4 に示

* nagai.ryoji@jaea.go.jp

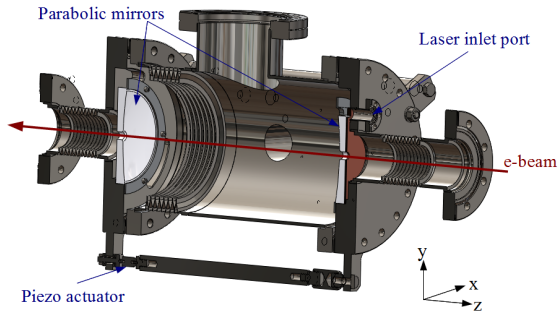


Figure 1: Prototype of the optical cavity

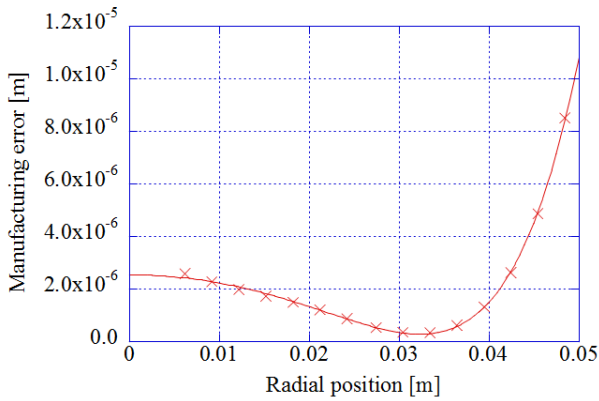


Figure 2: Manufacturing error of the parabolic mirror

す。加工誤差が $\lambda/30$ 以下で集光プロファイルの rms サイズが十分に小さくなっていることが分かる。

さらに、この光共振器では集光部分でレーザー光の位相面が一致することが求められるので、周回距離に対する加工誤差の影響についても調べた。その結果についても Figure 4 に示す。周回距離への影響は非常に大きく、加工誤差が $\lambda/30$ であっても、周回誤差が $0.24 \mu\text{m}(\text{rms})$ 程度ある。周回誤差は蓄積されるレーザー光の波長（ここでは 830 nm ）の $1/100$ 程度以下でないと十分な位相整合が得られないので、加工誤差は $\lambda/1000$ まで小さくすることが必要であり、このためには非常に高い加工技術が求められる。

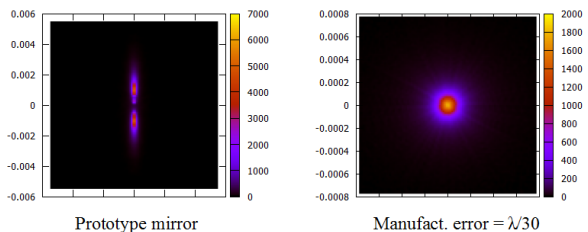


Figure 3: Influence on the spot profile by the manufacturing error of the mirrors

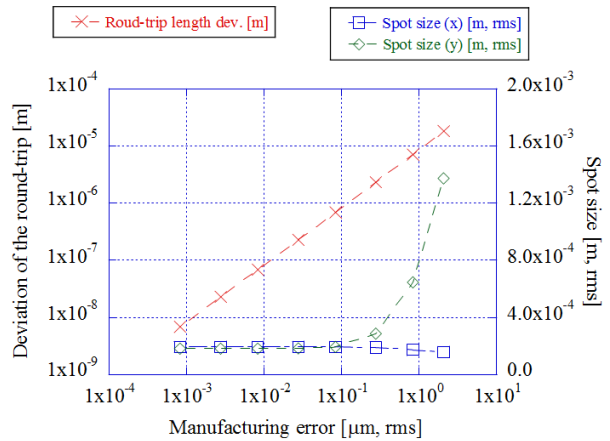


Figure 4: Influence on the spot and round-trip length by the manufacturing error of the mirrors

3. 放物面鏡のミスアライメントによる影響

ミラーのミスアライメントの影響について、片側のミラーを x 、 y 、 z 方向へオフセットおよび x 軸、 y 軸周りで傾けた場合の集光プロファイルと周回長についてレイトリス法により調べた。ただし、軸方向については Figure 1 に示すように、共振器の長軸（電子ビームの走る方向）を z 軸とし、断面方向を x 軸および y 軸として、入射レーザー光は y 方向にオフセットした位置から入射している。

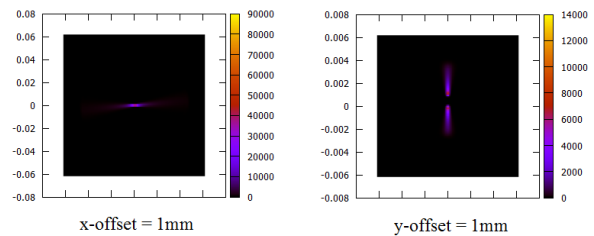


Figure 5: Influence on the spot profile by the x and y offset of the mirror

x 、 y 方向にオフセットした時の集光プロファイルは Figure 5 に示すようにオフセットした方向に広がる。オフセットによる集光サイズと周回長への影響をまとめたグラフを Figure 6 に示す。この図から集光サイズは $30 \mu\text{m}$ 程度のオフセットで十分に小さくなり、周回長の誤差も $10 \mu\text{m}$ 程度のオフセットで十分に小さくなる事が分かる。また、 z 方向へのオフセットについては、Figure 7 に示すように、 z 方向のオフセットが大きくなると集光サイズが y 方向に広がる。これは、 y 方向にオフセットした位置で入射する構成であるためである。集光サイズについては $10 \mu\text{m}$ 程度のオフセットでもほとんど大きくなる。一方、周回長については、位相整合をとるには nm 程度以下で z 方向を合わせる必要があり、従来の光共振器では z 方向のオフセットを変えても波長ごとに位相整合がとれる点が現れる。しかしながら、この共振器ではその範囲が $\pm 1 \mu\text{m}$ 程度に限られることが Figure 7 から分かる。

x 、 y 軸周りの傾きの影響はオフセット時とほぼ同様

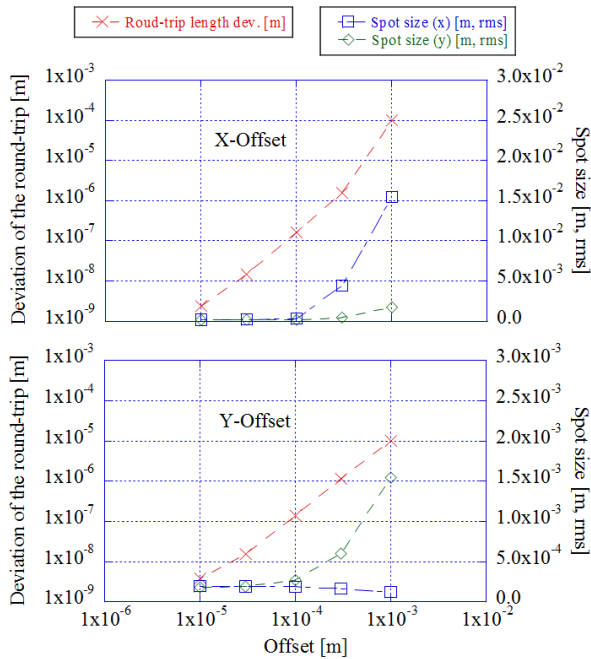


Figure 6: Influence on the spot and raound-trip length by the x and y offset of the mirror

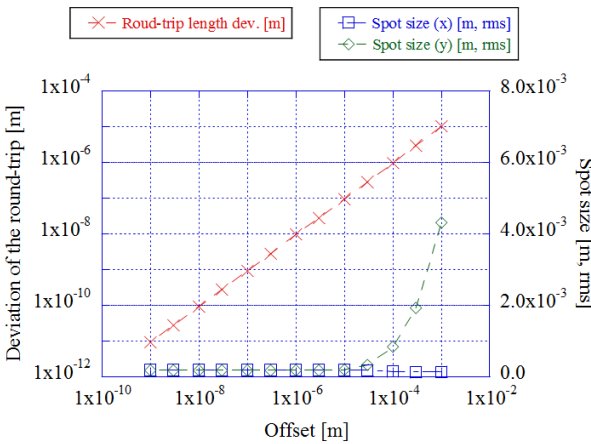


Figure 7: Influence on the spot and raound-trip length by the z offset of the mirror

であり、集光プロファイルは Figure 8 に示すように傾いた方向に広がる。傾きによる集光サイズと周回長への影響をまとめたグラフを Figure 9 に示す。この図から集光サイズは $100 \mu\text{rad}$ 程度の傾きで十分に小さくなり、周回長の誤差も $10 \mu\text{rad}$ 程度の傾きで十分に小さくなる事が分かる。

4. まとめ

レイトレイス法による加工誤差形状とミスアライメント影響の評価により、非対称型ファブリペロー共振器をレーザーコンプトン散乱用の光共振器するためには加工誤差を $\lambda/1000$ (サブ nm,rms) とするような極めて高い面精度を持った放物面鏡が必要であることが分かった。また、ミスアライメントの影響については z 方向

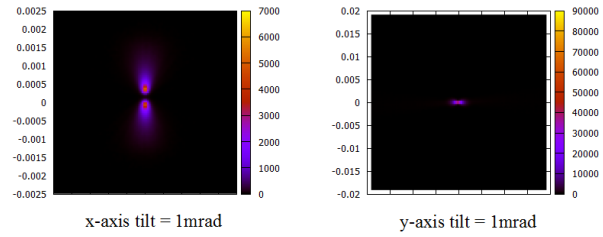


Figure 8: Influence on the spot profile by the x and y tilt of the mirror

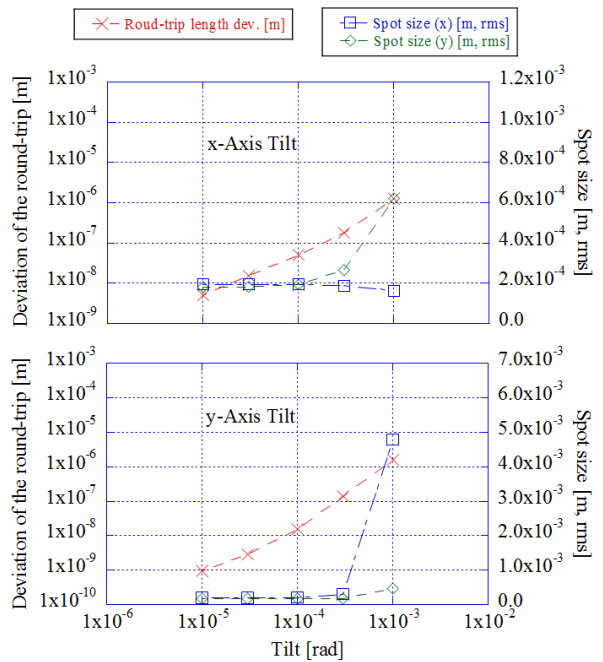


Figure 9: Influence on the spot and raound-trip length by the x and y tilt of the mirror

のオフセットについては、波長単位で現れる整合点が $\pm 1 \mu\text{m}$ 程度に限られることが分かった。傾きおよび断面方向オフセットのアライメント精度についてはそれほど厳しくないことが分かった。

本研究の一部は、科研費基盤 (C)23561018 の成果である。

参考文献

- [1] R. Hajima et al., J. Nucl. Sci. Tech. 45, pp. 441–451 (2008).
- [2] H. Ohgaki, T. Hayakawa, and I. Diato, The Review of Laser Engineering, 40, pp.188–193 (2012).
- [3] A. Moon, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 36, L1446–L1448 (1997).
- [4] I. Yamane, et al., Proc. of IPAC10 pp. 1402–1404 (2010).
- [5] R. Nagai, et al., Proc. of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, THPS041.
- [6] <http://cweb.canon.jp/indtech/zygo/lineup/verifire/asphere/index.html>