

## 共振器用鏡の形状制御実験

### DEVELOPMENT OF A MIRROR SHAPE CONTROL SCHEME

清水洋孝<sup>#</sup>, 江並和宏, 久米達哉, 平木雅彦, 山中 将, 吉田孝一

Hiroataka Shimizu<sup>#</sup>, Kazuhiro Enami, Tatsuya Kume, Masahiko Hiraki, Masashi Yamanaka, Koichi Yoshida

KEK High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

Recently, it is thought confidently that high intensity quasi-monochromatic X-ray beams are quite useful not only for scientific research area, but also industrial, surveying, and medical applications. To create those semi-monochromatic beams, an inverse-Compton scattering scheme is widely used. Recent accelerator technologies much help to increase the beam quality, means quite low emittance, high current beams are obtained. Those charged particle beam side improvements strongly push up requirements for laser beams side. To increase the laser power, introducing optical cavity system becomes more standard method. Also this laser stacking area has made rapid progresses. And now, the stacked laser power record is almost reaching to MW level. Beyond several hundred kW stacking, heat deformation of optical cavity mirrors become a serious problem. To overcome this problem, and also to support the laser stacking technics, mirror surface shape control researches are started. In this report, several R&D results are described precisely.

#### 1. はじめに

対象が周期的な波の構造を持つ様な場合、それらを同位相で重ね合わせる事によって、加算的な増幅効果が得られる事になる。これは光の様な極短い波長を持つ波に対しても同じ事で、レーザーの様な高いコヒーレンス性を有する光の場合、実際に行われている<sup>[1-3]</sup>。それぞれ別々の小出力のレーザー光源から光ファイバーで輸送されて来て、それらをファイバー長さを調整する事で加算的に合成して、一つの強力な光として使用する様な方法では無く、ここでは光共振器を使った加算的合成に話しを限定する。光共振器を使った光の蓄積には、高反射の鏡が必要になる。光学的な消耗を極度に抑えて光を折り返す事により、限られた空間内に光を閉じ込める事で、次に送られてくる光との重ね合わせを実現している。

加算的な光の合成に同位相性が重要な役割を持つ以上、空間の周期的境界条件を与える事になる高反射鏡、特にその面精度への要求は非常に高いものになってくる。高反射鏡の光学的消耗の低減化や面精度の改善に関しては、早くから研究開発が進められており、他の蓄積に必要な技術の向上と合いあって、数百 kW に及ぶ蓄積光強度が報告されるに至っている<sup>[4]</sup>。この様に加速器側から供給される荷電粒子線の性能も含めた開発状況が進展している状況で、技術の進歩が次の問題をもたらす事がある。光共振器内に蓄積されたレーザー光強度が強くなりすぎて、共振器を構成している高反射鏡との接触時に与える熱量が非常に大きくなり、反射面の形状が変形してしまう状況が実際に確認されている<sup>[3,4]</sup>。この変形は内部のレーザー光が落とす熱量と鏡が自身のマウン

トを通じて熱伝導によって排熱する熱量が釣り合う状態まで続く。つまり、鏡自身が自分の形状を変形させる事で、蓄積量される光の量を調整している様な状態で、熱平衡状態に向かって光共振器の本来持つ性能に制限的な熱フィードバックをかけている訳である。

上の状況からも解る様に、現行の技術を組み合わせさせて到達出来る蓄積強度の上限を決めているのは、熱による鏡表面の変形である。例えば、このような問題を解決する為に有用な情報を与えてくれそうな先行研究を探してみた場合、次の二つの研究開発が示唆的と思われる。

まず感度を上げる為に必要な大きな主鏡を、向ける角度に依らず重力に逆らって理想的な曲面に保つために「すばる望遠鏡」に於いて行われている鏡面制御の方法である<sup>[5]</sup>。10m 程度の大きさの鏡が制御対象の為に、領域を細分化して、主鏡反射面の裏側に 260 本以上のピエゾ素子を配する事で、0.1 秒に 1 回の割合いで自動的に曲面の形状を自動調整している。狙う面精度としては~100nm 程度の範囲を目標としている。

次に重力波観測の現場から、VIRGO group が採用している制御の方法を取り上げてみる<sup>[6]</sup>。やはりここでも分割された各セグメントに対し、多数の能動素子を使う方式が採られている。鏡面の熱的な変形の影響を、やはり背面に配した 60 個以上の小型のヒーターを使って、予め相殺させる事で影響を受けない様にする工夫が為されている。

上記の研究開発を踏まえて、加速器環境下での X 線生成実験の為に光共振器制御に応用出来るような要素と不向きな点とを考えた場合、何らかのアクチュエータを用いて、変形してしまった鏡の反射面を背

<sup>#</sup>hirotaka@post.kek.jp

面から押し戻す(引き戻す)と言う方向性は踏襲出来そうである。しかし、望遠鏡の主鏡の大きさがメートルの単位であるのに対して、光共振器構成用の反射鏡としては精々2~4 inch 程度の大きさが望まれる。これは光共振器の設計の思想にも依る点であるが、現在の主流である「コンパクトな形状の光共振器を加速器の beam line に出来るだけ浅い角度で導入する事で正面衝突に近い過程を保つ事で X 線量を稼ぐ」と言う方針に則れば、正面衝突の場合に比べて、鏡の半径程度の角度オフセットが常について回る為である。つまりすばる望遠鏡の場合に比べて、制御対象の細分化は難しいので、アクチュエータの数を減らして、真空導入が可能より単純な構造を考える必要がある。また熱源を使った温度制御の方式では、石英基板の熱的な変形の時定数(~ms 程度)が制御回路の応答時定数を決めてしまう為、それ以上に早い速度での制御が出来なくなってしまう。時間をかけてでも或る平衡状態に辿り着けばその正常な状態を維持出来る様な実験環境では有効な方法であるが、例えばピエゾの様な素子を使う事で代用出来る今回の様な場合には、第一候補では無いと考えられる。

これらの検討の下で、共振器用鏡の形状を制御し蓄積光強度を引き上げる為の研究開発を開始した。第一目標としては球面形状の凹面鏡を作成し、その曲率半径を遠隔で操作する事である。以下にその詳細を述べる。

## 2. 数値計算

荷重をかけて物を変形させる場合に、許容応力の上限を越えると弾性変形(即ちかけた荷重を取り除いた場合に元通りに戻る事)を越えて破壊に至ってしまう。まず目標とする曲がり具合が、想定している材料によって到達可能かどうかを有限要素法を用いて数値計算に依って見積もった。方法としては、良く知られた簡単なモデルの解析計算の結果を基に荷重のかけ方を決め、その際得られるはずの最大変位量及び最大応力の値を解析の結果と有限要素法の結果を比べる事で、作成したモデルが信頼出来るかどうかを検討し、他の点の変位量や応力分布などはその数値計算モデルを使う事で情報を得た<sup>[7]</sup>。

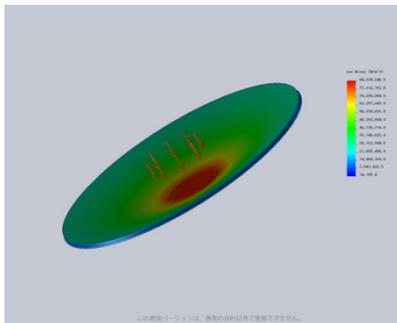


Figure 1: 有限要素法を使った凹面鏡設計。

共振器用鏡を変形させる趣旨のこれまでの先行研究に於いて、角型の鏡を円筒形に変形させる試みが

既に成功を見ている<sup>[8]</sup>。ここではそれを一歩進めて、まずは同心円環荷重による球面型凹面鏡を作成する。

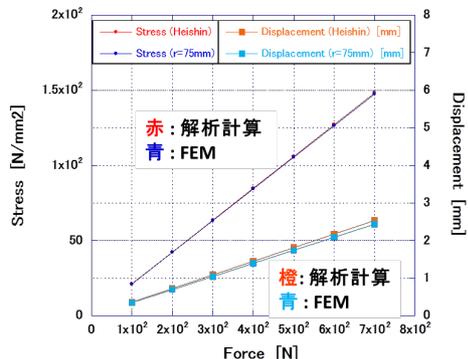


Figure 2: 有限要素法を使った解析結果の比較。

市販で手に入る  $\phi 100\text{mm}$  の合成石英鏡基板を仮定して、曲率半径が 1.5m 程度の凹面鏡が作成出来るかどうかを検討する。この場合必要なパラメータとして縦弾性係数 74GPa とポアソン比 0.18 を用いた<sup>[9]</sup>。構成した数値計算モデルは、解析的に得られる典型的な結果を良く再現しており、以降の検討に充分用いる事が出来る事が解った。

## 3. 曲げ器の設計と実験

数値計算での検討を基に、実際に合成石英基板を曲げて実験を行ってみる。方式は、出来るだけモデルの曲げ方を忠実に反映させる為に、単純固定支持と同心円環荷重とした。

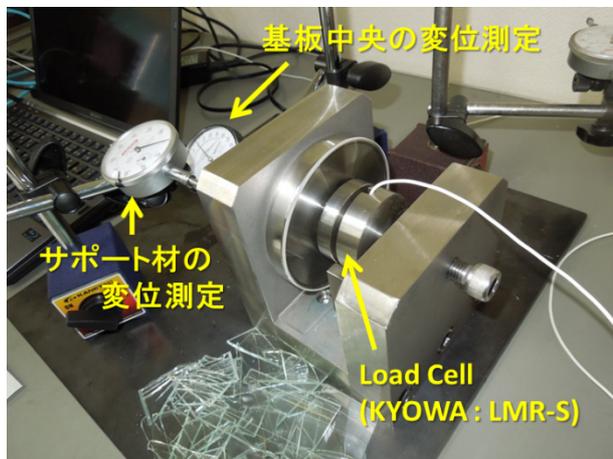


Figure 3: 簡易曲げ試験器を使った最大変位・応力測定。

まずテストスタンドでの簡易試験用に、図3の様な曲げ器を作成した。 $\phi 100\text{mm}$  /  $t=2.3\text{mm}$  の合成石英基板を  $\phi 30\text{mm}$  の位置に荷重をかけて曲げ込む。これは  $\phi 30\text{mm}$  の円環で囲まれた範囲内が放物面状に変形し、近似された内接円の半径を曲率半径として持つ凹面鏡として実効的に働く事を意味している。注意すべき点は、基板の曲率半径を小さくする事が目的である為に、例えばもっと広い大きさの基板を用意すれば、最大変位量(基板中央の凹み量)は容易に稼げるが、それは全体的に撓んだだけの結果であ

り、曲率半径は大きいままであるため、凹面鏡としては今は興味の対象とはならない。



Figure 4: 作成した鏡曲げ器。

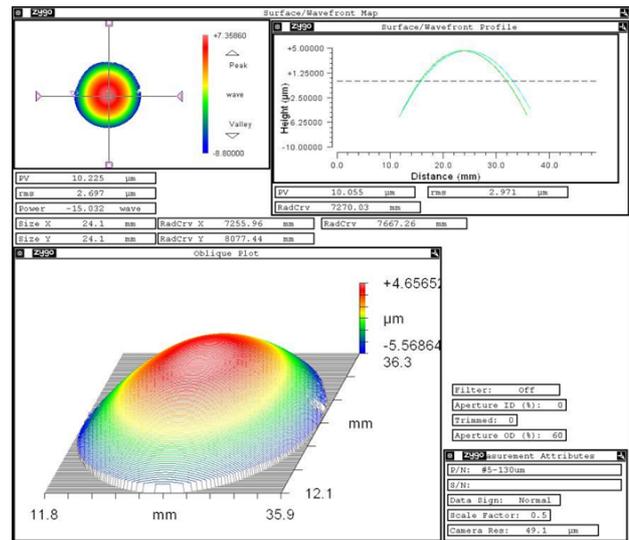


Figure 6: レーザー干渉計での測定結果例 1.

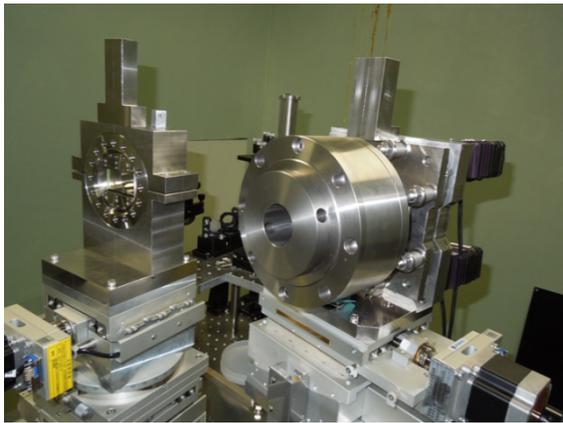


Figure 5: 曲げ器を4枚鏡光共振器に組み込んだ状態。

作成した鏡曲げ器は、想定している光共振器に実際にマウントされ、これまで備わっていた鏡の角度養成機構がそのまま使用出来る事を確認した。これにより、自作した凹面鏡を組み込んだ光共振器での蓄積実験が可能である事が確認出来た。

#### 4. 測定結果

作成した曲げ器を用いて、実際に凹面鏡を作成した。この結果を、レーザー干渉計を使って評価した。曲げ器の構成上、テストスタンドで曲げた状態のまま、光共振器に取り付け可能な造りになっている為、レーザー干渉計へのマウントも問題無く行われた。この測定後、所望の曲率半径が達成される迄何度か微調整を行い、最終的に光共振器側に組み込む、と言う流れを想定している。

今回は異なる2種類のレーザー干渉計を用いて、作成した凹面鏡の曲率半径の測定を行った。以下に典型的な測定結果の例をそれぞれ載せる。

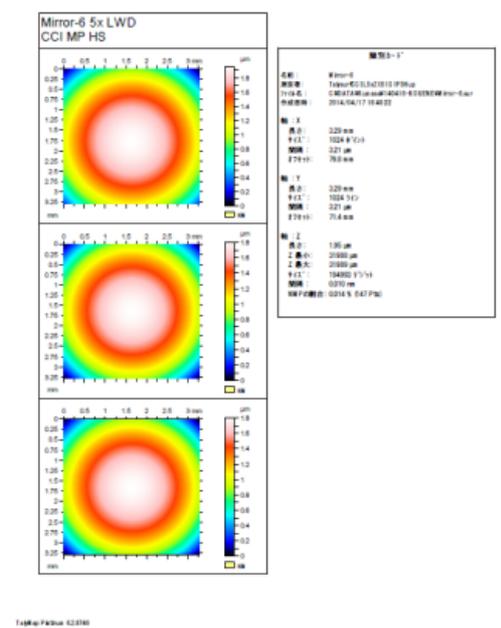


Figure 7: レーザー干渉計での測定例 2.

実際に曲げた鏡基板は、 $\phi 100\text{mm} / t=2.3\text{mm}$  の合成石英基板素板(誘電体多層膜の反射膜無し)の基板)と、 $\phi 100\text{mm} / t=2.37\text{mm}$  の高反射率鏡の2種類である。有限要素法を用いて、それぞれの厚さの数値計算モデルを作り、荷重に対する曲率半径の遷移を予め計算した。干渉計での測定から得られる結果をこの予想曲線と比較した plot を下に載せる。

図8が合成石英素板を用いた場合の結果、図9が高反射鏡を使った場合の結果になっている。両方の場合において共通するのが、荷重のかかり始め(横軸の左端の領域にある場合)の測定に関しては、曲げ器の機械的な遊びの部分(充分に締め切っていない事)と、曲率半径そのものが非常に大きい(平面との区別が付き難い)事から来る誤差が非常に大きくなる。図8中の最初の3点程が曲線から外れて見えるのは、この影響が大きいと考えられる。実際の測定

では、素板での練習をまず行い、曲率半径 2m の凹面鏡が実際に作成・測定出来た事を確認して、本番で使う予定の高反射鏡に対象を変えて再び曲げを行うと言う順番に進めた。図 9 が示す様に、高反射鏡を用いた場合においても、曲率半径~1.5m の凹面鏡が作成・測定出来ている事が見て取れる。更に数値計算での予想曲線にも非常に良く一致している点も明らかである事から、作成した曲げ器による凹面鏡作成が成功している事が結論出来る。

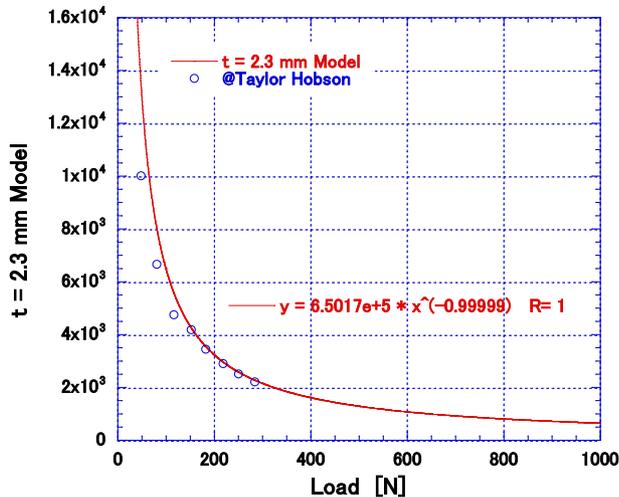


Figure 8: レーザー干渉計での測定結果 1.

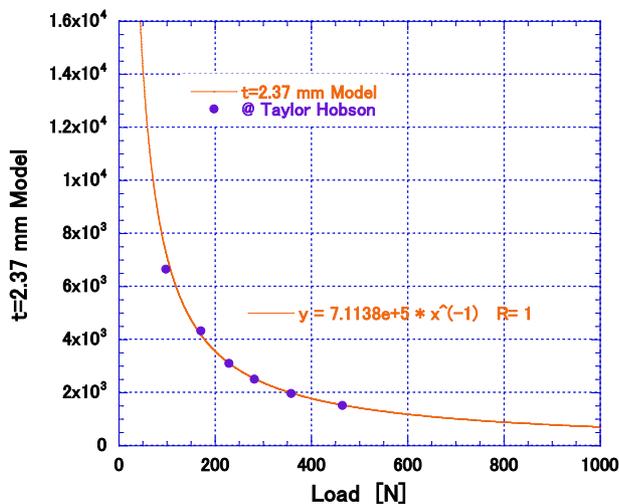


Figure 9: レーザー干渉計での測定結果 2.

## 5. 検討事項

用意した曲げ器 2 台を用いて、それぞれ曲率半径 1.5m の鏡と 3.0m の鏡を作成してレーザー実験室に移動させた。この際、1.5m の鏡の方が、途中で割れてしまい、実際に光共振器にマウントするには至らなかった。これは、図 9 の様な、かけた荷重に対して現在の曲率半径が幾らであるかを、その都度測定しなければならなかった開発段階では、避けるのが難しい破壊だと考えられる。通常の金属の引っ張り試験などを思い描くと、マウントされた資料には、

連続的に増加する引っ張り力がかけられ、その力の大きさが常時記録されている。そして破壊が生じた際の力の大きさが「引っ張り強さ」として記録される。この状況に対し、今回行った様な曲げ試験では、荷重の増加と次の荷重の増加の前に、測定作業が入る為に、動摩擦係数より大きな静止摩擦係数への抵抗と、それに伴う意図しない機械的な内部応力の蓄積が生じていた事が考えられる。この内部応力(破壊が生じるまで考慮していなかった潜在的なものも含めて)と静止摩擦係数への対応を考慮した曲げ実験を改めて行い、合成石英基板素板を資料とした実験で、曲率半径 1.5m の形状の作成及び 2 日以上保持にも成功している。

曲率半径の遠隔操作に関しては、機械的な曲げ器とピエゾ素子を組み合わせた実験を行った。石英基板をある程度機械的に曲げた状態から、ピエゾを伸縮させる事で、曲率半径の微調整が出来る事を確認した。このピエゾ素子はこれまで共振器鏡の位置の微調に使用していた物と同質であり、加速器環境の高真空中での使用に関しては問題無い。

## 参考文献

- [1] R. Arpit et al. "Design studies on compact four mirror laser resonator with mode-locked pulsed laser for 5 μm laser wire" NIM A 700 (2013) 145.
- [2] K. Sakae et al. "Development of a laser pulse storage technique in an optical super-cavity for a compact X-ray source based on laser-Compton scattering" NIM A 637 (2011) S107.
- [3] T. Akagi et al. "Development of a three dimensional four mirror optical cavity for laser-Compton scattering" NIM A 724 (2013) 63.
- [4] H. Carstens et al. "Megawatt-scale average-power ultrashort pulse in an enhancement cavity" to be published in Optics Letters.
- [5] 伊藤 昇 "主鏡面のアクティブ制御" 精密工学会誌 vol.67 (2001) 1572.
- [6] B. Canuel et al. "Wavefront aberration compensation with a thermally deformable mirror" Class. Quantum Grav. 29 (2012) 085012.
- [7] 機械設計便覧 丸善.
- [8] H. Shimizu et al. "Development of a 4-mirror optical cavity for an inverse Compton scattering experiment in the STF" NIM A 745 (2014) 63.
- [9] 東ソー "合成石英ガラスの機械・熱・電気的性質" [http://www.tosoh.co.jp/division/products/detail\\_000072\\_03.html](http://www.tosoh.co.jp/division/products/detail_000072_03.html)