

有限要素 ANSYS を用いた放射光ミラー解析

○内田 佳伯

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

概要

放射光ビームライン光学素子の一つであるミラーは、高熱負荷下にさらされることとなるため冷却が不十分だと熱歪が大きくなりビームラインの性能を充分発揮できなくなる。従ってシミュレーションを行い温度上昇、熱歪等が小さくなるようなミラーの冷却方式を検討することが重要となる。ミラー冷却によく用いられる側面冷却の場合、ミラーと冷却板との間に熱接触をよくするため通常 In シートを挟み込むが、接触面の熱伝導率の決定が困難等の理由により、従来は理想的なモデルで解析を行ってきた。しかし今回接触面の熱伝導率を決めることができたため、値を考慮した解析を行うこととした。ポスターではそれらの解析結果等を発表する

1 解析に使用したミラー

1.1 解析したモデルの形状

図 1 に今回解析を行ったモデルを示す。最適な冷却方式の検討のため、現在放射光実験施設ビームライン BL2A でシャックハルトマン法を用いて評価^[1]されているミラーである。長さ 50mm、幅 30mm、厚み 30mm のシリコン製のミラーの両側面を、外形 6mm、内径 4mm の冷却水を流すために銅パイプが溶接された長さ 50mm、幅 30mm、厚み 8mm のグリッド製の板で挟み込みミラーを間接的に冷却し、ミラー中心に放射光が当たる構造となっている。グリッドコップとはアルミナ分散強化銅のことで銅の優れた熱伝導性などの特性を失うことなく、高温領域で高強度を持ち合わせるため放射光実験施設(PF)のマスク等に用いられている素材である。図 2 に実物の写真を示す。ミラーは図 2 のように幅 30mm と幅 10mm のミラーが 2 連になっており真空を破ることなく切り替えられる構造となっており、放射光を当てた場合の形状の異なるミラー表面温度上昇・形状が測定できるが、今回は幅が 30mm のミラーで解析を行うこととした。

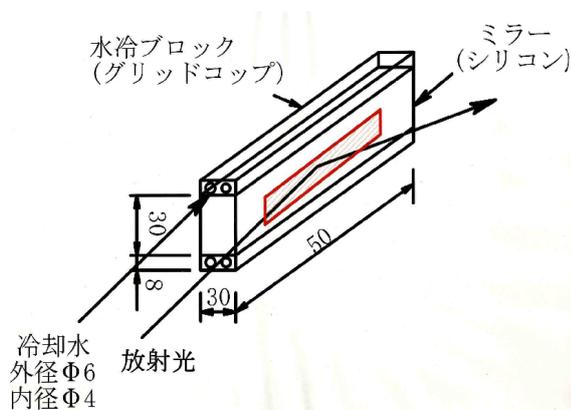


図 1. 解析したミラーの形状

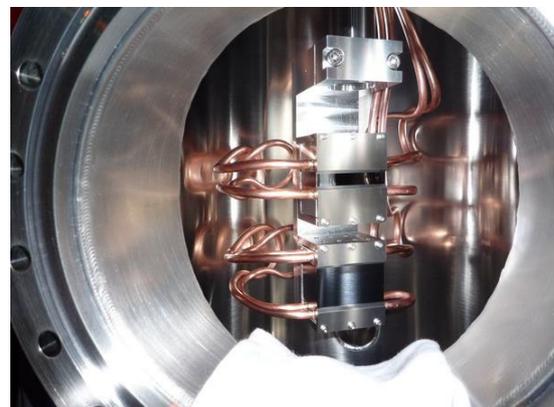


図 2. ビームラインに組み込んだミラー

1.2 入力パラメーター

ANSYS による熱解析を行う際にパラメーターとして熱伝導率(W/mm°C)、水路の熱伝達率(W/m m°C)、ミラーと冷却板の接触面の熱伝達率(W/mm²°C)、ミラーへの入熱(W/mm²)が必要である。シリコンとグリッドコップの熱伝導率は既知なのでその値を入力した。入熱に関しては放射光源専用ソフト SPECTRA を用いて計算をおこった。ミラーは光源から約 27.5m の地点にあり、放射光の取り込み角は縦約 1.1mrad、横 1.3mrad である。ミラー評価の際に熱負荷が一番大きい場合(Gap27mm K=2.24)で Total power は 59.2W となり Power density は約 0.97W/mm² となった。内径 4mm、流量 0.5ℓ/min の場合レイノルズ数は 2600>2300 となり乱流となるため、以下の計算式でヌセルト数を求めた後に熱伝達率を求めた。

$$Nu=0.0023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4}$$

Nu:ヌセルト数、Re:レイノルズ数、Pr:プラントル数

$$\alpha = Nu \times k / \ell$$

α :熱伝達率(W/mm²°C)、k:流体の熱伝導率(W/mm°C)、 ℓ :代表長さ(mm)

また値を決定することが困難であったシリコンとグリッドコップの接触面の熱伝達率の計算式(橋の式)は以下を用いることとした^[2]。

$$K = \frac{1.7 \times 10^5}{\frac{\delta_1 + \delta_0}{\lambda_1} + \frac{\delta_2 + \delta_0}{\lambda_2}} \times \frac{0.6P}{H} + \frac{10^6 \lambda_f}{\delta_1 + \delta_2}$$

K:熱接触コンダクタンス(W/m²°C)、 δ :面粗さ(μ m)、 δ_0 :接触相当長さ(=23 μ m)

λ :固体熱伝導率(W/m°C)、 λ_f :流体熱伝導率(W/m°C)、P:接触圧力(Mpa)

H:柔らかい方の強度(グリッドコップ)

次にシリコンの側面に銅を接触した状態で接触圧力を変化させ、熱接触抵抗値を実測した文献^[3]より値をグラフから読み取り、計算式より求めた値と比較したグラフを図 3 に示す。文献の実測では銅を使用し解析ではグリッドを使用しているが、熱伝導率等はほぼ同じ値であるため比較に用いた。図 3 から判るようにほぼ実測値と一致しているため、計算式より求めた値を解析に使用することとした。ただし銅とシリコンとの間に In を挟み込んだ場合に、上記式の流体熱伝導率に In の熱伝導率を入れると実測値より大きくずれてしまう。これはシリコンと銅の隙間に In が固体のため、接触圧力を上げたとしても気体のように満遍なく行き渡らず隙間を生じているのが原因と考えられる。熱接触をよくするために固体ではなく液体(例えば In-Ga)を入れる場合があるが、ミラー側面に多く塗りすぎると接触圧力を上げていった際にミラー表面に出てしまうとか、

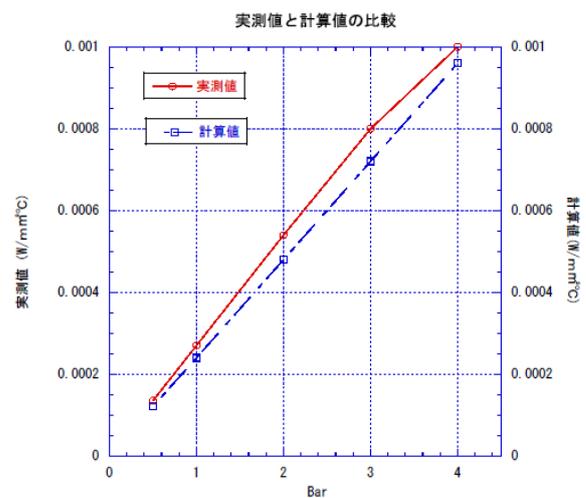


図 3. 実測値と計算値の比較

塗る液体によっては腐食を起こすという問題がある。また液体でなく気体を想定しても、ミラーは光源リングと直結している超高真空部分であるため気体で満たすこともできない。従って実際に挟み込む金属として固体である In 想定し、値は実測値を用いることにした

2 解析結果

図 4 に接触圧力 4Bar で In を挟み込んでいない場合、図 5 に In を挟み込んでいる場合、図 6 にグリッドコップとシリコンの接触面が理想的な場合の ANSYS の解析結果を示す。In がある、なしのモデルではグリッドコップとシリコンのモデルを別々に作り、接触面に上記式より決定した熱伝達率を入力している。一方理想的なモデルではグリッドコップとシリコンを一体で作成しそれぞれ熱伝導率を入力しているだけで接触面の熱伝達率は入力していない。また図 7 に接触圧力を変化させ In を挟み込んでいる場合と挟み込んでいない場合の表面の温度上昇のグラフを示す。

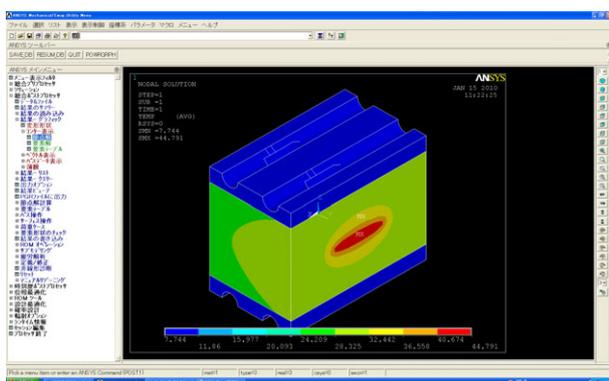


図 4. In なし

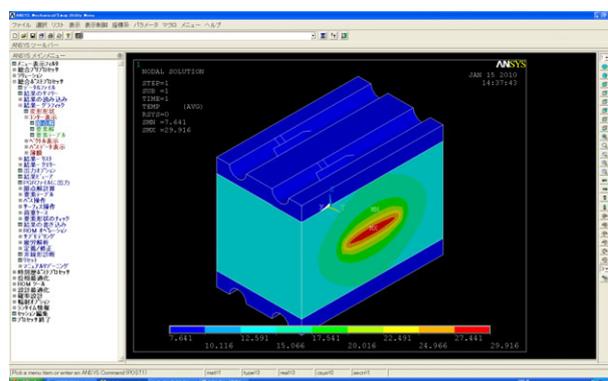


図 5. In あり

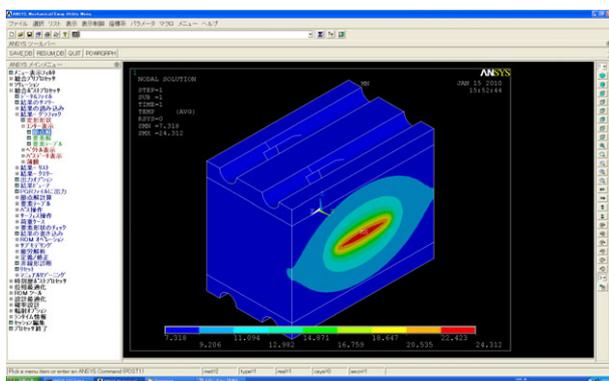


図 6. 理想的なモデル

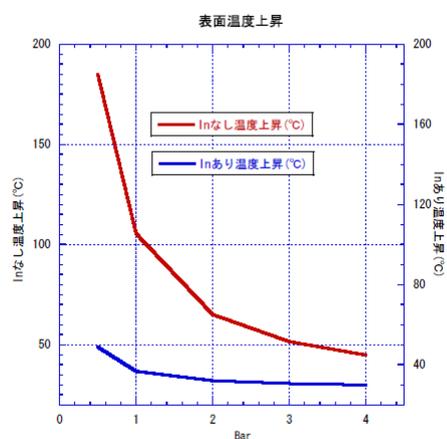


図 7. In 有無による温度上昇の違い

3 結論

図 7 から判るように In が無い場合は、接触圧力をあげればミラー表面の温度上昇は小さくなっていく。これは接触圧力とともに接触面の熱伝達率が大きくなるためである。これに対して In がある場合は、ある接触圧力から温度上昇はあまり変化しなくなる。これはある接触圧力で接触面の熱伝達率の変化が小さくなっていることによるためである。温度上昇の解析結果をまとめると

- (1) グリッドコップとシリコンの接触面に In を入れるとミラー表面の温度上昇は格段に抑えられる

- (2) In を挟み込む場合、ある接触圧力で温度上昇の変化が小さくなるため、ミラー表面に歪を生じない程度の圧力で接触させることが必要である

4 今後の展開

今回接触面の熱伝達率を考慮したミラー表面の温度上昇の解析を行うことができた。今後温度上昇、接触圧力を考慮したミラー表面の熱歪の解析を行い、実測値と比較・検討していきたいと考えている

参考文献

- [1] 平 18 技術研究会、2008 PF シンポジウム、SRI2009.
- [2] <http://www.a1s.co.jp/thermal/contact.pdf>
- [3] Barry Fell and Khalid Fayz Thermal Contact Resistance Measurements for Indirectly Cooled SR Optics