

きょう体のたわみ量について その2 — FEM による構造解析の結果

池田 優二

2000年5月23日

1 はじめに

3/31 のレポートでは、実験器きょう体のたわみ量を材料力学の知識を用いて解析的行なった。結果、たわみ量は十分小さく観測データにシステムチックなエラーを及ぼす範囲以下であることが得られた。しかしながら、解析的手法による計算は、「きょう体の蓋や内部張りなどの細かい構造を無視したモデルの簡素化が行なわれていたり」、「張合わせ板同士の境界面での境界条件に固定端条件が与えられていたり」、と一部現実とは異なった条件で解かれているため、得られた結果に信憑性に欠ける面があることも否定できない。

たわみ量としてより現実に近い結果を予想する手段として、有限要素法 (FEM) を用いる手法がある。今回、前回のレポートの結果によって改訂を行なった実験器きょう体について FEM による歪み/応力解析を行なった。以下、報告である。

2 モデル化

2.1 仮定 – 螺部の取り扱いについて

きょう体のモデル化を行なう上において、一つ重大な仮定を行なってある。それは、

- 螺によって板 (フランジ) 同士が張り合わせてある面はお互い連続体であるとする。

というものである。有限要素法においては、きょう体全体のたわみを計算するのに、螺部のような非常に細かな部分までを一つのモデル内に拾ってしまうのはあまり得策ではない。全体のメッシュが必要以上に細くなるし、また得られた結果の信用性も薄いからである。しかしながら、この仮定が誤っていればそもそも意味がない。以下、仮定の妥当性について述べる。

2.1.1 自由度の拘束

あるトルク ($=T$) で螺を締めつけた場合の、締めつけ力 ($=F_f$) 関係式は以下の式で与えられる。

$$T = F_f \left(\frac{d_2}{2} \left(\frac{\mu}{\cos \alpha} + \tan \alpha \right) + \mu_n \frac{d_n}{2} \right) / 1000 \quad (\text{Nm}) \quad (1)$$

十分なトルクで螺を締めつけて場合、JIS 規格の M6 螺の最小締めつけ軸力は 3330 N である。例えば 10 本の螺を使用すれば、締めつけ力は $33300 \text{ N} = 3398 \text{ kg 重}$ 、また面に平

行な摩擦力も最大静止摩擦係数を μ とすると、 $3398 \times \mu$ となり、(たいていの場合 $\mu > 0.1$ なので)200 kg 程度のきょう体であればどの密着している一方の面に対する他方の面の xyz 方向の自由度はない(つまり拘束されている)と考えられる。また、このように螺によって 3 点以上の点か固定されている以上、面の回転に対する自由度もあり得ない。

2.1.2 応力の分布とたわみ

面同士の自由度がまったく拘束されているとすると、問題になりうるのは連続体の場合と異なって螺部のみに応力が集中してしまうことによって応力分布が異なり、したがってひずみ量も異なってしまうことである(図 1)。しかし、「応力の集中部から離れるにしたがって応力場の乱れが減衰し、板幅(ここでは、螺部間の距離に相当)の 2-3 倍以上も離れると応力場は一様になる」というサン・ブナンの原理を用いると、我々の装置の場合は螺間隔が 130 mm 以下であれば応力分布とその先端のひずみ量は十分連続体と同じとみなせることが分かる。図には有限要素法によって我々のきょう体の場合により近いケースでサン・ブナンの原理を確かめたものである。螺間隔の 1 倍の距離においてさえ、応力と歪みの連続体の場合からのずれが、0.43 % 0.19 % となっており、面のつなぎ目を連続体と見なしても構わないことを述べている。

2.2 モデル

解析に使用したモデルを図 2 に示す。大きさは実際のものと同じにし、きょう体の蓋、デューワーについても形状を再現した。また、内部構造については、はりの役割となる較正系のレンズホルダー(3ヶ)と偏光器系のシャッターホルダーおよびフィルターステージを含めた。きょう体の素材はジェラルミンである。

解析ソフトには NASTRAN を使い、有限要素法におけるモデルには 3 次元ソリッドモデルを用いた。要素形状は四面体である。要素数は 22288、接点数は 44386 である(図 3)。

また、望遠鏡と接する面に対しては螺に相当する 6 点において全ての自由度が拘束されているとし、きょう体への外力は自重(重力)以外のものはないとした。

3 結果と考察

図 4 に望遠鏡の姿勢が「天頂」のときのきょう体のたわみ/応力図¹を示してある。較正系や偏光器系ではおおきなたわみはないが、非対称系をなす分光器系およびスリットビューア光路管においておおきなたわみが生じているのが分かる。しかしながら、最もたわみの大きい分光器系の先端でもその量は $5.0 \mu\text{m}$ であり、光学系のパフォーマンスに与える影響は小さい。

きょう体が最大のたわみ量を示すのは、望遠鏡の天頂距離が 90 度するとき、つまり装置が横倒しになった場合であると考えられる。きょう体はカセグレン焦点の光軸に対して非対称であるため、方位によってたわみ量は異なる。そこで、望遠鏡が 8 方位(北、北西、西、南西、南、南東、東、北東)を向いた場合の、きょう体に生じる重力ベクトルを考え、それぞれについてたわみ/応力解析を行なった。

¹本
レ
ポ
ー
ト
で「応力」と呼んでいるものは全てミーゼス応力 ($\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2)}$) である。

3.1 偏光子系と較正系の繫目のたわみの影響

図5には例として南側に横倒しにした場合を示してある。最大たわみ量は $35.0\ \mu\text{m}$ である。図から読み取れるように、たわみ量に対して最も効いている部分は、較正系と偏光子系の繫目部分の変形である。角度にすると約6秒のたわみが生じている。他の方位を向いた場合のたわみ量はもう数十%程小さいが、おおよそ同程度の値が得られている。

今、注目している繫目の部分のみが変形を生じたときの光学系に与える影響を考えてみる。変形を生じている部分は、丁度スリットと第一レンズの中間地点である。現在の設計においては、スリットは較正系の底面(偏光子側)に貼ついており、第一レンズは偏光子系の上面から支持されている。したがって、変形による光軸のずれ($=\delta\theta$)は第一レンズ以降に生じることになる。本来は視野中心、つまり第一レンズに垂直に入射した光線が第二レンズに斜入射することになり、分光器スリット上に結ぶ像も第二レンズの焦点距離($=65\ \text{mm}$)にスケールされた分($=\delta\theta \times 65\ \text{mm} \sim 0.15\ \mu\text{m}$)だけずれる。コリメータとカメラレンズの縮小率は1対1なので、ずれの量はそのまま検出器上での像のずれと等しい。

3.2 分光器系の回転によるたわみの影響

分光器はカセグレン焦点の光軸に対して軸対称系なので、姿勢によって異なるトルクが生じ、たわみとなって現れる(図6)。分光器系がカセグレン焦点軸に対して剛性を保ったまま回転したとすると²、光学系への影響はコリメータ通過後の45度ミラーの傾きのずれとなって現れる。トルクによる回転量($=\delta\phi$)は、数秒程度と偏光子系の変形によるたわみに比べて小さい。カメラレンズの焦点距離($=300\ \text{mm}$)によるスケールを考慮しても、検出器上での像の移動量($=\delta\phi \times 300\ \text{mm}$)は偏光子系の変形の場合に比較して1/10から1/100程度である。

図7に、天頂を含めた8方位を望遠鏡が向いた場合に、以上二つの変形の効果によって検出器上でどの方向にどれだけ像の移動が生じるかを示してある。8方位の天頂距離は90度であるため、図はワーストケースを示していると考えられる。像の移動が最も大きい西(東)から東(西)に望遠鏡を反転させた場合においても像の移動は十分1 pix以下であることがわかる。

4 まとめ

有限要素法(FEM)を用いて、実験用きょう体のたわみ量計算を行なった。その結果、

- きょう体のたわみ量にもっと効くのは、偏光子系の較正系の繫目の部分の変形と分光器系のトルクによる変形であること、
- 全体的なたわみ量は、蓋などの細かい形状を与えたことにより、解析的な結果(3/31レポート)よりファクターにして2倍から3倍大きな値が得られたこと、
- しかしながら、そのたわみが光学系に与える影響(検出器上での像の移動は)ワーストケースで1 pix以下に治まるので、全く問題ない範囲であること、

²この仮定は妥当であることは、FEM解析の結果確かめられている

が分かった。今回の結果は、光学系の安定性および想定パフォーマンスの達成に最も影響を与えるのは、望遠鏡の姿勢差によるきょう体のたわみでなく、光学部品の保持機構であろうことを言っているとも言える。今後は、そうした保持機構の安定性についても考察をすすめる予定である。

きょう体については、早急に図面をまとめて工作にかかりたい。

以上。