

大気蛍光望遠鏡の構造形状に関する解析的検討

三井造船株式会社 正会員 ○岩崎 博

三井造船株式会社 山口為久

1. 序論

光学望遠鏡に始まった天文学は、電波、赤外線、X線、ニュートリノとその観測手段を変えて止むことなく発展し、一方では素粒子物理学の成果を踏まえ宇宙物理学が誕生した。今日も謎とされる極高エネルギー宇宙線の存在があり、その発生起源と宇宙空間での伝播機構を解明中である。宇宙線の作る空気シャワーの新しい測定方法として大気蛍光望遠鏡がある。

本論ではこの大気蛍光望遠鏡の設計に関する手法を紹介する。この大気蛍光望遠鏡は風速 15m/秒時にも計測が可能でなくてはならない。

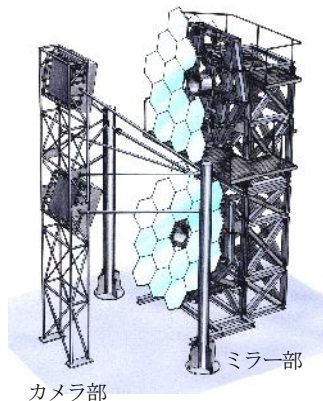


図1：大気蛍光望遠鏡の概観

2. 風荷重の生成

設計に際して最も問題になるのが風荷重の設定であった。望遠鏡の設置場所が米国ユタ州であり、その地域での風況情報が入手しにくいことから Karmann スペクトルによる風を生成し設計荷重として採用する方針をとった。風速変動はさまざまな周波数からなることから、それぞれの周波数の2乗を周波数の関数で表現するのがパワースペクトル密度であり(1)式で示される。

$$\frac{nSu(n)}{\sigma_u^2} = k \frac{\tilde{n}}{(1 + \tilde{n}^\beta)^{\frac{5}{3\beta}}} \quad (1)$$

$$\text{ここで } \tilde{n} = \frac{nL(z)}{\bar{U}(z)} \quad (\text{換算周波数}) \quad k = \frac{\beta \Gamma\left(\frac{5}{3\beta}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right) \beta \left(\frac{2}{3\beta}\right)} \quad (2)$$

$Su(n)$: スペクトル密度、 $\bar{U}$: 平均風速

$L(z) = 8.4 \ln Lx(z)$ $uLx(z)$: 乱れのスケール(強さ)

$$\sigma_u^2 = \frac{1}{T} \int_0^{T+T} \{U(t) - \bar{U}\}^2 dt \quad (3)$$

T : 風の周期、 Γ : ガンマ関数、 β は分布の形状を決める

媒介変数であるが $\beta = 2$ (Karmann 型)を用いることにする。

なお、 $L(z)$ は長さの定数である。

(1)式から乱れ強さと周期Tを変えて風荷重を生成した例を図2に示す。

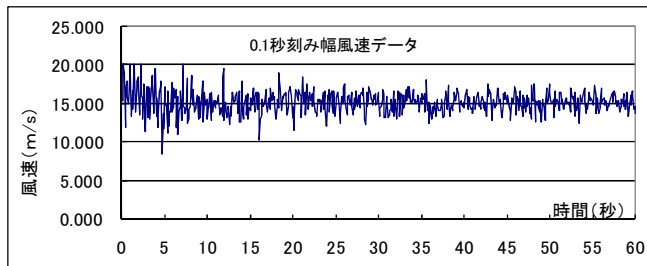


図2：生成された風荷重(平均風速 15m/秒時の場合)

風の周期と風の乱れ強さによって風の特性が大きく変動することから本計算では、平均風速は設計条件である 15m/秒、風の周期は 1 秒、10 秒、60 秒 100 秒の 4 種類を採用した。なお、風の乱れ強さは過去の実測結果等(文献3)から平均的に 0.2 とした。近年の報告では風速 15m/秒で乱れ強さが 0.4 程度発生している場合も観測されているが、頻度から 0.2 とした。なお、所与のスペクトルから直接時間軸上でのランダム波の生成は次のように行った。

$$x(t) = 2 \sum_{k=1}^N \sqrt{S(\omega_k) \Delta \omega_k} \cos(\omega_k t + \theta_k) \quad (4)$$

$S(\omega)$: スペクトル、 ω : 角周波数 θ_k : 位相

$\Delta \omega$: ω の有限積分区間の離散角周波数

ランダム波は最低周期Tで同じ波を繰り返すので乱数を用いて位相を決定している。

構造モデルは梁要素と板要素で構成し、風の方向は 4 種類を考慮した。

(1)真正面からの風向 (2)真正面、仰角 20 度の風向

(3)真横からの風向 (4)斜め 45 度からの風向

風の定義は(5)式で定義している。

$$F = \frac{1}{2} \rho U^2 CA \quad (5)$$

ここで、 F : 風力、 ρ : 風の密度、 U : 設計風速、

C : 抗力係数、 A : 風を受ける面の投影面積

厳密には抗力係数はレイノルズ数に応じて変動するが本計算では一定の値とみなし、三次元空間に置かれた薄い平板の係数を用いた。

キーワード：カルマンスペクトル、動的応答解析

連絡先住所：東京都中央区日本橋1丁目3番16号

電話 03-5202-3901 Fax03-5202-3939)

3. 望遠鏡の性能要件

風が 15m/秒時でも、ミラーの変位によるカメラ面上の像のズレと、カメラの揺れによる変位の相対差が 5mm 以内となるように設計しなければならない。

ただし、突風や風の変動が激しいときは計測を中止することも考えられる。

なお、図 3 に FEM 構造モデルを示す。

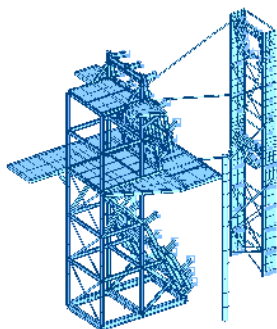


図 3：FEMモデル

4. 動的応答解析の結果

風による動的な応答計算はモーダル法過渡応答解析を用い風の高次項をも考慮した。その計算結果を図 4～6 に示す。

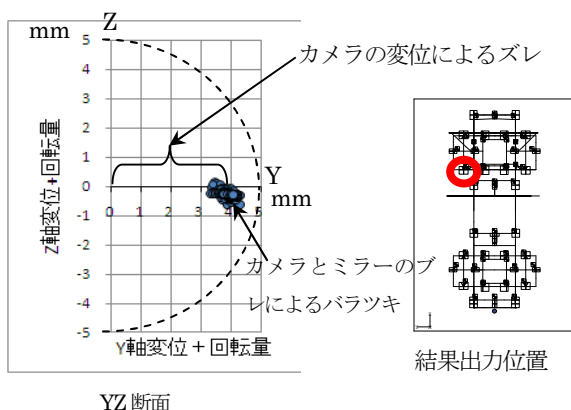


図 4: 風向 真正面 最大風速 15m/秒時 風周期 1 秒

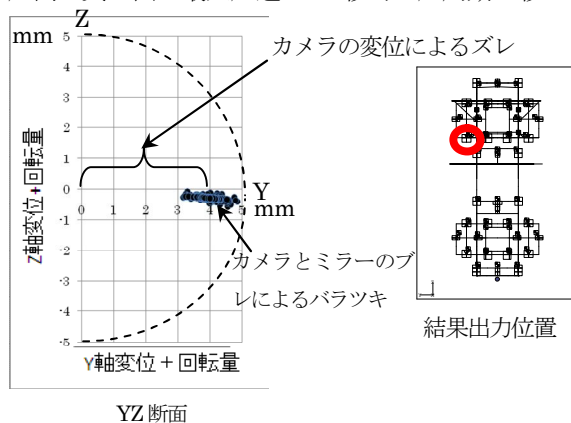


図 5: 風向 真正面 最大風速 15m/秒時 風周期 60 秒

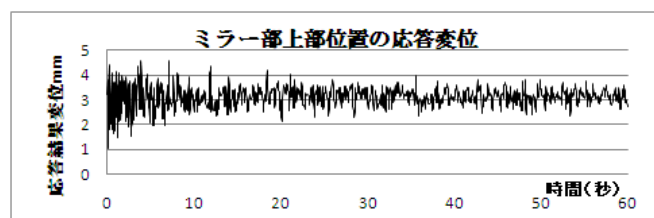


図 6：風向 正面 最大風速 15m/秒時 時刻歴変位結果
(並進変位成分の変動量)

5. 風洞実験

風荷重をスペクトルから算出し設計波として採用したが

実機における形状影響による風況を把握するため風洞実験を実施した。 風洞実験の様相を図 7 に示す。

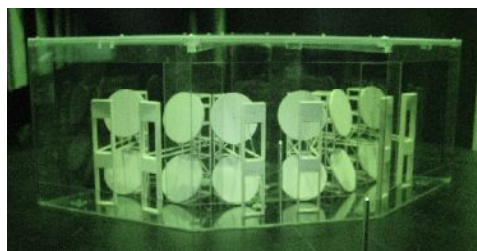


図 7：模型による風洞実験

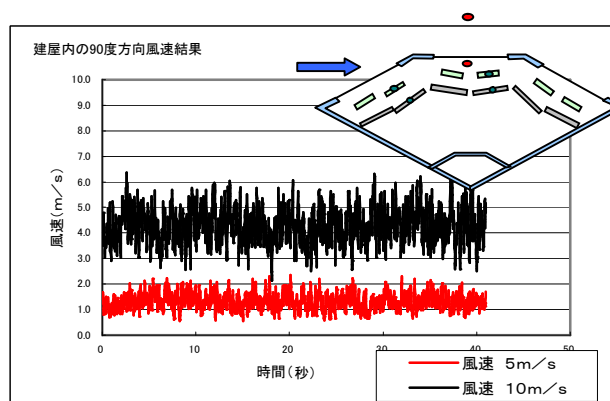


図 8：風洞実験結果 風向 真横

風洞実験は風速 5m/秒、10m/秒で実施し、その結果、図 8 から明らかなように真横からの風は上流風速の 60%程度まで減速しており実質 15m/秒以上の風速下でも計測が可能である事を示している。他の風向では真横の場合に比べ風の吹き抜ける領域が少ないため減速効果がより大きい結果となっている。

6. まとめ

風速 15m/秒時でも計測可能であることを確認し、最大振れ量が相対変位として 5mm 以内に収まった。傾向としては、真正面からの風向や斜め 45 度方向の風向による風荷重は横方向の風荷重に比べ小さいことが風洞実験で判明した。今回の計算では、Karmann スペクトルに従って風の波形を生成したが、今後はスペクトルの違いによる影響も検討してみたい。

謝辞

本設計では東京大学宇宙線研究所福島正己教授を始め同研究所及び東京工業大学理工学研究科のTA望遠鏡設計グループの方々にご協力いただいた。ここに厚く謝意を表します。

7. 参考文献

- (1) 日野幹雄 スペクトル解析 朝倉書店
- (2) 大熊武司他 建築物の耐風設計 鹿島出版会
- (3) 友清衣利子他 NeWMeK に基づく風エネルギー開発のための風向風速変動特性について日本風工学会論文誌 No99