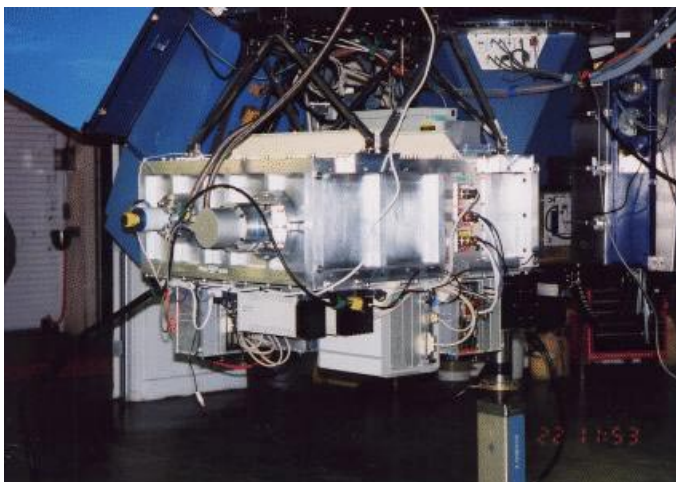


TRISPEC NEW ATTACHMENT FOR UKIRT

栗田光樹夫

平成 12 年 12 月 14 日



Abstract

観測装置 TRISPEC をイギリスの 4m 望遠鏡 UKIRT に取り付けるための吊り金具をトラス構造を用いて製作した。ここではトラス構造の構造解析を行い、その評価を行った。TRISPEC は外形 $920 \times 1080\text{mm}$ 高さ 400mm 重量 450kg で吊り金具には、取り付け後で位置と角度の調整ができることと、冷凍機の振動でも筐体がゆれないことが求められた。そして解析の結果、この吊り金具は仕様を十分満たした。

図 1: 前全体図

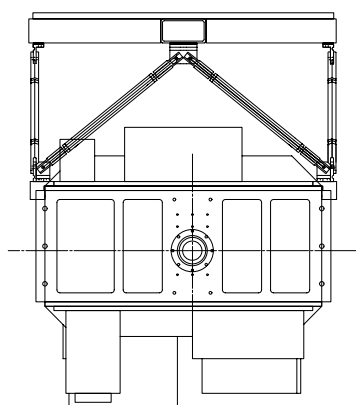
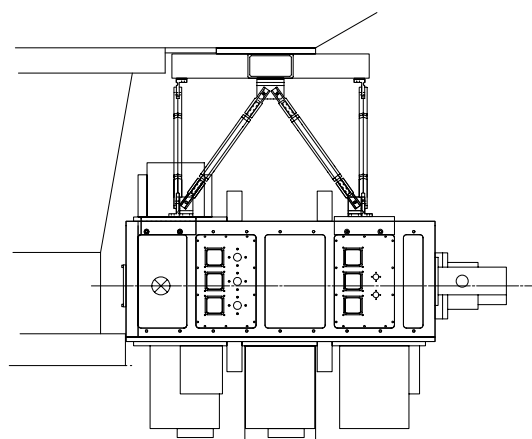


図 2: 横全体図



1 製作にあたって

TRISPEC は本来、前面の部分で固定されるよう設計されている。しかし今回は TRISPEC の上面を使用し UKIRT に固定しなければならなかった。固定といっても言ってみればぶら下げるような不安定さを感じさせる状態である。苦労話のようではいささか気が引けるが以下に製作にあたって私が「感じた難しさ」をあげる。

- 450kg という TRISPEC の重量。
- 位置及び角度 (自由度は 6 個) の調整が可能な上に「がた」がない。
- 冷凍機の振動で揺れない。
- TRISPEC は上面で固定されるような設計ではなく、さらに 8t の大気圧がかかっている上蓋面に吊り上げる際異常な力がかからないようにする。

2 工程

- UKIRT への取り付け作業日：2000 年 8 月 21 日～22 日
- 作業時間：4 時間
- 製作時間：約 40 日
- 製作者：部品 は石黒工機、他は名古屋大学

2.1 作業内容 ～ TRISPEC の瞳位置合わせ～

- UKIRT にガラエポプレート とアルミプレート を角パイプ (～) と共に取り付ける。
- その他の部品は全て TRISPEC に組み付ける。
- リフトで TRISPEC を UKIRT に近づける。リフトで全てのトラスの 4 点を固定する位置までもっていくのは困難だが、うち左右 2 点が固定できればリフトからはずして、トラスのみで移動可能。
- トラスを調節して 4 点を固定する。
- TRISPEC 前面で上下左右の位置合わせを行う。
- TRISPEC の瞳像 (図 3、4) を参考に傾きを調節する。前面は基本的には上下左右に動かさないこと。ターンバックルを締めて完了。

図 3,4 は実際の UKIRT に取り付けたときの TRISPEC の瞳像。主鏡カバーに描いてある文字が映っている。この調整に要した時間はおよそ 1 時間で調整を 10 回ほど繰り返した。

図 3: 瞳あわせ前

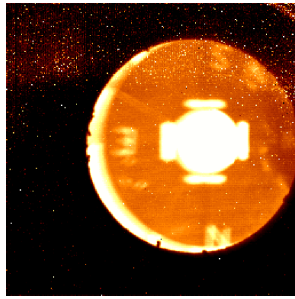
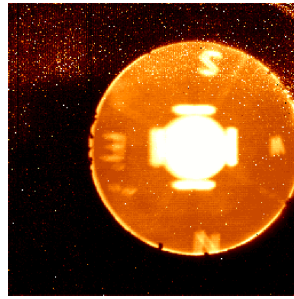


図 4: 瞳あわせ後



3 構造

- 角パイプ × 3

- 断面形状 150 × 80、t=6
- 断面 2 次モーメント $264 \times 10^4 mm^4$
- 重量 12kg、8kg、8kg
- 材質 ss400

- トラス

- 断面積 $585 mm^2$
- 重量 22kg(8 本)
- 材質ステンレス 304

- 滑節ピン

- 直径 6mm
- 材質 ss400
- 最大せん断応力 $\frac{1600(N)}{3^2\pi} \simeq 56(MPa)$ かかる荷重は真横を向いた時に最大になる。
JIS 規格では静荷重の場合せん断許容応力は 76MPa なのでそれ以下に抑える

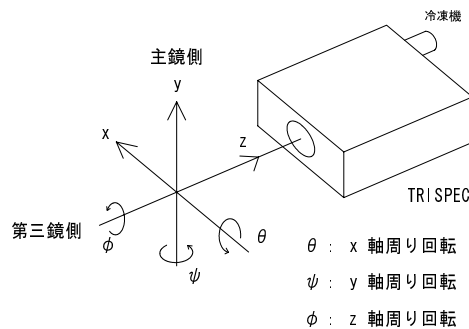
- L 金具

- 材質 ss400
- くびれている部分の断面積は $100 mm^2$ あるのでせん断に対しては十分。また引っ張りに対しても、安全係数 10 ととり、許容応力を 40MPa としても十分である。

4 仕様

4.1 座標軸の定義

座標軸の方向を、以下の様に指定する。ただし、原点は図中の座標軸の交点とは限らない。



4.2 許容範囲の定義

許容範囲は3種類。

- 1) 取り付け時の調整許容範囲
… 取り付け時の追い込み目標範囲。
- 2) 不連続のガタつき許容範囲
… 観測中の不連続なガタつきの許される範囲。
- 3) じわじわ、たわみ許容範囲
… 積分中に大きく動かなければ良い範囲。偏光分光の際などには1時間ポインティングし直さないで、1つのオブジェクトを観測する可能性がある、その間のたわみが許容範囲内になければいけない。

4.3 z 軸 (光軸方向)

- z 軸方向は、基本的に副鏡を動かすことで調整できるので、調整単位は $\pm 1mm$ 程度でよい。
- z 軸方向は、冷凍機の振動方向になるので、前面を固定する必要あり。(前回は、クランプを使用。)
- 可動域は、 $\pm 5mm$ も動けば十分。
- たわみによる focus のずれを可視チャンネルの CCD の $1/10\text{pixel}$ まで許容とすると、F33.0、1pixel が $65\mu m$ 相当なので $0.22mm$ 。

4.4 φ 軸 (光軸周りの回転)

- 天の南北方向と検出器の南北方向のずれが視野の両端で最大 $1/2\text{pixel}$ 分まで許容できるとすると、TRISPEC の detector は 512×512 なので

$$\frac{1}{2} \arctan\left(\frac{1}{512}\right) \simeq 3'.3$$

- 調整可能範囲は、 $\pm 1^\circ$ とする。
- たわみによる回転は全天で $\pm 1/5\text{pixel}$ まで許容とすると $\pm 1'$ 。

4.5 x 軸 (y 軸)

- x 軸、y 軸について取り付け時の誤差は、 $\pm 0.5\text{mm}$ 。
- x 軸については、スリットから星が逃げ無ければ良いと考えられる。
 1. UKIRT で、スリットに入れるのに望遠鏡で調整する単位は通常 $0''.05$ である。
 2. UKIRT では、スリット面において $1''.68/\text{mm}$ であるので $0''.05$ は $30\mu\text{m}$ 。
- 調整に必要な可動範囲は、 x, y の平行移動だけならば機械精度の誤差分で合っていればいいので $\pm 0.5\text{mm}$ あれば十分。ただし、回転調整したときに回転中心が焦点面から離れていると、 x, y の平行移動が必要になる。
- 全天では $\pm 0''.2$ 以下とするとすると、たわみ許容値は $\pm 0.1\text{mm}$ 。

4.6 θ 軸 (ψ 軸)

- θ 軸、 ψ 軸のずれは、すなわち視野と瞳のずれである。取り付け時に許容されるのは、どれだけずれた視野を見てもいいかで決まる。
- 調整単位は瞳径が可視で $\phi 7.9\text{mm}$ 、赤外で $\phi 6.8\text{mm}$ 、これを $\pm 0.1\text{mm}$ で合わせようとする、可視コリメータ+Window の焦点距離 = 288mm 、赤外コリメータ+Window の焦点距離 = 247mm なので

$$\text{可視} : \arctan\left(\frac{0.1}{288}\right) = 1'.2$$

$$\text{赤外} : \arctan\left(\frac{0.1}{247}\right) = 1'.4$$

以上より調整単位は $1'$ とする。

- 調整の時に重要なのは、焦点面（の法線）と望遠鏡光軸の角度のずれである。そのため、調整は出来るだけ焦点面の近くに回転中心が来るような機構にしなければいけない。何故なら、焦点面から遠い所を中心に回転すると、回転方向を調整した後、 x, y の平行方向の調整をし直す必要がある。

x, y, θ, ψ による変化は複合的に視野をずらす。最大 1 時間ポインティング位置の再調整をしなくても良いようにしたいので、焦点面上 (TRISPEC のスリット/マスク面上) でのずれを $\pm 30\mu\text{m}/\text{hour}$ 以下に抑えたい。今回の場合 3 軸の回転中心は TRISPEC のほぼ真中にあると近似でき、そこから焦点面上までの距離は 364mm なので、許容たわみ量は以下ようになる。

$$\delta x + 364\delta\psi \leq 0.03\text{mm}$$

$$\delta y + 364\delta\theta \leq 0.03\text{mm}$$

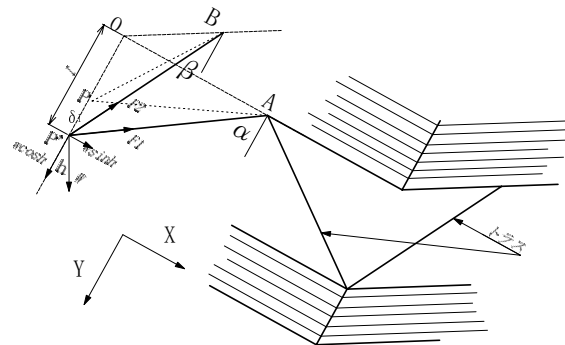
以上をまとめると

4.7 目標仕様値

	調整単位	調整可能範囲	全天での撓み
x	0.5mm 以下	$\pm 5mm$	$\delta x + 364\delta\psi \leq 0.03mm$
y	0.5mm 以下	$\pm 5mm$	$\delta y + 364\delta\theta \leq 0.03mm$
z	1mm 以下	$\pm 5mm$	$\pm 0.2mm$
ϕ	3' 以下	$\pm 1^\circ$	$\pm 1'$
θ	1' 以下	$\pm 1^\circ$	$\delta y + 364\delta\theta \leq 0.03mm$
ψ	1' 以下	$\pm 1^\circ$	$\delta x + 364\delta\psi \leq 0.03mm$

5 構造解析

TRISPEC の傾きが h° のとき



$l = 361(mm)$, $W = 450/4(kgW)$, $A = 585(mm^2)$, E はヤング率。傾きが TRISPEC の x 方向の場合トラスの開き角度は $AP'O = AP'O = 51^\circ(\alpha)$, $BPO = BP'O = 35.5^\circ(\beta)$, 傾きが z 方向の場合は逆になる。以後 OA 方向を x 方向、 OP 方向を y 方向と呼ぶ。

5.1 y 方向の力のみについて考える

荷重 W の y 方向成分は $W \cos h$ いま F_1, F_2 の y 方向の重量を支える成分をそれぞれ F_{1y}, F_{2y} とすると y 方向のつりあいより

$$F_{1y} \cos \alpha + F_{2y} \cos \beta = W \cos h \quad (1)$$

トラス 1,2 のそれぞれの長さは $l / \cos \alpha, l / \cos \beta$. y 方向に δ_y 移動したときトラス 1,2 の伸び量は $\delta_y \cos \alpha, \delta_y \cos \beta$

このときそれぞれの力は

$$F_{1y} = \frac{\delta_y \cos \alpha}{l / \cos \alpha} AE = \frac{\delta_y \cos^2 \alpha}{l} AE \quad (2)$$

$$F_{2y} = \frac{\delta_y \cos \beta}{l / \cos \beta} AE = \frac{\delta_y \cos^2 \beta}{l} AE \quad (3)$$

(1)(2)(3) より

$$\delta_y \frac{AE(\cos^3 \alpha + \cos^3 \beta)}{l} = W \cos h$$

$$\delta_y = \frac{lW \cos h}{AE(\cos^3 \alpha + \cos^3 \beta)} \quad (4)$$

注意：このときトラス 1,2 の x,z 方向の力の成分がつりあっていないが別の組み合わせのトラスとつりあっている。つまり荷重の縦成分によって TRISPEC が横ずれすることはない。

5.2 x 方向の力のみについて考える

荷重 W の x 方向成分は $W \sin h$ いま F_1, F_2 の x 方向の重量を支える成分をそれぞれ F_{1x}, F_{2x} とすると

$$F_{1x} \sin \alpha = W \sin h$$

$$F_{1x} = \frac{W \sin h}{\sin \alpha} \quad (5)$$

$$F_{2x} \cos \beta = F_{1x} \cos \alpha$$

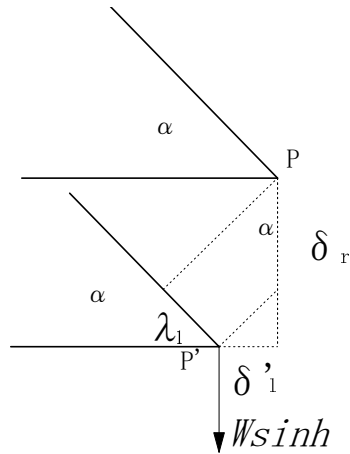
$$F_{2x} = F_{1x} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} = \frac{W \sin h}{\cos \beta \tan \alpha} \quad (6)$$

このときの x 方向の移動量 δ_x 、y 方向の移動量 δ'_y について考える。(5)(6) の力によって 1,2 のトラスはそれぞれ λ_1, λ_2 の変化をする。

$$\lambda_1 = \frac{l}{\cos \alpha AE} F_{1x} = \frac{lW \sin h}{AE \cos \alpha \sin \alpha} \quad (7)$$

$$\lambda_2 = \frac{l}{\cos \beta AE} F_{2x} = \frac{lW \sin h}{AE \cos^2 \beta \tan \alpha} \quad (8)$$

ただし λ_2 の y 方向の変化 δ'_y は $\lambda_2 \cos \beta$ 。x 方向の荷重によって P から P' に移動したとするとまず y 方向に $\lambda_2 \cos \beta$ 移動し x 方向には



$$\delta_y = \frac{\lambda_1}{\sin \alpha} + \frac{\delta'_y}{\tan \alpha} \quad (9)$$

$$= \frac{\lambda_1}{\sin \alpha} + \frac{\lambda_2 \cos \beta}{\tan \alpha} \quad (10)$$

$$= \frac{Wl \sin h}{AE \sin^2 \alpha} \left(\frac{1}{\cos \alpha} + \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} \right) \quad (11)$$

以上より y 方向の移動量 δ_Y 、x 方向の移動量 δ_X は

$$\delta_Y = \delta_y \pm \delta'_y = \frac{Wl}{AE} \left(\frac{\cos h}{\cos^3 \alpha + \cos^3 \beta} \pm \frac{\sin h}{\tan \alpha \cos \beta} \right) \quad (12)$$

$$\delta_X = \frac{Wl \sin h}{AE \sin^2 \alpha} \left(\frac{1}{\cos \alpha} + \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} \right) \quad (13)$$

注：(12) 式の第二項目の $\pm$ は逆向きの力を受ける反対側のトラスの組み合わせの変位を表している。

5.3 トラスによる TRISPEC の傾きについて考える

TRISPEC は y 方向の力によって傾く。トラスの伸び量の差は (12) 式の 2 項目の部分なのでその角度は

$$\frac{2Wl \sin h}{AE \tan \alpha \cos \beta} \times \frac{1}{2l \tan \alpha} \quad (14)$$

$$= \frac{W \sin h}{AE \cos \beta \tan^2 \alpha} \quad (15)$$

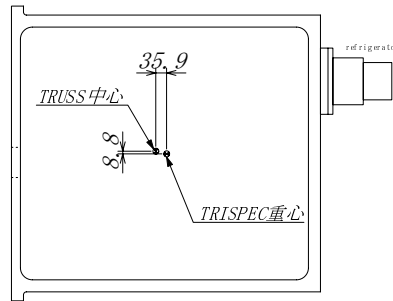
よって ϕ 回転は

$$1'' .45 \cdot \sin h \quad (16)$$

θ 回転は

$$5'' .6 \cdot \sin h \quad (17)$$

ψ 方向の回転は TRISPEC の重心とトラスの中心がほぼ一致しているので、この方向の回転モーメントは十分小さいので回転は無視できる。



5.4 TRISPEC の中心のシフト量

y 移動量は (12) の第一項より

$$4.1 \cdot \cos h \times 10^{-3}(mm) \quad (18)$$

x, z 移動量はそれぞれ (13) より以下になる。ただし x 方向に傾けた時は x 方向のみに z 方向に傾けた時は z 方向のみに以下の量だけ移動する。

$$12 \cdot \sin h \times 10^{-3}(mm) \quad (19)$$

$$28 \cdot \sin h \times 10^{-3}(mm) \quad (20)$$

5.5 角パイプ の撓み量

角パイプの撓みは y 方向の力によっておこる。 x, z 方向については十分強い。さらに、A 点及びその反対の点で結節される 2 つのトラスの y 方向の力は逆向きに同じなので打ち消されて 0 となる。つまり B 点及びその反対のパイプの変化についてのみ考察する。

B 及びその反対側にかかる力は (3)(4)(6) 式により

$$F = \frac{Wl}{AE} \left(\frac{\cos h \cos^2 \beta}{\cos^3 \alpha + \cos^3 \beta} \pm \frac{\sin h}{\tan \alpha \cos \beta} \right) \times \frac{AE}{l} \cos \beta \quad (21)$$

$$F = W \left(\frac{\cos h \cos^3 \beta}{\cos^3 \alpha + \cos^3 \beta} \pm \frac{\sin h}{\tan \alpha} \right) \quad (22)$$

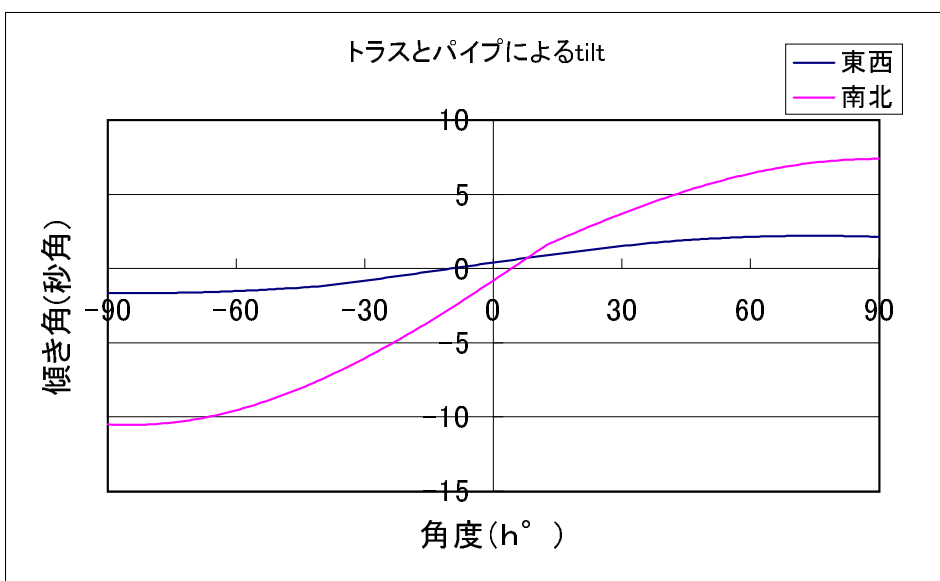
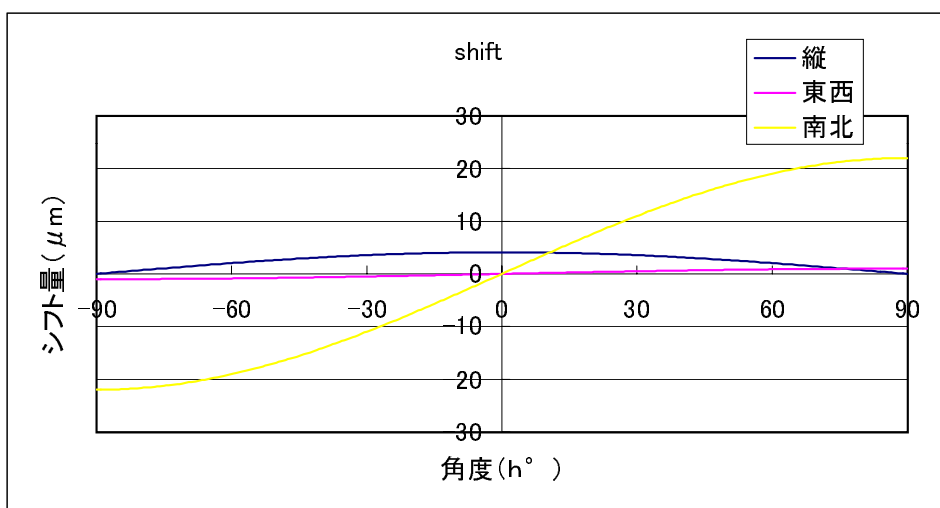
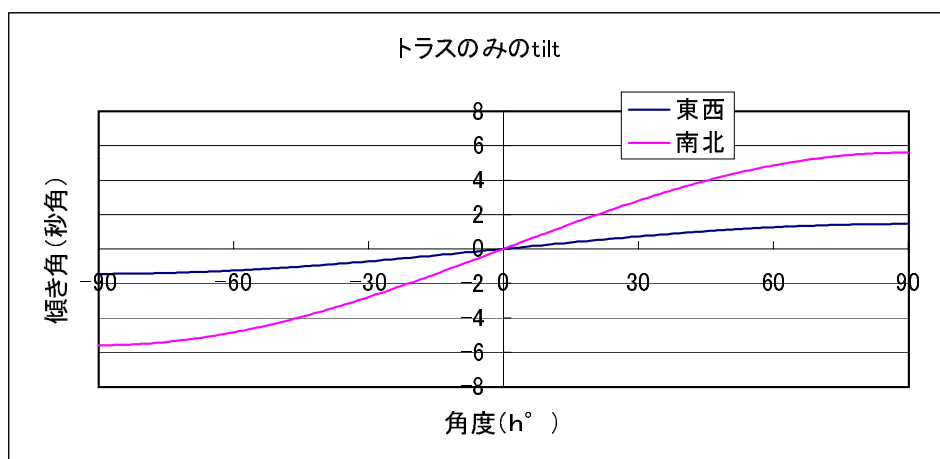
パイプの撓み量を δ_d 長さを d とすると

$$\delta_d = \frac{Fd^3}{3EI}$$

x 方向に傾ける時は の角パイプに力が掛かり $\alpha = 51, \beta = 35.5$ 。 z に傾ける時は に力が掛かり $\alpha = 35.5, \beta = 51$ 。さらに の角パイプは撓む方向によって片持ち梁としての支点が移動し

は望遠鏡に押さえつけられる場合その方向の撓みは 0 となる。以上より撓みの様子は図 5 のようになる。

図 5:



6 実際の仕様値

トラスは基準の長さから $\pm 7mm$ 変化する。それによって最大の位置と傾きの調整範囲、および強度結果を以下に示す。直調整単位については連続に変化できる。

	調整可能範囲	時間あたりの撓み量	全天での撓み
x	$\pm 13.5mm$	図 6 参照	$\pm 0.012mm$
y	$+4.5, -4.4$	図 7 参照	$\pm 0.011mm$
z	$\pm 7mm$	図 8 参照	$\pm 0.028mm$
ϕ	$\pm 33'$	図 8 参照	$\pm 1.5''$
θ	$\pm 55'$	図 8 参照	$\pm 5.6''$
ψ	$\pm 130'$	0	0

以下の図 6～9 はいずれも赤緯 - 50 度から 60 度の天体を 10 度ごとに追尾した様子を表示しており、望遠鏡が真上を向いた時 (赤緯 20 度の天体の南中時) との相対変位量である。図 6 に関してのみこの範囲の天体は赤緯 - 50 度と 60 度の範囲内に収まったので、この二つで代表とする。図 7 は y 方向の TRISPEC の中心移動を表し、グラフ曲線が下から赤緯 - 50 度の天体で、0 時で重なっている曲線のうち 0 時附近の変化率が小さいほうが上から 30, 40, 50, 60 度の天体。図 8 は z, ϕ, θ の様子で、z については縦軸を 28 倍して単位を μm に読み替える。 ϕ, θ についてもそれぞれ 1.45、5.6 倍して単位を秒角に読み替える。またグラフ曲線が上から赤緯 - 50 度の天体の様子。図 9 の曲線の順番も図 8 と同じ。

7 余談

トラス自体の重さだけなら 22kg 程度。それだけの構造で 450kg を支えることが驚きであった。トラスが軽くて強い理由は、構造として撓みはなく引っ張り圧縮だけで支えるからである。また結局 TRISPEC は一番危ういところで直径 6mm しかないピン 8 本で釣り上げられており、しかもそこはせん断力として全荷重が掛かっている。あらためて金属の強さというものを実感する。このトラス構造は一見いわゆるセルリエトラスと同じように見えるが、それとは逆向きをしているため、過拘束が起きている。構造的な強さはそれほど変りがないが、振る舞いは若干違って傾きが起きてしまう。ちなみに $\alpha = \beta$ でセルリエトラスとの比較をすると

横移動量はセルリエトラスの場合

$$\delta_R = \frac{Wl \sin h}{4AE \sin^2 \alpha \cos \alpha}$$

今回の場合

$$\delta_R = \frac{Wl \sin h}{4AE \sin^2 \alpha} \left(\frac{1}{\cos \alpha} + 1 \right)$$

縦移動量はセルリエトラスの場合

$$\delta_L = \frac{Wl \cos h}{8AE \cos^3 \alpha}$$

今回の場合

$$\delta_L = \frac{Wl}{8AE} \left(\frac{\cos h}{\cos^3 \alpha} \pm \frac{\sin h}{\sin \alpha} \right)$$

今回のものはセルリエトラスに比べて横方向には 2 項目の部分だけずれは大きい。縦方向は基本的には強度は同じであるが 2 項目が傾きを生んでしまう。セルリエトラスを採用しなかった理由は構造上 TRISPEC の上蓋に滑節点を置くときに制約があったため。

図 6: x 方向のずれ-hour angle(焦点面でのずれ量も同じ)

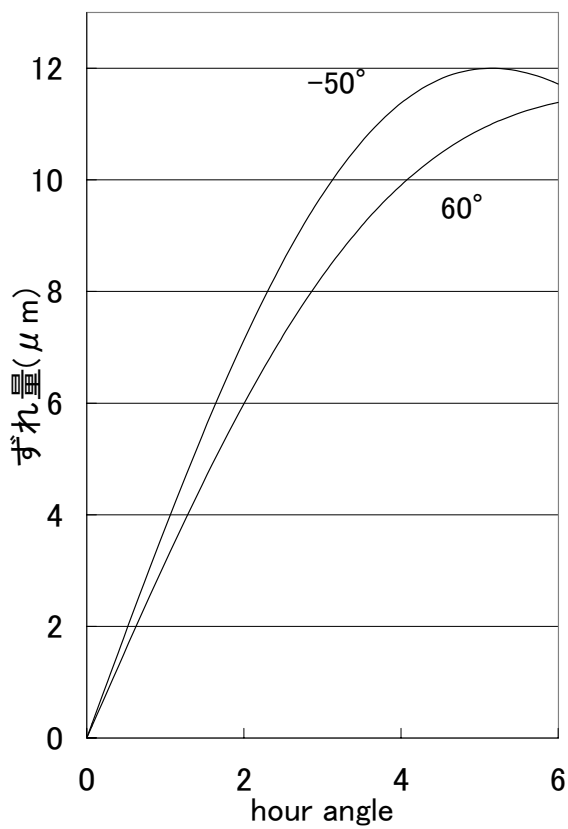


図 7: y 方向のずれ-hour angle

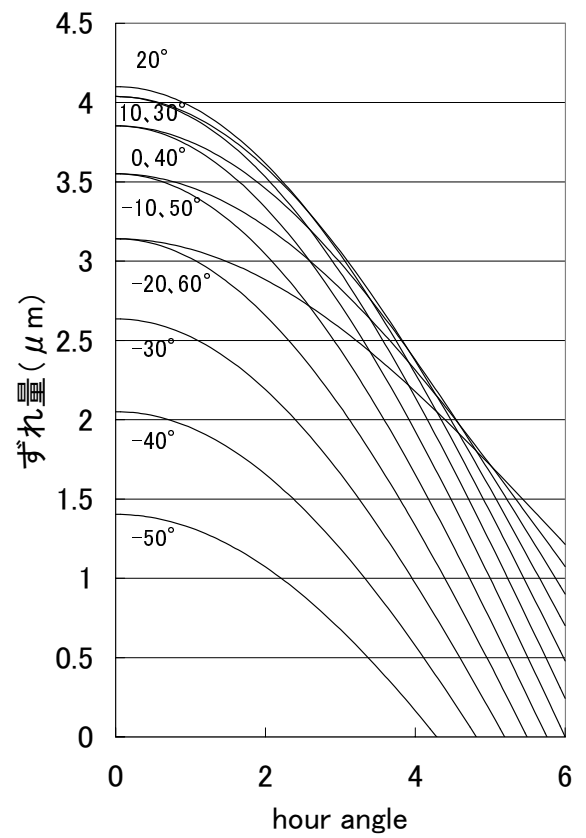


図 8: Z, ϕ, θ -hour angle

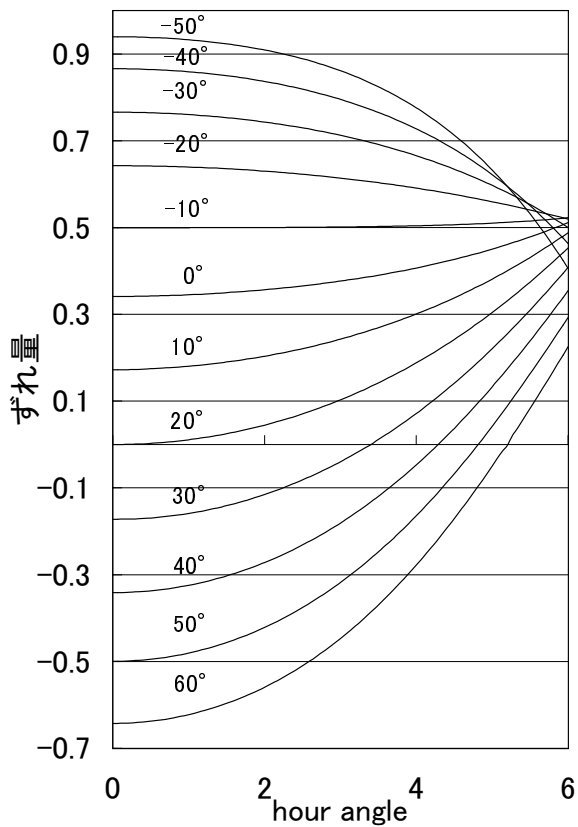


図 9: 焦点面の y 方向のずれ-hour angle

