

国立天文台岡山天体物理観測所 (OAO) サイト調査：接地境界層の評価

和田晋平*, 舞原俊憲*, 平田龍幸*, 太田耕司*, 岩室史英*, 岩田 生*, 木村仁彦*,
衛藤 茂*, 安東正隆*, 下農淳司*, 小矢野久, 吉田道利, 沖田喜一,
岡田隆史, 泉浦秀行, 清水康広, 稲田素子, 柳沢顕史,
長山省吾, 服部 堯, 田村直之**, 三上良孝

(2004年3月19日受理)

Astronomical Evaluation of OAO: Site Research on Surface Boundary Layer of Air

Shinpei WADA, Toshinori MAIHARA, Ryukou HIRATA, Kouji OHTA, Fumihide IWAMURO, Ikuru IWATA,
Masahiko KIMURA, Shigeru ETO, Masataka ANDO, Atsushi SHIMONO, Hisashi KOYANO,
Michitoshi YOSHIDA, Kiichi OKITA, Takafumi OKADA, Hideyuki IZUMIURA,
Yasuhiro SHIMIZU, Motoko INATA, Kenshi YANAGISAWA, Syogo NAGAYAMA,
Takashi HATTORI, Naoyuki TAMURA, and Yoshitaka MIKAMI

Abstract

Variability of the scale height of turbulent surface boundary layer of air has been monitored at the Okayama Astrophysical Observatory (OAO) using C_T^2 method. The measurements were made with a meteorological tower instrumented with microthermal sensors. Astronomical site evaluation of OAO has been done based on the scale height variation and the data of weather monitors at OAO. The results of the evaluation indicate that the effect of the turbulent surface boundary layer to astronomical seeing would become sufficiently small when installing a telescope at a height of 15m or higher from the ground.

1. はじめに

京都大学では、国立天文台と共同で岡山天体物理観測所に口径3.5mの望遠鏡を建設する計画¹⁾を進めている。可視・赤外線波長域における現代の観測天文学は、80年代以降の検出器の進歩と共に、望遠鏡の大口径化と観測天域・時間の拡大化が進んでいる。すばる望遠鏡などの大口径望遠鏡は、高い空間分解能や集光力を生かして、個々の天体の詳しい性質の研究や限られた狭い天域内の遠方宇宙の探査に用いられているが、共同利用の汎用望遠鏡であるため、広い天域の探査に時間を多く割くことは困難である。その一方で、広視野多天体または多波長の観測装置を用いて、少数

のプロジェクトだけに専念した運用方法を採用する口径3~4mクラスの中口径望遠鏡も現在数多く建設されており、巨大望遠鏡にはできない非常に広い天域の観測や、突発天体や変光天体など時間により明るさの変動する天体の観測が行なわれている。本計画は、国内で最も優れた観測サイトである国立天文台岡山天体物理観測所内に、新たな技術を用いた口径3.5mの望遠鏡を建設し、星形成の宇宙史や突発天体に関する観測を行いすばる望遠鏡と相補的に天文学の新しい分野を開拓するものである。

この計画を推進するにあたって京都大学が主体となり岡山観測所の観測適正条件の調査のため、「サイト調査」と総称的に呼ばれている、いくつかの方法による測定が2000年度から行われている²⁾。

我々は、すばる望遠鏡の建設時においても用いられた C_T^2 法³⁾ を用いて接地境界層のシーイング

* 京都大学大学院理学研究科(Department of Astronomy, Kyoto University)

* Department of Physics, University of Durham

条件から見た望遠鏡の設置条件の評価を行った。2002年2月にタワーを設置し、一年以上にわたって微熱乱流の垂直分布の実測を行ったので、報告する。

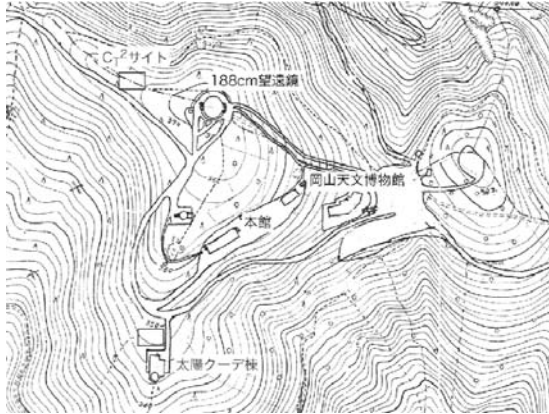


図 1. 岡山観測所構内。上が北。

2. 調査の目的

シーイングは地球大気を通して天体を見た時の見えかたのことである。天体からの光は大気上層までは平面波で進んでくるが、大気の中で温度や密度、すなわち大気の屈折率に揺らぎがあると、波面が屈曲する。この大気揺らぎは時間的、空間的に変動する。したがって、地上の望遠鏡で見た星像はゆれたり広がったり明るさが変わったりする。そのためシーイングは天体の撮像観測の空間分解能を決定し、分光観測の能率をも左右する重要な要素である。そのシーイングを劣化させる要因としては3つ（自由大気、接地境界層、ドーム環境）がある。

上空の自由大気で起こる屈折率ゆらぎは、温度勾配がある大気状態で風向風速に鉛直シア[†]がある場合に発生する⁴⁾（ケルビン-ヘルムホルツ不安定）。冬の日本のシーイングが悪いのは、強いジェットストリームが上空を流れていて、風のシアが強いからである。このジェットストリームが流れている、高度 12km あたりの 200hPa 付近での風速は、自由大気シーイングの良い指標になっている。尚、屈折率ゆらぎは温度ゆらぎが元になっているため、大気擾乱でよくかき混ぜられた領域では、かえって屈折率ゆらぎが小さくなる。その結果、屈折率ゆらぎの大きいところは、強い擾乱層の上下のシアの小さい領域との境界付近に、薄い層（数m-数10m）となって存在してい

[†] 風の速度（風向と風速の両方を含めて）が鉛直方向に変化していること

ることが、気球観測などから知られている。この自由大気による影響は以上の大局的な気象条件に左右され取り除くことはできないが、国立天文台岡山天体物理観測所の位置は日本では良いサイトであると認められている⁵⁾。

ドーム内では、ドーム/望遠鏡構造物や鏡の温度が周囲温度と違うことによって、空気に密度ゆらぎが発生する。このドーム環境については設計時に影響が最小限になるように考慮する。

接地境界層は大気と地表の境界層で、そこでの温度の乱れによって大気の屈折率が乱され星像が劣化する³⁾。一般的には、この層内では高さと共にシーイングの乱れは減少する。また、接地境界層からのシーイングへの寄与は局所的な地形に大きく影響される。

そこで、今回の調査の目的はシーイングの乱れの一要因である接地境界層内での屈折率の揺らぎに対して、高さに関する情報を新望遠鏡建設候補地で実際に測定することで取得し、シーイングへの接地境界層からの寄与を定量的に評価し、接地境界層の影響が十分小さくなる高さであるスケールハイトを求め、望遠鏡の不動点をどれ位の高さに設置すれば良いかを決定することである。

3. 測定

3.1 測定場所

C_T^2 の測定は188cmドームの西側の尾根を 70m 程進んだ地点で実施（図 1）。この場所は、本計画の初期に新望遠鏡の建設候補地として考えていた場所である。2002年1月中旬に C_T^2 タワー設置場所とそこに通じる道の整地が行われ、1月下旬には C_T^2 タワーの搬入及び設置が行われた。また、その後、タワー直下から188cm ドームまで LAN ケーブルを敷設し、 C_T^2 の測定をタワー直下の測定車両からだけでなく、ネットワークを通じて遠隔操作で行えるようになった。

3.2 測定タワー

大気の屈折率の揺らぎ(C_N^2)は、大気の温度揺らぎと相関があるので、この温度揺らぎの強度 C_T^2 を高さ方向に何点かで測定すれば接地境界層の様子を調べることが出来る。実際には接地境界層の影響が大きいのは約 15m 程度と考えられるので、 C_T^2 を測定するために建設候補地に 27m のタワー（図 2 左）を立て、10m, 15m, 20m, 27m の 4 点に 1m の間隔をあけて1対の微小な温度変化を測定するセンサーを南北方向に取り付けて測定を行った。また、このタワーの近くに観測

所が設置している気象モニター⁶⁾で気温、湿度、風速、風向、気圧、雨量等を測定している。

3.3 センサー

センサー (図 2 右下) にはプラスチックの 4本の柱に太さ $23.4\mu\text{m}$ のニッケル線 (約 2m) を巻いた抵抗体を用いており、抵抗値は実測で約 300Ω ($\pm 20\Omega$) である。そして、このニッケル線の抵抗体をホイートストンブリッジの 1 つに用いることで微小な温度変化による抵抗値の変化を電圧の変化として測定することができる。ニッケル線の抵抗は温度 1 度当たり約 2Ω の変化をし、ホイートストンブリッジ回路では温度 1 度あたり約 33mV の電圧変化がある。

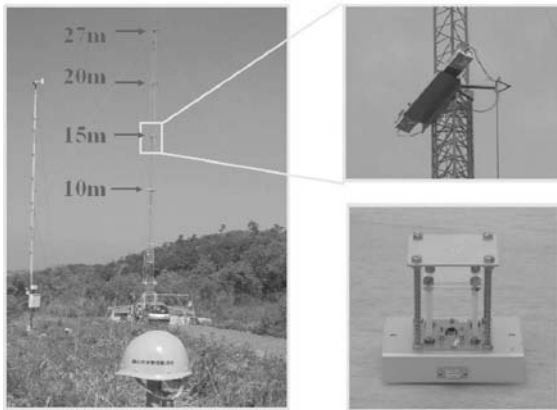


図 2. 測定タワー全景と一部拡大。左側の写真の中央が C_T^2 タワーで、各高さ毎に右上図のような 1 m の長さの台を取り付け、右下図のセンサーを対に付けている。センサー毎にケーブルが測定車の中まで続いている。左の写真の左側のポールは観測所が設置している気象モニター。 C_T^2 の解析で用いている気象データはこの気象モニターで取得されたデータである。

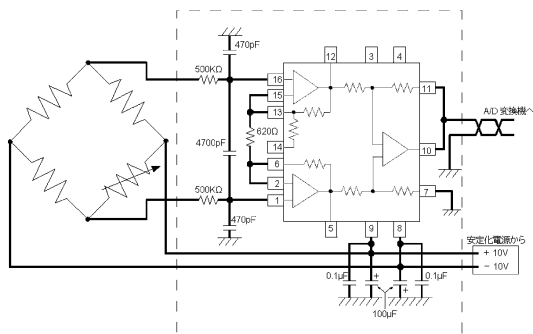


図 3. センサー及び差動増幅回路の回路図。破線で囲まれた部分が差動増幅部。

3.4 データの取込

測定はセンサーのブリッジ回路の電位差を 500msec 毎にサンプリングし差動増幅回路で約 10 倍に増幅した後、16ビットの A/D変換機と ADボードを用いてアナログデータをデジタルデータに変換し、それをパソコンのハードディスクに記録していく (図 3)。この測定システム全体での温度の分解能は約 0.8mK である。

また、解析時に使用する気象データは岡山観測所によって 1 分毎にサンプリングされ観測所の web ページに更新されていくのでそれを PC に記録している。そして、その他にも観測所内の気象データのアーカイブから必要なデータを取り出すことも併用している。

今回、解析で用いたデータは 2002 年 8 月から 2003 年 11 月までに雨でない夜間に測定した 35 日分である。また、測定したデータを 3ヶ月毎に、冬 1~3月の 5日間、春 4~6月の 6日間、夏 7~9月の 9日間、秋 10~12月の 15日間とわけた。

4. 測定データの解析

4.1 解析の基本式の導出

コルモゴロフ乱流モデル⁷⁾によると、温度揺らぎの強度 C_T^2 はある地点の 1つの方向 (今回の測定では水平方向) の 2点間 r_1, r_2 の温度 $T(r_1), T(r_2)$ と $r=|r_1-r_2|$ から

$$C_T^2 = \langle [T(r_1) - T(r_2)]^2 \rangle r^{-2/3} \quad (1)$$

と求めることができる。また、温度揺らぎの強度 C_T^2 と、屈折率揺らぎの強度 C_N^2 には

$$C_N^2 = \left(\frac{7.76 \times 10^{-5} P}{T^2} \right)^2 C_T^2 \quad (2)$$

の関係がある。 P は大気圧 [hPa], T は温度 [K]。ある高さで一对のセンサーにおける、ある時刻 t での温度を T_1, T_2 とし、その時の各センサーの出力を V_1, V_2 とする。このときに

$$\Delta V \equiv V_1 - V_2, \Delta T \equiv T_1 - T_2 \quad (3)$$

とすると、

$$C_T^2 = \frac{\langle (\Delta T)^2 \rangle_t - \langle \Delta T \rangle_t^2}{r^{2/3}} \quad (4)$$

となる。温度と出力電圧の関係 ($V=V_0\alpha T/4$) を用いて、これを電圧の差 ΔV に書き換えると、

$$C_T^2 = 16 \frac{\langle (\Delta V)^2 \rangle_i - \langle \Delta V \rangle_i^2}{\alpha^2 V_0^2 r^{2/3}} \quad (5)$$

と表される。αはニッケル線の比抵抗の温度依存性から決まる定数である。そして式(5)に、α=6.61×10⁻³ [K⁻¹]と、各高さのセンサー対の間隔 r=1 [m]と、センサーに与える電圧 V₀=2×10⁴ [mV]と、

$$\sigma_i^2 \equiv \langle (\Delta V)^2 \rangle_i - \langle \Delta V \rangle_i^2 \quad (6)$$

を代入すると、

$$C_T^2 = 9.15 \times 10^{-4} \sigma_i^2 \quad (7)$$

となる。

次に C_T² の高さ依存性を

$$C_T^2(z) = C_T^2(0) \exp\left(\frac{-z}{z_h}\right) \quad (8)$$

とする。ここで C_T²(0) は地上 0m での C_T² の値である。そして、高さ z [m] での接地境界層からナチュラルシーイングへの寄与を表すシーイングサイズ θ(z)³⁾ は

$$\theta(z) = 5.415\lambda^{-1/5} \left(\frac{7.76 \times 10^{-5} P}{T^2} \right)^{6/5} \left[\int dh C_T^2(h) \right]^{3/5} \quad (9)$$

であり、式(8)を代入し高さ方向に積分すると、

$$\begin{aligned} \theta(z) &= 5.3\lambda^{-1/5} \left(\frac{7.9 \times 10^{-5} P}{T^2} \right)^{6/5} [C_T^2(0) \exp\left(\frac{-z}{z_h}\right) z_h]^{3/5} \\ &= 5.3\lambda^{-1/5} \left(\frac{7.9 \times 10^{-5} P}{T^2} \right)^{6/5} [C_T^2(z) z_h]^{3/5} \end{aligned} \quad (10)$$

となる。

4.2 結果

(1) 全データ

今までに測定された全データを用いて、z_h、θ(0)とθ(15)の頻度分布を図4と図5に示す。

図4の z_h の頻度分布において、全データの80%は 15.1m以下に含まれている。これは望遠鏡の不動点を15mに設定すれば接地境界層の影響が観測時間の8割で取り除けることを示している。

図5のθ(0)の頻度分布では80%が 1.4 秒角以下に含まれ、θ(15)では80%が 0.44 秒角以下に含まれていた。ナチュラルシーイングは自由大気成分(θ_自²)と接地境界層成分(θ_接²)にわけることができるので、これらの間には鉛直方向にzをとると、

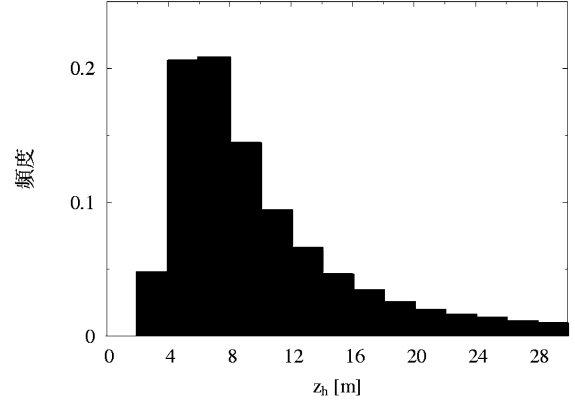


図4. 全データの z_h の頻度分布。

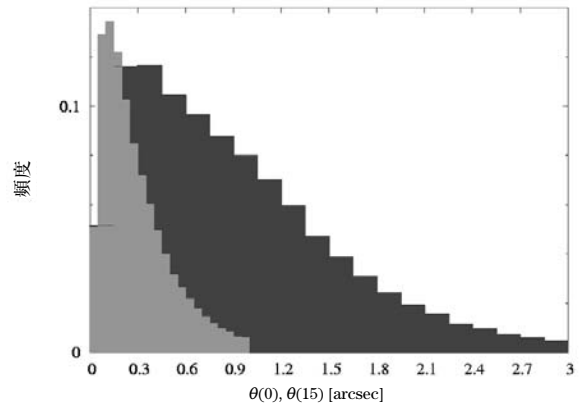


図5. 全データの θ(0) (黒) と θ(15) (灰色) の頻度分布。

$$\theta_N(z) = \sqrt{\theta_{自}^2 + \theta_{接}^2(z)} \quad (11)$$

の関係が成立つ。地上 0m での接地境界層成分からの寄与(θ_接²(0))と自由大気層成分からの寄与(θ_自²(0))が等しいとすると、地上から15m上方では、θ_接²(15)はθ_接²(0)よりも小さいため、ナチュラルシーイング(θ_N(15))は θ_N(0) に比べて 0.5秒角程度改善する。

(2) 季節毎

測定したデータを用いて季節毎の違いを調査した。図6~図8に z_h、θ(0)とθ(15)の頻度分布のグラフに示す。図6の z_h の頻度分布は季節毎の差はあまりみられないが、図7と図8の θ(0)やθ(15)についての結果から、冬がナチュラルシーイングに対する接地境界層からの影響が一番大きく、春や秋には影響が小さくなっていることがわかる。なお、夏の θ(0)、θ(15)の頻度分布において、0.1秒角のあたりでピーク状に突出しているデータ点が見られるが、これは C_T² を測定した日のうちで極端に接地境界層の影響が小さかった日があったためにこのようになっている。

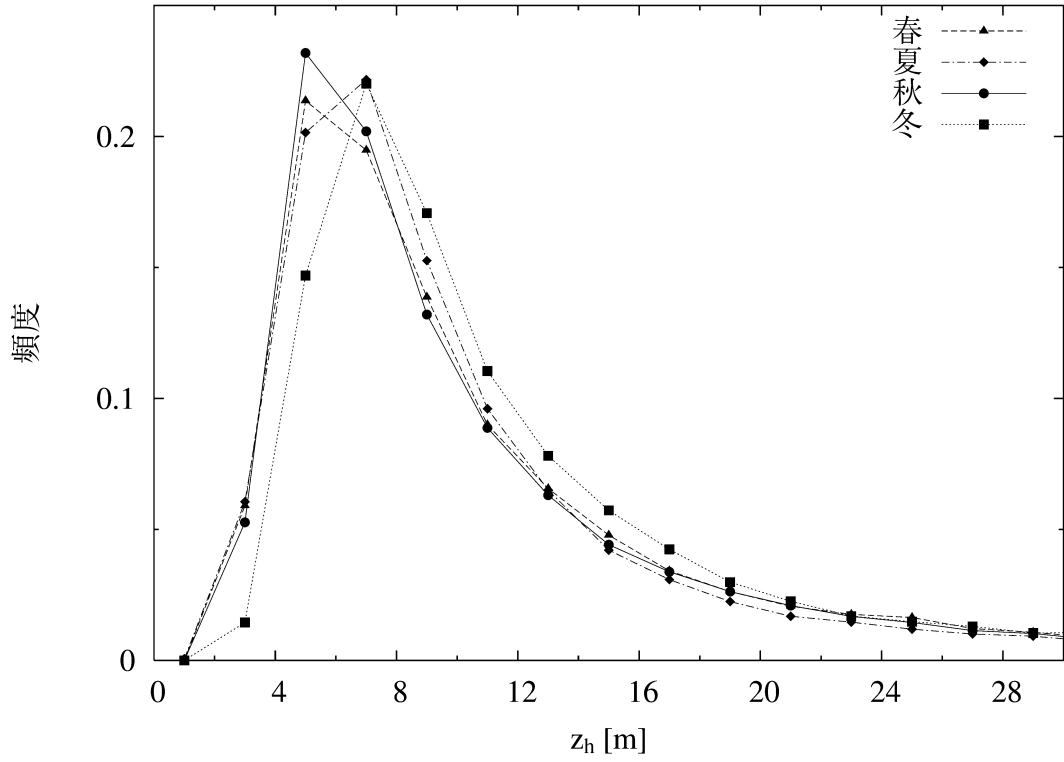


図6. 季節毎の z_h の頻度分布. 春 (▲), 夏 (◆), 秋 (●), 冬 (■).

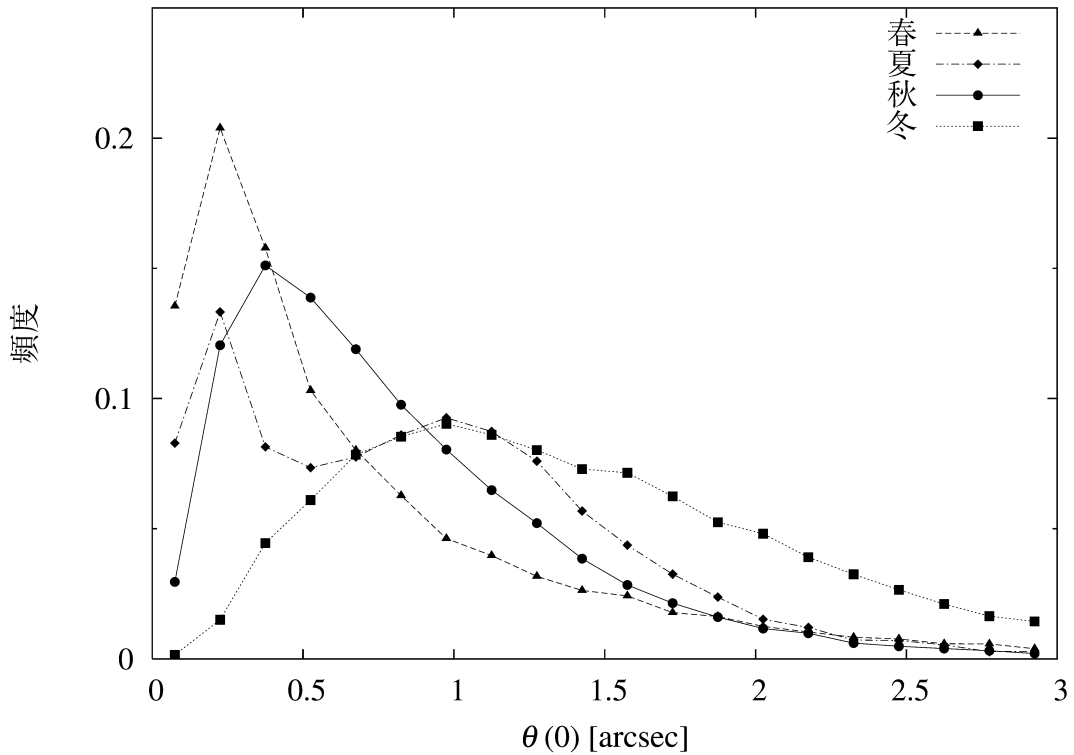


図7. 季節毎の $\theta(0)$ の頻度分布. 春 (▲), 夏 (◆), 秋 (●), 冬 (■).

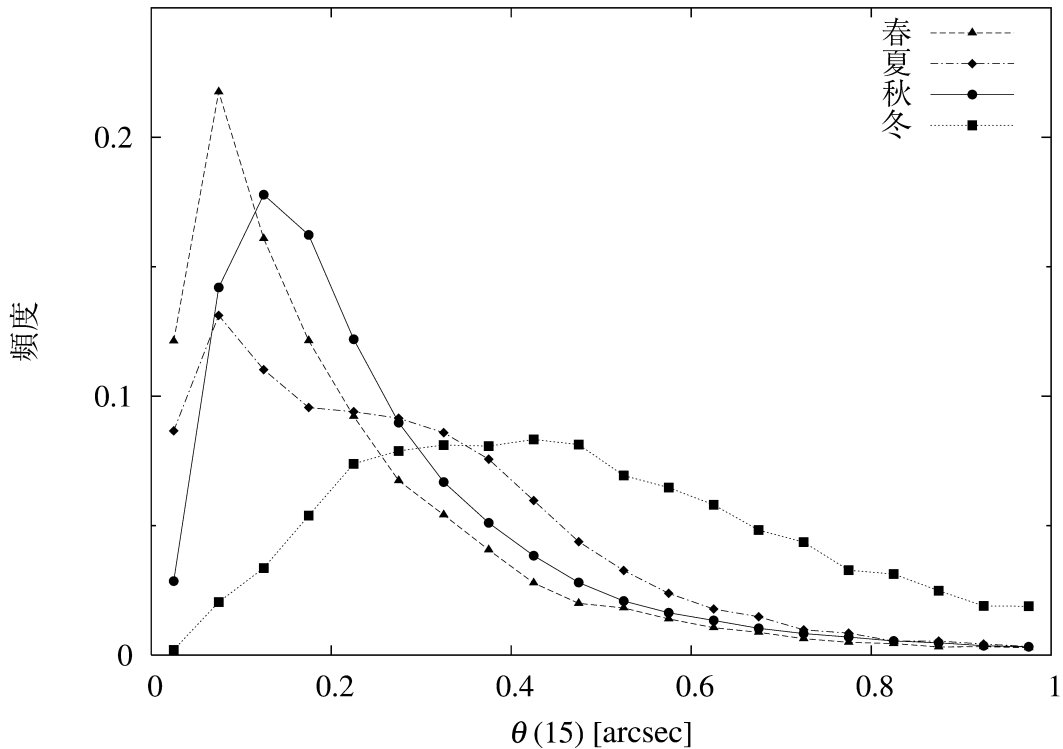


図8. 季節毎の $\theta(15)$ の頻度分布. 春 (▲), 夏 (◆), 秋 (●), 冬 (■).

5. 議論

5.1 気象との相関

(1) 気象モニターデータの取得

ここでは気象データ, 特に風向, 風速と C_T^2 との関係について議論する. 以下の図には, C_T^2 を測定した夜間において取得した気象データを季節毎に分け, 風向の頻度分布 (図9の左側) を示す.

季節毎で見ると, 冬ではほとんどが北風である. また, ほかの季節では冬に比べては他の方向から風が吹いている. C_T^2 を測定した夜間を通しては, 北東からの風が全体の約25%を占めている.

また, 図9の右側には, 岡山観測所の気象データのアーカイブから取得した, 2002年10月から2004年1月にかけてのほぼ毎日の19時半から30時の気象データを基に風向の頻度分布を示したものである. 一年を通して北東からの風が全体の約20%強を占めている. アーカイブされている全てのデータと C_T^2 測定した夜間のみのデータとを比べるとほぼ同じような分布をしている. このことから C_T^2 測定した夜間が各季節の典型的な気象であったと考えられる.

(2) C_T^2 と風向との相関

風向と z_h や $\theta(0)$, $\theta(15)$ との関係調べた (図10). 図10より, 風向が南や北東, 南南西の時は

$\theta(0)$ や $\theta(15)$ が小さく, 逆に北北西や東南東や西南西では大きくなっている.

これらについて図1を用いて観測所周辺の地形と比較する. $\theta(0)$ や $\theta(15)$ が小さくなる風向では, 南からは海からの風が吹き, 北東方向には矢掛町に向かう尾根が続き, 西北西には竹林寺から188cmドームに稜線が続いている. また, $\theta(0)$ や $\theta(15)$ が大きくなるのは, 北北西や西南西からはそれぞれ尾根を横切る方向に風が吹くときである. そして東南東には188cmドームがありこれによって乱された風が吹いたためと考えられる. しかし東南東からの風のときには C_T^2 タワーがセンサーに対しちょうど風上側にあるので, タワーによって風が乱されたことによって $\theta(0)$, $\theta(15)$ が大きくなった可能性もある.

図11で季節毎の風向と $\theta(0)$, $\theta(15)$ の関係を示す. $\theta(0)$, $\theta(15)$ と風向については, 冬はどの方向においても大きい値を示し, 春は風向による変化が大きく, 夏はどの方向からも同じ値くらいで冬よりも小さい値であり, 秋は方向による変化が春よりも小さい. $\theta(0)$ と $\theta(15)$ ではどの季節においても $\theta(15)$ のほうが方向による相違がより小さく, より円形に近いように見える. これは接地境界層の影響がだいたい取り除かれたことを示していると考えられる.

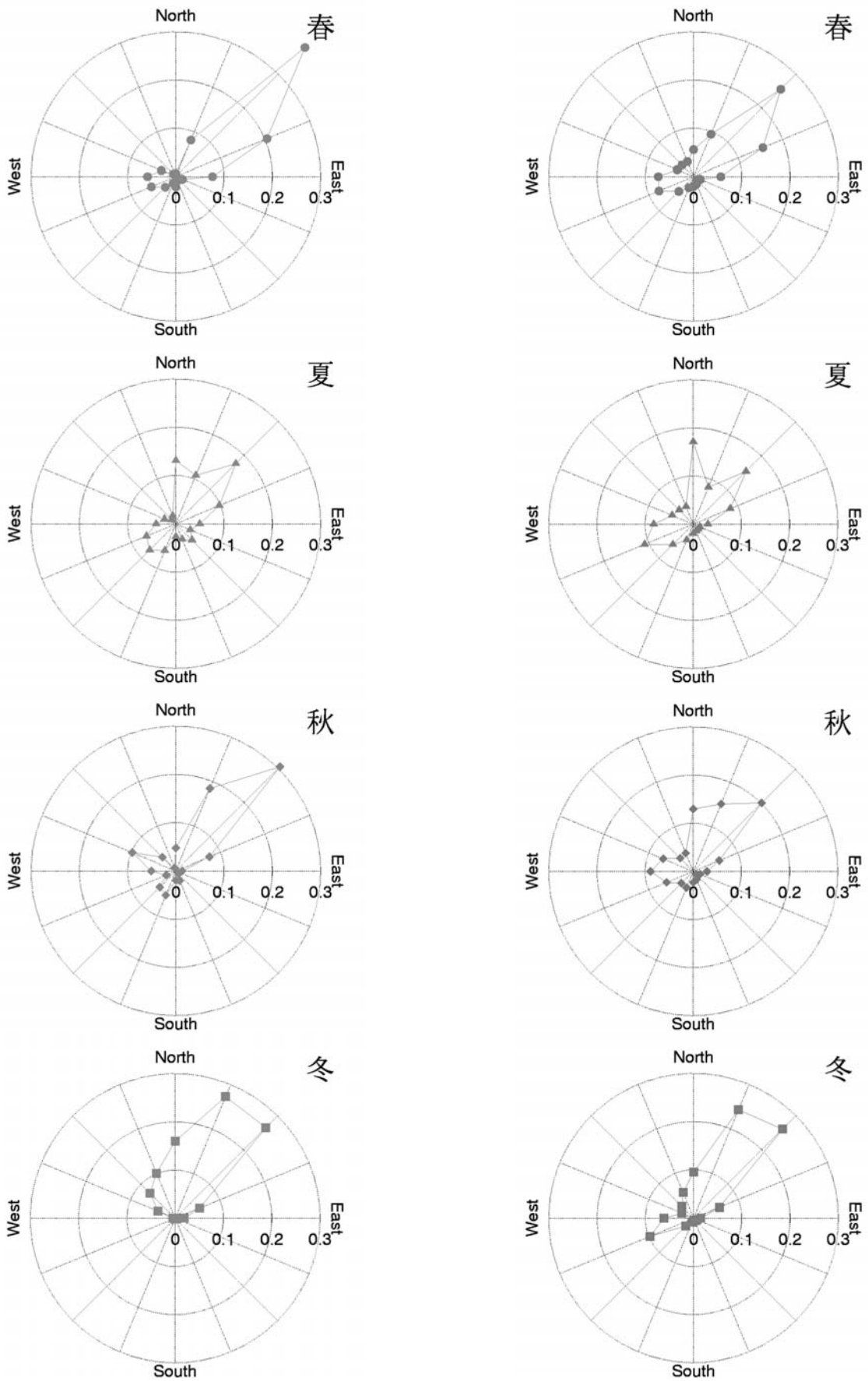


図9. 季節毎の風向の頻度分布. 上から春, 夏, 秋, 冬. 左側が C_7^2 を測定した夜間だけの気象データを用い, 右側は 2002年 10月以降のほぼ毎日の夜間の気象データを使用. それぞれ, 各風向毎の頻度を plot し, 円は内側より頻度の10%, 20%, 30%に対応.

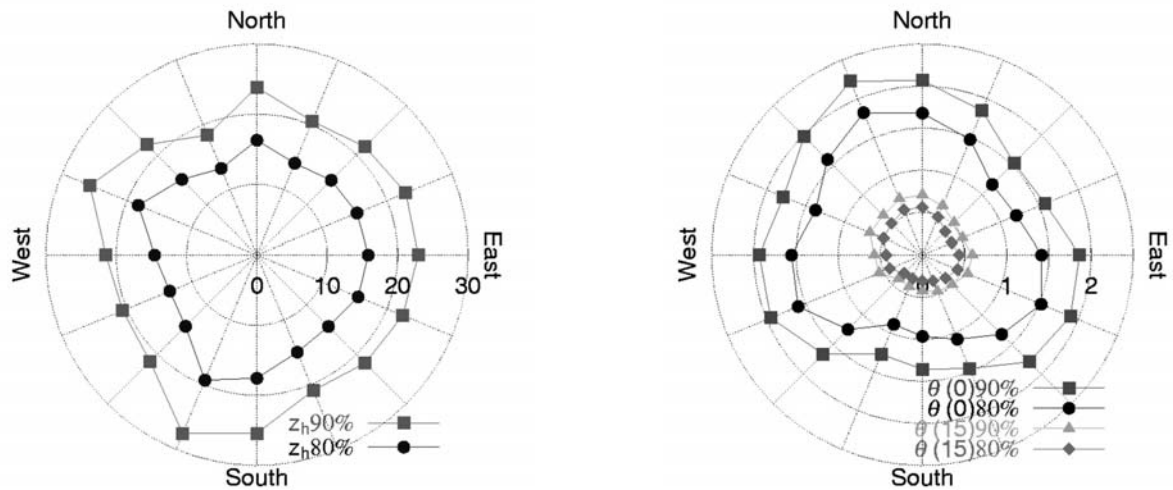


図 10. 全データの風向との関係. 左図が風向毎に z_h の90%と80%をplot. 右図が風向毎に $\theta(0)$ や $\theta(15)$ の90%と80%をplot. 左図の円は内側から10m, 20m, 30m に対応し, 右図の円は内側から0.5秒角, 1秒角, 1.5秒角, 2.5秒角に対応

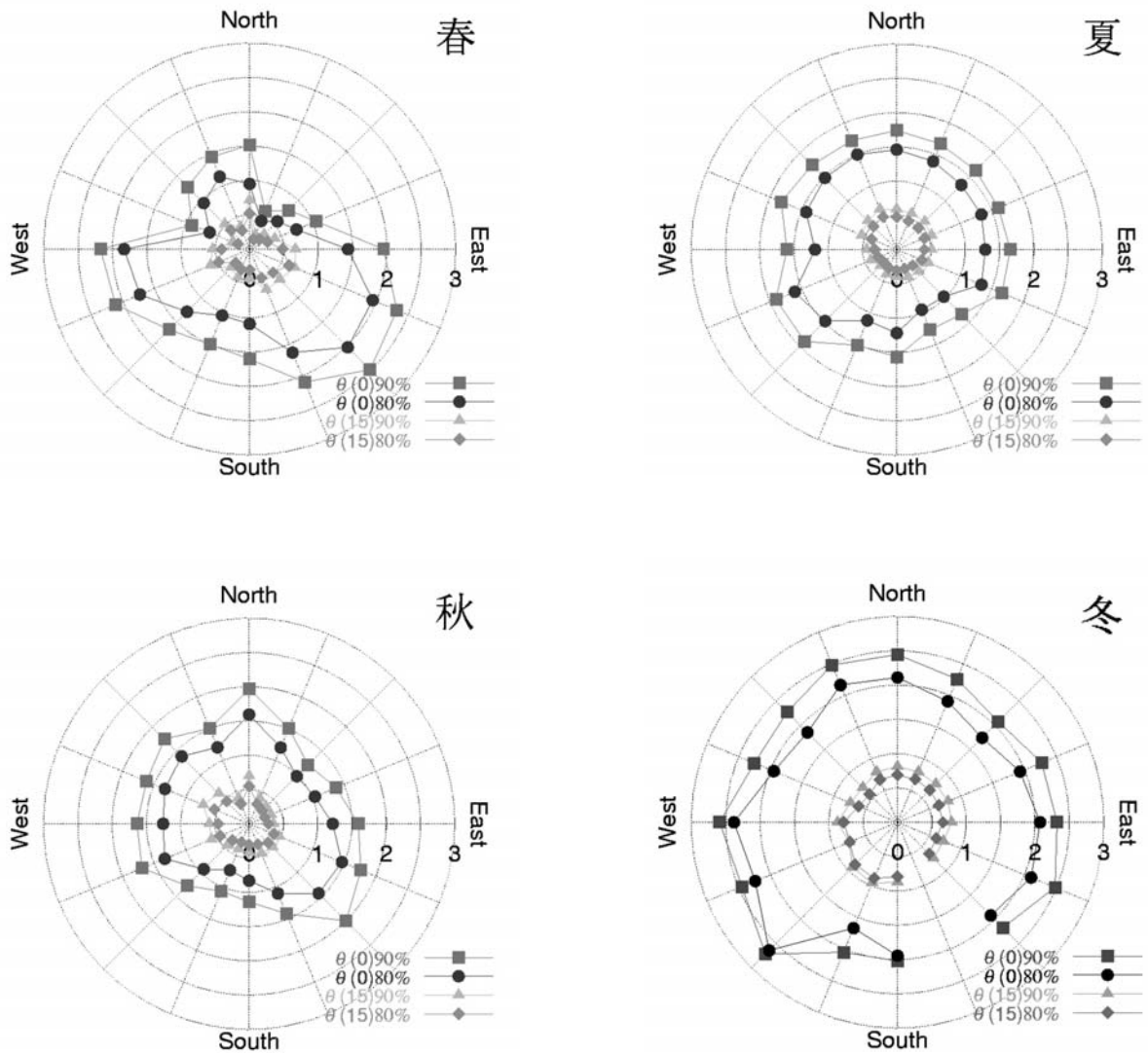


図 11. 季節毎の風向と $\theta(0)$, $\theta(15)$ の関係. それぞれ, 各風向毎に $\theta(0)$ と $\theta(15)$ の90%と80%をplot. 円は内側から0.5秒角, 1秒角, 1.5秒角, 2秒角, 2.5秒角, 3秒角に対応.

5.2 DIMM

(1) DIMMについて

DIMM (Differential Image Motion Monitor)⁸⁾ は一定距離離れた二つの望遠鏡開口で同じ星を撮像し、重心位置の相対的な揺らぎを測定することで観測サイトのナチュラルシーイングを測定する装置である (図12)。我々の調査では、 C_T^2 法での接地境界層成分の測定と並行して行っているため、DIMMによる測定と C_T^2 法での測定をあわせることで、ドーム高さで接地境界層成分の寄与が小さい場合のナチュラルシーイングの推定を行うことができる。

DIMMは測定点でのナチュラルシーイング (θ_N) を直接測定し、そして、地上約 1m あたりで測定しているので、式 (8)、式 (10) と式 (11) を用いて 15m でのナチュラルシーイング ($\theta_N(15)$) を求める換算式は、

$$\theta_N(15) = \sqrt{\theta_N^2(1) - \theta_{接}^2(1) + \theta_{接}^2(15)} \quad (12)$$

となる。



図 12. 実際に測定に使用しているDIMM.

(2) DIMMと C_T^2 の同時測定

DIMMの測定は、 C_T^2 タワーの近くのほか岡山観測所構内のいくつかの場所で測定を行っている。 C_T^2 との同時測定は 9 晩行われた。DIMMと C_T^2 の結果を用いて、任意の高さでのナチュラルシーイングを求めることができるので、今回これまでに測定された DIMMのデータを用いて地上 15 mでのナチュラルシーイングを求めた。導出には式(12)を用いて行うのであるが、ここで $\theta_N(1)$ は DIMM で得られた結果を、また、 $\theta_{接}(1)$ は C_T^2 測定で得られた結果を用いて式(10) から地上 1m での接地境界層成分を求めたもので、 $\theta_{接}(15)$ に

は C_T^2 測定で得られた $\theta(15)$ を用いる。

次に、DIMMで得られた結果に C_T^2 の結果を用いて式(12) で計算するときには、予め DIMM で求められた結果のうち明らかに数値が大き過ぎる場合を除いた後、以下の 2つの条件を満している C_T^2 のデータを用いて計算を行った。

1. DIMM のデータ点の時刻の前後 10秒以内で、かつ、DIMMの測定時刻に最も近い C_T^2 のデータ。
2. $\theta_{接}(1)$ と $\theta_N(1)$ について、 $\theta_{接}(1) < \theta_N(1)$ の関係が成立している。

このような条件で計算することが出来た DIMM データは全体の 62.3%であり、計算出来なかったデータ点の内 $\theta_{接}(1)$ と $\theta_N(1)$ の関係が逆転していたのが約半数であった。この $\theta_{接}(1)$ と $\theta_N(1)$ の関係が逆転する原因としては、DIMM と C_T^2 の測定誤差があげられる。そして、この計算が出来なかったデータ点の多くは計算出来たデータ点より $\theta_N(1)$ が小さいので、これ以降で述べる計算結果については接地境界層のナチュラルシーイングへの寄与を過小評価している可能性がある。

計算結果の内、特に C_T^2 サイトで測定された時のデータについて C_T^2 法で得られた結果と共に図 13に示す。左側のグラフは DIMM で測定されたナチュラルシーイング (θ_N) と C_T^2 法で測定した $\theta(0)$ と $\theta(15)$ を示しているが、2003年 8月 1日の 20 時から 21 時にかけては接地境界層の影響が小さくなるにつれてナチュラルシーイングが小さくなっていることが良くわかる。右側のグラフは上述の方法で DIMMと C_T^2 で得られた結果から求めた 15mでのナチュラルシーイングと、 $\theta_N(1)$ と $\theta_N(15)$ の 2つの値の差、即ち、地上から 15m上空に移動することでどれだけシーイングが改善されるかを示す。2003年 3月 10日のように 0.5 秒角から 1 秒角近くまで改善している時もあれば、2003年 8月 1日の 24時以降のようにほとんど地上と 15mとは変わらない時間も存在する。

過去に DIMM で測定されたナチュラルシーイングと C_T^2 法で測定したデータから、式 (12) を用いて地上 15mでのナチュラルシーイングに換算した結果を、その各々の頻度分布で図 14に示す。 $\theta_N(0)$ の最頻値は 1.2 秒角~1.4秒角の間で $\theta_N(15)$ の最頻値は 1.0秒角~1.2秒角の間であり、15m上方に移動することで最頻値で約 0.2秒角の改善がみられるという結果になった。

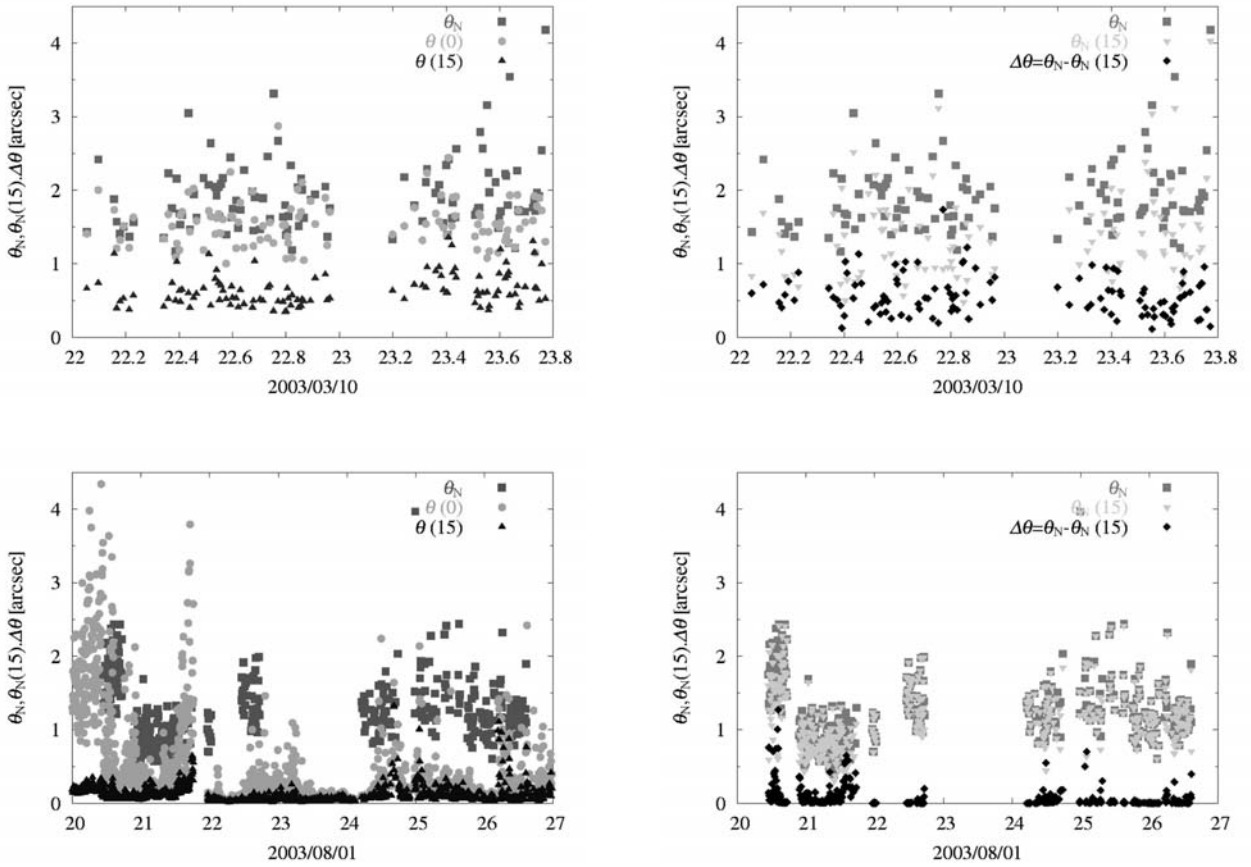


図 13. C_T^2 サイトでの DIMM と C_T^2 の同時測定の結果. 左が DIMM で測定されたナチュラルシーイング (θ_N) (■) と C_T^2 法で測定した $\theta(0)$ (●) と $\theta(15)$ (▲). 右は DIMM で測定されたナチュラルシーイング θ_N (■) と C_T^2 法の結果から式 (12) を用いて求めた 15m でのナチュラルシーイング $\theta_N(15)$ (▼) と, この二つの差 $\Delta\theta$ (◆).

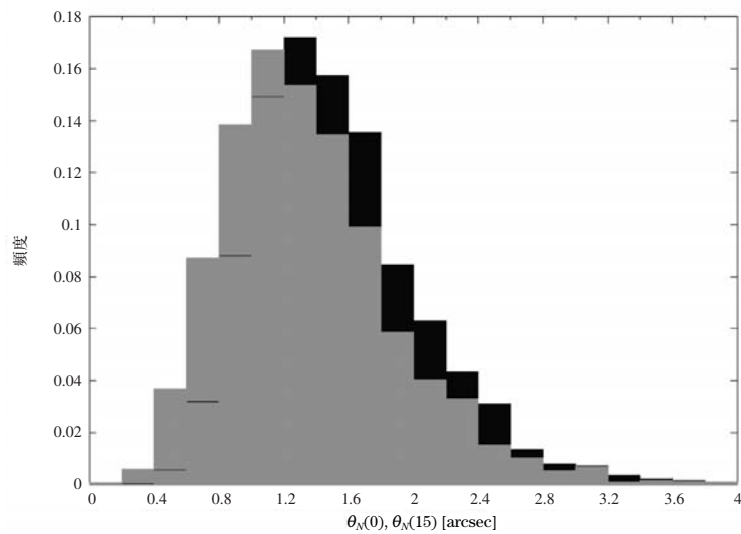


図 14. 図 13 DIMM で測定した $\theta_N(0)$ (黒) と 15m での値に変換した $\theta_N(15)$ (灰色).

6. まとめ

C_T^2 法はすばる望遠鏡の建設時においても用いられた、地上付近の接地境界層からのシーイングへの寄与を定量的に評価する方法である。我々は以前から進められている京都大学 3.5m 新技術望遠鏡計画に伴い、岡山天体物理観測所のサイト調査を行っている。

2002 年 2 月にタワーを設置し、2002 年 8 月から本測定を開始し、2003 年 11 月までに計 31 日分の測定データが得られた。この測定より求めた接地境界層のスケールハイトは最頻値が 6m~8m で、90%が 22.2m 以内に、80%は 15.1m 以内に含まれているという結果になった。また、測定データを季節毎に解析し、季節変化を調べると冬が接地境界層からのシーイングに対する影響が一番大きく、春や秋が小さいことが分った。

そして、測定タワーの近くで岡山観測所の気象モニターで気象データが取得されており気象との相関も調査した。測定した夜間の全てのデータでは風向は約 25%が北東からの風であった、それ以外の風向はだいたい同程度である。また、季節毎では冬は北風がほとんどであり、それ以外の季節はだいたいどの方向からも吹いている。風向と $\theta(0)$ 、 $\theta(15)$ の関係については北東や南からの尾根に沿って吹く風の際はナチュラルシーイングへの影響が小さく、尾根を横切る方向からや、188 cm ドームの方向からの風の際は影響が大きいことが分った。季節毎の違いについては冬はどの方向からも $\theta(0)$ 、 $\theta(15)$ が大きく、春は風向間の差が大きく、夏や秋は風向間の差は小さく、 $\theta(0)$ 、 $\theta(15)$ のみでは秋の方が影響は小さい。

また、我々は DIMM によるナチュラルシーイングの直接測定も行っており、 C_T^2 と同時測定することで任意の高さのナチュラルシーイングを推定することができる。DIMM で測定した地上でのナチュラルシーイングと 15m 上空でのナチュラルシーイングに換算した値のそれぞれの頻度分布の最頻値は $\theta_N(0)$ の 1.2 秒角~1.4 秒角の間と $\theta_N(15)$ の最頻値は 1.0 秒角~1.2 秒角の間であり、約 0.2 秒角

の差であった。

以上から、岡山観測所の C_T^2 タワーのサイトでは 15m 上方に望遠鏡の不動点を設置すると、接地境界層の影響が十分取り除かれることがわかった。

7. 謝 辞

本計画において、京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室の大谷浩氏をはじめとする皆様にはしばしば有用な助言を頂きました。また測定の際には岡山観測所の皆様には多大なるご協力を頂きました。大変感謝いたします。

参考文献

- 1) 京都・岡山 3.5m 新望遠鏡計画WG: 京都大学 3.5m 新技術望遠鏡計画説明書 (2004).
- 2) 岩田生 他: Sky Brightness at Okayama Astrophysical Observatory and Bisei Astronomical Observatory (2001).
- 3) 宮下暁彦, 野口猛, 中桐正夫, 山下泰正, 西村史朗, 田鍋浩義, 安藤裕康, 成相恭二, 林左絵子: マウナケア山頂 (JNLT サイト) の天文観測条件の評価, 国立天文台報, **1**, 61-70 (1989).
- 4) AO Science Workshop 2003
http://kolea.ifa.hawaii.edu/AO_Science_2003/index.html
- 5) 岡山天体物理観測所 40 周年記念誌編集委員会: 国立天文台岡山天体物理観測所 40 周年記念誌 (2001).
- 6) 吉田道利, 清水康広, 岡田隆史, 中村京子, 西原英治, 青木勉, 小澤友彦: 岡山天体物理観測所気象モニターの開発, 国立天文台報, **3**, 135-144 (1998).
- 7) John W. Hardy: Adaptive optics for astronomical telescopes, Oxford Univ. Press (1998).
- 8) 岩田生: ドーム候補地とサイト調査報告 (DIMM), 岡山ユーザーズミーティング集録 (2003).