

南極のドーム C における夏期サイト調査 の要約

(夏休みの宿題)

学部4年 沖田博文

アブストラクト

南極ドーム C での DIMM のデータによる夏期サイト調査報告。

2003-2004 年・2004-2005 年の夏期にそれぞれ 3 ヶ月カノーパスを使ってシーイングと isoplanatic angle を可視光でモニタリング。

シーイング・・・0.54 (median)

isoplanatic angle・・・6.8 (median)

シーイングは夕方に 0.4 の極小値



1. イントロダクション

フランスとイタリアは Concordia 基地を南極のドーム C(東経 123 度、南緯 75 度、海拔 3250m、気圧標高 3800m 以上)に建設し 2005 年から越冬開始。冷たく乾燥した風が吹き、良いシーイングが見込まれるので天文学に向いている。

90 年代、気球に取り付けた小型温度センサーによるサイト調査が南極点で行われた。南極点ではカタバ風(斜面に沿って降下する下降気流)があるので、地表面ではシーイングが悪かった(1.7)。しかし地表から 200m 上空(海拔 3050m)ではシーイングは 0.3 だったので、海拔 3250m にありさらに風の弱いドーム C で、良いシーイングがあると考えられた。

1995 年フランスとイタリアのグループはドーム C でサイト調査を Concordiastro という名前で始めた。このサイト調査は 2 種類の測定方法に基づいていて、GSM(装置名)を使った乱流パラメーター(シーイング r_0 、isoplanatic angle θ_0 、outer scale L_0 、coherence time τ_0)の可視光モニタリングと小型温度センサーを載せたバルーンによる垂直方向の屈

折 index structure constant $C_n^2(h)$ です。この調査は 2000-2001 年の夏から 2004-2005 の夏まで毎年行われた。

また太陽の観測は 1979-1980 から南極点で始まり、さらに良いシーイングが存在するドーム C では高い分解能の撮像とコロナグラフを得ることができる。

夏のサイト調査は一週間あたりのべ 80 人で行われた。越冬観測は今年からで、197 個のバルーンが打ち上げられ、ドーム C での風速のプロフィールはほとんど変化せず、乱流の大部分は熱勾配の急な (~ 0.1 /m) 地表 100m で起こる。

2.理論

2.1 シーイング

点光源を長時間露出した時の FWHM の広がりをシーイング といい、ある大気状態での角分解能を表す。Fried は r_0 という、シーイングサイズが Airy disc であるというような望遠鏡の口径と見なされるパラメーターを導入。

$$\varepsilon = 0.98 \times \frac{\lambda}{r_0} \quad (1)$$

ドーム C では DIMM でシーイングを継続して測定。DIMM は口径 $D < r_0$ の 2 つの開口を距離 $B > D$ 離れたものを筒先につけることで 2 つの像を結ぶ装置。Fried パラメーターは longitudinal と transversal 方向の分散から求められる。

2.2 Isoplanatic angle

Isoplanatic angle は AO にとって重要なパラメーターで、これは乱流の相関関数で同じ波面のゆがみに影響される 2 つの天体の最大角距離のこと。AO のシステムは近くの明るい参照星で動きを決めているので、この参照星は isoplanatic な領域になければならない。

isoplanatic angle θ_0 はスカラーのランダム変数で C_n^2 を積分することで得られる。これは 4cm の中央遮蔽のある 10cm の口径を使うことで星の瞬きに基づいておおよそ見積もることが出来る。

3.装置

3.1 コンコルディア観測所

高さ 5m の木製の観測台 ($\times 2$)

コンコルディア基地から風上の南西 300m

建物は 2m の圧縮した雪の上に建設

2 つの観測台の間に木製コンテナ、電源とコントロールシステム、越冬観測はファイバーでつないでコンコルディア基地から制御？

2 台目の望遠鏡は地上 1.5m に設置

3.2 望遠鏡

セレストロン C11(口径 280mm)で 2 倍バローレンズを入れて焦点距離 5600mm

鏡筒はインバー、主鏡支持装置の改良、ピント合わせに-90°でも使える 그리스

アストロフィジックス 900 赤道儀で、 그리스を変え、モーターに加熱装置

3.3 カメラ

PCO Pixelfly デジタル CCD カメラ、PCI ボードから制御

カメラは-15°C に保たれる保温ケースに入れて観測、2 倍バローは蓋を兼ねる

Table 1. Technical specifications of the CCD camera.

Number of pixels:	640 × 480
Pixel size:	9.9 × 9.9 μm
Binning modes:	horizontal: 1, 2 vertical: 1, 2, 4
Dynamic range:	12 bits
Exposure time:	10 μs to 10 s
Frame rate	40 fps without binning 76 fps in binning 2 × 2
Maximum QE	40% at 350 and 500 nm
Bandwidth (FWHM)	320–630 nm
ADU	7 e ⁻ /count
Readout noise:	16 e ⁻

4. 観測とデータ取得

4.1 DIMM によるシーイングの測定

C11 に直径 6cm、開口間距離 20cm のマスクを取り付け、一つは頂角 1° のウエッジプリズム、もう一方は平行平板を取り付ける。エアリーディスクのサイズは可視光で $\lambda/D=40\mu$ なので 2 × 2(20 × 20 μm) ビニングモードで観測。2 つの星像の距離は 1.6mm(80pixel)。

カノープス(V=-0.7、ドーム C では天頂角 $z=22^\circ \sim 52^\circ$)を用いて観測。12 月は太陽とカノープスがほぼ反対側となり観測に適している。

初回のシーイング測定は鏡筒が黒かったので鏡筒内気流によって失敗 鏡筒を白に変更 2003 年 11 月 21 日 ~ 2004 年 2 月 2 日、2004 年 12 月 4 日 ~ 2005 年 2 月 28 日に観測

4.1.1 空の背景光

空の背景光レベルは昼間の観測に大きな制限となる。2003年12月に半月かけて計測。背景光を $B(t)$ 、カノープスからの intensity を I_m とすると、Fig2 のようになる。

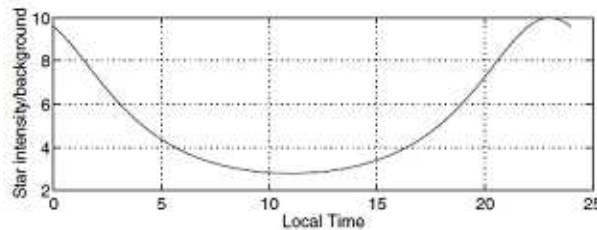


Fig. 2. Plot of the star image peak intensity I_m to the sky background level model $\langle B(t) \rangle$. From images taken in the period Dec. 1–15, 2003.

バックグラウンドは常に 10 ~ 30% あるが、測定に十分な flux が得られる

4.1.2 露出時間

Fried パラメータは限りなく短い露出時間で得なければならない。露出時間を τ 、 $\tau/2$ 、 $\tau/4$ 、 $\tau/8$ 、 $\tau/16$ 、 $\tau/32$ 、 $\tau/64$ 、 $\tau/128$ 、 $\tau/256$ と繰り返し行い、以下の計算をすると露出時間 0 の Fried パラメータが得られる。

$$\varepsilon(0) = \varepsilon(\tau)^{1.75} \varepsilon(\tau/2)^{-0.75} \quad (2)$$

露出時間は $\tau = 10\text{ms}$ (10 万分の 1 秒)

transverse 方向と longitudinal 方向の数%の違いは風速と風向、露出時間に依存。

4.1.3 シーイングの見積もり

2 分で 9,000 フレーム撮像が 1 セット(これを繰り返す)

撮像した画像はフラットフィールドで割る

星の重心から座標を求める

longitudinal 方向と transverse 方向それぞれ Fried パラメーター r_{0l} 、 r_{0t} を求める

露出時間を補正して longitudinal 方向と transverse 方向のシーイングを求める

シーイングはスカラーの関数なので、longitudinal と transverse で等しいはず
 $0.7 < \varepsilon_t / \varepsilon_l < 1.3$ の制限

最後に天頂角 z の補正 観測結果

4.1.4 スケールのキャリブレーション

ケンタウリ (明るい二重星、離角 10") を使ってピクセルの大きさを求める

600 フレーム撮影、ノイズを差し引いて計算 2×2 ピニングで $= 0.684 \pm 0.004''$

4.1.5 DIMM で得られた像の Strehl レート

Strehl レートは DIMM によって得られた 2 つの像のクオリティのことで、星像の最大の intensity と理論的なエアリーディスクの intensity の比で、収差や光学的な乱流に依存する。Strehl レートが 30% 以上だと良い星像と言える。

2004 年 12 月 10 日から 6 日観測し 3,400,000 の画像から、Strehl レート $\langle S_l \rangle = 0.56 \pm 0.11$ (左側)、 $\langle S_r \rangle = 0.53 \pm 0.11$ (左側)

4.2 Isoplanatic angle の測定

C11 に 4cm の中央遮蔽のある口径 10cm の開口マスクを筒先取り付け観測

2004 年 1 月 5 日 ~ 2 月 2 日に観測

手順は DIMM と同じ、カノーパス、 $\tau = 8 \sim 12\text{ms}$ 、 $\tau/2$ 、 $\tau/4$ 、 $\tau/8$ 、 $\tau/16$ と交互に露出バックグラウンドの平均値 b を引く

小さい値は 0 とみなす 大きい値は $5\sigma_b$ で、 σ_b とはバックグラウンドの分散のこと。

Isoplanatic angle の測定をすると星像は 2×2 ビニングで $N_l \sim 100\text{pixe}$ 、ビニングなしで $N_l \sim 250$ 伸びて写る

全 flux は積分することで求める

I 、 b 、 σ_b 、 N_l を記録する

2 分で 2×2 ビニングで 3300 フレーム、ビニングなしで 1400 フレーム撮像が 1 セット

以下のように処理

- ・露出時間 τ と $\tau/2$ ごとに 2 つに分ける
- ・それぞれ I 、 σ_l 、 s_τ 、 $s_{\tau/2}$ (s_τ : シンチレーションインデックス) を計算
- ・露出時間の補正
- ・ θ_0 を $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ で計算

5 結果

5.1 シーイングの変動

2003-2004 年、2004-2005 年で合計 31,597 回観測

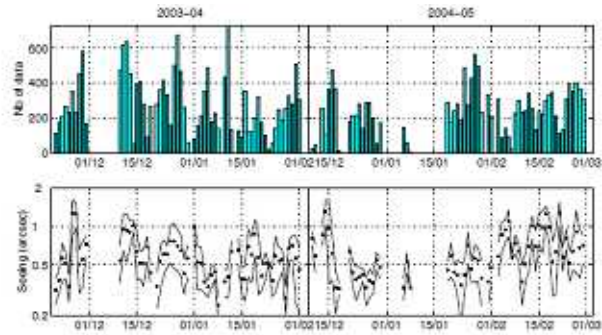


Fig. 4. *Top*: number of seeing data per day. *Bottom*: points are daily median seeing values and intervals containing 50% of values is delimited by lines. Data collected during the last two summer campaigns. Seeing axis is logarithmic

Table 2. Seeing statistics for the two summer campaigns. These numbers stand for the DIMM at $h = 8.5$ m.

Campaign	2003-04	2004-05	Total
Number of measurements	17 128	14 469	31 597
Median seeing (")	0.54	0.55	0.55
Mean seeing (")	0.65	0.67	0.66
Standard deviation (")	0.39	0.38	0.39
Max seeing (")	5.22	3.33	5.22
Min seeing (")	0.10	0.08	0.08

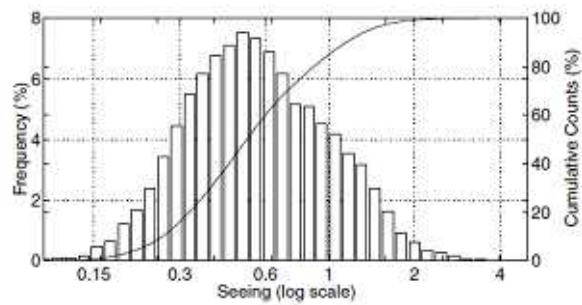
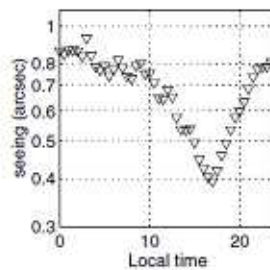


Fig. 5. Histogram (stairs) and cumulative histogram (continuous line) of seeing values for the 2003-2004 and 2004-2005 campaigns. Seeing axis is in logarithmic scale.

結果、太陽があるときのシーイングは非常によい

30 分毎のシーイングの時間変動

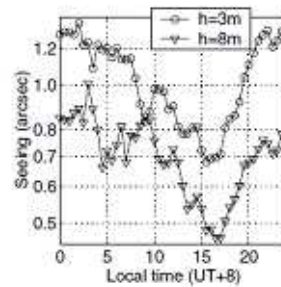


午後に最小値 0.4 を観測

それは高い位置の太陽と、200m ~ 400m にある温度勾配の不連続が正午ごろあって、それは夕方消え、20m ~ 30m の表面の反転層にとって変わることに関係。夜間、地上の反転層の上に望遠鏡があれば非常によいシーイングが見込まれる。反転層の高さはまだわからないが、越冬観測後にはわかる。

5.1.1 表面層の寄与

2 台の DIMM の同時観測(地上 3m、8m)で表面層のシーイングへの寄与を調査。すでに地上付近で大きな温度勾配があってほとんどの乱流は最初の数 10m で起きていると知られていた。地上 8m の望遠鏡のシーイングが Median/mean で 0.55/0.67" のとき、3m のそれは 0.93/1.03"。



この差は午後に顕著

turbulent energy ratio(TER)を以下に定義する

$$TER = \frac{\int_{3m}^{8m} C_n^2(h) dh}{\int_{3m}^{\infty} C_n^2(h) dh} \quad (3)$$

これは地上からの 5m の光路のエネルギーと全光路のエネルギーの比で、以下のように書き直せる。

$$TER = \frac{r_0(3m)^{-5/3} - r_0(8m)^{-5/3}}{r_0(3m)^{-5/3}} \quad (4)$$

この結果 48%、つまり乱流の半分は表面から 5m のところで起こる。

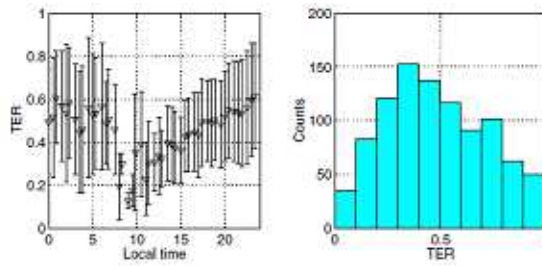


Fig. 7. Left: surface layer turbulent energy ratio (TER) as a function of time. Error bars are the standard deviation of the sample distribution. Right: TER histogram.

5.2 Isoplanatic angle とまたたき

6,000 フレーム以上観測し、 $\theta_0 = 0.5 \mu\text{m}$ で $\theta_0 = 6.8''$

isoplanatic angle は高度方向の乱流に敏感

Table 4. Isoplanatic angle (θ_0) and scintillation index statistics during the month of January 2004.

	$\theta_0 (")$	$s(\%)$
# of measurements	6368	6368
Mean value	6.8	0.88
Median value	6.8	0.63
standard deviation	2.4	0.90
Min value	0.7	
Max value	17.1	

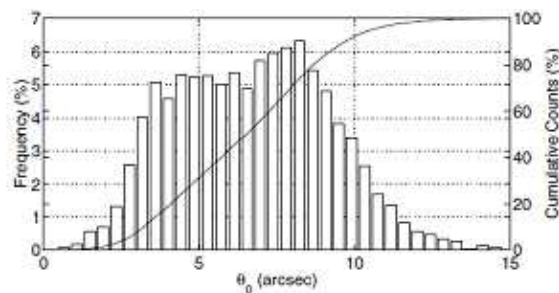


Fig. 8. Histogram (stairs) and cumulative histogram (line) of isoplanatic angle values for the campaign 2003–2004.

isoplanatic angle は他のサイトのおよそ 3 倍 10 倍の面積で AO が使える、高視野で AO が使える

Table 5. Comparison of Dome C isoplanatic angle with values observed at other sites.

Site	θ_0	Reference
Paranal	1.91	Ziad et al. (2000)
La Silla	1.25	Ziad et al. (2000)
Cerro Pachon (Chile)	2.71	Ziad et al. (2000)
Maidanak	2.47	Ziad et al. (2000)
Oukaimeden (Morocco)	1.58	Ziad et al. (2000)
South Pole	3.23	Marks et al. (1999)
Dome C	6.8	this paper

6. 議論と結論

シーイングが $<0.5''$ 、isoplanatic angle が他のサイトの3倍 太陽観測・赤外観測のベストサイト。気球に取り付けた小型温度センサーの観測から、温度プロファイルは地上100mまでの境界層で大きな勾配があることがわかった。

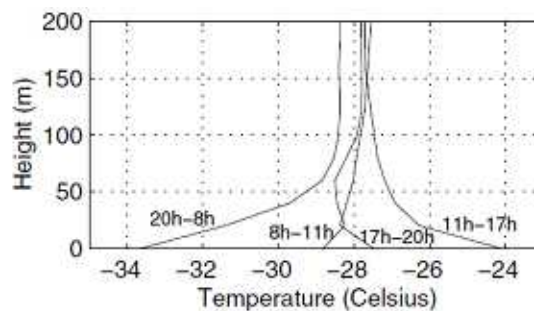


Fig. 10. Mean temperature profiles above the ground (from Aristidi et al. 2005), based on in-situ radiosoundings. On the vertical axis, height is counted from the snow (altitude 3260 m). The four curves correspond to measurements performed at four different times of the day.

isoplanatic angle とシーイングには関連は見られない。

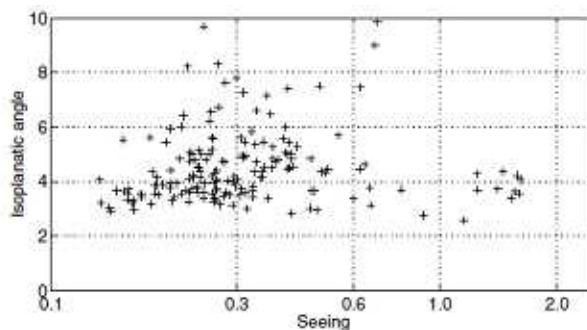


Fig. 11. Plot of the isoplanatic angle versus seeing (data collected in January 2004).

乱流は地上数十メートルで起こるのが支配的でシーイングの50%は地上5mで発生する。

C_n^2 は地上32mのタワーで温度を測定予定。地表層の上にどれだけの乱流があるか、地表

層の厚みはどれくらいか、地表層の乱流はどれくらいか。今後の冬期の観測結果が待たれる。