

南極ドームふじ基地の天文観測サイト利用に関する予備調査
—夏季接地乱流層の検出及び輸送中の振動記録—高遠徳尚^{1*}・浦口史寛¹・本山秀明²・福井幸太郎²・
田口 真²・市川 隆³・谷口友一郎³・村田千紘³Preliminary evaluation of Dome Fuji as a possible site for an infrared
astronomical observatory
—SODAR measurement of atmospheric turbulence in the boundary layer
in Antarctic summer—Naruhisa Takato^{1*}, Fumihiro Uraguchi¹, Hideaki Motoyama², Kotaro Fukui², Makoto Taguchi²,
Takashi Ichikawa³, Yuichiro Taniguchi³ and Chihiro Murata³

(2007年10月23日受付; 2007年12月18日受理)

Abstract: The Antarctic plateau can be the best astronomical observatory site on the earth because of its very dry air and low temperature. We have observed atmospheric turbulence in the boundary layer (up to the altitude of 1000 m above ice surface) by SODAR during JARE-48. We obtained valid continuous data of turbulence strength and three dimensional wind speed from Dec. 21, 2006 to Jan. 14, 2007. Our data show clear correlation between turbulent layer height and solar elevation. Also reported is the jolt measured during transportation from Cape Town to Dome Fuji.

要旨: 南極中央高地は水蒸気量が極めて少なく低温で、かつ気流の乱れが少ないため、地球上で最も優れた天体観測が行える場所である可能性が高い。その調査の一環として、ドームふじ基地において SODAR による接地境界乱流の測定を、第 48 次南極地域観測隊に委託して行った。2006 年 12 月 21 日~2007 年 1 月 14 日の連続 25 日間の有効な測定データ (乱流強度, 3 次元風速) が得られたので報告する。太陽高度に対応した乱流層高度の明瞭な日変化が見られた。また装置輸送時に測定した加速度計の記録も合わせて報告する。

1. はじめに

地上から天体を観測する場合、地球大気分子・原子によって光が吸収され、観測が可能な波長域がある。特に波長 $1\mu\text{m}$ 以上の赤外線域では、水蒸気による吸収の影響が深刻で

¹ 国立天文台ハワイ観測所. Subaru Telescope, 650 North A'ohoku Pl., Hilo, Hawaii 96720, USA.

² 情報・システム研究機構国立極地研究所. National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

³ 東北大学大学院理学研究科天文学専攻. Astronomical Institute, Tohoku University, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8578.

* Corresponding author. E-mail: takato@subaru.naoj.org

ある。そのため最近の望遠鏡は、できるだけ水蒸気が少ない標高の高い場所を選んで建設されてきた。現在地上で最も優れた望遠鏡サイトと認識されている場所は、ハワイ島マウナケア山頂（標高 4200 m）とチリ・アンデス山脈の太平洋側一帯（標高約 2500 m 以上）である。どちらも既に口径 8 m 以上の大望遠鏡が稼働しており、さらに次世代の口径 30 m 規模の超大型望遠鏡の建設地として、両地域の比較検討が進んでいる。

しかしここ数年、上記地域をしのぐかも知れない望遠鏡サイトとして、南極中央高地が注目を集めている。南極では南極点（標高 2835 m）で以前から天体観測が行われていたが、シーイング（地球大気の揺らぎによって悪化した星像の広がり大きさ）が悪く、観測地としての評価は良くなかった（Marks *et al.*, 1999; Travouillon *et al.*, 2003）。ところがドーム C（EPICA プロジェクトの掘削地）でヨーロッパ及びオーストラリアのグループが調査を行ったところ、極めて優れた天文サイトである可能性が見えてきた（Valenziano and Dall'Oglio, 1999; Lawrence *et al.*, 2004）。可降水量はマウナケアやアタカマ（標高 5000 m のアンデス山中）の 1/3-1/5、シーイングサイズも約半分、加えて気温が低いために大気からの熱雑音が少なく、さらに高感度の観測が可能と見込まれる。そのためヨーロッパでは、ドーム C での天文学の可能性を集中的に調査する活動が進行中である（Epchtein and Candidi, 2007）。

南極の中で天体観測に適した場所は、地形的に「ドーム」と呼ばれる地域で、そこでは風が弱く空気の乱流が少ないと考えられている。このような場所で現在までに基地が建設されている、あるいは建設予定の場所が、ドーム C（標高 3280 m）、ドームふじ（3810 m）、ドーム A（4093 m）である。ドーム A は中国が調査を始めており、オーストラリア、アメリカと共同で 2007/2008 年から本格的な観測を開始することになっている。

幸い日本はドームふじに氷床コアを採掘する基地を運営しており、ドームふじの調査を主導できる立場にある。我々の当面の目標は、ドームふじに口径 2-3 m 程度の赤外線望遠鏡と口径 10 m サイズのサブミリ波電波望遠鏡を建設し運用することである。そのためのサイト調査の予備調査として、第 48 次南極地域観測隊に依頼して SODAR（Sound detection and ranging）による大気境界層の観測を委託観測として実施した。本報告ではその結果を報告する。また装置の輸送中の振動も、加速度計によって記録したので、その結果も報告する。

2. SODAR の準備及び測定

南極天文台構想を本格的に国立極地研究所と相談を始めたのは 2005 年秋で、2006 年度から実施される南極地域観測第 VII 期計画策定後であった。同行者あるいは越冬隊員としての参加を希望したが、実現しなかった。そのため第 48 次隊に装置一式を委託した。日本から輸送した物資の輸送経路は表 1 の通りである。

観測装置である SODAR は音波を大気中に発して、乱流で散乱して戻ってくるエコーを受信し、乱流強度、風向風速の高度プロファイルを測定する装置（REMTECH 社製 PA-1）であ

表 1 SODAR の輸送ログ

Table 1. Itinerary of SODAR transportation from Japan to Dome Fuji Station.

| 日付 | 地点 |
|-------------|--|
| 2006年10月12日 | 日本(成田)発(空輸) |
| 2006年10月13日 | ケープタウン着 |
| 2006年11月8日 | ケープタウン発(空輸) |
| 2006年11月9日 | ノボラザレフスカヤ着(空輸) |
| 2006年12月3日 | 内陸航空拠点2(ARP2)着 |
| 2006年12月4日 | ARP2 出発 雪上車にて輸送 |
| 2006年12月12日 | ドームふじ基地着 |
| 2006年12月17日 | SODAR 設置 ヒーターからノイズ⇒ヒーター切で測定 |
| 2006年12月21日 | 定常観測開始 |
| 2007年1月14日 | 測定終了、撤収 (25日間連続測定) 雪上車で昭和基地、しらせで日本へ |
| 2007年4月16日 | 国立極地研究所到着 |

表 2 SODAR の諸元

Table 2. Specifications of SODAR PA-1.

| 項目 | 仕様 |
|-------------|---|
| 製造会社 | REMTECH, Inc (フランス) |
| モデル | PA-1 (with software enhancement) |
| 音響出力 | 1 W |
| 最大消費電力 | 130 W |
| 発信周波数 | 約 2 kHz |
| 構成: | |
| (1) 音響アンテナ | 一台、755 mm × 755 mm × 280 mm, 40.5 kg |
| (2) アンテナ設置足 | 4本、60 mm 角 × 855 mm (片端に 150 mm 角プレート付), 5.4 kg |
| (3) コントローラー | 一台、530 mm × 570 mm × 240 mm, 19 kg |
| (4) 信号ケーブル | 一本、50 m, 13 kg |
| (5) 音響カフ | 4枚、1300 mm × 400 mm × 40 mm, 12 kg/4枚 |

る。その仕様を表 2 に示す。国立天文台ハワイ観測所所有のこの装置は、ハワイで試験運用した後日本に空輸し、国立天文台・三鷹で動作を再確認して国立極地研究所に引き渡された。装置は成田を 2006 年 10 月 12 日に出発し、南アフリカ・ケープタウン経由でロシア・ノボラザレフスカヤ基地まで空輸され、ここで輸送機トラブルのために 1 カ月近く停滞したのち、再び航空機にてドームふじへの中継地点である内陸航空拠点 2 (ARP2: 72°56.5'S, 43°



図 1 ドームふじに設置した SODAR. ヒーターはノイズ源となったため使用しなかった
Fig. 1. SODAR installed at Dome Fuji Station (Photo by H. Motoyama, JARE-48).

27.3'E; 標高 3040 m, ドームふじまで約 500 km; MD245 in Kamiyama *et al.*, 1994) へ移動. その後音波アンテナとコントローラーは雪上車の屋上, その他は橇に積まれてドームふじ基地まで輸送された. ドームふじ基地到着は 2006 年 12 月 12 日であった. 資材の積み下ろしはすべて人力で行うため, 一つあたりの荷物は 2 人で運べる重量 (50 kg 以下) に分割した.

屋外に設置した音波アンテナは, 屋内に設置するコントローラーと接続する長さ 50 m のケーブルが届く範囲で, できるだけ騒音源, 熱源から離して設置した (図 1). 音波アンテナの設置の際には, 偏角を考慮して方位磁針を使って南北方向を設定した. コントローラーの電源は USA 仕様のため, 基地所有のスライダックで 115 V に昇圧して用いた.

音波アンテナには低温対策用にメーカー指定のシールド付きのヒーターを設置し, ヒーターの電源もコントローラー系とは別電源から取り, 電源線も信号線とは十分に離れたが, これがノイズの原因となり, SODAR 運用開始直後は正常なデータが得られなかった. 日本で確認した時には問題にならなかったが, 日本では大気乱流が大きくエコー強度がドームふじに比べずっと強かったためと考えられる. ヒーター電源を切った後は正常なデータを取得できた. 特に低温下でも動作に問題は起こらなかった.

また音波アンテナには標準では音響カフ (吸音材の囲い) を取り付けて, 周辺からの不要音波の混入を低減するが, 今回は輸送上の制約から使用しなかった. ハワイでの試験運用の経験から, ドームふじのような音響環境の良いところでは, 音響カフを使用しなくても測定に影響は無いと判断した.

当初, 音波アンテナにはその形状から雪が吹きだまることが懸念されたが, 幸い音響ホーンへの積雪は皆無であったため, 測定中に雪払いをする必要は無かった (図 2).



図 2 撤収時の SODAR. 音響ホーン部に雪の吹きだまりは発生しなかった.

Fig. 2. A picture taken at the end of the measurements. No snow drift covered the acoustic horns (photo by H. Motoyama, JARE-48).

3. SODAR による測定データ

ヒーターノイズの問題が解決してから撤収まで、2006年12月21日から2007年1月14日までの25日間、連続してデータを取得することができた。図3に乱流強度の高度分布の時間変化を示す。図3では乱流強度が強い高さが明るく表示されている。2007年1月8日0545 UTCに測定パラメーターを変更している。その日までは測定開始高度は地上40m、高度分解能20m、それ以後は開始地上高25m、高度分解能25mである。測定された乱流強度を微熱乱流係数 C_T^2 に変換するには、装置の校正が必要である。南極での測定後に国立天文台岡山観測所の30mタワーに取り付けた微熱乱流測定装置との同時測定を行い、現在校正データを検討中である。図3は校正を行っていない値である。

地表300mまでに明瞭な日変化が見られる。図4は全データを1日ごとに時刻を合わせて重ねたもので、05 UT頃から雪面で乱流が発生発達しながら上昇し、10 UT頃に最大高度(約300m)に達して消滅している。この高度は、バルーン観測による同時期の温度プロファイル(Hirasawa *et al.*, 1999)に見られる温度逆転層の高度と、ほぼ一致する。

高度600mと1000mに図3で乱流の強い領域が見られるが、これは装置の特性の可能性があるため、装置校正をしてから議論する必要がある。

地上25m以上1250m以下の風向は時間とともに変化するが、高さ方向の変化は少なくほぼ一定である(図5)。測定期間の平均風向は約130°(SE)であった。また風速は地上40m付近では8m/sであるが、高度と共に増加し、地上1000mでは12m/sに達する(図6)。

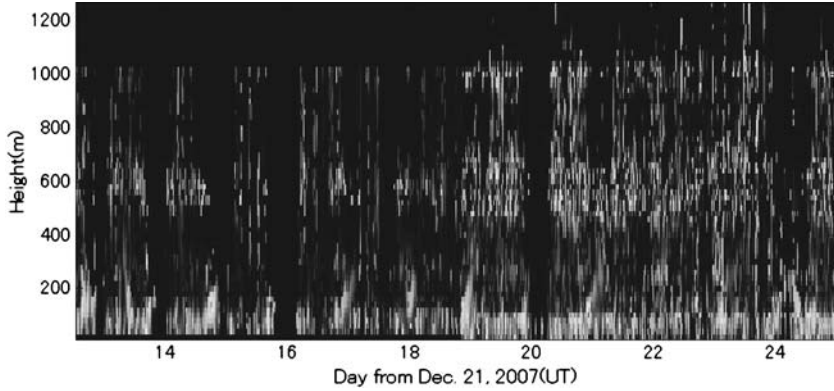


図 3 乱流強度高度プロファイルの時間変化. 1日ごとに混合層が発達しては消滅している様子が捉えられている. 高度 600 m と 1000 m 付近に乱流層があるように見えるが, 装置の特性の可能性があるので, 正確な校正が必要である.

Fig. 3. Time variation of the atmospheric turbulence profile up to 1200m above ground level. Diurnal variation of the mixed layer is clearly seen. Turbulence layers seen at $H=600\text{ m}$ and 1000 m might be instrumental and need to be calibrated.

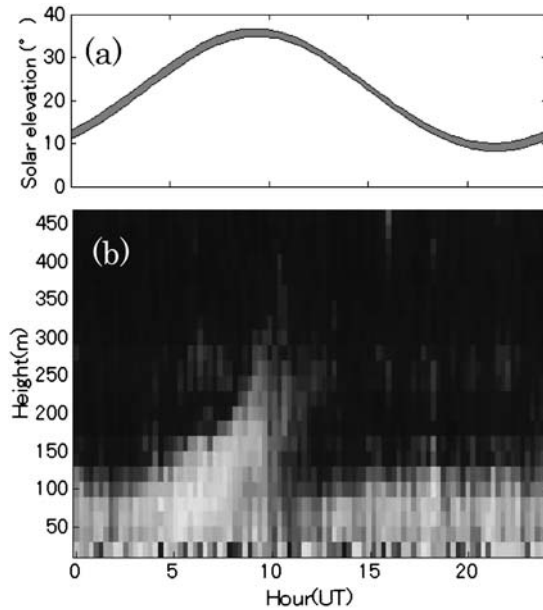


図 4 (a) 太陽高度の日変化 (上の線: 2007 年 12 月 21 日~下の線: 2008 年 1 月 14 日), (b) その期間の高度 500 m までの乱流強度の日変化の平均. 05 UT 頃から雪面近くで乱流が発達し, 10 UT には約 300 m まで上昇して消滅している. 10-12 UT は地表付近まで乱流が少ない.

Fig. 4. (a) Solar elevation during our observation (upper line: Dec. 21, 2007, lower line: Jan. 14, 2008), and (b) averaged diurnal variation of turbulence strength up to $H=500\text{ m}$. The turbulence onsets around 5h (UT) and develops up to $H=300\text{ m}$ at 10h (UT). The turbulence is weak between 10-12h (UT).

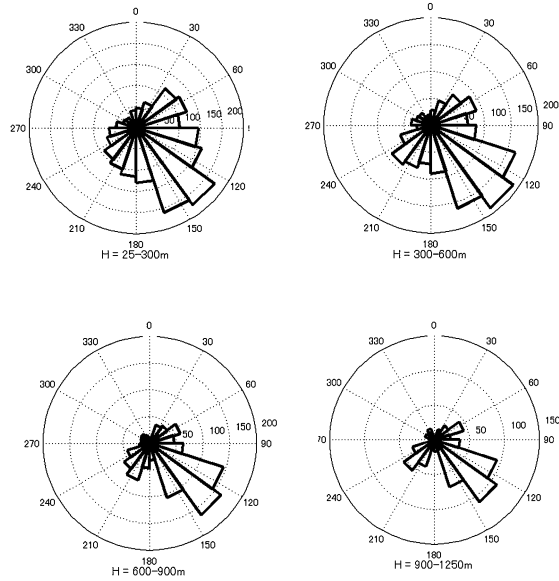


図 5 2006年12月21日から2007年1月14日(UT)までの風向の頻度分布(北が上, 東が右). 左上から高度25-300 m, 300-600 m, 600-900 m, 900-1250 m. 風向の高度変化は少なく, ほぼ南東の風が卓越している.

Fig. 5. Histogram of the wind direction at Dome Fuji from Dec. 21, 2006 to Jan. 14, 2007(UT) (from left to right, $h=25-300$ m, $300-600$ m, $600-900$ m, $900-1250$ m). South-East wind prevails from $h=25$ m to 1250 m in this period.

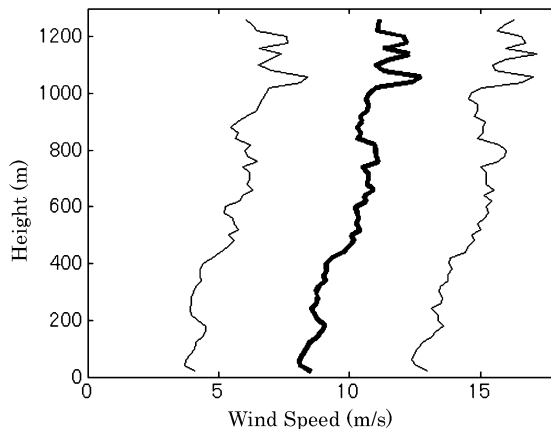


図 6 2006年12月21日から2007年1月14日(UT)までの平均風速の高度分布. 太線が平均値, 細線が $\pm 1\sigma$ の範囲を表している.

Fig. 6. Vertical profile of the mean wind speed at Dome Fuji from Dec. 21, 2006 to Jan. 14, 2007 (UT). The thick line shows the mean velocity profile; thin lines indicate the $1-\sigma$ data range.

4. 輸送振動の記録

将来ドームふじに天文台を建設する場合、望遠鏡の主鏡や観測装置など壊れやすい荷物を運搬しなければならない。現状の輸送手段でどの程度の衝撃が荷物に加わるかを調査しておくことは、将来の輸送手段を検討するために有用である。そこで、今回 SODAR を運搬するにあたり、小型の加速度計を荷物に取り付けて、運搬中、特に雪上車輸送中の衝撃を記録した。SODAR の運搬は、衝撃に弱い音響アンテナ部とコントローラーは雪上車の屋上、その他の部品は橇に取り付けた。

使用した加速度計は（株）スリック製 G-MEN DR10M2 及び NR50 である。DR10M2 は XYZ3 次元方向の加速度を 10G まで 0.1G の分解能で記録できる。NR50 は最大 50G まで 3 次元方向の加速度を記録できるが、分解能は 0.5G で加速度の正負は区別できない。DR10M2 は 10ms ごとに加速度を計測して、10 分間の最大値を記録するように設定した。NR50 は 125ms 間隔で測定し、同じく 10 分間の最大値を記録した。どちらの加速度計も気温も同時に記録される。

使用に先立って、低温での動作を冷凍庫を使って行った。その結果 DR10M2 は -75°C で $+0.3\text{G}$ のオフセットが生じるが、 -75°C でも正常に動作を続けることがわかった。一方 NR50 は正常に動作する温度は -50°C までで、それより低温では異常な値を記録した。今回の輸送は南極の夏季のため、 -50°C まで気温が低下することはなく、異常値は記録されなかった。なお、それぞれの電源は単 4 電池 3 本で供給するのが標準の使い方であるが、低温下での長時間記録のために、さらに外付けで単 3 電池 3 本を取り付けた。電池は（株）富士フィルム製（Energizer）のリチウム電池を使用した。

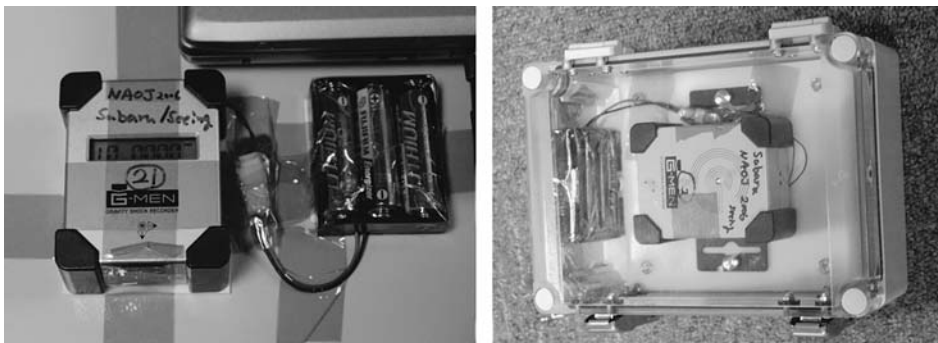


図 7 (左) SODAR コントローラーに取り付けた加速度計 DR10M2 と外付けした単 3 電池 (3 本)。(右) 橇に積載するために防水ケースに入れた NR50。橇に積載する際には気泡緩衝材で一重にくるんだ。

Fig. 7. (left) Jolt logger DR10M2 attached to the SODAR controller. (right) NR50 housed in a water-proof case. This case was wrapped by air cellular cushioning material for loading on a sledge.

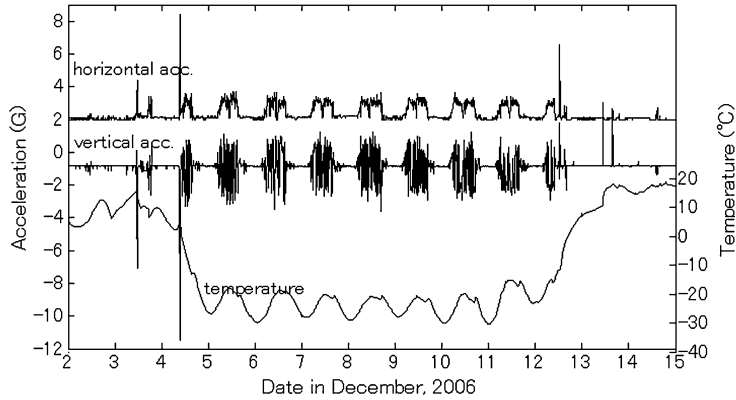


図 8 雪上車屋根に積載した SODAR コントローラーの振動と気温の記録. 水平方向の加速度は 2G だけオフセットして表示してある ($1G=9.8\text{ms}^{-2}$).

Fig. 8. Jolt and air temperature recorded by DR50M2 attached to SODAR controller loaded on the top of snow vehicle. The plot for horizontal acceleration is offset by +2G for clarify ($1G=9.8\text{ms}^{-2}$).

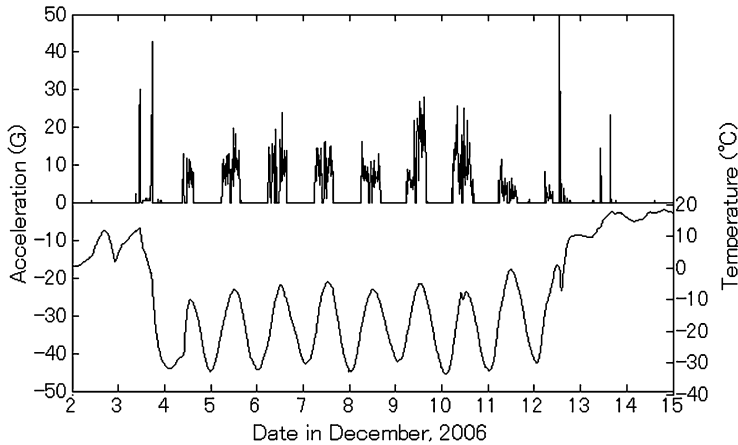


図 9 櫓に積載した荷物の振動と気温の記録. 3次元方向を合成した全加速度を表している. 12月12日に加わった衝撃は測定範囲 (50G) を超えている.

Fig. 9. Jolt (total acceleration) and air temperature recorded by NR50 loaded on sledge. Jolt logged at Dec. 12 exceeded the range of acceleration measurement (50G).

小さな加速度まで記録できる DR10M2 は SODAR のコントローラーの金属ケースに両面テープとカプトンテープで貼り付けた. コントローラーはダンボール箱に発泡スチロールで支持された状態にして梱包した. 一方 NR50 はメーカー別売りの防水ケース (型式 Bb-BOX) に入れて, 櫓の荷物と一緒に運搬した (図 7). どちらの加速度計も, データの記録は加速度センサー内蔵のタイマーで 2006 年 11 月 10 日 00 UT から開始するように設定した. データ

は2006年12月18日まで記録できた。

図8, 9に雪上車で運搬中に記録された加速度と気温を示す。日中に移動中は雪上車屋根では最大2G程度、橇では最大25G程度の加速度が生じている。しかし最も大きな衝撃が加わったのは荷物の積み下ろし時(12月3, 4日及び12日)で、コントローラーには10G, 橇荷には50G以上の衝撃が加わったことがわかる。ちなみに、ハワイ島にあるすばる望遠鏡の主鏡を輸送する際の許容加速度は0.5Gであった。実際に鏡を運搬するには、十分な対策が必要である。

5. 終わりに

今回はドームふじで初めて、天体観測サイトとして適した場所であるか否かの調査の第一歩を行うことができた。夏季のみのデータではあるが、波長3 μ m以上の赤外線域では、南極では太陽光の散乱が小さく太陽高度も低いため、太陽が昇っていても観測できる可能性があり、有益なデータである。特に0500-1100 UTを除けば混合層の発達が弱いことがわかったのは有意義であった。

しかし、南極の優れた特徴が現れるのは冬季である。今後は是非冬季の調査を行いたいと考えている。冬季は特に接地逆転層が強く、星像を乱す乱流が雪面付近に強く発達する。望遠鏡はその接地乱流層よりできるだけ上に設置したい。そのため雪面から高さ40-50mまでの乱流強度分布の実測が、望遠鏡構造の設計にとって重要となる。霜に強い超音波センサーを使った微熱乱流計をそのために開発中で、それらをタワーに取り付けた観測を是非行いたいと考えている。

謝 辞

今回の委託観測を行うにあたっては、多くの方のご協力を頂いた。第48次南極地域観測隊の方々には、観測装置の運搬・設置・運用・撤収のすべてを行っていただいた。平沢尚彦氏(国立極地研究所)には、南極の気象について貴重な助言を頂いた。国立極地研究所長の藤井理行氏には南極天文台計画全体にわたってご理解、ご助言を賜った。美濃和陽典氏(国立天文台)には、SODARの調整でお世話になった。この場を借りて深謝する。

文 献

- Epchtein, N. and Candidi, M. (2007): Proceedings of 1st ARENA Conference on "Large Astronomical Infrastructures at CONCORDIA, Prospects and Constraints for Antarctic Optical/IR Astronomy", Roscoff, France, October 16-19, 2006. Les Ulis, EDP Science, 356 p (EAS Pub. Ser. 25).
- Hirasawa, N., Hayashi, M., Kaneto, S. and Yamanouchi, T. (1999): Data of Project on Atmospheric Circulation and Material Cycle in the Antarctic, Part 1. Aerological Sounding Data at Dome Fuji Station in 1997. JARE Data Rep., 238 (Meteorology 32), 183 p.
- Kamiyama, K., Furukawa, T., Maeno, H., Kishi, T. and Kanao, M. (1994): Glaciological data collected by the 33rd Japanese Antarctic Research Expedition in 1992. JARE Data Rep., 194 (Glaciology 21), 67 p.

- Lawrence, J.S., Ashley, M.C.B., Tokovinin, A. and Travouillon, T. (2004): Exceptional astronomical seeing conditions above Dome C in Antarctica. *Nature*, **431**, 278–281.
- Marks, R.D., Vernin, J., Azouit, M., Manigault, J.E. and Clevelin, C. (1999): Measurement of optical seeing on the high Antarctic plateau. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **134**, 161–172.
- Travouillon, T., Ashlely, M.C.B., Burton, M.G., Storey, J.W.V., Conroy, P., Hovey, G., Jarnyk, M., Sutherland, R. and Lowenstein, R.F. (2003): Automated Shack-Hartmann seeing measurements at the South Pole. *Astron. Astrophys.*, **409**, 1169–1173.
- Valenziano, L. and Dall’Oglio, G. (1999): Millimetre Astronomy from the high Antarctic Plateau: Site Testing at Dome C. *Publ. Astron. Soc. Aust.*, **16**, 167–174.