

南極大陸内陸高原・ドームふじ基地の 接地境界層、自由大気、大気対流



○沖田博文、市川隆(東北大学)、Colin S. Bonner, Michael C. B. Ashley (UNSW),
小山拓也、栗田健太郎(東北大学)、
高遠徳尚(ハワイ観測所)、本山秀明(国立極地研究所)

1.1 南極大陸内陸高原ドームふじ基地

- 南緯 77° 19'
- 東経 39° 42'
- 標高 3,810 m
- 氷床のなだらかな円頂丘
- 見渡す限りのなだらかな雪原

Yamanouchi et al. (2003)

特異な気象
特異な地理



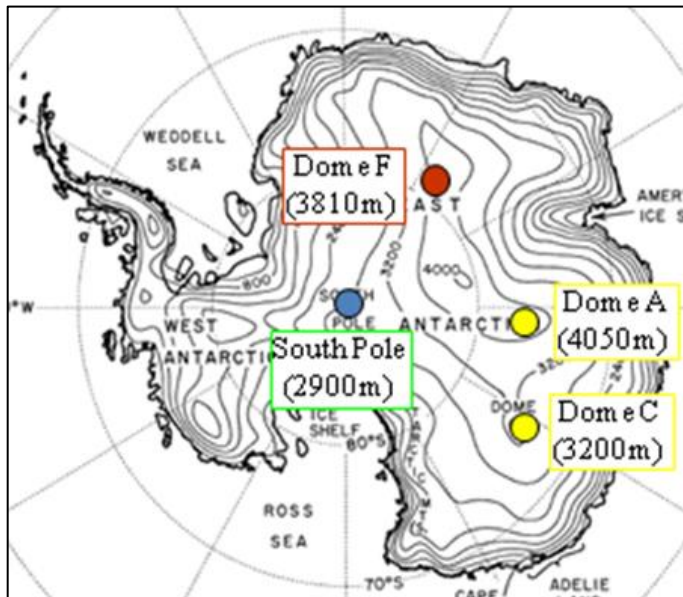
- 平均気圧 0.6
- 平均気温 -54.4 °C
- 最低気温 -79.7 °C
- 快晴率 68 %
- 平均風速 5.8 m/s
- 平均PWV 0.25 mm
- 冬期平均PWV 0.16 mm
- 連続 2,400 時間の夜

Yamanouchi et al. (2003); Saunders et al. (2009)

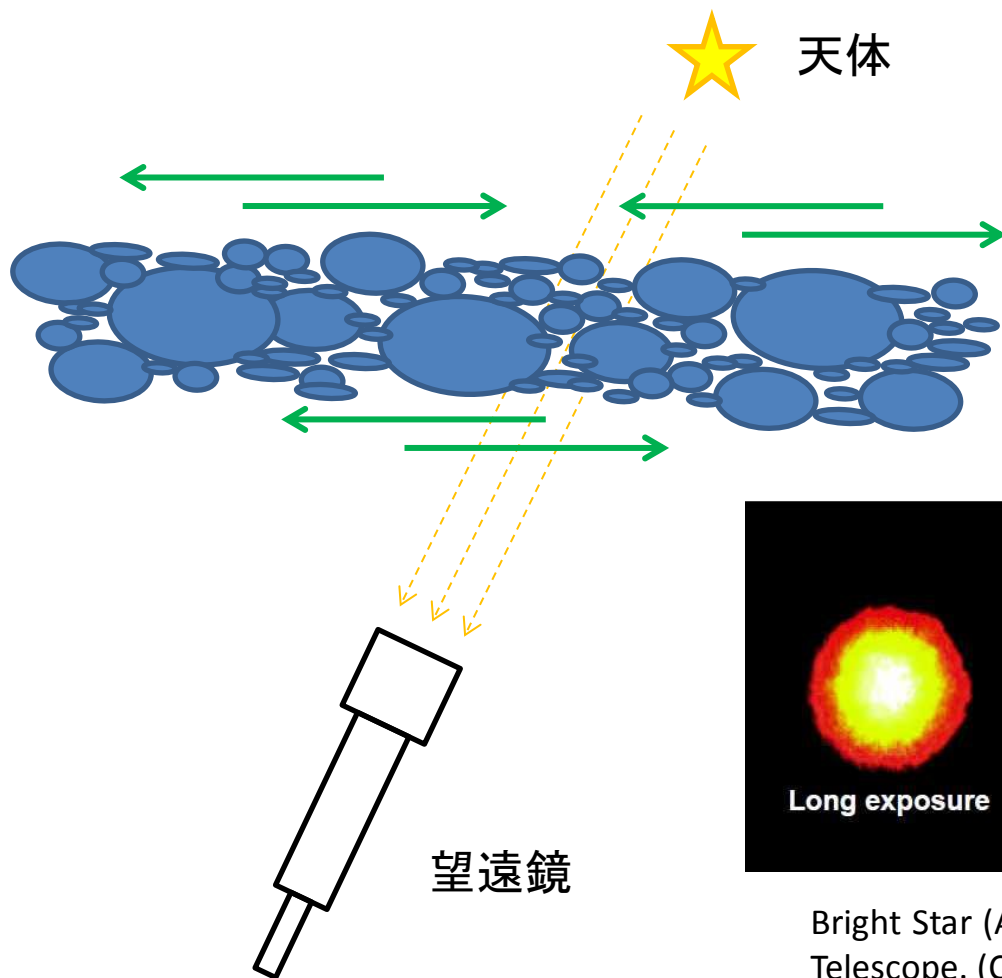
地球上で最も特異な気象・地理は赤外線天文学
にとって大きな利益をもたらす

- 大気、望遠鏡の熱放射が小さい
- 大気吸収が少ない

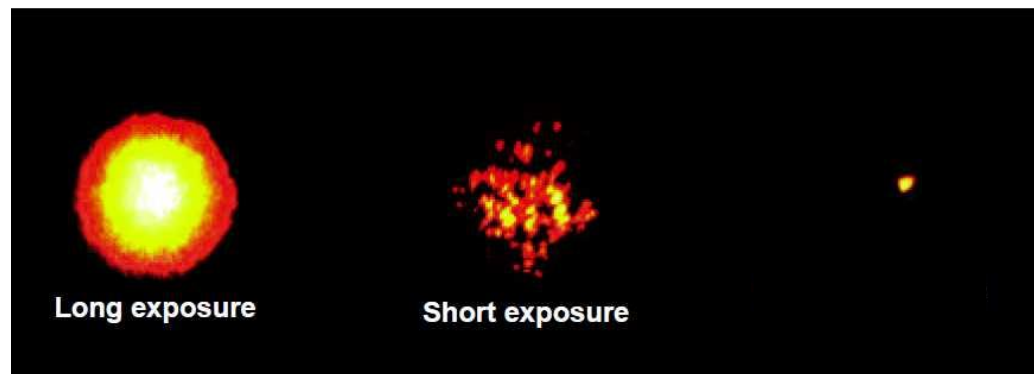
南極天文コンソーシアムでは2020年の観測開始を目指し、口径2.5mの赤外線望遠鏡と10mのサブミリ電波望遠鏡の建設プロジェクトを推進している。



1.2 シーイング

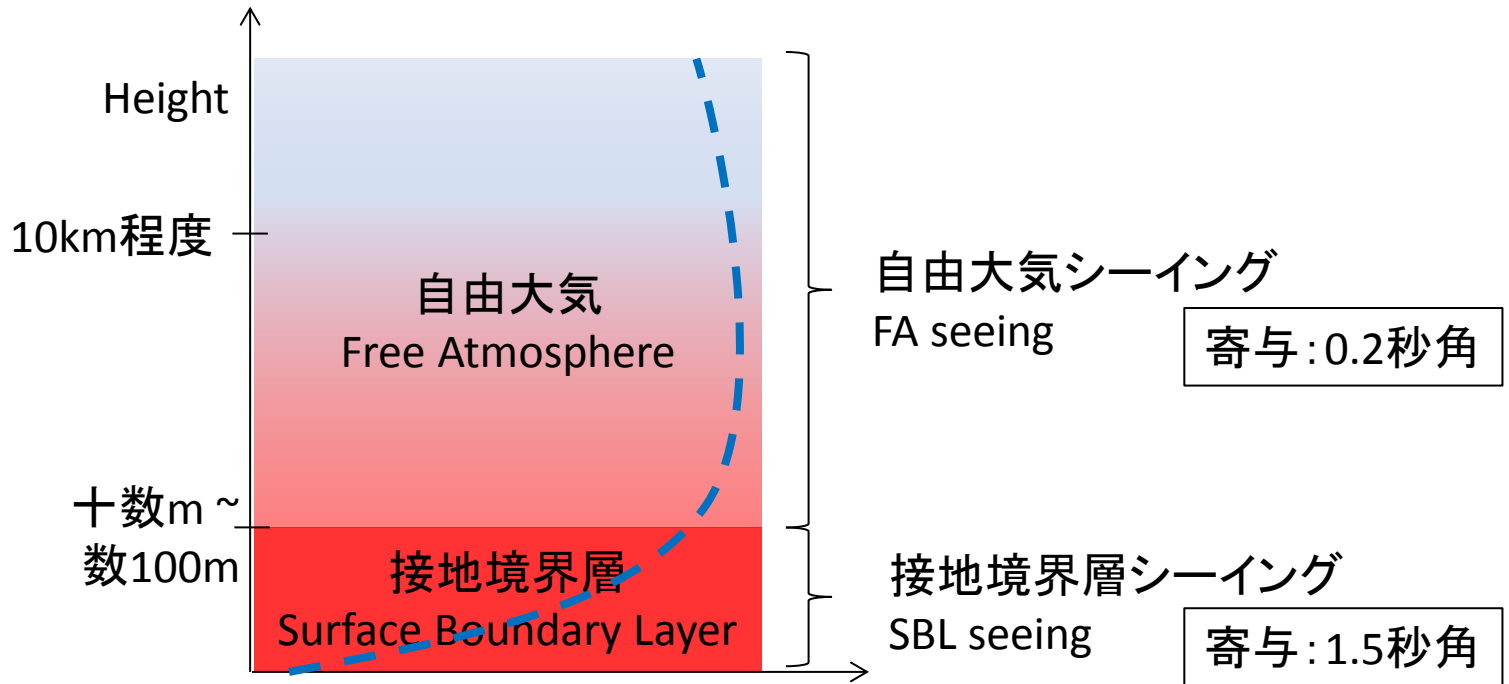


地球大気
(乱流層)



Bright Star (Arcturus) Observed with Lick Observatory's 1-m Telescope. (Copyright: Claire Max, http://cfao.ucolick.org/EO/resources/History_AO_Max.pdf)

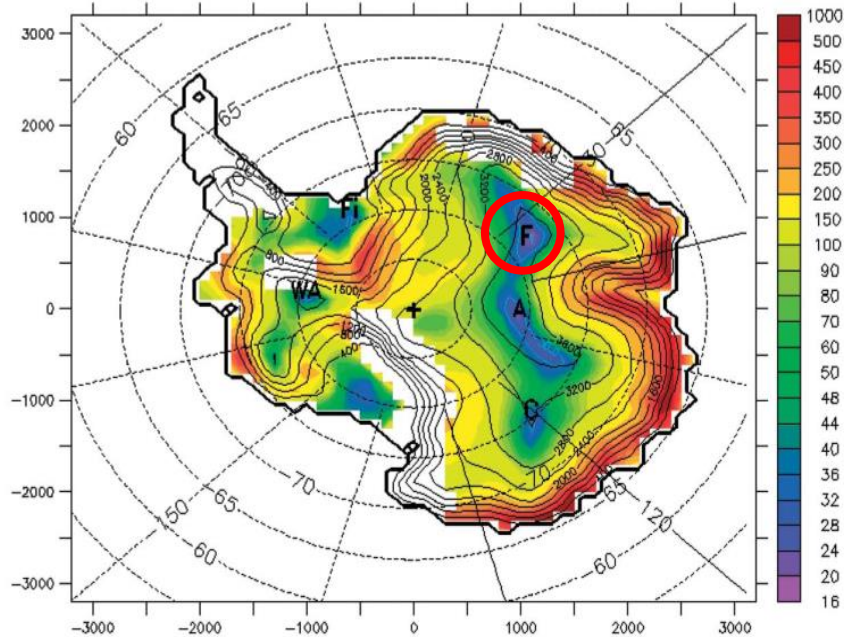
1.3 大気構造



Astronomical seeing on the Antarctic plateau is generally considered as the superposition of the contributions from two layers; **the surface boundary layer** and **the free atmosphere** above.

※可視光(0.5 μ m)の値

1.4 先行研究(1)



※可視光($0.5\mu\text{m}$)の値

シミュレーションによる接地境界層
の高さ分布

Swain & Gallee (2006)

- シミュレーションの結果から、ドームふじの接地境界層の高さは 18m
- サイト調査から、南極点の接地境界層の高さ270m (Travouillon et al. 2003)
- サイト調査から、ドームCの // 約30m (Aristidi et al. 2009)
- サイト調査から、ドームAの // 13.9m (Bonner et al. 2010)

現地調査は未実施 → 南極観測隊に参加してサイト調査を実施

1.5 先行研究(2)

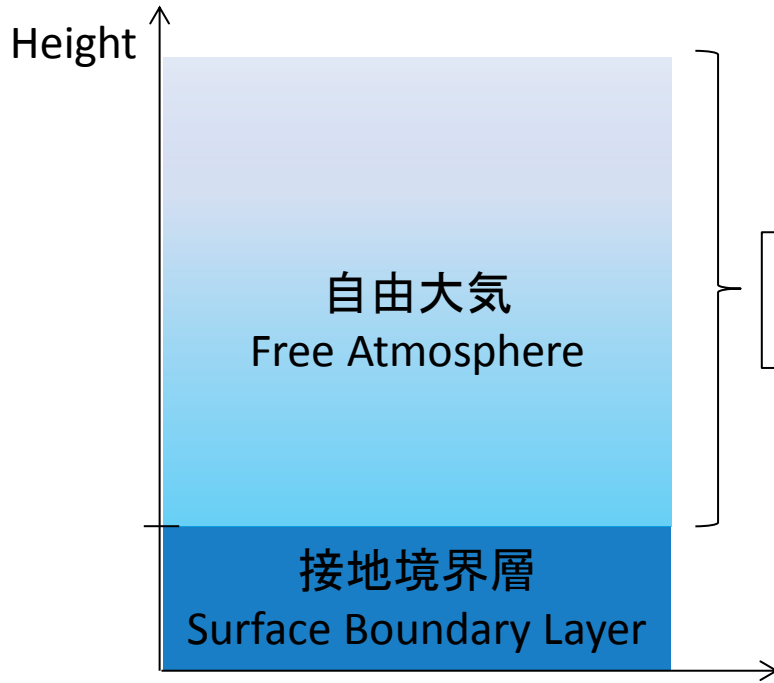


図2 大気構造の模式図

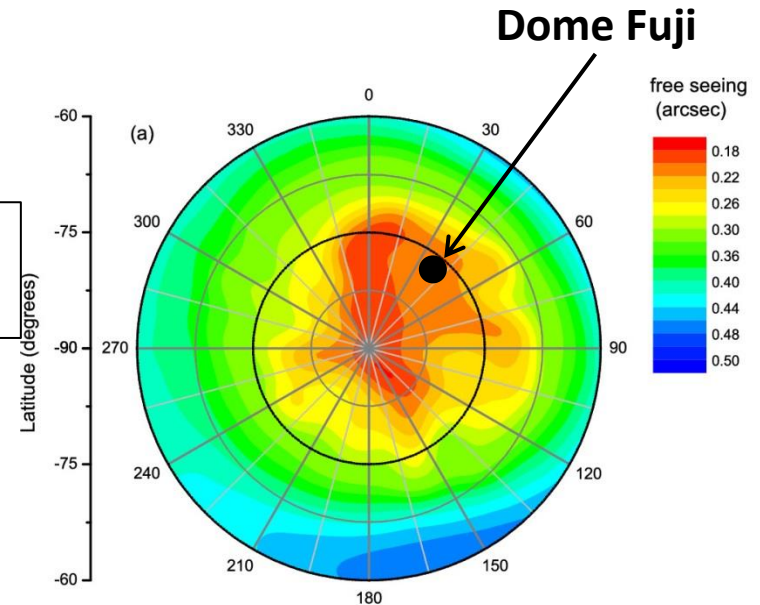


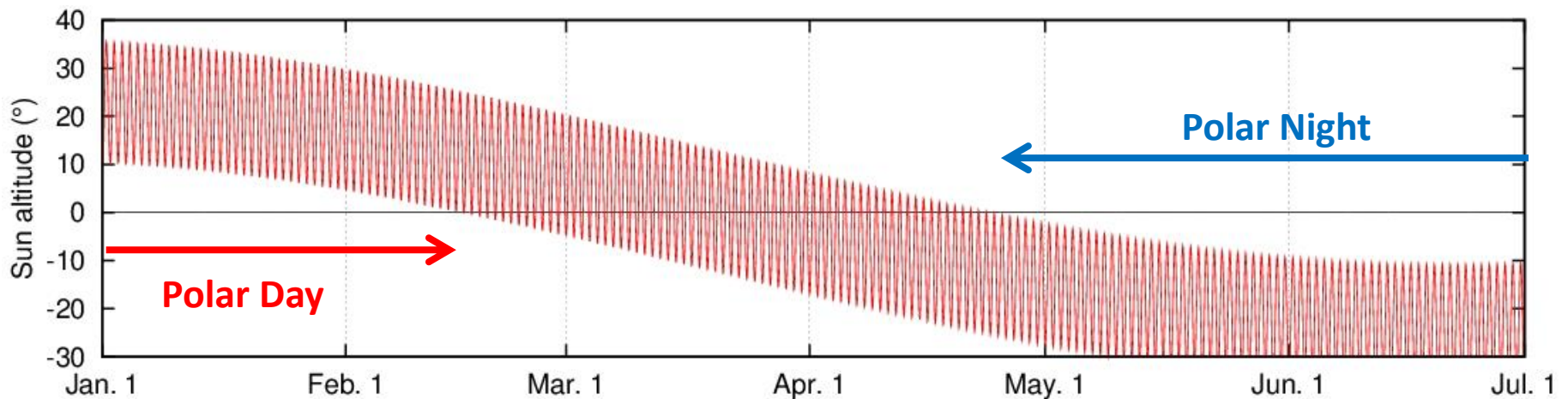
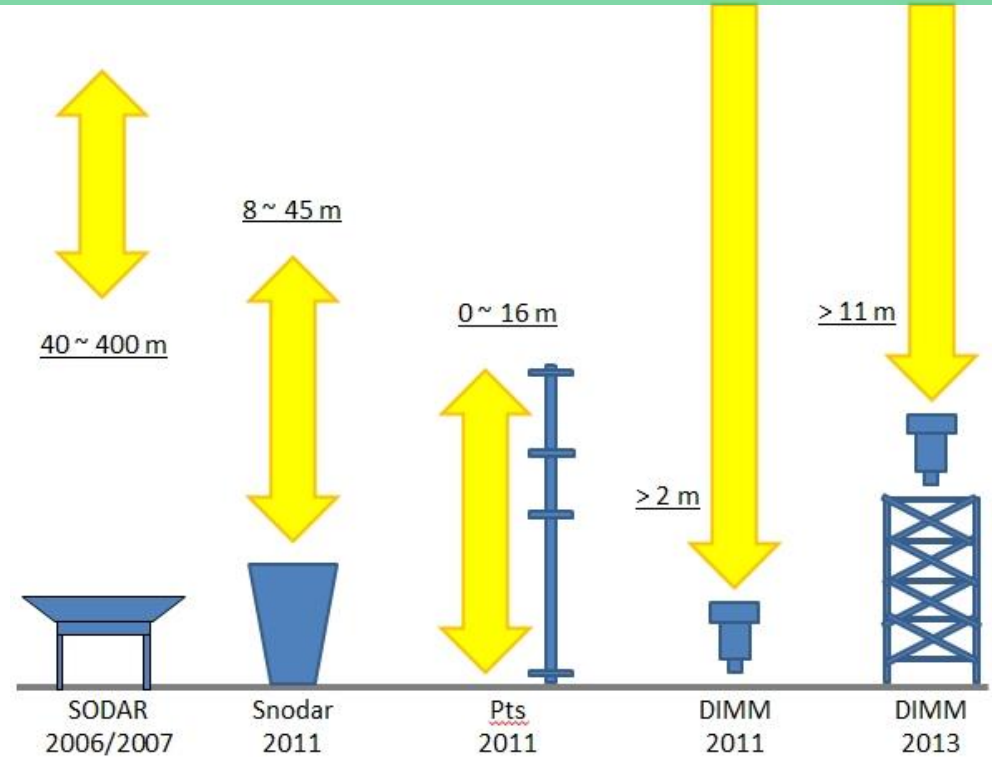
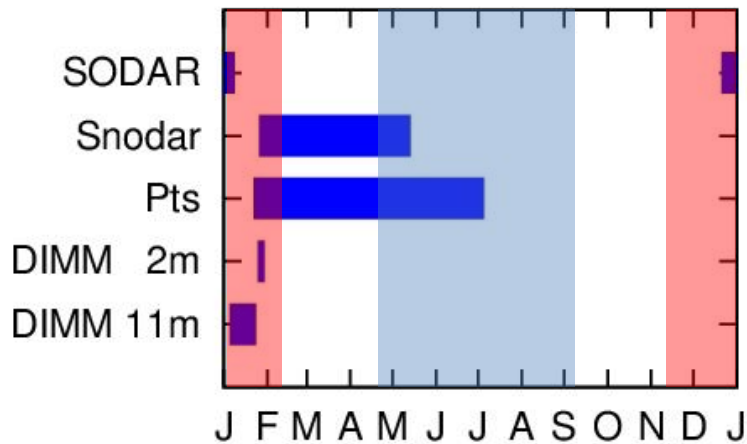
図4 シミュレーションによる自由大気シーイング分布 (Saunders et al. 2009)

自由大気シーイングはシミュレーションから0.207秒角と予想されているが、現地での実際の測定はまだ行われていない

現地での調査が必要 → 南極観測隊に参加してサイト調査を実施

Observations

2006-2013年に順次観測を実施



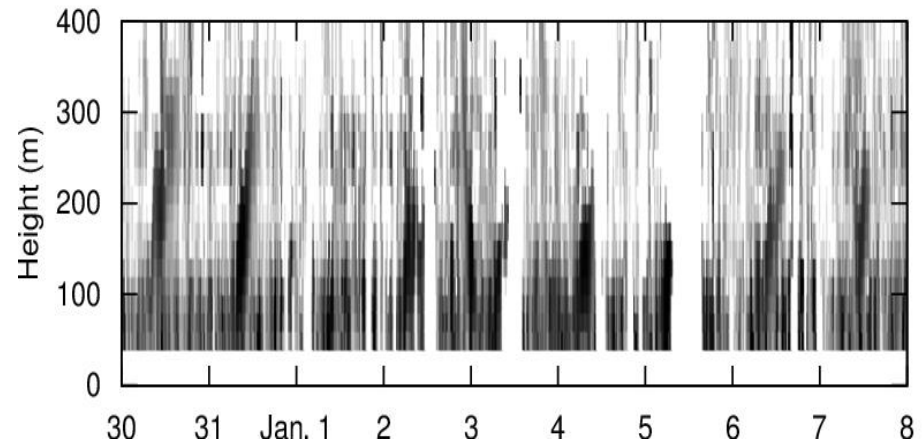
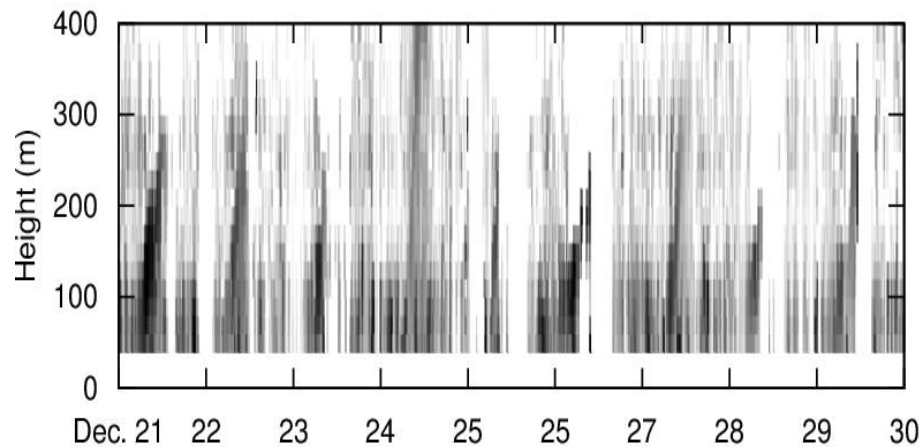
2.1 SODAR (2006-2007)

(Sonic Detection And Ringing)

- From 2006 December 21 to 2007 January 7
- Observations in “Polar day season”
- Turbulence profiling
between 40 and 400 m with $\Delta h = 20$ m

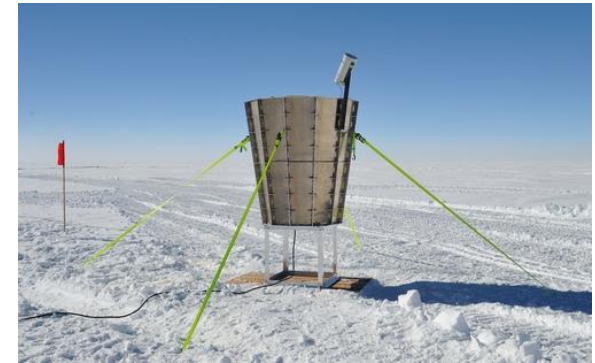


Photo by H. Motoyama



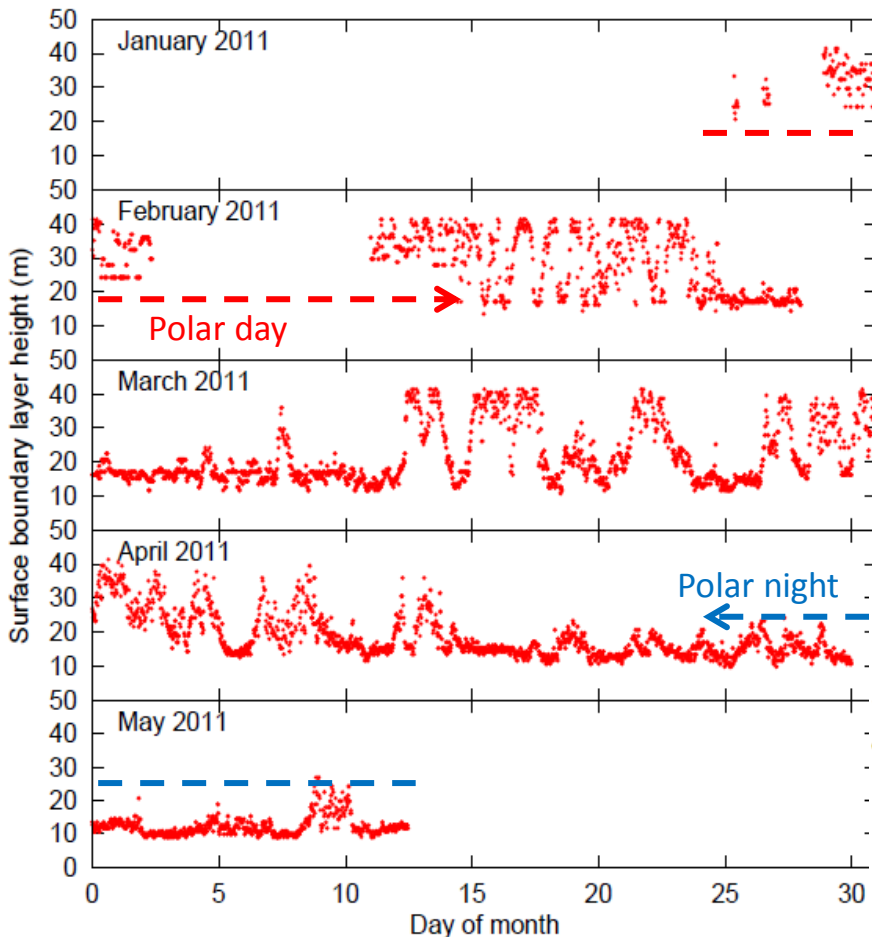
→ Diurnal variation is clearly seen.

2.2 Snodar (2011)

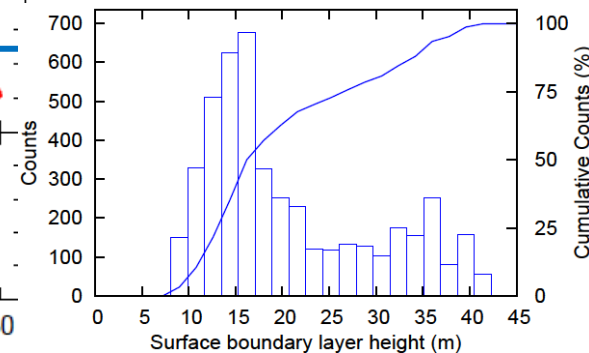


- From 2011 January 25 to May 13
- Turbulence profiling between 8 and 45 m with $\Delta h = 0.9$ m

We used the definition of Bonner et al. (2009) for the height of the surface boundary layer.



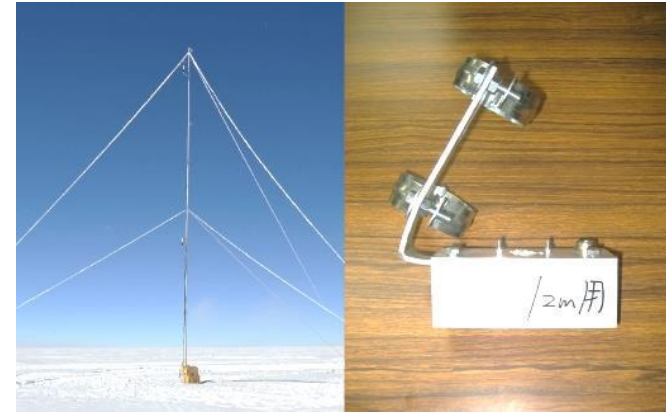
Month	Data availability	Number of 30 minute averages	All weather	
			Mean	Median
January	8.33 %	124	32.4 m	33.3 m
February	69.27 %	931	28.5 m	29.7 m
March	100 %	1488	22.1 m	18.0 m
April	100 %	1440	18.6 m	16.2 m
May	40.26 %	599	12.3 m	11.7 m
Total	63.22 %	4582	21.3 m	17.1 m



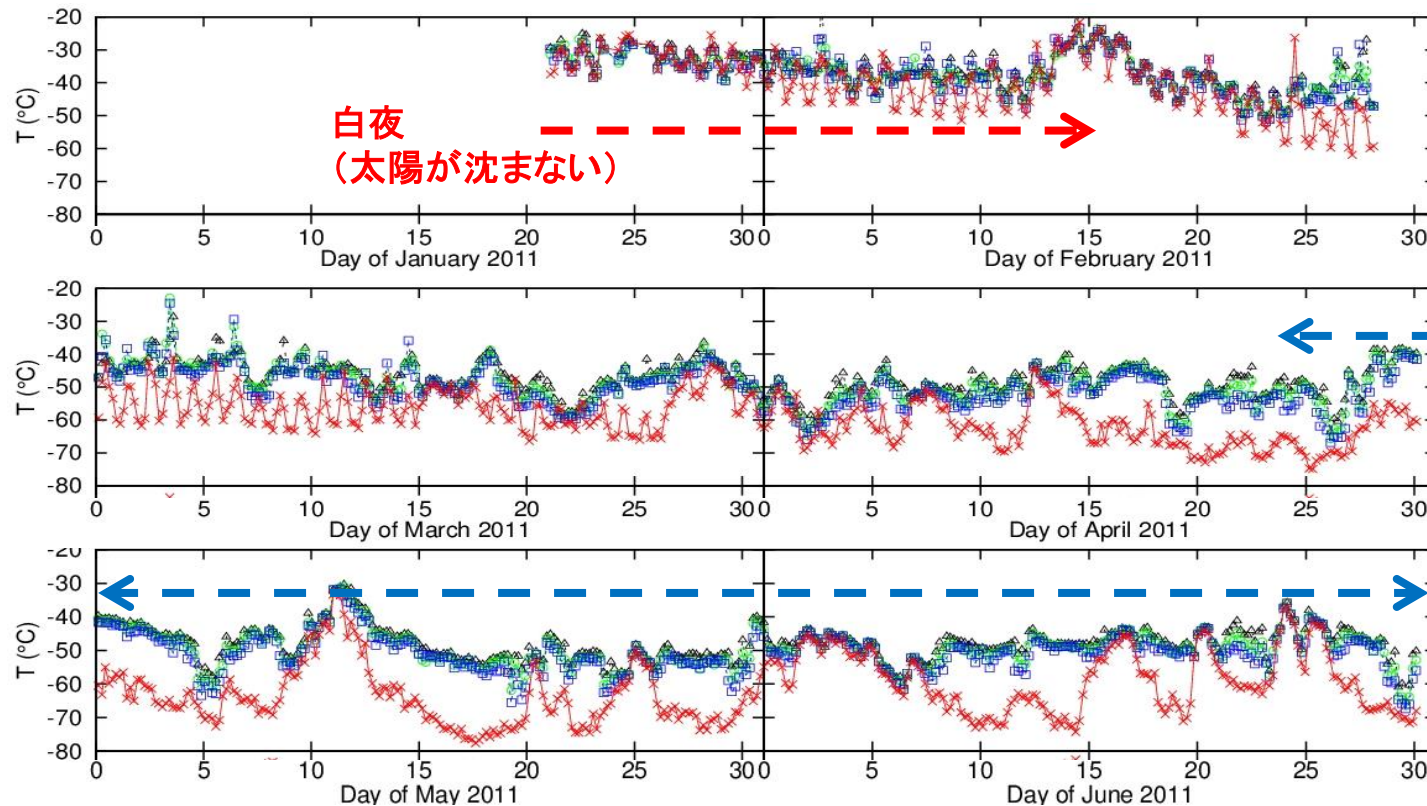
天候条件を考慮していない場合の接地境界層の高さ

2.3 Pt温度計 (2011)

- From 2011 January 21 to July 4
- 0.3, 9.5, 12, and 15.8 m above snow surface
- Measuring each two minute



- 白夜期に日変化 → 太陽による影響
- 雪面0.3mのみ低温 → 放射冷却が発達

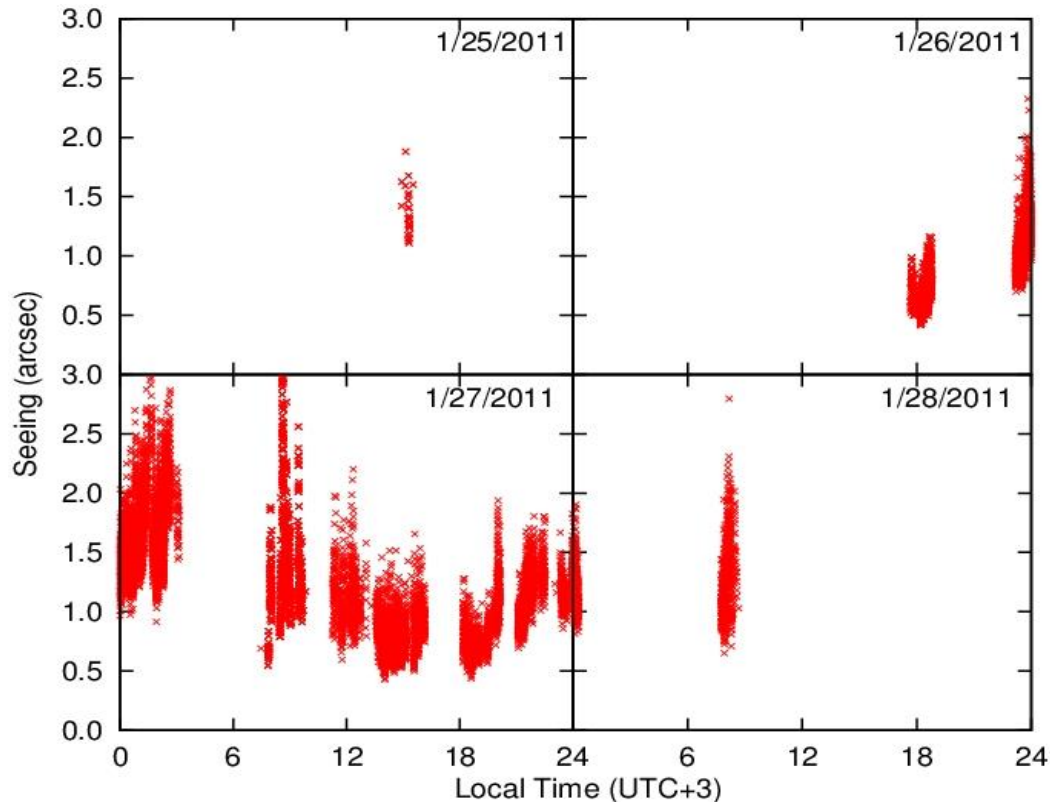
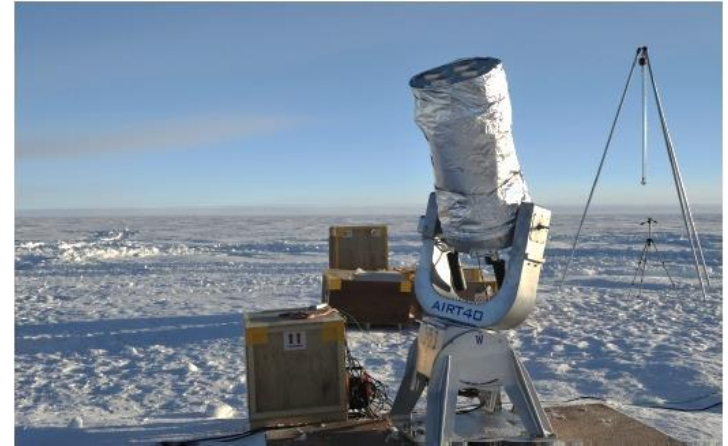


赤 × - 0.3 m
 青 □ - 9.5 m
 緑 ○ - 12 m
 黒 △ - 15.8 m

極夜
 (太陽が昇らない)

2.4 Tohoku DIMM (2011)

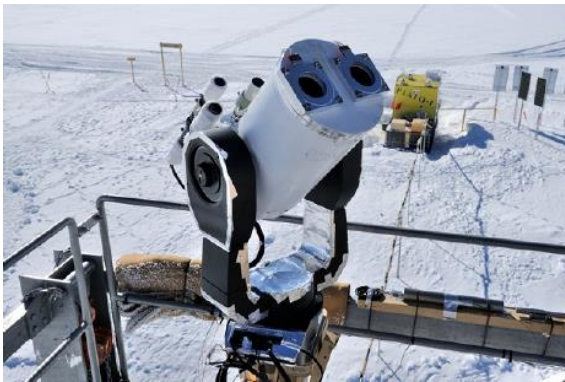
- From 2011 January 25 to 28
- Observations in “Polar day season”
- Observations 2 m above the snow surface



Subaperture diameter	ϕ 74 mm
Subaperture separation	250 mm
Observed wavelength	550 nm (peak sensitivity)
Pixel size	$8.4 \mu\text{m} \times 9.8 \mu\text{m}$
Pixel scale	$0.39''/\text{pix} \times 0.46''/\text{pix}$
Accuracy of pixel scale	$\pm 0.7\%$
Exposure time	0.001 sec
Number of frames used	
for each seeing estimate	30 over ~ 3 second
Height of the entrance pupils	~ 2 m

2.5 DF-DIMM (2013)

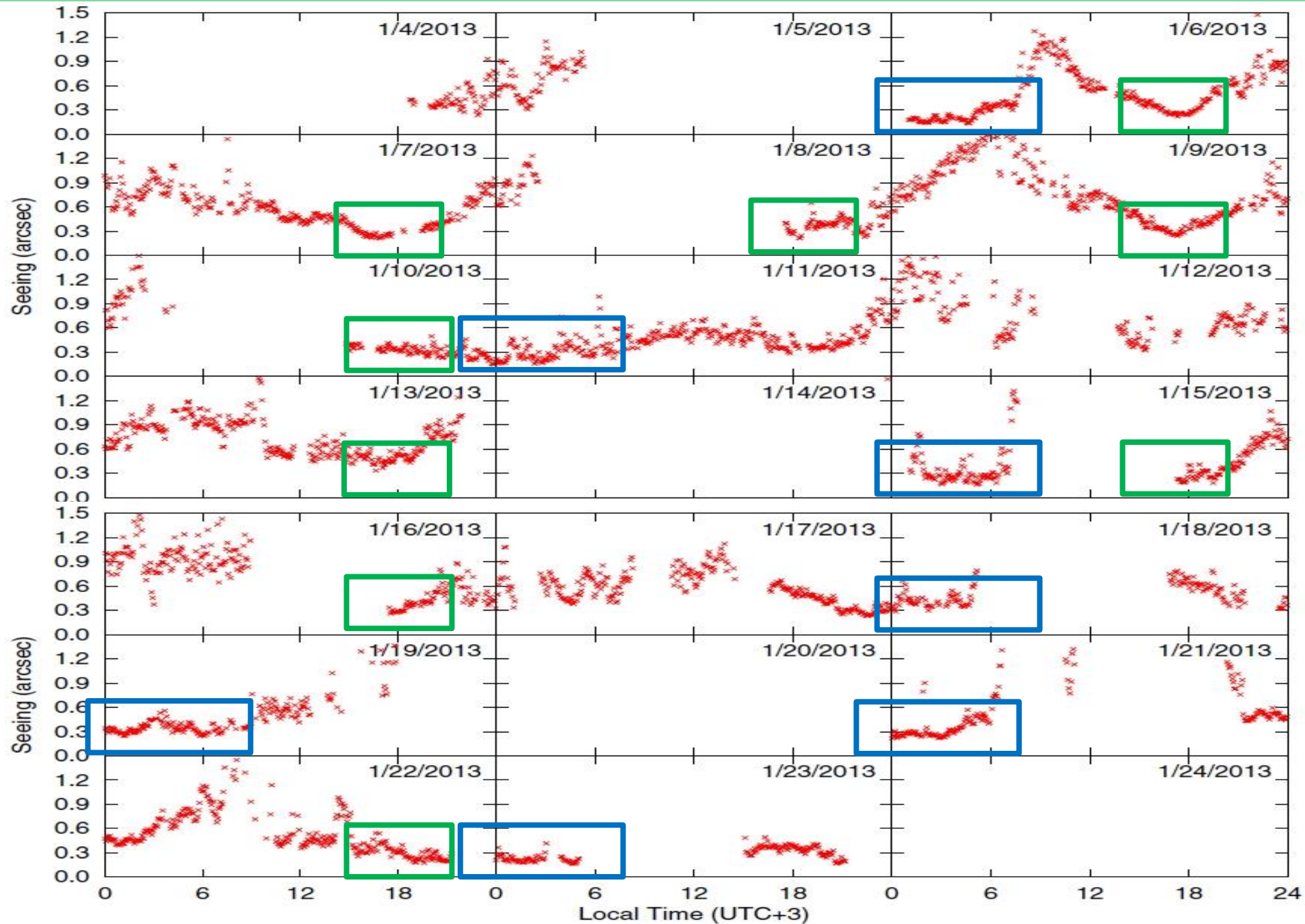
- From 2013 January 4 to July 23
- Observation in “Polar day season”
- Observations 11 m above the snow surface



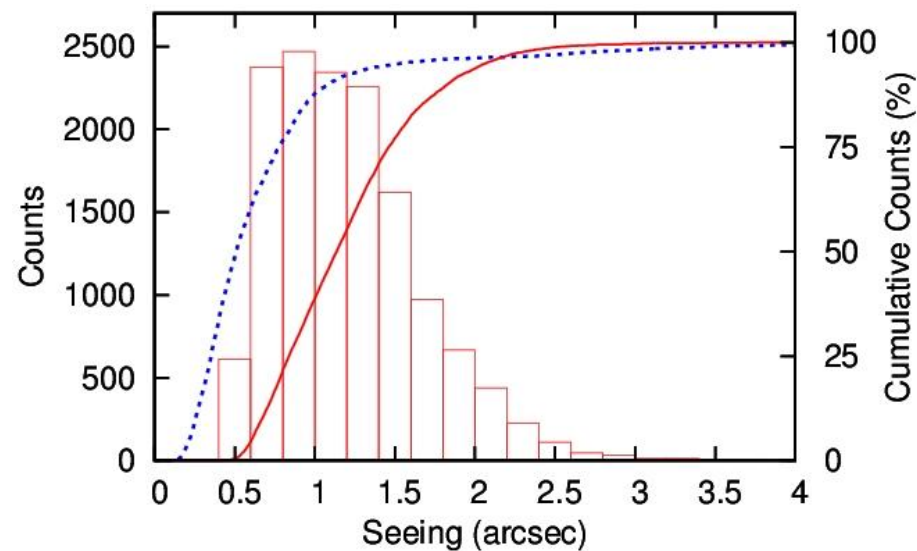
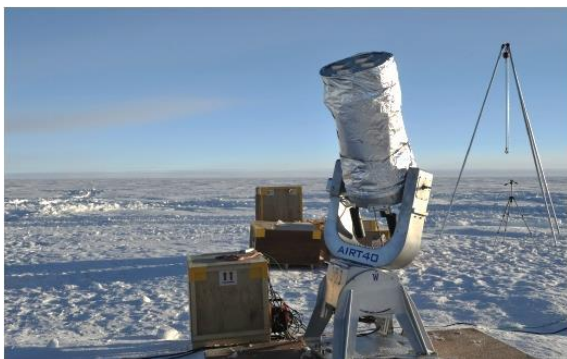
Subaperture diameter	$\phi 60$ mm
Subaperture separation	140 mm
Observed wavelength	472 nm
FWHM of the filter	35 nm
Pixel size	$7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$
Pixel scale	$0.775''/\text{pix} \pm 0.005''/\text{pix}$
Exposure time	0.001 s
Number of frames used for each seeing estimate	450 over ~ 5 min
Height of the entrance pupils	~ 11 m

- **Excellent seeing**, below $0.2''$ and continuing for several hours, was observed near local midnight.
- **Local minimum** of $\sim 0.3''$ near 18 h local time is also observed.

2. Observations and Results



2.6 Tohoku DIMM & DF-DIMM

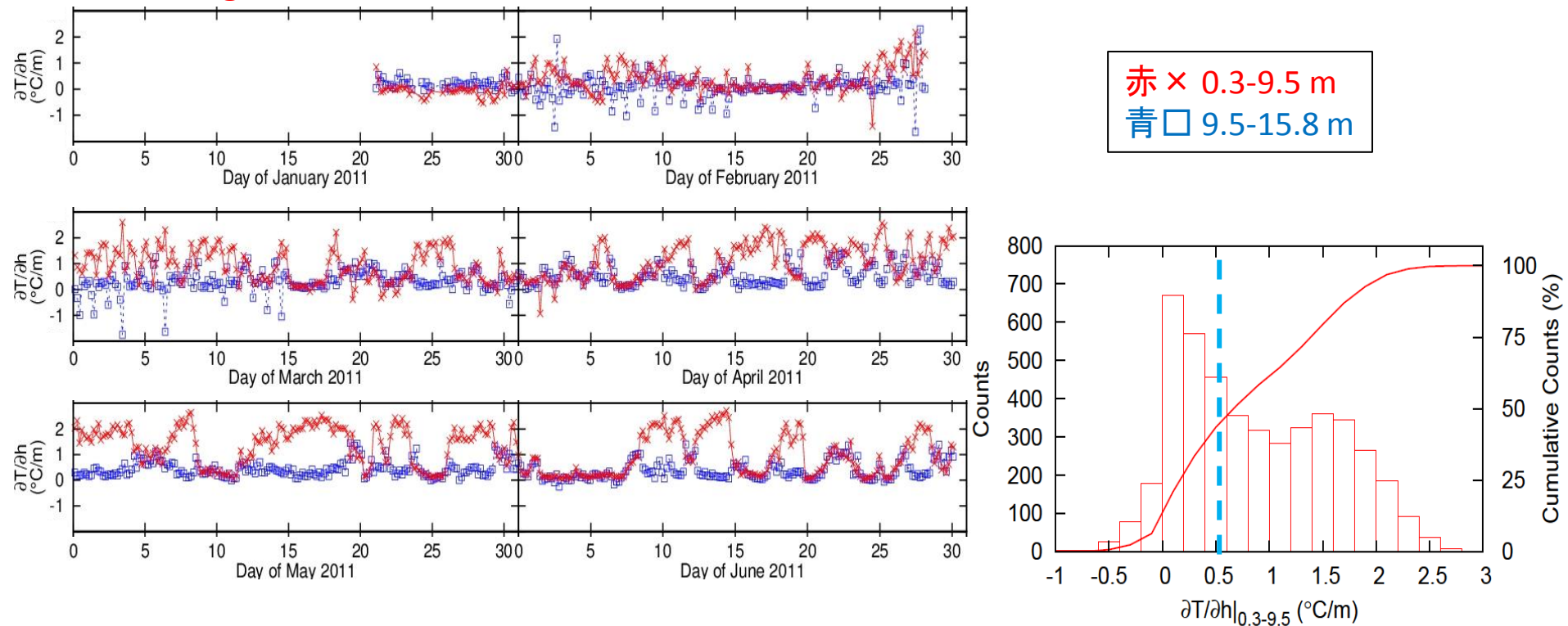


	Tohoku DIMM (2 m)	DF-DIMM (11 m)
Mean	1.2''	0.68''
Median	1.1''	0.52''
Mode	0.75''	0.36''
25th percentiles	0.83''	0.36''
75th percentiles	1.5''	0.78''

Seeing values are considered to become large due to the turbulent layer near snow surface, i.e., surface boundary layer.

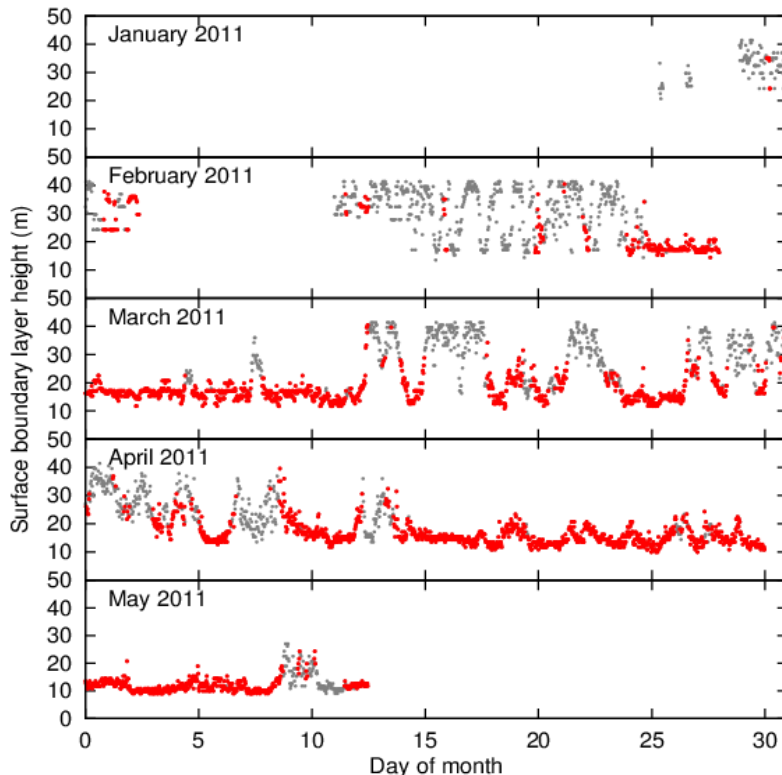
3.1 接地境界層(1)

- We should discuss the surface boundary layer height **only in the fine weather condition** that the astronomical observations can be performed.
- In the find weather, the atmosphere near the snow surface becomes cold by the radiative cooling and make a positive temperature gradient.
- Thus **we define the “fine weather” as the temperature gradient become 0.5 C/m or larger.**

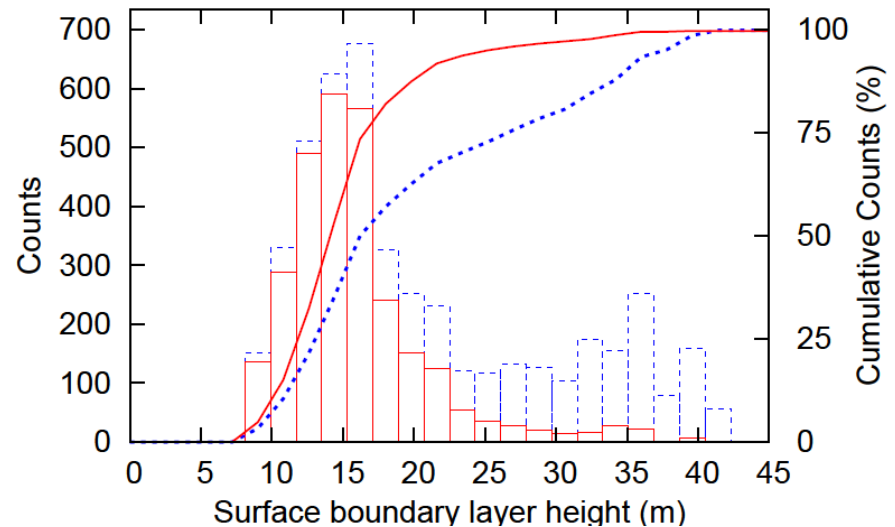


3.1 接地境界層(2)

Month	Data availability	Number of 30 minute averages	All weather		Number of fine weather observations	Fine weather	
			Mean	Median		Mean	Median
January	8.33 %	124	32.4 m	33.3 m	8	32.3 m	35.1 m
February	69.27 %	931	28.5 m	29.7 m	279	22.1 m	18.0 m
March	100 %	1488	22.1 m	18.0 m	972	17.1 m	16.2 m
April	100 %	1440	18.6 m	16.2 m	1076	16.2 m	15.3 m
May	40.26 %	599	12.3 m	11.7 m	477	11.8 m	11.7 m
Total	63.22 %	4582	21.3 m	17.1 m	2812	16.4 m	15.3 m



晴天時の接地境界層の高さ
平均 16.4 m、Median 15.3 m



3.2 自由大気

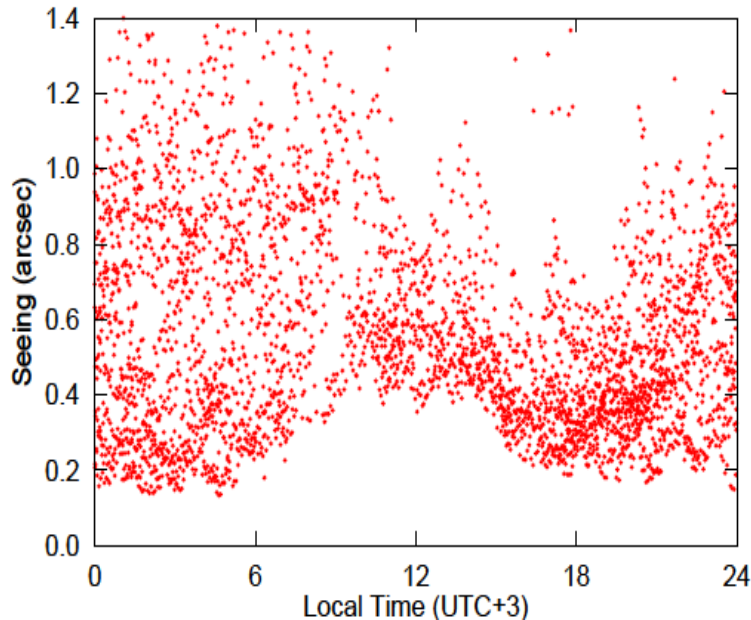


図9 時刻を合わせて重ね合わせた雪面から高さ11mのシーイングの時間変化。

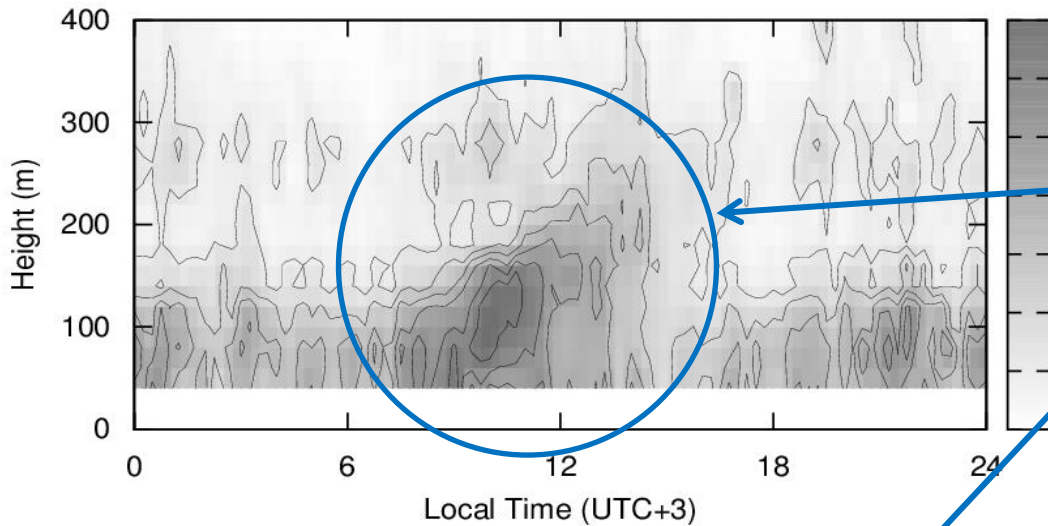
シーイングの下限值

16時～6時毎に継続して0.2秒角となる。これは接地境界層の影響を受けていない、つまり接地境界層が望遠鏡の高さより低い時に得られると考えられる。よってドームふじ基地の自由大気シーイングは0.2秒角程度だと考えられる。

可視光(0.5 μ m)で

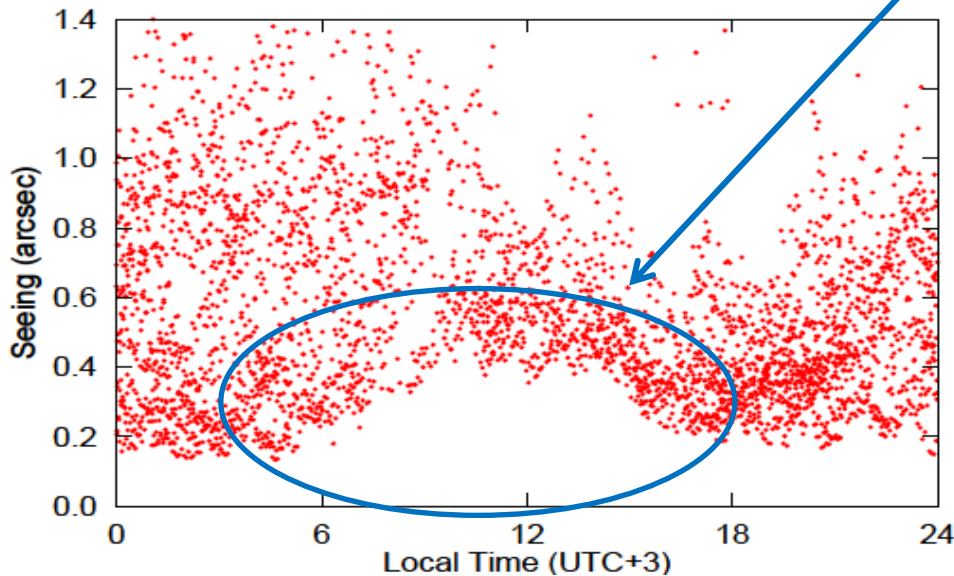
自由大気シーイング 約0.2秒角

3.3 大気対流



SODARによって得られた雪面40-300mの大気乱流プロファイルを時刻を合わせてスタックした図

太陽熱による対流が発生



- The lower limit of 6-16h is about 0.4".
- This means that **the solar heating in the polar day makes the atmospheric convection** up to 300 m above the snow surface.
- In the polar night, the convection will not occur.

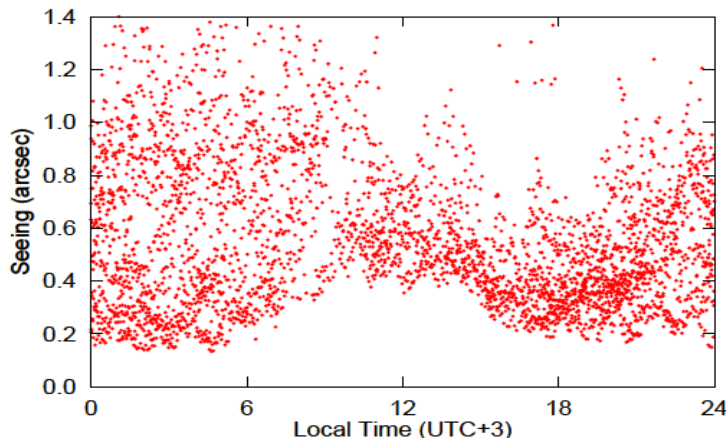
3.4 乱流強度分布

Tohoku DIMM、DF-DIMMで得られた雪面から2m, 11mのシーイングの統計値から
 接地境界層、大気対流、自由大気の影響を評価

	Tohoku DIMM (2 m)	DF-DIMM (11 m)
Mean	1.2''	0.68''
Median	1.1''	0.52''
Mode	0.75''	0.36''
25th percentiles	0.83''	0.36''
75th percentiles	1.5''	0.78''

$$\epsilon = 5.3\lambda^{-1/5} \left[\int C_N^2(h) dh \right]^{3/5}$$

$$\epsilon^{5/3} = \epsilon_{SBL}^{5/3} + \epsilon_{AC}^{5/3} + \epsilon_{FA}^{5/3}$$



$$C_{N, SBL}^2 \sim 6.2 \times 10^{-14} [m^{-2/3}]$$

$$C_{N, FA}^2 \sim 4.7 \times 10^{-18} [m^{-2/3}]$$

$$C_{N, AC}^2 \sim 4.4 \times 10^{-16} [m^{-2/3}]$$

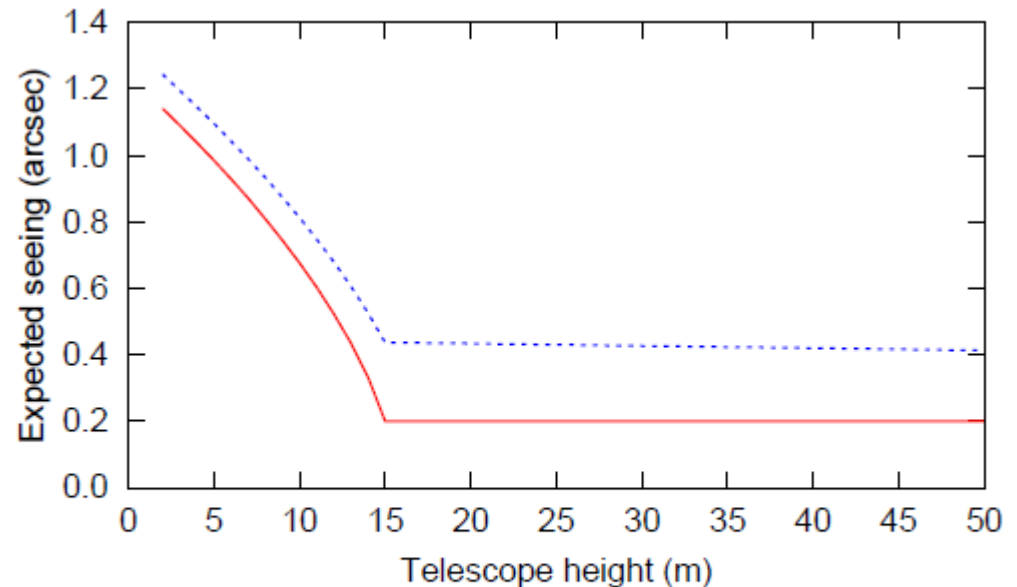


Fig. 18. Expected seeing at a certain height from the snow surface. Blue dot and Red solid lines mean the expected seeing with and without the atmospheric convection, respectively.

4. まとめ(1)

- 南極大陸内陸高原「ドームふじ基地」は天体観測に最適と考えられてきたが調査は殆ど行われてこなかった。
- そこで我々は「南極天文コンソーシアム」を組織し、2006年から南極観測隊に委託・参加してサイト調査を実施してきた。
- Snodar、Pt温度計の観測から接地境界層の高さを評価した結果、晴天時の接地境界層の高さはMedianで15.3mであった。
- DF-DIMMの観測から、自由大気シーイングは約0.2秒角であった。
- 太陽の沈まない白夜の季節、太陽高度が高い日中に雪面300m付近まで大気対流が生じ、シーイングが悪化する事が分かった。

4. まとめ(2)

- 2020年の観測開始を目指して開発が進められている「南極2.5m赤外線望遠鏡」は15.3mの接地境界層よりも高い場所に建設することで、補償光学(AO)が技術的に難しい**可視光から回折限界となる近赤外線(0.5~2 μ m)にかけて、0.2秒角の空間分解能で観測が可能**なユニークな望遠鏡となる
- 低空や白夜期間の観測は？(太陽系惑星等)
 - 0.2秒角は天頂での値なので、低空で悪くなる
 - ダイヤモンドダストによる散乱の可能性有り