

# 南極大型望遠鏡計画

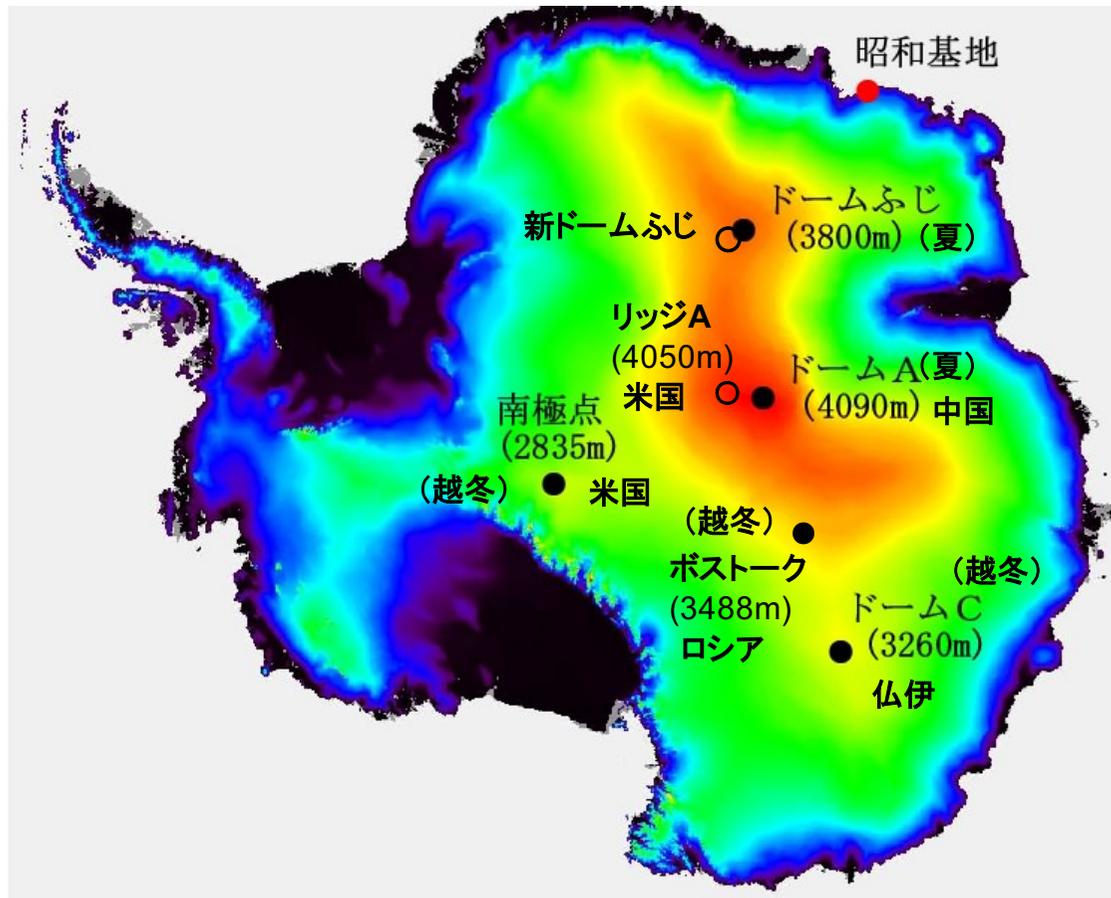
---

中井直正(筑波大学)、他

- (1) 南極内陸部の天文観測環境
- (2) 南極望遠鏡計画行程(予定)
- (3) 南極10mテラヘルツ望遠鏡
- (4) 南極30m級テラヘルツ望遠鏡計画
- (5) 輸送、基地・望遠鏡建設

# 南極内陸部の高原地帯

—地上で最高の天文観測環境—



○標高が高い

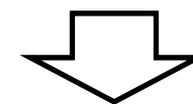
3200 m ~ 4000 m

○気温が極めて低い

最高 -20 °C

平均 -54 °C

最低 -80 °C



**水蒸気量: 極めて少ない**

宇宙から来るサブミリ波~

テラヘルツ波~赤外線

⇒ 大気中の水蒸気にあまり吸収されずに地上に届く

# 大気の光学的厚み

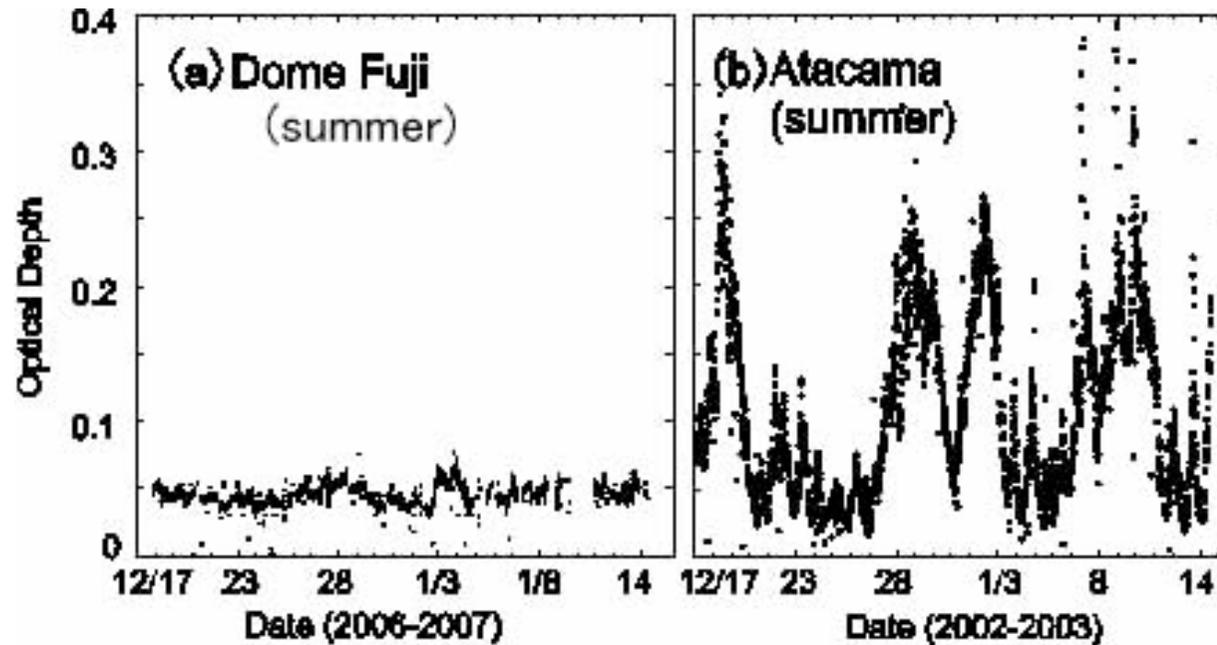
220 GHz@ドームふじ

実測： 2006,09年夏季

ドームふじ

チリ(アタカマ 5000m)

光学的厚み



06/12/17 ————— 07/1/14 02/12/17 ————— 03/1/14

夏季1か月

夏季1か月  
(数年分のうち良い年)



ドームふじ基地で測定中のラジオメータ



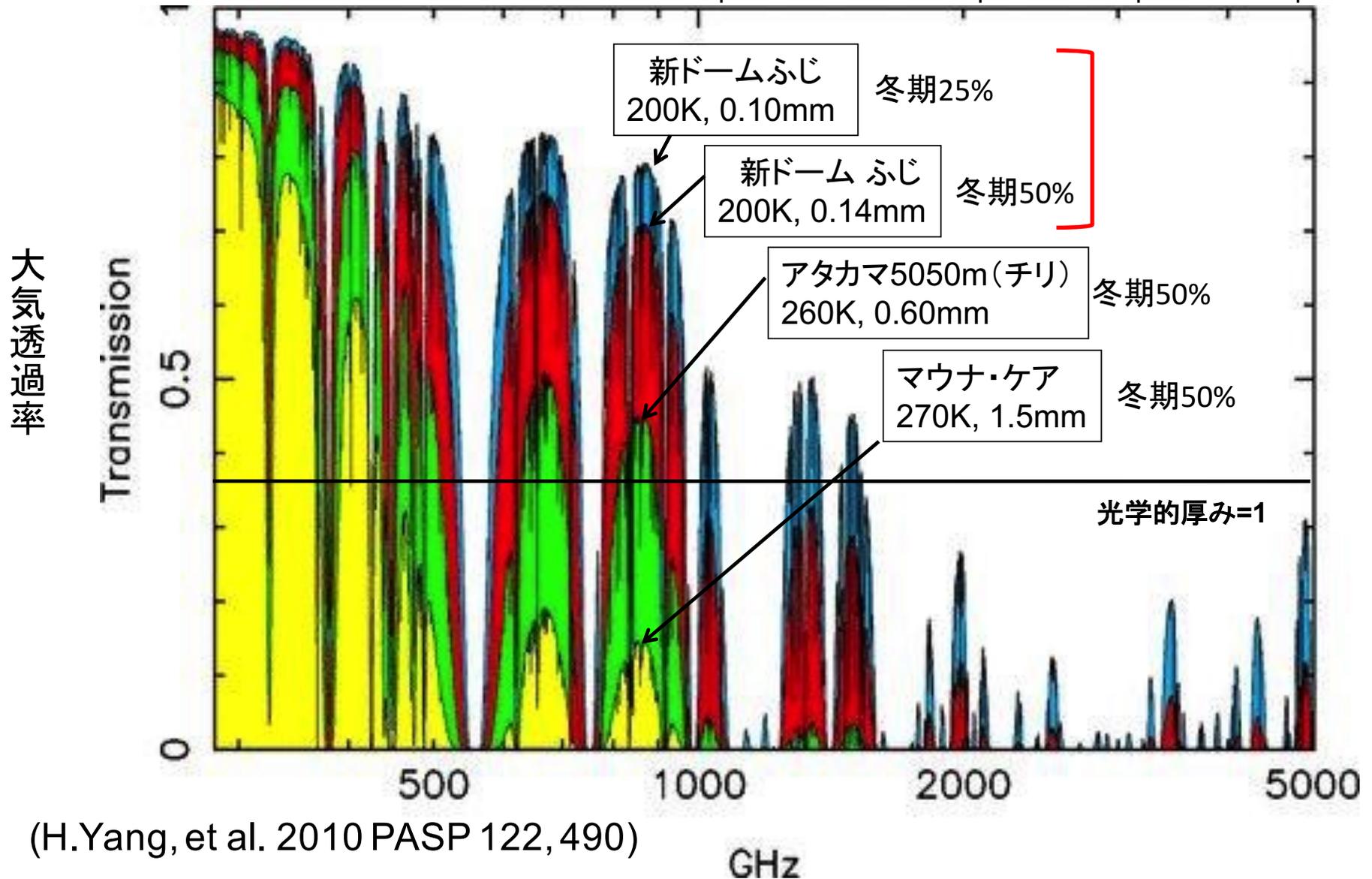
## 南極リッジ Aでの大気中の水蒸気量

---

略

# 大気透過率 (冬期50% (25%)) (計算値)

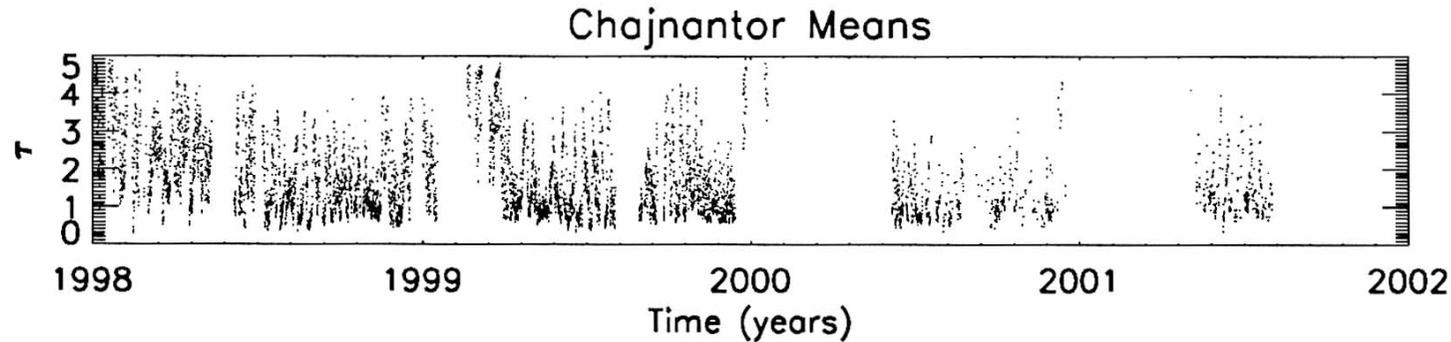
サブミリ波 テラヘルツ波  
世界最高 ← | → 世界で唯一可能  
300 $\mu$ m 150 $\mu$ m 100 $\mu$ m 60 $\mu$ m



(H.Yang, et al. 2010 PASP 122, 490)

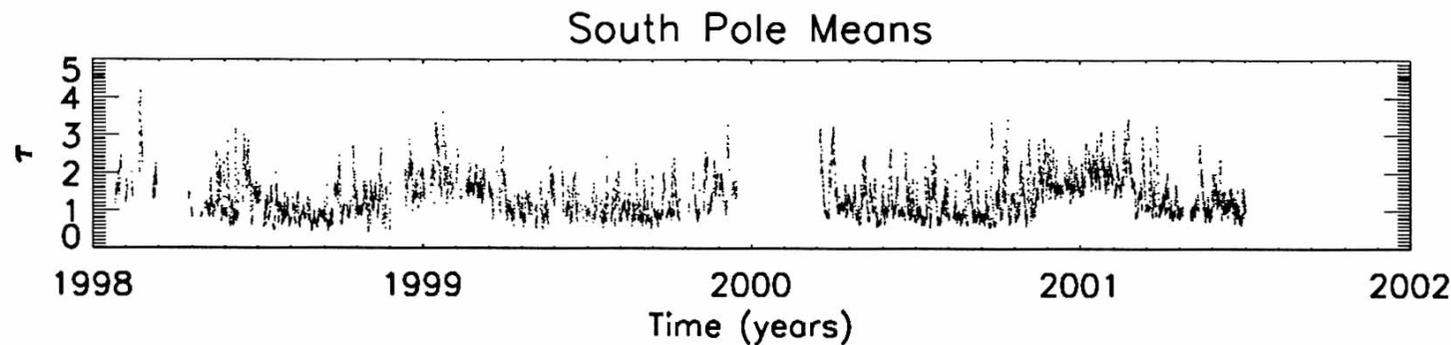
# 大気の安定性(1)

860 GHz = 350  $\mu\text{m}$  @南極点 (Peterson etc 2003 PASP 115, 383)

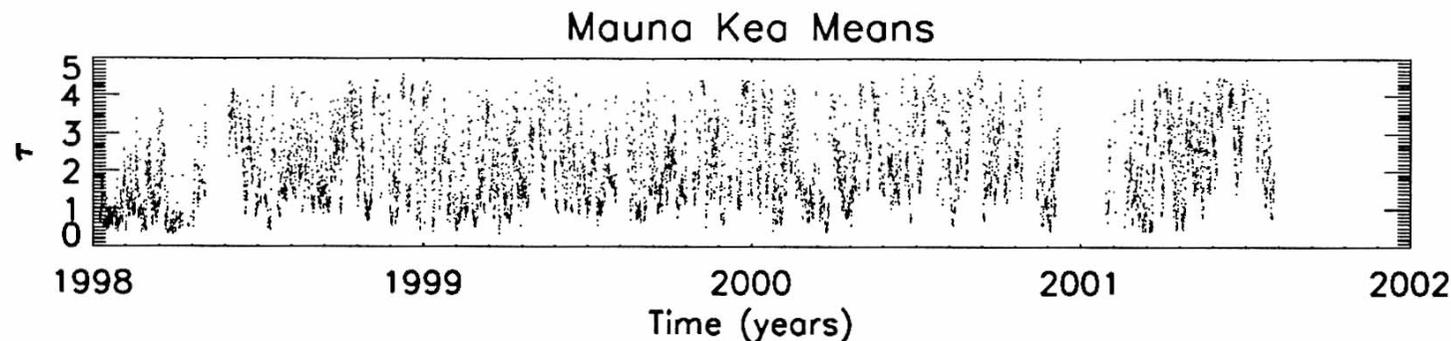


チリ  
ALMAサイト  
(5000 m)

↑  
光学的厚み



南極点  
(2840 m)



ハワイ  
マウナケア  
(4000 m)

# 大気安定性(2)

860 GHz = 350  $\mu$ m @南極点

(Peterson etc 2003 PASP 115, 383)

大気安定度: 抜群に良い

(常に高気圧、夜は4ヶ月継続、雪面)

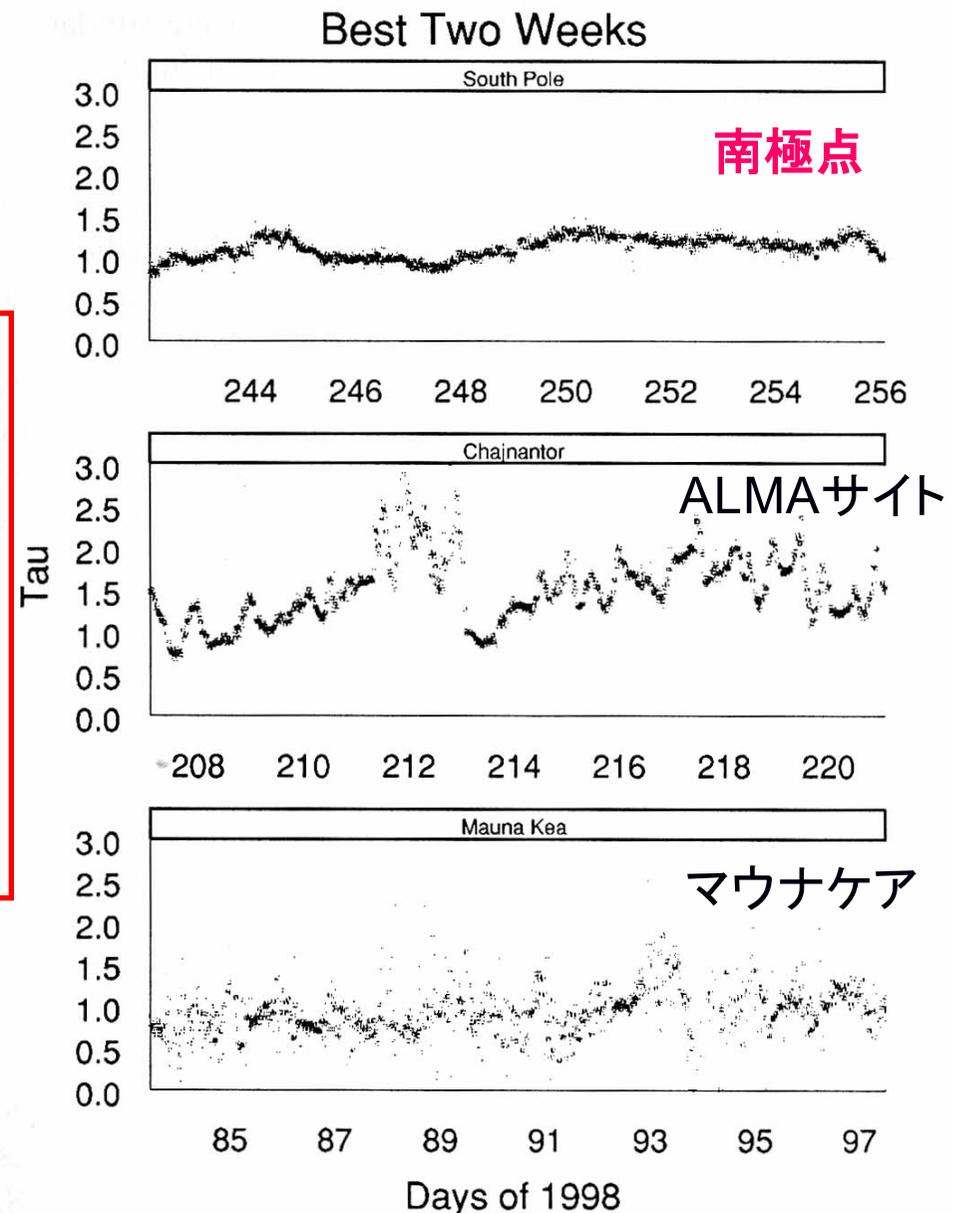
→特に

- ・強度較正が容易
- ・連続波観測に有効  
(ミリ波でも: SPT10m)
- ・干渉計

cf. マウナケア、チリ

「サブミリ波銀河」?

実態は0.8mm(350GHz)~2mm



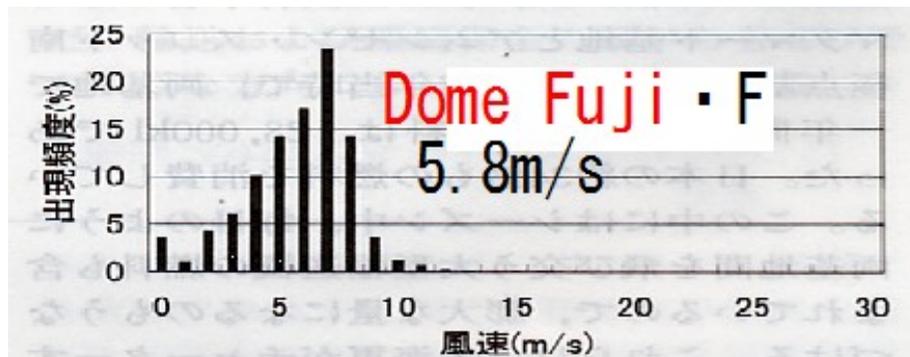
# 高い晴天率

快晴 = 68% (1994-95、年間)  
晴天 = 8~9割

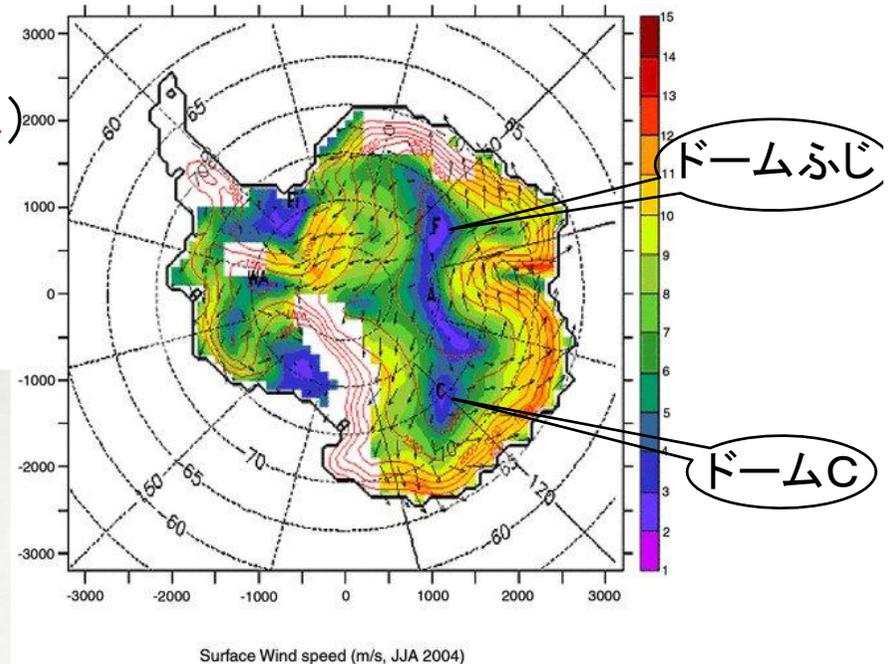
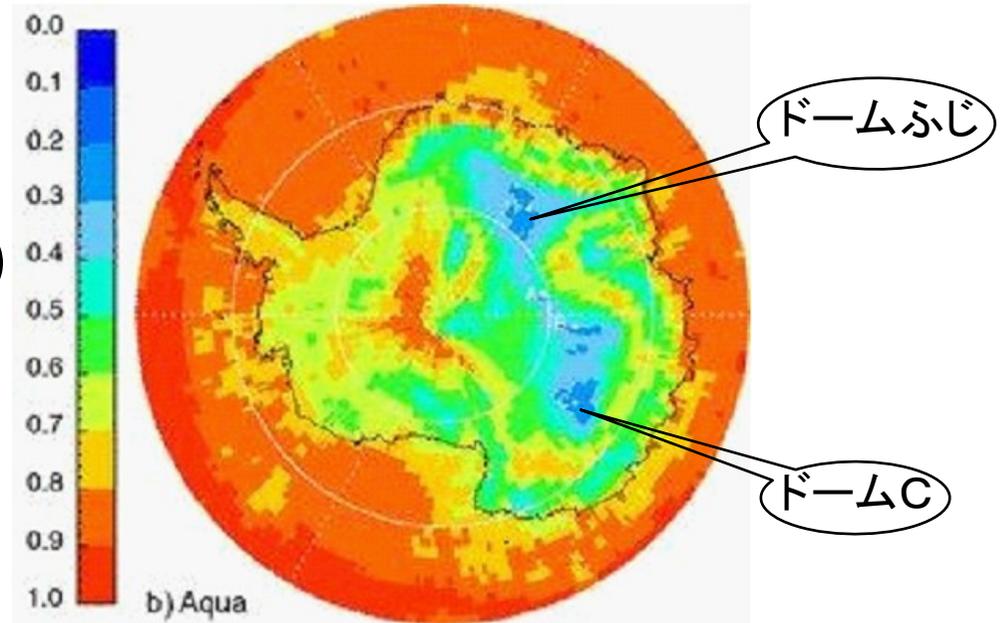
# 弱い風

→高いアンテナ指向性

- ・ドームふじ 平均 5.8 m/s  
(10 m/sは、ほとんど無し)
- ・ドームC 平均 3 m/s
- ・ALMAサイト 平均 6.1 m/s



# 雲の量(夜間)

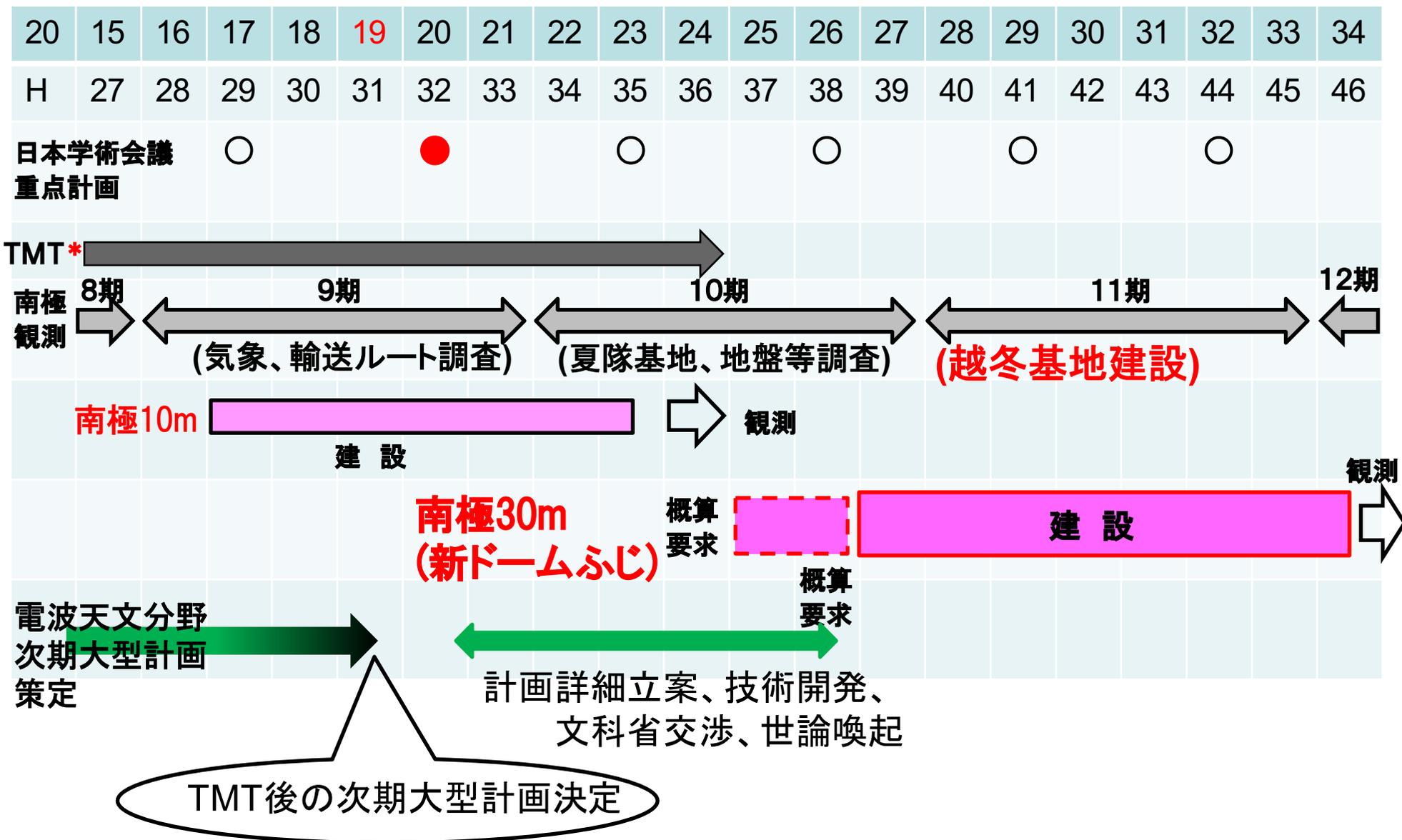


# 南極内陸部高原地帯

---

- 「**テラヘルツ帯**」・・・地上で唯一観測可能
- 「**サブミリ波帯**」・・・地上で最高(透過率、感度、安定性)  
650,850GHz帯でも年間観測可能(唯一)
- 「**ミリ波帯**」・・・・・・・・・・非常に高い大気安定度
- 「**赤外線**」・・・・・・・・・・地上唯一の窓を持つ  
高い感度  
高いシーイング

# 南極テラヘルツ望遠鏡建設計画(予定)



\* TMT: 30m光赤外線望遠鏡(ハワイ:建設中)

# 南極10mテラヘルツ望遠鏡

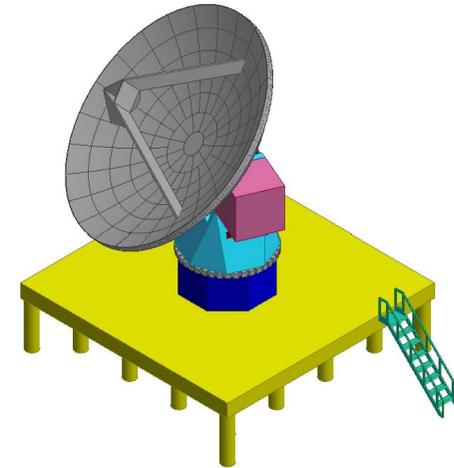
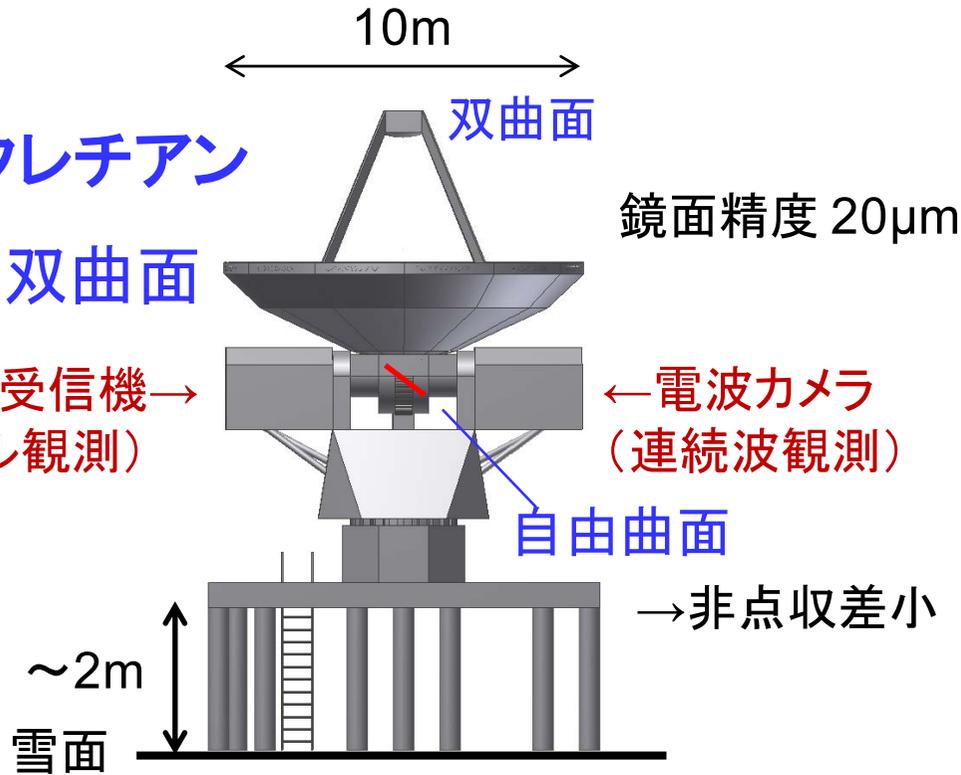
光学系

リッチー・クレチアン

コマ収差小 ← 双曲面

ヘテロダイン受信機 →  
(線スペクトル観測)

← 電波カメラ  
(連続波観測)



@新ドームふじ基地

視野 ~ 1°

+ 大規模電波カメラ

⇒ 大規模広域サーベイ

角分解能

$$\theta = 1.2 \lambda / D$$

0.4 THz

0.85 THz

1.5 THz

18.6"

8.7"

5.0"

0.4 THz	0.85 THz	1.5 THz
18.6"	8.7"	5.0"

# 南極 10m テラヘルツ望遠鏡－諸元－

(2015.11.2)

○感度等

(1) 連続波観測 (注 1)

(冬季 50%レベル@ドームC)

## 南極10m鏡

### 望遠鏡諸元 (最終版)

→資料(web)

(当初)

→限定的

当初

400GHz×1  
850GHz×1

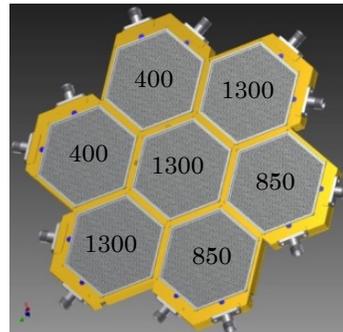
周波数帯 (注 2)	感 度 (5 $\sigma$ rms)				角分解能	素子数
	$\tau$ =60sec	1 hour	10 hours	Confusion		
400 GHz	13 mJy	1.7 mJy	0.55 mJy	2.1 mJy	18.6"	700×2
850	39	5.1	1.6	1.5	8.7"	3000×2
1300	215	27.7	8.8	0.26	5.7"	1200×3(注 4)

(注 1: 点源を観測したときのフラックス密度での感度)

(注 2: 当初は 400GHz+850GHz または 850GHz のみ。1300GHz は後から追加)

(注 3: Confusion limit は Blain+2002 を元に求める)

(注 4: ホーンを使用予定)



電波カメラ (MKID) の周波数帯の配置

(2) スペクトル線観測

(冬季 50%レベル@ドームC)

### 一部観測時間

→共同利用

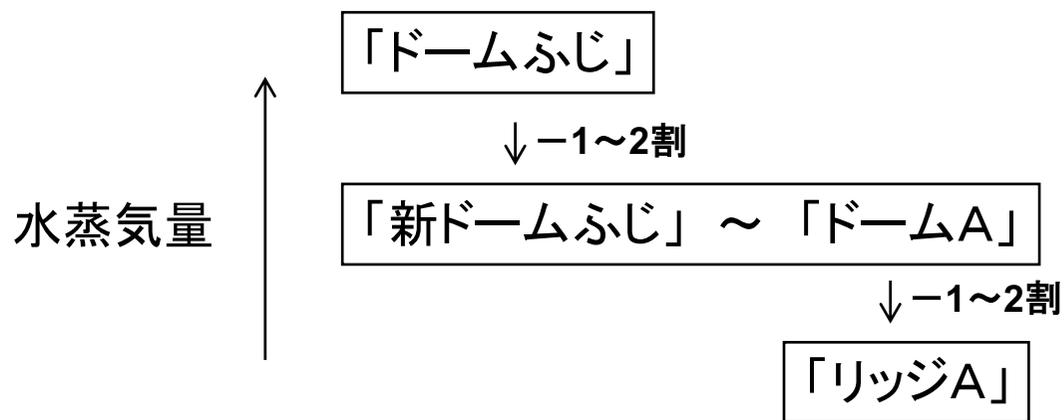
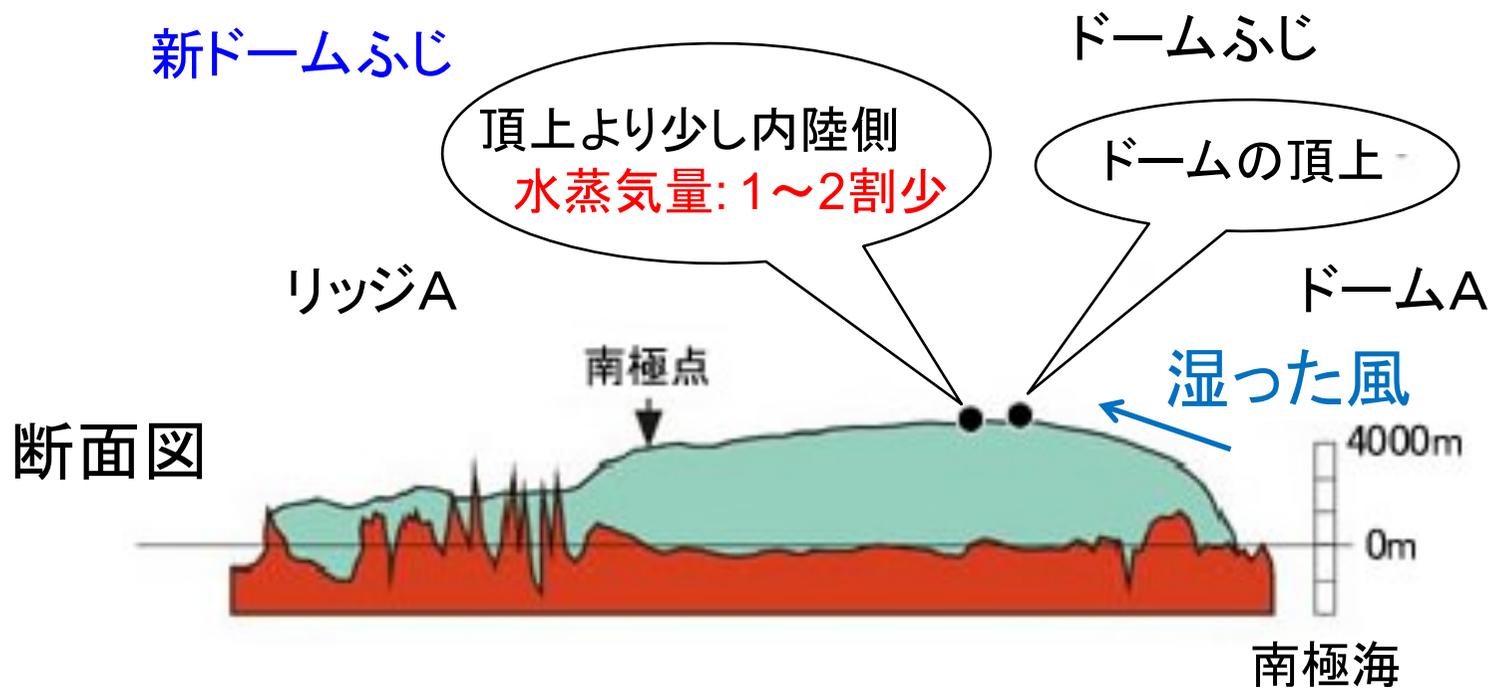
周波数帯	周波数範囲	感度(5 $\sigma$ rms for $\Delta V=1\text{km/s}$ ) *			角分解能
		$\tau$ =60sec	1 hour	10 hours	
(220 GHz)	210-275	0.098 K	0.013 K	0.0040 K	34"
350	275-373	0.086	0.011	0.0035	21"
460	385-500	0.16	0.021	0.0065	17"
850	787-950	0.46	0.059	0.019	8.7"
1000	1010-1060	1.10	0.14	0.045	7.4
1300	1260-1380	1.47	0.19	0.060	5.7"
(1500)	1440-1540	2.36	0.31	0.096	5.0

\*ON 点積分時間。感度は ON+OFF 観測時。

(注 1: 当初は 1 素子/受信機のみ。後に多素子受信機に変更の可能性あり)

(注 2: 後から MKID を用いた分光電波カメラ [R~1000,  $\Delta V=300\text{km/s}$ ] を追加予定)

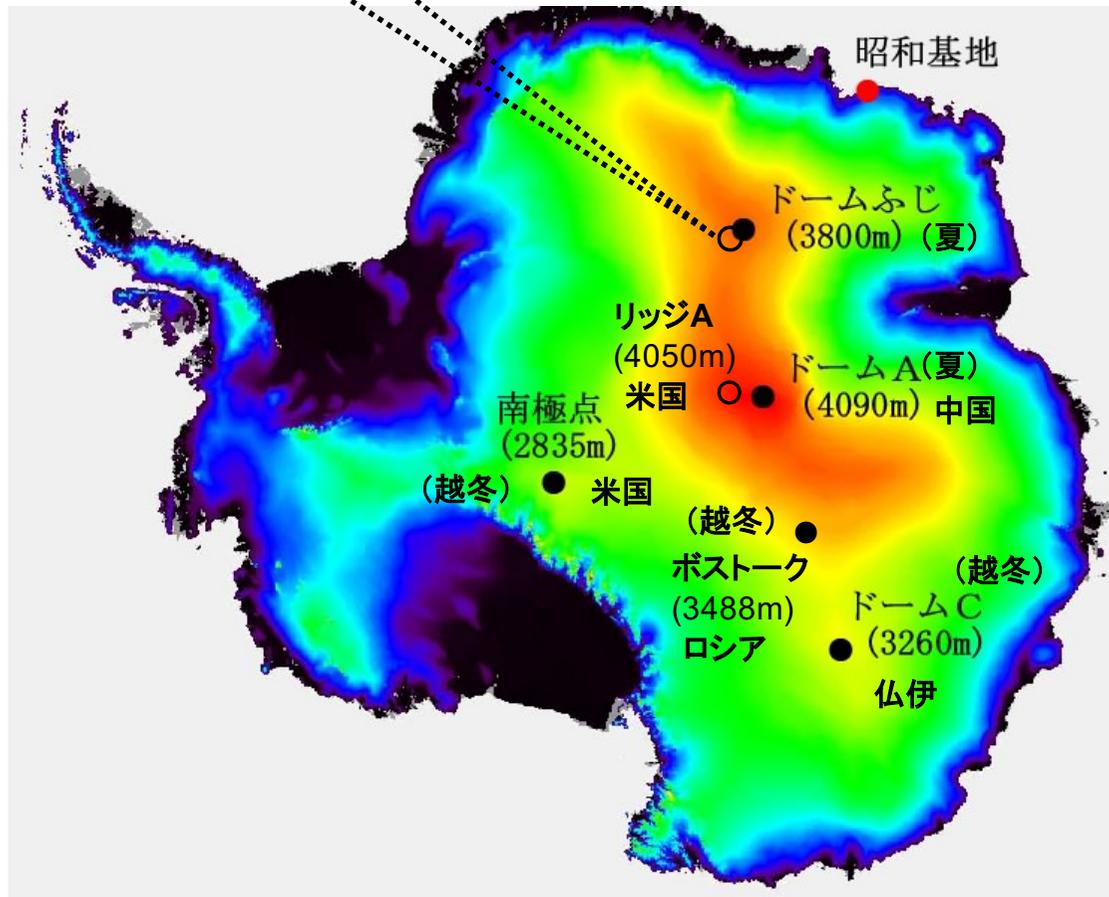
# 南極大陸内陸部



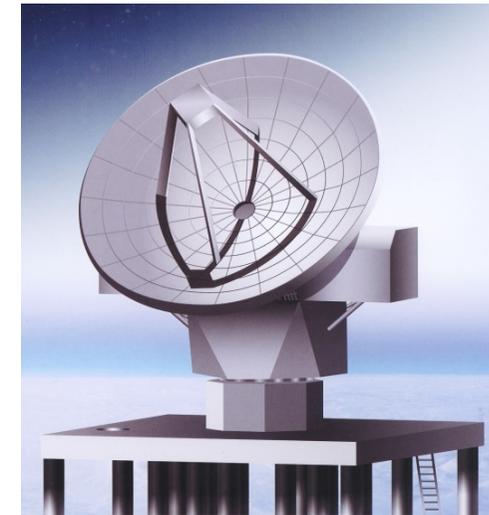
# 新ドームふじ基地：当面建設困難 ⇒ 建設場所を変更 ⇒ ドームC(コンコルディア基地)

(フランス・イタリア)

新ドームふじ  
(越冬)



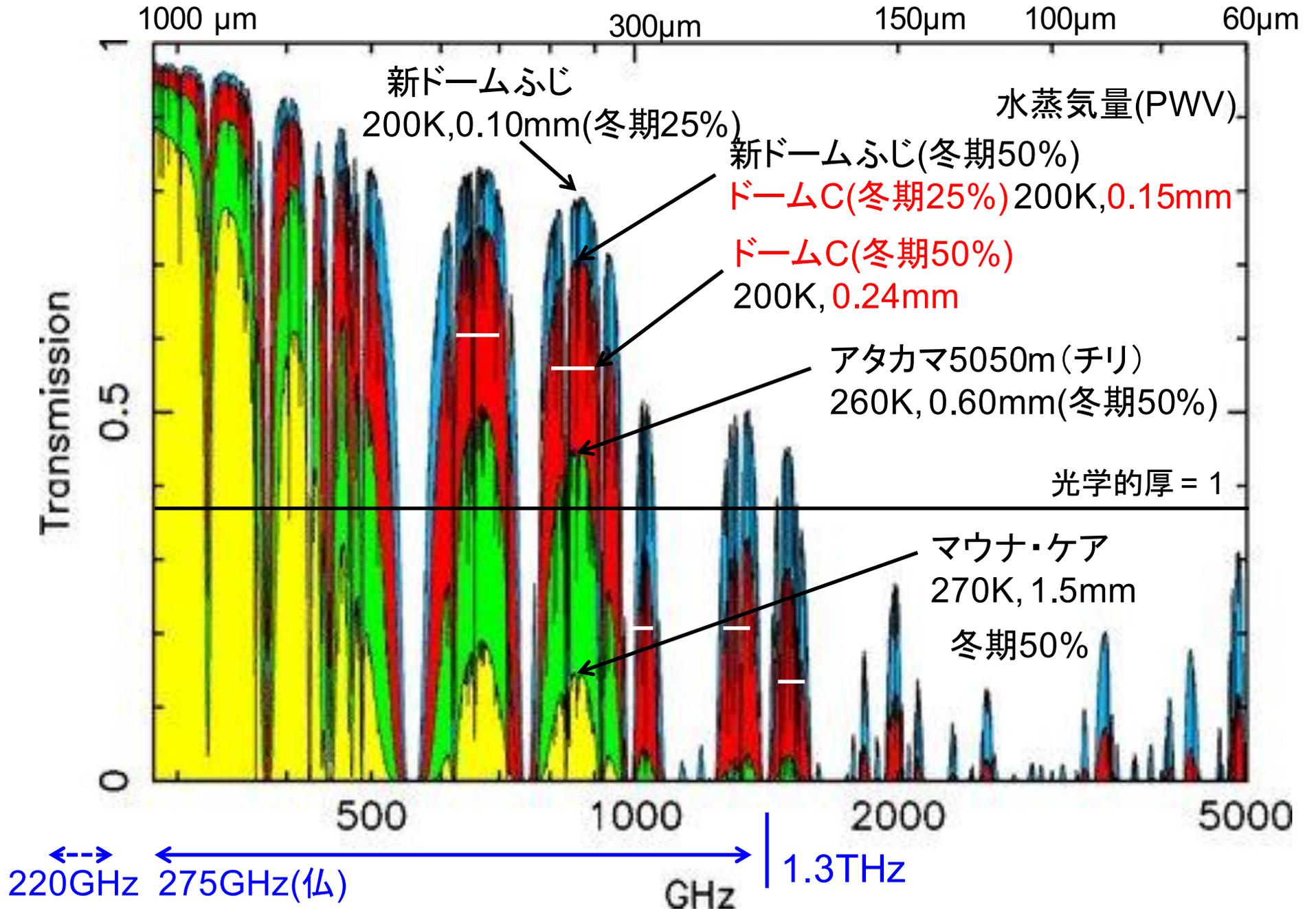
10mテラヘルツ望遠鏡



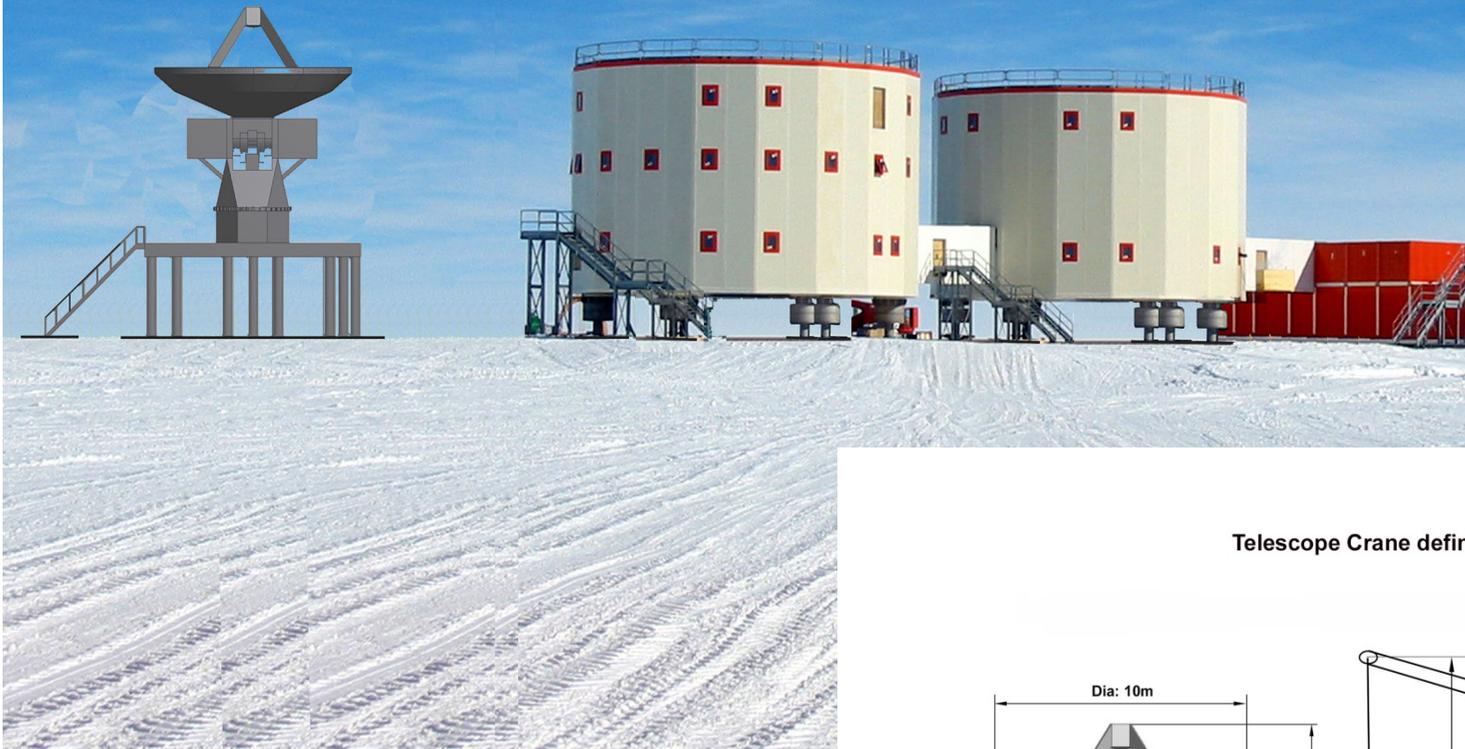
- 天文宇宙観測
- 次期大型計画の実現に向けて  
技術開発  
建設、運用の経験を積む

フランス極地研究所と交渉中(協力的・歓迎)

# ドームC: 大気透過率

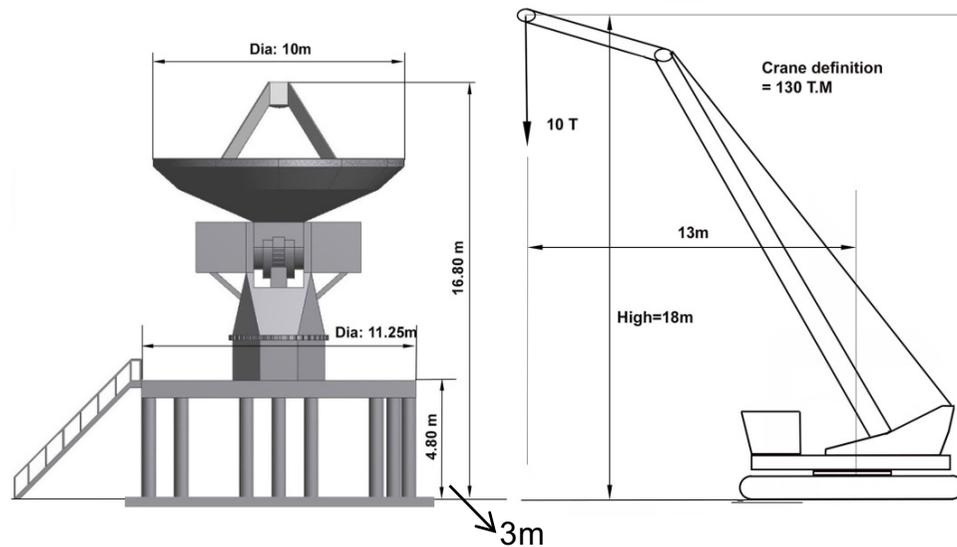


# 10m telescope - On site simulation with Concordia



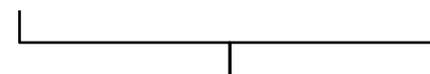
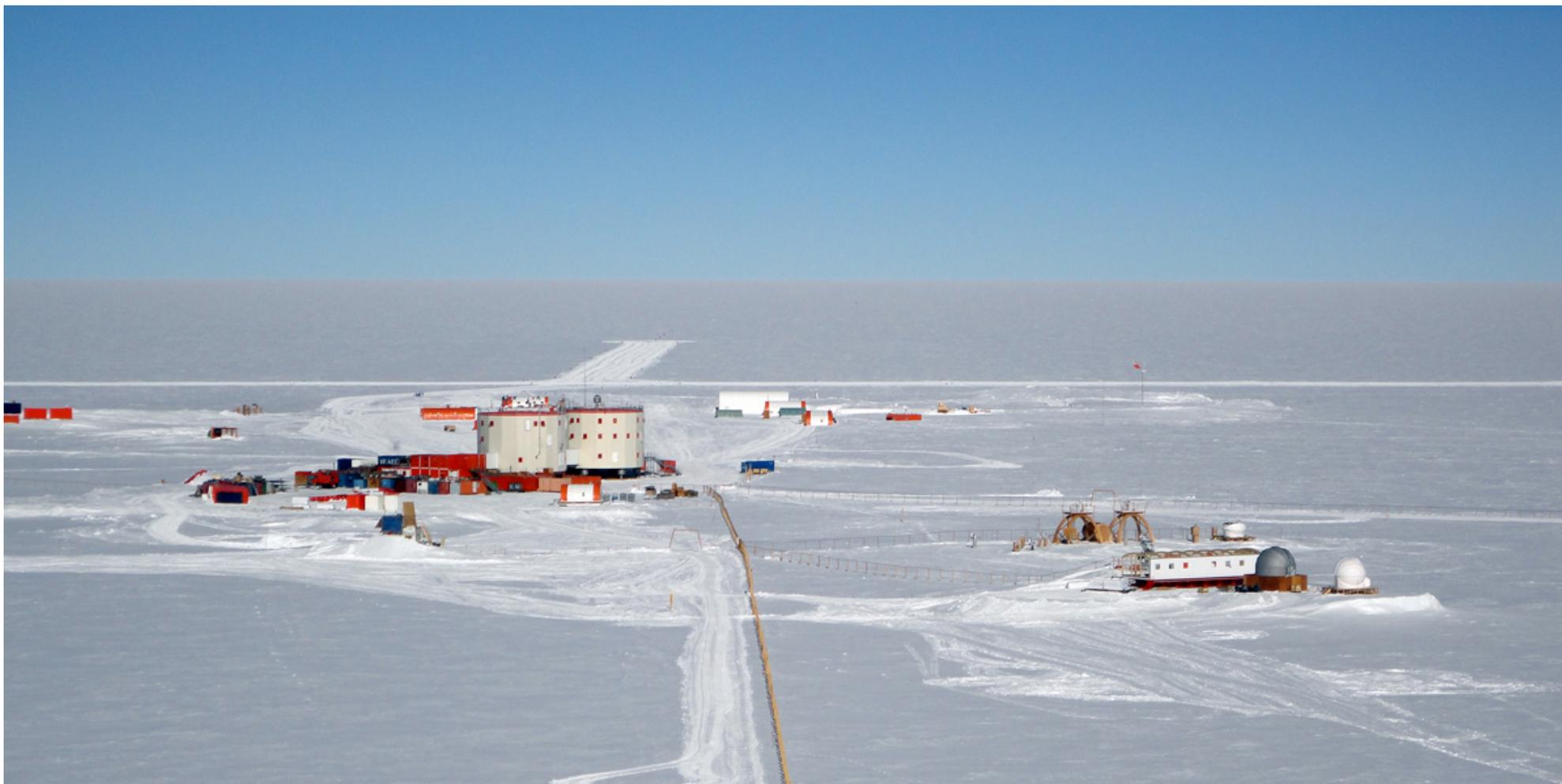
Telescope Crane definition

## 130t Crane



# コンコルディア基地(2003～)全景

(フランス+イタリア)



望遠鏡群

# 南極30m級テラヘルツ望遠鏡

## @新ドームふじ基地

- 口径 ~ 30 m
- 重量 ~ 1000 トン
- 電力 ~ 600 kVA  
(昭和基地 × 2)
- 越冬隊 ~ 7~10 人 / 冬
- 国際協力  
アジア, 豪州(大学), 米国(大学), 欧州(ESO?)
- 国立天文台 + 国立極地研究所
- 建物・輸送設備等  
望遠鏡の付帯設備として要求
- 運用期間 ~ 30年

10mの場合

← 70-100 トン

← 50 kVA

← 2 人 / 冬

CCAT 25m → 30m級

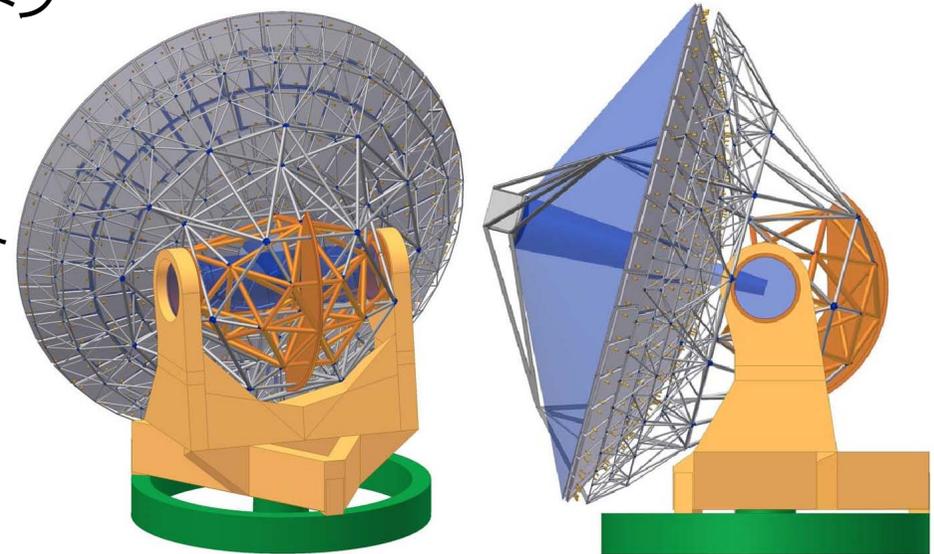


Figure 1: Truss with a distributed CFRP (grey) to steel (orange) connection. Masses for this design are given in Table I. Rod sizes are given in Table II.

(2015.11.2)

○感度等

(1) 連続波観測 (注 1)

(冬季 50%レベル@新ドームふじ)

周波数帯	感 度 (5 $\sigma$ rms) ( $\tau$ =積分時間)				角分 解能	素子数	Mapping speed [deg <sup>2</sup> hr <sup>-1</sup> mJy <sup>-2</sup> ]
	$\tau$ =60sec	1 hour	10 hours	confusion			
350GHz	0.80mJy	0.10mJy	0.033mJy	0.22 mJy	7.1"	4800×2	44×2
400	1.12	0.15	0.046	0.20	6.2"	6300×2	22×2
650	1.68	0.22	0.069	0.052	3.8"	16600×3	9.8×3
850	2.45	0.32	0.10	0.011	2.9"	27000×2	4.4×2
1300	13.6	1.76	0.56	0.00035	1.9"	10800×2	0.024×2 (注 3)
1500	46.4	5.99	1.89	0.00009	1.7"	14400×3	0.0022×3 (同)

(注 1: 点源を観測したときのフラックス密度での感度。感度は $1/\sqrt{\tau}$ に比例する。

(注 2: Confusion limit は Blain+2002 を元に求める)

(注 3: ホーンを使用予定)

(2) スペクトル線観測

(冬季 50%レベル@新ドームふじ)

周波数帯	周波数範囲	感度(5 $\sigma$ rms for $\Delta V=1\text{km/s}$ ) *			角分解能
		$\tau$ =60sec	1 hour	10 hours	
(220 GHz)	210-275	0.096 K	0.012 K	0.0039 K	11.3"
350	275-373	0.081	0.010	0.0033	7.1"
450	385-500	0.15	0.019	0.0061	5.5"
650	600-710	0.21	0.027	0.0086	3.8"
850	787-950	0.34	0.043	0.014	2.9"
1000	1010-1060	0.86	0.11	0.035	2.5"
1300	1260-1380	0.92	0.12	0.038	1.9"
1500	1440-1540	1.05	0.13	0.043	1.7"

\* ON 点積分時間。感度は ON+OFF 観測時。

(注 1: 感度は $1/\sqrt{\tau \Delta V}$ に比例する)

(注 2: 多素子受信機を搭載)

(注 3: 分光電波カメラ[R~1000,  $\Delta V=300\text{km/s}$ ]も搭載)

# 南極30m級

望遠鏡諸元

→資料(web)

今後、要検討

角分解能

1.9" @1.3THz

1.7" @1.5THz

# 超広域サーベイ観測

南天全体

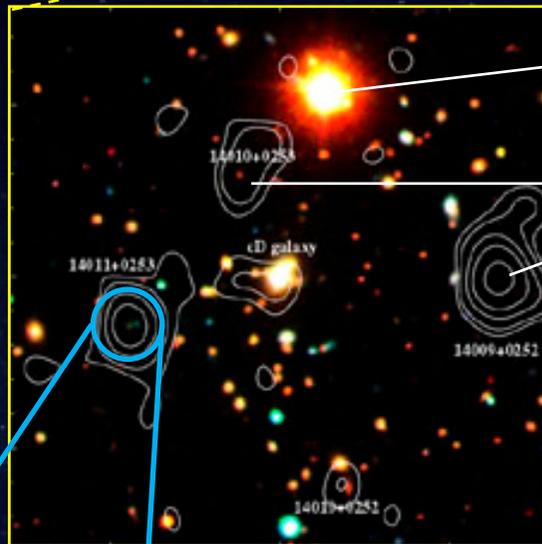
発見!

## 南極テラヘルツ望遠鏡

①南天全体から暗黒銀河を発見

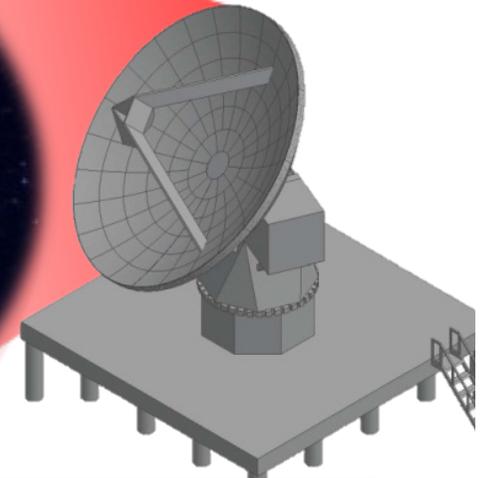
拡大

光学写真

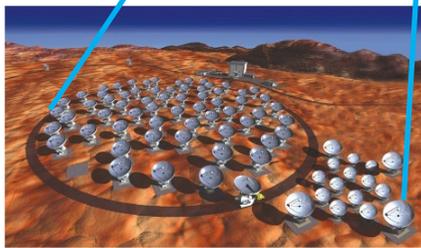


近くの銀河(光学写真)

遠方銀河(暗黒銀河)



- 超伝導電波カメラ  
5万画素 @850GHz
- 超広視野(世界最大)  
サーベイが得意



アルマ望遠鏡(チリ)、  
すばる、TMTなど

②発見した暗黒銀河の  
詳しい内部構造を調べる

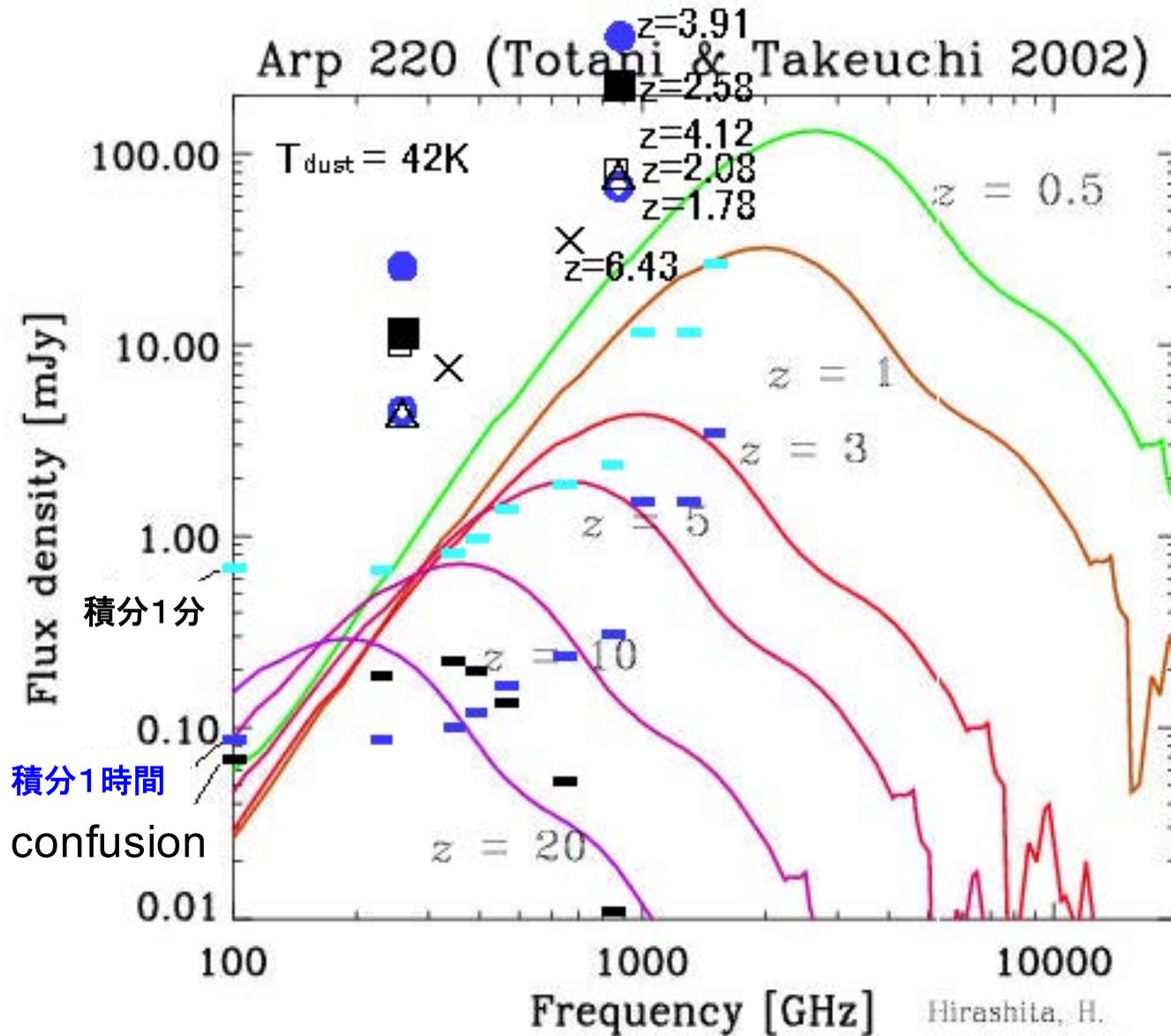
(12m, 7m × 66)

アルマ望遠鏡(チリ): 超高感度、  
超高角分解能。しかし視野が狭い

広域サーベイにおいて

30mアンテナ × >5万台と同等  
受信機雑音(カメラ) 1~2 K  
超高感度

# (例) 遠方銀河: ダスト放射の観測



南極30m鏡

# (例) AGN at high-z

(Leipski+2014)

QSO at  $z > 5$   
Herschel  
SDSS検出済

APM 08279+5255  
(Beelen+2006)

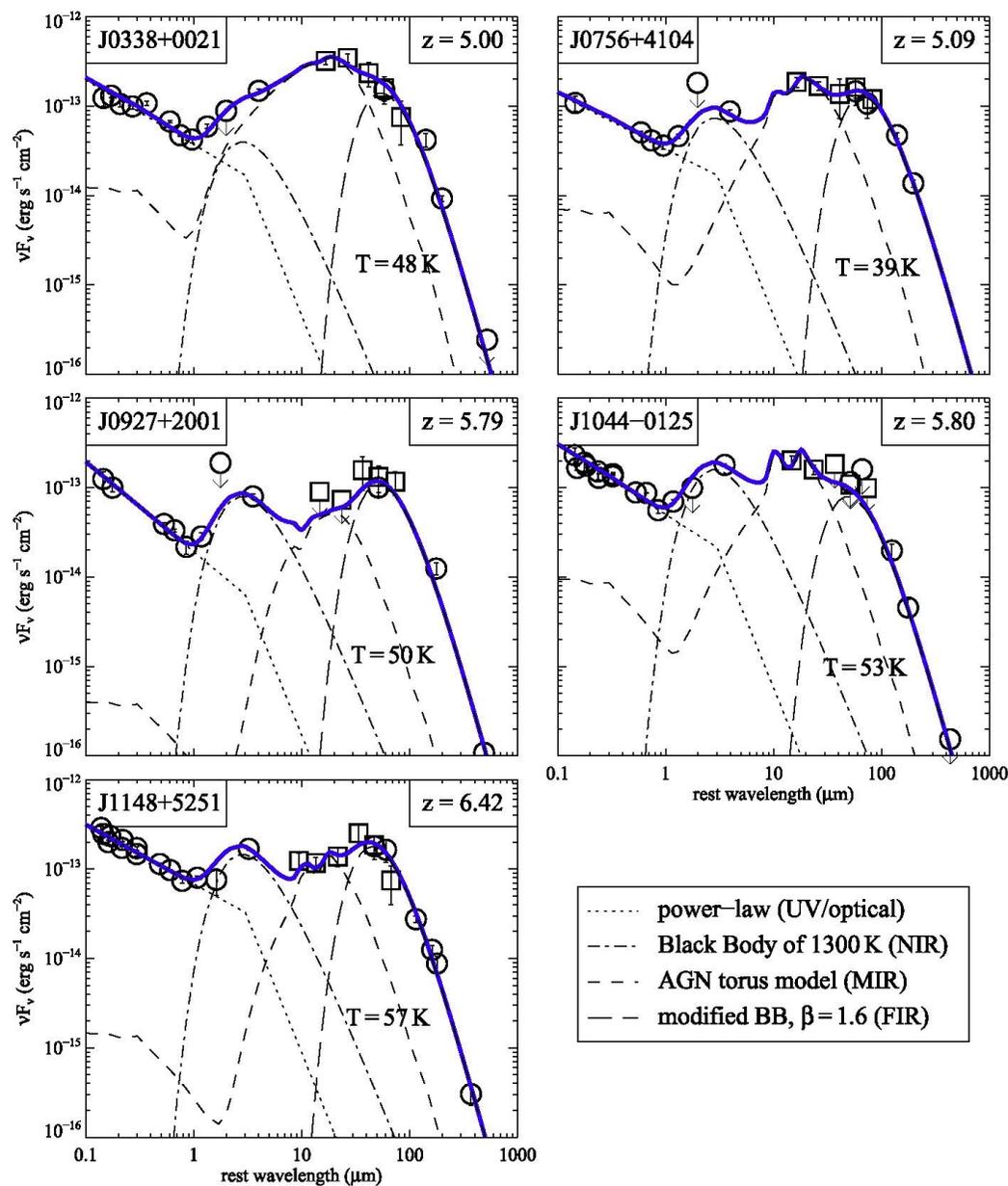
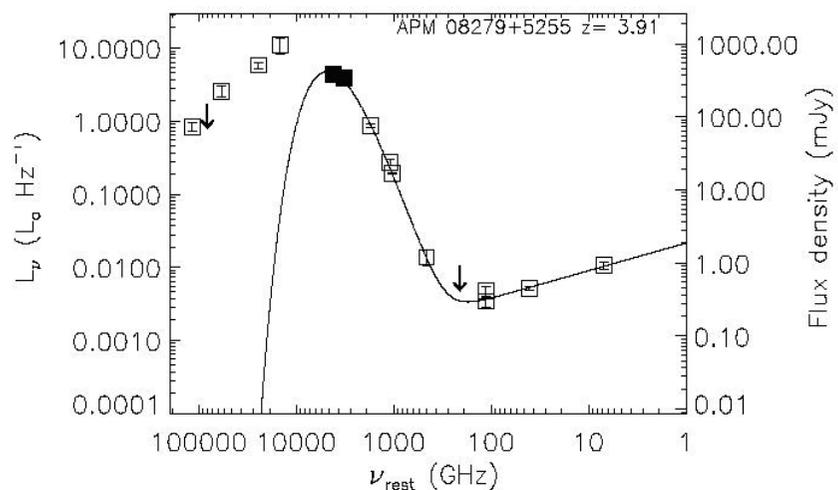
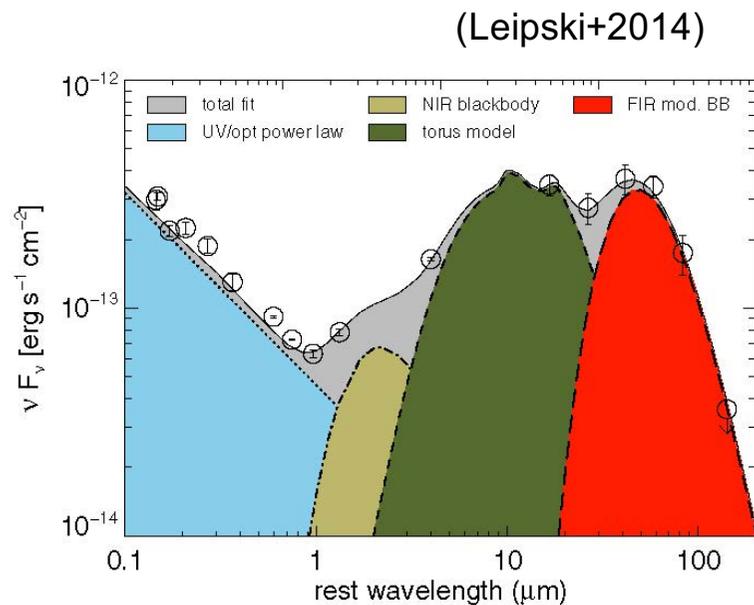
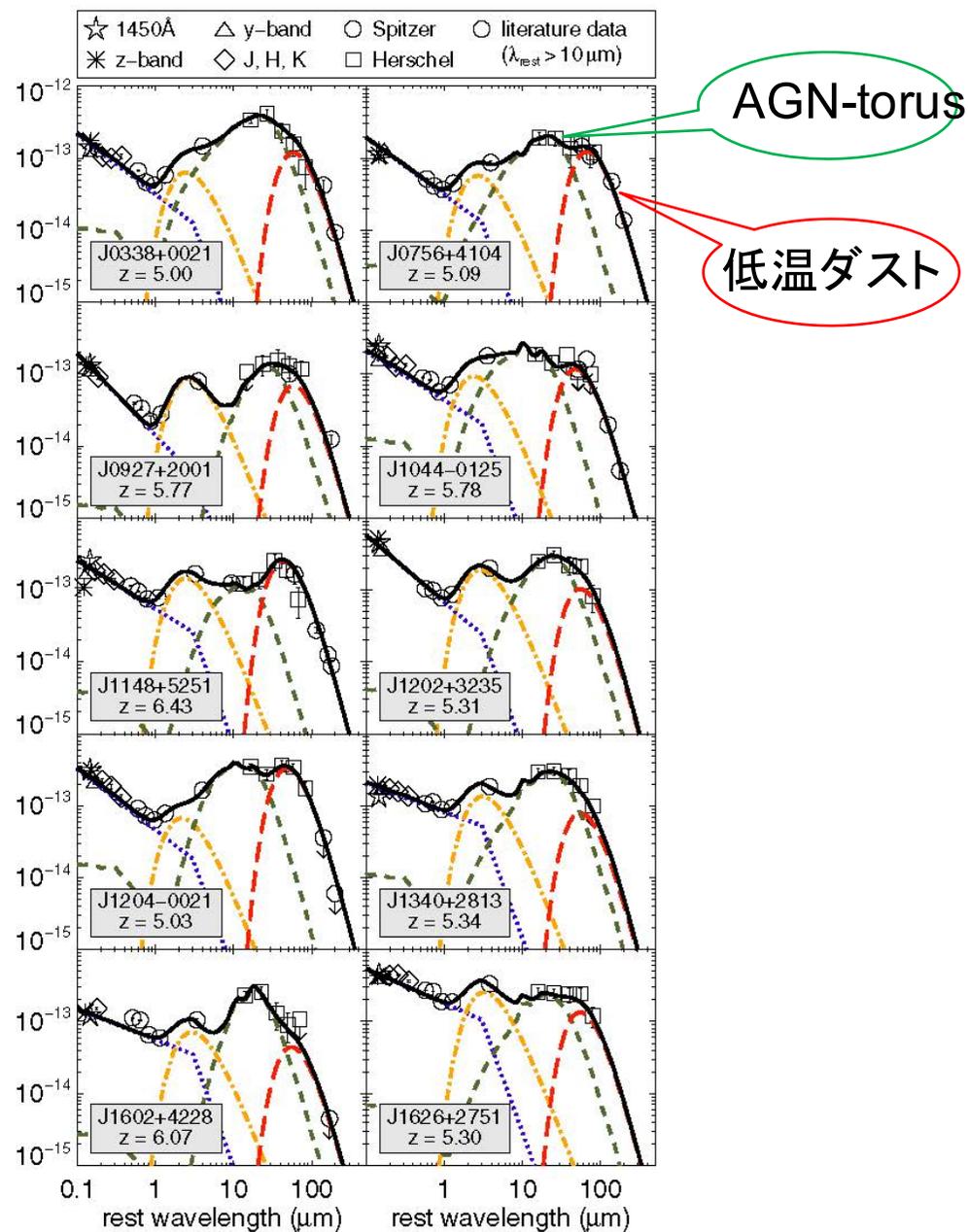


Figure 2. Observed SEDs of millimeter-detected quasars with at least two *Herschel* detections; for these objects multi-component SED fits were carried out as outlined in Section 2. The SED fit is performed using a power-law in the UV/optical (dotted line), a 1300 K blackbody in the NIR (dot-dashed line), a torus model in the NIR/MIR (short dashed line), and a modified blackbody in the FIR with emissivity index  $\beta$  fixed to 1.6 (long dashed line). The blue solid line corresponds to the sum of the fitted components which here represent the overall best fit. Thus, the temperature of the FIR component here may differ slightly from the overall mean temperature determined from all acceptable fits as presented in Table 3. The squares correspond to the new *Herschel* data.

(A color version of this figure is available in the online journal.)



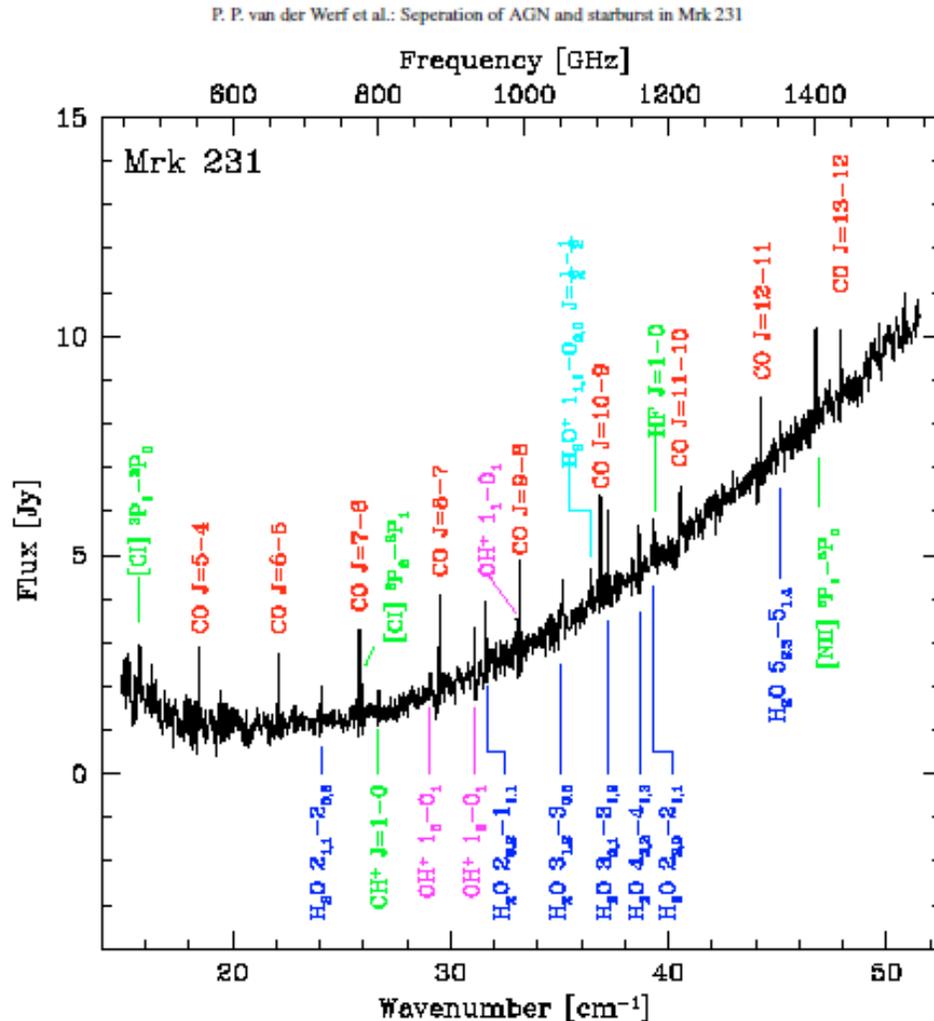
**Figure 2.** Schematic representation of the components used for SED fitting. As an example, we use the observed photometry of the  $z = 5.03$  QSO J1204–0021. (A color version of this figure is available in the online journal.)



**Figure 3.** SEDs of the 10 quasars detected in at least four *Herschel* bands. The plots shows  $\nu F_\nu$  in units of  $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$  over the rest frame wavelength. The colored lines indicate the results of a multi-component SED fit as described in Section 4.1. They consist of a power-law (blue dotted), a blackbody of  $T \sim 1200$  K (yellow dash-dotted), a torus model (green dashed), and a modified blackbody of  $\sim 47$  K (see Table 6; red long dashed). The black solid line shows the total fit as the sum of the individual components.

# Mrk231

ハーシェル衛星(van der Werf+ 2010)



SPIRE FTS spectrum of Mrk 231. Line identifications are given in red for CO lines, in blue for H<sub>2</sub>O, in magenta for OH<sup>+</sup>, in cyan for H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, green for the remaining lines.

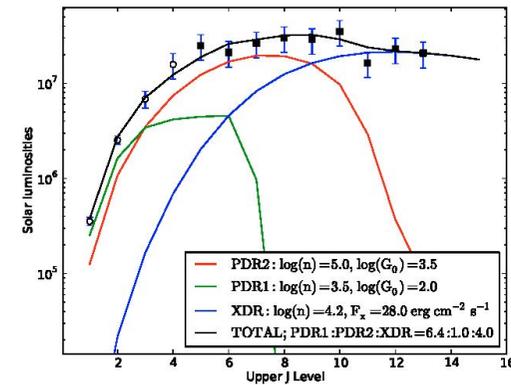
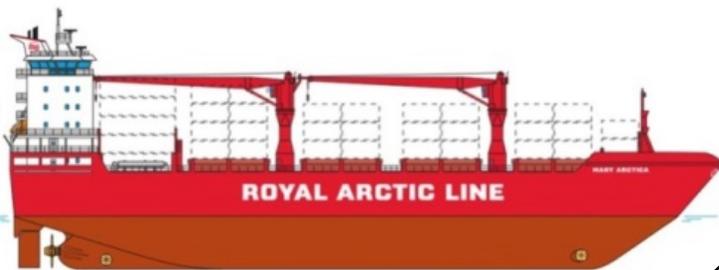


Fig. 2. Luminosities of CO lines from Mrk 231. Filled symbols represent measurements from the SPIRE FTS spectrum, while ground-based measurements are denoted with open symbols. Coloured lines indicate two model PDR components (red and green lines) and an XDR component (blue line). The sum of these three components is indicated by the black line and fits the CO measurements. In the legend,  $n$  denotes the number density of hydrogen nuclei ( $n = n_{\text{H}} + 2n_{\text{H}_2}$ ) in  $\text{cm}^{-3}$ ,  $G_0$  denotes the incident UV flux in units of  $1.6 \times 10^{-3} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  for the PDRs, and  $F_x$  the incident X-ray flux for the XDR. The legend also indicates the relative emitting areas of the three components.

CO  
 up to J=8  
 by UV radiation from star formation  
 J>8  
 X-ray heating by the accreting SMBH

# 輸送（重量物：海上）

南アフリカ  
ケープタウン

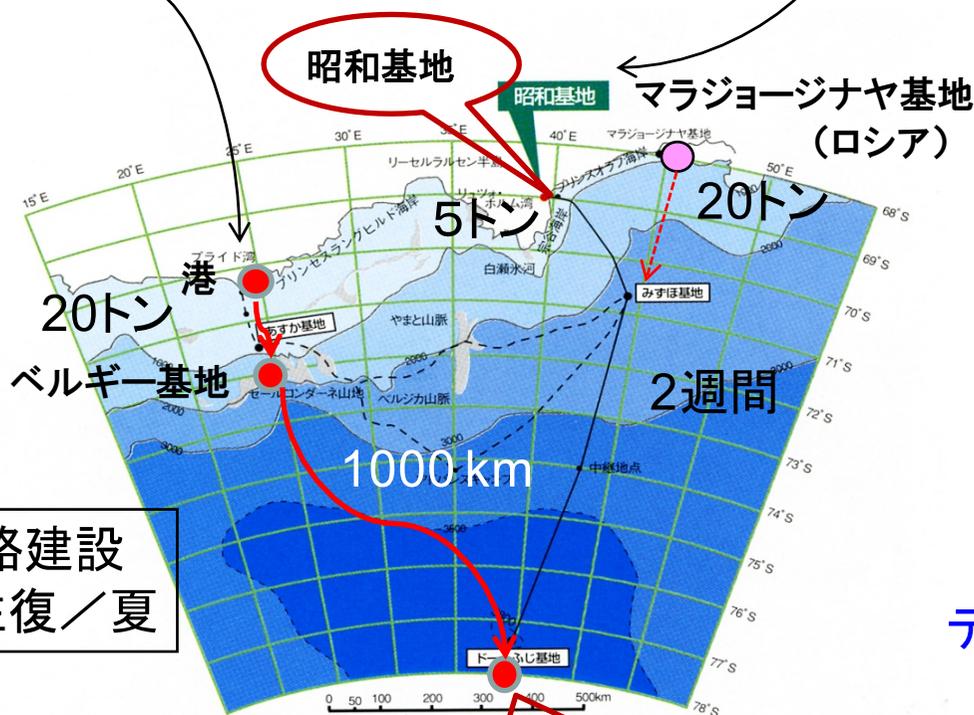


デンマークの砕氷貨物船  
(積載量 8000t)

オーストラリア  
フリーマントル



観測船しらせ (積載量 1100t)  
研究機材 ~ 100t



道路建設  
3往復 / 夏

新ドームふじ基地

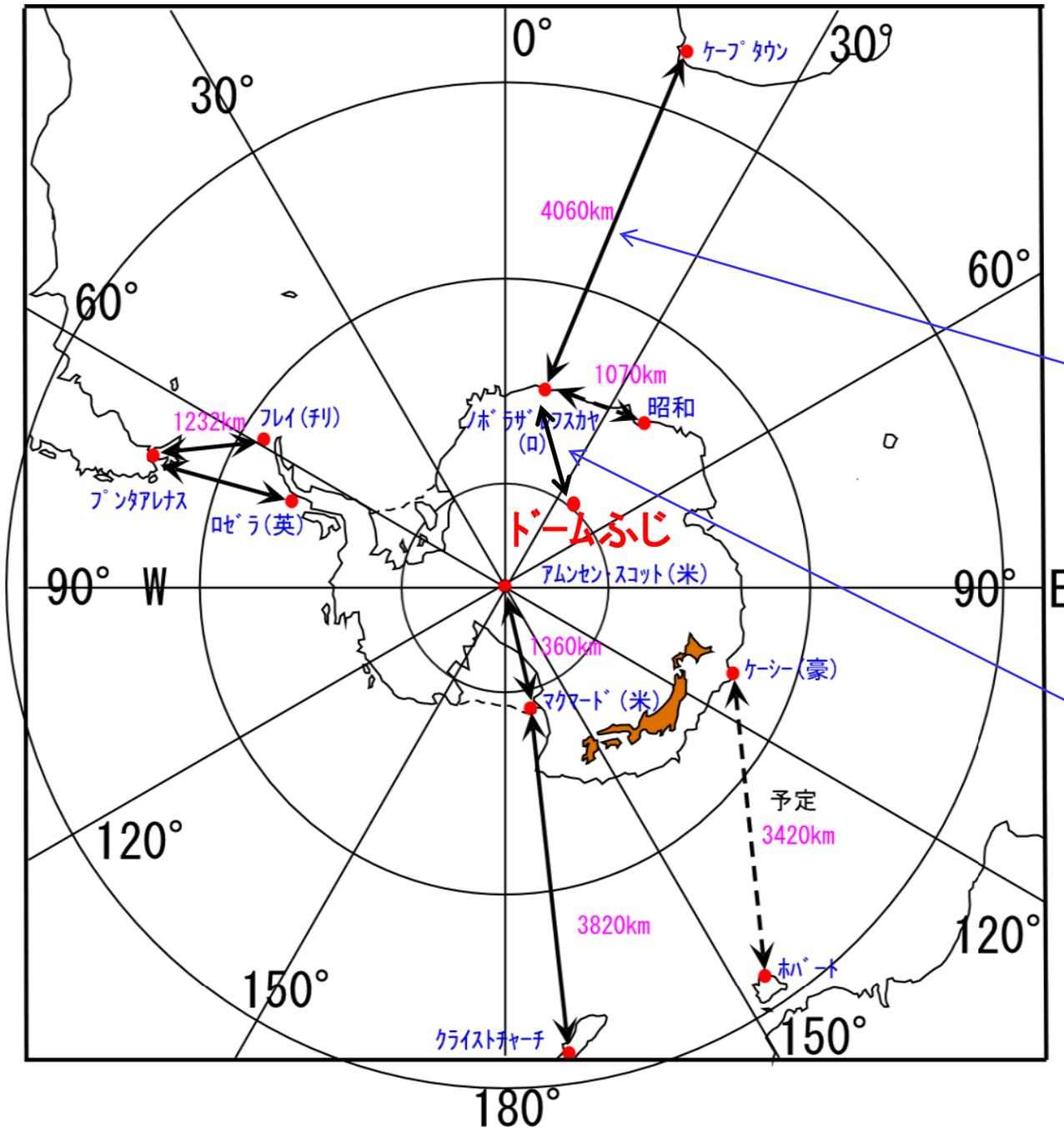
昭和基地付近は氷が厚い  
「しらせ」が着岸できないこともある  
輸送力が落ちる可能性あり



- (1) ベルギー基地用の港
- (2) マラジョージナヤ基地 (ロシア)  
(氷が薄い)

デンマーク貨物船をチャータ (100日 / 夏)  
ノルウェー、ベルギー、日本で負担

# 航空輸送（人、軽量精密部品）



イリュージン IL-16(ロシア)



バスラーターボ(~3トン)



# 第9期南極観測計画

## 「南極30m級テラヘルツ望遠鏡」に向けての調査

---

### (1) 新ドームふじ基地の気象測定

高さ40～50m鉄塔建設

- ・風速の高度分布: 望遠鏡の指向性、「風よけ」の必要性
- ・温度の高度分布: 望遠鏡の熱変形による鏡面誤差、指向性誤差

### (2) 地盤(雪面下)調査+アンテナ基礎設置法の開発

重量1000トン以上を水平に設置

### (3) ベルギー基地から新ドームふじ基地までの輸送ルート調査

セールロンダーネ山脈・クレパス帯の通過ルート

### (4) 輸送方法の検討

### (5) 夏季建設期間の最大化の検討

40日→>100日(11月～2月): 建設は昼夜2交代

### (6) 電力供給法の検討・開発(～600kVA)

# リッジAの可能性？

Dome A ~ 新ドームふじ

水蒸気量 (PWV)

COMPARISON OF TERAHERTZ TRANSMISSION AT DIFFERENT OBSERVATORY SITES

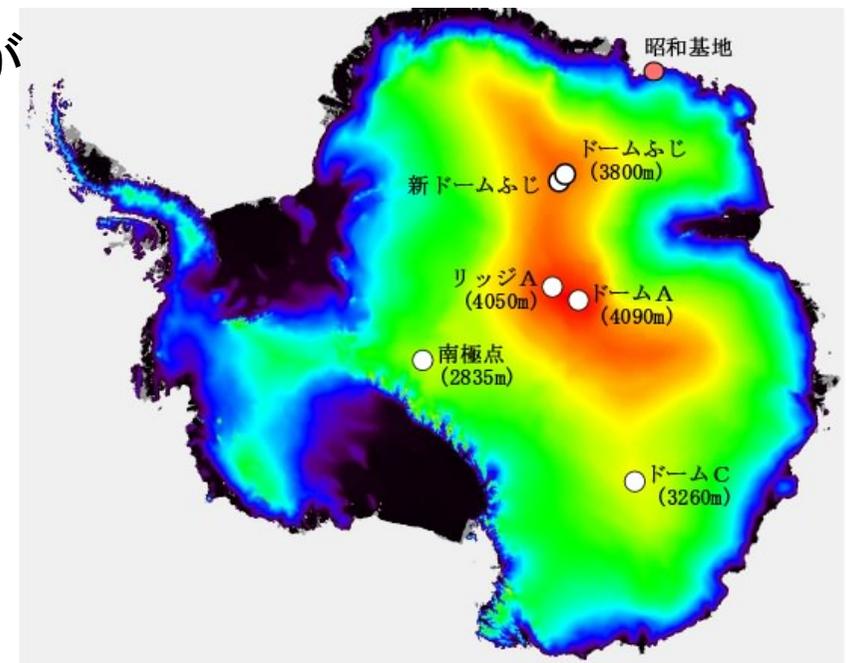
(Yang+2010)

Site <sup>a</sup>	25%ile PWV (mm)	50%ile PWV (mm)	Median winter transmission, 660 GHz	Best 25% winter transmission, 1460 GHz	Best 10% winter transmission, 1900 GHz
Dome A, 4100 m .....	0.10	0.14	74%	28%	4%
Ridge A, 4050 m .....	0.08	0.12	77%	33%	11%
Dome C, 3250 m .....	0.15	0.24	60%	13%	<1%
South Pole, 2850 m .....	0.23	0.32	52%	6%	0%
Chajnantor <sup>b</sup> , 5050 m .....	0.35	0.60	47%	7%	0%
Mauna Kea <sup>c</sup> , 4100 m .....	1.0	1.5	15%	0%	0%

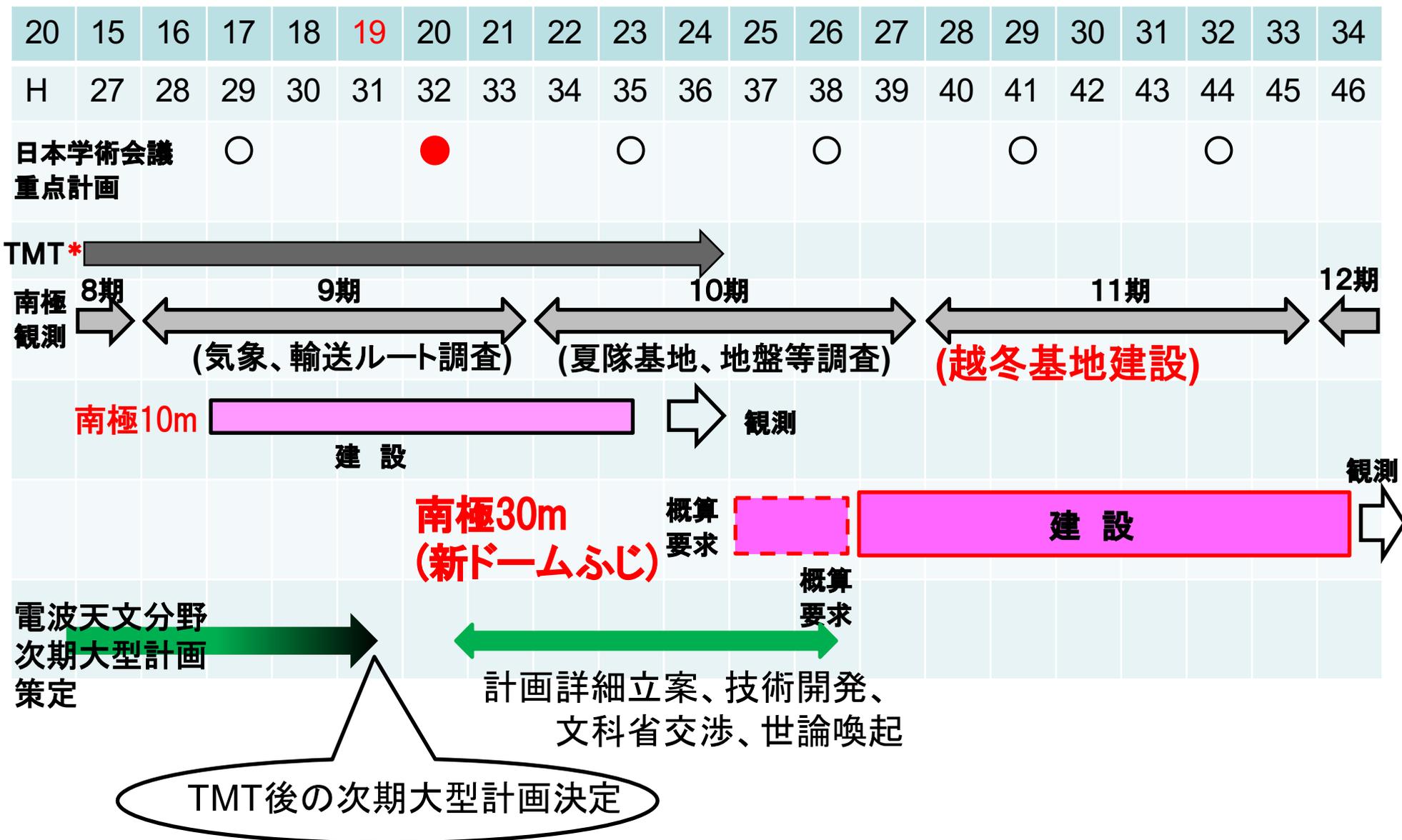
リッジA・・・南極内陸部で最良  
新ドームふじと大きくは変わらないが  
米国、豪州、中国は要求してくる？

問題点・・・デンマーク船をチャーターできるか？  
(制限100日/夏)  
国立極地研究所にはメリットなし？

当面・・・「新ドームふじ基地」を基本とし、  
「リッジA」の可能性も背後で検討



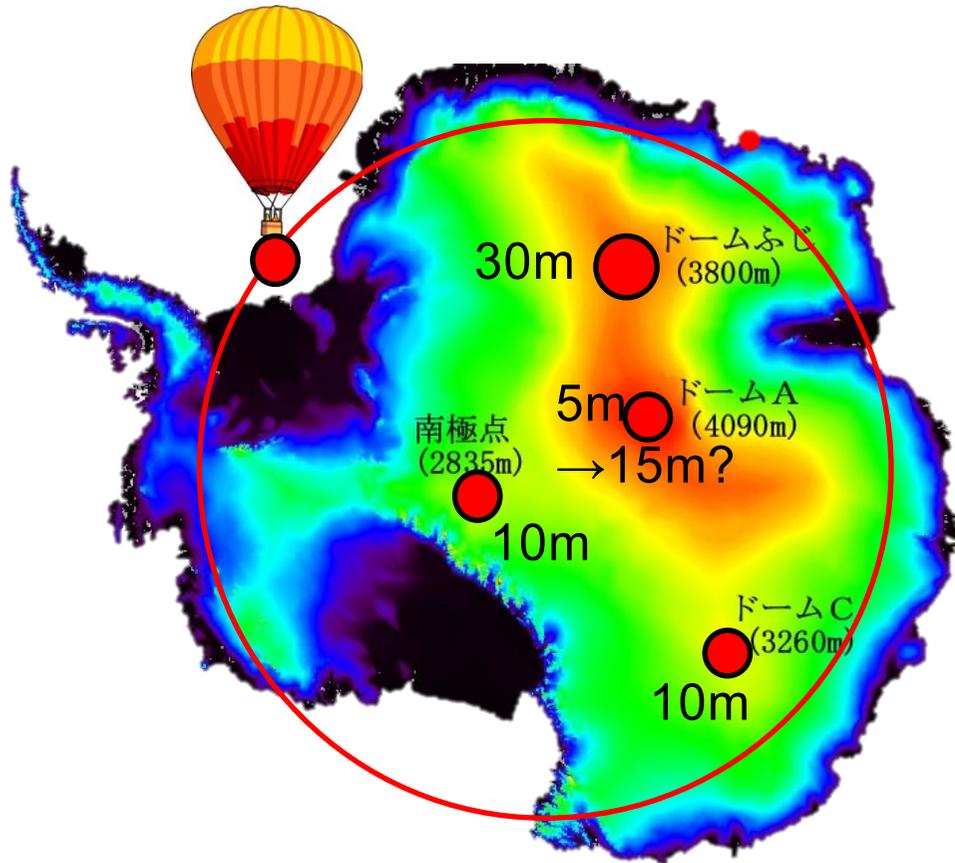
# 南極テラヘルツ望遠鏡建設計画(予定)



\* TMT: 30m光赤外線望遠鏡(ハワイ:建設中)

# 将来の発展性

周回気球搭載望遠鏡  
(土居他)



○(大型)赤外線望遠鏡

○赤外線テラヘルツ干渉計



○サブミリ波VLBI

220GHz→600GHz

密なUV平面

「巨大ブラックホールを見る」