

南極赤外線望遠鏡の開発
Antarctic Infrared Telescope (AIRT)

市川隆
東北大学理学研究科天文学専攻

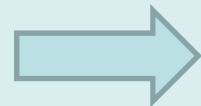
内容

1. 南極で目指す天文学
2. 望遠鏡と観測装置の仕様
3. 南極の環境とサイト調査
4. 望遠鏡建設のための諸問題
5. 今後の展望

主な科学的目的

- スーパーアースを持つ多惑星系のトランジット連続観測による系外惑星の大気構造の研究
- テラヘルツ望遠鏡と共同観測によるダストに覆われたhigh-zスターバースト銀河の広域探査と星生成活動の研究
- ヘテロダイン赤外線分光器による惑星の大気循環構造の研究

＋南極の環境

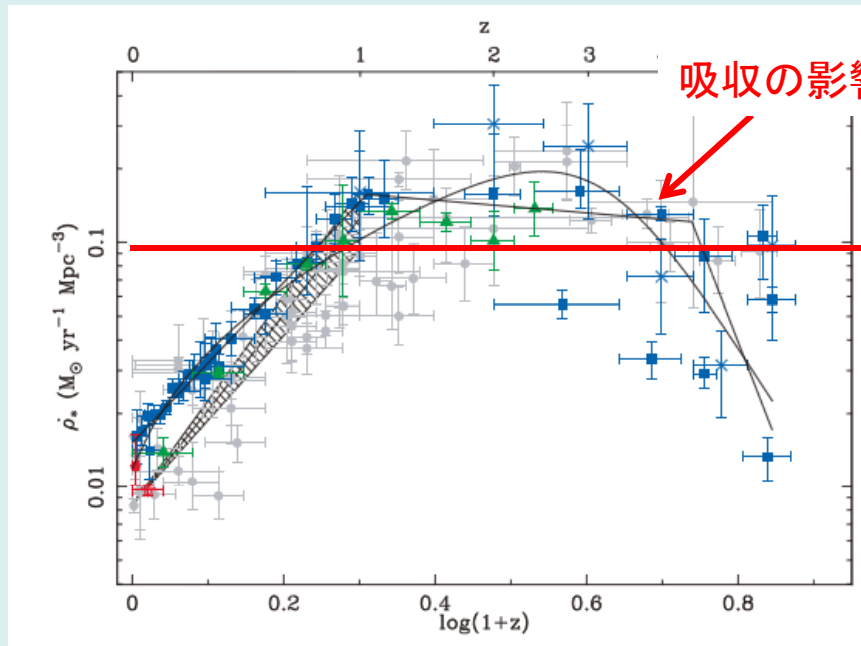


必要とする仕様、開発

- High-zで、ダストに覆われた銀河

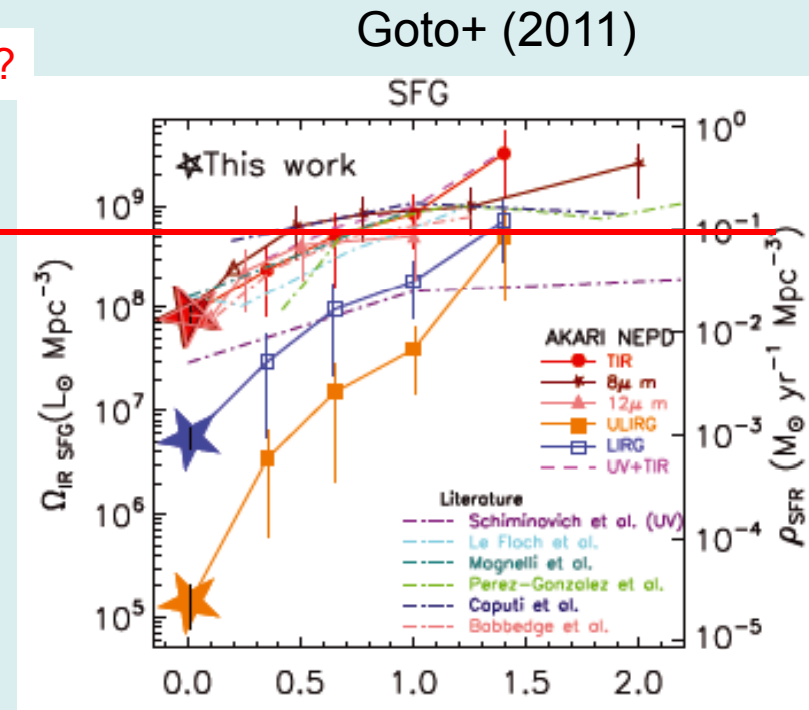
銀河での星生成の進化

赤外線銀河の占める割合



Hopkins+ (2006)

$z=2-3$ (10Gy-11Gy)にピーク

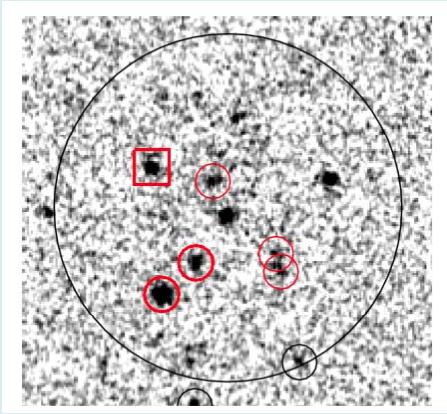


Goto+ (2011)

$z \sim 1.5$ から過去、急激に大きくなる

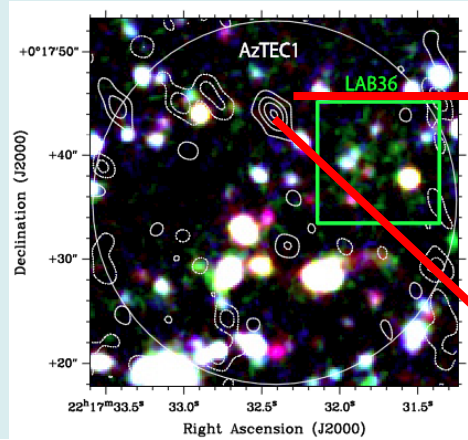
High-zでのスターバースト銀河探査 サブミリ銀河(SMG)

SSA22 ($z \sim 3$)



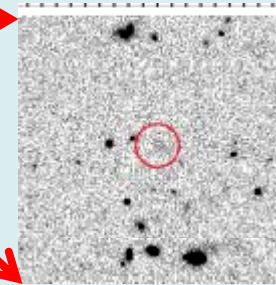
AzTEC20の近赤外線画像

Uchimoto+ (2012)



AzEC1とSMA860 μ m

すばる+MOIRCS

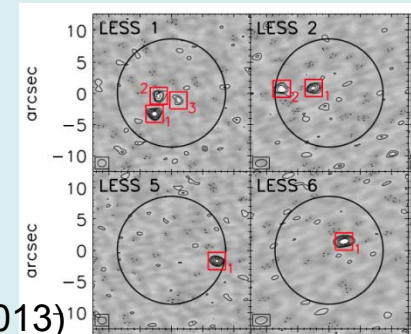


かろうじて見える

ビームサイズが大きい

High-z銀河はしばしばclumpy

高い空間解像度が必要



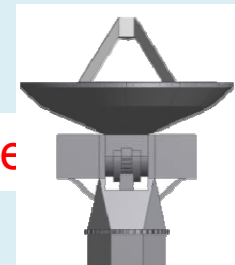
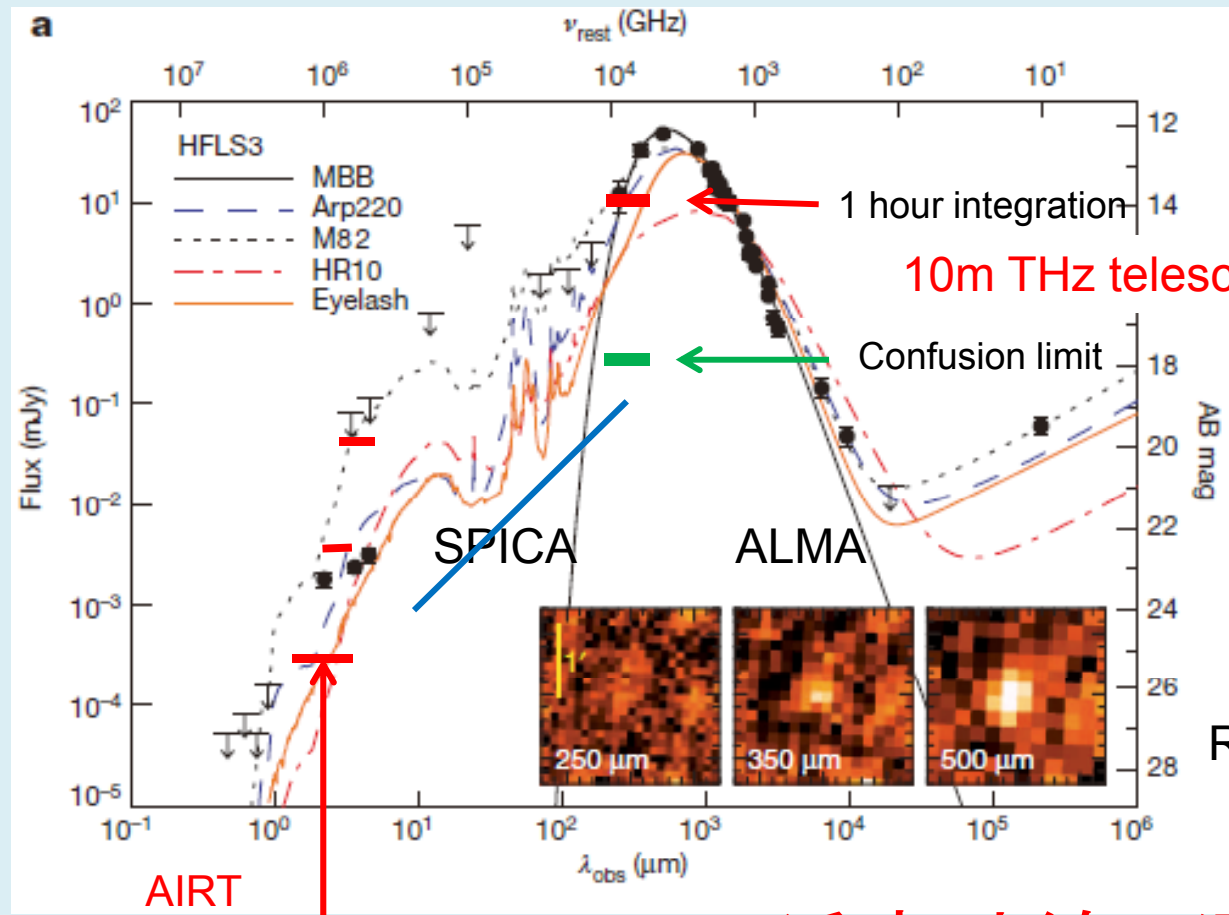
Hodge+(2013)¹⁰

SMGをALMAで見ると、多数のclumpから成っている

- ダストに覆われたhigh-zスターバースト銀河

z=6.5のHerschel銀河(2000Msun/yr)

250-, 350- 500- μm



Riechers+ 2013

2.4 μm , S/N=5 (1 hour)

近赤外線で深い観測

➤ 太陽系惑星の大気構造

• 中間赤外線ヘテロダイン分光

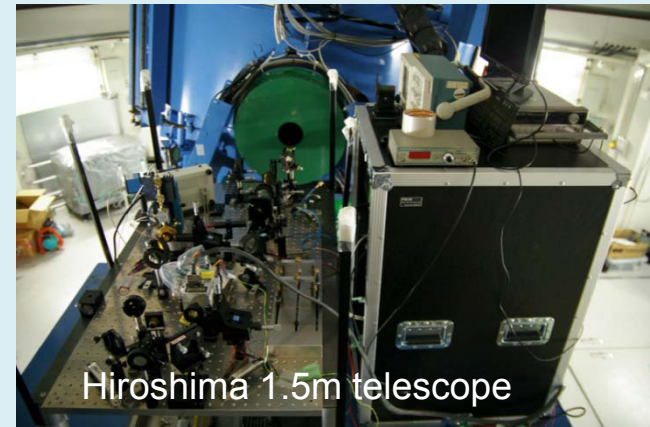
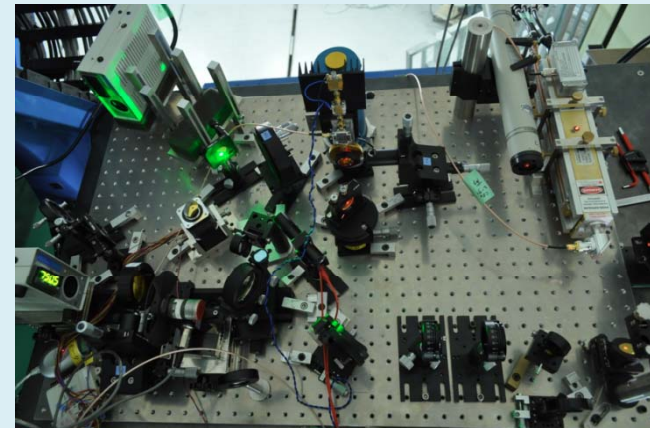
- $\lambda = 7\text{-}13\mu\text{m}$, ($17\mu\text{m}$)
- $R = 10^{6-7}$
- Band Width 1GHz

mixing ratio, velocity, pressure, excitation condition, temperature, and the vertical information of H_2O , CO_2 , O_3 , CO , HO_2 , ...



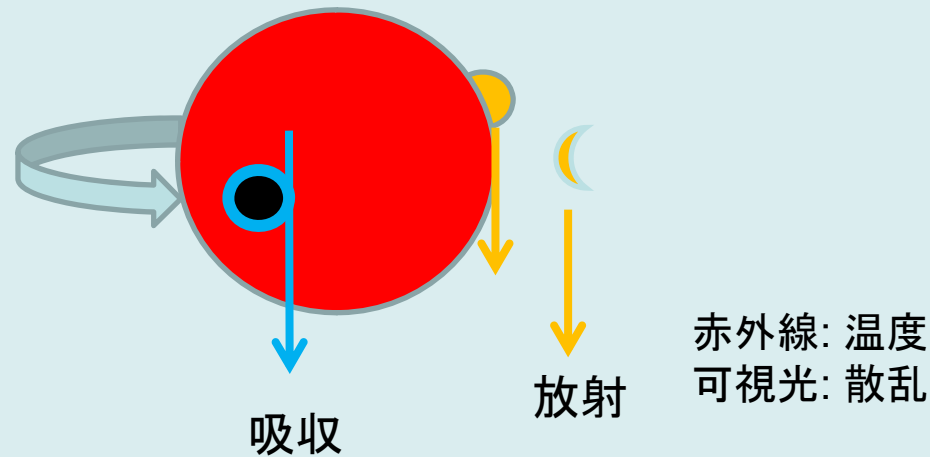
高い波長分解能
安定した環境

Nakagawa+ 2013



Hiroshima 1.5m telescope

➤ 地球型惑星の水蒸気大気の検出



Transmission spectroscopy
大気成分、散乱

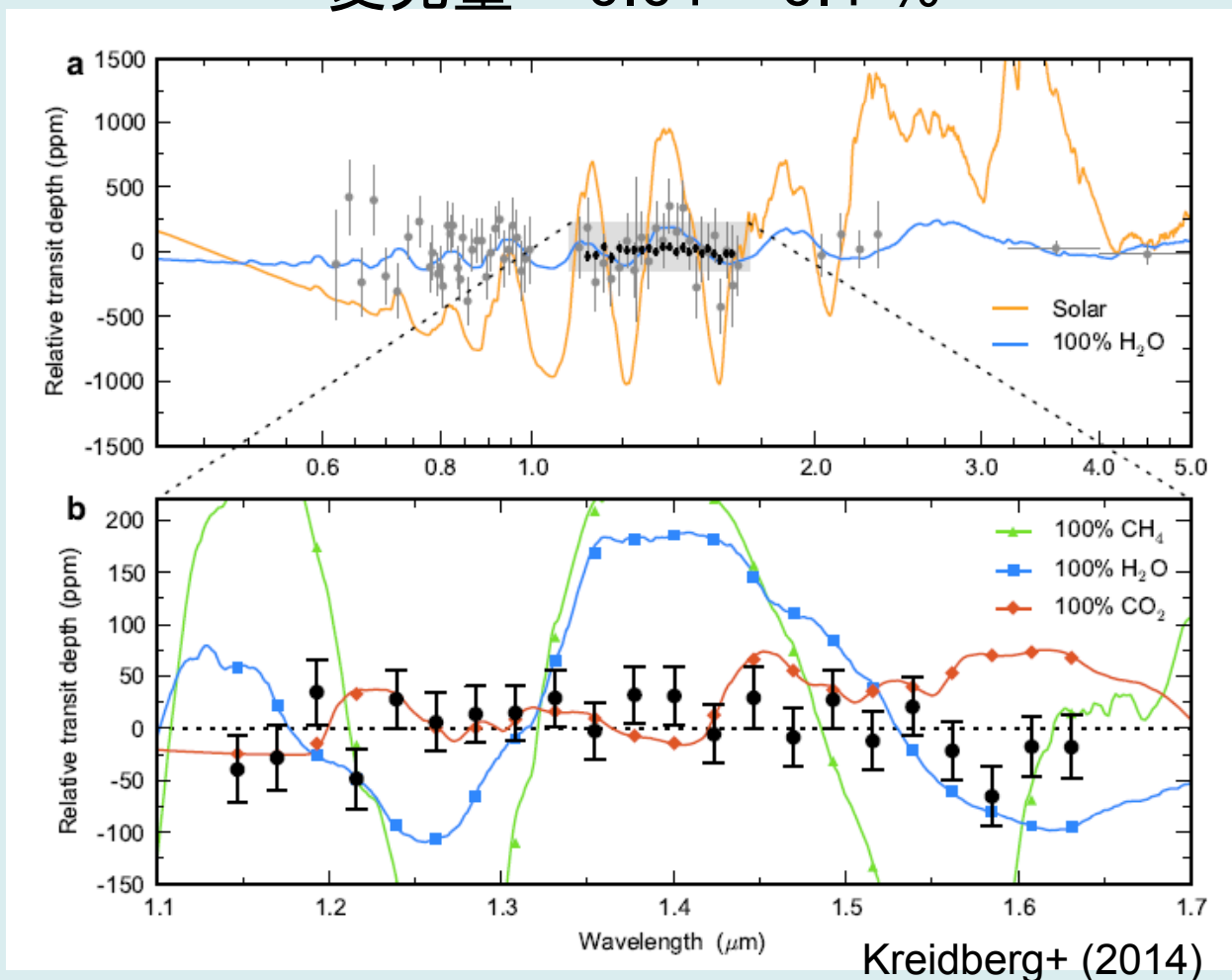
トランジット観測によるTransmission Spectroscopy

大気を持つスーパーアースについての観測例はごくわずか(1~3例)

Hubble望遠鏡による最近の高精度観測

雲の大気

変光量 $\sim 0.01 - 0.1 \%$

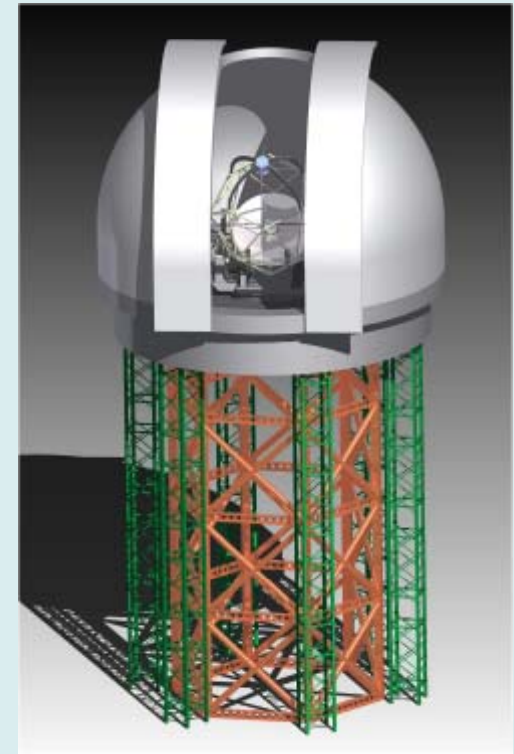
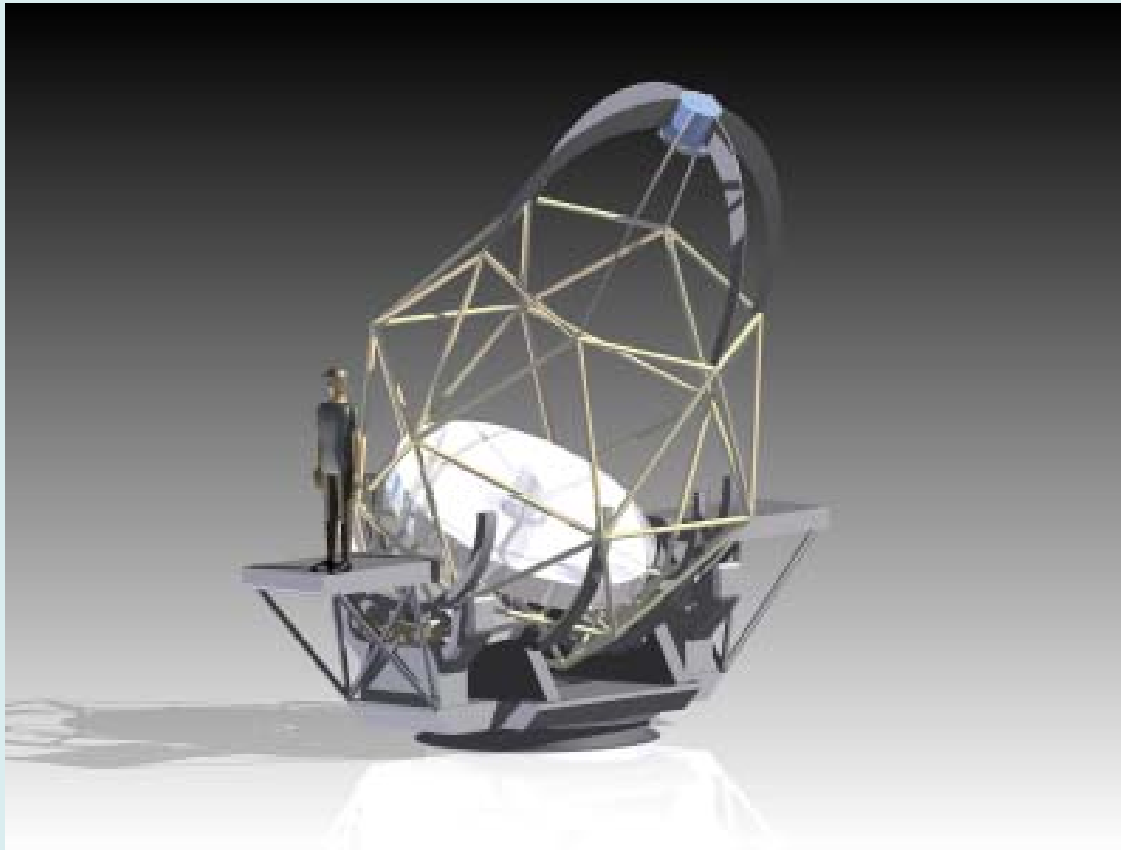


分光分解能 ~ 70
12 transits
の重ね合わせ

誤差
30ppm

長期間、ハッブル並の安定した観測

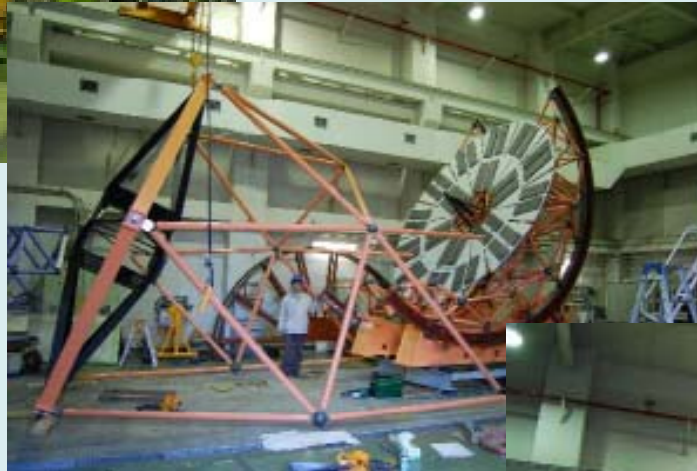
➤ 2.5m 赤外線望遠鏡



京都大学の岡山3.8mの技術 約5億円

Okayama 3.8m telescope

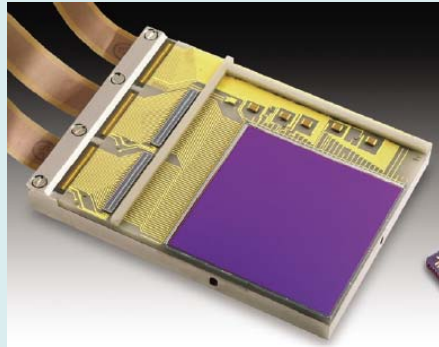
New technology of telescope mount
Kurita+ (2009)



- Light weight
- Easy to assemble

●三色赤外線カメラ・低分散多天体分光モード付き

1 μ m-5 μ m 3色同時
1色は低分散分光($r\sim 50-100$)



InSb 2Kx2Kx3

Proto model



Under assembling

2Kx2K VIRGO (1~2.5 μ m)
256x256x2 InSb (2.5~5 μ m)

基本的仕様

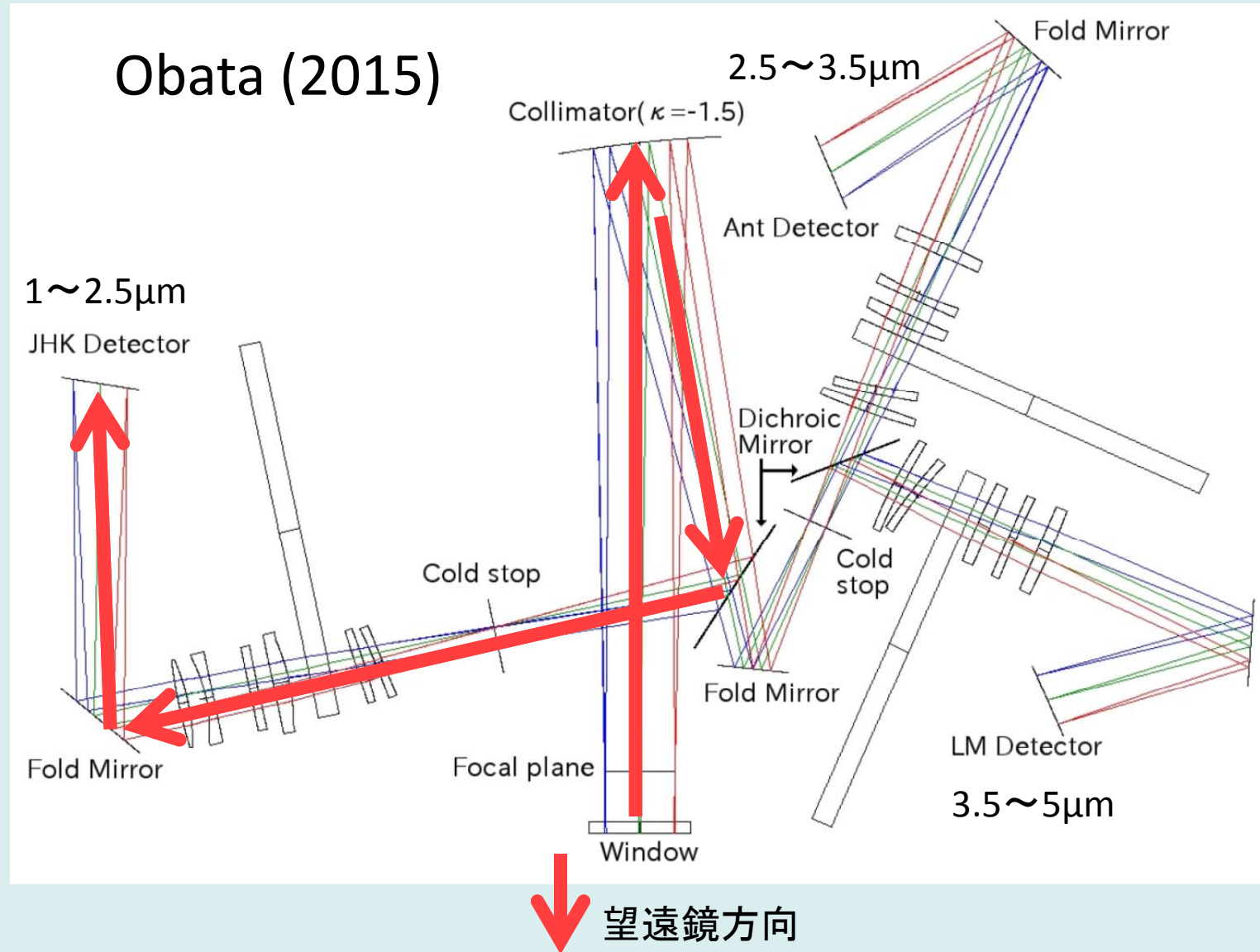
広視野で高空間分解能
広視野(7.5'x7.5')、回折限界(0.2"@2 μ m)

- ピクセルスケール 0.221" のカメラ
- 瞳収差量 630-760 μ m のコリメーター(MOIRCS程度)

分光用にコリメーターが必要

高い測光精度
迷光が5 - 6%

光学系全体図



カメラ評価

結果：目標値をほぼ満足

- ・ スポットダイアグラム
 - JHKは2pixel四方 / Ant,LMカメラは回折限界内に収まるスポット径
- ・ エンスクエアドエネルギーダイアグラム
 - 回折限界の距離(レイリーの評価基準)で70%程度
- ・ ストレール比
 - 0.8程度
- ・ ディストーション 1%

カメラ評価 / スポットダイアグラム

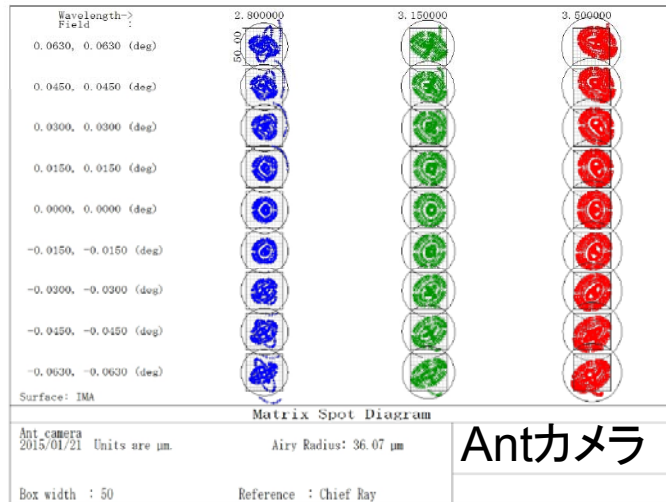


図 10.10 Ant カメラのスポットダイアグラム

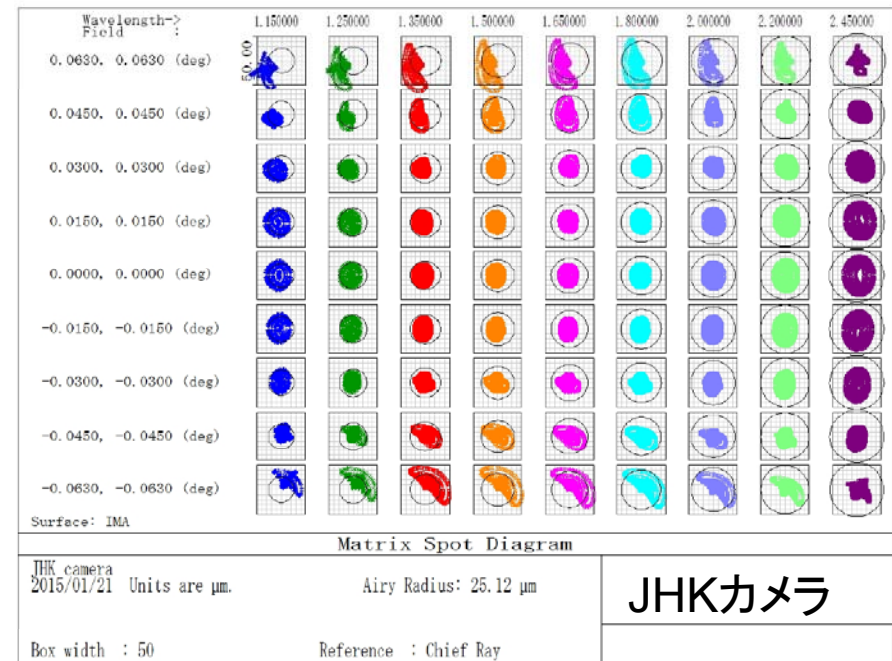


図 10.9 JHK カメラのスポットダイアグラム

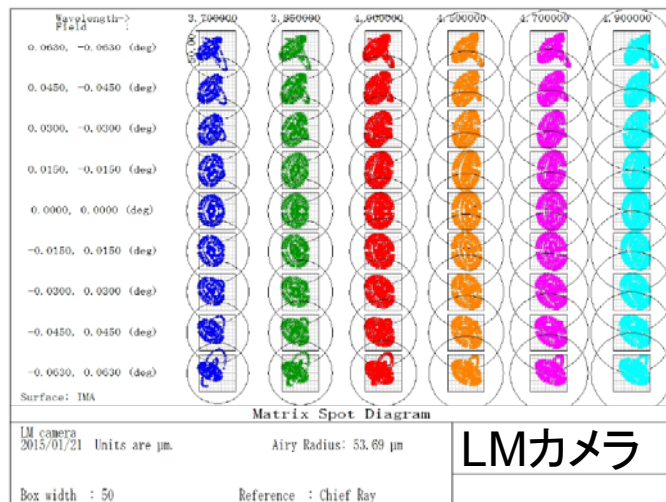


図 10.11 LM カメラのスポットダイアグラム

JHKは黒枠(2pixel四方)、Ant, LMは黒い円(回折限界)に収まっている。

目標値を満足している

カメラ評価 / エンスクエアドエネルギーダイアグラム

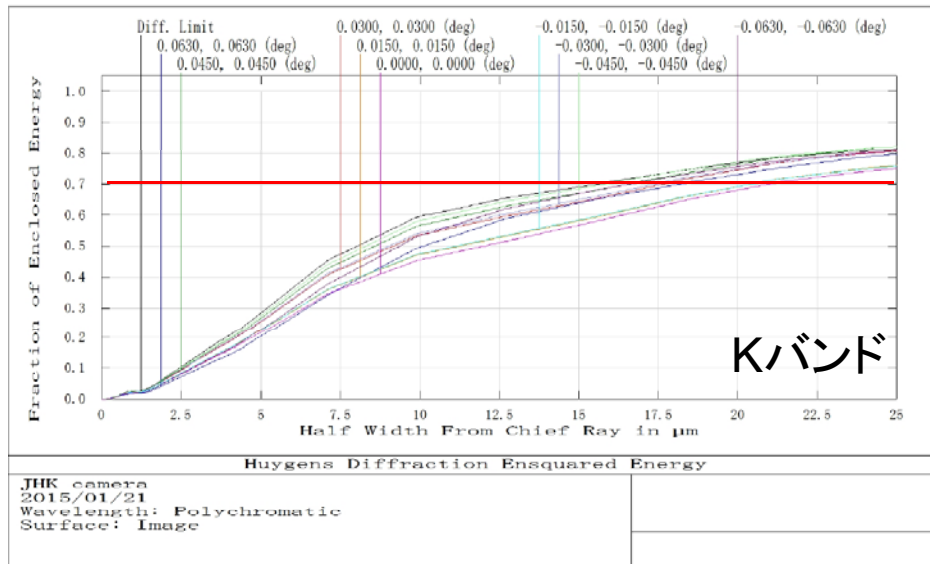


図 10.14 Kバンドのエンスクエアドエネルギーダイアグラム

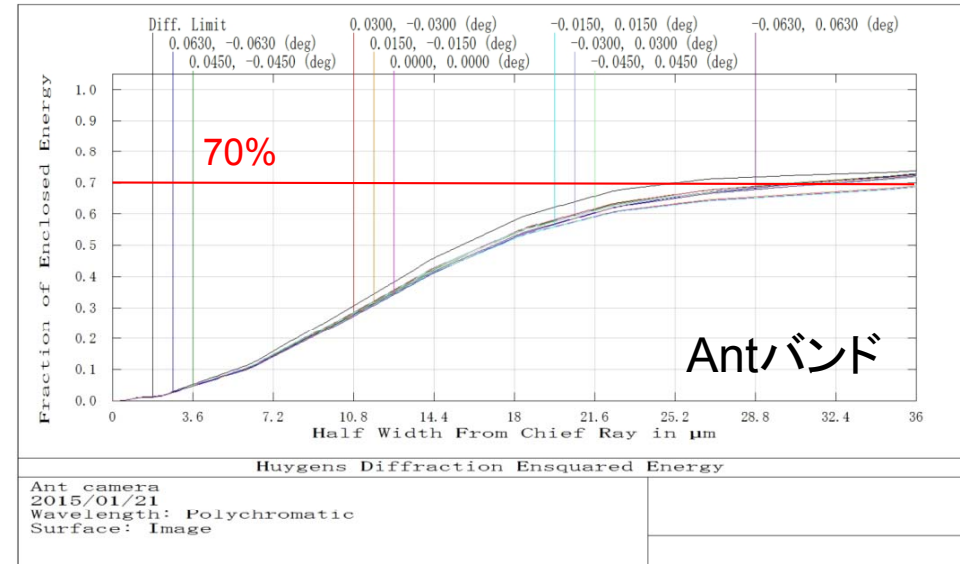


図 10.15 Antバンドのエンスクエアドエネルギーダイアグラム

- ・ 全バンドで回折限界の線と同等の**70%の光量**が収まっている

カメラ評価 / ストレール比

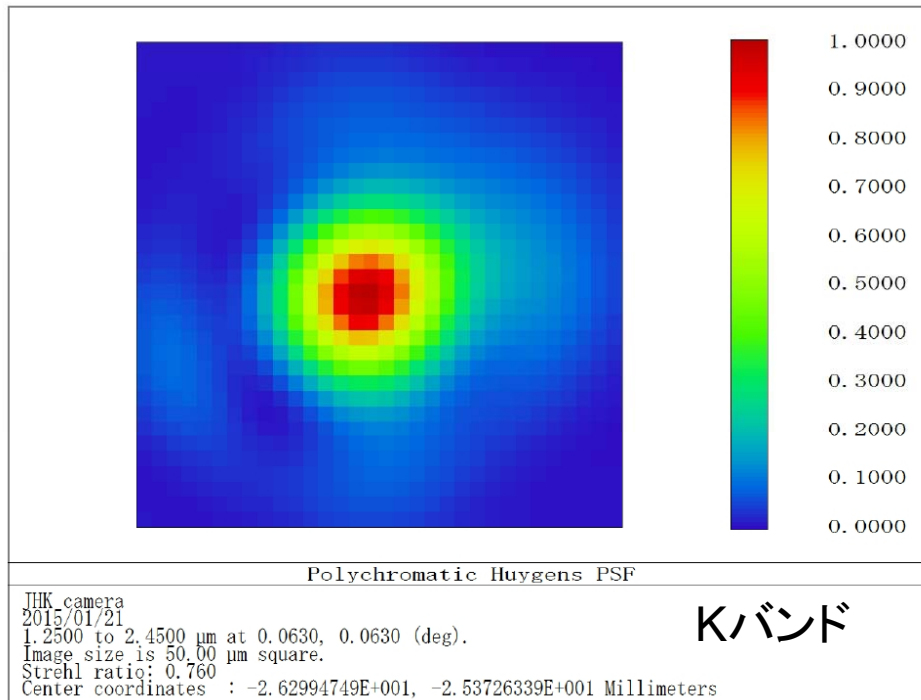


図 10.23 KバンドのPSF

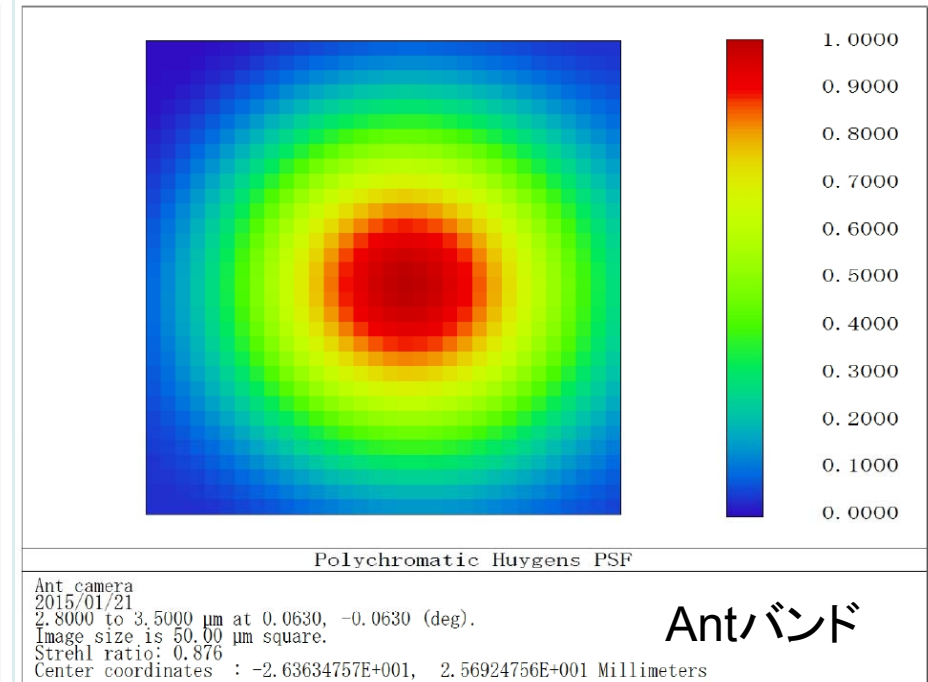


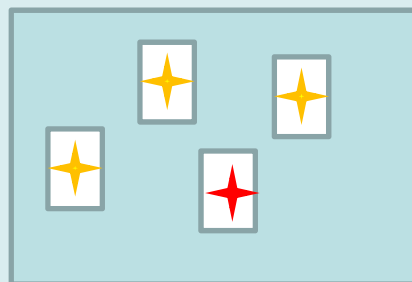
図 10.24 AntバンドのPSF

- ・ Kバンドの視野端でも**ストレール比0.75**程度(左図)
 - 0.8という目標値より少し低いが、**目標値とほぼ等しい**。これ以上の改善は厳しい?
- ・ AntバンドがKと比較してPSFが広がっているのは、**回折の影響**

今後の検討

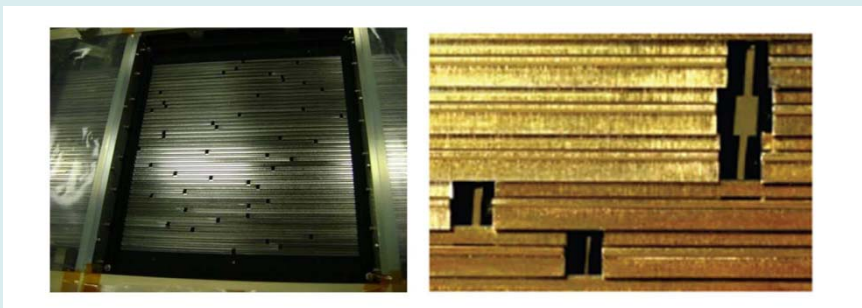
系外惑星に特化した多天体分光機能

簡単な多天体用スリットマスク

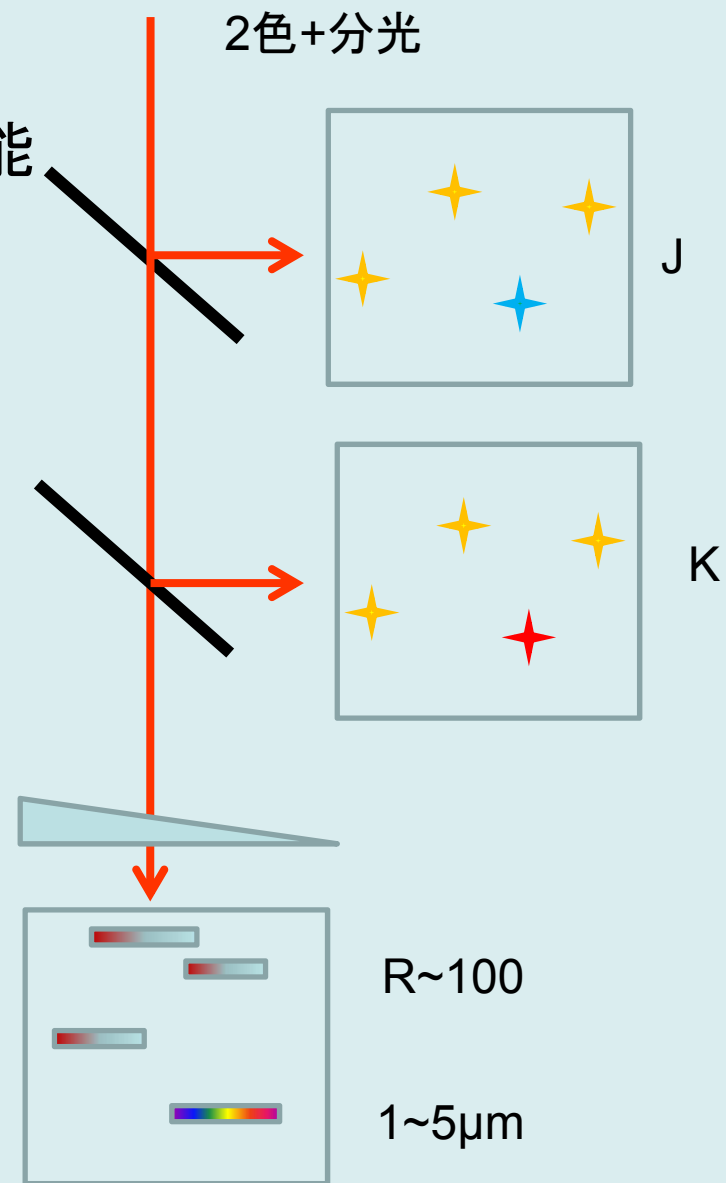


~10 参照星

KECK MOSFIREの例

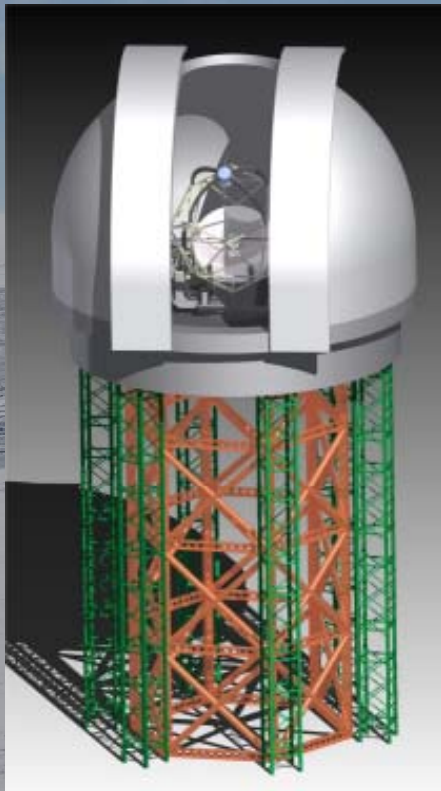


McLean+ 2010



設置する場所

国立極地研究所ドームふじ基地



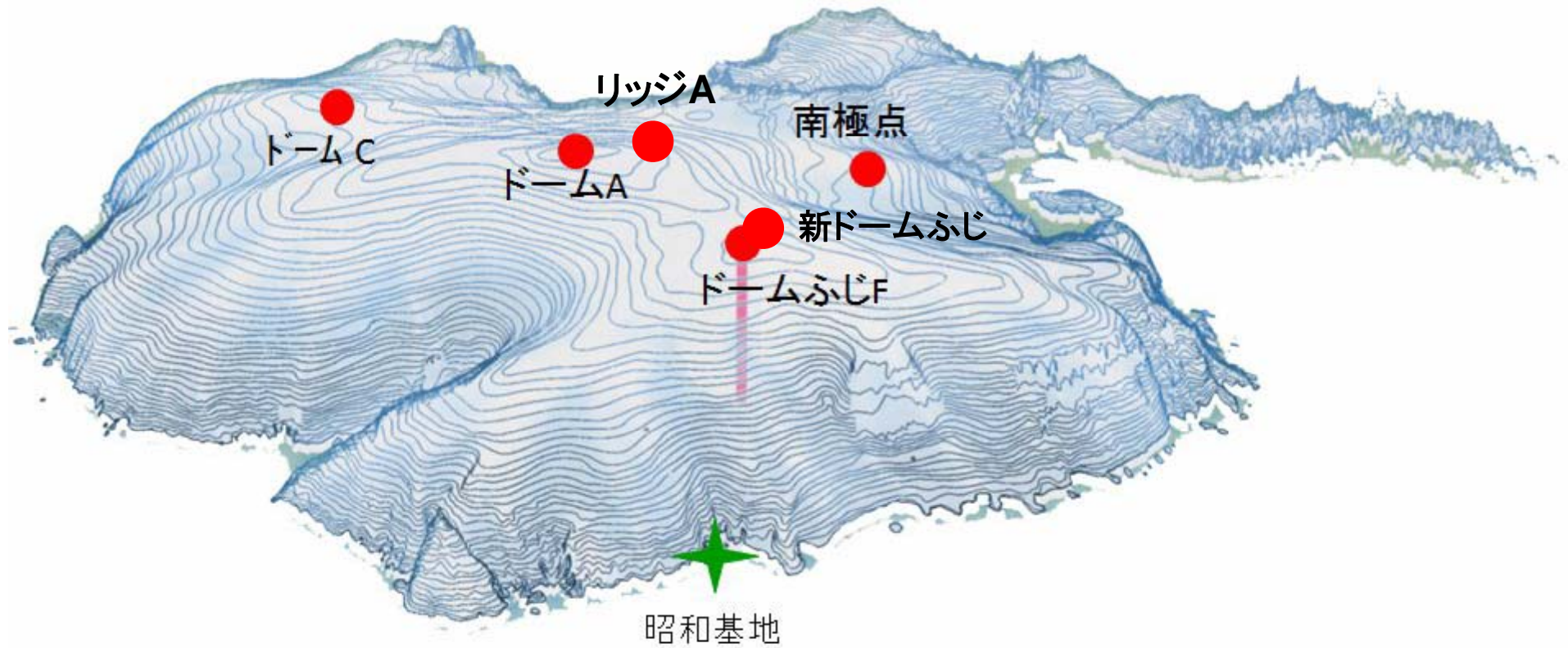
口径2.5m望遠鏡



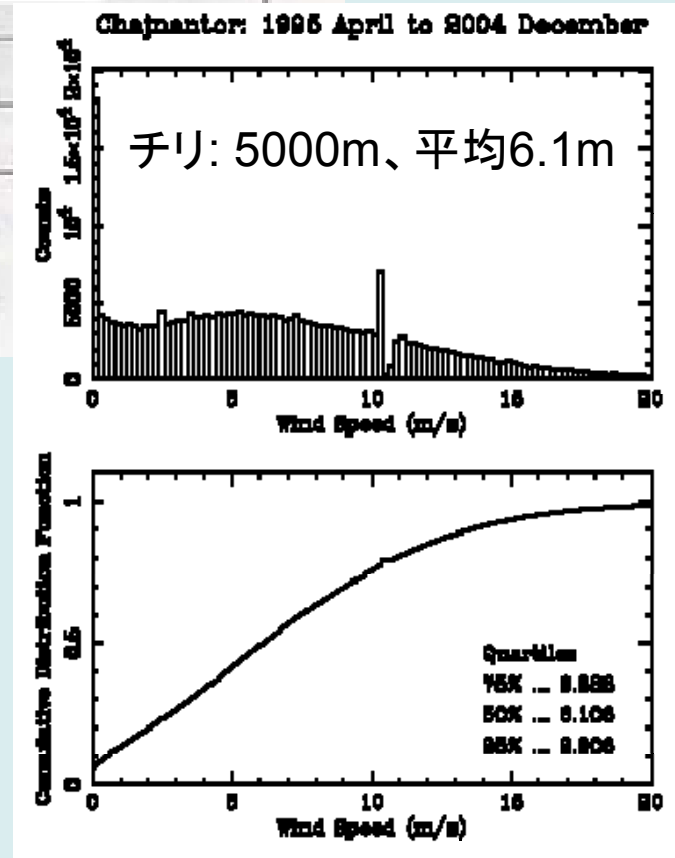
➤ 南極の環境

- ✓ 高い晴天率（快晴68%、晴れ85%）
- ✓ 卓越風向がなく、弱い風
- ✓ 高い透明度、低い水蒸気量（0.14mmPWV、冬期50%）
- ✓ 低い大気背景光
冬期は近赤外線でマウナケアの1/50～1/100
- ✓ 大気透過率の高い安定性
- ✓ 優れたシーイング（可視光0.2”（50%）、地上約15m高）
- ✓ 継続観測（赤緯-20度以下で周極観測可能）
冬期24時間、約5ヶ月間（波長に依存）の連続観測可

ドームは常に高気圧帯で大気が安定



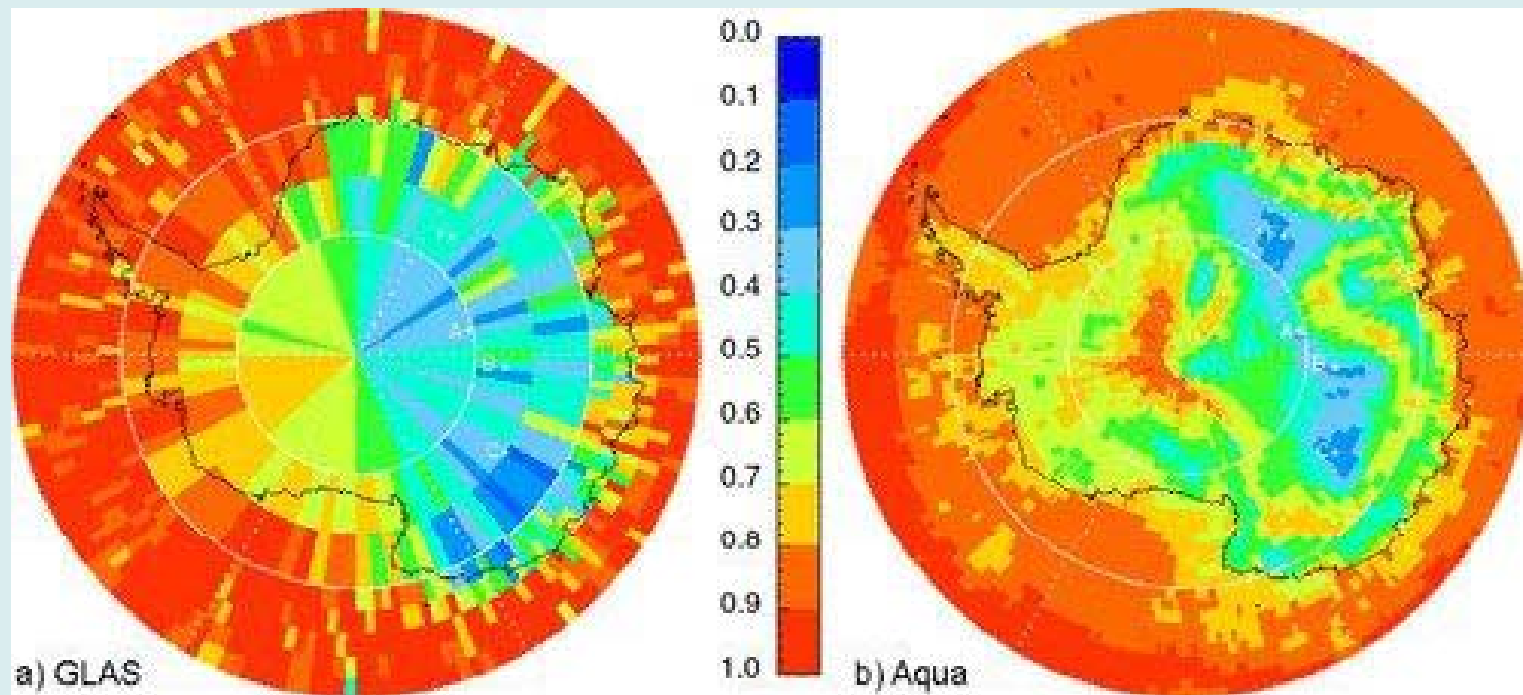
・風



- 晴天率

夜間の雲量(年平均)

Saunders+(2009) 衛星データによる



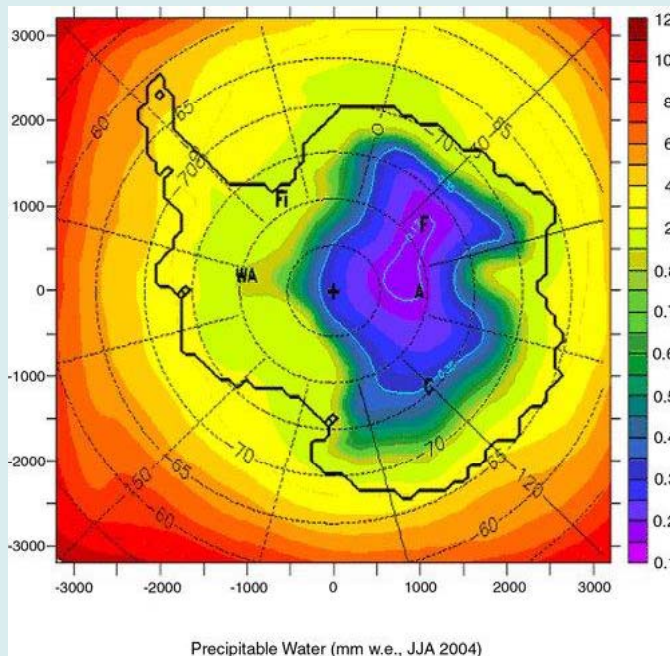
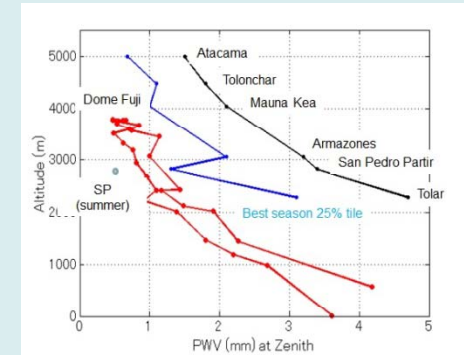
ドームふじ
(極地研実測⇒)

完全な晴天=68% (1994-95、年間)
晴天=85%?

- 水蒸気量(PWV)

衛星のデータから推定
現地調査と良い一致

(Saunders+ 2009)



Takato+ (2011)

TABLE 4

PWV QUANTILES FROM THE MHS SENSOR, FOR 2008
(DATA IN MICRONS)

	SP	DC	DA	RA	DB	DF
Annual median	437	342	233	210	274	279
Winter median	324	235	141	118	163	163
Winter 25%	258	146	103	77	115	114
Winter 10%	203	113	71	45	83	90
Winter σ	133	122	65	64	67	98

NOTE.—Winter refers to days 120–300.

(μm)

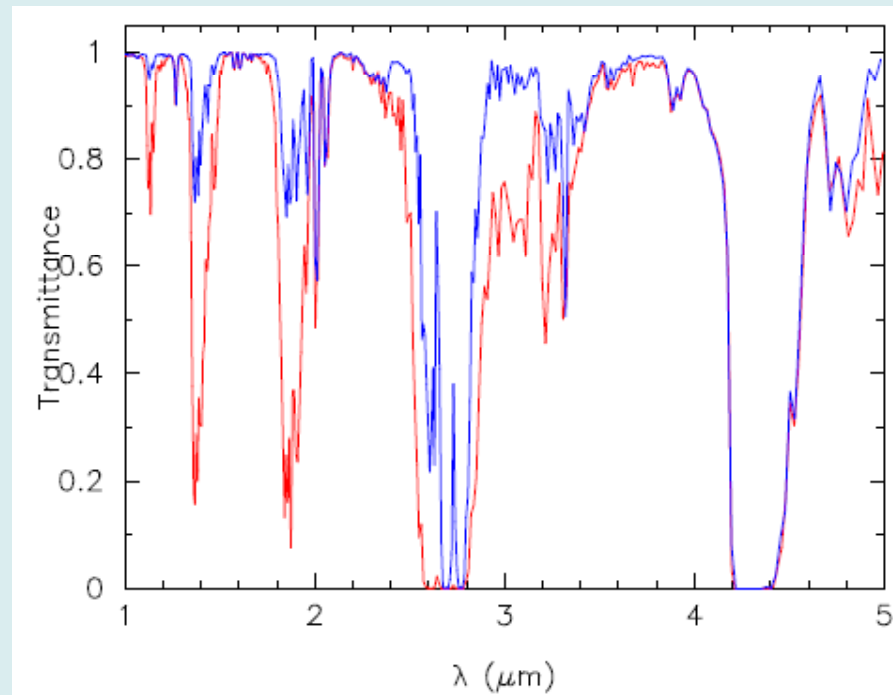
新ドームふじ基地 ~ ドームA

新ドームふじ基地
水蒸気量~10%低

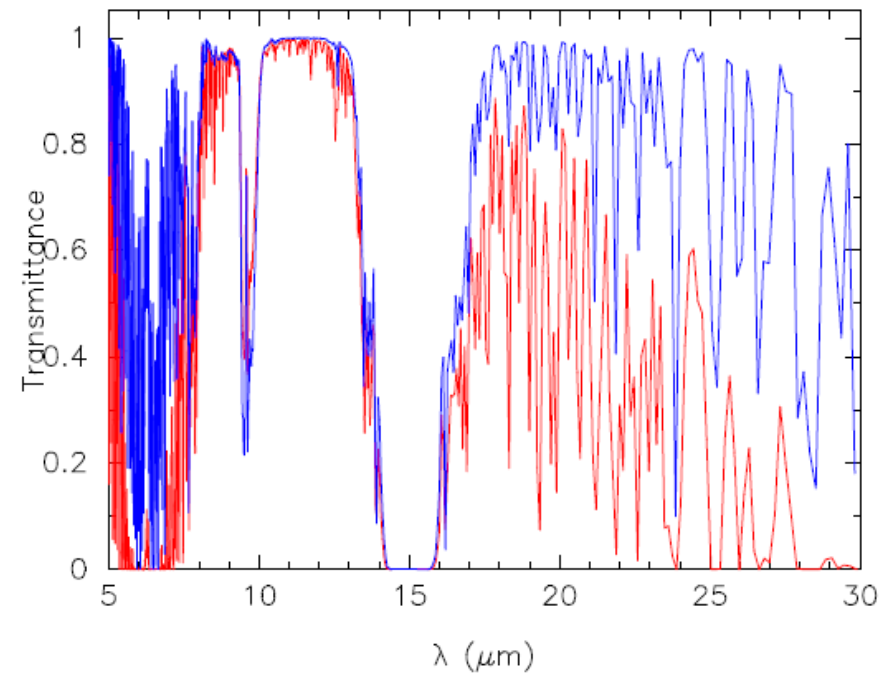
大気の透過率。マウナケアとの比較

		altitude	PWV
blue	Dome Fuji	3810m	0.2mm
red	Mounakea	4200m	1mm

Near-infrared

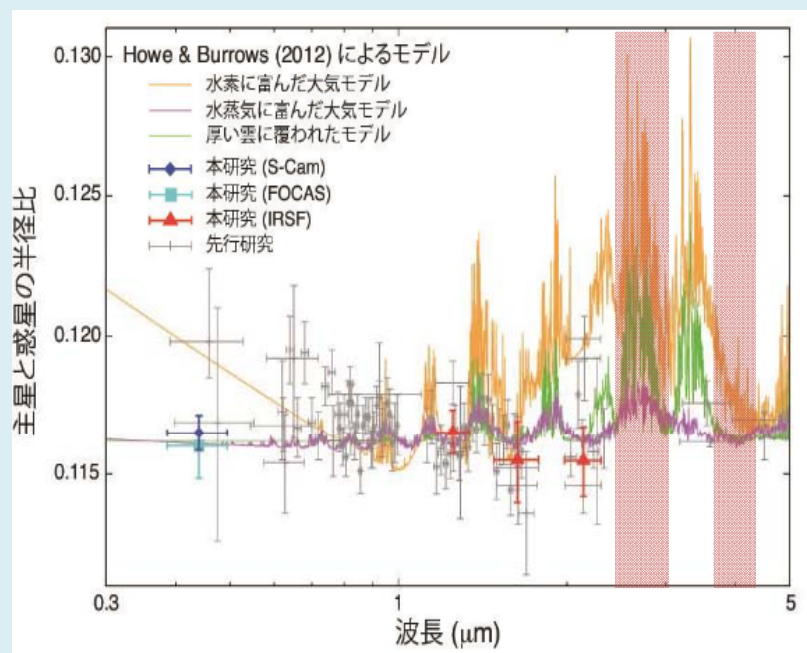


Mid-infrared



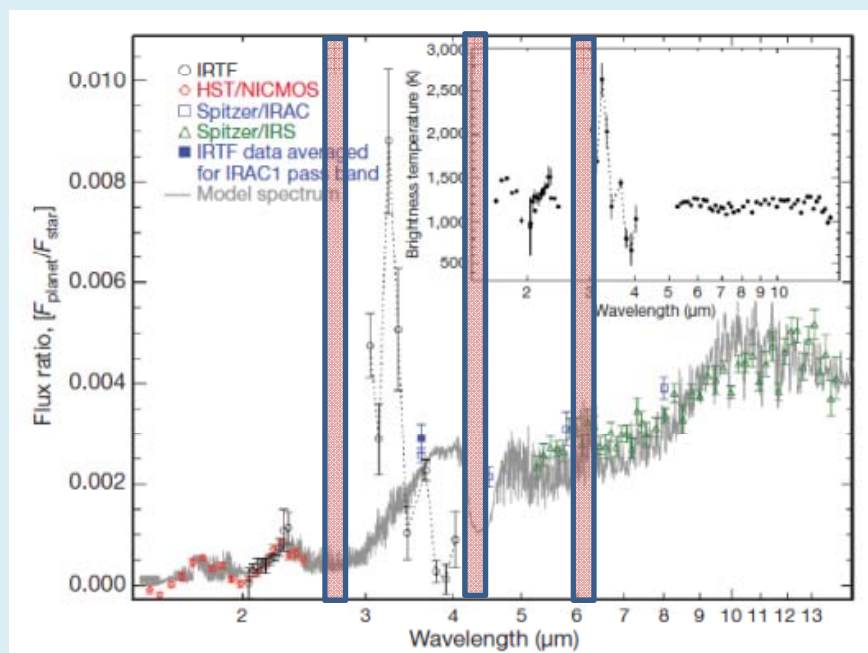
➤ 高い透明度

第1食トランジット



SuperEarth

第2食による大気温度



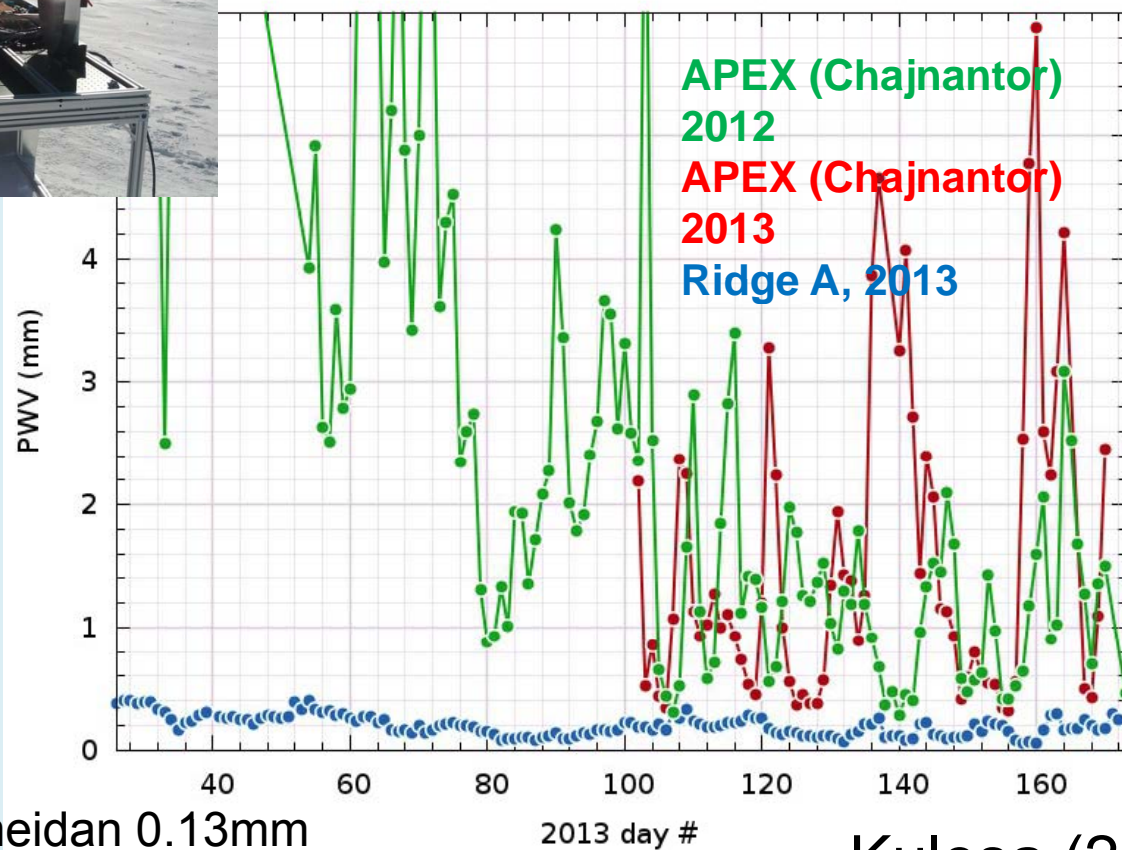
Hot Jupiter

➤ 安定した大気



大気の水蒸気量の変化

Ridge Aでの最近の810GHz観測



冬のmeidan 0.13mm
30%は0.1mm以下

Kulesa (2013)

➤ サイト調査 2006-2013

大気擾乱

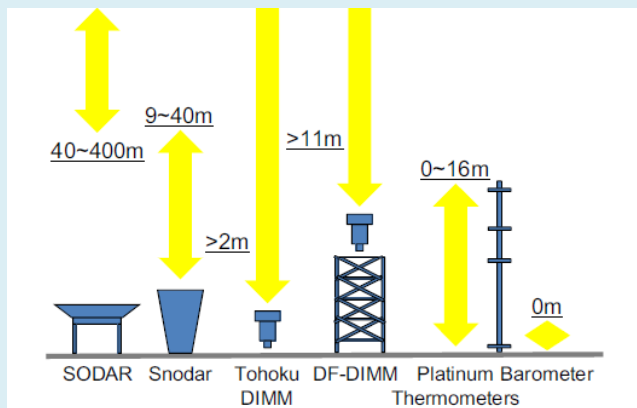
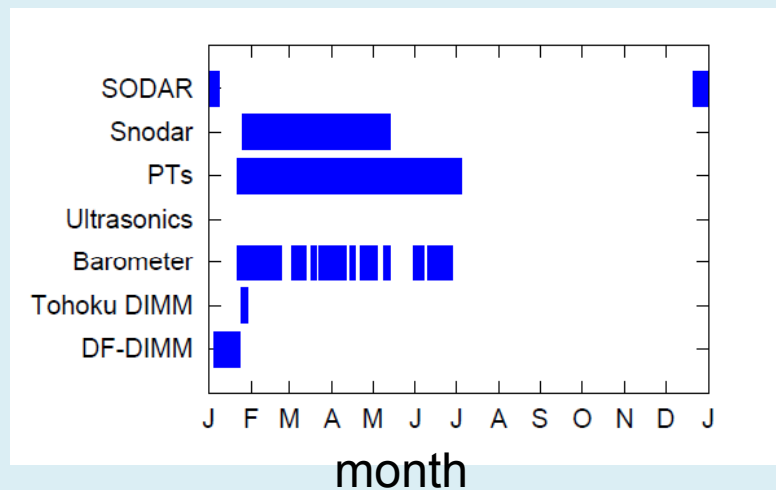


Figure 5.1: Measurement ranges of the height for each instrument.

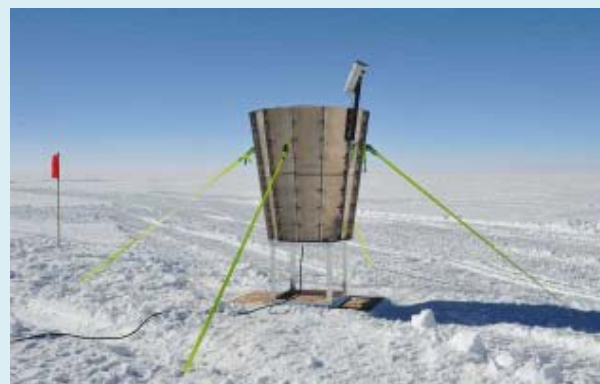


SODAR (NOAJ)

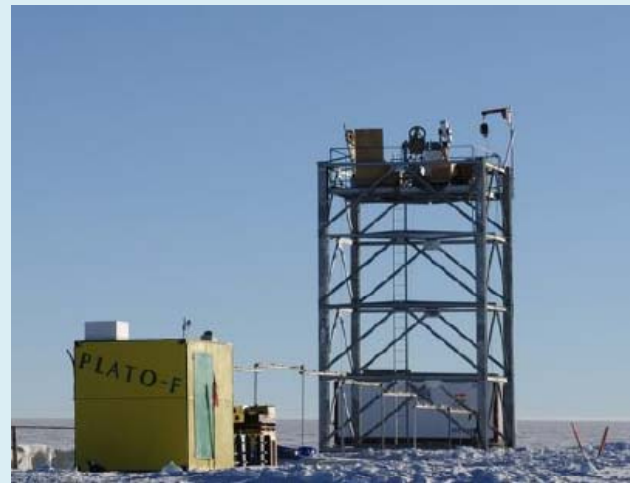
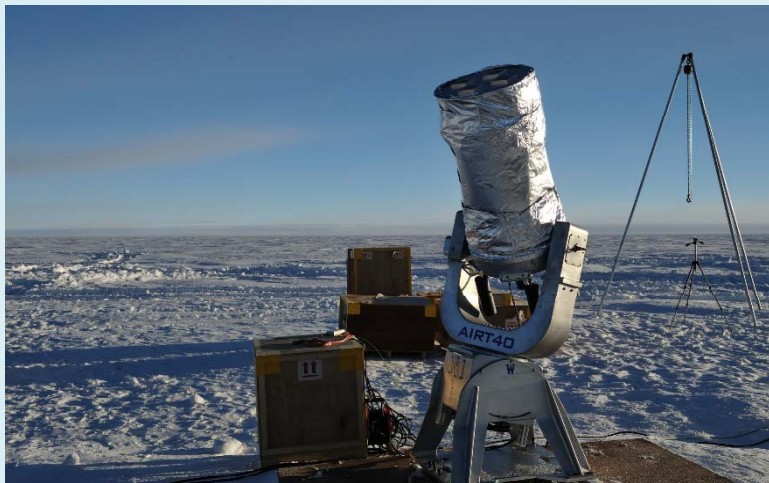


Takato (2006)

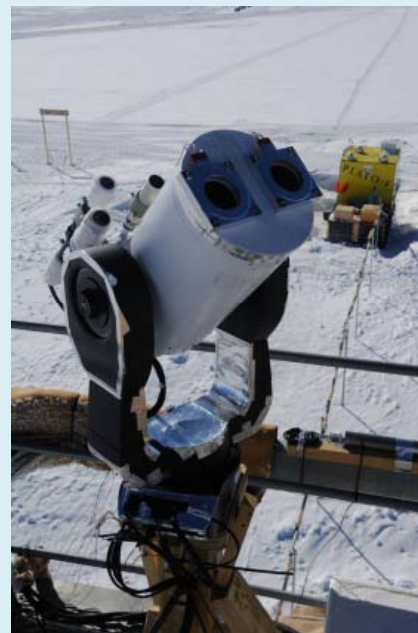
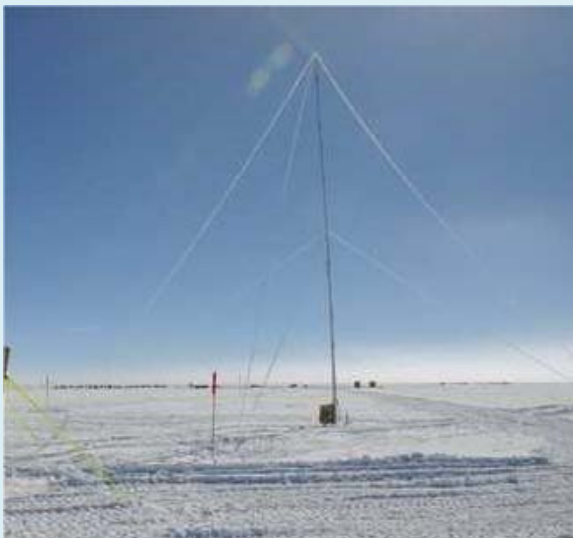
SNODAR (UNSW)



シーイング観測



温度勾配



➤ 高い大気安定性

大気の擾乱

Okita+ 2014

ドームふじの夏

ドームふじの冬

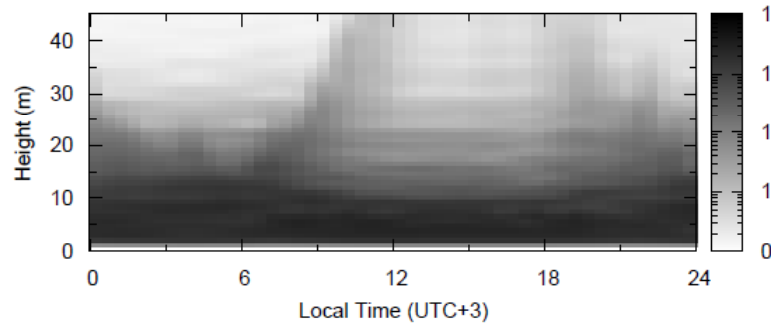


Figure 7.6: Same as Fig. [7.5] but for the Antarctic summer from February 24:00 (UTC+3), 2011.

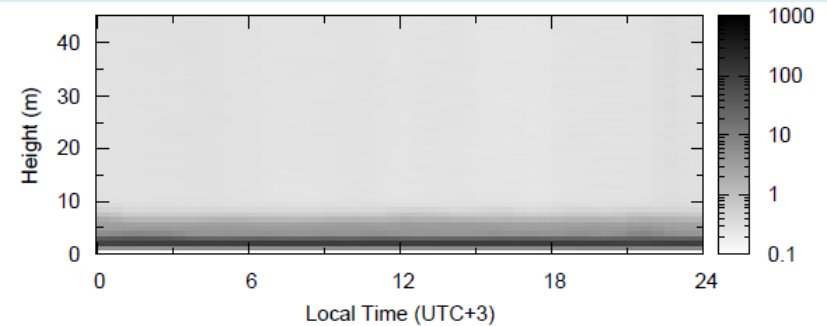
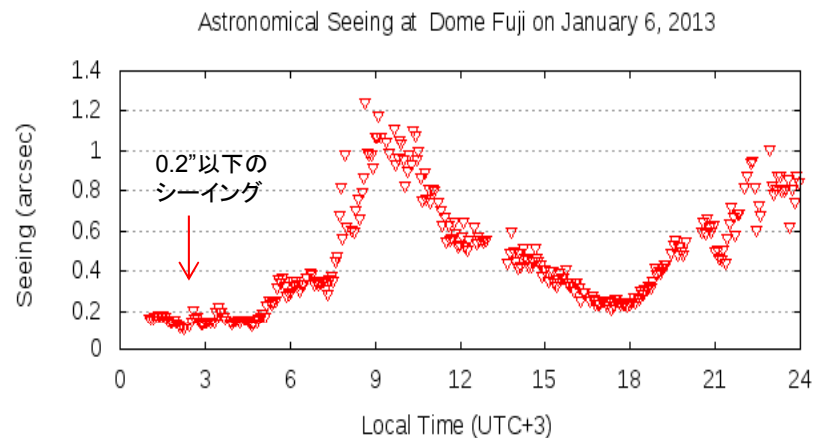


Figure 7.8: Same as Fig. [7.5] but for the Antarctic winter from May 3 00:00 to 24:00 (UTC+3), 2011.

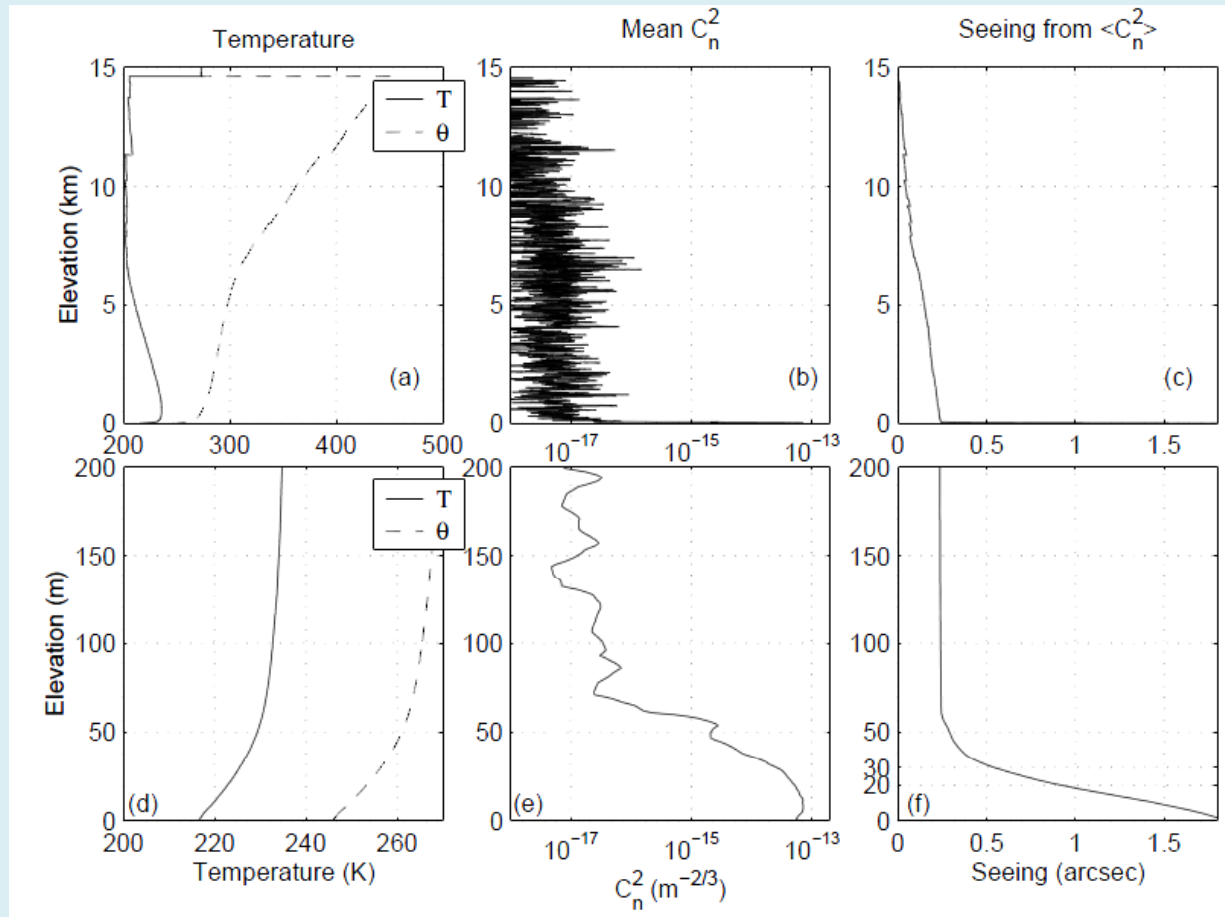


冬は0.25”(可視光)のシーイング

1.25 μ m以上では回折限界

上空大気の安定性

冬のドームC Agabi+ 2005



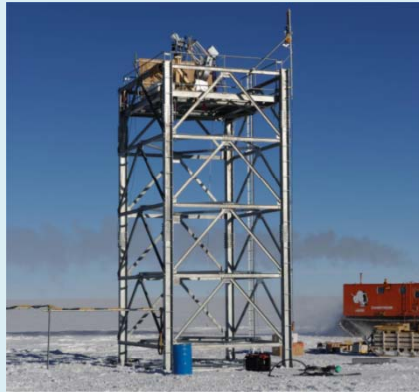
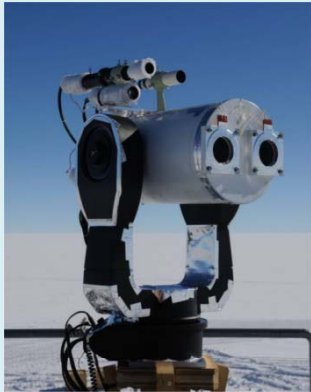
大気の擾乱は大半が接地境界層の中で起きている

南極内陸上空にはジェット気流はない

➤ 地球上最高のシーイング

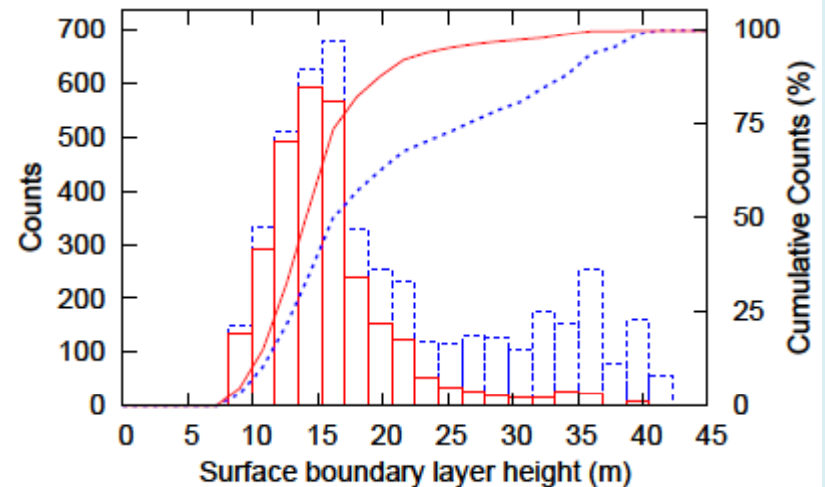
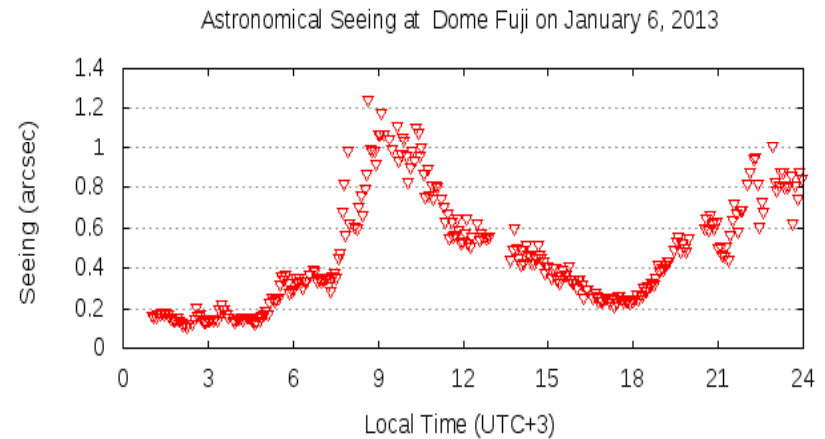
— 雪面から高さ15mで0.2秒角(天頂、可視光) —

Okita+2013



11m

- 接地境界層の上に出ると0.23"
- 接地境界層の厚みは1-5月の晴れの日では半分が15m
- 冬では半分以上が0.23"

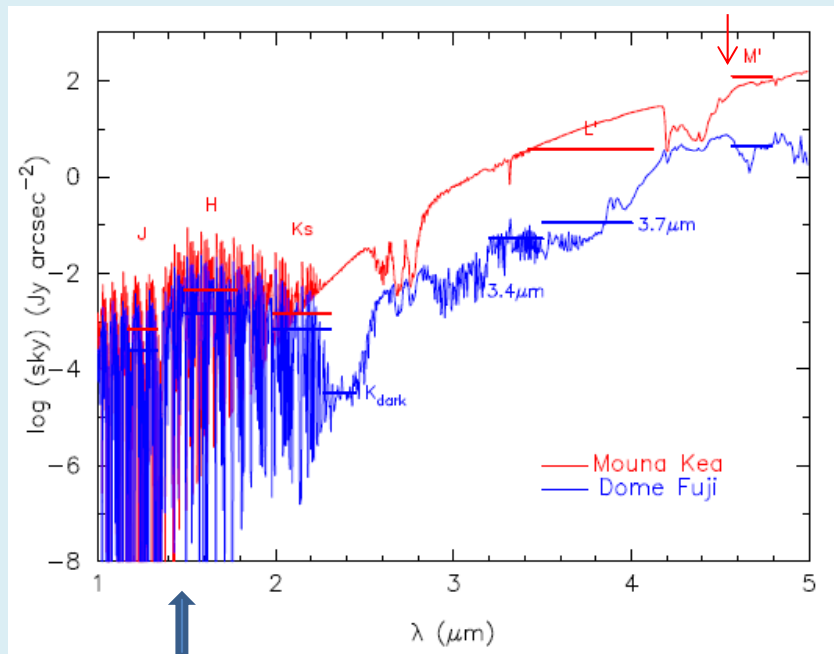


➤ 低い大気赤外線放射

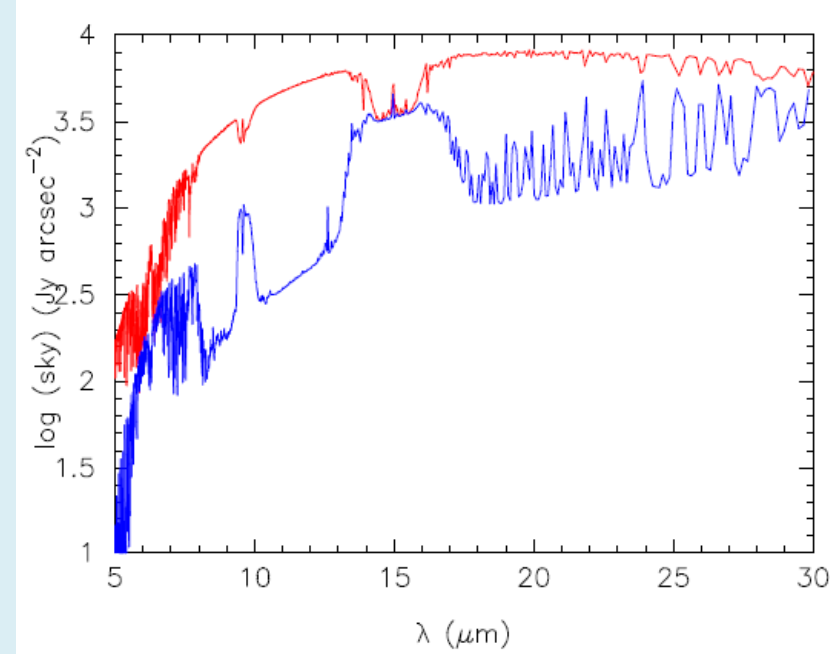
		altitude	temperature
blue	Dome Fuji	3810m	-70°C
red	Mounakea	4200m	0°C

Near-infrared

実測

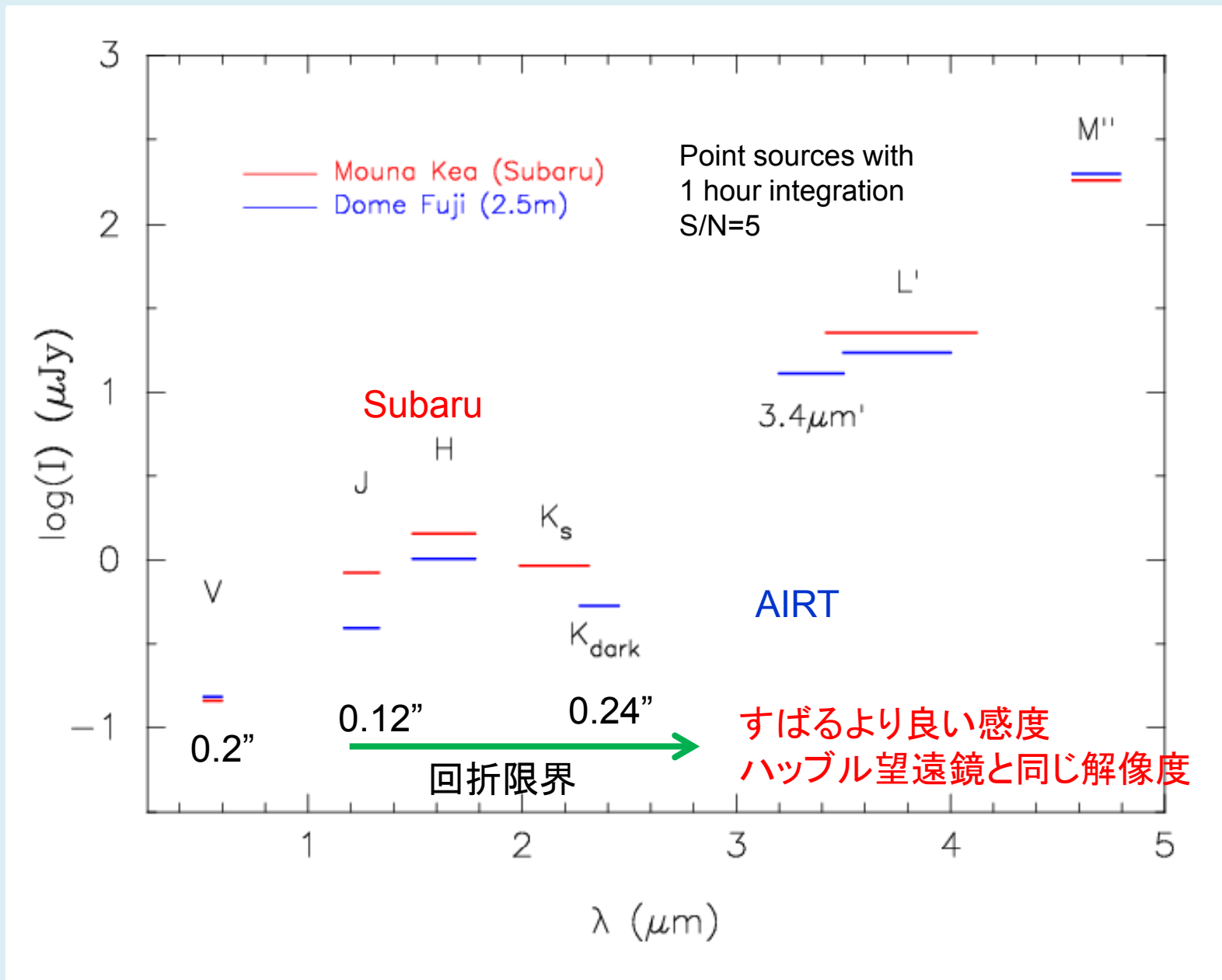


Mid-infrared



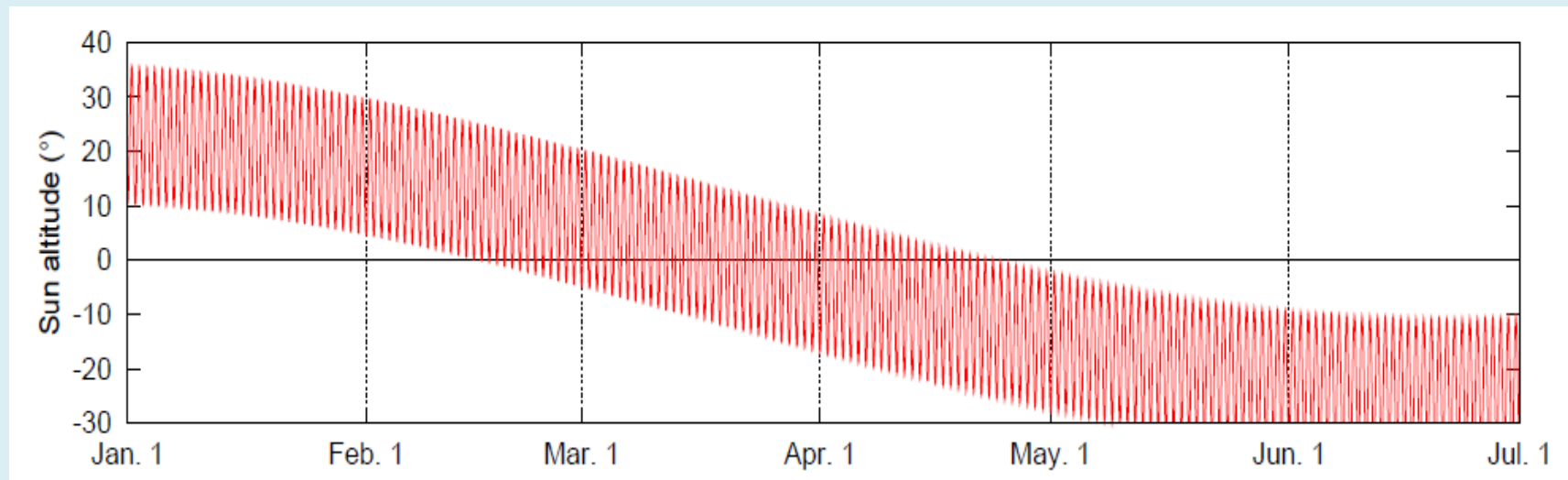
OHの観測例が少なく、1/3を仮定

すばるとの撮像検出限界の比較



➤ 6ヶ月間連続観測

長周期惑星と繰り返し観測



10 μ m可

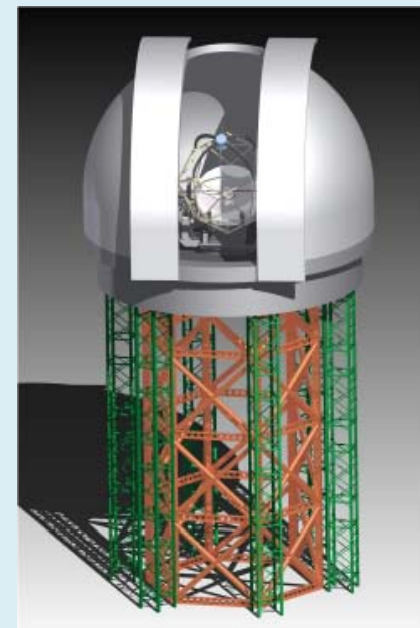
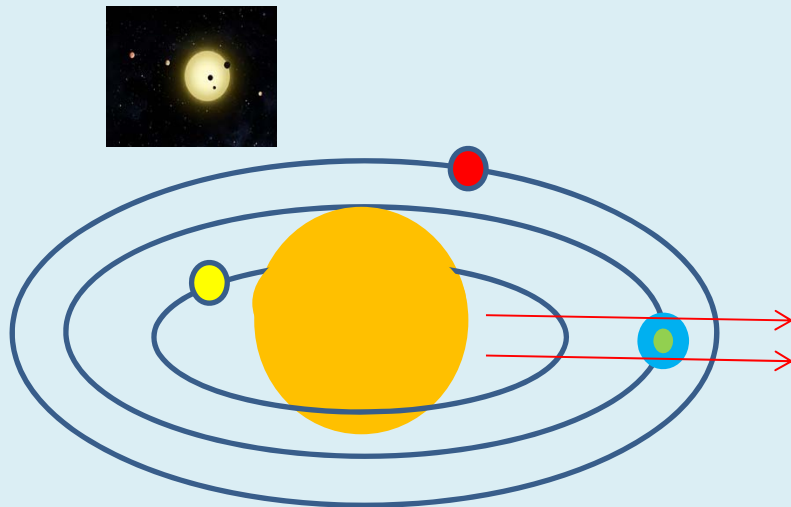
>2.5 μ m可
(6ヶ月)

極夜 (4ヶ月)

望遠鏡は夏期も運用可

多数の多惑星系の連続観測による、特に地球型惑星の大気構造の研究

複数の天体を準備し、次々に観測を続ける



極地研南極ドームふじ基地の天文観測所



南極内陸の極限環境における望遠鏡技術

➤ 未知の環境での望遠鏡・装置技術

- ◆ 低温下での建設・運用(-80°C~-20°C)
金属の低温脆性
- ◆ 水蒸気が過飽和
着霜
- ◆ 雪面上での設営
基礎工事、不同沈下
- ◆ 1000kmの運搬
振動
- ◆ 着雪・ダイヤモンドダスト対策
- ◆ 細い通信でのリモート制御
- ◆ 電力供給

望遠鏡建設に関する諸問題

- 建設作業は夏期のみ(2-3ヶ月)
- 遠征隊は1-2ヶ月/年

- 国立極地研究所による越冬基地と設営のサポートは不可欠
- 南極遠征は国家事業
- 観測隊員も輸送力などで限定

一部は「宇宙環境」仕様で解決できるかもしれないが

◆ 将来の望遠鏡基地として、様々な中小望遠鏡の容易な建設のための安価な技術

既存の技術と市販品の活用

国内での極寒環境での実験



-80°Cの冷凍庫



-60°C実験室(北大低温研)
(乾燥室がない)



-30°C北海道陸別町

ドームふじ基地遠征隊

2年に1回、1-2ヶ月程度の現地での試験・観測

➤ -80°Cで運用する小型望遠鏡と観測装置

40cm望遠鏡と赤外線カメラ



-40°Cで観測

2x10cmトランジット望遠鏡



-70°Cで無人観測

- ケーブル被覆の交換
- モーターのグリス交換
- 着霜対策
-

➤ 深刻な霜対策

過飽和水蒸気の状態なので、放射冷却する場所に着霜



40cm望遠鏡裏にヒーター



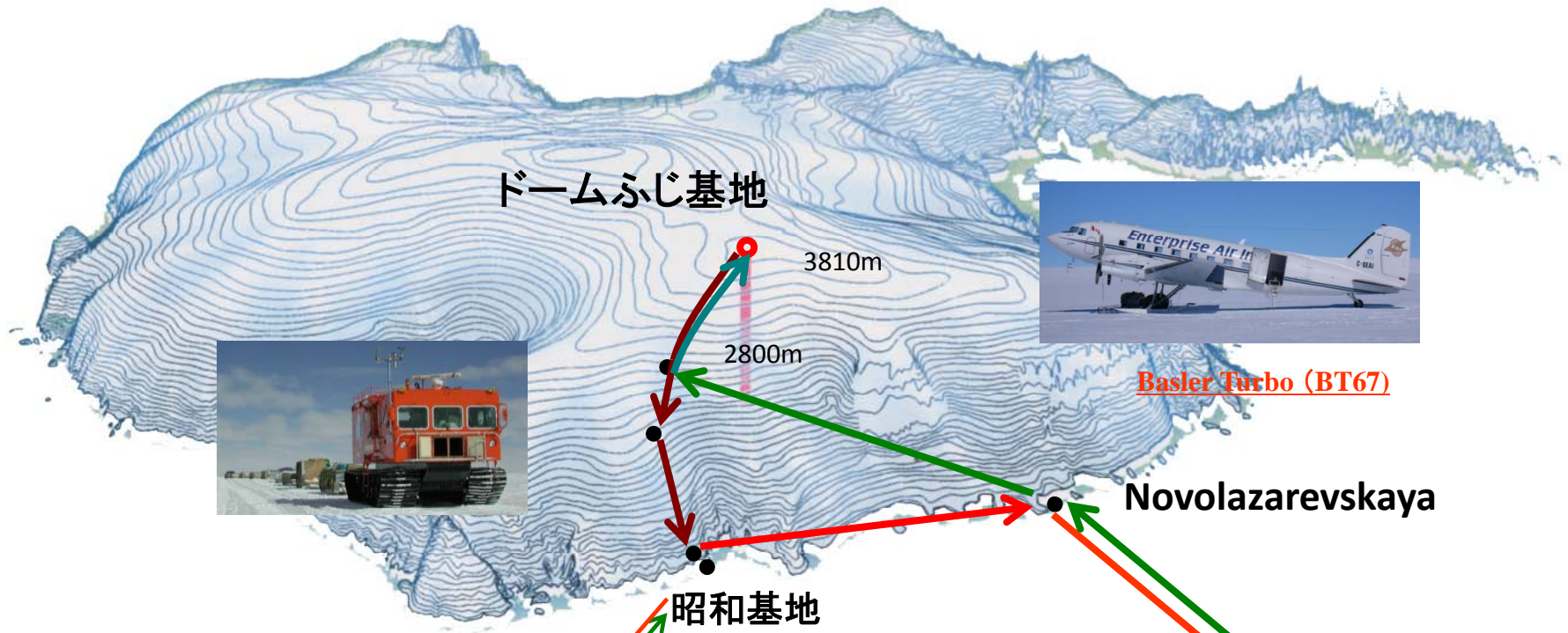
着霜しにくい塗料?

無人発電装置PLATO-F (UNSW)

一回の給油で1KWを2年間
128kbpsでの通信



ドームふじ基地への経路



ケープタウン

シドニー

フリーマントル

日本

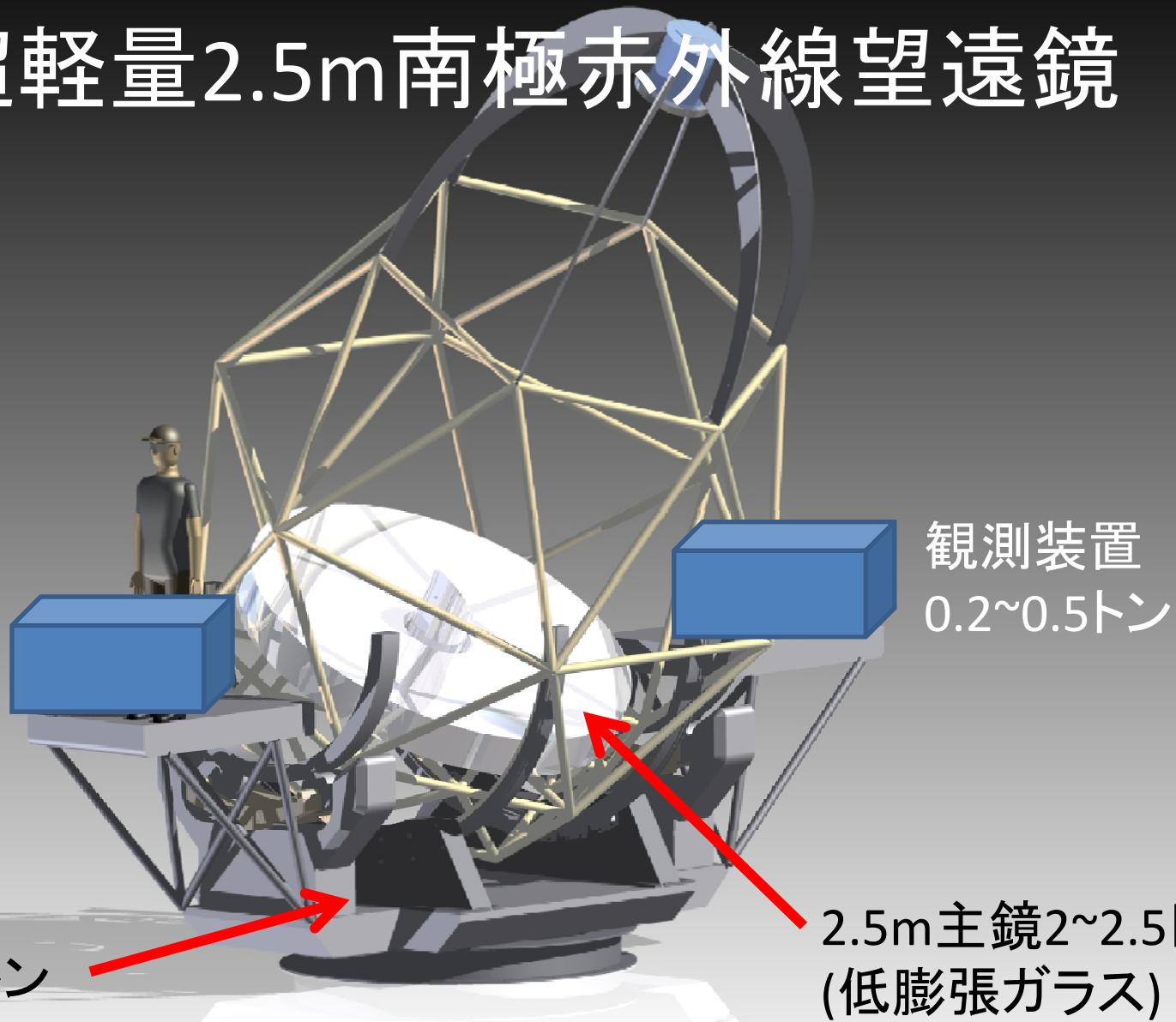


日本

課題

- 主鏡の安全な運搬
- 不等沈下対策
- 材料の低温脆性対策
- 圧雪地盤基礎の造成

超軽量2.5m南極赤外線望遠鏡



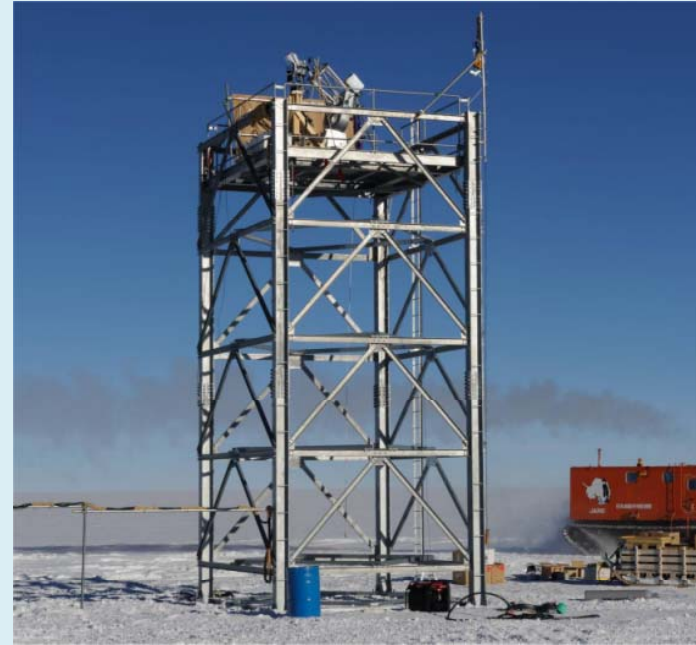
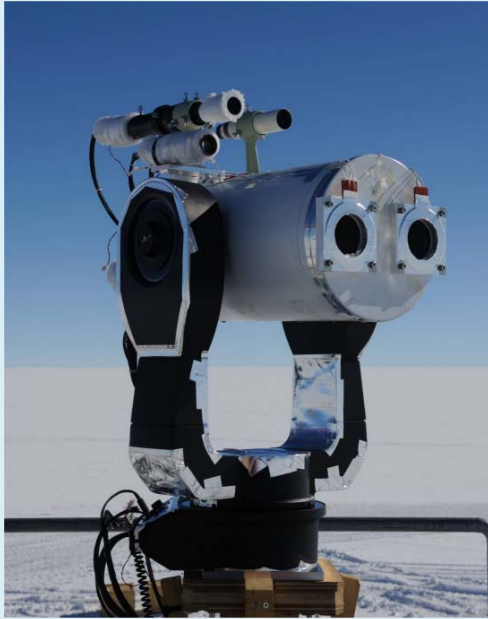
観測装置
0.2~0.5トン

2.5m主鏡2~2.5トン
(低膨張ガラス)

架台 6~7トン
(ステンレス S304)

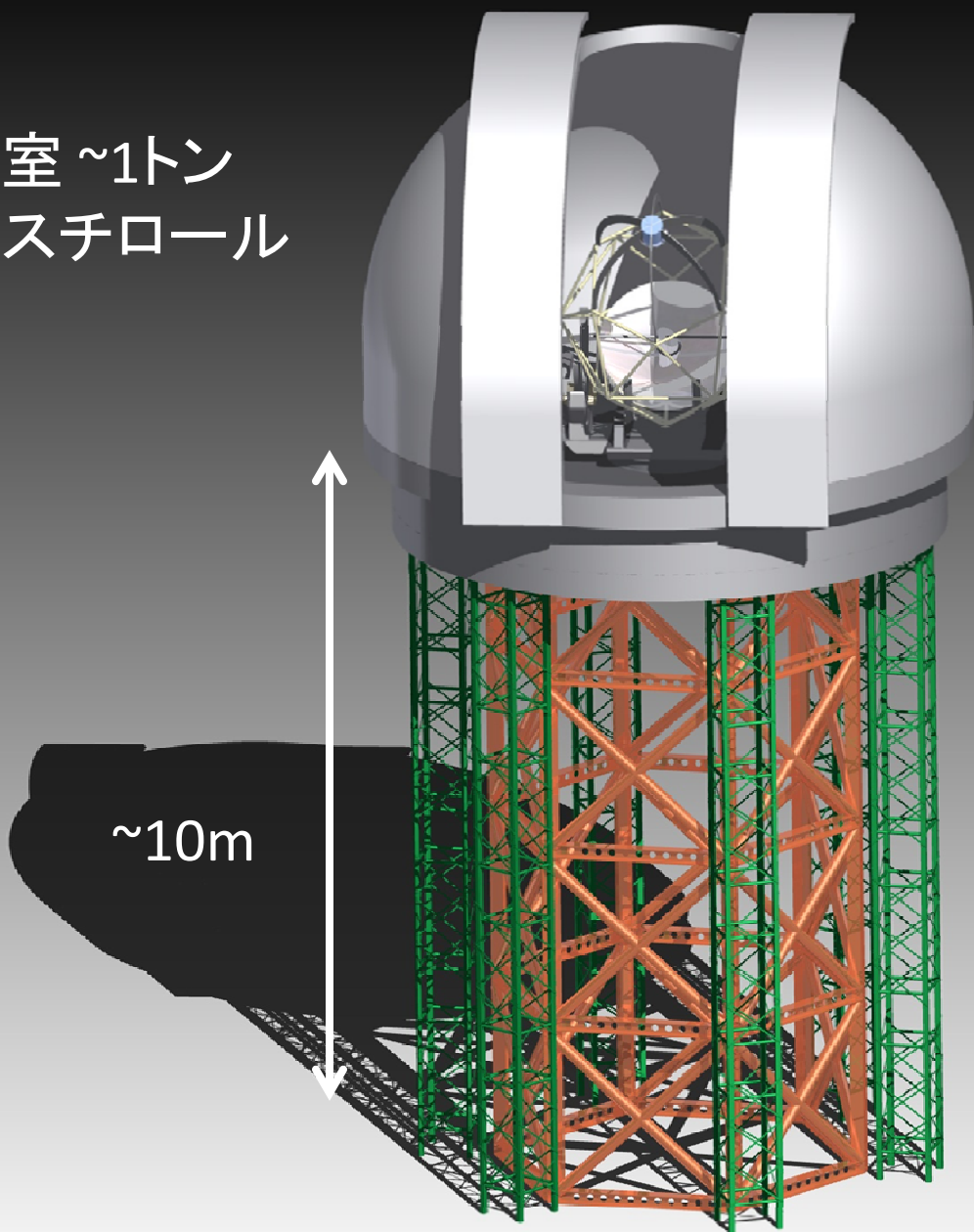
➤ 接地境界層が低い

高度11m



自由大気が雪面近くにある!!

観測室 ~1トン
発砲スチロール



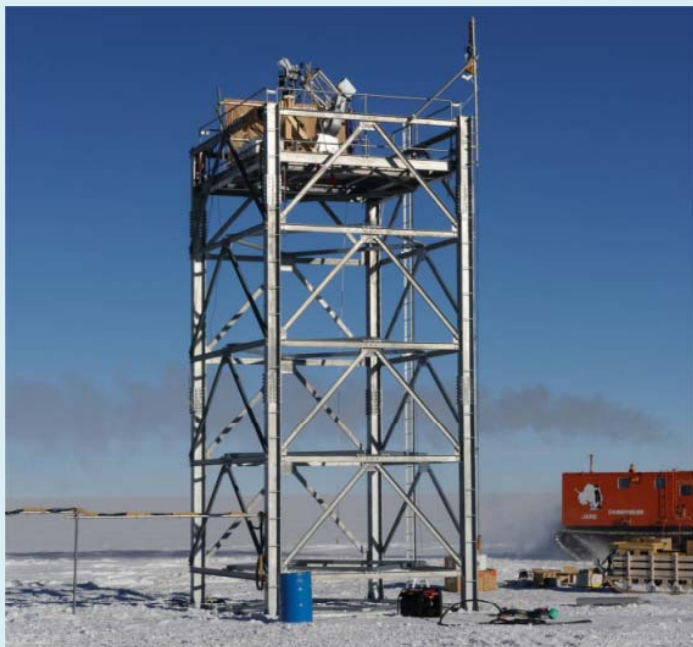
全体で40トン以内

望遠鏡	9トン
ステージ	<30トン
ドーム	<3トン
観測装置	1トン
クレーン他	<4トン

~10m

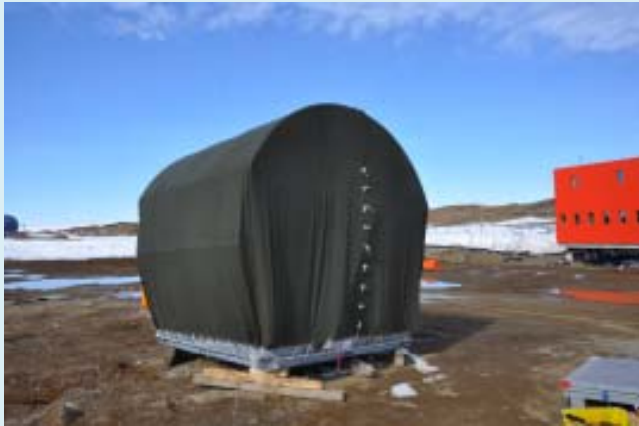
必要電力
11kVA(最大) 4kVA(平均)

雪面上での建設



第54次隊

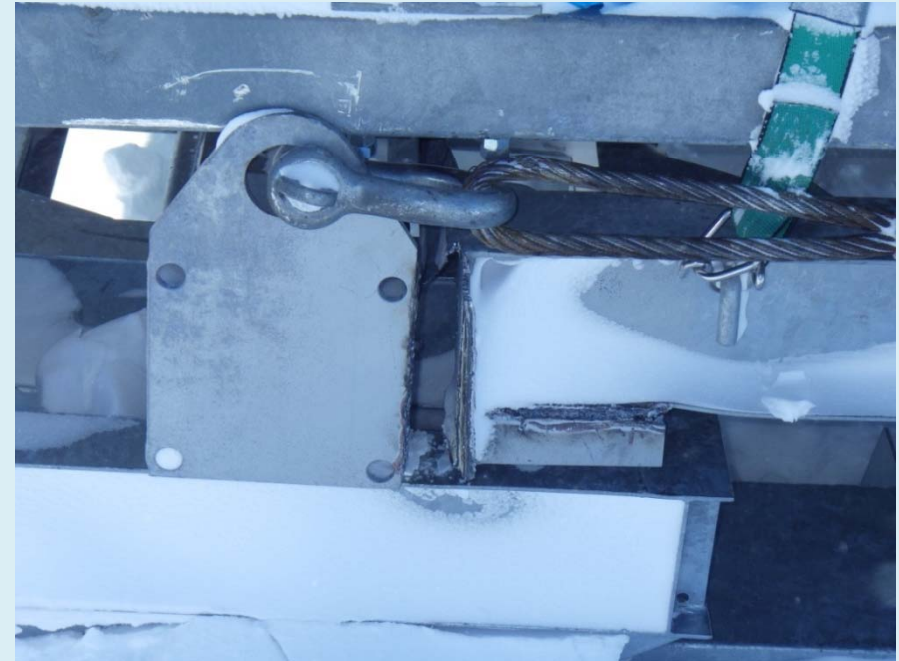
12ftコンテナ櫃と観測室を途中で破棄



致命的な破損はなさそう

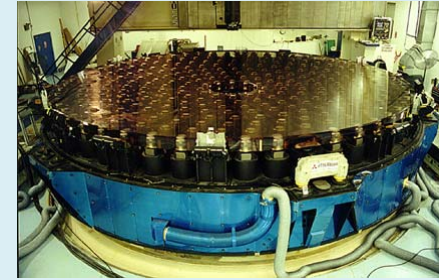


トラブル：12ftコンテナ櫃が故障

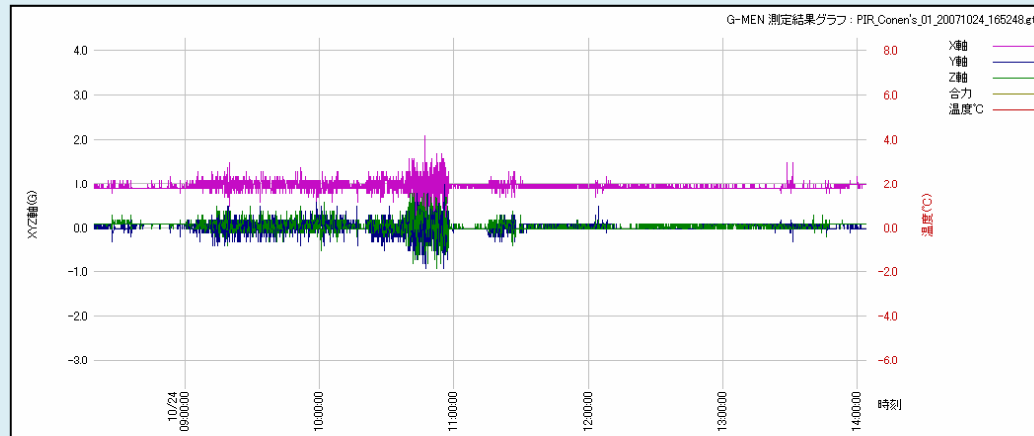


➤ 主鏡の安全な運搬

主鏡は約2億円、製作に2年、破損に対して修理はできない



すばる望遠鏡用観測装置(2トン)の例



直径8.2m(23t)の鏡を運んだエアサスペンション

- (1)エアサス車を使えば、山頂ダートロードでも±1G以下
- (2)トラックで慎重に運搬すれば±0.3G以下
- (3)クレーンでの吊り上げ中の急停止に注意

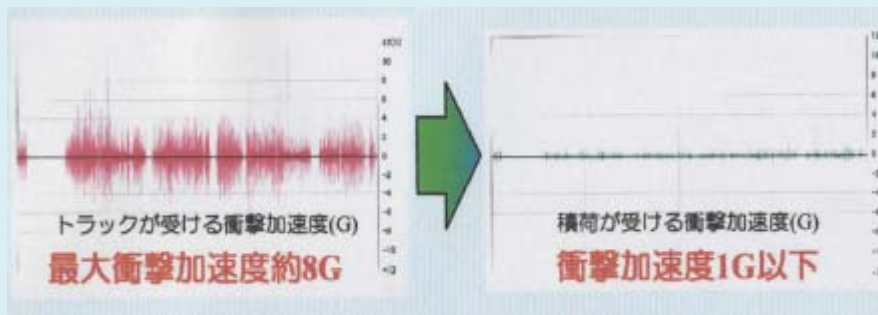


➤ 主鏡の安全な運搬

防振パレットの開発



振動が1G以下への低減



大型液晶パネルの運搬



三協マテリアルのカタログより

輸送物資の損傷

1. 衝撃的動による損傷

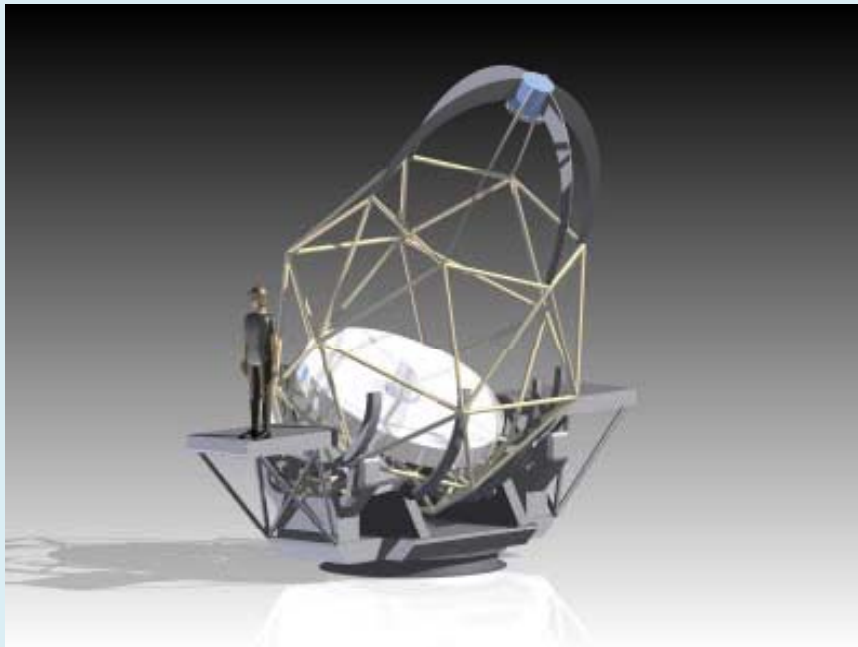
..... 赤外線望遠鏡の主鏡など

2. 連続振動による累積損傷

... 電子制御機器など

3. 共振による損傷

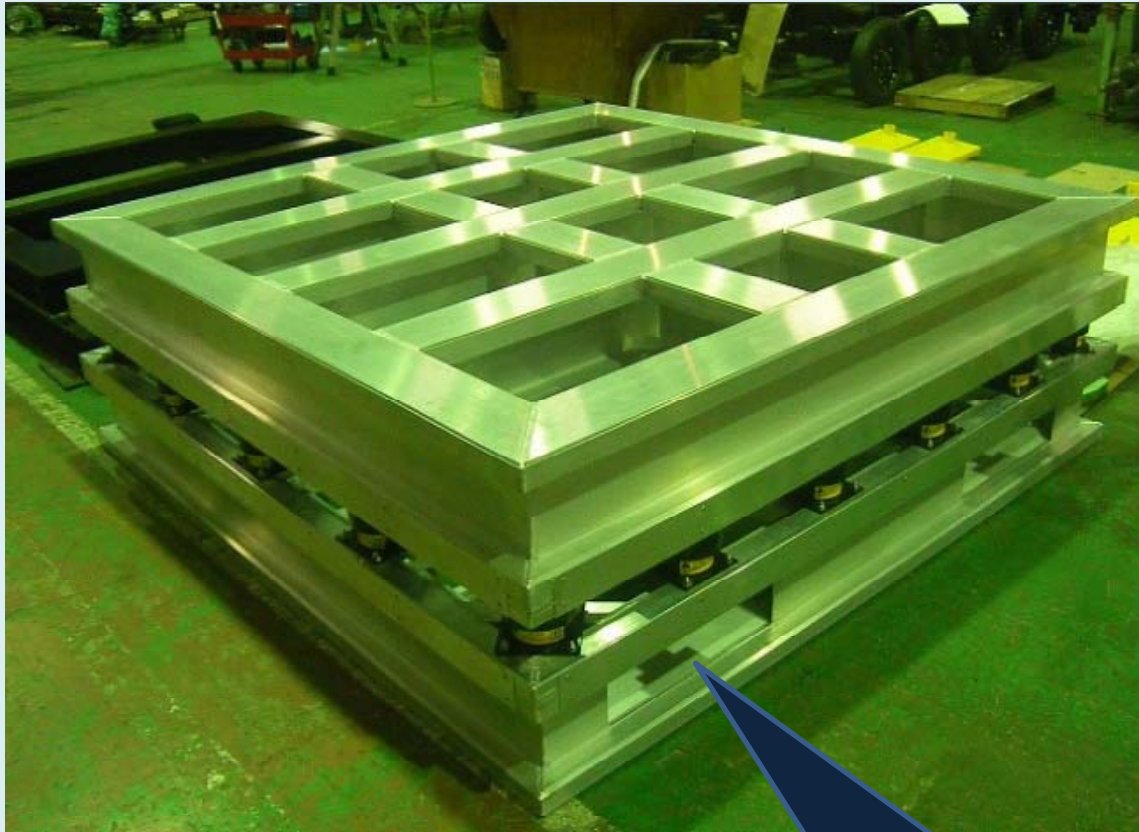
..... 機器全般



約1か月間
振動に耐えないと
いけない！

防振パレットの開発

香川他2013



製作： 三協立山(株)

寸法： 2m × 2m × 0.67m

重量： 440kg

耐荷重： 5t

材質： アルミニウム合金

防振ユニット： 30個

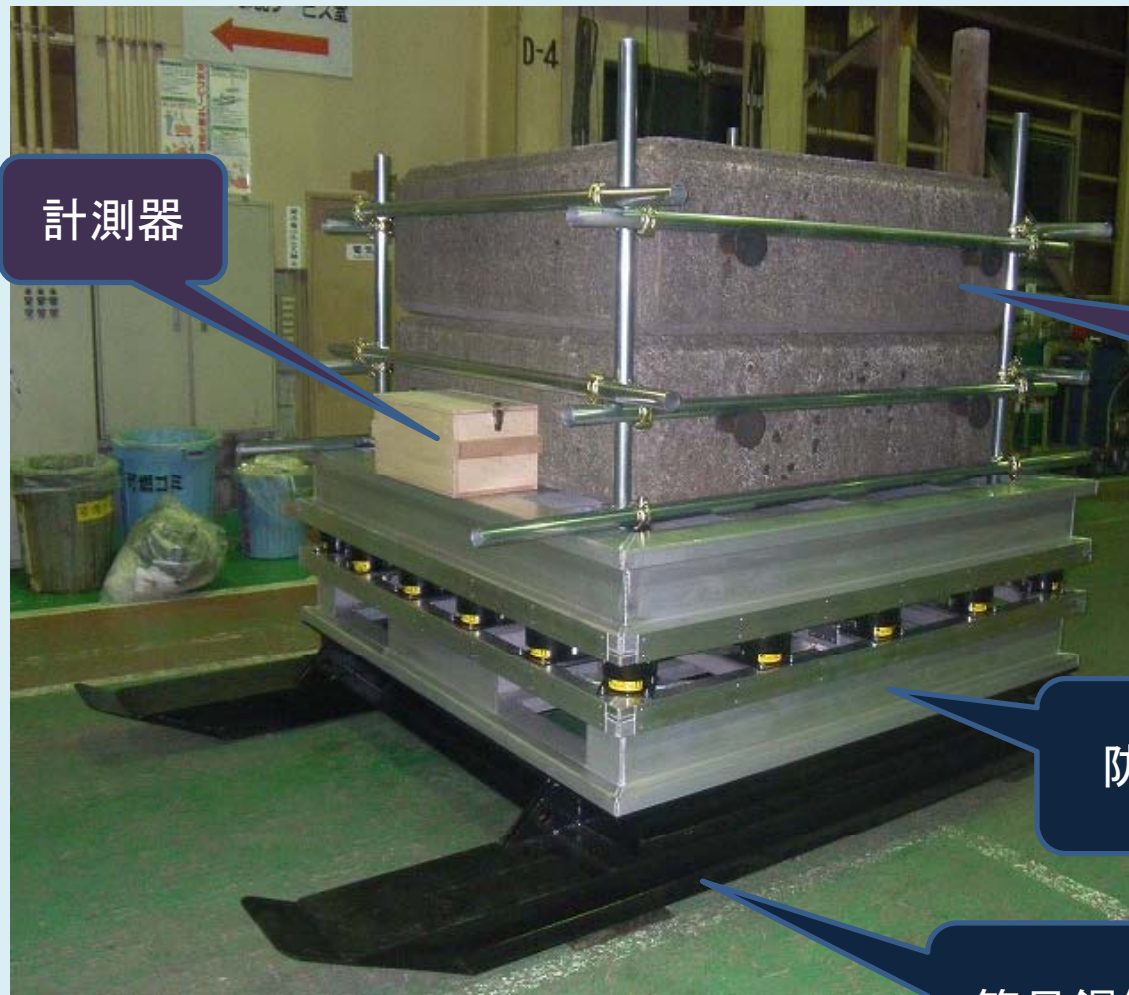
実質的には

寸法： 2m × 2m × 0.17m

重量： 180kg

フォークリフト用パレットとして使用可

防振パレットの取付け



計測器

ウエイト...2.5t × 2個

防振パレット...三協立山(株)

簡易鋼鉄橋...(株)大原鉄工所

防振パレットの取付け



防振パレットの性能評価実験



GPS

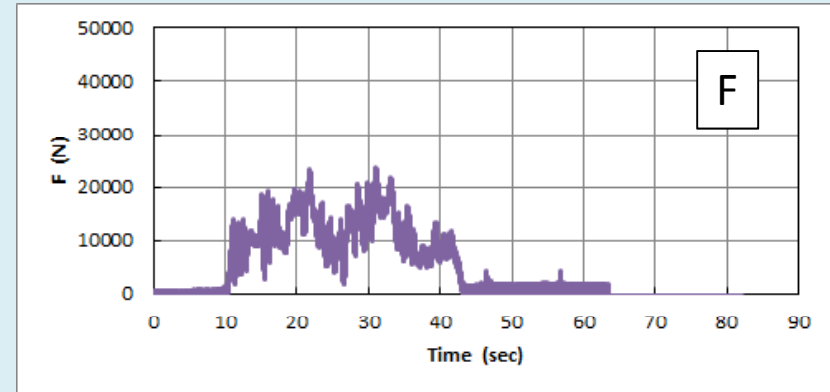
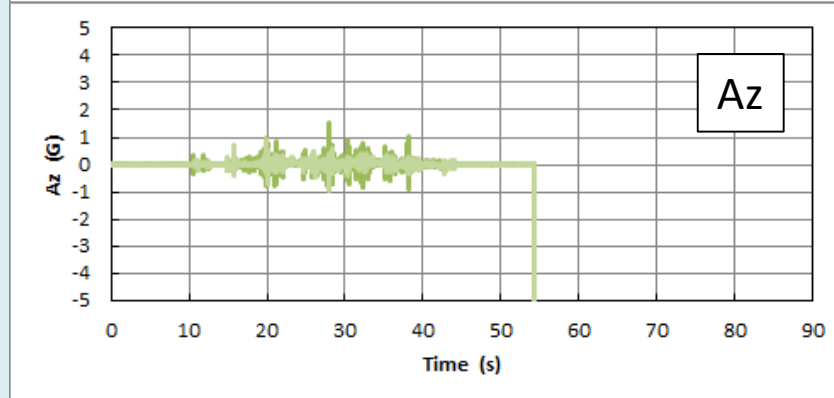
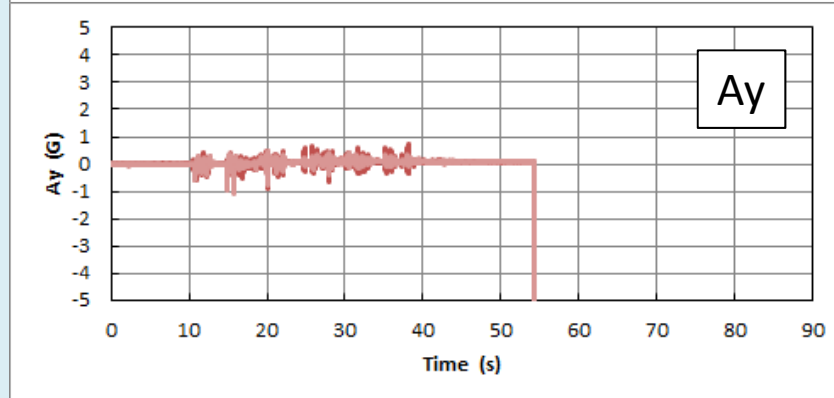
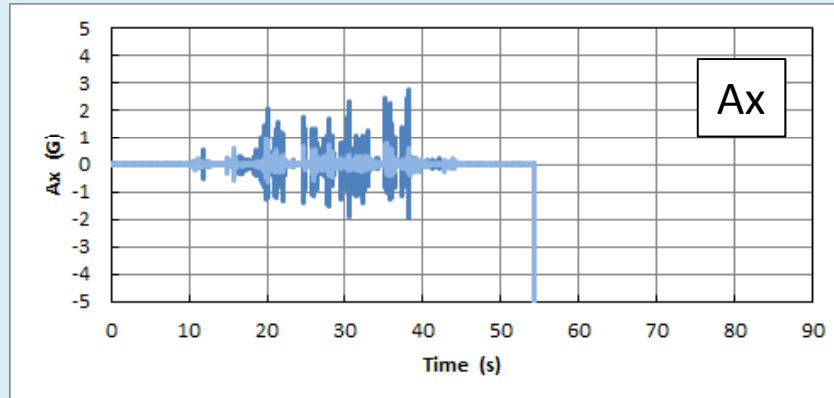
ロードセル

牽引ロープ
・ソフトカーロープ
・スチールワイヤー

加速度センサ
レートジャイロ



振動加速度



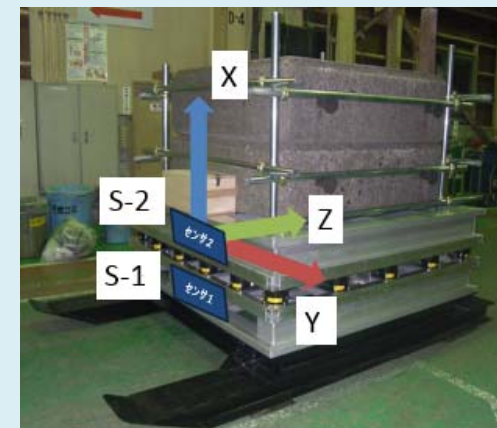
S-2 上側 薄い色

防振後

S-1 下側 濃い色

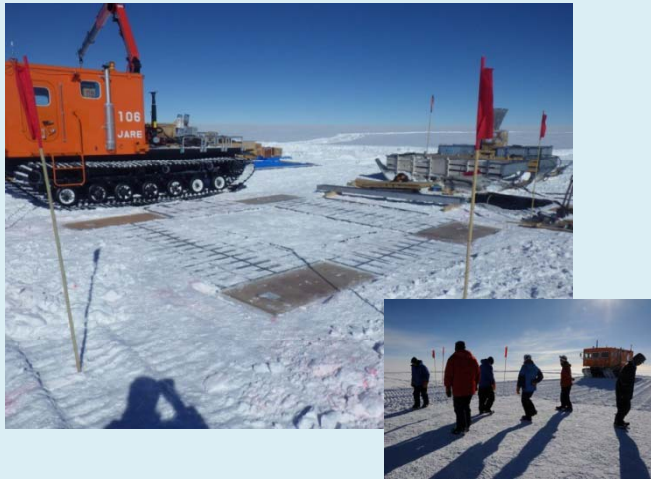
防振前

1G以内
になっている

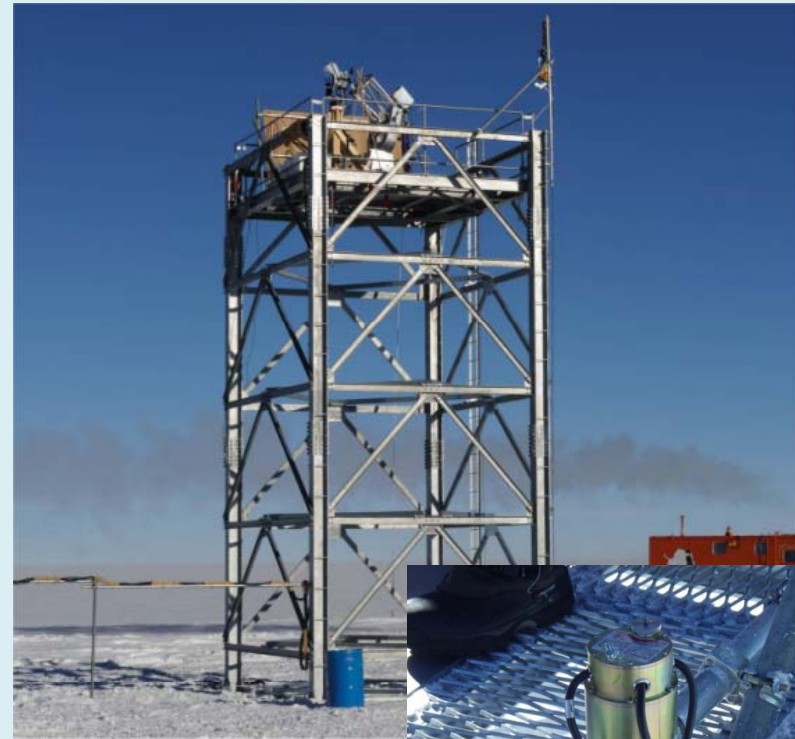


➤ 雪面上での建設

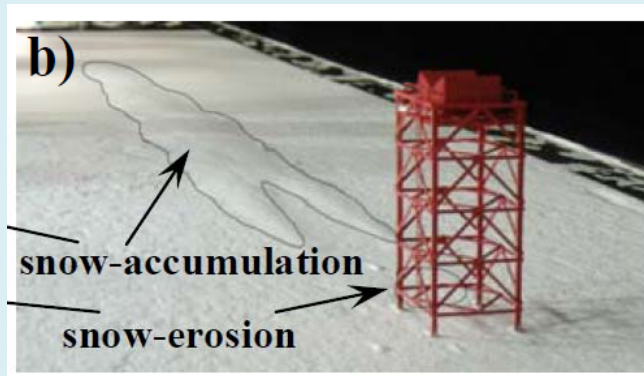
圧雪地盤の形成



9mステージの設営



風洞実験によるドリフト・着雪対策



傾斜計による不同沈下の測定
(現在も計測中)



圧雪地盤造成方法：

金他 2013

- パターン：

トレンチ掘削→攪拌→埋め戻し(30cm深さ)→踏み固め(7人で5分間)

- 評価方法：

ラム硬度, 密度, 雪温,
熱伝導率で評価.



圧雪地盤の造成：建設地の圧雪



(撮影：沖田 2012)

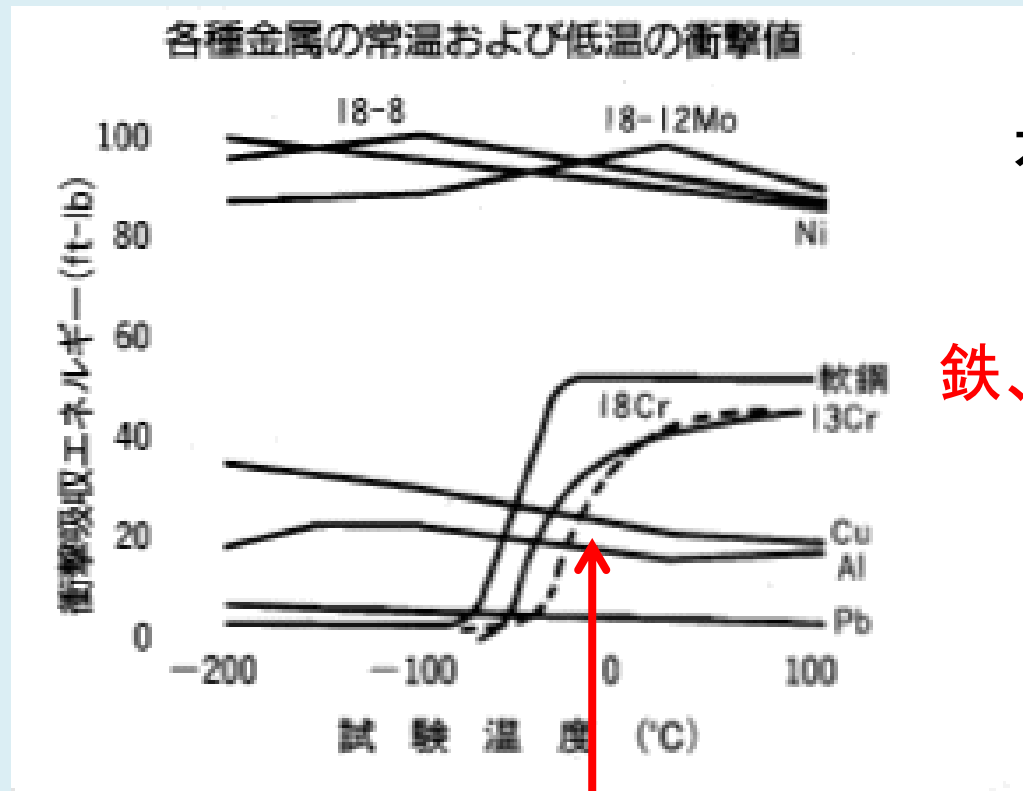
7m四方を雪上車で3往復してならず。



(撮影：沖田 2012)

7人で30分間踏み固めて、一晩まつ。

➤ 材料の低温脆性対策



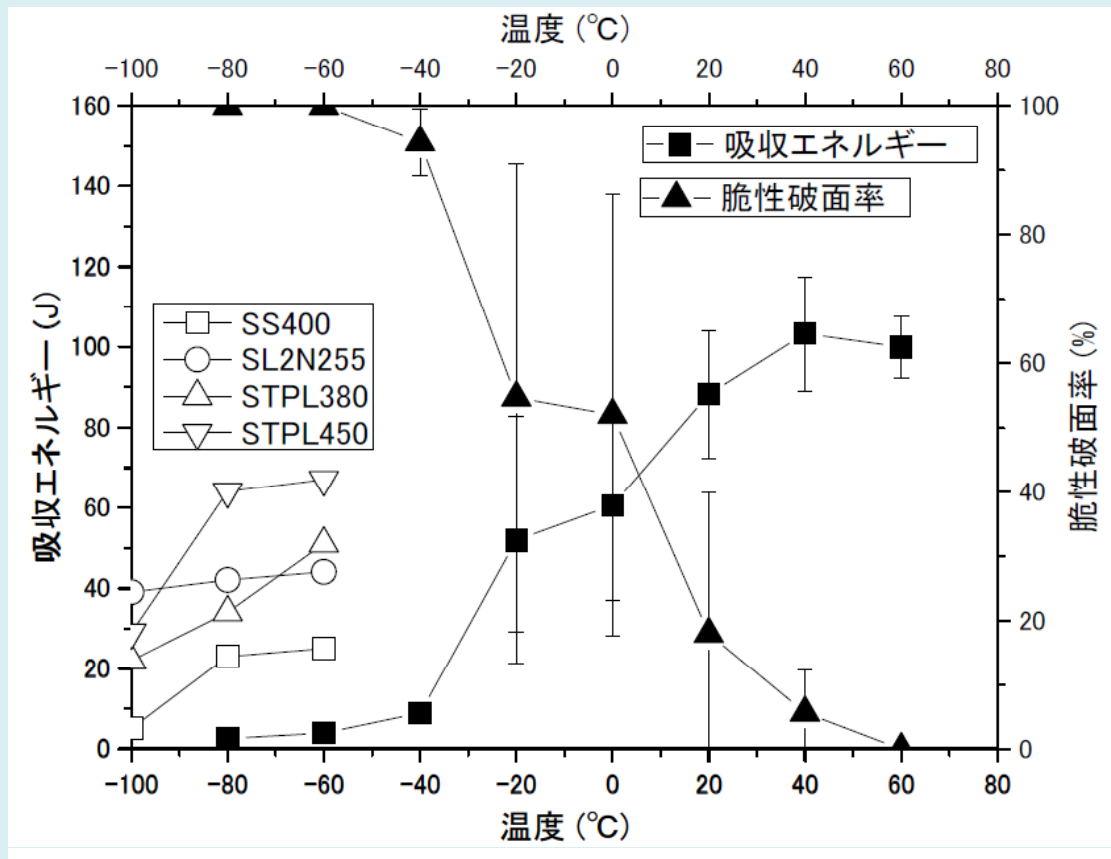
オーステナイトステンレス

鉄、マルテンサイトステンレス

アルミ

-20°C以下で急激に衝撃に対し弱くなる

鉄骨材のシャルピー試験 実際にタワーに使った材料

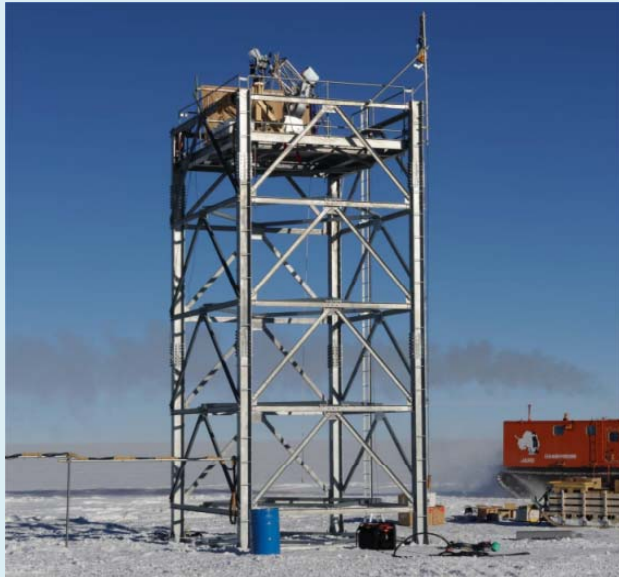


鋼材のシャルピー試験

昭和基地、ドームふじで崩壊した例はない(?)

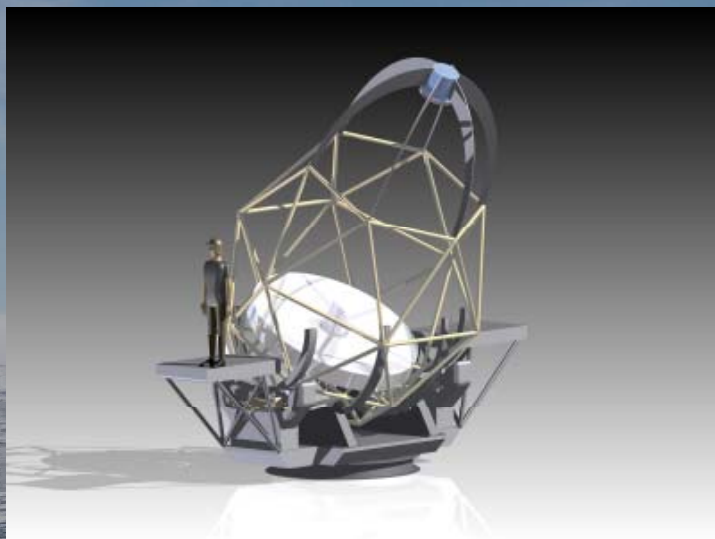


鉄鋼材+溶融亜鉛メッキ

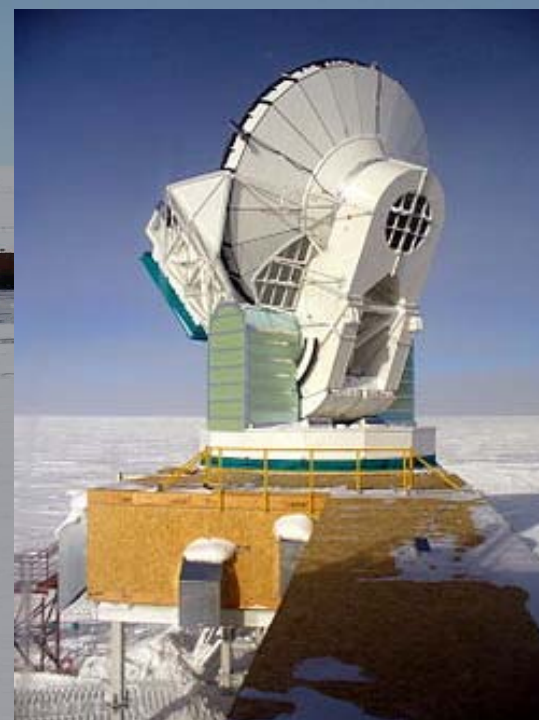


2年後、果たして倒れているか

トラス 構造で、最大限の
軽量化をしているので、1
本が壊れると崩壊する



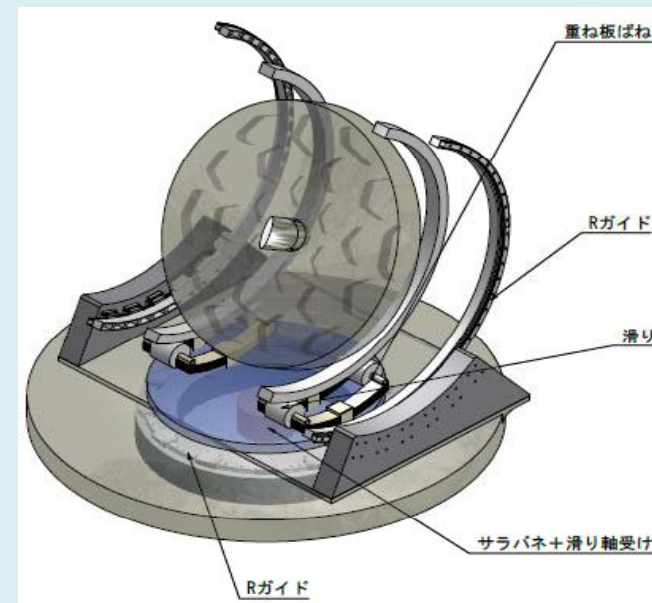
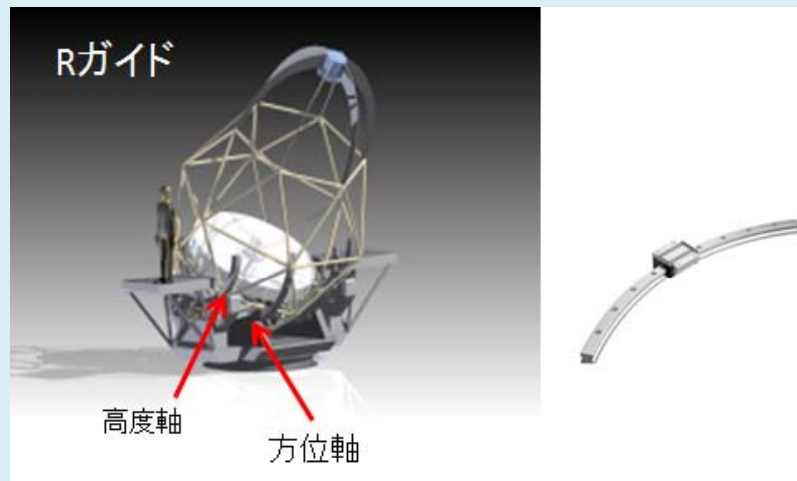
SPT(南極点 10m電波望遠鏡)の
軸受けが壊れた(詳細不明)



基本構造はオーストナイト系ステンレス(SUS304)で製作

材料費は望遠鏡全体に占める割合は少ない

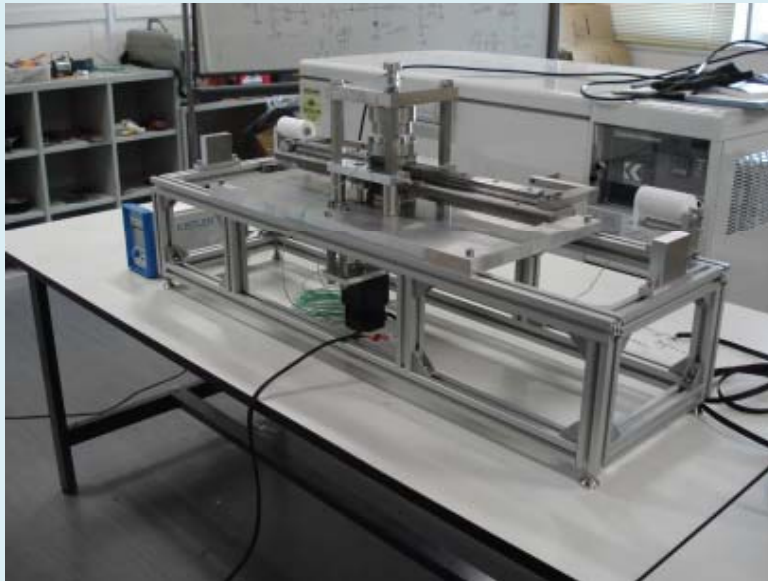
しかし、望遠鏡を支える市販品Rカイドはマルテンサイト(SUS440)
SUS304では焼きを入れることができないので製作不可



実際には、望遠鏡の荷重をサラバネである程度支え、Rカイドへの負担を減らす

SUS440のRガイドは冷却下でどの程度の寿命を持つか

相当品のLMガイドで冷却実験

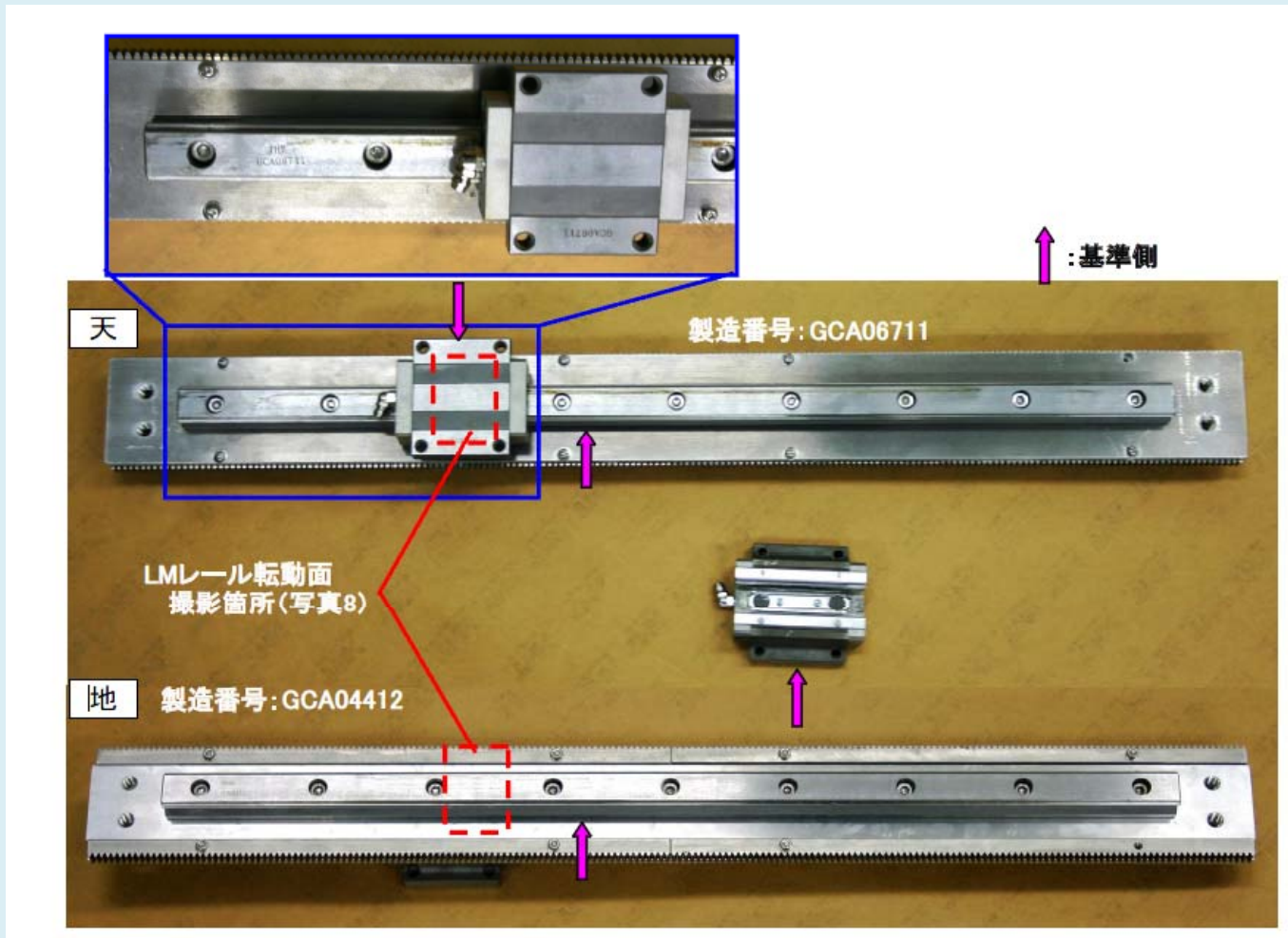


500kgの荷重をかけながら、
走行する試験機

これを冷凍庫内に入れて-80°Cで
の環境で、寿命の半分、500kmの
走行試験を行う

約75日間の連続運転

しかし、4.5km走行で、スタック



LMガイド製造メーカーで詳しく調査してもらったが、原因不明
低温脆性の問題以前。

この実験で得た結論

常温用の仕様品を低温で使った場合、何が起きるかわからない

現在、メーカーと協議しながら、部品のひとつひとつを確認しながら実験を進めていく

- ◆低温化での摩擦(小さなボールの使用)
- ◆グリスの粘性の影響
- ◆丁寧にセッティングして再測定

今後の展望

状況の変化

日本学術会議
第 22 期学術の大型施設計画・大規模研究計画に関するマスタープラン
「学術大型研究計画」への応募



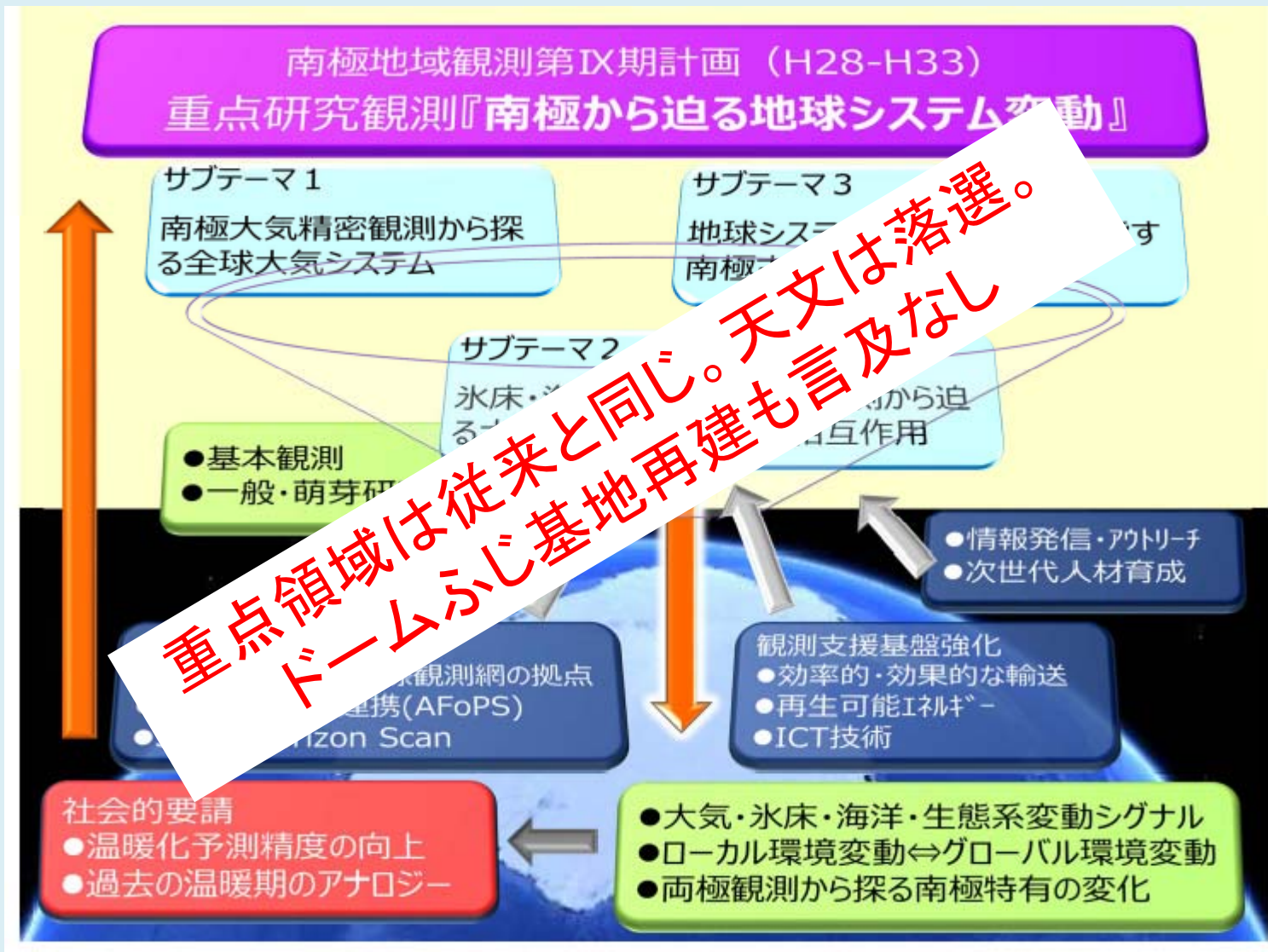
極域科学の
—南極観測・北極観測の地球環境変動研究—

不採択

計画の概要(抜粋)

- 1) 南極内陸総合観測
通年観測が可能な南極内陸基地を新たに整備し、地球観測と天文観測の世界先端拠点とする。
- 2) 北極域環境変動研究

国立極地研究所 南極地域観測第9期計画(2016-2021)



今後の方針

- ◆従来通り一般研究に応募。
ただし、ドームふじ基地遠征計画は不透明

南極赤外線天文グループ

東北大惑星グループ、(天文グループはまだ不透明)

- ◆小口径望遠鏡
- ◆2.5m赤外線望遠鏡(新ドームふじ基地)

南極テラヘルツ天文グループ(中井)

- ◆フランスと共同で、ドームCに10mテラヘルツ望遠鏡の建設
- ◆30mテラヘルツ望遠鏡(新ドームふじ基地)
国立天文台の次期国際大型計画として提案

極地研への窓
口の本化

赤外線グループ

電波グループ

南極天文コンソーシアム

中小計画

大型計画

窓口

宙空圏研究グループ

国際協力

国立天文台研究所
(情報・システム研究機構)

国立天文台
(自然科学研究機構)

天文研究者がいけない

一般研究

重点観測研究

ドームC

ドームA

リッジA

新ドームふじ基地