

# ドームふじにおける天体望遠鏡設営の課題

市川隆(東北大学理学研究科)

瀬田益道(筑波大学道数理物質科学研究科)

南極天文フォーラム

## 概要

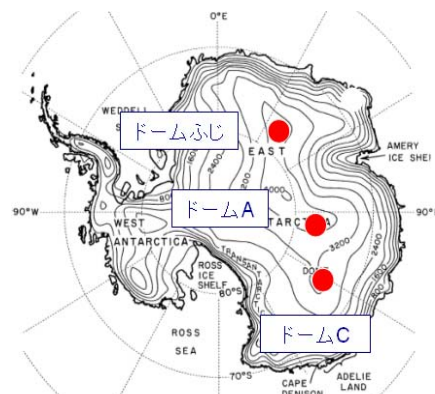
極寒の乾燥した南極は地球上で宇宙に開かれた最後の窓であると言われている。低温のため、大気からの赤外線雑音が非常に小さく、また水蒸気量が極端に少ないので赤外線からサブミリ波における大気の透過率が極めて高い。さらにドームは安定した大気によって、天体像をピンボケにする大気の擾乱が少ないと言われている。そこで我々は赤外線 2m 望遠鏡とテラヘルツ望遠鏡を設置して、寒極天文学を開拓する計画を進めている。ここでは高精度の望遠鏡を雪の上に設置する課題を議論する。

## 1. 赤外線天文学

南極の好天文条件によって、南極の標高 3000m 以上の高原に置かれた口径 2m の望遠鏡は、近・中間赤外線で回折限界を達成し、ハワイ島マウナケア山(4200m)にある口径 8m 級望遠鏡とほぼ同等の性能を有すると期待されている。このような背景から(1) high- $z$  宇宙( $1 < z < 5$ )での銀河の恒星質量に基づく大規模構造の探査、(2) 近傍銀河の星生成領域の観測に基づく銀河内での星生成過程の解明、(3) 極低質量星の探査、(4) 小惑星の非主軸回転に基づく力学進化の解明、(5) 太陽系内の水質変成史の解明および有機物の探査などの研究を計画している。特に南極の冬は太陽が昇らないため、従来考えられなかった長期点の連続観測も可能となる。また天気が良いので、豊富な観測時間が得られるものと期待される。

### 1.1 世界の取り組み

ヨーロッパとオーストラリアはドーム C にすでに小型の天体望遠鏡を設置しており、冬における天文環境調査が進んでいる。また口径 80cm の赤外線望遠鏡の建設を始めている。将来は 2.4m の赤外線望遠鏡を建設する計画である。米国は 2m 望遠鏡を 4 台並べる赤外線干渉計やさらには口径 16m 望遠鏡の設置のための候補地として、ドーム A やドームふじでのサイト調査を計画している。最近、中国もドーム A に天文台を建設する計画をスタートさせた。



### 1.2 大気擾乱調査

赤外線観測の問題のひとつとして、大気の擾乱がある。大気を通してくる天体像は、大気による場所による温度の違いや風による影響のために、いわゆるピンボケ像となる。2m 望

遠鏡の回折限界は波長  $2\mu\text{m}$  で、 $0.13$  秒角であり、これ以上の空間分解能は得られないが、大気の擾乱によって分解能が落ちることは、天体の検出限界を著しく下げる。南極の大気シミュレーションによると、ドームふじは接地境界層が他のドーム基地に比べて低い(冬で高度  $20\text{m}$ )という結果が得られており、



ドームふじが南極においてベストサイトではないかと期待されている。この地において日本がリーダーシップをとってサイト調査を進めていく。赤外線望遠鏡に関して基礎技術開発とサイト調査観測のために極寒仕様の口径  $40\text{cm}$  望遠鏡と広視野赤外線カメラを開発している。現在、各部品をマイナス  $80$  度の冷凍庫の中で駆動実験を行っている。この小型望遠鏡によって、サイト調査を進めるとともに、極寒地における赤外線観測の有効性を実証し、近傍の銀河や太陽系天体の観測などから初期成果を上げていく予定である。

その他、大気の擾乱測定のために、SODAR による大気のゆらぎの観測や  $\text{CT}^2$  センサーをタワーに設置して高度  $2\text{m}$  から  $20\text{m}$  程度の高さ温度の微小変動を測定することも計画している。

### 1.3 望遠鏡設営に関わる課題

望遠鏡は高精度の天体追尾精度を必要とするので、ピアに固定される。このピアは通常は地中に深く埋めるが、氷床に安定したピアを埋め込むことが可能かどうか検討が必要である。また、その高さが高ければ高いほど大気擾乱の影響を受けない。どこまで高くできるかが性能を生かす最大のカギとなる。ただしピアの傾きの精度は緩く、傾いた場合には、駆動軸の誤差を補正して望遠鏡の駆動を行うことで解決する。年に  $20\text{cm}$  の傾きがしょうじないかぎり問題ない。

通常、望遠鏡はドームの中に収めて風雨を防ぐ。ドームは天体の追尾に従って、回転する必要があるが、回転による振動が望遠鏡に伝わるのが許されない。ただし、ドームふじは雨が降らないのでドームは不要かもしれない。強い風によるドリフトから望遠鏡を保護する必要があるが、望遠鏡に付着した雪を効率よくとる方法があればドームは不要となる。

さらに重大な問題として、口径  $2\text{m}$  の鏡はガラス材でできているので、南極までの船による運搬やソリ又は雪上車によるドームまでの長距離運搬中の振動が心配である。望遠鏡自体を軽量化するためには、主鏡の裏側をくりぬいて軽量化する必要がある。直径  $2\text{m}$  厚さ  $20\text{cm}$  重さ  $700\text{kg}$  の主鏡をどのように運搬するかが大きな課題である。



名古屋大学で開発された超軽量望遠鏡架台  
(Kurita et al.)

## 2. テラヘルツ天文学

宇宙の構成要素の基本単位は銀河である。銀河は主として星とガスから構成され、ガスが収縮して星が生まれる。ガスの成分は主に水素分子であるが、星間空間（宇宙空間）のような低温下では強い電磁波を出さない。代わって電波領域で強い輝線を出す一酸化炭素 CO などをプローブとして星間分子ガスは観測されてきた。特に星形成の直接の母体となる高密度且つ比較的溫度の高い分子ガスの観測を行う際には、サブミリ波～テラヘルツ (THz) 領域にあるエネルギー準位の高い CO 輝線の観測が重要となる。また、銀河の輻射強度は、赤外線領域で一番強いが、遠方の銀河を観測する場合には、宇宙膨張の効果で周波数がシフトするため、輻射の強くなるサブミリ波～テラヘルツ帯域での観測が重要になる。遠方の銀河は若い銀河でもあり、星形成や銀河形成の研究において、テラヘルツ帯の観測は重要と言える。

### 2.1 極寒地設置の意義

テラヘルツ領域は、技術的には、赤外線と電波の狭間にあり、技術的な空白域であった。近年の技術発展によりテラヘルツ帯の検出器が出現し、テラヘルツ帯域での天体観測が可能となった。ところが、サブミリ波～テラヘルツ領域の電波は大気中の水蒸気や酸素による吸収の影響を受ける。そのため、望遠鏡の設置場所は、ハワイ・マウナケア山頂や南米高地の砂漠地帯など水蒸気が少ない場所が選ばれている。しかし、そこでもまだ大気の吸収が大きく十分な観測ができない状態にある。人工衛星から観測を行えば、大気の問題は解決するが、宇宙機器は、開発費が膨大であり、観測機器の更新やメンテナンスが行えず、大口径の望遠鏡の搭載も困難である。南極の高原地帯は、寒冷で高地なため、地上で唯一テラヘルツ天文学の観測が可能なサイトである。

### 2.2 ドームふじ基地と南極天文学の開拓

南極内陸部の高原地帯にあるドームふじ基地は、標高が高く(3810m)、極めて低温(最低気温-80℃)なため水蒸気量が非常に少なく、シミュレーションではハワイの山頂や南米高地よりもはるかに大気の透過率が高い(図1)。また年間を通して晴天率が9割以上と高く、風も弱い(5km/s以下)。よってサブミリ波～テラヘルツ領域では地上で最高の観測サイトであると期待できる。我々は世界に先駆けてドームふじ基地において南極天文学を実施することを目指している。大気透過率及び現地及び輸送環境の実地調査から始め、30cmクラスのサーベイ望遠鏡による天体観測の実証を経て、将来的には口径10mクラスのパラボラ型テラヘルツ望遠鏡を設置して、銀河系及び遠方の銀河や宇宙構造の最先端研究の実現を目標としている。

### 2.3 テラヘルツ望遠鏡

電波望遠鏡の基本的な機能は、天体からの微弱な信号をアンテナで集め、受信機により検出増幅し、分光計によりスペクトル(天体からの信号の強度を周波数で分解したデータ)を取得することである。10m望遠鏡の概念図を図2に示す。アンテナの口径は、望遠鏡の空間分解能と集光力を規定する。大きなアンテナほど優れているが、コストや輸送を考慮すると10mクラスが現実的な提案となる。受信機部はパラボラの下の機器室内に設置する。電波技術を応用した望遠鏡では高い周波数ほど技術的な困難さが増す。機械加工の精度が測定限界に近づくことと、検出素子に用いる物質の物性に依存する限界値が存在するためである。それでも、1THz程度までの観測機器は、超伝導素子(SIS)を用いた受信機により実験室レベルの性能が確認されている。超伝導素子を動作させるために、テラヘルツ望遠

鏡では 4K の極低温の環境が必要であるが、現在は、機械式冷凍機で容易に 4K の極低温環境は実現可能である。10m クラスのアンテナも 1THz 受信機も技術的には開発の目処がたっているが、南極という特異な環境への適応が南極天文学実現においては大きな技術開発課題となる。

## 2.4 南極設置の課題

南極への適応として、高い指向精度の実現維持と輸送手段の確保が特に重要な課題と考えている。10m の口径の望遠鏡の場合には 0.4" 程の指向精度の確保が必要である。0.4" は 10m の基礎に対して許容誤差が 5 $\mu$ m に相当する。0.4" の指向精度は望遠鏡本体の機械システムとしては実現可能な値であるが、酷寒の地で、雪原が基礎という環境での実現は容易ではないと考えている。設置初期の精度出し、不等沈下に対する精度維持、夏冬の昼夜の日照と気温変化への対策が必要となる。精度の要求が緩い 30cm のサーベイ望遠鏡の南極運用での技術実証という段階を経て、10m クラス鏡の指向精度実現を目指している。

南極ドームふじ基地までの輸送手段も大きな問題となる。サイト調査用の小型機器は航空機でも輸送可能であるが、10m クラスの本格的な望遠鏡の設置の際には、大型航空機によるドームふじ基地への輸送路が開拓されない限り、昭和基地からの陸路輸送が基本的な輸送手段となる。電波望遠鏡は国内で製造したシステムを海外で稼働させている前例が多数あるため、商用の航空機や船舶の輸送環境を実現できれば、望遠鏡の輸送条件としては問題無い。そこで、実地調査による輸送環境の過酷さを定量化した上で、商用輸送レベルまで振動レベルを軽減する振動減衰機構付きの輸送コンテナの開発が大きな課題となる。

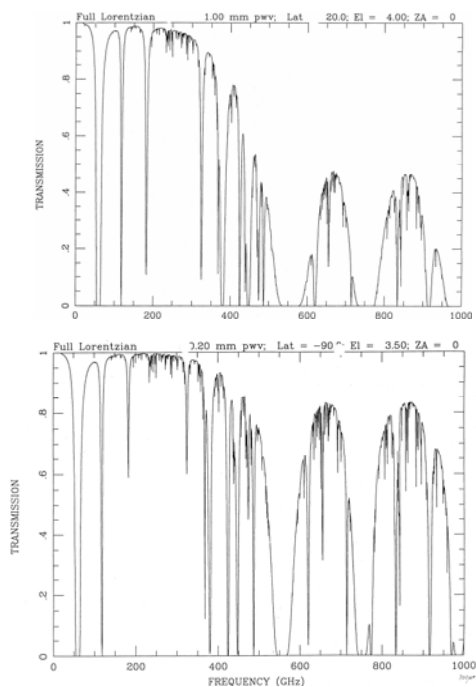


図1 大気透過率（上ハワイ、下ドームふじ）

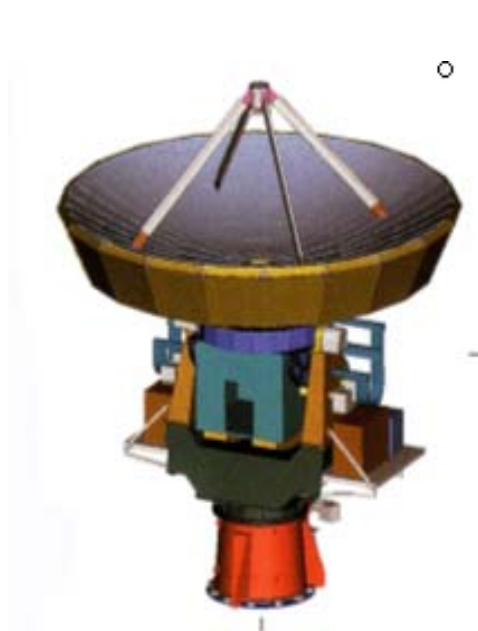


図2 10m パラボラ型テラヘルツ望遠鏡の概念図