

I V. 宇宙観測グループ

教 授 中井 直正

講 師 瀬田 益道

準研究員 山内 彩

大学院生 15名（数理物質科学研究科後期課程5名、前期課程8名；教育研究科2名）

研究室が発足して4年目となった。国土地理院32m鏡の20GHz帯電波望遠鏡化の整備を引き続き行い、単一鏡として本格的な観測を開始した。また南極ドームふじ基地における天文観測の計画を国立極地研究所と協力しつつ推進し、同時にプロトタイプとして30cmサブミリ波望遠鏡の開発を開始した。準研究員山内彩が年度末をもって転出した。

【1】国土地理院32m鏡の電波望遠鏡化と観測の開始

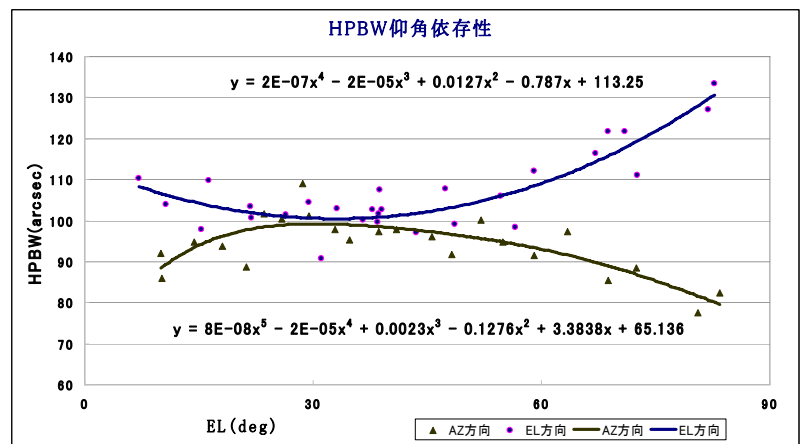
(1) 実効雑音の改善

昨年度に20GHz帯受信機等を立ち上げて12月に22GHzで最初に天体からの電波を受信し、本年度の5月18日に鹿島34m鏡との間で最初のVLBI実験に成功した（天体は3C84）。しかしながら、スペクトルに現れる雑音の大きさがシステム雑音温度から計算される理論値よりも数十倍も大きく、本格的な観測は不可能であった。

異常な実効雑音の原因を探るために夏に調査を行った。受信機の真空窓とその上のどこかで反射が起きて定在波が立っている可能性が高いと判断し、スペクトルのフーリエ変換による波長解析やビーム伝送系への吸収体の挿入、副鏡裏や副鏡ステイへの吸収体の貼り付けなど種々の実験を行った結果、主鏡中心にあってビーム伝送系上部の雨避けカバーを外すと、異常雑音が劇的に消失することがわかった。そこで10月21日に雨避けカバーを吸収・反射の少ないゴアテックス製の膜（RA7956）に交換して実効雑音を大幅に改善した。短時間周期のポジションスイッチではほぼ理論値に近い雑音を達成している。ただ、定在波がまだ若干残っていることと受信機やデジタル分光計の利得の不安定性による影響から、長時間周期のポジションスイッチや強い連続波電波を持つ天体の観測では異常雑音が発生する。今後、利得の安定化を一層進める必要がある。

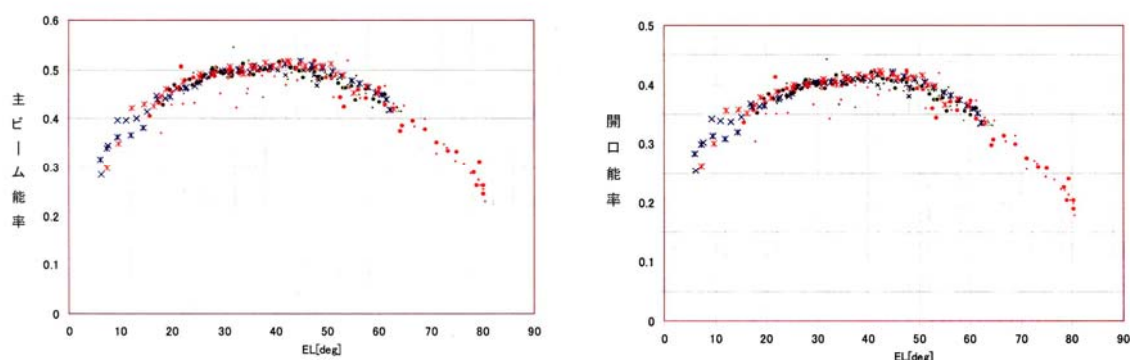
(2) アンテナ系

アンテナの最適化と性能測定を行った。まず天体を使って副鏡の位置を20GHz帯光学系に最適化した（但し、天体が昇るときと下るときで系統的に副鏡の最適位置に差が出る現象が発生している）。次に、晩期型星の水メーザーやQSOの連続波電波を使って全天で指向性の誤差を測定し、ポインティングモデルに最小2乗法を適用してパラメータを決定した。その結果、



適用後の残差が $\text{rms}=15''$ となった。実際、天体を入れて実測した結果もこれと矛盾しない。主ビームの大きさを考えるとこれで十分に観測可能となった。主ビームの大きさは強い点状電波源を観測して測定し、 $\text{HPBW}=100''$ を得た。但し、 $\text{EL}=30\sim 40^\circ$ 付近ではビームは丸いが、その上下では仰角方向に長いビームとなることがわかった（右図）。

主ビーム能率は惑星を用いて測定した。火星と土星も用いたが輝度温度が不明朗なので、主として木星を用いた。またその仰角依存性も測定した。その結果、仰角 $\text{EL}\sim 35^\circ$ 付近で最大で $\eta_{\text{mb}}=0.52$ であった。仰角がその前後では主ビーム能率は低下し、特に 70° 以上では大幅に低下することがわかった（下図左）。また主ビーム能率とビームサイズから開口能率を計算し、同じく仰角 $\text{EL}\sim 35^\circ$ 付近で $\eta_{\text{a}}=0.45$ であり、その上下で低下することもわかった（下図右）。これらの仰角依存性はビームサイズ（従ってビームの形状）の変化と性質が合致する。またこれらの能率の周波数依存性も測定した。



(3) 受信機系

受信機の冷却増幅部の改良を行い、受信機雑音温度の向上を図った。受信周波数は $19.5\text{--}25.2\text{GHz}$ である。中間周波数部は第1中間周波数が $4\sim 8\text{GHz}$ で、第2中間周波数はデジタル分光計用が $0\text{--}1.0\text{GHz}$ 、VLBI用が $0.5\text{--}1.0\text{GHz}$ である。増幅器の周囲の温度変化による利得変動が問題であったので、シェルター内の工夫により利得変動を抑制した。また第2中間周波数変換部をシェルターから観測局舎内に移動することによって、周囲環境の温度変動を抑制した。

デジタル分光計の制御ソフトウェアを整備し、装置部分の安定化も図って、実際の観測に用いることができるようにした。その結果、サンプルビット数が8ビット、周波数帯域幅が 2GHz 、分光点数が1万6千チャンネルで分光できる。この広い周波数帯域幅によりアンモニアの(J,K) = (1,1)~(5,5)の輝線が同時観測可能となった。

(4) 望遠鏡制御系ソフトウェア

望遠鏡の制御ソフトウェアを開発し、実際の観測に供した。観測者が観測パラメータを入力する観測テーブル作成部分とそれを読み込んで装置を動作させる中央制御部分からなる。中央制御部分は独立に動作する各装置の制御パソコンに指令を送っている。天体の追尾計算部分は国立天文台野辺山 45m 電波望遠鏡の COSMOS を元に一部修正を加えて、位置計算誤差を $0.01''$ 以下、速度計算誤差を 0.01km/s 以下とした。また分光計の出力を実時間でモニターすることのできるクイックシステムも整備した。

(5) データ処理系

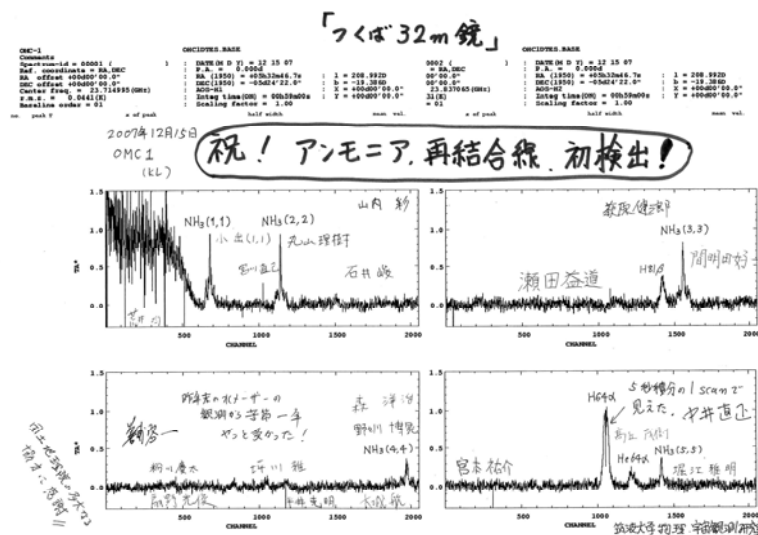
分光計で取得されたスペクトル線データはフラッシュメモリで大学まで持ってきて処理する。取

得周波数帯域 1GHz から任意の 2048 チャンネル分 (125MHz) を最大 8 個までに分割し、データ形式を変換して野辺山 45m 電波望遠鏡のデータ処理システムである NEWSTAR で処理する。

(6) 観測の開始

12 月 15 日にオリオン分子雲において 23–25GHz 帯にあるアンモニアの 4 本のスペクトル線および再結合線を初めて観測した (右図)。その後 12 月 24 日から本格的な観測を開始し、4 年生の卒業研究および修士論文や博士論文に向けての観測を継続した。

その中で、銀河 NGC 6946 や NGC 3079 のアンモニア輝線を初めて検出した。また活動的銀河中心核からの水メーザーの速度のモニター観測も開始した。



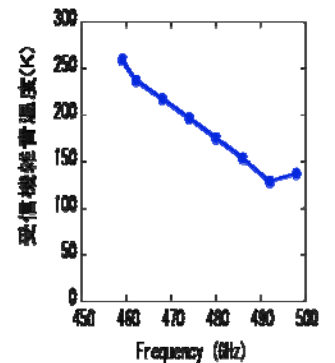
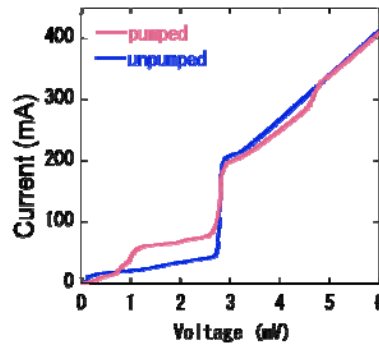
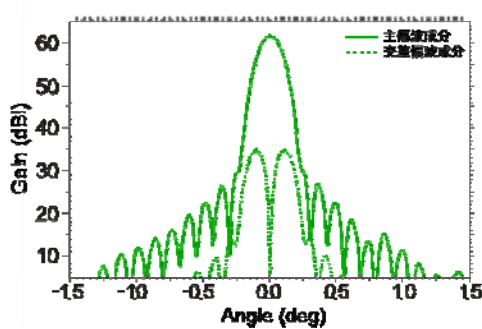
【2】南極望遠鏡計画

南極大陸の昭和基地から約 1000 km 内陸側の高原地帯にある日本のドームふじ基地において南極天文学を開拓するために、プロトタイプとして 30 cm サーベイ望遠鏡の開発を始め、今年度は設計及び基幹部品の製作を行った。

システム設計において、観測帯域は、星間物質の主要なプローブである、一酸化炭素分子と炭素原子の観測に適した 500 GHz と定めた。アンテナの形式は、広視野望遠鏡の特性を最大に生かすオフセットカセグレン型とし、空間分解能は、既存のサーベイデータを有効に活用できるように 30 cm 鏡の採用で 9 分角とした。伝送光学系の設計においては、将来の高周波数観測の際にも、伝送光学系の更新を不要とする、周波数の依存性が少ない光学パラメータを定めた。受信機の設計では、超伝導素子を用いた高感度受信機を採用した。小型軽量の 4K 冷凍機を採用しながら、信号窓径の最小化等により流入熱を抑制し、2 系等の観測信号の同時受信も可能な高感度受信機システムを設計した。これらの搭載機器は、南極現地での人力での運搬性を考慮して、60 kg 以下に分割できる構成にした。

アンテナ光学系のシュミレーションによる評価では、対称性が良い所望のビームサイズが実現できていることを確認し、伝送光学系は、観測周波数である 500 GHz 帯に加え、将来計画である 1 THz の観測においても、今回開発した伝送光学系が使用できることを確認した。製作した超伝導受信機を用いた評価試験の結果、超伝導素子の電流—電圧特性では、超伝導素子の 4K への確実な冷却及び良好な膜質を示す急峻な非線形特性を確認し、雑音性能の評価では等価熱雑音換算で 140 K を実現した。この雑音温度は世界レベルでの標準値であり、高感度受信機システムの開発に成功したと言える。

また、南極天文学の推進組織として発足させた南極天文コンソーシアムの活動を、東北大学等と協力して継続している。南極研究観測シンポジウム等で計画の発表を行い、国立極地研究所と計画の協議を行った。



【3】銀河の観測的研究

距離約 79Mpcにある円盤銀河IC1481 の活動的銀河中心核(AGN)から出ている超強力水メーザーをVLBAで観測した結果、半径が $r=2.8-14.0$ pc、厚さが $2H=1.5-4.1$ pc、回転速度が $V_{\text{rot}}=124-168$ km/s、速度分散が $\Delta V=31$ km/sである分子ガス円盤を発見した。この円盤の回転曲線は式

$$V_{\text{rot}} \propto r^{-(0.19 \pm 0.04)}$$

で表わされ、中心から離れるほどケプラー回転よりも有意にゆっくりと速度が減少している。この回転曲線を円盤の質量と中心にあるブラックホールの質量によるものとするモデルで計算すると、それぞれの質量は $M_{\text{disk}}=(4.3 \pm 0.3) \times 10^7 M_{\odot}$ と $M_{\text{BH}} < 10^7 M_{\odot}$ となり、円盤の質量だけで説明できるとともにブラックホールの質量の上限値を与えることができた。この結果はガス円盤が静水圧平行よりもはるかに厚いこととも合致している。また円盤に垂直方向にその片側に連続波電波のジェットも検出した。

<論文>

(査読論文)

1. Mamyoda,K., Nakai,N., Yamauchi,A., Diamond,H., Hure,J.M.
 “Detection of a Sub-Keplerian Water Maser Disk at the Active Galactic Nucleus of the Galaxy IC 1481”
Publ. of Astron. Soc. Japan, submitted.
2. Sorai,K., Habe,A., Nishitani,H., Hosaka,K., Watanabe,Y., Miwa,S., Ohishi,Y., Motogi,K., Minamidani,T., Awano,J., Sumida,S., Fukuya,Y., Uchida,R., Kaneko,N., Fujimoto,M.Y., Koyama,Y., Kimura,M., Nakai,N.
 “Large-scale NH₃ Observations toward the Galactic Star Forming Regions I. W51 Molecular Clouds Complex”
Publ. of Astron. Soc. Japan, submitted.

(国際研究会集録等)

1. Kuno,N., Sato,N., Nakanishi,H., Hirota,A., Tosaki,T., Shioya,Y., Sorai,K., Nakai,N., Nishiyama,K. and Vila-Vilaro,B. 2008 “Nobeyama CO Atlas of Nearby Spiral Galaxies”, in *Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies*, ed. Wada,K. and Combes,F. (Springer Science+

- Business Media, New York), 170.
2. Nakanishi,K., Sato,N., Kuno,N., Okumura,S.K., Kawabe,R., Kohno,K., Yamauchi,A., and Nakai,N. 2008 “Radio Continuum and Water Vapor Maser Monitoring Toward the Luminous Infrared Galaxy NGC 6240”, in *Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies*, ed. Wada,K. and Combes,F. (Springer Science+ Business Media, New York), 364.
 3. Sorai,K., Kuno,N., Nakai,N., Matsui,H. and Habe,A. 2008 “Kinematics of Molecular Gas in the Bar of Maffei 2”, in *Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies*, ed. Wada,K. and Combes,F. (Springer Science+ Business Media, New York), 380.
 4. Yamauchi,A., Nakai,N., Ishihara,Y., Diamond,P. and Sato,N. 2008 “Water-Vapor Maser Disk at the Nucleus of the Seyfert 2, IC 2560”, in *Mapping the Galaxy and Nearby Galaxies*, ed. Wada,K. and Combes,F. (Springer Science+ Business Media, New York), 385.
 5. Yamauchi,A., Nakai,N., Ishihara,Y., Diamond,P., and Sato,N., 2007 “Water-vapor maser disk at the nucleus of the Seyfert 2, IC 2560”, in *Astrophysical Masers and their Environments*, Proceeding of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Vol. 242, 412-413.

<学位論文>

(修士論文) 数理物質科学研究科・物理学専攻

1. 石井 峻
「南極可搬型サブミリ波望遠鏡光学系の開発」
2. 小出祐輔
「筑波大学電波望遠鏡制御ソフトウェアの開発」
3. 益田多美
「The Physical State of the CO Gas in the Spiral Galaxies Based on the Study of CO J=1-0 and J=2-1 Lines」
4. 宮川直己
「南極可搬型サブミリ波望遠鏡冷却受信機の開発」

(卒業論文)

1. 粉川慶太
「つくば 32m 電波望遠鏡の 20GHz 帯における受信観測性能の向上」
2. 高丘茂樹
「活動的銀河中心核ケンタウルス A のアンモニア観測」
3. 善甫啓一
「アンモニア観測による近傍銀河 NGC6946 中心部の分子ガスの研究」
4. 坪川 雅
「オリオン分子雲のアンモニア観測」
5. 野々川博晃
「星形成初期のコアを含む分子雲のアンモニア観測」
6. 前橋秀樹
「南極 30cm 可搬型電波望遠鏡受信機中間周波数部の設計」
7. 森 洋治
「つくば 32m 電波望遠鏡による W51 電離領域の観測的研究」

<学会発表>

1. 瀬田益道、石井峻、宮川直己、小出祐輔、宮本祐介、萩原健三郎、山内彩、中井直正、南極天文コンソーシアム
「南極 30cm 望遠鏡による 500GHz 帯の銀河面サーベイ計画」
日本天文学会秋季年会 (2007 年 9 月 26 日)
2. 中村佳代子、並河大地、亀野誠二、澤田一佐藤聡子、吉川亮、中井直正、佐藤奈穂子
「活動的銀河 NGC1052 のプラズマトーラス構造とメーザースポットの分布」
日本天文学会秋季年会 (2007 年 9 月 26 日)
3. 宮川直己、瀬田益道、石井峻、小出祐輔、宮本祐介、萩原健三郎、山内彩、中井直正、前澤裕之
「南極 30cm サブミリ波望遠鏡の開発」
日本天文学会秋季年会 (2007 年 9 月 27 日)
4. 石井峻、永井里、瀬田益道、中井直正、本山秀明、田口真
「南極ドームふじ基地における 220GHz 帯大気透過率の測定」
日本天文学会秋季年会 (2007 年 9 月 28 日)
5. 中西康一郎、久野成夫、濤崎智佳、奥田武志、河野孝太郎、徂徠和夫、中井直正
「CO(1-0) and CO(3-2) Mapping Observations toward Nearby Barred Spiral Galaxy NGC253」
日本天文学会春季年会 (2008 年 3 月 25 日)
6. 石井峻、宮川直己、瀬田益道、小出祐輔、宮本祐介、萩原健三郎、山内彩、中井直正、前澤裕之
「南極 30cm サブミリ波望遠鏡の開発」
日本天文学会春季年会 (2008 年 3 月 25 日)
7. 山倉鉄矢、中井直正、瀬田益道、前澤裕之、芝祥一、新保謙、山本智
「準光学型ホットエレクトロンボロメータの開発」
日本天文学会春季年会 (2008 年 3 月 25 日)
8. 瀬田益道、山内彩、萩原健三郎、宮本祐介、堀江雅明、間明田好一、宮川直己、小出祐輔、石井峻、荒井均、扇野光俊、平井克明、丸山理樹、大城航、永井里、中井直正、他 32m 鏡運用チーム、栗原忍、他宇宙測地グループ
「つくば 32m 電波望遠鏡 20GHz 帯観測システムの開発」
日本天文学会春季年会 (2008 年 3 月 27 日)
9. 山内彩、小出祐輔、萩原健三郎、堀江雅明、丸山理樹、瀬田益道、中井直正、栗原忍、他宇宙測地グループ
「つくば 32m 電波望遠鏡の単一鏡観測制御システムの開発」
日本天文学会春季年会 (2008 年 3 月 27 日)
10. 宮本祐介、瀬田益道、萩原健三郎、間明田好一、堀江雅明、石井峻、小出祐輔、宮川直己、中井直正、栗原忍、他宇宙測地グループ
「つくば 32m 電波望遠鏡の 20GHz 帯受信観測システムの開発」
日本天文学会春季年会 (2008 年 3 月 27 日)
11. 萩原健三郎、堀江雅明、宮本祐介、助田悠紀、間明田好一、石井峻、宮川直己、小出祐輔、荒井均、扇野光俊、平井克明、丸山理樹、大城航、永井里、山内彩、瀬田益道、中井直正、栗原忍、他宇宙測地グループ
「つくば 32m 電波望遠鏡の 20GHz 帯実効雑音の評価と雨避けカバーの交換」

日本天文学会春季年会（2008年3月27日）

- 1 2. 丸山理樹、中井直正、瀬田益道、山内彩、萩原健三郎、間明田好一、堀江雅明、宮本祐介、石井峻、小出祐輔、宮川直己、荒井均、扇野光俊、平井克明、大城航、永井里、粉川慶太、善甫啓一、高丘茂樹、坪川雅、野々川博晃、森洋治、前橋秀紀、栗原忍、他宇宙測地グループ
「つくば 32m 電波望遠鏡の 20GHz 帯アンテナ性能評価」

日本天文学会春季年会（2008年3月27日）

<外部資金>

(学 内)

1. 学内プロジェクト研究（特別助成研究）：瀬田益道（研究代表者） 中井直正 山内彩
「南極天文学開拓に向けてのサーベイ望遠鏡の開発」
(交付額 905 万円) (2/3 年)
2. 物理学系若手奨励研究プロジェクト：山内彩（研究代表者）
「アンモニア吸収線の観測による活動的銀河中心核の研究」
(交付額 32 万 5 千円) (1/1 年)

(学 外)

1. 科学研究費補助金（基盤研究 B）：中井直正（研究代表者）
「水メーザーの観測によるセイファート銀河の統一モデルの再考」
(交付額 100 万円) (3/3 年)
2. 科学研究費補助金（基盤研究 A）：瀬田益道（研究代表者）、中井直正、山内彩
「南極天文学を切り開くサブミリ波サーベイ望遠鏡の開発」
(交付額 2040 万円) (1/3 年)
3. 国立極地研究所共同研究：中井直正（研究代表者）、瀬田益道、他
「ドームふじ基地における天文観測の調査検討」
(交付額 9 万 9 千円) (1/3 年)
4. 自然科学研究機構国立天文台：中井直正（研究代表者）
「大学間連携 VLBI 観測事業に係る研究—先端的天文学研究の推進—」
(交付額 435 万 5 千円) (1/1 年)
5. 東レ科学技術研究助成金：瀬田益道（研究代表者）、中井直正、山内彩
「南極天文学の開拓」
(交付額 1152 万 9 千円) (1/2 年)

<共同研究・受託研究>

1. 「大学間連携 VLBI 観測事業に係る研究：先端的天文学研究の推進—高精度 VLBI 観測による銀河系の構造及び進化の解明」一般受託研究契約
大学共同利用機関法人自然科学研究機構（2007年4月2日～2008年3月31日）

<社会活動・広報活動>

(一般向講演)

1. 中井直正：第 17 回 ALMA 公開講演会

「銀河の中心とブラックホールをさぐる」

2007 年 8 月 12 日 (日) つくば市つくばエキスポセンター

(新聞記事等)

1. 2007 年 6 月 4 日、毎日新聞(夕刊)：「南極に天文台」

2. 2007 年 7 月 3 日、NHK 国際放送「ラジオ日本」：ニュースで南極天文台計画紹介

3. 2008 年 2 月 22 日、日本経済新聞(夕刊)：「南極に天文台を」



宇宙に開かれた地上の最後の窓

天体観測に好条件の南極に天文台を設置する構想を、筑波大、東北大などの研究チームが進めている。低温の南極は赤外線や電波が地上によく届くうえ、好天の日も多い。2012年の設置を目指すし、日本の南極隊員に観測装置を託して現地調査を始めた。【下桐実雅子】

筑波大など 12年設置目指す

構想では、筑波大が口径 10メートルの電波望遠鏡、東北大が口径 30メートルの電波望遠鏡、東大が口径 10メートルの電波望遠鏡、中井教授らによると、北大が口径の赤外線望遠鏡、平均気温が氷点下 54度のドームふじ(標高 3801メートル)に設置する。国立南極では、大気中の水蒸気や極端に少ない。世界天文台などの研究者も各国の望遠鏡が集まる米ハワイのマウナケア山頂やチリの高地に比べて、電波や赤外線が大気に吸

低温、好天 観測に最適

収されずに地上に届く割合が高い。中井教授は「なかでもドームふじは標高が一番高く有利。昭和基地より 1000メートル以内にあるため風も穏やかだ」と説明。宇宙初期の銀河などを観測し、銀河の進化過程や構造を解明したいという。

コンソーシアムは昨年未から 1 カ月間、第 48 次観測隊に依頼し、電波と赤外線の大気透過率を調査した。さらに、研究チームは南極で使う望遠鏡の小型版を試作中。氷点下 80度の業務用冷凍庫で望遠鏡部品の耐寒性を試験したり、北海道やグリーンランドでの試験観測を予定している。

南極では今年 2 月、米国が南極点に口径 10メートルの大型電波望遠鏡を完成させたほか、欧州、中国、豪州も現地調査を始めた。東北大の市川隆教授は「南極は宇宙に開かれた地上の最後の窓と言われる。いずれは世界の天文台が集結するはずで、日本もその動きに先駆けたい」と話している。

低温環境を考慮して開発中の東北大の 40 センチ赤外線望遠鏡。市川隆教授提供

(毎日新聞夕刊、2007 年 6 月 4 日)