



# TAO サイト調査 (1)

本原顕太郎, 宮田隆志, 土居 守

〈東京大学天文学教育研究センター 〒181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: kmotohara@ioa.s.u-tokyo.ac.jp, miyata@kiso.ioa.s.u-tokyo.ac.jp, doi@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

東京大学天文学教育研究センターでは現在、南米アタカマ高地の孤立峰（標高 5,630 m）に口径 6.5 m の赤外望遠鏡を建設するためのサイト調査を行っている。これまでに気象モニターとシーイングモニターの観測結果が得られて、この場所が赤外望遠鏡の建設の適地であることが明らかになってきた。ここでは調査の現状とその結果について簡単に紹介したい。

## 1. 南米アタカマに赤外望遠鏡を！

南米チリのアタカマ高地\*1は遠い。東京の自宅を出てから、サンペドロ・デ・アタカマ（通称サンペドロ）というアタカマ高地の入り口にある村のホテルに着くまでに 40 時間近くかかる。飛行機に乗っている時間だけでも軽く 24 時間以上。ホテルに着くころには大抵、睡眠不足でへろへろになっている。

環境も過酷だ。サンペドロ一帯は標高 2,000 m 余りなのだが、周囲は完全な砂漠地帯でカラカラに乾いている。しかもチリ北部一帯は地下鉱物資源の宝庫だけにそこら中に鉱脈があり、水は非常に硬い。ホテルの蛇口から出てくる水は温泉を飲んだときと同じ、錆びたような独特の味がする。

その代わりに酒は美味しい。日本でもチリワインが有名なように、美味しいワインが非常に安く（1 本数百円程度）手に入る。あと、ワインを蒸留して作ったピスコというブランデーもいい。このピ

スコにレモンジュースと卵白を入れたピスコサワーというカクテルはどこのレストランにもあって、夕食前には必ずといっていいほど飲んでいた。

アタカマ高地は、このサンペドロからさらにアルゼンチンに向かうハイウェイ（とはいっても分離帯もない片側一車線の道）を東に 100 km 足らず走ったところにある。標高差は実に 3,000 m 近く。四駆のピックアップトラックでもギアを一速に入れないと上れないような急坂を一気に駆け上がる。1 時間ほど走ると、標高 5,000 m だとは思えないような広大な平原が目の前に広がる。アタ



図 1 チャナントール山腹から ALMA 建設予定地を望む

\*1 『アタカマ高地』というのは TAO チーム内部で言い慣わされた通称で、サンペドロ・デ・アタカマから東に 60 km ほどにある標高 5,000 m の平原部を指す。現地でこのように呼ばれているわけではなく、実際の地名でいえば『Llano de Chajnantor と周辺領域』と呼ぶべきだろうが、本稿では便宜上、このように呼ぶことにする。

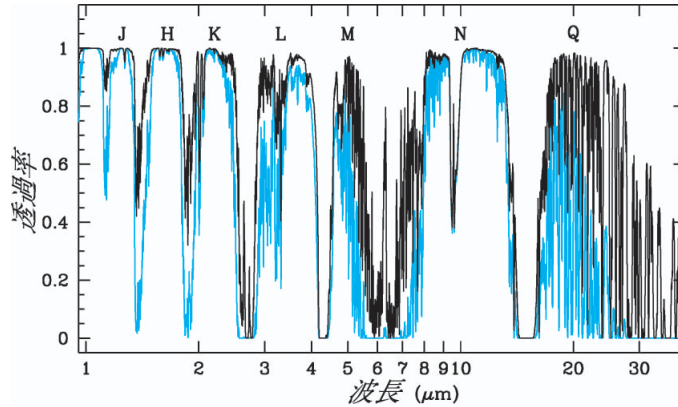


図 2 標準大気モデルを用いて計算した赤外域での大気透過率の比較。黒線がチャナントール山頂 (5,600 m)，青線は同じチリで VLTがあるパラナル山頂 (2,600 m)。1~2.5  $\mu\text{m}$  帯でほぼ連続した観測が可能になるのがわかる。3  $\mu\text{m}$  より長波長側でも各バンドの透過率が非常に良くなる。

カマ高地だ。奥には標高 6,000 m 以上もある山脈が連なり、その向こうはもうアルゼンチンだ。

アタカマ高地というと最近では専ら ALMA 計画で有名になっているが、われわれ東京大学の天文学教育研究センター（以下、天文センター）は、その ALMA サイトの脇にあるチャナントール (Co. Chajnantor) という標高 5,630 m の孤立峰の山頂に口径 6.5 m の赤外望遠鏡を建設する TAO (Tokyo Atacama Observatory) 望遠鏡プロジェクトを進めている。

ここに大型の赤外望遠鏡を設置するメリットはいくつかあるが、最も重要なのは赤外線での透過率が非常に良くなることだ。近赤外から中間赤外にかけての波長 1~20  $\mu\text{m}$  の領域は、大気中の水蒸気をはじめとする分子の吸収で大気の透過率プロファイルが複数の『窓』に寸断され、観測できない波長域が半分以上になる。しかし、アタカマは標高が高く非常に乾燥しているために水による吸収が少なく、例えば近赤外 1~2.5  $\mu\text{m}$  域ではほぼ完全に連続した観測が可能となる (図 2)。これは、特に分光観測を行う際には非常に大きな利点となる。

また透過率が高いということは、裏返すと大気の放射率が低いことを意味する。気温もハワイの

マウナケアに比べて 10 度以上は低いと見られており、結果として熱背景放射は半分近くに抑えられると予想されている。すなわち、300 K の大気の熱放射に悩まされる 10~20  $\mu\text{m}$  の中間赤外での観測には非常に有利な環境なのだ。また、近赤外 2.2  $\mu\text{m}$  バンドにおいてもより深い撮像が可能となるだろう。

天文センターでは 2 年前から望遠鏡建設に向けたサイト調査とその評価を行ってきた。本稿ではこれまでの調査の結果と、明らかになってきたアタカマ高地の光赤外望遠鏡サイトとしての適性を簡単ではあるが報告したい。なお TAO プロジェクトは吉井讓教授を代表とし、天文センターが中心となって、東京大学天文学教室の協力と全国の 70 以上の大学の賛同を得て進められている。

## 2. サイトの選定

一言でサイト選定といっても北部チリの中岳地帯は広い。東西南北それぞれ数百 km にわたって広がっていて、その中に多数の孤立峰が存在している。これらの峰すべてでサイト評価の現地調査を行うのは予算、時間、人すべての面で現実的ではない。そこで、天文センターでは気象衛星 Me-teosat と GOES のデータを解析し、サイトの絞り

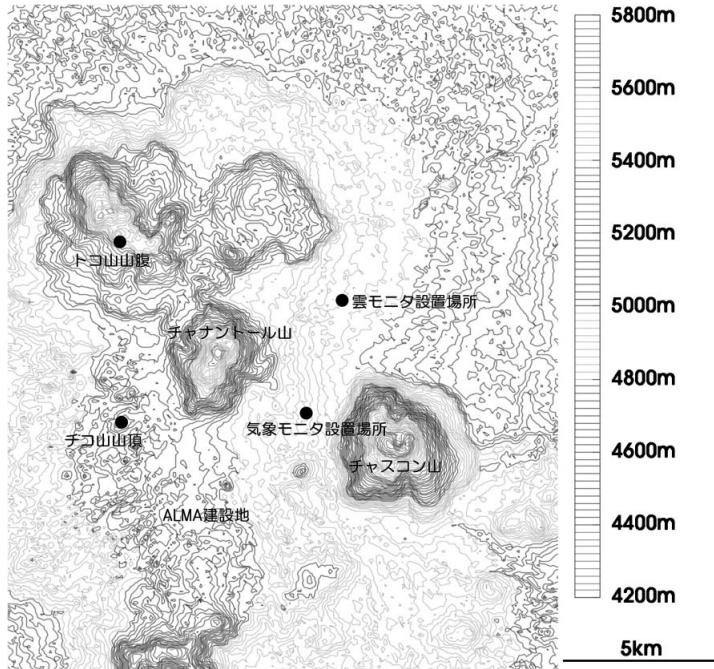


図 3 チャナントール山周辺の地形（データ提供：財団法人資源・環境観測解析センター）

込みを行うことにした。とは言え、この作業も単純ではない。衛星の複数の赤外バンドのデータを購入し、それをわれわれにとって意味のあるデータ（晴天率と水蒸気量）として解釈するには地球大気に関する専門的な知識が必要になる。幸いなことに米国のセロ・トロロ天文台 (CTIO) や欧州の南天天文台 (ESO) などが次世代の超大型望遠鏡計画のサイト選定のために同様の調査を計画していたので、これら機関との共同研究でデータを購入し気象学者の Andre Erasmus 氏に分析を委託した。

この研究ではチリ北部のかなり広い領域が対象になっており、望遠鏡設置の候補になりそうな峰々について晴天率と水蒸気量が調査された。結果として判明したことを大雑把にまとめると、

- 海岸に近い方が晴天率が高く、
- 内陸側に行いほど（すなわち、標高が高くなるほど）水蒸気量は減少する

という 2 点だった。

また、望遠鏡のサイトは気象条件だけでは決まらない（そんなことを言ったら南極の高山なんかは最高に良いサイトなのだが）。それ以外にもアクセスの容易さ、周辺の社会インフラ、その国の政情の安定性、治安、地質なども同様かそれ以上に重要だ。

これらの要件を考慮すると、アタカマ高地のチャナントール山が浮かび上がってきた。衛星データによれば、水蒸気量の少なさではトップに近く、晴天率もハワイのマウナケアに匹敵する。また、チリは社会的にも安定しており、治安も良く、そして何と云っても ALMA の建設に伴ってアタカマ地域の社会インフラが劇的に整備される見通しがあるのが大きな利点となった。

そこで、われわれは 2000 年から本格的にチャナントールとその周辺のサイト調査を開始した。以下、これらの調査の現状を簡単ではあるが紹介したい。

### 3. 気象条件の調査

衛星データからは、アタカマ高地一帯が天候に恵まれており、望遠鏡設置に有望なサイトであることが分かった。しかし、衛星データは空間分解能が粗い（～4 km）ため、局所的な気象の状況は知る事ができない。また、チャナントールのような孤立峰では雲の湧き出しや局所的な霧などが起きることも想定される。そのためよりきめの細かい局所的な気象調査が必要となる。さらに地表面での強風は観測の際に大きな障害となるので、どれくらいの風が吹くのかなどといった地表面での気象条件も知っておく必要がある。

このような衛星データだけでは知りえない気象環境の情報を得るため、2001年にアタカマ高地に気象モニターを設置して地表の気象条件の観測をスタートさせた。この装置は風向風速や温度、湿度などを測定するもので、太陽光発電とバッテリーを組合せて24時間365日無人でデータを取得する。後述するように望遠鏡設置候補地である



図4 データ回収中の気象モニターの様子。右が作業をしている筆者（宮田）。



図5 設置された雲モニター。奥に見えているのがチャナントール山。

チャナントール山頂はアクセスが悪かったため、現在のところは山麓の平原部（標高約 5,000 m）に設置している。

気象モニターによる観測は、これまで丸3年にわたって行っている。データ解析の結果、

- このサイトが非常に乾燥している（春季の地表水蒸気量は  $0.5 \text{ g/m}^3$  以下）
- 風は周期的な日変化を示し正午頃から20時あたりまで比較的強い（～10 m/s）
- 冬季の気温は夜間でも  $-10^\circ\text{C}$  程度までしか下がらない

などのことが明らかになってきた。

この気象データをもとに、望遠鏡のドームがどれくらい開けられるかを見積もると、条件の悪い2～3月を除いて80%以上、最も観測条件の良い春にはほぼ100%であることが分かった。衛星データの雲の条件と併せて考えても、春には90%の割合で観測が可能となる。これはすばる望遠鏡があるマウナケアの気象条件に勝るとも劣らない結果で、ここが光赤外望遠鏡に非常に適したサイトであることを物語っている。

気象モニターに加えて、チャナントール山に局所的に起こる（かもしれない）雲の湧き出しなどについても調査を開始している。そのためにASTE望遠鏡グループの協力を得て、全天雲モニ



図 6 チャンントール山頂で誇らしげな筆者（宮田）。

ター装置を 2004 年 3 月に設置した。これは、元々はハワイの Maui 島にある東京大学の MAGNUM 望遠鏡用に開発されたものを改良したもので、8~12 ミクロンの熱赤外線ですべての画像を取得する。この画像から雲の熱放射を測定しその量を見積もるというもので、画像は 5 分間隔で取得され、夜間だけでなく日中も動き続ける。今後はこのデータを使って、雲が本当に湧き出すか、湧き出すとしたらどの季節/時間に特徴的で、どの程度観測に影響を与えるのかなど、定量的な評価を行う予定だ。

#### 4. サイト実見

##### —チャンントール登頂—

望遠鏡設置の第一候補と考えているチャンントール山は標高 5,630 m、アタカマ高地にぽっかり突き出た孤立峰だ。このような山の上に口径 6.5 m もの望遠鏡とその付帯設備が建設できるような大きなスペースが取れるか、ということは、具体的な建設を考えると必ず知っておかなければならない。アタカマ高地から見上げるチャンントール山は比較的なだからで、山頂も望遠鏡設置を拒むような切り立ったものには見えない。しかし、山頂の状況は実際に行ってみなければ分からない。ところがこのチャンントール山には車

で往来できるようなアクセス道路は設置されていない。つまり、山頂の状況を調査するためには 5,600 m の山に自分で歩いていく必要があるのだ。

TAO プロジェクトではこの建設予定サイトの地形的状況を調査すべく、田中培生氏、河野孝太郎氏、宮田隆志と現地の 2 名からなる登頂隊を組織し、2002 年 11 月 22 日にチャンントール山の山頂調査を行った。登頂日の天候は晴れ時々曇りで、高山の強い紫外線を避けるには絶好の天候だった。早朝にサンペドロの宿を出発した登頂隊は、8:30 ごろに高度 5,080 m 地点から登山を開始した。大気圧は 0.5 気圧を切っており、少し歩いただけでも息が簡単にあがってしまう。酸素ボンベなどの機材は用意しているものの、高山病には細心の注意を払いながら少しずつゆっくりと山頂に近づいていく。山麓から見上げたときにはなだらかに見えた坂も、すべりやすい礫が表面を覆っていることもあってなかなか簡単には登っていくことができない。結局 4 時間にわたる登山の末、12:45 によく山頂エリアに到着した。

山頂周辺を見て回った結果、頂上付近には南北に 100 m 超の平地が確保できることが分かった。これは望遠鏡建設には十分な広さだ。また、山頂

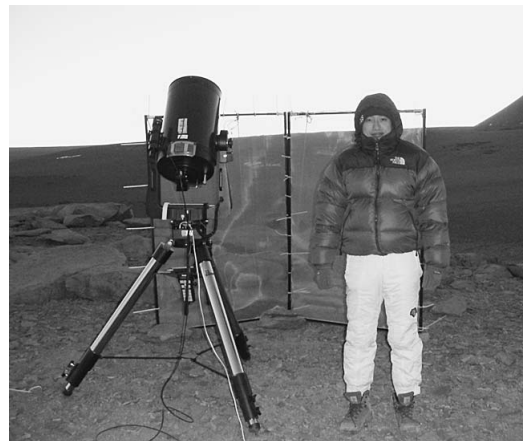


図 7 気象モニター脇でセットアップを完了したシーイングモニターと筆者（本原）。



図 8 トコ山腹 (5,400 m) でシーイング測定のための準備をしている筆者 (土居)。

から俯瞰することによってアクセス道路のルート取りにも目処をつけることができた。これらは望遠鏡建設の際に欠くことのできない情報で、現実的な建設作業の第一歩になったものと考えている。

まさに百聞は一見に如かず、の現地調査だった。

## 5. シーイング調査

望遠鏡を設置する際に、気象条件とともに重要な要素となってくるのがシーイングだ。いくら大気の透明度が良くても、シーイングが悪ければ高空間分解能は望めないし、暗い限界等級も期待できない。また、シーイングは地表面の風と地形によって生じる乱流（接地境界層乱流と呼ばれる）で大きく影響を受けるのだが、チャナントール山のような標高が高く風が強いと予想される場所ではこの接地境界層乱流が大きくなってシーイングが悪くなる可能性も十分にあった。

このシーイングの測定のために、われわれは国立天文台ハワイ観測所の高遠氏などのグループと共同でシーイングモニターを開発した。これは MEADE 社の 30 cm シュミットカセグレン式望遠鏡を改造したもので、安価で携帯性が優れていると同時に、自動車用 12 V バッテリーで一晩以

上観測できる省電力設計となっている。このため、アタカマのような孤立した場所でも運用ができる。シーイング測定の原理は Differential Image Motion Monitor (DIMM) と呼ばれる方式で、望遠鏡の前面に二つの穴が開いたマスクをつけて、それぞれの穴から入ってきた星の光を別々に結像させ、その相対位置のゆらぎから大気擾乱を測定する、というものだ。

これを用いて、2003年10月に国立天文台の高遠グループと合同でシーイング測定を行った。先にも述べたようにチャナントール山頂自体は道路がなくてアクセスできないので、

- 平原部（気象モニタ脇：5,000 m）
- 孤立峰山頂（チコ山頂：5,100 m）
- 標高の高い山腹（トコ山腹：5,400 m）

の3地点で測定を行った（それぞれの地点は図3の地図参照）。さらに、相対的なシーイングの評価を行うために、2台のシーイングモニターを用い、上のいずれかの2地点で同時に測定を行った。

標高が高く、しかも夜間の気温が非常に低下する中での測定は過酷で、結局4夜観測をしたもののすべて前半夜で打ち切った。しかし結果は非常に興味深いものだった。まず、平原部でのシーイングは非常に悪い。同時に測定していた孤立峰で0.4のシーイングが出ていたときでも、良くて2を切る程度だった。その一方で孤立峰や標高の高い山腹でのシーイングは可視でも安定して0.4台に達するという非常に良い値を示した。また、比較的標高の低かった孤立峰よりも山腹でもいから標高を上げた方がシーイングが良くなる傾向も見られた。これらの結果は

- アタカマ高地の平原部は光赤外望遠鏡には適さない
- 標高が高くなるとシーイングも良くなる、それも非常に良好である

ことを示唆しており、チャナントール山頂がマウナケアに勝るとも劣らない良好なシーイングをもっている可能性は非常に高いと考えられる。今

後行う予定にしているチャナントール山頂でのシーイング調査が非常に楽しみとなる結果となった。

## 6. まとめと展望

以上のように、チャナントール山頂が赤外望遠鏡にとって非常に良いサイトであることが具体的に明らかになってきた。しかしながら、山頂へのアクセス道路がない現状ではこれ以上の情報を得ることは難しい。

そこで現在、チャナントール山登頂の調査で得られた情報などをもとにして、山頂へのアクセス道路の建設と各種測定機器の山頂への移設の作業が進められている。アクセス道路が完成すれば、(道なき斜面を滑りながら歩くことなく!) 山頂での気象・観測条件の測定が可能となり、望遠鏡建設に向けた本格的なサイト調査を開始することができる。

本稿のタイトルを『TAO サイト調査 (1)』としたが、2004 年末には道路が完成して測定を開始す

ることができると思込んでおり、その際にまた、今度は『TAO サイト調査 (2)』という題で報告できればと思っている。

### TAO Site Survey (1)

**Kentaro MOTOHARA, Takashi MIYATA and Mamoru Doi**

*Institute of Astronomy, University of Tokyo, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan*

**Abstract:** Institute of Astronomy, University of Tokyo has a plan to construct a 6.5 m telescope optimized to the near- to mid-infrared wavelength on a peak of Atacama desert in Chile, which is at very high altitude above 5,600 m. We have started a site survey to evaluate the site, and obtained some data of weather and seeing. The results suggest that this site has a potential to become a very good site for an infrared telescope. We report a summary of the survey and the results in this article.