

第4章 サイト - チリ北部アタカマ地域

4.1 チリの天文台と天文学研究機関

チリ共和国は南米大陸の太平洋岸に、南緯約 17 度から南に延びた国土を持ち、西はほぼアンデス山脈の分水嶺を境にボリビア、アルゼンチンと国境を接している。大陸東端であるため太平洋の沖合には、強い寒流であるフンボルト海流が流れ、海上からの水蒸気量が少ない。このため、全般的に降雨量が少なく、特に、中緯度高圧帯に当たる地帯は乾燥しており、南緯 30 度以北では、水蒸気量が少なく晴天率も高いという天体観測に適した地域となっている。さらに、チリ共和国は南米の中では比較的治安もよく、技術水準も高いこともあり、比較的古くから有望な観測地として注目され、欧米各国が観測所を設置している。南米の地図を図 4.1 に示す。

大型観測施設が設置されている場所は、大きく 2 地域に分けられる。南のラセレナ地域と北のアントファガスタ地域である。ラセレナ地域は、南緯 30 度付近に当たり、第 IV 地方 (region IV) の州都であるラセレナ市 (人口 11 万人) と隣接する港湾都市コキンボ市 (人口 11 万人) を中心とした地域である。首都サンチャゴからは直線距離で 500km ほど。サンチャゴとの間に 2 ~ 3 社がそれぞれ 1 日 2 ~ 3 便の航空便を飛ばしている。国土を縦貫する汎アメリカ高速道路が通っており、10 社以上が高速バスを運行していて、陸上交通の便もチリ国内としては極めて良い。コキンボ港が利用できるため、海外からの重量物の輸送にも適している。

ヨーロッパ南天天文台 (ESO) ラシヤ観測所 (La Silla) は、南緯 29 度 15 分、西経 70 度 44 分に位置する。ラセレナ市の北 150km ほど、海拔 2500m の山頂に口径 3.6m の望遠鏡を筆頭とする大小 20 近くの望遠鏡が設置された大天文台である。後述の VLT の技術試験を目的とした新技術望遠鏡 NTT (口径 3.58m) やシュミット望遠鏡が設置され、視線速度による太陽系外惑星探査観測や赤外線掃天観測 DENIS など、ここにある他の望遠鏡を利用して実行されている。数年前までは、光学赤外線望遠鏡の他に、スウェーデンと共同運用している口径 15m の電波望遠鏡 SEST や東京大学天文学教育研究センターが運用している口径 60cm の電波望遠鏡も設置され、ミリ波・サブミリ波観測も行われていた。運用本部はドイツ・ミュンヘンにあり、ベルギー、デンマーク、フランス、ドイツ、イタリア、オランダ、ポルトガル、スウェーデン、スイス、英国の 10 ヶ国が共

同で組織している。山頂には観測装置改修や構内移動用自動車の検修ための工場、研究のための図書館、観測者宿泊施設、食堂、診療所、従業員の保養施設などをもち、さながら小さな町の様相を呈している。見学者用の施設は設置されていないが、ラセレナ市内からの見学ツアーが組まれており、連日多数の見学者が訪れている。山頂以外には、現地運用本部としてサンチャゴに施設を持つ（後述）ほか、ラセレナ市内にも連絡事務所を持っている。

ラスカンパナス天文台 (Las Compañas) は、南緯 29 度 01 分、西経 70 度 42 分に位置する。ラセレナ市より北方 156km の海拔 2500m の山頂にあり、ESO ラシヤ観測所の隣り山に当たる。口径 6.5m のマゼラン望遠鏡 2 台を筆頭に、デュポン望遠鏡 (口径 2.5m) など 10 台程度の天体望遠鏡が設置されている。マゼラン望遠鏡は、同型の望遠鏡 2 台が隣接して設置されており、管路によって結合することにより、光干渉計として用いることも可能な設計となっている。名古屋大学の 4m 電波望遠鏡なんてんも、ここに設置され、観測を行っていた。米国ワシントンに本部を置くカーネギー財団が運営している。

インターアメリカン天文台セロトロロ観測所 (Cerro Tololo) は、南緯 30 度 10 分、西経 70 度 49 分に位置する。ラセレナ市より東に 88km、ピスコやワイン生産で有名なエルキ谷をさかのぼった海拔 2200m の山頂にある。1962 年に開設された。口径 4m のブ



図 4.1: 南米におけるチリの位置

ランコ望遠鏡を筆頭に4基の望遠鏡が狭い山頂にひしめいている。コロンビア大学からハーバードスミソニアン天体物理学研究所のグループが設置した口径1.2m電波望遠鏡もここにある。米国立光学天文台NOAOとして、米国の大学連合が作っているAURA (Associated Universities for Research in Astronomy) が運営に当たっている。広報普及活動にも力を入れており、天文博物館が設置され、ラセレナ市内からのツアーが組まれていて、連日多数の見学者が訪れている。山頂以外にラセレナ市内に事務や技術部門を含む支援施設を持ち、研究スタッフは観測所と交代勤務の体制を取っている。

セロパチョン観測所は、セロトロコ天文台の数km南のパチョン山頂にあり、口径8mのジェミナイ南望遠鏡を持つ。米国、英国、カナダ、オーストラリア、チリ、アルゼンチン、ブラジルの7ヶ国共同で建設・運用されている。また、ジェミナイ南望遠鏡の隣にブラジル、ミシガン州立大学、北カリフォルニア大学、米国立光学天文台NOAOの共同で口径4mのSOAR望遠鏡を建設している。セロトロコ天文台とは国道からのアクセス道路は兼用しているものの、相互には多少離れているため、パチョン山頂には望遠鏡支援設備のほか研究施設も設けられている。

アントファガスタ地域は南緯24度付近、南回帰線直下に当たり、第II地方 (region II) の州都である港湾都市アントファガスタ市 (人口22万人) を中心とした地域である。首都サンチャゴから直線距離で1000kmほど。数社が1日数便の航空便を飛ばしている。国土を縦貫する汎アメリカ高速道路が通っており、陸上交通の便も良い。チリ北部最大の港湾であるアントファガスタ港が利用できるため、海外からの重量物の授受にも適している。

ヨーロッパ南天天文台 (ESO) パラナル山観測所は、南緯24度40分、西経70度25分に位置する。アントファガスタ市の南120kmほど、太平洋岸から12kmながら海拔2635mのパラナル山頂に口径8.2mの望遠鏡4基が設置されている。VLTと呼ばれる、この望遠鏡群は、それぞれ単独でも使用可能なほか、地下トンネルに光路が設置されており、全体を結合して干渉計として使用することもできる。さらに敷地内に敷設された線路上を移動可能な、3台の予備望遠鏡 (Auxiliary Telescopes) と呼ばれる1.8m鏡も加えて最長基線202mの干渉計として運用することが可能である。観測所の運用は、ラシヤと共にヨーロッパ南天天文台が行っており、サンチャゴの施設は共通である。

アントファガスタ市から北西200kmほどのアタカマ高原は海拔5000m近くに及び、ここでALMAが建設されている。科学保護地域 (Science Preserve) となっており、商業目的の活動などに対して一定の保護がチリ政府から与えられている。ここには小規模ながら、既に天文観測設備が設置され始めている。日本の国立天文台が設置した口径10mの電波望遠鏡ASTEや名古屋大学が移設・改修した4m電波望遠鏡なんてん2がそれぞれある。米国コーネル大学が宇宙背景放射観測装置を設置していたこともある。

このほか、チリ国内には、首都サンチャゴ市内に天文学関係の大きな機関が設置され

ている。ヨーロッパ南天天文台 (ESO) はサンチャゴ市内にオフィスを持ち、ロシアおよびパラナル両観測所の運営統括を行っている。観測所で必要な物資の調達、ヨーロッパなど国外からの観測機器授受に関する税関措置、対現地政府交渉などを行う部局があるほか、研究部門も持ち、観測所現地と交代勤務する体制がとられている。このほか、訪問観測者のための専用宿泊施設を持ち、観測者に不便を感じさせない対応となっている。

チリ国内の研究拠点に目を転ずると、国内で天文研究者が在籍する大学は、2002年時点での調査によれば、チリ大学、カトリカ大学、コンセプション大学、北カトリカ大学、ラセレナ大学の5つがある。

チリ大学天文学教室は市内西部、カラン山にあり、14名のスタッフを擁し、博士課程が設置されており、多数のポスドクおよび大学院生が在籍している。カラン山には教室や研究室のほか、いくつかの観測機器もあるが、現在は、上述のチリ国内にある国際研究機関の大型観測装置の観測時間を利用した研究が中心である。

カトリカ大学天文天体物理学教室は、8名のスタッフを擁し、博士課程が設置されており、多数のポスドクおよび大学院生が在籍している。小型の光学望遠鏡を持っているが、現在の研究活動は、上述のチリ国内にある国際研究機関の大型観測装置の観測時間を利用したものが中心である。

コンセプション大学は南部のコンセプション市にある。物理学教室に、4名の天文学研究スタッフが在籍しており、博士課程を持つ。恒星に関する研究が中心である。

ラセレナ大学はスタッフ2名で学部のみであるが、ラセレナ市にあり、周辺にある3つの国際天文台に地理的に近いという特徴を持つ。これを活かして、ESOから客員1名を迎えている。

北カトリカ大学はスタッフ1名であるが、アントファガスタ市にあり、ESOやALMAに最も近い大学であり、地の利を活かした研究拠点となる可能性を秘めている。

これら5大学は共同でFONDAP (Fondo Nacional de Desarrollo de Areas Prioritarias) を構成している。これはCenter of Excellenceとして産業科学省 (CONICYT) から認定を受けた研究組織で、チリ大学ALMAを利用した研究拠点となることを目指している。

チリの大学所在都市および外国設置天文台の位置を図4.2に示す。

特にチリ大学とはTAO計画推進をきっかけとして東京大学との学術協力の協定を結んでおり、サイト調査について協力して実施する体制を確立している。

チリの学術研究は産業科学省によって統括されている。ここは、正式にはComisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológicaというが、略称であるCONICYTと呼称されることが多い。CONICYTは学術研究のみならず国内産業についても管轄としており、チリ政府内では重要な役所である。チリ国内における学術研究活動は基本的にCONICYTの掌握の元で行われており、チリ国外の研究機関による活動も含まれる。

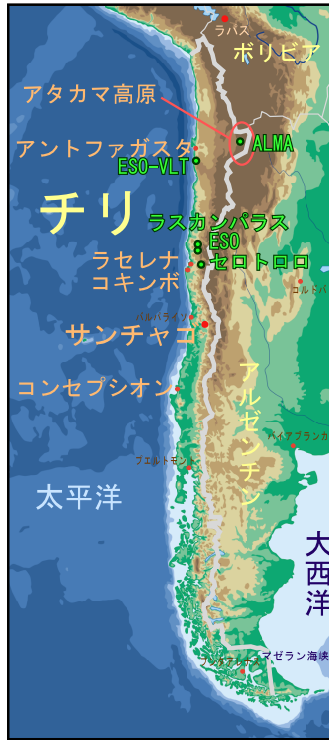


図 4.2: チリの主要都市と主要天文台所在地

後述するようにチリの主要産業は主に北部で採掘される鉱産物と中部で栽培される農作物であるため、これらの産業に悪影響を与える活動は基本的に認められない。したがって、無人の荒野といえども鉱産資源の採掘権が設定されると他の目的に利用することは困難となる。しかしながら、アタカマ地区は、学術研究上の価値が鉱産資源開発の潜在価値に優先するとの判断を CONICYT が既に行っており、ALMA 建設に関連して科学保護地域 (Science Preserve) を設定しており、鉱物資源採掘活動との支障が生じない配慮がなされている。逆に、アタカマ地区で長期にわたり学術調査活動を行うに際しては CONICYT の許可が必要となる。

TAO 計画では、次章で述べるサイト調査を行うに際して、CONICYT に申請を行っており、歴史的遺物、自然環境、対地雷に十分な注意を払い、他の学術研究活動に支障を生じないように配慮の上、科学保護地域内における調査活動の許可を得ている (Appendix C 参照)。

CONICYT との交渉進展に際しても、チリ大学は協定に基づいて大きな役割を果たし

ており、今後も重要なパートナーであることは間違いない。

4.2 アタカマの地理

地上に大型観測を建設する場合、その能力を最大限に引き出すためには天文観測に適した地域を選定する必要がある。光害に代表される人工的な悪影響を避けるのは当然であるが、自然環境の結果、地球大気による擾乱が最小限となっている場所を選定することも極めて重要である。具体的には、大気が乾燥しており、海拔が高く、晴天率が高く、上空の大気が安定していることが必要である。

このような条件を満たす場所を地球規模で探すと、南北回帰線付近で大洋の東寄りの高山が当てはまる。南北回帰線付近は中緯度高圧帯と呼ばれ、恒常的に高気圧が居座る場所となっている。これは、赤道付近で加熱された大気が上空で放射冷却したものが、南北回帰線付近で下降気流となるため生じていると考えられている。このため晴天率が高く、乾燥した地域となりやすい。実際、世界の大規模な砂漠地帯は南北回帰線付近に分布する。

地球の自転の影響で、大洋には大規模な海流が生じている。これは、コリオリカの関係で、赤道付近で東から西へ、高緯度で東から西へと向かう流れとなっており、大洋の東寄りでは、高緯度から低緯度へと向かう寒流となる。同じ理由で、中緯度高圧帯付近では、大気は西から東への偏西風が卓越する。このため、大洋に面する大陸西岸では水蒸気量が少ない寒流の上を通過した大気が陸地に達することとなり、晴天率が高い気候となる。

大洋上は大気循環を遮るものがない。このため、大陸西岸の高山や孤立峰を持つ島嶼は望遠鏡建設地としては高い海拔でありながら、周囲の地形による大気擾乱が少なく、優れた観測条件を得やすい。以上の条件を総合的に考慮すると、南米アンデス山脈、特にチリ共和国北部が世界で最も優れた観測条件を満たすことが期待できる。現代天文学では、観測のために高度な技術を必要とする。したがって、高度な技術的支援を比較的容易に得ることができることは、建設地選定において比較的重要な要因となる。建設時や運用時のことを考えると、通信および輸送の便がある程度以上は確保できることも考慮すべきである。また、安心して観測を実行でき、数年にわたる建設を安全に遂行できることを考えると、政治的に安定した地域であることも望まれる。チリ共和国は、これらの条件も満たしている。

チリ共和国は、東西幅 200km 程度、南北には南米大陸本土だけで南北 4000km に及ぶ細長い国土を持ち（チリ政府は南極大陸の一部に対し領有権を主張している）、西は太平洋に面し、東はアンデス山脈を境にボリビア、アルゼンチンと国境を接している。ペルーと国境を接する北部は砂漠地帯、首都サンチャゴ付近は地中海性気候の温帯、南部

は寒冷森林地帯から氷食地形による複雑な海岸線を持つ冷帯となっている。

太平洋沿岸をフンボルト海流が強い寒流として南から北へ流れており、これがチリの気候に強い影響を与えている。特に北部では緯度に比べて年平均気温が低く、乾燥しており、太平洋岸南回帰線直下の都市アントファガスタは、年平均気温 16.5℃、年間降水量 2mm であり、周囲は国境となるアンデス山脈の麓まで、アタカマ砂漠と呼ばれる砂漠地帯となっている。

チリ共和国自体は、農産物と鉱石を中心とする一次産品が主要輸出品である。日本では銅やワインの輸出元として知名度が高い。日本とは 1897 年に外交関係を確立しており、日露戦争当時、軍艦の提供を受けたこともある。1818 年のスペインからの独立時に、南米では唯一、先住民との合意により政府を樹立した経緯を持つ。世界史上唯一、革命に依らない社会主義政権を持ったり、その後の軍事独裁政権での非人道的政治体制を敷いたりしたこともあったが、現在では完全に民主主義国家となっており、南米では最も治安が安定した国として定評がある。経済的にも比較的安定している。

チリ国内のうち、アントファガスタ地域は、1883 年に終結した「太平洋戦争」Guerra de Pacifico によってボリビアから割譲した地域であるが、現在、領有権は国際的に確定している。銅やチリ硝石など地下資源に恵まれており、世界最大と言われる露天掘り銅山であるチュキカマタ銅山も、この地域にある。

地域最大の都市アントファガスタは、人口 22 万人。これら鉱産資源の積出港としてチリ北部最大の規模を誇る。周辺に良好な港湾がないことと歴史的経緯から、チリのみならず、隣国ボリビアやアルゼンチンからの輸送需要も多く、アントファガスタからアンデス山脈を越えて両国へと通じる高速道路や鉄道が整備されている。

大陸規模でみると、5000m 以上の高山が連なるアンデス山脈が太平洋岸に迫っているが、100km 規模でみると、太平洋岸から国境までは、複数の山脈が南北に走っている。アタカマ地区では、この山脈はほぼ 3 列となっており、西から、ヨーロッパ南天天文台パラナル山観測所のある海岸山脈、海拔 3000-4000m 級のドメイコ山脈、そして、海拔 5000-6000m 級の山々が連なるアンデス主山脈となっている。

図 4.3 にアタカマ地区を通る東西線に沿ったチリの地形の断面図を示す。

ドメイコ山脈とアンデス主山脈との間は、僅かな水分も卓越する西風に対して手前ある 2 つの山脈に遮られてしまうため、特に乾燥した地区となっており、世界 2 番目の面積を持つアタカマ塩湖が広がっている。アタカマ塩湖の北岸には、内陸部の中心となる町サンペドロ・デ・アタカマがある。伝統的な遊牧や鉱山採掘のほか、砂漠の特異な風景見物を目的とした観光が地域の主要産業である。TAO 計画で望遠鏡建設を計画している場所は、ALMA 建設地に隣接しており、アタカマ塩湖の東側にあたるアタカマ高原である。アンデス主山脈中となるが、海拔 5000m 近い高原が数 km 以上も続く乾燥した高地であり、海拔 6000m に迫る孤立峰が散在する。気候は西風が卓越しており、晴天率が高

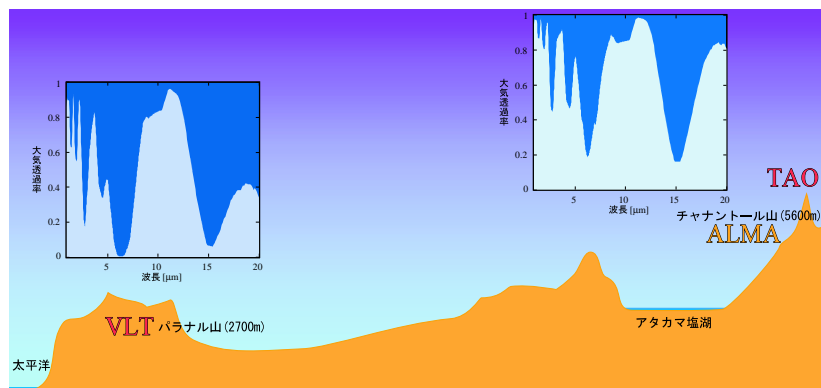


図 4.3: アタカマでの東西地形断面図

く絶対水蒸気量が少ないが、高山であるため一時的ではあるが降雪がある。2月頃には一時的に東風が吹くことがあり、「ボリビアの冬」と呼ばれる荒天が続くことがあるが、それ以外の季節はおおむね天候は安定している。天候条件の詳細については次章サイト調査を参照されたい。

アタカマ高原の中にはいくつかの孤立峰が点在している。その多くは火山起源であるが、多くは休火山であり容易には噴火する恐れはない。この点では富士山やマウナケア山と同様である。特に高原の西端に近い孤立峰は、西からの気流が乱されることなく山頂付近を吹き抜けるため、天体観測には最適な場所であることが期待できる。一方、麓から山頂へ到達する道路が建設できる程度の地形であることも現実的な条件となる。これらの点で我々が注目したのが標高 5600m のチャナントール山である。チャナントール山の航空写真を図 4.4 に示す。

4.3 南天 5600m のサイト

図 4.5 に、TAO から見た主要な天域の連続観測可能時間 (visibility) をすばる望遠鏡と比較する。縦軸は airmass < 1.5 で連続観測が可能な時間、横軸は赤経である。南天に TAO を設置することにより、北天のすばる望遠鏡と共同して全天を良い条件で観測することが可能になる。ALMA、ASTRO-F、ASTRO-E2 など新たに発見される天体は暗く、追求観測には長時間の積分が必要とされるはずである。南天の TAO は、銀河南極 (SGP)、大小マゼラン星雲 (LMC, SMC)、銀河中心 (GC) などの観測に威力を発揮することが図から見て取れる。

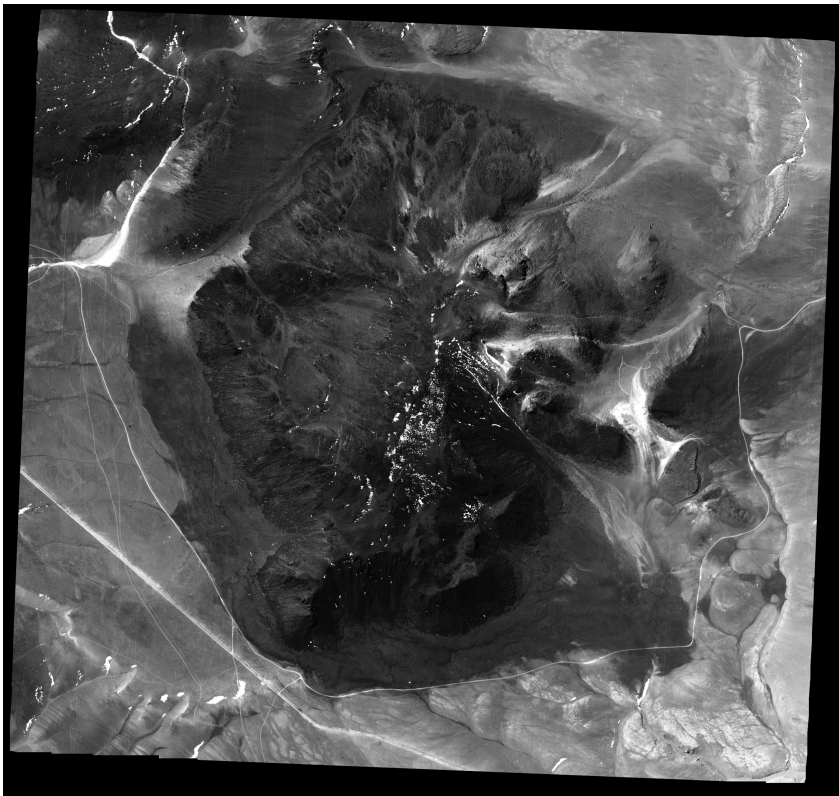


図 4.4: チャナントール山の航空写真

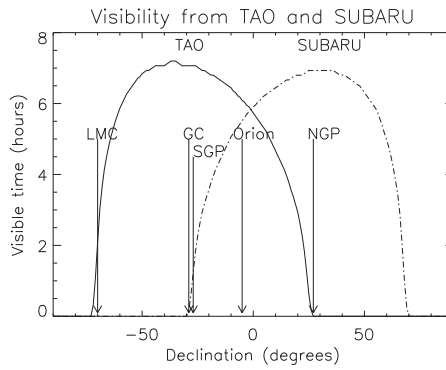


図 4.5: 主要天域の連続観測可能時間 (airmass < 1.5)

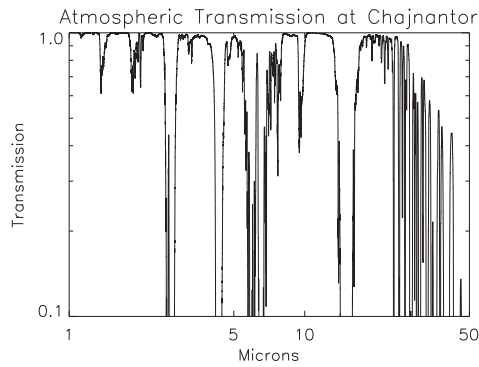


図 4.6: 大気透過率 (10 percentile at Chajnantor)

チャナントール山頂における大気透過率 (計算値) を図 4.6 に示す。高度 5640m で乾燥しているために、既存のサイトでは不可能な観測が TAO では可能となる。たとえば、(1) z, J, H, K と分かれている観測バンドが、TAO では光学領域から $2.55\mu\text{m}$ まで連続的につながり、また (2) 大気の窓は $43\mu\text{m}$ 付近まで開いている。宇宙論的な天体の赤方偏移を決定するには、光学領域から $2.55\mu\text{m}$ まで連続的に分光できることのメリットは大きい。 $4\mu\text{m}$ 付近まで大気の窓が開いていることは、地上からは観測不能であった観測的研究分野 (水素の純回転遷移線、スターバーストの遠赤外線など) に新たな可能性を与えるものである。