



ヒマラヤは地球最後の楽園か？

究極の天文観測サイトを求めて — ハンレへの旅

上野 宗孝

〈東京大学教養学部 東京大学大学院総合文化研究科 〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1〉
 e-mail: ueno@chianti.c.u-tokyo.ac.jp

筆者らのグループは1996年11月、サイトサーベイ隊としてインドの天文学者らとともにヒマラヤ・ラダック地方のハンレを訪れた。ハンレはインド国立天体物理学研究所が本格的な観測所を建設することを計画しているサイトであり、現在既に口径2mの望遠鏡の建設が始まっている。我々はそのサイトに230GHz波長帯の電波望遠鏡を持ち込み、大気中の天頂方向の積分水蒸気量の測定を行い、観測サイトとしてのポテンシャルを調べることを目指した。本文はその道中記である。

1. ヒマラヤにて

『いよいよ来るところまで来てしまったなあ。』

素直な感想である。悪い意味ではない、ふと口をついて出てくるのである。地の涯という言葉にびったりだと思った。ヒマラヤ山脈はむしろアジア大陸の中心部に近い。しかしそれでもやはり『地の涯』を感じさせる場所であった。

1996年11月、日本から参加したサイトサーベイ隊5名（東京大学理学部・山本智氏、東京大学教養学部・小久保英一郎君、宇宙科学研究所・望月賢治君、理化学研究所・岡朋治君、筆者）はIIA（Indian Institute of Astrophysics）の研究者2名とともにレーを後にして目指す観測サイトであるハンレへと向かっていた。レーはインド北部に位置する有名な観光都市である。チベット仏教が盛んな地域であり、ゴンパ（チベット仏教寺院）がいたるところにある。夏場は避暑を兼ねた観光客も多く、結構な賑わいを呈するそうである。しかし11月ともなると夜間の気温は氷点下を大きく割り込むようになる。この季節にレーを訪れる人は少ない。我々が二日前にデリーから搭乗した飛行機にも20名程の同乗者しかいなかった。デリーとレー

を結ぶ定期便は週に6便あり交通の便は決して悪くはない。経済好きな日本人の感覚では極めて採算性が低い路線のように思えるが、現地の人に聞いてみるとレーと麓の都市を陸路で行くのは極めて困難であるらしい。

インドにおけるヒマラヤの玄関口とも言えるレーの町の高度は富士山の高さとそれほど変わらない。飛行機を下りた瞬間から空気の薄さを感じる町であった。ところで私のように世界の地理にあまり詳しくない者にとっては、ヒマラヤ山脈という大きな山並みがチベットのあたりで隆起しているように思っていた。しかし見渡すかぎりの山塊の中に踏み込むと、山脈は二筋の衝立を構成していることを実感する（ヒマラヤ山脈とカラコラム山脈と思われる）。衝立の谷間になった部分には、水流豊富なインダス川が流れている。中国から流れ込むインダス川は、インド北部のヒマラヤの谷間を通り、やや北上しながら西に向かって流れ、最終的にはパキスタンへと流れ込んでいる。レーはこのインダス川を中心とする谷間のやや広い部分にある町である。このためレーからヒマラヤ山脈を越えてインド中心部に向かおうとすると、空路によらない場合、道は谷沿いに大きく西へ進

み、山脈の比較的ゆるやかな部分を越すそうである。しかしこの道を通してレーとデリーを行き来することは、IIAの研究者でも二の足を踏むほどの難路だそうである。従ってこの定期便はレーの町と下界を結ぶ重要な窓口なのだろう。確かに我々が乗った定期便にも乗客数に不釣り合いなほどの荷物が積み込まれていた。

余談だがレーの空港はすり鉢の底のような場所にあった。下り立ったときには、随分と飛行機が降りにくい場所に空港を建設したものだと思ったが、確かにまわりを見渡すとその界限に平地と言える場所があまり無い。このため飛行機は急降下する必要がある。我々の乗ってきたB 727も滑走路に激突するかの勢いで着陸した。もちろんレーの空港に管制塔や誘導システムは皆無であり、霧が出やすい地形でもあることから、視界が悪くなると定期便は簡単に欠航するようである。我々は幸いにして往復ともに、無事に離発着できたが、

我々はレーの町に2泊した。体を高地に慣らすためである。高地が人体に与える影響は以前天文月報に詳しく紹介されている¹⁾。我々の目指すハンレは標高がおおよそ4500mであり、レーよりもさらに空気が薄くなる。そこでレーの町で2日ほど体を慣らす必要があった。筆者の経験でも高度が4000m以上とそれ以下では、体感的なストレスが不連続に変化する(それは高山病を研究されている方とお話をした際にも、一般的な現象だと説明を受けた)。レー滞在の二日目に病院の見学をさせていただいた。この町の規模にそぐわないほどに大きな規模の病院は、本格的な高山病の研究施設を兼ねていた。急性の高山病患者に対応するために、患者を入れて加圧するシェルター状の施設が二つあった。高山病で苦しむ人を1気圧の環境下に戻してくれるというものである。大きなカプセル状の加圧容器は、気密ハッチをくぐって中を覗くと6~7名の人がゆったりと滞在できるというものであった。また携帯用の道具として、一人一人が入れる防水布でできた棺桶状の装置もあった。

これは患者を中に入れ、ファスナーを閉じ、足踏みポンプで加圧するというもので、安全のために1気圧以上の圧力が加わらないための圧力リークバルブが付いていた。我々は高山病に関する資料をいただいて病院を後にした。

我々がレーで滞在させていただいたのは、IIAによる借り上げ住宅であった。宿舎はインド側の研究者がハンレでの活動の足場として用いているものであり、玄関にはHIROT PROJECT (Himalayan InfraRed and Optical Telescope Project) と書かれたプレートが掛けられていた。結構ゆったりした作りで部屋数も多く、我々のレーでの滞足を快適なものにしてくれた。我々はさっそくこの宿舎で装置の試験を兼ねて、バルコニーを利用して水蒸気量の測定を行うことにした。

2. 究極の天文観測サイトとは

現代は宇宙に望遠鏡や観測装置を持ち出す時代である。大気の影響を受けない宇宙空間は観測条件の点において、地上のどのサイトよりも優れている。しかし、アクセスの不便さや装置開発に要する時間サイクルの長さの点においては、地上の天文台に及ばない部分もある。そう遠くない将来、自由にアクセス可能な宇宙望遠鏡というのも実現されるだろう。しかし例えば現在考えられている宇宙ステーションは望遠鏡を置くには軌道高度が低く観測条件が悪すぎる。このため本格的な宇宙天文台の実現にはもう少し時間がかかるだろう。このため大気を透過する可視光や近赤外線波長域、サブミリ、電波波長域の観測では、良好なサイトを捜し求める努力は怠るべきではない。

ところで、この『良いサイト』の定義は波長帯によって多少違っているが、相関はある。例えば赤外線観測ではシーイングの良さ、天気の良い、水蒸気量の少なさ、気温の低さなどが重要である。またサブミリ波観測でも大気の透過率に大きな影響を与える水蒸気量の少なさが重要である。つまり低温で乾燥していて高度が高く気流の安定して



いる場所は一般的に適地である。そこで、それらの条件を満たすハワイ島マウナケア山山頂やチリの高地帯が天文台の過密地帯となっている。また部分的にはそれ以上の環境的ポテンシャルを持つ南極点付近も、近い将来本格的な天文観測サイトとして開拓されるであろう。しかし残念ながら我々から便利の良い東アジア・東南アジア圏には好適なサイトはほとんど無さそうである（例外もある。例えばサブミリ波帯において富士山山頂は好サイトである）。

インドでは IIA の研究者を中心として 10 年以上に渡ってサイト調査を重ねてきた。書類審査と言うべき第一段目の場所探しには気象衛星のデータを用いて行い、ヒマラヤ地域の十数カ所がピックアップされた。それらの候補地はそれぞれ気象学的なデータが採取され、最終的に 2 地点が観測サイトの有力候補地として残された。それらのサイトでは小望遠鏡や全天カメラを用いて天文観測の条件を調査され、最終的にハンレが最適地として残された。気象学的な数値においてハンレはマウナケアを上回るサイトであった。さらに光学望遠鏡を用いたシーイング調査、空の明るさと赤外線波長帯を用いた水蒸気量調査が行われ、観測サイトとしての良好さを証明した。そこで IIA を中心としたグループは二段階からなる望遠鏡建設計画を政府に要求した。その計画とは最初に口径 2 m の光学赤外線望遠鏡を建設、次に口径 6 m の大型光学赤外線望遠鏡を建設するというものであった。そして昨年 2 m 望遠鏡の建設費がインド政府によって採択され、ハンレでの最初の本格的な天文台の建設が始まった。ハンレのサイトとしての特長をまとめると、

1. 晴天日数が多い、乾燥している
(年間降水量 = ~ 数 mm)
2. 可視域での空が暗い
3. 高度が高い (~ 4500 m)
4. 可視域でのシーイングが良い (< 1 秒)
5. 冬季の温度が低い

(~ -30℃ : 冬季の夜間)

6. 水蒸気量が少ない

(< 2 mm PWV : 赤外線での観測による)

我々がハンレに持ち込んだのは、山本氏のグループで開発された 230 GHz 帯のコンパクトな電波望遠鏡である。230 GHz 帯の電波で望遠鏡の仰角を変えながら大気のエミッションを測定することにより、積分量としての水蒸気量のモニターをする装置である。山本氏のグループではこの装置を富士山頂やチリに持ち込み調査を重ねられている。我々の調査の目的は、IIA の研究者により上限値が示されている水蒸気量の値を、電波観測によって測定することである。ハンレでの水蒸気量は、高度、気温、相対湿度 (~ 10 %) を考慮すると十分小さな値であることが予想される。そしてその低い値は、富士山頂と同様にして、短波長サブミリ波の観測を行うことが出来るレベルであることが期待されていた。このことが明らかになると、ハンレは赤外線とサブミリ波帯において、南極にこそ及ばないものの、既存の主要な観測サイトを凌ぐポテンシャルを示すことになり楽しみであった。特に冬季の低い気温は近赤外線波長での観測にとって極めて大きなメリットになる。地上望遠鏡を用いて観測を行う際の近赤外線波長帯での背景光の値を図 1 に示した。短波長の J (1.35 μm), H (1.65 μm) バンドでは OH 夜光による成分が支配的であり、この波長帯ではサイトの差による背景光の明るさの差は小さい。しかし望遠鏡からの熱放射が大きくなる 2 μm よりも長波長側では、望遠鏡の温度が背景光の明るさに大きく影響する。特に OH 夜光のスペクトルの間隙となる K (2.2 μm) バンドの長波長側と、熱放射の影響を大きく受ける L (3.6 μm) バンド波長帯での背景光は、望遠鏡温度が 0℃ から -30℃ に下がると 1 桁程度も減少することがわかる。従って、赤外線の限られた波長範囲ではあるが、冬季のハンレ (~ -30℃) で観測を行うと、マウナケア山頂 (~ 0℃) で観測する場合と比較して 1 桁程度背景光レベルを下

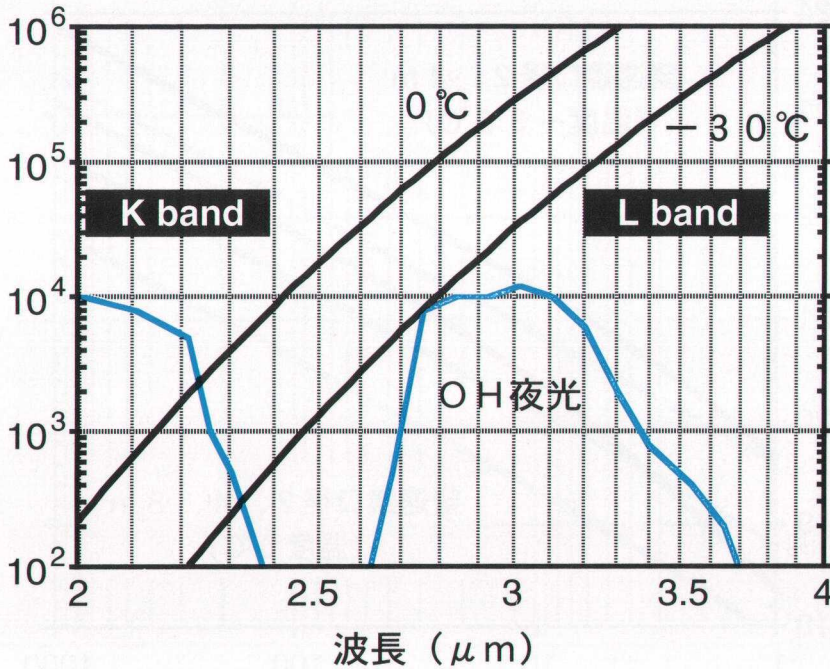


図1 近赤外線波長域(2~4 μm)における観測時の背景光の輝度。横軸は波長, 縦軸は単位望遠鏡面積あたり単位波長幅あたり単位時間あたり単位視野面積あたりの光子数。青線は上層大気からのOH夜光の輝度(本来は輝線放射だが低分解能で観測した際の均した値を示す), 黒線は望遠鏡からの熱放射(望遠鏡の温度0℃及び-30℃の場合, 反射鏡面・サポート部分など望遠鏡全体の熱放射率を8%と仮定)^{2), 3)}

げることができる。この差を赤外線観測経験者の直感に訴えるように表現すると、「ハンレでは通常のKバンドの観測のようにしてLバンドの観測が出来ますよ」と言える。この差は大きいだろう。KバンドとLバンドは近赤外線観測においても生産性の高い波長域である。望遠鏡温度が0℃の場合と-30℃の場合についての観測限界を図2に示した。驚くべきことだが口径2mの望遠鏡でも-30℃の環境温度で用いると、0℃にある口径4m望遠鏡の感度を凌ぐことができる。もし仮に口径4mの望遠鏡を-30℃の環境下で用いることが出来れば、KバンドとL、Mバンドの観測においては、マウナケアの口径8~10m望遠鏡をはるかに凌ぐことができる。ここまで考えるとヒマラヤの望遠鏡計画の持つ意味の重要性を感じるのである。

現在IIAのグループと共同で2m望遠鏡の赤外線カメラの設計を進めつつあるが、KバンドとLバンドの同時観測を行える2色カメラを検討中である。

3. ヤクとの出会い

レーでの試験観測で測定装置の動作確認を行った我々は、いよいよハンレへと向かう日を迎えた。2名のIIAの研究者と我々は、2台の運転手着きのジープを雇うと一路ハンレを目指した。小さなレーの町を離れると、民家は本当にまばらになる。しばらくするとインダス川を挟む山脈が狭まり、渓谷というべきところを走ることになる。川は日本の川でいうと洪水の時のように濁っており、濁流の表面を大きな氷が流れていた。11月になると夜

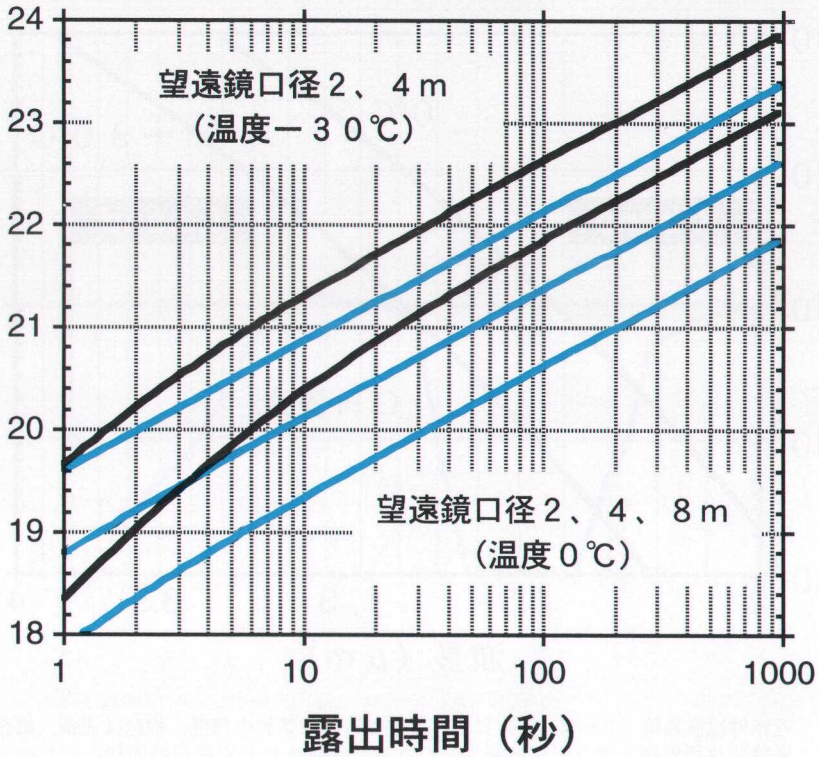


図2 口径2/4/8mの望遠鏡(温度0°C)でKバンド(2.2 μ m)の観測を行った際の検出限界と口径2/4mの望遠鏡(温度-30°C)でKバンド(2.4 μ m)の観測を行った際の検出限界。縦軸はKバンド等級、横軸は露出時間。望遠鏡を含む光学系の効率を30%、検出器の量子効率を80%、検出器の読みだし雑音を30電子数、検出器の暗電流とフラットフィールドエラーは無視できる場合、シーイングサイズを0.4秒角、検出限界の定義をS/N=5で仮定。望遠鏡温度が0°C \rightarrow -30°Cと変化すると観測時の背景光レベルを10分の1程度に抑えることができるため、検出限界が大幅に改善される。衛星搭載の冷却望遠鏡で観測を行えば、背景光は黄道光レベルまで下がるため、さらに大幅な感度の改善がある。

間の気温が低いため、水量が豊富で流れの激しいインダス川でも明け方には水面が氷結する。その氷が昼間の強い日差しに侵食され激流に融け込むのである。豊富な水流が無数の岩のような氷を押し流す姿は壮絶である。そしてその川面に映る空は、紺碧を通り越し紫というべきであった。条件の良い日のマウナケア山山頂で見る紫と同じ色である。外気温は低いのだが太陽の光は肌を射すように強く、顔に痛みを感じた。出発前我々は、レーからハンレへの行程は約250Kmの移動、レー側

の200Kmは舗装路、ハンレ手前の50Kmは未舗装路、と聞かされていた。しかし実際に動きだすと、舗装路というのも日本のように道路を平らに慣らしたのではなく、表面にコータールを塗り付けただけのものだけということを感じさせられた。それでもそのコータールのおかげで我々は砂塵をかぶりながら進むことから免れていた。行程の半ばあたりまで来ると道端で温泉が噴出してた。その傍にはドライブインがあり、我々はレーの宿舎から運んだドライカレーを取り分けた。

土の斜面に横穴を掘っただけのドライブインは、土間に木製の机を置き、掘り残した土をかまど台としていた。我々は洞窟の中で食事をしたが、入り口とは別に窓穴があったのと、土の色が明るいため、店の中は結構明るかった。その作りは太古の時代に迷い込んだかのようにであったが、かまどの横に積まれた即席ラーメンの山が我々を現代の世の中に縛った。

移動距離の半分を過ぎた辺りからインダス川沿いの溪谷が緩やかになり、道の両側には平原状の風景が広がっていた。平原ではあるが雨が降らないため植物は生きる術を持たない。しかしその中を川の水が満々と流れ、川岸の狭い範囲に苔や草を育てている。そしてそれらを食料としているのだろう、野性の馬の群れや山羊の一種と思われる動物の群れにも出会った。このころから我々は道路とも砂漠とも区別のつかない所を走り始めていた。レーを出たのは午前中であったが、既に太陽は大きく西に傾き、東進する我々の背後では夕陽に照らされた砂漠の砂が輝いていた。平坦地の終わりに近づいたところで、遠方の谷間に集落が見えた。筆者は以前からハンレのそばにニオマと言う町があると聞いていたため、IIAの研究者に尋ねるとやはりその集落はニオマであった。こんな環境にも町があることにはただただ敬意を示さざるを得ない。いったいどのようにして生計を立てているのだろうか、自給自足すらも適わないと思うのだが、村というべき規模の集落がとにかく存在している。ニオマを過ぎたのでハンレはもうすぐだと思ったのだが、それは少しばかり甘い期待であった。その頃から日も暮れ、我々の進む道路はインダス川へと差し掛かった。川にたどり着くと、橋が崩れていたため、浅瀬を選んでの通過となった。しかし我々はそれまでの行程で、その程度のことには動じない心構えが出来ていた。その後は道無き道を進むという感じの凸凹道であった。聞けば中国との国境に近づいているそうだ。臓腑を放り出されるのではないかという揺れがしばらく続いた後、崖下の狭道

を走っていた。帰る際に知ったのだが、崖の上には険しく佇む古城があった。大昔この地方を統括していたのではないかと思われるような姿を感じさせるものであった。そして車はようやく止まった。最後の数十Kmの行程はそれまでの200Kmの移動を凌ぐものであった。窓の外には幾つかの建物が見えた。車を這いずり出た我々は、その中にあるカマボコ型のシェルターへと案内された。中は宿舎になっており、煤を盛んに吐き出す石油ストーブとささやかな電灯が付けられていた。長い移動に疲れた我々は簡単な夕食を食べると早々にベッドへとすべりこんだ。11月とは言え夜間の外気温は-20℃近くまで下がる。ストーブがあるとは言え、すきま風が吹き込み、断熱の良くないシェルター内は毛布一枚で寝るにはいささか寒く、とりあえず着て来たものを片っ端から毛布に乗せてようやく眠りに入ることができた。

インドの朝はチャーイで始まる。これはIIAの宿舎でも、レーでも、そしてこのハンレでも同じであった。ただし、使っているミルクの差からか味は随分と違っている（ハンレでは山羊かヤクから搾ったミルクが使われていると思った）。簡単なパンとバターなどで朝食を食べる。飲み物はインダス川の水を汲んできているため、一度沸かしているとはいえ結構濁っている。朝食を終えて外に出ると、写真でしか見たことの無かったヤクが少し離れたところをゆったりと歩いていた。それを見た岡君がヤクを追い掛けて走り出した。しかし低酸素の世界に十分に馴染んでいない我々の体では、行動の穏やかなヤクにも追い付けなかった。このヤクにはその後間近でお目にかかったが、その毛はとても硬くゴワゴワしており、その目の優しさは牛の可愛さを上回ると思った。最近テレビで知ったことだが、硬いヤクの毛は歌舞伎の獅子の面などに珍重されているそうである。

その後我々は、宿舎のすぐ横手に装置を引き出して観測を始めた。本来のサイトは宿舎からさらに300m近く上がった小さな丘の上であった。し

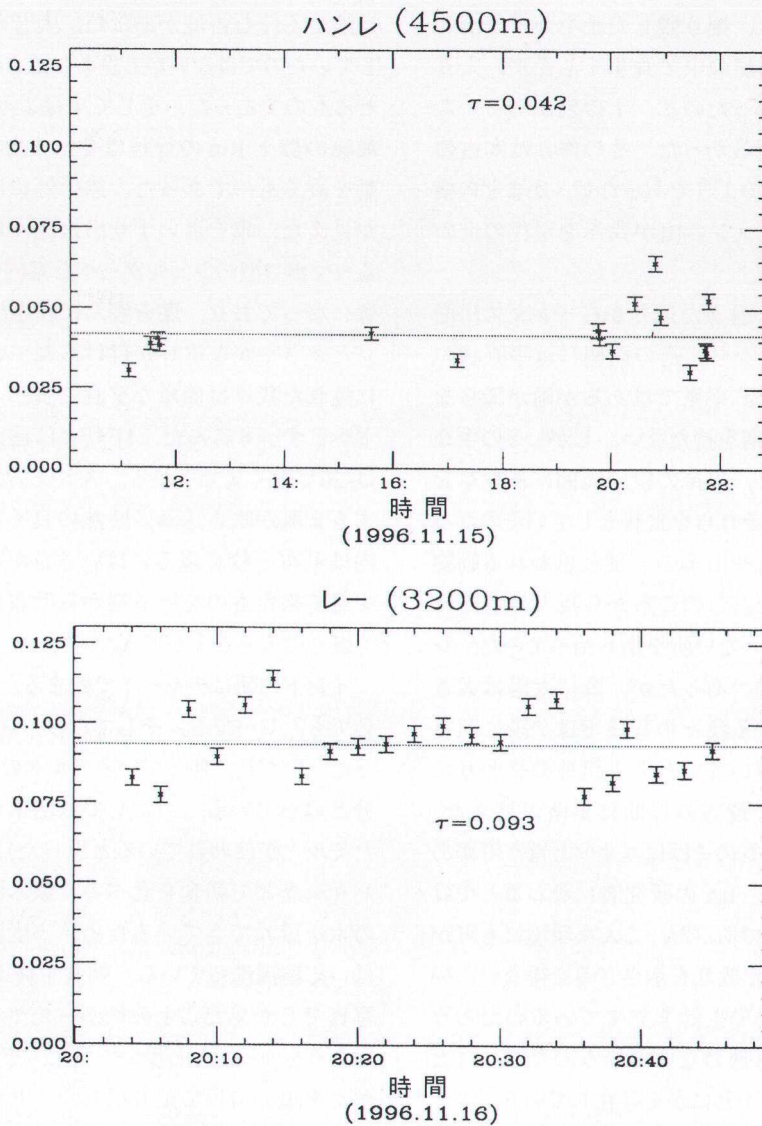


図3 ハンレ（標高約 4500 m, 1996 年 11 月 15 日）とレー（標高約 3200 m, 1996 年 11 月 16 日）における 230GHz 波長帯での大気の光学的な厚さ（天頂方向）。横軸は現地時間。レーの値は観測最後の時期のデータのみ使用（観測直後から天候が下り坂に入るため典型値よりも悪い可能性があり）。

かし装置の移動と電力供給の利便を言い訳にして 宿舎横で行うこととした。何しろ丘の麓までは車で行けるが、最後の数百mは装置を担いで歩いて登らなければならない。そのことを想像すると言いつのことも探したかったのが本音である。位置的には近いし、高度の差も小さいため、得られたデ

ータは観測サイトと同一条件と考えて差し支えないであろうと考えられた。さて観測を始めてコンピュータをのぞき込んだ我々は驚きを隠せなかった。電波望遠鏡のデータを取得しているコンピュータの画面には、望遠鏡の仰角を横軸に、縦軸に電波強度をリアルタイムに示していた。仰角が低

くなるほど大気の厚みが増すため強度が強くなり、天頂方向で最も強度が弱くなるはずである。しかしその画面に表示されるグラフは、ほぼ水平状態を保っていた。念のために山本さんは装置のチェックを行われたが、常温のアブソーバー（黒体）からの輻射のキャリブレーション信号はきちんと測定されている。どうやらハンレの水蒸気量は非常に少ないようであることがわかった。帰国後山本さんの研究室の皆さんによるきちんとしたデータ解析により、ハンレ、レーにおける水蒸気量が求められた。その結果を図3に示す⁴⁾。データ取得後我々はサイトへと向かうことにした。サイトでは24時間気象データを取得する装置が長期間に渡って運転されていた。

4. 東京にて

短い滞在であったが、ハンレでの記憶は2年を経た今でも強く残っている。我々のサイトサーベイにおける滞在期間は限られていたため、得られたデータもハンレのサイトとしての典型値を示しているかどうかという疑問はある。しかし我々が滞在中の気象条件が格別には優れていなかった（前後の日が現地では珍しく少し曇っていた）ことを考慮すると、我々の測定した水蒸気量は、ハンレでのチャンピオンデータを取りだしたものでは無いだろう。我々が滞在した際の印象では、この程度の条件は日常茶飯事に得られそうな感触であった。とにかく乾燥した場所であった。ヒマラヤサイトであるハンレは夜間の気温（冬季 $\sim -30^{\circ}\text{C}$ ）、低い水蒸気量、多い観測夜数などを総合して、世界でも非常に優れたサイトと言えるであろう。おそらくマウナケアを凌ぐことは間違いないというのが筆者の持った感想である。水蒸気量の測定に関しては、長期のモニター観測を行うことができるように、国際協力で測定装置の開発を検討している。現在口径2mの望遠鏡は既に建設が進行しており、ハンレ

とIIA本部（バンガロール）との間の衛星回線も実用化されているそうである。建設中の望遠鏡が完成すると、ヒマラヤでいよいよ本格的な赤外線観測がスタートするであろう。残念ながらサブミリ波観測施設の建設予定は、インドにおけるサブミリ波天文学の土壌が無いため建設が予定されていない。しかし近い将来には国際協力の形でサブミリ波天文台が建設される日が来るだろう。現在ではハワイ、チリと天文観測サイトが開拓され、すでにそれらの場所は過密状態である。今後地上天文観測においては、南極を別にすると、ヒマラヤは地球最後の楽園になるのではないだろうか。

思いだしてもハンレへの旅は楽な移動ではなかった。しかし時間が経過するのにしたがって、再び訪れたいくなる気持ちが湧いてくる。やはり「地の涯」なんだ。

参考文献

- 1) 天文月報 1997年 vol.90, No.1, p29 西村昌能
- 2) Astrophysical Quantities Third edition, Infrared Astronomy の項
- 3) Matsumoto T., et al., 1994, PASP, 106, 1217
- 4) 日本天文学会 97年春季年会 山本智他

A Record of Making a Site-survey at Hanle in the Himalayas

Munetaka UENO

Department of Earth Science and Astronomy, University of Tokyo, Komaba 3-8-1 Komaba, Meguro, Tokyo 153-8902, Japan

abstract: We visited Hanle, where Indian Institute of Astrophysics is going to build a new observatory, to measure atmospheric opacity using a 230GHz radio receiver. The opacity shows that the site must be one of the best places for observations in the submillimeter wavelengths in the world. The meteorological data and advanced studies in the visible wavelength also show the potential for the best-quality infrared observations. This paper will invite you to the site.