

## 第5章 サイト調査の経緯

### 5.1 現地調査

1999年初めの本プロジェクト開始以来、チリでのいろいろな調査を進めてきた。以下に、その内容について簡単にまとめる。

#### 第1回「地形調査、天文台訪問」

期間(チリ滞在日) : 1999/10/10-23

参加者 : 川良、田中、(半田)

協力者 : 中井 直正(国立天文台)、Angel Otarola(ESO)

- VLT 訪問 (C.Cesarsky, ESO 台長、D.Hofstadt, ALMA chief engineer と会見)
- Atacama 調査 (Pampa la Bola 平原探索、CBI 訪問)
- Co.Quimal 調査 (3700m 地点まで車で、4000m 付近まで登山)
- 在チリ日本大使館訪問 (成田右文 大使、梶本泰代 書記官と会見)
- チリ大学訪問 (M.T.Ruiz と会見)
- Las Campanas Office 訪問 (M.Phillips 副所長と会見)
- Las Campanas 天文台訪問 (F.Perez, Magellan Project chief engineer と会見、Magellan 望遠鏡見学)
- Gemini South 訪問
- AOC (CTIO) Office 訪問 (N.Suntzeff と会見)

#### 第2回「地形調査、天文台訪問」

期間(チリ滞在日) : 2000/06/28-07/07

参加者 : 川良、田中

協力者 : 阪本 成一(国立天文台)

- Atacama 調査 (Pampa la Bola 平原探索)

- チリ大学訪問 (M.T.Ruiz, J.May, J.Masa, L.Bronfman と会見)
- 在チリ日本大使館訪問 (梶本泰代 書記官と会見)
- CTIO Office 訪問 (A.Walker 副所長, N.Suntzeff, B.Gregory と会見)
- Las Campanas 天文台訪問 (S.Shectman, Magellan の光学系設計者と会見、Magellan 望遠鏡見学)
- ESO Office 訪問 (A.Otarola と会見)

### 第3回「地形調査、衛星気象データ WS 出席、チリ大学と MoU 締結、天文台訪問」

期間 (チリ滞在日) : 2001/05/07-16  
 参加者 : 吉井、田中、土居  
 協力者 : Angel Otarola (ESO)

- Atacama 調査 (Pampa la Bola 平原探索、気象モニター設置場所確認、Co.Honar 登頂)
- チリ大学訪問 (M.T.Ruiz, L.Bronfman と会見 サイト調査に関する MoU 締結)
- AOC Office にて衛星気象データの WS 出席 (A.Erasmus, L.Nyman, 他が出席)
- CTIO, Gemini South 訪問
- Las Campanas 天文台訪問 (F.Perez, Magellan Project chief engineer と会見、Magellan 望遠鏡見学)
- ESO 訪問 (NTT 他を見学)
- ESO Office 訪問 (D.Hohstadt と会見)
- 在チリ日本大使館訪問 (成田右文 大使、梶本泰代 書記官と会見)
- Puga 訪問 (建設会社)

### 第4回「気象モニター設置」

期間 (チリ滞在日) : 2001/09/11-17  
 参加者 : 田中、河野、宮田

- 気象モニター設置 (Co.Chajnantor と Co.Chascon とのサドル地点)
- 周辺の地形調査

第5回「気象データ回収」

期間(チリ滞在日) : 2002/02/18-24

参加者 : 河野、宮田

- 気象データ回収(2001/9-2002/2のデータ)
- 周辺の地形調査

第6回「Chajnantor 登頂、気象データ取得、シーイング測定」

期間(チリ滞在日) : 2002/11/19-12/14

参加者 : 田中、河野、宮田、土居、本原、征矢野

- Chajnantor 登頂(Ocegtel社のV.Saldana氏、F.Mellado氏が同行)
- 気象データ回収
- シーイングモニタ試験観測
- Magellan 望遠鏡見学
- チリ大学訪問(M.T. Ruiz, L. Bronfman と会合)

第7回「シーイング測定」

期間(チリ滞在日) : 2003/9/30-10/10

参加者 : 土居、本原、征矢野

協力者 : 高遠 徳尚、浦口 史寛(国立天文台)

- シーイングモニタ2点同時観測
- チリ大学訪問(M.T. Ruiz, L. Bronfman と会合)

第8回「雲モニター設置、気象データ取得」

期間(チリ滞在日) : 2004/3/2-3/13

参加者 : 吉井(サンチアゴ)、田中、河野、宮田、征矢野

協力者 : 江澤 元、岩下 浩幸(国立天文台)

- チリ大学訪問(L.Bronfman、J.Maza、M.T.Ruiz と会合)
- 日本大使館訪問(小川元 大使、中村和人 書記官、遠藤知庸 書記官と会合)
- 雲モニター設置(ASTE コンテナ屋根に設置)
- 気象データ回収

## 第9回「チャナントール山山頂アクセス道路敷設準備」

期間 (チリ滞在日) : 2005/2/27-3/4

参加者 : 田中

協力者 : 岩野 久香 (国際航業)、土井 英 (フジタ)  
中村 浩樹 (タカラ建設)

- ALMA-OSF (Operation Support Facility) 訪問、waiver forms にサイン
- 道路建設体制及び準備状況の確認
- 現地地形を道路予定ルートに沿っての登山にて調査

## 5.2 衛星によるチリ北部の気象調査

チリ北部、特にアタカマ高原は地球上で最も乾燥した地域である。水蒸気の吸収に強く影響されるサブミリ波観測に重点をおく ALMA が、アタカマの Chajnantor 高原に建設されることになったのは当然であろう。

赤外線性能を重視する TAO 望遠鏡では、水蒸気はもとより、サブミリ波観測では問題とならない氷粒子 (絹雲) の存在が問題になる。つまり、ALMA とは異なる気象調査が要求される。我々は、1993 年 7 月から 1999 年 9 月の期間における気象衛星 Meteosat-3 及び GOES-8 のデータを解析することにした。この期間には、強いエルニーニョとラニーニャが 1 回づつ、通常のラニーニャが 1 回と弱いエルニーニョが 2 回含まれており、長期の気象変動を調べるのに最適である。データは、東大、米国セロトロロ天文台、ESO の 3 者がそれぞれ購入したものをつなぎ、データ解析は東大とセロトロロ天文台が共同で気象学者の Erasmus に委託した。

解析は、 $6.7\mu\text{m}$  (水蒸気チャンネル) と  $10.7\mu\text{m}$  (赤外チャンネル) のイメージデータについて行った。既存の天文施設である米国セロトロロ天文台を含むチリ北部地域全域を解析の対象とし、夜間の晴天率や水蒸気量のマップを作成した。更に、我々が光赤外線観測の最適地として選定した 2 地点を含む 14 地点について詳細な解析を行った。その結果の一部を下に示す。

	測光夜 (%)	水蒸気量 (mm)	注
トロロ山	65%	2.2 - 6.5	米国セロトロロ天文台
パラナル山	85%	1.8 - 6.0	ESO パラナル天文台
チャナントール山	70%	0.3 - 1.2	TAO 第 1 候補地
キマル山	82%	0.9 - 2.8	TAO 第 2 候補地



測光夜と水蒸気量を組み合わせて考えた場合、TAO 設置候補地はいずれも既存の天文台の観測条件をしのぐことがわかった。我々が心配していた絹雲の出現も、測光夜の割合にみられるように十分に少ない。TAO 第 1 候補地であるチャナントール山（標高 5600m）の水蒸気量（mm）の少なさは特筆に値する。水蒸気量が少ないことは、赤外線の大気透過に優れ、大気熱雑音が少ないことを意味する。まさに、地上における赤外線観測の最適地である。

## 5.3 気象モニタによる地表気象条件のモニタ観測

### 5.3.1 概要

アタカマサイトの気象条件を調べる事は、望遠鏡建設地を決定する上でも、観測の環境や建設の条件を知る上でも重要である。これまでも ALMA サイトなどでは活発に気象データが取られているが、TAO 望遠鏡が目指している 5600m でのデータはまだ無い。そこで TAO グループでは独自の気象モニタを開発し、それによる気象データのモニタリングを行っている。気象モニタステーションは 2000 年度に完成、三鷹の天文センター構内に設置し試験運用を行った後、2001 年 9 月からアタカマサイトに輸送、モニタリングを開始している。現在の設置場所は高度 ~5000m のサドルポイントである。2004 年 3 月までに 2 年以上のデータを取得し解析を行っている。本節ではこの気象モニタ装置の詳細と、得られたデータについて述べる。

### 5.3.2 気象モニタ装置

TAO 用気象モニター装置は温度/湿度/風向風速/赤外放射量などを記録できる装置である。データは 10sec を単位として測定され、60 測定毎に平均演算などなされたあとロガー装置 (CR10X1) に自動的に保存されてゆく。なお、ロガーや各測定器は太陽電池と蓄電池によって駆動するようになっている。

図 5.1 にモニタ装置の写真のをせる。

データの読みだしはシリアルケーブル経由でノートパソコンを用いて行う。

気象装置は三鷹で仮運用を行った後、2001 年 9 月にアタカマサイトに輸送しモニタを開始している。現在はパンパラボラのサドルポイントに設置している (表 5.2 参照)。

この設置場所は Cerro Chajnantor と Cerro Chascon のちょうど間にあたる領域である。この場所には国立天文台 ALMA グループが気象モニタを設置している。この ALMA グループのデータと我々のデータはほぼ同じ量を測定することになるので、データを比

較検討することで両者の相対較正が可能となる。このように相対較正をおこなっておけば、後に我々のモニタ装置を別の場所に移設した後でも、両者のデータを精度良く比較することができる。2点のデータを同時に取得できれば、大気の逆転層の振舞を調べる事ができ、天候の状況を知る上で非常に重要な情報となりうる。

### 5.3.3 データ解析と結果

データの回収はこれまで4回に渡って行っており、28ヶ月間のデータについて解析が完了している。ここではこのうち、温度・湿度・風速(平均/最大)および絶対水蒸気量の変動についてまとめる。

データ解析は以下の手順で行った。まずデータを1月毎に分割する。この1月の範囲で毎日同じ時刻に得られたデータ値の median (中央値) を求め、これがその月の典型的な日変化だと考える。ここで時間としてはチリ標準時を用い、サマータイムは考えない。なお、絶対水蒸気量は直接の測定値ではないが、温度・湿度の測定から計算して求めている。

表 5.3 は月ごとの測定値の時間変動をまとめたものである。なお、同じ月に対して2回以上測定がある場合は、その平均を記載した。

図 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 は各季節での気象条件の日変化および風速のヒストグラムである。



図 5.1: 気象モニタ装置全景

各月のデータは 2004 年 3 月のデータ回収の時点で最も新しいデータを示してある。

西暦年		年
1/1 からの換算日		日
時刻		時分
赤外放射量	平均値	kW/m <sup>2</sup>
赤外放射計ドーム温度	平均値	°C
赤外放射計本体温度	平均値	°C
赤外放射量	補正後の平均値	kW/m <sup>2</sup>
風速	平均	m/s
風向	ベクトル平均	°
風速	最大	m/s
最大風速の時間	時分	
気温	平均値	°C
湿度	平均値	%
気圧	平均値	hPa
蓄電池電圧	平均値	V
口ガー温度	平均値	°C

表 5.1: 測定値一覧

西経	67.7196°	GPS による
南緯	23.001°	GPS による
高度	~5000m	地図からの推定

表 5.2: 設置場所

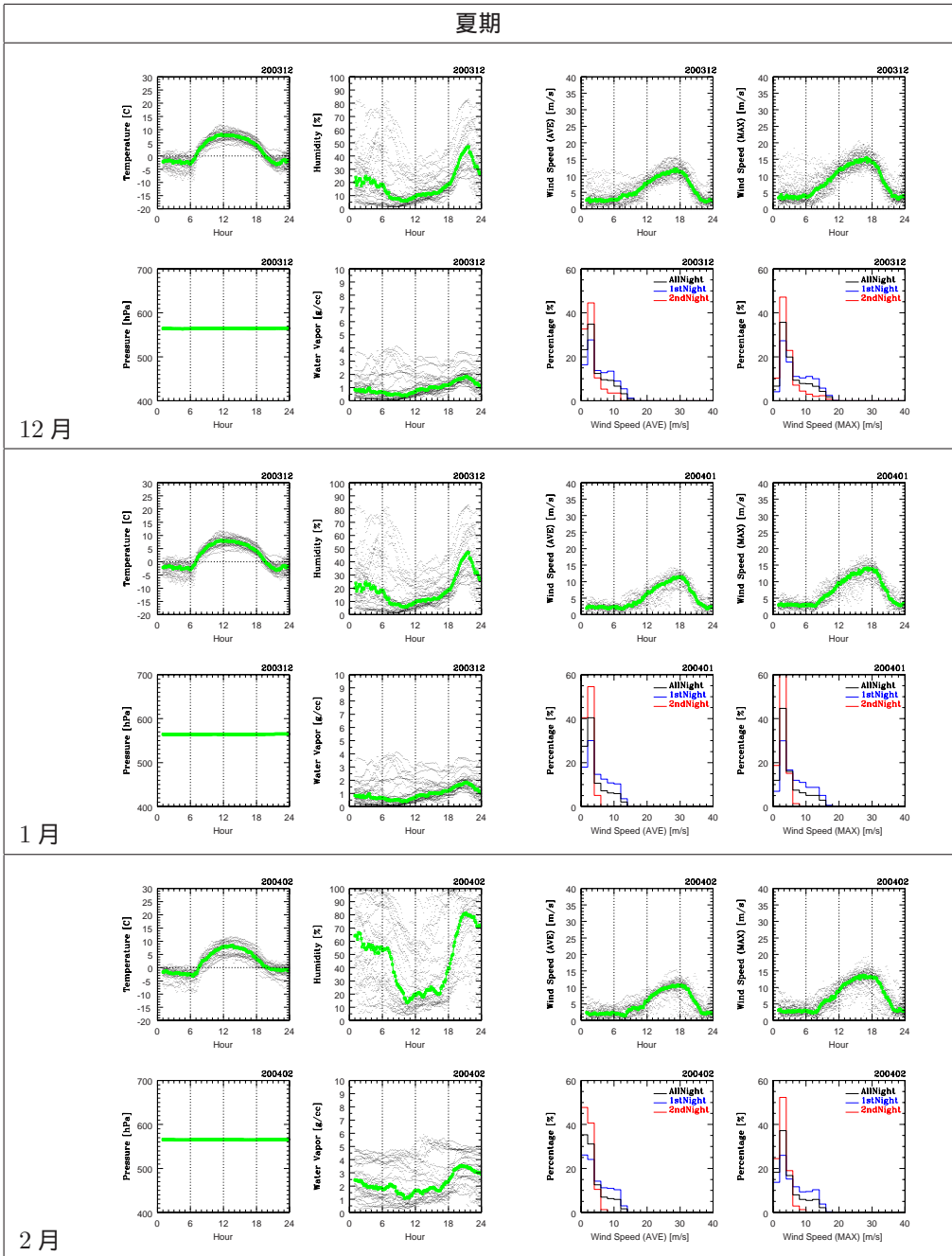
気温 [C]					湿度 [%]				
月	12:00	18:00	24:00	30:00	月	12:00	18:00	24:00	30:00
1	7.60	4.29	-2.11	-3.61	1	19.57	29.46	60.92	55.60
2	7.45	3.86	-1.32	-2.33	2	19.98	43.70	76.50	54.12
3	8.09	3.44	-0.69	-1.57	3	26.66	48.30	66.25	54.38
4	5.05	0.49	-2.90	-3.17	4	11.13	23.27	31.00	18.79
5	0.96	-2.69	-4.50	-4.70	5	19.62	40.35	32.94	33.27
6	0.62	-3.60	-4.97	-5.23	6	11.30	21.33	15.15	13.63
7	-2.67	-5.70	-7.38	-7.86	7	23.15	31.70	32.21	22.79
8	0.22	-3.92	-6.46	-6.90	8	9.58	16.87	17.36	14.60
9	1.19	-2.26	-5.43	-6.03	9	8.77	15.47	14.97	11.80
10	4.75	1.70	-4.13	-4.37	10	8.50	15.35	23.74	14.82
11	6.68	3.34	-2.89	-3.85	11	8.48	14.05	21.12	12.99
12	6.65	4.20	-2.06	-3.87	12	10.61	16.75	32.12	21.09

気圧 [hPa]					水蒸気量 [g/cc]				
月	12:00	18:00	24:00	30:00	月	12:00	18:00	24:00	30:00
1	565.1	564.5	565.5	564.6	1	1.68	2.11	2.56	1.94
2	565.5	564.6	565.7	564.8	2	1.72	2.68	3.17	2.08
3	565.8	565.0	566.0	565.0	3	2.37	3.10	3.03	2.31
4	565.2	564.6	565.3	564.4	4	0.74	1.17	1.10	0.69
5	565.3	564.5	565.0	564.2	5	1.13	1.42	1.17	1.16
6	565.3	564.6	565.1	564.0	6	0.53	0.79	0.49	0.46
7	563.6	563.2	563.7	562.5	7	0.75	1.03	0.82	0.62
8	564.5	563.7	564.4	563.4	8	0.50	0.66	0.52	0.43
9	564.1	563.7	564.0	562.9	9	0.47	0.65	0.49	0.36
10	564.8	564.3	564.8	564.0	10	0.61	0.86	0.86	0.48
11	564.7	564.1	565.1	564.1	11	0.59	0.86	0.80	0.50
12	564.6	564.2	565.0	564.0	12	0.75	1.09	1.23	0.72

風速 [5min の平均 m/s]					風速 [瞬間最大 m/s]				
月	12:00	18:00	24:00	30:00	月	12:00	18:00	24:00	30:00
1	6.74	10.82	2.41	2.56	1	10.44	13.31	3.63	3.09
2	5.94	10.63	1.99	2.30	2	8.97	13.18	2.90	3.01
3	5.33	9.48	2.18	1.92	3	8.88	12.00	3.13	2.71
4	6.14	8.71	3.12	3.35	4	11.03	11.09	5.07	5.06
5	6.25	7.61	4.69	4.66	5	11.95	11.10	8.82	8.70
6	6.16	6.15	4.68	4.83	6	10.00	8.59	8.36	7.91
7	6.52	7.46	4.36	5.73	7	12.04	11.15	9.50	10.23
8	6.54	8.27	4.35	4.53	8	11.48	11.09	6.63	8.61
9	7.29	9.32	4.76	5.28	9	12.87	12.29	7.40	8.98
10	7.68	10.30	3.30	3.31	10	11.76	12.85	4.70	4.36
11	7.91	11.18	3.04	2.93	11	11.51	13.83	4.06	3.66
12	7.27	10.89	2.27	2.27	12	11.43	13.79	3.42	3.10

表 5.3: 測定値一覧

夏期



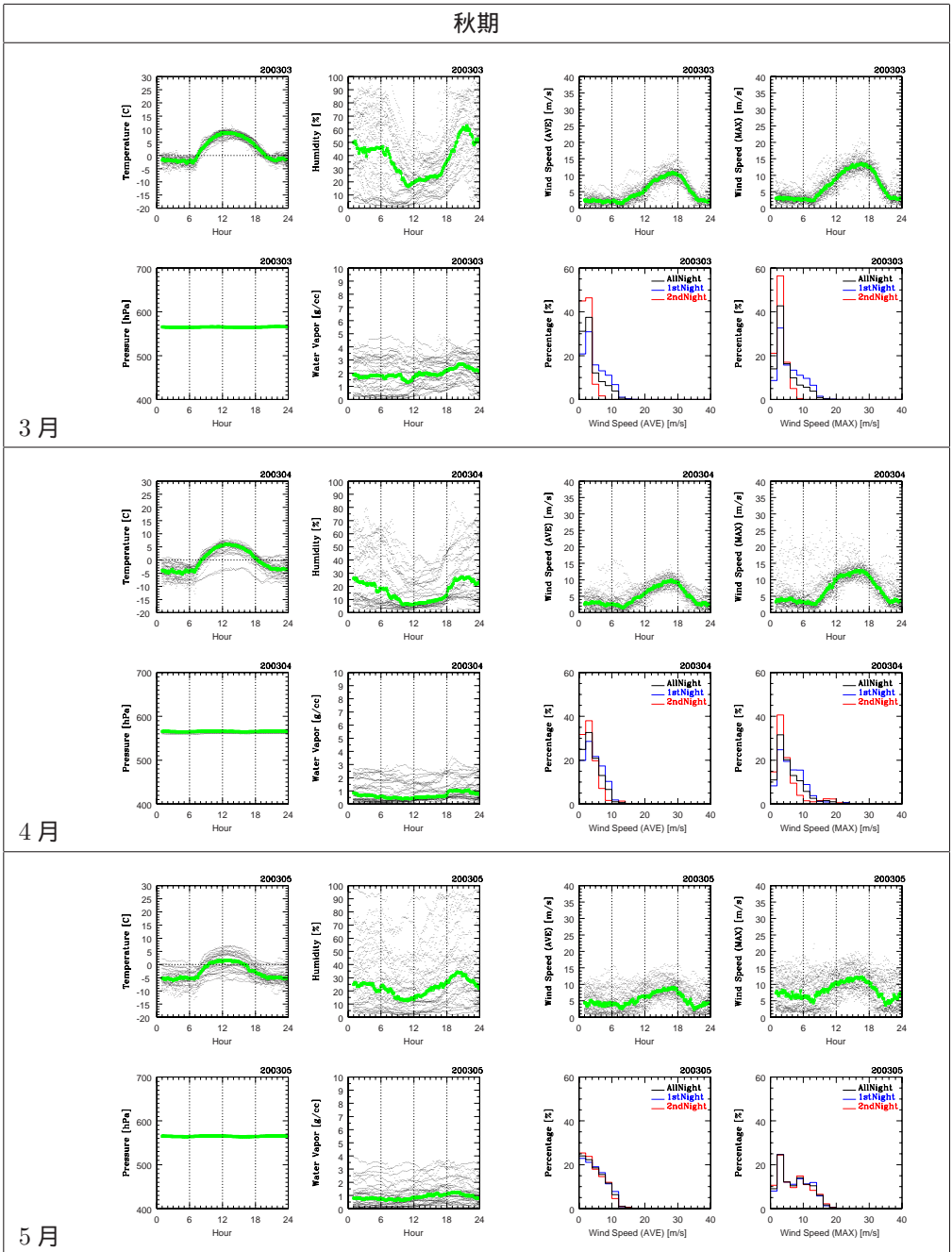
12月

1月

2月

図 5.2: 気象データの日変化の例 (夏期:12、1、2月)

秋期



3月

4月

5月

図 5.3: 気象データの日変化の例 (秋期:3、4、5月)

冬期

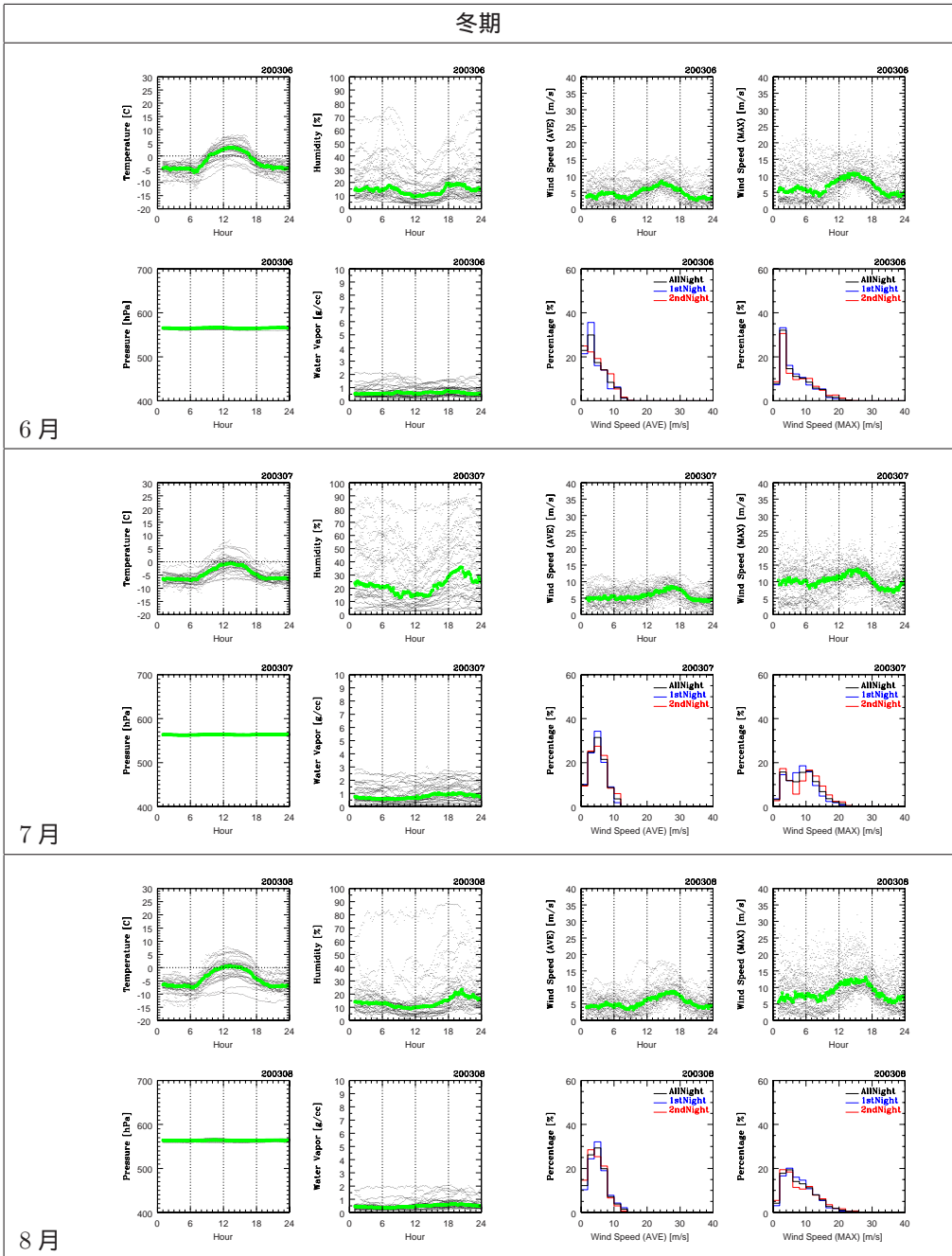


図 5.4: 気象データの日変化の例 (冬期:6、7、8月)

春期

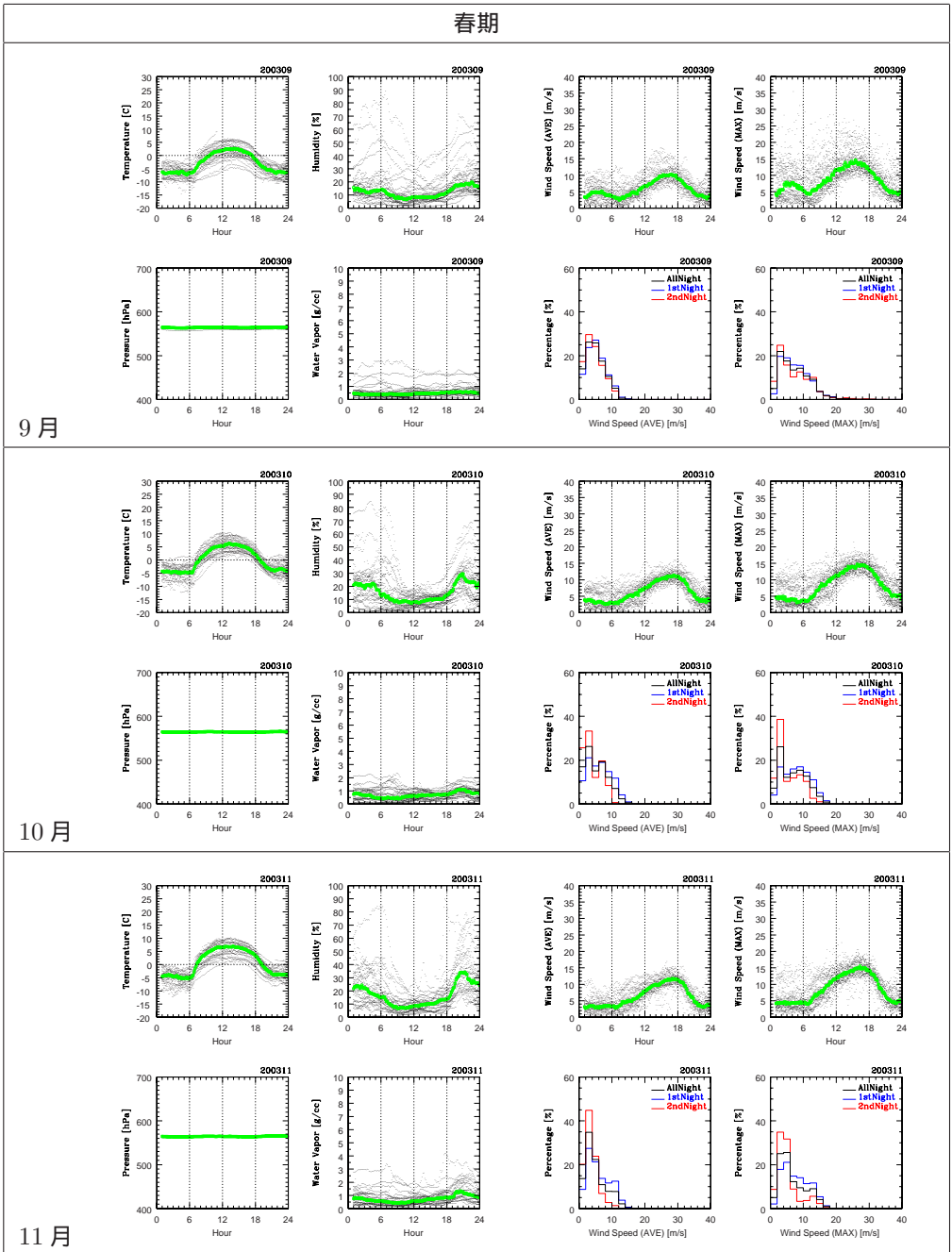


図 5.5: 気象データの日変化の例 (春期:9、10、11月)



## データの解釈

- 気温

気温は日中山形に上がり、夜間はほぼ一定値という変動を示す。この形はどの月もほぼおなじように見える。夜間の温度は冬期で  $-5^{\circ}\text{C}$  から  $-8^{\circ}\text{C}$ 、夏期で  $-1^{\circ}\text{C}$  から  $-4^{\circ}\text{C}$  程度である。

- 湿度/水蒸気量

湿度は年間を通じて日中は低く夜間に上昇するという傾向が見られる。しかしながら水蒸気量の変化ではこのような傾向は見られないので、これは温度の変化によるものだと思われる。

水蒸気量は冬から春にかけてが最も値が小さく、8-9月ではメディアン値で  $0.4\text{g/cc}$  を切る状態が続く。逆に夏期の2,3月頃は水蒸気量が高く、湿度も70%を超えることが多い。これはいわゆるボリビアンウインターの影響であると思われる。

- 風速

平均風速は午後から前半夜最初にかけて大きくなり ( $\sim 10\text{m/s}$ )、あとは小さい ( $\sim 5\text{m/s}$ ) という傾向をもつ。この傾向はどの月でもあまり大きくは変わらないが、8-10月は夜間の風速が少しだけ高いようである。逆にボリビアンウインターの影響を受けている1-2月は風速は小さくなっている。

最大風速の変化は平均風速の変化とほぼ同様である。8-10月が最も風の強い時期であり、 $25\text{m/s}$  を越えるような風が吹く日が何度かある。それ以外の時期では最大風速は概ね  $15-20\text{m/s}$  である。

## 5.4 赤外雲モニタによる雲量のモニタ観測

### 5.4.1 概要

2003年までに行った衛星画像の解析や気象モニタ装置によるモニタ測定によって、アタカマサイトの気象条件についてはかなり明らかになって来ている。気象衛星の画像からはグローバルな雲の挙動が明らかになっており、チャナントール山周辺では測光夜が70%を越すことがあきらかになって来た。また、気象モニタのデータからは、特に9-11月の春期にかけて気象条件に非常に恵まれ、地表水蒸気量の median で  $0.5\text{g/cc}$  を切る状態が続くことが分かっている。これらは、アタカマ/チャナントール山が赤外観測に非常に適したサイトであることを示している。

しかしながら、これまでの気象調査は衛星や地表データを元にしたものであり、山にローカルに湧き出すような低層の雲については状況がつかめていなかった。そこで我々TAOグループは2004年から、中間赤外線での全天雲モニタ装置を製作し、それによる雲量のモニタ観測をスタートさせた。このモニタ装置はMAGNUM望遠鏡用の雲モニタをベースに開発したものであり、日中を含む常時、雲の量をモニタできるものである。カメラは市販の中間赤外カメラを用いており、観測波長は  $8-12\mu\text{m}$  である。モニタはASTEサイトに設置され、ASTEの観測時の気象状況監視にも利用されている。

モニタ装置は2003年に開発され、東大木曾観測所などで試験を行った後、2004年3月にアタカマに設置、運用を行っている。これまでに、約2カ月分のデータの取得/解析を終えており、 $\tau$  で0.05レベルの雲まで充分に検出できることが明らかになっている。本節では、この雲モニタ装置の性能や得られた画像について述べる。



図 5.6: 雲モニタ写真。後ろはチャナントール山。

## 5.4.2 雲モニタ装置

TAO 赤外雲モニタ装置は、熱赤外線による全天モニタ観測を行う装置である。この装置は、MAGNUM 望遠鏡用の赤外雲モニタ装置をベースに開発を行ったものであり、日中を含む常時、雲の量をモニタできるようになっている。システムの諸元を表 5.4 にまとめておく。装置は大きく分けて、全天カメラ部分と制御用計算機からなっている。装置のブロックダイアグラムを図 5.7 に示す。

雲モニタ装置は 2004 年 3 月に、アタカマ/パンパラボラ高地の ASTE サイトに設置され運用されている。全天カメラ部は ASTE 望遠鏡脇の荷物用コンテナの上に、制御計算機はコンテナ内の防塵箱内にそれぞれ設置されている。電源やネットワーク環境は ASTE の物を利用している。

画像は 5 分に一度取得され、自動簡易解析を行った後、解析後データとしてシステムコントローラ PC のハードディスク上に保存される。これに加えて、オフラインでの詳細解析に使うため、生データを 30 分に一度ハードディスク上に残している。データの発生レートは 1.5Mbyte/hour である。コントローラ PC は ASTE ネットワークに接続されており、オンライン解析されたデータは WEB を通じて ASTE ネットワークに配信されている。

設置場所	アタカマ/ASTE サイト	標高 ~5000m
視野	天頂角 10-70°	ただし天頂に対して約 10° 傾斜 チャナントール山山頂を含む
分解能	1pix~0.8 度	
観測波長	8-12 $\mu$ m	カメラ感度による
モニタ期間	2004/03/09 -	
データ取得レート	1 枚/5 分	うち 6 枚に一度は RAW データも保存
データ発生レート	1.5Mbyte/hour	
全天鏡	カセグレンタイプ全天鏡 (国立天文台)	入射窓 $\phi$ 40 タイプ
入射窓	Ge $\phi$ 40mm t3mm	表面 DLC コート 裏面 反射防止コート
カメラ	AVION 製 IR-30	感度波長域 8-12 $\mu$ m アナログ ビデオ出力 RS232C 経由で制御
温度計	OMRON 製 E5GN	RS485 経由で制御
温度センサー	プラチナ抵抗 x2	測定範囲 -200-850°C
参照光源	銅ブロック (黒色塗装)	
制御 PC	Linux 計算機	Vine Linux
画像取込ボード	GV-BCTV5/PCI (I/O データ)	Video4Linux で制御

表 5.4: 雲モニタ諸元

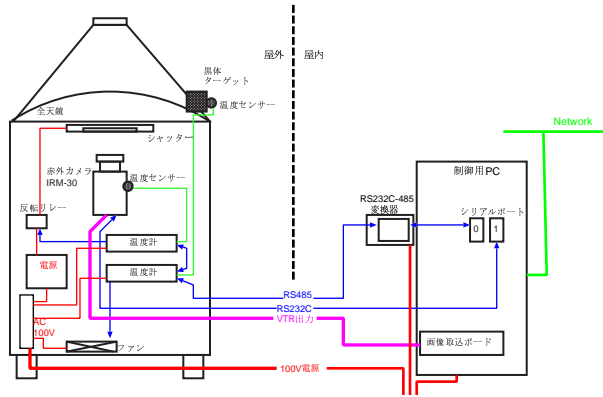


図 5.7: 雲モニタブロックダイアグラム

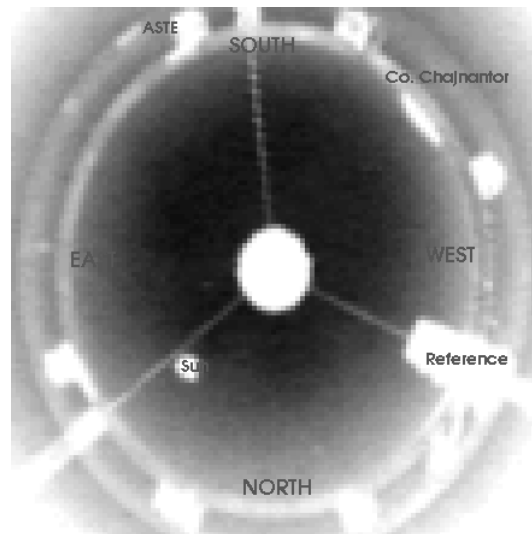


図 5.8: 得られた雲画像の例 (生画像)

### 5.4.3 データ解析

この雲モニタシステムで得られた画像データは雲からの赤外線放射の他、鏡、窓、レンズといった光学系からの放射を含んでいる。また、カメラは内部較正システムを持たないので、周囲環境によって出力レベルが変動してしまう。雲からの放射量を正確に測定するためには、このような要素を解析によって取り除く必要がある。

本雲モニタは視野内に黒体の参照光源を持ち、空の画像と同時にその明るさを測定するようになっている。参照光源の明るさはその温度（非制御）を測定することで計算できるので、参照光源の測定値を用いればカメラの出力変動はキャンセルすることが可能になる。また、代表的な快晴画像を集めて快晴時の代表画像を作成し、光学系温度を補正した上でこれを得られた画像から差し引けば、光学系からの赤外放射も除去することが可能である。さらに雲の温度をカメラ温度と同じであると仮定することで、得られた赤外線画像から雲量  $\tau$  のマップを作成することができる。

具体的な解析手順は以下の通りである。

1. ゲインを変えて取った 7 枚の画像を重ね合わせて 1 枚の画像にする。これは参照光源と空の明るさの比が大きく ( $> 1000$ )、普通の画像取得だけではダイナミックレンジが不足し十分な精度の測定が行えないため。
2. 参照光源の明るさと温度を測定。温度から理想的には明るさが幾らになるかを計算し、測定された明るさととの差を求める。これがカメラのバイアス変動と考え画像から引き算する。
3. カメラシステム温度を元に画像を規格化する。これによって画像は“カメラ温度での放射率”を表す量になる。
4. 同様に解析した快晴画像を差し引く。差し引きによって光学系からの放射がキャンセルされる。
5. 画像の不要な部分にマスクをかける。

解析の例として、快晴の場合とうす曇りの場合の  $\tau$  マップ画像を図 5.9 に示す。

### 5.4.4 解析結果

雲のモニタ観測は 2004 年 3 月にスタートしているが、3-4 月にかけては現地の電源トラブル他でモニタが行われておらず、十分なデータが得られているのは 2004 年 5 月以降である。ここでは、2004 年 5 月と 6 月のデータを解析した結果を示す。

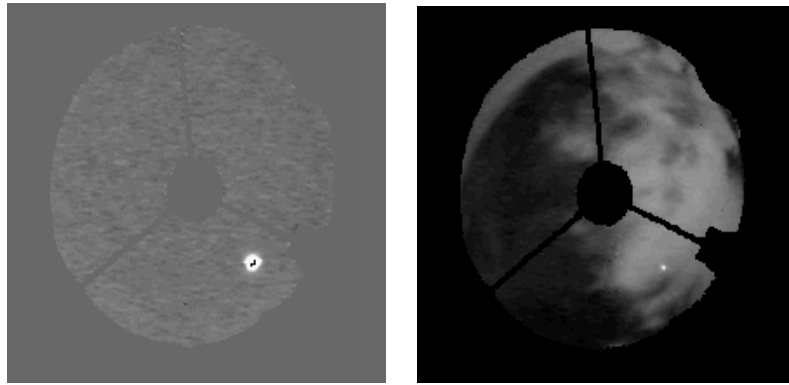


図 5.9: 雲画像の解析結果の例 (左=快晴、右=うす曇り)

$\tau$  の時間変動の様子を各方向で調べるため、得られた  $\tau$  マップを天頂と高さ  $3 \times$  方向 4 の計 13 領域 (表 5.5 参照) に分けてその値を調べた。13 領域のうち、天頂および NE 低、NW 低、SE 低、SW 低の 4 領域、計 5 領域の変動の様子を図 5.10 に示す。なお領域のうち、SW 低領域はチャナントール山を含む方向である。

$\tau$  の変動は大きく分けて、一日周期の弱い変動と、ときどき起きる大きな変化からなっ

名前	方向	天頂角
天頂	全方向	$< 25^\circ$
NE 高	北東方向 (画面左下)	$25 - 40^\circ$
NE 中	北東方向 (画面左下)	$40 - 55^\circ$
NE 低	北東方向 (画面左下)	$55 - 70^\circ$
NW 高	北西方向 (画面右下)	$25 - 40^\circ$
NW 中	北西方向 (画面右下)	$40 - 55^\circ$
NW 低	北西方向 (画面右下)	$55 - 70^\circ$
SE 高	南東方向 (画面左上)	$25 - 40^\circ$
SE 中	南東方向 (画面左上)	$40 - 55^\circ$
SE 低	南東方向 (画面左上)	$55 - 70^\circ$
SW 高	南西方向 (画面右上)	$25 - 40^\circ$
SW 中	南西方向 (画面右上)	$40 - 55^\circ$
SW 低	南西方向 (画面右上)	$55 - 70^\circ$

表 5.5: 雲モニタ解析の領域

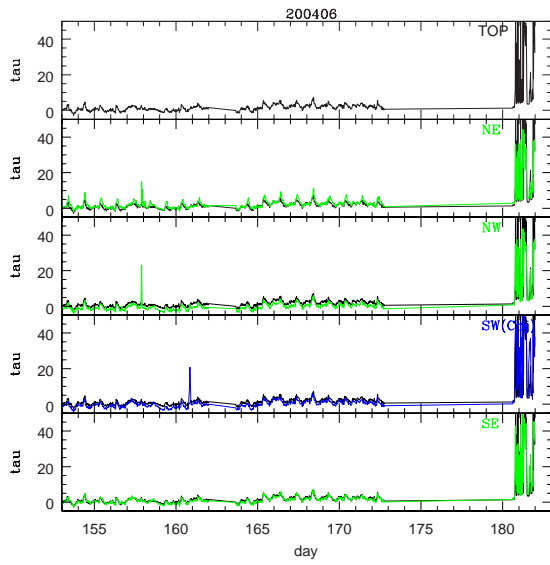
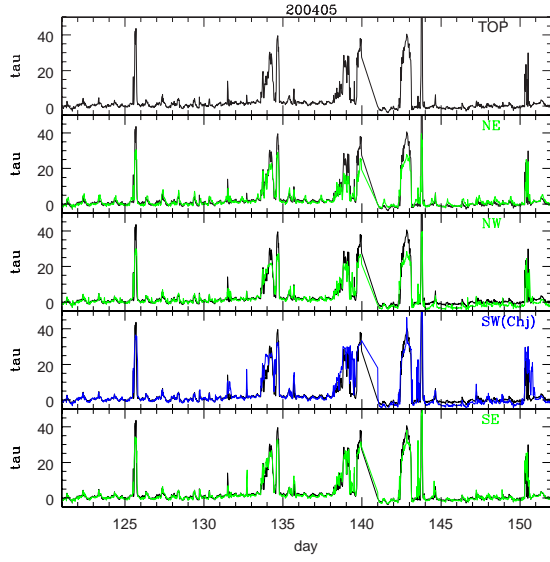


図 5.10:  $\tau$  の時間変動 (天頂、NE 低、NW 低、SE 低、SW 低)

領域	2004/05		2004/06	
	快晴 ( $\tau < 5\%$ )	晴れ ( $\tau < 10\%$ )	快晴 ( $\tau < 5\%$ )	晴れ ( $\tau < 10\%$ )
天頂	87%	90%	94%	97%
NE 低	86%	91%	87%	97%
NW 低	85%	89%	95%	96%
SW 低	<b>82%</b>	<b>85%</b>	<b>94%</b>	<b>95%</b>
SE 低	85%	89%	93%	96%

表 5.6: 雲モニタの測定による晴れの割合

ている。このうち前者の日変化は、光学系の温度変化など解析で落とし切れなかった成分であり、後者が実際の雲からの放射による成分だと考えている。このデータから、本モニタ観測によって、 $\tau \sim 5\%$ の雲ならば十分に検出できていることが分かる。

グラフから、 $\tau$ の時間変動の様子は方向で大きくは違っておらず、一次近似的には方向に強く依存しない事が分かる。しかしながら、より詳細に見ると、北側のデータ（パネル上から 2、3 枚目）は天頂のデータ（黒線）よりも曇の場合にやや小さめであることが多い。逆に南側では（パネル上から 4、5 枚目）、曇の場合に天頂よりも  $\tau$  が少し大きい傾向が見られる。

これを詳しく見るために、天頂での  $\tau$  と他の領域での  $\tau$  の相関を取ってみる（図 5.11）。図より、南側、特に SW 側で  $\tau$  が大きいデータが多いことが分かる。SW 領域はチャナントール山方向にあたっており、これらの結果は、チャナントール山上空で起きている、ローカルな雲の湧き出しを捕らえたものだと思われる。

このようなローカルな雲の湧き出しがどの位の頻度で起きているかを調べるために、各領域での雲量の統計量を計測した。表 5.6 は、各場所での  $\tau$  の出現割合をまとめたものである。

SW 側では相対的に晴れの割合が低下しており、天頂に比べて約 5%ほど晴れの割合が低い。すなわち、天頂で晴れであってもチャナントール山上空にだけローカルに雲がある割合は、この期間ではせいぜい 5%程度であると言える。

5%という値自身は問題になるような量ではなく、この結果からはチャナントール山で雲が湧き出す現象が観測に大きな影響を与えとは考えられない。ただし、この雲の湧き出し現象は季節によって大きく異なることも予想される。今後も引き続きモニタを進め、年間を通じた雲の湧き出し割合を調査する必要がある。



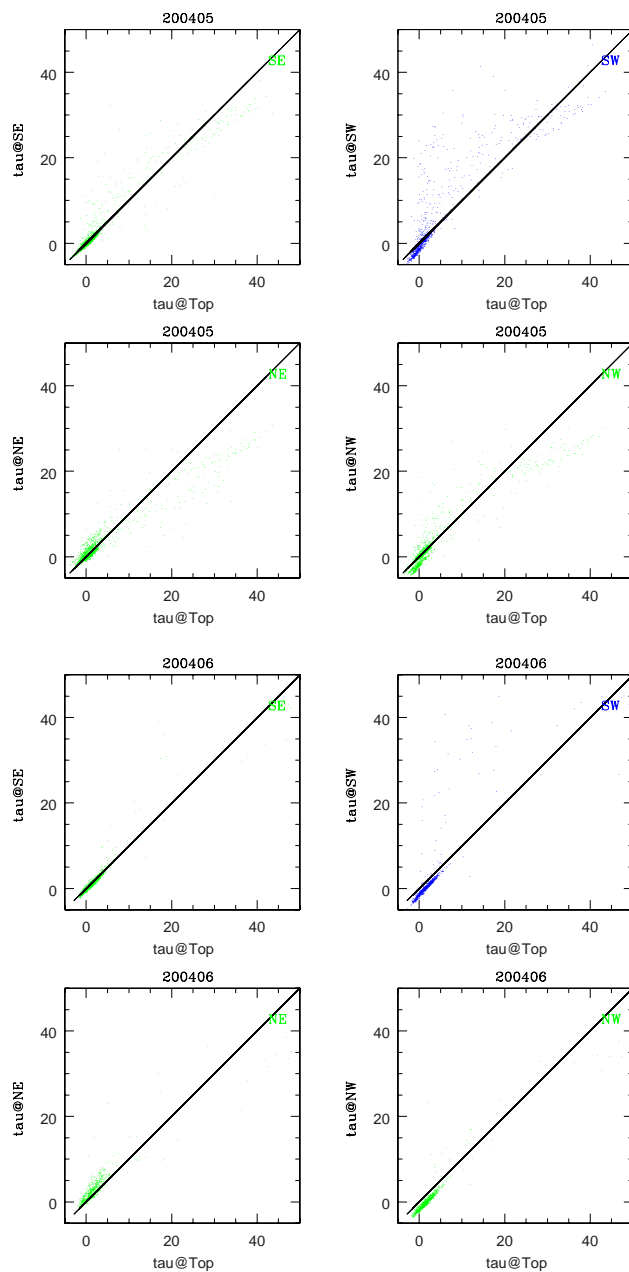


図 5.11: 天頂での  $\tau$  と、NE 低/NW 低/SE 低/SW 低の各領域での  $\tau$  との相関

## 5.5 シーイングモニタ

### 5.5.1 概要

サイトの決定にあたり重要なことの一つに、星のイメージサイズ、いわゆるシーイングサイズがあげられる。天体（点源）からの光は、地球の大気外ではほぼ理想的な平面波として入射するが、大気を通して来る間に波面が歪められ、望遠鏡を通して検出器の上に結像した際には、望遠鏡の収差を別にしても、理想的な点源像よりも広がって測定される。この波面の歪みはある狭い視野範囲であれば高速に変形する反射鏡などを使って補正可能である（Adaptive Optics: AO）が、もともとの歪みの量が少ないほど、より広い視野範囲あるいはより短周期の（短波長の光の）変動に対応できるので、AOを用いる場合でも、望遠鏡の位置決定の際にはシーイングサイズの良い場所を選ぶ必要がある。

このような測定は本来は像の回折限界がシーイングサイズよりも小さい望遠鏡、つまりある程度大きい口径の望遠鏡を良い性能でトラッキングしなければならない。しかし例えば  $0.''1$  の回折限界を得るために必要な望遠鏡の口径は 1m 程度となり、性能良いトラッキングのできる設置も含めると大規模な装置となってしまう。そこで、シーイング測定に特化した必要最小限の規模の装置として近年良く用いられているのが DIMM (Differential Image Motion Monitor) である。もともとは ESO のグループによって提案され (Sarazin, M. Roddier, F., “The ESO differential image motion monitor”, 1990, *Astron. Astrophy.*, 227, 294–300)、現在ではいくつもの天文台で各夜のシーイングの評価に用いられている。

DIMM は、望遠鏡の先端に口径  $d = 5 \sim 10\text{cm}$  の開口を  $s = 10 \sim 20\text{cm}$  の間隔で 2 個開け、それぞれの開口を通して入る光を、CCD 検出器の上に横に並べて結像するようにしたもので、それぞれの像の重心を高速 ( $\sim 1/1000\text{sec}$  露出) で測定する。二つの像の重心の相対位置を測ることで、間隔  $s$  だけ離れたところでの波面のずれが測定できる。つまり、重心位置の平均的な移動量の差を調べることにより、間隔  $s$  での波面の乱れ具合が統計的にわかる。一方、大気の波面を乱すもとなっている大気のゆらぎはコルモゴロフ乱流のモデルでよく近似され、大きなスケールと小さなスケールの間に良い相関があるとされている。そこで、このモデルを用いることで、20cm 程度の間隔で測定されたデータから口径 6.5m といった大型の開口を使った場合のシーイングも計算によって推測可能となるのである。

### 5.5.2 東大シーイングモニタ

我々は国立天文台の高遠グループと共同で TAO サイト調査用 DIMM を開発した (Motohara, K., et al., “University of Tokyo DIMM: a portable DIMM for site testing at Atacama”, 2004, Proc. SPIE, 5382, 648)。この DIMM は、東京大学と国立天文台ハワイ観測所にそれぞれ各 1 台ずつ配置されている。

望遠鏡には Meade 社の 30cm シュミットカセグレンを用いる。この望遠鏡は最低 1 人でも組み立てが可能で、携帯性に優れているとともに、RS-232C 接続によって PC からの制御が可能であるという特長をもつ。開口については、 $\phi 80\text{mm}$  の開口 2 個を、約 200mm 離して直交して 2 組設ける。これによって、将来的には上空の風向/風速の情報も得られることを目標としている。開口には 8mm 厚の BK7 の基板を置き、基板の両面が 40 秒角だけ傾くようにウェッジをかける。これにより、一つの星の像が、ほぼ一辺が 30 秒角の正方形の位置に、4 つの像として取得される。

検出器としては電子シャッターのある、1msec 以下の露出の可能な CCD カメラを用いる。東大で 4 機種の評価を行い、最も性能の良かったワテック社の Neptune100 という CCD カメラを用いることとした。CCD からのアナログビデオ出力はデータ取得用 PC のビデオキャプチャボード経由で取り込まれ、重心検出を行い、シーイングを算出する。また、バックアップのためビデオ出力は別にデジタルビデオカメラで録画する。

データ取得 PC は省電力マザーボード (EPIA-E533 / VIA Technologies 社) を搭載した DC12V で駆動可能なものを用いる。これにより、自動車用バッテリーで丸 1 晩以上の観測が可能となる。アタカマのような孤立した場所では商用の電源は期待できないため、この特性が観測効率を左右する非常に大きな要素となる。データ取得 PC は Vine Linux を搭載し、Video4Linux ライブラリを用いてビデオキャプチャボードから画像を取得する。シーイング測定ソフトウェアは全く新規に開発した。

図 5.12 にシステム構成を、図 5.13 にシステム全景を、表 5.7 に諸パラメータをしめす。

### 5.5.3 試験観測

アタカマでの本観測を開始する前に、以下の試験観測を実施した。

- 三鷹試験観測 (2002/10/28–29)  
基本動作を確認するための観測を行う。ソフトウェアに問題がいくつか見付かったものの、重大な問題は無いと判断。
- チリ/アタカマ試験観測 (2002/11/30–12/4)  
アタカマの標高 5000m 付近、TAO 気象モニタ脇での試験観測。本観測と同じ条

件での観測を行い、問題を洗い出すのを目的とする。この観測から以下の問題が浮き上がってきた。

- 風による振動：アタカマでは常に西風が吹き付けており、これによる振動が大きすぎて安定して正確なシーイングの測定ができない。また、これに関連してメモリ管理のバグのためにソフトウェアが不安定になってすぐに異常終了してしまう問題も明らかになった。

● マウナケア試験観測 (2003/3/17-19)

我々の DIMM システムが示すシーイング値の絶対キャリブレーションを行うため、

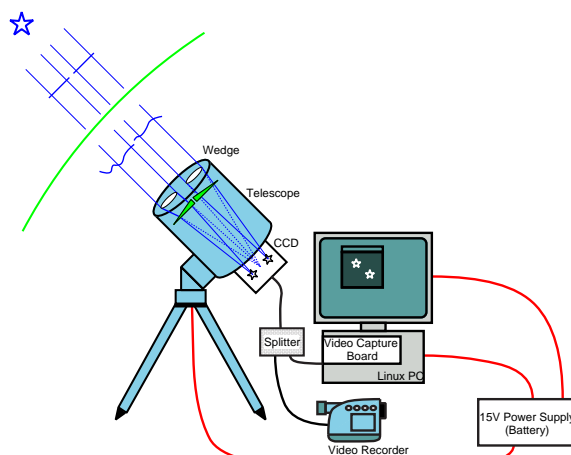


図 5.12: シーイングモニタのシステム概略

アパーチャー口径	74mm
アパーチャー数	4
アパーチャー間隔	205mm
ピクセルスケール	0."67 × 0."63
観測波長	5500Å
限界等級	~1.5 等 (1msec 露出時)
データ取得 PC	Storm Squid mini
OS	Vine Linux 2.6
画像取込ボード	VA1000Lite (AOpen) + Video4Linux

表 5.7: シーイングモニタ諸元



図 5.13: シーイングモニタをセットアップしたところ (アタカマにて)



図 5.14: マウナケア山頂での試験観測の様子

国立天文台ハワイ観測所の旧型 DIMM との同時観測をマウナケア山頂のすばる望遠鏡脇にて行った。この結果、以下の問題が判明した。

- インターレース問題：用いている CCD がインターレース方式であるために、時間が  $1/60\text{sec}$  離れた 2 つのフレームが同一フレームの奇偶列にそれぞれ格納されている。これを単一のフレームとして扱っていたために、実効的な星像の位置がなまされて相対位置の揺らぎが小さくなり、実際のシーイングよりも良い値を返していることが判明。

#### 5.5.4 アタカマ本観測

以上の試験観測で明らかになった問題を解決した上で、2003年10月上旬にTAOのアタカマでの本観測を行った (Uraguchi, F. et al., “Simultaneous seeing measurements at Atacama”, 2004, Proc. SPIE, 5489, 218)。この観測は、アタカマの多地点のシーイング測定を行うだけでなく、国立天文台ハワイ観測所の高遠グループの協力のもとに東京大学とハワイ観測所の同型のDIMMによる同時観測を行い、各地点の相対シーイングを測定することを目的としていた。

##### 測定地点

測定点は図 5.15 に示した 3 地点で、いずれかの 2 地点の同時測定を行った。

- TAO 気象モニタ設置場所 (以下「気象モニタ」と呼ぶ：4950m)  
アタカマの平原部のサンプルとして測定を行う。
- チコ山山頂 (「チコ山頂」：5150m)  
コーネル大のグループが以前測定を行っており、非常に良いシーイングの値を出し

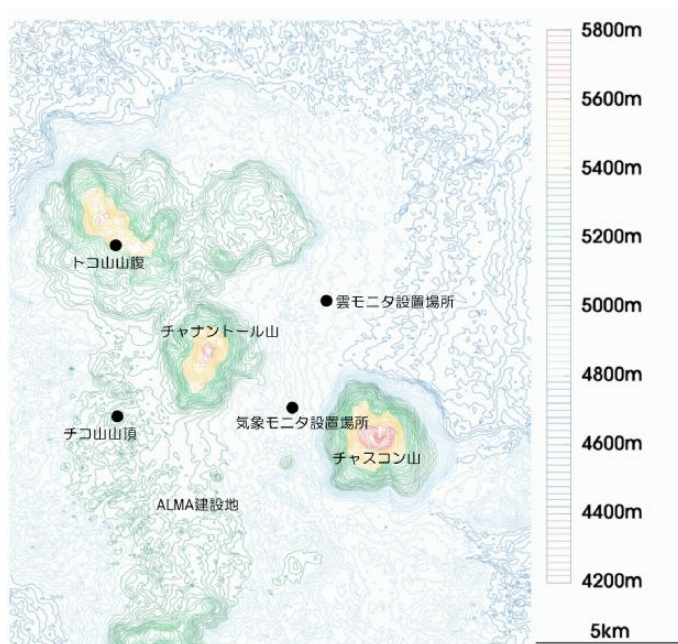


図 5.15: アタカマでのシーイング測定地点

ている。彼らの結果との比較という意味でも測定を行うべき地点

- トコ山中腹（「トコ山腹」：5430m）

標高が5430mと、非常に高い。山頂ではないので接地境界層の影響が心配されるが、Chajnantor山頂にもっとも近い条件の地点。これまでここまで高い地点でのシーイング測定の報告はないので、ここで測定すれば世界でもっとも高い地点でのシーイング測定となる。

## 測定結果と議論

測定は2003/10/4-10/7の3夜に渡って行った。図5.16、5.17、5.18に結果を示す。この結果から、以下のことが読みとれる。

- 気象モニタ脇について

気象モニタ横の地点は周辺のピークに比べて（気象条件にもよるが）シーイングがかなり悪いと見られる。Chicoで0."4を記録していたときに4"近くにまで悪化していたのは驚きだった。これはチャスコン山とチャナントール山の地表が放射冷却で冷え、それによって生じた重い空気が山肌を流れ落ちて（下降流）気象モニタ周囲に流れ込んで乱流を起こしているのではないかと推測される。

- チコ山頂とトコ山腹

高度が上がると上空の強い西風によって生じる接地境界層の乱流でシーイングが悪くなるのではないかと心配していたが、その逆に高度が上がるほどシーイングが良くなるという測定結果が出た。測定は前半夜1回のみ限定されており今後もデータを蓄積していく必要があるものの、これは、標高が上がるにつれてシーイングも良くなる可能性を示唆している。

- 測定値について DIMMによる測定値は大気乱流がKolomogrov乱流であると仮定している。しかし、大口径の望遠鏡ではこの仮定が成り立たなくなり、一般的にはDIMMによるシーイングよりも小さい値となることから、実際の望遠鏡で測定されるシーイングは今回の値よりもさらに良いと予想される。

すなわち、チャナントール山頂は

- － ベストシーイングが可視で0."4を十分に切る
- － 通常でも可視で0."6程度が期待できる可能性がある

など、マウナケア山頂に勝とも劣らないシーイングを持っている可能性が示された。

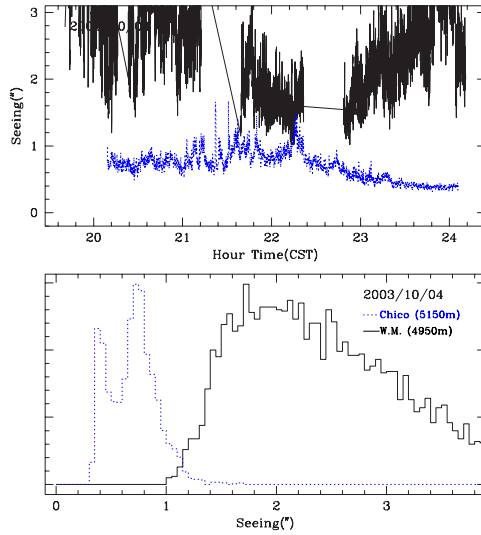


図 5.16: 2003/10/4 の測定結果。左が時間変動、右がヒストグラム。黒実線が気象モニタ脇、青点線がチコ山頂の値である。

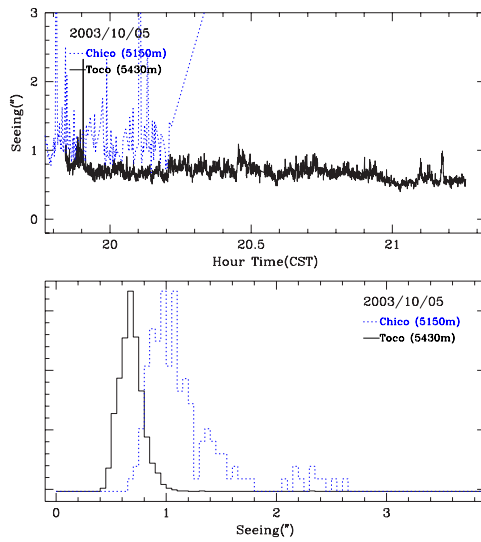


図 5.17: 2003/10/5 の測定結果。黒実線がトコ山腹、青点線がチコ山頂の値である。



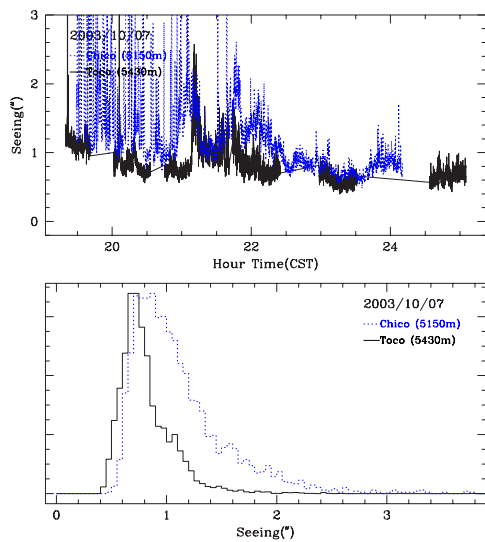


図 5.18: 2003/10/7 の測定結果。黒実線がトコ山腹、青点線がチコ山頂の値である。

## 5.6 今後の予定

現在、チャナントール山頂へのアクセス道路の建設を進めており、2005 年中に完成する予定である。その完成後、気象モニタ、雲モニタ、シーイングモニタを山頂に移設して本格的なサイト調査を開始する予定としている。



図 5.19: シーイングモニター装置を候補地へ搬入する途中で。アタカマ高原は草木 1 本見られぬほどの乾燥地帯だ。