

# マウナケア山頂 (JNLT サイト) の天文観測条件の評価

宮下曉彦, 野口 猛, 中桐正夫, 山下泰正, 西村史朗  
田鍋浩義, 安藤裕康, 成相恭二, 林 左 絵 子\*

## Astronomical Evaluation of Mauna Kea Summit for JNLT Site

by

A. Miyashita, T. Noguchi, Y. Yamashita, S. Nishimura,  
H. Tanabe, Y. Ando, K. Nariai, and S. Hayashi\*

(1989年9月30日受理)

### Abstract

The turbulent surface boundary layer has been monitored in the north west cone of Mauna Kea on the island of Hawaii. Measurements were made using meteorological tower instrumented with microthermal sensors.

Astronomical Evaluation of Mauna Kea Summit for JNLT Site has been done based on the above results together with the results of wind tunnel test of summit area.

We determined the best ground height for telescope facilities.

### 1. 概 要

ハワイ島マウナケア山頂の大型光学赤外線望遠鏡 (JNLT) 建設候補地で、「天文観測条件の調査研究」(サイトテスト) を、文部省科学研究費補助金 (海外学術研究) により、ハワイ大学の協力も得て行なった。

建設候補地点の選定に当たっては、既存のデータを広範囲に収集分析したほか、気象庁気象研究所との共同研究として山頂模型を用いた風洞実験を実施して、慎重に検討した。その結果、北西尾根上に候補地を選定し (図 1)、1987年の夏から秋に、30m の測定マストを立てて、望遠鏡の高さを最適化するための微熱乱流の垂直分布の実測を行った。

今回の調査の結果、この候補地の天文観測条件は予想通り優れていることがわかった。加えてシ

\* (Joint Astronomy Centre)

ーイングの乱れが風向と地形、地表からの高さによって大きく影響を受けていることが測定量とし

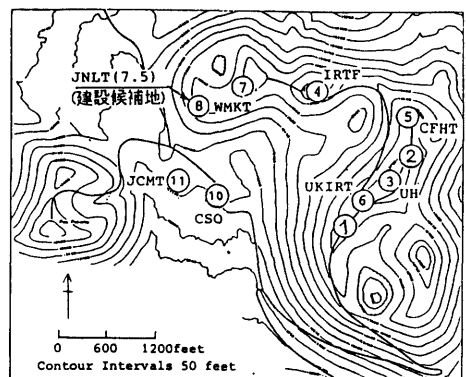


図 1 マウナケア山頂地形図  
東側尾根に UKIRT, UH88", CFHT 等が、北側の尾根に IRTF, WMKT が並び、その一番西に日本の大型光学赤外線望遠鏡 (JNLT) の候補地がある。

て明らかになった。一連の測定結果に基づき JNLT の不動点の高さが決定され、それにそって望遠鏡、ドームの設計が進められている。

## 2. 調査の目的

シーイングは天体の撮像観測の空間分解能を決定し、分光観測の能率をも左右する重要な要素である。望遠鏡による星像の大きさは望遠鏡の光学系の精度、追尾の精度等のほかに、大気屈折率の揺らぎによるシーイングの劣化が大きき要素となる。シーイングは主に3つの要因（自由大気、接地境界層、ドーム環境）に支配される。

自由大気の状態は大局的な気象条件と結び付いており、マウナケア山頂は世界で最良の自由大気状態を持つサイトの一つである。

接地境界層は大気と地表の境界層で、そこでの温度の乱れによって大気屈折率が乱され星像がぼけてしまう。一般的には、この層内では高さと共にシーイングの乱れは減少する。また、接地境界層ではシーイングは局所的な地形に大きく影響される。

ドーム内の熱活動はシーイングに直接影響を与えることが知られており、望遠鏡の温度を観測時の外気温にできるだけ近づけるようなドーム内の熱設計が必要となる。

そこで、今回の調査の目的はシーイングの乱れの一要因である接地境界層での屈折率の揺らぎ（地表乱流層）の高さに関する情報を JNLT 建設候補地で実際に測定して、JNLT が目標としているシーイングによる星像の劣化を 0.1 秒角以内に収めるためには、望遠鏡をどの位の高さに設置したら良いかを決定することである。

## 3. 測定

### 3.1 測定用マスト

大気屈折率の揺らぎ ( $C_N^2$ ) は、大気温度の揺らぎに起因しているから、この温度揺らぎの相関  $C_T^2$  (微熱乱流: Microthermal turbulence; 式(3)参照) を高さ方向に何点か測定すれば地表乱流層の様子を調べることができる。

$C_T^2$  を測定するために建設候補地に 30 m のマストを立て、高さ 6.5 m, 13 m, 27 m に 1 m 間隔の1対のマイクロサーマル・センサーを設置

した。30 m のマストの先端には風向、風速センサー、6.5 m のところには絶対温度計、湿度計を併せて設置した (写真1)。

### 3.2 マイクロサーマル・センサー

マイクロサーマル・センサーはハワイ大学天文学研究所 (IFA) のエラスムス博士の仕様により製作したもので、プラスチックの4本の柱に太さ 2.54 ミクロンのニッケル線を巻いた抵抗体である。抵抗値は約 260 オーム ( $\pm 5$  オーム) で、微小な温度変化による抵抗値の変化を電流値の変化によって測定することができる (写真2)。セン

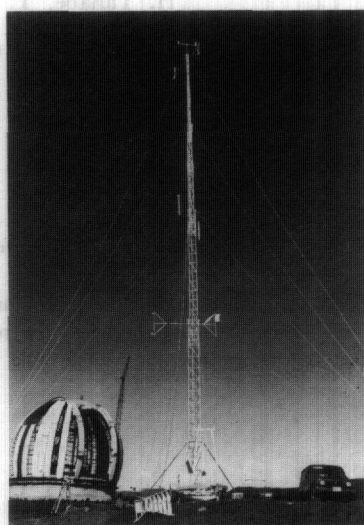


写真1 JNLT 建設候補地に立てられた 30 m の測定用マスト。後方は左から WMKT (建設中)、IRTF、CFHT の各ドーム。

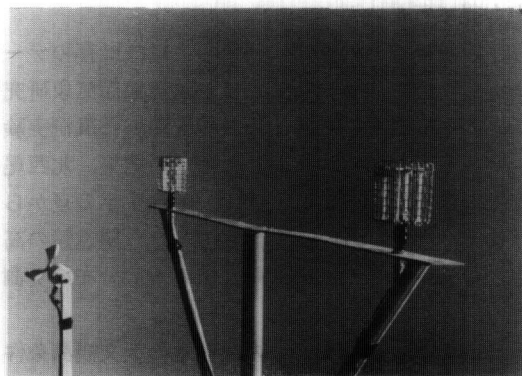


写真2 マストに取りつけられた マイクロサーマルセンサー

サーは外部からの衝撃を防ぐために金網で囲われているが、抵抗体に極めて細いニッケル線を使用しているため、氷雨が降る度に切断され度々測定が中断された。

### 3.3 データロガー

30m のマスト下には 21X と呼ばれるインテリジェントデータロガー、64K データモジュール、インタフェース、12V 蓄電池を防水ケースに入れて設置した。気温、湿度、風向、風速、microthermal のデータ取り込みのサンプリングタイムは10秒で、これらのデータの30分間毎の平均値、最高値、最小値を測定時刻とともに、データモジュールに蓄積した。適当な期間をおいてパーソナルコンピュータ (PC 9801 LT) によりフロッピーディスクに記録した。

### 3.4 全天カメラ

サイトテスト期間中の夜間の天候モニタとして、木曽の夜天光の観測に使用していた全天カメラを改修し、ハワイ大学 2.2m 望遠鏡ドームクーデ室屋上に設置した。この記録はマストでの測定期間が終了した後も林左絵子によって1988年秋まで続けられた。

この装置はフィルムの着脱以外は完全に自動化されたシステムであり、モータドライブ、タイマー、デライトスイッチにより夕方から明け方まで1時間/1コマの露光で繰り返し撮影し、毎夜11~12コマのデータを得た。(写真 3, 4)。



写真 3 全天カメラ装置

ハワイ大学 2.2m 望遠鏡のクーデ室屋上に据え付けられた魚眼レンズを用いた全天カメラ。自動で夜間のみ1時間に1コマ連続撮影する。建設中の WMKT ドームの左奥が JNLT 建設候補地。後方にマウイ島ハレアカラ山が見える。

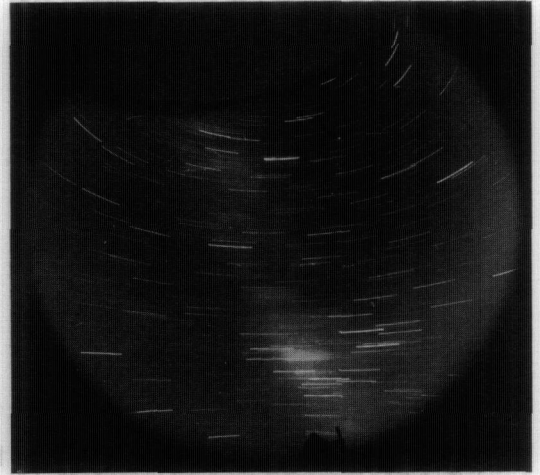


写真 4 全天カメラ写真の一例  
1987年8月26日 19<sup>h</sup>~20<sup>h</sup>

### 3.5 データ取得

このサイトテストには、田鍋浩義、安藤裕康 (5月25日~6月11日)、野口 猛 (5月25日~8月5日)、宮下暁彦 (7月24日~9月30日)、中桐正夫 (9月16日~12月5日)、成相恭二 (11月24日~12月5日) が出張し、ハワイ島ヒロをベースにして、山頂 JNLT サイトでのマスト建設作業、測定、その他の調査をそれぞれの期間について分担した。また、Joint Astronomy Centre の林左絵子が協力、助言した。

## 4. 測定データの解析

### 4.1 データの要素

マストでの測定で得られたデータは  $C_T^2$  (地上からの高さ  $h=27\text{m}$ ,  $13\text{m}$ ,  $6.5\text{m}$ )、気温 ( $h=6.5\text{m}$ )、湿度 ( $h=6.5\text{m}$ )、風速 ( $h=30\text{m}$ )、風向 ( $h=30\text{m}$ ) である (図 2)。これらのデータを

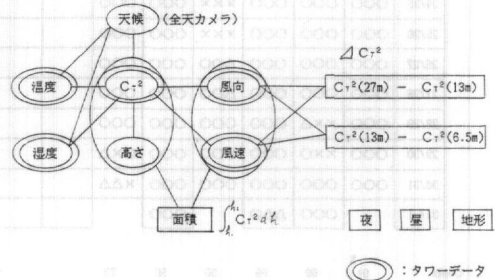


図 2 データの要素

全天カメラによる夜間の天候データ、地形、昼間との夜間の違いなどを考慮して解析した。

通常  $C_T^2$  の値は高さとともに小さくなるが日によってこれが逆になる場合が見られる。このときの気象条件はどうなっているのかを、特に風向、風速と地形との関係について詳細に解析した。

上記のデータ取得期間、風向に偏りが無かったことがデータの解析には好条件であった。また、全天カメラによる天候モニターは、マストによる

測定の結果を解釈するのに大変有効であった。

#### 4.2 風向、風速、天候の関係

図3と図4に風向、風速および天候の関係を示す。一般にマウナケアでは東西風が卓越していると言われているが、この期間そのような傾向は見られない。平均風速は5.5mであった。また、ある特定な風向のときに晴れる確率が高いという傾向は見られない。

表1に1987, June 13/14~1988 Oct. 7/8の全天カメラによる夜間の天候と晴天率などを示

表 1

Nighttime Weather Condition at Mauna Kea  
(All-sky camera observation at UH telescope building from June 1987 to Oct. 1988)  
O:Clear Δ:Partly cloudy X:cloudy

	1987						1988											
	JUNE	JULY	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUNE	JULY	AUG.	SEP.		OCT.
1/2		000	000	000	ΔΔΔ	000	×Δ0			ΔΔΔ		ΔΔΔ	×××		000		×××	1/2
2/3		000	000	ΔΔΔ	000	000	Δ00			0ΔΔ		×××	000		000		000	2/3
3/4		000	000	××Δ	×××	×Δ0			0ΔΔ	000	×××	×××	000		Δ××		000	3/4
4/5		000	000	×××	000	000			000	000	×××	000	000		000		000	4/5
5/6		000	000	×××	000	×××			000	000	000	000	000		000		000	5/6
6/7		000	000	×××	Δ×Δ	×Δ0			000	000	000		000		×××		000	6/7
7/8		000	000	000	×××	000			0Δ×	Δ×0	000		000		×××		000	7/8
8/9		00Δ	000	000	ΔΔ×	000			0ΔΔ	Δ00	000		000		ΔΔΔ			8/9
9/10		××0	000	0×Δ	××0	000			000	000	Δ×0		000		000			9/10
10/11		××0	000	×××	000	000			000	000	000		000		0××			10/11
11/12		000	000	000		000			000	000	000		ΔΔΔ		×××			11/12
12/13		000	000	000	000	000			Δ00	000	000		×××					12/13
13/14	000	000	000	×Δ×	000	000			000	000	000		×××		000			13/14
14/15	0ΔΔ	×××	000	000	×××	0Δ×			000		000		000	Δ00	000			14/15
15/16	000	×××	000	Δ××	×××	××Δ			000		×Δ0		ΔΔΔ	000	000			15/16
16/17	000	×××	000	×××	××Δ	000			000		000		000	Δ××	000			16/17
17/18	000	ΔΔΔ	000	×Δ0	××0	000			0Δ0		000		000	000	000	000		17/18
18/19	000	000	000	Δ×0	000	000			000		000		000	000	000	000		18/19
19/20	×00	Δ×Δ	00Δ	000	×ΔΔ	000			000		000		000	000	000	000		19/20
20/21	000	×××	000	000	×××	×××			000		000		000	000	ΔΔΔ	000		20/21
21/22	000	Δ00	000	000	×××	×ΔΔ			000		000		000	000	000	000		21/22
22/23	000	000	000	00Δ	×××	000			000		000		Δ00	000	000	000		22/23
23/24	0×Δ	000	000	×××	000	0×Δ					000		000	000	000	000		23/24
24/25	000	000	000	×××	000	000			000		000		000	000	000	×××		24/25
25/26	000	000	000	×××	000	000			Δ00		000		000	000	000	000		25/26
26/27	000	000	000	Δ00	000	000			××Δ		000		00Δ	000	000	×××		26/27
27/28	000	000	000	Δ00	000	000			××Δ		000		000	000		×ΔΔ		27/28
28/29	000	××Δ	000	000	000	000			ΔΔΔ		×××		000	000		×××		28/29
29/30	000	××0	000	000	000	0×Δ			000		××Δ		0	0ΔΔ		×××		29/30
30/31	000	000	000	000	000	×ΔΔ					000			×××		000		30/31
31/1		000	Δ00		000								×××		×××			31/1

	%																Total	
Clear	91	69	96	50	56	72			77	79	81		80	78	73	64		74.3 %
Partly cloudy	6	9	4	13	11	11			17	18	4		9	7	9	5		9.5 %
Cloudy	3	22	0	37	33	17			6	3	15		11	15	17	31		16.2 %

Wind speed - Wind direction Time : 20h-05h  
Mauna Kea JNLT Site 1987 Aug.23 - Nov.13 Weather : Fine

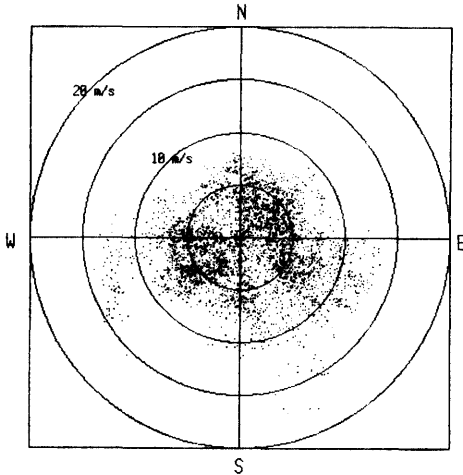


図 3 風向と風速 (30分間の平均値)  
測定期間中の30分間毎の平均値を昼夜すべてプロットしたもの。一般にマウナケアでは東西風が卓越していると言われているが、この期間そのような傾向は見られない。平均風速は 5.5 m である。

Weather - Wind speed, direction Time : 20h-05h  
Mauna Kea JNLT Site 1987 Aug.23 - Nov.13 Weather : Fine : +  
cloudy : |

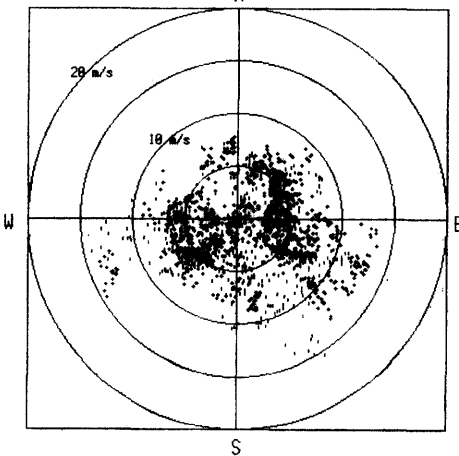


図 4 風向, 風速と天候  
夜間の風向と風速を天候によってマークを変えて示す。ある特定な風向の時に晴れる確率が大きいという傾向はない。

す。この期間の快晴率は 74% と高率である。また、一旦天気が崩れると 3~4 日連続して曇る傾向がある。

### 4.3 $C_T^2$ の値と高さ, 風向, 風速の関係について

$C_T^2$  - Height Time : 20h-05h  
Mauna Kea JNLT Site 1987 Aug.23, 24, 25, 27 Weather : Fine

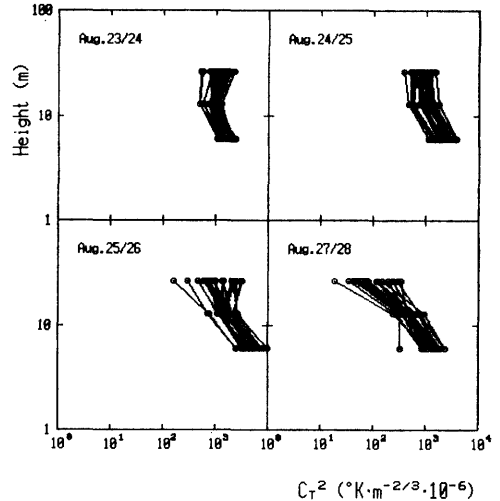


図 5  $C_T^2$  と高さの関係

例として 8 月 23 日~27 日の夜間のデータを示す。通常  $C_T^2$  の値は、高さとともに小さくなる。8 月 23 日~25 日までは地上からの高さが 27m での  $C_T^2$  の値が 13m の値よりも大きくなっている。この期間は Summit 方向から強い風が吹いていた。27/28 日には風もやみ、 $C_T^2$  の値は小さくなっている。シーイングの条件が良くなったことを示している。

$C_T^2$  - Wind speed, direction Time : 20h-05h  
Mauna Kea JNLT Site 1987 Aug.23 - Nov.13 Weather : Fine

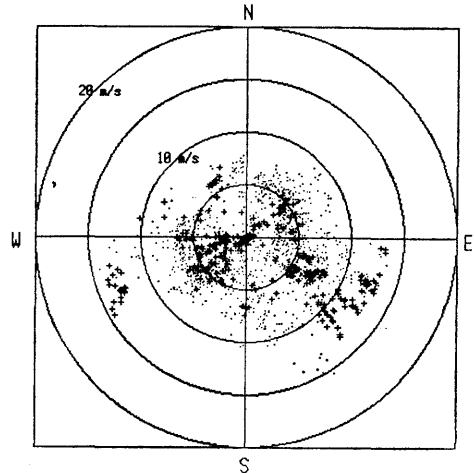


図 6 風速, 風向と  $C_T^2$  の逆勾配

- :  $C_{T^2}(27\text{ m}) \leq C_{T^2}(13\text{ m})$  の場合 (正常)
- + :  $C_{T^2}(27\text{ m}) > C_{T^2}(13\text{ m})$  の場合 (逆勾配)

$C_T^2$  の高さとの関係について、一例として8月23日～27日の様子を図5に示す。一般に  $C_T^2$  の

値は高さとともに小さくなる。しかし8月23日のように、13m と27m で逆転している場合もみられた。このとき何が起きているのかについて種々の相関を調べた。図6には風向、風速を  $\Delta \log C_T^2 = \log C_T^2(13\text{m}) - \log C_T^2(27\text{m})$  の値の正負でマークを変えてプロットしたものを、また、図7には、風速と  $\Delta \log C_T^2$  の関係を風向によって4分割したものを示す。

図8には天候が晴れの場合の高さと  $C_T^2$  の関係について、夜間(19:30-5:00)の30分間の平均値を測定全期間について示す。

図9にはシーイングの良否のインデックスとして  $\int_{6.5\text{m}}^{27\text{m}} C_T^2 dx$  の値を求め、この値と風向、地形の関係を示す。

#### 4.4 $C_T^2$ の値と温度、湿度、風向について

晴天時の  $C_T^2$  の値と温度の関係を図10に、 $C_T^2$  の値と湿度の関係を図11に、それぞれ風向によって4分割して示す。

### 5. 考 察

大気乱流に鉛直方向から入射する平面波によって生じる星像直径  $\theta$  (full width at half maximum) は

$$\theta = 5.3 \lambda^{-1/5} \left[ \int_z C_N^2(x) dx \right]^{3/5} \quad (1)$$

で与えられる<sup>2)</sup>。  $\lambda$  は波長 (m),  $z$  は高さ (m),  $\theta$  はラジアンで表される。一方、空気の屈折率の揺らぎの相関  $C_N^2$  と温度揺らぎの相関  $C_T^2$  との関係は

$$C_N^2 = \left( \frac{7.9 \times 10^{-5} P}{T^2} \right)^2 C_T^2 \quad (2)$$

で与える。ここで  $T$  は気温 (K),  $P$  は気圧 (mb) である。

一様均質な定常乱流モデルの理論によれば、 $C_T^2$  はある地点の一つの方向(ここでは高さ方向)の2点間 ( $x, x+r$ ) の温度揺らぎの時間平均と

$$C_T^2 = [T(x) - T(x-r)]^2 / r^{2/3} \quad (3)$$

の関係にあり、この測定では、 $r$  を1m にとり(3)式で  $C_T^2$  を計算した。ここで、 $C_T^2$  の高さの依存性を

$$C_T^2 = C_T^2(z_0) \exp[-(z-z_0)/z_h] \quad (4)$$

とする。測定データを解析した結果によれば、

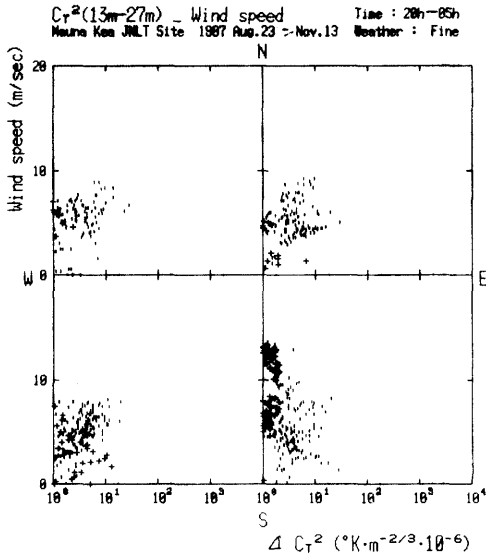


図7  $\Delta C_T^2$  と風速、風向

- ・:  $C_T^2(27\text{m}) \leq C_T^2(13\text{m})$  の場合 (正常)
  - + :  $C_T^2(27\text{m}) > C_T^2(13\text{m})$  の場合 (逆勾配)
- 逆勾配は、Summit 側からの風向では風速の大きい時に現れる。しかし、逆勾配の割合は小さい。一方 Poliahu 側からの風向では風速の小さい時に起き、しかも逆勾配の割合が大きい。

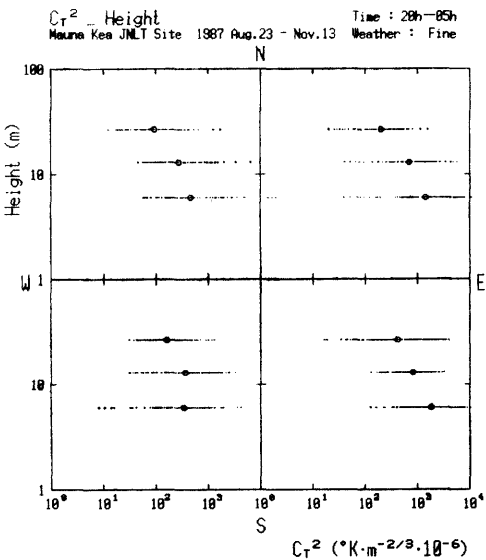


図8

マウナケア山頂 (JNLT・サイト) の天文観測条件の評価

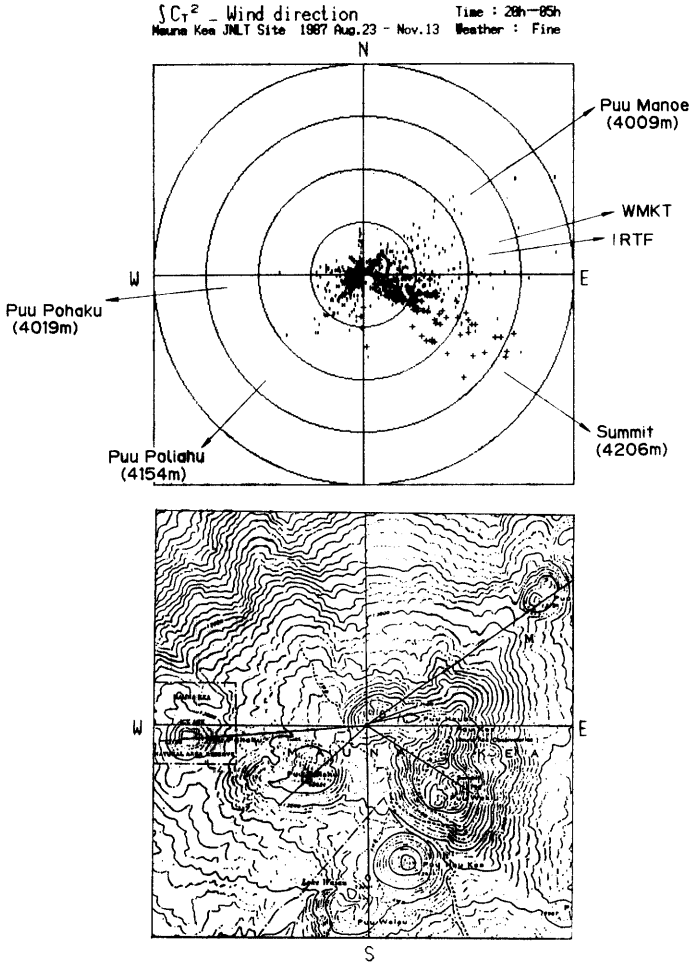


図 9  $\int_{6.5m}^{27m} C_T^2 dz$  の値をインデックスにした風向との関係

Summit, Puu Poliahu, IRTF, WMKT, Puu Manoe などが、シーイングに影響していることが良くわかる。

$z_0=27m$  にとった場合,  $z_h$  (scale height) は  $16.4m$  であった。従って (1) 式を高さ方向で積分すると

$$\theta = 5.3 \lambda^{-1/5} \left( \frac{7.9 \times 10^{-5} P}{T^2} \right)^{6/5} \times [C_T^2(z_0)]^{2/5} z_h^{3/5} \quad (5)$$

となる。いま,  $\lambda=550nm$ ,  $T=270K$ ,  $P=600mb$ ,  $z_h=16.4m$  とすると, 星像直径  $\theta$  と  $C_T^2(z_0)$  の関係は, 図 12 で表される。ドーム, 地表乱流層, 自由大気乱流層によるシーイング劣化への寄与がそれぞれ等しいとすると,  $0.1$  秒角以下の星像を得るには接地乱流層からの寄与は

$$\theta \leq 0.058 \text{ 秒角} \quad (6)$$

でなければならない。これは

$$C_T^2 \leq 10^8 (K^2 \cdot m^{-2/3} \cdot 10^{-10^{-6}}) \quad (7)$$

で達成される。

このことは, 今回のデータからみると  $z=27m$  の高さでは, 風向が SE で風速が大きい時 (Summit と UKIRT, UH88, CEHT の尾根による影響が現れる) 以外は, ほとんどの夜で達成されていることが判る (図 8)。

したがって,  $0.1$  秒以下の星像を得るためには望遠鏡 (の不動点) の高さを  $27m$  以上にすることが望ましい。現在, これに基づいて望遠鏡とド

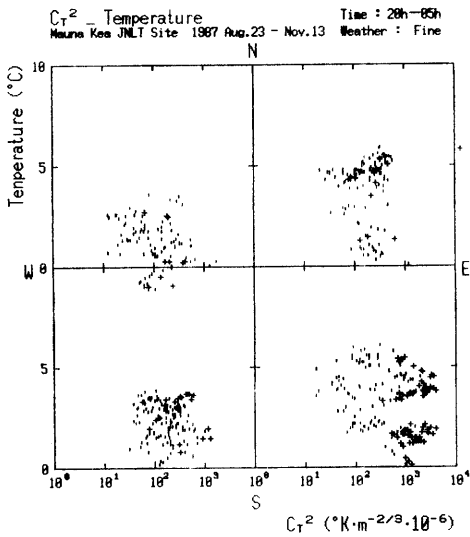


図 10  $C_T^2$  の値と温度

快晴の夜間の  $C_T^2$  の値と温度との関係，風向によって4分割．西寄りの風のときは，東寄りの風の時に比べて気温が低下し，一方，この時湿度は上昇する．特に風向が N~W の場合には，気温は氷点下になることがある．

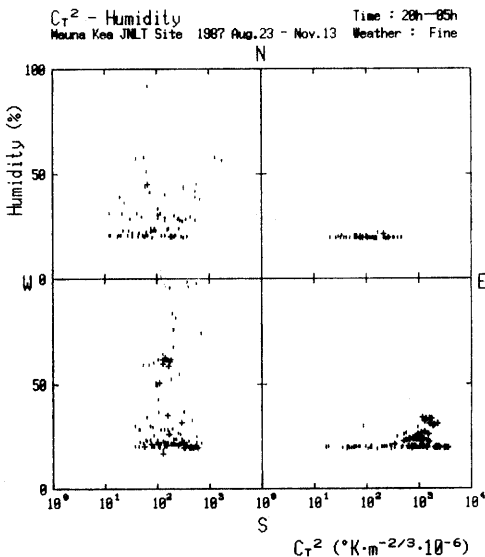


図 11  $C_T^2$  の値と湿度

快晴の夜間の  $C_T^2$  の値と湿度の関係，風向によって4分割．湿度 20% 以下はセンサーの特性で測定できない．東よりの風のときは，西よりの場合より湿度が低くなるのがわかる．

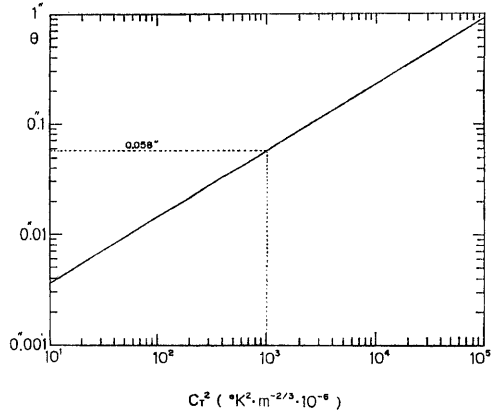


図 12 星像の大きさ  $\theta$  と  $C_T^2$  の関係

接地乱流層による星像の乱れの大きさを 0.058 角秒以下にするためには  $C_T^2 \leq 10^3$  の必要がある．このことは，地表からの高さ 27 m で達成される．

ームの基本設計が行なわれている．

データ解析および理論的考察の結果，マウナケア山頂の一般的气象の他，JNLT サイトでの微熱乱流の状態や，このサイト特有な様子がかかなり詳細に理解できた．JNLT サイトでの天文観測条件として次のようなことが言える．

- 1) 一般にマウナケアでは東西風が卓越していると言われているが，この期間そのような傾向は見られない．平均風速は 5.5m であった (図 3)．
- 2) ある特定な風向の時に晴れる確率が大きいという傾向はない (図 4)．
- 3) 風向が SE の時の Summit, SW の時の Poliahu など，大きな噴石丘が風上にある場合に  $C_T^2$  と高さの関係に逆勾配が起きる (図 6)．
- 4) その逆勾配は，Summit 側からの風向では風速の大きい時に現れる．しかし，逆勾配の度合は小さい．一方 Poliahu 側からの風向では風速の小さい時に起き，しかも逆勾配の度合が大きい (図 7)．
- 5) 風向が Summit 側の場合，Summit とその手前に位置する UKIRT, UH88, CFHT の望遠鏡が並ぶ尾根の影響が現れている．しかも， $C_T^2$  の値も全般的に大きな値になっ



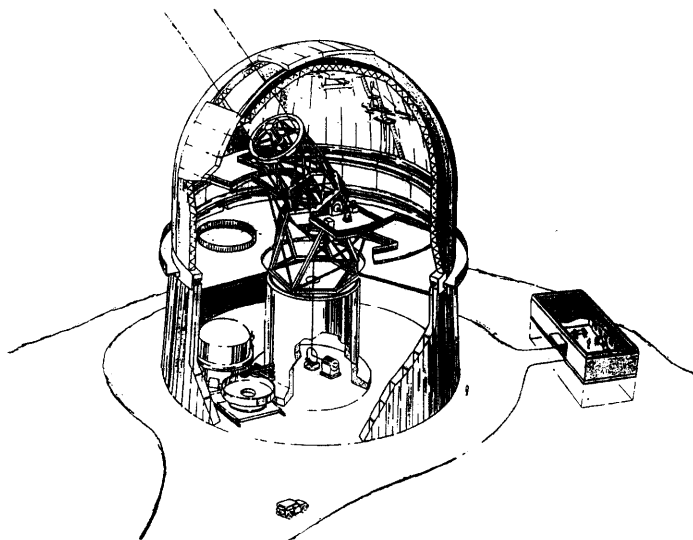


図 13 JNLT ドーム及び制御棟の概念図

ている (図 8). このことが, シーイングの劣化として顕著に現れている (図 9).

- 6) Poliahu 側の場合も, Summit 側ほどではないがシーイングは劣化している. そして, 13 m と 6.5 m での  $C_r^2$  の値が平均値でも逆勾配をもっているのが特徴的である. これは, Poliahu の山体の形状, JNLT サイトと Poliahu との距離, その間にある谷の冷氣などが複雑に関連した結果であろうと考えている. 気温の測定点が高さ方向で 2 点あれば, もう少し理解できただろうというのが, 気象の専門家のコメントであった (図 9).
- 7) IRTF のある尾根, WMKT (Keck ドーム), Puu Manoe などのシーイングへの影響も無視できない (図 9).
- 8)  $C_r^2$  の値と温度, 湿度のあいだには, ほとんど相関はない (図 10, 図 11).
- 9) 西寄りの風のときは, 東寄りの風の時に比べて気温が低下し, 一方, この時湿度は上昇する. 特に風向が N~W の場合には, 気温は氷点下になることがある (図 10, 11).
- 10) 地形がシーイングに及ぼす影響については, 模型による風洞実験の結果と定性的には良く一致している.

## 6. 結論

このサイトテストの結果, シーイングによる星像の劣化を 0.1 秒角以下に収めるためには, 望遠鏡の不動点の高さは 27m 以上にすることが望ましいことがわかった. JNLT ドームの頂点は 52 m で設計されており, サイトを 5 m 切り土して敷地造成をした場合, 隣のケック望遠鏡ドームの頂点とほぼ同じ高さとなるであろう.

シーイングは, 風向が Poliahu と一致する時を除けば, NE~N~W~S の時, 非常に良い条件を満たすのであろう.

今後の課題は, ドームによるシーイング劣化をいかに少なくできるかにある. 現在の計画では, 熱源となるものはできるだけドーム内に置かず地下通路でつなげた制御棟内に置くことで, ドーム内の熱制御を計算に乗せることができるようにする計画である (図 13).

## 7. 謝辞

今回のマウナケア・サイトテストはハワイ大学天文学研究所のエラスムス博士によって指導され, パーンス氏の援助によって行われました. また, ハワイ大学天文学研究所の支援はもとより, ハワイ島の人々の援助, 特にハワイ大学 2.2m 望

遠鏡のデークルーの人たち、ケック望遠鏡建設の現場たちの人たちの協力もありました。これらの人々に深く感謝いたします。

我々は、「局地気象ワークショップ」を数回開いて、サイトテスト以前には調査項目、測定方法などの検討、サイトテストの後にはその解析結果の検討、評価を行なってきました。気象研究所の藤谷徳之助氏、水沢緯度観測所（現国立天文台）の内藤 勲氏、国立天文台の吉沢正則氏に貴重な助言をいただきました。また、山頂模型による風洞実験では藤谷徳之助氏に指導していただきまし

た。これらの方々に深く感謝致します。

#### 参考文献

- 1) Ando, H., Noguchi, T., Nakagiri, M., Miyashita, A., Yamashita, Y., Nariai, K., and Tanabe, H., 1989, Proc. of Symposium on JNLT and Pelated Engineering Developments., eds. T. Kogure, and A. Tokunaga, p. 183.
- 2) Erasmus, D.A., Thompson, L.A. (1986), Proc. SPIE 628.