

# 太陽赤外スペクトルの観測 (II)\*

田 中 濟†・末 元 善三郎†

## 概 要

1970年9月14日、高度27 kmの気球より太陽光球中央部の高分散赤外スペクトルが観測された。波長域は $0.73\ \mu\sim 1.36\ \mu$ 、スペクトルの純度は $0.5\ \text{\AA}$ である。これより1,300本以上の太陽吸収線が検出された。

## 1. 序

われわれは1968年に気球より波長域 $0.98\ \mu\sim 2.19\ \mu$ の太陽赤外スペクトル観測に成功した[1]が、このとき得られたスペクトルは分解能が $10\ \text{\AA}$ と悪いため、研究上は不十分であった。そこで1969年にさらに高分散のスペクトル観測を試みたが、観測装置の不調のため観測は失敗に終わった。1970年度は装置に種々の改良をほどこし、太陽の高分散赤外スペクトル観測に成功した。

## 2. 観 測 装 置

観測装置は望遠鏡をかねた2軸サン・フォロワ、太陽アスペクトメータ、赤外スキャンニング・モノクロメータ、同期アンプからなる。このほか1,680 MHz FM-FM テレメータ(4チャンネル)、リモコン、方向規正装置、電源、バラストなどがアルミのアンクルで組んだ $70\ \text{cm}\times 70\ \text{cm}\times 70\ \text{cm}$ のゴンドラに収納された。全体は保温のため厚さ5~10 cmの発泡プラスチックでおおった。重量は約50 kgであった。

### (1) 2軸サン・フォロワ

ゴンドラ全体が宇宙研で開発された“よりもどし規正”[2][3]により、太陽の方位から $\pm 5^\circ$ 以内に規正されるので、サン・フォロワはそのうえでさらに $\pm 0.1^\circ$ まで規正を行なうことを目標として設計した。

サン・フォロワは望遠鏡をかねており、その先端には口径50 mm、焦点距離600 mmのレンズがとりつけられ、モノクロメータの第1スリット上に直径5.6 mmの太陽像が得られる。レンズで集光された太陽光は2面の $45^\circ$ 鏡で直角に曲げられ、垂直方向に導かれるが、この2面の $45^\circ$ 鏡が軸のまわりに回転して太陽を追尾する。

太陽センサはキャッチ用と精密フォロ用とがあつて、いずれも焦点距離200 mmのレンズとシリコン太陽電池を使用している。ゴンドラがほぼ太陽の方位に規正されているので、サン・フォロワは方位方向に $\pm 5^\circ$ のリミット・スイッチをもうけ、高度方向に $360^\circ$ 回転で

\* 宇宙研特別事業費による研究論文

† 東京大学理学部

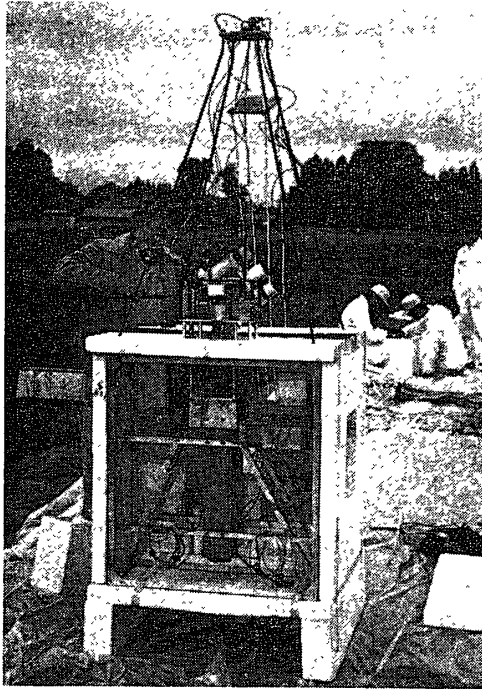


図 1 ゴンドラ

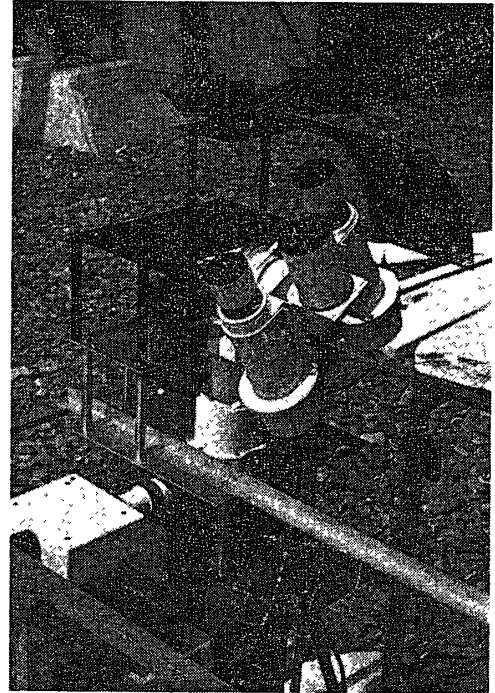


図 2 サン・フォロウ

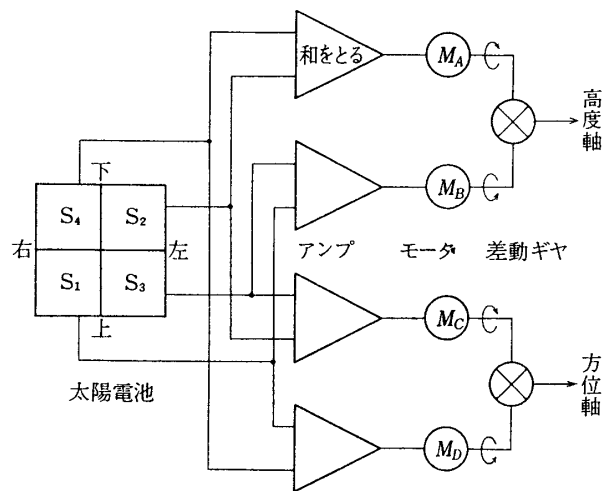


図 3 サン・フォロウ電気系接続図

きる形式とした。キャッチ用センサは水平方向に  $10^\circ$ 、上下方向に  $2.5^\circ$  の視野を有し、高度方向に回転して太陽をさがす。太陽をとらえるとリレーによりフォロ用センサに切りかえられる。

フォロ用センサは太陽電池を田型にはり合わせ、電流制御とするために  $2\Omega$  のシャント抵抗をつけたもので、 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$  の大きさを持ち、視野は約  $10^\circ$  である。上下、左右それぞれ 2 枚ずつの出力 ( $50 \sim 100\text{ mV}$ ) の和をとり、 $40\text{ dB}$  ほど増加してモータをまわす。

モータは各軸に2個ずつが差動ギヤを介してとりつけられ、逆回転するよう電氣的に接続されている。太陽センサの出力がバランスしていれば、一对のモータは同じ速さで逆方向に回転し、差動ギヤの出力は0となる。これは不感帯をなくすには有効な方法で、1968年から採用している。各軸の回転速度は最大で1回転約6分である。これからフォロのレスポンスは0.5秒となる。

太陽センサの出力は高度方向が360°回転なのでスリップ・リングを使用してとり出しているが、動力用電力はリングを介さないで接続している。

方位方向のリミット・スイッチは“よりもどし規正”が太陽から±5°以上はずれると働くが、コマンドにより復帰させることができる。

### (2) 太陽アスペクトメータ

太陽が正しくとらえられているかどうかはアスペクトメータにより監視する。

アスペクトメータは回転スリット、ファブリ・レンズ、光電管よりなる。回転スリットの上に太陽像が作られるが、その中心が回転中心と一致していれば、スリットを通る光量はつねに一定であり、ずれていけば光量に交流分が生ずる。これを光電管で測り、その交流出力の大きさからずれの量を求める。太陽面は一樣でなく周縁減光があるが、その影響は長波長ほど小さいので、光電管は8000 Åに最高感度をもつ(S-1特性)、浜松テレビのPV 11を使用した。

主望遠鏡の焦点近くにグレーティングの高次スペクトルをカットする目的で入れた東芝V-R 69フィルタを45°に傾け、その表面反射光を使ってアスペクトメータを働かせた。回転スリットの長さは8mmでこれは太陽半径(約16′)の約3倍に相当する。スリットの幅は0.1mmで、これにより0.1′程度の動きが監視できる。

### (3) スキャンニング・モノクロメータ

ツエルニー・ターナ型モノクロメータで、球面鏡は口径50mm、焦点距離554mm、グレーティングは1.2μブレーズ、1200本/mm、大きさは52mm×52mm、分解能約53,000

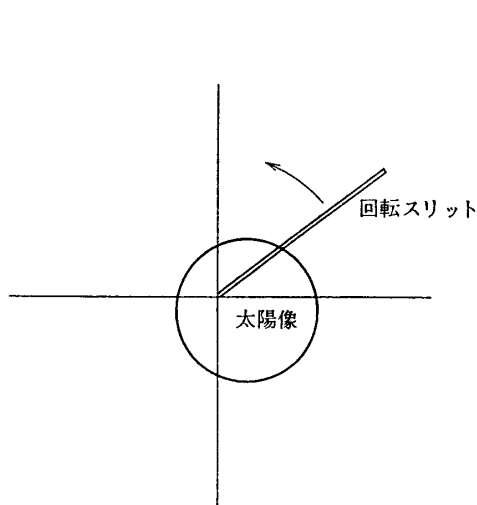


図4 太陽アスペクトメータの原理

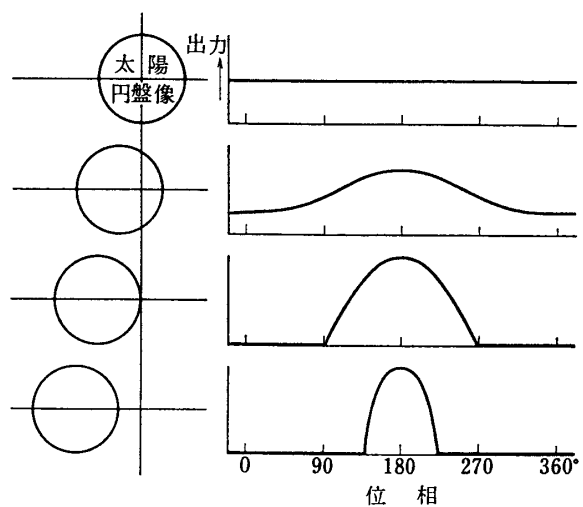


図5 太陽アスペクトメータの出力波形

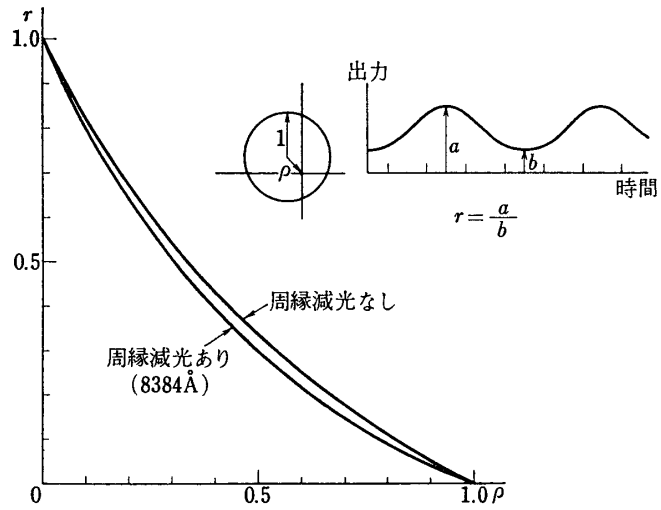


図 6 太陽アスペクトメータの理論特性 ( $\rho \leq 1$  の場合)

のものを使用した。スリット幅は第1スリット，第2スリットとも約  $20 \mu$  で，これはスペクトルの純度約  $0.2 \text{ \AA}$  に対応する（後述）。スリットの長さは第1スリットが  $1 \text{ mm}$ ，第2スリットが  $0.5 \text{ mm}$  で，第2スリットにはアメリカのインフラレッド・インダストリー社の PbS 検出器 B3-SA 19（感光面の大きさ  $0.38 \text{ mm} \times 0.63 \text{ mm}$ ）がとりつけられている。第1スリットの長さを第2スリットより長くしたのは，スキャンを行なった場合に調整の悪さやガタにより，スペクトルが少し上下にずれるのをカバーするためであって，有効長は第2スリットと同じに  $0.5 \text{ mm}$  である。 $20 \mu \times 0.5 \text{ mm}$  は太陽上  $0.11' \times 2.9'$  に相当する。

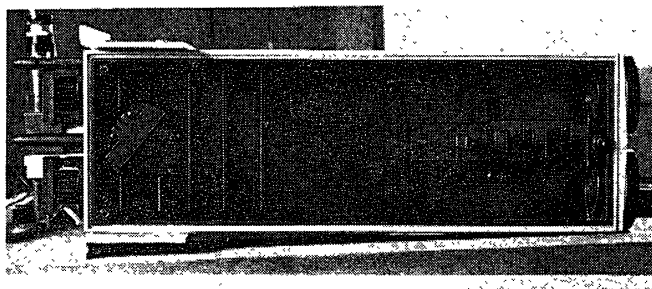


図 7 赤外モノクロメータ

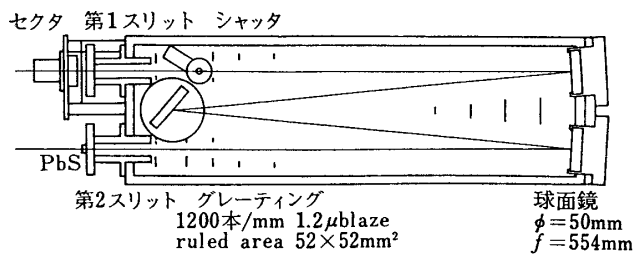


図 8 赤外モノクロメータの構造

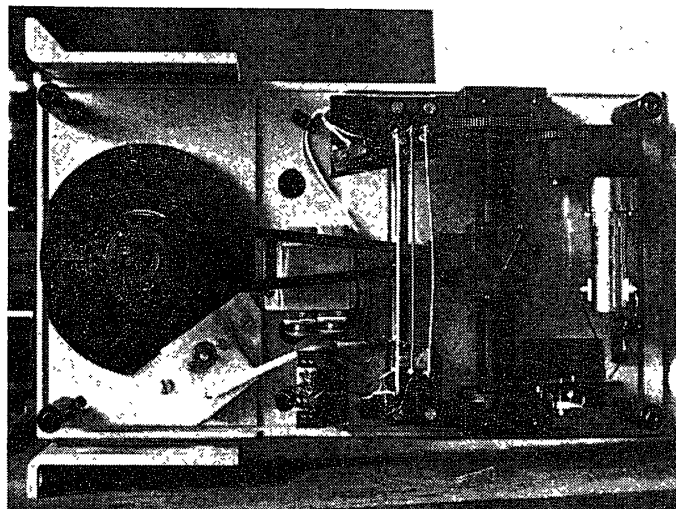


図 9 サイン・バー

スキャンは長さ 175 mm のサイン・バーによるグレーティングの回転によって行なった。波長域  $0.73 \mu \sim 1.36 \mu$  のスキャンに要する時間は約 64 分で、リミット・スイッチとラッチング・リレーにより自動往復スキャンが行なわれる。長波長端ではもう一つのマイクロスイッチによりソレノイドを働かせ、シャッタをしめてスペクトル・スキャンの上にダーク・レベルが入るようにした。

第1スリットの前には 16 枚羽根、500 Hz の回転セクタをとりつけ、光をチョッピングした。

#### (4) 同期アンプ

PbS の出力は 1.5 mV 程度であるから、テレメータの入力レベルである 0~5 V にもってゆくには 66 dB 程度の増幅が必要である。このうち 46 dB を同期検波以前の交流増幅、20 dB をオペレーショナル・アンプによる直流増幅にうけもたせた。

PbS の出力インピーダンスが  $2 M\Omega$  程度あるため、初段は東芝の FET 2SK 12 を使用し、あとはマルコンの厚膜 IC を使用した。PbS は冷えると感度があがるので、上空での温度変化にそなえてサーミスタによる利得調整回路を組み込んだ。同期検波は回転セクタから近接スイッチによってとり出した 500 Hz の同期信号を使い、低周波トランスとゲルマニウム・ダイオードによって行なった。帯域幅をきめる時定数は 10 ms にとっている。直流増幅はフィルブリック/ネクサス社の IC を使用した。

### 3. 観 測

気球は  $5,000 \text{ m}^3$  (B<sub>5</sub>-21) を使用した。放球は 1970 年 9 月 14 日 8 時 0 分 (日本標準時)、原町市大気球実験所から行なわれた。9 時 23 分、気球は原町市東方 55 km の海上、高度約 27 km で水平浮遊に入った。その後、気球は西方に流れ、原町市西方 130 km に来た 13 時 48 分カタを働かせてゴンドラをパラシュートにより落下させた。観測器機は喜多方市に待機していた回収班により、ただちに回収された。気球の最高到達高度は 28 km、平均の観

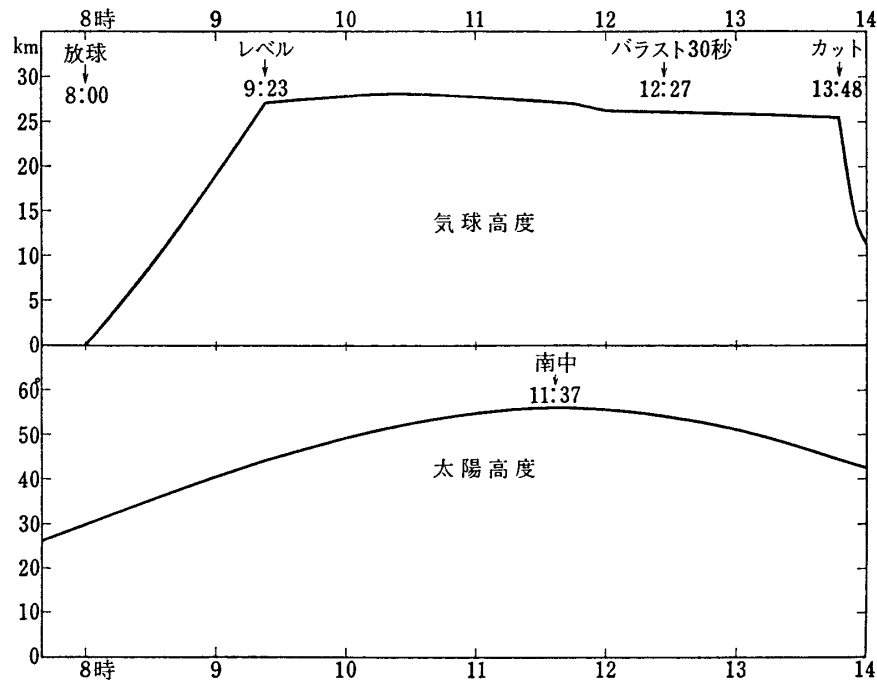


図 10 1970年9月14日 B<sub>5</sub>-21 飛揚データ曲線

測位置は東経 139°.8, 北緯 37°.5 であった.

観測は太陽の南中 (11時 37分) をはさんで, 9時 27分から 13時 48分まで4時間半にわたって行なわれた. この間, “よりもどし規正” が不安定になって数回ほど規正がはずれ15分ほど観測不能な時間ができたが, アスペクトメータのデータからおおむね良好に $\pm 0.1^\circ$ 以内の規正が行なわれたことがわかった. 平均の規正精度は 3', 最良は 2' であった.

テレメータの出力は理化電機のペンレコーダ (記録紙幅 250 mm, ペンスピードはフルスケール 1/3 秒) で記録をとった. 記録紙送りを 500 mm/min としたので, スペクトルは  $0.20 \text{ \AA/mm}$  で記録され, 15 m 巻紙 9本に 4 スキャン以上のトレースがえられた.

#### 4. 観測の整約

観測中の太陽高度は  $45^\circ \sim 56^\circ$  で, 天頂距離を  $z$  としたとき,  $\sec z = 1.42 \sim 1.20$  となる. 気球の高度は 26~28 km, したがって気圧は 16~22 mb であって, 観測器機と太陽間に存在する大気量は 150~250 m-atm となる. トレース上, 水蒸気の吸収線はまったく検出されず, 酸素分子による  $0.76 \mu$  (A band) と  $1.27 \mu$  の弱い吸収帯が検出されたのみである.

スペクトル線の同定は  $8770 \text{ \AA}$  までは Moore らの Rowland's Table の第 2 改訂版 [4],  $12000 \text{ \AA}$  までは Swensson らの表 [5], それより長波長は Mohler の表 [6] によって行なった. これらの表にないスペクトル線については付近のスペクトル線の波長から比例によって波長を決定した. サイン・バーを使用したため, トレースと波長の比例関係はかなりよい. ただし,  $1.2 \mu$  より長波長ではサイン・バーのコンタクト部分のガタのため, 波長送りが不安定になり, スペクトル線の形がゆがんでしまったものもある.

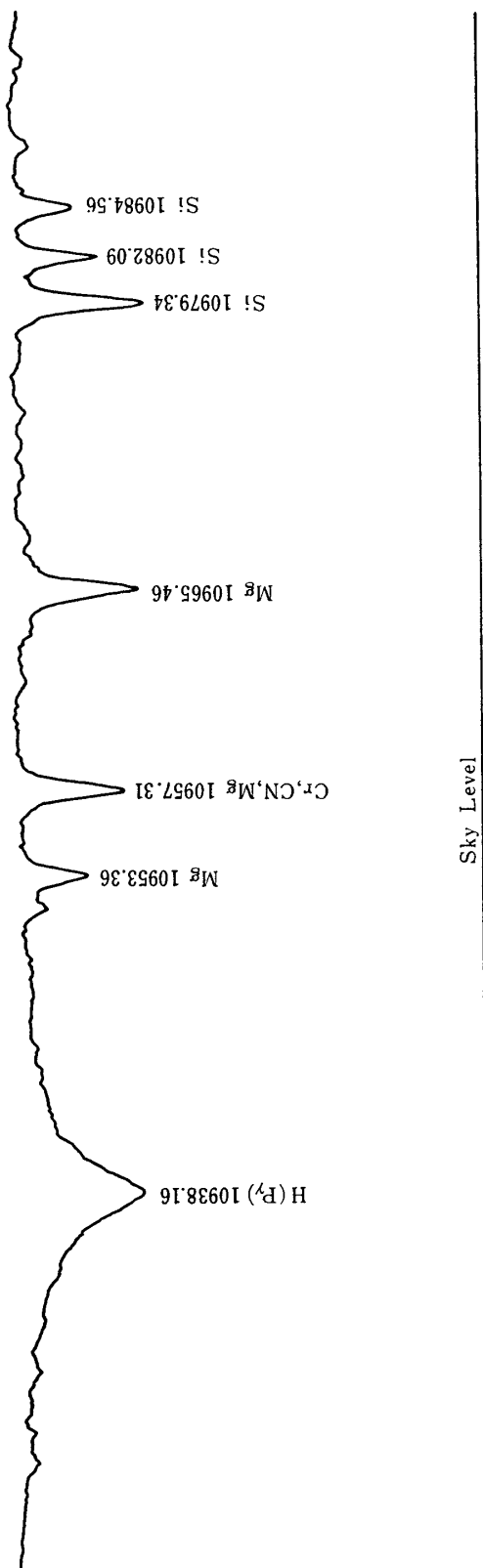


図 11 太陽赤外スペクトルの一部

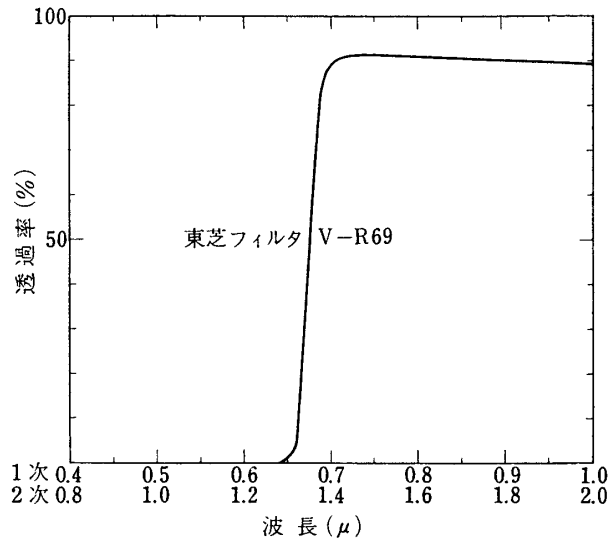


図 12 フィルタの透過率曲線

グレーティングの高次スペクトル・カット用フィルタとしては東芝の V-R 69 を使用したが、その透過率曲線はだいたい図 12 のようであった。6400 Å 以下では問題となるようなリークは見られない。逆にこの 2 倍の 12800 Å 以上では 2 次スペクトルの重なりがあるはずであるが、実際には 13200 Å で 1% 程度、13500 Å で 12% 程度の混入がみとめられた。

モノクロメータ内のストレー・ライトをチェックするため、地上で次のようなテストを行った。9400 Å, 11300 Å, 13500 Å 付近は水蒸気の強い吸収線があって、そのあるものはほとんど完全に飽和している。その吸収線の底がダーク・レベルとどれだけくいちがっているかを測定した。その結果 9400 Å および 11300 Å ではストレー・ライトは 0.3% 以下であること、13500 Å では吸収線の底が 10% あがっていることがわかった。13500 Å のものはフィルタによるグレーティングの 2 次スペクトルのリークと考えられ、モノクロメータ内のストレー・ライトは十分少ないと思われる。

## 5. 考 察

表 1 は検出された約 1,300 本のスペクトル線のうち、おもな吸収線 160 本 (等積幅がほぼ 100 Å 以上) をまとめたもので、同定欄に一のあるものは前記の表 [4][5][6] にないものである。各波長でそれぞれ四つのトレースがえられているので (部分的には二つのトレース、三つのトレースのところもある)、それぞれにおいて等積幅を測定し、その平均を等積幅の欄に示した。四つのトレース間の値のバラツキや測定精度を考えると、誤差は 10% 以内と推定される。2本の吸収線がブレンドしているものについては、それをあわせて測定した。Moore らの表 [4] には等積幅が示されているので、地球大気の吸収線とのブレンドのないもののみをいくつかくらべてみると、その一致がよいことがわかる (表 2)。くいちがいの大きいものは地球大気の吸収線が影響を与えていると判断されるものばかりであって、たとえば、7664.87 Å の K の吸収線の等積幅は Moore の表では 521 mÅ と与えられてい



表 1 太陽赤外スペクトル線

波長 (Å)	同 定	等積幅 (mÅ)	波長 (Å)	同 定	等積幅 (mÅ)
7288.74	Fe	} 193	8346.13	Mg	158
7289.19	Si		8387.78	Fe	200
7326.16	Ca	136	8468.42	Fe	150
7387.70	Mg	135	8498.06	CaII	1520
7389.39	Fe	160	8542.14	CaII	3600
7393.61	Ni	114	8556.80	Si	132
7409.10	Si	} 164	8648.47	Si	174
7409.35	Ni		8662.17	CaII	2790
7411.16	Fe	122	8674.76	Fe	113
7415.96	Si	133	8688.64	Fe	259
7423.51	Si	128	8736.04	Mg	215
7445.76	Fe	147	8752.03	Si	158
7462.34	Cr	135	8790.41	Si	} 146
7495.08	Fe	191	8790.49	Fe	
7511.03	Fe	210	8793.34	Fe	163
7586.03	Fe	147	8806.78	Mg	467
7616.98	Ni	147	8824.23	Fe	195
7664.29	Fe	} 331	8866.94	Fe	159
7664.87	K		8912.10	CaII	116
7698.98	K	159	8927.39	CaII	141
7742.72	Fe	131	8999.57	Fe	163
7748.28	Fe	} 212	9015.0w	H(P <sub>10</sub> )	820
7748.89	Ni		9061.44	C	171
7832.21	Fe	158	9062.24	Fe	} 178
7937.15	Fe	185	9062.46	C	
7944.00	Si	150	9078.28	C	129
7945.86	Fe	176	9088.34	Fe	} 244
7998.95	Fe	167	9088.53	C	
8046.06	Fe	150	9094.86	C	235
8085.18	Fe	128	9111.85	C	166
8098.75	Mg	118	9212.84	S	153
8183.25	Na	234	9229.0w	H(P <sub>9</sub> )	970
8194.84	Na	302	9237.54	S	110
8213.04	Mg	171	9255.79	Mg	233
8220.39	Fe	228	9405.75	C	253
8248.14	Fe	} 154	9413.50	Si	317
8248.80	CaII		9414.99	Mg	303
8327.06	Fe	192	9432.75	Mg	135
8331.93	Fe	152	9438.73	Mg	164
8335.15	C	131	9546.0w	H(P <sub>ε</sub> )	1080

波長につけたwは幅の広い吸収線を示す。

表1 太陽赤外スペクトル線(つづき)

波長 (Å)	同定	等積幅 (mÅ)	波長 (Å)	同定	等積幅 (mÅ)
9620.80	C	146	11197.27	—	106
9658.46	C	187	11251.18	—	112
9738.54	Fe	139	11253.15	Al	170
10049.33 <sub>w</sub>	H( <i>P</i> <sub>8</sub> )	1190	11254.97	Al	235
10145.58	Fe	126	11290.18	—	185
10216.34	Fe	141	11330.35	C	192
10327.35	SrII	149	11381.47	Na	180
10343.83	Ca	151	11403.82	Na	306
10371.28	Si	184	11439.11	Fe	117
10455.45	S	141	11485.68	—	112
10459.43	S	109	11591.49	Si	136
10585.14	Si	357	11593.56	Fe	154
10603.42	Si	270	11607.58	Fe	162
10627.63	Si	129	11610.56	Cr	} 259
10660.98	Si	293	11611.08	Si	
10683.09	C	229	11638.24	Fe	156
10685.36	C	171	11690.01	Fe	} 224
10689.74	Si	192	11690.24	K	
10691.27	C	267	11748.27	C	155
10694.24	Si	226	11753.34	C	176
10707.34	C	155	11754.81	C	181
10727.43	Si	252	11773.40	—	126
10729.58	C	150	11783.34	Fe	161
10749.39	Si	309	11828.24	Mg	615
10786.85	Si	274	11839.00	CaII	164
10811.13	Mg	387	11882.88	Fe	201
10827.14	Si	468	11884.12	Fe	158
10843.88	Si	214	11949.78	CaII	136
10868.82	Si	} 695	11973.08	Fe	260
10869.55	Si				
10885.38	Si	150	11991.63	Si	401
10914.24	MgII	} 194	12031.56	Si	625
10914.88	SrII				
10938.16 <sub>w</sub>	H( <i>P</i> <sub>7</sub> )	1480	12103.60	Si	317
10957.31	Cr, CN, Mg	198	12270.76	Si	280
10965.46	Mg	218	12395.90	Si	106
10979.34	Si	225	12433.41	—	127
10982.09	Si	123	12614.14	C	134
11018.00	Si	222	12638.78	Fe	115
11187.56	Si	194	12818.21 <sub>w</sub>	H( <i>P</i> <sub>β</sub> )	1450

波長につけた w は幅の広い吸収線を示す。

表 2 等積幅の比較

波 長	今 回 の 値	Moore 等
7389.39 Å	150 mÅ	144 mÅ
7445.76	147	178
7511.03	210	221
7586.03	147	132
7698.98	159	154
7832.21	158	150
7937.15	185	166
7944.00	150	147
7945.86	176	185
8194.84	302	304
8220.39	228	221
8327.06	192	193
8346.13	158	146
8556.80	132	134
8648.47	174	161
8688.64	259	268

るが、われわれの値は 7664.29 Å の Fe とあわせて 331 mÅ である。K の吸収線は O<sub>2</sub> の吸収線とブレンドしていて、Moore らは K の強度が O<sub>2</sub> より強いとしているが、実は K が弱いことがわかる。Moore らは Fe の等積幅を 120 mÅ と与えているので、K の等積幅は 331-120=211 mÅ である。ただし、気球からの観測でも O<sub>2</sub> の contribution が少しは残っていると思われる。こうした地上観測とのくいちがいは、地球大気の吸収の強いところでは随所に見られる。

スペクトルの理論的な分解能は純度 0.2 Å であるが、次に述べるようないろいろな理由で実際の分解能は悪化している。まずグレーティングの分解能は理論的には 1200 本×52 mm=62,400 であるが、グレーティングについてきたデータによるとその 85% の 53,000 である。口径のけられなどを考慮すると 50,000 以下になっているものと思われる。球面鏡の分解能はグレーティングにマッチするはずであるが、収差などのため多少は悪化している。しかし、分解能をもっとも悪化させるものはモノクロメータの熱膨脹であると思われる。モノクロメータはアルミニウム製で、その膨脹係数は  $2.3 \times 10^{-5} \text{ deg}^{-1}$  であるが、第 1 スリットから第 2 スリットまでの光路長は約 2000 mm あり、1° の温度変化に対して 0.046 mm の変化を起こす。スリット幅を 20 μ とした場合の焦点深度は 0.22 mm であって、温度が 5° 変化すると熱膨脹がこの値を越える。地上と上空での温度差（ゴンドラ内）は実測で 10~20° あるので、地上で十分焦点調整を行っても上空ではくるいが生ずる。一応上空ではモノクロメータの温度が 10°C になるとして、それにあわせて補正を行なったが、観測中にも 10° 程度の変動はありうるので調整がくるってしまう。焦点のずれはスリット幅が広がったのと同じ効果をもたらす。図 13 はスリット幅が変化したときの分散能の変化を示す。

得られたスペクトルを見ると、吸収線の半値幅は地上の高分散スペクトルで得られた本来の幅にくらべてかなり広い。ただし、吸収線ごとのバラツキがあって、もともと幅の広い吸収線もあることがわかるが、えられたスペクトル中もっとも幅の狭い吸収線をひろくと、8000 Å 付近では 0.8 Å, 10000 Å 付近で 0.7 Å, 12000 Å 付近で 0.6 Å 程度である。これらの吸収線の本来の幅は 0.2 Å 程度と推定されるので、分解能は 0.5 Å 程度まで悪化しているものと思われる。

観測したスペクトルは太陽光球中央部のものであるが、スリットの大きさが太陽面上で 0.11' × 2.9' に対応すること、方向規正のずれが平均 3', 最大 6' あるので、太陽中心から半径の半分程度までの部分がまざってきている。この値を  $\sin \theta$  とおくと  $\cos \theta > 0.87$  であって、赤外の周縁効果が小さいことを考えるとこれは中央部を測っているとしてさしつかえなからう。実際大部分の場合においては  $\cos \theta > 0.95$  となっている。

稿を終えるにあたり、観測全般にわたって協力して下さった東京大学宇宙航空研究所の西村 純教授をはじめとする大気球実験班の方々に対して衷心より感謝の意を表す。また観測を手伝って下さった東大理学系大学院生の平井正則君、トレースの整約に協力して下さった秘書の杉山昌子さん、観測装置の設計製作を引受け観測にもつきあって下さった中村勝重さんをはじめとする三鷹光器株式会社の方々にお礼を申しあげる。

1973年1月30日

### 参 考 文 献

- [1] 田中 濟, 末元善三郎: 太陽赤外スペクトルの観測(I); 宇宙研報告, 6, 316, 1970
- [2] 西村 純, 広沢春任, 太田茂雄, 大塚 豊, 奈良禧徳: よりもどし方式による方向規正; 宇宙研報告, 5, 132, 1969
- [3] 西村 純ほか (上に同): よりもどし方式による方向規正(II); 宇宙研報告, 6, 249, 1970
- [4] Moore, C. E., Minnaert, M. G. J., and Houtgast, J.: The Solar Spectrum 2935 Å to 8770 Å; National Bureau of Standards Monograph 61, 1966
- [5] Swensson, J. W., Benedict, W. S., Delbouille, L., and Roland, G.: The Solar Spectrum from  $\lambda 7498$  to  $\lambda 12016$ ; The Mémoires de la Société Royale des Sciences de Liège,

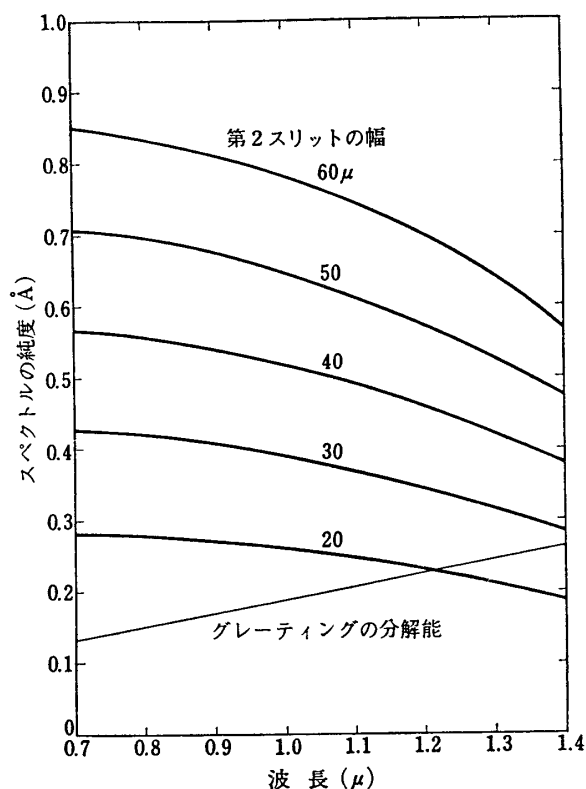


図 13 モノクロメータの分解能  
第1スリットと第2スリットを同じ幅とすれば、第2スリットが分解能を決定する。

Special Volume No. 5, 1970

- [ 6 ] Mohler, O. C. : A Table of Solar Spectrum Wave Lengths, 11984 A to 25578 A ; The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1955