

太陽赤外スペクトルの観測 I*

田 中 濟**・末元 善三郎**

概 要

1968年9月5日に放球された気球により、高度24 kmの成層圏から地球大気の吸収にさまたげられない太陽の赤外スペクトルが観測された。波長域は $0.98\mu\sim 2.19\mu$ 、スペクトルの純度は 10\AA である。これより $1\sim 2\mu$ 領域で等積幅 0.2\AA 以上の吸収線130本が検出された。

1. 序 論

太陽は光輝が強く感度の低いボロメータでも観測できるため、古くから赤外線測定が行なわれてきた。1800年に W. Hershel が赤外線を発見したのも太陽である。1900年には Langley [1] が $0.76\sim 5.3\mu$ の太陽赤外スペクトルを発表し、そこにあらわれている吸収帯が主として地球大気に含まれる分子によることをつきとめている。その後ボロメータの改良により、波長域は1940年頃までに 14μ まで拡張された。さらに長波長域では、 20μ 近傍に窓がある以外は電波領域まで地球大気の吸収があつて、地上からでは観測できない。

このように太陽赤外スペクトル観測の歴史は古いが、そこにあらわれる吸収帯がほとんど地球大気中の分子によるものであるから、太陽本体の研究というよりむしろ地球大気の組成の研究に応用されてきた。地球大気中に含まれる分子のうち、水蒸気による吸収は特に強く、波長域によってはほとんど飽和している。水蒸気量は湿度によって変化するのはもちろん、高度による変化もきわめて大きい。水蒸気は地表付近に集中しており、高度が10 km以上では空気の単位質量あたりに含まれる水蒸気量が地表の1/100以下に減少することが知られている [Gutnick; 2]。大気圧の変化を考慮に入れば、水蒸気による吸収は高度とともに急激に減少し、20 km以上ではほとんど無視できるまでになる。水蒸気について吸収の強いのは CO_2 で、特に 4.3μ の吸収は強く、高度30 km以上に昇らないと弱くならない。そのほか CH_4 、 N_2O 、 O_3 の吸収帯も観測されている。

さて、第2次世界大戦中に赤外線検出器の開発が進み、特に近赤外域においては硫化鉛(PbS)のようないままでのボロメータとはけたちがいに感度のよい光電導体があらわれた。これを使って Mohler *et al.* [3] は 2.5μ までの高精度の太陽赤外スペクトルのチャートを作っている。しかし、地上からの観測では地球大気の吸収にさまたげられて、太陽自体の吸収線の測定はかなり困難である。ところで、近赤外域での吸収はほとんど水蒸気のみを考えればすむので、気球によって20 km以上にあがれば、太陽のなまのスペクトルを得ることが

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 東京大学理学部天文学教室

可能になる。気球を使った観測も外国ではすでにいくつか試みられているようで、Goldman *et al.* [4] は予備報告を行なっている。

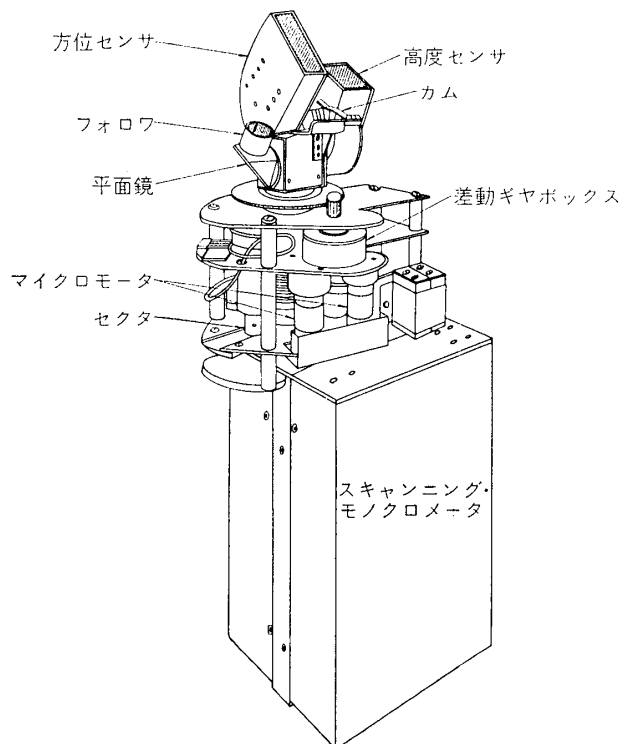
2. 観測装置

この観測は将来の高精度の観測の予備観測的意味をもっているのので、まず確実性の高いことを第1として装置の設計を行なった。スペクトルの純度を 10\AA 程度とすれば集光器としての望遠鏡がなくても光量的に十分であるから、分光器の入射スリットを日なたにさらす方式をとり、サン・フォロワーの精度が $\pm 1^\circ$ 程度ですむようにした。こうした観測には太陽全面を平均したふく射のスペクトルを得るという物理的意味をもたせることができる。

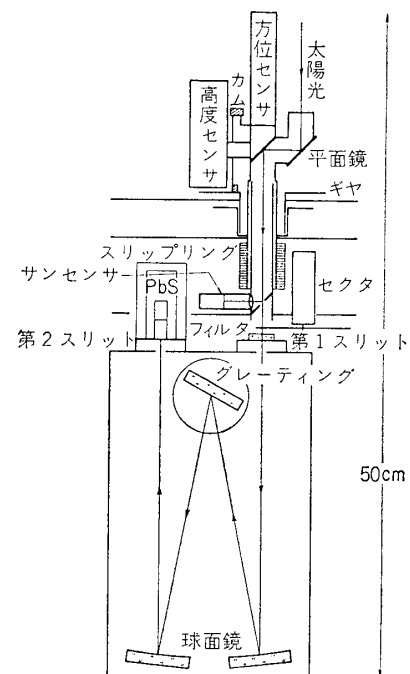
観測装置は2軸サン・フォロワー、スキャンニング・モノクロメータ、同期アンプ、1680 MHz FM-FM テレメータ（2チャンネル）、リモコン等気球関係機器および電池からなる。装置全体はアルミのアンクルで組んだ1辺60cmの立方体のゴンドラに収納し、保温のため厚さ5~10cmの発泡プラスチックでおおった。重量は約40kgであった。

(1) 2軸サン・フォロワー

サン・フォロワーは分光器の上部にあって、光軸と 45° に傾いた2面の平面鏡で太陽光を分光器内に導く（第1図、第2図）。水平軸のまわりに回転する第1鏡で光を 90° まげて水平方向に送り、さらに垂直軸のまわりに回転する第2鏡で光を 90° まげて下方に送る。各軸にはそれぞれ太陽センサがあって、まず方位センサが太陽をとらえてフォロワーを太陽に向け、



第1図 太陽赤外スペクトル観測装置（外観）



第2図 太陽赤外スペクトル観測装置（内部）

次に高度センサが上下してそれと同軸につけられた開口部を太陽に向ける。

各センサとも、キャッチ用 1 個とフォロー用 2 個、計 3 個の太陽電池が使用されている。まずフォロワーが一方向に動いてキャッチ用で太陽をとらえると、マイクロリレーがはたらくきフォローに切りかわる。フォロー用太陽電池の出力は直流増幅され、マイクロモータに伝えられる。マイクロモータは各軸に 1 対が差動ギヤを介してとりつけられ、おのおの逆回転するように接続されている。これらは無段変速の機械的サーボ系を構成しており、2 個の太陽電池が同じように照らされていれば、モータの回転はたがいに打ちけしあい軸は回転しないが、一方が強く照らされるとその出力がふえ、バランスするまで軸を回転させる。このようにスイッチのない方式を使えば、スタート・ストップの遅れが少なくすみ、不感帯がなくなってコントロールがスムーズになる。フォローのスピードは最大で方位が 1 回転 30 秒、高度が 45° を 30 秒である。

回転部分との電氣的接続はスリップ・リングを使ったが、高度関係の機械的接続をギヤとカムを組み合わせて行なっているので、高度用モータが固定のままですみ、動力用電力はいっさいスリップ・リングを通らないで供給されている。これは回転部分の軽量化にもおおいに役立っており、平面鏡などもできるだけ小型 ($34\text{ mm} \times 22\text{ mm}$) にして、フォロワーが回転することによる反動を最小限におさえた。ただ高度用のカムに少しガタがあったため、特に午後になって太陽の高度が減るセンスではフォローの精度が悪くなったようである。

サン・フォロワーが所定の精度で働いているかどうかをチェックするため、ごく簡単なサン・センサーを組み込んで観測中チェックを行なった。

(2) スキャンニング・モノクロメータ

スキャンニング・モノクロメータは口径 50 mm 、焦点距離 250 mm の球面鏡を 2 面使ったツェルニー・ターナー型で、分散素子としては 600 本/mm 、 1.6μ ブレーズ、有効面積 $32\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ (理論的分解能 19200) のボシュ・ロム製のグレーティングを使った (第 2 図)。

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い、スペクトルの波長域は $0.98 \sim 2.19\mu$ である。スクリューはピッチ 1.5 mm でマイクロモータにより駆動され、1 スキャンに要する時間は約 19 分であった。波長 10 \AA はスクリュー上で 61μ に相当する。

スリット幅は 1.6μ 付近でスペクトルの純度が 10 \AA になるように設定した。グレーティングを正の位置で使うことにすると、第 1 (入射) スリットは幅 195μ 、第 2 (射出) スリットは幅 157μ と計算される。スリットの長さは赤外検出器の感光部の大きさから第 2 スリットが 1 mm 、第 1 スリットはマージンをとって 2 mm とした。

スクリューの両端にはリミット用のマイクロスイッチをつけ、ラッチング・リレーによりマイクロモータの極性をかえて自動往復スキャンを行なう。スペクトルの波長をきめるため、スクリューをまわすギヤにマイクロスイッチをしかけてスペクトルにマークを入れた (247 \AA おき)。また第 1 スリット後方にはソレノイドを使ったシャッタをつけ、1 往復ごとに光をしゃ断してスペクトルにダーク・レベルが入るようにした (長波長端)。

グレーティングの second order を切るために、東芝の色ガラスフィルタ IR-D1B を使っ

た。フィルタのカットは 0.9μ 付近で、波長 1.8μ 以上では second order のスペクトルが混入するものと考えられる。このフィルタは 1.305μ にいやなディップが出るのが欠点である。

赤外線検出器は浜松テレビの PbS(P168)で、特に低雑音高感度のものを選んで使用した。PbS はパーマロイで2重に磁氣的電氣的シールドをほどこし、誘導雑音の減少につとめた。第1スリットの直前でセクタを回転させ、光のチョッピングを行なった。セクタ用モータはゼネレータ付きのマイクロモータで、ゼネレータ出力を位相検波の同期信号として使用した。マイクロモータにかける電圧は、定電圧電源でチョッピング周波数が 500Hz になるように調整した。

(3) 同期アンプ

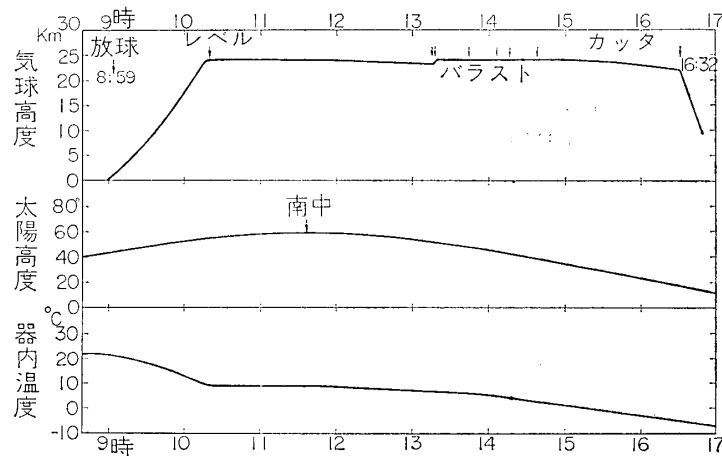
PbS は高インピダンス低出力なので、アンプの入力回路には FET (東芝 2SJ12) を使用し、SN 比の向上につとめた。テストの結果 PbS の出力が最大 2mV であることがわかったので、テレメータの入力を $0\sim 5\text{V}$ とするためには 66dB の利得が必要であった。

ところで、PbS は低温になると感度が指数的にふえるから(実測では 20°C さがると3倍)、その対策を考えておかないと上空で観測装置が冷えた場合、テレメータ入力オーバーしてしまう。サーミスタの温度に対する抵抗変化は PbS の感度変化ときわめてよく似ているので、アンプの中にサーミスタによる利得調整回路を組みこむことでこれは解決した。 66dB という利得は 25°C におけるもので、うち 46dB を検波以前の AC アンプ、 20dB をオペレーショナル・アンプにうけもたせた。

検波は低周波トランスとゲルマニウム・ダイオードを使って行ない、時定数は 22ms にとった。同期信号はセクター用マイクロモータのゼネレータの出力を位相シフト・アンプに入れ、低周波トランスを通してダイオードに加えた。

3. 観 測

気球は 2000m^3 を使用、1968年9月5日8時59分(日本標準時)原町市の宇宙航空研究



第3図 気球飛揚データ曲線 (1968-9-5)

所大気球実験場から放球され、10時20分原町市東方海上の高度24kmで水平浮遊状態に入った。その後気球は内陸に入り、平均の観測点の経緯度は東経140.°5、北緯37.°4であった。16時32分猪苗代湖上空にきたときカタをはたらかせた。ゴンドラは白河市西南の西郷村に落下し、翌6日16時20分回収に成功した。

装置はすべて順調にはたらき、ほぼ期待した結果がえられた。2チャンネルのテレメータで送られてきた信号は、それぞれのチャンネルにわけてペンレコーダで記録をとった。飛揚中サーミスタでゴンドラ内のPbS近傍の温度を測定したが、観測中はほぼ10°C程度に保たれていたことがわかった(第3図)。

スペクトルの記録は紙送りの速さ120mm/minで行なったので、10Åが1.9mmに記録された。飛揚中22のトレースが得られたが、種々の原因でそれぞれ不完全なところがあり、それらを何枚も重ねて満足すべきトレースを2個得ることができた。

4. 観測データの解析

地上テストで得られた波長マークを基準として、まず強い吸収線の同定を行なった。水素のPaschen seriesはよい指標になった。次に同定された吸収線の波長を使ってさらによい波長スケールをきめ、弱い吸収線の同定と等積幅の測定を行なった。サイン・バーの特長としてスクリュウの送りと波長は直線関係にあり、PbSの光量に対する直線性はチェックしてあるので、これはスムーズに行なわれた。

ここで波長目盛についてのべておきたい。気球からの観測は真空中に近い状態で行なわれているので、波長目盛は真空中の値に近いはずである。しかし、地上からの観測と比較する場合、むしろ標準状態での波長目盛を使っておく方が便利であると考えられる。よって、ここでは後者を使うことにした。

こうして1~2μの領域で検出された等積幅0.2Å以上の吸収線の表を第1表に示す。吸収線の同定にはBabcock and Moore [5]の表(写真によるもの、1.35μ以下)、Mohler *et al.* [6]の表(1.4μ以上)、およびMohler [7]の表(1.2μ以上)を使用した。表中等積幅の欄にbroadとあるのは幅の広い吸収を示し、数値に:(コロン)の付いているものは測定精度の悪いことを示す。同定の欄は元素記号で示したが、Hのあとのカッコ内はPaschen series (P_α~P_δ)とBrackett series (B₈~B_θ)のナンバリングをあらわす。+はブレンドを示し、その一方が不明のもの、カッコはcontributionの小さいことを示す。地球大気の吸収は1.268μのO₂のバンド・ヘッド以外検出されなかった。

5. 考 察

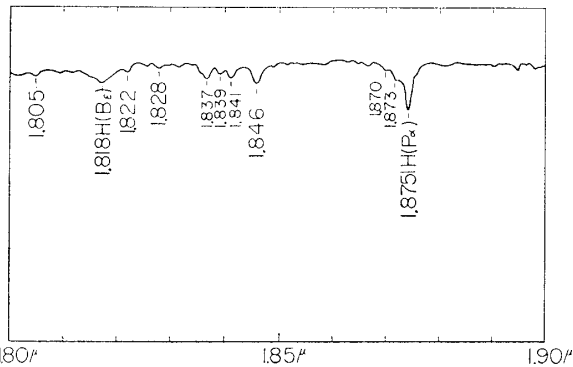
今回の観測はスペクトルの純度が10Åと分解能が悪く、十分な解析はできなかったが、それでも地上では水蒸気の吸収のためまったく観測できない1.32~1.42μ、1.8~1.95μ領域に新しい吸収線が多数検出された。その中でも1.8751μの水素のPaschen α線は顕著なものである(第4図)。また水素のBrackett seriesのように吸収線の幅が極端に広いので、低分散のためかえってはっきりと全系列が検出できたものもある。

第1表で同定ができていない吸収線(——で示す)については今後検討を要するが、同定

第1表 観測された等積幅 0.2 Å 以上の吸収線

波長	等積幅	同定	波長	等積幅	同定
1.0049 μ	1.1 Å	H(P ₈)	1.357 μ	broad	—
1.0457	0.3	S	1.362	broad	—
1.0585	0.3	Si	1.371	broad	—
1.0603	0.2	Si	1.383	0.4 Å	—
1.0661	0.2	Si	1.400	0.6	—
1.0691	1.0	C+Si	1.404	0.2	—
1.0728	0.3	Si+C	1.423	broad	—
1.0749	0.3	Si	1.429	0.2	—
1.0787	0.3	Si	1.4309	0.2	Fe
1.0811	0.3	Mg	1.4401	0.6	Fe
1.0827	0.5	Si(+He)	1.4513	0.3	Fe
1.0870	0.6	Si	1.4543	0.3:	C?
1.0938	1.3	H(P ₇)	1.4555	0.2:	C?
1.0965	broad	Mg?	1.4653	0.3	Fe
1.099	0.4:	—	1.471	0.2	—
1.102	0.2	—	1.4750	0.2	Fe?
1.119	0.3	—	1.483	0.2	—
1.125	0.4	—	1.4878	1.6	Mg
1.129	0.3	—	1.4956	0.2	Fe
1.138	0.3	—	1.5025	1.1	Mg
1.1404	0.3	Na	1.5040	Mg	Mg
1.159	0.3	—	1.5052	2.0	Fe
1.161	0.3	—	1.5208	0.2	Fe
1.1754	0.3	C	1.5220	0.2	Fe
1.178	0.3	—	1.5245	0.2	Fe
1.1828	0.8	Mg	1.5295	0.5	Fe
1.1876	0.5	—	1.5335	0.3	Fe
1.1988	1.1	Si	1.5377	0.2	Fe
1.2032	0.6	Si	1.5393	0.3	Fe+?
1.2084	0.5	Mg	1.5557	0.3	Si+Ni
1.2104	0.4	Si	1.5591	0.3	Fe+Si
1.2271	0.2	Si	1.568	0.5:	—
1.268	0.4	AtmO ₂ +Na	1.5741	1.7	Mg+Fe
1.2818	2.2	H(P _{β})	1.5749	Mg	Mg
1.3123	0.3:	Al	1.5766	1.5	Mg
1.3151	0.3:	Al	1.5820	0.4:	Fe+?
1.318	0.3:	—	1.5835	0.4:	Fe+Si+?
1.329	0.4	—	1.5869	0.2:	Fe
1.332	0.3	—	1.5888	2.4	Si(+Fe+Mg)
1.339	0.2	—	1.5960	1.1	Si(+Mg+Fe+Al)
1.350	0.2	—	1.5981	0.3	Fe

波 長	等 積 幅	同 定	波 長	等 積 幅	同 定
1.6007 μ	0.5 Å	Fe+ ?	1.7327 μ	1.1 Å	Fe
1.6040	0.3	Fe	1.737	broad	H(B _r)
1.6095	0.9	Si+Fe	1.741	0.4	—
1.616	broad	Fe+Si+Ca	1.747	broad	—
1.620	broad	Si+Ca	1.7617	0.6	C+Si
1.624	broad	Si+ ?	1.7771	0.3	Fe+ ?
1.6316	0.4	Fe	1.794	0.6	—
1.6364	0.4	Mg+Ni	1.805	0.2	—
1.6382	0.8	Si+ ?	1.818	very broad	H(B _e)
1.640	broad	H(B _o)	1.822	0.3	—
1.6445	0.3	Fe	1.828	0.2	—
1.6487	0.3	Fe	1.837	0.8	—
1.6521	0.3	Fe	1.839	0.4	—
1.6542	0.2	Fe+ ?	1.841	0.6	—
1.6562	0.2	—	1.846	1.1	—
1.665	broad	Fe+ ?	1.870	0.3	—
1.6681	0.3	Si	1.873	0.6	—
1.6719	0.5	Al(+Fe)	1.8751	3.0	H(P _{α})
1.6751	0.7	Al(+Fe)	1.919	0.8	—
1.680	very broad	H(B _v)	1.942	0.7:	—
1.688	0.4	—	1.9445	0.9:	H(B _s)
1.700	broad	Ni+Fe	1.9506	0.4	Ca+Si
1.7109	1.1	Mg	1.9722	0.5	C+Si
1.7226	0.4	Fe+Si	1.9777	0.6	Ca



第 4 図 観測された太陽赤外スペクトルの一部

できたものについては次のことがいえる. H, Fe 以外の元素では Na, Mg, Al, Si, S といった周期率表第 3 周期の元素が多い. その他 C, Ca, Ni が検出された. 分子については, この領域には強い吸収帯がなく検出されなかった.

地上で観測できる領域においても, 大気の吸収線とブレンドがひどいため, いままで測定がむずかしかった吸収線の等積幅の見当をつけることができた. たとえば, Mohler *et al.* [6] は表に与えた等

積幅の値がどの程度正確に測定できたかを, A, B, C, D, E とランクをつけてあらわしている. このうち, A (最良), B (誤差 10~25%) にランクされたものについて第 1 表との比較を試みると, その一致はかなりよい (第 2 表). ただし, 分解能が悪いため近接した吸収線の 1 本 1 本が分離できないものについては, 等積幅の和を比較してある (表中 * をつけたもの).

第2表 等積幅の比較

波長	等積幅	Mohler et al. [6]	Mohler [7]
1.2818 μ	2.2 \AA	— m \AA	2500 m \AA
1.4750	0.2	213*	218*
1.4956	0.2	198	210
1.5208	0.2	259*	257*
1.5295	0.5	550*	415*
1.5335	0.3	291*	275*
1.5960	1.1	1097*	1005*
1.6316	0.4	457*	496*
1.6364	0.4	452*	407*
1.6445	0.3	341*	278*
1.6487	0.3	316	281
1.6681	0.3	353*	388*
1.6719	0.5	595*	473*
1.7109	1.1	1033*	1039*
1.7617	0.6	596*	481*

すでにのべたように、波長 1.8 μ 以上では second order のスペクトルが混入しており、continuum がゲタをはいているものと考えられる。実際 1 μ 付近でのフィルタの透過率は相当悪いのであるが、太陽のエネルギーが 1 μ では 2 μ の 7 倍も強いので、2 μ 以上では second order の方が強くなってしまう。このため第1表は 2 μ まででカットした。また 1.8 μ 以上の吸収線の等積幅は過小評価になっていると考えられるが、second order の混入率がどれくらいかを定量的にきめることがむずかしいので補正量をはっきり示すことはしなかった。おおざっぱな見積りによれば、Paschen α 線のあたりでは、second order の continuum への contribution は 30% 程度と見込まれるので、 P_α 線の等積幅は 1.43 倍の 4.3 \AA となる。ちなみに Paschen series の吸収線の等積幅を Holweger [8] のモデル計算とくらべてみると第3表のようになる。彼は $\cos \theta = 1.0$ (disk center) と $\cos \theta = 0.3$ の値しか与えていないので、今回の観測のように太陽全面のふく射を平均したものを測定した場合とどう比較してよいのかわからないが、 P_α の値が低く出ていることは確かである。second order の問題は、今後

第3表 Paschen series 吸収線のモデル計算との比較

	波長	等積幅	モデル (Holweger [8])	
			$\cos \theta = 1.0$	$\cos \theta = 0.3$
P_α	1.8751 μ	4.3* \AA	9.16 \AA	3.39 \AA
P_β	1.2818	2.2	3.87	0.95
P_γ	1.0938	1.3	2.52	0.53
P_δ	1.0049	1.1	2.11	0.41

* second order の影響を補正した。

波長域をわけて観測すれば解決できるはずである。

太陽の物理的な研究を行なうには、理想からいうと 0.1 \AA 程度の分解能がほしいが、実際問題として分光器が非常に大きくなって実用的でなくなってしまう。とりあえず、次の目標として分解能 $0.5 \sim 2 \text{ \AA}$ で観測を行なうことを計画している。

稿を終えるにあたり、気球飛揚、観測全般にわたって協力をおしماず、有益な助言を下され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る。また装置のテストや観測に協力して下さった東大理学系大学院学生の平井正則君、結果の解析において種々のデータを提供して下さった東大天文学教室助手の田中捷雄君と大学院学生の中嶋浩一君に感謝する。さらに装置全般、特にサン・フォロワーの開発に貴重なアイデアを提供して下さった三鷹光器株式会社の中村氏、神田氏にもお礼を申しあげる。

1970 年 2 月 5 日

参 考 文 献

- [1] Langley, S. P.: Sur les Derniers Résultats Obtenu dans l'Étude de la Partie Infrarouge de Spectre Solaire; Ann. Ap. Obs., Smithsonian Institution, **1**, 1, 1900.
- [2] Gutnick, M.: Mean Atmospheric Moisture Profiles to 31km for Middle Latitudes; Applied Optics, **1**, 670, 1962.
- [3] Mohler, O. C., Pierce, A. K., McMath, R. R., and Goldberg, L.: Photometric Atlas of the Near Infrared Solar Spectrum, $\lambda 8465$ to $\lambda 25242$; Ann Arbor: University of Michigan Press, Michigan, 1950.
- [4] Goldman, A., Murcray, D. G., Murcray, F. H., and Williams, W. J.: Atomic Solar Lines in the Region $1 \sim 2 \mu$ Observed from a Balloon-borne Spectrometer; Astrophys. J., **153**, 1007, 1968.
- [5] Babcock, H. D., and Moore, C. E.: The Solar Spectrum, $\lambda 6600$ to $\lambda 13495$; Carnegie Institution of Washington Publication No. 579, Washington, 1947.
- [6] Mohler, O. C., Pierce, A. K., McMath, P. R., and Goldberg, L.: Table of Infrared Solar Lines, $1.4 \sim 2.5 \mu$; Astrophys. J., **117**, 41, 1953.
- [7] Mohler, O. C.: A Table of Solar Spectrum Wave Lengths, 11984 A to 25578 A; Ann Arbor: University of Michigan Press, Michigan, 1955.
- [8] Holweger, H.: Ein empirisches Modell der Sonnenatmosphäre mit lokalem thermodynamischem Gleichgewicht; Z. Astrophys., **65**, 365, 1967.