

気球高度における大気 H₂O スペクトルの観測*

芝井 広・奥田 治之・山上 隆正・西村 純
舞原 俊憲**・高見 英樹**・水谷 耕平**・廣本 宣久***
中川 貴雄†・小林 行泰††・J. A. Thomas#・R. Sood#

(1986年7月25日受理)

Atmospheric H₂O Spectra at Balloon Altitudes

By

H. SHIBAI, H. OKUDA, T. YAMAGAMI, J. NISHIMURA, T. MAIHARA
H. TAKAMI, K. MIZUTANI, N. HIROMOTO, T. NAKAGAWA, Y. KOBAYASHI
J. A. THOMAS, R. SOOD

Abstract: Far — infrared H₂O emission spectra of the upper atmosphere have been obtained during a balloon flight in Alice Springs, Australia. Analyses show that the emission features of the telluric H₂O are fitted by a model atmosphere of 245 K in mean temperature and of $1.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ in H₂O column density. We have also made an assessment for the telluric H₂O absorption via this model, thus enabling a correction of the observed astronomical spectra.

1. はじめに

遠赤外線波長域における天体輻射源の観測は、少なくとも 10 km 以上の飛行機高度でやっと可能になる。しかし地球大気中の H₂O の吸収は飛行機高度でもまだ非常に強く、H₂O 回転遷移線による吸収の多くは飽和しているため、その前後の波長域でも天体分光観測は

* 本研究は、宇宙研特別事業費並びに文部省科研費海外学術調査「気球による宇宙空間物理学の諸現象の調査研究」により行われた。

** 京都大学

*** 電波研究所

† 東京大学

†† 東京天文台

メルボルン大学（現在の所属ニューサウスウェールズ大学）

困難である。それに対して気球高度 (≥ 35 km) では水蒸気の個々の遷移線巾は $40 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度かそれ以下となり、天体からの輝線輻射の観測には、 H_2O 分子自身のを除いて十分に透過性が良くなる。 H_2O についても、天体の視野速度がある程度あれば、輝線スペクトルを直接測定することも可能となるであろう。

今回の気球観測では、オリオン KL 天体、RCW 38 及び土星の遠赤外域分光観測を行い、それらの広帯域連続スペクトル成分と幾つかの輝線スペクトル強度を測定したが [1]、同時に大気中の H_2O 輝線の遠赤外スペクトルも、45 から $115 \mu\text{m}$ の領域で得ることができたので、そのモデル解析を行った。

2. 分光器と観測

観測に用いた装置は、口径 50 cm の気球搭載赤外線望遠鏡 (BIRT) に取り付けられた、液体ヘリウム冷却のグレーティング分光器である [2]。分光器は Infrared Laboratories 社の HD-3(8) 型デュワーに収納され、約 2.8 l の液体ヘリウムにより上空の条件で 1.8 K 程度まで冷却される。BIRT のナスマス焦点に置かれた状態で、天体に対する有効ビームサイズは約 $2 \times 2 \text{ arcmin}^2$ である。波長分解能はグレーティング角によるが約 150~300 程度となる。検出器としては、波長 45~ $120 \mu\text{m}$ 領域用として Ge: Ga 光伝導素子を用い、波長

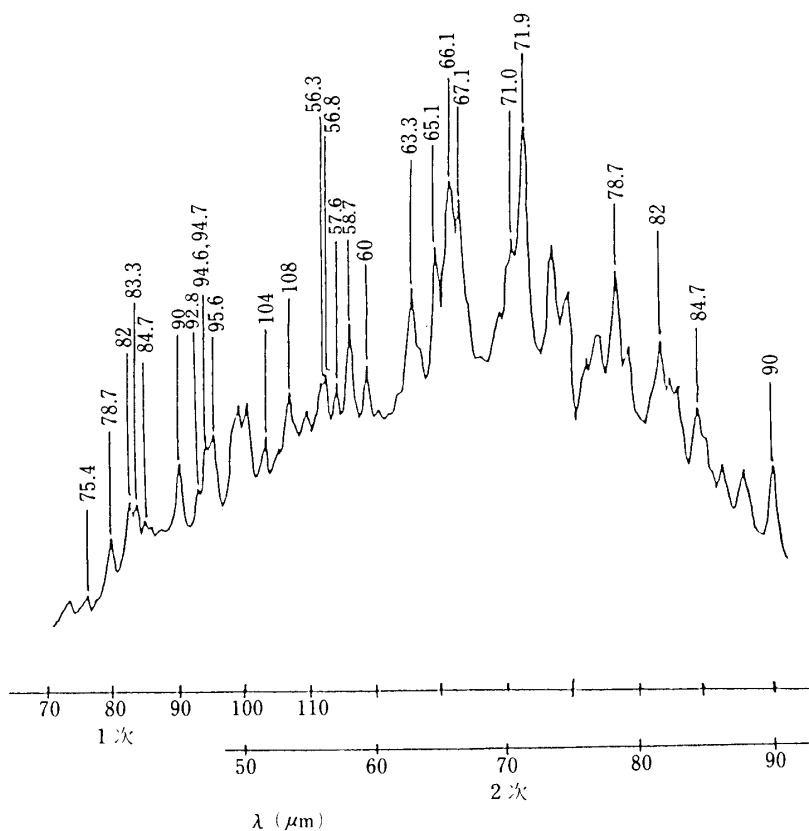


図 1 Ge: Ga チャンネルにおける H_2O emission のスペクトル。背景に液体窒素の液面を置く。

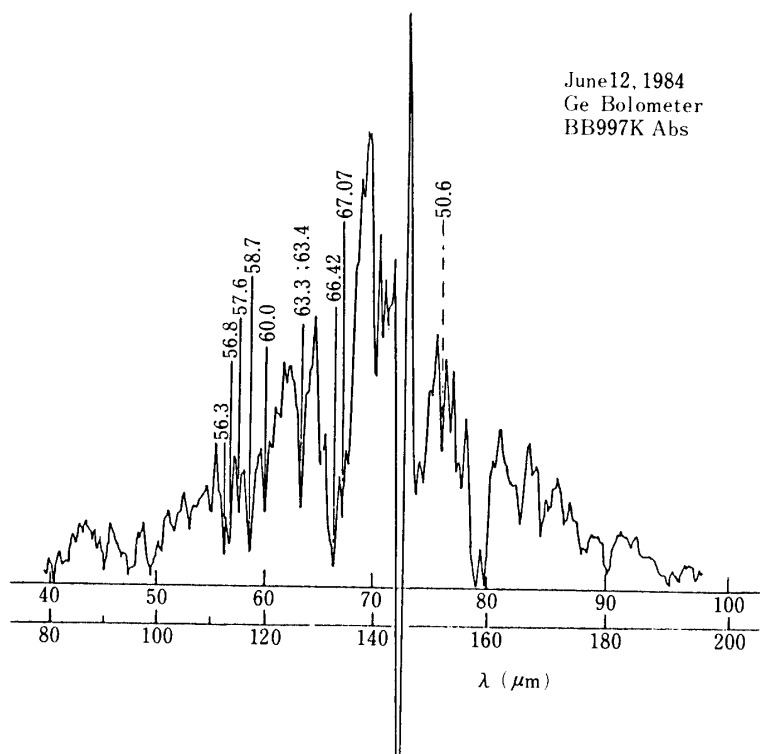
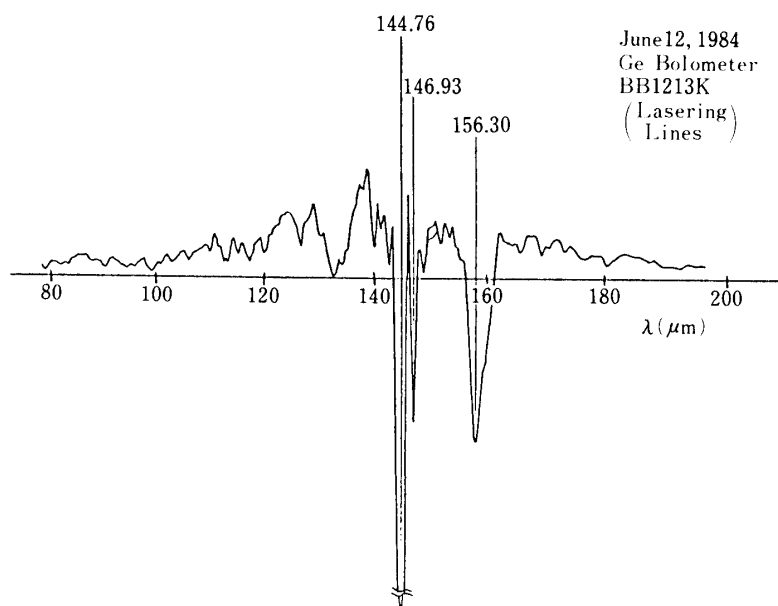


図 2(a) ボロメータチャンネルにおける H₂O 吸収スペクトル。黒体光源 997 K の場合。



(b) 同じく黒体光源 1213 K の場合。

90~180 μm 領域用には Ge ボロメータを用いた。しかし後者は実際の観測時には正常に動作しなかったため、以下の解析では 45~120 μm 帯のデータに基づいた結果を示す。

1) 実験室における大気 H_2O の吸収及び輻射スペクトル遠赤外線波長全域に亘って大気中の H_2O 分子による回転遷移線が強く輻射していることを、地上における分光器の性能を試験する場合に利用することもできる。特に分光器の波長の較正や、分解能のチェックが簡単に行える。例えば図1は、GRASP 分光器の窓の直前に平面鏡を置いて、液体窒素の液面を見た時に測られる大気中の H_2O 輝線のスペクトルである。これは、窓から液面までの約 20 cm の径路に存在する H_2O 分子 (約 10^{19}cm^{-2} のコラム密度) からの輻射で、分光器の波長較正をこれを使って完全に行うことができた。約 10^{19}cm^{-2} のコラム密度は、気球高度における残留大気光路中のそれとほぼ同じオーダーであり、分光器の総合的調整にも適した測定である。

図2(a), (b)はそれぞれ標準黒体光源の温度 979 K 及び 1213 K を背景として、光源とデュワー窓との間 (~15 cm) の径路に存在する H_2O による吸収のスペクトルを示している。この2つの測定は、Ge ボロメータのチャンネルの信号で、約 16 Hz 羽根チョップパによる周期整流出力のチャートである。図2(b)のように高温の黒体輻射を分光器に接近させて吸収の測定を行った場合は、見かけ上吸収が 0 レベル以下になる現象が見られる。一種

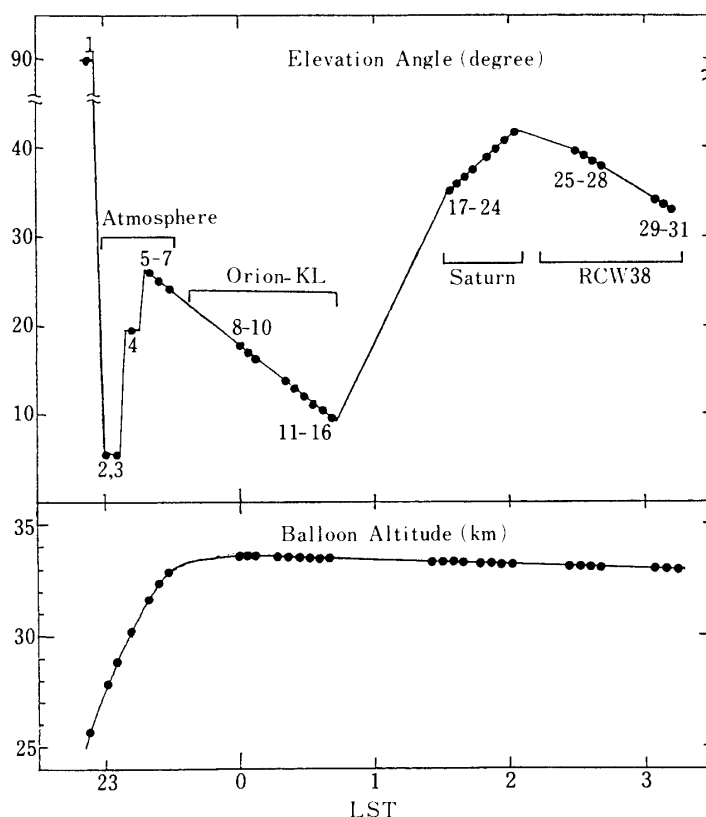


図3 上は気球望遠鏡の仰角、下は高度を示す。横軸は現地の標準時である。黒丸は、大気のスぺクトルが得られたことを示している。

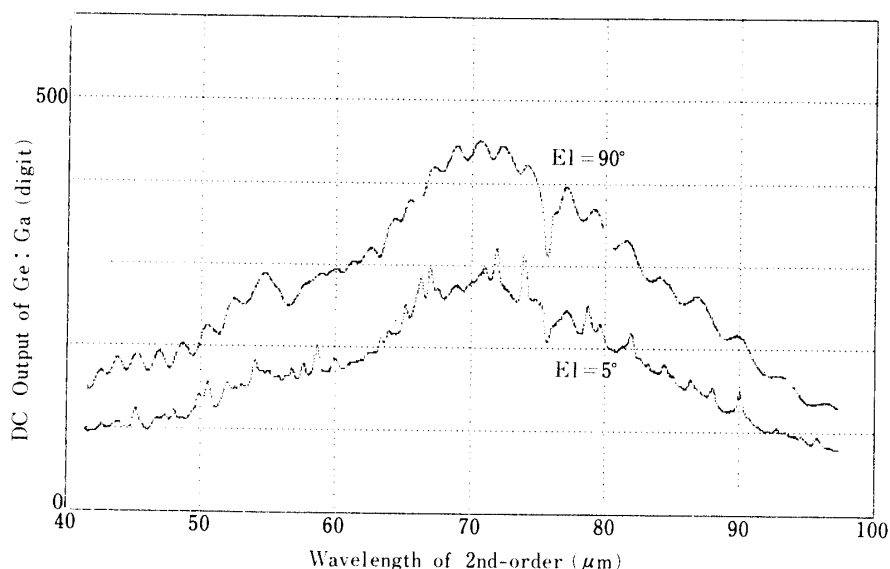


図4 生のスペクトルデータの例。仰角90度の時は、望遠鏡はフタでおおわれている。波打っているのはフィルターの干渉効果である。仰角5度の時は、水蒸気のラインが数多くみられる。

のレーザー的な効果と見られ、その最も強い線は波長 $144.76 \mu\text{m}$ の線と同定されている (para H_2O $4_{13}-3_{22}$ 遷移に対応)。

2) 観測の概要

GRASPによる実際の観測は、1985年3月8日、オーストラリアのアリススプリングス気球基地において行われた。気球飛揚高度は約33 kmで、ローカル時22:30から翌日3:30の約5時間間に、約30回のスペクトルスキャンを行っており、それらの観測時における H_2O 輝線スペクトルが、Ge:GaのDC出力信号として記録されている。代表的な全体のスキャンプロファイルを図4に示す。仰角 $El=5^\circ$ のデータは、気球高度約29 kmの時のものである。

このような大気放射の測定データには、同時に分光器デュワーの窓材の放射及びデュワー内の窒素部分に起因する熱放射成分が含まれているので、その量を推定する必要がある。そのため、1つは望遠鏡の蓋開け前のスペクトルスキャンデータから得られる約230 Kの黒体放射に対するレスポンスカーブを用いて、又1つの方法として、 $El \approx 5^\circ \sim 42^\circ$ の仰角に対する特定の H_2O ライン強度の依存性を調べることにより、窓の放射及び内部の熱放射による基準のカーブが決められた。そのベースラインに対する超過成分のみを大気放射として以後の解析に使う。例として、図5に、そのようにして求めた大気放射成分のみとみなされるスペクトルを示す。縦軸は、フラックスの基準として用いた230 K黒体放射に対する相対値で表わされている。横軸はグレーティングの2次の波長を代表として表示している。

ここに得られている全体の波長域の大気 H_2O 放射のプロファイルは、グレーティングの次

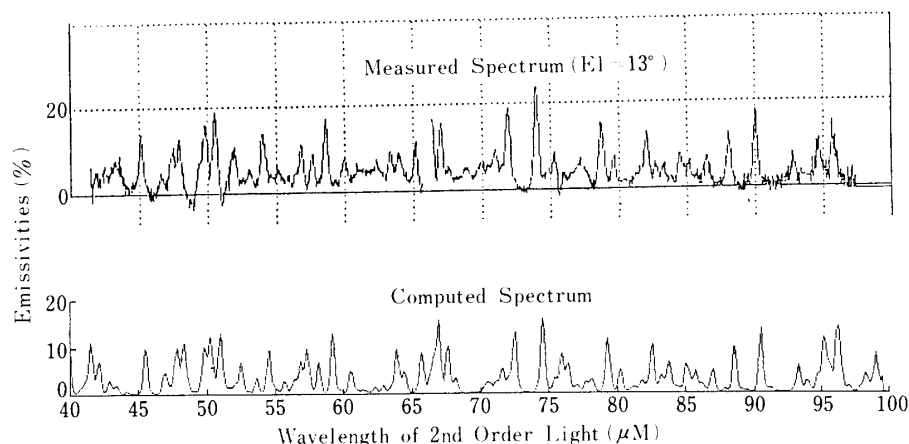


図5 上は測定されたスペクトルから大気のリニア成分だけを抽出したもの。下は、モデル計算によってスペクトルを再現したもの。両者とも仰角90度の時のフタの熱輻射成分(230 K 黒体輻射)で規格した。

数の異なる成分が混ざっている。同じラインが2つの次数にそれぞれ現われている場合には、グレーティングの効率カーブをある程度推定して分離することができる。しかしそれだけで全体の効率をユニークに決定することは難しいので、遠赤外フーリエ分光器を使ってそれぞれの次数の効率を求めた。

3. 大気モデルによる解析

地球大気に含まれる水蒸気やオゾンなどが示す遠赤外スペクトルについては、Tranb and Stier (1976) [4]によって詳しいモデル計算がなされた。彼らは地球大気が等温等質で静水圧平衡にあると仮定し、水蒸気分子などのスペクトル線がローレンツ型で近似できるとして視線に沿った光路積分を行ない、地球大気の透過率スペクトルを求めた。ただし、彼らは上空における水蒸の体積混入率を2.5 ppmと仮定したが、Solomon et al. (1982) [3]の理論的予想値(30~50 kmで5.5~6.0 ppmv)や最近の観測結果はもう少し大きい値を示している。そこでわれわれは体積混入率を一応5.0 ppmvと仮定し、計算の方法はTraub and Stierに従って、大気の放射スペクトルのモデル計算を行なった。

上層大気のH₂O存在量の絶対値を定量的に推定するためには、観測されたスペクトルの全体の形と、絶対フラックスの値を同時に合わせることでパラメータを決定することが必要である。観測された約30回のスキャンのプロファイルは、高度や仰角のちがいに、全体の形自体はほぼ一定のまま全体の相対的強度だけが大きくなったり小さくなったりするだけであった。従って、分子の各励起レベルのPopulationを決めている温度のパラメータは、一定のある値を採用することができると考えられる。実際のモデル計算では、温度245 Kが最も良く観測スペクトルと計算値を合わせられるということがわかったので、その値を採用する。なお、モデル計算の結果をみるかぎり、温度変化によるスペクトルの変形は少ない。モデル計算の概要を表1に示す。

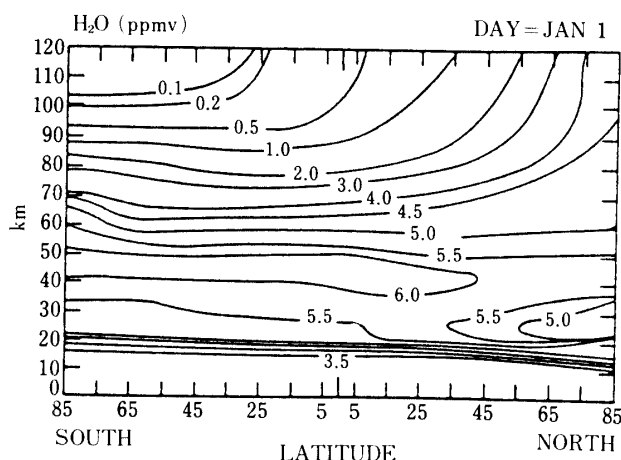


図 6 Solomon et al.(1982)による水蒸気混入率の予想値

表 1 モデル計算の概要

- ・ 静水圧平衡にある等温等質大気を仮定.
- ・ ラインの形はローレンツ型として Curtis—Godson 近似を用いる.
- ・ 気球高度 33.1 km, 仰角 13 度.
- ・ 有効温度 245 度 K (−28 度C), 気圧 9.3 mb
- ・ 水蒸気の体積混入率 5.0 ppmv
- ・ 計算格子点 0.005 cm 毎

このようなモデルに基づいて、我々の分光器で期待される H₂O スペクトル線強度を計算した結果を図 5 に示す。線スペクトルは、分光器の分解能 0.8 ミクロン/次数とし、前述のように 230 K の黒体輻射に対する相対的 Emissivity に換算して示されている。尚図 5 の計算されたスペクトル強度は、大気中の H₂O の存在量 (Mixing ratio) を 5 ppmv と仮定したものである。気球高度の強い水蒸気ラインに関しては、ライン強度は、柱密度の平方根に比例する(芝井他[5])。したがって、観測結果とモデル計算結果約 1.5 倍の差を、水蒸気存在量がちがうことだけで説明しようとする、約 2.2 倍の水蒸気量(11 ppmv)を仮定しなければならない。この値は他の観測結果や理論的予想値(5.5~6.0 ppmv)に比べて若干大きい。次の節で仰角分布について述べたあと、このくいちがいについて議論する。

4. 水蒸気ライン強度の仰角分布と水蒸気存在量

図 3 に示すように観測の仰角は 10~40 度の範囲にわたって変わり、それぞれについてスペクトルが得られたので、ライン強度の仰角分布を得ることができた。調べたラインは表 2 に示した 5 本のラインである。これらのラインは強いことと、隣のラインとの混ざり合いがないことを条件に選ばれた。図 6 に、 $4_{32}-3_{21}$ (58.7 ミクロン)の強度の仰角分布を示す。

表 2

波長 (ミクロン)	遷移準位	分光器の 次数	超過成分 (airmass)	相関係数
90.0	3 ₂₂ - 2 ₁₁	1	3.2	0.94
108.1	2 ₂₁ - 1 ₁₀	1	1.6	0.97
58.7*	4 ₃₂ - 3 ₂₁	2	1.0	0.99
65.2	6 ₂₅ - 5 ₁₄	2	1.0	0.97
58.7*	4 ₃₂ - 3 ₂₁	3	1.4	0.98

* 両方の次数で測定された。

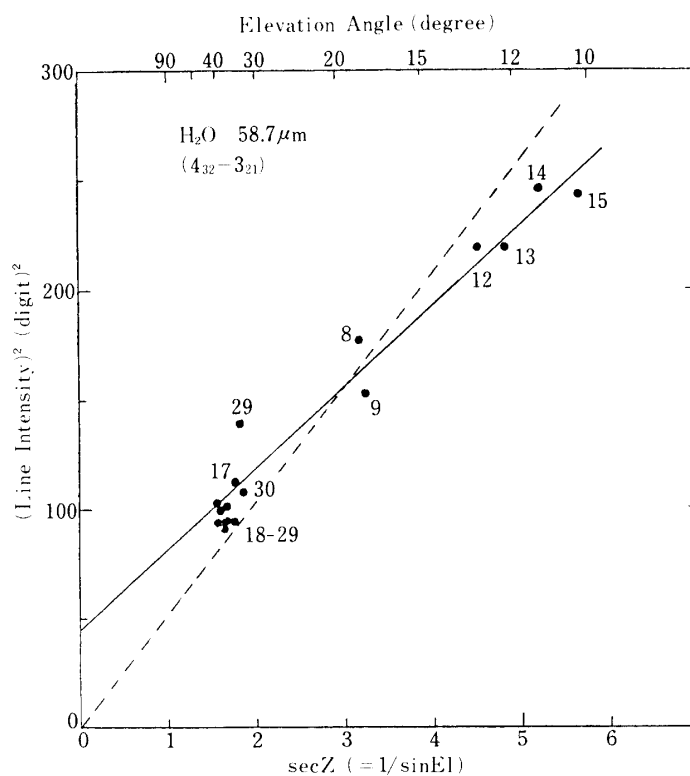


図 7 4₃₂-3₂₁ ラインの強度の 2 乗の仰角分布。数字はスペクトルの番号を表わす。

水蒸気の柱密度が $\sec Z (= 1/\sin El)$ に比例し、先に述べたようにライン強度が柱密度の平方根に比例するならば、ライン強度の 2 乗と $\sec Z$ とは比例するはずである。実際、図 6 からわかるように両表はかなり良い比例関係を示す。しかしながら、測定点を直線で近似すると、原点を通る直線はあまりよく合わず、原点の上方を通る直線によってよく近似できる。この傾向は他の 4 本のラインについても同様に見られるものである(表 2)。この現象を説明するためには、例えば、望遠鏡の仰角に依存しない水蒸気成分即ち、大気本来のものでない成分(超過成分とよぶ)があると仮定すればよい。このような超過成分の原因と

しては観測機器からの脱ガスが考えられるが確証は得られていない。

表2から超過の水蒸気成分の量を、1.0~1.6 airmass と見積もることができる。(3₂₂-2₁₁については直線近似したときの相関があまりよくないので除外した。)一方、前節で述べたように仰角13度に対して11 ppmvの水蒸気量が求まっているが、このうち18~26%は、超過成分である。よって、大気本来の水蒸気量として、8.5±0.5 ppmv が得られる。

なお、測定したスペクトル(Emissivity)は、次の理由で過小な見積もりになっている可能性がある。それは、分光器の感度特性が、連続スペクトルと線スペクトルとで若干異なる徴候があるためで、スペクトル強度に対して最大+20%、水蒸気量にとっては2乗に依存するために最大+50%の不確定さをつけ加えなければならない。一方、モデル計算の結果の精度は、主として用いたパラメータ(AFGL, カタログ[6])によって決まっており、現在その精度を調べているところであるが、±10%を超えることはないと予想されている。これらの不確定性を考慮すると、今回の気球観測で得られた水蒸気の存在量は8.5(+5.5, -1.0)ppmvになる。測定した高度は33.1 kmであるが、視線方向の積分値を見ているので、33 km から上を見た時の平均的な存在量の測定になっている。スケールハイトは約7 kmであることを考慮すると、33~40 kmの範囲での平均的な水蒸気の存在量が8.5(+5.5, -1.0) ppmvであったといえる。

先にも述べたように、この値はSolomon et al. (1982)の予想値5.5~6.0 ppmvより若干大きい。高度30~40 kmにおける水蒸気量の測定は数例しかなく、いずれも我々の結果より若干小さい値を示している。この差について、今後比較検討するとともに、次回の観測でも同様の測定を試みるつもりである。

参 考 文 献

- [1] 高見英樹他, 1986, 本報告 p. 100.
- [2] 舞原俊憲他, 1984, 宇宙観測シンポジウム, p. 41-42.
- [3] Solomon, P. M. et al. 1982, Planet. Space Sci. **30**, 1117.
- [4] Traub, and Steier 1976, Applied Optics, **15**, 364.
- [5] 芝井広他.1986, 宇宙観測シンポジウム.
- [6] AFGL Atmospheric Line Parameters Compilation (1982).