

熱圏下部の窒素分子振動温度, 回転温度および数密度  
—観測ロケット S-310-24 号機による観測—

川島 高弘<sup>\*1</sup>・小山 孝一郎<sup>\*2</sup>・鈴木 勝久<sup>\*3</sup>  
岩上 直幹<sup>\*1</sup>・小川 利紘<sup>\*1</sup>・置田 彩子<sup>\*4</sup>  
福山 恒太<sup>\*5</sup>・野田 亮<sup>\*6</sup>

(1997年6月26日受理)

Measurements of Vibrational/Rotational  
Temperatures and Density of Molecular Nitrogen  
Using a Sounding Rocket S-310-24

By

Takahiro KAWASHIMA<sup>\*1</sup>, Koh-ichiro OYAMA<sup>\*2</sup>, Katsuhisa SUZUKI<sup>\*3</sup>,  
Naomoto IWAGAMI<sup>\*1</sup>, Toshihiro OGAWA<sup>\*1</sup>, Saeko OKITA<sup>\*4</sup>,  
Kouta FUKUYAMA<sup>\*5</sup> and Akira NODA<sup>\*6</sup>

**Abstract:** The vibrational and the rotational temperatures of atmospheric molecular nitrogen were successfully measured in situ by a sounding rocket S-317-24 in the lower thermosphere over Uchinoura, Kagoshima, Japan, at 20:00 JST on February 11, 1996.

Molecular nitrogen is first ionized using an electron gun and the emission of the 1st Negative Band of the ionized N<sub>2</sub> is measured by a sensitive spectrometer. Both number density and rotational temperature were measured in the intermediate layer which happened to appear during the flight. Preliminary analysis shows that height profile of rotational temperature shows a wavy structure, although it follows roughly MSIS 86 atmospheric model. The vertical wavelength of the wavy structure is about 40km. One-dimensional numerical simulation executed with an assumption that the structure is generated by atmospheric tidal wave, can explain the phenomenon as well as neutral density fluctuation. The upper limit of the vibrational temperature observed is consistent with O'neil's (1974) measurement.

---

\*1 東京大学  
\*2 宇宙科学研究所  
\*3 横浜国立大学  
\*4 東海大学  
\*5 武蔵工業大学  
\*6 東京理科大学

## 概 要

1996年2月11日20:00 JSTに鹿児島宇宙空間観測所より打ち上げられた観測ロケットS-310-24号機により高度100~160kmにおける窒素分子の振動温度、回転温度、数密度の同時観測に成功した。電子銃を用いて大気中の窒素分子を電離し、窒素分子イオンからの発光スペクトルの1つである1st Negative Bandを高感度の分光器で測定することで各物理量を求めた。またこの実験の最中、電離中間層が高度140km近辺に発生しており、世界で初めて電離中間層中の中性大気の数密度、温度を観測した。観測された温度の高度分布は通常の大気モデルと違い、鉛直波長40kmほどの波動構造を示していることがわかった。この現象を潮汐波による変動と仮定して簡単な1次元大気物理シミュレーションを実行して検討した。振動温度に関しては本観測器で値を正確に決定できるほど高温に振動励起されておらず上限を与えるにとどまったが、上限値は過去のO'neil(1974)の測定と矛盾しない。

### 1. はじめに

測定の目的は高度100-160kmにおける窒素分子 $N_2$ の振動温度、回転温度、および数密度の同時観測である。振動温度は熱圏下部の電子温度、電子密度や $N_2$ の関わる化学反応、および太陽エネルギーの分配を考える上で重要なパラメータである[小山他;1997]。回転温度は今回の観測高度領域では並進温度(いわゆる大気温度)に等しいと考えられている。温度は熱圏の構造、力学を決定する重要なパラメータでありながら直接観測はほとんどなされていない[Barth and Epavier, 1993]。特に今回の観測領域は高度差がわずか50kmの間に温度が400K近く変化する熱力学的に活発な領域でありながら主に質量分析計、落下球、およびISレーダ(incoherent scatter radar)の観測をもとに作製された標準大気モデル(MSIS 86)においては温度の直接観測の裏付けのない空白域である。本実験の大きな目的の一つは新しく開発された測定器によってこの温度測定空白領域研究のためのさらなる展開を試みることである。

### 2. ロケット搭載型窒素振動温度回転温度測定器の概要

図1に観測ロケットS-310-24号機ロケットに搭載した窒素振動回転温度測定器(この論文では以後NTVと略称する)の概略図を示す。NTVは大きく分けて電子銃と分光器よりなる。電子銃より放出された電子ビームによってロケット周囲の大気中の窒素分子を電離励起させ発光させる。この発光の中で窒素分子イオンの1st Negative Band(以下、1NGと略)群と呼ばれる振動回転バンド群を分光器で検出することで、電離励起前の窒素分子基底状態の振動温度、回転温度および数密度を決定する。観測領域中心はBird[1988]の計算結果を参照して衝撃波を避けるためロケット中心軸から285mmの距離にした。図2にNTVおよび他の測定器の写真を示す。図2において電子銃からの電子を捕集するコレクタが左側に伸展され、電子エネルギー分布測定用のファラデーカップ(Farady cup)が右側に伸展されている様子を示す。

#### 2-1. 分光器部

分光器は凹面型回折格子を用いた。波長分解能は1.1nm、波長域は356-442nmである。また1つのスペクトルにかかる露出時間は227.7msである。図3に分光器の光路を示す。分光器は採光部、分光部、検出部の3つからなる。採光部は回折格子における高次光をカットすることを目的として青色フィルタ(HOYA製B410, 中心波長410nm, 半値幅20nm)と集光および測定領域を限ることを目的とした石英対物レンズ(直径50mm, 焦点距離170mm)からなる。対物レンズの焦点面にスリットを配置した。分光部はスリット(幅0.15mm×長さ5mm)、4枚の反射鏡、および凹面型回折格子からなる。分光器の仕様を表1に示す。回折格子により分光された光は石英窓を通じて検出部に導かれる。検出部はイメージインテンシファイア(image intensifier, 以後I・Iと略する)付きリニアイメージセンサ(linear image sensor)とI・I用高圧電源(松定プレジジョン製HII-

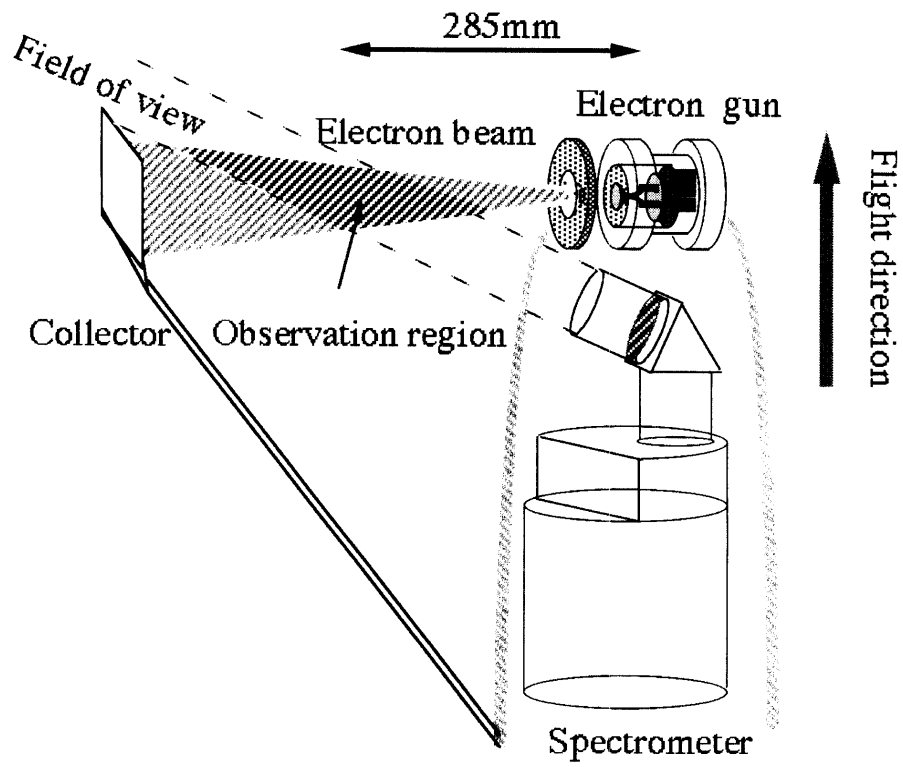


図1. 測定器概略図  
電子ビームと分光器の視野の交わる領域が観測域である。

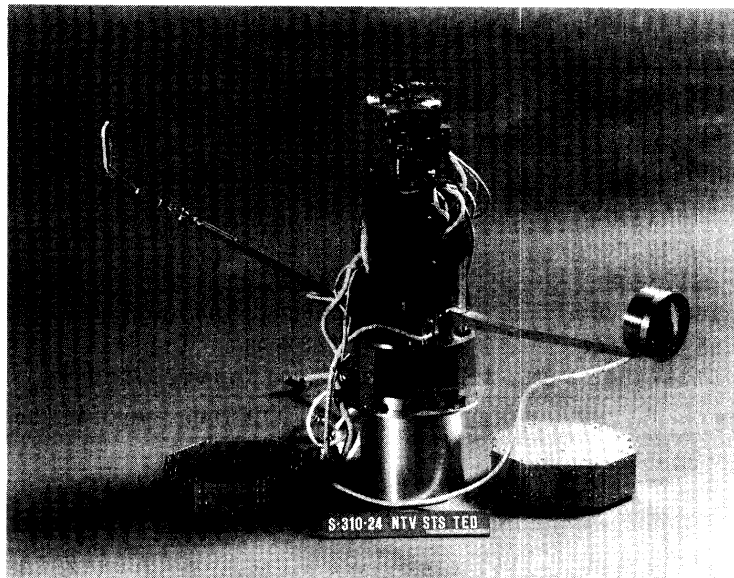


図2. 測定器の写真

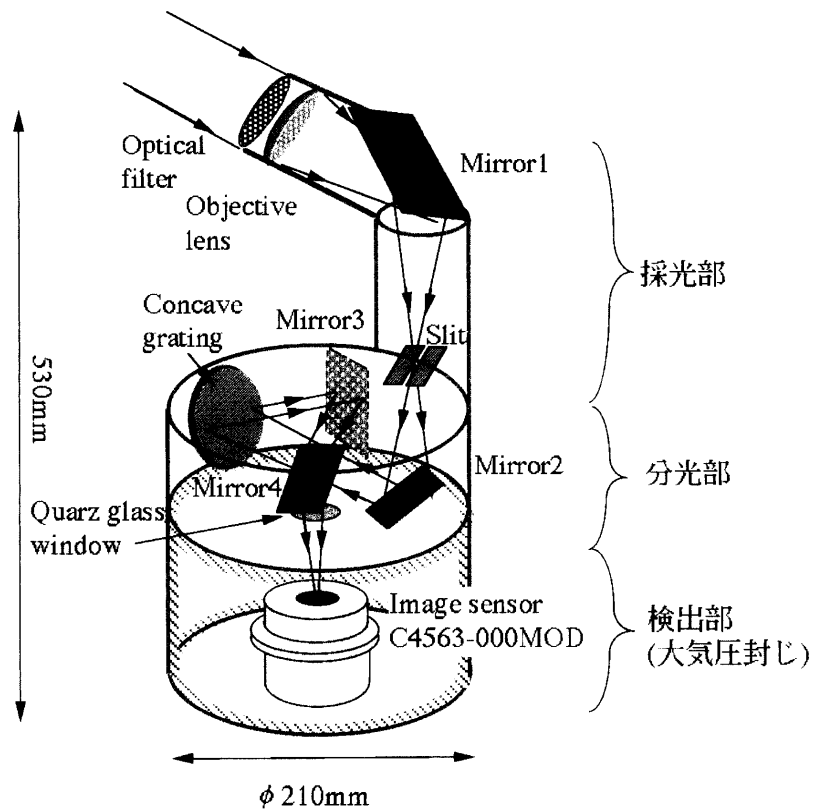


図3. 測定器の光路

表1. 分光器の仕様

分解能	1.1nm
波長域 (I・Iの有効波長域)	356nm - 442nm
使用スリット	幅 0.15 mm × 長さ 5mm
使用回折格子型番	ミルトンロイ製 35-82-40-021
分散	4.5nm/mm
前焦点距離	231mm
後焦点距離 (波長)	225mm (380 nm) - 251mm (780 nm)
回折格子刻印数	792.8 本/mm
回折格子直径と F 値 ( ) は面取り後	φ 95 mm (60 mm), F 2.4 (F 3.8)
対物レンズ	石英, 口径 50 mm, 焦点距離 170 mm
多次光カットフィルタ	HOYA 製 B 410 中心波長 410nm, 半値幅 20 nm

611-u) よりなる。検出部は高電圧による放電を防ぐため大気圧封じが施されている。I・Iに接着しているイメージセンサの仕様は表2に示す。気圧センサ(サヤマレーディング製 PTX-800 MA)を用いて検出部の気圧をモニタした。イメージセンサ部は単体の振動試験で十分に振動に耐えうることを確認して搭載用として採用した。

図4にイメージセンサ系電子回路部のブロックチャートを示す。窒素分子イオンからの発光スペクトルはI・Iのカソード部に当たり、光電効果で電子に変換される。光電子はマイクロチャンネルプレート (micro channel plate, 以後 MCP と略す) で増倍され蛍光面 (screen) で再び光子に変換される。その増倍率は MCP の入力-出

表 2. I・I 付層イメージセンサの仕様

型番	浜松ホトニクス製 C 4563-000 MOD
分光感度特性	195~850nm
入力窓材	合成石英
最高感度波長	430 nm
露出時間	240 ms
I・I 用マイクロチャンネルプレート	2 段
I・I 増倍率	$2 \times 10^5$ (MCP 電圧 1600 V のとき)
イメージセンサ有効入力面サイズ	17.5 (W) × 2.5 (H) mm
イメージセンサ有効チャンネル数	700 ch
冷却	なし

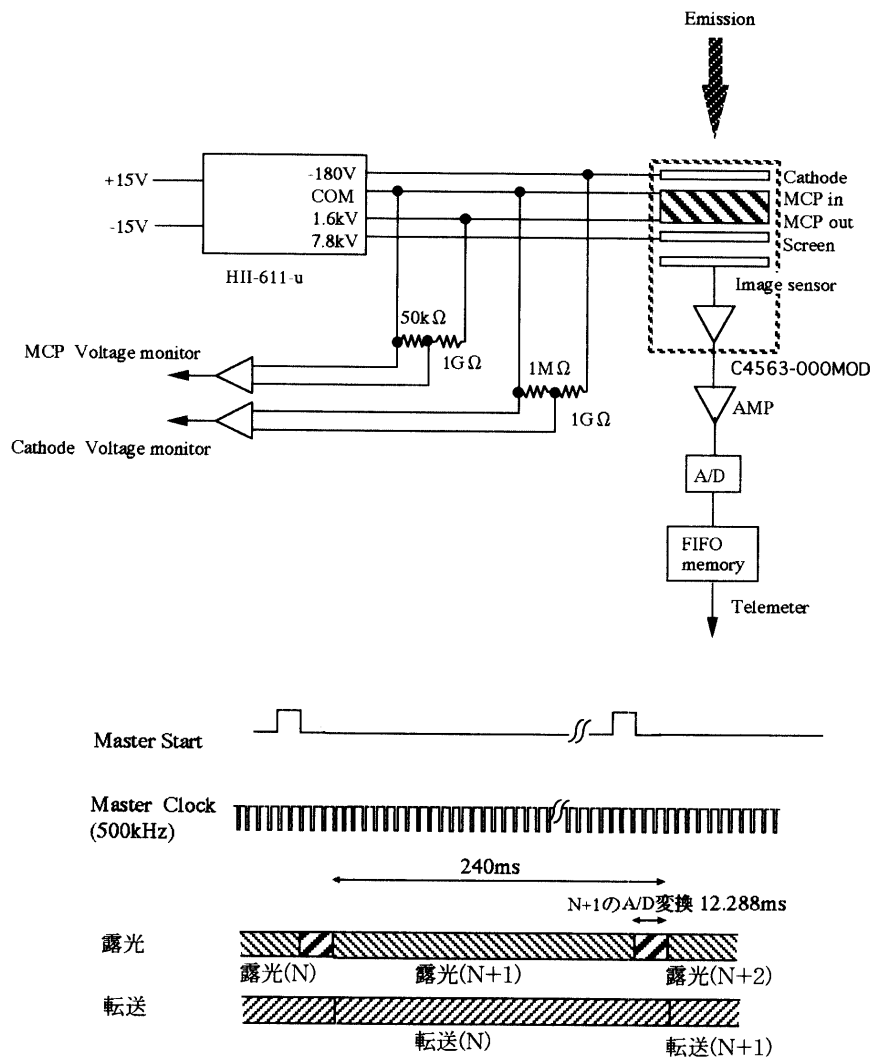


図 4. イメージセンサーエレクトロニクスブロックチャートおよび読み出しのタイミングチャート

力面間にかかる電圧で決定される。今回の測定ではMCP電圧は1600Vとし、この時の増倍率は $2 \times 10^5$ であった。蛍光面からの光子は1024素子のチャンネルイメージセンサに227.7msの間露光され、これによって生じたイメージセンサの出力信号は増幅器によって増幅された後、A/D変換されメモリ(memory)に蓄えられる。変換精度は12bit、変換周波数は83.3kHzである。A/D変換は図4においてマスタースタート(master start)とともに行なわれる。A/D変換においてマスタークロック(master clock, 500kHz)6回につき1素子ずつ読み出され、1024素子全部、すなわち1スペクトル分の信号を読み出すのに要するAD変換時間は12.228msである。そして次のイメージフレーム(image frame)の露光開始とともにイメージセンサ素子1024個のうち、1・1に覆われている700個の有効素子を含む768素子からの信号がテレメータへ送信される。また1・1に印加したMCP電圧値とカソード電圧値はモニター信号として地上に送られた。高度が高くなるにつれ、窒素分子の数密度が急激に小さくなることによるイメージセンサの出力電圧の低下は増幅器の利得を高低の2段階に設定し、高度120km近辺で切り替えることで対応した。

## 2. 2. 電子銃部 [福山他; 1997]

電子銃の電子ビーム電流値は2mA、電子ビームエネルギー値は1keVである。図5に電子銃の概略図を示す。電子銃は電子を放出する直径0.2mmのタングステンフィラメント(大和テクノシステムズ製)、電子を加速するアノード電極、および電子ビームを絞るグリッド電極よりなる。各電極の電位はフィラメントがロケット筐体に対し-130V、グリッドは-1360V、アノードはロケット筐体と同じ電位である。放出された電子ビームはコレクタで捕集されロケット筐体に帰還される。コレクタは電子ビームの電流値をモニタするとともにロケット筐体の電位上昇を防止する役目がある。コレクタにはロケット筐体に対し+100Vの電圧をかけ、またコレクタからの2次電子放出を避けるためコレクタ前面にメッシュを置いた。メッシュにはロケット筐体に対し+50Vの電圧をかけた。すなわちメッシュはコレクタに対し50V負にバイアスされている。電子銃全体は観測時に電子銃近辺からの放出ガスによる観測への汚染を防ぐため真空封じを行ない、観測開始の5秒前に開蓋した。電子銃内部の真空モニタとしてピラニーゲージ(大亜真空製P-3)を用いた。開蓋はワイヤーカットと押しパネにより行なう。図6に電子銃のエレクトロニクスブロックチャートを示す。図6において、斜線で囲まれた領域は全体が-1030Vに浮いている部分を示す。高圧電源として松定プレジジョン製HV, HQ, HBシリーズを用いた。これらの高圧電源は真空中での放電対策のため内部はポットイングが施されている。またフィラメントを熱するための電源と

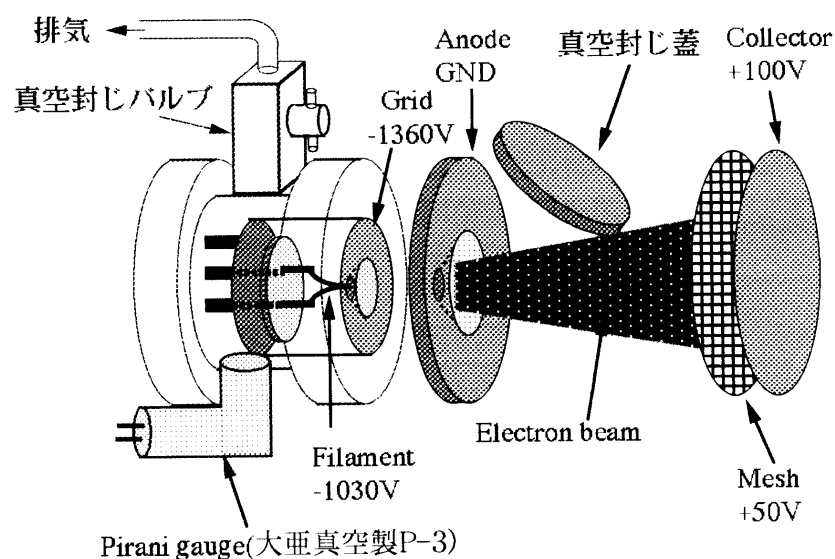


図5. 電子銃の概略図  
電子銃全体は真空容器の中に収まっており、真空引きおよび真空封じを行うことができる。

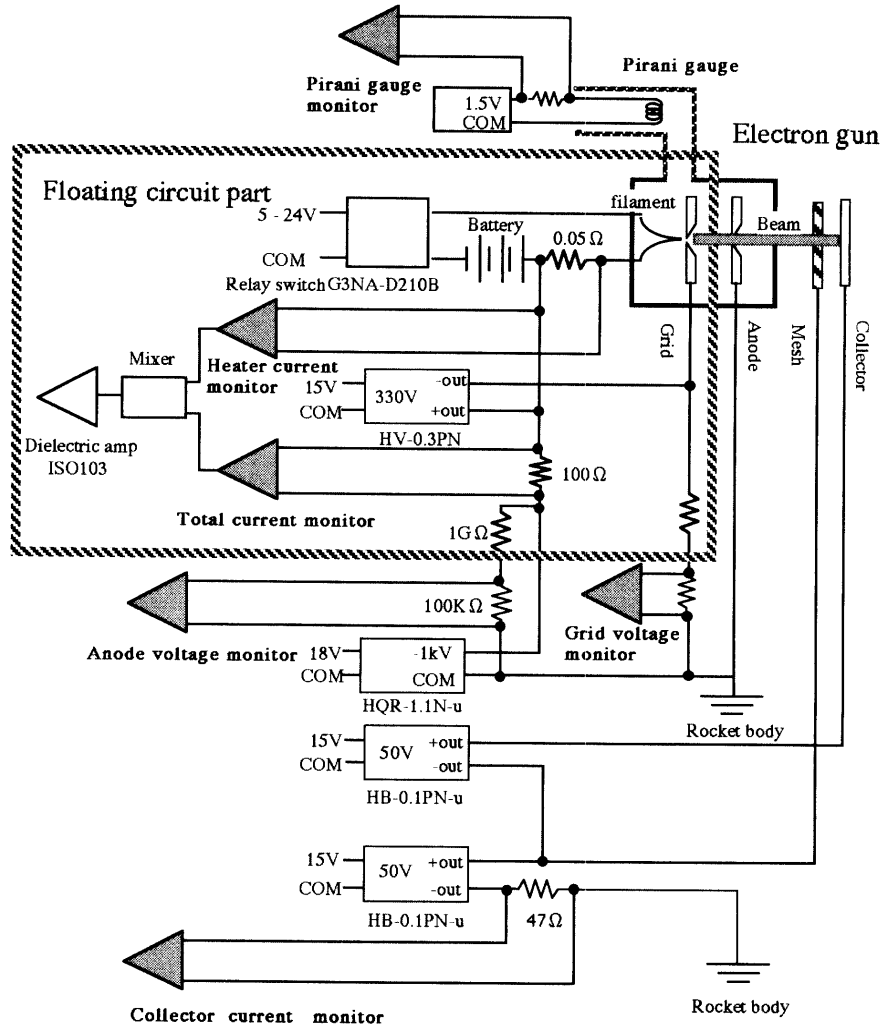


図6. イメージセンサーエレクトロニクスブロックチャート

してユアサ製 Ni-Cd 電池 4000 D (1.2V, 4000mAh) を 3 本直列に繋いで使用した。フィラメントの ON, OFF は電池全体が -1030 V に浮いているためオムロン製リレースイッチ (G 3 NA-D 210 B) を用いて行なった。リレースイッチ等の電圧降下を含めるとフィラメント両端にかかる電圧は 2.5 V, フィラメントに流した電流値は 5.3 A であった。電子銃の動作確認のためアノード電圧, グリッド電圧, ヒータ電流, 全放出電流, コレクタ電流, およびピラニーゲージによる真空度はフライト時にテレメータで送信する。全放出電流とはフィラメントから放出された全ての電子による電流で, コレクタ電流は電子銃からの電子電流のうちコレクタで捕集される電流を示す。本電子銃に用いられたフィラメント, およびピラニーゲージは単体での振動試験を充分に行ない, 打上げ時の振動に耐えることが確認されてから採用を決めた。

図7に電子銃の真空排気系を示す。ロケット内部の電子銃をノーズコーンに開けられた直径φ26の穴を通じて, 打上げ1時間前まで排気する。排気はまず全バルブを開いてロータリーポンプで真空系全体を粗引きする。ロータリーポンプは静電気がロケットに与える影響を考慮して, ゴム管により絶縁した。次いでバルブ2を閉じソープションポンプによる排気を行なう。ソープションポンプの冷却には液体窒素を用いた。この排気系で電子銃内部は  $10^{-4}$  Torr 台を達成した。打上げ1時間前にノーズコーンに開けられた直径36mmの他の穴から工具を入れてバルブ1 (NUPRO製プラグバルブ P 4 T) を閉じて真空封じを行なう。真空封じの持続時間に関しては福山他 [1997] で詳しく述べられているが観測開始までに  $10^{-1}$  Torr 前後に保つことができた。

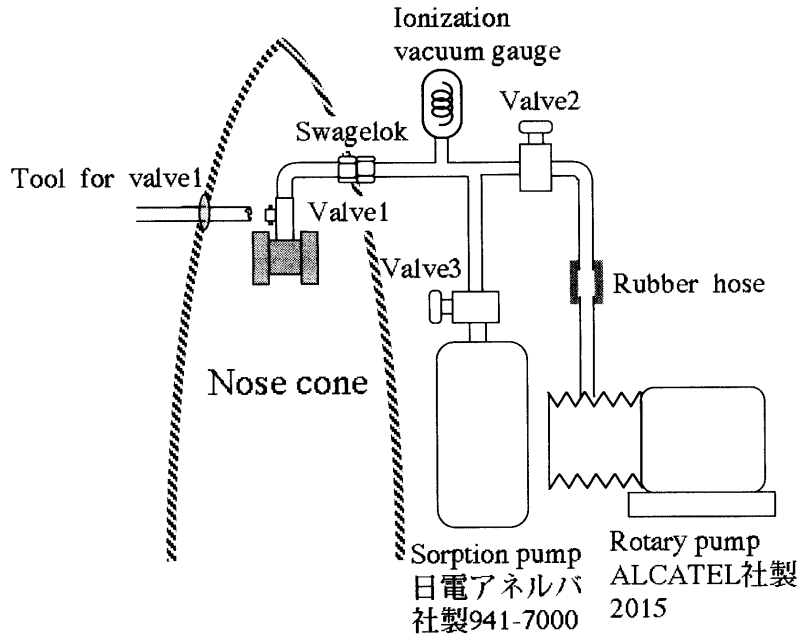


図7. S-310-24 真空排気系

### 3. 観測前の地上での機器校正

電子銃の校正に関しては福山他 [1997] を参照されたい. ここでは分光器の校正についてのみ触れる.

#### 3-1. 分光器の校正

図8に水銀ランプ光を照射した時のスペクトルを示す. 水銀ランプの輝線の波長は既知なので図8を用いて素子と波長の対応を付けて波長校正を行なった. 波長への変換は焦点面が平面である (field flat) という特徴と回

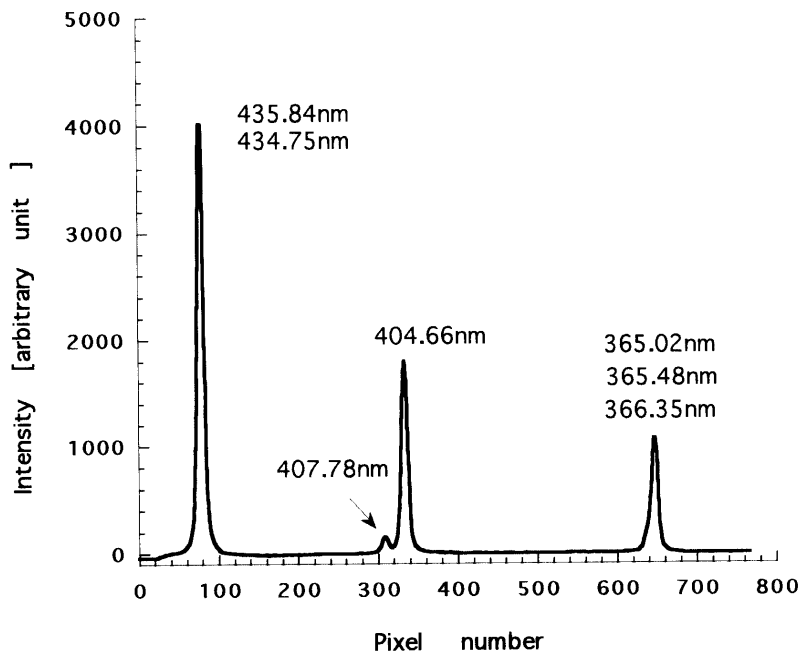


図8. 水銀ランプのスペクトル



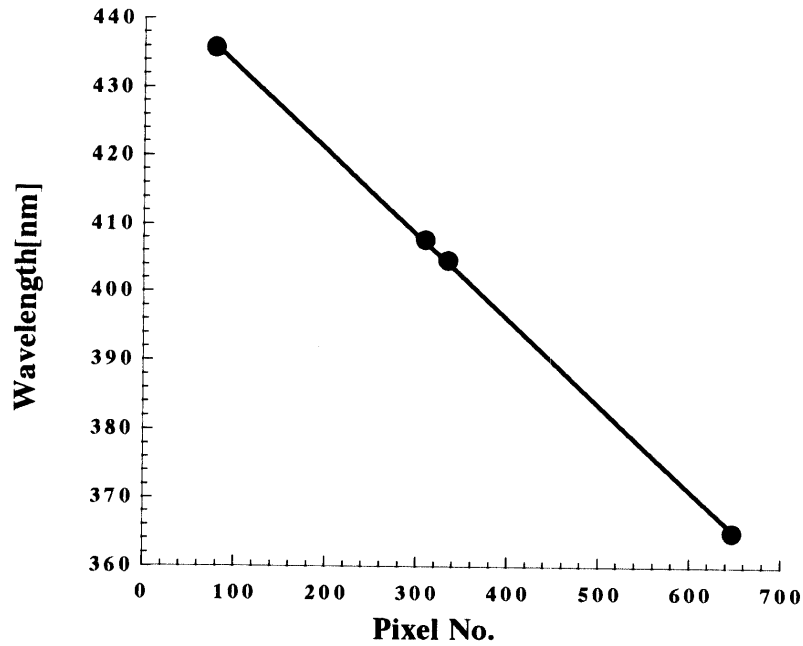


図9. 素子と波長の関係

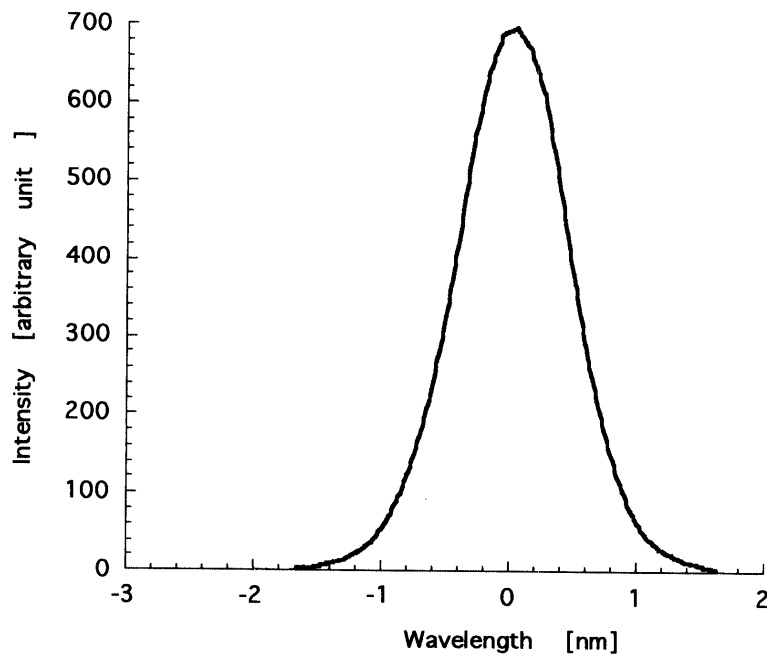


図10. 分光器の装置関数

折格子の方程式

$$\lambda [nm] = \frac{\sin \alpha + \sin \beta}{10^{-6} M [mm^{-1}]}$$

を用いた。ここで $\lambda$ は波長,  $\alpha$ は回折格子への入射角,  $\beta$ は出射角,  $M$ は1mm当たりの回折格子刻印数である。図9にイメージセンサの素子数と図8における4本の水銀スペクトルの波長の関係を示す。1次関数を最小二乗法でフィットさせると以下ようになった。

$$\lambda [nm] = 445.95 - 0.12464 \times N$$

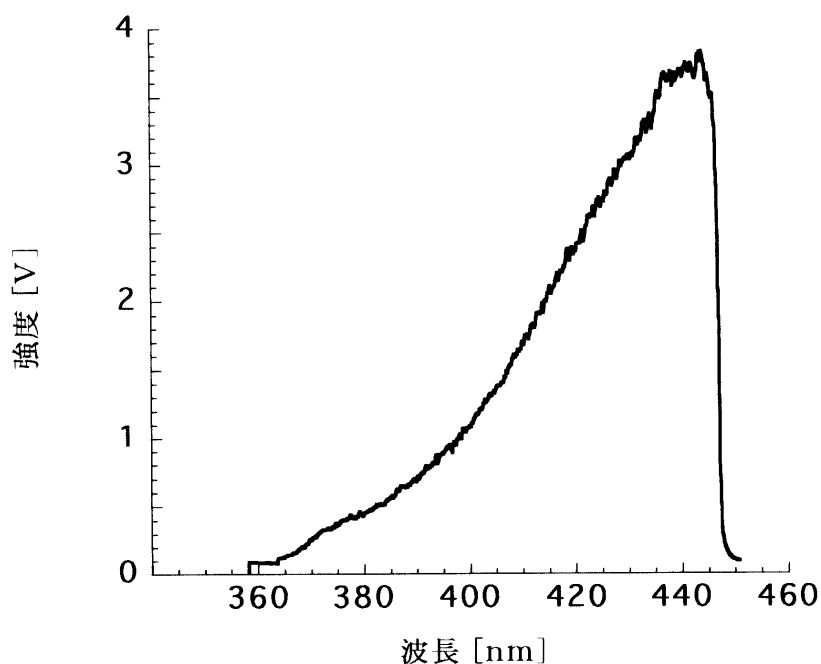


図11. 白熱灯のスペクトル

$N$  は素子番号で、ここでは1から、768までの数字である。

相関係数は0.99991と非常に高い。このことは波長に対する素子の直線性が高いことを意味する。今後、上式を波長変換の基本となる式とする。

図10に水銀ランプ404.66 [nm]の輝線を中心波長を原点となるよう波長をずらしたスペクトルを示す。分光器の視野に一樣にランプ光が拡がるよう、ランプと分光器の間に拡散ガラス（シグマ光器製オパール型拡散板DFO-50C-1）をおいた。図10より分解能は1.1nmということがわかった。振動温度、回転温度をパラメータとする理論的な振動回転スペクトルと、分光器の装置関数のたたみこみ積分を行なうと、シミュレーションスペクトルを得ることができる [小山他, 1997]。図10をシミュレーションスペクトルを得る際の装置関数とした。

図11に白熱灯のスペクトルを示す。白熱灯は輝線がなくなだらかなスペクトルプロファイルを持っており折格子およびイメージセンサの平坦性を測る尺度となる。図11からみる限り各素子からの出力信号のばらつきは小さい。図12にイメージセンサに光を入れない時の出力信号の変動（雑音）を示す。この雑音は0.07~0.08V程度でイメージセンサの最大出力電圧10Vの1%未満である。このためS/Nが十分なスペクトルに対しては問題とならないが、微弱スペクトルに対しては影響を及ぼす。この雑音は光量や露出時間によらず常に一定であることからイメージセンサの読み出しに伴う電氣的雑音と思われる。取得されたスペクトルから図12で示された雑音を差し引いて解析を行なった。

図13に室内実験において電子銃で電離励起させた窒素分子イオンの発光スペクトルを示す。波長391.4nmの1NG (0, 0)と波長427.8nmの1NG (0, 1)の強度比は上側振動準位が等しいため、電子ビームによる励起過程によらず発光過程  $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$  における1NG (0, 0)と1NG (0, 1)のそれぞれの遷移確率の比に等しい [小山他; 1997]。図13から求めた1NG (0, 0)の1NG (0, 1)に対する強度比は2.81である。一方、理論な遷移確率の比は3.07 [Gilmore, Laher and Espy; 1992]である。したがって波長427.8nmにおける分光器-検出系全体の感度を1とすると波長391.4nmでの感度は0.915である。以上の方法で感度補正を行なうことができる。

また、絶対較正を施してある標準重水素ランプ（浜松ホトニクス製L1626-40）を用いて分光器の絶対感度校正を行なった。図14に距離を変えた際の重水素ランプの出力を示す。出力は重水素ランプの連続スペクトルの中

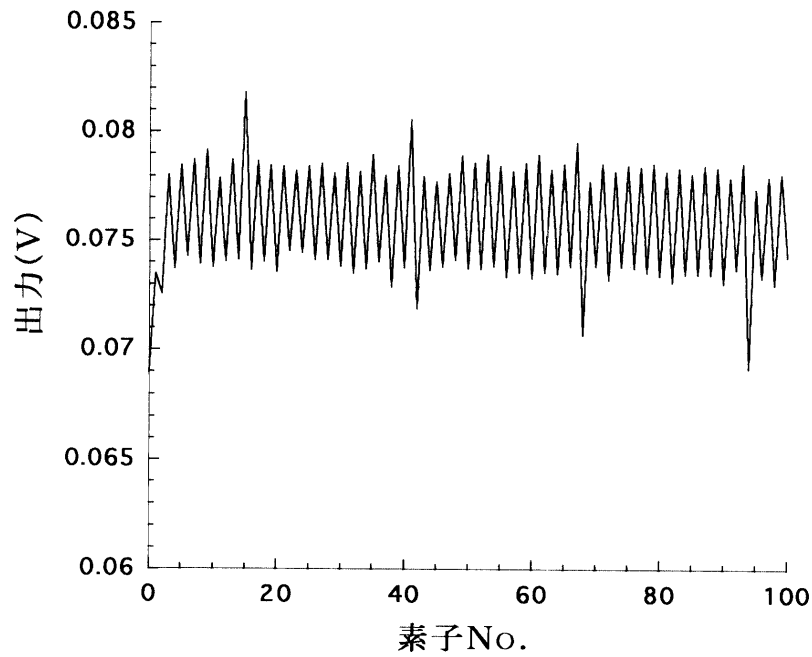
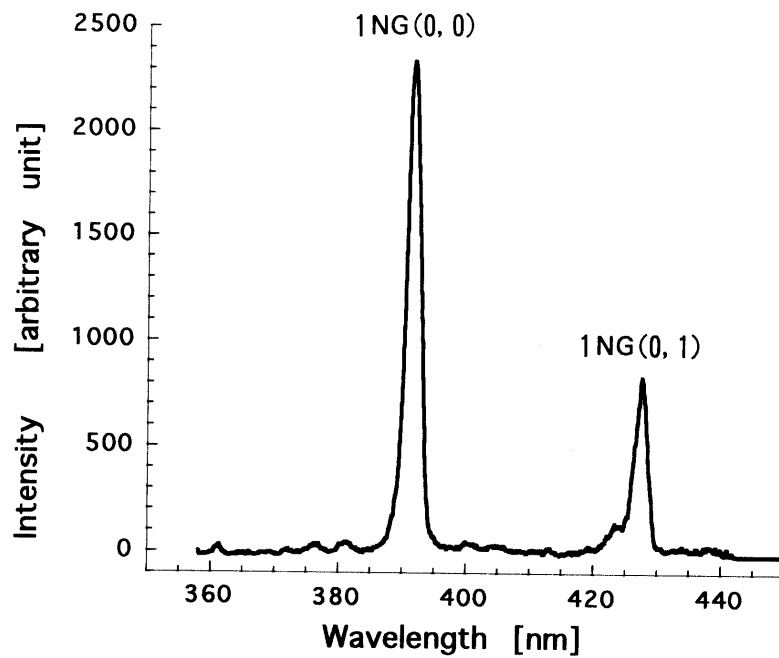


図12. イメージセンサの読み出しノイズ

図13 室内実験で得られた  $N_2^+$  1st Negative Band のスペクトル

で 420–440 nm の平均値を用いた。またランプの出力が強すぎたため 1/400 に減光するフィルタ（ケンコー製 ND 400）を分光器の採光部に付属した。較正は 3 度行なったがどれも出力強度が距離の逆二乗に乗り、較正は正確に行なわれた。高度 100 km 近辺での 1NG (0, 1) の Band head のイメージセンサの想定出力電圧は 5.0 V だがこの絶対較正により、5.0 V の出力電圧は 200 kR 程度の光量に相当することがわかった。

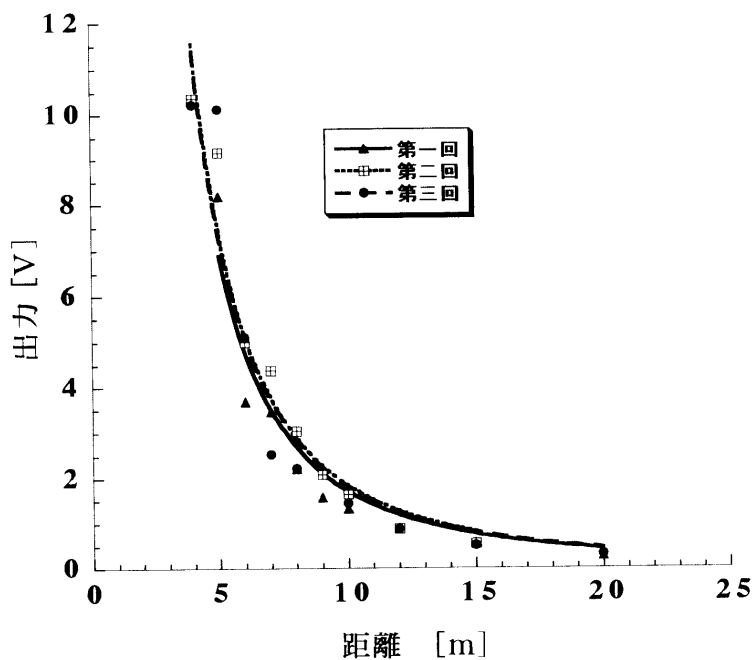


図 14. 標準重水素ランプの出力と距離の関係

### 3-2. スペースチェンバ試験

宇宙研の理学系スペースチェンバ (space simulation chamber) を用いて、搭載機器全体を真空引きしてビーム照射試験を行なった。図 15 にビーム照射中の写真を示す。

測定高度に対応する真空環境 ( $8 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-6}$  [Torr]) のもとでビーム照射とスペクトルの取得に成功し



図 15. スペースチェンバでの試験

左側の搭載機器 (NTV) の最上部にある電子銃より電子ビームが照射されている。真空度は  $8 \times 10^{-4}$  [Torr] (高度 95 km 相当) である。

表3. 消費電流

I・I 高圧電源	電子銃高圧電源	電子銃ヒータ	消費電流 (mA)
OFF	OFF	OFF	350
OFF	ON	OFF	600
ON	OFF	OFF	750
ON	ON	OFF	900
OFF	ON	ON	1400
ON	ON	ON	1700

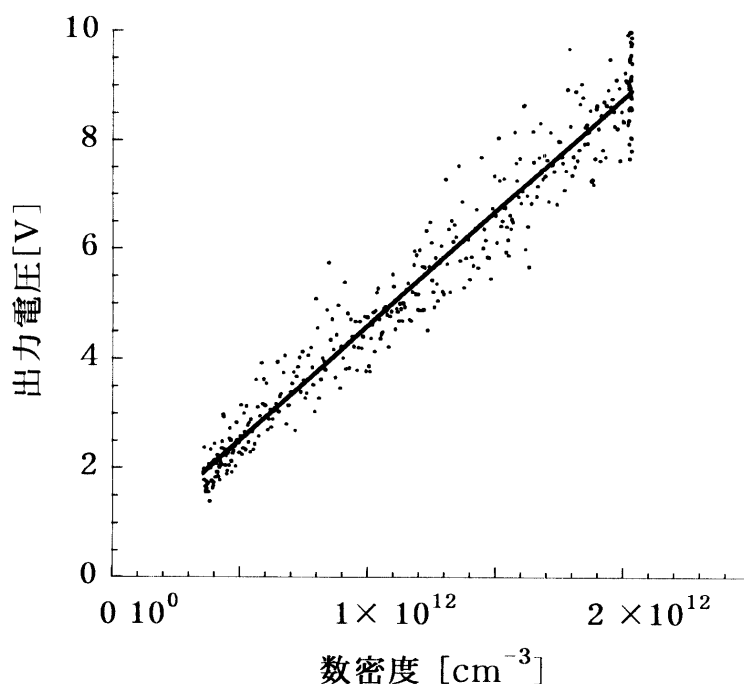


図16. 1NG(0,1)のBand headの強度と数密度の関係

た. この際の消費電流値を表3に示す.

各モニタに関しては電子銃の全放出電流モニタおよびヒータ電流モニタを除いて正常に作動した. この実験により  $10^{-4}$  [Torr] より真空度が悪くなると基板上での縁面放電により全放出電流モニタ, およびヒータ電流モニタの絶縁アンプが破壊されることが判明した. これらのモニタ回路の基板面にコーティング (Coating, Grace specialty polymers; Emerson & Cuming, Inc. 製) を施し, 放電阻止に成功した. また電子銃の蓋開けテストを2回行ない成功した.

また, 真空度を変えることで数密度の校正を行なった. 小山他 [1997] で触れたようにスペクトル強度は窒素分子数密度に比例する. 図16に窒素分子の数密度  $N_0$  [ $\text{cm}^{-3}$ ] と1NG(0,1)のBand headの出力強度  $I_{0,1}$  [V] の関係を示す. 数密度は電離真空計の真空度から気体状態方程式を用いて求めた. 温度は室温を仮定して300Kとした. 図16よりスペクトル出力は数密度に比例していることがわかる. 1次式を仮定して最小二乗法でフィッティングすると以下ようになる. イメージセンサの出力アンプの利得を高低の2段階設定したのでそれぞれの利得について校正した.

$$N_0 = 1.76 \times 10^{12} \cdot I_{0,1} \text{ (増幅器の低利得)}$$

$$N_0 = 2.30 \times 10^{11} \cdot I_{0,1} \text{ (増幅器の高利得)} \quad (3-1)$$

図16は高利得の場合である. 今後, スペクトル強度より数密度を求める際, (3-1)式が基本になる.

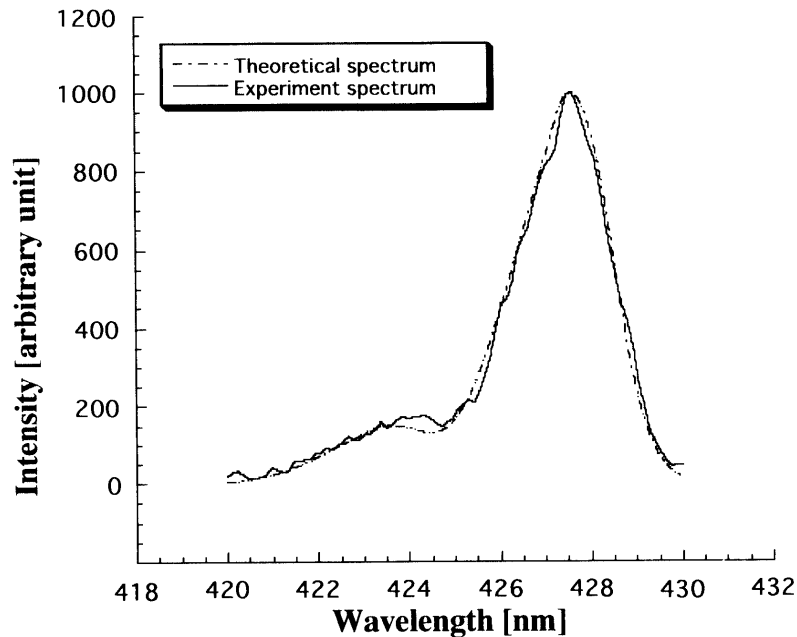


図 17. チェンバ試験でのスペクトルと理論スペクトル  
 黒実線が観測値，灰色実線が理論値である．回転温度は 300 K と決定された．  
 真空度は  $9 \times 10^{-5}$  [Torr] (高度 110 km に相当)．

次に回転温度の求め方，および較正について触れる．図 17 に実験スペクトルと最適フィットしたシミュレーションスペクトルを示す．真空度は  $9 \times 10^{-5}$  [Torr] である．このとき回転温度は室温を反映して 300 K となった．回転温度をパラメータとしてシミュレーションスペクトルと実験スペクトルの残差が最小になるようにフィッティングする．シミュレーションスペクトルの求め方は小山他 [1997] を参照されたい．残差は 420–430 nm を 1000 分割し，実験スペクトル，シミュレーションスペクトルとも 1 NG (0, 1) のピーク値を 1000 で規格化した際，実験スペクトルとシミュレーションスペクトルの残差の二乗和の平方根として定義した．

$$\text{残差} = \sqrt{\sum_i (f(\lambda_i) - y(\lambda_i))^2}$$

$f(\lambda_i)$  : シミュレーションスペクトル

$y(\lambda_i)$  : 観測スペクトル

残差はスペクトルの S/N が大きい程小さくなる．上記の残差の定義では，スペクトルの S/N は大体，以下で与えられる．

$$S/N = \frac{1000^{\frac{3}{2}}}{\text{残差}}$$

残差が 1000 のときは S/N は 31.6 である．さらに  $N_2$  数密度を変えることでスペクトルの S/N を変え，それぞれのスペクトルに対し回転温度を決定した．図 18 に示すように回転温度と残差の関係を求め，室温 (300 K) を中心とする温度の散らばりから回転温度誤差を見積もることができる．その結果，以下のようになった．

$$\Delta T = 0.064 \times \text{残差} \quad (3-2)$$

$\Delta T$  は温度の誤差である．上式は 今後，回転温度誤差評価をする際に基準となる．振動温度較正は野田 [1997] を参照されたい．

電子ビーム電子放出によるロケット本体の帯電の程度を知るため，実験を行なった．詳細は福山他 [1997] を参照して頂きたい．電離層プラズマに相当する背景プラズマがない状態で実験を行なった．電子ビームの一部がコレクタから外れ，捕集されないために電子が流出しロケット本体が正に帯電することが考えられる．ビームプ

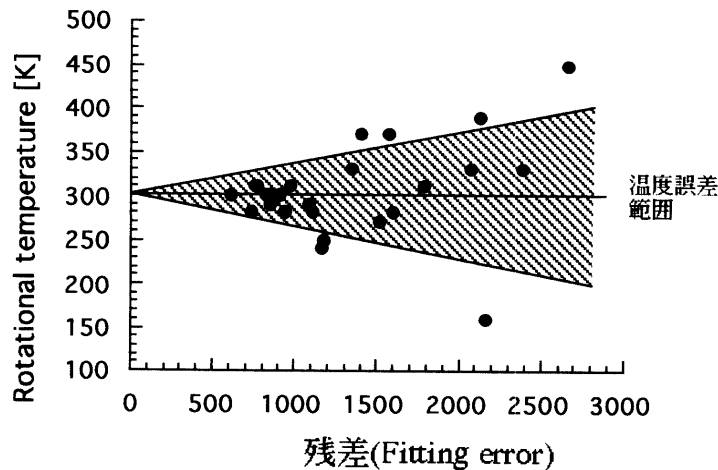


図 18. 回転温度誤差の見積り

残差が大きくなると温度の散らばりも大きくなる。図中、斜線で示された領域は  $T$  を回転温度として、 $T = 300 \pm \Delta T = 300 \pm 0.064 \times \text{Fitting error}$  で示された領域である。

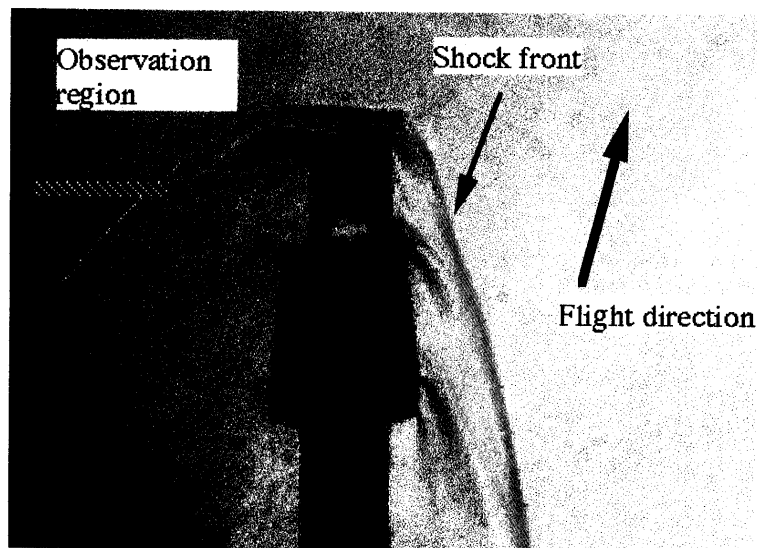


図 19. 超音速風洞における衝撃波の形状

中央にある影が測定器の最先端部を模擬した 1/2 の模型である。模型の周囲に広がるのが衝撃波面である。また斜線で描かれているのが観測領域である。

ラズマの生成効率はチャンバ内の真空度が低いほど高い。インピーダンスプローブ (impedance probe) によって電子密度を測定した結果、電子ビームによる電子密度が  $10^4$  個/cc である時、電位上昇は 70 V であった。実際は電離層プラズマがあるので電位上昇はより小さいことが予想されるが、いずれにしても今後、他の観測器と同時に搭載したときのことを考えて帯電を抑える努力をする必要がある。

衝撃波のプロファイルを見るため宇宙科学研究所の超音速風洞を用いて実験を行なった。風洞の大きさの制限から測定器本体は入らないため 1/2 の模型を用いて実験を行なった。実験時の写真を図 19 に示す。流速はマッハ数 (Mach Number) 4、風洞内の圧力は 50 Torr である。図 19 は迎角 (attack angle, ロケット軸と流れの方向のなす角) が  $15^\circ$  のときで、ロケット軸回りの姿勢のうち、測定領域が風下側に入って最も衝撃波による加熱、圧縮を受けやすい姿勢のときの写真を示す。図 19 から最悪の場合でも測定領域は衝撃波を避けられることがわかる。実際のロケット実験ではマッハ数は 6 程度で風洞実験値より大きい。このため、実際のフライトでは衝撃

波面は図19よりロケット本体に近づき測定領域は衝撃波面外に出る方向に行くため、条件が良くなると思われる。だが風洞内の圧力は50 Torrであるが、実際のフライトでは環境の気圧は $10^{-4} \sim 10^{-6}$  [Torr]と希薄なため、波面の厚みは0.1~10m(平均自由行程程度)となることによる波面が膨らむ効果は未知数である。

#### 4. 観測結果

S-310-24号機は日本時間で1996年2月11日20:00 JSTに鹿児島宇宙空間観測所(31.1° N, 131.3° E)より打上げ角76.5°, 方位角135°で打ち上げられた。

当日の波長10.7cmの太陽の電波束F10.7は74, 磁場擾乱を示すKpインデックスは4であった。また後述するが打上げ場から約50km離れた山川の電離層観測機で得られたアイオノグラムにより電離中間層(intermediate layer)が観測ロケット打上げ時間の前後、極めて顕著に現れたことが確認された。図20に本観測ロケット飛翔の大体の様子を示す。

電子銃内の放電を誘発する水成分を除去するため、打上げ60分前まで電子銃内部をソーブションポンプで真空引きを行ない、その後、300 Torrの乾燥窒素ガスと置換した。打上げ後、48秒(高度約60.9km)に電子密度

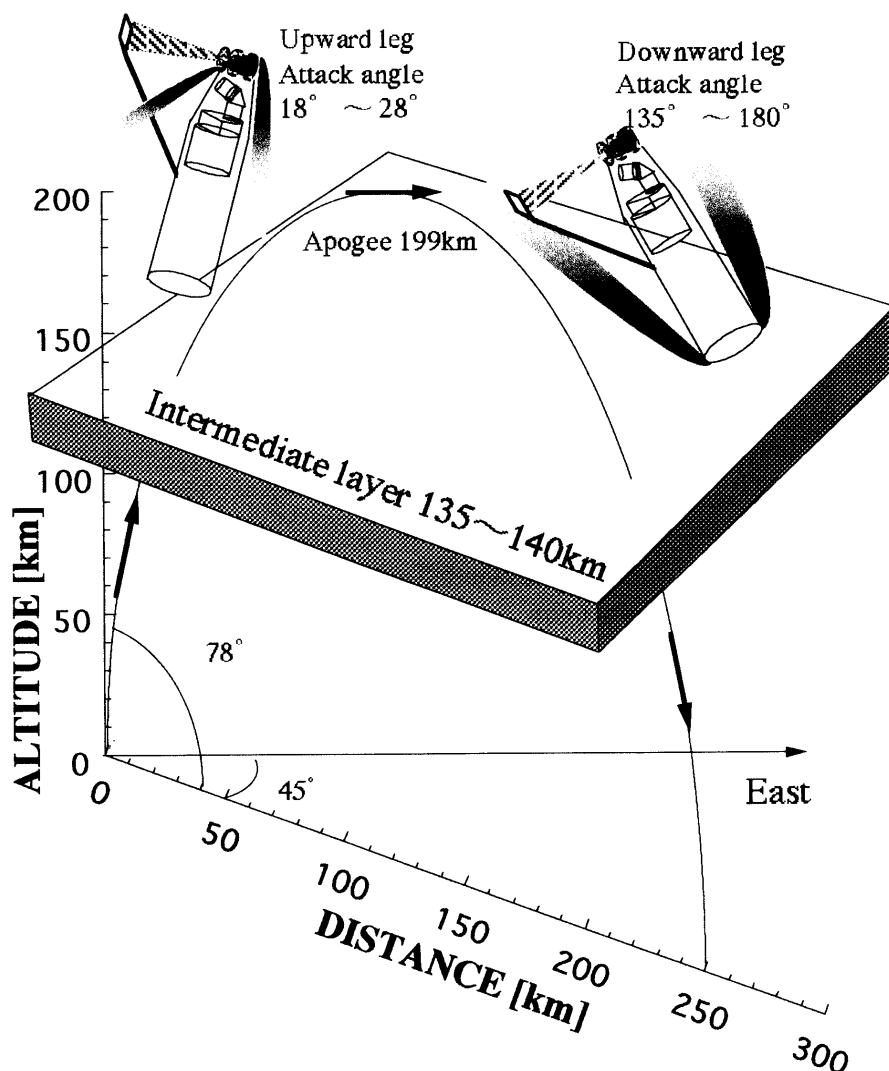


図20. S-310-24の飛行経路  
仰角78°方位角135°で打ち上げられた。また高度135~140km近辺電離中間層が現れていた。



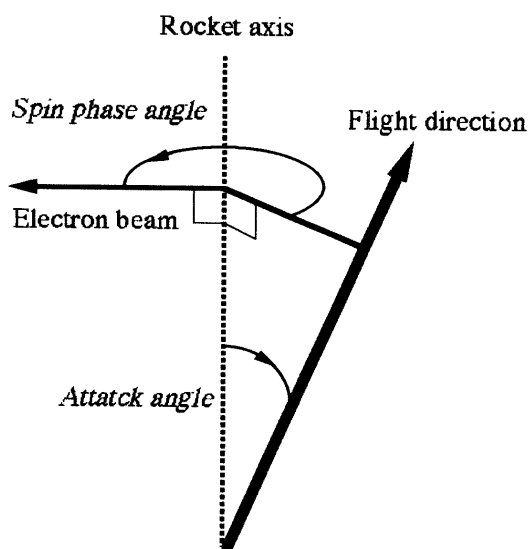


図 21. 角度の定義

ロケット軸と速度ベクトルのなす角を Attack angle と定義した。また、ロケット軸と速度ベクトルを含む平面と電子ビームのなす角をスピン回転方向に定義したのが Spin phase angle である。

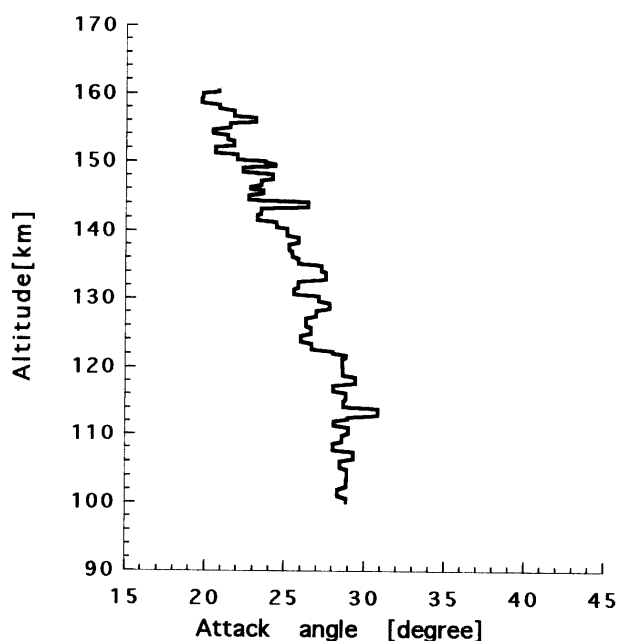


図 22. 上昇時における S-310-24 の迎角

測定器（インピーダンスプローブ）のアンテナを伸展し、57秒（高度約75km）で電子銃の蓋開けを行なった。蓋開けの確認はピラニーゲージで示される真空度が上がることで行なった。68秒後（高度91km）に電子銃のヒータを点火した。ヒータからの全放出電流値が2~3秒間で安定した後、74秒後（高度100km）に電子銃、およびI・Iの高圧電源をONにすることによりビームが照射され、観測が開始された。127秒後（高度160km）にヒータがOFFされ、上りの観測は終了した。その後、I・Iの高圧がOFFになる138秒後までの間、大気背景光の観測がなされた。下降時には再び312秒後（170km）でヒータON、323秒後（160km）で高圧電源ONとなり観測が開始され、下りの観測は381秒後（高度92km）に高圧電源がOFFとなる時まで続いた。

スターセンサ（STS）および磁場センサ（GA）よりロケットの姿勢を決定した。図21にロケットの姿勢を特

微づける2つの角度を定義した。迎角 (attack angle) は速度ベクトルとロケット軸のなす角である。スピン位相角 (spin phase angle) はロケット軸と速度ベクトルを含む平面を基準にして、この平面と電子ビームのなす角をスピン方向に定義した。迎角が大きく、かつ、スピン位相角が  $180^\circ$  に近いとき、観測領域はロケットの風下側に入り衝撃波の影響を受けやすくなる。図22にスターセンサを用いて決定された上昇時の高度と迎角の関係を示す。上昇時においては迎角は  $20^\circ$  から  $30^\circ$  に保たれていた。風洞実験では迎角が  $15^\circ$  の時、かろうじて衝撃波を避けられることがわかっているため、実際の観測では上昇時ではやや衝撃波を被ったものと思われる。

#### 4-1. 電子ビームモニタの結果

図23に電子銃の全放出電流値 (●点) とコレクタ電流 (■点) の上昇時の高度変化を示した。また実線はS-310-24号機に同時に搭載された電子密度測定器 (NEI) による電子密度の高度分布を示す。電子密度観測では電離中間層によると思われる電子密度のピークが高度133km近辺に見られる。全放出電流値は前述のとおりフィラメントより放出される全熱電子を電流値に換算した値を示す。高度110km以上では図23より全放出電流値は高度によらず一定であることがわかる。コレクタ電流は一次の電子ビーム電流値のうちコレクタに捕集された分に加えて、電子銃とコレクタの間で一次電子ビームによって窒素分子が電離されることによって放出される二次電子による寄与、および背景の電離層電子をコレクタが捕集することによる寄与も含まれている。コレクタ電流は高度110km以下では大きな値を示し、その後、高度とともに電流値が減り、そして高度140km近辺にピークが見られた。全放出電流値は一定であり、かつ、室内実験では1次ビーム電流と全放出電流値の比は1次ビーム電流値によらず  $\sim 0.9$  と一定であること [福山他; 1997] から、1次ビーム電流値も時間によらず一定の筈である。したがって高度140km近辺のコレクタ電流値のピークの原因は1次ビーム電流値の変動によるものではない。このピークは、ピークの現れた高度がNEIによって観測された電子密度のピーク高度と一致すること、前述のアイオノグラムによる電離中間層と高度が一致することから、ロケットが電離中間層中を通過した際、コレク

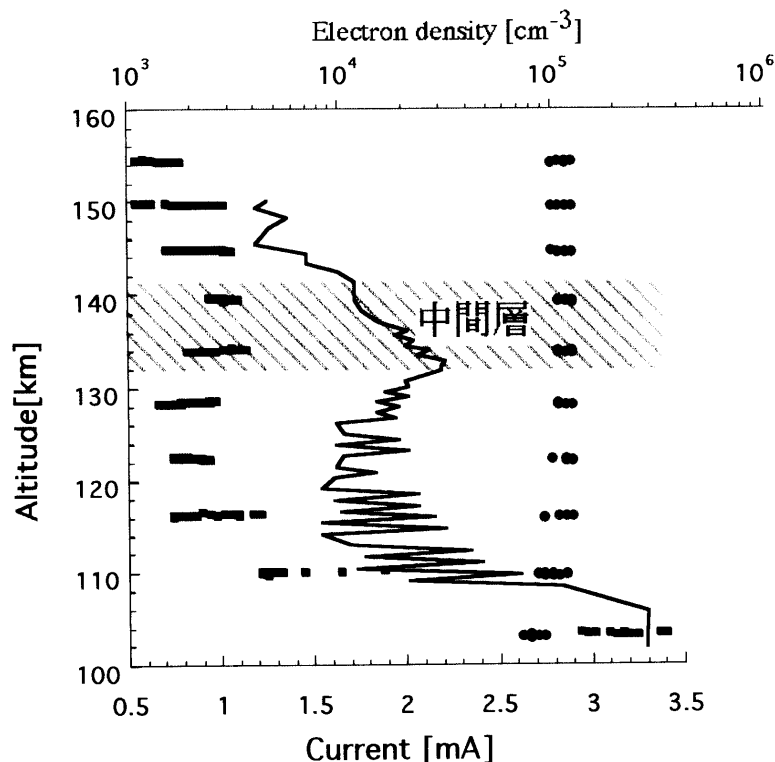


図23. 全放出電子ビーム電流値 (●点) とコレクターに流れた電流値 (■点) 実線はインピーダンスプローブによる電子密度 (渡辺氏提供)

表 4. タイムシーケンス

時間 [S] (打ち上げ後)	予想高度 [km]	実際の高度 [km]	項目
-60 [min]			NTV 電子銃排気終了
48		60.969	NEI アンテナ伸展
57	75	75.015	NTV 電子銃蓋開け
68	91	91.141	NTV 電子銃ヒータ ON
74	100	99.461	NTV 電子銃高圧電源 ON I・I 高圧電源 ON
97		128.22	NTV イメージセンサーゲイン Low→High 切り替え
127	160	158.38	NTV 電子銃ヒータ OFF
138	170	167.34	NTV 電子銃高圧電源 OFF I・I 高圧電源 ON
312	170	162.12	NTV 電子銃ヒータ ON
323	160	152.56	NTV 電子銃高圧電源 ON I・I 高圧電源 ON
346		128.81	NTV イメージセンサーゲイン High→Low 切り替え
381	92	83.212	NTV 電子銃高圧電源 OFF I・I 高圧電源 OFF
382	91	81.778	NTV 電子銃ヒータ OFF

タが多量の電離層電子を捕集したためと思われる。高度 110 km 以下では電子ビームによって気体から電離した二次電子が数多く存在したため、NEI による電子密度、コレクタ電流値ともに大きな値を示した。この二次電子については、振動温度観測に深刻な影響をもたらすため、4-3の振動温度観測の項でも触れる。

#### 4-2. 回転温度, 数密度観測結果

図 24 に各高度における代表的な観測スペクトルとそれに最適フィットしたシミュレーションスペクトルを示す。図 24 の観測スペクトルは高度方向に 50 個のスペクトルを積算し、その移動平均スペクトルにシミュレーションスペクトルを非線形最小二乗法によって fitting して求めた。高度が上がるにつれ窒素分子の数密度が落ちるためスペクトルの S/N も落ちる。図 25 にロケット上昇時に観測された回転温度の高度プロファイルを示す。誤差棒付き実線が今回の観測結果、実線が標準的な中性大気モデルである MSIS 86 モデルより求めた並進温度である。高度方向に 20 個のスペクトルを積算し移動平均による高度分解能は 7 km である。誤差棒は式 (3-2) から決定した。図 25 において高度 122 km で極大値、高度 135 km 近辺で極小値を示す波状構造が見つかった。MSIS 86 モデルとの違いは最大 100 K 以上にも達した。高度 140 km 以上ではスペクトルの S/N が落ち、fitting 誤差が大きくなるため回転温度の信頼性は低い。図 26 に数密度の高度プロファイルを示す。実線は高度方向に 20 個の移動平均を取ったスペクトルの 1 NG (0, 1) の Band head 強度から、チェンバ実験での数密度の較正式 (3-1) を元に決定した数密度である。点線が MSIS 86 モデルによる数密度である。観測値は高度 113 km 付近に極小値、高度 140 km 付近に極大値を示す、緩やかな波状構造が見られた。高度 110 km 以下では数密度は MSIS 86 モデルより大きな値を示した。これは高度 110 km 以下では平均自由行程がロケットの大きさより小さくなり、衝撃波のできる条件が整うためと思われる。当初、想定された迎角 (attack angle) は 15° であったが実際は 30° 近い値であった。このため衝撃波を被らないよう搭載機器を設計したが、実際は衝撃波による影響を多少受けた。

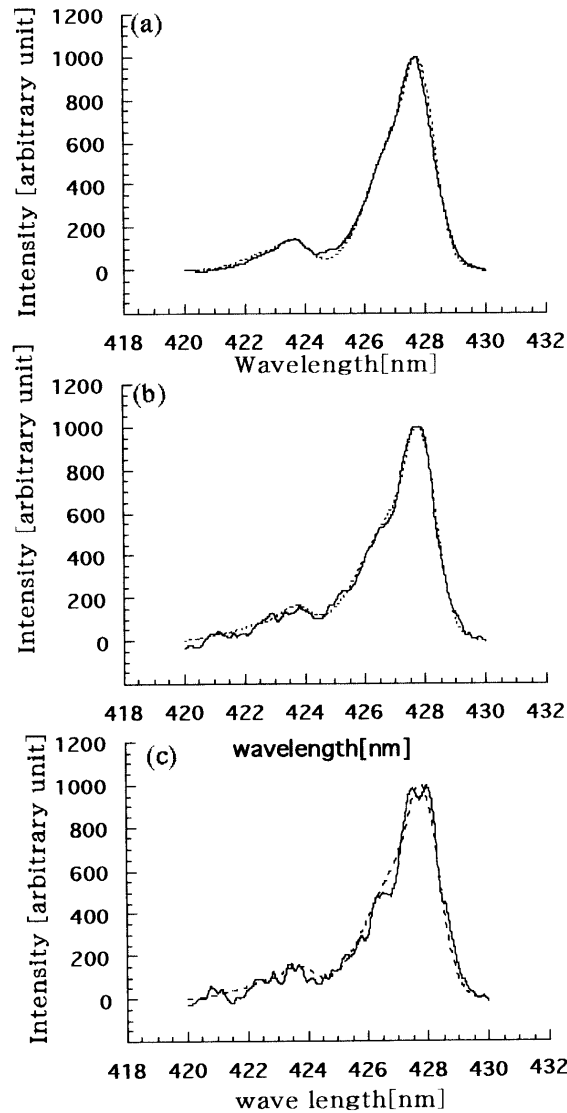


図 24. S-310-24 で取得された各高度におけるスペクトル  
 実線が観測スペクトル、点線が理論スペクトルである。高度と回転温度はそれぞれ  
 (a) 高度  $107 \pm 7$  km, 250 K, (b) 高度  $125 \pm 6$  km, 400 K, (c) 高度  $134 \pm 6$  km, 350 K である。

以上のように回転温度、数密度双方に波状構造がみられた。MSIS 86 モデルからの回転温度の乖離は最大で 100 K にも達した。MSIS 86 モデルが平均的な大気の描像であり潮汐波、重力波のような短時間スケールの現象を考慮に入れていないこと、また観測領域である高度 100–140 km は温度の高度方向の勾配が急で鉛直風による熱移流効果が大きいことを考えれば、本観測にみられるような大きな温度変動は可能である。ここではこの推測の妥当性を検討するため、以下の熱移流方程式を用いて数値計算を行なった。[Rishbeth, Moffett and Bailey ; 1969]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -W \left( \frac{g}{C_p} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4-1)$$

ここで  $T$  は温度、 $W$  は上向きの風速である。 $g$  は重力加速度、 $C_p$  は定圧比熱である。下向きの風があると第一項は断熱圧縮による加熱、第二項は上方からの熱の輸送による加熱（温度の傾きが正の場合）があることを示す。鉛直の風の場合は以下の式を仮定した。

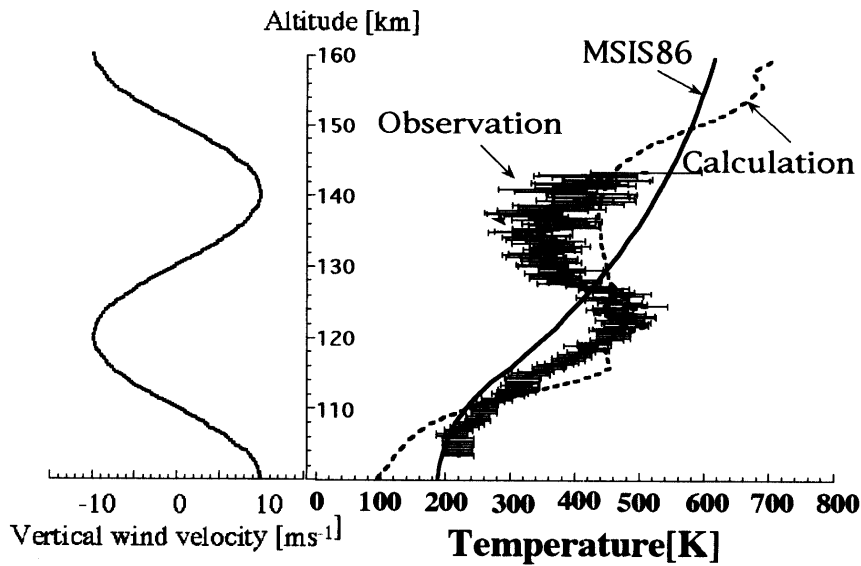


図 25. S-310-24 で観測された回転温度 (誤差棒付き実線) と MSIS 86 による中性大気温度 (実線)  
 点線は MSIS 86 の中性大気温度を初期値として 10 分にわたって左図の鉛直風が吹き続けた場合  
 の温度分布. 下降流 (上昇流) があるとき, 断熱圧縮 (断熱膨張) と上層 (下層) からの熱の移流に  
 より加熱 (冷却) される.

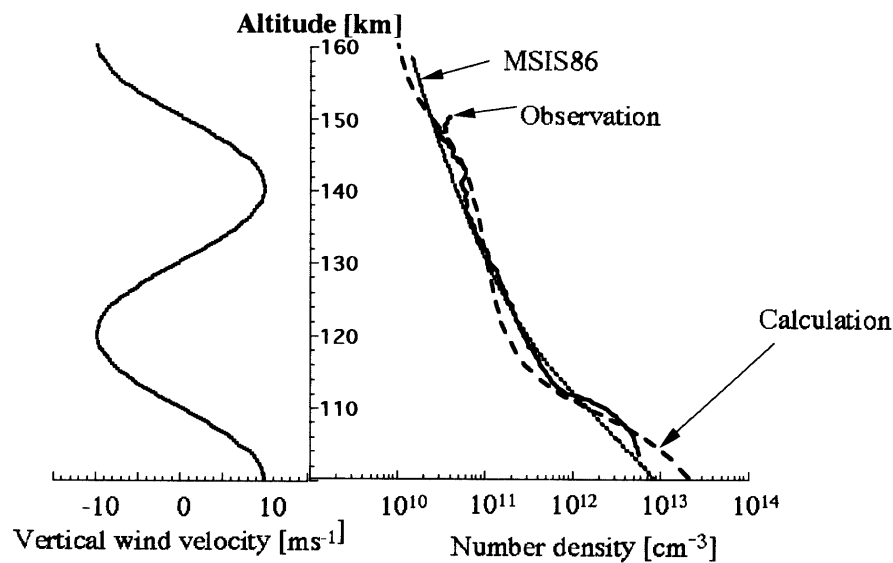


図 26. S-310-24 で観測された数密度 (実線) と MSIS 86 による数密度 (点線)  
 破線は MSIS 86 の数密度を初期値として 10 分にわたって左図の鉛直風が吹き続けた場合の数密  
 度分布. 上昇流域では数密度の高い下層からの移流により数密度が大きくなる.

$$W = A \sin\left(2\pi \frac{z-130}{\lambda}\right) \quad (4-2)$$

ここでは鉛直波長で  $\lambda = 40$  km, 振幅は  $A = 10$  m/s を仮定した. 図 25 の左側に鉛直風場として仮定した波の鉛直  
 プロファイルを示す. 鉛直波長に関しては半日周期の潮汐波  $S_{2,4}$  モードと同程度とした [Osterman, Heelis and  
 Baily; 1994]. 式 (4-2) を式 (4-1) に代入して MSIS 86 モデルの温度分布を初期値として時間発展させて,  
 数値シミュレーションを行なった. 10 分後の計算値を図 25 の破線に示す. 計算結果は観測値と近い値を示す. こ  
 のことから MSIS 86 モデルのような標準的な温度プロファイルに加えて潮汐波のような最大 10 m/s の鉛直風が

10分ほど吹き続ければ、観測された温度プロファイルは十分考えうる現象であることがわかる。また数密度に関しては1次元連続の式を用いて検討した。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -n \frac{\partial W}{\partial z} - W \frac{\partial n}{\partial z} \quad (4-3)$$

ここで  $n$  は数密度、 $W$  は上向きの風速で温度の場合と同様式(4-2)を仮定した。温度の場合と同様に MSIS 86 モデルの数密度分布を初期値として10分間、時間発展させた結果を図26の破線に示す。数密度は下層ほど大きいため、上昇流域では下層から分子が輸送され数密度が大きくなる。図26では特に高度140km付近を中心とする数密度観測値の増大が、数値計算結果とよく一致していることがわかる。

#### 4-3. 振動温度観測結果

図27に過去の振動温度の理論的な計算に加え、O'neil等[1974]による振動温度上限と今回の測定によって得られた振動温度の上限を示す。今回の測定はO'neil[1974]の上限値とよく一致する。振動温度測定は[小山他, 1997]で触れたように二次電子のような低エネルギー電子の影響を強く受ける。高度110km以下では図23に示したようにコレクタ電流値、電子密度ともに大きく、気体からの二次電子の放出が盛んに行なわれていることが示唆される。低エネルギー電子が存在すると、分光スペクトルにおいて  $N_2$  2nd Positive Band (以下2PGと略)群が強く現れる。これは2PG群は入射励起電子エネルギーが14eVと低エネルギー領域で発光断面積の最大値を迎えるためである。図28aに今回の観測で得られた低エネルギー電子がほとんど存在しない場合、図28bに低エネルギー電子が多量に存在する場合のスペクトルプロファイルを示す。図28bの状況下では電子衝撃の際 Franck-Condon の原理が成り立たず振動温度は実際より高く見積もられる。この様子を見るため図29に高度をx軸に、2PG(0,2)と1NG(0,1)のピーク強度の比およびそのときの振動温度をy軸に示した。2PG(0,2)と1NG(0,1)の比と振動温度は良い相関を示し、2PG(0,2)が1NG(0,1)に対し相対的に強く出ると振動温度は実に~1000Kと非常に高く測定されていることがわかる。この高度域での大気の真の振動温度は、図29において2PG(0,2)と1NG(0,1)の比が0.1以下である場合の観測値、500K以下であると思われる。

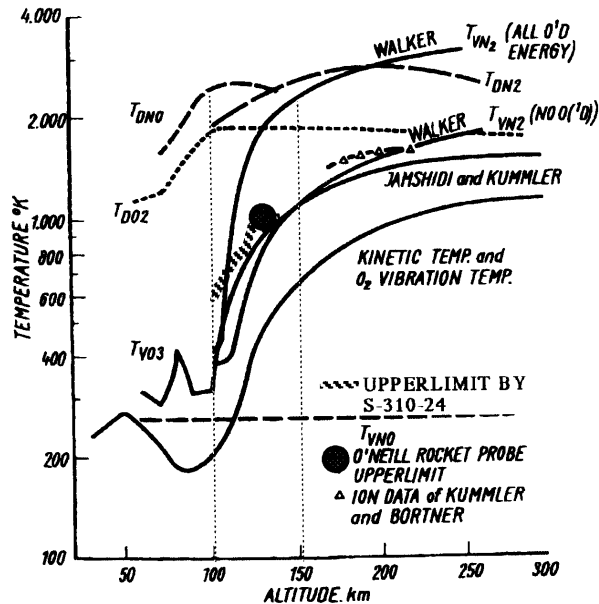


図27. S-310-24による振動温度観測結果(太い点線)と過去の振動温度観測および計算結果(Kummler et al. 1972)

今回の測定は唯一の直接測定であるO'neill(1973)の結果と一致した。

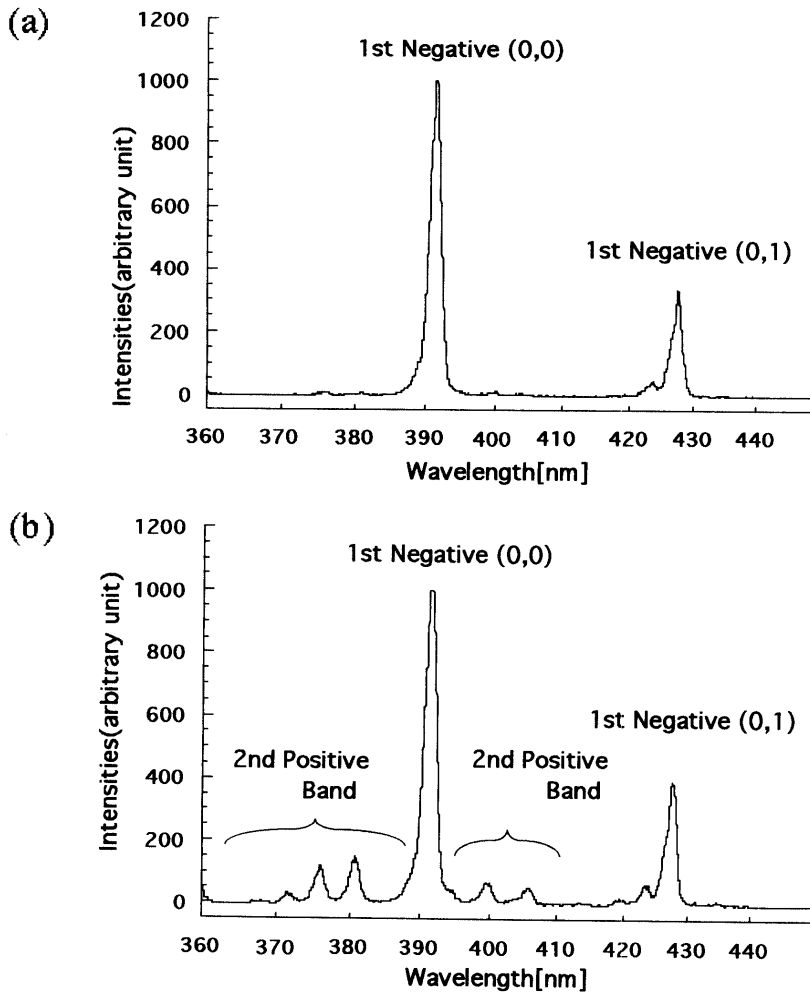


図 28. 低エネルギー電子が少い場合 (a) と多い場合 (b) のスペクトル (b) では 2nd Positive Band 群が大きく現れている。

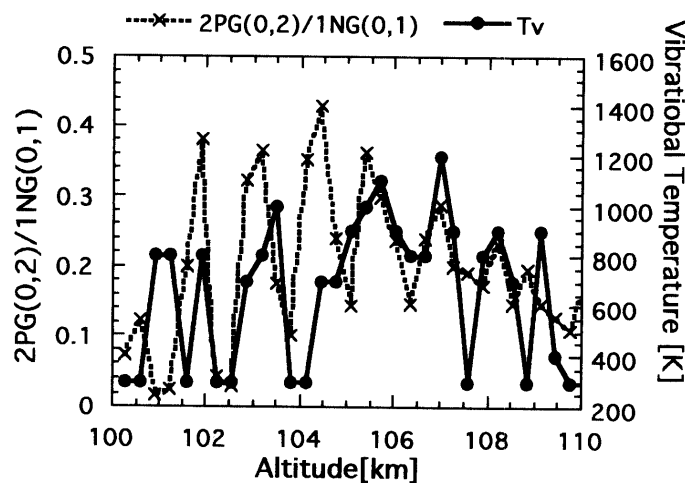


図 29. 振動温度と 2PG (0, 1) の相対的強度の関係  
 点線が 2PG (0, 2)/1NG (0, 1) の比、実線が振動温度である。  
 2PG (0, 1) の 1NG (0, 1) に対する相対強度が大きくなると振動温度が高く測定される傾向にある。  
 注) 本測定器は振動温度 500K 以下では温度分解能がないため、図中、300K と 500K の実質的な違いはない。

## 5. 電離中間層について

高度 130–180 km の領域は E 層と F 層の谷間に当たり、通常、夜間の電子密度は  $10^3 \text{cm}^{-3}$  以下である。しかし、時折、電離中間層 (intermediate layer) と呼ばれる背景電子密度より 1 桁ほど高く緩やかなピークを持った層が F 層下部より降下して高度 120 km 付近で消える現象が観測されている [Shen, Smarts and Farley ; 1976]。電離中間層は半日周期の潮汐波  $S_{2,4}$  モードによる風のシア (shear) によってイオンおよび電子が収束することにより形成されると考えられる [Fujitaka and Tomatsu ; 1973], [Osterman, Heelis and Baily ; 1994]。図 25 の温度観測で波状構造がみられ、潮汐波が存在したことが示唆される。

本測定中に出現した電離中間層の高度変化を図 30 に示す。高度はロケット打上げ場である鹿児島宇宙空間観測所より約 50 km 離れた山川にある電離層レーダで取得されたアイオノグラムにより決定された。19 時 45 分頃に高度 153 km に電子密度のピークが現れ始めた後、この層は下降し 20 時 45 分頃高度 123 km で消滅した。通常、電離中間層の下方伝搬速度は 1.5 m/s である。これは電離中間層が潮汐波により形成され、波の位相の下方伝搬とともに下方に移動するためと考えられている。今回は 6.9 m/s で下方に移動していく様子がみられた。次にこの下方伝搬をイオンの収束という観点で考える。イオンのドリフト速度を決定する式は温度拡散を無視すれば以下ようになる [Chimonas ; 1973]。

$$e(\bar{E} + \bar{u}_\alpha \times \bar{B}) + m_\alpha v_\alpha (\bar{U} - \bar{u}_\alpha) = 0$$

第一項は電磁気学的な力、第二項は中性風による衝突効果である。座標系は磁北方向を  $X$  軸、鉛直上向きを  $Z$  軸、また  $X$  軸、 $Z$  軸に直交して東向きを  $Y$  軸とした。ここで  $\bar{E}$  は電場、 $\bar{B} = B_0(X, O, Z)$  は地球磁場、 $\bar{U} = (U, V, W)$  は中性大気の数、 $\bar{u}_\alpha = (u_\alpha, v_\alpha, w_\alpha)$  はイオン、電子の数で添字の  $\alpha$  はイオンに対して  $i$ 、電子に対して  $e$  をとる。

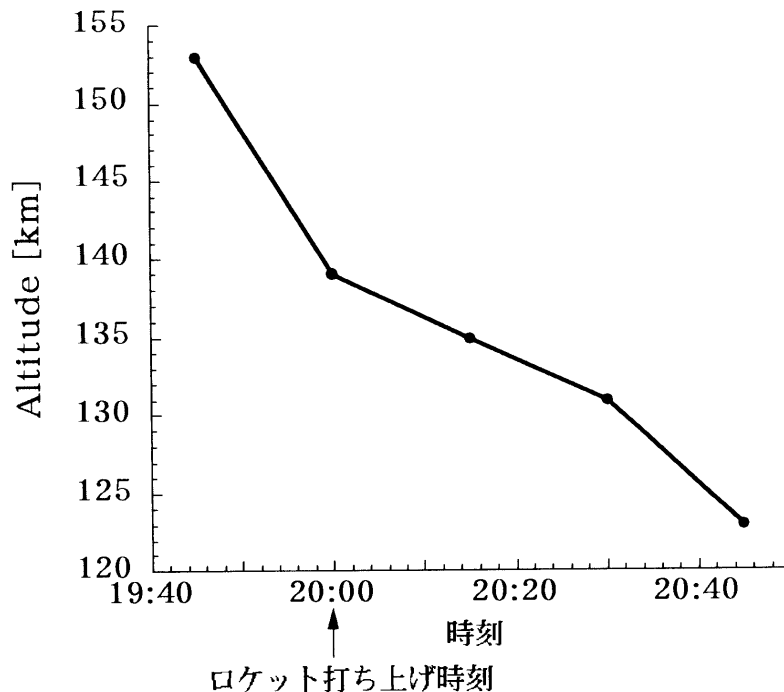


図 30. 電離中間層の高度の時間変化  
19:45 頃、高度約 153 km で発生し、6.9 m/s で下降し続け 21:00 頃、高度 120 km で消滅した。



上式を行列の形に書くと以下のようになる.

$$\begin{pmatrix} 1, & -Q_\alpha Z, & 0 \\ Q_\alpha Z, & 1, & Q_\alpha X \\ 0, & Q_\alpha X, & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_\alpha \\ v_\alpha \\ w_\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U \\ V \\ W + EQ_\alpha/B \end{pmatrix} \quad Q_\alpha = \frac{e_\alpha B}{m_\alpha v_\alpha} \quad (5-1)$$

$Q_\alpha$  はサイクロトロン周波数と衝突周波数の比でイオンに関しては 120 km で 1 となるよう仮定した. 衝突周波数が数密度に比例することから  $Q_\alpha$  は  $\exp\left(\frac{z-120}{H}\right)$  に比例するとした. ここで  $H$  はスケールハイトである. 電子に関しては全観測高度領域においてサイクロトロン周波数の方が大きい, すなわち

$$\frac{1}{Q_e^2} \ll 1$$

とした.

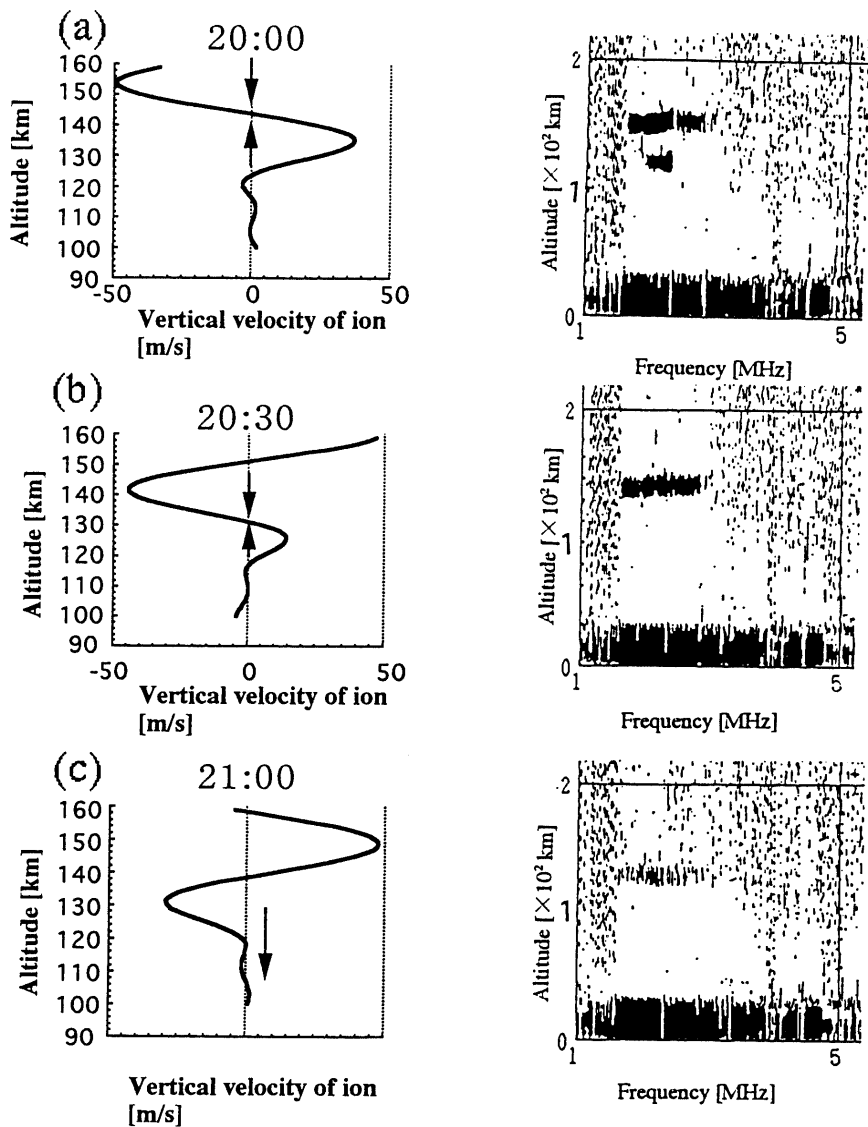


図 31. 各時刻におけるイオン鉛直ドリフト度 (左図) とアイオノグラム (右図)  
 (a) 20:00, (b) 20:30, (c) 20:00 のときである. 左側図において矢印部分でイオンの収束があり中間層が形成され波動の位相の下方伝搬とともに下方へ輸送される. 21:00 では下方ドリフトのみとなり収束が消えて中間層が消滅するがアイオノグラムにおいても中間層が消えたことが観測された.

またイオン質量は電子質量よりはるかに大きいため以下の近似が成り立つ。

$$\frac{Q_i}{Q_e} \ll 1$$

また、高度 120 km 以上では両極性拡散により

$$w_i = w_e$$

が成り立つとする。この仮定は電場が生じないため  $E = 0$  であることを意味する。

以上の仮定から (5-1) を計算してイオン、電子の鉛直ドリフト速度を求めると

$$w_i = \frac{-XQ_iV + XZQ_i^2U + (1 + Z^2Q_i^2)W}{1 + Q_i^2} \quad (5-2)$$

となる。

式 (4-2) と同じような風の場合に位相速度 6.9 m/s を仮定して式 (5-2) で記述される鉛直ドリフト速度を求めたのが図 31a, 図 31b, および図 31c における左のパネルである。ただし電離中間層の現れ始めた日本標準時刻 19:45 を時間の始点とした。図 31a は 20:00, 図 31b は 20:30, 図 31c は 21:00 の場合を示した。また、右のパネルは各時刻のアイオノグラムを示した。アイオノグラムにおいて、黒いエコーが電離中間層に相当する。図 31 の左パネルにおいて上下の矢印で挟まれた部分にイオンが上下から収束し、電離中間層が形成される。この高度はアイオノグラムのエコーと良い一致を示す。また計算では 21:00 に鉛直イオンドリフト速度は高度 115 km 付近で下向きのみになりイオン収束が消えるが、この様子もアイオノグラムで電離中間層が消えることに対応している。

## 6. ま と め

今回の観測の成果は大きく 2 つに分けられる。一番目の成果は窒素分子の回転温度および数密度を同時測定したことである。未だ謎の多い熱圏下部領域での貴重な温度データを提供した。下部熱圏、E 層領域は平均的には高度とともに温度が単調に増加すると考えられているが、今回の観測では、回転温度に関しては鉛直波長 40 km の波状構造が見つかった。MSIS 86 モデルによる並進温度との違いは 100 K にも達し、大きく変化する大気の様子が観測された。実験当日は観測領域で電離中間層が発生していることがアイオノグラム、および S-310-24 号機に搭載されたインピーダンスプローブから知られた。中性大気鉛直風場として半日周期の潮汐波  $S_{2,4}$  モードと同じ波長スケール、振幅を想定すると断熱圧縮および熱の移流により、10 分で MSIS 86 モデルで表される初期状態から観測された温度分布に近づくことがわかった。また、この風の場合によって引き起こされるイオンの鉛直ドリフトから、電離中間層の高度、収束状態を調べたところ、アイオノグラムとよく一致することがわかった。現在、数密度などのデータも入れてモデルを 2 次元に拡張してさらに詳しく解析中である。

2 番目の成果は観測の主目的であった窒素振動温度の測定である。今回の観測は太陽活動度が最低に近く、太陽紫外光のない夜間に行なわれたため、窒素分子はほとんど振動的に励起されないことが推測されたが、それを実証した形になった。高度 100 km 近辺での窒素分子振動温度は 500 K 以下、高度 130 km での窒素振動温度の上限値は 800 K で、O'neil「1974」の測定結果と矛盾しないことがわかった。より高い高度ではスペクトルの S/N 比が小さく有意な測定は行なえなかった。

## 7. 今後の展望

今回の観測の成果に基づき、将来ここに述べた測定器によって少なくとも 2 つの研究課題に取り組みたい。その 1 つは電離中間層および Sporadic E 層中での回転温度観測である。電離中間層は潮汐波、Sporadic E 層は重力波によって引き起こされるとされるが、大気力学を考える上で温度は非常に重要なデータである。今回の観測では偶然、電離中間層発生中に観測を行なうことができたが、次回は電離中間層の発生を地上でモニタしつつ、

同じ測定器を用いて回転温度観測を行なうことで今回の温度分布の再現性を調べることを目指している。垂直風の検出、およびその下部熱圏の温度構造におよぼす影響は今後の重要な課題である。

もう1つの研究課題は振動温度観測である。太陽活動度が最大(2001年頃)の時期で、なおかつ昼間に打ち上げれば、高度100km付近でも振動温度が800K以上に達すると考えられるため、本測定器で振動温度の値が決定できる。またこの時期、大気の並進温度も高度200kmでは1000K程度に達すると考えられ、今回の観測の上限高度(140km)より高高度での観測を可能にすることを目標にしている。そのためには今の測定器のS/N比を100倍高めることが必要である。この目標はより明るい光学系を用い、電子ビーム電流値を増大させ、イメージセンサを冷却すれば十分可能であると考えられる。

## 8. 謝 辞

基礎開発過程で過去5年に渡り脈々と続けられた小山研究室の先輩諸氏の研究成果が本実験の成果として結実した。観測ロケット実験に際しては数々の方々のご協力を頂いた。チェンバ試験では宇宙科学研究所の中村助教授、および相原技官、機械工作では同研究所の佐藤技官、振動衝撃試験では平田技官、風洞実験では本郷技官、電子密度を測定したインピーダンスプローブでは渡辺技官にお世話になった。さらに本研究所市川教授には原子分子物理学の理論的なアドバイスを、慶応大学の中嶋氏に実験的アドバイスを、宇宙科学研究所の安部教授には衝撃波の理論的アドバイスを、向井教授にはトラブルシューティングの指導を戴いた。電子銃開発の過程ではNTT(株)システムエレクトロニクス研究所の島津主幹研究員、斉藤課長らの助言、協力を戴いた。搭載用の電子銃、エレクトロニクス、および分光器はアプロ(株)、エーディー(株)、神和光器(有)によってそれぞれ設計、製作された。特にロケット搭載用イメージインテンシファイアでは浜松フォトリクス(株)島津、大庭両部長以下多くの方々の協力を得た。ここに敬意を表する。最後に同研究所観測ロケット実験班、および実験に協力して頂いた所外各関連機関に対し心からなる謝意を表する。本研究は特定研究費、搭載用基礎開発費により行なわれた。

## 引用文献

- [ 1 ] Barth, C. A. and F. G. Epavier, A method of measuring the temperature of the lower thermosphere, *J. Geophys. Res.*, **98**, A6, 9437-9441, 1993.
- [ 2 ] Bird, G. A., Aerodynamic effects on atmospheric composition measurements from rocket vehicles in the thermosphere, *Planet. Space. Sci.*, **36**, 9, 921-926, 1988.
- [ 3 ] Chimonas, G., Wind component exchange and the rapid vertical movement of a sporadic E layer, *J. Geophys. Res.*, **78**, 25, 5636-5639, 1973.
- [ 4 ] Fujitaka, K. and T. Tohmatsu, A tidal theory of the ionospheric intermediate layer, *J. Atmos. Terr. Phys.* **35**, 425-438, 1973.
- [ 5 ] Gilmore, F. R., R. R. Laher and P. J. Espy, Franck-Condon factor, r-centroid, electronic transition moments and Einstein coefficient for many nitrogen and oxygen band systems, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **21**, 1005-1121, 1992.
- [ 6 ] Hedin, A. E., MSIS-86 Thermospheric model, *J. Geophys. Res.*, **92**, A5, 4649-4662, 1987.
- [ 7 ] Kawashima T., K.-I. Oyama, K. Suzuki, S. Tei and N. Iwagami, A Measurement of vibrational, rotational temperature of N<sub>2</sub> and the number density in the lower thermosphere - Instrumentation and preliminary results, *Adv. Space Res.*, **19**, 663-666, 1997.
- [ 8 ] Kawashima T., K.-I. Oyama, K. Suzuki, S. Tei and N. Iwagami, Measurement of vibrational temperature of N<sub>2</sub> at the height of ~100km, Instrumentation and preliminary results, Proceedings of the 20th ISTS, 96-j-10, 1996.
- [ 9 ] Kummler, R. H. and M. H. Bortner, Vibrational temperature in the E and F regions, *Space Res.* **XII**, 711-719, 1972.
- [ 10 ] O'neil, R. R., W. R. Pendleton Jr., A. M. Hart and A. T. Stair, Jr., Vibrational temperature and molecular density of thermospheric nitrogen measured by rocket-borne electron beam induced luminescence, *J. Geophys. Res.*, **79**, 13, 1942-1957, 1974.
- [ 11 ] Osterman, G. B., R. A. Heelis and G. J. Baily, Modeling the formation of intermediate layers at Arecibo latitudes, *J. Geophys. Res.*, **99**, A6, 11,357-11,365, 1994.

- [12] Oyama K.-I, T. Kawashima and K. Suzuki, Rotational temperature of  $N_2$  and the number density in the height range of  $-100\text{km}$ , Progress report of atomic collision research in Japan, **22**, 111, 1997.
- [13] Oyama K.-I, T. Kawashima and K. Suzuki, Vibrational temperature of  $N_2$  in the height range of  $100-140\text{km}$ , Progress report of atomic collision research in Japan, **22**, 112, 1996.
- [14] Rishbeth, H., R. J. Moffett and G. J. Bailey, Continuity of air motion in the mid latitude thermosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **31**, 1035-1047, 1969.
- [15] Shen, J. S., W. E. Swarts and D. T. Farley, Ionization layers in the nighttime E region valley above Arecibo, *J. Geophys. Res.*, **81**, 31, 5517-5526, 1976.
- [16] 小山孝一郎, 川島高弘, 水町勇一郎, 鈴木勝久, 提井信力, ロケット搭載用窒素振動温度測定器の開発に関する基礎研究, 宇宙科学研究所報告第94号, 1997年.
- [17] 福山恒太, 小山孝一郎, 川島高弘, 安齋貴昭, 提井信力, 窒素振動温度観測用電子銃の開発, 搭載機器基礎開発成果報告書, Vol. 11, 宇宙科学研究所宇宙理学委員会, 1997年.
- [18] 野田 亮, 後藤修平, 川島高弘, 小山孝一郎, 窒素振動温度可変装置の開発, 搭載機器基礎開発成果報告書, Vol. 11, 宇宙科学研究所宇宙理学委員会, 1997年.