

## foil・チャフ放出機構の開発と S-310-29 号機による 上部中間圏及び下部熱圏の中性風風向・風速測定

小泉宜子<sup>1</sup>・下山 学<sup>1</sup>・小山孝一郎<sup>2</sup>・村山泰啓<sup>3</sup>・橋元保雄<sup>2</sup>  
下瀬 滋<sup>2</sup>・長谷川克也<sup>2</sup>・鎌田幸男<sup>2</sup>・阿部琢美<sup>2</sup>

## Development of Foil Chaff Ejection System and Measurements of Neutral Wind using a Sounding Rocket S-310-29

By

Yoshiko KOIZUMI<sup>1</sup>, Manabu SHIMOYAMA<sup>1</sup>, Koh-ichiro OYAMA<sup>2</sup>,  
Yasuhiro MURAYAMA<sup>3</sup>, Yasuo HASHIMOTO<sup>2</sup>, Shigeru SHIMOSE<sup>2</sup>  
Katsuya HASEGAWA<sup>2</sup>, Yukio KAMATA<sup>2</sup> and Takumi ABE<sup>2</sup>

**Abstract:** The dynamics of neutral atmosphere is closely coupled with the behavior of ionized gas and chemical process in the lower thermosphere-mesosphere region. The measurement of the neutral wind at the height region is important to study those processes. So far the neutral wind has been independently measured by a radar-tracking of foil chaffs; a micro rocket is needed for the wind measurement in addition to a main, big rocket which carries other scientific instruments.

In order to conduct simultaneous wind and other measurements onboard a single rocket, we have developed two types of foil chaff ejection systems to be installed in a sounding rocket. We have tested two foil chaff ejection systems: 1) foil chaffs are accommodated in an airtight cylinder case whose sealing cap is removed with one atmospheric pressure, 2) foil chaffs are accommodated in the splitted cylinder, which is ejected by a spring.

These two ejection systems were loaded on a sounding rocket S-310-29, which was launched on the 10th, January, 2000. About 20,000 pieces of foil chaff in total were successfully ejected during the downleg of the rocket, around the height of 100km, 341sec after the launch. The foil chaff were tracked in the height range of 95.0-88.5km by the primary radar and the velocity and direction of the neutral wind were obtained.

### 概 要

中間圏及び下部熱圏高度における中性大気の力学過程は電離気体と密接な関係があるため、この高度領域での中性風の測定は重要である。今までは米国製マイクロロケット(パイパーロケット)から

1 東京大学大学院 理学系研究科

2 宇宙科学研究所

3 通信総合研究所

放出されたフォイル・チャフをレーダーで追尾することにより、単独で中性風の測定を行っていた。そこで複数の地球物理的なパラメータと同時に中性風の測定を行えるよう、観測ロケットからフォイル・チャフを放出する機構の開発を行い、下記の二通りの放出機構を試した。

- 1) フォイル・チャフを封入した円筒を大気圧封じし、高度約 100km での圧力差により放出する方法
- 2) フォイル・チャフを封入した縦に割れ目の入った円筒をバネの力で放出し、竹割りの要領でフォイル・チャフを散布する方法

それぞれの円筒には約 5,000 枚のフォイル・チャフを封入でき、ロケット側面から放出を行う。

2000年1月10日に打ち上げられた観測ロケットS-310-29号機にフォイル・チャフ放出機構を搭載し、打ち上げ 341 秒後のロケット下降時に合計約 20,000 枚のフォイル・チャフを放出することに成功した。フォイル・チャフは一次レーダーモードで高度約 95.0-88.5km の間で追尾され、レーダーの情報から中性風の風向・風速が得られた。

**重要語:**チャフ, 中性風

## 1. はじめに

高度 80-100km 付近の上部中間圏、下部熱圏における地球物理現象として、大気光や Es 層 (sporadic E layer) の発生などが挙げられる。この大気光の波状構造や Es 層の成因には、大気の運動が深く関わっており、そのためこの領域での大気の力学過程、即ち中性大気風向・風速の情報を得ることは、これらの現象を解明するうえで重要である。これまでこの高度領域での中性風測定は、他の測定器とは別にマイクロロケットを打ち上げ、フォイル・チャフや落下球を放出しレーダー追尾することで行ってきた。この報告では、一機の観測ロケットによって他の測定器と同時に中性風の情報を得ることを目的とした、フォイル・チャフ放出機構の開発と測定結果について述べる。

## 2. フォイル・チャフによる中性風測定

中性風の測定は、中波レーダーによる測定(間接測定)と落下球や発光雲などを利用したその場での測定(直接測定)の二つに大分される。直接測定の主な手法は、ロケットから放出した目標が落下しながら大気の動きと共に動くのをレーダーで追尾するもので、目標の落下速度が測定精度の高度分解能を決定する。大気密度は高度が下がると指数関数的に増加するため、上空から落下してきた目標は高度を下げるごとに空気抵抗が急速に大きくなり、落下速度は減速してある高度で終端速度に達する。また落下速度は大気密度の他に、目標の単位面積あたりの密度(以下、面密度)も関係し、落下球やパラシュートの場合は面密度が約 150-200g/m<sup>2</sup> で終端に達した落下速度は 100m/s 以上になる。より高い高度分解能を得るためには、目標の落下速度は数十 m/s 以下が望ましい。この落下速度になるためには、面密度が数 g/m<sup>2</sup> 程度になるものを目標に用いればよい。この条件にかなったものがチャフ(chaff)である。

チャフはもともと軍事技術の一つで、航空機等が相手のレーダーに探知もしくは追跡されるのを妨害するために散布する金属片である。この金属片は、強力な電波反射体になるよう妨害するレーダーの半波長分の長さを持った双極子(dipole)になっている。これに用いられる双極子の形状は細い線状(cylinder)であるが、落下速度が速すぎるうえに拡散が速いため、上部中間圏・下部熱圏高度の風速測定には適さない。図 1 は高度に対応するレイノルズ数と空気抵抗の対比である。線状や微粉末状(sphere)のチャフに比べ箔状(plate)は空気抵抗が大きくなり、落下速度が小さくなる [Widdel,1990]。従って dipole の形状が箔状のものが最も風速測定に適している。この箔状チャフはフォイル・チャフ(foil chaff)と呼ばれる。フォイル・チャフによる中性風の測定はドイツの Max-Planck 研究所の H.-U. Widdel が開発した手法で、ヨーロッパを中心に測定が行われている。日本では 1997 年に Murayama *et al* [1999a,b] が成功している。

ここでフォイル・チャフ(以下では単にチャフと記述する)による中性風測定について説明する。ロケットから放出されたチャフの塊はチャフクラウド(chaff cloud)を形成し、その場での大気の動き(中性風)によって動いていく。このチャフクラウドをレーダーで追尾し、その軌跡を解析することで、中性風の東西、南北、鉛直成分の情報を得るという方法である(図2)。測定は乱流やシアアー(shear)によってチャフクラウドが散逸してレーダーに受からなくなるまで行われる。

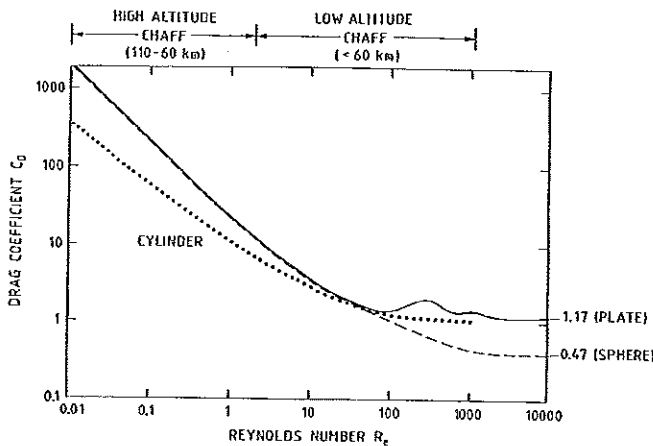


図1 チャフの形状による空気抵抗  $C_D$  の違い [Widdel,1990]

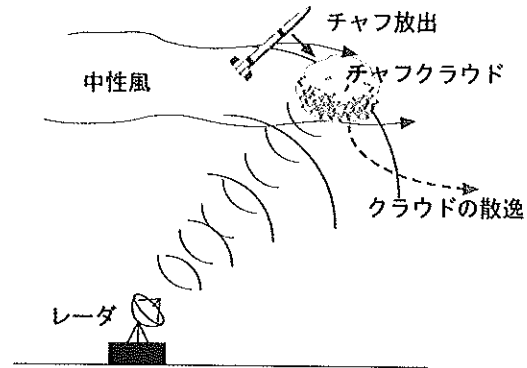


図2 チャフによる中性風測定法

前述したように使用するチャフの面密度が高度分解能を決める他に、幅及び長さはそれぞれ測定高度の平均自由行程の大きさと、追尾するレーダーの半波長分で決まる。また測定する高度範囲はチャフの厚さで決まり、厚さ  $1.0\mu\text{m}$ (面密度  $1.7\text{g}/\text{m}^2$ ) のチャフでは測定高度範囲は  $100\text{-}86\text{km}$ , 厚さ  $2.5\mu\text{m}$ ( $3.4\text{g}/\text{m}^2$ ) では測定高度範囲は約  $95\text{km}$  以下になる [Widdel,1991]。

チャフクラウドのレーダーによる追尾は、チャフの落下速度が終端速度に達してから行われるため、あらかじめチャフの動きを予測しておく必要がある。チャフの振舞いは、鉛直方向上向きを正にとると運動方程式(1)で表される。式(1)で、右辺の第一項は重力を、第二項は空気抵抗を表している。

$$m \frac{dv}{dt} = -mg - \frac{1}{2} C_D \rho v^2 \ell'^2 \quad (1)$$

ここで、 $m$  はチャフの質量 [ $\text{kg}$ ](= 面密度 $\times$ 幅 $\times$ 長さ)、 $v$  はチャフの鉛直方向速度 [ $\text{m}/\text{s}$ ]、 $g$  は重力加速度、 $\rho$  は大気密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]、 $\ell'$  はチャフの代表的な長さ(=  $\sqrt{\text{幅}\times\text{長さ}}$ )である。また  $C_D$  は空気抵抗の摩擦係数であり、式(2)で表される。

$$C_D = \frac{8cM}{(\rho\sigma\ell' + CM) \cdot v} \quad (2)$$

ここで、 $c$  は熱速度 [ $\text{m}/\text{s}$ ]、 $M$  は大気平均分子量 [ $\text{kg}$ ]、 $\sigma$  は衝突断面積 ( $5.0 \times 10^{-19}\text{m}^2$ ) をそれぞれ表し、 $C$  は完全弾性衝突をすることを  $C=4$  という定数を与える(完全非弾性衝突とした場合は  $C=2$ ) [Widdel,1990]。

図3aは厚さ  $1.0\mu\text{m}$ (幅  $5\text{mm}$ , 長さ  $25\text{mm}$ , 面密度  $1.7\text{g}/\text{m}^2$ ) のチャフを用いた場合で、式(1)の運動方程式に、初期条件として高度  $105\text{km}$  で鉛直下向きに速度  $1.43\text{km}/\text{s}$ , 高度  $100\text{km}$  で速度  $1.47\text{km}/\text{s}$ , 高度  $95\text{km}$  で速度  $1.5\text{km}/\text{s}$  をそれぞれ与えたときの、チャフの高度の時間変化であり、図3bは同じ初期条件でのチャフの落下速度である。初期条件の高度と速度は、後述するロケット実験で搭載する S-310 型ロケットの下降時(down leg)に予測される

おおまかな値で、ロケットから水平方向の初速度0で放出した状況を想定した。また式(1)の運動方程式に必要な大気パラメータは、CIRA72の平均モデルを使用した。

図3a,bからチャフは数十秒で、重力と空気抵抗のバランスのとれた状態になることが分り、このとき数十m/sの終端速度に達していることが分かる。終端速度に達する高度は、放出高度に依らずほぼ一定で90-95kmになる。放出高度が高すぎると終端速度になるまでの急激な落下によりチャフが拡散してしまうが、逆に放出高度が低すぎた場合でも、放出後すぐに終端速度になってしまいチャフクラウドを形成せずに広がってしまう可能性がある。従って放出高度は終端速度になる高度よりある程度上でなくてはならない。

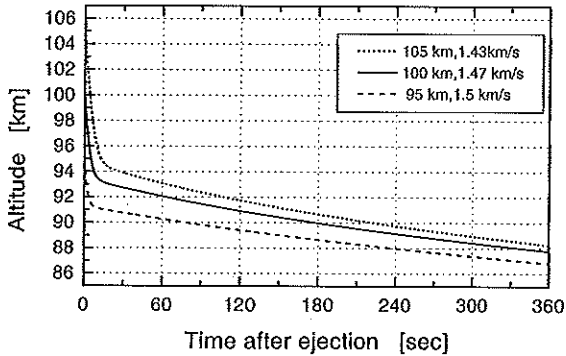


図 3a 予測されるチャフの高度変化

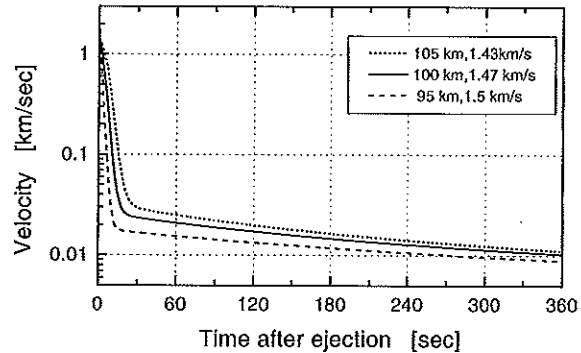


図 3b 予測されるチャフの落下速度の変化

### 3. 放出機構の開発

過去に行われたチャフによる中性風測定は、マイクロロケットのペイロードに詰め込んだチャフを放出することで行っていたため[Widdel,1985],同時に複数の大気パラメータを得ることができなかった。そこで一機のロケットで複数の測定器による観測と同時にチャフによる中性風の測定を行うためには、観測ロケットに搭載が可能なフォイル・チャフ放出機構の開発が必要となった。本研究では、文部省宇宙科学研究所の観測ロケット S-310 搭載用フォイル・チャフ放出機構として気圧式とバネ式の二方式を開発した。以下にそれぞれの機構の概要を記す。

#### 3.1 気圧式

気圧式は、チャフの入った筒を地上で大気圧封じし、高高度での外気との圧力差を利用して蓋を開け、チャフを放出する方法である(図4a)。筒の寸法(内径×長さ)は50mmφ×179mmで、二筒が逆向きについており二方向に放出できるようになっている。それぞれの蓋と一体化したシャフトは互いにワイヤーカッターを通してステンレス線につながっていて、放出高度でワイヤーカッターが作動しステンレス線が切れることで、シャフトの溝に引っかかっていたロックプレートが解除され、蓋が圧力差で飛び出す際にチャフをスポンジで掻きだし放出する。蓋の内側とシャフトが通る穴の部分にOリングを施すことで、筒が大気圧を保ちリークしないようになっている。また高度100kmでの大気圧は約10<sup>-4</sup>torrになることから、約18kgfの力が蓋にかかりシャフトにも放出方向に力が加わるため、ロックプレートはシャフトにかかる力に耐えられるようステンレスを使用した。またロックプレートは、この原理を用いてバネの力で放出時に支障なく解除できるようになっている。放出確認のため、蓋の横にマイクロスイッチが取り付けられている。この方式は、次に記すバネ式と比べてチャフを収める手順は比較的簡単であるが、円筒内の大気圧封じを保つことが重要である。

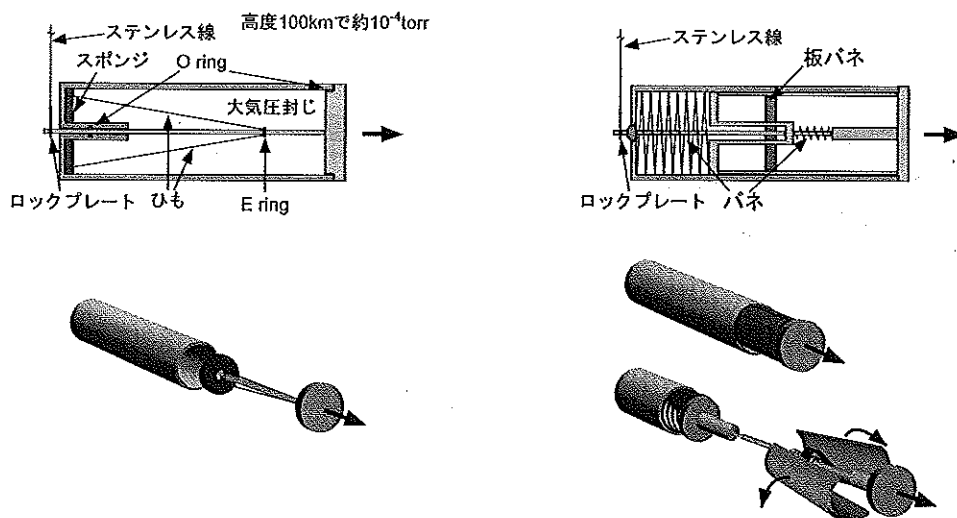


図4a フォイル・チャフ放出機構：気圧式

図4b フォイル・チャフ放出機構：バネ式

### 3.2 バネ式

バネ式は、マイクロロケットで用いられたチャフ放出方法に基づいた方法である。縦に割れ目のはいた筒にチャフを入れ、筒をバネで押し出すと同時に中の小さなバネ及び板バネの力で筒が分解する竹割りの要領でチャフを放出する(図4b)。チャフを取める筒の寸法は54mmφ×125mmで、気圧式と同様、二筒が逆向きについており二方向に放出できるようになっている。放出作動方法も気圧式と同様、放出高度でワイヤーカッターが作動しステンレス線が切れることでロックプレートが解除され、バネの力で筒を放出する。またマイクロスイッチが筒の側面に取り付けてあるので、筒が放出されたか否かを確認できるようになっている。こちらは、気圧式と比べて構造が複雑なためチャフを取める手順が多くなるが、気圧に関係なく作動することが長所である。

## 4. ロケット実験

開発したフォイル・チャフ放出機構は、文部省宇宙科学研究所の観測ロケット S-310-29号機に搭載され、鹿児島宇宙空間観測所(KSC, 131°04'E, 31°15'N)から2000年1月10日5時50分JSTに上下角77°、方位角135°で打ち上げられた。

S-310-29号機には前述した気圧式とバネ式の二つのフォイル・チャフ放出機構を搭載した(図5)。搭載した機構は気圧式2筒、バネ式2筒の計4筒である。また使用したチャフは厚さ1.0μm、幅5mm、長さ25mm、面密度1.7g/m<sup>2</sup>で、4筒合わせて約20,000枚封入した。S-310-29号機は全長7509mm、外径310mmで頭胴部、モーター部、尾翼部より構成されている。頭胴部は全長2352mm、外径310mmで開頭コーン部、観測計器搭載部、基本計器部、頭胴部接手部及びチャフ部からなる。チャフ部はS-310-29号機で初めて設けられた。チャフ部には90°等分、4箇所に70mmφのチャフ放出用窓を設定し、フォイル・チャフ放出機構とロケット壁面までの間に筒状のガイドが設置されている。図6に搭載位置を示す。

KSCから打ち上げられたS-310-29号機は、打ち上げから341秒後のロケット下降時に高度約100kmでチャフの放出を行った。全4筒放出の成功は、各筒に取り付けてあるマイクロスイッチの開閉で得られる出力電圧をテレメータで受信することで確認した。

ロケットを追尾していたレーダーは、チャフ放出の約1分前に自動追尾からコンピュータスレーブに、二次レーダーモードから一次レーダーモードに切り替えチャフ捕捉に備える。チャフ放出後コンピュータスレーブからマ

ニユアルに切り替える。ロケットとチャフが直距離にして約 600m 以上離れ、ロケットがレーダーのレンジゲートの外に出てチャフの反射信号のみになってからレンジオート、アングルオートに続いて自動追尾を開始する。チャフからの信号が受信できなくなるまで、放出後約 5 分間追尾を行った。

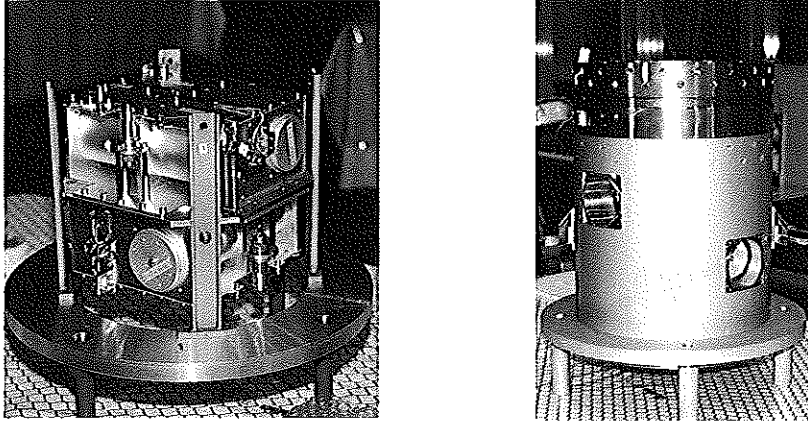


図5 S-310-29号機に搭載したフォイル・チャフ放出機構(左)とチャフ部(右)

レーダーによって追尾されたチャフのデータから、中性風について算出を行った。算出には、レーダーの追尾状態が良好であり、チャフからの受信レベルが十分なデータを用いた(打ち上げ後 353.0 ~ 629.9 秒)。チャフの位置はレーダーからの直距離、方位角、仰角の3成分で得られ、データ間隔は 0.1 秒である。これを直交座標に変換し、チャフの位置を東西方向  $x$ 、南北方向  $y$ (KSC を原点として東と北をそれぞれ正とする)、地球の丸みを考慮した高度  $h$  で表す。10 秒間の位置データを移動平均してチャフクラウドの中心を求めた後、時間微分を行い高度 50m 間隔で平均して水平風速および落下速度とした。算出した速度の鉛直成分が鉛直風速ではなく落下速度になるのは、重力による落下を含んでいるためである。

## 5. 結果および考察

図7はS-310-29号機とチャフの位置、図8aはチャフの水平面上の軌跡、図8bはチャフの高度変化である。図8a,bによると、チャフクラウドは数百mの広がりをもっているように見える。しかし、実際にはチャフはレンジゲートの大きさ(約1.2km)よりも大きく広がっていたと報告されている。実際のチャフの広がりと追尾データとで違いが生じるのは、追尾データがレンジゲート内におけるチャフからの反射のうち、受信レベルが高い部分を表しているためである。

解析で算出された東西、南北風速(東向きと北向きがそれぞれ正)および落下速度の高度プロファイルを図9に示す。放出されたチャフは、高度約 95.0-88.5km の間を大気による減速を受けて緩やかに落下しながら、南西方向に流された後、南東に方向を変えている。水平風速から、西から東向きに変化するのは高度 91.5km 付近であり、全般的に南に約 50m/s の風速であることが分かった。また図8bのチャフの高度変化において、高度 90.5km 付近で鉛直方向の大きな動きがあり、この高度に対応する水平面上の軌跡でも同様の大きな東西方向の動きが見られる。この影響が風速に大きな変動として表れている。

図9において、水平風速、落下速度の3成分とも高度に対して波状のゆらぎが見られる。特に東西成分と鉛直成分については、ともに個々の振幅が顕著で両成分の位相が合っているように見える。この波状のゆらぎについて、どのくらいの鉛直波長が卓越しているかを高速フーリエ変換(FFT)を用いて解析し、結果を図10に示した。東西成分と鉛直成分はともに 300m の鉛直波長が卓越している。南北成分は 200m や 300m 程度の鉛直波長でピークが見られるが、特に卓越したものは見られない。

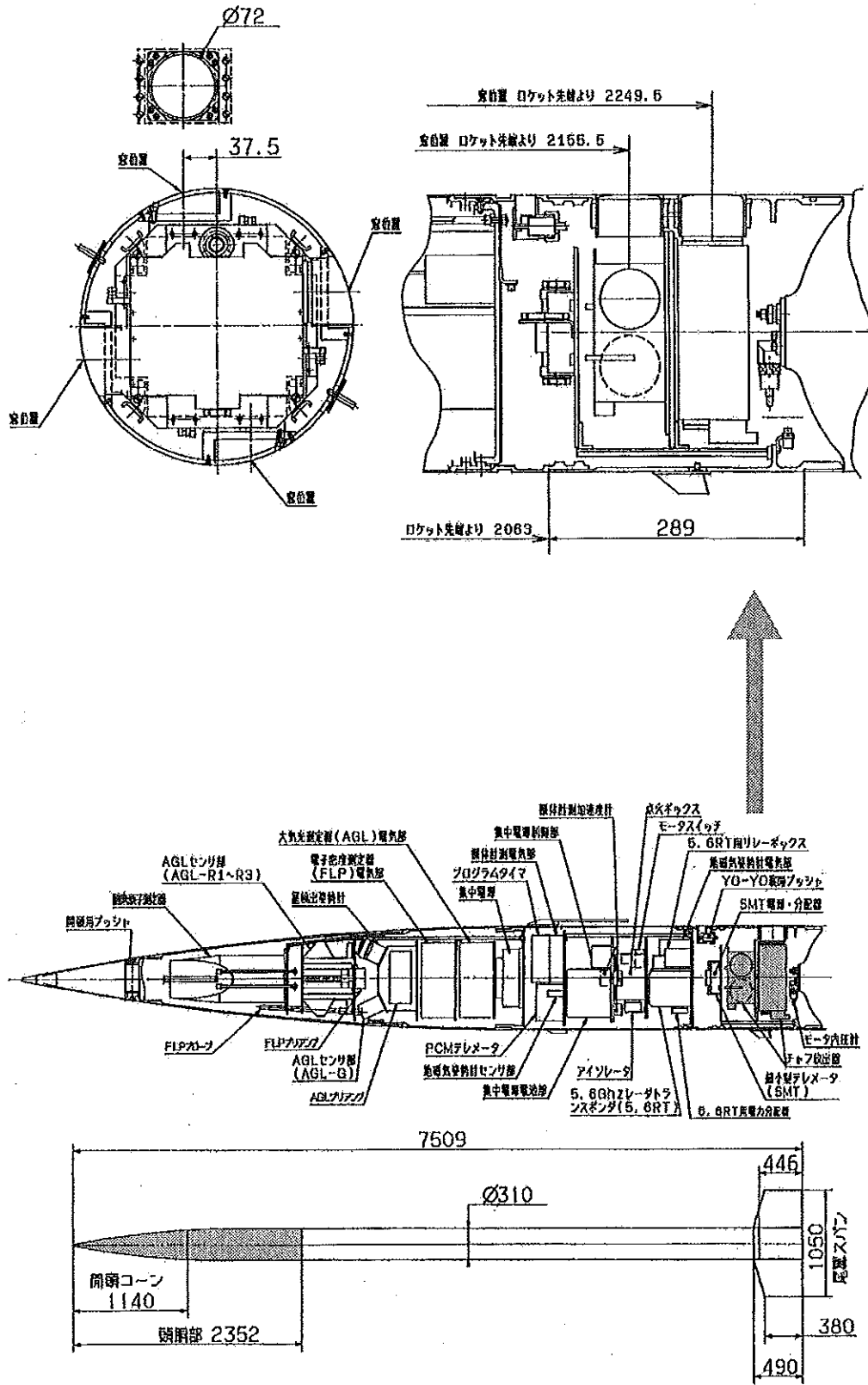


図6 フォイル・チャフ放出機構搭載位置

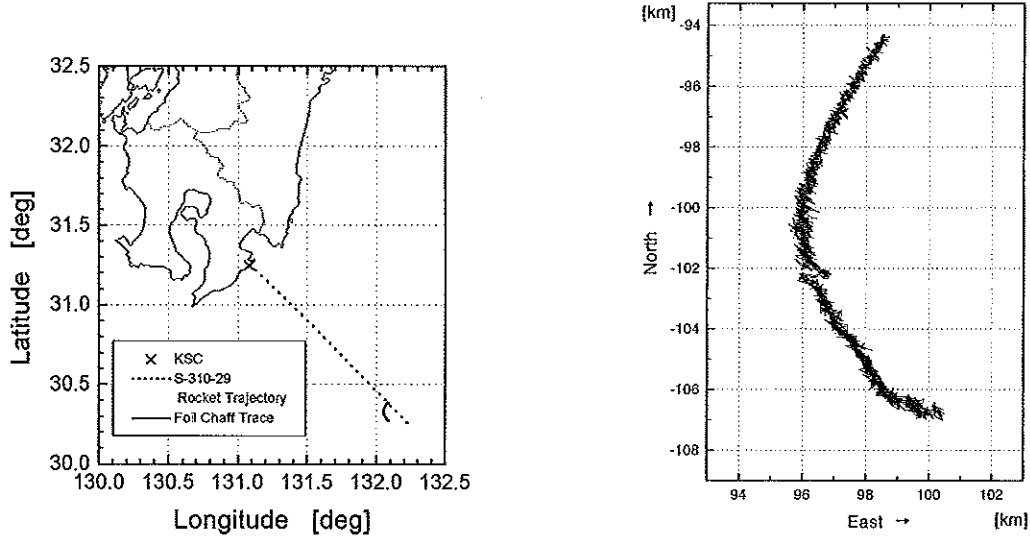


図7 S-310-29号機の軌道(点線)およびチャフの軌跡(実線)

図8a 放出したチャフの水平面上での軌跡

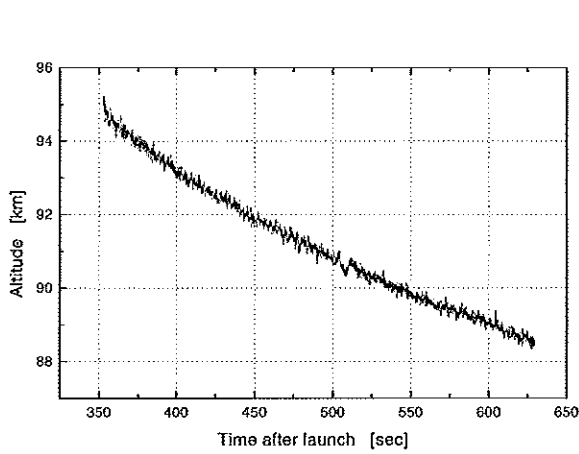


図8b 放出したチャフの高度変化

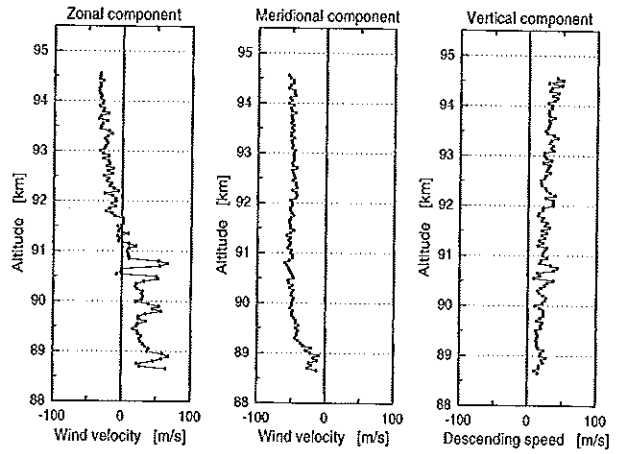


図9 チャフの軌跡から得られた東西風速(左), 南北風速(中), 落下速度(右)

波状のゆらぎの解釈として、この領域でよく観測される大気波動の一種の内部重力波としてこのゆらぎを考えると、上昇流で西向き(下降流で東向き)の重力波が挙げられる。一般的な内部重力波の水平スケールは数十~数千 km, 鉛直スケールは数~十数 km である。それと比較して、チャフで測定された東西、鉛直成分の鉛直波長は短く波面の立った重力波となり、一般的な内部重力波とはかなり性質が異なるものである。



## 6. ま と め

本研究では、観測ロケット S-310 にフォイル・チャフ放出機構を搭載することで他の測定器とともに同時に中性風を測定できるよう、フォイル・チャフ放出機構を開発し、S-310-29号機に搭載して実際に測定を行った。

フォイル・チャフ放出機構として気圧式、バネ式の二通りの機構を開発した。両方とも S-310-29号機によるロケット実験で放出の成功が確認されている。ロケットから放出したチャフのレーダー追尾により高度約 95.0 - 88.5km の間で中性風測定を行い、解析の結果、高度 91.5km 付近で東西成分の風向が入れかわり、全測定領域にわたり南向きに約 50m/s の風速をもつことが分かった。また高度 90.5km 付近で、東西および鉛直成分に大きな変動が確認された。さらに水平風速、落下速度それぞれに、高度に対して波状のゆらぎが見られ、特に東西風速と落下速度のゆらぎはともに鉛直波長が 300m で位相も一致している。このゆらぎを内部重力波と仮定すると、一般的な重力波と比べ鉛直スケール、特に水平スケールがかなり小さいものになってしまう。

今後は、風速に見られる波状構造についての考察と、東西・鉛直成分に見られる大きな変動についての解析を進める必要がある。またチャフクラウドの形状や広がりの変化から波動や乱流による大気の鉛直運動が存在が推察できる [Widdel,1987] ので、次回のロケット実験ではレンジゲート内全域でのチャフからの受信状態を表すビデオ波形をモニタすることを検討している。

## 7. 謝 辞

本研究を進めるにあたりご協力頂いた、観測ロケット実験班および所外関連機関の皆様にお礼申し上げます。高速度カメラによるチャフ放出の撮影は喜久里豊氏にご協力頂きました。放出機構の設計・製作は株式会社エーディーによるものです。なお、フォイル・チャフ放出機構の開発は平成 11 年度搭載用基礎開発費の一部を用いて行われました。

## 8. 参 考 文 献

- [1] Murayama, Y., K. Igarashi, I. Nishimuta, R. Yamazaki, K.-I. Oyama, T. Tsuda, T. Nakamura, S. Fukao, H.-U. Widdel and K. Schlegel: Cooperative wind observation in the upper mesosphere and lower thermosphere with foil chaff technique, the MU radar, and Yamagawa MF radar, *Earth, Planets and Space*, 51, 719-729, 1999a.
- [2] Murayama, Y., K. Igarashi, I. Nishimuta, R. Yamazaki, K.-I. Oyama, T. Tsuda, T. Nakamura, S. Fukao, H.-U. Widdel, and K. Schlegel: Wind observations in the MLT region over southern Japan, by using foil chaff technique, Yamagawa MF radar and the MU radar, *Adv. Space Res.*, 24, 575-578, 1999b.
- [3] Widdel, H.-U.: Foil clouds as a tool for measuring wind structure and irregularities in the lower thermosphere (92-50 km), *Radio Science*, 20, 803-812, 1985.
- [4] Widdel, H.-U.: Vertical movements in the middle atmosphere derived from foil cloud experiments, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 49, 723-741, 1987.
- [5] Widdel, H.-U.: Foil chaff clouds as a tool for in-situ measurements of atmospheric motion in the middle atmosphere: their flight behaviour and implications for radar tracking, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 52, 89-101, 1990.
- [6] Widdel, H.-U.: Experimental evidence for solitary waves in the middle atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 96, 15,931-15,942, 1991.

