

WAVE2004キャンペーンにおけるフォイル・チャフによる 中性風測定と電子密度測定との比較

小泉 宜子¹・村山 泰啓²・川村 誠治²
阿部 琢美³・小山 孝一郎³

Neutral wind measurement from foil chaff experiment during WAVE 2004 campaign

By

Yoshiko KOIZUMI¹, Yasuhiro MURAYAMA², Seiji KAWAMURA²,
Takumi ABE³, Koh-ichiro OYAMA³

Abstract: Foil chaff experiment using a sounding rocket S-310-33 was carried out during the WAVE 2004 campaign. This is a campaign to study the formation process of the waves in the airglow structures. S-310-33 was launched at 0:30JST on the 18th January 2004, from Uchinoura, Japan and about 20,000 foils were successfully ejected and tracked by primary radar. The velocity vector of the neutral wind was obtained in the height range of 96-85km. The results indicate a very strong northward wind above 89 km and an eastward wind below. Preliminary results of Fast Langmuir Probe (FLP) and Medium Frequency Receiver (MFR) show that electron density has a significant increase at about 89 km. This density variation is analyzed based on wind shear theory using the neutral wind observation.

概 要

大気光波状構造形成過程の解明を目的とするWAVE2004キャンペーンの一環として、観測ロケットS-310-33号機ロケット実験が行われた。本ロケット実験では、酸素原子密度・電子密度・大気光発光強度の鉛直分布を観測したほか、微細な大気波動の特性を解明するため中間圏・下部熱圏での風系を高精度で直接測定できるフォイル・チャフを用いた観測を行った。測定は高度96-85kmの領域で行われ、高度89km以上では非常に強い北向きの風が、それ以下では東向き風の風が卓越していたことが分かった。また同じくS-310-33号機に搭載されたラングミュアプローブ (FLP) および中波帯電波受信機 (MFR) の観測から、高度89km付近において急激な電子密度の変動があったとされている。本研究では、この89km付近にみられる電子密度の変動と中性風との関係について、Wind shear理論で説明できるか検証を行った。

¹東京大学大学院 理学系研究科

²情報通信研究機構

³宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

1. はじめに

2004年1月に行われたロケット・地上総合観測「大気光波状構造 (WAVE2004) キャンペーン」は、大気光の波状構造の理解を目的としており、その主要因と考えられている大気波動の観測は特に重要となる。S-310-33号機ロケット実験では、酸素原子密度・大気光発光強度の観測の他に、中性風や電子密度の測定も行われた。本稿では、同ロケットに搭載されたフォイル・チャフ (以下、チャフ) による中間圏・下部熱圏高度の中性風測定の結果と、風向が変化する高度とほぼ同高度で見られる電子密度の急激な変動との関係について報告する。

2. フォイル・チャフによる中性風測定

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氏が開発した手法で、ヨーロッパを中心に測定が行われており [Widdel, 1985], 日本では1997年に最初の実験が行われている [Murayama et al., 1999a,b]. さらに、2000年には観測ロケット搭載用チャフ放出機構を開発し測定に成功した [Koizumi et al., 2004]. これにより複数の測定器と同時の直接測定が可能となった。

チャフとは両面にアルミを蒸着した短冊状のプラスチック箔のことで、1枚の大きさは約5mm×25mm、厚さ1 μ mである。数千～数万枚のチャフを高度100km付近で放出し、チャフが電波を反射する性質を利用してレーダーで追尾を行い、その軌跡から風向・風速を算出する。

S-310-33号機は内之浦宇宙空間観測所 (USC) から2004年1月18日0時30分JSTに南東方向に打ち上げられ、打ち上げ277秒後のロケット下降時の高度約103kmで約20,000枚のチャフを放出した。放出したチャフは、打ち上げ後289.4秒に新精測レーダーで捕捉し、約13分間にわたって追尾が行われた。同時にチャフからの反射の受信強度を示すビデオ波形も取得した。また打ち上げ後413.9～555.0秒については、旧精測レーダーでも追尾に成功し、新精測の結果とほぼ一致していることが確かめられた。

3. 観測結果

図1は、チャフの水平面上での軌跡と高度変化である。チャフは高度96～84kmの間を大気による減速を受けて緩やかに落下しながら北向きに流された後、東に方向を変えて流されている。この軌跡から高度分解能500mで算出した水平風速および落下速度を図2に示す。東西風速は、高度89km以上で西向きの風が吹いており、それより下では高度が下がるにつれ東向きの風が強くなっている。南北風速は、高度94kmで140m/sという非常に強い北向きの風が観測され、それより下では弱まって高度88km付近でほぼゼロになっている。このように高度約89kmを境に、上部では非常に強い北向きの風が、下部では東向きの風が卓越していることが分かった。

今回の実験では、情報通信研究機構の山川MFレーダーでも中性風・電子密度の同時観測が行われている [川村他, 2005]。図2の破線はMFレーダーで観測された水平風速で、チャフの測定時刻 (0:34-0:49 JST) に近い0:30JSTの30分平均値を使用している。東西成分については、どの高度でも東向きの風で10 m/s程度で、チャフに見られる風向の変化は観測されていない。南北成分では北向きの風が観測されており風向についてはチャフと一致するが、100m/sを超えるような強い風は観測されていない。

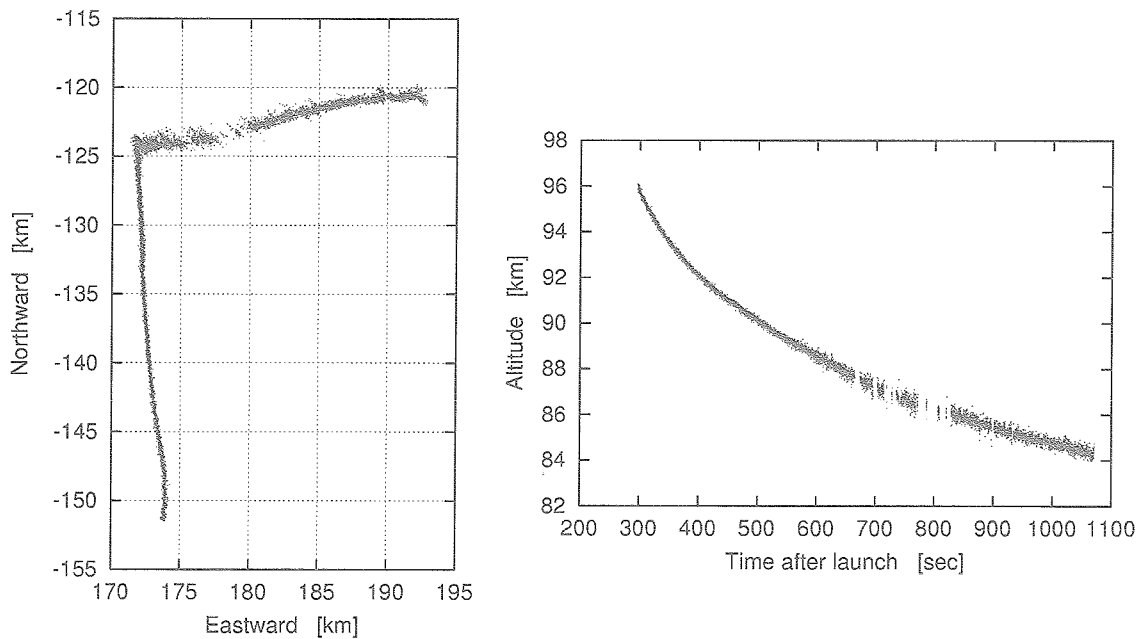


図1 放出したチャフの水平面上での軌跡 (左) と高度変化 (右)

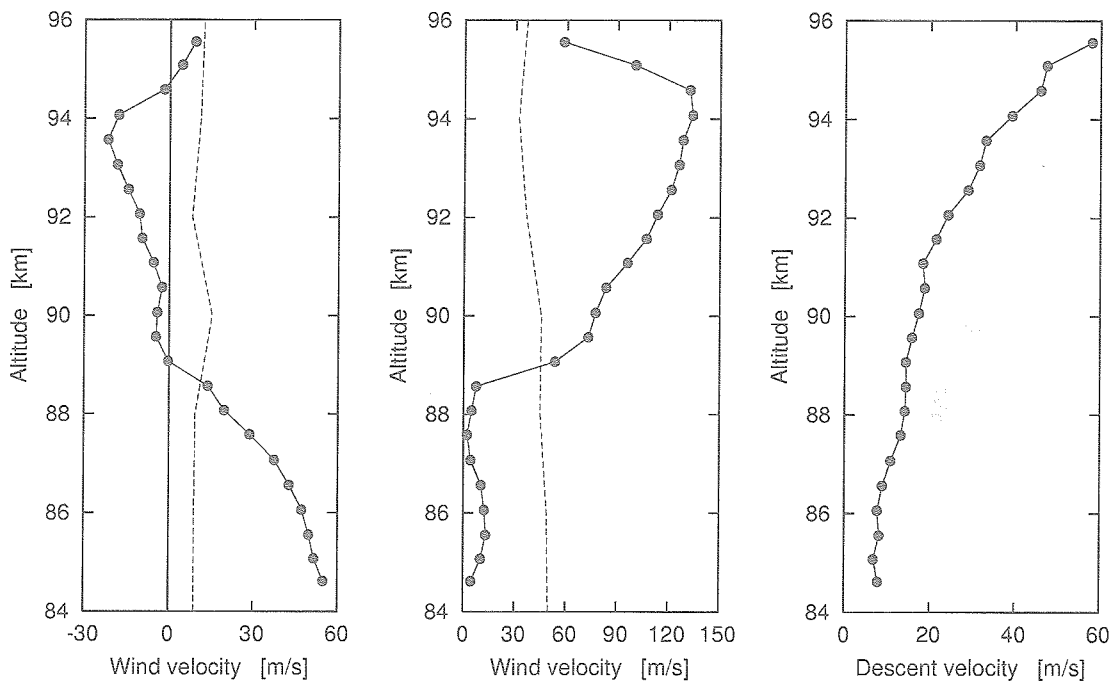


図2 チャフ・MFレーダーで観測された東西風速 (左), 南北風速 (中), 落下速度 (右). 実線がチャフ, 破線がMFレーダー.

4. ラングミュアプローブによる電子密度測定

S-310-33号機には電子温度・密度観測を目的として、二つのラングミュアプローブ (FLP) が搭載されている [阿部他, 2005]。ひとつは電圧固定プローブ (CLP) で、円筒プローブに一定電圧の+5Vを印加したもので、プローブに流れる電流値から電子密度を算出できる。もうひとつは電圧スイーププローブ (SWP) で、振幅4V・周期200msの三角波電圧を印加したものである。今回の電圧スイーププローブによる観測では、プローブに流れる電流の出力の一部が飽和していて電子密度の算出が困難なため、プローブ電流値が電子密度にほぼ比例することを利用して、三角波電圧の上り2Vを印加したときのプローブ電流値を電子密度として使用した。

図3は、ラングミュアプローブで観測された電子密度である。左がロケット上昇時、右が下降時で、各グラフの左側が固定プローブから、右側がスイーププローブから求められた電子密度である。固定プローブでは高度89kmのところでは上昇時・下降時ともに電子密度が急激に上昇し、それより上の高度ではほとんど出力が飽和している。高度89km以上で固定プローブのlowゲインで飽和していない部分については、スイーププローブの電流値が低くなっている高度と対応している。固定プローブの結果から、高度89km付近では最低でも二桁程度の変化が見られることが分かった。またこの現象は同じロケットに搭載されていた中波電波帯受信機 (MFR) でも観測されている。 [芦原他, 2005]

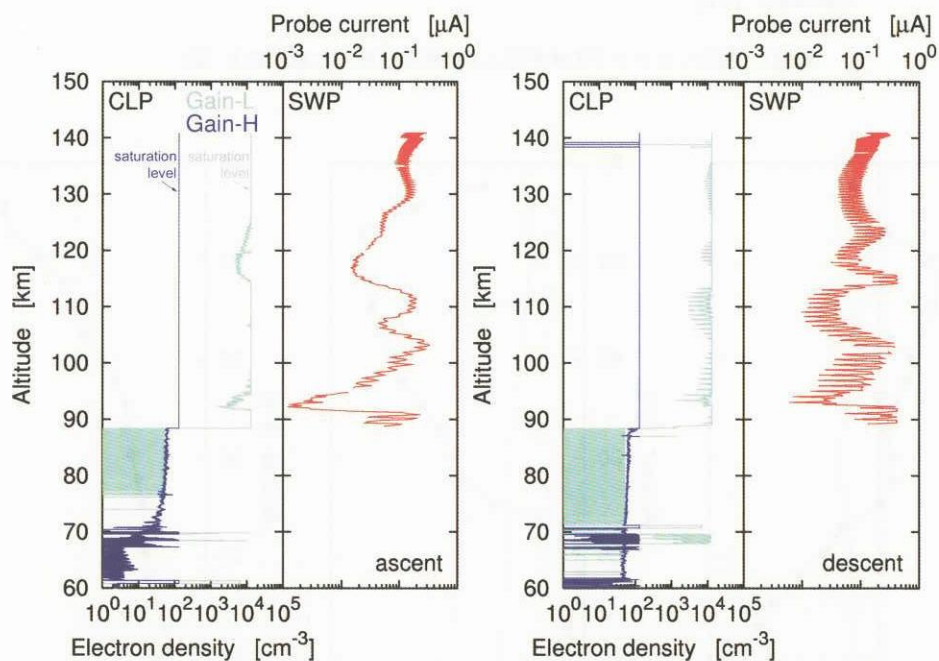


図3 ラングミュアプローブで観測された電子密度。左がロケット上昇時、右が下降時で、各グラフの左側が固定プローブ (CLP)、右側がスイーププローブ (SWP) から求められた電子密度と電流値。

5. 考 察

これらの観測結果から、ほぼ同じ高度で中性風の風向の変化と電子密度の急激な変動が存在していることがわかった。そこで電子密度と中性風の整合性について、Wind shear理論を仮定し定量的な見積もりを行ってみた。

Wind shear 理論とは、中性風にある高度の上側で西向き、下側で東向きのシアアがあるとき、その高度に $v \times B$ ドリフトによってイオンと電子が集積して密度の高い薄い層が形成されるという理論である [Whitehead, 1961]。

イオンの運動は式 (1) で表される。ここで ν_{in} はイオン-中性大気衝突周波数, \mathbf{u} は中性風水平成分, \mathbf{B} は磁場, \mathbf{E} は電場, P_i はイオンの分圧, \mathbf{g} は重力加速度である。電場と重力の寄与を無視すると, 定常状態のイオンの鉛直速度 w は式 (2) となり, 東西風および南北風によるドリフト成分と拡散項の三つから成り立っている。 I は磁場伏角, n_i はイオン密度, r は ν_{in}/ω_i (ω_i :イオンジャイロ周波数) である。

$$m_i \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v}_i \cdot \nabla \right) \mathbf{v}_i = m_i e (\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}) - m_i \nu_{in} (\mathbf{v}_i - \mathbf{u}) - \nabla \frac{P_i}{n_i} + m_i \mathbf{g} \quad (1)$$

$$w = \frac{1}{1+r^2} (rU \cos I - V \sin I \cos I) - D_{iz} \frac{1}{n_i} \frac{\partial n_i}{\partial z} \quad (2)$$

$$D_{iz} = \frac{\sin^2 I + r^2}{1+r^2} \frac{k_B T_i}{m_i \nu_{in}}$$

イオンの運動は拡散よりも中性風の効果のほうが大きいとすると, 式 (2) のうち拡散項が無視できるので, $U \cdot V$ それぞれにチャプで観測された東西・南北風速を代入すると鉛直ドリフト速度 w が求まる。この w の鉛直分布からイオンの収束領域を推定することができる。算出した鉛直ドリフト速度が図4である。 dw/dz が負となる領域がイオンの収束領域となり, 特に $w=0$ の高度でイオンがもっとも効果的に溜まるので, 電子密度のピークの位置と推測される。図4から dw/dz が負となる領域は高度86-94kmであり, $w=0$ となる高度は89kmで電子密度が急激に増加している高度と一致するが, 観測された電子密度ピークの立ち上がりの高度と比べると中性風から推定されるイオンの収束領域は高度幅が広く形状が異なっている。

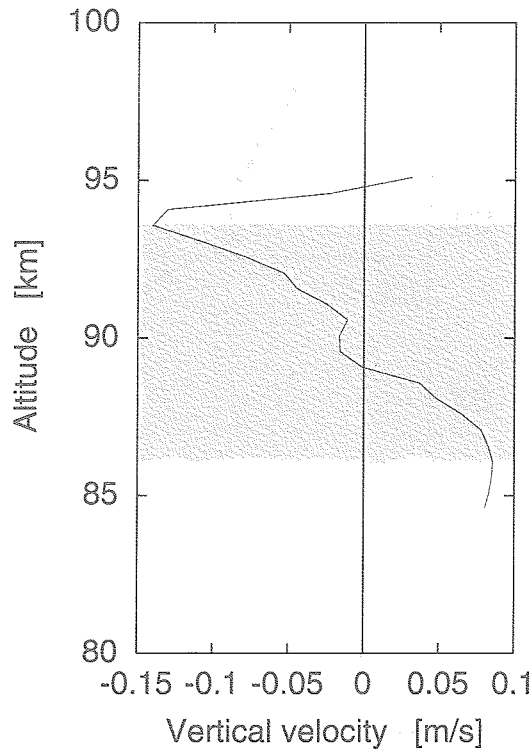


図4 Wind shear 理論から推定した鉛直ドリフト速度, dw/dz が負となる領域をグレーで示す。

今度は先ほど無視していた拡散を考慮し、電子密度から中性風の推定を行った。鉛直ドリフト速度がゼロとなる平衡状態を仮定すると式 (2) から次式のように与えられる。

$$\frac{1}{1+r^2} (rU \cos I - V \sin I \cos I) = D_{iz} \frac{1}{n_i} \frac{\partial n_i}{\partial z}$$

r は高度120kmではほぼ1であり、それより下の高度では r を含む東西風によるドリフトが効き、南北風によるドリフトは無視することができる。電気的中性条件から電子密度はイオン密度と同程度と考えられるので、観測された電子密度プロファイルを代入することで、電子密度の鉛直勾配から東西風速 U を推定できる。図5は推定した東西風速である。赤がロケット上昇時、青が下降時の風速であり、黒はチャフの観測結果である。風速の値が不連続になっているが、これは電子密度について中央の線を境に上部でスイーププローブ、下部で固定プローブのデータを用いたためである。上昇・下降時ともに高度93km付近で西向きにピークをもち、チャフの結果と一致しているが、それより下の高度ではチャフに見られる東向きの風速とは一致していない。

以上から今回観測された中性風と電子密度について、Wind shear理論だけでは説明ができないことがわかった。したがってこの電子密度の急激な変動について、今回仮定したような定常状態ではないイオンの運動やwind shearの他に大気波動などを考慮する必要がある。

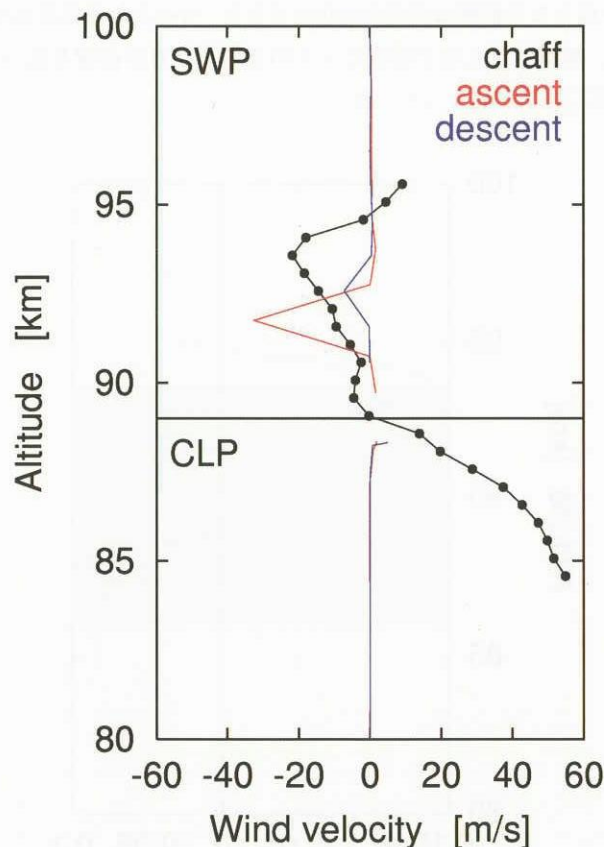


図5 Wind shear 理論から推定した東西風速。電子密度については、中央の線を境に、上部ではスイーププローブのデータ、下部では固定プローブのデータを使用している。赤が算出した東西風速のロケット上昇時、青が下降時、黒がチャフの結果である。

6. まとめ

S-310-33号機ロケット実験で行われた中性風測定の観測結果やMFレーダーとの比較を議論するとともに、高度89km付近でみられる電子密度の急激な変動について中性風との関係をWind shear理論で説明できるか検証した。

チャフによる測定から、高度約89kmを境に、上部では非常に強い北向きの風が、下部では東向きの風が卓越していることが分かった。MFレーダーでは東西・南北成分ともに風向がほとんど変化せず、南北成分については風向についてはチャフと一致するが、100m/sを超えるような強い風は観測されていない。

Wind shear理論による電子密度の推定から、ロケット飛翔時の高度86-94kmの領域ではイオンが収束する領域であり、高度89km付近でロケットの上昇・下降時ともに電子密度のピークをもつことがわかった。これはロケットで観測された電子密度の急激な変化と一致しているが、電子密度のピーク構造とは形状が異なる。また東西風速の推定を行ったところ、チャフの観測値と西向きの構造は一致するがそれより下部では一致しなかった。したがって、今回観測された電子密度の変動について、wind shearの他に何らかの効果が存在している可能性が考えられる。またラングミュアプローブで測られた電子密度の信頼性についても問題が残っており、何らかの原因で実際の電子密度の変動よりも大きく観測された可能性もある。今後は、wind shear以外の効果や測定自体の検証が必要である。

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。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。

参 考 文 献

- [1] 阿部琢美 他, "FLP (Fast Langmuir Probe) による電子温度と密度の観測", 本研究報告, 2005
- [2] 川村誠治 他, "WAVE2004キャンペーン時の山川MFレーダーによる風速・電子密度観測", 本研究報告, 2005
- [3] Koizumi Y., M. Shimoyama, K-I. Oyama, Y. Murayama, T. Tsuda, and T. Nakamura, Foil chaff ejection systems for rocket-borne measurement of neutral winds in the mesosphere and lower thermosphere, *Rev. Sci. Instrum.*, 75 (7), 2346-2350, 2004.
- [4] Murayama, Y., K. Igarashi, I. Nishimuta, R. Yamazaki, K-I. Oyama, T. Tsuda, T. Nakamura, S. Fukao, H-U. Widdel, and K. Schlegl, 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.
- [5] Murayama, Y., K. Igarashi, I. Nishimuta, R. Yamazaki, K-I. Oyama, T. Tsuda, T. Nakamura, S. Fukao, H-U. Widdel, and K. Schlegl, 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.
- [6] 芦原佑樹 他, "中波帯電波受信機 (MFR) による電子密度推定", 本研究報告, 2005
- [7] Whitehead, J. D., The formation of the sporadic-E layer in the temperate zones, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 20, 49-58, 1961.
- [8] Widdel, H-U., Foil clouds as a tool for measuring wind structure and irregularities in the lower thermosphere (92-50 km), *Radio Sci.*, 20, 803-812, 1985.