

WAVE2000 キャンペーン時の S310-29 搭載チャフ・山川 MF レーダー・ MU レーダーによる中間圏・下部熱圏中の風速・気温観測

村山泰啓¹・五十嵐喜良¹・小泉宜子・下山 学
小山孝一郎¹・中村卓司³・津田敏隆³

Observation of Wind and Temperature of the Mesosphere and Lower Thermosphere with MF and MU Radars

By

Yasuhiro MURAYAMA, Kiyoshi IGARASHI, Yoshioko KOIZUMI, Manabu SHIMOYAMA

Koh-ichiro OYAMA, Takuji NAKAMURA and Toshitaka TSUDA

Abstract : Results are shown of mesospheric and lower thermospheric wind and temperature observations with foil-chaff on board S310-29 rocket (5:50 Japan Standard time, 10 Jan. 2000), the MU radar of Kyoto University (MUR), and Yamagawa MF radar (MFR). Zonal winds agree well between chaff, MFR and MUR. Temporal variation of the radar winds shows similar features suggesting horizontal homogeneity may be due to large tidal activity. Temperature profiles estimated from MUR meteor data implies large variation and very small values of Brunt-Vaisala frequency (BVF) ($\sim 0 - 5 \times 10^6$) at 85-95 km over the MU radar site, around the rocket experiment time. Assuming homogeneity of temperature field between MUR and the rocket site, interpretation of gravity waves as found in the airglow imaging and rocket results needs not only a typical BVF value (5 min), but also more realistic determination.

要 項

WAVE2000 (WAVE200) キャンペーンにおける S310-29 ロケット実験 (内之浦; 2000 年 1 月 10 日 5:50JST) の際に行われたチャフ実験, 京大 MU レーダー流星モード (MUR), 山川 MF レーダー (MFR) による中間圏・下部熱圏領域の風速・気温の観測結果を示す。MUR, MFR, チャフの風速の高度プロファイルはとくに東西風についてよい一致がみられた。レーダーによる風速観測では, 大気潮汐と思われる変動が見られ, MUR, MFR はしばしばよく似たプロファイルを示した。MUR 流星観測から推定される気温にも顕著な変動があった。ロケット打ち上げ時刻前後の気温は高度 85-95km で大きな負の高度勾配をもち, ブラント・バイサラ周波数 N^2 が非常に小さく ($\sim 0 - 5 \times 10^6 \text{sec}^{-2}$) なっていた。MUR と内之浦で同様の温度変動を仮定すれば, 内之浦上空で見られた大気光やロケットの観測結果を重力波の分散関係式など理論を援用して解釈する場合, 背景の N^2 の値として中層大気中の代表値では不適切で, その時間・領域の推定値が必要な場合がありうる。

重要語 : 大気動波, 中間圏, チャフ

1 通信総合研究所

2 宇宙科学研究所

3 京都大学宇宙電波科学研究センター

1. はじめに

WAVE2000 (縞縞 2000) キャンペーンでは、大気光 (OH および 558nm) の地上 CCD 全天撮像による縞縞構造の観測、中波 (MF) レーダーによる風系の観測とともに、ロケットによる発光層の構造および発光のエネルギー源である酸素原子密度分布などを測定して、OH 大気光縞縞構造の生成に関する理解、および、地上 OH 大気光全天撮像による発光層測高の検証を主な目的とする。S310-29 号機によるロケット観測は 2000 年 1 月 10 日 5:50JST (9 日 20:50UT) に行われた。本稿では、同ロケットに搭載されたフォイル・チャフ、および地上からの山川 MF レーダー・MU レーダーによって観測された中間圏・下部熱圏高度の水平風速、また MU レーダーの流星エコー観測から推定された気温変動について報告する。

2. チャフ、山川 MF レーダー、MU レーダー観測

WAVE2000 キャンペーン実験を目的とした S310-29 ロケットが鹿児島宇宙空間観測所 (KSC; 鹿児島県肝属郡内之浦町; 31N, 131E) で 2000 年 1 月 10 日午前 5 時 50 分 (JST; 日本標準時、世界標準時で 9 日 20 時 50 分) に打ち上げられた。下部熱圏化学組成・発光強度や電子密度などの観測を行うとともに、S310-29 搭載チャフ実験、および地上の山川 MF レーダー (鹿児島県指宿郡)、京大 MU レーダー (滋賀県信楽町) によって、上部中間圏・下部熱圏力学場の同時観測が行われた。

チャフ実験は、正確にはフォイル・チャフ法 (foil chaff または foil cloud; ここではこれを単にチャフと呼ぶ) と呼ばれ、中間圏・下部熱圏の風速観測を目的としてドイツ Max-Planck-Institut fuer Aeronomie の H.-U. Widdel 氏によって開発された。今回は 25mm × 5mm × 1 μ m のアルミ蒸着フィルム片 2 万枚を上空で放出し、地上のトラッキングレーダーで追跡して周囲の風速場を観測した。S310-29 でははじめてチャフを複数の測定器と同じ機体に搭載するため、チャフ射出機構などが新たに開発され実験が行われた [小泉他、2000]。原理などについては、Widdel [1987]、Murayama et al. [1999]、小泉他 [2000] を参照されたい。図 1 は 2000 年 1 月 10 日打ち上げ時の地上トラッキングレーダーによるターゲット追跡データを示す。降下時の高度約 95km でチャフの追跡を開始している。トラッキング・データ (レンジ、方位角、仰角) から水平位置・高度を求め、高度 300m 毎に平均してから求めた風速が図 2 である。東西風速は高度 91.5km 付近で下層の東向きから上層の西向きへ風向が反転していることがわかる。南北風は全高度で南向きで、90km 以上の高度ではほぼ 50m/s となっていた。

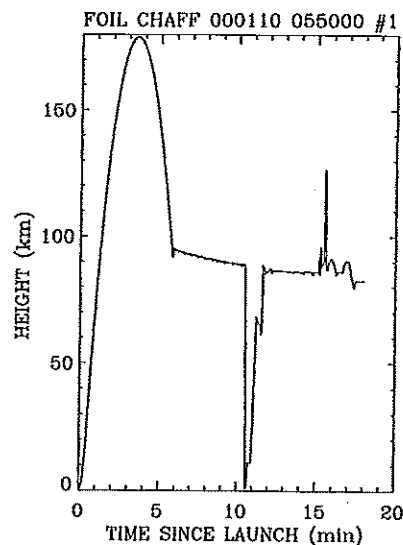


図 1
2000 年 1 月 10 日 実験時の地上トラッキング
レーダーによるターゲット追跡データ。

山川 MF (中波) レーダーは通信総合研究所山川電波観測所 (鹿児島県指宿郡山川町; 31N, 131E) に設置されたモノスタティック・パルス・レーダーである [Igarashi et al., 1996; Murayama et al., 2000]. 地上から MF 帯 (中波帯; 中心周波数 1.955MHz) の電波を発射し、下部電離圏 (D 領域) での分反射エコーを 3 基の受信アンテナで受信する. 受信信号についての相関法 (FCA; Full Correlation Analysis と呼ばれる [例えば Briggs, 1984]) から水平風速が得られる. 通常、昼間は高度 60-100 km、夜間は約 78-100 km の水平風速プロファイルを、時間分解能 3 分・高度分解能 約 7 km で継続的に観測している. また、差分吸収法 (DAE; Differential Absorption Experiment [e.g., Manson, 1984]) から D 領域電子密度プロファイルの推定も行っている.

MU レーダーは京都大学信楽 MU 観測所 (滋賀県信楽町; 35N, 136E) で運用される国内唯一の VHF 帯 MST レーダーである [Fukao et al., 1985a; 1985b]. WAVE2000 キャンペーンでは主に流星風観測モードにより時間・高度分解能 30 分・1km で上部中間圏・下部熱圏の水平風を求めた [例えば Tsutsumi et al., 1996; Nakamura et al., 1991]. 流星は、大気圏で燃え尽きる際に中性大気を電離してしばしば強い電波散乱体を形成する. この散乱電波のドップラーシフトから中間圏・下部熱圏高度の風速が得られる. また流星エコー強度の減少率から分子拡散係数 D が推定される. D の変動分 D'/D_0 は近似的に中性気温の変動分 T'/T_0 の 2 倍 ($T'/T_0 \sim (D'/D_0)/2$) であることが知られており [Tsutsumi et al., 1994; 1996]、さらに背景気温プロファイル $T_0(z)$ を与えると $T = (D'/D_0)/2 \times T_0 + T_0$ として D の測定から気温場 T を推定できる.

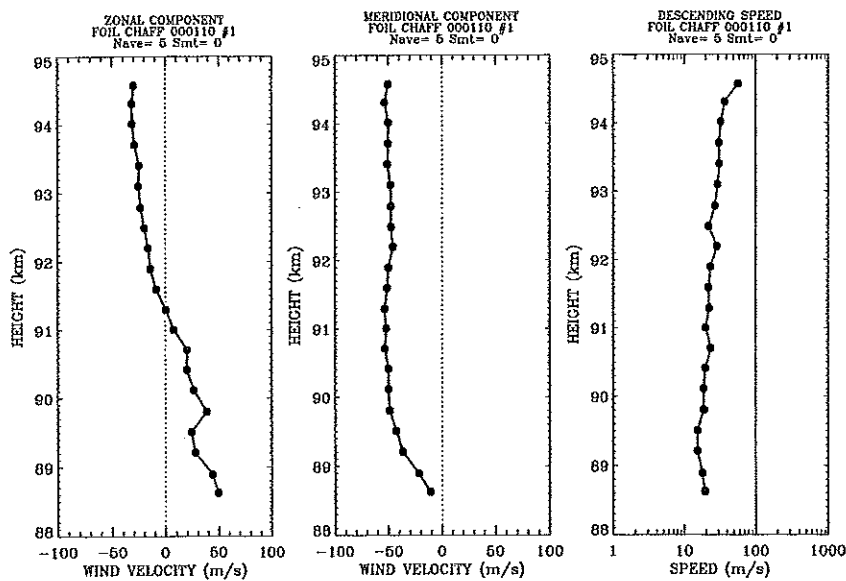


図2 S310-29号機搭載チャフ実験(2000年1月10日5:50JST)から、高度分解能300mとして処理して得られた東西風速(左)、南北風速(中)、チャフ落下速度(右)。

3. 観測結果

3.1 水平風速

図3は山川MFレーダーで観測された東西風、南北風の時間・高度断面図カラーコンターで示したものである. 2000年1月8日0 UTから11日12 UTの30分平均値を示している. 東西風、南北風には、高度約90km以下でそれぞれ3 UTおよび6 UT付近に最大値となる1日周期変動が顕著に見られ、またその位相構造が時間とともに下方へ伝播する傾向が見られる. 山川の位置する30Nで顕著なS(1,1)モードの1日潮汐波が卓越していると考

えられる。S310 ロケット打ち上げは 20:50UT (図中横軸で day9.87 付近) であるが、この時間には東西風は約 90km 以下で東向き、90km 以上で西向きの傾向を示す。南北風には 85km 付近を境にして上層では一様に南向き、下層では北向きの強いシアーが見られる。南北風はとくに高度 80 ~ 85km 付近で、ロケット打ち上げ数時間前から周期 2 時間程度の卓越する周期構造を示した。この周期構造は上下位相伝搬を示さない、鉛直スケールの長い構造を示唆している。東西風には対応する変動は見られない。またここでは図はしめさないが、数日間にわたる風速変動場に 1 日周期成分を取り出すバンドパスフィルターを施すと、卓越する 1 日周期変動の位相がロケット打ち上げ時間前に不連続になっており、この時に強い南北風シアーが生じていた。

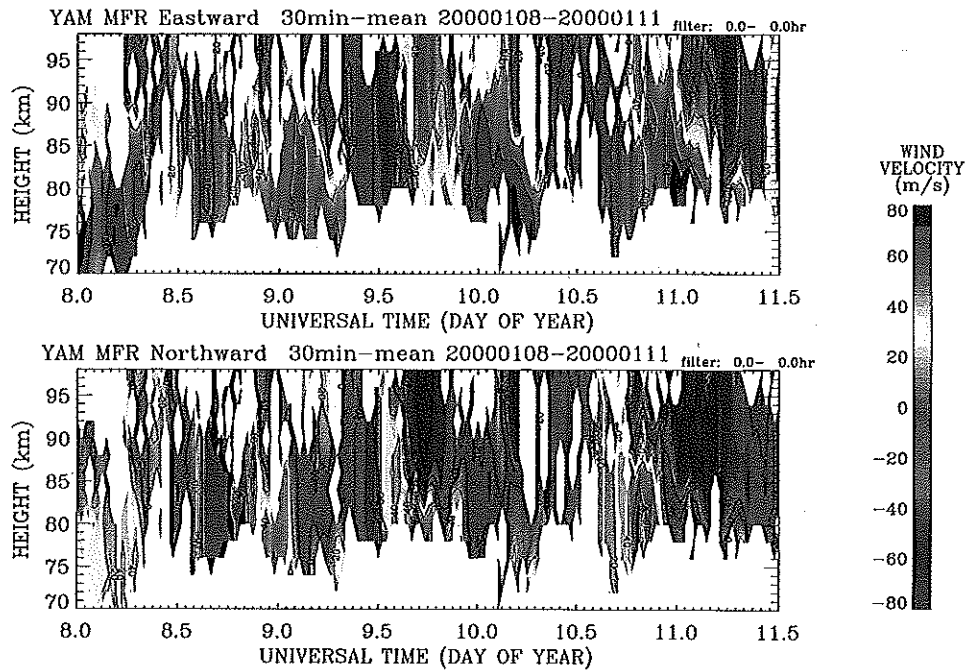


図3 山川 MF レーダーで観測された東西風 (上)、南北風 (下) の時間高度断面図。2000 年 1 月 8 日 0 UT から 11 日 12 UT の 30 分平均値を示している。コンター間隔は 20m/s ごと、ロケット打ち上げ時刻は day9.87 付近。

図 4 は MU レーダーで観測された東西風、南北風を示している。山川と同様に 1 日潮汐が卓越し、また明らかな位相の下方伝播が確認できる。鉛直波長は 30km 程度と見積られる。ロケット打ち上げ時点では、山川と同様、上部で西向き・南向きとなるシアー構造が認められる。山川観測で見られた南北風の 2 時間程度の周期構造の卓越は見られなかった。

S-310-29 号機搭載チャフ、山川 MF レーダー (MFR)、MU レーダー (MUR) で観測された東西風、南北風の高度プロファイルの比較を図 5 に示す。レーダーデータは 30 分毎の平均値である。ただし、それぞれのデータの高度分解能が MFR は 7km、MUR は 1km、チャフは 300m であるため分解できる高度構造が異なることに注意されたい。東西成分については、ロケット打ち上げ時刻に近い 21UT 頃はチャフ・MFR・MUR ではいずれも高度 90km 付近が 0m/s とするシアー構造が共通して見られる。MFR と MUR の高度プロファイルは 19 - 20 UT 頃は必ずしも似ていないが、22 - 23 UT では両者はよく似た構造を示している。一方、ロケット実験時の南北成分については、MFR と MUR のプロファイルは 83 - 90km 以下でよく似た構造をしている。高度 90km 以上では MFR はほぼ一定の 30 - 45m/s のフラットなプロファイルを示すが、MUR は 95km 以上でふたたび北向きに反転していた。チャフデータのフラットなプロファイルは MFR のそれに似ているが、風速値はチャフの方が大きい。

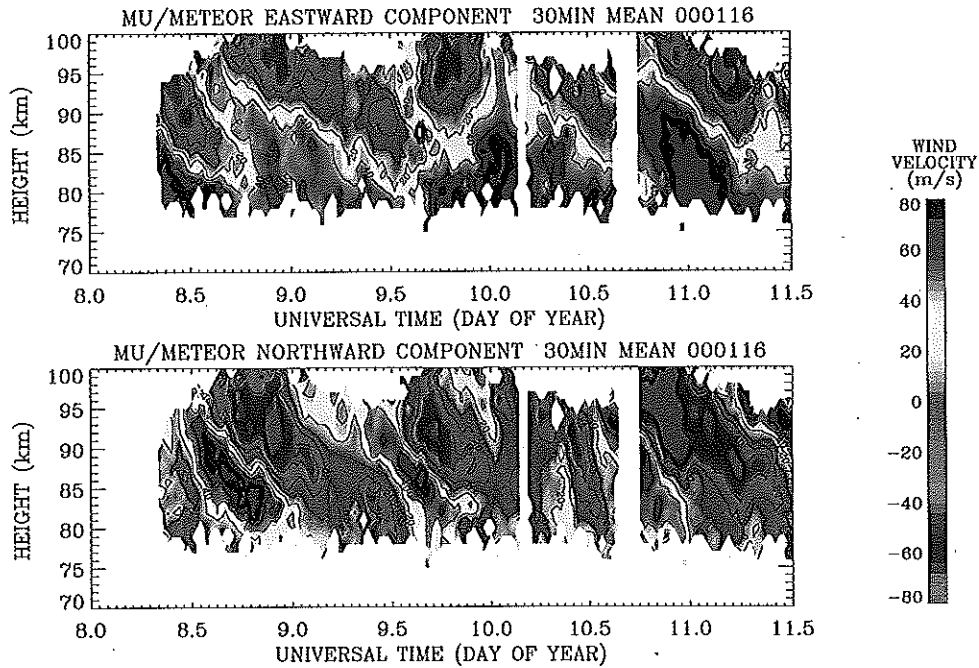


図4 図3と同じ。ただし、MUレーダー流星風観測結果を示してある。山川MFレーダーと異なり高度分解能が高い(1km)ため、微細な構造がよく見えている。

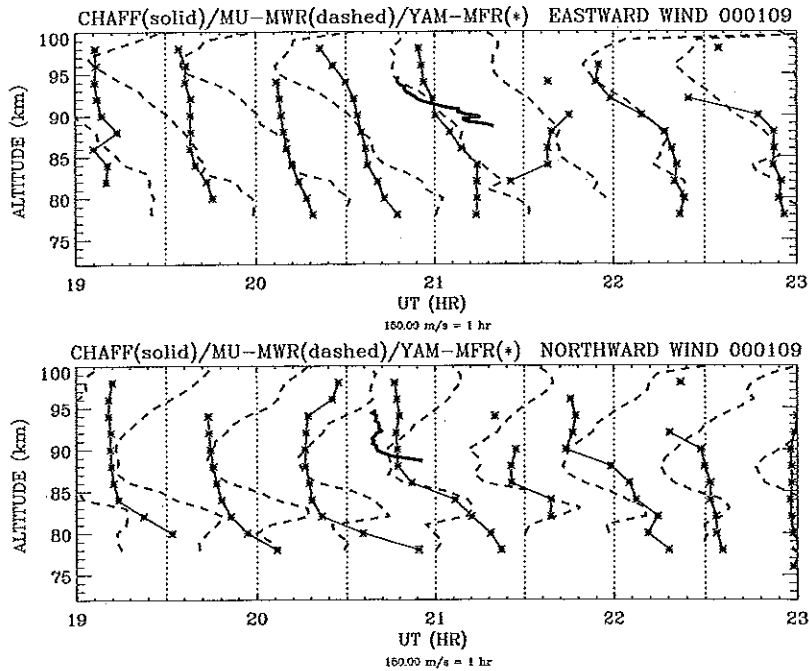


図5 S31029号機搭載チャフ(太実線)、山川MFレーダー(*と実線)、MUレーダー(破線)で観測された東西風(上)、南北風(下)の高度プロファイルの比較。縦の破線は各時刻の0 m/sを示す。横軸は1時間が風速150 m/sに対応し、最小目盛りの間隔が15 m/s。レーダー観測結果は30分毎の平均値で、高度分解能はMFレーダー7 km、MUレーダー1 km、チャフ300 mであることを注意。

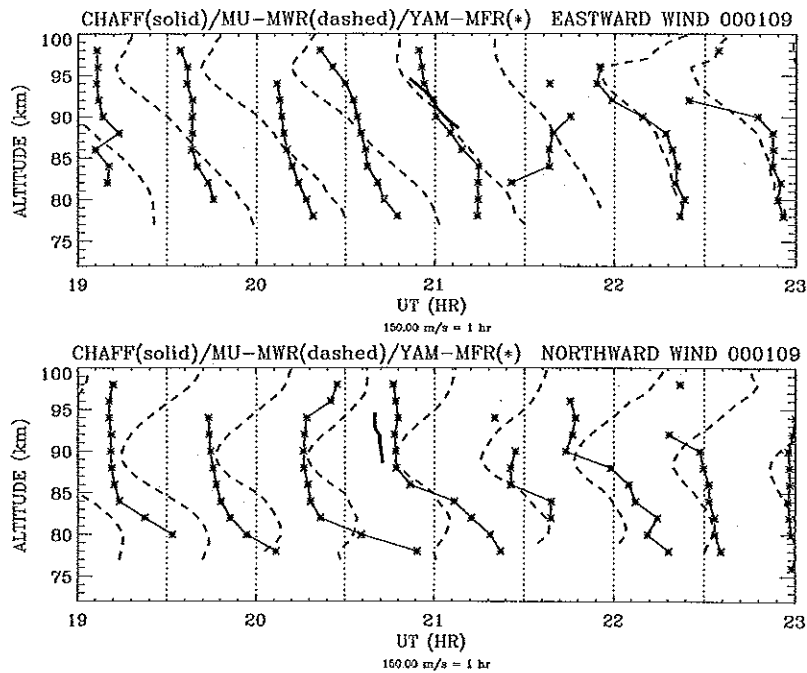


図6 図5と同じ。ただしすべてのデータの高度分解能は7kmに統一してある。

図6は、図5のデータをすべて同じ7kmの高度分解能にして示したものである。これを見ると21UT以前はMFRは一樣に東向きフラットなプロファイルを示しMURのシア構造と異なるのに対し、21UT以降のMFRとMURのよく似たプロファイルとなっていた。また南北成分においてチャフの南向き風速が約50m/sとMFRやMURより大きい傾向は図5と同様に見られる。

3.2 気温変動

2節で述べたように、MURによる流星モードでは分子拡散係数 D が推定され、さらに D の変動分から気温の変動分 T' の推定が可能となる。背景気温プロファイルとしてCIRA1986モデル値 T_{CIRA} を仮定すれば、 $T = (D'/D_0)/2 \times T_{CIRA} + T_{CIRA}$ として D の測定から気温場 T を推定できる。このようにして得られた気温プロファイルを図7に示す。破線は35Nにおける1月のCIRA1986モデル値で、中間圏界面は95-100km付近に位置していた。CCDイメージャによる大気光波状構造が観測された高度(85-95km)では背景の温度構造が負の高度勾配を持ち、大気が比較的不安定な領域であったことが示唆される。さらに流星エコーから推定される30分ごとの気温プロファイルを見ると、主に大気潮汐と思われる気温変動が見られ、とくにS310-29打ち上げ時刻に近い9日21UTのプロファイルでは高度84-90kmで負の気温高度勾配 $-\partial T/\partial z$ が乾燥断熱減率大気 Γ_d に近く、大気が非常に不安定になっていたことがわかる。

この気温高度プロファイルから計算されたプラント・バイサラ周波数 N^2 の時間高度断面図を図8に示す。時間・高度分解能30分・1kmのデータから上述の T を求めた後、高度方向に7km幅の移動平均を施してから $-\delta T/\delta z$ を計算して N^2 を求めている。風速場にみられたような位相の下方伝播が N^2 にもみられる。S310-29ロケット打ち上げ時である1月9日20:50UT頃の高度83-93kmには他の時間・高度でみられないような N^2 の小さい領域($N^2 \sim 0 - 5 \times 10^{-6} \text{sec}^{-2}$)が生成されていたことがわかる。

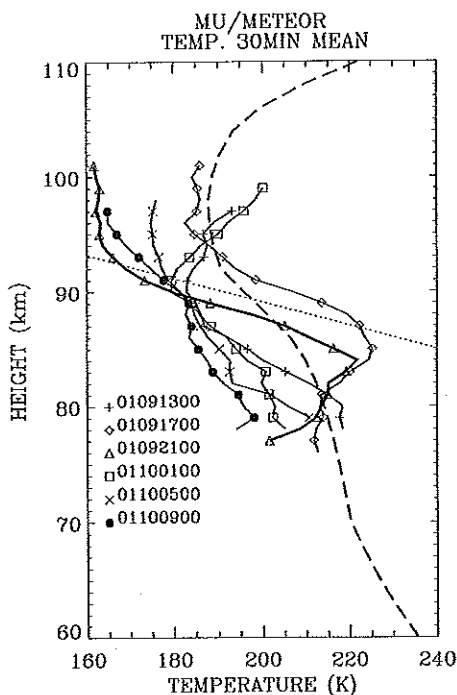


図7 MUレーダーの流星観測データから推定された気温プロファイル(実線). 1月9日 13UT から 10日 9UT までを 4時間毎にシンボルを変えて示してある. 背景気温場として CIRA1986(破線)を仮定した. 太実線と三角形シンボルは 1月9日 21UT (S310-29 ロケット実験時にもっとも近い時間帯)の気温を示す. 高度 84~90km で負の高度勾配 $\partial T/\partial z$ が非常に大きくなっている. 乾燥断熱減率 Γ_d (点線) より勾配が急だとブラント・バイサラ周波数 N^2 が負となる.

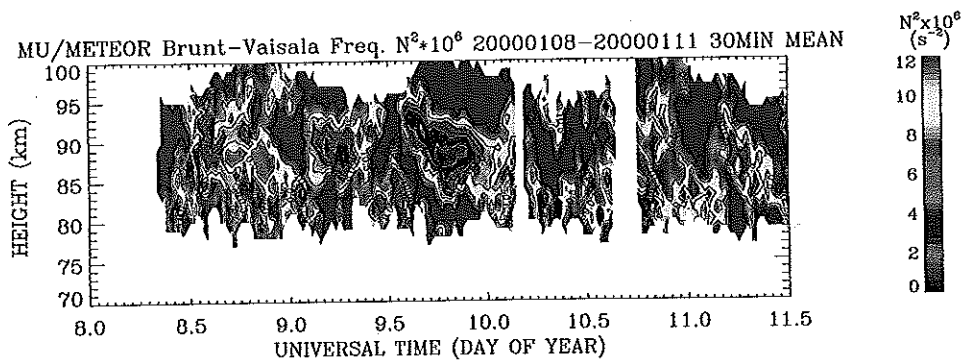


図8 気温高度プロファイルから計算されたブラント・バイサラ周波数 N^2 の時間高度断面図. ロケット打ち上げ時間前後 (day9.87) で高度 85~95km 付近の N^2 が顕著に小さくなっている.

4. 議 論

ロケット実験から得られる酸素原子密度や大気発光強度の高度プロファイルと、地上の CCD 観測から得られる大気光の水平 2 次元波状構造から大気波動の解釈が試みられている [Iwagami et al., 2000; 岩上他, 2000; 久保田他, 2000]。波動の同定や波動現象と大気組成・発光強度の相互作用の議論において、大気重力波の分散関係式をもちいた鉛直波長・水平波長の相互関係を論ずるために重力波の背景風や、背景の気温、気温の高度変化から得られる大気の静的安定度すなわちプラント・バイサラ周波数などの情報が波動場の特性を決める上で大変重要となる。しかし、ロケット打ち上げ場所である内之浦やその近傍である山川では中間圏気温の高度プロファイルの観測がないため、プラント・バイサラ周波数の実測値が得られていない。

一方 2 節、3 節でも述べたように滋賀県信楽町（内之浦から約 600km）の MU レーダーによる流星エコーの観測から気温の変動分を求め、背景場を仮定することで気温を推定することが可能である。信楽(36N)と山川(31N)における気温変動をもたらす波動場が似通っているかどうかは問題であるが、風速変動については、図 6 やこれまでの同時観測結果 [Igarashi et al., 1996] などからも両地点の中間圏でしばしば 1 日潮汐が卓越し、またその時間・空間変動についても両地点で比較的似た振舞いをしている場合があると考えられる。気温変動場も信楽・内之浦/山川でほぼ同じであったと想定すると、図 7、8 で示したように S310-29 号機ロケット実験時には高度 83-93km で大気が不安定になっていた、すなわち N^2 が非常に小さくなっていた可能性がある。

重力波の分散関係などの解釈においては、気温場が得られない場合は中層大気中のプラント・バイサラ周期としてしばしば典型的な値 5 分程度 ($N^2 \sim 1.11 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-2}$) を用いるが、上記の信楽・内之浦/山川で同じ気温場があったとする推論を用いるならば今回のロケット観測時の中間圏界面領域では $N^2 \sim 0 - 5 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-2}$ 程度であった可能性があり、これを適用した大気重力波の解釈（例えばダクト伝搬など）についても議論されるべきであろう。

5. ま と め

縞縞 2000 (WAVE200) キャンペーンにおける S310-29 ロケット打ち上げ (2000 年 1 月 10 日 5:50JST) で行われたチャフ実験、山川 MF レーダー (MFR)、京大 MU レーダー (MUR) による中間圏・下部熱圏領域の力学場 (風速・気温) の観測結果やその相互比較を議論した。

MFR、MUR による風速観測では大気潮汐と思われる波動が卓越し、またその振舞いも似通っている場合があった。高度分解能を 7km に統一した MFR、MUR、チャフの風速高度プロファイルを比較すると、とくに東西風はよい一致を示した。MUR の流星データと CIRA モデルから推定された気温場には、大気潮汐と思われる温度変動が卓越していた。ロケット打ち上げ時刻前後では高度 85-95km で気温の負の高度勾配 (減率) が顕著に大きく、プラント・バイサラ周波数 N^2 は非常に小さく ($N^2 \sim 0 - 5 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-2}$) になっていた。MUR と内之浦は 5 度の緯度差があるが、力学場の大きな変動要因の 1 つである大気潮汐の振舞いが似ていることがしばしば報告される [(例えば) Igarashi et al., 1996] ことから、潮汐の温度変動は両地点で似ていた可能性がある。内之浦上空で見られた大気光やロケットの観測結果を重力波の分散関係式など理論を援用して解釈する場合、背景場の情報の一つとして中層大気中の N^2 の代表的な値 ($\sim 1.11 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-2}$; 周期 5 分) を用いることが多いが、中間圏高度では短時間に大きな気温変動 (<~数十 K) が起こりうることから、とくに今回の実験時の重力波の解釈は、 N^2 の代表値でなく、その地点・時刻の推定値を用いた議論も必要と考えられる。

参 考 文 献

- [1] Fukao, S., T. Sato, T. Tsuda, S. Kato, K. Wakasugi and T. Makihira: The MU radar with an active phased array system, 1. Antenna and power amplifiers, *Radio Sci.*, 20, 1155-1168, 1985a.
- [2] Fukao, S., T. Tsuda, T. Sato, S. Kato, K. Wakasugi and T. Makihira: The MU radar with an active phased array system, 2. In-house equipment, *Radio Sci.*, 20, 1169-1176, 1985b.
- [3] Igarashi, K., I. Nishimuta, Y. Murayama, T. Tsuda, T. Nakamura and M. Tsutsumi: Comparison of wind measurements between Yamagawa MF radar and the MU radar, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 3341, 1996.
- [4] Iwagami, N., T. Shibaki, T. Suzuki, Y. Yamada, H. Onishi, Y. Takahashi, H. Yamamoto, H. Sekiguchi, K. Mori, Y. Sano, M. Kubota, Y. Murayama, M. Ishii, K-I. Oyama, R. Yoshimura, M. Shimoyama, Y. Koizumi, K. Shiokawa, N. Takegawa and T. Nakamura: the Wave2000 campaign: Overview and preliminary results, *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, submitted, 2000.
- [5] 岩上直幹, 柴木友和, 鈴木利和, 関口宏之, 竹川暢之: 大気光波は構造キャンペーン2000における酸素原子密度・大気光放射率のロケット計測, 宇宙研報告2000.
- [6] 久保田実, 村山泰啓, 石井 守, 山田嘉典, 大西久永, 福西 浩: 大気光波状キャンペーン2000における大気光波状構造の地上イメージング観測, 宇宙研報告, 2000.
- [7] 小泉直子, 下山 学, 小山孝一郎, 村山泰啓, 橋元保雄, 下瀬 滋, 長谷川克也, 鎌田幸男, 阿部琢美: フォイル・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, 宇宙研報告, 2000.
- [8] Nakamura, T., T. Tsuda, M. Tsutsumi, K. Kita, T. Uehara, S. Kato and S. Fukao: Meteor wind observations with the MU radar, *Radio Sci.*, 26, 857-869, 1991.
- [9] Manson, M. A. and C. E. Meek: partial reflection D-region electron densities, *MAP handbook*, 13, 1984.
- [10] 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, pp.719-729, 1999.
- [11] Murayama, Y., K. Igarashi, D. Rice, B. Watkins, R. Collins, K. Mizutani, Y. Saito and S. Kainuma: Medium Frequency Radars in Japan and Alaska, for Upper Atmosphere Observations, *IEICE Trans.*, E83-B, 1996-2003, 2000.
- [12] Tsutsumi, M., T. Tsuda and T. Nakamura: Temperature fluctuations near the mesopause inferred from meteor observations with the middle and upper atmosphere radar., *Radio Sci.*, 29, 599, 1994.
- [13] Tsutsumi, M., T. Tsuda and S. Fukao: Wind velocity and temperature fluctuations due to a 2-day wave observed with radio meteor echoes. *J. Geophys. Res.*, 101, 9425, 1996.
- [14] Widdel, H.-U.: Vertical movements in the middle atmosphere derived from foil cloud experiments, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 49, 723-741, 1987.
- [15] Widdel, H.-U.: Experimental evidence for solitary waves in the middle atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 96, 15931-15942, 1991.

