

## S-310-26号機からのTMA放出による中性大気風速の観測

山本 衛<sup>1</sup>・Miguel F. Larsen<sup>2</sup>・深尾 昌一郎<sup>1</sup>

### Neutral wind in the sporadic E region measured by the chemical release experiment with the sounding rocket S-310-26

By

Mamoru YAMAMOTO<sup>1</sup>, Miguel F. LARSEN<sup>2</sup> and Shoichiro FUKAO<sup>1</sup>

**Abstract:** Wind measurements made with the chemical release technique during a sporadic E layer event are presented. The data were obtained as part of the SEEK (Sporadic-E Experiment over Kyushu) campaign. The winds show a strong maximum in the lower E region approaching  $150 \text{ m s}^{-1}$  near 105 km altitude and a large shear below the maximum. The large shear was at the same altitude as the peak in the electron densities measured on the downleg of the rocket trajectory. Calculations of the Richardson numbers for the wind profile show that the altitude range near 103km was highly unstable.

#### 概 要

1996年8月21日0時30分(JST)に打上げられた観測ロケットS-310-26号機ではTMA(トリメチルアルミニウム)放出実験が実施された。本稿では、観測された高度98~134 kmの中性大気風速の振舞いについて報告する。本実験はSEEK(Sporadic-E Experiment over Kyushu)キャンペーンの一環として行なわれたもので、ロケット打上げはスプラディックE層と沿磁力線イレギュラリティが発生している条件下で実施された。ロケットに搭載された圧力容器からのTMA放出と、鹿児島県・宮崎県・高知県にわたって展開された4ヶ所の地上観測点のうち3ヶ所からのTMA発光雲の写真撮影に成功した。求められた風速は高度約105 kmにおいて最大風速  $150 \text{ m s}^{-1}$  に達しており、その直下には非常に大きな風の鉛直シアが観測された。観測値から求めた大気のリチャードソン数から、高度103 km付近に不安定領域が存在することが明らかにされた。

**重要語:** TMA放出実験, 中性大気風速, E領域イレギュラリティ, リチャードソン数, ロケット観測

---

<sup>1</sup>京都大学超高層電波研究センター, <sup>2</sup>クレムソン大学

## 1. はじめに

SEEK (Sporadic-E Experiment over Kyushu) では、種子島南部に設置された Frequency Agile Radar (FAR) によって E 領域イレギュラリティに準周期エコーが見られるときに 2 機の観測ロケットを打上げてスボラディック E 層の直接観測を実施し、中緯度 E 領域イレギュラリティ現象の総合的な解明を目差した (Fukao 他, 1998; 深尾他, 本号)。特に 1996 年 8 月 21 日 0 時 30 分 (JST) に打上げられた観測ロケット S-310-26 号機では、インピーダンスプローブによる電子密度プロファイルの観測、ブーメラン法による電界の観測とともにロケットから TMA (トリメチルアルミニウム) を放出して行なう中性大気風速の観測が実施された (Larsen 他, 1998)。古くから知られているように、スボラディック E (Es) 層の生成には、中性大気風速の高度シア (風速の高度変化) によって背景電離圏のイオンが特定高度に集積されるために生じるとするシア理論が有力である (Whitehead, 1989)。また SEEK の主目的である電離圏イレギュラリティの準周期構造は、中性大気中の大気重力波がその原因と考えられている。S-310-26 号機で実施された TMA 放出実験は、中性大気の風速と波動を観測し、スボラディック E 層やイレギュラリティとの関連を調べることを目的としている。100 km を越える高度の中性大気の運動を観測することは非常に困難であり、TMA を用いる観測がほとんど唯一の方法である。中性大気と電離大気の相互作用を明らかにする上で、本実験の結果は貴重なデータをもたらすものと期待された。

## 2. 観測方法

本実験においては、高度 80 ~ 160 km の領域に TMA による発光雲を形成し、地上 4 ヶ所に設けた観測点から発光雲の形状を連続写真撮影することによって、風速測定を行った。TMA は自然発火性の物質であり、地上では空気中あるいは水中で爆発的に発火・発熱する。一方、上空に散布された TMA は、酸素と反応して発光し、その光を地上から 5 分 ~ 30 分間観測可能である。発光現象の観測可能時間は高度によって変化するが、一般に高々度ほど拡散が早いので観測時間が限られ、100 km 以下の高度では比較的長い間観測が可能である。

本実験の概要を表 1 に示す。観測ロケット S-310-26 号機には、内部が可動ピストンで仕切られ、圧力センサー及び爆発バルブ (タイマー信号で作動) が取り付けられた圧力容器が装備された。本実験では、可動ピストンの噴出口 (爆発バルブ) 側に TMA 80%, TEA (トリエチルアルミニウム) 20% の混合液体を充填し、反対側を約 7 気圧の純窒素で加圧した。また安全のため、容器内部の圧力を観測ロケットの打上げ直前まで監視した。爆発バルブのタイマーは、ロケットが降下中の高度約 160 km の時点で TMA 噴射を開始するように打上げ後 284 秒にセットされた。TMA 噴射の時間は噴出口の小穴の大きさと内部圧力の組み合わせで決まるが、今回は噴射が約 80 秒間持続するようにセットした。本実験では、TMA 発光雲を地上の 2 地点以上から連続的に写真撮影することによって風速が観測される。観測ロケットの飛跡と 4 ヶ所の地上観測点の配置を図 1 に示す。ロケット打上げ場所である鹿児島県内之浦町の他、鹿児島県南種子町、宮崎県高崎町、及び高知県大方町に設置された地上観測場所には、それぞれ 2 台のハッセルブラッド・カメラを設置し、パーソナル計算機を用いて 20 秒露光 (毎分 3 枚の撮影) の制御を行った。これら地上観測機器のオペレーションのため、それぞれ 2 名の観測者を配置し、毎日気象状況のチェックを繰り返して最適な打ち上げ時期を待った。

観測ロケット S-310-26 号機は、種子島南部に配置された Frequency Agile Radar (FAR) が強い FAI 反射エコーを観測する中で 1996 年 8 月 21 日 0 時 30 分 (JST) に打ち上げられた。この時 FAR で観測された FAI エコーの様子については、深尾他 (本号) が紹介している。S-310-26 号機の打ち上げ時には残念ながら宮崎県高崎町の気象条件が悪かったが、その他の地上観測点 3 ヶ所からは、TMA 発光雲の写真撮影に成功した。図 2 には、東北大学理学部が夜光観測用の全天 CCD イメージャを用いて内之浦 (本実験の地上観測点と同位置) から撮影した TMA 発光雲の写真を示す。初めの 2 枚には、噴出され始めた発光雲が下方に向かって伸びていく様子が捉えられている。また発光雲は形成直後から背景の大気の動きに従って変形を続けることが良くわかる。形状が大き

表1 TMA観測の諸元

項目	仕様
圧力容器	TMA (トリメチルアルミニウム) 80%とTEA (トリエチルアルミニウム) 20%の混合液体を充填し、窒素で加圧する。 TMA充填量: 2.5 kg, 内部の圧力: 約7気圧 ロケット打上げまで圧力モニター可能.
TMA噴射	ロケット発射後284秒後に噴射開始(下りの高度約160 km) TMA噴射は約80秒間持続し, 下りの高度約80 kmに達する.
地上観測点	鹿児島県肝属郡内之浦町 文部省宇宙科学研究所鹿児島宇宙空間観測所 (北緯31度15分, 東経131度05分) 鹿児島県熊毛郡南種子町 南種子中学校 (北緯30度24分, 東経130度54分) 宮崎県北諸県郡高崎町 たちばな天文台 (北緯31度52分, 東経131度04分) 高知県幡多郡大方町 高知県立幡多青少年の家 (北緯33度02分, 東経133度03分)
撮影方法	各観測点にカメラを2台ずつ設置し, 20秒露光で毎分3枚撮影する. 各カメラの撮影時刻は計算機制御される. 撮影の時刻精度は1秒以内.

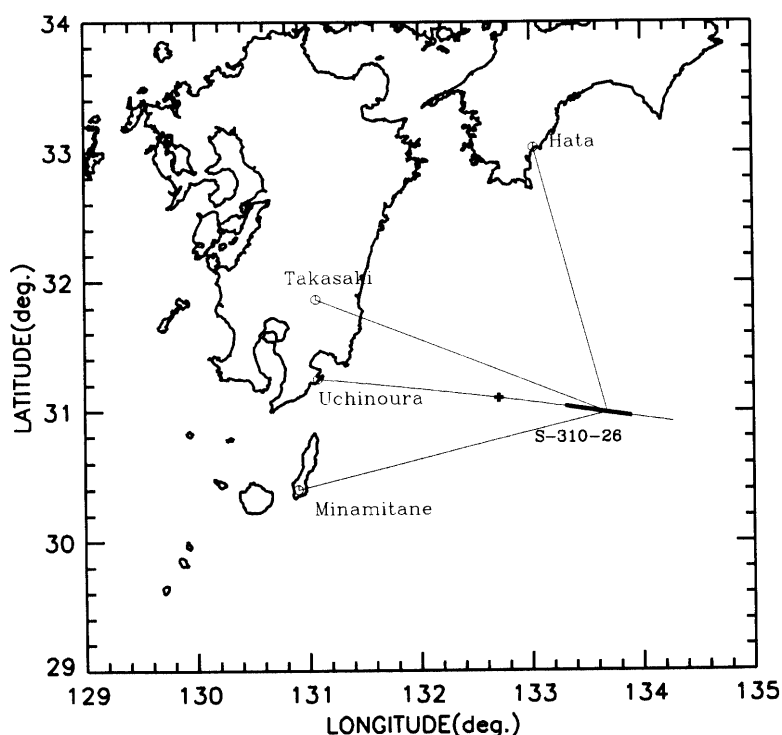


図1 観測ロケットS-310-26号機の軌道と地上観測点の配置

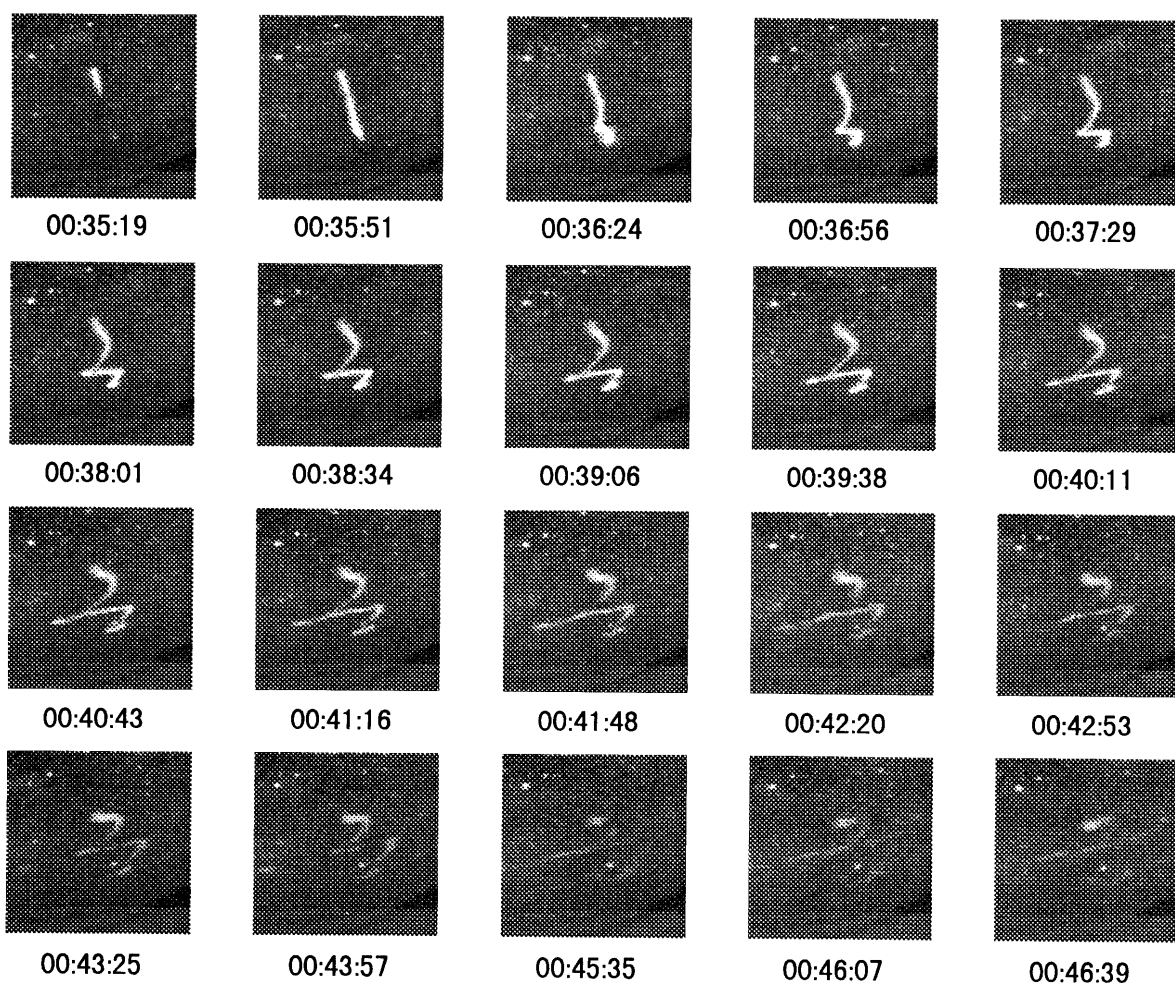


図2 内之浦から観測されたTMA発光雲の連続写真。  
(東北大学理学部の全天CCDイメージャによる撮像。露光時間は20秒)

く引き伸ばされる部分は、風速の高度変化が大きい（シアが大きい）領域に対応している。このような発光雲は約10分間にわたって観測された。

大気風速を求めるためには、上記のようにして撮影された数多くの写真を用いて発光雲の3角測量を行う必要がある。それぞれの写真の背景に写っている星の位置を手掛かりに、それぞれの地上観測点から見た発光雲の方向を正確に決めることができ、最低2ヶ所から撮影された写真を用いることで、発光雲のそれぞれの部分の3次元位置が定められる。更に連続的に撮影された写真を用いることで時間的な発光雲の位置変化を求めて、風速を推定する。求められた風速の確からしさは、発光雲を長時間観測するほど向上する。同様に確からしさは、地上観測点の配置（つまり複数の地上観測点から発光雲を見込む角）にも影響されることとなる。実際には、発光雲の位置決め精度は数百メートルまたはそれ以下であると考えられる（Larsen 他, 1998）。

### 3. 観測結果

図3に本実験によって得られた中性大気風速の高度プロファイルを示す。信頼性の高い風速推定値は、高度134 kmから98 kmにかけて得られた。風速の東西方向成分（実線）と南北方向成分（破線）は、それぞれ東向き、北向きを正としている。観測された風速は高度105 km付近で $150 \text{ m s}^{-1}$ に達する最大値を示した。またその

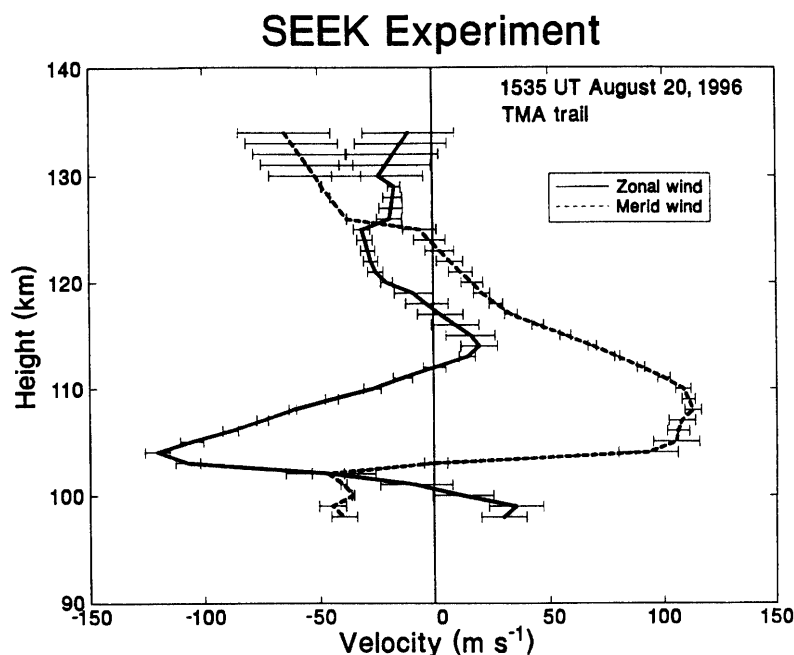


図3 観測ロケットS-310-26号機によって観測された風速の東西方向成分（実線）と南北方向成分（破線）の鉛直プロファイル。それぞれ東向き及び北向きの風を正とする。

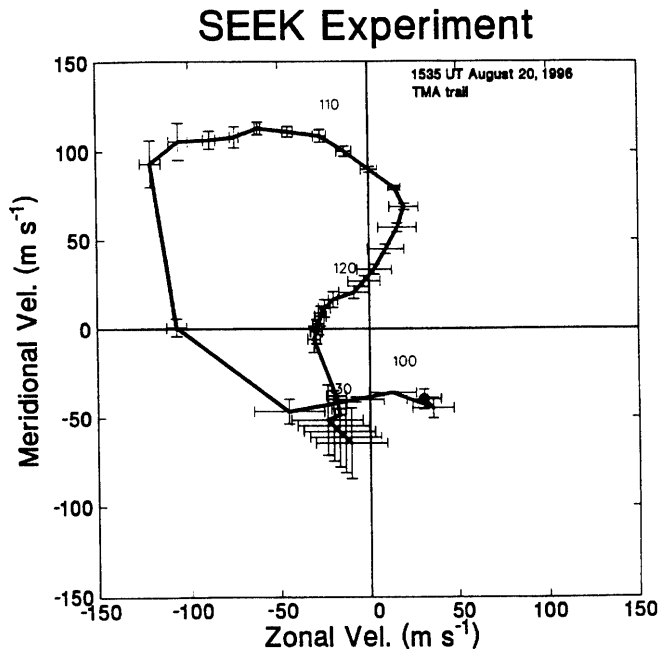


図4 風速プロファイルのホドグラフ表示。水平及び鉛直軸が東西及び南北風速成分に対応する。図中の数字は、データ点の高度を10 km毎に示す。

直下の高度100 km付近には強い鉛直シアが観測された。図4に、各高度において観測された風速ベクトルを東向き・北向き風速成分をそれぞれ水平・垂直軸に取った直交座標上に表し、隣り合う高度におけるベクトルの頂点をつなげて表示したものを示す（この表示方式をホドグラフと呼ぶ）。図中に示される数字は、データ点の高度を10 km毎に示している。風速の最大値における風向が北西向きであることがわかる。また風速ベクトル

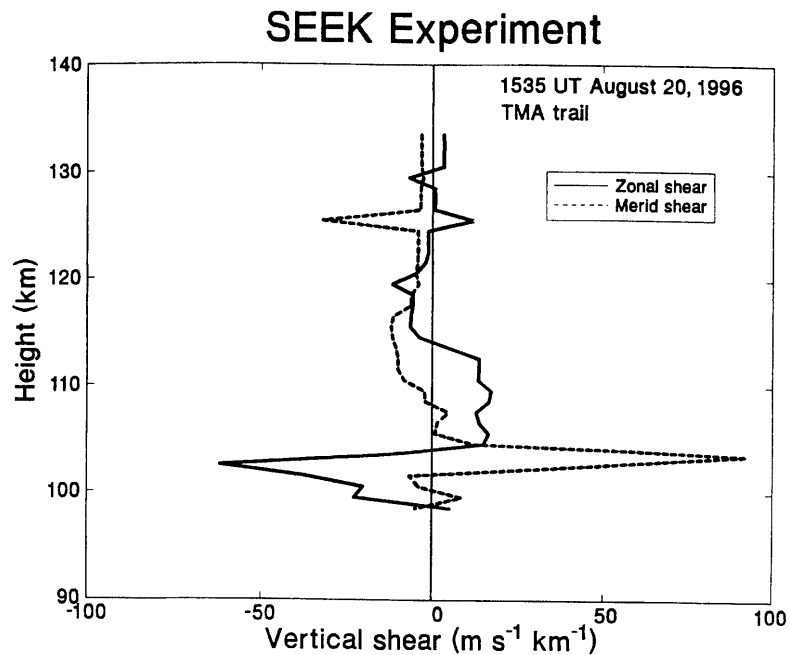


図5 観測された風速プロファイルの鉛直シア。実線及び破線がそれぞれ東西及び南北方向成分を示す。

が高度が上昇するにつれて時計回りに回転する様子が示されている。

Yamamoto 他 (1998) 及び山本他 (本号) によって示されるとおり、観測ロケット S-310-26号機に搭載されたインピーダンスプローブでの観測結果には、Es層によると見られる電子密度のピークが見られる。それは、上昇時には1立方センチメートル当たり  $8 \times 10^4$  個程度であり、下降時には  $7 \times 10^4$  個程度であった。また電子密度ピークの高度には上昇時と下降時で2~3 kmの相違が見られる。山本他 (本号) は、下降時に観測されたEs層の高度は、中性大気風速のシアによるEs層の生成を支持すると結論している。

図5に風速の東西及び南北成分にみられる鉛直シアの高度分布を示した。シアの大きさは高度100~105 kmの範囲で  $50 \text{ m s}^{-1} \text{ km}^{-1}$  を越える大きな値を示す以外はそれほど大きくはない。大気の安定度を示すリチャードソン数  $R_i$  は、以下のように定義される。

$$R_i = \frac{\omega_b}{\partial V / \partial z}$$

ここで  $\omega_b$  は Brunt-Väisälä 周波数、 $V$  は風速、 $z$  は高度を示す。良く知られているように、 $R_i < 0.25$  となるとき大気は不安定となり、いわゆる Kelvin-Helmholtz 不安定を生じる。風速として我々が観測した値を用い、大気温度構造に M-SIS モデル (Hedin 他, 1991) を用いて求めたリチャードソン数の高度分布を図6に示す。高度102~103 kmの領域において  $R_i < 0.25$  となっていることから、Es層の付近において大気が不安定になっていたことが分かる。

#### 4. 結 論

Es層が発生している領域において TMA 発光雲を用いて観測した中性大気風速から、最大風速が  $150 \text{ m s}^{-1}$  に達し、その直下において  $50 \text{ m s}^{-1} \text{ km}^{-1}$  を越える大きなシアが存在することを明らかにした。このようなEs層と中性大気風速の同時観測はあまり多くないが、いくつかの例が知られている。

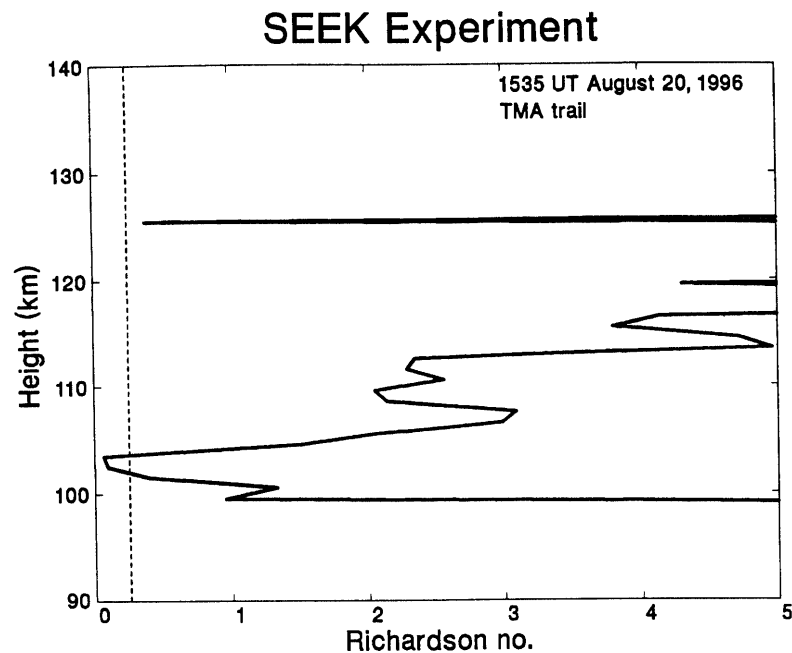


図6 観測された風速から求めたリチャードソン数の高度プロファイル。垂直の破線は $R_i = 0.25$ を示す。

まず Bedinger and Smith (1967) は、米国バージニア州の Wallops 島から風速と電子密度の一連の観測を実施している。彼らのデータには、SEEKで行なわれたような電子密度と風速の同時観測の例はないものの、それが1ないし数時間の間隔で行われた例が報告されている。高度105 km付近において最大風速が $150 \text{ m s}^{-1}$ を越えるほど大きいというSEEK観測結果と同様の結果が得られており、更にSEEK観測で見られたような非常に大きな風速の鉛直シアも示されている。

また Rees 他 (1976) は、オーストラリアの Woomera から電子密度の観測とTMAを用いた風速測定を実施している。彼らの風速プロファイルは、高度104 km付近において $130 \text{ m s}^{-1}$ を越える値を示しており、またシアはSEEKで見られた程度に大きいものが得られている。彼らの研究では、Es層は風速の最大値に近い高度で発生している。彼らはリチャードソン数を示してはいないが、観測された風の鉛直シアは今回の我々の観測値に近いものとなっている。

以上述べたように、我々の観測結果は、非常に大きい風速とその鉛直シアの存在に関して、過去の研究例と矛盾しないものであり、今回行なわれたTMA発光雲を用いた風速測定実験は成功を収めたといえる。通常は、本実験で明らかになったような、リチャードソン数が0.25を下回るような不安定な風のシアが数kmの厚さに渡って存在することはないことから、大きなシアを作り出し維持するだけの強い力学構造の存在が不可欠であることが結論される。ただし残念ながら、現在のところそのような大きな風速場をもたらす原因は未知である。

## 謝 辞

本観測の費用の一部は、文部省科学研究費補助金国際学術研究（課題番号08044074）及び基盤研究（B）（2）（一般）（課題番号07454117）、山田科学振興財団研究援助金によって賄われた。本研究の実施に当たっては、参加研究者のみならず様々な方々に御協力いただいた。特に、川添 晃、佐藤 三生、囊部 樹生、大工園 認の4氏の協力がなければ、地上観測点の設営は可能ではなかった。

## 参考文献

- Bedinger, J. F., and L. G. Smith, Measured wind shears and electron densities, *Space Res.*, VII, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 100–112, 1967.
- Fukao, S., M. Yamamoto, R. T. Tsunoda, H. Hayakawa, and T. Mukai, The SEEK (Sporadic-E Experiment over Kyushu) campaign, *Geophys. Res. Lett.*, in press, 1998.
- 深尾 昌一郎, 山本 衛, R. T. Tsunoda, 早川 基, 向井 利典, SEEK (Sporadic-E Experiment over Kyushu) キャンペーン—観測ロケット S-310-25号機, 26号機を中心とした中緯度E領域イレギュラリティの総合観測—, 宇宙科学研究所報告, 本号, 1998.
- Hedin, A. E., M. A. Biondi, R. G. Burnside, G. Hernandez., R. M. Johnson, T. L. Killeen, C. Mazaudier, J. W. Meriwether, J. E. Salah, R. J. Sica, R. W. Smith, N. W. Spencer, V. B. Wickwar, and T. S. Viridi, Revised global model of thermosphere winds using satellite and ground-based observations, *J. Geophys. Res.*, **96**, 7657–7688, 1991.
- Larsen, M. F., S. Fukao, M. Yamamoto, R. T. Tsunoda, K. Igarashi, and T. Ono, The SEEK chemical release experiment: Observed neutral wind profile in a region of sporadic E, *Geophys. Res. Lett.*, in press, 1998.
- Rees, D., E. B. Dorling, K. H. Lloyd, and C. Low, The role of neutral winds and ionospheric electric field in forming stable sporadic E-layers, *Planet. Space Sci.*, **24**, 475–478, 1976.
- Whitehead, I. D., Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic E, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **51**, 401–424, 1989.
- Yamamoto, Mas., T. Ono, H. Oya, R. T. Tsunoda, M. F. Larsen, S. Fukao, and M. Yamamoto, Structures in sporadic-E observed with an impedance probe during the SEEK campaign, *Geophys. Res. Lett.*, in press, 1998.
- 山本真行, 小野高幸, 大家 寛, SEEK観測ロケット搭載インピーダンスプローブ (NEI) によって得られたQPエコー発生時スボラディックE電離層構造, 宇宙科学研究所報告, 本号, 1998.