

## 論文内容の要旨

### 論文題目

# Contribution of gravity waves to ionization layers in the lower E region

## — Rocket-ground-based observations of the lower thermosphere/ionosphere —

下部E領域層構造への重力波の寄与に関する研究

— 下部熱圏・電離圏におけるロケット・地上総合観測 —

氏名: 吉村 玲子

ロケット・地上 MST レーダ・全天型イメージャによる観測結果を総合的に解釈して、下部電離圏・熱圏高度の力学・プラズマ輸送に周期半日以上の慣性重力波が大きく寄与していることを明らかにした。

電離圏E領域では突発的に電子密度の高い層(スプラディックE層/Es 層)が出現し、地上からの電波伝播や衛星データの受信に支障を来すことがある。このEs層は 50 年以上前から観測が行われており、その形成過程や一般的な振る舞いに関してはよく研究されている。一方で、E領域でもより下部(~90 km)で頻繁に観測される複数のピーク構造については、何らかの大气波動によるものであるということ意外は理解されていなかった。それは解析に必要なパラメータの同時観測が行われていなかったというのが大きな理由の一つである。そこで我々は、電子密度・酸素原子密度・中性風を同時観測することで、これらの層構造にどのような特徴をもつ波動の寄与があるのかについて検証を行った。

これらは WAVE2000 キャンペーン(大气光発光層の波状構造形成メカニズム解明のための総合観測)の一環として行われた科学実験であり、ロケットで電子密度・酸素原子密度・中性風速、地上 MST レーダで中性風速、全天型イメージャで大气光をそれぞれ観測した。ロケット実験は鹿児島県内之浦の宇宙空間観測所にて行われ、内之浦周辺で全天撮像装置による大气光観測結果をオンラインでモニターし、大气光発光層に波状構造が現れた時を狙ってロケットを発射し、その構造を突き抜ける形で観測を行った。

ロケット観測によって得られた電子密度及び酸素原子密度の高度分布には、発光層高度付近に波長 10 km の複数層構造が見られた。電子密度ピークは、同時に観測された中性風速の東西風シアに一致し、この層構造が、良く知られている windshear 理論によって形成されていることが裏付けられた。また、電子密度と酸素原子密度のピーク高度はほぼ一致していた。これらのロケット観測結果を用いて、波状構造を作り出したと思われる重力波の鉛直・水平波長(下限)、振幅、鉛直・水平位相速度(上限)、伝播方向の推定を行った。

鉛直波長と水平風振幅は、観測された電子密度構造からイオンの鉛直ドリフト速度を逆算し、更にそれを駆動するような東西風を算出することによって決定した。次に、イオンの鉛直ドリフト速度振幅と重力波の鉛直位相速度との大小関係から、水平位相速度の上限及び水平波長の下限を推定した。イオンの鉛直ドリフト速度は中性大気密度に逆比例する形になっており、下層ほど小さくなる。また、イオンの層を形成するには鉛直ドリフト速度が重力波の鉛直位相速度と比べて大きくなければならず、このことから鉛直位相速度の上限が決定される。また、重力波の分散関係式より、水平波長の下限も推測される。以上から見積もったパラメータは、鉛直波長:~10 km、水平波長:>2000 km、鉛直位相速度:<0.2 ms<sup>-1</sup>、水平位相速度:<40 ms<sup>-1</sup>、周期:>14 時間、水平風振幅:~40 ms<sup>-1</sup>であった。また、電子密度と酸素原子密度の変調過程の違いから伝播方向の推定を行い、南向きもしくは西向きという結果が得られた。このような水平波長>>鉛直波長(~200 倍以上)の重力波は、地球の自転によるコリオリカの影響を受けて波面が高度とともに回転する慣性重力波と考えられ、重力波の東西成分と南北成分の関係はよく知られた極方程式で現される。これを用いて南北風速を算出したところ、やはりロケット観測で得られた南北風プロファイルとよい一致を示した。

このようにして得られた重力波は、ロケット実験で得られた東西風速と、波長・振幅・位相ともよく一致した。また、このようなパラメータを持つ重力波によって、モデル化した酸素原子密度の鉛直構造を変調させたところ、振幅・位相ともよく一致し、算出された重力波パラメータが極めて妥当であるということが検証された。

更に、水平波長が 2000 km 以上と見積もられたことから、ロケット打ち上げ地点より 600 km 北東(信楽)にある MU レーダ(中層大気観測レーダ:京都大学中空電波観測所)の流星モードによる水平風観測にも同様の特徴が現れていると考え、レーダ観測結果に鉛直波長 5-15 km のバンドパスフィルタ処理を施したところ、周期 14 時間程度の重力波が検出された。これはロケット観測結果から算出された結果と矛盾なく、上述の算出が強く支持される結果となった。また、MU レーダの統計的な解析によると、鉛直波長:5-15 km、水平波長:数 100 - 数 1000 km、周期 10~20 時間程度の慣性重力波は、この高度領域(~90 km)で卓越する成分であるということがわかっている。このように、下部E領域で頻繁に観測される複数層構造の形成・維持には、この高度領域で卓越する慣性重力波が大きく寄与しているということがわかった。以上より、下部E領域におけるプラズマの鉛直輸送や再結合過程に関して、これまで潮汐に限定されていた波動の影響を、慣性重力波に拡張して考慮していくべきであるということが言える。

一方、同時観測された大気光波状構造から推測される大気重力波は、ロケット観測によって得られた電子密度及び酸素原子密度の鉛直構造には見られず、同様にロケット観測から得られた重力波の特徴は大気光変調には見られなかった。大気光観測に用いたイメージャは視野が 200 km × 200 km であり、それを大きく越える水平波長をもつ重力波は観測できない。また、大気光観測に見られた波状構造から推測される重力波の水平位相速度はイオンの鉛直ドリフト速度よりも早く、この重力波によってプラズマ層は影響を受けないということがわかった。また、酸素原子密度の鉛直構造にもこの影響が現れていないのは、大気光変調率が小さく、酸素原子密度測定 of 分解能以下の変動であったためと考えられる。つまり、大気光の水平構造変調と酸素原子密度及び電子密度の鉛直波状構造を引き起こした重力波は全く別のものであるということであり、これはこれまでの理解とは異なる見解である。

WAVE2000 キャンペーンの主目的は、大気光波状構造の形成メカニズムの解明ということであったが、これは風速場が大気光観測地点(ロケット打ち上げ地点)と MU レーダ観測地点で似通っているということから、MU レーダ観測結果を用いて大気光波状構造を作り出した重力波の起源の可能性を議論することができる。MUレーダで観測されたイオンの両極性拡散係数から温度場の変動が推定できる。この温度場を用いて鉛直波数の2乗 ( $m^2$ ) を計算したところ、高度 90 km 付近で負になることがあった。これは重力波が  $m^2$  となる両端で反射を繰り返しながら伝播するダクト伝播である可能性を示唆するものである。また、同じ温度場を用いてリチャードソン数を計算したところ、ロケット打ち上げ直前に高度 85 km 付近で負になることがあった。これはこの時間、この高度でシア不安定が起こっていた可能性を示すものであり、この場合、大気光波状構造はこの場で局所的に生成された重力波と関係があるという可能性が示唆された。いずれの場合も検証には正確な温度観測が必要である。