

報告番号	※ 甲 第 11096 号
------	---------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Study of dynamical neutral-plasma coupling processes in the low-latitude ionosphere based on ground-based airglow observations (地上からの大気光観測に基づく低緯度電離圏の中性・電離大気の力学結合過程の研究)

氏 名 福島 大祐

論 文 内 容 の 要 旨

地球の超高層大気である熱圏や電離圏 F 層は、太陽からの紫外線によって大気の一部が電離しておりプラズマが生成されている。このような電離圏の環境では、プラズマの密度が乱れた擾乱現象が存在する。電離圏擾乱は下層大気からの大気波動や磁気圏からの電磁擾乱の影響によって起こっていると考えられている。電離圏擾乱が起こると電離圏において電波の遅延や乱れが生じるため、衛星地上間で通信や GPS 測位に大きな障害となる。このような理由から電離圏擾乱の特性や発生原因を解明することは、衛星を用いた通信や測位の信頼性や精度の向上に大きく貢献する。そこで本研究では、中緯度域に比べて観測があまり行われていなかった低緯度域の電離圏擾乱の観測を通して、低緯度域の熱圏・電離圏領域で起こる中性大気と電離大気の力学結合過程を解明することを目的とする。本研究では、高度 200-300km の熱圏大気の発光現象である波長が 630nm の大気光を地上からの光学観測機器を用いて撮像することで得られる大気光画像を解析することで、中規模伝搬性電離圏擾乱 (MSTID)、プラズマバブル、Midnight Brightness Wave (MBW) に関する 3 つの研究を行った。

1 つ目の研究として、赤道域のインドネシアで夜間に観測された MSTID の 7 年間にわたる統計解析を行った。この研究では、インドネシア、コトタバン (地理経度: 100.3° E、地理緯度: 0.2° S、磁気緯度: 10.6° S) に設置された高感度全天大気光カメラで撮像された熱圏 630nm 大気光の画像中に MSTID を観測した。2002 年 10 月 - 2009 年 10 月の 7 年間の期間中に観測された MSTID の水平位相速度は 320 ± 170 m/s、周期は 42 ± 11 分、水平波長は 790 ± 440 km である。これらの MSTID は赤道電離圏異常と考えられる大気光が明るくなった領域内で頻繁に観測された。MSTID の太陽活動度依存性を調べるために、太陽活動度が減少していく 7 年間に観測された MSTID の発生率、伝搬方向、水平位相速度、周期、水平波長について統計的に解析を行った。その結果、太陽活動が下がるにつれて MSTID の発生率は減少しており、また MSTID の平均水平波長は大きくなる傾向が見られた。伝搬方向は、7 年間全体で南向き (極向き) 伝搬が大部分を占めており、東西に伝搬する MSTID は 7 年間に全く観測されなかった。本研究で観測された MSTID が東西伝搬ではなく磁力線

に沿った方向の南向き伝搬であることから、熱圏に存在する大気重力波によって MSTID が発生していると考えられる。大気重力波は中性大気分子粘性のため、熱圏温度が低い太陽活動極小期には極大期よりも高い高度へと伝搬することができず、水平波長が大きい波だけが低い高度へと伝搬できることが数値計算によって示されている。太陽活動度が下がるにつれて、MSTID の発生率が減少し、平均の水平波長が大きくなるという統計結果は大気重力波の数値計算の結果と矛盾しないため、本研究では熱圏の大気重力波が MSTID として 630nm 大気光画像中に観測されていると結論付けた。水平位相速度が下層大気の音速（約 300m/s）を超える大気重力波は高度 100km 以下の下層大気中では存在できないため、水平位相速度が 300m/s を超える MSTID については、下部熱圏で発生した 2 次的な大気重力波であると考えられる。水平位相速度が 300m/s を超えない MSTID については、下層大気から直接伝搬してきた大気重力波が原因である可能性がある。そこで本研究では、MSTID の伝搬方向と雲頂温度データから得られる対流圏の対流活動分布との比較を行った。その結果、水平位相速度が 300m/s の MSTID の 81 % において、伝搬方向から推測される発生源の方向の対流圏に活発な対流活動が見られた。このことから、水平位相速度が 300m/s 以下の MSTID については、対流圏の対流活動から発生した大気重力波が熱圏へと直接伝搬し、MSTID として大気光画像中に観測されていると考えられる。

2 つ目の研究として、インドネシアとタイの低緯度磁気共役点でプラズマバブルと熱圏中性風を組み合わせた初めての磁気共役点観測を行った。この研究では 2011 年 4 月 5 日にインドネシア、コトタバンとタイ、チェンマイ（地理経度：98.9° E、地理緯度：18.8° N、磁気緯度：8.9° N）の両磁気共役点の全天大気光カメラで撮像された 630nm 大気光画像中にプラズマバブルを同時に観測した。プラズマバブルは 13 - 20UT（20 - 03LT）の時間帯で東向きに約 100-125m/s の速度で伝搬しており、両磁気共役点で観測された速度はほぼ同じであった。プラズマバブルの伝搬速度は、地方時間が遅くなるにつれ減少していた。プラズマバブルは地球の磁力線に沿って電子密度が減少した構造を持つため、磁気共役性を持つことがこれまでの研究で明らかになっている。南半球のコトタバんで観測された大気光画像を磁力線に沿って北半球の磁気共役点に投影した画像とチェンマイで観測された大気光画像をつなげたところ、プラズマバブルの構造が非常によく一致していたことから、本研究で観測されたプラズマバブルも磁力線に沿って南北半球で対称な構造を持っていることが分かった。また両磁気共役点では、背景の熱圏中性風速もファブリ・ペロー干渉計によって観測されており、コトタバンでは東向き 70 - 130 m/s、チェンマイでは東向き 50 - 90 m/s であった。熱圏中性風の東向き風速もプラズマバブルの伝搬速度と同様に地方時間が遅くなるにつれ減少していたが、プラズマバブルの伝搬速度は熱圏中性風速よりも全体的に少し大きくなっていった。本研究では熱圏中性風による F 層ダイナモの効果で電離圏のプラズマドリフト速度にどの程度寄与しているか調べるために、観測されたプラズマバブルの伝搬速度と、観測された熱圏風速とモデルの電離圏伝導度から予測されるプラズマバブルの伝搬速度の比較を行った。その結果、熱圏風速から見積もったプラズマバブルの速度が観測された速度の 60-90 % 程度の値となった。このことから、プラズマドリフト速度の大部分が熱圏中性風による F 層ダイナモ効果で発生した電場による $E \times B$ ドリフトで説明できることがわかった。しかし、観測されたプラズマバブル速度の 10-40 % は F 層ダイナモでは説明することができないため、他の要因を考える必要がある。他の要因として、1) 同

一磁力線上の磁気赤道付近でより速い熱圏風が吹いていることによって追加されるダイナモ効果、2) E層でのダイナモ効果による電場の寄与、3) 大気光発光層の高度が実際の高度より高く見積もられてしまった場合で、プラズマバブルの速度が実際より大きく見積もられていた可能性が挙げられる。

3つ目の研究として、低緯度域のMBW とそれに伴う電離圏変動の磁気共役点観測を行った。この研究では2011年2月7日にインドネシア、コトタバンの全天大気光カメラで撮像された630nm大気光画像中にMBWと考えられる大気光の増光を観測した。MBWは1540-1730UT (2240-0030LT)の真夜中付近の時間帯において1度だけ極方向へと伝搬していた。観測されたMBWの伝搬速度は約290m/s、伝搬方向は南南西であった。また、この日のコトタバンの大気光観測と同時に、ファブリ・ペロー干渉計による熱圏風速とイオノゾンデによる電離圏高度の観測が行われていた。MBWがコトタン上空で観測された時間にかけて、熱圏南北風が北向き(磁気赤道向き)約20m/sから南向き(極向き)約50m/sと変動しており、電離圏高度は約300kmから約190kmへと下降していた。このことから観測された極向き熱圏風が磁力線に沿ってプラズマを押し下げ、その結果大気光強度が増大しMBWとして観測されたと結論付けた。一方で、MBWの磁気共役性を調べるためにコトタバンの磁気共役点であるチェンマイの大気光の解析を行ったところ、MBWと考えられる大気光の増光は確認できなかった。このことからMBWは磁気共役性を持っていないことが、本研究で初めて明らかになった。しかし、コトタンでMBWが観測された時間帯と同じ時間帯に、チェンマイのイオノゾンデで観測された電離圏高度は約30km上昇していた。この北半球での電離圏高度の上昇は南半球で観測されたMBWとほぼ同時に起こっていることから、MBW内部で発生した分極電場が北半球に投影され、この分極電場による上向き $E \times B$ ドリフトによって電離圏高度が上昇していた可能性が挙げられる。この仮説を確かめるために、南半球のコトタンで観測された中性風速と大気光強度の比から求めた分極電場による上向き $E \times B$ ドリフトの値と、北半球のチェンマイで観測された電離圏上昇から推定したドリフトの値を比較したところ、両者は近い値となり、この仮説を支持する結果が得られた。

本研究では、これらの3つの研究成果より以下のことを結論付けた。1) 夜間の低緯度域のMSTIDは主に熱圏の大気重力波によって発生している。この大気重力波のうち下層大気から直接伝搬できるものについては、対流圏の対流活動が主な発生源である。2) 電離圏プラズマバブルの東西ドリフトは、その大部分が熱圏中性風によるF層ダイナモ効果によって支配されている。3) MBWは極向きの熱圏中性風によって電離圏が押し下げられ、その結果、大気光が増光することによって発生している。MBWに磁気共役性は見られない。これらの3つの研究結果は、中性大気と電離大気との力学的な結合過程を通して、大気重力波や熱圏中性風といった中性大気現象が電離大気の変動に大きく影響していることを示している。本研究を行うことによって、中性大気力学変動が支配的に低緯度の電離圏擾乱の特徴を決めていることが明らかになった。