

氏名	中 田 裕 之
学位(専攻分野)	博士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2186 号
学位授与の日付	平成 12 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	理学研究科地球惑星科学専攻
学位論文題目	The standing toroidal mode oscillations in the magnetosphere-ionosphere system (磁気圏電離圏結合系における定在トロイダルモード振動)

論文調査委員 (主査) 助教授 藤田 茂 教授 荒木 徹 助教授 町田 忍

### 論 文 内 容 の 要 旨

ULF 周期 (数秒~数分) を持つ地磁気脈動の中で、継続時間が長い Pc 型地磁気脈動は、高緯度から低緯度に向かうにつれ周期が短くなる傾向があることから、磁力線の定在振動 (固有振動) と考えられている。地磁気脈動は、磁気圏において電磁流体 (MHD) 波動であるため、地球磁力線上の定在振動はアルペンモードの振動であるが、この振動はトロイダルモードの磁場変動をもつので、定在トロイダル振動と呼ばれる。定在トロイダル振動に伴って地上で観測される磁場変動は、磁気圏中の MHD 波動が中性大気中の電磁波として電離層を透過したものと、電離層において MHD 波動が作る電流によって誘起された磁場変動が合成されたものである。電離層電流を考える際、電離層電気伝導度は、電場方向のペダーセン伝導度、電場と磁場両者に垂直方向のホール伝導度という非等方テンソルで定義されることが、地上磁場変動を求める取扱いを複雑にしている。MHD 波動はアルペン波と磁気音波の 2 種類があるが、アルペン波が電離層に入射した場合、ペダーセン伝導度・ホール伝導度によって誘起される波動はそれぞれアルペン波と磁気音波である。アルペン波は静電的な電場を持ち、磁気音波は誘導的な電場を持つため、電離層電場は一般に静電的な電場と誘導的な電場が混在している。

申請者は、本研究において、磁気圏と電離圏の結合系における定在トロイダル振動の振る舞いを数値的に計算し、定在トロイダル振動に伴う地上磁場変動が、磁気圏電離圏の諸物理量によってどのように変化するかを論じた。使用したモデルは、主磁場が電離層と斜交している台形磁気圏モデルである。申請者が本論文中で述べているとおり、双極子磁気圏モデルが望ましいが、これを使用するには数値解法上の困難性がある。電離圏での非等方伝導度を考慮した境界条件を与え、定在トロイダル振動の固有値解を計算し、地上磁場変動を数値的に求めた研究は本研究が初めてである。

最初に、申請者は、磁気圏電離圏が磁気赤道に対し対称であるモデルを使用し、電離層のペダーセン伝導度・ホール伝導度、磁力線の伏角、磁気赤道から電離層高度でのアルペン速度分布という 3 種の物理量の変化によって、定在トロイダル振動に伴った地上磁場がどのように変化するかを考察している。本研究の特徴は、トロイダル振動に伴う電離層電場が静電的であるか又は誘導的であるかによって地上に現れる磁場擾乱の上記物理量に対する依存性が異なることを明らかにしたことである。すなわち、電離層電場が静電的である場合、電離層ペダーセン伝導度は定在アルペン振動に伴う磁場変動を遮蔽し、ホール電流は逆に増幅するが、電離層電場が誘導的である場合、ペダーセン伝導度のみならずホール伝導度も定在アルペン振動の磁場を遮蔽することを示した。電離層における電場が静電的である条件は、ホール伝導度よりペダーセン伝導度が大きいことと、周期が長いことである。地上磁場への伏角による影響は、電離層電場が静電的である場合は、ペダーセン伝導度が伏角の  $\sin$  だけ小さくなったとすれば良く、誘導的である場合は、地上磁場は伏角にほとんど依存しないことも明らかにした。前者は Allan and Knox [1979] と一致している。磁力線沿いのアルペン速度分布が変化した場合、磁場擾乱の電離層透過の振る舞いは、電離層電場が静電的である場合は変化がないが、誘導的である場合は電離層におけるアルペン速度が大きくなり、定在トロイダル振動の周期が短くなることにより、電離層における磁場の遮蔽効果が大きくなる。更に磁力線

沿いのアルベン速度が電離層に向けて大きくなることから、アルベン波動が赤道から電離層に伝搬する途中で一部反射することにより、赤道面での磁場変動に対して電離層高度の磁場変動は小さくなることも示した。

つぎに磁気圏電離層が赤道に対し非対称である場合について考察し、電離層伝導度・磁力線の伏角・磁力線に沿ったアルベン速度分布の3つのパラメータが南北で非対称性であることによって、地上共役点間の磁場変動比がどの様に変化するかを論じている。特に電離層電気伝導度が南北非対称性をどのように決めるのかということに関して、電離層電場が静電的であるか又は誘導的であるかが重要な点であることを明らかにした。すなわち、静電的である場合はホール伝導度が大きな半球で地上磁場が大きくなるが、誘導的である場合は逆になることを示した。電離層電場が静電的であるか又は誘導的であるかは定在トロイダル振動の周期にも依存し、より低周波振動に対して電離層電場は静電的であることも明らかにしている。これにより長周期地磁気脈動と短周期地磁気脈動が基本モードとその高調波として地上で検出された場合、地上磁場振幅の南北比は逆になる可能性があることも見いだした。

最後に、標準電離層モデル (IRI) と大気モデル (CIRA) から求めた電離層伝導度と、国際標準磁場モデル (IGRF) から求めた磁場を使用して、地上磁場擾乱の南北非対称性を数値的に計算している。これにより、高緯度地域においては、Pc5帯の長周期地磁気脈動は磁力線に沿った定在トロイダル基本振動に相当し、電離層電場はほぼ静電的であることを明らかにした。このことにより、Pc5ではホール伝導度が大きな半球（一般に夏半球）で地上磁場振幅が大きくなり、Pc3は逆になることを明らかにした。更に地磁気緯度は地理的経度によって地理的緯度が異なるために、経度によっても南北非対称性が異なる傾向を示す場合があることも明らかにした。これらの結果は、地磁気経度 210 度子午面におけるネットワーク観測から得られた地磁気脈動の共役点間磁場振幅比とほぼ一致する。昭和基地—アイスランド地磁気共役点観測における観測結果と理論的結果の一致も見た。しかしながら、これらの一致は定性的なものであり、今後モデルの精密化や、観測条件と一致する電離層磁気圏物理量を使っての理論計算の必要性を論じている。

#### 論文審査の結果の要旨

継続時間が長い地磁気脈動は、地球磁気圏に存在する定在トロイダル振動であると考えられている。定在トロイダル振動について、ペダーセン伝導度とホール伝導度両者を取り入れた電離層境界条件を用いて、磁気圏電離層中の磁気流体波固有振動を計算し、地上における電磁場擾乱を計算した研究はまだ行われていない。理由は、非等方伝導度を持つ電離層を境界として、磁気圏から地上までを連結させた場で、定在トロイダル振動を求めることが難しいためである。一方で、地上のネットワーク観測等により、地上共役点間の磁場振幅比や地上衛星間での共役観測などが近年盛んに行われるようになってきている。したがって、定在トロイダル振動に伴う磁気圏電離層における電磁場分布や地上磁場変動を求めることは、磁気圏電離層物理学において重要なことである。従来の研究においては、電離層を完全導体にして磁気圏中の定在トロイダル振動を考えるものや、電離層にアルベン波を入射させ、それが地上にどのように伝搬するかを調べたものがあるが、定在振動である地磁気脈動に伴う地上磁場擾乱を求めたものはなかった。

本研究では、台形磁気圏モデルを用いて、磁気圏から地上までの、定在トロイダル振動に伴う電磁場擾乱を求めることに成功した。これまで行われた定在トロイダル振動に伴う地上磁場擾乱を求める方法は、まず、定在トロイダル振動をペダーセン伝導度のみ持つ電離層を仮定して求め、こうして得られた電場を用いて、これが作るホール電流を計算し、地上磁場擾乱を求めるというものである。しかし、アルベン波が電離層に入射した場合、ホール伝導度も磁気圏側の MHD 波動の振る舞いに影響を与えるため、上記の単純化した電離層境界の扱いは正しくない。例えば、Yoshikawa and Itonaga [1996] や Buchert and Budnik [1997] は、ホール伝導度による誘導的電離層電場は、MHD 波動の振る舞いに重要であることを示している。本研究では、定在トロイダル振動に伴う電磁場擾乱を求めることにより、特にペダーセン伝導度よりホール伝導度が高い場合では、ホール伝導度の増大が定在トロイダル振動に伴う地上磁場擾乱を小さくするという、「ホール伝導度による磁場遮蔽効果」があることを示した。更に、定在トロイダル振動に伴う地上磁場擾乱の地上磁場擾乱の伏角・アルベン速度依存性なども調べ、それぞれ、電離層電場が静電的又は誘導的な状態で依存性が変化することも明らかにした。例えば、地上磁場擾乱の伏角依存性を調べた結果、これまで知られていたペダーセン伝導度の効果が伏角によって変化すること以外に、ホール伝導度の効果は伏角にほとんど依存しないことを明らかにした。これは本論文におけるモデル計算により明らかとなったことである。

また、磁気赤道に対して磁気圏電離圏が非対称であるときの地上磁場振幅の共役点間の比について、電離層伝導度・伏角・磁力線沿いのアルベン速度分布に対する依存性を調べている。この中で、電離層電場が静電的であるか又は誘導的であるかは、定在トロイダル振動の周期にも依存し、より低周波振動に対して電離層電場は静電的な傾向をもつことも明らかにした。これにより長周期地磁気脈動と短周期地磁気脈動において地上磁場振幅の南北比は逆になる可能性があることも示した。この種の理論的な研究はこれまで行われてこなかったものであると同時に、地上ネットワークによる共役観測データとの対比の上で非常に重要なものである。

つぎに、実際の地球磁気圏電離圏における定在トロイダル振動の振る舞いを考えるために、現実的なモデル（国際標準磁場モデル、国際標準電離層モデル）を用いて電気伝導度、アルベン速度、伏角を求め、 $L=2, 4, 6$ 、磁気緯度 $0, 90, 180, 270$ 度の各地点において南北非対称が理論的にはどのように現れるかを計算した。その結果、基本波と高調波は、現実の電離層の状態においては、電離層電場がそれぞれ静電的又は誘導的であり、このことゆえ、共役点間地上振幅比の季節依存性が基本波と高調波とで異なることを示した。また、地理座標と地磁気座標との違いが、各地点での共役点間地上振幅比の非対称性に大きく影響していることも明らかとなった。これらの結果は、地磁気脈動の観測結果を解釈する際に有用なものである。更に、 $210$ 度子午面地磁気観測網や、昭和基地—アイスランド地磁気共役点観測などの、高緯度における観測結果との定性的な一致を見た。

本研究は、台形磁気圏という単純化したモデルながら、磁気圏電離圏結合系における、電離層伝導度・磁力線の伏角・磁力線に沿ったアルベン速度分布という基本的な物理量に対する定在トロイダル振動の振る舞いの依存性を網羅的に調べ上げ、その結果に対する理論的な解釈を与えたものである。その結果、電離層電場が静電的であるか誘導的であるかによって、磁場擾乱の電離層透過の様子が変化し、これにより共役点間での地上磁場振幅比の非対称性がコントロールされることを見いだした。このことは、今後地上における地磁気脈動の観測を解釈していくうえで重要な結果を与えていると評価出来る。

以上の観点から、本申請論文は、博士（理学）の学位論文として価値あるものと認めた。なお、平成12年2月4日、本論文に報告されている研究内容と、これに関連する分野についての口頭試問を行った結果、合格と認めた。