108:101:02 (潮汐波;プラネタリー波;地磁気変動)

1. 中層大気力学*

ー中性大気から電離大気へー

宮 原 三 郎**

1. はじめに

この小論では中層大気力学に関連する分野で今後研 究すべき課題について論ずるが,これまで中層大気力 学がその主な対象としてきた課題からは少し外れて, 気象学と地球電磁気学との境界領域に属する課題につ いて論ずることにする.

中層大気は対流圏界面(高度約10km)からホモポー ズ(高度約110km)の広い高度範囲に広がる大気であ り、そこでは大気運動による拡散によりオゾン等の微 量成分は別として大気成分はほぼ一様に混合されてい る。また、上部中間圏・下部熱圏では大気の電離も始 まっており電離圏の一部をも構成しているが電離が中 性大気運動に与える効果は小さい、この高度範囲が一 般的に中層大気と定義されているが (例えば Andrews, Holton and Leovy, 1987), それより上層の大 気との境界は必ずしも明確なものではない、成分の重 カ分離や中性大気運動に対する電離の効果は高度と伴 に徐々に増大していく、本稿では中性大気の運動と地 球電磁気学的現象とが相互に係わり合いを持ちはじめ る領域(高度約 110 km から 150 km の領域)までを 含めて中層大気と定義する、この定義が不自然でない ことは本稿の中で明らかにされるであろう.

気象学の一分野としての中層大気力学は中性大気の 力学を論ずるものであり、中層大気大循環、プラネタ リー波・赤道波・大気潮汐波・内部重力波などの伝播 や平均流との相互作用、物質輸送などをその主な対象 としてきた、気象学の発展とは少し異なった道を歩み 古くから研究されてきた大気潮汐波を除いては、これ らの研究は60年代に入って本格的に開始されたといっ てよいであろう、過去35年間の研究の結果、先に述べ

- ** Saburo Miyahara, 九州大学理学部地球惑星科学科.
- © 1996 日本気象学会

た波動はラプラスの潮汐方程式の固有解として統一的 に理解され**1, 中層大気大循環・物質輸送は波と平均 流の相互作用の観点から、波に伴う運動量、E-P フ ラックス, Transformed Euler 平均, 残差子午面循環, Lagrange 平均などの概念を用いて,これまた統一的 に理解されるに到っている (例えば Andrews, Holton and Leovy, 1987). 例えば成層圏突然昇温・準2年振 動・オゾン輸送などはその典型的な例と言って良いで あろう、中層大気力学の研究は現在ではこれらを基礎 として、より総合的な中層大気の理解に向けて研究が 進行中であり、大気力学・大気化学・大気放射学など を組み合わせたオゾンの科学,オゾンなどの微量成分 分布にも大きな影響を与える成層圏対流圏間の物質交 換など、単に中層大気力学だけに留まらない領域で大 きな進展を見せようとしている.これらは中層大気力 学に関連して今後研究すべき課題であることは論を待 たないが、これらは気象学の分野における主流の研究 テーマの範疇にあり、ことさら強調するまでもなく発 展が見込まれる領域であり、ここでは敢えて取り上げ ないことにする.

先にも述べたように中層大気の上部では大気の電離 が進み電離圏の一部をも構成している.しかしながら 中層大気の電離度はより高々度の大気の電離度に比較 すると相対的に低く,その大気運動は基本的には中性 大気運動と考えて良い.電離大気の効果は中性大気運

*1) 内部重力波の中でも鉛直スケールに比較して水平ス ケールが充分大きな波では静力学平衡近似が成り立ち、東西方向に伝播するものについてはラプラスの潮 汐方程式が適用できる.ただし、実際の内部重力波は 必ずしも水平スケールは大きくない.また局在し、南 北方向にも伝播するのでラプラスの潮汐方程式は適 用できない場合が多い.ここでは「ラプラスの潮汐方 程式は静力学平衡し東西方向に伝播する内部重力波 解を含む」と理解されたい.

"天気"43.7.

^{*} Middle atmosphere dynamics : From the neutral atmosphere to the ionized atmosphere.

動に対してイオン抗力 (ion drag) として働き、高度 約 100 km 以上では無視できない大きさを持つことが 知られている。また高度 100 km~150 km 付近の中性 大気の運動はこの高度領域に電流系を発生させ、その 電流の変動が地磁気変動として観測されることは古く から知られており、その研究は地球電磁気学の一分野 として発展してきた (例えば Chapman and Bartels. 1940;永田・等松, 1973) この現象と深い関わりを持 つ大気潮汐波動に関しては気象学および地球電磁気学 の双方から研究が行われてきた(例えば Chapman and Lindzen, 1970; Kato, 1980) が、気象学のなかで はあまりポピュラーでなかった大気潮汐波動に関連し ていることも原因してのことと思われるが、気象力学 の側から地磁気変動現象が注目されることはほとんど 無かった.しかし,最近のいくつかの研究により,地 磁気の変動と気象学の分野でなじみの深い中層大気の プラネタリー波や大循環の変動との関連が指摘されは じめている、ここではこれらの研究の一端を紹介し、 今後気象力学の側からも研究を深めていくことが必要 であることを示すことにする.

- 2. 中性大気風系の日々変動と地磁気日変化(Sq) の日々変動
- 2.1 地磁気日変化 (Sq)の日々変動

太陽活動の変動による磁場変動が静穏な日には quiet-day solar daily magnetic variation (Sq) と呼 ばれる比較的規則的な地磁気の日変化が観測される. 第1図にグァム島(北緯14度,東経145度)で観測され た地磁気の東向き成分変動を、その例として示す。こ れによると地方時の午前中に東向き成分が最大となり 午後には最小となる変動を示し、夜間には比較的定常 な値を持つことがわかる。その変動の振幅は 10nT ~20nT である。図には示さないが磁場の北向き成分 にも規則的な変動が見られ、北半球においては北緯約 30度以北で地方時の正午前に北向き成分が最小とな り、それより南側では逆に北向き成分が最大となる。 南半球では北半球と赤道に対して対称な変動が観測さ れる。この日変化は下部熱圏の高度 100 km~150 km 付近(ダイナモ領域と呼ばれる)に流れる規則的な電 流系によって引き起こされていることが知られており (例えば Chapman and Bartels, 1940; Matsushita, 1969), 第2図にこの電流系の例を示す。この電流系は 北半球では反時計回り、南半球では時計回りの流れで あり、正午付近の南北半球ともに緯度30~40度付近に



<< NONTHLY CHART by EEJVIEW >>



中心点を持っている.この電流系にビオ・サバールの 法則を適用すれば上に述べた地磁気の日変化を定性的 に理解することができる.この電流系を引き起こす中 性大気の風速分布は京都大学の加藤先生によって潮汐 方程式を満たす形で求められ(Kato, 1956),一日潮汐 成分が半日潮汐成分よりも3~4倍大きく,しかも高 緯度側で大きな振幅を持つ傾向があることが示された が,これらの性質は当時の潮汐論の理解する所と矛盾 していた.この矛盾は後にラプラスの潮汐方程式の負 の等価深度を持つ解の発見により解決され,この風系 は下部熱圏で励起される負の等価深度を持つ鉛直伝播 しない一日潮汐波の解に付随することが明らかにされた (Kato, 1966).

ここに述べたように Sq は下部熱圏で励起された一 日潮汐に伴う風系で主に引き起こされるが, 第1図の 例でも解るように地磁気の日変化は必ずしも日々規則 的に起こっているわけではなく、太陽活動が静穏な日 が続いても日々変動が存在することが知られている. 例えば第3図は地磁気日変化から推定した電流系の中 心点の移動を2日間にわたって調べたものであり、日 によって変動を示しており、この日々変動が地磁気活 動度の変動と明確には関連していないことが知られて いる (例えば Hasegawa, 1936; Chapman and Bartels, 1940). Sq は電磁気学的現象であるからその変動 は電磁気的変動(例えばダイナモ領域の電気伝導度や 電磁場の日々変動など)によるであろうことは容易に 想像できる。しかし、Sq は中性大気の風系によって引 き起こされる電流系によるものであるから、その日々 変動は中性大気風系の変動にもその原因が求められる であろう ここでは九大中層大気大循環モデルでシ ミュレートされた中性大気風系を使用して Sq の日々 変動について調べた研究について先ず紹介する.

2.2 九州大学中層大気大循環モデル

九大中層大気大循環モデルは地表面から高度約 160 km までの大気運動をシミュレートすることを目的と しており、気象庁において開発され東大で気候モデル へと発展させられた対流圏大循環モデルをそのルーツ としている.この中層大気大循環モデルは対流圏大循 環モデルと基本的に同じ対流圏物理過程が含まれてお



第3図 1933年9月23日(実線),9月24日(点線)の電流中心点の移動.時刻は日本 標準時.(Hasegawa, 1936より引用).

り、海陸分布や地形、海水面温度の効果も取り入れら れている。ここで紹介する結果は水平波数21,鉛直方 向には成層圏・中間圏で約 2.5 km, 下部熱圏で 5 km ~10 km の分解能を持つモデルによるものである。短 波放射については日変化を含んでおり、成層圏・中間 圏でのオゾン加熱も含まれている。ただし、下部熱圏 での酸素分子解離に伴う加熱は考慮されていない、長 波放射については対流圏から下部成層圏にかけては Chou et al. (1985) のスキーム, 中層大気に関しては ニュートン冷却近似を用いている。大気全体を通じて 水平渦粘性とリチャードソン数によって変化する鉛直 渦拡散が導入されているが、特に下部熱圏ではそこで 重要となる散逸過程である分子粘性・分子熱伝導・イ オン抗力が導入されている。また、大気層全体につい て乾燥対流調節が取り入れられており、中層大気で重 要となる内部重力波や潮汐波のブレーキングをモデル の解像度の範囲内で表現できる。

このモデルは短波放射に日変化を含んでいるのでモ デル中で自動的に熱潮汐波動が励起され下部熱圏まで 伝播する過程がシミュレートされる.ただし下部熱圏 での短波放射過程を含まないので下部熱圏内で励起さ れる潮汐(in situ tide)はモデルでは表現されない.

2.3 2次元ダイナモモデルと地磁気変動の計算

中性大気風系による電流系の生成は磁気赤道の両側 約10度以内を除いては水平2次元モデル(thinn-shell model)により近似できることが知られている(例え ば Forbes and Lindzen, 1976a, b). 詳しいダイナモモ デルの記述については上記文献を参照していただくこ とにして、ここではその概略を述べるにとどめること にする.いま、大気電気伝導度の時空間分布と地球磁 場が外部パラメタとして与えられているとする、各高 度での電気伝導度と地球磁場の鉛直成分を重みとして 高度平均した中性大気風系を右辺に源として含む緯度 経度を独立変数とする2階の偏微分方程式を解くこと により, 各時刻での電流流線関数が求まる. この流線 関数より電流分布を求め、さらにこの電流分布から地 磁気変動を計算することができる。ここに示す結果で は大気の電気伝導度はウォルフ黒点数50を仮定し Internationa Reference Ionosphere 1990 を利用して 求め、地球磁場は磁気緯度と地理的緯度は一致すると 仮定したダイポール磁場を用いる.大循環モデルを10 月1日の条件のもとに積分し定常的状態に達した後の 10日間のデータを2時間ごとにサンプリングし、高度 92 km~160 km の風を使用して 2 時間ごとに電流系 および地磁気変動を求める。ただし大循環モデルには in situ tide が含まれていないので、負の基本モード (1,-1)に属する日々変動しない1日潮汐振動中性 大気風系を大循環モデルの結果に加えて計算を行って いる.

2.4 電流系分布と地磁気変動

大循環モデルでシミュレートされた10日平均の太陽 に同期して西進する1日潮と半日潮の振幅の緯度高度



diurnal tide. (b) Migrating semidiurnal tide. 単位は ms⁻¹.

(a) AMPLITUDE OF MIGRATING DIURNAL TIDE ZONAL WIND (M/S)

(b) AMPLITUDE OF MIGRATING SEMI-DIURNAL TIDE ZONAL WIND (M/S) 分布を第4図a, bに示す。これによると中間圏界面 から下部熱圏にかけては1日潮汐が、また110km以 上の高度では半日潮汐が卓越していることがわかる。 各地点での風系は、この潮汐振動成分に non-migrating tide(太陽に同期して西進しない波数成分を持つ潮 汐)や一般風、さらには重力波やプラネタリー波など の波動が加わって変動する.その一例として、日本近 傍のグリッド点(北緯36度,東経135度,高度約100 km) での東西風成分の10日平均からのずれを第5図に示 す. これによれば他の周期成分に比較して1日・半日 周期の成分が卓越していることは明らかであるが、そ の振幅は決して一様ではなく日々変動していることが わかる.この変動の原因は定かではないが、励起源で ある対流圏での水蒸気分布の変動(このモデルでは潮 汐波動のもう一つの主な励起源であるオゾンの分布は 固定している),凝結熱分布の変動,伝播媒質である途 中の大気の平均場の変動、内部重力波やプラネタリー 波との相互作用に伴う変動等が考えられる、潮汐振動 の日々変動は観測でもよく知られており今後その原因 を解明していく必要がある。

このような風系の変動が全て直接電流系に反映する わけではなく、ダイナモ領域での高度平均値が電流系 に寄与するので、この領域の厚さに対して相対的に大 きな鉛直スケールを持つ風系の寄与が大きくなる、大 循環モデルの風系から求められた電流系の例として9 日目の 23.5UT における電流流線関数分布を第6 図に 示す、太陽が南中する経度の緯度35度付近に電流系の 中心点が位置し、北半球で半時計回り南半球で時計回 りの分布を示しており、基本的性質は第2図と一致し ていることがわかる。さらに、10日間にわたる 23.5UT での電流系から求めた磁場の北緯19.4度における東向 き成分の経度分布を第7図に示す。磁場変動は基本的 には午前側で東向き午後側で西向きで夜間には殆ど零 であり, 第1図に示した例と定性的に一致している. この磁場変動は毎日同じ変動を繰り返すのではなく 日々変動が明らかに存在している。振幅は 28nT ~38nTの間で変動し、また経度分布も夜明け付近や 午前中の経度帯でディップを示す日もある、この様な 日々変動は、変動のパターンは同じではないが第1図 の例でも観測されている。また、第8図は1日目の15. 5UT から3日目の 13.5UT までの2日間の電流系の 中心点の移動を2時間毎に示したもので, 第3図の例 に示されたような中心点の日々変動も存在しているこ とがわかる.

14



の東西風変動(10日平均値からの偏差). 単位は ms⁻¹. 横軸は初日からの時刻 (hour).



第 6 図 9 日日の 23.501 におりる 電流流線 () 数 の緯度経度分布:北半球は反時計回り, 南半球は時計回り.等値線間隔は20,000 A.

このモデルでは地球電磁気的環境(電気伝導度・地 球のダイポール磁場)および in situ tide は日々変動 しないように設定しているので,現れた日々変動は全 て中性風系の変動によるものである.たとえ地球電磁 気的環境および in situ tide が定常的であっても,中 性大気風系の日々変動によって,電流系および地磁気 の Sq に無視できない大きさの日々変動を生じうるこ とが示されたわけである.中性大気風系の変動には潮 汐波動の変動だけではなく様々な気象学的要素の変動

"天気"43.7.

459

LONGITUDINAL DISTRIBUTION OF B



第7図 北緯19.4度での磁場東向き成分の経度分布. 横軸は各日における経度(0度 ~360度)を示す. 縦軸は磁場の強さ.単位はT.



15.5UT~2日目 13.5UT, (△) 2日目 1 5UT~3日目 13.5UT.

が係わっていると考えられる 実際の地磁気観測デー タの日々変動の解析によると夏期には2日周期の変動 成分が卓越している場合があることが知られており, 中間圏上部から下部熱圏にかけての夏半球にグローバ ルに存在する2-day wave との関係を示唆した研究も 発表されている (Ito *et al.*, 1986). Sq の変動に対する 気象学(中層大気力学)の面からの更なる研究が望ま れる.

3. プラネタリー波と地磁気長周期変動

前章で地磁気 Sq の日々変動と中性大気運動の関係 について述べたが、この章では地磁気変動の長周期成 分(1週間〜数週間)の卓越周期と中層大気中のプラ ネタリー波の関係について、最近のいくつかの研究結 果について紹介する.

3.1 地磁気変動の長周期成分と 16-day wave

第9図はペルーのホアンカヨで観測された地磁気水 平成分の変動を1979年の1年間について1時間毎にプ ロットしたものであり、右下には最初の60日間が拡大 図で示してある (Forbes and Leveroni, 1992). 地磁気 は明瞭な日変化を示しており、正午頃に北向き成分が 最大となりその振幅は100nT以上に達している.これ は前章で述べた Sq と同様な現象であるが、ホアンカ ヨが磁気赤道直下に位置するため赤道エレクトロ ジェットの効果で Sq よりは大きな振幅を示している (Forbes, 1981). ここで注目したいのはその日変動が 一定ではなく変動を示している点である.最初の128日 間についてのパワースペクトル(2日以上の周期)が 第10図に示されているが,顕著な周期成分として34日, および16日付近にピークが存在していることがわか る。またここでは図に示さないが、正午の磁場のみに ついてのパワースペクトル (第9図拡大図の上側エン ベロープのスペクトル)は、16日周期が卓越し34日周 期成分の約2倍の大きさを持っている。彼らは34日成





分については 10.7 cm 太陽電波の解析との比較によ り、太陽の自転の影響と結論している。一方16日成分 については地球外にその原因を求めることは難しく、 約16日の周期を持つ中層大気のノーマルモードプラネ タリー波 (16-day wave) との関連を示唆し、それが ダイナモ領域で 10 ms⁻¹ 程度の風速振幅を持てば観測 される程度の地磁気の振幅変動が説明できるとしてい る。因みに、1979年1月は特に強い 16-day wave が 対流圏から中層大気にかけて生じたことが知られてい る (例えば Wu and Miyahara, 1988).

この研究に触発されて Kohsiek *et al.* (1995) は, 北緯50度付近に分布する長期間の地磁気観測連続デー タが得られる 8 地点について10年間のデータを用い て,地磁気変動の長周期成分と 16-day wave の関連 について調べた. 第11図はその中の1地点フュルステ ンフェルドブルック(北緯48.17度,東経11.28度)で のパワースペクトルを示したものである.27日,13.5 日,9日付近に顕著なピークがみられるが,彼らの解 析によるとこれは太陽の自転による変動とその倍振動 成分である.それとは独立に18日と10日付近にピーク がみられるが,彼らはこれが中層大気の16-day wave や10-day wave と関連があり得るとの観点から,特 に16-day wave と関連について議論を行っている. 第12図は1979年の最初の128日間についてフュルステ ンフェルドブルックでのパワースペクトルを示したも ので,32日のピークは太陽の自転の影響と考えられる が,16日付近に16-day wave と関連するかも知れな いピークが見える.両者の関連を調べるためフュルス テンフェルドブルックとその他の観測点での地磁気変 動の位相差を16日周期成分について調べ、16日周期で

"天気"43.7.

1. 中層大気力学ー中性大気から電離大気へー





第12図 フュルステンフェルドブルックでの磁場東向き成分変動(1979年の 最初の128日間)のパワースペクトル (Kohsiek *et al.*, 1995 より 引用).

西進する東西波数1の波の位相(直線,16-day wave に対応)と比較したのが第13図である(顕著なピーク はみられない18.29日と14.22日成分についても参考に 示してある) この図によると16-day wave とは反対 に地磁気変動は東進しているようにみえる。しかし,± 135度付近の地点(MMB, VIC, MEA, NEW)では位 相が180度付近に位置しており、位相の取り方(-180~+180ではなく0~360度に取る)によっては西進 しているようにもみえる図を作ることも可能であり、 観測地点数が少ないこの解析のみからでは確かな結論 は導けない。

短期間ではなく1980年から1982年の長期間にわたる

17



462

クとの経度差.(◇)は18.29日と14.22日 周期成分について示してある. 直線は東 西波数1の西進波の位相を示す.(Kohsiek *et al.*, 1995 より引用).

フュルステンフェルドブルックでの地磁気変動の16日 周期成分振幅変動と、1hPa 高度での16-day wave に 伴うジオポテンシャルの振幅変動を比較した例が第14 図に示されている.これによれば両者は同程度の時間 スケールで変動しているが、必ずしも常に高い相関を もっているとはいえない.また、同じ北半球側の16day wave の振幅変動ではなく、南半球側に16-day wave が現れた場合との相関が良い場合もみられる.

ここに紹介した研究結果によると、地磁気変動成分 中には中層大気中の 16-day wave 周期帯に相当する 付近に有意なスペクトルのピークが存在することは確 かであるが、両者の間に因果関係があることを示すま でには至っていない.両者の関係を明らかにするため には、中層大気中にその存在が知られている 16-day wave がダイナモ領域でもその電流系に影響を与える ほどに充分な振幅を保っているか否かを観測すること がまず重要であろう.100 km以下の高度領域ではプラ ネタリー波の時間スケールを持つ変動がレーダーによ り直接観測されており(例えば Forbes et al., 1995; Ito et al., 1984; Tsuda et al., 1988; Williams and Avery, 1992). 少なくとも 100 km 付近まではプラネ タリー波がおよんでいることが確認されている。流星 レーダーなどによりドップラー効果を利用して風速測 定が可能な約 100 km 以下の領域に比べて, Incoherent Scatter レーダーを必要とするダイナモ領域での 風速観測例は少なく、平均風や潮汐成分が卓越してい ることは知られているが、ここで対象としている周期 帯に有意な成分が分布するかどうかについては詳しく

調べられていない(例えば Oliver *et al.*, 1988). 今後 のダイナモ領域での中性風速観測の発展が大いに望ま れる.

3.2 プラネタリー波の下部熱圏伝播シミュレー ション

前節で述べたようにプラネタリー波と地磁気変動の 関連について議論するためには、ダイナモ領域でプラ ネタリー波が有意な振幅を持つか否かを知ることが重 要である.そこで数値モデルによるプラネタリー波シ ミュレーションによりダイナモ領域におけるプラネタ リー波の振幅を調べた研究をここでは紹介することに しよう

下部熱圏まで含んだ数値モデルによるノーマルモー ドプラネタリー波の研究には Salby(1981 a, b), Wu and Miyahara (1988) などがあるが, これらのモデル は成層圏中間圏をその対象としており, 下部熱圏はス ポンジ層として含まれているにすぎない. 下部熱圏で のノーマルモードプラネタリー波の構造の研究は最近 始められたにすぎない (例えば Hagan *et al.*, 1993; Forbes *et al.*, 1995). 前者は 2-day wave, 後者は 16day wave の下部熱圏での構造を調べた研究である が, ここでは当面の話題と関係する後者について紹介 する.

16-day wave の構造は平均東西風の影響を大きく 受けるので,この研究では第15図に示されている4種 の異なる平均東西流中での16-day wave の構造につ いて調べている.これらの風系は高度 30 km までは ECMWF の値を,それより上空では MSISE90 (Hedin, 1991).の温度場を用いて高度 80 kmまで地衡 風近似で求めたもの(a),(a)の風系をベースとし て Smith (1985)の風系で補正したもの(b),(b) の風系で高度 108 km まで地衡風近似で求めたもの (c),およびそれにレーダー観測によって得られた情 報 (Portnyagin, 1986)を加えたもの(d)である.こ れらの中では(d)が下部熱圏での実際の風系を最も よく反映していると考えられる.

モデルの最下端で緯度によらない一様な西進する東 西波数1の上昇流を与え、周波数に対する大気の応答 を調べると12~20日周期に緩やかなピークが存在する ことがわかる.この周期の範囲では波の構造に顕著な 変化は見られないので、各風系において周期16日の強 制を与えた場合の構造を共鳴した 16-day wave と考 え、そのジオポテンシャルハイトの振幅が第16図に示 されている.ただし振幅には任意性があるので、この



1995 より引用)

図では最大振幅が1979年1月に観測された 16-day wave の最大振幅 1100 m と一致するように規格化さ れている. この結果によると成層圏中間圏での構造が 風系に大きく依存していることがわかるが,それと同 時に今対象としている下部熱圏での構造も風系により 大きく変化していることがわかる. 成層圏中間圏で16 -day wave が卓越する冬半球側(第15図で西風が成層 圏中間圏に存在する半球)の下部熱圏に波動がおよん でいる以外に,夏半球側の下部熱圏にも振幅がみられ る. これは 80~100 km の高度域に存在する西風又は 弱い東風領域をダクトとして赤道を越えて冬半球側か ら伝播^{#2)}してきたもので,特に西風が両半球にわった て続いている(c)の場合には大きな振幅がみられる. 最もよく現実の平均東西風分布を反映していると考え て良い(d)の場合にも夏半球側への伝播がみられる. この様な夏側での 16-day wave の存在はアラスカに

^{*2) 16-}day wave は自由振動であり外部波的構造を持つ ので伝播の概念は不適当と考えられるかも知れない が、平均流が存在し散逸も存在する現実的大気では位 相構造を持ち、内部波的振る舞いをすることが知られ ている(Wu and Miyahara, 1988).



り引用).

おけるレーダーでも観測されており,0~30 km の高度 では1月に16-day wave 成分が卓越するのに対して, 80~100 km の高度では7~8月に卓越することが報 告されている(Williams and Avery, 1992).前節に紹 介した地磁気の16日周期の振幅変動が逆の半球側の 1hPa のジオポテンシャルハイトと相関があるように みえるのも全く荒唐無稽な話ではなく,この様な現象 が関与している可能性もあることを指摘しておきた い.

図には示していないが,これに伴う下部熱圏での風 速擾乱は最大で5ms⁻¹程であり,ダイナモ電流に充分 な影響を与えうる大きさには達していない.このシ ミュレーションでは散逸機構としては分子粘性・分子 熱伝導・イオン抗力・鉛直の渦拡散が考慮されている が,内部重力波によるストレスが波を弱めるように働 くと仮定してレーリー摩擦を加えた結果では,風速は さらに弱まっている.この結果からこの論文では,地 磁気変動の16日成分は 16-day wave が直接ダイナモ 領域にまで伝播して影響を与えるのではなく,潮汐波 や内部重力波がダイナモ領域へ伝播する過程で 16day wave と相互作用し、その結果ダイナモ領域の中 性風が 16-day wave により間接的に影響を受け、そ れが地磁気の変動に現れる可能性を示唆している。

このシミュレーションの結果では、16-day wave は ダイナモ領域で直接地磁気変動に有意な変動を与える ほどの振幅は持たないことが示された.しかしながら 平均東西風の下部熱圏の構造は観測的にも不明な点が 多く、このモデルで仮定した風速分布も必ずしも現実 を反映していない.特に 110 km より高々度の領域の ではほぼ静止大気が仮定されているが、16-day wave の構造は平均風速分布に大きく依存するので、この高 度領域での実際の分布を与えた場合には結果も大きく 異なると考えられる.また、内部重力波がプラネタリー 波に与える効果についても必ずしも散逸として働くと は限らず、逆に増幅する場合もあり得る.それ故、こ のシミュレーションのみでは 16-day wave のダイナ モ領域への直接伝播が否定されたとは必ずしもいえな い、また、潮汐波・プラネタリー波・内部重力波の相



第16図 図15の平均東西風中での 16-day wave のジオポテンシャルハイト(単位はm)の緯度高度分布.最大値は 1100 m に規格化してある.(等値線間隔は 200 m)(Forbes et al., 1995 より引用).

互作用についても理論観測の両面で幾つかの研究が発 表されているに過ぎない段階であり(例えば Manson *et al.*, 1982; Teitelbaum and Vial, 1991; Miyahara and Forbes, 1994), 詳しいことは今後の研究を待たね ばならない.

4. おわりに

この小論では中層大気力学に関する分野で今後研究 すべき課題の一つとして、中性大気風系が地磁気変動 に及ぼす影響について取り上げ、最近の幾つかの研究 を紹介した.現象が地磁気に関することでもあり、こ の現象は気象分野の中層大気力学研究者の注目を集め ることはこれまであまりなく、地球電磁気学の側から 中層大気力学に興味を持つ人々により研究が行われて きた.しかしながら、今まで述べてきたようにこの現 象には、プラネタリー波・内部重力波・潮汐波など気 象学になじみ深い波動が大きく関わっている.気象学 の立場からすればこれらの波動が下部熱圏までおよん でいるか否かはこれまであまり気にせず、その領域は 研究対象外と見なす傾向があった.しかし下部熱圏と いえども大気は大部分中性であり,まだまだ中性大気 力学が支配する世界と言って良いであろう.成層圏・ 中間圏を伝播した波動が下部熱圏に達するまでにどの 様な振る舞いをし相互に影響を及ぼしあい平均場に影 響を与えているかの解明は,まさに中層大気力学がこ れまで対象としてきた課題の延長線上に存在してい る.現象が地磁気変動として観測されるので気象学と はかけ離れた印象を与えるが,実は地磁気変動は中性 大気運動の結果生じているのであり,そこに電磁気学 的要因は介在しているがまさに中層大気力学が解決し なければならない問題の一つのである.この問題を成 層圏・中間圏・下部熱圏を含んだひとつの中層大気中 の波動の振る舞いとエネルギー・運動量輸送の問題の 一側面として捉え考えていく必要がある.

謝辞

本稿は、平成7年5月19日に東京大学先端科学技術 研究センター講堂で開催された、東京大学気候システ ム研究センター主催のワークショップでの講演を基礎 に執筆したものです.講演の機会を作って下さった東 京大学気候システム研究センター長の住明正氏に感謝 いたします.

Sq についてご教示いただきました京都大学名誉教 授加藤進先生にこの場を借りてお礼申し上げます。

磁場観測データを提供いただき,地球電磁気学について教えていただいた九州大学理学部助教授坂翁介氏 に感謝いたします.

本稿第2章で紹介した研究は、九州大学大学院理学 研究科物理学専攻の大石正純君の修士論文によるもの です.

参考文献

- Andrews, D. G., J. R. Holton, and C. B. Leovy, 1987 : Middle Atmosphere Dynamics, Academic Press.
- Chapman, S. and J. Bartels, 1940 : Geomagnetism, Vols. I and II, Clarendon Press, Oxford.
- Chapman, S. and R. S. Lindzen, 1970 : Atmospheric Tides, Reidel, Dordrecht, Netherlands.
- Chou, M. -D., D. P. Kratz, and W. Ridgway, 1991: Infrared radiation paramererizations in numerical climate models, J. Climate, **4**, 424-437.
- Forbes, J. M., 1981 : The Equatorial Electrojet, Rev. Geophys. Space Phys., **19**, 469–504.
- Forbes, J. M., M. E. Hagan, S. Miyahara, F. Vial, A. H. Manson, C. E. Meek, and Y. I. Portnyagin, 1995: Quasi 16-day oscillation in the mesosphere and lower thermosphere, J. Geophys. Res., 100, 9149 -9163.
- Forbes, J. M. and S. Leveroni, 1992: Quasi 16-day oscillation in the ionosphere, Geophys. Res. Lett., 19, 981-984.
- Forbes, J. M. and R. S. Lindzen, 1976a : Atmospheric solar tides and their electrodynamic effects, I, The global Sq current system, J. Atmos. Terr. Phys., 38, 897-910.
- Forbes, J. M. and R. S. Lindzen, 1976b : Atmospheric solar tides and their electrodynamic effects, II, The equatorial electrojet, J. Atmos. Terr. Phys., **38**, 911 -920.
- Hagan, M. E., J. M. Forbes, and F. Vial, 1993: Numerical investigation of the propagation of the quasi-2-day wave into the lower thermosphere, J. Geophys. Res., 98, 23, 193-23, 205.
- Hasegawa, M., 1936 : On the progressive change of the field of diurnal variations, Proc. Imp. Acad.

Tokyo, 12, 277-280.

- Hedin, A., 1991 : Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere, J. Geophys. Res., 96, 1159-1172.
- Ito, R., S. Kato, and T. Tsuda, 1986 : Consideration of an ionospheric wind dynamo driven by a planetary wave with a two-day period, J. Atmos. Terr. Phys., 48, 1-13.
- Kato, S., 1956 : Horizontal wind systems in the ionospheric E region deduced from the dynamo theory of geomagnetic Sq variation, part II, J. Geomagnet. Geoelec., 8, 24-37.
- Kato, S., 1966 : Diurnal atmospheric oscillation, I, eigenvalues and Hough functions, J. Geophys. Res., **71**, 3201-3209.
- Kato, S., 1980 : Dynamics of The Upper Atmosphere, Reidel, Dordrecht, Netherlands.
- Kohsiek, A., K. H. Glassmeier, T. Hirooka, 1995: Periods of planetary waves in geomagnetic variations, Ann. Geophys., 13, 168-176.
- Manson, A. H., C. E. Meek, J. B. Gregory, and D. K. Chakrabarty, 1982 : Fluctuations in tidal (24-, 12-h) characteristics and oscillations (8-h-5-d) in the mesosphere and lower thermosphere (70-110 km) : Saskatoon (52°N, 107°W), 1979-1981., Planet. Space Sci., 30, 1283-1294.
- Matsushita, S., 1969 : Dynamo currents, winds, and electric fields, Radio Sci., 4, 771-780.
- Miyahara, S., and J. M. Forbes, 1994 : Interactions between diurnal tides and gravity waves in the lower thermosphere, J. Atmos. Terr. Phys., **56**, 1365 -1373.
- 永田 武・等松 隆夫,1973:超高層大気の物理学,裳
 華房
- Oliver, W. L., D. Alcaydé, and P. Bauer, 1988: Incoherent Scatter radar contributions, Chapter 4, COSPAR International Reference Atmosphere: 1986, Part I: Thermosphere Models, Adv. Space Res., 8, 119-147.
- Portnyagin, Y. I., 1986 : The climatic wind regime in the lower thermosphere from meteor radar observations, J. Atmos, Terr. Phys., 48, 1099-1109.
- Salby, M. L., 1981a : Rossby normal modes in nonuniform background configurations, I, Simple fields, J. Atmos. Sci., 38, 1803-1826.
- Salby, M. L., 1981b: Rossby normal modes in nonuniform background configurations, II, Equinox and solstice conditions, J. Atmos. Sci., **38**, 1827 -1840.

- Smith, A. K., 1985 : Wave transience and wave-mean flow interaction caused by the interference of stationary and traveling waves, J. Atmos. Sci., **42**, 529 -535.
- Teitelbaum, H., and F. Vial, 1991: On tidal variability induced by non-linear interaction with planetary waves, J. Geophys. Res., **96**, 14, 169-14, 178.
- Tsuda, T., S. Kato, and R. A. Vincent, 1988 : Long period wind oscillations observed by the Kyoto meteor radar and comparison of the quasi-2 day

wave with Adelaide HF radar observations, J. Atmos. Terr. Phys., 50, 225-230.

- Williams, C. R., and S. K. Avery, 1992 : Analysis of long-period waves using the mesosphere- stratosphere-troposphere radar at Poker Flat, Alaska, J. Geophys. Res., 97, 20, 855-20, 861.
- Wu, D.-H., and S. Miyahara, 1988 : On the structure and behavior of transient waves during January 1979, J. Meteor. Soc. Japan, 66, 247-260.



第46回科学講演会開催案内

- 主催 財団法人東レ科学振興会
- と き 平成8年10月9日(水)
 開場:17時30分
 開演:18時00分 終演:20時45分
- ところ 有楽町朝日ホール 東京都千代田区有楽町2-5-1 有楽町マリオン11階(JR 有楽町駅前)
- テーマ "ポリマーサイエンスの新潮流"
 - 1. 先端高分子材料の新展開 東京大学教授 西 敏夫

II. 高分子材料の分子設計

東京大学名誉教授

東京理科大学教授 井上祥平

その他 入場無料・予約なし・先着順(定員638名) ご来聴の方には,後日講演記録を進呈致しま す。

問い合わせ先財団法人東レ科学振興会

千葉県浦安市美浜一丁目8番1号(東レビ ル)

Tel 0473-50-6103 Fax 0473-50-6082