

108:12 (中性大気風; Sq; 赤道エレクトロジェット)

5. 大気圏電離圏カップリング

—電離圏電流変動と中性大気変動を中心として—

宮原 三郎*

1. 中層大気と電離圏

中層大気とは高度約10km~110kmの成層圏・中間圏・下部熱圏の大気領域を指し、高度約70kmより上の領域では大気の電離も次第に顕著となり、D領域およびE領域の一部を構成している。しかしながら基本的には中層大気は中性大気として取り扱われ、気象学の一つの重要な研究対象領域とされてきた（例えば、Andrews *et al.* 1987）。他方、大気の電子密度が比較的高い高度約70km~500kmの電離圏は超高層物理学（Aeronomy）の対象として研究がなされてきた（例えば、永田・等松 1973; Tohmatsu 1990）。中層大気研究と超高層物理学の研究は、独立に行われてきた

わけではなく、我が国では両分野の研究者による研究会が40年以上前から開催されており、今日の大気圏シンポジウムへとつながっている。また、1980年代に行われた Middle Atmosphere Program (MAP) は、両分野の研究を国際的に大きく進展させるきっかけとなった。参考までに第1図に、中層大気および電離圏を含む地球大気温度の平均構造と大気領域の名称を記す。

中性大気と電離圏大気の結合過程に深く関わっている大気運動としてよく知られているものに大気潮汐運動がある。この関連で古くから研究されているテーマに、E領域に流れるSq電流系や赤道エレクトロジェット (equatorial electrojet, EEJ) がある（例えば、Kato 1956, 1966; Tarpley 1970; Forbes and Lindzen 1976a, b)。

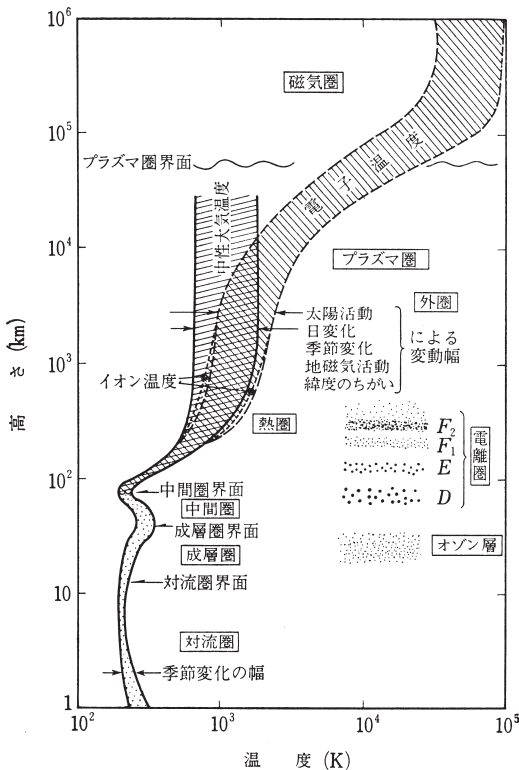
* 九州大学大学院理学研究院。

© 2012 日本気象学会

中性大気と電離大気の現象を包括的に捉えその全貌を明らかにすることを目的として、地表からF領域までを表現できる大気大循環モデルが近年我が国で開発され、下層から伝播した潮汐波、赤道波、重力波などが電離圏の現象に重要な影響を与えていることも明らかにされつつある (Miyoshi and Fujiwara 2003, 2006a, b, 2008; Miyoshi *et al.* 2009; Fujiwara and Miyoshi 2006, 2009, 2010).

また、最近話題となっている現象として、電離圏の大気構造の経度分布がローカルタイムを固定してみた場合に明瞭な東西波数4を持つ現象 (wave-4) がある。この現象にも、大気潮汐運動やE領域ダイナモが関わっていることが示唆されている (例えば, Forbes *et al.* 2006, 2008, 2009; Jin *et al.* 2008).

本講演では古くから研究が行われているSqやEEJについて中性大気との関わりからの観点から、我々の研究グループの研究結果を中心として紹介する。



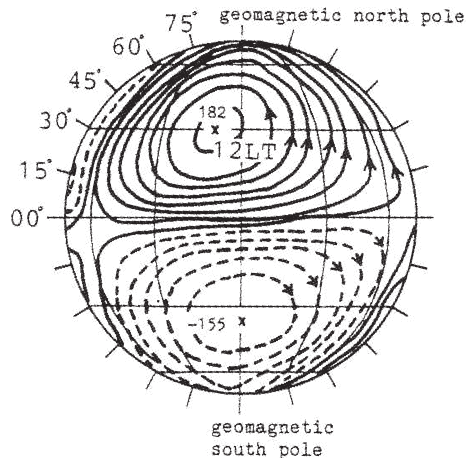
第1図 地球大気平均温度の鉛直分布と大気領域の名称 (永田・等松 1973).

2. Sq および EEJ とそれを誘起する中性風

太陽活動が静穏な日には規則的な地磁気変動が観測される。この地磁気変動は Solar quiet variation (Sq) と呼ばれている。Sq 地磁気変動を引き起こす E 領域に流れるダイナモ電流の等価電流系の一例を第2図に示す。

Sq 電流系は昼半球に存在し、北半球では反時計回り、南半球では時計回りであり E 領域にこのような電流が存在することはロケット観測でも確かめられている。Sq 変動からそれを誘起すると考えられる E 領域での中性風が求められており (Kato 1956), この中性風分布は、Kato (1966) により求められた太陽潮汐 (1, -1) モードの風系に酷似している。(1, -1) モードの風系を仮定して2次元ダイナモモデルにより計算されたSq等価電流系は、基本的にSq等価電流系を再現できる (例えば, Tarpley 1970)。しかしながら、2次元ダイナモモデルによる等価電流系では、昼間に磁気赤道近傍に流れる大きなEEJは説明できない。これを説明するためには、磁気赤道近傍でのホール電流の効果をより正確に取り入れた3次元モデル計算が必要である (例えば, Takeda and Maeda 1980)。

Sq や EEJ には、太陽活動度依存性、季節変動や日々変動が存在することが知られている (例えば, Yamazaki *et al.* 2010)。本稿は、Sq や EEJ の日々



第2図 Sq 変動の等価電流系。渦電流の中心に示されている数値は電流の強さを表しており、単位は1,000A (Matsushita 1965)。Tohmatsu (1990) より引用。

変動と中性大気風変動の関係について、九州大学中層大気大循環モデル (Kyushu-GCM) によりシミュレートされた中性風と準3次元ダイナモモデルを用いた研究結果に基づいて紹介し、観測結果との簡単な比較を行う。

3. モデル概要とシミュレーション結果・考察

中性大気風により電離圏に誘起されるダイナモ電流 \mathbf{J} は、導電率テンソル σ 、地球主磁場 \mathbf{B} 、および中性大気風の水平成分 \mathbf{V} を用いて、次式で表される。

$$\mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{E} はダイナモにより誘起される静電場であり、静電ポテンシャル ϕ により、次式で表される。

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi \quad (2)$$

ここで、電流は非発散条件、

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (3)$$

を満たす。(1)、(2) を (3) に代入し、整理すると従属変数 ϕ についての楕円型3次元微分方程式

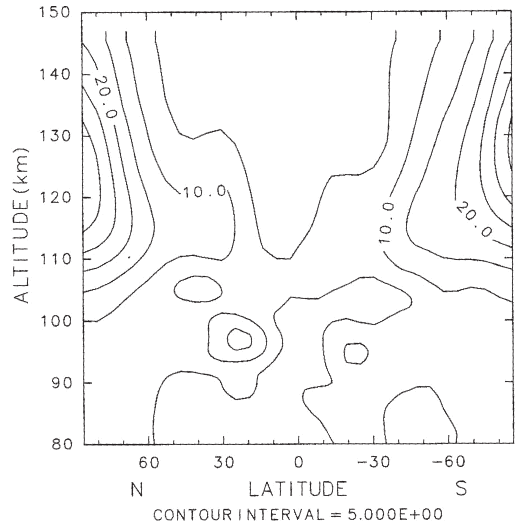
$$L\phi = \rho \quad (4)$$

が得られる。ここで L は楕円型の3次元2階微分演算子、非斉次項 ρ は中性大気風、地球主磁場、中性大気風、導電率テンソルの既知関数である。数学的には、(4)を適切な境界条件の下に境界値問題として解けば、静電ポテンシャルが得られ、(2)、(1)により静電場および電流が得られる。しかしながら、導電率テンソルは極端な異方性を持ち、全球的にこの境界値問題を3次元的に解くことに成功した例は未だない。そこで、主磁場の磁力線方向

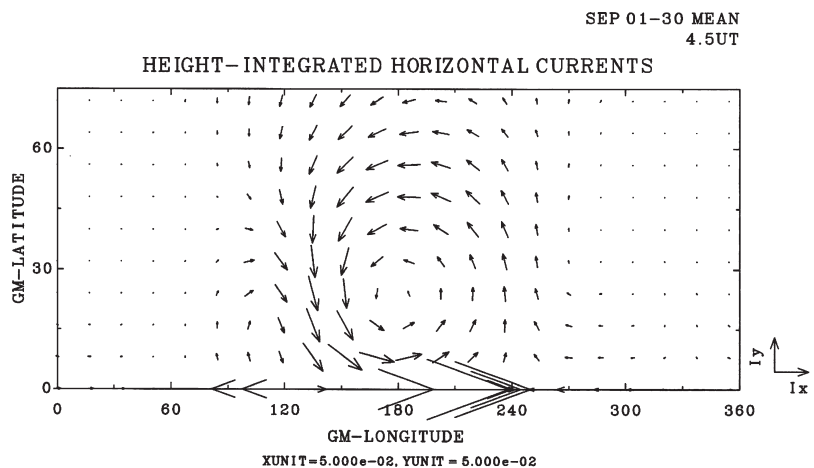
の伝導率が極端に大きい異方性を利用して、磁力線に沿って静電ポテンシャルが等電位であると仮定して問題を準3次元境界値問題に還元して解く手法が用いられている (例えば、Takeda and Maeda 1980; Richmond and Roble 1987)。

我々のダイナモモデルは Takeda and Maeda (1980) の準3次元モデルを使用し、既知として与える中性大気風は、高度領域 0 km~145 km を対象としたKyushu-

GCM のシミュレーション結果を使用している。ダイナモモデルは地磁気座標に準拠した南北対称モデルであり、用いる風系もこの座標系での南北対称風成分のみを用いている。モデルの高度領域は90km~400kmであり、高度145km以上の中性大気風は、高度140kmでの値と同じものを使用している。境界条件は下部境界で鉛直電流 = 0、上部境界では沿磁力線電流 = 0 を



第3図 Migrating diurnal tideに伴う東西風振幅の緯度高度分布。等値線間隔は 5 ms^{-1} (KSM 2008)。



第4図 1ヶ月平均の高度積分電流の磁気経度緯度分布。ユニットベクトルの大きさは、 0.05 Am^{-1} (KSM 2008)。

課している。シミュレーションは9月の30日間について、毎日4.5UTCの時刻について実行されている。モデルの詳細およびシミュレーション結果の詳細は Kawano-Sasaki and Miyahara (2008, 以下 KSM と略記) を参照されたい。

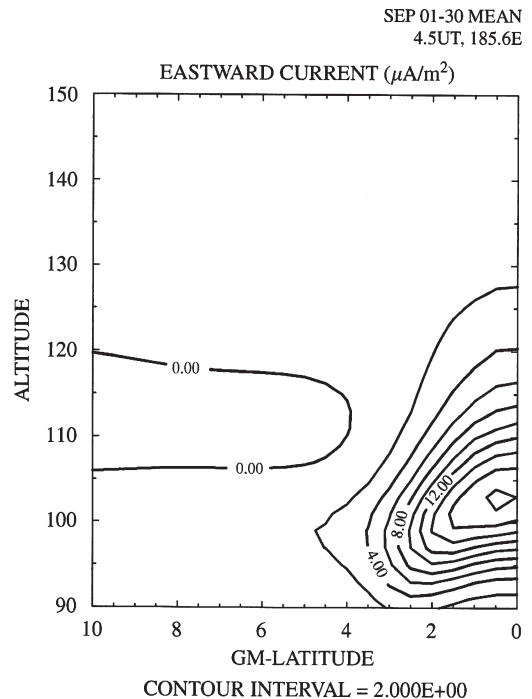
第3図は Kyushu-GCM の9月の1ヶ月平均の migrating diurnal tide の東西風振幅の緯度高度分布を示しており、高度120km~130km付近を中心とした高緯度に 30ms^{-1} を超える振幅がみられる。これは(1, -1)モードに伴う風系である。また、高度95km, 25°Nと25°S付近に別の振幅の大きな箇所がみられる。これは成層圏・中間圏を通して伝播してきた(1, 1)モードに伴う風系である。ダイナモシミュレーションに用いた風系は、第3図に示した風のみではなく、東西波数0~4の全てのタイムスケールの風系の南北対称成分であり、migrating diurnal tide, migrating semidiurnal tide, non-migrating diurnal tide, non-migrating semidiurnal tideなどが含まれている。

第4図は、高度積分した1ヶ月平均の水平電流の磁気経度緯度分布を示しており、第2図に示した等価電流と同様な反時計回りの電流と磁気赤道付近の強い東向き電流 (EEJ) が再現されていることがわかる。第5図は磁気経度185°付近における1ヶ月平均の東向き電流の磁気緯度高度分布を示しており、EEJが高度105km, 磁気緯度3°以内に集中していることを示しており、若干電流が強いことを除いては観測や他のモデル計算と一致している (例えば, Davis *et al.* 1967; Richmond 1973; Anandarao and Raghavarao 1987)。

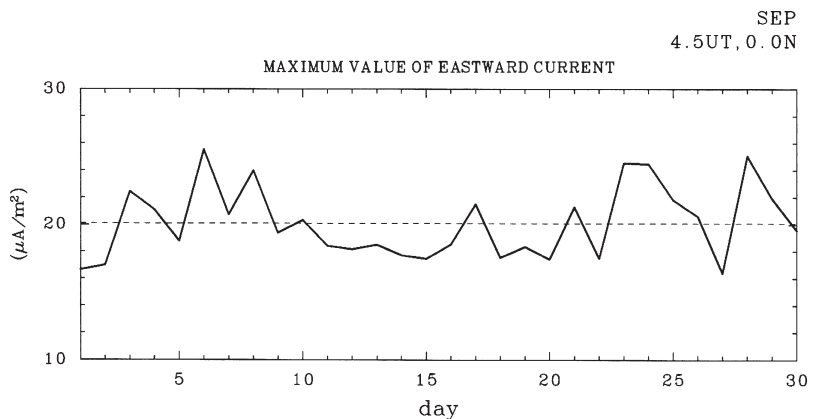
以上は、1ヶ月平均値の風系を用いた結果であるが、風系はGCMシミュレーションによるものであり、日々の風系を用いてシミュレーションを実行することが可能である。導電率テンソルには月平均の4.5UTCの値を用い、風系のみ30日間の毎日の4.5UTCの値を用いてシミュレーションを実行し、中性風の変動によりSqやEEJがどの程度の変動を示すか

を調べた。

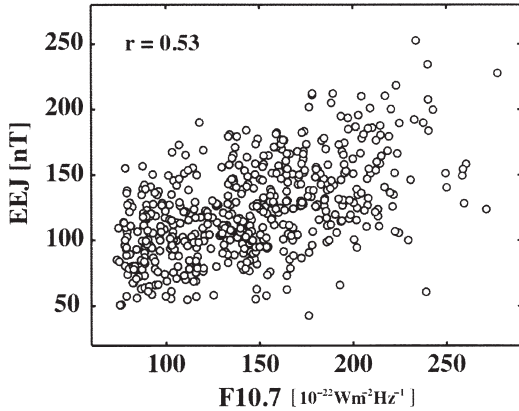
第6図にEEJの最大値の日々変動を示す。月平均値は $20\mu\text{Am}^{-2}$ であり、その変動は $\pm 5\mu\text{Am}^{-2}$ 程度の範囲で起こっており、絶対値に対して50%程度の変動幅を持つことが分かる。第7図には Yamazaki *et al.* (2010) により得られたEEJ強度の太陽活動度



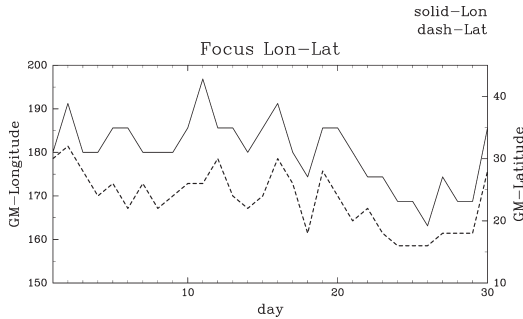
第5図 磁気経度185°付近における1ヶ月平均の東向き電流の磁気緯度高度分布. 等値線間隔は $2.0\mu\text{Am}^{-2}$ (KSM 2008).



第6図 EEJの最大値の日々変動. 単位は μAm^{-2} (KSM 2008).



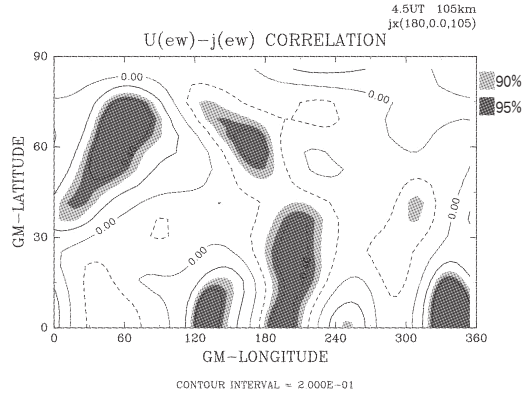
第7図 EEJの強度(単位はnT)と太陽活動度(F10.7)の相関図(Yamazaki *et al.* 2010).



第8図 シミュレーションにより得られたSqの中心緯度経度の日々変動。実線は経度変動、点線は緯度変動を表示。

(F10.7) 依存性が示されている。F10.7の増大に伴ってEEJが増加する傾向がみられる。ある一定のF10.7についてもみられるEEJの変動は主に季節変動や日々変動に起因すると考えられており(Yamazaki *et al.* 2010), その変動幅は、平均値の大きさに匹敵している。我々のシミュレーション結果は、中性風変動によるEEJ変動幅は50%程度であり、観測されるEEJの変動の半分程度の大きさは、中性風の日々変動によって説明される可能性があることを示唆している。

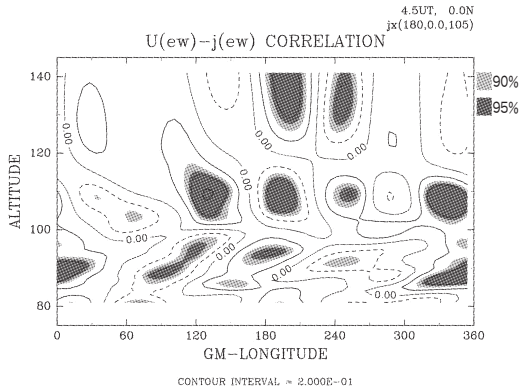
第8図にシミュレーションで得られたSq中心緯度経度(第4図の回転的な電流の中心)の日変化を示す。緯度変化は10数度、経度変化は30度程度の範囲内で変動することが分かる。観測によるとSqの中心緯度および中心地方時(LT)は季節変化を示してい



第9図 磁気赤道上の高度105km, 磁気経度180°におけるEEJと4.5UTCにおける高度105kmの東西風の相関。

る。中心緯度は、南半球では緯度30度より高緯度側に、北半球では低緯度側に分布している。また、中心地方時は4月から10月にかけて北半球では午前側に南半球では午後側に分布している。また、日々変化による中心の分散は緯度10度程度、LTは1~1.5時間程度である(湯元・公田, 私信)。観測にみられる変動幅は、中性風変動による日々変動と同程度の変動幅を持っていることが分かる。

これまで示したように、EEJやSqの日々変動が中性風の日々変動のみでも有意な大きさで得られることが分かった。それでは、これらの変動を引き起こしている風速変動は主にどの領域の変動であろうか。この疑問への解答を得る手始めとして、EEJの変動と中性風の変動の関係についての相関解析結果を示す。第9図は磁気赤道上の高度105km, 磁気経度180度におけるEEJと4.5UTCにおける高度105kmの東西風の間の相関を30日間のデータについて解析したものである。赤道域から低緯度の磁気経度130°付近および200°付近にそれぞれ正と負の高い相関がみられる。この相関は午前中の東向きの風および午後の西向きの風がEEJを強めることを示唆している。この結果は、Sqを引き起こす主因とされる(1, -1)モードの風が赤道および低緯度で午前中では東向きおよび午後では西向きの風であること、およびSqの東向き電流の強さとEEJの強さには強い正の相関($r=0.8$)がある(Yamazaki *et al.* 2010)ことと整合的である。EEJが卓越する領域から遠く離れた領域でも高い相関がみられるが、これは電磁現象を介しての相関では



第10図 磁気赤道上の高度105km, 磁気経度180°におけるEEJと4.5UTCにおける磁気赤道上の東西風の相関。

なく、中性風のグローバル分布そのものの相関の結果現れた擬似相関であると解釈した方が物理的に妥当であると考えられるかもしれないが、解答を得るにはダイナモモデルによる数値計算で定量的解析を行う必要がある。

第10図は同じ相関の磁気赤道高度断面図である。この図でもEEJが卓越する領域から離れたところにも高い相関がみられるが、高度90kmから100kmの磁気経度90°~200°にみられる相関が物理的に意味ある相関であるか否かは簡単には判断できない。(1)~(4)で示したように、電流は与えられた中性風場で直接決まる部分と境界値問題で決定される静電場により決まる部分からなり、特にEEJは電場の効果が大きいことが知られているので、ダイナモモデルによる定量的な解析が必要である。

4. まとめ

ここに示したように、下部熱圏の中性風の日々変動に伴い、ダイナモ領域に流れる電流系も日々変動する。その変動の大きさは、観測されている変動の大きさに匹敵するものである。この結果はダイナモ領域の変動が、電磁気学的条件は変動しない場合でも、中性風の変動によって、かなりの部分が説明できる可能性を示唆している。中性風の日々変動の原因としては、対流圏や中層大気から伝播してきた、migrating tide, non-migrating tide などの変動が考えられる。また、F領域に観測されるwave-4の原因として、non-migrating tide によるダイナモ領域の電場変動の間接的

な影響や non-migrating tide が直接影響を与えること等が考察されている(例えば, Forbes *et al.* 2006, 2008, 2009; Jin *et al.* 2008)。

さらに、下層から伝播した潮汐波、赤道波、重力波などが熱圏や電離圏の現象に重要な影響を与えていることが大気大循環モデルを用いて明らかにされつつある(Miyoshi and Fujiwara 2003, 2004, 2006a, b, 2008; Miyoshi *et al.* 2009; Fujiwara and Miyoshi 2006, 2009, 2010)。

ここでは、SqやEEJ等ごく限られた現象についてのみ紹介したが、電離圏の現象は我々が想像している以上に対流圏や中層大気の現象と密接に関わっていると考えられる。これらを明らかにするためには、観測とモデルシミュレーションの両面から、また気象学と超高層物理学の両面から更に研究を進めて行く必要がある。

SqとEEJの研究で大きな成果を上げられた加藤進先生と広野求和先生は、その後、大気レーダーおよびライダーの分野で先駆的な研究を推進され、また後進の育成にも大きな功績を残され、気象学の発展に偉大な足跡を記されている。気象学の分野で育った若い研究者が超高層物理学の分野に果敢に挑戦し、将来大きな成果を上げることを期待し、この文書を締めくくこととする。

謝辞

本文中の図版で引用文献が示されていないものは全て、修士課程の荒牧優衣さんに提供いただきました。また、湯元清文教授には観測データを提供いただきました。この場を借りて感謝致します。

参考文献

- Anandarao, B. G. and R. Raghavarao, 1987: Structural changes in the currents and fields of the equatorial electrojet due to zonal and meridional winds. *J. Geophys. Res.*, **92**, 2514-2526.
- Andrews, D. G., J. R. Holton and C. B. Leovy, 1987: *Middle Atmosphere Dynamics*. Academic Press, 489 pp.
- Davis, T. N., K. Burrows and J. D. Stolarik, 1967: A latitude survey of the equatorial electrojet with rocket-borne magnetometers. *J. Geophys. Res.*, **72**, 1845-1861.
- 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.
- Forbes, J. M., J. Russell, S. Miyahara, X. Zhang, S. Palo, M. Mlynczak, C. J. Mertens and M. E. Hagan, 2006: Troposphere-thermosphere tidal coupling as measured by the SABER instrument on TIMED during July-September 2002. *J. Geophys. Res.*, **111**, A10S06, doi:10.1029/2005JA0011492.
- Forbes, J. M., X. Zhang, S. Palo, J. Russell, C. J. Mertens and M. Mlynczak, 2008: Tidal variability in the ionospheric dynamo region. *J. Geophys. Res.*, **113**, A02310, doi:10.1029/2007JA012737.
- Forbes, J. M., S. L. Bruinsma, X. Zhang and J. Oberheide, 2009: Surface-exosphere coupling due to thermal tides. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L15812, doi:10.1029/2009GL038748.
- Fujiwara, H. and Y. Miyoshi, 2006: Characteristics of the large-scale traveling atmospheric disturbances during geomagnetically quiet and disturbed periods simulated by a whole atmosphere general circulation model. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L20108, doi:10.1029/2006GL027103.
- Fujiwara, H. and Y. Miyoshi, 2009: Global distribution of the thermospheric disturbances produced by effects from the upper and lower regions: simulations by a whole atmosphere GCM. *Earth Planets Space*, **61**, 463-470.
- Fujiwara, H. and Y. Miyoshi, 2010: Morphological features and variations of temperature in the upper thermosphere simulated by a whole atmosphere GCM. *Ann. Geophys.*, **28**, 427-437.
- Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara and H. Shinagawa, 2008: Electrodynamics of the formation of ionospheric wave number 4 longitudinal structure. *J. Geophys. Res.*, **113**, A09307, doi:10.1029/2008JA013301.
- Kato, S., 1956: Horizontal wind systems in the ionospheric E region deduced from the dynamo theory of the geomagnetic Sq variation. Part II. Rotating earth. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **8**, 24-37.
- Kato, S., 1966: Diurnal atmospheric oscillation. I. Eigenvalues and Hough functions. *J. Geophys. Res.*, **71**, 3201-3209.
- Kawano-Sasaki, K. and S. Miyahara, 2008: A study on three-dimensional structures of the ionospheric dynamo currents induced by the neutral winds simulated by the Kyushu-GCM. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **70**, 1549-1562.
- Matsushita, S., 1965: Global presentation of the external Sq and L current systems. *J. Geophys. Res.*, **70**, 4395-4398.
- Miyoshi, Y. and H. Fujiwara, 2003: Day-to-day variations of migrating diurnal tide simulated by a GCM from the ground surface to the exobase. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1789, doi:10.1029/2003GL017695.
- Miyoshi, Y. and H. Fujiwara, 2004: Day-to-day variations of migrating semidiurnal tide simulated by a general circulation model. *Adv. Polar Up. Atmos. Res.*, **18**, 87-95.
- Miyoshi, Y. and H. Fujiwara, 2006a: Excitation mechanism of intraseasonal oscillation in the equatorial mesosphere and lower thermosphere. *J. Geophys. Res.*, **111**, D14108, doi:10.1029/2005JD006993.
- Miyoshi, Y. and H. Fujiwara, 2006b: Day-to-day variations of migrating semidiurnal tide in the mesosphere and thermosphere. *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, Special Issue, **59**, 199-207.
- Miyoshi, Y. and H. Fujiwara, 2008: Gravity waves in the thermosphere simulated by a general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **113**, D01101, doi:10.1029/2007JD008874.
- Miyoshi, Y., H. Fujiwara, J. M. Forbes and S. L. Bruinsma, 2009: Solar terminator wave and its relation to the atmospheric tide. *J. Geophys. Res.*, **114**, A07303, doi:10.1029/2009JA014110.
- 永田 武, 等松隆夫, 1973: 超高層大気の物理学. 物理科学選書 6, 裳華房, 453pp.
- Richmond, A. D., 1973: Equatorial electrojet. I. Development of a model including winds and instabilities. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **35**, 1083-1103.
- Richmond, A. D. and R. G. Roble, 1987: Electrodynamic effects of thermospheric winds from the NCAR Thermospheric General Circulation Model. *J. Geophys. Res.*, **92**, 12365-12376.
- Takeda, M. and H. Maeda, 1980: Three-dimensional structure of ionospheric currents. I. Currents caused by diurnal tidal winds. *J. Geophys. Res.*, **85**, 6895-6899.
- Tarpley, J. D., 1970: The ionospheric wind dynamo. II. Solar tides. *Planet. Space Sci.*, **18**, 1091-1103.
- Tohmatsu, T, 1990: Compendium of Aeronomy. (Translated and Revised by Ogawa, T.), TERRAPUB, 509 pp.
- Yamazaki, Y., K. Yumoto, T. Uozumi, S. Abe, M. G.

Cardianl, D. McNamara, R. Marshall, B. M. Shevtsov and S. I. Solovyev, 2010: Reexamination of the Sq -EEJ relationship based on extended

magnetometer networks in the east Asian region. *J. Geophys. Res.*, **115**, A09319, doi:10.1029/2010JA015339.

(長谷部) 雲のところで成層圏へ流入しているということではありません。また、雲がピンク色に見えるのは、おそらく大気による屈折のために、長波長の光だけが上空を照らしているためだと思います。このことから、お見せした雲は、かなり高いところにある非常に薄い雲で、おそらく我々が注目している巻雲だろうと思います。また、実際には、飛行機による観測で、雲の出現高度や薄さを調べないといけません、我々は、地上から見て、おそらく脱水と関連していると思われる雲を紹介させて頂きました。

Q. 赤道エレクトロジェット (EEJ) の変動プロセスと大気運動との関係がよく分かりませんでした。電荷分布が変わって EEJ が変動するのでしょうか？

(宮原) 今日お話ししたのは、電流 \mathbf{J} の変動ですが、 \mathbf{J} は $\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B})$ で表現されます。このシミュレーションで日々変化するのは、中性大気風の水平成分 \mathbf{V} だけです。中性大気風が変わった結果 \mathbf{J} が変動します。また、現実の大気では導電率 σ も日々変動しますが、このシミュレーションでは、日々変動はないとしていますので、 \mathbf{V} が変動して $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ が変動することと、 $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ を満たすように電場 \mathbf{E} が変わるため、結果として電流 \mathbf{J} も変動します。

Q. これから南極に大きなレーダを建てて、気象学と超高層大気物理学の共同研究を推進しようと思っておりますので、宮原先生のお話は大変エンカレッジでした。今日のお話は中性大気から電離大気への影響という内容で、大気波動が大変重要であるという Kyushu-GCM の結果を示されましたが、このような高度になると、大気重力波が結構重要な役割を果たすと思います。そこで、宮原先生のモデルでは大気重力波がどのように表現されているのか教えてください。

(宮原) 今日示しました中性大気風 \mathbf{V} は、東西波数 4 以下の大規模波動のみを与えて求めました。Kyushu-GCM の波数切断は T42 だったと思いますが、その生のデータで計算したら、かなり複雑な電流が出る可能性もあります。ただ、局所的な大気重力波が大規模波動を変調させて \mathbf{V} が変わるということは十分考えられます。もう一つの可能

性は、この辺りの高度になると、電磁力も効いてきますので、イオンドラッグのような効果で \mathbf{V} が変わる可能性があります。大気重力波の効果は大変重要と思いますので、是非、研究してください。

Q. S_q の等価電流系が、鉛直方向に二階建てになったのは、なぜですか？ また、高緯度なら等価深度は負になるため二階建ての構造にはならないので、示された図は低緯度域の分布でしょうか？

(宮原) 大気中性風が鉛直に二階建ての構造になった原因は \mathbf{V} の分布にあり、 $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ によるホール電流により、 \mathbf{J} も二階建ての構造になります。また、示した図は、緯度 30 度より赤道側での分布です。

Q. ご自身の研究分野で、こういった点が難しいか、あるいは面白いのか、また、こういった点を今後研究していく必要があるかという点についてコメントを頂きたいです。

(谷本) 今日は、中緯度における海洋から大気への影響を主にお話ししました。中緯度では総観規模擾乱が卓越するため、海から大気への影響は見えにくいですが、それを取り出すというところに、面白さがあると思います。今日のお話では、何十年分のデータを用いた季節平均の図や、1ヶ月くらいの期間で平均した数値実験結果をお見せしました。このような時間平均操作は、総観規模擾乱の効果をフィルターアウトするには効果的です。しかし、実際には総観規模擾乱が卓越していますので、今日お話しした気圧極小域が、暖気移流場や寒気移流場の中で、どのように応答しているのかを細かく観ていくのが一つの研究の方向だと思います。また、海洋のスケールは大気のスケールよりも一桁くらい小さいので、海洋の影響が大気中でどのようにスケールアップするのかという点も、これから研究すべき非常に重要な課題だと思います。

(新野) 今日は、境界層と自由大気の相互作用のうち、対流のイニシエーション、台風と海面も含めた境界層の相互作用、竜巻渦の速度分布を決める上での境界層の役割について話しましたが、いずれも観測による把握も、数値シミュレーションに

よる再現も容易ではなく、難しい課題が沢山残っています。また、新しい測器が開発されているので、対流のイニシエーションの問題では、新しい測器を用いて、データ同化を含めて観測できっちり実態を把握することが必要です。一方、海の波浪の問題では、現状では非常に荒れた海では観測が難しいので、新しい観測手法を考えていく必要があると思っています。いずれにしても現象を観測できっちり把握するのが鍵と言えます。

(黒田) ともかく、わけが分からないのが面白いと思います。これは、原因Aに対する応答Bが一对一ではなく、非常にぶれて確率的だということです。これは気象学全般に言えることでしょうか、その対応が非常に難しいという印象を持っています。例えば、昔からよく知られている成層圏突然昇温にしても、何で起きるのか詳しくはよく分かっていないと思います。ブロッキングが関係しているということも示唆されていますが、両者の因果関係が明瞭に分かっているとは言い難いと思います。そういうところがある意味面白いです。また、成層圏-対流圏上下結合に関しても、力学的に分かっているような気もしますが、外部パラメータをほんの少しだけ(0.1%)変化させると、様相がすごく変わってしまいます。これは、どのような理由によるのか、今後研究していく必要があると思います。

(長谷部) 難しさという点からしますと、現象として私たちが観ているのは、太平洋を横断する規模の現象で、明らかにこのような現象を理解するには、例えば衛星観測が有利ですが、一方で鉛直スケールが大変小さくて衛星観測では分解できないということが挙げられます。また、最近、個々の対流活動そのもの、あるいは対流雲の貫入という非常に小さなスケールの現象に再び注目が集まりつつありますが、こういうスケールが大変異なる

現象を統一的にどのように捉えるのかということに難しいと思います。さらに、個人的な興味としては、私はもともと大気組成を力学の観点から見てきたのですが、例えば大気組成が力学場を変えらるというようなことがあれば面白いと考えています。

(宮原) ご承知のように先ほど紹介した超高層大気をもともとやっておられた方、あるいはその辺の研究分野の方が、気象学会で現在非常に沢山活躍されています。逆に、超高層の分野で活躍されている気象出身の方はあまり多くありません。今日堀内賞を受賞されたお一人の方は気象出身ということで、このようなことをこれから先もどんどんやっていけば、お互いの分野の相互理解が深まるのではないかと思います。また、電離圏と聞くと、中性大気の力学は手が出ないように思いますが、電離圏といっても圧倒的に多くの中性大気が存在しますので、中性大気の知識が通用する部分も多いため、中性大気の力学屋さんにも超高層の方と一緒にやれば、超高層の現象に気象力学の知識で迫ることもできると思います。さらに、互いの協力で力学に限らず広い分野で非常に大きな発展が期待できると思います。

Q. 平均場が大きく変わるときに、例えば、降水や風などで見た大気海洋の相互作用のシグナルを取り出すことができるのかという点に関しコメントを頂きたい。

(谷本) 実際には、平均場が変わるといふほどの変化がないので、イメージが湧きにくいですが、数値実験の枠組みでは、例えば、水温のフロントの位置を変えたりとか、その強さを変えたりすることにより平均場を大きく変えることはできます。このような数値実験により、大気海洋相互作用のシグナルを取り出すことは擬似的に可能ではないかと思えます。