

私の大気力学研究

—2013年度藤原賞受賞記念講演—

宮 原 三 郎*

1. はじめに

この度は日本気象学会藤原賞を授与いただき、大変光栄に存じます。私の研究を評価していただきました学会の皆様方にこの場を借りてお礼申し上げます。本日の講演は私の大気力学研究と題しまして、私が行って来ました研究について、その結果あるいは成果と言うよりは、その時々でどのような研究背景の下でどのような考えに基づいて研究を行ったかについて、お話ししたいと思います。また、私の研究が気象学研究の流れに何らかの影響を与えることができたとするならば、そのことについても若干ふれてみたいと思います。

私は大気力学の研究を長年行ってきましたが、それを研究手法により分類すると、数値モデルによる大気力学シミュレーションと大気力学の理論的研究に大別できます。前者の研究はさらに二つに分類できます。ひとつは研究対象や特定の物理機構に特化した数値モデルによるシミュレーション、たとえば波動—平均流相互作用を記述する力学モデルによるシミュレーションなどです。この場合、モデルはある研究目的に特化しているため、その結果はモデルの条件設定によっては客観性をもつとは言えないこともあり得ます。もう一つは大気大循環モデルによるシミュレーションで、モデルそのものは意図的要因を可能な限り排除し、物理法則そのものに則ることを重んじて開発が行われます。このモデルによって得られたデータを、大気潮汐波、プラネタリー波、ケルビン波などの振る舞いの解

析、波動—平均流相互作用解析、波動—波動相互作用解析など特定の意図をもって解析を行い、得られた結果を大気力学理論や先に述べた特化した数値モデルによるシミュレーションなどに基づいて、物理的解釈を行うものです。このような二つの異なるシミュレーション手法を用いて研究を行って来ました。

もう一方の大気力学の理論的研究では大気力学現象そのものではなく、専ら理論的興味や疑問を出発点として、大気運動を支配する微分方程式の解の特徴やその物理的意味の解明などを行って来ました。

また、私の研究を研究対象により分類しますと、(1) 中層大気力学、とくに中間圏・下部熱圏の力学、(2) 中性大気・電離大気結合、(3) 対流圏力学に大別されます。(1)に関しては、大気潮汐波・プラネタリー波・ケルビン波・重力波などを研究対象とし、波の励起と振る舞い、波動—平均流相互作用、波動—波動相互作用、中層大気大循環・物質輸送などの研究を行って来ました。(2)では、特に電離圏ダイナモと中性大気変動の關係に焦点をあて、Sq (Solar quiet variation) や赤道エレクトロジェットの日々変動の原因について、中性大気力学と電離圏物理学を結合する立場から研究を行って来ました。本日は、受賞対象となりました(1)、(2)についてお話ししたいと思います。

2. 大気潮汐波動に関する研究

私が大学院修士課程に進学したのは1970年で、大気物理学講座に所属し、講座担当教授であった澤田龍吉先生の下で大気潮汐の研究をすることになりました。この年は、新しい大気潮汐の教科書 (Chapman and Lindzen 1970) が出版された年であり、今にして思えば大気潮汐研究が新たな発展を迎えようとしている時期でした。また、波と平均流の相互作用研究も盛んに

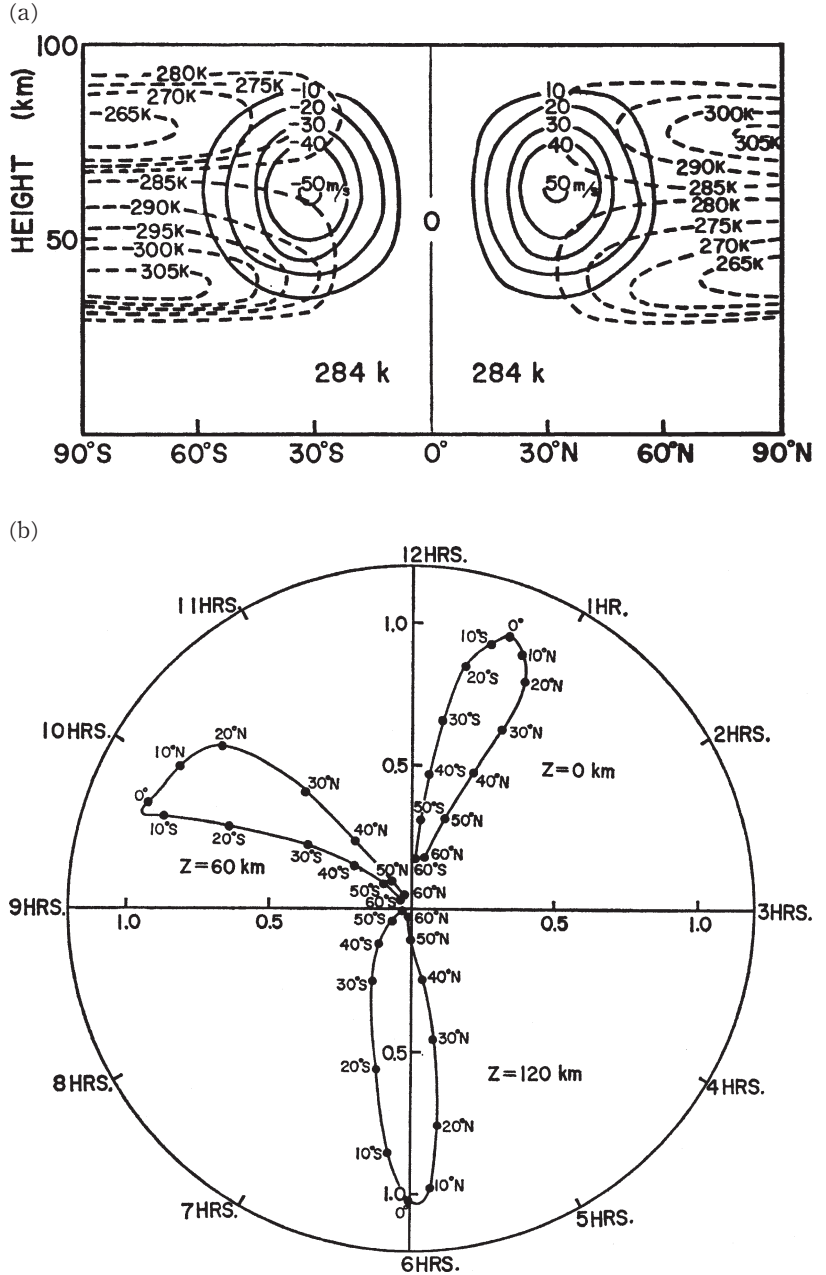
* 九州大学名誉教授。
s_miyahara@kyudai.jp

—2013年9月24日受領—
—2013年10月16日受理—

行われようとしている時期でもありました。

2.1 帯状平均東西風中の大気潮汐波の鉛直伝播

帯状平均東西風中のプラネタリー波の鉛直伝播については Charney and Drazin (1961) を嚆矢として研究が進展し、1970年は現実的な平均流と温度分布中のプラネタリー波伝播を論じた松野太郎先生による論文 (Matsuno 1970) が発表された年でもありました。これに対して大気潮汐波の鉛直伝播については、支配方程式がプリミティブ方程式系であり帯状平均流中の伝播を記述する方程式が複雑になるため、Chiu (1953), Sawada (1966) など幾つかの論文は発表されていたものの、Matsuno (1970) の様な詳細な解析は行われていませんでした。Chapman and Lindzen (1970) でも、現状の問題点として1頁程度の記述がなされているに過ぎません。このような状況の中、松野先生よりプリミティブ方程式系でも準地衡風方程式系と同様な計算が大型計算機を使用すれば可能であるとの示唆をいただき、そのようなモデル計算を行うこととしました。当時、大型計算機センターに導入され一般ユーザーが使用可能となった計算機の性能は、現在のノートパソコンの足下にも及ば



第1図 (a) モデル計算に使用した帯状平均東西風 (実線, 単位 ms^{-1}) と温度 (破線, 単位 K) の緯度高度分布. 東西風分布は, 中層大気での冬半球の西風, 夏半球の東風を模式化している. 温度分布は赤道上では284Kの等温大気で, 緯度高度分布は東西風と温度風平衡状態にある. Miyahara (1975) より引用. (b) 高度 0 km, 60 km, 120 km における太陽半日潮汐気圧振動の振幅と位相の緯度分布. 振幅 (極座標動径で表示) は 3°S の値で規格化されている. 位相 (極座標角度で表示) は気圧が最大値をとる太陽地方時で示されている. Miyahara (1975) より引用.

ないものでしたが、最新の電子計算機を使用して研究を行うことに大きな喜びを感じていたことを今でも思い出します。

帯状平均東西風と温度風平衡温度の効果を取り入れたプリミティブ方程式波動伝播モデルを完成し発表した論文が Miyahara (1975) で、大気太陰潮汐波の鉛直伝播に対する平均場の影響を論じたものです。第1図 a に、モデルで使用した帯状平均東西風と温度分布、第1図 b にモデル計算により得られた幾つかの高度における気圧振動の振幅と位相の緯度分布を示しています。太陰潮汐に伴う地表面気圧振動は顕著な季節変動と赤道非対称性を示すことが知られていました (Chapman and Lindzen 1970) が、私の計算結果は観測と同程度の非対称性が、帯状平均東西風と温度分布の効果によって説明できる可能性を示すものでした。

ここで使用した平均流分布が、成層圏・中間圏の帯状平均東西風を模した極端に単純化されたものであることを訝られる方が多いと思いますが、このようなモデルによる結果を発表した裏には事情があります。この単純化モデル計算の後に、現実的な分布を使用した計算を実行しその結果を論文として公表することを計画していたのですが、その間に Lindzen and Hong (1974) が発表されました。この論文では現実的な平均流と温度分布の効果を取り入れた計算が太陽潮汐・太陰潮汐について詳細に実行されていました。私が計画していた研究が既に実行され公表されたので、彼らの論文の中では論じられていなかった、太陰潮汐の南北非対称性の問題だけに焦点を絞った論文を公表することにしたのが前述の論文です。

潮汐波の励起源を与え、定常的な波動伝播を議論する、この種のモデルを用いた私のその後の研究は、1997年に発表した non-migrating tides の鉛直伝播を論じた Ekanayake *et al.* (1997) までありません。この論文は、後に述べる中層大気大循環モデルで顕著に現れる non-migrating tides の励起源が対流圏の湿潤対流加熱であることを確かめるために行った研究です。京都大学の麻生武彦先生の数値モデルを使わせていただき、大循環モデルにより得られた帯状平均場と湿潤対流加熱を与えて潮汐波の鉛直伝播を調べ、大循環モデルの結果を再解釈したもので、Ekanayake さんの博士学位論文となったものです。

励起源を与えて定常的な波動伝播を記述するモデルは Global Scale Wave Model (GSWM) として NCAR の Hagan さんを中心として開発整備され

(GSWM 2004)、今日では大気潮汐波・プラネタリー波の鉛直伝播モデルとして多くの研究者に広く使われていることを、ここで一言付け加えておきます。

2.2 大気潮汐波による下部熱圏平均流生成

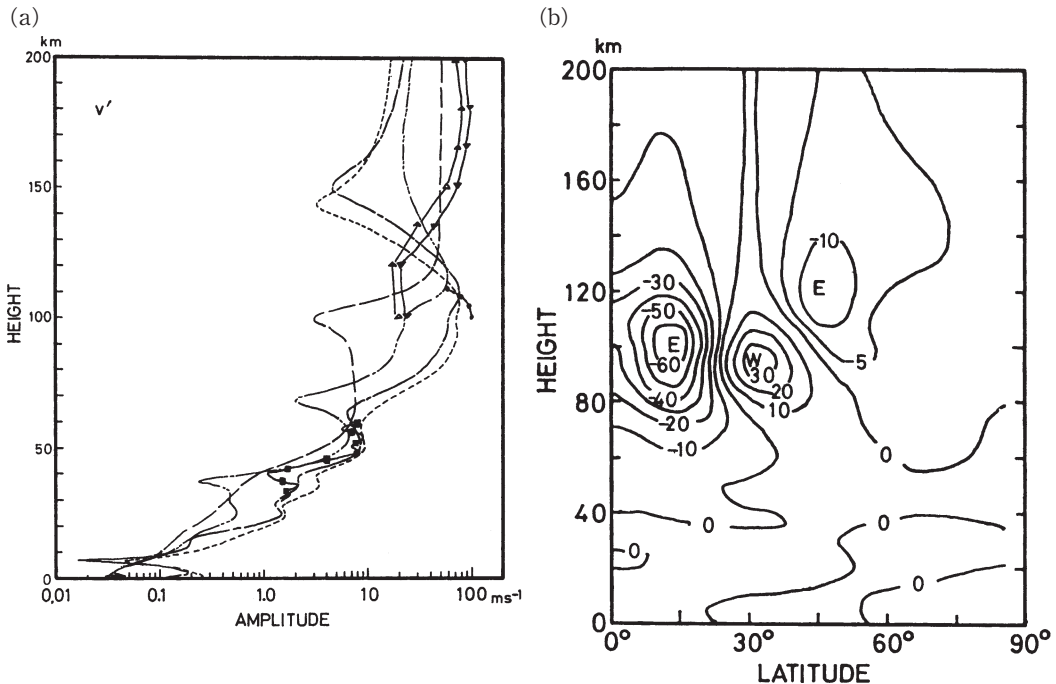
上記の研究では平均場が波動伝播に与える影響を調べることを目的としていましたが、波動と平均場の相互作用についての研究も Charney and Drazin (1961), Eliassen and Palm (1961) など、早くから行われていました。私自身の研究に大きな影響を与えたのは、Booker and Bretherton (1967) の重力波と平均流の相互作用に関する研究で、クリティカルレベル吸収、波動による運動量輸送、平均場への運動量移送など、詳細な理論的取り扱いを通じ多くのことを学びました。また、松野先生によるプラネタリー波伝播による成層圏突然昇温機構の解明 (Matsuno 1971)、瓜生さんによる波動-平均流相互作用理論構築の試み (Uryu 1973, 1974)、日々の研究室での議論などにも大きな刺激を受けました。そして一般化された Eliassen-Palm flux 理論 (Andrews and McIntyre 1976) が発表されたことも大きな刺激となりました。瓜生さんから、プラネタリー波と同様に大気潮汐波も、平均場に大きな影響を与えていると思われるので調べてみてはどうかと示唆をいただき、大気潮汐波による平均流相互作用の研究を開始しました。Andrews and McIntyre (1976) が発表される 1~2 年前であったと記憶しています。

プリミティブ方程式系を帯状平均場と波動場に分離し、(1) 波動の 2 次効果による平均場生成を記述する時間発展方程式系、(2) 波動の 2 次効果により生成された平均場が波動伝播に与える影響を記述する時間発展方程式系、この二つの方程式系からなるモデルを構築しました。このモデルは球面上のプリミティブ方程式系ですが、その東西運動量に関する部分だけを簡略化してデカルト座標で表現すれば以下ようになります。

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - f \bar{v} = - \frac{\partial \bar{u}' v'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{u}' w'}{\partial z} + \text{dissipation terms} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u'}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial u'}{\partial x} + v' \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + w' \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - f v' = - \frac{\partial \phi'}{\partial x} + \text{dissipation terms} \quad (2)$$

帯状平均場と波動場を交互に時間発展方程式として解き、波動場については自らが生成した平均場の影響



第2図 (a) 太陽一日潮汐波(南北風成分)振幅の高度分布. 単位は ms^{-1} . 点線は 15° , 一点鎖線は 30° , 二点鎖線は 45° , 破線は 75° の値を表している. 記号付きの線は幾つかの観測点での観測値を表している. 詳細は Miyahara (1981a) を参照. (b) (a) に示された太陽一日潮汐振動により生成された帯状平均東西風の緯度高度分布. 単位は ms^{-1} . Miyahara (1981a) より引用.

を受ける準非線形方程式となっています. 1978年から1990年代にかけて, このモデルあるいはそれを変更したものを使用して幾つかの論文を發表しました. 第2図 a, b は Miyahara (1981a) によるもので, 観測と同程度の振幅を持つ一日潮汐振動により, 上部中間圏・下部熱圏に数 10 ms^{-1} に及ぶ帯状平均東西風が作られていることがわかります. このモデルを使用した一連の論文により, 大気潮汐振動がこの領域の大気大循環に大きな影響を与えていることを示すことができました.

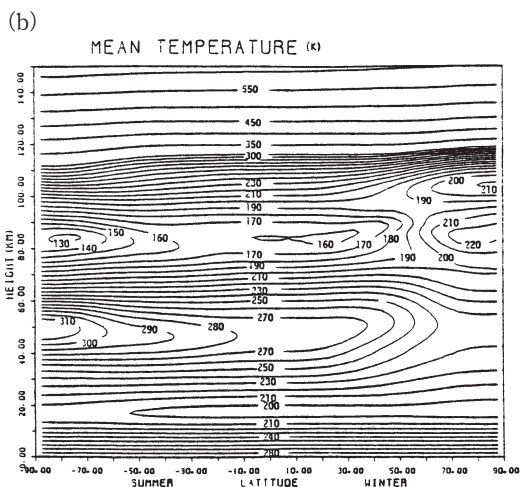
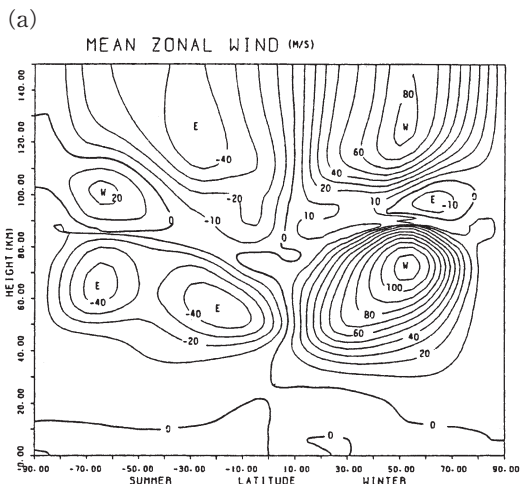
3. 中間圏・下部熱圏循環における内部重力波の役割

大気潮汐波動による平均流生成の研究を行っていた1980年代の初めに, 大気大循環における内部重力波の重要性を指摘する画期的な論文 (Lindzen 1981; Matsuno 1982) が相次いで發表されました. 中間圏界面付近の, 帯状平均東西風の弱風層生成と冬極の高温と夏極の低温生成に必要なとされる摩擦力 (Leovy 1964) に相当する力が, Lindzen (1981) は内部重力波の碎

波によって, Matsuno (1982) は渦粘性による内部重力波の散逸によって説明できることを示しました. この二つの論文により, 大気大循環における内部重力波の役割の重要性が認識されるようになったと言ってよいでしょう.

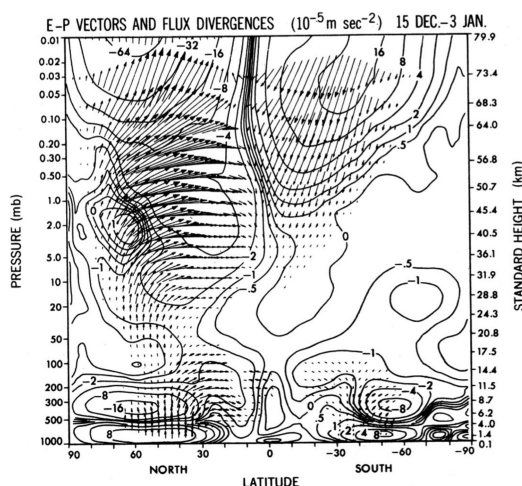
このような状況のもと, 私も中層大気大循環における内部重力波の役割について, 前節で述べたモデルを使用して研究を始め, 1982年にハワイで開催された日米セミナー「中層大気力学」で, その結果を發表しました. 第3図 a, b は Miyahara (1984) によるもので, 成層圏から下部熱圏にわたる帯状平均非断熱加熱, 一日潮汐波, Matsuno (1982) に基づいた内部重力波パラメタリゼーションを取り入れたモデルによる帯状平均東西風および温度の緯度高度分布が示されており, 中間圏界面付近の弱風層とそれより上層の風向逆転と夏冬の温度場の逆転などが再現されていることがわかります. Holton (1983) も Lindzen (1981) の内部重力波パラメタリゼーションを使用して, 同様な結果を得ています.

このようにして中層大気大循環における重力波の役



第3図 (a) モデルによりシミュレートされた帯状平均東西風の緯度高度分布。単位は ms^{-1} 。(b) モデルによりシミュレートされた帯状平均温度の緯度高度分布。単位は K。Miyahara (1984) より引用。

割の重要性が認識されるようになりましたが、パラメタリゼーションに含まれるパラメータの任意性、例えば与える重力波の大きさや水平位相速度など、不確定な要素が多く、パラメタリゼーションが記述しているような機構が現実の大気中で有効に働いているか否かを調べる研究が必要であることは明らかでした。HF ドップラーレーダーによる運動量フラックス観測 (Vincent and Reid 1983) もありましたが、全球にわたる重力波観測は望むべくもなく、その他の手段による検証が必要でした。このような状況の中で私は、GFDL に長期間滞在して研究する機会に恵まれまし

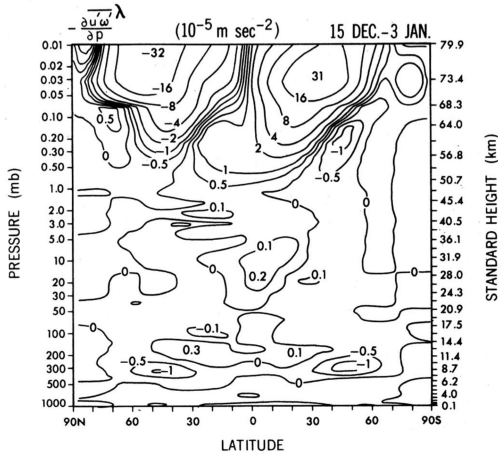


第4図 GFDL “SKYHI” モデルによる EP フラックスベクトルとその発散の緯度高度分布 (12月15日－1月3日平均値)。EP フラックスベクトルは、それぞれの高度の圧力で規格化されている。発散の単位は 10^{-5}ms^{-2} 。Miyahara *et al.* (1986) より引用。

た。当時 GFDL では中間圏まで記述することができ、大循環モデル GFDL “SKYHI” を使った研究が行われていました (例えば、Andrews *et al.* 1983; Mahlman and Umscheid 1984)。このモデルの開発にあたっては内部重力波の鉛直伝播は特に意識されておらず、内部重力波はモデルに含まれる対流調節や地形などにより励起され、モデルの解像度が許す範囲内でプリミティブ方程式系により鉛直伝播が陽に解かれていました。内部重力波の鉛直伝播が運動方程式に則って解かれている大循環モデルのデータを解析することは、内部重力波パラメタリゼーションが記述するような機構が実際に働いているか否かの検証には最適であると考え、内部重力波の解析を実行し Miyahara *et al.* (1986) として発表しました。第4図は解析結果の一例であり、北半球が冬の条件下での EP フラックスとその発散が示されています。冬の成層圏と中間圏では上方伝播と赤道方向に向かうプラネタリー波に伴う EP フラックスが顕著にみられます。しかしながら上部中間圏および夏半球では、主に鉛直方向に向かうフラックスが明らかにみられます。上部中間圏では、冬半球では $-1.6 \times 10^{-4} \text{ms}^{-2}$ 以上 (最大で $-6.4 \times 10^{-4} \text{ms}^{-2}$) の東風加速、夏側では $1.6 \times 10^{-4} \text{ms}^{-2}$ 以上の西風加速が存在しており、それぞれの半球の帯状平均東

西風を減速するように働いています。第5図には内部重力波と考えられる東西波数5以上の擾乱による運動量輸送の鉛直発散が示されています。冬側で $-1.6 \times$

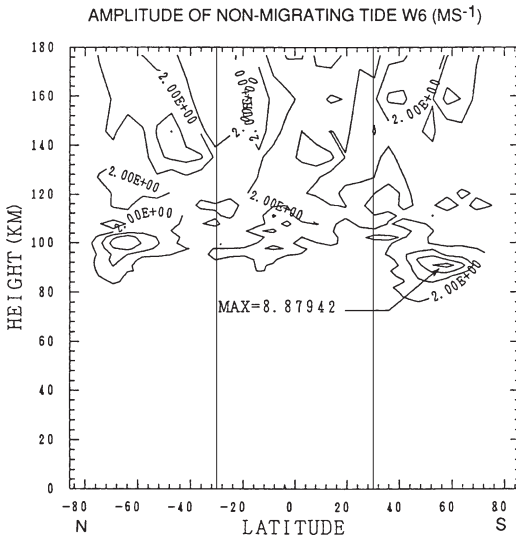
10^{-4}ms^{-2} 以上（最大で $-3.2 \times 10^{-4} \text{ms}^{-2}$ ）の東風加速，夏側で $1.6 \times 10^{-4} \text{ms}^{-2}$ 以上（最大で $3.1 \times 10^{-4} \text{ms}^{-2}$ ）の西風加速となっています。これら二つの解析結果は，上部中間圏では冬半球ではプラネタリー波の半分程度，夏半球ではそのほとんど全てが内部重力波に伴う鉛直運動量輸送によって，帯状平均東西風の減速が起こっていることを示しています。この解析により，定量的には問題があるものの内部重力波が中間圏の大気大循環において重要な役割を果たしていることを確認することができました。



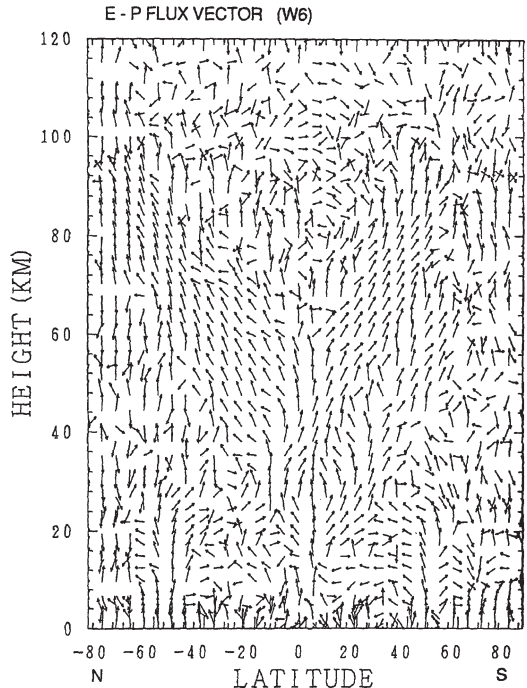
第5図 GFDL “SKYHI” モデル中の内部重力波（東西波数5以上）による帯状平均東西方向運動量フラックス鉛直発散の緯度高度分布（12月15日－1月3日平均値）。単位は 10^{-5}ms^{-2} 。Miyahara *et al.* (1986) より引用。

4. 中層大気大循環モデルによる潮汐波・重力波研究

上記研究により，大気大循環モデルが中層大気力学研究に非常に有力な手段となることを実感しました。当時中間圏まで含んだ中層大気大循環モデルは GFDL “SKYHI” を筆頭として僅かしかありませんでした。そこで帰国後，GFDL “SKYHI” には含ま



第6図 中層大気大循環モデルによりシミュレートされた東西波数6西進一日潮汐振動（東西風成分）振幅の緯度高度分布。単位は ms^{-1} 。南北両半球の緯度30°の実線は一日潮汐の振動数 ω がコリオリパラメータ f と一致する ($\omega^2 = f^2$ となる) 緯度を表している。Miyahara *et al.* (1993) より引用。



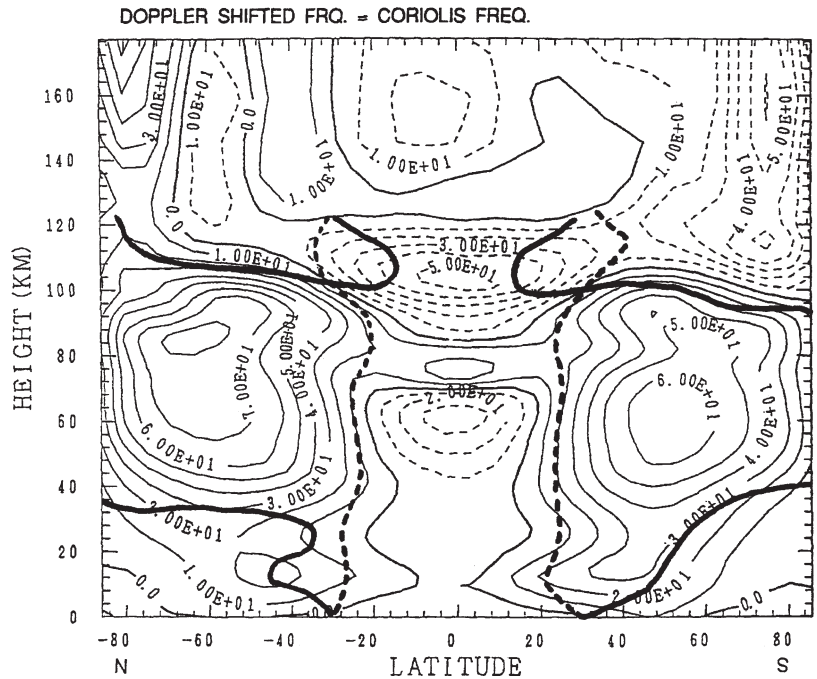
第7図 東西波数6西進一日潮汐振動に伴うEPフラックスベクトルの緯度高度分布。ベクトルの大きさは規格化されており，ベクトルの向きは潮汐波の伝播方向を示している。Miyahara *et al.* (1993) より引用。

れていなかった太陽放射の日変化サイクル・熱圏での分子粘性・分子熱伝導・電離大気によるイオン抗力などの物理過程を含み、私の主な研究対象である潮汐波の励起と振る舞いも記述できる地表面から下部熱圏高度約150 km までを対象とした九州大学中層大気大循環モデルを開発することにしました。開発のベースとなったのは、気象庁で開発され (Kanamitsu *et al.* 1983), 東京大学で共同利用可能な大気大循環モデル (松野 1987) へと拡張されたモデルです。当時、大学院修士課程院生であった三好勉信さん (現九州大学准教授) に主力になってもらい、その他の大学院生の協力も得て中層大気大循環モデルへの改造を徐々に行い、1990年代には一応モデルを完成させることができました。このような地表から下部熱圏までを統一的に記述できる大気大循環モデルは世界でも類を見ないのでした。

このモデルのシミュレーションデータを解析し、多くの論文を発表することができました。ここではその中の一つ (Miyahara *et al.* 1993) を紹介したいと思います。第6図は、モデル中の東西波数6の西進一日潮汐波振幅の緯度高度分布を示したもので、下部熱圏の高度90~100 km 南北緯度60°付近に大きな振幅がみられます。潮汐理論では、潮汐波はその振動数 ω がコリオリパラメータ f より大きい場合($\omega^2 > f^2$)にのみ鉛直伝播が可能なが知られており (Chapman and Lindzen 1970), 一日潮汐波の場合には図中に示された南北緯度30°より低緯度側のみが伝播可能な領域となります。第6図に示した振幅分布は、明らかに潮汐理論と矛盾した高緯度側での伝播を示しているようにみえます。第7図はこの潮汐波に伴うEPフラックスの緯度高度分布を示したもので、明らかに熱帯対流圏から下

部熱圏中高緯度への伝播を示しており、潮汐理論の結果とは相容れません。この矛盾は、帯状平均東西風による振動数のドップラーシフトを考えることにより解くことが可能です。ドップラーシフトした振動数 $\hat{\omega}$ は、波動の東西方向の波数 k と平均東西風 \bar{u} を使って、 $\hat{\omega} = \omega - k\bar{u}$ と表されます。平均東西風が存在する場合にはドップラーシフトの影響を受け、鉛直伝播可能な条件は $\hat{\omega}^2 > f^2$ となります。第8図は、このモデルでシミュレートされた帯状平均東西風の緯度高度分布と、ドップラーシフトした一日潮汐波振動数 $\hat{\omega}$ がコリオリパラメータ f と一致する位置が示されています。これによると、東西波数6の西進一日潮汐波はドップラーシフトの効果により赤道から極域までの緯度帯が鉛直伝播可能な領域となっていることがわかります。

この大循環モデルに基づいた一連の論文により、下部熱圏では、non-migrating tide と呼ばれる太陽加熱の西進位相とは同期しない位相速度を持つ潮汐波が大きな振幅を持つこと (Miyahara and Miyoshi 1997)



第8図 モデルによりシミュレートされた帯状平均東西風の緯度高度分布 (コンター)。単位は ms^{-1} 。太い実線 (点線) は東西波数6西進 (東進) 一日潮汐振動のドップラーシフト振動数 $\hat{\omega}$ がコリオリパラメータ f と一致する ($\hat{\omega}^2 = f^2$ となる) 緯度を示している。Miyahara *et al.* (1993) より引用。

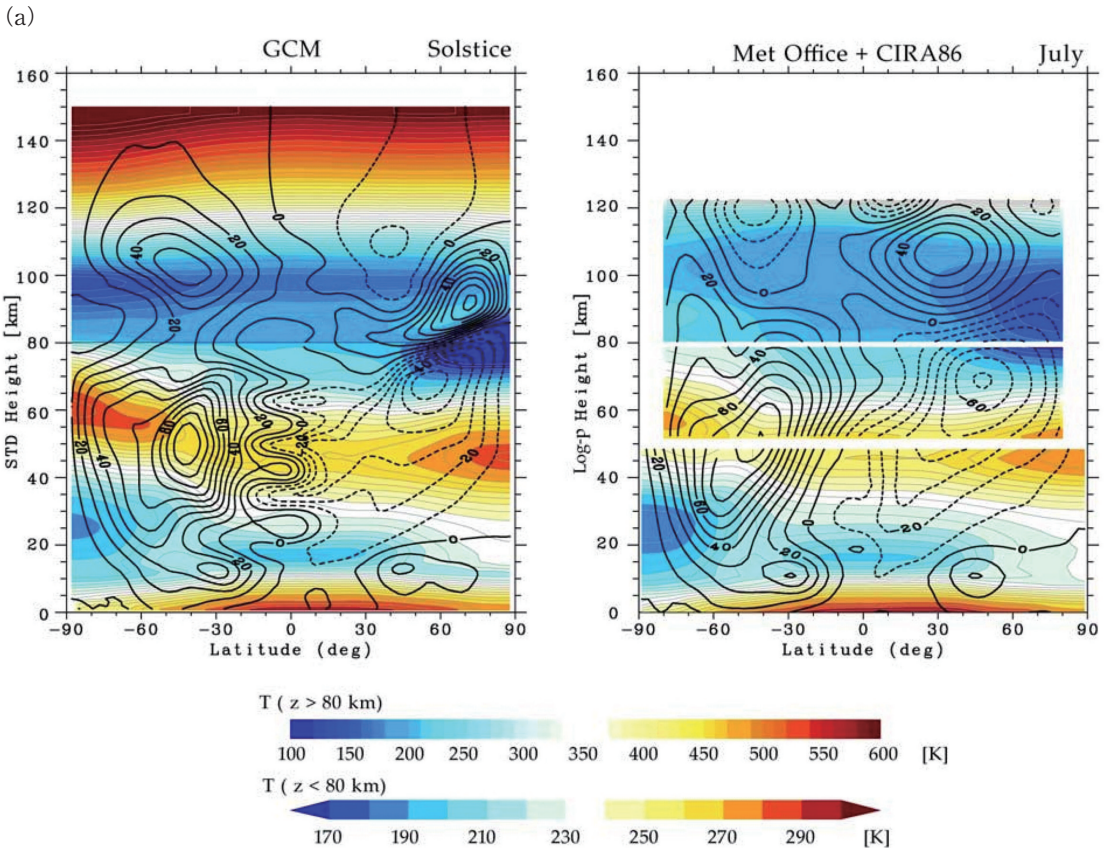
や、それが熱帯対流圏の湿潤対流加熱によって励起されること (Ekanayake *et al.* 1997) などを示すことができました。また、南極点での観測で明らかにされた、夏の下部熱圏で卓越する non-migrating tide の一種である東西波数 1 の西進半日潮汐波 (Forbes *et al.* 1995, 1999; Portnyagin *et al.* 1998) が、東西波数 2 の西進半日潮汐波と冬半球成層圏で卓越する波数 1 の定常プラネタリー波の、非線形効果によって冬の成層圏中間圏で励起され、赤道を越えて夏の極域下部熱圏まで伝播することも示すことができました (Yamashita *et al.* 2002)。

ここで述べた幾つかの例の通り、下部熱圏まで含んだ中層大気大循環モデルは、中層大気力学の解明に大きな力を発揮することが明らかとなり、今日では多数の中層大気大循環モデルが開発され研究が進行しています。私自身が若干関与した研究としては、Watanabe and Miyahara (2009) があります。これ

は重力波パラメタリゼーションを使用しない高解像度大循環モデル (T213L270) で帯状平均場や大気潮汐波と内部重力波の相互作用を調べたもので、第 9 図 a, b にその結果の一部が示されています。中間圏界面付近の弱風層と夏冬極での温度逆転が再現されていること、内部重力波に伴う運動量輸送と一日潮汐波の強い相互作用が存在していることなどがわかります。この結果は、下部熱圏まで含む大循環モデルで内部重力波パラメタリゼーションを使用する場合には、潮汐波との相互作用まで正しく表現できるパラメタリゼーションを用いる必要があることを示しています。

5. 下部熱圏中性大気運動と電離圏電流変動の研究

太陽活動が静穏な場合には、地表面の磁場が規則的な日変化を示すことは古くから知られていました (例えば, Chapman and Bartels 1940)。観測された昼間の北向き磁場変動の例を第10図に示します。30°より



第 9 図 (a) T213L270モデルによりシミュレートされた夏至条件下の帯状平均東西風 (ms^{-1}) および温度 (K) と、CIRA86および Met. Office データによる 7 月の気候値。

低緯度側では北向きの磁場が強くなり、極側の緯度帯では弱くなっていることがわかります。変動の大きさは地球主磁場の1%以下の小さな変動です。この変動はSolar quiet variation (Sq)と呼ばれています。地球磁場の日変化分布より電離圏E領域(高度100-130 km)付近の昼側に、北半球では反時計回り、南半球では時計回りの電流が流れていると考えられており、

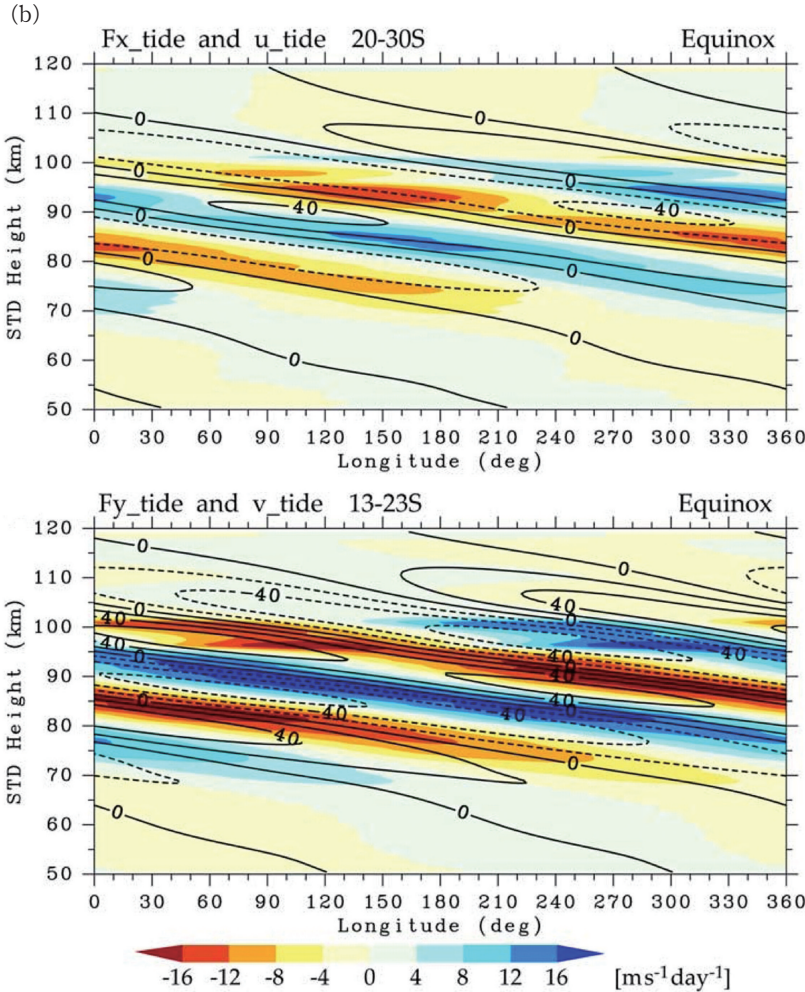
それを2次元非発散等価電流で表現したものの一例を第11図に示します。ここで注意していただきたいことは、Sqは地磁気に関連した現象であるため、分布は普通に用いられている緯度経度ではなく地磁気緯度経度に沿っていることです。また、第10図に示されている通り、磁気赤道(Dip equator)を中心とした数度の緯度帯で、北向き磁場変動が極端に大きくなっ

ています。この大きな磁場変動は磁気赤道付近の高度105 km付近に強い東向き赤道ジェット電流(Equatorial Electro Jet, EEJ)が昼間流れることに起因しています(例えば, Forbes 1981)。EEJは2次元非発散電流では表現不可能であり、第11図には反映されていません。電離圏のSqおよびEEJはダイナモ理論(例えば, Forbes 1981; 永田・等松 1973)で説明されることが知られており、電流は次式で表されます。

$$\mathbf{J} = [\sigma][\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}] \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{J} は3次元電流、 \mathbf{U} は中性大気風の水平成分、 \mathbf{B} は地球主磁場、 $[\sigma]$ は導電率テンソルを表しています。 \mathbf{E} は、 $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ を満たすように起こる電荷分離による二次的電場を表します。地球主磁場をダイポール定常磁場として与え、また導電率テンソルも太陽の日周運動とともに規則的に日変化する外部パラメータとして与えた場合、中性大気風 \mathbf{U} を微分方程式の非斉次項として与えて(3)、(4)式を解くことによ

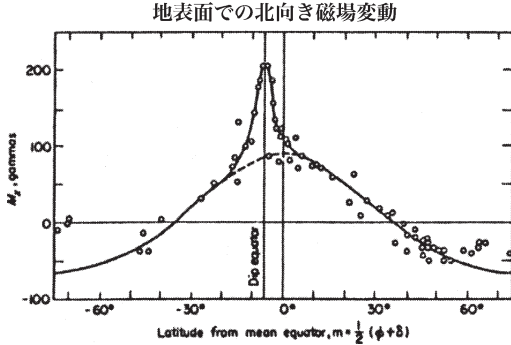


第9図 (b) モデルによりシミュレートされた東西波数1西進一日潮汐振動に伴う東西風(u_{tide})および南北風(v_{tide})の経度高度分布(コンタープロット)。単位は ms^{-1} 。内部重力波に伴う東西方向および南北方向の運動量輸送による加速の西進1日周期成分の経度高度分布(カラープロット)。単位は $\text{ms}^{-1}\text{day}^{-1}$ 。

$$F_x_{\text{tide}} = \left[-\frac{\partial u' w'^t}{\partial z} \right]_{\text{diurnal westward moving zonal wavenumber}=1}$$

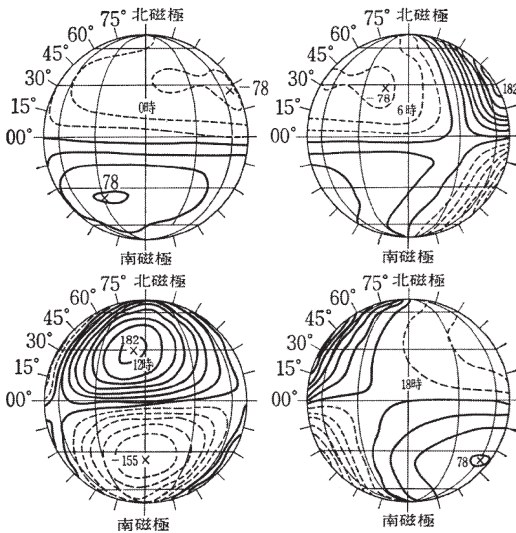
$$F_y_{\text{tide}} = \left[-\frac{\partial v' w'^t}{\partial z} \right]_{\text{diurnal westward moving zonal wavenumber}=1}$$

Watanabe and Miyahara (2009) より引用。



第10図 昼間の地表面北向き磁場変動の緯度分布. 単位は 10^{-9} T (tesla) = gamma. Forbes (1981) より引用.

Sq 2次元等価電流系



第11図 Sq 2次元等価電流系の0時, 6時, 12時, 18時(地方時)における全球分布. 実線は反時計回り, 点線は時計回りを表す. 単位は 10^8 A. 永田・等松 (1973) より引用.

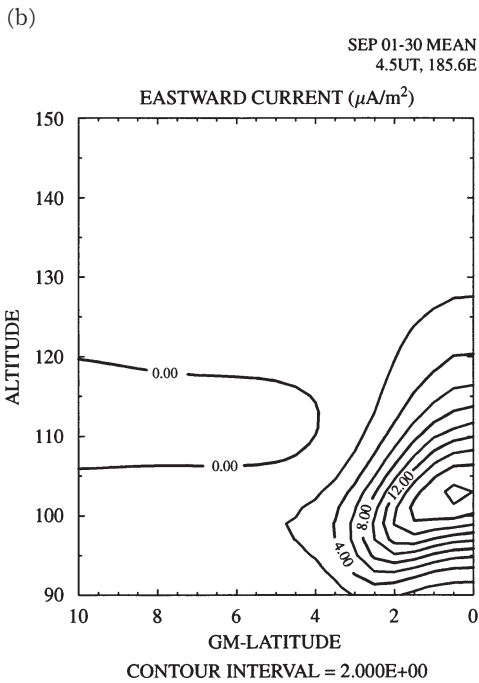
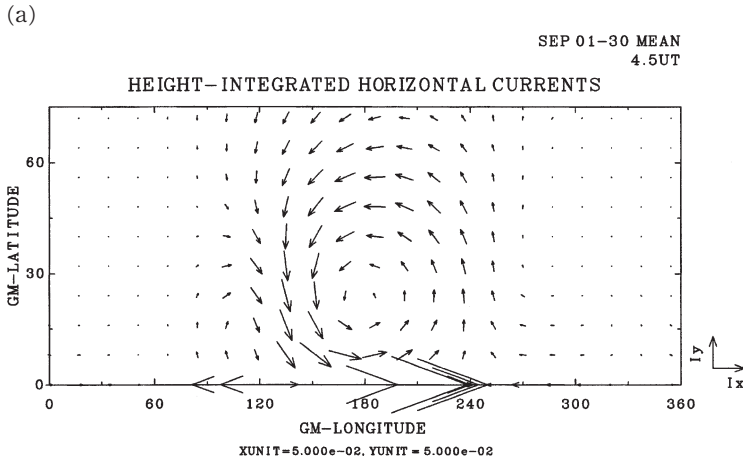
り \mathbf{E} が解として求まり, (3)式に代入することにより中性大気風変動に応じて変動する電流 \mathbf{J} が求まることとなります.

ダイナモ理論は電離圏電流系を記述する理論であり, 大気力学とは関係がないように思われるかもしれませんが, 式の中に中性大気風が含まれていることが, 大気力学との大きな接点となっています. 第11図に示されているような等価Sq電流系を作るのに必要な中性大気風系が加藤 進先生によって求められ

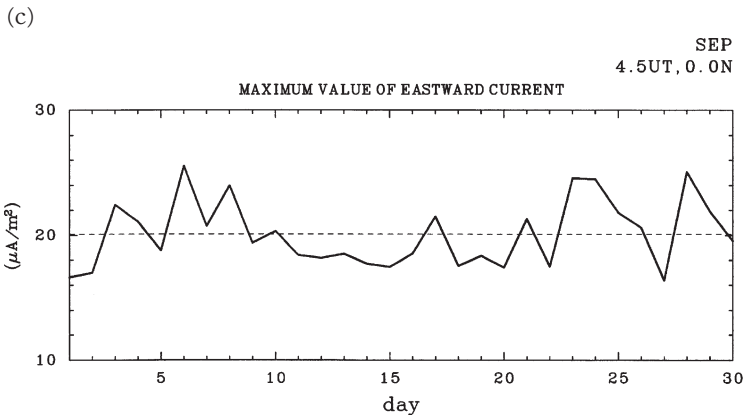
(Kato 1956), その風系が大気の大規模運動を記述するラプラス潮汐方程式の解の一つである一日太陽潮汐波の負の等価深度をもつ固有モード解によるものであることも, 加藤先生により明らかにされています (Kato 1966a, b). 今日では大気力学の常識となっている負の等価深度をもつ固有モード解 (例えば, Andrews *et al.* 1987) の発見が, 電離圏ダイナモ研究と深く係っていることは, 大気力学研究と電離圏研究が密接な関係にあることの一つの現れと言ってもよいでしょう.

Sq や EEJ の日変化は規則的ではあるものの, 日々変動が大きいことは古くから知られています (例えば, Chapman and Bartels 1940). 私は, この日々変動に大気力学の視点から興味を抱き, 変動が中性大気風の日々変動でどの程度まで説明できるかについて, 大循環モデルの中性風と2次元ダイナモモデル (例えば, Forbes 1981; 永田・等松 1973) を使った研究を行いました (Miyahara and Ooishi 1997). この研究で用いられた大循環モデルには, 下部熱圏で一日潮汐波を励起する短波放射過程が含まれていません. その代用としてラプラス潮汐方程式の解による中性風を大循環モデルの風に加えたものが使われています. このように定常な下部熱圏一日潮汐風を加えているにもかかわらず, 下層から伝播してきた潮汐波などの日々変動により, Sq が観測に匹敵する日々変動を示すことを, この研究で示すことができました. その後, 下部熱圏まで記述できる九州大学中層大気大循環モデルが完成したことにより, モデルで自動的に引き起こされる日々変動する中性大気風のデータが下部熱圏まで含めて使用可能となりました. この中性大気風データを用いて, (3), (4)で表現されるダイナモモデルを準3次元的手法 (Takeda and Maeda 1980) により解き, Sq や EEJ の分布, そしてそれらの日々変動を調べました (Kawano-Sasaki and Miyahara 2008). このモデルは磁気赤道に対して南北対称な成分のみを使用した, 対称モデルです. このモデルでは導電率テンソルは日変化を含んだ氣候値を用いているため, 解として求めた電流の日々変動は全て中性大気変動によるものです. 第12図 a, b, c に示しますように, Sq や EEJ の3次元分布を再現することができ, また電流も中性大気風の日々変動に伴って大きく変動することがわかりました.

しかし, この研究では中性大気風変動のどの成分が電流の日々変動に寄与しているかまでは解明されてい



第12図 (a) 高度積分した4.5UTでの水平電流の地磁気緯度経度分布。経度180°付近が12LT (地方時) となる。ユニットベクトルの大きさは $5 \times 10^{-2} \text{Am}^{-1}$ 。反時計回りの電流 (Sq) と磁気赤道上の大きな東向き電流 (EEJ) が再現されている。(b) 4.5UT, 地磁気経度 185.6°における東向き電流の地磁気緯度高度分布。単位は μAm^{-2} 。磁気赤道高度103 km 付近を中心とした EEJ が再現されている。(c) 4.5UT における磁気赤道上の東向き電流の最大値の日々変動。単位は μAm^{-2} 。EEJ の日々変動を表している。Kawano-Sasaki and Miyahara (2008) より引用。



ません。観測によりますと成層圏突然昇温の後に Sq や熱圏の中性大気密度や温度が顕著に変動することが最近発見されています (Yamazaki *et al.* 2012; Liu *et al.* 2011). また、赤道超高速ケルビン波の変動と電離圏変動の関係も報告されています (Takahashi *et al.* 2007). さらに成層圏突然昇温に先立って、中間圏で東西波数 2 の擾乱が卓越する場合があることが Aura EOS/MLS データの解析から明らかになり、平均場の不安定性による生成の可能性が指摘されています (飯田 2013). 我々のダイナモモデルにおいても、突然昇温時の電流変動が検出されており (荒牧 2012), また大循環モデルにおいても、赤道超高速ケルビン波 (Chen and Miyahara 2012) や潮汐波 (Yamashita *et al.* 2002) の日々変動が常に存在することが分かっています。成層圏から下部熱圏にわたる中性大気風変動と下部熱圏電流変動の因果関係解明をめざして研究を現在進めているところです。

ここでは、電離圏と中性大気の結合過程について私が直接関係したごく一部の研究について紹介しました。しかし、両領域の結合は様々な物理過程を通じて起こっています。この過程を大循環モデル使用して研究すべく、九州大学中層大気大循環モデルをさらに発展させ熱圏モデルと結合させることにより、両領域の結合過程の研究が三好勉信さんと藤原 均さんによって進められました (例えば, Miyoshi and Fujiwara 2003; Fujiwara and Miyoshi 2006). この一連の研究が、気象学会2010年度堀内賞「地表から熱圏までを含む大気大循環モデルの開発と大気領域間結合過程の研究」として高く評価されたことは記憶に新しいところです。この研究がさらに多くの研究者によって進められ、Whole atmosphere-ionosphere model GAIA として世界に先駆けて成果をあげつつあります (例えば, Jin *et al.* 2012; Liu *et al.* 2013). この分野の開拓を一つの研究目標としてきた者として、気象学と超高層大気物理学の連携によるモデル開発が実現したことを大変うれしく思っています。今後両分野の研究者の協力により研究がさらに進展することを願っています。

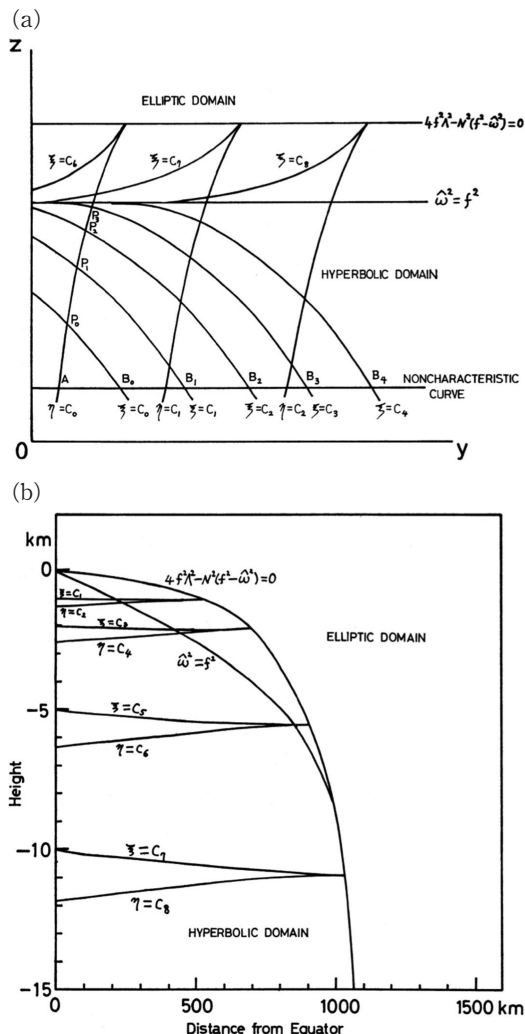
6. 大気力学の理論的研究

ここでは、理論的興味に基づいて行ったクリティカルレベルでの波の振る舞いに関する研究と、慣性重力波に伴う 3 次元波活動度フラックスの研究について紹介したいと思います。

6.1 回転系上のクリティカルレベルでの波の振舞
ラプラス潮汐方程式において、波の振動数とコリオリパラメータが一致する緯度 (第 6 図参照) は方程式の見かけの特異点であり、解は特異性を示さないことが知られています (例えば, Flattery 1967). 一方で、一様回転系 (f 平面) で平均帯状流が高度のみの関数である場合には、慣性重力波のドップラシフトした振動数とコリオリパラメータが一致する高度 (Jones' critical level) では、解が特異性を示すことが知られています (Jones 1967). また、Lindzen (1970) は、赤道 β 平面上で平均帯状流が高度のみの関数である場合の Jones' critical level での赤道波について数値計算と数理解析により、解は特異性を持たないことを示唆しました。私は、 f 平面と β 平面での解の振舞の違いについて興味を持ち、Miyahara (1976) で β 平面上の数値計算と微分方程式の特異点解析により、Jones' critical level で解が特異性を持つことを示しました。その後 Kitchen and McIntyre (1980) が、Ray tracing の手法を使って β 平面での波動伝播解析を実行し、Jones' critical level で解は特異性を持たないことを示しました。この論文のプレプリントを受け取った私は1976年論文の特異点解析に不備があることを知り、系を記述する偏微分方程式の双曲型領域における特性曲線解析を行いました (Miyahara 1981b). 第13図 a, b に、その結果の一部が示されています。この論文で、Jones (1967) の条件設定では解は特異性を持つが、Lindzen (1970) や Miyahara (1976) の条件下では特異性を持たないことが結論づけられました。Miyahara (1976) の数値計算結果は、単に特性曲線が Jones' critical level 付近に集中することによる見かけ上の特異性にすぎないことが示され、Kitchen and McIntyre (1980) の結果を Ray tracing の手法に類似した特性曲線解析で再確認することができました。

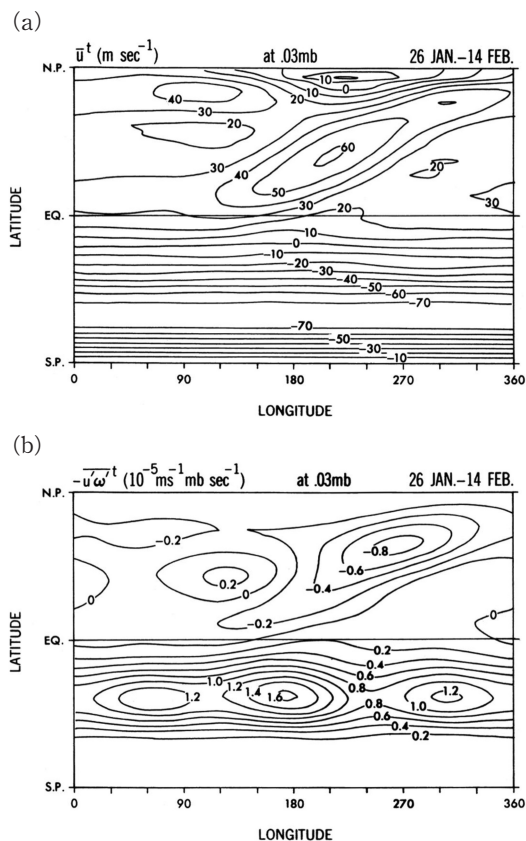
6.2 慣性重力波に適用可能な 3 次元波活動度フラックスの研究

4 節で、GFDL “SKYHI” 中の擾乱について EP フラックスや内部重力波についての帯状平均を用いた解析例を示し、重力波が中層大気循環で重要な役割を果たしていることを述べました。重力波は水平スケールが小さく、その励起源や鉛直伝播特性も局所性を持つと考えられるので、同じ論文 (Miyahara *et al.* 1986) で、モデルの各グリッド点での時間平均をとつ



第13図 (a) f -平面で $\bar{u}(z)$ の場合の双曲型領域 (Hyperbolic Domain) における特性曲線の分布. 境界 (Noncharacteristic Curve) から出た波は特性曲線 $\xi = \text{const.}$ に沿って伝播し, $\omega^2 = f^2$ に漸近する. または, もう一つの特性曲線 $\eta = \text{const.}$ に沿って伝播し, $\omega^2 = f^2$ を通り抜け, 楕円型領域 (Elliptic Domain) との境界で反射して特性曲線 $\xi = \text{const.}$ に沿って伝播し, $\omega^2 = f^2$ に漸近する. 境界上で滑らかに分布した波は, 特性曲線が $\omega^2 = f^2$ に漸近することにより空間変化が急峻となり, $\omega^2 = f^2$ で特異性を示す. Jones (1967) の結果と一致. (b) β 平面で Lindzen (1971) で使用された $\bar{u}(z)$ の場合の, 双曲型領域における特性曲線の分布. この場合は, $\xi = \text{const.}$ $\eta = \text{const.}$ のどちらの特性曲線も $\omega^2 = f^2$ に漸近しないため, 解は $\omega^2 = f^2$ で特異性を示さない. Miyahara (1981b) より引用.

た解析も行いました. 第14図 a, b には上部中間圏における, 時間平均東西風 \bar{u}' と東西および南北波数 5 以上の擾乱成分による, $\bar{u}'\omega'^t$ の緯度経度分布が示されています. 定常プラネタリー波が卓越する冬半球では, \bar{u}' に明らかな東西波数 1 成分の卓越がみられ, この分布と高い負の相関を持つ, $\bar{u}'\omega'^t$ の分布がみられることがわかります. この構造は, 局所的な時間平均東西風の向きとは逆方向の位相速度を持つ内部重力波が局所的に鉛直伝播していることを示しています. これに対して夏半球側では東風が卓越し, 経度方向に一樣な \bar{u}' の構造がみられます. しかし, $\bar{u}'\omega'^t$ は経度方向に一樣ではなく 3 カ所で大きな値を示していること



第14図 (a) GFDL “SKYHI” によりシミュレートされた, 時間平均東西風の緯度経度分布 (高度 0.03 hPa, 1 月 26 日 - 2 月 14 日平均). 単位は ms^{-1} . (b) 同時期同高度における内部重力波による, 東向き運動量の鉛直輸送時間平均の緯度経度分布. 等圧面座標系での $-\bar{u}'\omega'^t$ (単位 $10^{-5} \text{ms}^{-1} \text{hPa s}^{-1}$) の分布が示されている. Miyahara *et al.* (1986) より引用.

がわかります。この経度分布は、対流圏熱帯域の3カ所の波源で励起された東向きに伝播する重力波が、東風の中を中間圏まで波源分布の情報を保ちながら伝播してきたものであることが他の高度での解析によりわかりました。

ここで解析した $\overline{u'w'}$ は、レイノルズストレステンソルの一成分であり、これに基づいて解析を行ったわけです。私はこの解析を実行した当時から、EPフラックスで定式化されているのと同様な手段で、慣性内部重力波に伴う2次のオーダーの物理量と関係づけることが可能な時間平均フラックスの定式化についても研究に取り組んでいました。私と同時期にGFDLに滞在していたPlumbさんが、準地衡風擾乱について時間平均を用いた3次元フラックスの定式化を完成しており(Plumb 1986)、GFDLでのセミナーでも発表していました。私も同様なことを慣性重力波について研究していることを彼に話したことはありますが、互いに深く議論することなく両名ともGFDLを離れ帰国しました。帰国後は先に述べた中層大気循環モデル開発やその他の研究に力を集中しましたので、時折思い出して式変形などを試みることはありましたが、この研究に集中的に時間を割くことはありませんでした。

何がきっかけであったかはよく覚えていませんが、2000年代の中頃になってあらためて、Plumb (1985, 1986), Trenberth (1986), Takaya and Nakamura (2001) などを読み返して定式化を試み、慣性内部重力波に適用できる3次元波活動度フラックスを導き、Miyahara (2006) を発表しました。その結果を簡略化してブシネスク系で示すと以下ようになります。

時間平均した運動方程式および密度変化の式を、3次元残差循環と波活動度フラックスを含む形に変形すると、変換された時間平均3次元方程式は

$$F \equiv \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(\overline{u'^2} - \overline{v'^2} - \overline{w'^2} + \frac{\overline{r'^2}}{N^2}) & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} + \frac{f}{N^2} \overline{v'r'} \\ \overline{u'v'} & \frac{1}{2}(\overline{v'^2} - \overline{u'^2} - \overline{w'^2} + \frac{\overline{r'^2}}{N^2}) & \overline{v'w'} - \frac{f}{N^2} \overline{u'r'} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \hat{c}_{gx} \frac{E}{\hat{c}_x} & \hat{c}_{gy} \frac{E}{\hat{c}_x} & \hat{c}_{gz} \frac{E}{\hat{c}_x} \\ \hat{c}_{gx} \frac{E}{\hat{c}_y} & \hat{c}_{gy} \frac{E}{\hat{c}_y} & \hat{c}_{gz} \frac{E}{\hat{c}_y} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (c_{gx} - \bar{u})k & (c_{gy} - \bar{v})k & c_{gz}k \\ (c_{gx} - \bar{u})l & (c_{gy} - \bar{v})l & c_{gz}l \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{E}{\bar{\omega}} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{D\bar{u}}{Dt} - f\bar{v}^* &= -\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x} - (\nabla \cdot F)_x \\ \frac{D\bar{v}}{Dt} + f\bar{u}^* &= -\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial y} - (\nabla \cdot F)_y \\ \frac{D\bar{r}}{Dt} - N^2 \bar{w}^* &= -\frac{\partial \overline{r'w'}}{\partial z} \end{aligned} \quad (5)$$

となります。ここで $\bar{\quad}$ は局所的な時間平均を表しています。また、 r は浮力であり、その他の変数は、慣用に従っています。

この式に含まれている

$$\begin{aligned} \bar{u}^* &= \bar{u} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\overline{u'r'}}{N^2} \right) + \frac{1}{f} \frac{\partial \bar{S}}{\partial y} \\ \bar{v}^* &= \bar{v} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\overline{v'r'}}{N^2} \right) - \frac{1}{f} \frac{\partial \bar{S}}{\partial x} \\ \bar{w}^* &= \bar{w} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\overline{u'r'}}{N^2} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\overline{v'r'}}{N^2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

は3次元残差循環であり、擾乱の運動エネルギーと位置エネルギーの差 $\bar{S} = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} - \frac{\overline{r'^2}}{N^2})$ 、擾乱による水平密度輸送 $\overline{u'r'}$ 、 $\overline{v'r'}$ を含んだ形で表されています。この3次元残差循環は時間平均場および擾乱の振幅が波長に比べてゆっくり変化しているWKB的条件下では、オイラー平均流と擾乱に伴うストークスドリフトの和になり、近似的に3次元物質循環を表すことがわかりました。

また、擾乱の2次の項で構成されるテンソル F は(7)式であたえられます。

\mathbf{c}_g は擾乱の対地群速度ベクトル、 $\hat{\mathbf{c}}_g$ は局所的な時間平均流に相対的な群速度ベクトル、 c は擾乱の対地位相速度、 \hat{c} は局所的な時間平均流に相対的な位相速度であり、サフィックス x, y はそれぞれの方向の群速度成分および位相速度を表しています。 $\bar{\omega}$ は擾乱のドップラーシフト振動数、 E, k, l は、それぞれ擾

乱のエネルギー, x , y 方向の波数です。(7)によりテンソル F は, 擾乱に伴う東西および子午面方向の擬運動量フラックスをあたえる3次元波活動度フラックスであることがわかります。

この論文では定式化およびその物理的意味について述べたのみで, 具体的なデータへの適用は行っていません。その後, 具体的なデータ解析への適用や理論の更なる展開を論じた論文が発表されました (Kawatani *et al.* 2010; Kinoshita *et al.* 2010; Noda 2010; Shutts and Vosper 2011; Kinoshita and Sato 2013a,b)。私の論文が, この方面の研究の発展のきっかけとなったことを大変うれしく思っています。

7. 中層大気力学・化学・気候プロジェクト研究

国内の中層大気力学・化学研究者の間では, 国際的プロジェクトである Stratospheric Processes And their Role in Climate (SPARC) の下で, プロジェクト研究推進計画が練られてきました。具体的には国内の中層大気に関連する多くの研究者が集まり, 廣田勇先生を領域代表者として特定領域研究の申請を行ってきました。長期にわたる関係者の努力がようやくにして実り, 平成11年度-平成14年度の特定領域研究「成層圏力学過程とオゾンの変動およびその気候への影響」が採択されるに至り, 廣田先生よりパトタッチを受けた私が領域代表者を務めることとなりました。このプロジェクトには中層大気力学・化学とそれに関連する分野の多数の研究者・院生が参加して研究が遂行されました。中層大気力学・化学素過程の研究, 気候変動やオゾンホール将来予測など多岐にわたる研究が実行され, この中から多数の若手研究者が育ち, 今では中堅を担う研究者として各方面で活躍しておられます。また, プロジェクトの中で国際シンポジウムや一般市民を対象とした公開シンポジウムを開催したことなどが思い出されます。プロジェクト研究の主催は初めての経験であり自らの研究遂行とは異なる苦労もありましたが, 多数の研究者や院生の方々の協力をいただきながら進めることができました。この分野の発展に少しでも寄与できたことをうれしく思っています。

8. 研究生活を振り返って

私の研究生活で大きな転機となったのは, 1982年にハワイで開催された日米セミナー「中層大気力学」でした。このセミナーは松野先生, 故 Holton 先生を双

方の代表者として開催されたもので, 本日の私の話に登場した多くの方が日米双方より参加し, 特に日本からは若手の研究者院生が多く参加しました。その後の中層大気力学の中心課題となった多くのテーマについての発表があり大きな刺激となりました。また, 多くの海外の研究者と共同研究を行うきっかけとなりました。セミナーの報告 (廣田ほか 1983) が天気に掲載されています。廣田先生による概要報告と, 林祥介さん山中大さんによる大変奇抜な報告書で, 参加者の似顔絵もすばらしいできばえです。今とは違って気軽に国際会議に出席できる時代ではなく, 当時の若手が感じ取った雰囲気を知るためにも, 今の若い方々に是非読んでいただきたいと思えます。

また, GFDL とボストン大学への, 二度にわたる海外長期滞在は Mahlman さん, 故林 良一さん, Forbes さんを始めとして多くの海外研究者と共同研究を行う貴重な機会となり, 短期滞在では体験することができない多くの経験を積むことができました。昨今では短期の国際会議出席等は容易にできるようになりましたが, もし可能であれば長期滞在しての研究を行われるよう若い方々にお勧めしたいと思います。

謝 辞

大学院に進学し大気力学の研究を始めて40数年の年月が瞬く間に過ぎてしまいました。大学院で研究を指導していただき, この道へ導いていただいた故澤田龍吉先生, 松野太郎先生, 故瓜生道也先生に感謝致します。さらに当時の大気物理研究室・地球物理研究室の皆様にも感謝致します。あの当時, 大学院で熱心に議論しました楽しく遊んだことが思い出されます。また, 今日まで超高層大気・中層大気分野で折に触れて激励いただいた, 加藤 進先生, 廣田 勇先生に感謝致します。

ここではそれぞれのお名前はあげませんが, 大学の同僚の方々, 国内外の共同研究者の方々, 大学と一緒に研究を進めた大学院生および学部学生の方々, そして研究推進を支えていただいた大学事務職員の方々にこの場を借りて感謝致します。

最後に, 私の好き勝手な研究生活を文句も言わずに支えてくれた家族全員にも感謝したいと思います。

参 考 文 献

Andrews, D. G. and M. E. McIntyre, 1976: Planetary waves in horizontal and vertical shear: The general-

- ized Eliassen-Palm relation and the mean zonal acceleration. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2031-2048.
- Andrews, D. G., J. D. Mahlman and R. W. Sinclair, 1983: Eliassen-Palm diagnostics of wave-mean flow interaction in the GFDL "SKYHI" general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 2768-2784.
- Andrews, D. G., J. R. Holton and C. B. Leovy, 1987: *Middle Atmosphere Dynamics*. Academic Press, 489 pp.
- 荒牧優衣, 2012: 九州大学中層大気大循環モデルおよび準三次元ダイナモモデルを用いた電離圏電流変動の研究. 九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻, 修士論文.
- Booker, J. R. and F. P. Bretherton, 1967: The critical layer for internal gravity waves in a shear flow. *J. Fluid Mech.*, **27**, 513-529.
- Chapman, S. and J. Bartels, 1940: *Geomagnetism*, Vol. I and II. Clarendon Press, Oxford, 1049pp.
- Chapman, S. and R. S. Lindzen, 1970: *Atmospheric tides*. Reidel, Dordrecht, 201pp.
- Charney, J. G. and P. G. Drazin, 1961: Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **66**, 83-109.
- Chen, Y.-W. and S. Miyahara, 2012: Analysis of fast and ultrafast Kelvin waves simulated by the Kyushu-GCM. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **80**, 1-11.
- Chiu, W. C., 1953: On the oscillations of the atmosphere. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklimatol.*, **A5**, 280-303.
- Ekanayake, E. M. P., T. Aso and S. Miyahara, 1997: Background wind effect on propagation of nonmigrating diurnal tides in the middle atmosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **59**, 401-429.
- Eliassen, A. and E. Palm, 1961: On the transfer of energy in stationary mountain waves. *Geophys. Publ.*, **22**(3), 1-23.
- Flattery, F. G., 1967: Hough Functions. Technical Report, No. 21, Dept. of Geophysical Sciences, University of Chicago.
- Forbes, J. M., 1981: The equatorial electrojet. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **19**, 469-504.
- Forbes, J. M., N. A. Makarov and Yu. I. Portnyagin, 1995: First results from the meteor radar at South Pole: A large 12-hour oscillation with zonal wavenumber one. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 3247-3250.
- Forbes, J. M., Yu. I. Portnyagin, N. A. Makarov, S. E. Palo, E. G. Merzlyakov and X. Zhang, 1999: Dynamics of the lower thermosphere over South Pole from meteor radar wind measurements. *Earth Planets Space*, **51**, 611-620.
- 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.
- GSWM, 2004: GSWM: Global Scale Wave Model. <http://www.hao.ucar.edu/modeling/gswm/gswm.html> (2013.9.16閲覧).
- 廣田 勇, 林 祥介, 山中大学, 1983: 日米セミナー「中層大気力学」の報告. *天気*, **30**, 133-135.
- Holton, J. R., 1983: The influence of gravity wave breaking on the general circulation of the middle atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 2497-2507.
- 飯田千尋, 2013: 成層圏突然昇温前後の中間圏循環場の変動. 九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻, 修士論文.
- Jin, H., Y. Miyoshi, D. Pancheva, P. Mukhtarov, H. Fujiwara and H. Shinagawa, 2012: Response of migrating tides to the stratospheric sudden warming in 2009 and their effects on the ionosphere studied by a whole atmosphere-ionosphere model GAIA with COSMIC and TIMED/SABER observations. *J. Geophys. Res.*, **117**, A10323, doi:10.1029/2012JA017650.
- Jones, W. L., 1967: Propagation of internal gravity waves in fluids with shear flow and rotation. *J. Fluid Mech.*, **30**, 439-448.
- Kanamitsu, M., K. Tada, T. Kudo, N. Sato and S. Isa, 1983: Description of the JMA operational spectral model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **61**, 812-828.
- Kato, S., 1956: Horizontal wind systems in the ionospheric E region deduced from the dynamo theory of the geomagnetic Sq variation, 2. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **8**, 24-37.
- Kato, S., 1966a: Diurnal atmospheric oscillation. 1. Eigenvalues and Hough functions. *J. Geophys. Res.*, **71**, 3201-3209.
- Kato, S., 1966b: Diurnal atmospheric oscillation. 2. Thermal excitation in the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **71**, 3211-3214.
- 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.
- Kawatani, Y., K. Sato, T. J. Dunkerton, S. Watanabe, S. Miyahara and M. Takahashi, 2010: The roles of equatorial trapped waves and internal inertia-gravity waves in driving the quasi-biennial oscillation. Part II: Three-dimensional distribution of wave forcing. *J.*

- Atmos. Sci., 67, 981-997.
- Kinoshita, T. and K. Sato, 2013a: A formulation of unified three-dimensional wave activity flux of inertia-gravity waves and Rossby waves. *J. Atmos. Sci.*, 70, 1603-1615.
- Kinoshita, T. and K. Sato, 2013b: A formulation of three-dimensional residual mean flow applicable both to inertia-gravity waves and to Rossby waves. *J. Atmos. Sci.*, 70, 1577-1602.
- Kinoshita, T., Y. Tomikawa and K. Sato, 2010: On the three-dimensional residual mean circulation and wave activity flux of the primitive equations. *J. Meteor. Soc. Japan*, 88, 373-394.
- Kitchen, E. H. and M. E. McIntyre, 1980: On whether inertia-gravity waves are absorbed or reflected when their intrinsic frequency is Doppler-shifted towards f . *J. Meteor. Soc. Japan*, 58, 118-126.
- Leovy, C. B., 1964: Simple models of thermally driven mesospheric circulation. *J. Atmos. Sci.*, 21, 327-341.
- Lindzen, R. S., 1970: Internal equatorial planetary-scale waves in shear flow. *J. Atmos. Sci.*, 27, 394-407.
- Lindzen, R. S., 1981: Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown. *J. Geophys. Res.*, 86, 9707-9714.
- Lindzen, R. S. and S.-S. Hong, 1974: Effects of mean winds and horizontal temperature gradients on solar and lunar semidiurnal tides in the atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 31, 1421-1446.
- Liu, H., E. Doornbos, M. Yamamoto and S. Tulasi Ram, 2011: Strong thermospheric cooling during the 2009 major stratosphere warming. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L12102, doi:10.1029/2011GL047898.
- Liu, H., H. Jin, Y. Miyoshi, H. Fujiwara and H. Shinagawa, 2013: Upper atmosphere response to stratosphere sudden warming: Local time and height dependence simulated by GAIA model. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 635-640, doi:10.1002/grl.50146.
- Mahlman, J. D. and L. J. Umscheid, 1984: Dynamics of the middle atmosphere: successes and problems of the GFDL "SKYHI" general circulation model. In *Dynamics of the Middle Atmosphere*, J. R. Holton and T. Matsuno, eds., Terrapub, 501-525.
- Matsuno, T., 1970: Vertical propagation of stationary planetary waves in the winter Northern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, 27, 871-883.
- Matsuno, T., 1971: A dynamical model of the stratospheric sudden warming. *J. Atmos. Sci.*, 28, 1479-1494.
- Matsuno, T., 1982: A quasi one-dimensional model of the middle atmosphere circulation interacting with internal gravity waves. *J. Meteor. Soc. Japan*, 60, 215-226.
- 松野太郎, 1987: 共同利用可能な大気大循環モデルの開発, 昭和61年度科学研究費補助金 (一般 B) 研究成果報告書.
- Miyahara, S., 1975: The effects on the atmospheric lunar tide of the meridional temperature gradient and the zonal winds. *J. Meteor. Soc. Japan*, 53, 55-68.
- Miyahara, S., 1976: Wave absorptions at critical levels in laterally bounded rotating fluids. *J. Meteor. Soc. Japan*, 54, 91-98.
- Miyahara, S., 1981a: Zonal mean winds induced by solar diurnal tides in the lower thermosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 59, 303-319.
- Miyahara, S., 1981b: A note on the behavior of waves around the inertia-frequency. *J. Meteor. Soc. Japan*, 59, 902-905.
- Miyahara, S., 1984: A numerical simulation of the zonal mean circulation of the middle atmosphere including effects of solar diurnal tidal waves and internal gravity waves; Solstice condition. In *Dynamics of the Middle Atmosphere*, J. R. Holton and T. Matsuno, eds., Terrapub, 271-287.
- Miyahara, S., 2006: A three dimensional wave activity flux applicable to inertia-gravity waves. *SOLA*, 2, 108-111.
- Miyahara, S. and Y. Miyoshi, 1997: Migrating and non-migrating atmospheric tides simulated by a middle atmosphere general circulation model. *Adv. Space Res.*, 20, 1201-1207.
- Miyahara, S. and M. Ooishi, 1997: Variation of Sq induced by atmospheric tides simulated by a middle atmosphere general circulation model. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 49, 77-87.
- Miyahara, S., Y. Hayashi and J. D. Mahlman, 1986: Interactions between gravity waves and planetary-scale flow simulated by the GFDL "SKYHI" general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 43, 1844-1861.
- Miyahara, S., Y. Yoshida and Y. Miyoshi, 1993: Dynamic coupling between the lower and upper atmosphere by tides and gravity waves. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 55, 1039-1053.
- 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.
- 永田 武, 等松隆夫, 1973: 超高層大気の物理学. 裳華房, 453pp.
- Noda, A., 2010: A general three-dimensional trans-

- formed Eulerian mean formulation. *SOLA*, **6**, 85–88.
- Plumb, R. A., 1985: On the three-dimensional propagation of stationary waves. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 217–229.
- Plumb, R. A., 1986: Three-dimensional propagation of transient quasi-geostrophic eddies and its relationship with the eddy forcing of the time-mean flow. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 1657–1678.
- Portnyagin, Y. I., J. M. Forbes, N. A. Makarov, E. G. Merzlyakov and S. Palo, 1998: The summertime 12-hour wind oscillation with zonal wavenumber $s=1$ in the lower thermosphere over the South Pole. *Ann. Geophys.*, **16**, 828–837.
- Sawada, R., 1966: The effect of zonal winds on the atmospheric lunar tide. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklimatol*, **A15**, 129–167.
- Shutts, G. J. and S. B. Vosper, 2011: Stratospheric gravity waves revealed in NWP model forecasts. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 303–317.
- Takahashi, H., C. M. Wrasse, J. Fechine, D. Pancheva, M. A. Abdu, I. S. Batista, L. M. Lima, P. P. Batista, B. R. Clemesha, N. J. Schuch, K. Shiokawa, D. Gobbi, M. G. Mlynchak and J. M. Russell, 2007: Signatures of ultra fast Kelvin waves in the equatorial middle atmosphere and ionosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L11108, doi:10.1029/2007GL029612.
- Takaya, K. and H. Nakamura, 2001: A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 608–627.
- Takeda, M. and H. Maeda, 1980: Three-dimensional structure of ionospheric currents. 1. Currents caused by diurnal tidal winds. *J. Geophys. Res.*, **85**, 6895–6899.
- Trenberth, K. E., 1986: An assessment of the impact of transient eddies on the zonal flow during a blocking episode using localized Eliassen–Palm flux diagnostics. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 2070–2087.
- Uryu, M., 1973: On the transport of energy and momentum in stationary waves in a rotating stratified fluid. *J. Meteor. Soc. Japan*, **51**, 86–92.
- Uryu, M., 1974: Mean zonal flows induced by a vertically propagating Rossby wave packet. *J. Meteor. Soc. Japan*, **52**, 481–490.
- Vincent, R. A. and I. M. Reid, 1983: HF Doppler measurements of mesospheric gravity wave momentum fluxes. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1321–1333.
- Watanabe, S. and S. Miyahara, 2009: Quantification of the gravity wave forcing of the migrating diurnal tide in a gravity wave-resolving general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **114**, D07110, doi:10.1029/2008JD011218.
- Yamashita, K., S. Miyahara, Y. Miyoshi, K. Kawano and J. Ninomiya, 2002: Seasonal variation of non-migrating semidiurnal tide in the polar MLT region in a general circulation model. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **64**, 1083–1094.
- Yamazaki, Y., K. Yumoto, D. McNamara, T. Hirooka, T. Uozumi, K. Kitamura, S. Abe and A. Ikeda, 2012: Ionospheric current system during sudden stratospheric warming events. *J. Geophys. Res.*, **117**, A03334, doi:10.1029/2011JA017453.

A Record of My Study on Middle Atmosphere Dynamics

Saburo MIYAHARA*

* *Emeritus Professor, Kyushu University.*
E-mail: s_miyahara@kyudai.jp

(Received 24 September 2013; Accepted 16 October 2013)
