

論文の内容の要旨

論文題目 A formulation of three-dimensional residual mean flow and wave activity flux on the primitive and quasi-geostrophic equation systems
(準地衡流系及びプリミティブ方程式系における
3次元残差流と波活動度フラックスの定式化)

氏名 木下 武也

中層大気における大気大循環は、様々なスケールの波により駆動されている。これまで緯度高度断面における変形オイラー平均 (Transformed Eulerian-Mean : TEM) 系を用いた2次元循環の解析により、成層圏のブリュワ・ドブソン循環はプラネタリー波・傾圧波・大気重力波、中間圏の夏極から冬極に流れる子午面循環は主に大気重力波によって駆動されていることがわかっている。しかしながら、上記の循環を含む空気塊の経度方向の流れや、子午面循環の経度依存性については、まだ解明されていないことが多い。また近年、観測技術やモデル分解能の向上により、今まで以上に高精度な大気現象の理解が進んでいる。その結果として、これまでの東西平均を用いる解析では見られなかった、局所的に物質輸送や擾乱活動の大きい領域が存在することがわかってきた。そこで、TEM系を3次元に拡張する研究がこれまでいくつか行われてきた。しかし、準地衡流系においてはロスビー波、プリミティブ方程式系においては重力波というように、限られた擾乱に適用できるものであった。以上を踏まえ、本研究では、大気微量成分の3次元輸送を評価するために、ロスビー波と重力波を含む全ての大気内部の擾乱に適用可能なTEM系の3次元への拡張をプリミティブ方程式系において行うことを目的とした。

TEM系の残差流は、ゆっくりと変化する背景場の下で小振幅擾乱を仮定するとオイラー平均流とストークスドリフトの和となり、近似的に空気塊の平均的な輸送を表わすラグランジュ平均流に一致する。まず、プリミティブ方程式系における3次元ストークスドリフト (PRSD) を、その定義から式変形を行うことで定式化した。また同様の手法で準地衡流系における3次元ストークスドリフト (QGSD) を得た。PRSDは、ロスビー数が小さい仮定の下でQGSDに一致し、 f 平面仮定の下で重力波の分散関係式を用いるとMiyaharaやKinoshita他が導出した重力波に伴うストークスドリフトに一致する。従って、PRSDは重力波とロスビー波両者に適用可能である。このPRSDをERA-Interim再解析データに適用し、上部対流圏における擾乱に伴う3次元残差流を調べた結果、ストームトラックの上流と下流域で、それぞれ擾乱の構造の違いによる特徴的な流れが存在することが明らかになった。

次に、PRSDを時間平均した水平方向の運動方程式に代入することで、背景場への波強

制に対応する 3 次元波活動度フラックス(3D-flux-M) を定式化した。PRSD と 3D-flux-M を重力波パラメタリゼーションを用いず重力波を陽に再現できる高分解能大循環モデルデータに適用した。7 月におけるアンデス山脈付近における重力波に伴う物質輸送を調べた結果、1hPa より上部(中間圏)では、重力波の砕波に伴う南極向きの流れが存在し、1hPa より下部(成層圏)ではアンデス山脈の西(東)側で、南極(赤道)向きの流れが存在することが明らかになった。これはアンデス山脈で発生した地形性重力波がほぼ真上に伝播し、エネルギー分布が地形に固定されているためと考えられる。

続いて、波の伝播を記述する 3 次元波活動度フラックス(3D-flux-W) を 3D-flux-M を用いて導出した。まず、3D-flux-W と群速度を関係づけるために得るために、ロスビー波と重力波の両方を含む分散関係式を導出し、これを用いて修正した波活動度密度を導出した。また、得られた 3D-flux-W が、ロスビー数の小さい仮定の下では Plumb が導出したロスビー波の伝播を記述する 3 次元波活動度フラックスに一致し、f 平面仮定の下で、重力波の分散関係式を用いると、Miyahara が導出した重力波の 3 次元波活動度フラックスに一致することを示した。従って、3D-flux-W はロスビー波と慣性重力波両者の伝播を統一的に記述できるものである。

ここで重要な点は、3D-flux-M と 3D-flux-W が異なる形をしていることである。ERA-Interim 再解析データを用いてストームトラック領域における擾乱に伴う 3 次元残差流と波活動度フラックスの収束発散の分布を調べたところ、3D-flux-M の収束発散は擾乱に伴う 3 次元残差流とほぼ一致するのに対し、3D-flux-W とはストームトラックの上流と下流域において若干異なるのがわかった。一方、3 次元波活動度フラックスの向きと大きさを調べた結果、3D-flux-W は Plumb のロスビー波の特性を基に導かれた 3 次元波活動度フラックスとほぼ一致するのに対し、3D-flux-M は、ストームトラック領域全体で異なっていた。これは 3D-flux-M が波の作る平均流に着目して導出されたフラックスであり、波そのものの性質を用いて導出されたものではないため、特に東西成分に対して群速度に比例しないことが原因と考えられる。以上の結果は、擾乱に伴う 3 次元物質輸送の解析には 3D-flux-M を、波の伝播を記述する際は 3D-flux-W というように、目的に応じて異なる 3 次元波活動度フラックスを用いる必要があることを意味する。

赤道中層気には、東西風が約 2 年で振動する現象(QBO) や半年周期で振動する現象(SAO) が存在する。これまでの研究から、QBO の駆動メカニズムには、内部重力波の他、赤道ケルビン波、混合ロスビー重力波等の赤道捕捉波(赤道波) が関わっていることがわかっている。内部重力波の伝播や砕波を表わす 3 次元波活動度フラックスは Miyahara や Kinoshita et al. によって導出されているが、赤道波に適用可能な 3 次元波活動度フラックスとストークスドリフトは未導出である。そこで、本研究では、時間平均を用いて、赤道ベータ面における上記二つの定式化を行った。得られた 3 次元波活動度フラックスは、その収束発散が背景場に対して 3 次元の波強制を与えること、そして南北方向に積分したフラックスが赤道波の群速度と南北方向に積分した波活動度密度の積に一致することがわか

った。赤道波の群速度に比例するのが、フラックスそのものではなく南北に積分したものであることは、TEM 系の赤道波に伴う 2 次元の Eliassen-Palm フラックスの鉛直成分において示されているが、本研究では新たに 3 次元の波活動度フラックスの東西成分について成り立つことを示したことになる。

以上の定式では、擾乱の位相を消すために時間平均を用いてきたため、準停滞性擾乱には適用できない問題がある。そこで本研究では、最後に、準停滞性ロスビー波に適用可能な 3 次元 Stokes drift を反対称渦拡散テンソルを用いて導出した。

本研究で導出した定式には、いくつか制約が残されている。一つはコリオリパラメータを分母に含むため、赤道では適用できないこと、二つめは振幅が急激に変化する擾乱に伴う物質輸送を表現できないことである。それでもなお、得られた 3 次元残差流と波活動度フラックスは、上記の問題を除いて、観測やモデルの高解像度化、高分解能化が進む中で、3 次元の物質輸送や擾乱活動を詳細に解析できるものである。これらを用いた解析を進めることで、より高精度な気候全体の予測が進むと考えられる。