

「波の活動度」および「波の活動度フラックス」

「波の活動度フラックス (以下フラックス)」は、現象の理論的な理解に役立つのみならず、実際の解析にも非常に有用な物理量である。フラックスの性質として重要なことは、1. 平面波の極限でフラックスが波 (波束) の群速度に比例する事、2. フラックスの収束 (発散) が基本場西風の減速 (加速) と等価な事、の2点 が理論的に証明される事である。1の性質から、フラックスを描画する事により波束の実際の振る舞いを解析する事が出来る。また、2の性質から、波が基本場に及ぼす実際の影響を解析する事も出来る。従って例えば、大気中または海洋中のどの領域でロスビー波や重力波などが発生し、どのように伝播し、どの領域で減衰するか、そしてそれによる基本場への影響はどのようなものか、という、いわゆる「波と基本場 (または平均流) との相互作用」の問題を観測や数値モデルのデータを用いて考えるとき、「フラックス」を用いると理解しやすい場合が多い。よって、フラックスを用いた研究を、最近多々見かけるようになったが、数種類提案されているフラックスの物理的意味を「正しく」理解して使用する事が必要である。なお、「波と基本場 (平均流) との相互作用」の問題はかつて地球流体力学の花形であり、長い歴史をもち、参考文献も非常に多い (例えば、瓜生 (1976) 等を参照の事)。以下特に重要なものを紹介しながら、フラックスの概念の簡潔な説明を試みる。

「波の活動度フラックス」は「波の活動度 (wave-activity)」の保存則中に現れる物理量である。「波の活動度」はその名通り、波の活動の度合いを表す物理量である。そのような物理量としては、「波のエネルギー」がまず思い浮かぶが、基本場にシアが存在する場合、一般に波のエネルギーは保存しない。それは、シアを通じて、波と基本場との間にエネルギーのやり取りがあるからである。一般に基本場には、偏西風の分布などを思い起こせば分かりやすいが、シアがある

と考える事が出来るため、「波の活動度」として波のエネルギーを考えるのはやや不適切であるといえる。

シアのある基本場中での「波の活動度」として、地球流体力学でよく考えられるのが、擬運動量に関するような物理量である。これは東西方向の運動量保存則 (より正確には、回転球面上の流体の角運動量保存則) に関係した量で、東西一様な基本場 (すなわち南北シアのみあるような基本場) 中で厳密に保存する。実際の中高緯度大気の偏西風基本場は東西非一様であると考えられるが、その場合も非一様性は非常に弱い (すなわち、偏西風の東西シアより南北シアの方が卓越する) と考えて、近似的に擬運動量が保存するとみなす事もある (後述)。

波の活動度のフラックスの導出は、大きく分けると2種類が考えられる。すなわち、A. 「波の活動度」を定義してその保存則を導く (保存則中にフラックスが現れる) 方法と、B. 基本場のフィードバックの式を考える方法とである。ロスビー波に関しては、「波の活動度」は一般に擾乱エンストロフィーを基本場の有効ベータ効果で割ったような量で定義できる (他の定義の仕方もある) ため、A, B のどちらでもフラックスを導出できるが、重力波に関しては、「波の活動度」を定義しにくいいため、Bの方法で導出するのが一般的である。

フラックスにはいくつかの種類が提案されている。なぜ複数存在するかというと、それは東西方向の伝播をどのように表現するかによって研究者による差異があるからである。逆に言うと、様々なフラックスも、東西平均すれば、基本的にはひとつの形に帰着する。

その形は、いわゆる伝統的なEP (Eliassen-Palm) フラックスである。このフラックスは、東西平均された形をしており、南北一鉛直方向の2次元伝播を表す。波の活動度及びそのフラックスを考える上での「基本形」とも呼べるものであり、準地衡系の場合には、ロスビー波束の群速度伝播やその基本場への影響を考えるのに役立つ。一方、プリミティブ方程式系の場合

は、重力波束の影響も含む。この形のフラックスの参考文献は山ほどあるのだが、ここでは Andrews *et al.* (1987) を挙げたい。

フラックスの2次元から3次元への拡張は、歴史的にロスビー波束について行われてきた。Hoskins *et al.* (1983), Trenberth (1986), Plumb (1986) のフラックスが良く使われる。いずれも、時間平均した物理量として定義され、移動性の短周期傾圧擾乱(移動性高低気圧)の波束の解析に適している。Trenberth (1986) の導出は上記Bの方法、Plumb (1986) のものは上記Aに依る(Hoskinsの導出はやや特殊なので割愛する)。また、Plumb (1986) の導出は、東西非一様な基本場中の擾乱について行われているので、厳密な意味での保存則の導出ではないが、基本場の東西非一様性が弱いと仮定して近似的な保存則(及びそのフラックス)を導出している。もちろん、東西一様な基本場では厳密な保存則に帰着する。

実は、Hoskins または Trenberth のフラックスは厳密な意味では3次元の波束伝播に平行ではない。厳密に3次元群速度と平行になりうるのは Plumb (1986) のフラックスなのだが、今までの実際の解析では、計算のやや簡便な Hoskins または Trenberth のフラックスが使われる事が多かったようである。

次に、惑星波やブロッキング高気圧のような長周期準停滞性擾乱に対するフラックスを紹介する。この場合、上記のフラックスと違う点は、停滞性擾乱は空間位相が固定されているため、時間平均を取ってもフラックス成分から波の位相依存性を除去する事が出来ないことである。従って、導出にはそれなりの工夫を要するが、詳細は割愛する。

東西一様な基本場中の停滞性擾乱のためのフラックスとして、Plumb (1985) や Kuroda (1996) をあげる事が出来る。Kurodaの結果は、Plumb (1985) の導出をより理論的に精緻に行ったもので、フラックスの形は同一である。これらのフラックスは惑星波伝播の記述に最適であると考えられる。一方、東西非一様な基本場中の停滞性擾乱のためのフラックスとして、Takaya and Nakamura (1997, 2001) が挙げられる。これらは、Plumbの成果を基に、東西非一様な基本場中の波の活動度の近似的な保存則を導いたものである。このフラックスは、例えば、東西非一様な基本場中のブロッキング現象に伴うロスビー波束の解析等に適している。また、Takaya and Nakamura (2001) のフラックスは、移動性擾乱の snapshot の

伝播も表現可能である。

ここまで紹介してきたフラックスは、主にロスビー波を対象としていたが、最近、重力波の3次元波束伝播を表すフラックスが提案された。Miyahara (2006) などがそれで、時間平均された形で定義されている。重力波束の3次元伝播はこれまで未開拓な分野であり、これからの活用が期待される。

波の活動度フラックスは「打出の小槌」ではない。これをプロットすれば、何でも現象が説明されるわけではない。また、実際の解析に当たっては、対象とする現象は移動性擾乱か停滞性擾乱か、または基本場は東西一様か非一様なのかによく注意する必要がある。しかし、このような点に注意しながら、正しくフラックスを選択すれば、フラックスは非常に有力な解析ツールになりうる。この拙文が、その一助になれば、まことにさいわいである。

最後に余談であるが、「波の活動度」として、まれに擬エネルギーに関する物理量に言及される事がある (Andrews 1983)。擬エネルギーは東西非一様な基本場でも厳密に保存するのだが、そのフラックスは実際の解析にはやや使いにくい。理論的には大変興味深い物理量なのだが、この稿ではその説明は割愛する。

参 考 文 献

- Andrews, D. G., 1983: A conservation law for small-amplitude quasigeostrophic disturbances on a zonally asymmetric basic flow. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 85-90.
- Andrews, D. G., J. R. Holton and C. B. Leovy, 1987: *Middle Atmosphere Dynamics*. Academic Press, 489 pp.
- Hoskins, B. J., I. N. James and G. H. White, 1983: The shape, propagation and mean-flow interaction of large-scale weather systems. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1595-1612.
- Kuroda, Y., 1996: Quasi-geostrophic 3-dimensional E-P flux of stationary waves on a sphere. *J. Meteor. Soc. Japan.*, **74**, 563-569.
- Miyahara, S. 2006: A three dimensional wave activity flux applicable to inertio-gravity waves. *SOLA*, **2**, 108-111.
- 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.

- Takaya, K. and H. Nakamura, 1997 : A formulation of a wave-activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 2985-2988.
- 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.
- 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.
- 瓜生道也, 1976 : 波とそのまわりの平均運動. *天気*, **23**, 3-22.

(独立行政法人海洋研究開発機構 高谷康太郎)