

導波管

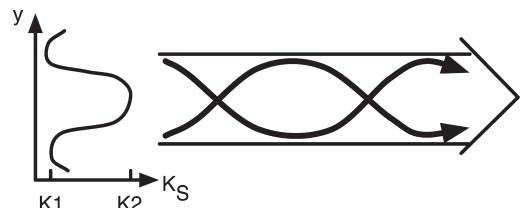
大気及び海洋にも、光ファイバーのような導波管 (waveguide) に相当する構造がある。本解説では、大気中のロスビー波に対する導波管について解説する。ロスビー波に対する導波管は、西風が南北方向に集中して分布する領域 (西風ジェット) に現れる。西風ジェットではロスビー波が捕捉され効率的にエネルギー (厳密には「波の活動度」; 高谷 (2009)) が伝播される。例えば、夏の小笠原高気圧の形成に寄与する「シルクロードパターン」(Enomoto *et al.* 2003) はユーラシア大陸上の亜熱帯ジェットを導波管とするロスビー波である。

ロスビー波の存在には渦度勾配が不可欠である。地球回転の効果に伴う惑星渦度は南北勾配を持つ (ベータ効果)。西風ジェットが存在する場合は、ジェット自体が渦度を持ち、その中心で強い南北渦度勾配を示す。このためジェット上を伝播するロスビー波の場合は、ベータ効果だけでなく、それにジェットの渦度勾配を加えたもの (実効ベータ) を考えなければならない。すなわち、導波管は、西風が集中化して強い渦度勾配が生じることにより形成される。

ロスビー波はそれ自身では西向きへのパターンの移動速度、つまり位相速度を持つ。およそ1週間より長い時間スケールを持つロスビー波は、背景の西風と位相速度とが相殺されるため、パターンがほとんど移動しない。このため地上に対する位相速度はほぼ0と見なしてよい。これを (準) 定常ロスビー波と呼ぶ。その群速度は東向き成分を持ち西風の大きさに比例する。また、その向きは波数ベクトルの向きである。つまり群速度の向きは位相線と直交する。群速度は局所的に集中した波のエネルギーの伝播速度であり、このエネルギーの塊を波束と呼ぶ。波束は様々な波長を持つ波によって構成されている。波束伝播に伴って波の振幅の大きな領域が時間とともに東へ移動する様子が見えれば観測される。

ここで、東西方向に一樣、南北方向に非一樣に分布する西風中を水平に伝播する定常ロスビー波について考えてみよう (Hoskins and Ambrizzi 1993, 以下 HA93)。ここでは対流圏中緯度で典型的な鉛直に一樣な波を考えるため鉛直波数は0となる。詳細は省くが、分散関係式から定常ロスビー波の「全波数」(K_S) が光の屈折率に対応する量であることが導かれる。この量は東西波数と南北波数との自乗和の平方根であり、また、実効ベータを西風風速で割ったものの平方根に等しい。光波がスネルの法則に従って屈折率の大きい方向に屈折するように、定常ロスビー波は K_S の大きい方向に屈折する。

第1図は HA93の第2図 e からの転載である。西風ジェット上では実効ベータが非常に大きく、その緯度中心付近にしばしば K_S の極大が存在する。波束は、その地点での実効ベータと西風風速によって決まる K_S を持つ。東西一樣な西風の場合、東西波数は波束伝播中一定の値を保つため、波束の南北伝播により K_S が変化すると波束の南北波数が変化する。波束は波数ベクトルの向きに進むので、 K_S の極大緯度よりも北に行き過ぎた波束 (図の太矢印) は、南北波数が小さくなり徐々に時計回りに進行方向を変えて、ついには轉向緯度 (南北波数が0になる緯度) で方向を南向きに変える。同様に極大緯度を南向きに過ぎた波束は、極大の南側で北向きに進路を変える。こうして



第1図 左グラフは全波数 K_S の南北分布を示す。右の図の太い矢印は波束伝播を示す。HA93の第2図 e を転載。

K_s の極大付近に捕捉されながら波束が東へと伝播する。これが、西風ジェットがロスビー波に対する導波管となるメカニズムである。

ここで、東西波長の短い、つまり東西波数の大きな波束ほど、中心緯度と転向緯度とが近いことに注意されたい。また、西風ジェットが存在しても、 K_s の極大が伴わなければ導波管とはならない。なお、現実大気では西風は東西に非一様に分布している。この場合は局所的な西風で計算される K_s に基づいて議論されることが多い。厳密ではないものの、西風の東西非一様性は相対的に小さいため実用上は十分であると考えられる。

導波管は、水平に伝播する波束についてのみならず、鉛直方向に伝播する波束に対しても、定義可能である。導波管の形成には渦度の実効ベータ（西風の南北2階微分）のみならず、西風の鉛直1階及び2階微分、そして西風そのものの分布が重要である。Karoly and Hoskins (1982) では成層圏の東西一様な西風中を鉛直及び南北に伝播する波束に対する導波管を議論している。この研究の様に、従来成層圏の大規模波動は、東西一様な西風中を伝播すると仮定して解析が行われてきた。しかし、Nishii and Nakamura (2004, 2005) では東西非一様な西風中を3次元的に伝播する波束に着目し、これに対する導波管の解析を行っている。プロッキング高気圧などの対流圏の循環異常は、その減衰期に波束を下流側に射出することが知られている。成層圏が西風になる寒候期において、その近傍で対流圏と成層圏を繋ぐ導波管が存在すると、波束は成層圏に向けて効率的に射出される。そして成層圏の局所的な循環異常を発達させる。

一般に寒候期成層圏では高度とともに風速が強くなる。詳細は省くが、この時ロスビー波の3次元的な K_s は高さと共に減少する傾向を示す。以後、第1図の中心緯度より北側の部分を緯度ではなく高度方向の図と見なし、また、南北波数を鉛直波数と入れ替えて考える（南北方向の例では北ほど西風が弱まるが、この例では上空ほど西風が強くなることに注意）。そうすると、波束を構成する波のうち、短い東西波長成分

ほど低い高度で下向きに方向を変える、つまり鉛直波数の符号が負になることが分かる。これは、Holton (2004) などの気象力学の教科書で説明されている事実、すなわち東西波長の短いロスビー波は強い西風中を存在できないため、ある高度以上は鉛直伝播できないことと整合的である。

こうして下向きに方向を変えた、短い波長成分で構成された波束は対流圏に向かおうとする。ここで対流圏成層圏間に導波管が存在すると、波束は対流圏まで伝わり、対流圏の局所的な循環異常の発達に寄与する。このような導波管の形成には、実効ベータの極大などの局所的な西風構造が寄与しており、成層圏極夜ジェット中心と対流圏亜寒帯ジェット中心とが近い領域で、導波管が形成される傾向にある。

参考文献

- Enomoto, T., B. J. Hoskins and Y. Matsuda, 2003: The formation mechanism of the Bonin high in August. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129, 157-178.
- Holton, J. R., 2004: *An Introduction to Dynamic Meteorology* (4th ed.). Elsevier Academic Press, 531 pp.
- Hoskins, B. J. and T. Ambrizzi, 1993: Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow. *J. Atmos. Sci.*, 50, 1661-1671.
- Karoly, D. J. and B. J. Hoskins, 1982: Three dimensional propagation of planetary waves. *J. Meteor. Soc. Japan*, 60, 109-123.
- Nishii, K. and H. Nakamura, 2004: Lower-stratospheric Rossby wave trains in the Southern Hemisphere: A case-study for late winter of 1997. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 130, 325-355.
- Nishii, K. and H. Nakamura, 2005: Upward and downward injection of Rossby wave activity across the tropopause: A new aspect of the troposphere-stratosphere linkage. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131, 545-564.
- 高谷康太郎, 2009: 「波の活動度」および「波の活動度フラックス」. *天気*, 56, 831-833.

(東京大学大学院理学系研究科 西井和晃)