

波のいろいろ

廣 田 勇*

1. 波という言葉

前回(天気5月号)は「風のいろいろ」についてお話をしましたので、今回はその続きで気象のなかの「波」について語りましょう。例によって、まずは波という言葉の広がりやを考えるとところから始めます。

「なみ」を表す漢字には、波のほか浪、濤、漣、瀾などがあり、微妙な使い分けをされています。気象予報に出て来るのは「波浪警報」で、勇壮な音楽なら「波濤を越えて」、小説なら「波瀾万丈の生涯」、さらには上野の国立西洋美術館に飾られているクールベの名画「波」等々、いずれも大海原の波のイメージです。そう思って「なみ」の字を良く見ると、すべてサンズイが付いています。つまり、「なみ」とは本来、水の表面の現象なのです。

しかし面白いことに、波の持つ凹凸・起伏の形態や振舞いは、水に直接繋がらない事柄にも比喩的に敷衍され、様々な使い方やをされるようになりました。古いところでは万葉集にある「天の海に雲のなみ立ち…」や古今集の貫之の歌に見られる「水なき空に浪ぞ立ちける」などは良くご存じのことでしょう。もっと身近なところでは、子供のころ端午の節句に唄った童謡「鯉のぼり」の「薨の波と雲の波…」を思い出します。サッカー競技場でサポーターが作るウェーブ、天気予報で使われる寒波や熱波も比喩的な語法です。

このように、波のイメージが広がるにつれ、科学用語にも波の言葉(概念)が使われるようになりました。音波、電磁波、衝撃波、地震波等々です。物理学を少し学んだ方なら、量子力学入門に出て来る「光の粒子性と波動性」の説明を思い出さずしてはなりません。

2. 波の原理

波の「かたち」と「なりたち」を素朴に考えるには、やはり目に見える水の表面の波の話から始めるのが良いでしょう。池で鯉が跳ねたときに出来る波紋、風に吹かれて岸に寄せる湖面のさざなみ、等々です。

いま、水平一様な水面に何らかの力が働いて水の一部が持ち上げられたとすれば、重力の作用により水面の高低(変位)をゼロにするような横向きの運動が生じます。その結果、変位の両側にも(水の出入りによる)水面の高低が生まれます。全体で見ると水の量は変わりませんから、要するに横向き運動と水面の高低とが重力と質量保存とを媒介として結びつけられていることとなります。このことを数学的に定式化したのが初等物理学でいうところの「波動方程式」の原型です。もうちょっとだけ数学の言葉を使えば、重力効果による運動方程式と質量保存則の二つを組み合わせたのですから、教養の物理程度で学ぶ最も易しい時間空間に関する線形2階微分方程式です。高校生にもわかる算術で言えば、サイン関数を2回微分するともとの形になりますから、サインが波動方程式の解となることは自明でしょう。サインカーブはまさに波の形です。気象学でデータ解析に使うフーリエ解析やスペクトル解析なども、結局は中学生にもわかるサインコサインの性質に帰着されます(たとえば「気象解析学」(廣田 1999)を参照のこと)。

この議論で大切なことは、数学的表現以前の直観的理解として、(1)水の表面に見られる凹凸の横向き移動は重力の効果によるものであること、(2)そのときの波の動きとは変位(高低の形態)の動きであって水そのものの流れではないこと、のふたつです。そして同時に、波の形態と振舞いに関して、波頭の水平間隔(つまり波長)、その形(位相)の動き(水の流

* Isamu HIROTA, 京都大学名誉教授。

© 2011 日本気象学会

速とは異なる位相速度)、両者の比で決まる振動数や周期、といった波に伴う基本的な量の意味も納得されるはずで。

ここで述べた水の波はその成因から「重力波」と呼ばれます。この仲間には、内部波・外部波・表面波などの少しずつ性質の異なったものがあります。さらに、前回説明した地球自転のコリオリ効果を受けた「慣性重力波」もあります。それらの意味も後でゆっくりテキストを読んで勉強して下さい。このような波の原理を、直観を交えて極めてわかり易く説明した解説書として、N. F. Barber 著、高橋 毅訳の「水の波」(1974)をお勧めします。通常の物理学教科書とは違って、たとえば本論の第6節で述べる「波に伴うエネルギー伝搬」の意味など、目から鱗が落ちるような読後感を味わえるに違いありません。

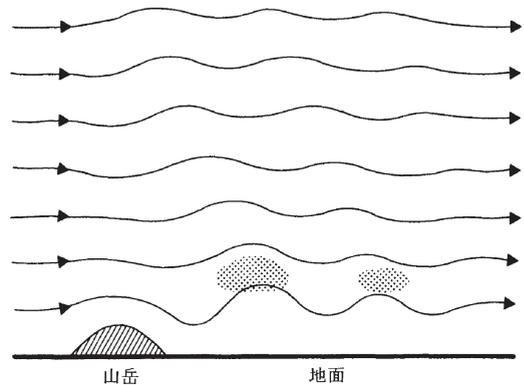
なお、余計なお世話ですがひとつだけ注意しておくことは、宇宙論に出て来るアインシュタインの「重力波」と水面の「重力波」とを混同しないことです。前者は「重力をつくる波」、後者は「重力がつくる波」です。

3. 空の波

先に述べた童謡の「雲の波」は、単なる形態上の類似ではなく、まさに大空のなかにも波が存在することの好例です。好天で上空の風が強い日には、白い高積雲の列が等間隔で何本も並んでいるのが見られます。風向に直角に並んでいる場合もあれば、飛行機雲からまるで魚の小骨のように直角な小さな筋目が見られるときもあります。このような美しい雲の配列をみると、「波」という捉え方がぴったり当てはまるのがわかるでしょう。「あまの香具山かすみ棚引く」と優雅に歌われた霞のうねり、あるいは衛星写真に見られる台風の筋状の渦巻き(スパイラルバンド)もこの仲間に入ります。本来、空気は透明で眼には見えないもののはずですが、霞や雲が大気の動きを眼に見えるようにしてくれているわけです。まさに「雲による流体運動の可視化」です。貫之の和歌なら散る桜の花びらによる風の可視化です。

このような「空に浮かぶ波」をあかず眺めているうちに、大自然のなかには波を作り出す機構とその波長・振動数を決める「スケールの選択性」という法則が潜んでいることに改めて気が付くことでしょう。

空に見られるこのような波は、水の波のところでも示した「重力波」の一種です。それを作り出しているメ



第1図 山越え気流中の重力波の模式図。

カニズム(力学的成因)には様々なものがあると考えられていますが、一番わかりやすい例は「山越え気流」です。高さが1 km程度のカマボコ状の山脈に直角に風が当たって乗り越えるとき、下流に山脈と平行な重力波が作られ、その上昇域に出来た雲の筋がしばしば見られます(第1図)。気流の波が山の高さ以上の上空にまであること、及びその位相が高さとともに微妙に傾いていることの意味は後ほど再び触れます。

重力波の成因としては、山岳(地形)のほかにも、台風の例のように下層の積雲対流が原因で作られるものや、強い前線活動、さらには対流圏上層の強いジェット気流から発生する重力波もあります。大気重力波は、従来、その規模(水平スケール)が比較的小さいために、天気現象との直接的な結びつきがないことも含め、通常的气象観測から定量的に捉えることが難しい現象でしたが、近年の大型レーダー観測や高分解能の衛星GPS観測などから、地球全体でみた分布や強度が知られるようになってきました。これらの重力波が大規模大気循環に果たす役割、つまり「波のはたらき」は本論の第6節で詳しく述べます。

4. 波としての高低気圧

通常のテレビや新聞での天気予報は、日本列島の天気状況を説明することが目的であるため、明日は大陸から高気圧が張り出ししてくるとか本州南岸に低気圧が発生し東に進んでくるなどのような表現が殆どです。本州太平洋岸で発達した低気圧が東北・北海道の東海上を抜けてアリューシャン列島に去ってしまえば、日本列島の天気に関する限り、その先のことに注意を払う必要はありません。ときたま、異常気象などという観点からシベリア上空のジェット気流の蛇行の説明

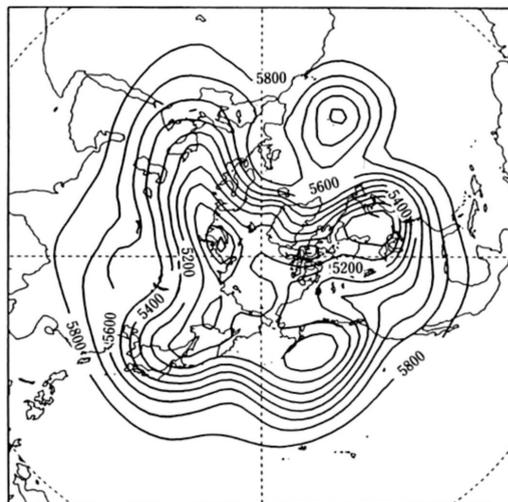
があるにせよ、通常は日本付近の高気圧や低気圧を「孤立した」ひとつの形態としてのみ捉え、そのはるか西側（アジア大陸）や東側（北太平洋）の気圧分布には特段の注意が寄せられることはありません。夏の台風（熱帯低気圧）のような場合は、たしかに「孤立したひとつの渦」という見方で良いでしょうが、中緯度の高低気圧の理解のためには、もっと視野を広げた（キザな言い方をすれば）パースペクティブな見方が求められます。

第2図をご覧ください。これは、ある冬の日の北半球500 hPa面の高度分布図です。これを見ると、北極を中心にして、まるで五弁の椿の花びらのような見事な形をしていることがわかるでしょう。まさに「波うっている」としか言いようがありません。地球を取り巻く中緯度帯の長さ3万km弱のなかで波の数が5つですから、東西方向に測った波の大きさ（波長）は5000~6000kmということになります。この波が地表に影を落としたものを日本列島付近の地上天気図で見たものが、日々の天気と直結するいわゆる移動性高低気圧に他なりません。要するに、「三寒四温」と言われるような天気の変化をもたらす個々の高気圧や低気圧は孤立したものではなく、地球規模の大きな波の一部分なのです。

さて、「かたち」の次は波の「なりたち」です。低気圧の発達の様相を地上（海面）の天気図に基づいて最初に議論をしたのは20世紀初頭の「ノルウェー学派」でした。とりわけ、1919年のJ. ビアクネスによる「前線の発見」とその上に発生発達する低気圧の一生の記述は気象学史の上で忘れることはできません。低気圧の構造の一部として前線があるのではなく、前線があるからそこに低気圧が生まれるのです。

中高緯度の前線帯とは、地球における太陽放射と赤外放射の兼ね合いで、極側が低温、低緯度側が高温という南北温度差が集中した場所のことです。前回説明した「温度風」のことを思い出せば、南北の温度差は上空ほど強い西風（ジェット気流）の存在を意味します。暖かい空気は軽いので上昇、冷たい空気は重くて沈降の性質を持ちますから、あたかも下から熱せられた鍋の中で生じる「対流現象」と類似の空気塊の転倒が起きます。ただし、鍋の中の対流と異なる点は、温度差が上下のみならず水平（南北）にも存在すること、生じる運動が地球自転によるコリオリの効果を受けることです。

このような場で生じる波のことを気象学用語では



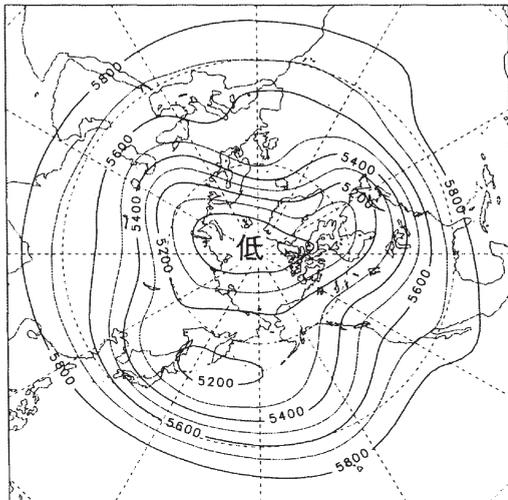
第2図 ある日の北半球500 hPa面の高度分布図
(単位 m)。

「傾圧不安定波」と言います。温度差が上下と南北両方にあるので「傾斜対流」と呼ばれることもあります。その数学的表現や物理的意味の詳細は後日テキストでしっかり学んで貰うとして、この「不安定性」の最も大切な意味のひとつは、「卓越波長の選択律」、つまり最も出現しやすい波の大きさが、場の南北温度差、重力、コリオリ係数などで決まることです。1940年代末に確立されたこの傾圧不安定論に現実の地球の諸量を当てはめると、卓越する高低気圧の東西波長は数千kmとなり、またその動きは対流圏中層の西風にほぼ等しい位相速度で東に進みますから、観測と良い一致を示しています。

5. ロスビー波

移動性高低気圧よりもっとサイズの大きい波もあります。第3図は北半球500 hPa面高度を1月について長年の平均を取ったものです。

もし第2図に示したような高低気圧波が常に東に進むものだけならば、長期間の平均図では波の峰と谷が互いに打ち消された結果として、東西に一樣な同心円状のパターンになるはずですが、しかし実際はそうならず、やはり波が残って見えます。この図では波数が2か3くらいで、第2図の波より大きいものです。時間平均図で見えるということは、動かずにいつも同じ場所に停滞している波成分の卓越を意味します。カンの鋭い方ならこの「場所」を決めている要因が北半球の大陸分布、特にチベット高原（ヒマラヤ）やロッキー



第3図 北半球 500 hPa 面高度の1月平均 (単位 m).

山脈のような大規模地形に対応していることに気が付くことでしょう。

このような地球規模の波の本質は、コリオリ効果が緯度によって異なること（極で最大、赤道でゼロ）にあります。コリオリ力の緯度変化の効果を受けた波は、1930年代末に最初にそれを議論した C. G. ロスビーの名前に因んで「ロスビー波」と呼ばれています。そのなかで、第3図の波は地形によって強制的に作られたものなので「強制ロスビー波」と言います。ロスビー波の一般論は、たとえば「グローバル気象学」(廣田 1992) を参照して貰うとして、ひとつだけ重要なヒントは、この強制ロスビー波が地上 10km 以上の成層圏・中間圏にも伝わっていることです。ここでは図示ませんが、冬の成層圏の気圧パターンは極を中心とした波数が1か2の大きなうねりが卓越しています。

大気中の波動には他にもいろいろありますが、いまここでそれらを総て羅列することはやめ、最後に大気波動の意味を「作用」の見地から考えてみることにしましょう。

6. 波のはたらき

自然科学の視点として「目的論」を持ちこむのは必ずしも適当ではありませんが、ここでは敢えて「大気中の波は何のためにあるのか？」という問題提起をしてみます。その裏側には「神は無駄なものをお創りにならないはずだ」という発想があります。自分は基督

教徒や回教徒ではないから神という言葉は嫌いだ、という方は「自然法則のもたらす必然性」と言い換えても結構です。

第4節で述べた傾圧不安定波動としての移動性高低気圧は、まさにその好例です。すなわち、地球規模で南北に温度差を持つ場のなかで、赤道側の暖気と極側の寒気とを入れ替えるための最も効率のよい運動形態として東西波長が数千 km の波が必然的に発生発達する、という解釈です。これは前回の「風のいろいろ」で示した古典的なハドレー循環（熱対流としての東西一様な子午面循環）とは明らかに違って、東西方向の波動による南北熱交換です。天気予報解説の言葉を借りるなら、低気圧の前面に吹き込む暖かい南風、高気圧から吹きおろす冷たい北風、という状況です。これこそが対流圏大循環の熱的平衡状態を維持する高低気圧の「はたらき」に他なりません。もちろん高低気圧波動の作用はそれ以外にもあります。低気圧に伴い雨が降ることからもわかるように、地球規模での「水蒸気輸送作用」も重要です。また傾圧不安定波動に伴う南北運動量輸送作用も中緯度西風ジェットを維持するための重要な「はたらき」です。

重力波と強制ロスビー波は、また一味違ったはたらきを持っています。第1図と第3図で見た「地形の効果」とは、見方を変えてみると、風が山脈に当たって邪魔をされること、つまり「ブレーキ作用」を受けることです。このブレーキ作用は地表面だけではなく上層をも含めた大気の流れ全体が受け止めます。そのために、重力波や強制ロスビー波は運動量やエネルギーを上方に伝えるのに都合の良い立体構造を持っています。地表で作られたこれらの波が対流圏内にとどまらず成層圏以高にまで伝搬しているのは、まさに「波のはたらき」の現れなのです。波に伴う「エネルギーフラックス」や「群速度」といった物理過程の数学的表現、さらにはその作用による中層大気（成層圏中間圏）大循環の美しい振舞いも後ほどテキストでしっかり学んで下さい。きっと「空の波」という視点から気象学の奥深さを堪能されるに違いありません。

参考文献

- Barber, N. F. (高橋 毅訳), 1974: 水の波. モダンサイエンスシリーズ, 共立出版, 160pp.
 廣田 勇, 1992: グローバル気象学. 東京大学出版会, 160pp.
 廣田 勇, 1999: 気象解析学. 東京大学出版会, 192pp.