

Pilotが作る隔月誌

P I L O T

2010 No.2 MAR



偏西風の気象学

筑波大学教授 田中 博



このたび、日本航空機操縦士協会で「偏西風の気象学」についての講演をさせていただく機会を与えていただきました。大気大循環を専門とする気象学者の講演が、操縦士協会の会員の皆様に興味あるものとして受け入れてもらえれば幸いです。ここでは、大気中に見られるグローバルな現象からミクロな現象までの間のスケール相互作用の実態と力学について、簡単に紹介したいと思います。

●大気現象のスケール

地球大気には、さまざまな空間スケールの現象が特徴的な時間スケール（ライフサイクル）を持って、発生しては消滅しています（図1）。例えば、地表面近くの大気境界層には、1 cm から100m 程度のスケールの渦が存在し、数秒から数分の時間スケールで発生・消滅を繰り返しています。ここで、渦あるいは擾乱とは大小さまざまな渦巻きが入り乱れた状態の流れの意味で用いています。

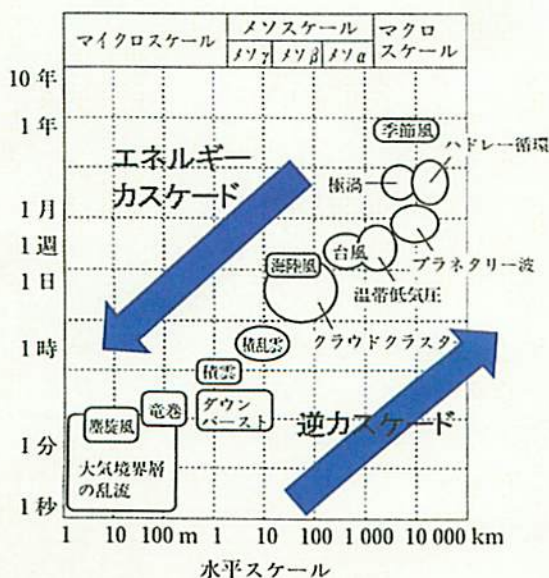


図1 大気現象のスケール

大気境界層上部には、日中、サーマル（熱気泡）が上昇してできる積雲対流がポップコーン状に形成されます。晴天乱気流（CAT）の原因となるケルビン・ヘルムホルツ（KH）波もこのスケールです（図2）。流体の室内実験において、速度が異なる流体の間の敷居を取り去ると、境界に生じた強いシアにより、次の瞬間に特徴的な渦が発生します。これがKH波です。

積雲や積乱雲が組織化されたクラウドクラスター（雲の集合体）、メソ擾乱（集中豪雨のスケールの擾乱）などのように、空間スケールが大きくなると、それに伴ってライフサイクルも長くなります。海陸風は海陸分布の熱的なコントラストにより日周期で交代する風系で、代表的なメソスケールの現象です。さらにスケールが大きくなると、それまで3次元的だった流れも水平2次元的になり、数100kmの台風、数1000kmの温帯低気圧（高低気圧波動）、数10000kmのプラネタリー波などがそのスケールを代表する顕著な大気現象となります。

図2には温帯低気圧のライフサイクルを示しました。天気図で見ると、中緯度に東西に並ぶ高低気圧波動の典型的な波長は4000kmから6000km程度であり、東西方向に地球を一周する間に、気圧の波が5から7周期含まれるような特徴的なスケールを持っています。この温帯

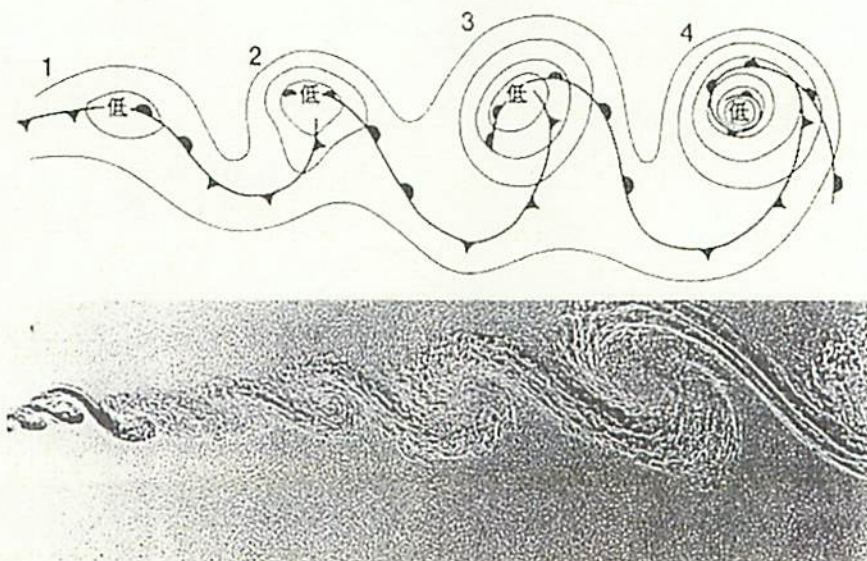


図2 温帯低気圧のライフサイクル（上）と室内実験で作られたKH波（下）

低気圧に代表される東西波数5から7の波動あるいは渦を、気象学では総観規模擾乱と呼びます。図3は温帯低気圧の数値シミュレーションで得られた温度の等値線を示したもので、低気圧の前面（東側）では北上する暖気が温暖前線を形成し、低気圧の背後（西側）からは寒気が南下して寒冷前線を形成します。流体力学の相似則により、温帯低気圧の形状はKH波と似たものになりますが、北の寒気と南の暖気という気団の境目で発生した渦巻が南北混合を行っているという特徴が見てとれます。

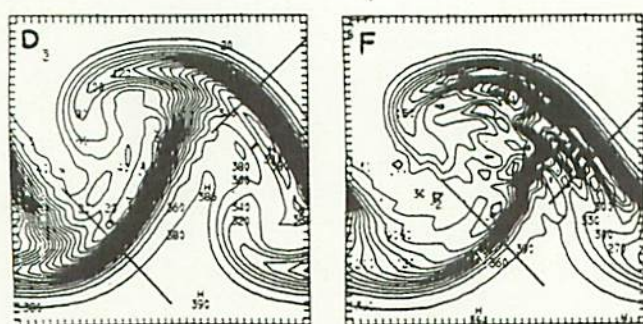


図3 温帯低気圧の温度分布

一方、プラネタリー波は、主にロッキー山脈やチベット高原などの力学的な影響で、偏西風が蛇行して形成される地球規模（マクロスケール）の波動であり、地球を取り巻く東西波数1から4程度のスケールを持ちます。大陸と海洋の熱的なコントラストにより、年周期で交代する風系をモンスーン（季節風）といいます。

これもマクロスケールの現象です。地球大気の中で最も空間スケールが大きい現象のひとつとして、放射加熱の南北差が原因で励起されるハドレー循環が挙げられます。これは成因論的には東西方向に一樣と考えられ、赤道で上昇し中緯度で下降する東西波数0（つまり軸対称）の熱対流です。その他に、地球を東西に取り巻く中緯度の偏西風ジェット気流、低緯度の偏東風ジェット気流、高緯度の極夜ジェットなどの風系も、東西波数0のマクロスケールの現象になります。

図1の大気現象に対し、時空間の傾きを計算すると、これらの現象に共通する速度として10m/sという特徴的な値が見えてきます。ただし、地球のサイズは有限なので、気候変動のようなグローバルな現象については、この共通の傾きから外れてしまいます。

●大気現象のスペクトル

地球大気にはどのスケールにどの程度の強さの現象が存在するのかを、定量的に分析する最も古典的な手法に東西波数展開（調和解析）があります。これは、大学で学ぶフーリエ級数展開に基づく解析手法です。例えば、気圧分布の指標である500hPa等圧面高度を北緯45度の緯度円に沿ってグラフにしてみると、ロッキー山脈とチベット高原の影響で大陸の西岸に高気圧、

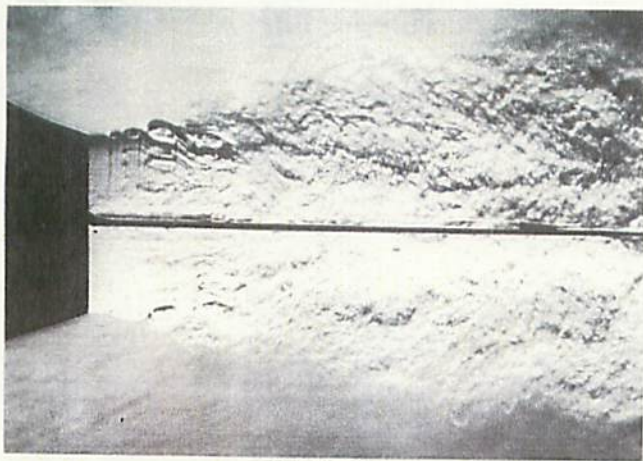


図4 ジェット噴射と乱流

東岸に低気圧が形成されます。そのようなマクロスケールのプラネタリー波に、温帯低気圧に伴う総観規模波動が重なっている様子が見えます。東西方向に周期的な500hPa 高度場を、調和解析の手法で各々の東西波数からの貢献に分解してみると、どのスケールの波の振幅が大きいかが分析できます。これをスペクトル分布といいます。つまり、高度場を異なる波数のサインカーブの重ね合わせで表現した場合、その振幅を波数ごとにプロットすることで、どの波の振幅が最も大きいかを定量的に調べることが可能となります。通常は波のエネルギーの次元となる振幅の2乗をプロットして表現します。解析結果によると、プラネタリー波が最も卓越し、次いで総観規模波動、そしてメソ擾乱の順にスペクトル強度が落ちて行く特徴が解かります。

スペクトルというと、太陽光をプリズムで分解して見える7色の光を思い浮かべますが、光を波長別に分解してその強さを比較することと、大気大循環を波長別に分解してその強さを比較することは、同じ作業になります。

●エネルギーのカスケード

地球規模の大気の運動や乱気流のような小規模な運動が、どのようなメカニズムで形成・維持されているのかを研究することは、大気大循環研究や気象学の中心テーマです。したがって、

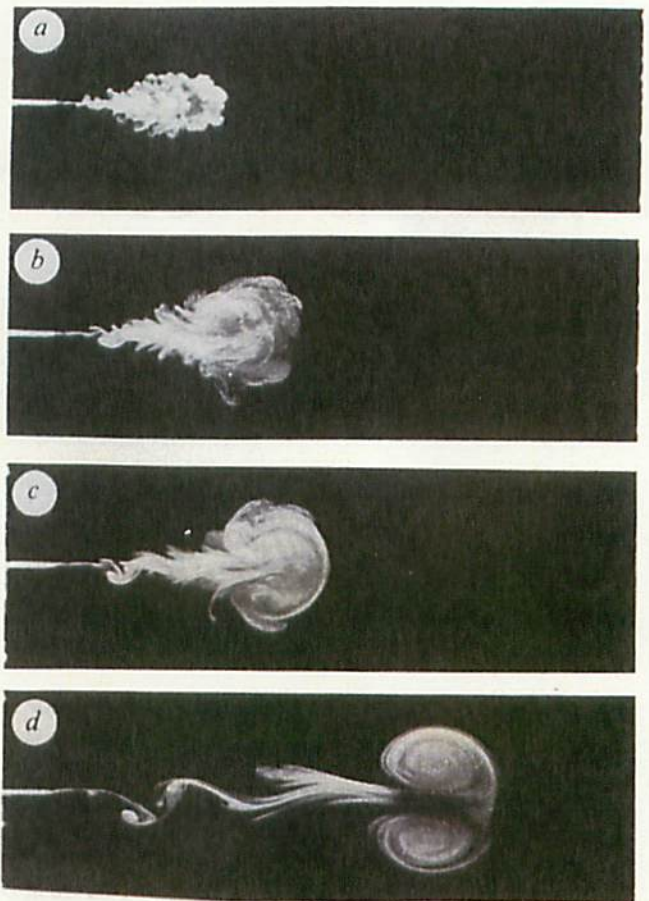


図5 乱流から生まれる巨大渦

大気エネルギーが、どのようなプロセスで維持され、あるいはどのようにして変動しているのかを知ることは重要です。

図4は航空機のジェットエンジンから噴出す気流が、層流から波動、渦、そして乱流へと変遷するプロセスを可視化したものです。これは3次元乱流の特徴になります。はじめ猛スピードで噴射されたジェット気流は、エンジンの出口付近では層流になっていますが、やがて平均流の力学的なシア不安定により波が急発達し、振幅の増大によりその波は碎波して渦を巻くようになります。すると、渦の中でも強いシアが不安定を引き起こし、さらに細かい渦へと細分化が進行します。このように大きい渦の運動エネルギーが小さい渦へと枝別れしてゆくプロセスのことを、エネルギーのカスケードといいます。

このような乱流の形態の最小単位を見てみると、ブルーム（運動によりむくむくと成長するキノコの形をした流れ）の集合として認識することができます。渦が細分化され、相対的に粘

性の効果が大きくなると、流れの前方で運動を阻止するようにキノコの形をしたブルームが姿を現してきます。

このように、図1に示したエネルギーカスケードにより、地球規模で供給される太陽放射エネルギーは、はじめにハドレー循環や温帯低気圧を形成し、やがてより小さい渦または擾乱へと細分化され、最終的には境界層乱流の分子粘性により摩擦熱になります。

●エネルギーの逆カスケード

一方で、総観規模波動に供給されたエネルギーの一部は、プラネタリー波や帯状流などのより大きなスケールの現象へも流れます。これは水平的な2次元乱流の特徴であり、地球の自転効果をより強く感じるプラネタリー波のスケールでは、流れが水平2次的になっていることによります。そこでは、細かい渦同士がぶつかり合い、融合を繰り返してより大きな渦へと成長します。この過程では、エネルギーが小スケールから大スケールに向かって流れるので、このプロセスをエネルギーの逆カスケードといいます。

図5の水槽実験では、2次元乱流の特徴を再現するために、強い密度成層の中に注入された着色トレーサーの、時間発展の様子が示されて

います。始めは図5aのようにジェット状に噴出した流れが、3次元乱流的に細かい渦に分裂して広がります。しかし、このトレーサーは、次第に密度の釣り合う水平2次元平面に押しつぶされるようになります。このときの運動は鉛直方向の運動が抑制され、2次的になります。すると、2次元乱流の力学的束縛により、渦同士が融合を繰り返しながら、やがて大きな平面的ブルームへと発達するのです(図5d)。これは、2次元乱流に見られるエネルギーの逆カスケードの典型例といえます。

例えば、台風の発達過程では、潜熱放出で発達した積雲タワーからなるメソスケールの渦が融合を繰り返すことで巨大な渦に発達し、中心付近でウォームコアと台風の眼を発達させます。これは、小さい渦が融合して大きな渦となる逆カスケードの典型になります。また、木星の大赤斑は高気圧性の巨大渦であり、周辺より細かい渦によるエネルギーの逆カスケードで維持されていると言われていますが、これも2次元乱流の特徴です。

●ブロッキングと偏西風ジェット

さらに、中緯度の偏西風ジェットをブロックして長期間留まり、各地に異常気象をもたらす

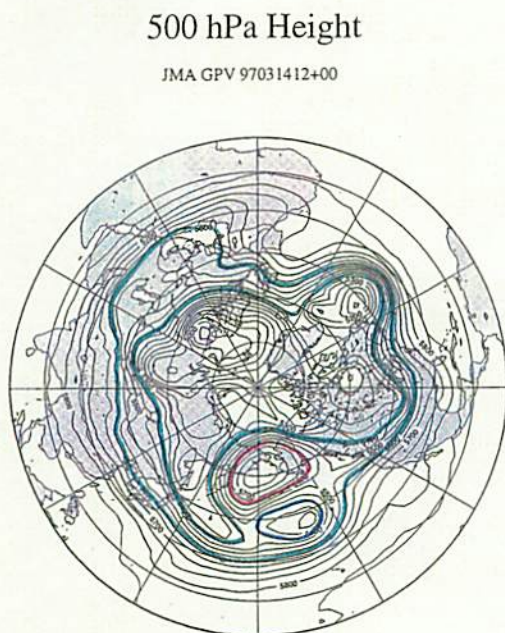


図6 ブロッキング高気圧

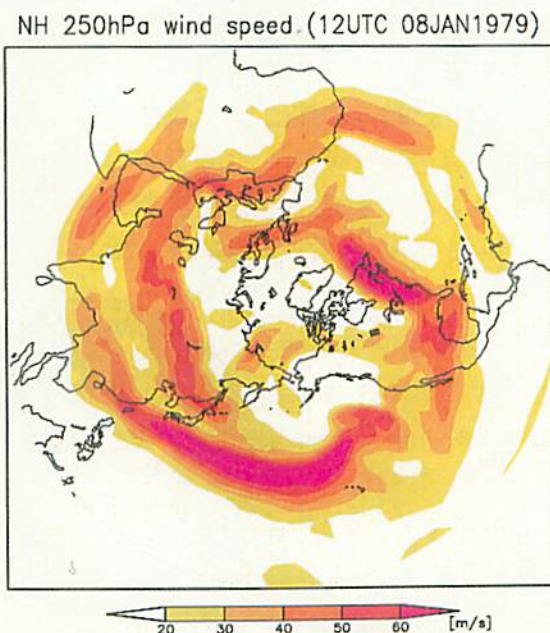


図7 偏西風ジェット気流の風速

ブロッキング高気圧も、総観規模波動からのエネルギーの逆カスケードで維持されています(図6)。偏西風帯でブロッキング高気圧が発生すると、その南の接離低気圧とで一对の渦巻を形成し、偏西風をブロックして長期間同じ位置に留まります。図5dの渦対と同じ構造です。東進する温帯低気圧や高気圧の渦は、ブロッキングにブロックされて南北に引き伸ばされるように碎波し、ブロッキング本体の渦に取り込まれることで、巨大渦としてのブロッキングを維持しています。

実は、偏西風ジェットや極渦などの帯状流は、北極から見ると地球を取り巻く最も大きな東西波数0の渦であり、これらも総観規模波動からのエネルギーの逆カスケードにより維持されています(図7)。つまり、温帯低気圧の渦が発達し、偏西風ジェットに取り込まれるように引き延ばされて、結果として偏西風ジェットを加速しているのです。

●北極振動と地球温暖化

近年、地球温暖化が問題となり、地球規模で異常気象をもたらす北極振動という現象が注目されています(図8)。これは北極圏を取り巻く極渦(寒帯ジェット)が強くなったり(AOプラス)弱くなったり(AOマイナス)する現象です。AOプラスの時には北極圏が低圧偏差、中緯度が高圧偏差となり、地衡風により寒帯ジェットが強まります。これにより、北極圏に寒気が

閉じ込められるため、北極圏が低温偏差、中緯度が高温偏差となります。AOマイナスの時はその逆のパターンとなります。この北極振動の形成メカニズムにも、総観規模波動からのエネルギーの逆カスケードが重要です。北極振動は、地球温暖化の地理的なパターンを決定する重要な現象として注目されています。

●おわりに

このように、3次元乱流としてのエネルギーのカスケードは、大きな渦を細かい渦に細分化することで、流れを無秩序な乱流へと遷移させます。ケルビン・ヘルムホルツ波の碎波によるCATはまさに、エネルギーカスケードの一場で登場します。それに対し、2次元乱流としての逆カスケードは、乱流状の小さな渦から秩序だった巨大渦を形成する特徴があります。地球を取り巻く偏西風ジェットは、温帯低気圧の渦を寄せ集めて維持されており、逆カスケードの産物とすることができるのです。

大気大循環から境界層乱流に至るまでのさまざまなスケールの現象は、エネルギーのカスケードと逆カスケードによりスケール相互作用を行ない、お互いに影響を及ぼし合っています。そのように考えると、偏西風ジェット気流も晴天乱気流(CAT)もみな繋がって見えるので、地球流体の奥の深さに感銘を受けます。

(参考文献：田中博 2007：偏西風の気象学、成山堂、174pp)

AO プラス



AO マイナス



by FRSGC

図8 北極振動と寒帯ジェットの強弱