

# エネルギー循環

## 大気中のエネルギー

大気中にはさまざまな形態のエネルギーが存在する。たとえば、空気塊とは質量  $m$  をもつガス状の物質のことであるから、それが基準面（水平面）から高さ  $z$  にあれば  $mgz$  の位置エネルギーをもつ（図1）。気象学では剛体力学のように特定の質量  $m$  の物質を考える代わりに、流体力学の慣例に従い単位質量当たりの大気の物理量を考えるので、単位質量当たりの位置エネルギーは  $\phi = gz$  と表される。 $\phi$  はジオポテンシャルと呼ばれる。同様に、空気塊の温度が絶対零度でない限りそれは熱エネルギーをもつ。温度  $T$  の空気塊はその温度に比例する内部エネルギー  $I = c_v T$ （単位質量当たり）をもつ。ここで、 $c_v$ ：定積比熱である。そして、この空気塊が速度  $v$  で移動しているならば、それは運動エネルギー  $K = |v|^2/2$ （単位質量当たり）をもつ。以上  $\phi$ ,  $I$ ,  $K$  が大気の基本エネルギーであるが、運動エネルギーと位置エネルギーの和をとくに力学的エネルギーという。また、位置エネルギーと内部エネルギーの和を全位置エネルギーという。

内部エネルギーは定積比熱の定義からも明らかなように、空気塊の膨張を許さないときの加熱に伴う熱エネルギーの増減を計る量であるが、気圧一定の条件で空気塊の膨張を許し、外に対してなした仕事量（圧力エネルギー） $p\alpha$  を内部エネルギーに加えた量として熱エネルギーを評価する方が気象学ではより便利である。この量は熱力学的にはエンタルピー  $H = c_v T + p\alpha$  と呼ばれ、気象学では顕熱  $c_p T = c_v T + RT$  と呼ばれている。ここで、 $c_p = c_v + R$ ：定圧比熱、 $R$ ：乾燥空気の気体定数である。顕熱とは、定圧条件での加熱により、温度変化として現れる熱エネルギーの増減を計る量である。顕熱エネルギーは  $p\alpha = RT$  の状態方程式により、内部エネルギー  $c_v T$  と圧力エネルギー  $p\alpha$  が結びついた量であることがわかる。このほかに、空気塊が水蒸気を含んでいる場合にはさらに潜熱  $Le$  が加わる。潜熱とは、水蒸気が気体、液体、固体のいずれかの状態からほかの状態に移るときに、相変化に伴い出入りする熱エネルギーのことである。顕熱は熱エネルギーの増減が温度としてみえるのに対し、潜熱は熱エネルギーの増減が水蒸気量の増減によって決まり、温度に現れないことからこのように呼ばれている。水蒸気に限らず、任意の化学物質の相変化に伴い出入りする熱エネルギー

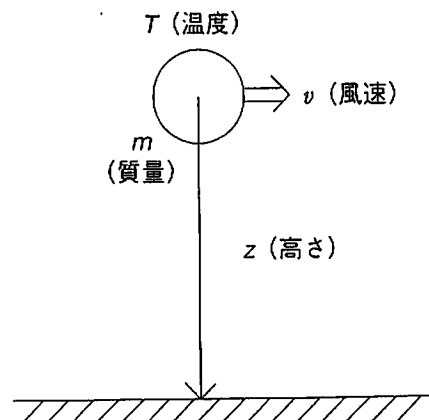


図1 高さ  $z$  にある質量  $m$ 、温度  $T$  の空気塊が運動  $v$  で移動する様子

ギーを一般に潜熱と呼ぶが、気象学では潜熱といえは一般に水蒸気に伴う熱量をいう。ほかにも地球大気には雷に伴う電気エネルギーなども挙げられるが、基本エネルギーと比較すると量的には小さい。

### エネルギーバランス

地球大気に存在するさまざまな形態のエネルギーは、そのエネルギー源と散逸、そして考えている領域の境界を通過して流入するフラックスにより増減する。この法則を記述したものがエネルギーバランス式である。たとえば、地球大気全体を領域にとれば、太陽放射や地球放射は境界を通過して流入、流出するエネルギーフラックスであり、領域内での水蒸気の凝結による潜熱の放出などはエネルギーの生成項となる。閉じた系では定義により境界を通過して流入するフラックスがないので、エネルギーの増減は領域内での生成項 (source) と消滅項 (sink) で決まる。そしてもし、生成と消滅がなければエネルギー量は変化しなくなるので、エネルギーは保存される。これがエネルギー保存則である。

たとえば、顕熱で表した熱力学第1法則に静力学平衡の式を代入すると

$$\Delta q = c_p \Delta T + g \Delta z$$

となり、一定質量の空気塊に加えた熱エネルギー  $\Delta q$  は顕熱エネルギーの増加と位置エネルギーの増加に配分されることが示される。もし、生成項  $\Delta q$  がなければ、顕熱エネルギーと位置エネルギーの和  $c_p T + gz$  は保存されることになる。 $c_p T + gz$  は乾燥静的エネルギーと呼ばれている。この乾燥静的エネルギーの保存則からただちに乾燥断熱減率  $\Gamma_d = g/c_p$  が算出できる。つまり乾燥空気を断熱的に持ち上げると位置エネルギー  $gz$  が増えた分だけ顕熱エネルギー  $c_p T$  が減ることになり、温度が  $g/c_p$  の割合で高さとともに減少するのである。これは、エネルギー的にみた乾燥断熱減率の説明であり、実際の大气でみられるエネルギー保存則の典型例といえる。湿潤大気の場合には潜熱の効果が加わり、湿潤静的エネルギー  $c_p T + gz + Lz$  が保存される。大気

の成層状態が中立点を超えて不安定化すると、その不安定を解消するような運動つまり風が発生する。風の発生は運動エネルギーの増加を意味し、このとき湿潤静的エネルギーの一部が運動エネルギーに変換される。もしこの系全体で生成項、消滅項がなければ湿潤静的エネルギーと運動エネルギーの和  $c_p T + gz + Le + K$  が保存されるような運動が生じることになる。これはベルヌーイの法則と呼ばれ、湿潤空気のエネルギー保存則である。

### エネルギー輸送

地球大気の運動のエネルギーの源は太陽からの放射エネルギーである (図2)。地球平均

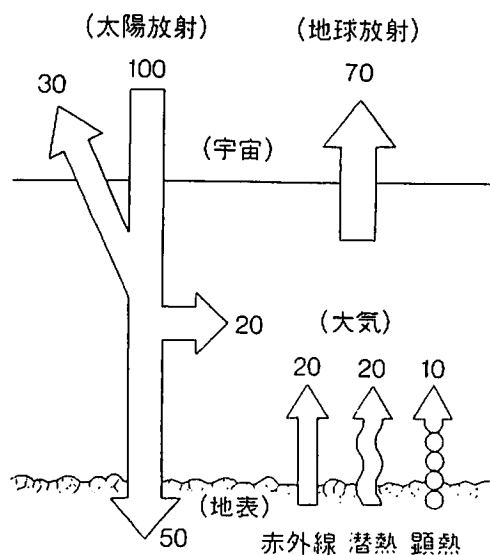


図2 放射エネルギーのバランス (%)

でみると、太陽放射エネルギーは（これを100%とすると）その約30%がアルベドの値に依存して宇宙空間に反射し、残りの70%のうち20%は大気を直接加熱し、残りの50%は地表に達して大地を暖める。暖められた大地はその温度の4乗に比例する赤外放射で下から大気を暖めるが、大気自身も温度の4乗に比例する赤外放射で地表を暖め返すので、差し引き20%の赤外放射エネルギーが正味フラックスとして大気を暖めている。そして、約20%が潜熱フラックス、10%が顕熱フラックスとして大地から大気に向かってエネルギー輸送が生じる。ここでの鉛直熱輸送は成層不安定により発生するサーマルなどの対流が重要な役割を果たしている。結局、大地は50%の太陽放射で暖められて、合計50%の正味赤外放射、潜熱・顕熱フラックスにより冷えるので、熱エネルギーのバランスが保たれている。そして、大気も合計70%の太陽放射、正味赤外放射、潜熱・顕熱フラックスで暖められて、70%の宇宙空間への赤外放射により冷えているので、熱エネルギーのバランスが保たれている。大気上端における太陽放射と赤外（地球）放射のエネルギーのバランスも保たれている。

以上は主に放射収支に伴う地球全体でみたエネルギーの流れであるが、これらの量の南北分布を調べると緯度により大きく異なり、地域的な特徴がみられる。赤道付近では太陽放射が強く、それに伴い大気は高温となる。海上や湿潤な気候区では潜熱フラックスが顕熱フラックスを上回り、乾燥地帯や砂漠ではその逆となる。一方、南北両極域では、放射冷却が太陽放射を上回り低温となり、とくに、1日中太陽が昇らない極夜においては、放射平衡温度は絶対零度に近くなる。このような、放射収支によるエネルギーの地域的な過不足は低緯度の放射平衡温度を上げ、高緯度の放射平衡温度を下げるため、南北の温度差が顕著になる。ここで大気の運動を許すと、初め南北の温度差はハドレー循環などの熱対流による南北混合で一部解消されるが、地球の自転などの力学的な条件によりハドレー循環は緯度約 $30^\circ$ で止まるため、その先の中緯度で南北の温度傾度が増大するようになる。そこで登場する重要な熱輸送のメカニズムが傾斜不安定により励起される温帯低気圧である（図3）。ハドレー循環と比較すると温帯低気圧はほとんど2次元的な水平渦であるが、詳しくその構造を調べてみると、低気圧の前面（東側）で南からの暖気の移流が上昇気流を伴って吹き上げ地表で温暖前線を形成し、逆に低気圧の後面（西側）で北からの寒気の移流が下降流となって吹き降りてきて地表で寒冷前線を形成するという特徴がみられる。温帯低気圧の前面での暖気の上昇は相対的に軽い空気塊の上昇であり、同様に、後面での寒気の下降は相対的に重い空気

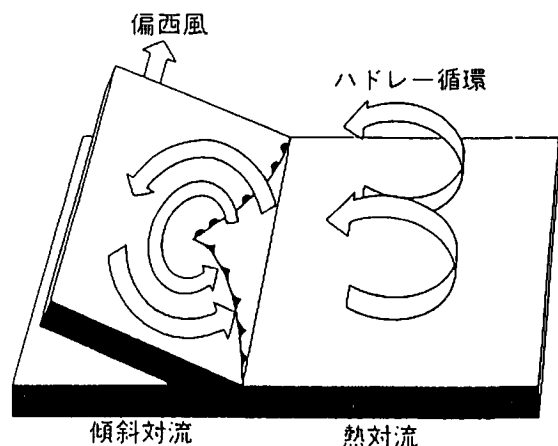


図3 熱対流と傾斜対流

塊の下降に対応する. このような温帯低気圧に伴う対流をエネルギー的にみても、それは有効位置エネルギーから運動エネルギーへの変換であることがわかる. ここで、有効位置エネルギーとは全位置エネルギーのうち運動エネルギーに変換可能な部分を指す. 軽い空気塊が上昇し重い空気塊が下降するという点では、ハドレー循環などの熱対流と同様であるが、有効位置エネルギーから運動エネルギーへの変換がわずかに傾いた水平渦の中で盛んに行われているのが特徴である. このような構造を傾斜対流という. 実際には上昇流域は極側に、下降流域は赤道側に偏っているため、東西平均すると、フェレル循環のようになる. 傾斜対流は回転する地球上で南北に温度差が存在することで不安定化し、増大してくる対流である. 運動エネルギーが増大すれば渦が強まり、エネルギー変換はますます増大する. 傾圧大気における南北の温度差は有効位置エネルギーの存在を意味し、これが傾斜対流として運動エネルギーに変換されるプロセスを傾圧不安定という. 南北混合により熱エネルギーが高緯度に輸送され、

南北の温度差がなくなるとこの不安定は解消される.

ハドレー循環による熱輸送は主に軸対称流による顕熱と位置エネルギーのフラックスの形態で行われる. それに対し、中・高緯度での熱輸送は温帯低気圧による渦顕熱フラックスの形態で行われる. このようにして、渦を含む大気の大循環は熱エネルギーを低緯度から高緯度に向けて輸送し、低緯度を冷やし高緯度を暖めている. 大気が行う熱輸送に匹敵する熱輸送が海洋循環によっても行われ、両者を足し合わせた南北の熱輸送が放射過程によって生じる南北の熱的不均衡を補い、熱エネルギーのバランスを保っている (図4). 熱対流としてのハドレー循環や傾斜対流としての温帯低気圧などの大気大循環は、南北の温度勾配を解消する目的で力学的不安定により生じた運動であり、これらの運動により大気の南北温度差は放射平衡から推測される温度差よりも小さなものになっている.

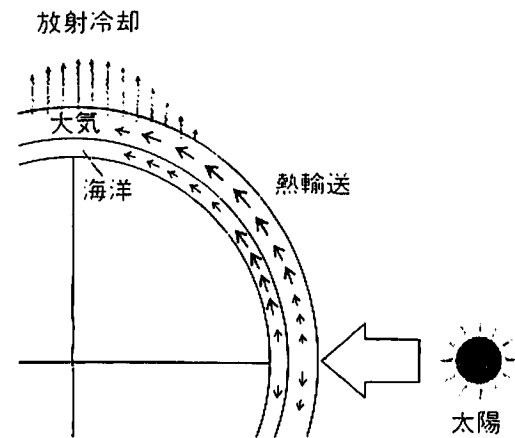


図4 南北の熱輸送

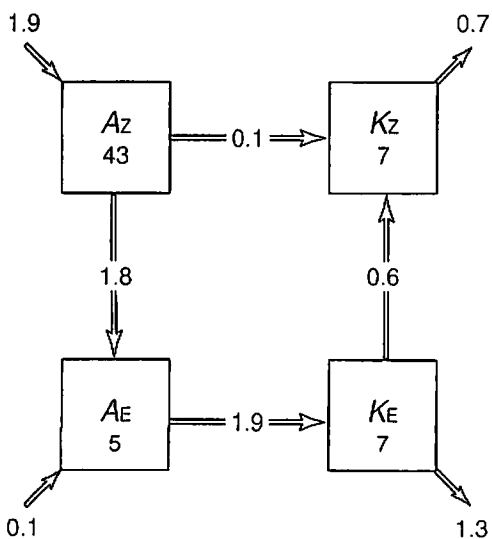


図5 対流圏のエネルギーボックス (Kung & Tanaka, 1983)

ボックス内の数値：エネルギーの値 (単位:  $10^5 \text{ J/m}^2$ ), 矢印の数値：変換, 生成, 消散の値 (単位:  $\text{W/m}^2$ ).

エネルギーボックス

大気大循環のエネルギー流は、带状 (Z) と渦 (E) 成分に分けた有効位置エネルギー A と運動エネルギー K のボックスで表現することで、いっそう理解を深めることができる

(図5). ここで、帯状成分とは東西方向の平均成分のことで、渦成分とは帯状成分からのずれによる成分である。初めに、太陽放射の南北の加熱差は帯状有効位置エネルギー  $A_z$  を生成する。温度の南北差が仮にハドレー循環による南北混合で解消されるならば、エネルギー流は熱対流  $A_z \rightarrow K_z$  によって表現されることになる。しかし、実際のエネルギー流は  $A_z \rightarrow A_E \rightarrow K_E$  のような流れにより特徴づけられている。初めの  $A_z \rightarrow A_E$  は傾斜対流による熱エネルギーの南北混合を意味し、 $A_E \rightarrow K_E$  は傾斜対流の前面で暖気が上昇し、後面で寒気が下降することで生じる有効位置エネルギーから運動エネルギーへの変換（傾圧変換という）を意味する。渦運動エネルギー  $K_E$  は帯状有効位置エネルギー  $A_z$  から供給されているので、これは傾圧不安定によるエネルギー流である。渦運動エネルギー  $K_E$  は帯状運動エネルギー  $K_z$  に流れており、温帯低気圧が中緯度の偏西風ジェットを維持しているという事実が読み取れる。もし、温帯低気圧が傾圧不安定でなく、順圧不安定によるものならば、順圧不安定のエネルギー源は帯状運動エネルギー  $K_z$  にあるので、 $K_z \rightarrow K_E$  というエネルギー流（順圧変換という）によって特徴づけられるはずである。しかし、実際はむしろ逆の流れであることから、温帯低気圧という渦が順圧不安定によるという仮説は否定される。結局、大気大循環を特徴づけるエネルギー流は傾圧不安定に伴う傾斜対流の励起に代表され、ハドレーが18世紀に考えたような軸対称循環による大気大循環像はエネルギー論的に正しくないことが明らかになった。このようにして、大気大循環の認識はハドレー循環のような軸対称循環から、温帯低気圧に伴う渦が本質的に重要なエネルギー輸送を担っているというロスビー循環と呼ばれる認識へと進化し、今日に至っている。

### エネルギースペクトル

エネルギーボックス図における渦成分は波数展開によりさらに波数スペクトルに分解することができる。傾圧不安定による傾圧変換は東西波数6付近にピークをもち、総観規模擾乱としての高低気圧波動の典型的なスケール4000~6000 kmを決めている。総観規模擾乱に供給されたエネルギーの一部はより小さいスケールの渦へと流れる。これは大きな渦が時間とともに小さな渦に分裂し、その渦がさらに小さな渦へと細分化され、やがては無秩序な乱流と化して粘性摩擦により運動が止み、摩擦熱に還元されるプロセスである。これは3次元乱流の特徴であり、このように大きい渦の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う。一方で、総観規模擾乱に供給されたエネルギーはプラネタリー波や帯状流などより大きなスケールの現象へと流れる。これは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領域で流れは2次元的になっていることによる。渦どうしがぶつかり合い、融合を繰り返してより大きな渦へと成長する過程では、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う。木星の大赤斑は高気圧性の巨大渦であり、このエネルギーの逆カスケードで維持されているといわれている。また、中緯度の偏西風ジェットをブロックして長期間とどまり、各地に異常気象をもたらすブロッキング高気圧も総

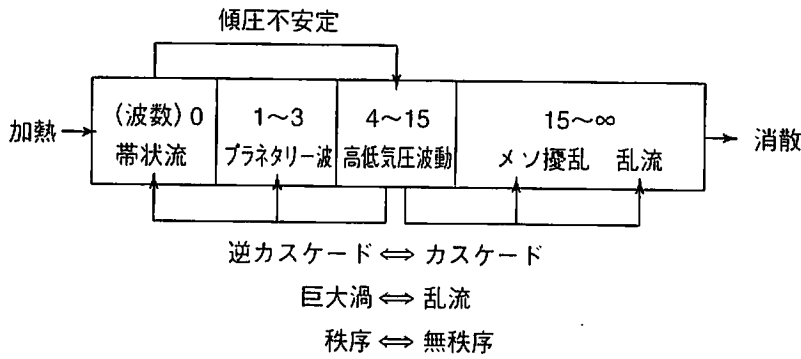


図6 波数領域におけるエネルギーのカスケードと逆カスケードの模式図

観規模擾乱からのエネルギーの逆カスケードで維持されていると考えられている。さらに、带状流が作り出す偏西風ジェットや極渦などは、地球を取り巻くもっとも大きな波数0の渦であり、これらも総観規模擾乱からのエネルギーの逆カスケード

により維持されている。このように、エネルギーのカスケードは流れを無秩序な乱流へと遷移させるのに対し、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る(図6)。大気大循環から境界層の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、逆カスケードによりスケール相互作用を行い、おたがいに影響を及ぼし合っている(図7)。

[田中 博]

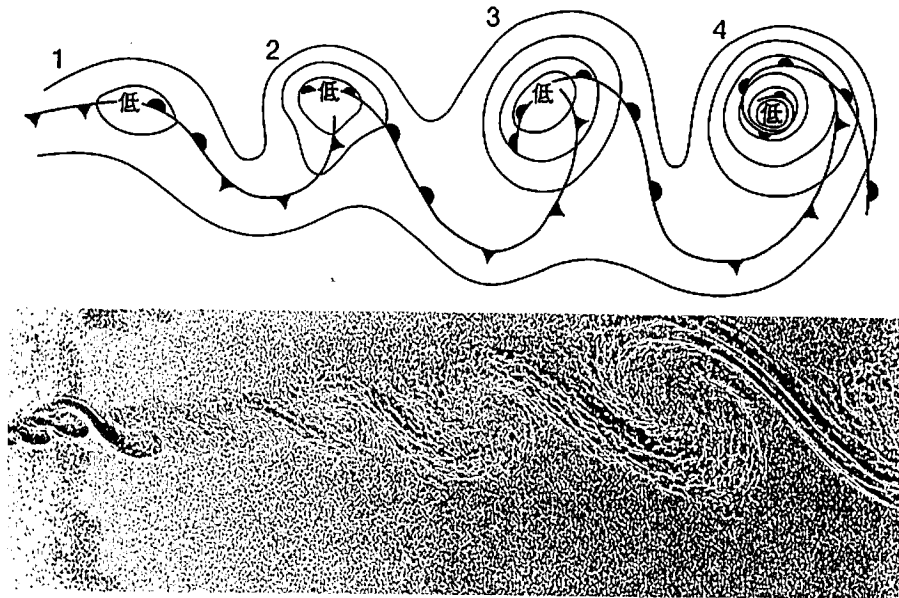


図7 温帯低気圧の一生(上)とシア不安定の室内実験(下)  
158ページ, 図2も参照.