

## 成層圏・中間圏の気象学

廣田 勇\*

## 1. はじめに

もしも人類が水中生物だったとしたら、気象学の体系が現在のそれと非常に異なっていたであろうことは想像に難くありません。もちろんその知的活動が同じ程度であったとしての話ですが、

当然のことながら、学問とは人類の歴史とともに歩んできました。気象学もその例外ではありません。人間が陸上動物だったからこそ、まず地上附近の気象現象の記述に始まり、生活に密着した天気天候（雨風や日照や気温など）に深い関心が向けられてきたわけです。

しかしながら、自然現象を科学の立場でながめ、ひとつの認識体系を構成しようとするときに、身近なところから始めるのが唯一最善であるとの保証は全くありません。いつぞや島貫陸氏が気象教育に関連して「小学校の理科の時間に校庭で気温や風を測ってみるのは、一見手頃な題材のようでありながら、接地層気象の複雑さを考えると、決して良い教材とは言えない」という意味のことを述べておられましたが、確かにその通りだと思われ

ます。とは言え、幸か不幸か、我々は既に対流圏の気象学にどっぷりとつかってしまっています。気象学イコールお天気、という烙印は仲々拭えそうにありません。人間を中心にして見た物理的な距離と研究の歴史との両方の理由から、大ていのテキストは対流圏の記述がほとんどで、成層圏や中間圏の話は添えもの程度にしか書かれていません。従って、おそらくこの普及講座の読者の多くは、低気圧や台風や雲のことはある程度知っていて、その上いささかの知的好奇心から、まだ良く知らない成層圏や中間圏のことを少しかじってみようと思いつきながらこのページを開いておられるのではないのでしょうか。勿論それもひとつの勉強態度として結構です。新しい物事を知る楽しさというのは確かにあるのですから。

しかし僅か数ページの中に成層圏・中間圏の構造や振

舞に関する諸々の事実をすべて盛り込むことなどまず不可能です。かと言って、通り一べんの知識をカタログ風に羅列してみても仕方ありません。もしこの講座の読者の中にこれから成層圏・中間圏の気象学に本格的に取り組もうとする方がいたら、まず本文からその心構えを読みとり、やがて教科書でがっちり勉強して下さることを期待します。

そんなわけで、今回の講座ではちょっとした発想の転換を試み、二十世紀かのスペースコロニーの中で生れ育った住民になったつもりで、最初から対流圏界面より上の大気だけを考えることにしましょう。この住民にとって、さし当りは“遠く離れた”地表面附近のことは良く知らなくてもよいのです。あえてこんなことを言う意味は本文を最後まで読んでいただければおわかりになると思います。

## 2. 中層大気の温度構造

以下本文では、成層圏と中間圏をひとまとめにして中層大気と呼ぶことにします。大気の垂直分布をその温度構造によって分類するのは、単なる便宜以上に深い意味を持っています。季節と緯度をならした平均で気温の高度分布を見ますと、高さ 10~20 km 附近に気温の低い等温層があり、そこから約 50 km までは上昇傾向を示します。その極大値が成層圏界面です。従って 10~50 km の領域は断熱的な垂直運動に対して安定であり、対流は生じません。これが成層圏の名の由来です。50 km より上の中間圏では約 80 km (中間圏界面) まで気温が減少しますが、その傾度は  $4^{\circ}\text{K}/\text{km}$  にも達しませんので、やはり一般に上下方向の対流は起きません。

中層大気中に上下方向の対流が存在しないことは、地表面（海面）や下層大気中から水蒸気が運ばれて来ないということですから、大雑把に言って中層大気中では水蒸気の凝結（すなわち雲）は生じないはずで、従って雲に伴う凝結熱の放出とか、種々の波長の放射に対する吸収・散乱・反射等も考える必要がありません。このこ

\* Isamu Hirota, 京都大学理学部。

とが中層大気の熱収支をすっきりとしたものにさせている第一の理由です(生半可な知識のある人は、いや中層大気中の微量成分としての  $H_2O$  は重要だ、とおっしゃるかも知れません。しかし、第1近似としてdryな大気のみを考えればよい、ということの有難さのほうに注目することが大切なのです)。

さて放射を考えましょう。大気は  $0.3 \mu m$  以上の可視光線に対しては透明ですから、上からやってくる太陽光線やそれが下層で反射されてくるものは中層大気にとって直接関係なく素通りです。重要なのは太陽紫外線です。酸素分子  $O_2$  は紫外線を吸収して酸素原子  $O$  に光解離し、 $O$  と  $O_2$  との再結合によりオゾン  $O_3$  を作り出します。オゾン自身はまた紫外線を吸収して  $O$  と  $O_2$  とにわかれますが、生成と消滅のふたつの作用の兼ね合いとして、オゾン量は中層大気中である一定の平衡状態を保ちつつ、太陽紫外線のエネルギーを大気加熱に役立てているわけです。

このようにして出来るオゾンの高度分布を実際に測定してみると、25 km 附近で最大の密度を持っていることがわかりますが、上に行くほど先に紫外線が吸収されることと大気密度が減少することの両方の理由から、加熱率としては高さ 50 km 附近に最大値が現れます。つまり、中層大気の中央部分に気温の極大値(成層圏界面)の出現する理由は、大気中にオゾン、ひいては酸素の存在することと直接結びついていることがわかります(ちなみに、オゾンの存在しない他の惑星大気では、成層圏界面に相当する中層の気温のピークは見られません)。

一方、熱収支の見地から言えば、このオゾンによる加熱に見合うだけの冷却は、主として  $CO_2$  からの赤外放射によってもたらされます。中層大気中の赤外放射過程はかなり複雑ですが、それでも雲(水滴)を考えなくてすむだけ単純化できるのは魅力です。それならば火山噴火等によるエアロゾル(成層圏に浮遊する微粒子)の放射に及ぼす影響はどうか、との質問が出るかも知れません。しかし、以下に述べる地球規模での熱収支と力学の問題にとって、その効果は二次的と見て、とりあえず考慮から外しても良いでしょう(成層圏エアロゾルを研究されている方、ごめんなさい)。

次に気温の緯度分布を考えてみましょう。中層大気の温度がオゾンを通して太陽紫外線の吸収によって支配されていることは、地球と太陽との幾何学的関係、つまり地軸の傾きの効果が気温分布にもろに現れることを意味します。このことから、中層大気中の加熱率の極大

値は夏極の高度 50 km 附近に現われることがわかるでしょう。逆に冬極は極夜で日射がゼロのため、赤外放射による冷却一方です。事実、高度 50 km の気温分布を観測してみれば、夏極(約  $290^\circ K$ ) から冬極(約  $230^\circ K$ ) へかけてほぼ一様な水平傾度をしています(赤道イコール熱帯というのは下層大気だけでしか通用しない観念です)。春分秋分時には赤道を中心とした南北両半球対称の温度分布となりますが、水平温度傾度は小さく、赤道と極の間で僅か  $10^\circ K$  程度にすぎません。

勿論、観測される気温分布とは放射のみによって決まっているわけではありません。大小さまざまな規模の運動によって熱が空間的に運ばれ、その結果としてある平衡を保っている状態が見えているはずですが、従って、今度は、一体中層大気中ではどんな運動があり、それをどう解釈すれば良いか、という問題に移りましょう。

### 3. 中層大気の運動

地球規模で見た中層大気の運動(大循環)は第1近似として考えるかぎり、かなり単純なものです。まず夏冬の場合、熱源たる夏極で上昇、冷源たる冬極で下降、その補償流として中層大気上部で夏半球から冬半球へ、下部でその逆、という両極をつなぐ巨大な子午面循環が考えられます。これに地球の自転の効果(コリオリの効果)を組み合わせると、冬半球で西風、夏半球で東風が卓越することになります。春分秋分時には赤道から両極に向かう子午面循環となりますから両半球とも西風成分が卓越するでしょう。事実このような季節別の東西風系は観測で確かめられています。冬半球の西風は極夜ジェットと呼ばれ、中緯度の高さ 60~70 km 附近に中心を持ち、その極大値は 80 m/sec にも及びます。これとはほぼ反対称に夏半球中緯度の東風は  $-60$  m/sec 程度の強さを示します。春秋の西風の最大値は赤道-極間の加熱差の弱いことを反映して 30~40 m/sec 程度です。

このような地球規模の巨大な子午面循環と東西風系の形成には、上の説明からわかるとおり、加熱冷却・重力・自転の3つの基本的な要因が本質的な役割りを果たしています。実を言えば、この考え方は今から250年も昔にハドレーが地表附近の熱帯貿易風と中緯度偏西風の成因を説明するために考えたことと殆ど同じです。下層大気の大循環は陸あり海あり山あり氷ありで何やら複雑怪奇ですが、中層大気のそれは単純明快です。

もちろん中層大気の運動はこのような軸対称子午面循環だけではありません。観測によれば、時間的にも空間

的にも大小さまざまなスケールを持った変動の存在することが知られます。従って第2近似として次に中層大気中の波動の特性を考えてみることにします。

#### 4. 中層大気中の波動力学

様々な波動擾乱の力学的特性を論ずるには、運動方程式をはじめとして、熱力学方程式、連続の式などを数学的にきちんと取り扱う必要があります。しかし、ここではその詳細にはふれず、そのかわりひとつだけ大切な点を指摘しておきましょう。

たとえば運動方程式を気圧座標で書いてみると

$$\frac{dV}{dt} + f\mathbf{k} \times \mathbf{V} + \nabla\phi = 0$$

となりますが、この式には気圧  $p$  や密度  $\rho$  が表わきどこにも現われていません。従って波動の性質をきめる運動の法則自体は、1000 mb であろうが 1 mb であろうが同じであることがわかります。この事情は他の方程式に関しても同様です。重力や自転の効果はもともと高さに関係ですから、中層大気のみならずも特に法則自体には変りがないわけです。それ故、もし中層大気波動の特徴というものがあるとすれば、それは中層大気中の局所的な熱源の存在とか、平均場の温度や風速の分布とか境界条件などに求められるべきものです。

一般に波の性質を論ずる場合、着眼点としては、その波がどうして作られたかという成因と、出来た波がどんな構造を持ちどう振舞うか、更にはどんな作用をもたらすか、といった点にあります。

それではまず中層大気中で波動が生成される可能性から考えますと、熱的励起と力学的不安定性ということになります。熱によって励起される波の例としては大気潮汐を挙げることができます。これは中層大気中のオゾンが太陽紫外線を吸収するとき、地球の自転に伴い昼側と夜側で加熱が異なるため励起されるもので、自転周期(24時間)に応じた1日潮、及びその高調波としての半日潮が生じます。

一方、不安定性に起因する波とは、波が平均場から何らかの形でエネルギーを受け取って自発的に発達する現象のことです。しかしはじめに述べたとおり、中層大気では成層状態が良いため、上下対流は生じません。同様に平均風速の垂直・水平シアに起因する不安定性も殆ど期待できません。その理由は、きわめて大雑把に言って、平均流のシアがあまり大きくないこと、中層大気が上下に固体の境界面を持っていないことのためによ

ります(殆ど、と言ったのは、実は理論的には特殊な不安定性の可能性がありますが、現実の中層大気中でそれが卓越しているという観測事実がないからです)。

潮汐を除いて、波の成因が中層大気内部における熱や不安定性でないとするれば、残る可能性は、波がこの領域の外から伝わってくることだけです。事実、中層大気の底(対流圏界面)で観測してみれば、様々な波が下層大気から上向きに伝わって来ていることがわかります。我々は今、大気の下層で何が起きているか知らない、という立場で考えているのですから、それらの波が如何にして作られたかについては目をつぶり、やって来た波の形態や振舞に注目しましょう。

下からやってくる、つまり伝播性の波動は、重力の影響を直接受けた“重力波”と、地球の自転及び球面の効果を受けて絶対温度の保存則に支配される“プラネタリー波”の2種類に大別することが出来ます。その特徴は風速分布や成層状態など平均場の量をパラメータとして、波の位相速度、水平垂直波長を結びつける“分散関係式”によって記述されます。

これを見て、何やらえらく難しそうだ、などと尻ごみする必要は全くありません。分散関係式を導くこと自体は比較的簡単な算術にすぎません。大切なのは、自然現象との対応において、場の状況設定をふまえた物理的な問題意識をしっかりと持つことです。

このようにして伝播性波動の記述が出来たならば、次の着眼点は、それらの波が地球規模で見たとき中層大気の大循環にどのような作用をもたらしているのか、という問題になります。次節でその具体例をふたつ示しましょう。

#### 5. 突然昇温と準2年周期振動

冬の成層圏の特徴を一言で要約すれば、極域が低温低圧で、それを取り巻くように西風帯状流が吹いていることです。この流れの場は下層からやってくるプラネタリー波を含んでいますから少しゆがんでいます。これに対し、夏の成層圏の流れはほぼ円対称の渦です。これは東風帯状流の中ではプラネタリー波は一般に伝わり得ない、ということから簡単に説明されます。

さて、年によって多少違いはありますが、冬の冷たい極渦の中で時折気温の突然上昇することがあります。“突然”というのは温度上昇の程度が1週間か10日位の間に数十度にも達するからで、この変化は季節の進行に見られるような、数ヶ月かかって数十度昇温するのにく

らべ明らかに桁ちがいの急激さです。この突然昇温現象を流れの場や波について見れば、半球をとりまく波の数が1~2という大きなプラネタリー波の振幅が増大して極渦が崩壊し、極域の昇温に伴って高気圧性の夏型の流れに変わってしまうわけです。

この現象は、先に波の成因のところで触れたように、極渦の力学的不安定性に伴って波が平均場からエネルギーを受け取り自動的に発達するものではありません。そもそもプラネタリー波は下層から伝播してきたものだったはずで、その波が平均場を変える作用を持っている点にこそ興味が持たれます。

ところが一方、次のような面白い性質が理論的に知られています。すなわち、“伝播性の波は、もし内部摩擦や放射による減衰とか外力の変化とかによる振幅の時間変化がなく定常的であり、かつ平均風速と位相速度が一致することがない、の条件を満たすならば、この波は平均流を強めたり弱めたりすることはない”。これを“非相互作用の定理”と言います。これだけでは少し抽象的に過ぎますのでプラネタリー波の場合について物理的な意味を述べますと、次のようになります。プラネタリー波は上向きにエネルギーを運ぶと同時に極向きに熱を運んで南北の温度傾度を変えようとしませんが、その熱輸送による緯度別の加熱冷却は、その結果生ずる上昇下降運動に伴う断熱変化によって打ち消されてしまいます。同様に波に伴う水平運動量輸送は上昇下降流の補償流として生ずる子午面循環に働くコリオリ効果と打ち消し合います。結局、平均場は波の存在を感じなくてすむわけで、これが非相互作用と呼ばれる所以です。

突然昇温のときを除けば、中層大気中ではほぼこの定理が当てはまり、まことにすっきりとしたイメージを描くことができます。逆に言えば、突然昇温とは、この定理の前提条件が満たされないときに起こる現象にちがいない、ということになりましょう。すなわち、もし何かの理由で下層から伝わってくるプラネタリー波が急速に増大したとしますと、このとき定常性の仮定が破れますから、増大した波の先端(上端)で極域の温度が上昇し西風が弱まります。その結果、やがて西風が東風にまで変わってしまうと、西風と東風の境目(平均風速ゼロの高度)では東西方向に動かない波の位相速度と一致しますから、そのことにより非相互作用の条件は更にくずれ、昇温はますます強化されます。

以上が突然昇温現象のメカニズムのあらましですが、その要点をひとことと言えば伝播性波動と平均流との相

互作用ということに尽きます。

波の作用を示すもうひとつの例として、現象的には一見異なっていますが、今度は赤道成層圏の準2年周期振動を取り上げてみましょう。

赤道上の風の吹き方は、コリオリ力がゼロのため地衡風の近似が直接使えず、多少考えにくいものです。しかし、ハドレーの考え方に従って回転球面上の角運動量保存則を適用するかぎり、赤道では東風帯状流が卓越するはずで、ところが、まことに不思議なことに、赤道成層圏の東西風をたとえば月平均で調べてみますと、東風と西風とがゆっくりと規則的に交替して出現していることがわかります。その変動の周期は約26ヶ月なので、ふつう準2年周期振動と呼ばれています。26ヶ月という周期の奇妙さもさることながら、力学の立場からはどうして赤道域で西風が現われるかが興味のまです。

このメカニズムは次のように考えられています。赤道成層圏には下層大気から上向きに伝わってくる2種類の大規模な波動が卓越しています(例によって、それらが下層大気中でどのように生成されているのかについてはいま問わないことにします)。赤道波動はコリオリ力が弱いため中緯度の地衡風運動とはかなり異なっていて、むしろ重力波の性質を備えています。その詳細は教科書の記述にゆずりますが、赤道附近ではコリオリ因子自体は小さくても、コリオリ因子の緯度変化は大きく、その効果が重要であることだけ指摘しておきましょう。

さて、中層大気の下層で現実に観測される赤道波は、ケルヴィン波(東西波数1, 周期約15日で東進)と混合ロスビー重力波(東西波数4, 周期約5日で西進)として知られています。これらの波は下層で励起され上方に伝播するとき、その波に伴う運動量を選びます。前者には西向きの、後者には東向きの運動量がそれぞれ伴っています。しかし、この波に関しても本来“非相互作用の定理”が適用できますから、もし波の非定常性などの効果がなければ平均流は波の存在を感じないはずで、ところが赤道波はその垂直波長が短いため、温度の非均一性に伴う放射によって上方に伝わる途中で減衰します。この減衰過程は定常の条件を満たしませんから、波と流れとの間に相互作用が生じ、東西風速が変化することになります。もう少し具体的に言うと、この減衰は波の位相速度と平均流との相対的な大きさによって決まるので、その結果として、東風の中を伝わるケルヴィン波は西風生成の作用をもたらす、西風の中を伝わる混合ロスビー重力波が東風を生み出すことになります。このふたつの効

果が交互に繰り返されて生ずるのが、すなわち観測される赤道東西風の周期振動に他なりません。

以上、舌足らずながら、突然昇温と準2年周期振動を例にとり、中層大気中における波の流れとの関係を概観しました。このふたつの現象はそれぞれ今から約30年前と20年前に発見され、その後の多くの観測的・理論的研究を経て、ともに10年ほど前にその大筋が理解されるようになったものです。そして現在でも、そのシナリオをよりクリアーカットなものにする努力が続けられています。

## 6. まとめ

中層大気には、まだまだ面白い現象がたくさんあり興味は尽きませんが、この小文の目的はそれらをすべて網羅することではありません。むしろ強調したいことは、放射過程にしる、ハドレー型子午面循環にしる、波の伝播にしる、或いは相互作用にしる、中層大気の中で起きている現象は雑多な要素が少ないが故に、その本質がきわめて単純化して考えられるという点です。これこそが中層大気を考える場合のひとつの大きな魅力であると言ってよいでしょう。近年の研究の跡をたどってみますと、1960年代から70年代にかけて、気象力学や大循環論をリードしてきたものは、実に波動伝播や相互作用といった新しい概念の具体化である中層大気力学だったと言っても決して過言ではありません。その意味から、ここに述べた突然昇温や準2年周期振動は単なる現象論的興味以上に、新しい力学の良き“教材”だったとも言えます。小学生の教材としてまず接地層を測らせることは必ずしも適当ではない、と言ったことの裏がえしとして、

気象力学を勉強するならば中層大気から始めなさい、と言えあまりにも我田引水に過ぎるでしょうか。スペースコロニーの住民云々と言ったのはその意味からだったのです。幸いにして、最近、松野・島崎 著「成層圏と中間圏の大気」(東大出版会)という素晴らしい教科書が出て、日本語で本格的に中層大気の勉強をすることが可能になりました。

しかしながら、気象学の歴史から一旦離れて、中層大気の気象学の明快さ面白さにまず目をむけることは、決して地上生物としての人間にまつわる気象を軽視することではありません。たしかに我々にとって天気や気候は重要なものであり、それに深い関心を寄せることは大切です。問題はその関心の持ち方、理解の進め方です。とにかく実用的に有益であることを至上命令とする工学は別として、いやしくも自然科学の立場から気象を見ようとする場合には、複雑な地表面附近の気象にとらわれることなく、自由な精神を以て、より大きな目で大気そのものを眺める努力が必要です。大げさな言い方を許してもらえば、物理学に限らず、一見実用と関係ない研究から生れてきた新しい知見が、結局一番重要な認識の根幹を作ってきたという事例は枚挙にいとまがありません。“急がば回れ”の諺どおり、対流圏の気象学も、一旦そこから離れた立場で考えることを必要にしている段階に到っているように思われます。

日本気象学会は来年で丁度百年目を迎えます。良い機会です。このへんで一度、それぞれの立場で気象に対する発想の転換をしてみませんか。中層大気の勉強もきっとそのひとつの糸口になるはずで。

## 第19回理工学における同位元素研究発表会のお知らせ

関係諸学協会の共同主催で、標記の研究発表会を開催いたします。この研究発表会の目的は、異なった専門分野の研究者が一堂に会し、同位元素および放射線の利用の技術を中心とした研究、およびその技術の基礎となる研究の発表と討論を行い、各専門分野間の知識と技術の交流を図ろうとするものであります。会員各位におかれては奮ってご応募、ご参加下さることを希望いたします。

会期 昭和57年7月5日(月)～7月7日(水)

会場 国立教育会館(東京都千代田区霞が関3-2-3 文部省となり)

発表申込 所定の申込書(1件1通)によりお申し込み下さい。所定の申込書は下記にて請求して下さい。

〒113 東京都文京区本駒込 2-28-45

日本アイソトープ協会内

理工学における同位元素研究発表会運営委員会

TEL (03) 946-7111(代) 内線 261

発表申込締切 昭和57年3月1日(月) 必着

講演要旨 講演要旨集を発行します。発表申込みがあり次第、所定の原稿用紙(1,400字程度)をお送りします。

講演要旨原稿締切 昭和57年4月15日(木) 必着