

大自然の作る熱気球のお話*

—対流混合層についての分かり易い説明—

高 谷 美 正**

1. はじめに

お天気の良い日に、草むらに寝転がって空を見る。すると、羊の背中のようなモクモクした背の低い白い雲が、ポカリポカリと浮かんでいる。こんなのだかな眺めを楽しんだことのある人は多いことと思う。このタイプの雲を積雲という。

実はこの積雲は、その下に目に見えない胴体を持っているのである。丁度氷山が水面下に大きな本体を隠しているように、温められた地表から立ち昇る、目に見えない、温かい空気塊の頭の部分が積雲になっているのである。白い綿帽子をかむった透明な熱気球。今回の談話室では、こうした自然界が作り出す熱気球についてのお話をしようと思う。

2. 大自然が作る熱気球

今から10年以上前(1984年11月23日)、筆者が気象大に勤務していた時のことである。天気の良い午前中に日食が起きた。窓から見上げていると、空が暗くなってしまう。それまでたくさんあった積雲が見る見るうちに消滅した。このことから積雲の発生は、日射に深く関係していることがわかる。

お天気の良い日、日射によって地面が温められると、次に地面に接している空気が温められる。そうすると、その空気は軽くなって上昇しようとする。その際、地表面に接している空気が一度に全部地表から剥がれて上昇するのではない。何らかの原因で温められ方に不均一があったり、大気の乱れによって、ある部分が上昇し、そのまわりから空気が下降してくる。つまり対

流が生じるのである。この対流は地表面のあちこちから発生して、全体として一つの大気の層を形成する。このように、対流により上下の空気が混合している大気の層を「対流混合層」という。ここでは略して混合層と呼ぶことにする。混合層の厚さは、日本の内陸部では日中で1000 mほどである。

混合層内の対流の水平スケールは、数100 m から1000 mの程度である。これらの対流は、その形態の違いによって、サーマルとかブリュームあるいは対流細胞などと呼ぶ。サーマルは地表面付近でできた温かい空気塊が、フワフワと昇っていく場合をいう。これは自然界が作る熱気球と名付けるにふさわしい。ブリュームは、地表面付近から温かい空気が柱のような形をして、時間的に連続して立ち昇っているイメージである。対流細胞は、多数の対流が規則正しく配列されている場合の各対流の要素をいう。ここではしばらく、サーマルという言葉を用いて対流を表現することにする。

1個のサーマルの概念図を第1図に示した。内部では上昇流があり、外側では下降流となっている。つまりこれが自然界が作り出す熱気球である。温められた地表からは、多数のサーマルが発生する(第2図)。ちなみに、パラグライダーを楽しむ人は、次から次へと上昇流を求めて、空中を渡り歩くのだそうである。

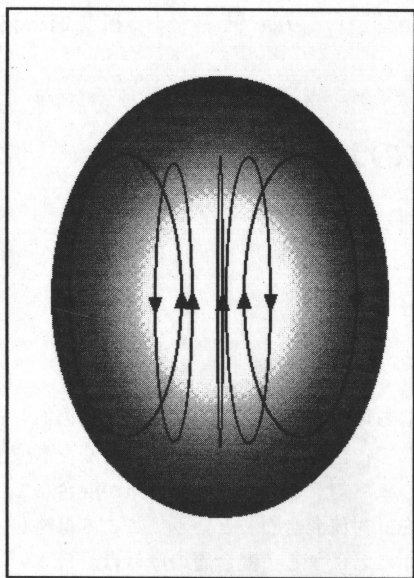
このサーマルは目に見えないとされているが、レーダーを使って観測することが出来る。サーマルの内部と外部の境界で、水蒸気の量や気温が大きく変化するので、屈折率も大きく変化する。この点を利用するのである。第3図は水平から2度だけ傾いた平面で切ったもので、サーマルがたくさん集まって、蜂の巣のようなパターンを形成しているのがわかる。鉛直断面を見たのが第4図で、柱のような構造が規則正しく並んでいる様子は、どちらかといえば対流細胞を見て

* Hot-air balloons in nature

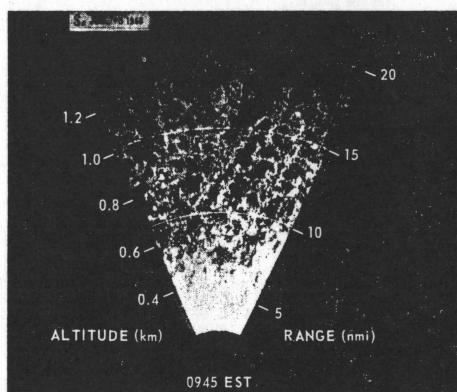
—An introduction to the atmospheric convective mixing layer—

** Yoshimasa Takaya, 気象庁図書資料管理室.

© 1995 日本気象学会



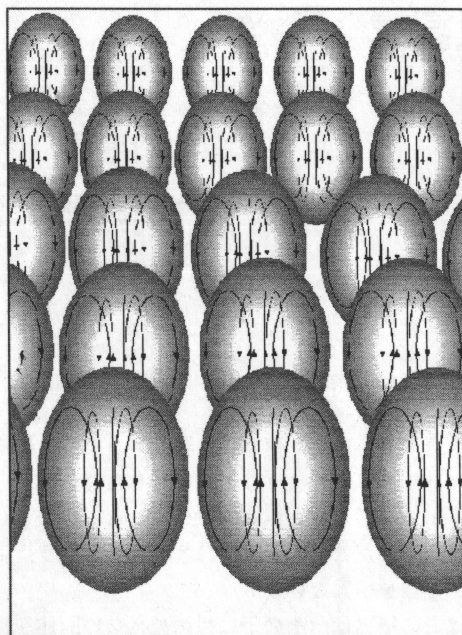
第1図 1個のサーマルの概念図。
1個のサーマルを単純化して描いたもの。



第3図 レーダーによって捉えられたサーマルの集合の水平断面。

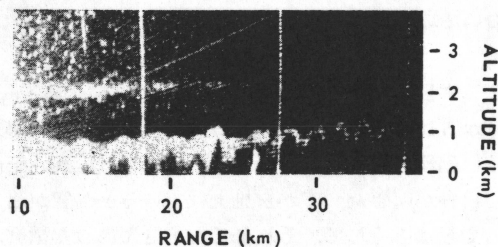
レーダーは、水蒸気量と気温が空間的に急激に変化している部分を白く描いている。サーマルとまわりの空気との境界で、水蒸気量と気温が大きく変化するので、輪のような模様はそれらの輪郭を表わしている。この図では、レーダーのビームを、水平から2°の角度だけ上に傾けながら回転させて撮影している。このために、厳密には水平断面ではなく、中心に近いほど低い高度を、離れるほど高い高度を見ていることになる。高い所ほどサーマルの直径は大きいことがわかる。

(アメリカ気象学会提供, T.G. Konrad, 1970: J. Atmos. Sci., 27, 1138-1147.)



第2図 温められた地表面から発生するサーマルの集合。

温められた地表から、多数のサーマルが発生している様子を単純化して描いたもの。



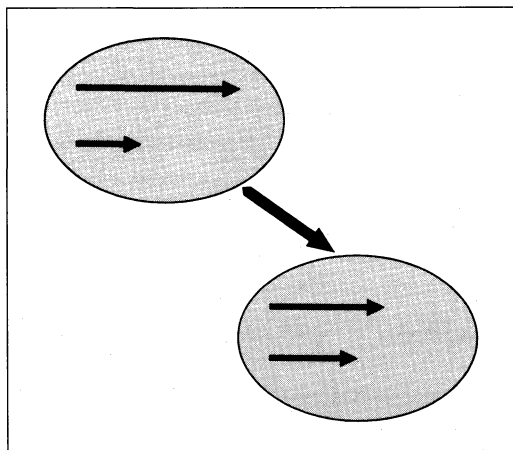
第4図 レーダーによって捉えられたサーマルの集合の鉛直断面。

レーダービームを、鉛直面内で回転させて撮影したもの。塔のような形で多数並んでいる様子は、どちらかといえば対流細胞を思わせる。塔の中は空気の上昇域で、側面が下降域。Konradは、対流細胞の形は第1図のように単純ではなく、入道雲のように表面はでこぼこしていると述べている。

(アメリカ気象学会提供, T.G. Konrad, 1970: J. Atmos. Sci., 27: 1138-1147.)

いるものと思われる。

ところが実は、このサーマルの姿を肉眼で捕えることが出来る場合がある。大気の水蒸気を十分含んでおり、かつ混合層が全体としてはまだあまり温まってい



第5図 摩擦による速度の変化。
初めに大きな速度差を持った流れがあったとする(左上)。それが摩擦によって速度差を減少させる様子(右下)を模式的に表わしたもの。

ない午前中などに見える(本号カラーページ、写真1)。水蒸気がたっぷり含まれているサーマルの境界が、まだあまり温まっていない上空の空気に触れると、含まれていた水蒸気が細かい水滴になり、このようなくらの形をした雲になるものと思われる。この雲は、雲底(雲の底の部分)がはっきりしていない。又、頂上は波打っていて、そこは積雲に似ている。この原因は、サーマルの内部の方が気温が高く湿っており、そのすぐ上の大気は冷たく乾燥していて、上が重く下が軽いという力学的に不安定な状態にあるからである。このためサーマルの上の空気は下にもぐろうとし、サーマル内の空気は上に昇ろうとして、大きな乱れが生じるのである。

本号カラーページ写真2は、約1分おきに撮影した写真である。積雲のような形をしたサーマルの頂上は、波打ちながら横に広がり、やがて消えていくのがわかるであろう。サーマルは、混合層の上にある逆転層にぶつかると、それ以上は上昇できずに水平に広がる。煙が天井にあたって水平に広がるように、その時に、水滴は蒸発し、混合層の上部に水蒸気が広まって行く。

このように、地表面付近で温められた空気は上昇し、まわりからまだ温まっていない空気が下降して温められて上昇する。こうした空気の循環運動を通じて、地表面の熱が次第に上空に伝わってゆくことになる。

3. 熱気球が運ぶ水平な風

混合層内の空気の下上運動は、混合層上部の強い風

を地表付近まで運んできたり、逆に混合層上部の風に、静止している地面の影響を運んでブレーキをかけたりする。このことについて説明しよう。それには摩擦の話から始めないといけない。

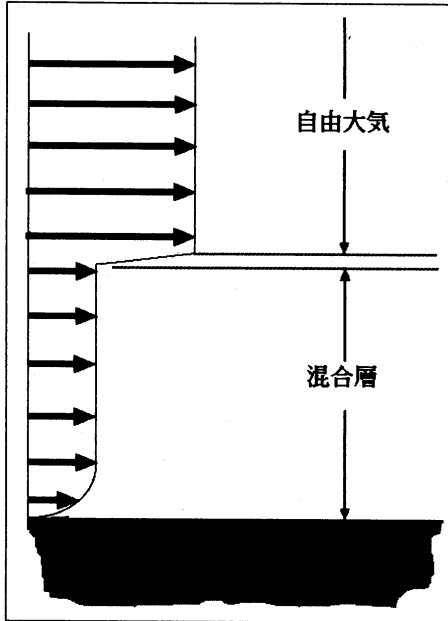
固体と固体の摩擦なら、日常生活の中で経験済みである。固体と流体(液体)の摩擦は、例えば川の流れは、真ん中で速くとも岸辺では比較的ゆるやかであることや、ボートを漕ぐのを止めればやがて止まってしまうことなどに見られる。どちらも、速度の違う物どうしが接触して、速い方は遅い方に合わせ、遅い方は速い方に合わせ、互いに歩み寄って違いを少なくするように変化するということである。速度の違う空気どうしの摩擦も全く同様で、互いにその速度の差を小さくするように働くのである(第5図)。もっとも質量の違いが極端に大きいと、質量の小さい方だけが一方的に歩み寄るように見える。風は静止している地面に歩み寄って、地表付近で速度が小さくなる。強い風の時に、地面に身を伏せてしのぐことを想像して見てほしい。しかし実は、地球の方も大気の運動の影響を受けて、自転速度を変化させていることが、最近の精密観測からわかっている。

サーマルは地表で発生するために、水平速度が小さい空気からなっている。サーマルとともに上昇してきた空気は、混合層の上部で上空の強い風に出会うと、摩擦の働きにより水平速度を与えられる。同時に上空の風も摩擦によって速度を減じる。上昇してきた空気は、やがて下降に転じる。しかし、地表面に接すると、持ち運んできた水平速度を摩擦により失う。こうして、混合層内の至る所で、空気が上下運動をしながら、上空の風の風速の一部をもらってきては地表面にぶつかって速度を失う、ということを繰り返している。この結果、混合層の中では、上空より風速が小さくなっている。つまり、混合層の上部まで地表面の影響が及んでいるのである。地表面の影響の及ばない上空の大気を「自由大気」という。水平方向の風速が、高さとともにどう変わるかを単純化して描いたのが第6図である。ただしこの場合は、混合層の上で水平方向の風速が一定と仮定した。

4. 混合層の1日の変化

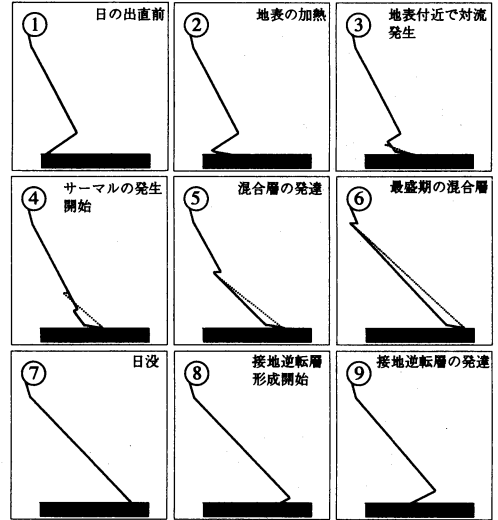
ここで、混合層の1日の変化を、気温の高さ方向の分布をもとに説明しよう(第7図①～⑨)。

良く晴れた日の日の出の直前は、地表面はいわゆる放射冷却によって冷たくなっている。そして地面に接



第6図 混合層と自由大気の速度分布。
混合層の上部まで地表面の影響が及んで、水平速度が自由大気より小さめになって、かつ高さによらない分布をしている。混合層と自由大気の間には薄い逆転層というのがあって、そこで水平速度はほとんど不連続的に自由大気の速度に近づく。

している空気も冷えて、上へ行くほど気温が高いという、いわゆる逆転層(接地逆転層)を形成している(①)。そこに太陽が昇ってくると、先ず地表面が温められる。次に地表に接している空気が温まる(②)。やがて対流が発生する(③)。この対流は、初めは地表面に近い所に留まっている。というのは、接地逆転層があるために、地表面から上昇した空気はすぐに浮力を失い、上昇を抑えられてしまうからである。しかし次第に地表面が温まってくるにつれて、ついにはあちこちで、この接地逆転層を越えて、温かい空気の塊が上昇を続けるようになる(④)。この塊がサーマルである。地表面付近では直径が100 mの程度だったサーマルは、上昇しながら上空の低い気圧に合わせて膨張したり、周囲の空気を取り込んだりして成長する。この膨張の際に、外部の空気を押しのけるという仕事にエネルギーを使うので、サーマルの温度は上昇するにつれて減少する。しかし、サーマルの温度がまわりの大気温度より高い間は、サーマルには浮力がはたらき上昇を続ける。そしてある高さで、サーマルの温度とまわりの大気の



第7図 混合層の気温分布の日変化。

①～⑨はいずれも横軸は水平方向に平均した気温、縦軸は高さを表わす。点線はサーマルの温度が、上昇するにつれてどのように変化するかを示している。

①日の出直前で、地表面付近に逆転層が出来ている様子を表わしている。

②地表面に極く近い所の空気が熱せられているが、対流はまだ発生していない。

③接地逆転層の下で小規模な対流が起こっている。対流の上部に新しい逆転層が形成されている。

④地表面の加熱も強まり、接地逆転層が消滅し、サーマルが立ち昇り始めたところ。

⑤サーマルが頻繁に発生して、逆転層の位置も高くなってゆく。

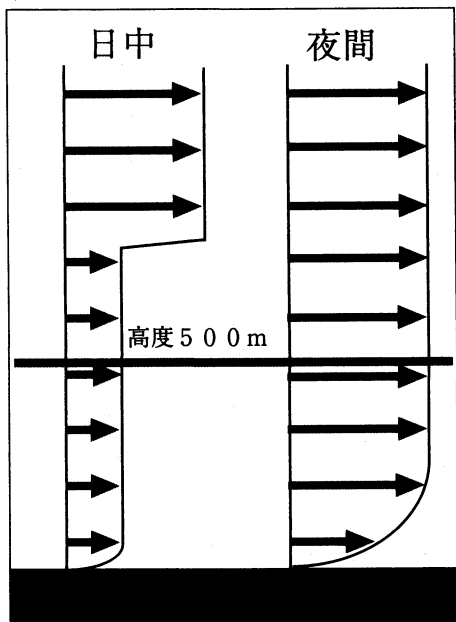
⑥最盛期の混合層で、厚さも最大になったところ。

⑦日没とともに、対流も不活発になる。そして上空の逆転層がぼやけてくる。

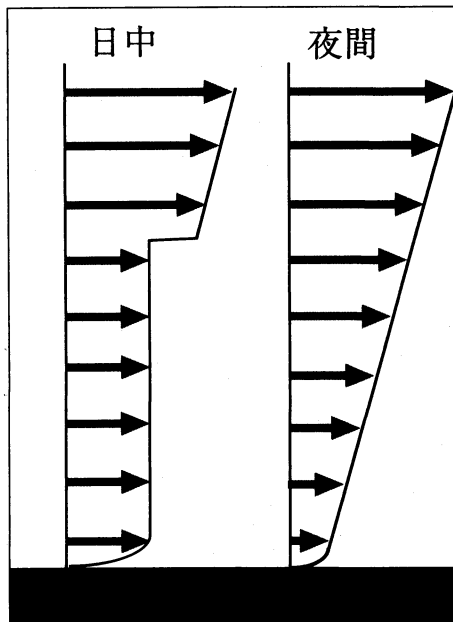
⑧夜間にはいり、地表が冷え始め、それにつれて地表面付近の空気も冷えて、接地逆転層が形成され始める。

⑨接地逆転層が発達する。

温度が等しくなり、サーマルは浮力を失う。しかし上昇する勢いで、なお少しサーマルは上昇するので、静止する頃には、まわりの大気より温度が低くなっている。あちらこちらでサーマルが上昇するうちに、サーマルが静止する高さの大気温度は、それより少し上の大気温度より低くなり、こうして逆転層が形成される(③～⑥)。太陽高度が上がるとともに、逆転層の位置は高くなり、混合層は発達する(⑤、⑥)。静止する頃のサーマルの直径は、日中では1000 mほどにな



第8図 混合層の水平な風の日変化1.
地上500mの高さの気は、日中は活発な対流活動の中にあるが、夜間になると対流はなくなり、上空の強い風の影響を受ける。



第9図 混合層の水平な風の日変化2.
風の強さが上空に行くほど強い場合を考える。日中に混合層が発達すると、より上空の強い風を地上にもたらし、夜間になると、上空の風は降りてこない。

る。静止してからは逆転層の上の気と混じりあって、サーマルとしての一生を終える。夕方になって地表面が冷えてくると、サーマルの発生はほとんどなくなる。同時に混合層の上の逆転層ははやけてくる(⑦)。やがて放射冷却によって地表面の冷却が進むと、地表面付近に接地逆転層が形成され始める(⑧)。更に夜間に入ると、接地逆転層は発達する(⑨)。晴天が続く限り、こうした変化は毎日規則的に起こる。これを混合層の日変化と呼ぼう。

サーマルが十分多量の水蒸気を含んで上昇し、上空で冷えた時に、サーマル内の水蒸気圧が飽和に達すれば雲ができる。これが積雲である。

混合層内の対流運動は、サーマルの不規則な生成消滅の状態であったり、上昇域と下降域が比較的規則的に並び、むしろ対流細胞と呼ばれるものになったりする。どのような条件で、運動の違いが生ずるかは、はっきりとはわかっていない。しかし筆者の経験では、初めにサーマルの状態があって、やがて対流細胞の状態へ移行するようである。

ここでちょっとわき道にそれる。第28回夏季大学(1994年8月1～3日)の、ある講義が終わってから、

「高度500mの風が夜間に地表面の影響から解放されるとは、どういうことですか?」という質問が受講者から出された。その講義の中で、夏の南関東上空約500mに、深夜現われる強風(夜間下層ジェット)の話があり、その成因に関連した質問であった。その時の講師の回答は、学問的には正確なものだったが、限られた時間の中で十分に理解してもらうことは困難だったと思う。しかしこの質問は、対流混合層についての本質をたずねているものであり、これに対して分かり易い説明を与えることは、気象学の普及にも役立つのではないかと考えて筆を執ったというのが本稿の動機である。質問の意味は、高度500mの風が、日中どうして地表との間に摩擦を生じるのか。そしてその摩擦が夜間になればどうして消えてしまうのかということであろう。

本稿をここまで読み進めて下さった読者ならば、答えは見えていると思う。500mほどの高さの空気を考えれば、これは混合層の中程の高さである。そして日中は活発な対流があるので、地表面との間の摩擦によって風が弱いと考えられる。夜間になり、地表面が冷えてくると、対流もなくなる。すると、地表面の摩

擦は上空まで及ばず、上層の強い風がそのまま吹くと考えられる。つまり上空 500 m の風は地表面の影響から解放されているのである (第 8 図)。

ちなみに、上空での水平速度分布が高さとともに増大している場合には、混合層の発達とともに、より上空の強い風が地表面付近まで降りてくることがある (第 9 図)。冬の日本の太平洋側で、夜間よりも日中のほうが季節風が強く吹くのはこうした効果による。

5. おわりに

先に述べた「夜間下層ジェット」の現象では、混合層の日変化による効果の他に「慣性振動」という、地球の自転による効果が加わり、日中と夜間の違いを一層強めている。これについては機会を改めて解説したい。

第 1 図～第 4 図と本号カラーページ写真 1, 2 のサーマルや対流細胞の形は、上空の風があまり強くない場合のものである。ある程度風が強まると、サーマルの形は変形し、又風の向きに沿って列を作って並ぶ傾向があることが報告されている。更に風が強まると、並んでいた個々のサーマルはくっついてしまい、ロールケーキのようになることがわかっている。

最後に、典型的な対流混合層が形成されるのは、高

気圧下であって天候が安定している場合に限られるということを付け加えよう。お天気が良いということは、高気圧におおわれているということである。従って大局的には大気はゆっくりと下降している。この下降してくる大気の最下層に対流により混合層が形成される。夏の日射が強い時は、大概午後になると、あちこちで、混合層上部の逆転層を越えて対流が発達する。それはしばしば積乱雲になる。積乱雲の高さは対流圏の上部にまで及ぶことがある。或いは低気圧や台風などが来れば混合層はひとたまりもなく破壊されて、空気の上下の混合は対流圏の上から下までの範囲で行われる。

この解説を書き始めてから、空をよく注意して眺めるようになった。そして、1 日として同じ空が無いことに改めて驚いている。読者諸氏がこれを読んで毎日の空の変化を楽しんで下さるようになれば著者としては望外の喜びである。

この解説を作成するにあたって、荒川正一氏 (東京家政大学)、北畠尚子氏 (気象大学校)、高橋俊二氏 (気象研究所)、花房龍男氏 (気象研究所)、「教育と普及委員会」から貴重なご意見をいただいた。アメリカ気象学会は、写真の複製を快く許可して下さった。深く感謝申し上げる。