

第4章： 大気の安定度の解析（エマグラム）

1. はじめに

天気予報で、大気の状態が不安定になっているので雷が発生しやすいでしょう、と言うことがある。このような場合、大気の安定度は、鉛直方向の気温と湿度の分布によって決まっている。本実験では、夏季に関東地方が一日中よく晴れて猛暑に見舞われた日と、雷雲が発生していわゆるゲリラ豪雨に襲われた日を例に、高層気象データを解析して、大気の安定度の評価を行なう。

課題（1）、（2）と、課題（3）、（4）のうち経路を図示する部分はエマグラム用紙に作図し（手書き）、課題（3）、（4）のうち数値で解答する部分と、課題（5）～（7）はレポート用紙等を書いて提出しなさい（手書きでもワープロでもよい）。適切なタイトルと学生番号、氏名を記載した表紙をつけ、ホッチキスでとじて提出すること。レポート用紙のサイズはA4とする。

2. 用意するもの

筆記用具、定規、レポート用紙（以上は各自持参）、エマグラム用紙

3. データ

使用するデータは以下の2セットである。

1. 高層気象観測 館野 2007年8月15日 9時
2. 高層気象観測 館野 2008年8月 5日 9時

時刻は日本標準時である。配布したデータには、高層気象観測の結果のうち、気圧、高度、気温、相対湿度、露点温度が記載されている。なお、露点温度は、気圧と気温、相対湿度から算出したものである。2セットのデータのうち、前者は猛暑に見舞われた日、後者はいわゆるゲリラ豪雨に襲われた日のものである。

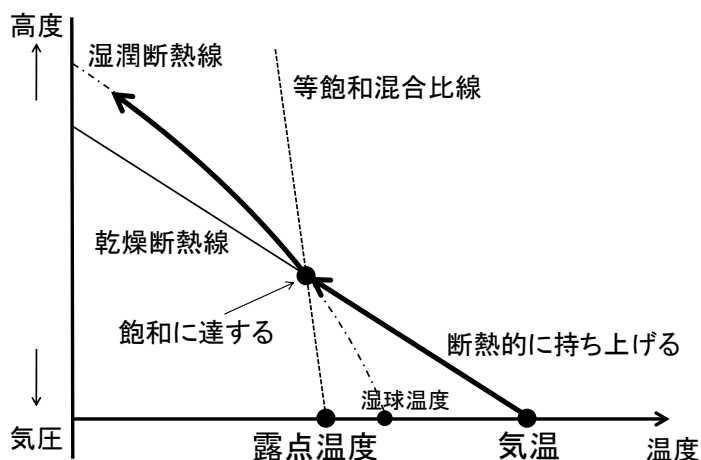
4. エマグラムの作成と利用

エマグラムの縦軸は気圧（hPa）、横軸は温度（℃）である。気圧は、対数軸になっていて、上下が反転している。はじめに、高層気象観測で得られた気温の観測値をプロットし折れ線で結ぶ。次に、露点温度の観測値を同じようにプロットし折れ線で結ぶ。

エマグラムに引いてある斜めの曲線のうち、最も横に寝ているオレンジ色の線を「**乾燥断熱線**」(dry adiabat)、やや寝ている水色の線を「**湿潤断熱線**」(moist adiabat)、もっとも立っているピンク色の線を「**等飽和混合比線**」(line of constant mixing ratio)という。乾燥断熱線は、飽和に達していない空気塊の断熱減率（**乾燥断熱減率**(dry adiabatic lapse rate)）を表している。乾燥断熱減率は $1.0^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 程度の値である。湿潤断熱線は、飽和に達している空気塊の断熱減率（**湿潤断熱減率**(moist adiabatic lapse rate)）を表している。湿潤な空気塊は、断熱膨張して温度が低下すると水蒸気が凝結し潜熱を放出する。このため、湿潤断熱減率は、乾燥断熱減率より小さい。比較的高温な環境では $5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 程度の値であるが、低温になると空気中に含まれる水蒸気の量が減少し、潜熱の放出による加熱の効果も小さくなるため、乾燥断熱減率に近い値になる。

エマグラム上のある位置にある、未飽和の空気塊を断熱的に持ち上げることを考える。はじめ

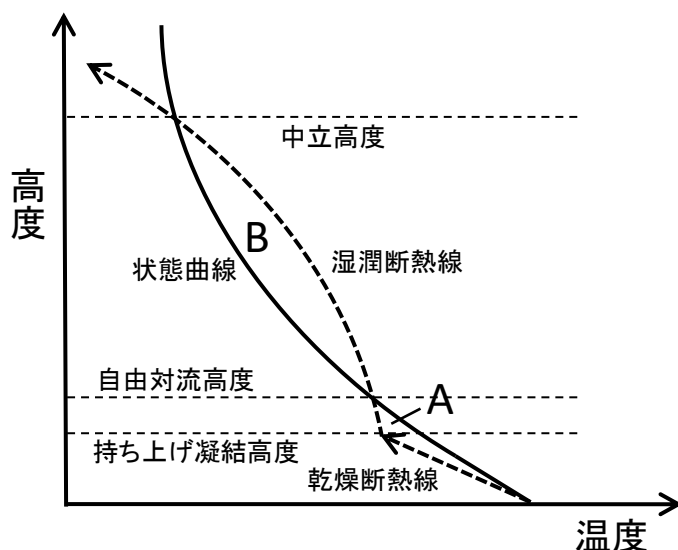
のうち、空気塊の温度は乾燥断熱線に沿って低下し、エマグラム上を左上に移動していく。エマグラム上の空気塊の位置における飽和混合比が、この空気塊の実際の混合比と等しくなったとき、空気塊は飽和に達したことになる。混合比（乾燥空気の質量に対する水蒸気の質量の割合）は凝結していなければ保存する量であるから、空気塊の混合比は、露点温度における等飽和混合比線の値として読み取ることができる。空気塊が飽和に達すると、以後、空気塊の温度は湿潤断熱線に沿って低下していく。



エマグラム上に、実際に観測された気圧（高度）と気温、露点温度との関係をプロットすれば、大気の状態を解析することができる。持ち上げた空気塊の温度が、その高度における気温より高い場合には、さらに浮力を受けて上昇しようとするので、大気の状態は不安定である。

現実的な状況として、条件つき不安定の成層のもとで、水蒸気を含んでいるが飽和には達していない空気塊を上方に移動したときの温度変化を考えよう。下の図には実際の気温分布を状態曲線として実線で描いた。地表付近の空気塊を持ちあげると、点線で示したように、空気塊の温度は乾燥断熱減率に従って低下していき、やがて飽和に達する。このときの高度が**持ち上げ凝結高度**(lifting condensation level; LCL)である。この高度は積雲や積乱雲のような対流性の雲の雲底高度にほぼ対応する。さらに上昇を続けると、湿潤断熱減率に従って温度が下がっていく。条件つき不安定の成層のもとではまわりの空気の温度減率は湿潤断熱減率よりも大きいので、上昇する空気塊の温度はやがて周囲の気温と等しくなる。この高度を**自由対流高度**(level of free convection; LFC)という。この高度を超えて上昇すると、空気塊の温度は周囲の気温よりも高くなるから、外力がなくても浮力によって上昇を続けられるようになる。

対流圏の上層では気温減率は小さくなっているから、上昇する空気塊の温度は、やがて周囲の気温に等しくなる。これを中立高度とよぶことがある。中立高度より上では空気塊は浮力を得ることができないから、対流は止まる。理論上、この高度が対流性の雲の雲頂高度に対応する。ただし、実際の積雲対流においては、空気塊は相対的に低温なまわりの空気を取り込みながら上昇していくので、雲頂高度はこれよりも低くなることが多い。空気塊がまわりの空気を取り込むことを**エントレインメント**(entrainment)という。



本実験では、**ショワルター安定指数**(Showalter stability index; SSI)を用いて、大気の安定度を評価する。ショワルター安定指数とは、500 hPaにおける実際の気温と、850 hPaの位置にある空気塊を断熱的に500 hPaまで持ち上げたときの空気塊の温度との差として定義される。持ち上げた空気塊の温度のほうが高ければショワルター安定指数は負の値となる。このような場合には、持ち上げた空気塊の温度がまわりの空気の温度よりも高いため、浮力によってさらに上昇することになり、大気の状態が不安定であるといえる。理論的には、0℃未満であれば不安定、0℃より大きければ安定ということになるが、日射による地表付近の昇温などを見込み、+2℃以下の場合には雷発生に注意が必要であるとされている。

本実験では計算はしないが、大気の安定度の指標として、**対流有効位置エネルギー**(convective available potential energy; CAPE)や**対流抑制**(convective inhibition; CIN)を用いることがある。CAPEとは、空気塊が自由対流高度から中立高度までまわりの空気と混ざることなく浮力によって上昇したとき、浮力がした仕事のことであり、浮力の大きさは、持ち上げられた空気塊とまわりの空気との温度差に比例するので、CAPEつまり浮力がした仕事は、上の図のBの部分の面積に対応する。一般に、CAPEが大きいほど積雲対流が発達しやすいと考えられる。一方、CINとは、地表付近の空気塊が持ち上げ凝結高度を経て自由対流高度まで上昇するために必要な仕事のことであり、上の図のAの部分の面積に対応する。CINが大きいほど積雲対流が発達しにくいとされる。

上記の各指数の他に、比較的簡単に計算できる指標として、K-index、Total Totals indexなどが提案されている。たとえば、K-indexは

$$KI = T_{850} - T_{500} + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700})$$

のように定義される。値が大きいほど大気の状態が不安定であり、日本での目安として、28℃以上で雷が発生する可能性が高くなる。また、Total Totals indexは

$$TT = T_{850} - T_{500} + T_{d850} - T_{500}$$

と定義され、K-indexと同様、値が大きいほど大気の状態が不安定である。TTが40℃以上の場合、雷が発生しやすくなる。

5. 課題

(1) 2007年8月15日9時の館野における高層気象観測について、エマグラムを作成せよ。今回の解析では、地上（館野においては高度31m）から300hPaまでのデータについて作図を行なうものとする。適切に線の種類を使い分けて気温と露点温度の線を区別しやすくように表示すること。

(2) 2008年8月5日9時の館野における高層気象観測について、(1)と同様に、エマグラムを作成せよ。

※課題(1)と(2)のエマグラムは別々の用紙に作成すること。

(3) 課題(1)と(2)で作成した、それぞれのエマグラムについて、持ち上げ凝結高度と自由対流高度を求めよ（単位はhPa、1の位まででよい）。持ち上げる空気塊は、混合層（大気がよく混合されている層）の上端に相当する高度として、(1)においては959.8hPa、(2)においては988.7hPaとする。解答はレポート用紙に記載せよ。ただし、指定された高度の空気塊を自由対流高度まで持ち上げたときの経路は、課題(1)、(2)のエマグラム上に書き入れよ。

(4) 課題(1)と(2)で作成した、それぞれのエマグラムについて、ショワルター安定指数を求めよ。解答はレポート用紙に記載せよ（500hPaにおける気温の値と、850hPaから500hPaまで持ち上げた空気塊の温度の値も示すこと）。ただし、850hPaの空気塊を500hPaまで断熱的に持ち上げたときの経路は、課題(1)、(2)のエマグラム上に書き入れよ。

(5) ふたつの事例の間で、持ち上げ凝結高度と自由対流高度にはどのような違いがあるか。また、そのような違いが生じた主な原因は何か、エマグラムから読み取れる範囲で答えよ。

(6) ふたつの事例の間で、ショワルター安定指数にはどのような違いがあるか。また、そのような違いが生じた主な原因は何か、エマグラムから読み取れる範囲で答えよ。

(7) ふたつの事例の間で、CIN（対流抑制）にはどのような違いがあるか、エマグラムから読み取れる範囲で答えよ。

(8) ふたつの事例に関して、持ち上げ凝結高度、自由対流高度、ショワルター安定指数と午後の降水との関係について考察せよ。

課題の解答は、学生番号と氏名の記入を確認のうえ、次回の実験の開始時まで提出してください。