

エマグラム (Skew-Tダイアグラム) の読み方

(はじめに)

この資料は、下段の原著からの翻訳版です。例によって誤訳・珍訳は大目に見て頂き内容の理解に努めて下さい。原著を読みみたい方にはURLも書いておきましたのでご利用下さい。
H28.10.28 吉田s

上昇気流が私たちのエンジン！

サーマルと不安定：

太陽の光は空気を暖めることなく透過し、遮るもの即ち暗色の耕作地、舗装や岩の太陽に面する側に当たって熱に変わります。草や木の葉緑素はこの太陽光が全て熱に変わらないような緩衝役を果します。この地面の暖まりかたの差がサーマルを作ります。ただ、それは上空の空気の温度が地面のそれより低い時でそうでなければ上昇しません。どの程度低いか、どのくらい早く上昇するかを決めます。これを不安定とか安定ではない大気とかいいます。

計測結果：

昔はラジオゾンデの気球が毎朝0600にバッファローや他の場所から上げられ、大気温度や露点温度、風向・風速を上昇しながら計測していました。今日では衛星による計測が可能になり、コンピュータ・モデルによる予測計算でどんな場所の大気の状態も判るようになってきました。この予測計算のプロットは調査結果と呼ばれ、書き表した図は、温度(T)を右に傾斜(Skew)させてプロットしてあるので「Skew-Tダイアグラム」といいます。これらのプロットはソアリング・パイロットである私たちに膨大な量の有効な情報を伝えてくれます。

勉強の動機：

このプロットの読み取り方を学んだら、以下の決定ができるようになります。

- ・逆転層があったとして、それが消滅してソアリングが始められるか
- ・トリガー温度 — 地上温度が何度になればサーマルが出来始めるか
- ・その日の期待できる最高温度は何度か
- ・その最高温度には何時になるか、サーマルは高度いくつまで届くか
- ・雲ができるか、その高度は、またその厚さは
- ・各高度における風向／風速、地面近く若しくは雲の近くのリフトはどこか
- ・オーバーデベロップメントになり、雷雨や雨がくるか
- ・まとめていえば — その日はどのように良いかまたは悪いか、もし予想が外れるとしたら何がきっかけになるか

Skew-Tダイアグラムは、ちゃんと説明を受けないとなんだか得体の知れない様子にも見えますが、幸いなことに私には読者がこれを簡単に見てそのソアリング日が期待できるかどうかの判断をするためのガイドができます。

原著 Skew T's – How to Read Them

By Jim Martin (UP) Finger Lakes Soaring Club, Dansville, NY 2015

http://www.flsc.org/portals/12/PDF/Read_Skew_T.pdf

データの入手先：

一番お勧めのサイトは、Bill MoningerさんのFSLサイトのインターアクティブ Skew-Tダイアグラムです。

(<http://www-frd.fsl.noaa.gov/mab/soundings/java/>)

ここでダウンロードしJAVAで見ることができます。もしJAVAが使えないならHML5のボタンを使って下さい。空港の識別記号と欲しい時間を入れればダイアグラムを入手できます。マウス・ポインターをその日の予想最高地上温度の位置においてクリックすれば、その日の余裕エネルギーや凝結(雲のできる)高度、対流の深さが描かれます。

ソアリング・チャートの予報サイト：

私の好きなサイトはXCSSkies (<http://www.xcsskies.com/>) で、必要なデータプロットとソアリング予報が入手できます。このサイトは、一日中最新情報に更新されていて、実際のソアリング時刻に最も近いデータが得られます。

同様にSkew-T情報が得られ、さらに各種の予報マップを提供してくれるもう一つのソアリング用のサイトは、Dr.JackのBLIPMAPSです。

(<http://www.drjack.info/BLIP/INFO/index.html>)

この両サイトが提供してくれるチャートは、その中身に手を加えたりする必要ありませんが、内容を理解すること、そしてたまにあるのですがこの数学モデルが間違った入力で計算されていたらその結果も間違ってしまうことを覚えて下さい。Skew-Tが何を示しているかを理解できたらこの予測チャートを使った判断が確りできます。

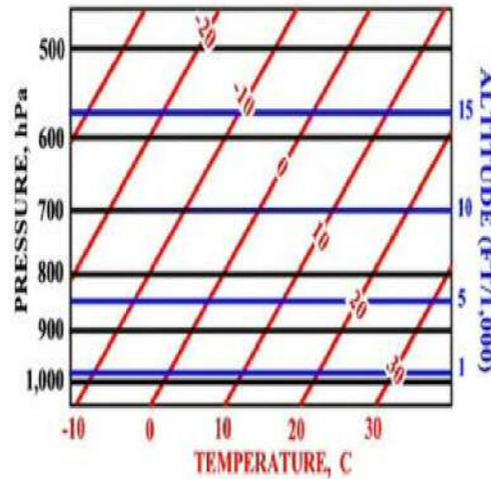
ついでに言うと、このダイアグラムは理想的なサーマル・ソアリングの予想チャートであるだけでなく、本来は政府が対流性の悪天候を予想するために開発したものです。データを収集して精密なシミュレーションモデルにする為の多大な努力は、あなたへの良いソアリング予報だけでなく、破壊的な力に発達しうるサイクロン、ハリケーン、サンダーstormの予報の為です。

Skew-Tダイアグラムの構成

Skew-Tダイアグラムは、大気温度と露点温度のデータを高度別にプロットしたものです。温度一定の線は高度／圧力の縦軸に沿って右に傾斜(Skew)させています、このダイアグラムには私たちが価値ある情報を読み解くための追加のラインが引かれています。これらの追加ライン、乾燥断熱線、湿潤断熱線、等混合比線は熱力学の方程式に従って引かれています。ありがたいことにこの方程式に怯える必要はなく、数式を解く作業はありません。ただ、これらの線が何を意味するかは理解しておく必要があります。

温度と圧力の線

温度一定の線は、垂直方向に右に傾けて(Skew)引かれ、圧力の減少具合(即ち高度)はその対数值(log)で水平に引かれます。このため、この図は正式には、Skew-T log-Pダイアグラムと呼ばれます。これは、この図から外挿して求める時に便利だからです。判り易くするために縦軸の右側に圧力高度の線も加えられます。何処の部署がこのダイアグラムを作ったかにより、この単位は海面上からfeetかKmが使われます。



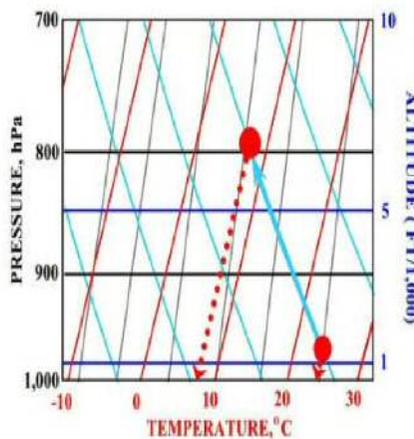
気温の下がり方(遞減率):

空気は上昇させると膨張することによりその温度を下げます。空気が地面にある時はある量の水蒸気を含みます。空気の塊が上昇すると、それは乾燥断熱遞減率(DALR)に沿って温度を下げついでには含まれた水蒸気を凝結させることとなります。雲ができ、そのまま上昇し湿潤断熱遞減率(SALR)に沿って温度を下げます。ここで「断熱」とは熱力学の言葉で“温度の変化率”を言います。(記者注:断熱とは、“周囲と熱量のやり取りのない”変化のこと。)

乾燥断熱率

乾燥断熱率の線は、空気の塊を上昇させたら、凝結(100%湿度)が起こるまでに温度がどう変わるかを示しています。その密度即ち空気の浮力はその温度とどのくらい水蒸気を含んでいるかによります。

図が最初の解析線の例です。簡略化したSkew-Tですが、シアンは乾燥断熱率の線です。ここでは赤丸で示した地面の空気の塊(この例では地面は1200ftMSLでこの空気の温度は23°Cです)が6000ftMSLまで上昇したら何が起こるかを示しています。この赤丸はサーマルの簡単なモデルです。これが上昇すると温度が下がりますが、その値は乾燥断熱線に沿った値になります。温度の線が“Skew”していますので正しい温度を読み取るには注意がいります。矢印のついた赤い波線がこの温度をどのように読み取るかを示します。勿論、しばしば地上気温や霧などで乾燥断熱といえない条件もありますが、こういった時の解析は別に示します。



先ほどの空気の塊は6000ftでは8°Cに冷やされ体積は20%増えます。この冷却はこの塊を膨張させることによりおきます。上昇により周りの空気の圧力は下がり、この塊は包まれている空気を押しつけて膨張します。この仕事は、この塊の内部エネルギーで賄われるため温度が下がります。

断熱変化は、周りとの熱のやり取りがないのでそういうのですが、私たちはこの塊はそれが動いている間も周りの空気と混じり合わないかと仮定しています。これは妥当な仮定で、少なくとも有効で矛盾のない結果をもたらしてくれます。乾燥断熱率(DALR)でいう“乾燥”とは、乾燥した大気なんてないことから文字通りの状態ではありません。未だ凝結が始まっていないという意味です。この率は1000ft当たり約3°Cと覚えておいて下さい。凝結が始まると、湿潤断熱率(SALR)にとって代わります。私たちはこの湿潤断熱率の線は雲底から上で用います。

等混合比線(雲底)

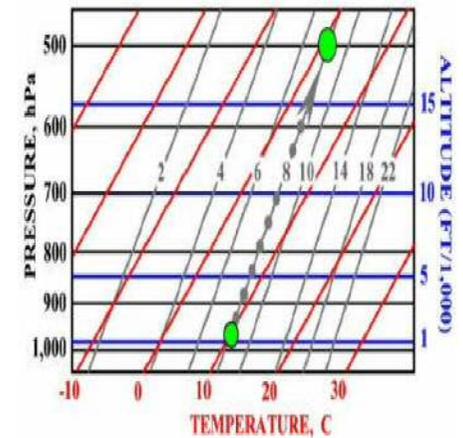
Skew-T log-Pダイアグラムに先ず乾燥断熱線を引くことから始めました。上昇する空気の塊が露点温度に達したら何が起きるかを知るにはこの図に別の線を引く必要があり、それは等混合比線(ここでは灰色で引かれた線で一定の塊の空気を含みうる水蒸気の量を数字で示してある)です。この線と乾燥断熱率の線が何処で交わるかで凝結が始まり雲を作りだすかが決定できます。

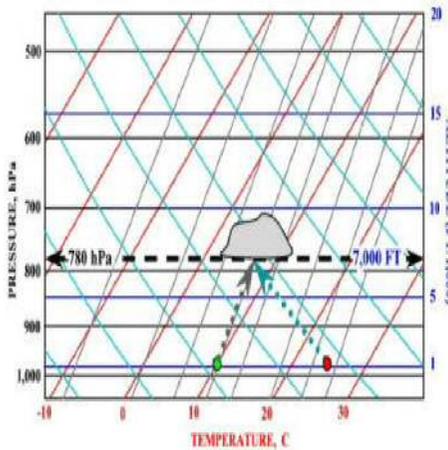
これまでの勉強で上昇する空気の塊が乾燥断熱率に従ってどのように温度を下げていくかが判りました。

雲ができるかできないかを予想するには上昇する空気の露点温度がどう変化するかを知る必要があります。この等混合比線が教えてくれます。この“混合比”とは1kgの空気は何gの水蒸気が含まれるかを示します。この比率は質量比率(反対は体積比率)で、この塊が膨張しても比率は変わりません。しかし、露点温度は変わります。地上にある塊は露点温度10°Cでしたがこれを18000ftに上昇させると2°Cになります。

繰り返しますが、この等混合比線は空気の塊が高度を上げるに従って露点温度がどう変わるかを示します。地面の露点温度を通る一定の混合比線は地面の空気を持ち上げて行った時の露点温度の変化を示します。空気の塊はこの露点温度の下がりかたより早いので、野放しの上昇は必ず雲を作ることになります。

空気の塊が上昇して温度が下がると露点温度も下がる訳は圧力が下がり膨張が起こる事と関連します。乾燥断熱過程で見てきたように、膨張は温度を下げますが同時に水蒸気分子間の平均距離を増やします。凝結はそれ自体分子の密集過程ですから少なくなった分子を凝結させるためにはさらに温度を下げる必要があるのです。





積雲ができる時

これまで、Skew-Tでどのようにして雲を扱うかを理解しました。地面の空気の塊が25°Cでこの露点温度が10°Cとします。(図の赤丸)この塊が上昇すると7000ftで温度が8°Cに下がり、この露点温度も同じ8°Cになります。7000ftで温度と露点温度が同じになることから凝結が始まり雲ができます。

雲底を推定するために広く用いられてきた公式は、上昇する空気の温度の低下率と露点温度の低下率が異なることを使っています。

$$\begin{aligned} \text{乾燥空気の温度逓減率} &= 2.5^\circ\text{C}/1000\text{ft} \\ \text{露点温度逓減率} &= 0.5^\circ\text{C}/1000\text{ft} \\ \text{雲底高度} &= (\text{温度}^\circ\text{C} - \text{露点温度}^\circ\text{C}) \times 500\text{ft} \end{aligned}$$

この結果は、冒頭のSkew-Tダイアグラムで得られたものと辻褄があいますね。この図からの解析では、地面の空気が非常に乾燥していると積雲ができずに高度が求められないことが時にあります。この理由を後で述べますが、それは中身を理解しないで盲目的に結果に頼るようなことが無いようにするためです。

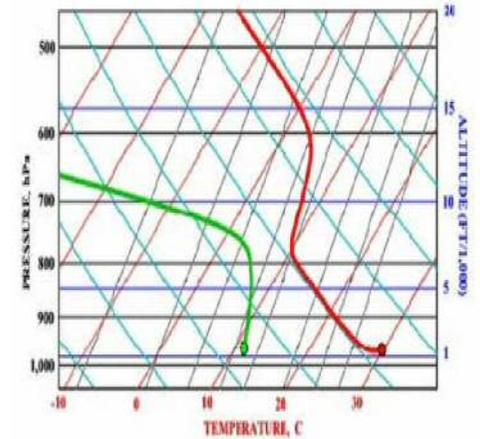
逓減率

Skew-Tダイアグラムには2つの役割があります:それは線で表されており、上昇する空気の塊が凝結が始まるまでその温度と露点温度をどう変化させていくのか、そして凝結が起きた後その塊の温度がどう変わっていくのかで、併せてそれが観測データから得られることです。この2つの役割があることが、混乱を起こすことがあるのだらうと思います。更に判らなくなることに2つの役目をもつ“逓減率”があります。

私たちが扱う逓減率は4種類あります:乾燥断熱、湿潤断熱、温度、露点温度の4つです。逓減率という言葉あまり厳密に使わないので混乱しますのでこれからは厳密に使い分けます。最初の2つ、乾燥断熱逓減率、湿潤断熱逓減率は、(断熱変化の仮定の下)計算されたもので、Skew-Tに固定の線として表されます。後ろの2つ、温度逓減率と露点温度逓減率は計測されたか、計測値をベースにした数学モデルを使って有効な予報期間を計算したものです。

次の図は、私がSkew-Tダイアグラムの計算ラインの上に計測データを上書きしたもので、この図が以下に有効かが判ると思います。赤の実線が各高度で計測された温度です。この各点が実際または計算予測されたその高度の温度であることが重要です。

このプロットから3つの異なる逓減率の領域があることから、3領域が検討の対象となります。この赤実線中で;地面からある高度までは温度の逓減率が比較的大きいことが判ります。この数百ft地面上から約6000ftまでは温度は乾燥断熱逓減率で減少しています。6000ft以上では温度はかなりゆっくり減少しています。私たちは各領域が何でそうなのかを理解し、それがサーマル予測にどういう意味なのかを知ります。



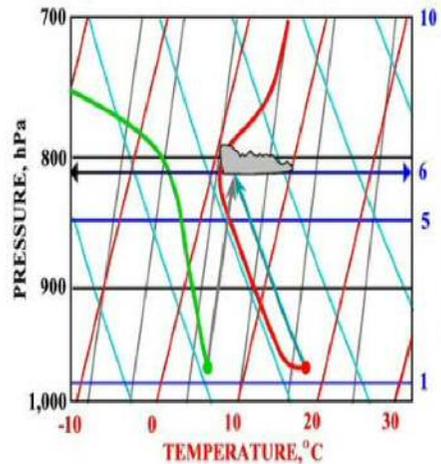
このケースの最下層は、太陽の恩恵で存在する“超断熱層”と理解されます。この存在は、熱力学的と言うより運動力学的な由来によります。強制的な日射(加熱)がカットされると、空気の上下位置はより冷たい空気に占められようとする動きがやみます。これが“不安定”で崖の上の岩と同じように少し押せば落っこちてしまうのと同じ状態です。東部の”超断熱層”は一般的に薄く、穏やかな傾斜の小さな丘のようなものです。西部ではこの層は十分な日射により数百ftまで成長し、崖から転がり落ちる岩と同様です。これがダスト・デビルの元となり、大きなエネルギーを開放し15,000ft以上に達します。

地面から数百ftから約6000ftまでは、温度は乾燥断熱率に沿います。ここでは何も事件は起きません。この領域ではサーマルが良くできます。地面が暖められ、多くのサーマルが空気を混ぜますので実際の逓減率は太陽光が注ぐ限り乾燥断熱率に必然的になります。

逆転層: 次の層は逆転層と呼ばれます。”逆転”とは、高度を上げて温度が変わらないか逆に増えるという意味です。この例では、良くあることですが温度は高度を増すごとに下がってはいますので厳密な意味では逆転層はない事になりますが、6000ft以上はこの下がり方が極めてゆっくりになります。ブルー・コンデションの日、一番低い逆転層がリフトに蓋をし、このような場所は光が弱くこのことが問題を起こすのですが後述します。

露点温度/Dewpoint Spread: 緑色の実線は露点温度を表します。露点温度がその空気の温度と一緒に非常に近いなら雲の層ができています。露点温度が温度の実線から離れて行くなればその空気は乾燥していることを示します。

この例に示された形は、代表的なサーマル・ソアリング日を示しており、特に逆転層の近くの露点温度と温度が近づいてはいるが一致してはいない辺りが良いのですが訳は後述します。



ソアリングができる日か？

私たちは良い日には良いスタートをすることが出来るので、ここに私は一つの例を示します。これは、典型的な東部の良い春の日です。赤い線は温度の逓減予測です。赤丸は地面の平均温度の予想です。シアン矢印は地面の温度からからの断熱逓減率で引かれ6000ftで2.5°Cとなり、相当に不安定な日であることがわかります。温度差が大きいことは不安定も大きく、リフトも強くなります。

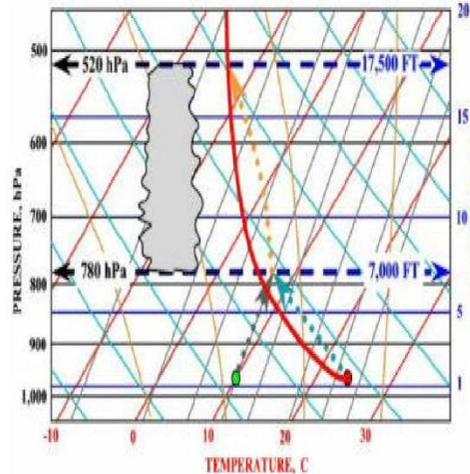
緑の線と緑丸はこの日の露点温度の予測を示します。私は、この緑丸から等混合比線に沿って線を引いています。この線が地面温度から断熱逓減率で引いた線が逆転層の下で交差していますので、この日のリフトは積雲を作ることが判ります。ここで気が付かなければいけない事は、雲底でも空気は2.5°Cと予想されますので未だ周りの空気より暖かく、この日のリフトは高度を上げて弱くならない事を示します。まあ、良くあることです。

上空の露点温度がそれなりに低いので私は積雲が大きく広がることは無いと予想しますし、逆転層が確り雲の成長を抑えますのでオーバーデベロップメントになることは無いと思います。この後でソアリング予報のこの2つの重要な点についてもう少し述べます。

これまで積雲ができる良い日について述べましたので、皆さんによく判って貰うために積雲のできない良い日がどんな図かを説明します。赤い実線が温度の逓減がどうなるかを数学モデルで求めてものです。赤丸はこのモデルで地面の平均温度がどうなるかを求めたものです。シアン矢印は地面からの断熱逓減率を示し、6000ftで2.5°Cですから、相当に不安定な日です。

緑の実線と緑丸もこのモデルが予測した露点温度です。この緑丸から等混合比線を引いていますが、この線が地面からの断熱逓減率で引いた線と交差するのが逆転層の上なら、この日は積雲ができず、結果としてリフトは逆転層で蓋をされてしまうこととなります。

雲底から上では何が起きているか



凝結が起きますと、湿潤断熱逓減率 (SALR) が登場します。凝結は熱を放出: 水蒸気が水に凝結する時は大量の熱を放出 (440cal/gram/Cで気化する時の7.5倍) します。対流性の嵐やハリケーンの元になりうる十分な熱量です。

以降はオレンジの線、湿潤断熱線を追加します。シアン乾燥断熱線と比べ、高度の低いところ即ち空気が多量の水蒸気を含め得るところは劇的にその傾斜が緩くなります。500hPa以上ではこの湿潤断熱線も乾燥断熱線とそう傾斜が変わらなくなります。

凝結が始まると上昇する空気の冷却は凝結しない空気と比べかなりゆっくりになります。これは気/液の相変化時の潜熱の放出によるものです。

この例の780hPa以下の図は、今ではかなり見覚えがある筈です。不安定な地上の24°Cの空気は上昇し7000ftでその温度と露点温度が同じになり、凝結が始まります。これまでのところ全て良く、結果の積雲(cu)を皆さんは期待していませんか？

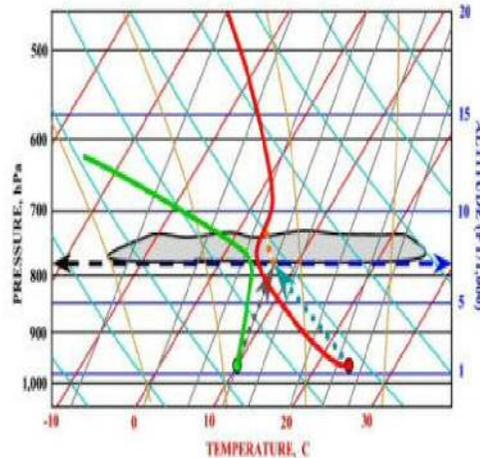
この雲底の近くには逆転層が無いのが問題なのです。雲ができるとオレンジの線の湿潤断熱率に変わり、17500ftまで成長することになります。ここで雲が凍結温度(これは簡単に判り、温度の逓減線が0°Cの乾燥断熱率を7000ftで交差する)以下まで成長すると雨になります。

この図からは何時から対流が風の強い高度まで達し、この風が混じって地上に吹き下りて来るかは明らかではありません。この図は数年前のミップリン・カウンターの競技会の予測図からです。全般的には良い条件でしたが、局所的な雨や会場では60mphのガストに見舞われました。積雲(cu)が予想されるような条件では、弱い逆転層の存在がオーバーデベロップメントを防ぐために必要で、さもなくば積乱雲(Nb)が発達し最悪雷雨に見舞われることとなります。

積雲(cu)の広がり(オーバーデベロップメント)

良いソアリング日和がオーバーデベロップメントで台無しになることがままありますが、そんな事から私はこれを寧ろスプレッド・アウトと呼びます。このスプレッド・アウトの発生はSkew-Tを調べれば予測できますのでその例を説明します。:

雲底の近くの空気(サーマルではない周りの空気)の温度と露点温度が殆ど一緒です。周りの湿度が高いので雲は蒸発しにくくなります。この温度差が雲底近くで3°C以内ならスプレッド・アウトの可能性が高くなります。差が小さい程確率が高くなります。歴史的にもそうなのですが、逆転層の中で露点温度が空気温度に頻繁に近づくことでは何も起きません。湿度は対流によって運ばれるしかないので、逆転層で蓋をしてしまっているのです。



風(Wind)

通常Skew-Tの右の縦軸には風の表示があり風向(磁方位)と速度(kt)が各高度に応じて表示されています。計測結果か計算結果かに依らず、このデータはサーマルが何処にあるかを探るとき低ければ地表のとの関係において、高ければ雲底近くでどこを探せば良いかの助けになります。

どんな高度でも風向が90° 近くかそれ以上変わる時は、サーマルの明らかなせん断が発生しています。一般に5kt程度の弱い風は、地表からサーマルの塊を剥がしてサーマルの柱に供給する助けになると共に地面を冷やし次のサーマル発生を助けるため、サーマルの予想発生時刻を早めることもあります。

風速がさらに大きくなってもこの混合効果を同様に予想できます。15~20ktを超えるようになると断片化しサーマルは不規則で途切れ途切れになります。

時折、風の方向が雲底で90° 変化することがありますが、この時は積雲の傍らで上昇することができ、このサーマル列の上に出ることが出来る場合があります。

水蒸気が浮力に与える影響

空気は決して完全に乾燥しておらず、また湿った空気は乾燥した空気より密ではないことから、空気に水蒸気を含めば密度が下がります。浮力はサーマルの塊の空気と周りの空気の密度の差に依るので、水蒸気を含んだ効果を計算しておく必要があります。別のやり方はこうです。乾燥空気は動かそうとすると水蒸気を含んだ空気よりより運動量を与える必要があります。より水蒸気を含んだ空気は上昇過程ではゆっくりと冷え、そのうえ上昇を開始するにはよりエネルギーを必要とします。

この効果は重要です。これは、その空気の密度が何°Cの乾燥空気の密度と同じかで計算します。これを仮想温度といいます。代表的な東部のソアリング日和のこの仮想温度は、地面から2mの百葉箱で計測した温度より2°C高いことが知られています。この仮想温度(T_v)を計算する式は、

$$T_v = T + w/6 \quad (\text{概算値})$$

ここで、 T は地表面温度(°C)で、 W は空気の混合率で1kgに含まれる水分をgで表したものです。

因みに、私のご紹介した各機関の提供するSkew-Tダイアグラムではこの仮想温度でなく、実際の気温で書かれていますので、私は通常(あまり厳密ではありませんが...)先ほどの公式で計算しています。このやり方は、雲底を予想するのに良く役立ち、補正しない場合よりは高くなります。

絹雲や他の雲

一般の天気予報では、“部分的に”とか“全般に”曇りとか言ってどんな雲かを言う事はまずありません。TAFやMOS(Model Output Statistics)の予報はまして雲の層の高度も知らせます。どんなSkew-Tでも露点温度と温度の線が雲のありそうな高度では近づくので、その高さや厚さは明らかです。

まとめ

Skew-Tダイアグラムは、特定の場所の上空の大気の状態を捉えています。それは、この地点から80000ft上空までの温度、露点温度、風速・風向を表したものです。加えて、非常にコンパクトなフォームで多くのデータを示しており、Skew-Tダイアグラムの乾燥及び湿潤断熱率や等混合比線を使えば仮にこうなったらと言うような計算も実施できます。

これらのダイアグラムはサーマル・ソアリングの予報に最適です。クロスカントリー・ソアリングに興味ある方(若しくはただ漂っているのが好きな方も)は少しの努力、数分の解析でその日の条件を掴むことができます。他のデータを使って予報を立てているパイロットにしても、Skew-Tより良い方法はないのです。