

ABC 以前の話

二 宮 洸 三*

1. はじめに

このシリーズでは、すでに何人かの方々が興味深い有益な解説を書いておられますが、その内容はかなり深遠です。ここでは、気象の基礎を学ぶに際しての「ABC 以前」の事柄を述べたいと思います。

私達は書物や、講義・講座で気象を学び始めます。私の経験では、書物を通読し、ノートを取るのが精一杯（居眠りするとも！）で、実体感を持って理解・納得する（腑に落ちるまでに）ことは困難でした。今でも、納得できないことがあります。このような基本的な疑問を的確に表現するのは難しく、講義中や学会で率直に質問するには勇気が要ります。

おそらく、多くの方がこのような「モヤモヤした疑問」を御持ちでしょう。もっと気楽に疑問を投げかけ、議論できる雰囲気望まれます。しかし、このような「モヤモヤ」を感じることは更に理解を深めるために望ましいことです。

その一方、書物や講義を疑問無しに受け入れ暗記し、「モヤモヤ」を感じない人もおられます。疑問を持たないことは理解を妨げます。このような事情はすべての分野で見られることで、中国でも有名な格言が残されています：

「悉く書を信ずれば、則ち書無きに如かず」（孟子）

「学んで思はざれば則ち暗し、思ひて学ばざれば則ち危うし」（論語）

書物を熟読し講義を本気で聞けば、疑問が湧き、盲信しないでしょ。疑問を持たば考察し、さらに調べるはずです。以下、幾つかの例を挙げて考えてみま

す。

2. 標準大気

多くの気象の入門書では、地球大気の立体構造の模式図である標準大気の図を載せています。一般に、標準大気の図では左側の縦軸に高度を、右側の縦軸に気圧を、横軸に気温を目盛っています。高度と気圧の関係は、16kmで $\sim 100\text{hPa}$ 、30kmでは $\sim 10\text{hPa}$ 、50kmでは $\sim 1\text{hPa}$ 、80kmでは $\sim 0.01\text{hPa}$ であると読みとれます。気温の高度分布の特徴から、大気層は下から順に、対流圏、成層圏、中間圏、熱圏の4層に分けられると述べられています。

多くの書物では、米国で作られた「US標準大気」を引用していますが、出典を明記していない書物もあります。それが、全地球平均した気候値なのか、特定の地域の気候値なのかの説明のない書物もあります。

自然科学の学習では、実験や観測に基づく事実の記述・説明から始めるのが適切です。100kmの上空まで、どのような手段で気温、気圧、密度を観測したのかは、科学的にも興味深いテーマであるのに、十分に説明されていません。ほとんど真空に近い上空の気温や風速が、日常の温度や風の感覚とどのように異なるかの説明も不十分です。どの密度の大気までなら、対流圏に適応される運動方程式などがそのまま適用できるかなどの説明もありません。

入門書では、対流圏の学習が中心なので中間圏や熱圏の説明を省略しているのですが、対流圏や下部成層圏の説明も不十分です。実際の観測データを示して、高度・気圧・気温の分布図を書く実習をすれば実体的な理解が深まるはずです。実例として、第1表に高層気象台（所在地：つくば市）で得られた1990年2月の09時（日本標準時）の月平均値を示します。この観

* Kozo NINOMIYA (無所属).

knino@cd.wakwak.com

© 2012 日本気象学会

第1表 高層気象台で得られた1990年2月の09時
(日本時)の月平均観測値.

気圧 hPa	高度 m	気温°C
1021	0	4.9
1000	196	4.7
900	1049	0.4
800	1987	-3.3
700	3037	-6.9
600	4226	-13.0
500	5595	-20.5
400	7211	-31.5
350	8142	-38.5
300	9182	-46.1
250	10375	-52.5
200	11807	-53.7
175	12665	-54.0
150	13651	-55.5
125	14805	-58.3
100	16202	-60.2
70	18423	-59.6
50	20536	-57.8
40	21945	-57.0
30	23764	-56.6
20	26351	-53.9

第2表 高層気象台で得られた1990年2月9日09時
(日本時)の観測値.

気圧 hPa	高度 m	気温°C
1025	0	2.8
1000	229	1.1
900	1067	-4.4
800	1989	-6.8
700	3021	-11.9
600	4181	-20.4
500	5505	-27.5
400	7081	-37.5
350	7987	-45.4
315	8685	-50.1
300	9002	-47.9
250	10207	-47.6
200	11683	-48.9
175	12557	-50.6
150	13561	-52.5
135	14237	-55.4
125	14730	-54.0
100	16161	-52.7
70	18445	-56.5
50	20582	-55.7
40	21993	-57.6
30	23805	-57.5
20	26387	-53.7

測データで高度・気圧・気温分布図を「標準大気の図」と同じ形式で書いて比較すれば、日本上空の状態が実感できます。

大気の状態は日々刻々と変化しています。第2表は高層気象台の1990年2月9日09時の観測データです。この表では700, 500hPaなどの「指定気圧面データ」に加えて、温度の高度分布における著しい変化を示す「特異点データ」も載せています。このデータで高度・気圧・気温分布図を作成すれば、日々の状態が月平均値とは異なることが実感できます。

日本の高層観測データは、気象庁刊行の“Aerological Data of Japan”に載っており(1994年まで)気象庁図書資料室で閲覧できます。それ以後はCDに収録されています。また気象庁のホームページでも見られます。高層観測データは、気象庁印刷天気図の附表にも記載されています。他の観測点、他の季節のデータと比較することをお勧めします。

3. 乾燥断熱減率と温位

テキストや講義では、気象学で用いる最も基礎的な物理法則として、理想気体の状態方程式、熱力学第1

法則、静力学方程式が、頻繁に登場します。

空気塊に対する熱エネルギーの出し入れがなく空気塊内での水蒸気の凝結もない仮想的な過程を乾燥断熱過程と呼びます。空気塊が乾燥断熱的に100m上昇すれば、温度が0.98°C低下することが、上記の基本法則から示されます。この気温低下率を乾燥断熱減率と呼び Γ_a で表し、下記の式で与えられます；

$$\Gamma_a = g/c_p \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度、 c_p は空気定圧比熱です。このことはどのテキストでも説明されているので、導出の計算の説明を省略します。

一方、上記の物理法則から乾燥断熱過程における保存量(不変量)として温位(potential temperature) θ が、

$$\theta = T (p_0/p)^\kappa \quad (2)$$

によって定義されます。ここで T は絶対温度、 p_0 は基準面における気圧(1000hPa)、 p は気圧、 $\kappa = R/c_p$

=0.286です。(R は空気の気体常数, c_p は空気の定圧比熱です.)

乾燥断熱過程で上昇する(上昇させた)気塊がある高度(気圧)に達した時の温度は, (1)式, または(2)式で求めるとテキストに書かれています. 私自身も講義やテキストでこのような説明をしてきました.

では, この記述が本当かどうか, 第1表のデータを使って, 1000hPa にあった気塊を乾燥断熱過程で上空まで持ち上げたときの温度を計算してみてください. その計算結果を第3表に示しました. 確かに対流圏下層(700hPa 以下)では(1)式による温度と(2)式による温度はよく一致しています. ところが対流圏中層まで気塊を上昇させると両式による計算の答えは異なってきます. さらに上空まで気塊を持ち上げるとその差はますます増加します. (2)式の計算では, 無限大の上空まで気塊を持ち上げなければ絶対温度はゼロ K になりません. (1)式を使うと, ~30km まで気塊を持ち上げると温度がゼロ K になります!

これまで, 私の講義やテキストで, この違いについて質問を受けたことは一回もありません. 受講者や読者の方々は, 講義やテキストの説明を鵜呑みにして, ご自身で記述・説明の真偽や適応限界を実データで確認する習慣をお持ちでないのです.

では(1)式と(2)式の計算の差はなぜ生じたのでしょうか? (2)式の導出には, 熱力学第1法則と気体の状態方程式のみが使われており, (1)式の導出には静力学平衡の式

$$\partial p / \partial z = -\rho g \tag{3}$$

も使用されています. ρ (空気の密度) = p / RT です. この式によって p と z の関係が求められています.

上昇する(上昇させた)気塊の圧力は外界の気圧と同じになると考えています. 外界の気圧を求めるのですから(3)式で使用する空気密度 ρ は上昇する気塊の密度ではなく, 外界の空気の密度 (ρ') でなければなりません. それを求める温度も外界の温度 T' でなければなりません. 通常の大気では, $T' > T$ です. このように考えれば, 断熱上昇する(させる)気塊の「実際の断熱温度減率」は

$$\Gamma_a^* = \Gamma_a(T/T') \tag{4}$$

となります. T が絶対ゼロ K に近づくと上空でも, 外界の温度 (T') は ~200K ですから, Γ_a^* はゼロに近づきます. (1)式のかわりに(4)式の数値を使用すれば

第3表 第1表のデータを用いて, 1000hPa から乾燥断熱的に上昇させた気塊の温度(K).

気圧	外界の温度	式(1)による気塊の温度	式(2)による気塊の温度
1000	278	278	278
900	274	270	270
800	270	260	261
700	266	250	251
600	260	239	240
500	253	225	228
400	241	209	214
350	235	200	206
300	227	190	197
250	221	178	187
200	220	164	176
175	219	156	169
150	218	146	162
125	215	135	154
100	213	121	144
70	213	99	130
50	215	79	118
40	214	65	111
30	217	47	102
20	219	22	91

(2)式を使用した答えと一致した値が得られます(ご自分で確認してください).

$T/T' \approx 1$ の場合(気塊の上昇が対流圏下層の場合)に限り, $\Gamma_a^* = \Gamma_a$ の近似が使用できるのです. 実際問題として ~700hPa 以下の気層で気塊の安定性を議論する時はこの仮定が許されます. この例に限らず, 気象学で使用される数式の多くは, 特定の条件を仮定して導かれたものです.

言われてみれば, 当たり前のことですが, 実データで確かめれば「腑に落ちる」まで納得されたでしょう.

多くのテキストや講義では上記の説明が省かれています. 学習すべき重要な事項が沢山あり, 限られた講義時間, 限られたページ数では, 全部を細かく説明する余裕がないからです.

新聞・TV・雑誌で伝えられるニュース, 解説などの大部分では, 前提となる仮定条件や適合範囲の説明がありません. このような不完全な情報に踊らされて, 政治・経済・国際・社会・災害などの問題で誤った判断をしない注意が大切です. この意味で, 乾燥断

熱減率の議論は有益なテーマです。

4. 正確な表現

気象学は科学の一分野ですが、自然災害、環境問題などでは社会と深い関わりを持ちますから、社会で誤解されないような（正確な）表現が必要です。

風速の表現

台風が近づくと、TV、ラジオ、新聞で気象情報が報じられます。その中に、不適切な表現があります。「風速25メートル、沿岸の波の高さ3m」などがその実例です。波の高さはメートル（長さの次元の単位）で表現して理解できます。しかし、風速をメートルで表現しては理解できません。十数年以前、気象学会の評議委員会で「風速 xxメートル」では理解（実感）できない市民が多いと言う指摘がありました。風速は、秒速 (m/s) あるいは、時速 (km/h) で表現しなければなりません。米国では、毎時 xx マイル (mph) が良く使われています。1 マイル=~1.61 km です。これだと日常生活の自動車の速度から容易に風速の程度を実感できます。なお海上では「ノット」が使われます。1ノット=(1時間に1海里)です。1海里=~1.85km です。

かつて気象庁在職中、風速は秒速で表現するよう何回かお願いしたのですが、いまだに気象キャスターは不適切な風速表現を改めていません。

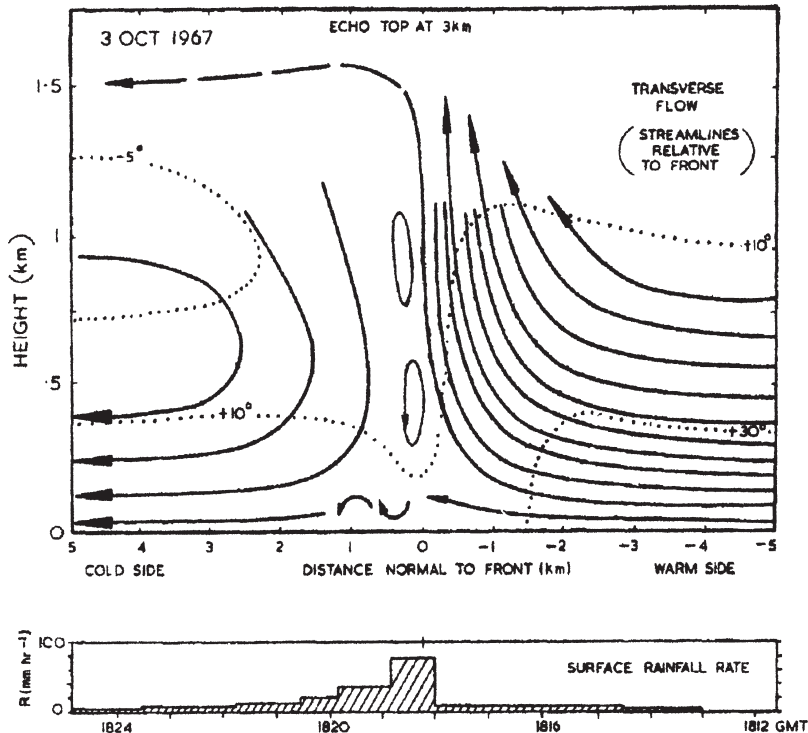
降水量と降水強度

降水量は、観測期間（時間間隔）を指定し、その期間内の降水量を水深で表現します。すなわち mm/h や mm/d の単位で表現します。（なお、1 mm の水深は 1 m²あたり 1 kg の水

量に相当します。）これに対し、ごく短期間（時間間隔）内の降水量を「降水強度」で表現します。たとえば、1分 (min) 内に 2 mm の降水があった時、(2 mm/min) を1時間あたりに換算して降水強度120 mm/h と書くことがあります。これは1時間に120 mm の降水があったことを意味しません。

第1図はイギリス上空を寒冷前線が通過した時の観測事例 (Browning and Harrold 1970) です。この論文は寒冷前線の構造に関してしばしば引用される論文です。彼らは寒冷前線の通過時に「強い降水」があったと述べています。確かに100mm/hの「降水強度」が観測されていますが、その継続時間は3分たらずで（図の横軸の時間は分単位で示されています）、「降水量」はたかだか5 mm/h です。

数年前、気象集誌に日本の豪雨の一事例の解析結果を投稿しました。その時に査読者の一人から「Browning and Harrold の豪雨の論文を引用すべき」のコメント



第1図 1967年10月3日イギリス上空を通過した寒冷前線を横切る高度-距離（移動方向の）断面図。太線は相対的な流れの流線、破線は等温線を示す。下段のグラフは、降水強度の時間変化。この図では距離を時間に換算している。時間軸の単位は「分」である。強い降水強度は前線近くで観測され、~3分間で終止している。（Browning and Harrold (1970) の図を簡略化して掲げた。）

ントが寄せられました。私が調べた豪雨は間歇的に数時間続き、1時間降水量が100mm、日降水量が400mmに近く、水蒸気輸送量も水蒸気流束収束量もイギリスのケースとはけた違いに大きいので、この論文を引用しなかったのです。査読者は降水強度と降水量を読み違えたのか、あるいは、彼らの「強雨」の文字を信じたようです。「悉く書を信ずれば」の格言が思い出されます。物事を比較する時には、実際の状況を確認してから対比しなければ意味がありません。

年月日と場所の表現

年月日の表現が曖昧なことがあります。学術論文・報告では少ないのですが、官庁・団体の報告、新聞・雑誌では、「昨年、昨年度」などの記述があります。これでは、何年のことかわかりません。はっきりと数字で記せば、明白・確実です。「40年代」などの表現も1940年代か、2040年代か、昭和40年代か、(将来の)平成40年代かが不明です。明記が必要です。

日本では135°E標準時ですが、広い国では複数の地方時があり、さらに夏時間を使用することもあります。～40年も以前に、アメリカのローカル雨量データ(昔の気象庁区内観測所データのような)を調べたことがあります。すべてに地方標準時と夏時間の表示があり、明確でした。報告では、日本時間か、協定世界時(UTC)かの明記が望まれます。

地名についても同様です。意外なことに、アメリカ、イギリスの報告で地名や緯度・経度の記載のない図があります。知らないはずがないと考えている(唯我独尊思想)ののでしょうか、不親切だと思います。日本では、近年の度重なる市町村の合併で過去の観測点の地名(の場所)を知るのが困難になってきました。これからも地名の変更があるでしょうから、地点リストや地点図が必要です。(編集委員、査読者がこのような図表の削除を求めることがありますが、基本情報の提示は必要です。)

誇大表現

近頃、「誇大表現」が気になります。TV等で、「ケネディスペースセンター」を「ケネディ宇宙セン

ター」と呼んでいます。英・米語では、「宇宙」はコスモスと表現します。「宇宙線」を「コスミックレイ」と言うように。月までの距離は～38万km、太陽までの距離は～1億5000万km、最も近い恒星までの距離は～5光年、そして宇宙の広がりには～100億光年以上だとされています。

これに対して、静止衛星(地球自転同期衛星)の高さは～3万6000km、多くの軌道衛星の高さは数百kmです。一般的に、数百kmの範囲は「大気圏外スペース」、数億kmの範囲は「太陽系内スペース」とされています。ですから、数百kmの高さのスペースクラフトの飛行を宇宙飛行と呼ぶのは誇大です。NASAは“National Aeronautics and Space Administration”であるのに、日本では「米国航空宇宙局」と呼んでいます。NASAに類似する日本の組織はJAXA(Japan Aerospace eXploration Agency)と正確に英文表記されているのに、日本語表記では「宇宙航空研究開発機構」となっています。大気圏外飛行は素晴らしい成果ですが、まだ宇宙と言うほどには遠距離には至っていません。

自然科学の分野でも、大衆・メディア・政官界に迎合する呼称は数多くあります。すでに約40年以前、気象分野ではGARP(Global Atmospheric Research Program:地球大気研究計画)を日本では「地球大気開発計画」と称しました。地震学の分野でも、「地震予知研究計画」を「地震予知計画」と称しました(近年ようやく本来の名称に改められました。)

過大な実用性を標榜し、誇大な名称を冠した組織名や研究計画をみうけます。目標を高く掲げ、研究予算を確保することは大切ですが、大学では教育の観点からも節度が求められます。気象の学習・研究にも、まず、誠実・正直が求められます。これこそ「ABC以前」の事柄です。

参考文献

Browning, K. A. and T. W. Harrold, 1970: Air motion and precipitation growth at a cold front. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 96, 369-389.