

湿球温度・相当温度の実用価値

(気温よりも有意なことについて)

木 村 耕 三*

一般に地面と地面附近の空気とは熱平衡にあると考えてよいと思うが、その地表面では一般に水蒸気の蒸発や凝結が行われて、外界から受授する熱の一部を潜熱の形に置き換えてしまうので、すくなくとも地面附近の熱に関する問題を取扱う場合は、潜熱量を測り得ない乾球温度計による気温では不適當で、気圧変化量のすくない地上では湿球温度や相当温度がより合理的であることは気象熱力学の教科書によって容易に理解される筈である。

ところが、気象熱力学という直観的に高層気象のためのものという概念が支配的で湿球温度等が高層気象学で大きな意義を持っていないためか、あるいは教科書類では地上の問題として具体的に論じていないためか、一般には注目されずに気温によって総てが論ぜられているような印象を受ける。

筆者はこの問題についてすでに一部を報告済であるが¹⁾、その論文では誤りをおかしているので、ここに訂正加筆し、次の機会に発表する予定の数篇の論文の序報としての目的をもって、地上現象を解析するには気温よりも湿球温度の方が有意義であることを強調しようと思う。

なお、式の導き方において、先輩諸氏がすでに別の形で厳密に示されているものを、応用を主体とする論理の統一と簡明のために自己流に書き改めたことを予めお断りしておく。

1. 非断熱現象の場合の温度変化

われわれが地上の熱的現象を問題にする場合には、輻射や降雨など外部からの熱の受授によって変化する非断熱現象であることを前提としなければならない。

空気の状態を完全乾燥の場合から潜熱の影響の現れる場合までの3段階に分けて、そのおのおのの熱量変化を熱力第一則によって、荒川：気象熱力学(岩波書店)の記号に従って書くと、

$$dq = c_p dT - A v d p \dots\dots\dots (1)$$

$$dq = (c_p + c_p' x) dT - A v d p \dots\dots\dots (2)$$

$$dq = (c_p + c x) dT + T d \left(\frac{\gamma \xi}{T} \right) - A v d(p - e) \dots (3)$$

(1)は水蒸気を全く含まぬ場合、(2)は混合比 x の水蒸気を含み、その量に変化の生じない場合、(3)は $(x - \xi)$ の水蒸気が水滴となった場合である。

ここで、Rossby 等が相当温位等を求める時に行ったように、 $c x$ や $c' x$ を c_p に比べて小さいとして省略すると、地上の場合 5×10^{-2} 以下の量を省略したことになる。

また、この3種の空気塊が同時に同じ場所において、系外からの熱を受授して変化した場合を考えると、エントロピー変化量 $\Delta \psi$ は等しいことになるので、

$$\begin{aligned} \Delta \psi &= c_p \log \left(\frac{T}{T_0} \right) - A R \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \\ &= c_p \log \left(\frac{T'}{T'_0} \right) - A R \log \left(\frac{p'}{p'_0} \right) \\ &= c_p \log \left(\frac{T''}{T''_0} \right) + \left(\frac{\gamma \xi}{T} - \frac{\gamma_0 \xi_0}{T_0} \right) \\ &\quad - A R \log \left(\frac{p - e}{p_0 - e_0} \right) \end{aligned}$$

ただし、0を附したものを初値とする。

地上における気圧の変化量は年間を通じても5%以下の微量で、 $c/c_p x$ と同程度なので省略すると、

$$\Delta \psi = c_p \log \left(\frac{T}{T_0} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$= c_p \log \left(\frac{T'}{T'_0} \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$= c_p \log \left(\frac{T''}{T''_0} \right) + \left(\frac{\gamma \xi}{T} - \frac{\gamma_0 \xi_0}{T_0} \right) \dots\dots\dots (6)$$

すなわち、空気塊中の水蒸気量に増減のない場合は完全乾燥空気の場合と変りなく、乾球温度の対数値の差はエントロピー変化量に比例することになるので、気温変化量をもって熱的な変化量を代表させてもよい。

水蒸気量の増減のある場合は、(4)と(6)との関係で、初値を絶対温度 $0^\circ K$ の場合にとると、混合比も0の場合で、 T を T_e 、 T'' を T と書き改めると

* 旭川地方気象台

$$Te = T \exp \frac{\gamma \xi}{c_p T} \dots \dots \dots (7)$$

(7) は Rossby の定義する相当温度であって、水蒸気量の増減の有無にかかわらず、相当温度の対数値の差はエントロピー変化量に比例することを表わすので、非断熱過程の場合でも地上附近の気圧変化の小さい場所では、熱的な変化に着目する場合の尺度としては、乾球温度よりも Rossby 流の相当温度の方が合理的であることになる。

(7) の特殊な場合としては飽和状態の場合を考えると、 T は湿球温度 (T_w) であり、 ξ はその時の飽和混合比 (ξ_w) であって、気圧の変化を省略できる場合は ξ_w は T_w によって一意的に定まるので、相当温度と湿球温度は質的には同じである。

2. 湿球温度・相当温度の実用性

さきに5%以下の微小量を省略しているので、(7) 式の指数部分を展開して2次項以下を省略することができるから、

$$T_e = T + \frac{\gamma \xi}{c_p} = T_w + \frac{\gamma \xi_w}{c_p} \dots \dots \dots (8)$$

これは Robitch 流の相当温度であって、右2辺の関係

は August 等の求めた通風乾湿温度計についての公式に容易に改められる。

また、現用気象常用表の常数を用い、気圧を 755mm Hg とすると、(8) は次の Prött の公式となる。

$$\left. \begin{aligned} (Te) &= T + \frac{3}{2}e = T_w + \frac{3}{2}E(\text{mb}) \\ &= T + 2e = T_w + 2E(\text{mmHg}) \end{aligned} \right\} \dots \dots (9)$$

ただし、 E は T_w の時の飽和水蒸気圧

以上の式で5%以下の量を省略して来たので、絶対値としてはある程度の誤差を含み得る。しかし、われわれの問題とする場合は比較のために用いるのであるから、1年間の変化あるいは極と赤道を対称としても、温度の小數位にわずかの誤差が介入する程度の支障しか与えないはずである。

第1表は最も省略回数の多い(9)式の右2辺の関係、つまり Prött の公式から、気温と水蒸気圧とで湿球温度を算出したものと実測値との差の頻度分布を示したもので、通風乾湿計によって観測し August の公式によって水蒸気圧が計算された場合は実測値とほとんど一致して、上述の事情を説明している。普通の乾湿計を用い Angot の公式で計算された場合は、季節的に多少の相違

第1表 (9) 式からの T_w 計算値と実測値との誤差分布

Angot 公式による (昭和19年10時観測)

	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
5月	—	—	2	1	6	4	8	5	5	—	—	—	—
6	—	—	1	3	9	6	3	3	2	1	2	—	—
7	—	—	1	—	3	—	7	4	3	8	4	1	—
8	—	—	—	—	1	2	6	5	7	6	2	1	1
9	1	4	3	3	2	7	7	1	2	—	—	—	—
10	—	2	7	7	6	5	3	1	—	—	—	—	—
計	1	6	14	14	27	24	34	19	19	15	8	—	—

平均 0.57 ± 0.25

August 公式による (昭和31年日平均値)

	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
5月	1	2	—	1	7	11	9	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	2	5	8	7	5	2	—	1	—	—
7	—	—	1	1	4	12	8	4	1	—	—	—	—
8	—	—	—	—	5	8	11	5	2	—	—	—	—
9	—	1	4	5	4	6	6	3	1	—	—	—	—
10	—	—	3	3	4	9	7	5	—	—	—	—	—
計	1	3	8	12	29	54	48	22	6	—	1	—	—

平均 -0.09 ± 0.15

が伴うが、平均して 0.6 度ほど実測値より低く出るものと考えておかねばならない。

このことを逆に表現すると、(9) 式は第 1 表でわかるような確からしきで成り立ち、相当温度を (9) 式によって簡単に求めても、特に通風乾湿計を用いる場合は、実際上問題となるほどの誤差は生じないことを意味する。

湿球温度は直接観測できるが、相当温度は間接的に算出しなければならない。この点では相当温度は利用し難い不便があるが、飽和水蒸気が温度の 1 次函数でないため、湿球温度は広い幅の変化量に対して量的な比較を行う場合には熱量に比例しないという点で欠陥を持つ。

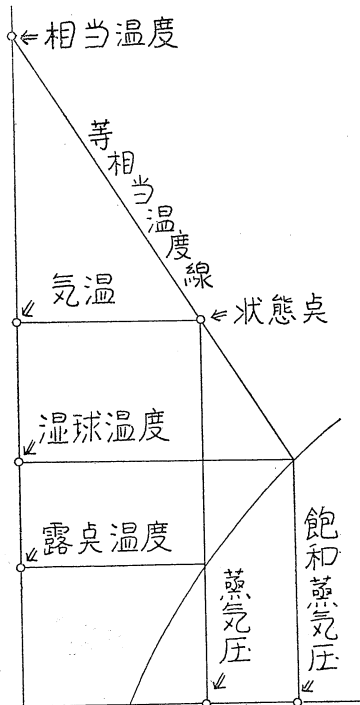
第 2 表は湿球温度のいろいろな値の時に、湿球温度が 5 度上昇するのに対応する熱量変化量と見なし得る相当温度の上昇量である。

第 2 表 湿球温度 5°C 上昇に應ずる相当温度の上昇量 (°C)

湿球温度	0→5	5→10	10→15	15→20	20→25	25→30
相当温度変化量	8.9	10.3	12.1	14.5	17.4	21.1

3. 気温の持つ欠陥

第 1 図は T—E 図によって示した諸量の関係である。



第 1 図 T—E 図による諸量の関係の説明

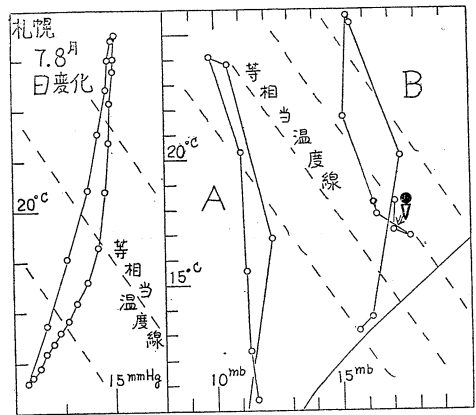
空気の状態を示すためには 2 つの要素を必要とするが、このうちで簡単に機械的に自記し得るものは気温と湿度で、湿度は直接には熱的な意義は持たぬから、熱に関する量を観測する上では気温は最も有利である。

しかし、気温は第 2 図に示したような欠陥を持つ。

第 2・1 図は海陸風の影響も受けず、比較的強い擾乱も生じない札幌の 7・8 月の毎時平均による状態点の変化図形で、安定した気象状態の下ではこれによく似た図形を日変化として示す。

第 2・2 図は特定の気象状態の下にある時は必ずといってよいくらい再三示される図形である。(A) は日本海側の各地に春季しばしば現われる高温異常乾燥時のもので、(B) は (A) と同じ現象とその後に降雨がおこった時のものである。

第 2・1 図によって示される気温の欠陥は、日中は外界からの熱の変化に対して相当温度型の尺度で、また、夜間高温時は湿球温度型の尺度で変化して、日中と夜間とは熱量の変化に應ずる量が質的に異なることである。したがって、たとえば日変化の形式などを論ずる場合には、その場所その時の水蒸気量の如何を考慮に入れなければ本質的な特性を求める結論は導き得ない。



第 2 図 T—E 図による状態曲線例

第 2・1 図(左)、札幌夏季の平均日変化図形
第 2・2 図(右)、偽断熱的現象を伴う場合の図形

- A: 日中の異常昇温(昭和32年5月24日)
- B: 日中の異常昇温と降雨による気温低下量の減小(昭和32年6月18日)

第2・2図によって示される気温の欠陥は、ある気象状態の下では見掛上断熱的な温度変化が生じて、第2・1図のような安定した状態とは異質のものが見分けられずに観測されてしまうことである。したがって、たとえば日平均値を求める場合、安定した状態の時は24時間の平均熱量を示す尺度と見ることができるが、このような現象を含む場合は単に24時間の平均気温という形式的な意味しか持ち得ない。

このため、第2・2図(A)のような現象の頻発した旭川の昭和31年6月5日以前とそれ以後との月平均値では、平均湿球温度が10.1度対12.3度と順調かつ常識的に上昇しているのに対して、平均気温はともに14.9度と非論理的な結果が出てしまう。

もちろん、相当温度や湿球温度によったとしても、強風時の擾乱により地上の熱量(水蒸気量等)が上空へ輸送され、強雨時には雨滴によって上空の低温が地上に輸送されるなどで、2次的な影響を受け完全にその時の気塊の熱量を観測することができるとはいうことができないが、すくなくとも上述のような気温の持つ欠陥は排除することができる。

以上によって、系外からの熱の受授がある場合にも、地上においては相当温度が質・量ともに最もよく対応し、湿球温度は量的には欠陥を持つが、質的にはよく対応し、気温は質・量ともに欠陥を持つということを示した。

次に実用例をあげて、その実用価値を具体的に示そうと思う。

実例 1. 地上における前線・気塊の解析

一般にいわれる前線や気塊の解析法についてはすでに報告済¹⁾であるが、その要領を述べると次の通りである。

同一の気塊内では第2図に示したような図形が得られる。気塊が交代した時はT-E図上(これに等相当温度線等を加えたものを T_e ダイアグラムと呼ぶことにする)における図形の位置が変わるので、図形の位置の変わり方から前線の種類・通過時刻・気塊の種別などの判定を行う。

また、24時間中の輻射による熱収支は一般にほとんどゼロと見做せるという経験と、場所によって多少の差はあるが、9時頃と21時頃が輻射のない場合に相当する値を示すものと見做せるという経験とから、9時または21時における前24時間の相当温度の変化量を各地点につい

て求め、その分布の状況から正変化量の最大の区域の相当温度の低い行、側に温暖型前線が、負変化量の最大の区域の相当温度の高い側に寒冷型前線が存在するとして解析する方法もある。

これらの実例は筆者の気塊・前線に関する論文²⁾を参照せられたい。

この2つの方法はいずれも地上資料の気温等で行うよりは客観的で、高層資料によるよりは細密に行うことができるが、 T_e ダイアグラムによる方が詳細であるが現業的でなく、事後調査等の目的に相当であり、変化量によるものは現業的であるが前24時間を取るために主観のまじる場合も多いという欠点を持つ。

もし、輻射の影響をなんらかの方法で除去し得るならば、3時間量が計算することができて、後者の方法は利点を増すであろう。その可能性はあるように思われるが今は触れぬこととする。

以上のような、天気図上の解析の他に、日平均を単位とする時間的な変化の解析の問題は、松倉秀夫³⁾が示したように、重要な意味を持っており、松倉はそれを気温を用いて示しているが、湿球温度または相当温度を用いて解析するときはさらに多くの事実を見出すことができる。

この問題については報告すべきことが多いので別の機会に改めて述べることにする。

実例 2. 低温災害予防のための量的予報法

いままでに非常に数多くの翌朝最低気温の予想法というのが発表され、今もお後を断たぬ傾向にあるが、あえてそれ等の方法の欠点を指摘すると、それらは統計的な手段によって物理的な意義の薄い常数を見出し、その常数いかんによって結果が支配されるという点に要約できる。

すなわち、その常数は筆者のチェックしてみた数例においては共通して経年的に変化しており、統計期間中の値が将来にも通用すると保証し難い。また、ある期間中の最確値を予報することとなって、実際にこれ等の方法が価値を発揮すべき異常低温の予想のためには適用性が薄い。低温災害予防という目的に合するためには、たとえば田畑というような現地において任意の高度のものを予想できるものであることが望ましいが、長年にわたる統計値を要するのであるから、このような臨機の方法がとり得ない。

以上のような欠点を排除する目的で、問題をまずもっ

とも重要な低温災害防止のための予想法に限定する。

この場合は別の方法で夜間の天候は晴と予想され、かつ、短時間の低温は災害とはならぬから、予報時にはすでに晴天となっているものと考えたと系外の熱変化が放射の変化のみと仮定してよいこととなるから、(4)等と(7)との関係からその変化量は相当温度の変化量に比例すると見做し得ることとなる。雲量の日変化が統計的に示される以上問題は残るが、一応長年月の毎時平均相当温度は安定した同一の天候の下における日変化の状態を示すものとする、予報時前の2回の観測で得た相当温度の変化量と後の観測時から平均最低気温時までの相当温度の予想変化量との比は、永年平均におけるそれ等の変化量の比に等しいと考えることができるので、この予想変化量を計算により、また、 T_e ダイアグラムと2等辺3角形の透明定規の頂点から底辺に向って第3図に示したように分割線を入れたものを使って、作図によって求める方法が考えられる。

ただし、計算による場合も、定規による場合も、後の観測時の水蒸気圧が翌朝まで続くものと仮定し、その水蒸気圧に應ずる露点温度よりも、その水蒸気圧の場合の予想相当温度の示す気温が低かった場合は、翌朝の湿度100%として予想相当温度の場合の湿球温度を予想最低

気温とする。

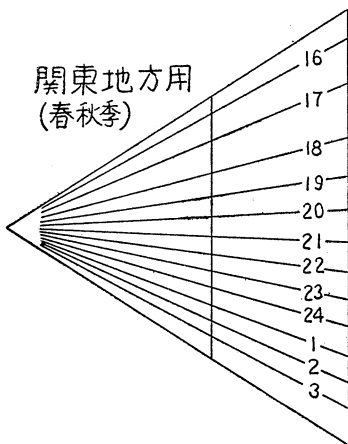
後に示すように、永年平均値はその場所のものである必要はなく、岡田: Climate of Japan の統計表³⁾から近くの地点のものをを用いて十分である。また、實際上最低気温時に湿度100%という仮定は当てはまらぬが、湿度90%としても予想値としての違いはごく僅かである。

なお、予報発表時前に行う2回の観測の際は、できればその間に順調に気象状態が変化していることを自記温度計と同湿度計の記象から認定しておいた方がよい。また、2回観測が面倒ならば、自記計記象から読みとってよいがこの場合 T_e ダイアグラム上に等湿度線を入れておけば、定規を用いる方法で簡単に作業できる。

以上、低温災害を予想される場合の量的予報の方法として照会して来たが、一般の場合に用いても従来の方法に比して適中率はよいように思う。

第3表は西日本の某地で好成绩を挙げたと報告されている従来の方式のものについて、その方法のつくられた地点で、その方式に必要な夜間の天候は既知とするなど十分な条件を与え、ただその方式のための常数を求めるために用いられた年以外のものについて、筆者の方式では全く機械的に15時と18時の気温・水蒸気圧と札幌の年平均毎時平均値から計算した相当温度とを用いて、各々の方法で毎日の予想値を求め、それと実値との差の絶体値の頻度分布を比較したものである。

すなわち、某氏法では最も好ましい条件の下で、筆者の方式では最悪の条件を与えたのにもかかわらず、第3表は甲乙なしと判定できる程度以上の実用価値を示しているものと思う。



第3図 T_e ダイアグラムによる翌朝最低気温予想に使用する定規の形式。

数字は観測時を示し、その時の状態点を線上にのせて定規の下辺と、後の観測時の蒸気圧線との交点を読む。ただし、前の観測時の状態点は後のものと同じ蒸気圧を持つように相当温度線に沿って移す。

定規底辺は常に蒸気圧線に平行に保持する。

第3表 某氏法と本稿の方法との予報値と実値との差の頻度分布の比較

某氏の方法	4	5~6	2	1	1	0	0	0
	6	4~5	2	2	0	2	0	0
	12	3~4	3	5	4	0	0	0
	20	2~3	5	11	3	1	0	0
	31	1~2	11	14	4	1	1	0
	49	0~1	17	18	7	3	4	0
	温度差 ($^{\circ}\text{C}$)	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	
計		40	51	19	7	5	0	

本稿の方法

実例 3. 農作物収量と積算相当温度

農作物の生育と気温との相関については多くの人々によって数多く報告されているが、しかし、農作物の生育と不可分の関係にある植物体温・地温・水温は蒸発凝結現象と結び付いているので、外気と熱平衡にあるとし、系外からの熱は日平均でゼロとすると、それらの日平均値と相当温度の日平均値とは気温よりも高い関係を持つはずである。

農作物と気温との関係は、北海道では水稲について7・8月の平均気温が収量と最も高い相関を持つ⁴⁾ほか、他の気象要素を含めぬとよい相関が得られず⁵⁾、適地適作の基準として用いられる生育可能期間中の積算温度も一応の基準となる程度で実用的信頼性が少ない。

気温を相当温度に改めた場合、この積算値が営農計画または収量推定に役立つことは、藤田孝男が水稲についてはすでに報告⁶⁾し、その他の作物についても近く報告されるはずである。

実例 4. 水温との関係

河川・池・水田などの水温が水稲の生育や魚類の養殖などに深い関係を持ち、各方面でこの問題に重大な関心を寄せられている。

この問題を取扱う場合、水面における熱収支が重点となり、そのために輻射量・気温・露点温度・風による輸送などの各要素を取扱うわけだが、もっとも理想的な場合を考えても、気温によるものと露点温度によるものという二つの要素があり、三原義秋等は Latzko の得た結果などを利用してこの関係を解く方法を示している⁷⁾。

しかし、詳述することは別の機会にゆずるが、実際問題として根本的で未解結と思われることは、日平均値としてその時の気象状態において達し得る最終水温如何ということであって、これが簡単な方法で求められぬと、たとえば温水溜池を作った場合の効率の測定などの基本的な問題が現実的には解決されない。

日平均を考える時、空気と水とが熱平衡にあると考えることができるならば、日平均の水温とこれと熱平衡にある気層内で測られた日平均湿球温度とは等しいはずである。

実験的な測定結果は別の機会にゆずるとして、第4表に旭川市旧市内を流れる石狩川・忠別川において毎月1回づつ昼夜観測の行われた昭和19年5月から9月までの水温と、旭川測候所の湿球温度の同日の日平均値とを示した。ただし、強風のあった場合と上流地方の融雪最盛期の場合とは除外してある。毎月15日が石狩川金星橋、

同25日が忠別川忠別橋のものである。

第4表 日平均気温・湿球温度と日平均河川水温との比較（於旭川・昭19）

観測月日	5.25	7.25	8.15	8.25	9.15	9.25
水 温	9.8	18.9	21.3	20.9	15.5	14.2
湿球との差	+0.1	0.0	-0.8	-0.5	+0.2	0.0
気温との差	+3.6	+2.7	+2.3	+2.8	+1.8	+1.6

この表から判るように、測点の環境の相違や無通風の乾湿計を用いていたなどの条件を考えると、予想以上に水温と湿球温度が一致しており、すくなくとも気温よりは高い相関性を持つといえるであろう。

このことは、たとえば温水溜池の効率を測る場合に、アスマン通風乾湿計の湿球の示度を最終水温として測定することができ、あるいはその経済効果等を判定することに用いる上に便利であると思う。

結 語

以上、Rossby・Robitchの相当温度、それと prött の公式との関係などはすでに述べられていることではあるが、本稿ではこれらを地上における気象現象の解析に実用する場合の価値を検討して、次のような結論を述べた。

- イ) 地上において熱平衡にある系内では、水蒸気の状態いかんにかかわらず、相当温度は等しく、特に通風乾湿計で観測された場合、相当温度は prött の公式を用いて簡単に算出されても実用上支障はない。
- ロ) 系外から授受する熱の変化量は相当温度の対数値の差に比例する。
- ハ) 湿球温度は質的には相当温度と同様で、直接観測し得る利点を持つが、系外からの熱量の変化とは単純な比例関係にないため、量的には欠陥を持つ。
- ニ) 気温は、熱的な問題を取扱う目的には、質的量的共に欠陥を持つ。

そして、性格の異なる4つの実用例について、相当温度や湿球温度が気温より価値の高いことを示した。たとえば室内気候の問題⁸⁾などについてなど、まだこの他にも筆者の気付いた例がいくつかあるが、本稿の目的は次に続く筆者のいくつかの論文の序報としてのものであるので割愛する。

本稿の素は筆者が満洲において旧陸軍に応召時代、必要にせまられて始めた調査に発する。以来、和達清夫・大内浩・肥沼寛一・久塚清隆の諸先輩をはじめ、多くの

知友同僚の御支援のもとに本日ようやく脱稿することを
得た。ここに厚く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 木村耕三, 1951: 気塊及び前線の解析法抄報, 北部管区気象研究会, No. 3, p. 56.
木村耕三, 1952: 気塊及び前線の解析法, 研究時報, 4, No. 3, p. 106.
- 2) 松倉茂夫, 1952: 季節の階段的变化と上層気温より見たる季節の遅速について, 研究時報, 4, p. 426.
- 3) T. Okada 1931: The Climate of Japan, 中気欧文報告, 4, p. 383.
- 4) 斎藤博英, 1951: 上川地方の米作と夏期気温との関係並に其の予想の1・2の方法, 北部気象研究会誌, No. 2, p. 13.
- 5) 大後美保, 1945: 日本作物気象の研究, 朝倉書店.
- 6) 藤田孝男, 1955: 上川地方に於る米収量の推算方式, 産気調, 18, No. 2, p. 69.
- 7) 三原義秋と協力者, 1955: 温水池の熱効率に関する研究〔1〕, 農技研, A, No. 4, p. 52.
- 8) たとえば
岡田武松, 1942: 理論気象学上巻, 岩波書店, 101頁以下.
- 9) 斎藤博英, 1951: 室内気候について, 研究時報, 2, No. 13, p. 38.