

# 気温と地表温度の年平均値の差異に 対する熱平衡論的考察\*

東 修 三

## Note on the Difference of Annual Mean Temperature between Air and Earth Surface.

SYUZO AZUMA

### I 提出問題

本邦各地の測候所の観測結果を見ると、年平均気温は地表温度の年平均値と一致せず、2~3°C 後の方が高く出ている処が大部分である事がわかる。

この事実は、今迄未知であったとは云えないが、尠くとも、これを取立てて詮議したものは見出せず、特に、かかる状態で熱平衡が成立し得るか、即ち、かかる状態が物理学的に見て可能であるかと云う疑問を發した学者もない様である。

尤も、この問題は、京大気象学特別研究所に於て、滑川博士が提出され、故志賀正氏が其解決を企て、昭和14年度の日本数学物理学会で中間報告として講演されたが、不幸にして、其研究が中絶されていたので、著者が、これを引継いで其解決を志したのである。

### II 地温の年平均値に対する考察

本論に入るに先立ち、豫備的考察として、地中温度に就いて論議する。

地中に於ける熱輸送は、伝導のみによると取扱い、

$$\frac{\partial \theta_B}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa_B \frac{\partial \theta_B}{\partial z} \right)$$

[ $\theta_B$ ; 地温,  $z$ ; 深さ,  $\kappa_B$ ; 熱拡散率]

で律せられる事は周知である。又、変化する温度場( $\theta_B$ )

は、定常状態( $\bar{\theta}_B$ )に重合されたものとして取扱われ、 $[\theta_B = \bar{\theta}_B + \theta_B'(t)]$ 、定常状態を分離出来る事も明白である。

定常状態に対しては  $\partial \bar{\theta}_B / \partial t = 0$  であるから、上式から、 $\frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa_B \frac{\partial \bar{\theta}_B}{\partial z} \right) = 0$  でなくてはならず、従って、 $\kappa_B \frac{\partial \bar{\theta}_B}{\partial z} = \text{const.}$  でなければならない。更に、この常数が零でないなら、熱は一方的に、地表面から地中へ流れるか、又は、地中から地表面へ流れる事となるので、この熱流の行先を論議せねばならない。

偖て、一次元熱流を考える限り（水平方向には一樣であると考える）、側方との熱の出入がないから、熱平衡が成立するためには、この常数は零でなくてはならない。即ち、 $\partial \bar{\theta}_B / \partial z = 0$ 、従って  $\bar{\theta}_B = \text{const.}$  で、深さに対して  $\bar{\theta}_B$  は一定でなくてはならない事となる。

観測から得られた年平均地温が、上記の定常状態の温度を表示するや否やに対して種々の議論もあるが、各層の年平均地温を  $\bar{\theta}_B$  と見做して、 $\bar{\theta}_B$  が深さによって変らない性状があるかを検して見る。一例を大阪にとると、

地表温度は 16.5°C、深さ 0.5m で 16.5°C、1.0m で 16.6°C、2.0m で 16.4°C、3.0m で 16.4°C であって、0.2°C 以上の差異は見出せないから、大体適合していると見てよい。Table 1. は日本気候表から取った材料を表示したもので、伊東、阿蘇の如く、特殊事情のあると

TABLE 1. 年平均地表及び地中温度

°C

		札幌	青森	秋田	新潟	銚子	東京	名古屋	大阪	京都	神戸	広島	福岡	伊東	阿蘇
地表温度		—	11.0	12.3	13.7	16.7	15.2	17.2	16.5	15.8	16.9	17.1	16.9	16.7	10.7
地 中 温 度	0.5m	9.2	11.1	12.1	14.0	16.7	15.4	16.7	16.5	16.0	16.4	16.8	17.3	17.5	11.4
	1.0m	9.3	10.9	12.1	14.0	16.9	15.5	17.0	16.6	16.0	16.3	16.6	17.4	18.8	12.5
	2.0m	9.2	11.0	12.0	13.7	16.9	15.8	16.6	16.4	16.0	16.6	16.9	17.2	19.7	13.2
	3.0m	9.2	10.9	12.0	—	17.0	15.6	16.6	16.4	16.0	16.6	16.8	18.5	20.4	13.5

\* 昭和26年度 日本気象学会総会にて講演。

思われるもの以外の測候所の値は、大体一致している。

以上の考察から重要な事項を列記すると、

(1) 地表及び地中温度の年平均値は、其観測方法及び平均値算出法等に問題があるに拘らず、其値は各層で一致し、熱平衡の見地から見た定常状態の温度を示している。

(2) 従って、地中温度の不易層の温度は、地表温度の年平均値、又は、各層の温度の年平均値と見做して差支えない（但し、特殊事情のあると思われる場所を除く、例、伊東、阿蘇等）。

(3) 地表温度の正確な観測は、厄介であり本邦では、温度計の半球を土地に埋めて測定していて、輻射の関係其他幾多の疑問があるに拘らず、年平均地表温度は、熱平衡論的に矛盾のない温度を示している事は、注目すべき事である。又、浅層は曲管寒暖計、深層は鉄管寒暖計を用い測定法を異にしていて、これらの影響も残留する憂いがあるに拘らず、年平均値は熱平衡論的に矛盾しない結果を与えている。

(4) これらの年平均値は、地表及び浅層は1日6回、深層は、1日1回（10時）の測定を平均したものである

から、必ずしも正確な平均値とは云えないし、特に、各層に於ける位相の遅速を考慮せば、平均の方法を改良すべきではないかと思われるに拘らず。結果は、熱平衡論的に矛盾しない値を与えている。

II 年平均気温と年平均地表温度との差異に対する考察

(1) 今取扱う気温と云うのは、百葉箱内で地上約2mの高さに置いた温度計の示度で、1日6回の定時観測値を平均したものである事は云うまでもない。

この平均値は、地温の場合の類推によつて、一応、定常状態の値と見做し得る。従って、この年平均気温が年平均地表又は地中温度に等しければ、熱平衡的に一応問題は生じないが、両者の間に差異があれば、地表面は、温度を異にする空気層で包まれている事となって、其熱平衡が論議の対象となる。

(2) 年平均気温と地表温度を前記の14箇所の測候所で比較すると、1~3°C位、前者の方が低くなっている（Table 2.）。従って、定常的に地表面は、約2°C低温の気層と接していると考えられる。空気は熱の絶縁体で

TABLE 2. 年平均気温と地表温度の差異 °C

	札幌	青森	秋田	新潟	銚子	東京	名古屋	大阪	京都	神戸	広島	福岡	伊東	阿蘇
地表温度	—	11.0	12.3	13.7	16.7	15.2	17.2	16.5	15.8	16.9	17.1	16.9	16.7	10.7
気温	7.0	9.2	10.4	12.7	14.7	14.0	14.4	15.1	13.9	15.1	14.6	14.9	15.5	9.0
差	—	1.8	1.9	1.0	2.0	1.2	2.8	1.4	1.9	1.8	2.5	2.0	1.2	1.7

ないので、かかる状態が永久に成立していると見るなら、常に地表面から上方に向う熱流がなくてはならない。この熱流の行先が問題となる。勿論、地表面に於ける熱平衡は、この熱流が存在しても成立し得る事は明らかである。輻射の収支の過不足でも、或は降水又は蒸発に伴う熱流を取入れても、成立せしめ得る途はある。従って、問題の焦点は、この熱流の落着く過程の解明に帰着する。

(3) この問題の物理学的考察に先立ち、この差異の分布から何等かの暗示が得られないか、例えば、輻射の過不足等が作用しているなら、地理的分布に何等かの系統性が見出される見込があるので、其実状を調査して見た。Fig. 1. は、これを示したものであるが、不規則に分布していて劃然たる系統的结果は見出し難い。

(4) 気温と地表温度の年平均値に差があるとすれば、両者の中間部、即ち、接地気層に於ける温度の垂直分布が問題となる。

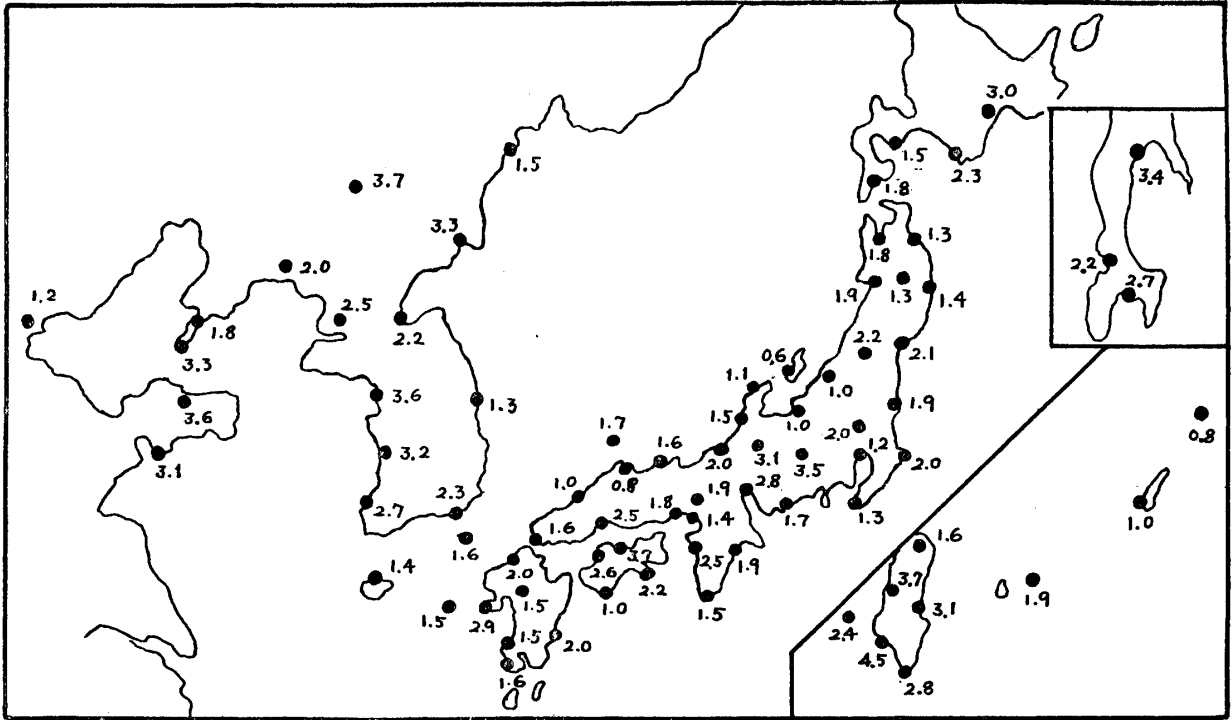
然し、接地気層の長期間に渉る観測結果の発表されたものは非常に少く、著者の知る範囲では、有名なBEST 1) の材料しかない。Table 3. は、BEST の観測結果を転載したものであるが、この表でわかる如く、少くとも、地上2.5cm~1.2mの高さ迄は、大略等温と見做

し得る。従って、年平均状態は定常的性格を示していて、

TABLE 3. 月及び年平均温度差 —BEST の観測—

	A (2.5 cm—30 cm)	B (30 cm—1.2 m)
1 月	0.175°C	0.167°C
2 月	0.167	0.106
3 月	0.039	0.100
4 月	-0.193	-0.022
5 月	-0.389	-0.083
6 月	-0.522	-0.111
7 月	-0.406	-0.061
8 月	-0.306	-0.067
9 月	-0.111	0.045
10 月	0.089	0.156
11 月	0.200	0.139
12 月	0.256	0.161
年平均	-0.083	0.045
乾燥断熱率に相当する差	-0.003	-0.009

Fig. 1. [年平均地表温度-年平均気温]の分布



地中温度の場合と同様、熱平衡が成立して、この点には何んら問題は生じない様にも見えるが、百葉箱の温度を正当として、上記の結果を採用すれば、Fig. 2. に示す如く、地表面極近傍で約 2°C の温度飛躍が存在する事となって、問題が生じて来る。

(5) BEST の観測結果は、大略  $(\partial\theta/\partial z=0)$  ( $\theta$ ; 年平均気温) を満足しているが、この結果は、地中に於ける場合とは異なり、理論的に要求されるものではない。何故ならば、大気中では、熱伝導のみに支配されず、輻射の効果も働らくし、伝導も渦乱流によるものであり、且又、一方的に上方又は下方に流れ得ないと云う条件は必ずしも満たす必要は認めないからである。

即ち、
$$c\rho\kappa \frac{\partial\theta}{\partial z},$$

[ $c$ ; 空気の比熱,  $\rho$ ; 空気の密度,  $\kappa$ ; 熱拡散率]

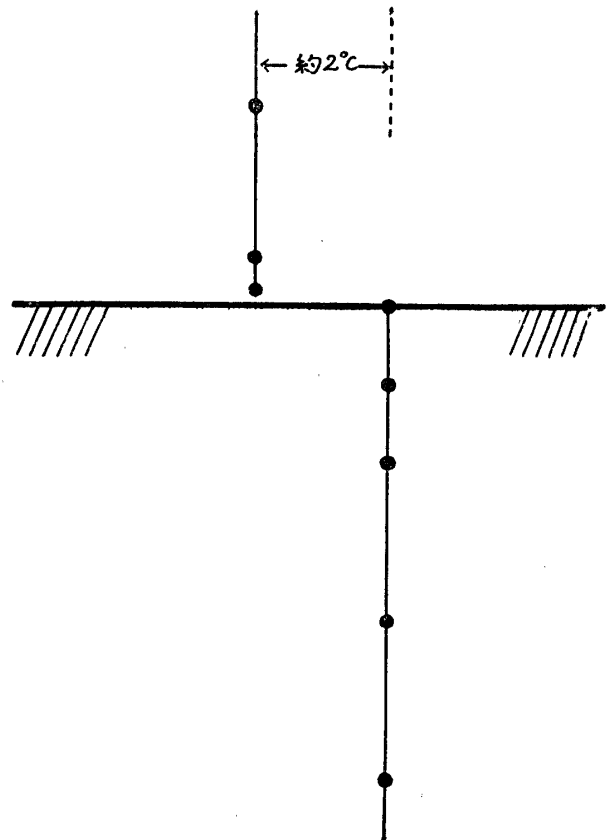
のみによって熱移動が起るとし、地表温度と地表面極近くの気層の温度とに差があるとすると、地表面から接地気層に常に流入している熱の捌口がなくなって熱平衡が成立せず、従って、地層の  $\theta_B$  と接地気層の  $\theta$  とは一致し差は存在し得ないと云う結論となる。

然し、大気中では、一般に地表面は熱源で、冷源は大気の上層にあると考えられているから、地表面から永久的に上方への熱流が存在し、これが上層での冷却を補充して、熱平衡が成立していると考えられる事は可能である。

即ち、地表面では、

$$R_D - R_U = -c\rho\kappa \frac{\partial\theta}{\partial z} \Big|_{z=0}$$

Fig. 2.



[ $R_U$ ; 上向きの輻射流,  $R_D$ ; 下向きの輻射流] が成立し,  $R_D > R_U$  であるが, 上層では,  $R_D < R_U$  で, 其不足分だけ下方から常に補充されると見ればよいのである. かく考える時は, 下方からの熱流が,  $\partial\bar{\theta}/\partial z=0$  なる接地気層を通過し得るかと言う疑問を解明せねばならぬ事となる.

(6) 今, 地表温度と気温との差  $2^\circ\text{C}$  が, 分子境界層の上下で生起していると仮定すると, この層を通過して常に上方に向う熱量は, 層の厚さを  $\delta=0.1\text{cm}$  と推定すると,  $Q=c\rho\kappa m \Delta\theta/\delta=10^{-3}\text{cal/cm}^2\cdot\text{sec}$  (茲に分子熱拡散率  $\kappa m=0.2\text{cm}^2/\text{sec}$  とした) となる. この熱量が, 渦熱伝導で接地気層を通過するに要する温度勾配は,  $\bar{\kappa}=10^2\text{cm}^2/\text{sec}$  と見做すと,  $\partial\bar{\theta}/\partial z=-4\times 10^{-3}^\circ\text{C}/\text{cm}$  となり,  $-4^\circ\text{C}/\text{m}$  位となる. 然し, これは不安定であるから, 必ずしも, この状況が永続すると考える必要はない.

不安定気層の場合の熱流に対する巧妙な取扱は既に滑川教授<sup>2)</sup>によって果されている. この取扱は,  $\theta=\bar{\theta}+b'(t)$ ,  $\kappa=\bar{\kappa}+\kappa'(t)$  と時間的変化を考慮すると, 熱流は,

$$Q=-c\rho\kappa\frac{\partial\theta}{\partial z}=-c\rho\bar{\kappa}\frac{\partial\bar{\theta}}{\partial z}-c\rho\kappa'(t)\frac{\partial b'(t)}{\partial z}$$

となり, 不安定気層の場合は,  $\partial\bar{\theta}/\partial z=0$  となるも, 第2項が残留し, これによって熱が上方へ運ばれるのである.

この考えを取入れると, 仮令,  $\partial\bar{\theta}/\partial z=0$  でも, 上方への熱流は存在し得て, 分子境界層から入って来る熱量を上方へ運ぶ事は可能である. 従って, 問題となっている  $2^\circ\text{C}$  の温度差の存在を否定する事の合理性はなくなって来る.

然し, この項の概算を企てても,  $\kappa'(t)$ ,  $\partial b'(t)/\partial z$  を与える適当な観測結果がないので, 前記の要求された熱流を上方へ運び得る程度のものであるか否かは不明であり, 且又, 大気の上層で断熱率より大なる絶対不安定の観測される事は極めて稀であっても, 接地気層では,  $-4^\circ\text{C}/\text{m}$  位の不安定層は日中には屢々観測されているから, 必ずしも静的不安定成立せず常に等温化すると云う提言も受入れる必要はない. 即ち,  $\partial\bar{\theta}/\partial z=0$  でも熱は上方に運び得る可能性のある事は示し得たと思うが, 何故, 年平均に於て接地気層が等温状を呈すべきかは説明し得ない. 又, この事実, 即ち, 接地気層の等温性は, 如何なる土地に於ても然るやと云うことは, 唯一例のみからの考察では確言することは出来ない.

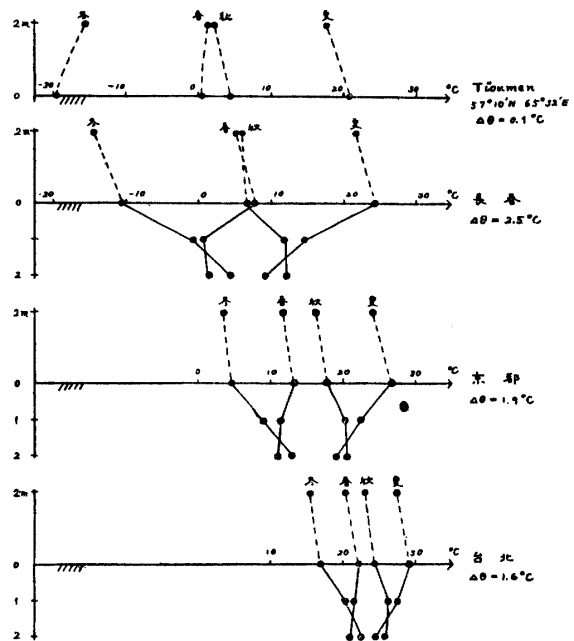
(7) 前項迄は, 移流を慮外視して, 熱平衡の成立の有無を検したが, この問題に移流の影響が存在する事は明らかである. 特に, 本邦附近では, 冬期, アジア大陸から寒冷気塊が流入して, 平均的に見ると, 尠くとも冬期は, 其土地特有の気温より低い温度の空気が吹走していると思ふべきからである. この影響を考慮すると, 年平均気温が地表温度より低く出で当然であると

云える様である.

Fig. 3. に示した季節別の気温及び地温の垂直分布の実状は, 上記の事柄を或程度示している様である. 即ち, 冬期のシベリヤ気団の発現地に近い Tioumen では, 地表温度の方が気温より低く出ているが, 長春では逆に, 地表温度の方が著しく高く出ている, これはシベリヤ冷氣団の吹走のためであると考えられる. 同様な事は京都でも云えるが, 長春よりも, その差は小となっている. 勿論, 移流がなければ, 冬期は地表温度の方が低く出る筈である. この様な事情が年平均に影響して, 気温の方が地表温度より低く出ている訳である.

これだけの影響であるなら, 問題の温度差に顕著な地理的分布が豫期される筈であるが, 前述の如く判然としないのは, 他の要因も重合しているものと推察される.

Fig. 3. 季節別気温及び地温垂直分布



(8) 移流のある場合の熱平衡を簡単なモデルで論ずる事は容易であるが, 目下の問題の解決は至難である.

今, 地表温度を  $T_B=T_0+ax$ , [ $a>0$ ,  $x$  を南方にとる] とし, 年平均気温を  $\bar{\theta}$  として, NEWTON の冷却則を仮定すると,

$$c\rho\frac{d\bar{\theta}}{dt}=k(T_B-\bar{\theta}) \quad [k; \text{比例常数}]$$

が成立し,  $\bar{\theta}$  を定常と見做すと,  $\partial\bar{\theta}/\partial t=0$  故,

$$c\rho\bar{u}\frac{\partial\bar{\theta}}{\partial x}=k(T_B-\bar{\theta}) \quad [\bar{u} \text{ は風速の年平均値とする}]$$

となる.  $\bar{\theta}|_{x=0}=T_B|_{x=0}=T_0$  なる条件でのこの式の解から, 地表温度と気温との差は,

$$\Delta\theta=T_B-\bar{\theta}(x)=\frac{c\rho\bar{u}a}{k}\left\{1-\exp\left(-\frac{k}{c\rho\bar{u}}x\right)\right\}$$

となり,  $x$  が相当大となって,  $1 \gg \exp(-kx/c\rho\bar{u})$  が満

たされると、

$$\Delta\theta \rightarrow \frac{\varepsilon\rho\bar{u}a}{k} = \text{const.}$$

即ち、一定値に近ずき、これが問題の温度差  $2^{\circ}\text{C}$  位だとする考察は合理的の様に思われる。

然し、この取扱は、NEWTON の冷却則を用い熱量収支のみを概算したに止まり、巨視的に見た場合であって、接地気層の取扱は微視的考察に委ねねばならない。

(9) 結局、観測結果に現われる年平均気温と地表温度の差異は、若し、百葉箱内の気温が、其測定法に於て著しい系統的誤差がなく、真実に近いものと見做されるなら、この差異の成立のための熱平衡が問題となり、これが物理的説明を要求され、又、気候学的考察の一対象ともなる事には疑はない。

然し、以上の考察から、これが解明には接地気層の温度分布を詳細に知る必要があるので、BEST の材料の如く比較的長年月の観測結果の獲得が問題の解決に先行すべきであると思う。かかる観点からも微細気象観測の充実が望ましい。

終りに臨み、本論文作成に当り懇切な御指導を賜りたる京都大学教授滑川忠夫先生に深厚なる謝意を表す。

#### 文 献

- 1) BEST, A. C., *Geophysical Memoirs.*, No. 65(1935).
- 2) 滑川忠夫, 海水又は湖水温度年変化に関する一理論. 京大理学部紀要 (A). 18(5) (1935).  
(1952年12月24日受理)