

植生の場における地中環境

とくに地温について

上原 勝樹

(香川大学農学部)

1. まえがき

土地は作物生産の場で、その土壌の物理性とくに熱的・温度的要素は作物種子の発芽、並びに生育には勿論のこと、肥料の分解その他有機物の腐敗、微生物の醗酵などに密接な関係をもつので、これら土壌の熱的、温度的特性を明らかにしておくことは極めて重要で、またそれらを作物生育にうまく調節利用することの研究は農業上とくに大切である。かかる見地から、平地や傾斜地における地温について述べてみよう。

2. 地温の形成

(1) 日射と地物の反射能

地温を左右する熱源は勿論太陽からの日射で、その量はAbbotやFowleらの測定によると、大気の上限で太陽光線に垂直な1cm²に1分間について約1.94 calとされており、これを太陽常数Solar constantという。

この日射は、その大部分(約75%)が大気層を通過して地面に達し、そのうち一部は地面で反射されて空気中にもどり、残りは地面に吸収されてその温度を高め、地面からはその温度に相応した輻射をなして空気を暖め、また地下へも熱を伝える。

地面ではそこに到達する日射の幾割を反射し、また吸収するかは地面の状態によつて異なるので、入射する輻射エネルギーに対する反射するエネルギーの割合を反射能(Albedo)という。これは一般に波長によつて異なるので、Hulburtによると、砂は赤外線をよく反射し、雪は紫外線をよく反射するという。

したがつて、地面における反射能の大小は地面に吸収される日射熱量の多寡に関係し、つぎに述べる純輻射量Sを左右するので、地温の形成に極めて大切な要素である。それ故多くの研究があり、それらを要約すると第1表のようである。

第1表 いろいろな表面の反射能

| 表面の種類 | 反射能 | 表面の種類 | 反射能 |
|-----------|-------------|-----------|-------------|
| 新雪(かわいた) | 0.8 ~ 0.95 | ばれいし畑 | 0.15 ~ 0.27 |
| 古雪(ぬれた) | 0.60 | 草地 | 0.18 ~ 0.23 |
| たい雪(よごれた) | 0.40 ~ 0.50 | 水稲田 | 0.12 ~ 0.20 |
| 乾燥土壌 | 0.15 ~ 0.18 | びーと・るーさん畑 | 0.25 |
| 湿潤土壌 | 0.10 ~ 0.12 | わた畑 | 0.20 |
| 砂面 | 0.30 ~ 0.40 | 小麦畑 生育初期 | 0.10 ~ 0.15 |
| 黒土 | 0.08 ~ 0.14 | 小麦畑 生育後期 | 0.20 ~ 0.25 |

(2) 地面の熱収支

前述のように、地面は熱授受に関する作用面であつて、昼間は短波輻射である日射をうけるが、この日射は直射光 R_d と散乱光 R_s とからなり、ともに地面において一部反射され、残りは熱エネルギーに移して地中へ伝導される。

また昼夜とも、地面からはその温度に相応した長波輻射 $R\uparrow$ を大気に向け射出しており、全時に大気層からは逆輻射 $R\downarrow$ をうける。両者の差し引きが地面から大気に向けて放出される正味の輻射量で、とくに夜間における地温、大気の冷却に密接な関係があるので、これを夜間輻射 (Nocturnal radiation) または有効輻射 (Effective radiation) という。これら輻射に関する全部の熱流を決算して、地面に向つてきた場合を正と規約して S で表わすと

$$S = (1 - r)(R_d + R_s) + (R\uparrow - R\downarrow) \quad (1)$$

となる。ここに r は地面における日射の反射能である。したがつて、 $S > 0$ ならば地面は輻射による熱をうけていることになり、 $S < 0$ ならば地面から熱を出していることになるので、 S は地面に対して真に有効なエネルギー効果をおよぼす輻射 (flux) であつて純輻射 (Net radiation) という。

一方地面を通じて、地下へ熱伝導によつて運搬され地温の上昇に使われる熱を B とし、また地面を通してその直上の気層との間にアウスタウシユによつて運搬される熱の取引があり、これを L で示す。さらに地面においては一般に蒸発または凝結が行なわれているので、それによる熱の得失を V で示すと、地温の上昇にあずかる熱量は、以上の各過程における熱量の収支決算の結果として与えられるので、それを式で表わすと

$$B = S - L - V \quad (2)$$

のような熱収支式とよばれる基本式が得られる。上式における熱収支項 B 、 L および V の符号は慣例によつて地面から去る時に正と規約する。

例えば、地温の日変化を考えると、 $S - L - V > 0$ すなわち $B > 0$ であれば、地面に入る熱量が地面から出る熱量よりも多く地温は上昇するが、逆に $S - L - V < 0$ すなわち $B < 0$ であれば、地面から出る熱量の方が多く、地温は下る。しかし地中に入つた熱が地温として現われる状態は、土壤の物理的性質によつてきまり、地温の高低は地面に出入する熱量の外に、土壤の比熱、密度、水分含量、地面の色、地面の被覆物の有無、地面の傾斜などで異なる。

そして夫々上述したような地形や土壤の状態などに応じて、1日の各時刻における(2)式各項の増減により、地中に入る熱量は増減あるいは正負となつて地温の日変化が形成され、同様に季節変化、年変化が形成されるのである。

3. 地温分布の実態と応用

(1) 被覆と地温

被覆物があると、その表面が地面の作用を営み、日中は日射を反射・吸収し、その結果被覆下地面への日射は減じ、裸地のそれより低温になる。また夜間被覆物は、地面からの輻射を防ぐから被覆下の地温は裸地より高温で、結局地温の昇降を緩和して、温度変化の較差を小さくする。

わらを被覆した場合： 地面にわらを被覆したとき、敷わらの温度上昇に使われる熱を B' で示すと、

敷わら表面の熱収支を表わす式は、裸地の場合における(2)式と同様に

$$B = S - L - V - B' \quad (3)$$

で与えられる。

中川・坪井は、清耕区と敷わら区において1959年3月5日8-12時に熱収支の観測を行ない第2表のような結果を得た。

第2表 清耕区と敷わら区における熱収支

| | (cal/cm ² ・4hr) | | | |
|---------|----------------------------|-------|-------|------|
| | S | B | L+V | B' |
| 清 耕 区 | 157.58 | 66.50 | 91.08 | — |
| 敷 わ ら 区 | 107.45 | 11.02 | 94.40 | 2.03 |

地温の観測結果によると、日中清耕区の地温が敷わら区より高く、例えば地下5cmで正午に7℃の差を示し、夜間は反対に敷わら区が2℃内外高温であつた。これは清耕区の地温日較差が敷わら区に比べて著しく大きいことを示すものである。

日中清耕区の地温が敷わら区より高いのは、反射能の違い(清耕区6.9%、敷わら区19.5%)により、清耕区の地面に吸収される純輻射量Sが敷わら区の表面に吸収されるものに比べて大きくなること、および土壌の熱伝導率がわらのそれより大きいことなどが原因で、敷わら区では地温の上昇に用いられる熱量Bが清耕区に比べて非常に少ないことがわかる。

樹木の場合：北面傾斜棚仕立ぶどう園内外において、上原が1949年8月6~7日の快晴日に観測した結果から、園内外の地温の日平均および日較差を示すと第3表のようである。日平均温度は地中各深さを通じて園内は園外に比べて全日低温で、地面にて5.9℃、地下30cmにおいても3.7℃低かつた。日較差は地中へ深さとともに急減し、かつ園内では地面にて16.4℃、地下30cmにおいては0.7℃園外より小さい。また最高温度も地面および地下30cmにおいて夫々16.6℃、4.1℃園内が低かつた。

第3表 地温の日平均および日較差

| 深 さ cm | 園 内 | | 園 外 裸 地 | |
|-----------|------|-----|---------|------|
| | 日平均 | 日較差 | 日平均 | 日較差 |
| 0 | 26.7 | 7.0 | 32.6 | 23.4 |
| 5 | 26.6 | 5.7 | 31.6 | 14.1 |
| 10 | 26.4 | 3.1 | 31.7 | 9.7 |
| 20 | 25.8 | 1.5 | 29.7 | 3.5 |
| 30 | 25.1 | 0.7 | 28.8 | 1.4 |

(2) 地面の色と地温

地面の色を黒色にすると日射の吸収率が大きくなるからその温度は白色の場より著しく高くなる。

八峯は京都において、填土の地面を黒色および白色にして地温を観測した結果から、地面に出入する熱量を計算した。それによると、黒色区は白色区より多量の日射を吸収し、地中に与える熱量も多いので地温は著しく高温となる。すなわち、地中に入る熱量Bは10時前後に最も多量で、黒色区では $0.29 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ であるが、白色区はこれより著しく少量で $0.16 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ にすぎなかつた。

また鈴木・丸山が1956年4月21日にCarbon Blackを 1m^2 当り100gr散布した区と、全然散布しなかつた標準区とについて、地面の反射能を測定した結果は第4表のようで、Carbon区は無散布区の $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{7}$ の値を示した。すなわち、Carbonを散布すれば、反射能は小さくなるので、地面温度は標準区より数度高温になるばかりでなく、地中でもかなり高温で、Carbon散布による地温上昇の効果が明らかに認められた。また地面の反射能は、Carbonの量が多いほど小さくなり、それが地面の昇温に役だが、量が多すぎるとかえつて有効性を失うようで、大体100grが限度であるという。

第4表 標準区とCarbon区の地面における反射能(%)

| 区 | 時間 | 10.30 | 11.00 | 11.30 | 12.00 |
|--------|----|-------|-------|-------|-------|
| | 標準 | | 7.6 | 8.8 | 9.9 |
| Carbon | | 1.0 | 1.9 | 2.0 | 4.0 |

つぎに上原は、南北両斜面に地面勾配約 10° のテラスを設け、それぞれ地面に石灰を1mm厚さに散布した区と、無散布の標準区とについて、1958年8月6~7日の快晴日に地温の観測を行ない、第5表のような結果を得た。

第5表 石灰散布の有無と地温($^\circ\text{C}$)

| 深さ cm | 南 斜 面 | | | | | | 北 斜 面 | | | | | |
|----------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| | 最 高 | | 最 低 | | 較 差 | | 最 高 | | 最 低 | | 較 差 | |
| | 散 布 | 標 準 | 散 布 | 標 準 | 散 布 | 標 準 | 散 布 | 標 準 | 散 布 | 標 準 | 散 布 | 標 準 |
| 地面 | 45.0 | 60.0 | 23.0 | 23.6 | 22.0 | 36.4 | 44.0 | 58.0 | 22.2 | 23.0 | 21.8 | 35.0 |
| 5 | 35.6 | 45.1 | 25.0 | 26.8 | 10.6 | 18.3 | 45.0 | 43.5 | 24.5 | 27.5 | 10.5 | 16.0 |
| 10 | 33.7 | 38.3 | 27.0 | 29.5 | 6.7 | 8.8 | 32.4 | 39.5 | 25.5 | 28.5 | 6.9 | 11.0 |
| 20 | 31.1 | 35.5 | 28.4 | 30.7 | 2.7 | 4.8 | 30.6 | 35.0 | 27.8 | 29.7 | 2.8 | 5.3 |
| 30 | 30.0 | 32.3 | 29.2 | 30.3 | 0.8 | 2.0 | 30.2 | 32.6 | 29.0 | 30.5 | 1.2 | 2.1 |

(3) 土壌の含水量と地温

水の比熱は他の土壌成分のそれより大で、かつ土壌水分が多いほど地面蒸発が増すから湿潤地は乾燥地より温度変化が小さい。

八鐵が京都において1931年8月26日の晴天日に、乾燥土と湿潤土の地温を観測した結果によると、乾燥土の地面温度は12-15時に湿潤土よりも7-8℃前後高く、5cmの深さにおいても12-14時に乾燥土は5-6℃高温であつた。しかし30cmの深さになると両者の温度差はほとんどなく、各深さにおける最高、最低温度を示すと第6表のようである。

第6表 乾燥土および湿潤土の地温(℃)

| 深さ cm | 最 高 | | 最 低 | | 日 平 均 | |
|----------|------|------|------|------|-------|-------|
| | 乾燥土 | 湿潤土 | 乾燥土 | 湿潤土 | 乾燥土 | 湿潤土 |
| 地面 | 47.6 | 40.0 | 23.2 | 23.1 | 32.45 | 29.59 |
| 5 | 40.8 | 34.8 | 24.8 | 24.6 | 31.52 | 28.99 |
| 10 | 33.6 | 32.8 | 26.2 | 25.9 | 30.68 | 29.01 |
| 20 | 31.2 | 30.1 | 27.4 | 27.4 | 29.15 | 28.61 |
| 30 | 29.5 | 29.0 | 27.9 | 27.8 | 28.49 | 28.30 |

林・高橋が岩手山の南斜面において、冬季牧草畑に8-9℃の湧水をかんがいで実験を行なつた結果、かんがい区は融雪が早く、12-3月の月平均地温は7.5-7.9℃で、無かん水区は積雪期間中0.5-0.7℃であつた。一般に畑地かんがいの地温への影響は、かん水量・水温および時期などによつて異なり、冬季は比較的温度的の高い水をかん水することになるから、かん水区の地温は無かん水区に比べて高温である場合が多い。

また排水を十分に行えば、土壌の比熱が減少するほか地面蒸発も減り、したがつて排水不良田に比べると春季における土壌温度の上昇を容易にすることができる。一般に排水不良地の表層土は排水良好な土地に比べて3-7℃低温であることが知られている。

以上のように、かんがいによつて土壌水分が増すと、地面の反射能が小さくなるため、短波輻射の吸収が大きくなり、一方かんがいによつて地面温度が低下し、また接地気層内の水蒸気が増加すると有効輻射が小さくなることなどと相まつて純輻射Sが増加する。またかんがいすれば、蒸発によつて放出される熱量Vが急激に増すが、これはかんがい水量によつてきまり、蒸発の増加によるVの増加はSの増大によつて補われ、アウスタウシユによつて運搬される熱量Lは著しく減少する。そしてかんがい量が十分な大いさになるとLは負となり、接地層の気温分布は日中でも逆転を生ずるようになる。一方土壌内の熱移動Bはかんがいによつて比較的わずかしが変化しないといわれる。したがつてこれらのことや、湿潤土壌の熱容量の大きいことから、かんがいの有無などから生ずる土壌の乾湿と地温の関係が理解されよう。

(4) 傾斜の角度と地温

傾斜面の地温は、傾斜の方位、角度などによつて異なり、その解析は厄介であるが、最近傾斜地の開発利用がますます盛んになつてきているので、傾斜地の地温分布の特性検出はきわめて重要である。つぎに上原が南北両斜面における開墾直後の状態の裸地について、傾斜角度0, 5, 10, 20, 30および35°の開墾限界までの各斜面の地温を、1956年8-9月の快晴日に観測した一例を示すと第7表のようである。

第7表 各傾角における地温の日平均(°C)

| 深さ cm | 南 斜 面 | | | | | | 北 斜 面 | | | | | |
|----------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 5° | 10° | 20° | 30° | 35° | 0° | 5° | 10° | 20° | 30° | 35° |
| 地面 | 29.2 | 29.8 | 30.2 | 30.9 | 30.6 | 30.3 | 32.4 | 32.3 | 32.0 | 31.4 | 30.4 | 30.1 |
| 5 | 28.7 | 29.2 | 29.4 | 29.7 | 29.4 | 29.3 | 31.2 | 30.9 | 30.7 | 30.0 | 29.2 | 28.8 |
| 10 | 28.4 | 28.8 | 29.1 | 29.4 | 29.4 | 29.1 | 30.3 | 30.3 | 30.1 | 29.7 | 29.2 | 28.9 |
| 20 | 28.2 | 28.5 | 28.7 | 28.9 | 28.6 | 28.5 | 29.2 | 29.2 | 29.2 | 28.8 | 28.5 | 28.3 |
| 30 | 27.4 | 27.9 | 28.1 | 28.4 | 28.4 | 28.2 | 28.1 | 28.2 | 28.2 | 30.0 | 27.8 | 27.7 |

傾斜の角度と地温の関係は日射量($R_d + R_s$)の配布に平行的であつた。すなわち日射の日総量は、南傾斜面では傾角20°付近に最大で、北斜面では傾角0°に最も大きく、傾角の増加につれて次第に減少している。すなわち平地の日射量を100%とすると、傾角5°, 10°, 20°, 30°および35°の各斜面では、南面は夫々102.5, 107.6, 110.0, 106.5, 103.6%, 北面では夫々98.3, 89.5, 82.4, 68.6, 67.2%であつた。それに対して地温は、南斜面では各深さとも傾角20°付近に温度は最も高く、北斜面は傾角0°の平地に最高で、傾角の増加につれてしだいに温度は低下していることがわかる。

4. あとがき

以上ごく簡単に土壌温度の形成と、地温分布の二、三例について述べたのであるが、とくに土壌の熱的・温度的現象は地面における熱経済の面から考えることが必要であろうと思われる。また作物畑の地温は、化学的現象その他ともからみ合い、その総合結果として現われてくるので、化学的な面からも平行的に考えてゆかねばならない。

参 考 文 献

- (1) 農業気象ハンドブック、養賢堂 1961
- (2) エム・イ・ブドウイコ：地表面の熱収支(内島訳)、河川水温調査会 1959
- (3) 中川行夫・坪井八十二：果樹園の土壌管理の違いによる地温の変化について、園芸会雑誌 31(1), 1961
- (4) 鈴木清太郎・丸山栄三：Carbon Black の地面散布による地温上昇について(序報)、産業気象調査報告 20(2), 1957
- (5) 上原勝樹：傾斜地開発利用に関する物理気象的研究、香川大農学部紀要 7, 1961
- (6) 上原勝樹・中山一義：テラスにおける地温のコントロールについて、香川大農学部学術報告 13(2), 1962
- (7) 八鍬利助：農業物理学、養賢堂 1961
- (8) 八鍬利助：地温に関する研究、謄写印刷 1943