植物体温に関する研究(第2報)*

中 川 行 夫

(農業技術研究所気象科)

Studies on the Plant Temperature (2nd Report)

Y. NAKAGAWA

(Division of Meteorology, National Institute of Agricultural Sciences)

1. 緒 言

植物体温がその周囲の気温と異つた分布を示すことは前報⁽¹⁾において現象的に記述した。本実験においては、植物体温の成立機構すなわち熱経済の問題を論じようとしたものである。ここに色々御指導賜つた研究所の坪井、小沢、今井、内島各技官および気象庁研修所の荒井氏に厚く感謝の意を表す次第である。

2. 実験方法

昭和31年7月から10月に亘つて苹果及び茄子の果実を用いて、種々の天候の下に果実温度、日射量、風速の観測を行つた。果実温度は果実の地面側表面、地面側表面より1.5cm内部、中心、反対側表面及び反対側表面より1.5cm内部の各点に熱電対を挿入して、主としてオツシログラフによつて自記させた。日射量は農試電試型日射計により、風速は風向風速計によつて測定した。

このデーターを次に述べる方法で、果実の熱収支を計算して見た。

a) 果実の熱容量の決定

熱量計法によつて固体の比熱を測定する場合には次の式より計算される。

$$c = \frac{W+w}{M} \times \frac{T-\theta}{\theta'-T} \quad (1)$$

但し C : 求める固体の比熱

M : 固体の質量

θ' : 熱した状態における固体の温度

W : 固体と混合する液体の質量

θ : 固体と混合する液体の最初の温度

w : 熱量計、攪拌器および寒暖計の水中に浸つてゐる部分の熱容量

T : 混合後の液体の温度

実際には魔法瓶に一定量の水を容れておいて、この中に熱した果実を投入して測定した。さらに果実を水と置換することによつて密度を計算した。第1表に果実の比熱、密度および熱容量を示した。

b) 果実に貯えられる熱量(F)

前述したように果実内の温度分布を測定することによ

Tab.1 Specific heat, density and heat capacity of fruits

第1表 果実の比熱、密度及び熱容量

Fruits 果実の種類	Specific Heat 比 熱	Density 密 度	Heat Capacity 熱 容 量
Tomato	0.853	1.089	0.928
Apple	0.853	0.833	0.711
Natsu-daïdai	0.615	0.968	0.595

つて、果実の平均温度を算出した。

今 T_1 時刻における果実の平均温度を $t_1^\circ\text{C}$ 、 T_2 時刻における果実の平均温度を $t_2^\circ\text{C}$ とすれば、単位時間に果実に貯えられる熱量 (F) は

$$F(T_2 - T_1) = \frac{4}{3} \pi r^3 \times cw(t_2 - t_1) \quad (2)$$

但し r : 果実を球と看做して果実の半径

c : 果実の比熱

w : 果実の密度

で表される。F の値が正の場合には果実が昇温したときであり、負の場合には降温したときである。

c) 果実に吸収される日射量(I)

日射計を太陽光線に直角に設置して観測したものを直射光(D)と散乱光(S)の和と考え、日射計に筒をつけて太陽光線に直角に設置して測定した値を直射光(D)と考えると、散乱光の値はこの差によつて求められる。

今果実を球と考えると、太陽側の半球に直射光(D)が照射し、散乱光(S)は全球に照射すると仮定した。半球(表面積 $2\pi r^2$)に照射する直射光の和はその底(πr^2)に直角に入射する直射光に等しいので、果実表面で反射される割合を α とすれば、(3) 式によつて果実に吸収される短波輻射が求められる。

$$I = (1 - \alpha)(\pi r^2 \times D + 4\pi r^2 \times S) \quad (3)$$

果実表面の反射率 α は文献より 0.25 とした。

d) 果実より放射する長波輻射(R)

果実の上半分の有効長波輻射を考えて見るに、Linkeの実験式⁽²⁾より

$$f_Z = f_0 \cos r_Z \quad (4)$$

f_Z, f_0 はそれぞれ天頂角 Z 及び垂直方向への有効輻射量であり、r は

* 昭和32年4月5日 32年度大会において発表

$$r=0.11+0.034p \quad (5)$$

で示される。 p は水蒸気張力 (mmHg) である。

今果実上半部の水平な単位面積よりの有効輻射量は (4) 式を積分したものであり、それは Brunt の式に等しいと考えると

$$2\pi\beta f_0 \int_0^{\pi/2} \sin Z \cos^{r+1} Z dZ = \frac{2\pi\beta f_0}{r+2} \\ = \beta\sigma T_{f_1}^4 - \beta\sigma T_a^4 (a+b\sqrt{e}) \quad (6)$$

但し β : 果実の射出能(吸収能)

T_{f_1} : 果実上半分の平均表面温度(°K)

T_a : 気温(°K)

又果実の上半分全体より出る有効長波輻射量は (4) 式を半球について積分して

$$R = \beta f_0 a^2 \pi \int_0^{\pi/2} \sin Z \cos^r Z dZ \int_0^{2\pi} d\alpha \\ = \frac{2\pi\beta f_0 a^2 \pi}{r+1} \quad (7)$$

(7) 式に (6) 式を代入して

$$R = \frac{r+2}{r+1} \beta a^2 \pi [\sigma T_{f_1}^4 - T_a^4 (a+b\sqrt{e})] \quad (8)$$

但し a : 果実の半径

果実の下半分より出る長波輻射に関しては、果実下半分の平均表面温度と地表温とが殆んど等温なので零とみなした。従つて (8) 式が果実より出る有効長波輻射量を示すものである。 β は文献⁽⁹⁾ より 0.74 として計算した。

e) 拡散によつて失われる熱量 (A)

果実表面において熱の収支を考えた場合に、果実自身

の呼吸熱及び果実よりの蒸発(凝結)を無視すると (9) 式で示される。

$$F = I - R - A \quad (9)$$

但し I : 果実に吸収される日射量 (cal/単位時間・果実当り)

R : 果実より放射する長波輻射 (")

A : 拡散によつて失われる熱量 (")

F : 果実に貯えられる熱量 (")

前述の方法で日射量 (I)、長波輻射量 (R) 及び果実に貯えられる熱量 (F) が求められるので、(9) 式より拡散によつて失われる熱量 (A) が求められる。

3. 結果及び考察

a) 果実の熱収支

前述の方法で計算した果実の熱収支の一例を第 2 表に示したが、何れも快晴無風の場合の例である。単位は果実当りのカロリーで示しており、() 内は吸収日射量 (I) を 100% としたときの相対値である。

先ず日中では、日射量 (I) の 100% に対して長波輻射 (R) で 6~12%, 拡散で大部分即ち 82~90% が失われ、残りの 3~7% が果実に貯えられる熱量となつている。すなわち日中では拡散によつて失う割合が大半を占めておることが理解される。風のある場合には更に拡散量の増大が考えられるので、果実に貯えられる熱量の減少が予想される。

夜間には果実表面温度が気温より低くなるので、拡散によつて果実は空気より受熱することになる。第 2 表に見られるように夜間には拡散によつて失われる熱量は負の数値を示している。従つて果実よりの長波輻射と果実

Tab.2 Heat balances of the fruits at various periods. (unit; cal/fruit)

The number in round bracket shows comparative value to I (absorbed short-wave radiation by the fruits)

第 2 表 果実の熱収支の一例 (単位: cal/果実当り) () 内の数字は日射量 I を 100% としたときの値

Date 観測期日	Period of experiment 観測時刻	I 吸収日射量	R 長波輻射量	A 拡散で失われる熱量	F 果実に貯えられる熱量
July 28	0732—1303 (daytime)	9858.69(100)	715.68 (7.26)	8451.91 (85.73)	691.10(7.01)
July 27	1558—1900 (evening)	2469.60(100)	276.84(11.21)	3019.06(122.25)	-826.30(-33.46)
July 27—28	1900—0440 (night)	0	768.72	-57.71	-711.01
July 28	0440—0732 (morning)	1789.64(100)	235.79(13.18)	379.35 (21.20)	1174.50(65.62)
October 5	1512—1630 (evening)	414.64(100)	100.78(24.31)	456.30(110.05)	-142.44(-34.36)
"	1630—2000 (night)	0	245.10	-117.60	-127.50
October 6	1006—1212 (daytime)	1393.80(100)	171.40(12.30)	1143.50 (82.04)	78.90(5.66)
October 9	1442—1654 (evening)	1306.5 (100)	221.20(16.93)	1213.00 (92.84)	-127.70(-9.77)
October 9—10	1712—0400 (night)	0	795.40	-345.40	-450.00
October 11	1100—1430 (daytime)	5372.70(100)	310.50 (5.78)	4882.20 (90.87)	180.00(3.35)
October 16	1000—1400 (daytime)	7402.8 (100)	662.40 (8.95)	6426.00 (86.84)	314.40(4.25)
"	1400—1530 (evening)	2021.70(100)	196.20 (9.70)	2273.10(112.44)	-447.60(-22.14)

への Austausch による受熱との差引きによつて果実は冷却することになる。曇天で風のある場合には、果実よりの有効長波輻射が減ずる一方、Austausch による果実の受熱が増大するので、果実の冷却度合の少いことが予想される。

朝には、果実に貯えられる熱量が 65%、拡散で失われる熱量が 21% を示しており、日中とは著しく様相を異にしている。これは朝には、果実表面温度が気温より遅れ目に経過するので、日出直後は依然として気温の方が高いために、果実は空気より Austausch によつて受熱する一方朝の後半には果実表面温度が気温より高い値を示すようになるので、Austausch によつて放熱を始める。従つて朝全体としては Austausch による放熱量は極めて少くなると考えられる。

夕方には、果実温は気温より遅れ目に降温するので、気温と果実温の差が大となり、拡散によつて失われる量は日射量の 90~120% にも達する程増大する。

b) 果実よりの熱伝達係数

前述の方法によつて求めた拡散によつて失われる熱量 (A) を用いて、次式より熱伝達係数 (h) を計算した。

$$A = h\{2\pi r^2(t_{f_1} - t_a) + 2\pi r^2(t_{f_2} - t_a)\} \quad (10)$$

但し t_{f_1} : 果実上半表面平均温度

t_{f_2} : 果実下半表面平均温度

h : 熱伝達係数 (cal/cm²·min. °C)

その結果を第3表に示したが、分散が多いために平均値で示した。表より見られるように、明らかに日中と夜間すなわち不安定状態の場合と安定状態の場合とでは差が認められた。しかしこの値は静穏状態（風向風速計の廻らない）におけるものであるので、Reynolds 数との関係は見出せなかつた。

さらに自然対流によつて球面から熱が放散する場合⁽⁴⁾は、境界層の厚さ δ' が

$$\delta' = 4.1 r (P_r \cdot G_r)^{-1/4} \quad (11)$$

Tab. 4 Comparison of heat transfer volume to the fruits between A and Q

A : heat transfer volume to the fruits calculated from formula(9)

Q : heat transfer volume to the fruits in the free convection calculated from formula (11) and (12)

第4表 自然対流時と静穏時における果実への受熱量の比較

A : (9) 式より計算した果実への拡散による受熱量

Q : (11) 及び (12) 式より計算した自然対流による果実への受熱量

Tim 時刻	18h45	19h45	20h45	21h45	22h45	23h45	24h45	01h45	02h45	03h45
A	0.43	0.81	0.46	0.64	0.85	0.89	0.64	0.50	0.06	1.22
Q	0.015	0.017	0.035	0.039	0.032	0.032	0.033	0.043	0.032	0.013
A/Q	29.4	48.5	13.1	16.3	26.4	27.7	19.3	11.7	1.86	94.5

Tab.3 Heat transfer coefficient from the fruits in calm condition

第3表 果実よりの熱伝達係数(静穏時における)

Division 区 分	Heat transfer coefficient 熱 伝 達 係 数
Day-time 日 中	0.144cal/cm ² ·min. °C
Transition 移 転 時	0.104
Night 夜 間	0.0086

であるとすれば、放熱量 Q は

$$Q = \frac{4\pi r^2 K}{\delta'} (\theta_0 - \theta') \left(1 + \frac{\delta'}{r}\right) \quad (12)$$

で示される。

但し r : 球の半径

P_r : Prandtl 数 $\left(\frac{\nu}{k}\right)$

G_r : Grashof 数 $\left(\frac{ag l^3 |\theta_0 - \theta'|}{\nu^2}\right)$

k : 空気の温度拡散率

ν : 空気の動粘性係数

a : 空気の体膨脹係数

g : 重力の加速度

l : 物体の代表的な長さ

θ_0 : 物体の表面温

θ' : 気温

K : 空気の熱伝導率

この (11) 及 (12) 式を用いて自然対流時の果実の受熱量 (Q) と (9) 式より求められた受熱量 (A) とを、静穏であつた 10 月 9 日 18 時 45 分乃至 10 日 3 時 45 分の例について比較して見たのが第4表である。

両者の比である A/Q は 10 乃至 30 の値を示しており、静穏といつても可成りの風速のあることが認められる。

c) 果実内の温度分布

果実の熱収支を算出するに当つては果実平均温度を用いたが、果実でも場所によつて著しく温度が異なる。これは日中は主として太陽輻射の照射の方向に原因し、夜間は輻射冷却の方向による差異に起因するものであろう。日中では直達輻射の照射する側の半球は、照射しない反対側の半球に比べると著しく高温になり、また夜間においては、地面側の半球に比べて、天空側の半球よりの有効長波輻射が盛になることが考えられるので、天空側半球の方が低温を示す訳である。第1図に10月16日10時乃至16時における例を示したが、直達輻射照射側の半球表面温度は、反対側表面に比較して、最高温度で8.7°Cも高くなっているのが認められる。これは果実の熱伝導率の少いことにも起因するものであろう。

4. 結 語

最近、凍霜害の防除対策に関連して、気温と植物体温の関係の研究が必要であることが痛感される。将来は果実温度に限らず、葉茎温、樹温にも発展して行きたいと考えている。

文 献

- (1) 中川：植物体温に関する研究（第1報），農業気象，12(3)，1957
- (2) F. Linke: Die nächtliche effektive Ausstrahlung unter verschiedenen Zenitdistanzen, Met. Zeit. 1931.
- (3) H. F. Poppendiek: Transient and steady state heat transfer in irradiated citrus fruit, Heat transfer and fluid mechanics institute, 1951.
- (4) 押田：蒸発，乾燥，河出書房，1950.
- (5) 荒井：温度計示度に及ぼす赤外輻射の影響，農業気象，10(3, 4)，1955.

Fig.1 Temperature distribution in egg plant

第1図 茄子の果実内における温度分布（10月16日10時乃至16時）

Résumé

In order to research the heat balance of the fruit, the author carried out the observations of fruit temperature (apple and egg plant), air temperature, wind velocity and solar, sky radiation from July to October in 1956.

The temperature of fruit situated near the ground were measured with copper-constantan junction at several positions of upper surface, 1.5cm depth from the upper surface, center, lower surface and 1.5cm depth from the lower surface, and recored by oscillo-graph.

The heat balance at fruit surface in unit time was showed by following formula ;

$$F = I - R - A \quad (1)$$

F : heat stored in the fruit,

I : absorbed incoming radiation from the sun,

R : outgoing flux of long wave radiation from the fruit,

A : flux of energy from the fruit surface as sensible heat,

all the above being expressed in cal/fruit.

Assuming the average fruit temperature to be t_1 and t_2 at times T_1 and T_2 , respectively, the heat stored in the fruit (F) is calculated ;

$$F(T_2 - T_1) = 4/3 \pi r^3 \times cw(t_2 - t_1) \quad (2)$$

where r and cw are radius and heat capacity of fruit, respectively.

The absorbed incoming radiation from the sun (I) is represented by ;

$$I = (1 - \alpha) (\pi r^2 \times D + 4 \pi r^2 \times S) \quad (3)$$

where D and S are solar radiation and sky radiation, respectively, and α is the albedo of the fruit surface.

The outgoing flux of long wave radiation from the fruit (R) is found ;

$$R = \frac{r+2}{r+1} \beta a^2 \pi [\sigma T_{f1}^4 - \sigma T_a^4 (a + b\sqrt{e})] \quad (4)$$

where r , β and a are vapor pressure (mmHg) near the ground, emissivity (absorptivity) of fruit and radius of fruit, respectively, and e , T_{f1} and T_a are the vapor pressure (mb) near the ground, absolute temperature of upper fruit surface and air.

The flux of energy from the fruit surface as sensible heat (A) is calculated from the formula (1).

From the formulae (1), (2) (3) and (4) the heat balance of the fruit at various periods was calculated and showed in Tab. 2.

It is recognized that proportions of heat stored in the fruit (F), flux of energy from the fruit surface as sensible heat (A) and outgoing long wave radiation (R) to radiation from the sun (I) are showed to be 3-7%, 82-90% and 6-12%, respectively, in the day time.

In the night, the fruit received the heat from the air by Austausch (A) as air temperature was higher than fruit surface temperature, and lost by the long wave radiation (R) from the surface. Then, fruit lost the heat by the amount corresponding to the difference between R and A .

The heat transfer coefficients from the fruit surface in calm condition are showed in Tab. 3, and the difference between them in stable and unstable is clearly recognized.

The temperature distribution in the fruit is showed in Fig. 1., and the large difference between upper surface temperature and lower surface temperature is recognized.

本 会 記 事 (II)

昭和 32 年度大会について

昭和 32 年度大会は 4 月 4・6 日両日にわたり、農業技術研究所講堂において開催された。4 日午後は総会及び 31 年度学会賞授与式並びに授賞者記念講演が行われ、引つづき駒込六義園内において懇親会が開かれ盛会裡に時を過した。尚大会の一行事として農業気象測器・農業物理応用製品展示会が、メーカー約 20 社の参加によって行われ、大会の研究発表に劣らず有意義であつた。

○ 研究発表 講演題目及び発表者は次の通りである (○印は講演者)

- 1 異なる土壌に生育せる水稻の生育及び胡麻葉枯病、罹病に及ぼす水温の影響
(農技研) 馬場 起, °内島善兵衛
- 2 水田気象が水稻の炭水化物の集積に及ぼす影響について (山形大学農) 羽根田栄四郎
- (追加) 山岳降水量の研究 (第 3 報) (九大農学部) 坂上 務
- 3 ペントナイト撒布による風蝕防止法
(関東東山農試) °田中貞雄, 佐野 洋, 谷沢恒夫, 柿沼 計
- 4 ネーピアグラス, グラガ混植垣の防風効果について (鹿児島農試) °川俣 稔, 築島安宏, 佐藤虎雄
- 5 穂波の研究 (5) (農技研) 井上栄一
- 6 温水地の熱効率に関する研究 (7) 温水路の熱収支について
(農技研) 三原義秋, °内島善兵衛, 中村千里
- 7 温水池の熱効率に関する研究 (8) 水面の Shearing Stress と風速との関係
(農技研) 三原義秋, °内島善兵衛, 中村千里,

大沼一己

- 8 温水池の熱効率に関する研究 (9) 温水池への熱及び水蒸気の輸送について
(農技研) 三原義秋, °内島善兵衛, 中村千里
- 大沼一己
- 9 気象要因に基いた稲作栽培技術の確立のために (杉戸農業高校) 津村友義
- 10 水稻二期作の研究 (第 1 報) 水稻苗発根の低温限界 (千葉農試) °林 政衛, 井上俊作, 橋爪 厚
- 11 水稻二期作の研究 (第 2 報) 千葉県内主要地域における水稻の早期植付限界について
(千葉農試) °林 政衛, 橋爪 厚, 井上俊作
- 12 小麦の雹害減収算定尺度について
(岡山大学農) 志茂山貞二
- 13 水稻生育期と気温の地域的特徴
(東北農試) 伊達 了
- 14 気温推移の特徴から見た東北地域の冷害年次について (東北農試) 阿部玄三
- 15 暖地水稻普通栽培における水面遮光降温試験 (I)
(九州農試) 佐藤正一, °船橋義成
- 16 出穂期における小麦及び稗麦凍霜害の被害様相
(関東東山統計指) °神前芳信, 小高真一
- 17 北海道冷害の実相とこれが対策
(帯広畜産大) 村越信夫
- 18 水稻生殖生長期の気象条件を異にすることが秋落現象の発現に及ぼす影響について (代読)
(岐阜農試) 白木 実, 大橋照次, 丹羽一郎

40 頁につづく