植物群落の夜間冷却におよぼす放射量および 風速の影響について*

斎 藤 隆 幸
(農業技術研究所, 気象科)

Effect of Net Radiation and Wind on Nocturnal Cooling of Plant Communities

Takayuki SAITO

(Div. of Meteorology, National Institute of Agricultural Sciences, Nishigahara, Kitaku, Tokyo)

1. ま え が き

同一気象条件のもとでは、植物が一面に生えている場所の最低気温は裸地面よりもはるかに低くなることはよく知られている。最近 BERLYAND²⁾ は裸地面の夜間温度降下量の時間的変化を、放射量・風速の関数として理論的に求め、それをもとにして裸地面の夜間冷却の予報に便利な図表を与えている。しかしながら植物が群落状態をなしている場合の夜間冷却の予報に関する研究は、実際問題としては裸地以上の重要性があるにもかかわらず殆どなされていない。裸地と植物群落との夜間冷却の差が大きいため、群落の夜間冷却を裸地面での予報方式より推定することは不可能である。

この研究では、広い面積に一樣に存在する植物群落の夜間温度降下量を計算によって求めてみた。夜間冷却の大きさは、同一気団のもとでは主として放射および風速の大きさによってきまるので、夜間温度降下量をそれらの関数として計算した。次に裸地面の温度降下量を矢張り放射量、風速の関数として計算した。これらの計算結果をもとにして、同一気象条件のもとでの群落と裸地との夜間冷却の大きさを比較した。

2. 植物群落の夜間温度降下量の計算

この研究の対象として考えている植物群落とは、広くて平坦な場所に麦、水稻あるいは雑草のような植物体の熱容量の余り大きくない植物が一樣に植えられている群落である。これは森林のように植物体の熱容量の大きいものは、植物体にたくわえられる熱量の変化をも計算に際して考慮しなければならず、取扱いがやっかいになるからである。従ってこれからのべようとする理論および

計算結果は森のような群落に適用することはできないものと思われる。この計算では群落として広い場所に密に（地面 1 cm^2 当りの葉面積 4.4 cm^2 ）ドリル蒔に植えられた高さ 60 cm の小麦畑を想定し、稈面上の放射量が $0.05, 0.10, 0.15\text{ cal. cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ 、稈面上 40 cm における風速が $0.5\sim 4.0\text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ のとき、その小麦畑の温度降下量が一晩でそれぞれの位になるかを求めてみる。

このような熱容量の小さな群落では日没時より数時間は温度降下の割合は大きい、日没時より $9\sim 12$ 時間経過した後においては冷却の速さは極めて緩慢である。特に日の出頃の冷却過程より昇温過程への移行する時刻においては、放射熱・潜熱・顕熱など群落に出入りする熱流はほぼ平衡にあり、植物体内の貯熱量の時間的変化は無視できる程小さいものとみなしてよい。このことは、小麦畑の観測結果をもとにして求められた熱収支の計算結果からもみとめられた。即ち、日没直後の $19\sim 22$ 時では、植被層が放射により失う熱量の約 84% が顕熱あるいは潜熱として群落の上方あるいは下方より群落内に入り、残り 16% が群落の温度降下に使われている。これに対して早朝 $4\sim 5$ 時では植物体が放射により失う熱量の僅か 4% 程度が植物体の冷却に使用されているにすぎず、残りの 96% は顕熱あるいは潜熱として外からおぎなわれていることがわかった。このことより日の出前の $1\sim 2$ 時間では植被層の熱収支を考えるのに植物体の貯熱量の時間的変化は近似的には無視することができる。このような場合には与えられた放射、風速のもとで熱的にほぼ平衡状態にある植物体の温度は、植物体の貯熱量の時間的変化を無視したその時刻の熱収支式より容易に求めることができると考えてよい。その時の植物体の温度が計算によって得られれば、それと日没時の温度との差をとり、これをもって一晩の温度降下量とみなすことができる。このような方針のもとに計算をすすめることに

* 昭和41年11月22日 関東支部例会にて発表

する。

今のべたように最低温度のおこる時の熱収支式は近似的にすべての高さにおいて次式が成立する。

$$R = G + K \frac{d}{dz} (c_p \cdot \rho \cdot \theta + L \cdot \rho_w) \quad (1)$$

(1) 式の R は考えている高さの純放射量であって、正味として放射熱は上方に向かって流れる。この上向きを正の符号とする。 R は群落の上面より上方ではすべての高さで一定とみなすにできる。(厳密には高さにより僅かながら変化しているが)。また群落の中では地面に近く程小さくなる。 G は地中より植被下の地面に向かって流れる熱量であり、上向きを正とする。 K , θ , ρ_w は考えている高さの拡散係数、気温、水蒸気密度、 c_p は空気の定圧比熱、 ρ は空気の密度、 L は水蒸気の凝結による潜熱で $600 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1}$ とする。 z は上方を正とするので、 $d\theta/dz$ または $d\rho_w/dz$ はそれが正の場合には熱および水蒸気は上方より下方へと向って流れていることを意味している。(1)より

$$\frac{d}{dz} (c_p \cdot \rho \cdot \theta + L \cdot \rho_w) = \frac{R}{K} - \frac{G}{K} \quad (2)$$

もし群落面上のある特定の高さ H における気温、水蒸気密度がそれぞれ、 θ_H , ρ_{wH} として与えられるならば H より下方の任意の高さでの $(c_p \cdot \rho \cdot \theta + L \cdot \rho_w)$ の値は (2) より次のようになる。

$$c_p \cdot \rho \cdot \theta + L \cdot \rho_w = c_p \cdot \rho \cdot \theta_H + L \cdot \rho_{wH} - \int_z^H \frac{R}{K} dz + G \int_z^H \frac{1}{K} dz \quad (3)$$

今回の計算では H を逆転層の上面の高さとする。地面付近では夜間の気温は時刻とともに変るが、逆転層の高さにおいては余り変化しないので、この高さにおける気温、水蒸気密度を基準として与え、かつその温度、水蒸気密度は一晩中日没時の値を保つものと仮定する。 H の大きさについてはあとでべる。

群落内の気温、または植物体の温度分布を (3) 式を用いて計算するためには、まずはじめに植被下の地面温度を放射量、風速の関数として求めなくてはならない。求めようとする地面温度を θ_0 とすれば、地面に接した空気の温度も θ_0 とみなしてよく、その気層内でも (3) 式は成立するので

$$c_p \cdot \rho \cdot \theta_0 + L \cdot \rho_{w0} = c_p \cdot \rho \cdot \theta_H + L \cdot \rho_{wH} - \int_0^H \frac{R}{K} dz + G \int_0^H \frac{1}{K} dz \quad (4)$$

となる。 ρ_{w0} は地面に接した空気の水蒸気密度であるが、その時刻では地面附近の水蒸気は飽和状態にあるとみなしてよいので、 ρ_{w0} は θ_0 をもってあらわすことが

できる。気温が $0 \sim 10^\circ\text{C}$ 位では気温 θ と飽和水蒸気密度 ρ'_w との間には、 $\rho'_w \approx a + b\theta$, $a = 5.1 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $b = 0.36 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ であらわされたので

$$z=0, \quad c_p \cdot \rho \cdot \theta_0 + L \cdot \rho_{w0} = (c_p \cdot \rho + L \cdot b) \theta_0 + L \cdot a \quad (4)$$

となる。従ってもし (4) 式の G を θ_0 をもってあらわすことができれば、 KR , の分布を与えて θ_0 を (4) 式より求めることができるわけである。そこで次に G と θ_0 との関係を求めてみる。

今第 1 図に示すような最高が 14 時頃、最低が 5 時頃おこる地面温度の日変化 (これはわが国の各地における地面温度の日変化の平均の状態である) を考えてみる。植

Fig. 1. Diurnal variation of the temperature on the soil surface used in the calculation.

被下の地面温度の日変化に対しても、振幅は小さいがほぼこれと同様な型の日変化がおこるものと考えことにする。この日変化に対して最低地面温度のおこる時刻における G の大きさを考えてみる。地中温度を θ' , x を地面より下方へはかった距離とすると地中での熱伝導の方程式は

$$\frac{\partial \theta'}{\partial t} = \kappa^2 \frac{\partial^2 \theta'}{\partial x^2}, \quad \kappa^2 = \frac{k}{C \cdot M} \quad (6)$$

ここに k , C , M はそれぞれ土の熱伝導率、比熱、密度で $C \cdot M$ は土の熱容量である。第 1 図の地面温度の日変化は近似的に

$$\theta'_{x=0} = A_0 + A_1 \sin(nt + \varepsilon_1) + A_2 \sin(2nt + \varepsilon_2) \quad (7)$$

であらわすことができ、地面での地温勾配は

$$\left(\frac{\partial \theta'}{\partial x} \right)_{x=0} = A_1 \left(-\frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{n}{2}} \right) \sqrt{2} \times \sin \left(nt + \varepsilon_1 + \frac{\pi}{4} \right)$$

$$+A_2\left(-\frac{1}{\kappa}\sqrt{\frac{2n}{2}}\right)\sqrt{2}\times\sin\left(2nt+\varepsilon_2+\frac{\pi}{4}\right) \quad (8)$$

となる⁶⁾。 $t=0$ は午前0時にとっている。第1図に示す日変化に対しては $\varepsilon_1=240^\circ$, $\varepsilon_2=60^\circ$, $A_2=0.38A_1$ とすればよい¹⁾。また $n=2\pi/T$ であり T は周期で24時間とする。(8)式を用いて最低温度のおこる時刻すなわち5時 ($t=0.208T$) の $x=0$ における地温勾配を求めると

$$\left(\frac{\partial\theta'}{\partial x}\right)_{x=0}=0.74A_1\frac{1}{\kappa}\sqrt{\frac{n}{2}} \quad (9)$$

となる。また第1図で示す日没時から最低地面温度のおこる時刻までの温度降下量 $\Delta\theta'_{x=0}$ と A_1 との間には

$$\Delta\theta'_{x=0}\simeq 0.95A_1$$

という関係が得られたので、これを(9)式に入れて G は

$$G=k\left(\frac{d\theta'}{dx}\right)_{x=0}=0.79k\Delta\theta'_{x=0}\left(\frac{1}{\kappa}\sqrt{\frac{n}{2}}\right) \quad (10)$$

となる。ところで第1図に示した日変化では日没は18時30分頃であるから(9)式の地温勾配は日没時より10～11時間後における温度勾配とみなすことができる。しかし日没後9時間位経過した後における地面温度の降下量は夜間の全温度降下量に比して小さいので、それ以後の地中温度勾配にも大きな変化はおこらないと考えられる。従って夜間の長さが9～12時間の範囲では最低地面温度のおこる時刻における温度勾配は近似的には夜の長さに関係なく(9)式であらわすことができるものとする。また夜間における全地面温度降下量と最低地面温度時における地中より地面に向って流れる熱流 G との間には近似的に(10)式の関係がつねに成立するものとみなすことにする。日没時の地面温度を θ'_0 とすると $\Delta\theta'_{x=0}=\theta'_0-\theta_0$ であるから

$$G=0.79k(\theta'_0-\theta_0)\left(\frac{1}{\kappa}\sqrt{\frac{n}{2}}\right) \quad (11)$$

となり、 G と θ_0 との関係が得られたわけである。(4)式に(5)および(11)を入れて θ_0 を求めるためには、 θ'_0 を与えねばならないが、今後の計算では日没時には気温高度分布は等温であり且つ地面温度と等しいと仮定して

$$\theta_H=\theta'_0 \quad (12)$$

として計算する。このような仮定は実際大して不自然でない。(5), (11), (12)を(4)に代入すると未知数は θ_0 のみとなり

$$\begin{aligned} \theta_0 = & \frac{1}{c_p \cdot \rho + b \cdot L + 0.79k\left(-\frac{1}{\kappa}\sqrt{\frac{n}{2}}\right)\int_0^H \frac{1}{K} dz} \times \\ & \left[(c_p \cdot \rho \cdot \theta_H + \rho_{wH}) - \int_0^H \frac{R}{K} dz + \right. \\ & \left. + 0.79k\left(-\frac{1}{\kappa}\sqrt{\frac{n}{2}}\right) \cdot \theta_H \int_0^H \frac{1}{K} dz - a \cdot L \right] \quad (13) \end{aligned}$$

穂面上の風速、放射量に対する K , R の分布を与えれば、それに対する θ_0 を(13)式よりきめることができる。

はじめに穂面上40cmにおける風速を色々変えたとき、それに対する群落の中および上方の K の分布を考えてみる。群落の地面修正量を d , 粗度係数を z_0 , として, $z=d+z_0$ (即ち今回の計算では $d=40$ cm, $z_0=10$ cm とするから $z=d+z_0=50$ cm となり穂面下10cmのところ)より地上5mまでの風速分布が

$$u = \frac{u_*}{0.4} \left\{ 2.3 \log \frac{z-d}{z_0} + \alpha(z-d-z_0) \right\} \quad (14)$$

であらわされるものとするとその時の拡散係数 K の分布は

$$K = 0.4 u_* (z-d) \frac{1}{1 + \alpha(z-d)}, \quad 500 \geq z \geq h \quad (15)$$

となる。(15)式により示された拡散係数が群落面 h より地上5mまで成立するものとする。 u_* は摩擦速度, α は安定度をあらわす量である。夜間地面附近では気層は非常に安定状態にあるので、熱の交換にとって非常に大切な K の値に安定度の効果を取り入れた。群落面上40cm (即ち $d+z_0$ より50cm)における風速を色々変えた場合、 K の分布がどのように変るかを求めるためには、その風速と α の関係がわかっていなければならない。ところが一般には K または α は風速や温度勾配などの関数であるから、風速のみを与えて α をきめることはできない。しかし夜間では風が弱ければ弱い程夜間冷却は大きく、気温は下方程小さくなり、気温の勾配は大きくなって安定となるから、極く大ざっぱには夜間の α の値は風速のみの関数としてあらわすことができるのではないかとおもわれる。このことを調べるために Pasqil⁷⁾ の裸地における晴夜の観測値も用いて第2図に示すように横軸に地上50cmにおける風速を、また縦軸には α の値をとってみると、点のばらつきは多少あるが地上50cmの風速と α との間に一つの関係が得られた。第2図によれば地上50cmにおける風速が4m/s以上では $\alpha=0$ としてよいが、風速が小さくなる程 α の値は大きくなり安定度の効果が大きくなる。実際の計算

Fig. 2. α in eq. (14) vs. wind speed at 50 cm above the soil surface.

では $z=d+z_0=50$ cm のところを裸地面に相当する高さと考え、そこより 50 cm 高いところ即ち $z=100$ cm (穂面上 40 cm) における風速を指定して第2図より α をきめる。次に (14) より $z=100$ cm での風速が与えられたのであるから u_* を求め、これを (15) に入れて $z=100$ cm 即ち穂面上 40 cm の風速に対する K の分布を求めた。ここで $d=40$ cm, $z_0=10$ cm とおいたのは、この計算で考えている高さ 60 cm, 葉面積指数 4.4 という麦畑に対する d, z_0 の値としてそのような値が経験的に求められたからである。以上のようにして求めた $z=100$ cm における風速に対する穂面における拡散係数の値は、風速 50, 100, 200, 400 cm/sec に対してそれぞれ 50, 126, 306, 712 cm²/sec となった。

つぎに 5 m 以上の高さでの K の分布を考えてみる。地上 10~50 m 位の間の夜間の拡散係数の分布を系統的に観測整理した例は殆どない。JEHN, and GERHARDT⁵⁾ は 1 例として 1 晩の拡散係数の高度分布の時間的変化を与えているので、それをもとにして、著者は近似的に K と z との関係をつぎのようにあらわしそれを計算に使用した。

$$K \propto z^{1/3} \quad (16)$$

(16) 式からわかるように、 K は地上 10 m 位までは高さとともに急に大きくなるが、約 40 m 以上では高さによる増加の割合は非常に小さくなり殆ど一定となる。

(16) 式のようにしたときの比例定数の値は (15) 式できめられた 5 m における K の値と (16) 式による K の

値とが等しいとしてきめることができる。

次に群落内の拡散係数の高度分布を考えてみる。今のところ群落内部の拡散係数についてもわれわれの知識は全く不十分である。ここでは考えている麦畑内での風速分布の観測値は近似的に

$$u = u_h e^{-a(h-z)}, \quad a = 0.0424 \frac{1}{\text{cm}} \quad (17)$$

であらわされたので、そこでの拡散係数も風速に比例するとして

$$K = K_h e^{-a(h-z)}, \quad h \geq z \geq 10 \quad (18)$$

となり、計算にはこれをつかう。 h は穂面の高さで 60 cm であり、 u_h, K_h はその高さの風速および拡散係数で、 K_h は (15) より得られる。

つぎに 10 cm より下方では

$$K \propto (1 - e^{-0.0132z}), \quad 10 \geq z \geq z_1 \quad (19)$$

とする、(19) 式で比例定数は $z=10$ cm では (19) 式による K の値と、(18) 式より求められた K の値とが等しいとおいてきめることができる。また地面より z_1 という高さまでは分子拡散に等しいとして

$$K = 0.24 \text{ cm}^2/\text{sec}, \quad z_1 \geq z \geq 0 \quad (20)$$

とする。 z_1 は (19) の K の値が $K=0.24$ cm²/sec となるような高さとしてきめることができる。

つぎに純放射量 R の分布についてのべる。群落内部の R の高さによる変化については、葉面積指数 4.0~4.5 程度の小麦畑では経験的に

$$R = R_h e^{-0.0384(h-z)}, \quad h \geq z \geq 0 \quad (21)$$

が得られているのでこれを使用する。 R_h は穂面における純放射量であって、穂面より上の高さでは

$$R = R_h = \text{const.} \quad z \geq h \quad (22)$$

とする。 $R_h=0.05, 0.10, 0.15$ cal·cm⁻²·min⁻¹ について計算される。

つぎに逆転層の高さ H についてのべる。すべての高さにつき一定の K をもつ大気の日没時より時間 t 後における逆転層の高さは近似的に次のようにあらわされる⁸⁾。

$$H = \sqrt{4 \cdot K \cdot t} \quad (23)$$

この式を用いて H の大きさをきめるのに、 t としてここでは 10 時間とする。(23) 式で t が 1~2 時間ちがっても H にはあまりきいてこない。夜間における熱の垂直方向の流れにえきようするものは上空よりもむしろ地面附近の拡散係数と思はれるので、(23) 式より H を出すのにここでは $z=5$ m における K の値を使用する。穂面上 40 cm の風速を 50, 100, 200, 400 cm/sec としたときそれぞれ $H=53, 102, 212, 486$ m となった。これらの値は実測値と比べて大体妥当なものと思わ

れる。また H の値が 20~40 m 位ちがったとしてもそのような上空の影響は θ_0 の値にあまりきかないことがわかった。従って H の値を求めるのに (23) 式を用いて充分である。

(9)~(13) 式の土の熱伝導率の値として $k=0.0040 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$, また $\kappa=\sqrt{k/C \cdot M}$ の $C \cdot M=0.6 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$ という値が使用された。これらの数値は土壌が十分にしめり、体積含水率30%の土壌に相当している⁴⁾。植被下の土壌含水率により植物体の最低温度がどの程度変るものであるかは計算していないが、裸地面の最低温度の土壌水分によるちがいのような大きな相違は生じないものと思われる。なお (13) 式で $c_p \cdot \rho=0.3 \times 10^{-4} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$, $\theta_H=20^\circ \text{C}$, $\rho_{wH}=9.5 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (これは相対湿度55%に相当) とした。ここで $\theta_H=20^\circ \text{C}$ と仮定したのは、もし例えば θ_H を 10°C と位とすると最低温度は 0°C 以下となることもあり、この場合には氷結による熱の効果をも考えなくてはならなくなり計算がやっかいになるからである。もしこの場合冷却の途中で気温が 0°C に達すれば其時以後は氷結がおこり、水蒸気の昇華をとめないながら気温は降下するであろう。この場合には早朝時の平衡状態における L の値として、氷結による潜熱 80 cal/g を加え 680 cal/g としなくてはならない。これは今回 $L=600 \text{ cal/g}$ とした場合よりも約10%余大きい値である。この氷結の潜熱のため、もし日没時の水蒸気濃度が同じなら1晩の気温降下量の絶対値は小さくなるはずである。しかし10%だけ小さくなるというのではない。なぜならば夜間の熱の交換におよぼす潜熱の割合は左程大きくはないからである。従ってもし日没時の水蒸気濃度が余り変らなければ途中氷結があっても氷結がないと仮定して求めた温度降下量よりも多少小さくなる程度でその差は10%以内と考えられる。しかし一方日没時の水蒸気量がこの計算で仮定されたものよりもはるかに小さい場合には氷結の有無にかかわらず、潜熱の量が小さくなりここで求めた計算値よりも、もっと大きな温度降下量を示すものと思われる。日没時の水蒸気量の大小がどの程度1晩の気温降下量に影響するものかは今回は計算していないので明らかでない。

以上のようにして (13) 式を用いて穂面 (群落面) 上の純放射量が $0.05, 0.10, 0.15 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, 穂面上 40 cm における風速が 50, 100, 200, 400 cm/sec のそれぞれにつき (13) 式より植被下の地面温度 θ_0 を求め、これと日没時の地面温度との差、即ち植被下地面温度降下量を求めこれが第3図の点線によって示されてい

Fig. 3. Temperature fall as function of wind speed at the height 40 cm above the surface of the wheat field. Full lines: temperature of the top leaf. Broken lines: soil surface temperature under the canopy. R_h is net radiation at the top level of canopy.

る。

θ_0 がわかるとそれをもとにして、植物体温の高度分布をそれぞれの風速、放射量に対して求めることが可能となる。群落内任意の高さにおける葉温を θ_L , それをとりまく空気温度を θ , 葉面での単位面積当りの水蒸気交換係数を k' (従って熱伝達係数は $c_p \cdot \rho \cdot k'$ となる) とすれば葉に与えられる単位面積当りの顕熱伝達量は葉の両面を考慮して $2c_p \cdot \rho \cdot k'(\theta - \theta_L)$, 葉面における水蒸気密度を ρ_{wL} , 葉をりまく空気中の水蒸気密度を ρ_w とすると、葉の単位面積当りの凝結による熱量は $2 \cdot L \cdot k'(\rho_w - \rho_{wL})$ となる。平衡状態においてはの空気単位体積中の葉に与えられる熱量の和は葉が放射によって失う熱量即ち dR/dz に等しくなければならない。今地面 1 cm^2 当りの $z=0$ より群落内のある高さまでの葉面積の総和を F とすると、その高さではつぎのような熱収支式が成立する。

$$\frac{dR}{dz} = \frac{dF}{dz} [c_p \cdot \rho \cdot 2k'(\theta - \theta_L) + L \cdot 2 \cdot k'(\rho_w - \rho_{wL})] \quad (24)$$

dF/dz は考えている高さにおける平均としての空間 1 cm^3 内の葉面積となる。今考えている畑では葉は高さにつき一様に分布すると考えているので dF/dz はすべての高さで一定である。実際の計算では植物の高さ 60 cm , 葉面積指数は 4.4 としたので $dF/dz=0.073(1/\text{cm})$ と

いう値を使った。葉面は飽和しているとみなしてよいから ρ_{wL} と θ_L の間には前と同様に次のような関係がある。

$$\rho_{wL} = a + b \cdot \theta_L$$

この関係 (24) 式に入れると群落内の考えている高さにおける θ_L は次のようになる。

$$\theta_L = \frac{1}{c_p \cdot \rho + L \cdot b} \times \left\{ -\frac{\frac{dR}{dz}}{\frac{dF}{dz} - 2k'} + (c_p \cdot \rho \cdot \theta + L \cdot \rho_w) - L \cdot a \right\} \quad (25)$$

(25) 式で $(c_p \cdot \rho \cdot \theta + L \cdot \rho_w)$ の値は、(3) 式において θ_0 がわかっているから G の値が求められ、従って (3) 式より群落内のすべての高さにおける $(c_p \cdot \rho \cdot \theta + L \cdot \rho_w)$ の値が求められる。 k' の値は葉のまわりの風速の関数であり、また群落内での風速は高さによりことなり (17) 式であらわされるとしたので k' の値もまた高さによりことなつた値が使用された。かこにおけるいくつかの研究⁹⁾を参照して著者は葉面 (片面) 1 cm^2 当りの k' (cm/sec) と葉のまわりの風速 u (cm/sec) との関係式としてつぎのようなものを使用することにした。

$$k' = 0.33 + 0.34 u^{0.5} \quad (26)$$

穂面上 40 cm における風速を与えると群落内の風速は (17) 式できまるので、(26) 式を用いてその時の k' の高度分布がきめられる。このようにしてもし穂面上 40 cm における放射量、風速を与えれば、それに対する θ_L の高度分布を (25) 式よりきめることができる。その θ_L と日没時の葉温 (ここではすべての高さで 20°C とした) との差をとれば、葉温の一晚の温度降下量の高度分布が得られる。第3図には計算された麦畑の上層部の葉の1晩の温度降下量が群落面上 40 cm における風速および純放射量の種々の値に対して実線によって示されている。

ここに求められた温度降下量とは日没時より10~11時間間経過した間の温度降下量と考えてよい。しかし前にのべたように日没時より9時間間経過した後における温度降下量は1晩の全温度降下量に比して極めて小さい。特に熱容量の小さい麦畑等の群落ではなおさらそのようなことがいえるので、第3図に示された温度降下量は夜間の長さのことなっても、近似的には何時の場合でも1晩の温度降下量とみなしてさしつかえないものと思われる。

第3図で風速が 1 m/sec 以下になると冷却は急に大きくなることがわかる。一般に葉温は植被下の地面温度よ

りも低く特に風が弱くなるとその差は大きくなる。計算は純放射量 $0.15 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ という値に対してなされているが、実際にはそのような大きな値になることは殆どなく、普通晴れた夜で $0.09 \sim 0.12 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 程度である。第3図から風速が 0.5 m/sec 以上では一定の風速に対して温度降下量は放射量の増加に大体比例して増加することがわかる。

Fig. 4. Calculated profiles of temperature for $R_h = 0.1 \text{ ly/min}$, θ_L : leaf temperature, θ : air temperature, A: for $0.5 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ of wind speed at 40 cm above the surface of the wheat field, B: $3.0 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$.

第4図には1例として放射量 $0.10 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ で穂面上 40 cm における風速がそれぞれ 0.5 m/sec , 3.0 m/sec のときの葉温の高度分布が示されている。 0.5 m/sec の風速の時は群落面で葉温は最低であり、上面より 20 cm 下方では葉温は急に大きくなり、地面温度と上面での葉温との差は約 9°C に達している。一方風速 3 m/sec ではその差は 0.7°C にすぎない。

葉温の高度分布がわかるとそのときの群落内の気温および水蒸気密度の高度分布を求めることが可能となる。例えば気温について考えてみると、葉のまわりより葉に与えられる顕熱量 ((27) 式左辺) は垂直方向の顕熱流の考えている高さの単位体積当りに貯えられる熱量 ((27) 式右辺) と平衡を保っていなければならないから次式が成立する。

$$\frac{dF}{dz} c_p \cdot \rho \cdot 2 \cdot k' (\theta - \theta_L) = \frac{d}{dz} \left(K \cdot c_p \cdot \rho \frac{d\theta}{dz} \right) \quad (27)$$

(27) 式において未知数は θ のみであるから、二つの境界条件を与えれば解くことができることになる。その条件として $z=0$, $\theta=\theta_0$ および $z=H$, $\theta=\theta_H$ の二つである。しかし実際には (27) 式を解析的に解くことは不

可能であるため図式計算によって、二つの条件を満足する解を求めることにした。図式計算の具体的方法についてはここでは省略する。解の一部が第4図に示されている。放射量が $0.10 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ で風速が 0.5 m/sec , 3 m/sec のときの θ の高度分布が前に求めた θ_L の分布とともに示されている。風速が 0.5 m/sec のとき気温の最低は群落の上面より $15 \sim 20 \text{ cm}$ のところにおこり、また気温と葉温との差は上面で 0.7°C 位で下方にゆく程小さい。明け方熱的に平衡に近い時刻では群落内の気温と葉温との差はおそらくここに計算されたように 1°C 以内と考えられる。一方風が強くなると気温分布は殆ど等温となり気温と葉温との差は更に小さくなる。これは上方からの暖かい空気が群落の内に非常に入りやすくなり、かつ葉面での熱伝達係数もまた大きくなるからである。

気温の場合と同様にして群落内の水蒸気密度の高度分布も計算することができる。(27)式に相当するものとして

$$\frac{dF}{dz} \cdot 2k'(\rho_w - \rho_{wL}) = \frac{d}{dz} \left(K \frac{d\rho_w}{dz} \right) \quad (28)$$

が成立する。第4図に示された気温分布に対する水蒸気密度の高度分布を計算してみると風速が 0.5 m/sec のときは群落内部では水蒸気は群落のすべての高さで飽和状態になるという結果が得られた。

3. 観測値との比較

以上の計算によって得られた結果を麦畑における夜間冷却の観測値と比較することにする。観測は日没時より明朝まで続けられたが、穂上 40 cm における風速は一晚中殆ど一定で 0.5 m/sec 程度であった。1時より5時迄の純放射量の平均値は $0.68 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 、日没時より最低温度のあらわれる時刻までの時間は10時間であり、その間の麦畑の上層部の植物体温の降下量は 9.5°C となった。一方ここで計算によって得られた第3図から穂面上の風速 0.5 m/sec , 放射量 $0.68 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ に相当する温度降下量をよみると 9.3°C となって、ここで求めた計算値と観測値とは大体よく一致している。また最低温度時の葉の温度と気温との差は観測では 0.5°C 、計算では 0.6°C (何れも群落の上層部) となり、相対湿度についても計算、観測とも 100% となり、何れも計算と観測とはよく一致した。しかし葉温または気温の高度分布についてはその形はよく似ているとはいえない。観測では群落内の気温または葉温の最低は中層部またはそれより少し低いところにあられ、群落の上面とそこの温度との差は 1.5°C 位である。しかし今回の計算では、温度最低部は群落の上面より下 15 cm 位のところにあ

われ、上面との温度差は 0.3°C 位にしかすぎない。これは計算のとき想定した麦畑では葉が密集して群落の下層部ではあまり冷えなかったことにもよるが、計算に使用した群落内の拡散係数の高度分布に安定度の効果を考えなかったことにもよると考えられる。

4. 裸地面の温度降下量

夜間草の生えている場所が裸地よりも低温となっていることはしばしば経験するところである。そこで、はじめに群落の場合と同様の方法で草の全く生えていない非常に広い裸地面の一晚の温度降下量を種々の風速、放射量、地壌水分に対して計算し、ついでそれらと群落の温度降下とを比較してみる。裸地面の夜間冷却の公式としては BRUNT の式が有名である。しかしこれは風速が 0 の場合であるから、与えられた放射量に対して可能な温度降下量の最大値を示すわけである。BERLYAND は裸地面温度の降下量の時間的変化を種々の放射量、風速に対して求めている。著者も著者自身の方法によって計算し、その結果を BRUNT, BERLYAND のものと比較した。

裸地面の温度の夜間降下量の計算には、植被下の地面温度の降下量と同じ方法をもちいた。ただし拡散係数の高度分布としては、この場合には植物はないので地面より 0.5 cm までは分子拡散係数 $0.25 \text{ cm}^2/\text{sec}$ を 0.5 cm より 5 m の高さまでは (15) 式を使用する。 5 m 以上では群降の場合と同じである。次に土壌の含水量については、群落の場合には土壌のしめり具合は植物体の冷却にそれ程大きく影響しないと思われるので、唯一種類の体積含水率 30% の土壌についてのみ計算した。しかし裸地の場合には含水量は温度降下量に大きくきいてくるので、ここでは土壌含水量 (体積) が $10, 20, 30\%$ の場合についてなされた。それぞれ大ざっぱにいうと乾燥土壌、普通のしめり、湿った土、とみなしてよいと思う。計算に用いた数値は $k=0.0024, 0.0036, 0.0040 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, $C \cdot M=0.5, 0.4, 0.6 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, $\kappa=0.078, 0.085, 0.082 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1/2}$ である。第5図には計算の結果が示されている。横軸の風速は裸地面上 50 cm の高さの風速をとってある。第5図からわかるように風の強弱による冷却の差は群落に比してはるかに小さいことがわかる。また土壌含水量のちがいが大きく影響していることもわかる。

つぎに第5図に示した値を BRUNT および BERLYAND によって求められた値と比較してみよう。例として放射量が $0.10 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 、土壌含水率 (体積) 10% 、地面上における風速が $0, 0.5, 2.0 \text{ m/sec}$ の場合について比較する。Brunt の値は風速が 0 の場合であるから、同

Fig. 5. Fall of the temperature of bare soil surface against wind speed at the height 50 cm above the surface. Broken lines: $0.05 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ of net radiation, full lines: $0.10 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$, chain lines: $0.15 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$. W_r is volume water content.

Fig. 6. Fall of temperature of the bare soil surface after sunset by various authors with net radiation $0.1 \text{ cal}/\text{cm}^2\cdot\text{min}$ and volume water content of soil 10%. 1: wind speed 2.0 m/s at 50 cm, 2: wind speed 0.5 m/s, 3: 0 m/s.

じ時間に対する可能な最大降下温度量を示すことになる。著者の求めた値は日没時より10~11時間経過した間の温度降下量とみなしてよく、何れの場合でもその時刻での BRUNT, BERLYAND による温度降下量と大体よく一致している。厳密なことを言えばここで計算された値は夜間の長さおよび地温の日変化が第1図に示された場合にのみおこりうる温度降下量なのである。しかし第5図にみられるように、ここで計算された値が他の研究者による値と殆ど差がないこと、および日没時より10時間位後においてはそれ以後の温度降下量は極めて小さいことから、夜間の長さに長短はあっても、今回求めたのは地面温度降下量は何時の場合でも、その一晚の地面温度降

下量とみなしても大した誤差をともしないといえる。

第5図に示した値は非常に広い裸地面での温度降下量であるが、今度は同一気象条件のもとで裸地と麦畑とが同時に存在した場合、両者の間で温度降下量にどの程度の差がおこるかを考えてみる。ただし麦畑、裸地とも非常に広く互に移流の影響は考えられないと仮定して温度降下を比較するものとする。1例として第7図には麦畑穂面上40 cmにおける風速がいろいろに変わった時の麦畑

Fig. 7. Comparison of the fall of temperature of the surface of the wheat canopy with that of bare soil surface under the same meteorological conditions. Wind speed is at the height 40 cm above the surface of the canopy. Net radiation $0.10 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$, full line: wheat field, broken lines: bare soil surface.

上層部の植物体およびそのときの裸地面のそれぞれの一晚の温度降下量が、放射量 $0.10 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ に対して示されている。実線は麦畑で第3図の $0.10 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ に対するものと同一のものである。点線は裸地面のもので矢張り第4図よりよみとったものである。この場合穂面上40 cmの風速に対する裸地面上50 cmの風速は、5 m以上の高さで裸地および麦畑上で風速は等しいと仮定して計算によって求め、その風速に対する地面温度降下量の値が第4図よりよみとられた。第7図によると麦畑面上40 cmにおける風速が1 m/sec以下になると麦畑の方が冷却がはるかに大きい、しかし風が強くと逆に裸地の方が低温になるという結果になる。これをたしかめる観測 data はもちあわせていないが、風が強いと上方からの暖かい空気を麦畑の上面は非常に受けやすい状態にあるためと思われる。

4. む す び

麦畑の一晚の温度降下量におよぼす放射量および風速の影響が計算により求められ、第3図にその結果が示されている。これらの計算値は観測値とよく一致した。今回の計算値が森林のような熱容量の大きい群落に適用できるかどうかはわからない。また最低温度が 0°C 以下になり氷結がおこる場合の温度降下量の計算は行っていないが、これについての検討が加えられた。

群落の夜間冷却が裸地のそれよりもどの程度大きいかわかるために裸地面の温度降下量も求められ(第5図)、他の研究者による値との比較がおこなわれた。同一気象条件のもとでは風が弱いときには麦畑の方が冷えるが、風が強くなると逆に裸地の方が低温となりうるという結果が得られた(第7図)。また裸地の場合には地中から地面への熱の補給が大きいいため、夜間冷却におよぼす風の影響は余り大きくあらわれていないが、群落の場合には地中からの熱の補給がないため、風の影響は顕著になることもわかった。

ここに求められた温度降下量は大体日没時より10~11時間経過した間の温度降下量とみなしてよいが、明け方の降下量は小さいため、季節による夜間の長さの大小にかかわらず、近似的には今回の計算値を常に一晚の温度降下量とみなしてよいものと思われる。

夜間冷却の防止という立場より今回の計算結果をながめた場合、群落では放射量を小さくすることは勿論必要であるが風速を群落面近くで 1 m/sec 以下にならないよ

うに、風通しをよくすることが必要である。一方裸地の場合には風よりもむしろ、土壤水分を大きくすることが効果的であり風速は群落の場合程、気にすることはないことがわかる。

計算に際し検討および協力をいただいた磯部誠之および堀部淑子両技官に御礼申しあげる。

引 用 文 献

- 1) 東修三 (1960): 地面温度の日変化に関する理論, 京都府立大学学術報告, **3**, 7~8.
- 2) BERLYAND, M. K. (1956): *Prediction and regulation of heat conditions in the atmospheric surface layer*. Gidrometizats. Leningrad.
- 3) BRUNT, D. (1939): *Physical and Dynamical Meteorology*. 2nd ed. Cambridge Univ. Press.
- 4) Van Wijk, W. R. (1963): *Physics of Plant Environment*. North-Holland Pub. Comp. Amsterdam.
- 5) JEHN, K. H., and J. R. GERHARDT (1950): A preliminary study of the eddy transfer of heat near the earth surface, *J. Met.* **7**, 343-346.
- 6) 小平吉男 (1933): 物理数学, II, 岩波書店
- 7) PASQUILL, F., (1949): Eddy diffusion of water vapour and heat near the ground, *Proc. Roy. Soc., A*, **198**.
- 8) SUTTON, O. G. (1953): *Micrometeorology*, New York: McGraw-Hill Book Co.
- 9) 例えば武智修・長谷場徹也(1963): 葉温に関する研究(3), 農業気象, **19**, 1.

Summary

In order to study the nocturnal cooling of plant communities, the fall of temperature of a wheat field during night was calculated for various values of net radiation and of wind speed above the surface of the wheat field, 60 cm height and with 4.4 of L A I. The results of the calculation were compared with the fall of temperature of the bare soil surface during night.

As it is observed that the thermal condition of the plant layer is approximately in equilibrium for the time just before sunrise, the vertical distribution of leaf temperature, air temperature and water vapour density within the plant layer at the time of sunrise are calculated with various values of net radiation and of wind speed at the height 40 cm above the surface of the wheat field on the assumption of equilibrium condition.

The calculated profiles of leaf temperature and air temperature for $0.10\text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ of net radiation are shown in Fig. 4 for the values of $0.5\text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ and $3.0\text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ of wind speed. It is seen from Fig. 4 that difference between the temperatures of the upper part of plant layer and of soil surface under the plant layer is about 9.0°C for $0.5\text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ of wind speed and about 0.5°C for $3.0\text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$.

The fall of temperature during night was obtained from the difference between the calculated value of temperature and the temperature at the time of sunset. The temperature at the time of sunset was assumed to be equal to that at the top of the inversion layers. The fall of leaf temperature of the upper part of the wheat field, shown in Fig. 3, is in very close agreement with observational values. As seen in Fig. 3, the temperature fall increases rapidly with decreasing the wind speed below 1 m/sec .

The fall of temperature of the bare soil surface was also calculated for the radiation values and the wind speed at the height 50 cm above the soil surface. The calculated results of the fall are in good agreement with those of BERLYAND (1956). The variation in the fall of temperature of the bare soil surface with wind speed is not so apparent as in the case of the wheat field.

By use of both calculated results of the wheat field and of the bare soil surface, comparison was made of the fall of temperature of the upper part of the wheat field and of the bare soil surface under the same meteorological conditions. From the results it can be inferred that the night minimum temperature of the upper part of the wheat field is lower than that of the bare soil surface for the condition of calm wind, but that for windy condition the reverse is the case.]

学 界 ニ ュ ー ス

1. Working Group on Agrometeorological Aspects of Micrometeorology について

WMO に属する農業気象専門部会 (CAGM) の中に最近上記のような作業グループが結成され、農業気象の最近の研究についてのレビューを作るとともに研究を進展させる途についての勧告をだすことになった。

グループの構成はつぎの通りである：

委員長 E. R. LEMON (米)
副委員長 J. L. MONTEITH (英)
委員 A. BAUMGARTNER (独), M. I. BUDYKO (ソ), 井上栄一 (日), R. O. SLATYER (豪), G. STANHILL (イスラエル)。

このグループからの報告は1969年1月1日までにCAGMの部会長に提出される予定となっている。

2. 羽生寿郎会員訪欧

羽生会員は「寒冷地畑作の気候、立地的栽培計画法に関する調査研究」というテーマで、9月にイギリスとオランダとを視察することになった。イギリスでは Rothamsted Experimental Station, Cambridge Univ., National Institute of Agricultural Engineering, Weather office を、オランダでは Wageningen Univ., Institute of Horticultural Engineering などを視察することになっている。

3. 世界の米に関する第1回 シンポジウムひらかる

日本農学会の主催する「世界の米のシンポジウム」は5カ年計画ですすめられているが、1第回のシンポジウムがつぎのような要領でひらかれることになった。

と き：昭和42年10月5 (木), 6 (金)

ところ：東京大学経済学部別館第2教室

発 表：

第1日 (5日)

1. 東南アジアの稲作概観 御子柴晴夫 (作物)
2. 東南アジアの気象概観 河村 武 (農気)
3. 東南アジアの稲作環境と品種の分布 松尾 孝嶺 (育種)

4. 東南アジアの水田の肥沃度 川口桂三郎 (土肥)
 5. 東南アジア水稻の栄養生理 田中 明 (土肥)
- 第2日 (6日)

6. 東南アジア稲作の水管理 八田 貞男 (作物)
7. 東南アジア稲作における病害とその防除法について 水上 武幸 (植病)

4. Dr. Frederick A. Brooks 逝く

Physical Microclimatology の名著でわが国にも広く知られ、また昨年の太平洋学術会議にも出席して、その微気象研究の結果をわが国に紹介した California 大学の名誉教授 Dr. Brooks は本年3月10日に永眠された。ここに皆様にお知らせして故人の冥福を祈りたいと思います。

5. IBP ニュース

1959年に IUBS (国際生物学連合) の MONTALENTI 教授によつて提案されてから、3カ年間の準備期間 (phase 1) を終了した IBP は本年7月1日から5カ年間 (1967~1971) の実施期 (phase 2) に移った。参加国は47国に及び、7部門にわかれてそれぞれ活発な研究活動を展開している。この IBP は地球上の生物資源の状態と開発とを研究する国際的な研究プログラムで、20世紀後半をかざるに足るものであり、その成功がのぞまれている。