植物群落内部の蒸散量及び拡散係数の 高度分布に対する熱収支法の適用*

斎 藤 隆 幸

(農業技術研究所 気象科)

On Estimation of Transpiration and of Eddy-Transfer Coefficient
within Plant Communities by Energy Balance Method

T. SAITŌ

(Division of Meteorology, National Institute of Agricultural Sciences)

1. ま え が き

裸地、水面又は作物の上の水蒸気及び熱の輸送量は熱収支法によつて比較的容易に求められるが¹⁾、ここではいままでの熱収支法の考え方を植物群落内部の各部分に適用することによつて、群落内部の蒸散量及び熱の輸送量、及び拡散係数の高度分布等を求めることにする。

これによつて、畑全体の蒸発散量から植物の各部毎の蒸散量又は土壌面からの蒸発量等を分離することができる。

拡散係数についてもこれまでは麦畑や水稻等の群落内部の温度の日変化やその振幅位相等を用いて固体の熱伝導に対する拡散係数をあらわす式によつて計算されてきた。しかしそこでは拡散係数が一定であるとし更に又、固体の上面又は底面では熱の出入はあつても内部では放射の吸収又は熱の発生はない等が仮定されている。しかし実際の群落内部では拡散係数は必ずしも一定ではなく、又内部の到るところで放射の吸収が行われ、放射の吸収及び渦動拡散の両作用によつて群落内部の物理的特性がきめられている。

以下群落内部に対する熱収支法の適用を、去る昭和36年5月24、25両日行われた麦畑の微気象の観測値を用いて述べてみることにする。

2. 麦畑上の熱収支について

麦畑の内部の拡散係数等を求める前に麦畑の上に於ける熱収支について考えることにしよう。

(i) 観測について：観測は昭和36年5月24・25両日埼玉県北本町の農業技術研究所生理遺伝部のかなり広い麦畑に於て行われた。麦の植え方は所謂ドリル播と言われるものであつて畑一面に様に植えられてあるから、畑の内部に於ける放射の吸収量気温湿度等の物理的特性が、スジ播の植え方のように株内と畦間とで異なるというような水平方向の違いを考える必要がないので好都合であつた。1m² 当り 21 株が植えられ穂の高さは

80~85 cm であつて、葉や茎は青々としており成熟までにはまだ間があるように思われた。

24 日は曇天で時々小雨があつて放射の観測等は時々中断されねばならなかつたが、25 日は雲量は 5~7 程度で日射は時々かなり強くなり、従つて解析には 25 日の data のみ使用することにした。25 日の 1.5 m 高さの平均風速は約 1.7 m/s であつた。観測は 30 分毎に 10 分間行われ気温湿度風速の約 3 m の高さまでの垂直分布及び正味放射量の 10 分間の平均値が得られた。使用した測器及測定要領はすでに物理第二研究室で何回となく野外観測に使用されたものと全く同一なのでここでは省略することにした²⁾。唯従来と異なるのは地温の観測が追加されたことである。熱電対を用いて地面より深さ 40 cm までの 7 ケ所の深さの温度が 30 分毎に測定され、それよりすでに多くの人々が行つていて全く同様の方法³⁾によつて地中へ伝達する熱量が計算された。その畑の土壌の熱容量の平均値として 0.459 cal/cm³°C なる値が実験により求められた。又株間で時々日射の観測が行われたがそれについてはあとで述べることにする。

(ii) 熱収支法による畑上での輸送量及び拡散係数の計算：麦畑の上で測定された正味の放射量(短波と長波)を R_1 、乱流により上方へ伝達される熱量を F_1 、上方への水蒸気輸送量を E_1 、地中に伝達された熱量を G 、作物層の温度上昇に使用された熱量を $M \cdot C \cdot d\theta/dt$ ($M \cdot C$ は作物層の熱容量)、作物層の水蒸気量の増加のために使用された熱量を $L \cdot dX/dt$ (L ：蒸発に伴う潜熱、 X ：絶対湿度)、同化に伴う熱量を $\lambda \cdot p$ 、移流による熱輸送量を A とすれば(第1図参照)

$$R_1 = F_1 + LE_1 + G + M \cdot C \cdot \frac{d\theta}{dt} + L \cdot \frac{dX}{dt} + \lambda \cdot P + A$$

が成立する。但し

$$R_1 = R_1 \downarrow - R_1 \uparrow$$

しかしここでは移流による項 A は無視し、又 $\lambda \cdot P$ も小さいから考えないことにする。更に又 $(M \cdot C \cdot d\theta/dt + L \cdot dX/dt)$ も実際計算してみると前の三項の和に比して極

* 昭和36年11月14日 風のシンポジウムにおいて発表

Fig. 1.

めて小さく1% 或はそれ以下であるので考えないことにする。従つて上式は次のようになる。

$$R_1 = F_1 + lE_1 + G \quad (1)$$

$$\therefore F_1 + lE_1 = R_1 - G \quad (2)$$

となり、 R_1 及び G の値は観測より求められる。ところで F_1 及び $l \cdot E_1$ の値を求めるのに拡散係数を F_1 及び E_1 につき同一としそれを K_1 とすれば

$$F_1 = C_p \cdot \rho \cdot K_1 \cdot \frac{d\theta}{dz} \quad (3)$$

$$l \cdot E_1 = l \cdot K_1 \cdot \frac{d\chi}{dz} \quad (3')$$

(但し χ は絶対湿度をあらわしもし比湿 q を以てあらわすと $l\rho K \frac{dq}{dz}$ となる) となり、任意の高さの $\frac{d\theta}{dz}$, $\frac{d\chi}{dz}$ は観測値より得られるので (2)(3)(3') よりその高さの K_1 を求めることが出来、従つて (3)(3') より F_1 , $l \cdot E_1$ を求めることができる。同じ考え方ではあるがもし温度勾配が余り急でない場合には、2点間の温度差 $\Delta\theta$ 及び湿度差 $\Delta\chi$ より Bowen ratio β

$$\beta = \frac{F_1}{lE_1} = \frac{C_p \rho}{l} \frac{\Delta T}{\Delta \chi} = 0.49 \frac{\Delta T}{\Delta \chi}$$

(但し χ : g/m³, ΔT : °C)

を求め

$$F_1 = \frac{\beta}{1+\beta} (R_1 - G)$$

$$lE_1 = \frac{1}{1+\beta} (R_1 - G)$$

より F_1 , $l \cdot E_1$ を求めてもよい。(このような方法が熱収支法と呼ばれるものである。) ここでは後者の方法で F_1 , lE_1 を求めた。 β の値は2点の高さを穂面上20 cm, 50 cm にえらんで、その平均値は0.25 となつた。第2図にその計算値が示されている。

次に種々の高度の K を求めるのに、例えば (3) より

F_1 がわかり各高さの $d\theta/dz$ が分るとその高さでの K を求めることが出来る。それらは第7図に示されている。

又このようにして求めた K の値がどの程度迄信頼のおけるものであるかどうかを知るために、他の人々によつて求められた値と比較してみることにする。

SWINBANK 等⁴⁾ は第3図に示すように横軸にリチャードソン数 R_i を縦軸に $\frac{K}{(z)^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)}$ なる $\bar{K}$ (夫々高さ

1.50 m に於ける値) をとつて示しているの、ここでもそれに相当する値を求めて同じ図に記入してみた。(我々の場合高さとしては地面修正量 (Zero plane displacement) d より 150 cm 高い場所に於ける値を求めた)。第3図から明らかなように、ここで求めた値は大体従来の人々によつて得られた値の附近にちらばつてゐることから、我々の計算によつて得られた F_1 , lE_1 及び穂面より上の K 値は大体合理的なものであるように思われる。

Fig. 3.

3. 麦畑の内部に於ける蒸散量及び拡散係数の高度分布

(i) 計算方法: 第1図に示すように麦畑を仮に3つの層に分け、それぞれの層からの蒸散量及び2, 3なる高度での拡散係数を求めることにする。高さ1, 2, 3に於ける下向き及び上向きの放射 (長波及び短波を含む)

Fig. 2. Energy balance over wheat field.

の flux をそれぞれ $R_{1\downarrow}$, $R_{1\uparrow}$, $R_{2\downarrow}$, $R_{2\uparrow}$, $R_{3\downarrow}$, $R_{3\uparrow}$ とすれば、各層の植物体による純放射吸収量 R_{12} , R_{23} はそれぞれ次のようになる。

$$\begin{aligned} R_{12} &= (R_{1\downarrow} - R_{1\uparrow}) - (R_{2\downarrow} - R_{2\uparrow}) \\ R_{23} &= (R_{2\downarrow} - R_{2\uparrow}) - (R_{3\downarrow} - R_{3\uparrow}) \end{aligned} \quad (4)$$

R_{12} , R_{23} は一応測定可能な量とみなして議論を進めることにする。

今はじめに一番上の層について熱収支を考えてみることにする。今2なる高さに於ける水蒸気及び熱輸送量を夫々 E_2 , F_2 とすればこの層による蒸散量は $(E_1 - E_2)$ であり、又この層からの拡散による熱輸送量は $(F_1 - F_2)$ 、又この層の温度上昇を $d\theta/dt$ 、水蒸気の増加を dX/dt とすると (X : 絶対湿度)

$$R_{12} = l(E_1 - E_2) + (F_1 - F_2) + mc \frac{d\theta}{dt} + l \frac{dX}{dt} \quad (5)$$

前と同様上式の第3, 4項の和は第1, 2の項の和に比して極めて小さく前者の1%にも満たないので省略すると(5)は

$$\begin{aligned} R_{12} &= (lE_1 + F_1) - (lE_2 + F_2) = (lE_1 + F_1) \\ &\quad - K_2 \left\{ l \cdot \left(\frac{dX}{dz} \right)_2 + C_p \cdot \rho \cdot \left(\frac{d\theta}{dz} \right)_2 \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

のようになる。但し K_2 は2なる高さに於ける拡散係数であり、又 R_{12} は測定され、且つ $(lE_1 + F_1)$ は(2)の $(R_1 - G)$ と同一のものであり、従つて $(lE_2 + F_2)$ の値を知ることが出来るが、その値より lE_2 , F_2 を分けることは(2)で F_1 , lE_1 を別々に求めたと全く同様にして求めることが出来る。唯前の節では2点の温度差及び絶対湿度差より β を求めて F_1 , lE_1 を求めたが、考えている層の厚さがそれ程大きくもなく温度及び湿度の勾配の高さによる変り方が大きいので、ここでは2なる高度での dX/dz , $d\theta/dz$ をグラフ上より求め、それを用いて(6)によつて K_2 を求め又 E_2 , F_2 もそれぞれ $K_2(dX/dz)_2$, $K_2 C_p \rho (d\theta/dz)_2$ より求めることにした。

$l(E_1 - E_2)$ 及び $(F_1 - F_2)$ を求めれば、これらが夫々 R_{12} のうちこの層からの蒸散及び渦動拡散によつて失われる熱量となる。更に又この層からの蒸散量は $(E_1 - E_2)$ として計算することもできる。

全く同様にして中間の層からの蒸散量や3の高度における拡散係数を求めることも出来る。こうして各層からの蒸散量が分れば全蒸発散量より蒸散量のみ分離することも可能となつてくる。

(ii) 計算結果：(6)より K_2 を求めるためには群落内部の温度分布や湿度分布がかなり詳しく測定されねばならない。今回の測定は麦畑上で温度、湿度を測定するのに使用したと同種の通風型温湿度計を麦畑内部の50 cmの高さにおいて測定し、これと畑の上の温度分布、

湿度分布、地表面温度及び非通風の熱電対による層内の温度測定等を考慮して適当にきめた。

しかし果してそれが真の温度分布をあらわしているかどうかは疑問ではあるが一応それを用いて(6)によつて計算することにした。

今回の観測でもう一つの不備な点は各層が正味として吸収した放射量(長波及び短波を含めた)を求めることにあつた。麦畑の内部のようなせまい部分の群落内の色々の高度に於ける Net flux を測定するにふさわしい放射計は現在のところ手元にはないので、従つて各層の吸収量 R_{12} , R_{23} ……を充分正しく知ることはむずかしい。ここでは次に述べるような群落内の日射量の減衰をもとにして近似的に(6)の R_{12} , R_{23} の値を推定によつて求めその値を使用することにした。

Fig. 4. Relative intensity of solar radiation within wheat crops

1: down ward, 2: upward

第4図は24, 25の両日適当な時刻をえらんで何回か群落内部の日射量を測定した結果である。横軸は麦畑の表面より下方へ(群落内へ)測つた距離であつて、表面より40 cm及び75 cmのところに日射計をおき、上からの下向き日射量及び下方からの上向き日射量(反射光)が測定された。縦軸は日射量の相対値が示され、麦畑の上での上方からの下向きの日射量の大きさを1とした場合の各高さでの下向き日射量の相対値がグラフの上方にplotされ、各高さでの上向き日射量の測定値(相対値)がグラフの下方にplotされている。二つの曲線はそれぞれの平均値を示すものであつて、例えば表面では入射量は1.0反射量は約0.15従つて表面での日射の

Net flux の相対値は 0.85 となる。又第 1 図に示された高さ 2 及び 3 での日射の Net flux の相対値はそれぞれグラフより $0.70 - 0.09 = 0.61$, $0.41 - 0.05 = 0.36$ となるから、第 1 図の一番上の層の日射の吸収量の相対値は 0.24, 第 2 の層の正味の吸収量は 0.25 となる。畑の上の日射の Net flux, 第 1 の層及び第 2 層の日射の吸収量の値の比は $0.85 : 0.24 : 0.25 = 1 : 0.28 : 0.29$ となる。又一番下の層の吸収量は同様に 0.20 を得た。測定値が非常にばらついているのは日射計を 1 個しか使用しなかつたために、1 回の測定に時間がかかりその間に雲等のために日射量が相当に変化したためである。従つて観測の回数をできるだけ多くしてその平均値を使うよりはかない。とに角日射量に関する限り畑の上の日射の Net flux が分ると、極く大ざつぱではあつても各層の正味の日射吸収量を前述の比率を用いて求めることはできるわけである。(勿論雲の分布、太陽高度等によつて減衰の割合もことなるであろうから、このような方法ではその時の吸収量は正確には出すことは出来ないわけである)。

一方植物は日射と同時に長波放射の吸収(正しくは放熱)が行われる。日射は植物をあたためるのに対して長波は日中に於てさえも冷却として作用する。長波の Net flux が群落の各層でどのように減衰するかもよく分らない。しかし長波の放熱による冷却の作用はおそらく群落の上層部のみで内部ではその作用は殆んどなくなり、そこでは日射のみ考えればよいのではないかと想像される。長波の Net flux の減衰は日射の減衰よりも急激ではあろうかどの程度のものかよく分らないので、ここでは一応長波の減衰する割合を日射の減衰と同じと考え、各時刻に於ける麦畑上の Net flux (長波及び日射を含めた)の測定値より各時刻毎の各層の吸収量を今述べた方法によつて算出することにした。25 日は雲があり日射の平均の Net flux は $0.98 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ に比して、長波の平均の Net flux は $-0.03 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ 程度に小さい

Fig. 5. Energy balance of plant cover layer.
($F_1 - F_2$): sensible heat flux, R_{12} : absorbed radiation,
($E_1 - E_2$): transpiration from the plant layer.

ことから、このような場合には上のように長波の減衰が日射の減衰と同じであると仮定して各層の吸収量を求めても、実際の長波の減衰を用いて計算された吸収量とそれ程大きな大差はないものと考えてもよいと思う。こうして(6)の R_{12} , R_{23} をきめた。

第 5 図 A には一番上の層に対する熱収支の計算結果即ち輻射吸収量 R_{12} , この

層からの蒸散に費やされた熱量 $l(E_1 - E_2)$ 及び拡散により流出された熱量 $(F_1 - F_2)$ が示されている。第 5 図 B には同様に第二の層の熱収支量が示されている。

Fig. 6. E_1 : water vapor flux over the field. ($E_1 - E_2$): transpiration from upper layer, ($E_2 - E_3$): from the middle layer.

Fig. 7. Estimated value of K, L : Crops surface level.
1: 10 h 30 m, 2: 11 h 00 m, 3: 11 h 30 m,
4: 12 h 00 m, 5: 12 h 30 m, 6: 13 h 00 m

第 6 図には畑の上での全蒸散量 E_1 , 第 1 の層からの蒸散量 $(E_1 - E_2)$ 及び第 2 の層からの蒸散量 $(E_2 - E_3)$ の値が示されている。2 つの層からの蒸散量の和は全蒸散量の約 $2/3$ になっている。

又第 7 図には各時刻の拡散係数の高度分布が示されている。

第 6 図及び第 7 図での蒸散量や拡散係数等の大きさは必ずしも信頼のおけるものとは言えないかもしれぬ。例えば拡散係数についても群落の内部に入ると急激に小さくなるものと想像していたが、第 7 図によると徐々に減衰している。これは

群落の各層の放射吸収量を正しく測定することが出来なかつたことや、そこでの温度分布や湿度分布の測定も不十分であつたことによるのかも知れぬ。今後はこれらの測定値も出来るだけ正しいものにしたいと思つている。

4. む す び

植物群落をいくつかの層に分け、各層の熱収支を考えることによつてその層からの蒸散量及び拡散によつてうばわれた熱量を求め、更に群落内部の拡散係数を求める方法について述べてきた。また一例として麦畑の内部の蒸散量及び拡散係数の高度分布を計算してみた。しかしながらこのような方法を使用する場合には、群落の各層での植物の繁茂する状態特に放射の吸収及び蒸散にあずかる葉が水平的に略一様にしかかなり広い面積に密に分布していることが必要である。もし葉の並び方にある程度以上の粗密がある場合には粗の場所と密の場所とでは拡散係数の大きさは異なるであろうし、また(6)式を用いて拡散係数を求める場合に、たとえ (dX/dz) 及び $(d\theta/dz)$ の値として多くの場所で測定されたものの平均値を用いたとしても、求められた K の値がどの場所に相当する K の値であるかどうかは明かではなく、またそれがその層の平均の値を与えてくれるものかどうかとも疑問である。このことは例えば(6)の F_2 は K_2 および $(d\theta/dz)_2$ が場所によつて異なる場合、各場所を示すindexを i として $F_2 = \frac{1}{n} \sum_i K_{2i} \left(\frac{d\theta}{dz} \right)_{2i}$ を以て示し得ることからも明かである。従つて上に述べたような方法で群落内部の拡散係数を求める場合には植物体が広い面

積に一樣にしかなるべく密に分布しているような群落(例えば前の計算例に用いたドリル播の麦畑とか桑畑や竹やぶ)に通用すべきであろう。そしてこのような場合にはこの方法によつて求めた拡散係数は近似的には略正しい平均値を与えてくれるものと考えられる。また(6)の式の左辺の値としてできるだけ多くの場所の観測値の平均値を用いるべきであることは言うまでもない。

この方法を用いる場合には群落内部の純放射量の高度分布を十分に正しく測定する必要がある、今後はこの目的になつた純放射計の研究が是非とも必要であろう。

計算に使用した資料は農技研生理第2科の麦畑に於ける微気象観測によるものであつて、いろいろと御便宜を与えられた生理第2科の小田室長をはじめ同研究室の皆様厚く御礼申上げる。観測は農技研気象科の井上栄一、中川行夫、磯部誠之、堀部淑子及び東大大学院の竹田厚の諸氏及び著者の協同によるものである。更にまた計算にあつては谷信輝、中川行夫、内島善兵衛の諸氏にいろいろ数えていただいた。ここにこれらの方々に深く謝意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 中川行夫：砂丘地の微気象特性 農業気象 15(3) p. 97.
- 2) 谷信輝・井上栄一・磯部誠之・堀部淑子：(1961年) 1959年鴻巣観測について 農業気象 16(4) 159~163.
- 3) 農業気象ハンドブック (1961) p. 70.
- 4) PRIESTLEY, C.H.B.: (1959) Turbulent Transfer in the Lower Atmosphere p. 31.

Summary

The vertical distribution of transpiration and of the eddy transfer coefficient within the plant communities can be estimated through the principle of energy balance. Now, we suppose that the plant communities are formed of some layers, as shown in Fig. 1. Energy balance of the upper layer is represented by the equation

$$R_{12} = l \cdot (E_1 - E_2) + (F_1 - F_2) + M \cdot C \cdot \frac{d\theta}{dt} + l \cdot \frac{dX}{dt} \simeq (l \cdot E_1 + F_1) - (l \cdot E_2 + F_2) \\ = (l \cdot E_1 + F_1) - K_2 \left\{ l \cdot \left(\frac{dX}{dz} \right)_2 + C_p \cdot \rho \cdot \left(\frac{d\theta}{dz} \right)_2 \right\}$$

where R_{12} is radiation absorbed by the layer, which is measurable, and l is latent heat of evaporation, E_1 watervapor flux at the surface level, 1, F_1 sensible heat flux at the surface level, K_2 eddy transfer coefficient at the level, 2, $(dX/dz)_2$ gradient of absolute humidity at the level, 2, $(d\theta/dz)_2$ gradient of temperature at the level, 2. Then, from the equation, K_2 is computed by uses of observed $(dX/dz)_2$ and $(d\theta/dz)_2$ and $l \cdot E_1$ and F_1 , which is estimated by energy balance method. The transpiration from the layer, $(E_1 - E_2)$, are estimated.

If R_{23} , radiation absorbed by the middle layer, $(dX/dz)_3$ and $(d\theta/dz)_3$ are used, then, K_3 , E_3 and F_3 are calculated in the same manner as above. So the transpiration from the layer, $(E_2 - E_3)$, are also estimated.

The calculated values of the transpiration and of the eddy transfer coefficient are shown in Fig. 6 and 7, using the data obtained from the micrometeorological obserbation in and above the wheat field on May 25, 1961. Owing to insufficiency of the measurement of temperature profile and radiation within the plant layers, the plotted points are scattered, as seen from these figures. However, energy balance approach will be available for estimation of the vertical distribution of the transpiration and of the eddy transfer coefficient within the plant communities like crops or woods.