穂 波 の 研 究

(5) 穂波上のエネルギー収支*

井 上 栄 一

(農業技術研究所 気象科)

Studies of the Phenomena of Waving Plants ("HONAMI")

Caused by Wind

Part 5. Energy Budget over Fields of Waving Plants

E. INOUE

(Division of Meteorology, National Institute of Agricultural Sciences)

1. ま え が き

作物の穂波の上で起る風の中の温度、湿度、炭酸ガス濃度などの勾配が作物と風との間に行われている熱量、水蒸気、炭酸ガスなどの輸送現象に関係していることが前報にのべられた。この現象には同時にエネルギーの出入の問題がともなっている。例えば水蒸気の輸送現象には作物からの蒸散、水面からの蒸発の際に必要な熱エネルギーの消費が、また炭酸ガスの輸送を生ずる作物の同化作用には太陽エネルギーの吸収が起つている。

このようなエネルギー収支の問題は、太陽エネルギーと作物収量との結びつきを考える上に是非ともとりあげられなければならないものであつて、このエネルギー収支を最も経済的にまた合理的に実現させる方法を見出すことが私達に課せられた最も重大な使命の一つであろうと著者は思っている。

作物が全く存在しないか、あるいはその存在が殆ど無視出来るような裸地面や温水池面などで太陽から受けるエネルギーの収支を考察することはすでに多くの人々によつて行われているが(例えば 三原その他 1955, 熊井・千葉 1952), 作物が十分に繁茂している場合についてはあまり多くは研究がなされていないようである。裸地の場合とは異つて作物の繁茂している場合には、作物群落とその畦間気流の存在とが問題をかなり複雑にしている、そこにおけるエネルギー収支を考えるためには当然作物の生理生態や畦間気流の特性についても十分な知識が必要とされる。残念なことにこの問題は気象学と作物学との境界にとり残されたままになつていようである。

最近 Baumgartner (1956)は森林地帯を対象にしてその熱収支や水分収支をくわしく調べているが、その研究の手段や方法にはまことに学ぶべき点が多い。著者も遠からず水田地帯のエネルギー収支についてくわしい研究を行いたいと思つているが、本報では初歩的に穂波上の

エネルギー収支の一部分を取り上げることにした。ここに使用した測定例はすでに発表されたものであるが(井上 1957, 井上その他 1958), 前報における計算に一部不注意な誤りを犯しているのでここにお詫びかたがた訂正したいと思う。

2. 稲田上のエネルギー収支

稲田にふりそそぐ太陽エネルギーの内一部分は群落を温めてそれから風に奪われ、一部は稲田からの蒸発散に使われ、また一部分は稲の同化作用に使われる。この目に見えないエネルギーのやりとりが稲田の上の気温、湿度、CO₂濃度の高度分布となつてあらわれ、また各種の物理量の輸送現象を伴う。前報ではこの輸送現象だけが主としてとりあつたが、ここでは輸送現象に伴われるエネルギー収支が問題にされる。

昭和31年9月18日午後に着者等は稲田上の炭素同化作用の空気力学的測定をはじめて行つた(井上 1957)。その時に得られた CO₂量および水蒸気量の輸送量は第1表**の通りであり、これらの輸送量が同化量(または呼吸量)と蒸発散量を表わすものと考えられた。

作物が同化作用を行うに必要なとする太陽エネルギーについて Baumgartner (1956)は

という関係を与えているので、ここでもこれを採用すれば 1g の CO₂ を同化するに要するエネルギーは 2,500 cal になる。なお呼吸作用については上と同様な関係で放出された熱量が全部周囲の熱収支に寄与すると考えられている (Monteith 1957)。そこで輸送される CO₂ 量 P に

** 表中 Run no. 6 の数値の一部は前報(井上 1958)の第2表中のものと相違しているが、これは前報の解析の際に誤りを犯したためである。従つて前報の数値もこの数値の通り訂正されなければならない。また前報で Run no. 6 で一株当たり 10 分間に 23.5mg という大きすぎる呼吸量を与えた結果は 10.9mg という値に訂正されなければならない。

* 1957 年 12 月 6 日、関東支部例会において発表

2, 500 cal/g を乗じて同化あるいは呼吸作用に伴うエネルギー量 ϵ_p を計算して第1表中に示した。ここに

$$\epsilon_p = 0.25 \times 10^4 P \text{ cal/cm}^2 \text{ sec} \quad (2)$$

である。Run 2 について云つてもこれは $0.37 \text{ cal/cm}^2 \text{ hr}$ に相当するだけで、たしかに大きな量であるとは云えない。

一方蒸発散量 λ に必要とされる熱エネルギーは周知の潜熱 600 cal/g を使つて

Table 1. Turbulent fluxes of heat, vapor and CO_2 over a paddy field at Konosu Experimental Farm

Run no.	2	5	6
Time (Sept. 18, 1956)	1518 ~1528	1634 ~1644	1725 ~1735
U (200) (cm/sec)	150	95	110
U (130) (cm/sec)	120	75	85
C (200) (mg/l)	0.479	0.471	0.487
C (130) (mg/l)	0.474	0.469	0.492
E (200) (g/m ³)	16.23	16.95	16.64
E (130) (g/m ³)	16.54	17.28	16.65
Θ (200) (°C)	24.1	23.1	21.4
Θ (130) (°C)	24.1	22.8	20.7
CO_2 Flux $P \times 10^8$ (g/cm ² sec)	-4.02	-1.07	3.36
H_2O Flux $\lambda \times 10^6$ (g/cm ² sec)	2.50	1.77	0.07
Sensible Heat Flux $\epsilon_\theta \times 10^4$ (cal/cm ² sec)	0	-4.82	-14.1
Latent Heat Flux $\epsilon_\lambda \times 10^4$ (cal/cm ² sec)	15.0	10.6	0.42
Heat Flux of Assimilation $\epsilon_p \times 10^4$ (cal/cm ² sec)	1.02	0.45	-0.83

$$\epsilon_\lambda = 600 \lambda \text{ cal/cm}^2 \text{ sec} \quad (3)$$

で与えられ、これも第1表に示されている。蒸発散量は作物よりの蒸散量 T と水田面よりの蒸発量 V との和として考えられるが、前報の空気力学的方法では両者を分離して測定することは困難である。金関 (1956) は8月下旬の稲田で両者を分離する試みを行つてよい結果を得ている。それによれば大雑把にみて

$$T/V \approx 2, \quad (4)$$

即ち蒸発散量のほぼ (2/3) が蒸散量に相当するものとみなされるようである。従つて蒸散だけに要する熱エネルギー ϵ_T としては

$$\epsilon_T = \frac{2}{3} \epsilon_\lambda = 400 \lambda \text{ cal/cm}^2 \text{ sec} \quad (5)$$

という関係が得られる。これを Run 2 にあてはめてみれば蒸散に要する熱エネルギーは $3.6 \text{ cal/cm}^2 \text{ hr}$ となり同化作用に要するエネルギーの約 10 倍に相当する。一方 Run 6 では呼吸によつて放出される熱エネルギー量が蒸散に要するもののほぼ 3 倍に相当している。

これまで地表面における熱収支を問題にする場合、同化あるいは呼吸作用に伴う熱エネルギーは無視されるのが普通であつた (Sutton 1953)。また稲田についても稲の成長の全期間についての平均としては供給される太陽エネルギーのほぼ 1 % 程度が稲の体内有機物として貯えられるに過ぎないと云われる (福富 1951)。しかし輸送量やそれに伴うエネルギー量の比率はその平均化時間によつて可成り変動するものであつて、ここに示したように数十分間における現象では同化あるいは呼吸作用に伴う熱エネルギーが他の項にくらべて決して無視することの出来ない場合のあることを著者は強調したい。最近 Monteith (1957) も植物の密生している草原における夜

Table 2. Turbulent fluxes of heat, vapor and CO_2 over a wheat field at Konosu Experimental Farm

Run no.	1	4	5	6	7	8	9	11	13	15	17
Time	1342 ~1407 May 21, 1957	1458 ~1519	1612 ~1635	1951 ~2021	2140 ~2156	0517 ~0533 May 22	0903 ~0922	1026 ~1041	1145 ~1200	1306 ~1320	1419 ~1443
CO_2 Flux $P \times 10^8$ (g/cm ² sec)	-0.77	-1.72	-2.24	4.40	2.20	-2.52	-2.42	-2.80	-6.45	-3.64	-5.18
H_2O Flux $\lambda \times 10^6$ (g/cm ² sec)	5.54	4.51	2.72	0.78	0.54	-1.26	1.50	4.40	4.56	3.42	4.29
Sensible Heat Flux $\epsilon_\theta \times 10^4$ (cal/cm ² sec)	9.24	-3.22	-12.8	-9.36	-6.17	-2.27	9.45	12.5	5.29	0.42	-0.89
Latent Heat Flux $\epsilon_\lambda \times 10^4$ (cal/cm ² sec)	33.3	27.1	16.3	4.68	3.24	-7.57	9.00	26.4	37.4	20.6	25.7
Heat Flux of Assimilation $\epsilon_p \times 10^4$ (cal/cm ² sec)	0.20	0.42	0.57	-1.12	-0.56	0.64	0.61	0.71	1.63	0.92	1.31

間の熱収支には植物の呼吸作用によつて放出される熱エネルギーが重要な寄与をする可能性のあることを指摘している。

3. 麦畑上のエネルギー収支

昭和32年5月13日午後より14日午後にかけて埼玉県鴻巣の小麦の試験圃場でも炭素同化作用の空気力学的測定が行われた(井上その他 1958)。この時にも CO_2 、水分の各輸送量が計算されているが、前節と同様にエネルギー量に換算した結果を第2表に示した。この場合にも同化あるいは呼吸作用に伴う熱エネルギーは放熱や蒸発散の熱エネルギーにくらべて一般に小さいとは云えるけれども、全く無視出来るほどの大きさでもない場合のあることが判る。

麦畑における蒸発散量を蒸発量と蒸散量とに分離する試みはまだ全く行われていないようである。しかし陸稲畑についての評価では蒸散量と畦間土壌面よりの蒸発量の比がやはり 2:1 位になつていように見える(長谷川1957)。

4. 結 び

圃場におけるエネルギー収支に関する研究にとりかかるための最初の段階として、著者は生育期における稲田

および麦畑における同化ならびに呼吸作用がエネルギー収支にどの程度の寄与をしているかを実測によつて検討してみた。その結果、他の放熱や蒸発散にもとづく項にくらべて一般には確かに小さいけれども場合によつてはこの項が到底無視出来ない大きさを持つことが判つた。

エネルギー収支に寄与する項としては作物群落に貯えられる熱量その他が存在するが、これについての研究は目下行われており近く発表されるであろう。

引用文献

Baumgartner, A.	1956: Ber. dtsh. Wetterd., 5, no. 28, 53p.
福富斌夫	1951: 農業気象, 6, 143.
長谷川新一	1957: 「畑地灌漑の総合研究」 第3章.
井上栄一	1957: 農業気象, 12, 138.
井上その他	1958: 農業気象, 13, 121.
金関四郎	1956: 農業気象, 12, 30.
熊井・千葉	1952: 農業物理研究, 2, 81.
三原その他	1955: 農研報告, A 4, 45.
Monteith, J. L.	1957: Quart. J. Roy. Met. Soc., 83, 322.
Sutton, O. G.	1953: Micrometeorology, McGraw Hill.

Summary

Taking the following relation of plant assimilation into account the contributions of three terms of heat convection, evapotranspiration and assimilation to the energy budget over a paddy and a wheat field have been dealt with respectively:

The fluxes of heat, vapor and carbon dioxide are measured aerodynamically under natural conditions and corresponding terms of energy budget are computed and compared with each other. It has been shown that the contribution of assimilation term to the energy budget is sometimes fairly significant, although almost usually it is much smaller than other two terms.