苗代における炭素同化作用の空気力学的測定*

井上栄一・谷 信輝・今井和彦・磯部誠之

(農業技術研究所 気象科)

The Aerodynamic Measurement of Photosynthesis over
a Nursery of Rice Plants

E. INOUE, N. TANI, K. IMAI and S. ISOBE

(Division of Meteorology, National Institute of Agricultural Sciences)

1. ま え が き

十分な広さを持つ水稲田や麦畑には空気力学的方法によつて炭素同化作用を測定する可能性が見出されたけれども(井上 1957, 井上その他 1958a), 比較的にせまい苗代にこの方法を適用することが出来るかどうか判らなかつた。しかし苗代期の同化作用を知ることは作物学の見地からして重要であるというので, その困難と対策について考察を行つた上で 1957 年 6 月に最初の苗代観測を行つた。予期された困難はそのまま多く生じたが, ここにはその結果を報告する。

2. 苗代測定に予想される困難性

著者等が炭素同化作用の空気力学的測定に使用する式

$$P = \frac{(U_2 - U_1)(C_1 - C_2)}{33.1 \left(\log \frac{Z_2 - d}{Z_1 - d} \right)^2} \quad (1)$$

においては, 風速 U および CO_2 濃度 C を測定する高度 Z が適当にとられなければならない。まず気層安定度の影響が省略されて U および C の分布が対数法則で表現出来る程度に Z は小さく, しかも一方ではその高度が畦間に位置しない様に作物の高さ h よりは大きくなければならない。気温 Θ , 湿度 E の測定から (1) と同様な関係式を使つて圃場の放熱量や蒸発散量を求める場合についても全く同じ注意が払われなければならない。

非常に広くて一様な水稲田などでは $Z=6\text{ m}$ の高さまでの気象要素の高度分布が十分に圃場そのものについての特性を具えることはすでに多数の観測で示されたが, 圃場の大きさが限られている場合には 6 m の高さまでのうち下部だけがその圃場の特性を示し上部は圃場より風上の隣接地の特性を示すことがある(井上・谷・今井 1953)。著者等は経験的にある高度までの分布が十分圃場の特性を示すためには, その圃場は測定点より風上側に測定高度の 100 倍の距離とそれに相当する横の広がりを持つ必要があることを示した(井上・谷・今井 1955)。従つてその幅が局限されている苗代では, (1) 式に使

用する U や C を測定するには Z のとり方にも制限があり, 例えば風上側に 50 m の広がりだけを持つ圃場ではせいぜい 50 cm 位の高さまでが限度となる。しかも苗の高さが 20 cm であつたとするならば Z の下限がそれでおさえられ, 20 cm から 70 cm の高さの範囲での風速差 ΔU や濃度差 ΔC が十分な精度で得られなければならない。使用計器如何によつてはこの点に困難の生ずることが予期される。このように狭い高度範囲での差を正確に測定するためには計器自体が十分に小さくしなければならず, 計器の存在によつて測定対象の高度分布を乱すことも十分小さくしなければならない。温湿度計の通気や, CO_2 濃度測定のための空気の吸入風速が大きすぎるとは存在する温湿度や濃度の勾配をも乱してしまうおそれがある。

限られた表面からの輸送量を測定するにはトラバース法も考えられる。トラバース法は空気力学的な風洞実験において熱後流や運動量後流の測定のため慣用されている方法であり, 防風垣の抵抗係数の測定(谷 1958), 温水池の熱経済の測定に最近では農業気象学的にも応用されることが多い。これを苗代のような有限圃場の同化作用測定に応用するためには第 1 図に示すように風上側と

Fig. 1. Traverse method of measuring CO_2 flux.

風下側で U 及び C の高度分布を求め(この時計器を風に直角に横断させるのでトラバース法の名

がある), (2) 式に示すように両断面における CO_2 の通過量の差をもつて対象圃場に吸収あるいは放出される量とみなすものである。著者等にはこの方法の有効性をためすだけの測定装置がないのでまだ実行の段階には達していない。

$$P = \int_0^\infty (U_1 C_1 - U_2 C_2) dZ \quad (2)$$

* 1958 年 4 月 9 日 昭和 33 年度大会において発表

この他にも熱あるいは水蒸気の輸送量測定に使用される変動法も同化作用の測定に応用される可能性は考えられ、これも有限圃場の場合には特に効果的であろうと思う。これは風速変動の垂直成分 w と CO_2 濃度の変動量 C とを同時に測定して

$$P = \langle wC \rangle \quad (2)$$

によつて輸送量を計算する方法である。(例えば井上1957)。しかしこの方法を使用するにはまず濃度変動を十分くわしく測定し得る装置が必要とされ、著者等にはまだ実行の見通しも立たない。今後光学的な方法で C の変動が求められるようになれば変動法も実用されるものと思われる。理論的には C の変動についても温度および湿度の変動と同様にスペクトルの $-7/3$ 乗則, Euler 相関係数の $4/3$ 乗則の成立が導かれ(井上その他1958b), 実測される機会の到来が待たれている。

(1) あるいは (2) 式を使用する二つの空気力学的方法に見られる重大な共通の欠点は、平均風速 U が測定出来ない位に小さい場合に輸送量が計算不能となることである。このように静穏な場合、日中ならば陽炎がもえたち平均風速はなくとも輸送は盛んに行われ(Priestley 1957), 夜間ならば気層が極めて安定して輸送は分子拡散程度の小さな拡散係数を使つて表わされることになる(Monteith 1957)。これらの極端な場合については著者等は他の機会にくわしく論ずるつもりであるが、こういう場合にも(3)式を使用する変動法は有効性を保つてあろう。

3. 苗代観測の実施

1957年6月19日午後より20日午後まで鴻巣試験圃場内の苗代において殆ど連続的な観測が行われた。この観測は農技研鴻巣分室にある作況調査研究室と著者等の物理第2研究室との協同で行われ、前者は CO_2 濃度の高度分布の測定を、後者はそれ以外の気象要素の測定を分担した。

観測を行つた圃場は第2図に示されており、空気力学的方法を応用するのに必ずしも好条件下にある圃場とはいいがたく、風向が北成分をもつようになると測定点が数十米離れた人家の風下に入り、 C 分布の異常を来たことは予想された*。南成分の風が主として卓越することを期待して苗代中に3本の6m支柱を立て、これらに各種の測定器具をとり付けた(第2図)。測器およびその取付け要領は次の通りである：

(a) 風速計

理工研型小型 Robinson 風速計が使用された。最初

* 苗の草高は水面上 20 cm であり、生育時期から云うと7葉前後の苗代末期であつた。

Fig. 2. Site of observation, Konosu Experimental Farm, June 19~20, 1957.

(Run1 より7まで) 6個の風速計が水面より 6, 3.2, 1.6, 0.8, 0.5, 0.3 m の高さをそれぞれ配置されたが、後に 2.3 および 1.2 m の二つの高さにも風速計が追加され8点の風速を得ようとした。

(b) 温湿度計

1ヶ月前に行われた麦畑観測で使用された計器に通気速度に関係した欠陥が見出されたため、新たに作られた装置が使用された。詳細は同じ著者達の他の論文(谷その他1958)に示されているのでここでは述べない。6個の温湿度計が第2支柱を使つて 5.15, 3.15, 2.15, 1.1, 0.65 および 0.15 m の高さに配置された。畦間の状態をも測定することを狙つて最低点は苗の群落内に位置するように選ばれたが、通気速度(約 3 m/sec 以上)を考えると計器が正しく群落内の 0.15 m の高さの温湿度を示したものととは考えにくい。この他に一組の熱電対温度計を加え水中約 2 cm の深さに沈む泥面の温度を測定した。

6点における乾球温度と湿球温度ならびに地温の1点を加えた計 13 の読みとりを切換えスイッチによつて次々に行つたが、10分間に6回の読みとりを繰り返すことは比較的容易であつた。

(c) CO_2 濃度測定装置

第3の支柱を使つて前と同様に6点(水面よりの高度 3.1, 1.5, 0.7, 0.3, 0.1 および 0.02 m)にポリエチレンの細管を開口させ、その位置の空気を吸気ポンプによつてビニール袋に採取したのち近くの研究室まで持ちかへつて分析した。約 7 l の容量をもつ袋を満すに平均して約20分かかり、内径 0.7 cm の管では約 15 cm/sec の速さで空気を吸入していることになる。

(d) Net-Radiometer 装置

作物の同化作用や圃場の熱収支についての研究を行うには、そこに供給される太陽からの熱エネルギーについ

てもくわしく知っておかなければならない。従来の著者等の観測では雲量や雲形だけが記録されたにすぎなかったが、今回はじめて太陽輻射量の観測が加えられた。しかしこれも Net-Radiometer(Beckman-Whitley 社製)だけの使用であつて、更に完全な輻射測定のための経験を得るのが目的であつた。三脚に取付けられた Radiometer は苗代の中に設置され、受光面は水面より 63 cm、穂面より 43 cm の高さにあつた。この高さを如何にすべきかは何も検討されていない。受光面に吹きつけられる強制通風は可成り強いので、その通風が測定地点の微細気象要素に影響を与えないように十分離れた点に設置した。

3本の支柱から予期される風下側に約 30 m 離れた点に指示計が置かれ測定要員はその位置で風速、温湿度、輻射量の読みとりを行うことが出来るようにしておいた。CO₂ 濃度の測定は吸気管の長さに制限されて支柱からあまり遠ざかることが出来ず、第1図に示されるように近く(距離約 8 m)に吸気ポンプとその採取要員の位置が測定結果になるべく影響を与えないように選ばれた。

この日は午前より午後の半ばにかけて快晴がつづき、この年の最高気温が記録されたというが、その後薄雲が出て Run 2 では雲量 7 が記録された。夜間も連続的な記録を得ることに努めた結果、翌20日の午後までに22回の観測が行われ、CO₂ の同時観測もその中の 11 回についてなされた。各種の計器の準備が完了するのを待つて時刻 1648 より測定 Run No. 1 が開始され CO₂ を吸入するビニール袋が十分ふくらむまで風速および温湿度の測定が同時になされた。Run No. 1 の終つたのは 1704 であつて、この間の平均化時間は 16 min であつた。CO₂ 濃度が同時に測定される場合には吸入器の作動状況によつて平均化時間が一定しないうらみはあつたが、その他の場合には標準の平均化時間として 10 min がえられ、ほぼ 1 時間おきに 1 回の観測を行うのにつとめた。しかし都合により 2 時間ほどの間隔をとらなければならない場合も生じた。

観測開始の頃には計器の精度や配置状況に対して風向、風速ともに良好であつたが、夜に入るにつれて風速は低下し風向も一定しくなくなり、明らかに観測に不適当と思われる場合も生じた。しかしそういう不適当な場合にも観測を行つて、その結果にどの程度の不都合さが現われるかを見ようとした。最終観測の Run 22 は 20 日午後の 1452~1505 に行われたが、この頃には風向は Run 1 の頃と同様に S におちついていた。

4. 測定結果とその解析

22回にわたる測定結果は第1表に示されている。ここに U , Θ , E , r , C および R_N はそれぞれ風速、温度、

絶対湿度、相対湿度、CO₂ 濃度および Net Radiation Flux を示すものとする。日中の高度分布を示す代表的な例として第3図に Run 20 の測定を示す。気温、湿度、

Fig. 3. Daytime profiles of velocity U , temperature Θ , humidity E , and CO₂ concentration C over the nursery of rice plants, 1148~1202, June 20, 1957, Konosu Experimental Farm.

CO₂ 濃度の高度分布はそれぞれ放熱型、蒸発型、同化型であることが明らかに見られる。また夜間の例として第4図に Run 8 の測定を示す。この測定では風向が不良であつたが、気温は吸熱(逆転)型を、CO₂ 濃度は呼吸型を示している。しかし温湿度計の通風や空気吸入管の吸入速度が可成り大きいことを考えると苗代表面に近い位

Fig. 4. Nighttime profiles of velocity U , temperature Θ , humidity E , and CO₂ concentration C over the nursery of rice plants, 2300~2323, June 19, 1957, Konosu Experimental Farm.

Table 1. Observed results over the nursery of rice plants, June 19~20, 1957, Konosu Experimental Farm.

Run No.	Time	Wind direction and other remarks	Wind velocity U (m/sec)								Air temperature θ ($^{\circ}\text{C}$)							
			Z (m)								Z (m)							
			6	3.2	2.3	1.6	1.2	0.8	0.5	0.3	5.2	3.2	2.2	1.2	0.7	0.2	0	
①	1648~1704	S S, cloud 7/10, Cs S, sunset 1859 SSE S, beginning guttation	4.65	3.9		3.2		2.65	2.2	1.5	27.4	27.7	27.4	27.1	27.1	26.7	25.2	
2	1720~1730		4.35	3.65		3.05		2.3	2.1	1.4	26.6	26.6	26.6	26.3	26.1	25.5	24.4	
3	1851~1859		2.9	2.45		2.03		1.61	1.45	0.8	23.9	23.8	23.6	23.4	23.1	23.0	22.9	
④	1900~1914		2.8	2.3		1.90		1.52	1.53	.8	23.6	23.4	23.3	23.1	22.8	22.9	22.6	
5	1955~2005	S S→SE (bad condition) NE, cloud 2/10 N	2.15	1.8		1.52		1.10	1.0	.55	22.4	22.3	22.2	22.1	21.9	21.3	21.1	
6	2056~2101		1.9	1.55		1.24		.78	0.7		21.1	20.9	20.7	20.6	20.4	19.9	20.3	
⑦	2104~2121		1.5	1.25		1.05		.75	0.7	—	21.0	20.9	20.8	20.8	20.5	20.1	20.3	
⑧	2300~2323		1.7	1.5	1.41	1.34	1.2	1.0	.8	—	20.0	20.0	19.8	19.7	19.5	19.0	19.3	
9	2326~2336	WNW N, cloud 10/10, As, dew SW, sunrise 0425 SSW	1.0	.95	.80	.77	.7	—	—	—	19.4	19.4	19.3	19.3	19.1	18.7	19.0	
10	0056~0106		1.15	1.1	1.02	.95	—	—	—	—	17.6	17.8	17.8	17.8	17.7	17.6	18.2	
11	0300~0310		0.9	0.85	.82	.75	—	—	—	—	15.4	15.7	15.9	16.1	16.2	16.4	17.0	
⑫	0359~0427		.95	.85	—	.65	—	—	—	—	14.1	14.3	14.6	14.9	15.0	15.4	16.3	
13	0455~0505	SSW, cloud 10/10, As WNW, 10/10 WNW SSE, 10/10, AcAsCs	1.2	0.9	—	.64	—	—	—	—	13.4	13.6	14.0	14.5	14.8	15.3	16.2	
⑭	0559~0613		1.2	1.2	1.13	.95	0.8	0.7	.7	—	15.7	15.6	15.9	16.4	16.7	17.1	17.8	
15	0700~0710		—	.9	.82	.78	.55	.5	.6	—	18.7	18.8	18.8	19.1	19.3	19.7	21.2	
⑮	0801~0814		.85	1.0	.87	.84	.7	.6	.5	—	21.1	21.1	21.3	21.4	21.6	22.2	24.3	
⑰	0956~1011	SSE, 10/10, AcAsCs SSE SSW S, 7/10, Ac	1.15	1.25	1.35	1.18	1.0	.95	.9	.55	25.6	25.8	26.1	26.3	26.6	27.2	30.0	
18	1024~1033		1.75	1.7	1.66	1.60	1.45	1.3	1.15	.75	25.3	25.7	26.0	26.5	26.9	27.2	29.8	
19	1100~1110		1.45	1.4	1.36	1.24	1.1	.95	.9	.55	26.3	26.4	26.4	26.5	26.7	27.3	29.8	
⑳	1148~1202		2.30	2.25	2.15	1.95	1.8	1.5	1.4	0.9	27.2	27.5	27.6	27.8	28.1	28.6	30.9	
㉑	1348~1402	S S, 8/10, As	2.6	2.4	2.30	2.07	1.95	1.7	1.5	.95	28.2	28.3	28.3	28.2	28.2	27.9	29.4	
㉒	1452~1505		2.2	2.0	1.95	1.75	1.6	1.35	1.2	.7	28.4	28.4	28.3	28.1	27.9	27.3	27.8	

Run No.	Absolute humidity E (g/m ³)						Relative humidity r (%)						CO ₂ concentration C (mg/l)						Net radiation R_N (cal/cm ² min)
	Z (m)						Z (m)						Z (m)						
	5.2	3.2	2.2	1.2	0.7	0.1	5.2	3.2	2.2	1.2	0.7	0.2	3.1	1.5	0.7	0.3	0.1	0.02	
①	14.87	13.92	13.92	14.45	15.51	15.40	56	52	52	56	59	61	0.523	0.525	0.518	0.522	0.508	0.537	0.15
2	14.47	13.88	13.72	14.35	15.25	15.43	57	55	54	58	62	65						0.04	
3	15.16	14.77	14.88	15.14	15.61	15.35	70	69	70	72	75	75						-0.06	
④	15.18	14.98	15.04	15.31	15.76	15.40	71	71	72	74	77	75	0.531	0.537	0.545	0.533	0.570	0.536	-0.06
5	15.83	15.73	15.79	16.00	16.26	16.43	80	80	80	82	84	88						-0.04	
6	15.64	15.58	15.70	15.91	16.17	16.45	85	85	87	89	91	95						-0.05	
⑦	15.69	15.58	15.64	15.80	16.12	16.51	85	85	86	89	90	95	0.578	0.578	0.583	0.583	0.596	0.628	-0.03
⑧	15.63	15.78	15.74	15.64	15.92	16.04	90	91	91	91	95	98	0.584	0.591	0.595	0.609	0.607	0.643	-0.07
9	15.82	15.66	15.87	15.87	16.14	15.91	95	94	95	95	98	99						-0.06	
10	14.47	14.64	14.78	14.78	14.84	14.90	96	96	97	97	98	99						-0.07	
11	12.90	13.13	13.43	13.59	13.67	13.85	98	98	99	99	99	99						-0.04	
⑫	11.91	12.04	12.28	12.51	12.85	13.03	98	98	98	98	100	99	0.690	0.704	0.715	0.733	0.729	0.752	-0.05
13	11.39	11.29	11.96	12.35	12.57	13.09	98	96	99	99	99	100						-0.01	
⑬	12.59	12.38	12.75	13.17	13.59	14.46	94	93	94	94	96	99	0.628	0.625	0.623	0.617	0.610	0.623	0.07
15	14.44	14.39	14.67	14.78	15.27	15.97	90	89	91	90	93	94						0.19	
⑯	15.48	15.48	15.52	15.77	16.11	17.53	84	84	83	84	85	89	0.572	0.564	0.564	0.548	0.551	0.546	0.32
⑰	16.64	16.71	16.38	17.23	18.10	20.38	70	69	67	69	72	78	0.569	0.562	0.564	0.549	0.554	0.567	0.79
18	16.64	17.08	16.60	17.64	18.09	20.20	71	71	68	70	71	77						0.79	
19	16.10	15.72	15.72	16.47	17.70	19.64	65	63	68	66	70	75						0.48	
⑳	16.56	15.94	15.88	16.77	18.13	20.30	64	60	60	62	66	72	0.547	0.533	0.526	0.514	0.524	0.528	0.81
㉑	16.89	16.33	16.33	17.05	18.23	19.45	62	59	59	62	66	72	0.544	0.537	0.531	0.496	0.517	0.520	0.35
㉒	—	15.46	15.35	16.11	17.33	18.21	—	56	56	59	64	69	0.542	0.534	0.521	0.513	0.514	0.526	0.17

置やその内部における測定値をそのまま使用することは困難であり、また2m以上の高度における測定値は苗代以外の地表面の特性に左右されているらしいことは気温や湿度の分布型からもうかがわれる。そこで空気力学的計算に使用すべき測定値としては30cmから220cmの高度範囲内にあるものを主として対象とすることにした。

まず全部の測定結果を片対数方眼紙上に書き、風速の高度分布が比較的によく測定されたRunをよく調べて地表面修正量 d および粗度 Z_0 が次のように決定された。

$$d=20\text{ cm}, \quad Z_0=1\text{ cm}$$

苗代の草高自身も20cmであることから、苗代の密集した穂面そのものが見かけの表面になっていること意味している。これは生育した稲田や麦畑でも弱風下によく見られる現象である。次に風速以外の測定要素にも d だけの高度修正を行って片対数表示を行い、視察によつて測定点にもつとも近いと思われる直線をひいた。その一例がRun 20について第5図に示されている。そして個

P が同化作用によつて苗代に吸収される CO_2 量を意味するものとみなされる。これと同様式によつて放熱量 Q 、蒸発散量 A が計算され、更に同化に要する熱量 λP および蒸発散に要する熱量 LA を計算することが出来て(井上 1958)、それらの値も第2表に示されている。但し Q 、 A の計算式は次の通りである(上向きに輸送される量を正の値とする)。

$$Q = \frac{\rho c_p (U_2 - U_1) (\Theta_1 - \Theta_2)}{33.1 \left(\log \frac{Z_2 - d}{Z_1 - d} \right)^2}, \quad (4)$$

$$A = \frac{(U_2 - U_1) (E_1 - E_2)}{33.1 \left(\log \frac{Z_2 - d}{Z_1 - d} \right)^2} \quad (5)$$

ここに各種の記号の意味は次の通りである。

ρ : 空気密度	0.0012 g/cm ³ ,
c_p : 空気の定圧比熱	0.24 cal/°C g (air),
L : 蒸発潜熱	600 cal/g (H ₂ O),
λ : 光合成に要する熱量	2500 cal/g (CO ₂).

5. 測定と解析結果についての考察

空気力学的方法を適用するのに苗代の条件は必ずしも良好であるとはいえず、風向が不良の場合もあり、また手持ちの測定装置をそのまま流用しているために気象要素の微細な傾度を測定するのに必ずしも適当であるとはいえなかつたこと等の理由で、求められた結果には可成りの誤差が入っているものと思われる。しかし日中における同化(負の P)と夜間における呼吸(正の P)を示す点では、これらの結果も定性的には合理的であるとみなされよう。従つて限られた範囲の圃場における同化作用も、気象要素の傾度測定を十分合理的に行い得るならば空気力学的に評価される可能性があるといえよう。

しかし極端に圃場がせまくなつたり、限られた少数の作物だけが対象とされなければならない場合には、もはやここに使用されたままの空気力学的方法は適用されず、従来の同化箱を使用する方法に頼らざるを得なくなるであろう。

無限に広い理想的な圃場を対象とする空気力学的測定法と、ごく少数の作物だけを対象とする同化箱測定法とはもともと対立すべきものではなく、圃場の条件に応じてまた測定の目的に応じてそれぞれの特徴を発揮すべきである。この点については小さな面積をもつ蒸発計や蒸発散計が使用されると同時に空気力学的な蒸発散量測定法が使用されてそれぞれの特徴を発揮すると共に、それぞれの間の関係が半経験的に追求されている蒸発散研究の現状によく似た所がある。そして同化量に対しても同化位(potential-assimilation)あるいは光合成位(potential

Fig. 5. Semi-logarithmic representation of profiles of U , Θ , E and C with the modified height, $Z-d$, where d is the zero-plane displacement. Run No. 20, 1148~1202, June 20, 1957, Konosu Experimental Farm.

々の測定値よりも画かれた直線が各Runの特性を表わすものと考えて、その直線上の二点 Z_1 , Z_2 における値 C_1 , C_2 などを(1)式に代入して輸送量を計算する方法をとつた。二つの高度としては任意的に $Z_1=70\text{ cm}$, $Z_2=170\text{ cm}$ をとり、それぞれの高さの要素を読みとつた値が第2表に示されている。但し CO_2 濃度の測定を伴つたRunだけが取扱われた。これらの値を使つて計算された P はもともと CO_2 量の垂直方向への輸送量を示すもので、正の値は上向きに輸送される量、つまり呼吸作用によつて苗代より放出される量を意味し、負の値の

photosynthesis) といった様な概念の適用される可能性も十分考えられ, Mather (1954) や Budyko (1956) の研究にもその萌芽が十分よみとられる。

第2表には各 Run における消費エネルギーの評価が示されているが, 風による放熱 (Q), 蒸発散に必要な潜熱 (LA) および同化に必要とされる熱量 (λP) と輻射

Table 2. Diurnal variations of the rates of heat transfer, evapotranspiration and CO_2 assimilation, and of the heat budget over the nursery of rice plants, June 19~20, 1957, Konosu Experimental Farm.

Run No.	Time	U (170) (cm/s)	U (70) (cm/s)	Θ (170) (°C)	Θ (70) (°C)	E (170) (g/m ²)	E (70) (g/m ²)	C (170) (mg/l)	C (70) (mg/l)	Q (cal/cm ² min)	A (g/cm ² sec)	P (g/cm ² sec)	LA (cal/cm ² min)	λP (cal/cm ² min)	R_N (cal/cm ² min)	X $= R_N - Q - LA - \lambda P$ (cal/cm ² min)
1	1648~1704	325	253	27.30	26.97	14.08	15.28	0.523	0.5215	-0.055	11.5×10^{-6}	-14.40×10^{-8}	4.0414	0.002	0.15	-0.346
4	1900~1914	190	149	23.20	22.80	15.14	18.35	0.536	0.545	-0.038	18.8	49.1	0.678	-0.007	-0.06	-0.638
7	2104~2121	100	80	20.77	20.52	15.70	16.05	0.577	0.583	-0.012	0.93	10.6	0.034	-0.002	-0.03	-0.060
8	2300~2323	120	94	19.78	19.50	15.76	15.96	0.5895	0.597	-0.017	0.69	26.0	0.025	-0.004	-0.07	-0.074
12	0359~0427	76	59	14.68	15.02	12.38	12.83	0.7055	0.716	0.013	1.02	23.8	0.037	-0.004	-0.05	-0.097
14	0559~0613	95	75	16.09	16.80	12.92	13.58	0.626	0.6225	0.033	1.76	-9.31	0.064	+0.001	0.07	-0.029
16	0801~0814	78	60	21.33	21.57	15.63	16.10	0.567	0.561	0.010	1.13	-14.4	0.041	+0.002	0.32	0.267
17	0956~1011	123	97	26.23	26.60	16.74	18.10	0.564	0.559	0.022	4.71	-17.3	0.169	+0.003	0.79	0.595
20	1148~1202	195	157	27.65	28.00	16.18	17.77	0.534	0.526	0.031	8.04	-40.4	0.290	+0.006	0.81	0.482
21	1348~1402	213	167	28.26	28.17	16.64	18.16	0.5395	0.530	-0.010	9.32	-58.3	0.335	+0.009	0.35	0.016
22	1452~1505	171	134	28.23	27.90	15.63	17.05	0.5335	0.523	-0.028	6.99	-51.6	0.252	+0.008	0.17	-0.061

Fig. 6 Diurnal variation of heat budget terms.

によつて供給される熱量 (R_N) との関係について考えてみよう。これらの量を

$$R_N = Q + LA + \lambda P + X \quad (6)$$

という関係で結びつけることは一般に地表面における熱収支の研究に用いられている所であり, X の中には苗代

自身の温度変化, 地中に伝えられる熱量, 移流によつて運び去られる熱量などが含まれることになる。この観測では X の内容について詳細に論ずるに足る資料を求め得なかつたが, 第2表および第6図に X の時間的変化が示されている。そして第6図には $\Theta(20)$ も参考的に図示されており, 日没前後の急激な温度低下の原因は R_N が負になることよりもむしろはげしい蒸発散作用にあることがうかがわれる。しかし詳細な議論が行われるためには今後の観測が必要とされる。

先に図示された Run 8 および Run 20 の CO_2 濃度の分布からも明らかのように, 昼間および夜間における濃度分布の特長はた

だその傾度の符号 (同化型の正, 呼吸型の負) にあるばかりでなく濃度の絶対値が夜間において増大する点にも見られ, この傾向はすでに他の多くの圃場についても知られている。これは CO_2 の吸源あるいは湧源に相当する作物面の同化あるいは呼吸作用の強さが時間的に変化する

ることによつて生ずる一種の過渡的現象であり、非定常乱流輸送現象として今後流体力学的にも十分研究されなければならない問題であるが、非常に概念的には夜間には一般に拡散能力が弱くしかも圃面がCO₂の湧源になるためにCO₂の蓄積が起るとして説明されるであろう。Huber (1952) はこのようなCO₂濃度分布の時間的変化が模式的に第7図に示されるようなものであるとして、

Fig. 7 Diurnal variation (Schematic) of the vertical distribution of CO₂ Concentration.

ASB にかこまれる部分の面積に相当するCO₂量を作物面における同化量と見なす方法を発表している。この方法は地中に貯えられる熱量の計算等にしばしば使用されるものであるが、風速や乱流拡散係数が高さによつても時間によつても変化する大気を対象としては到底合理的な同化量評価の方法とは見なし得ない。

圃場近傍に何等かの原因にもとずくCO₂の湧源あるいは吸源がありしかもその強さが時間的に変化する場合には、風向によつては圃面のCO₂濃度が空間的にも時間的にも変化してここに述べられた空気力学的な炭素同化作用の測定結果に誤差を与えることが十分考えられなければならない。その誤差は湧源の強さと圃場と湧源との距離などに当然関係すべきであり、その誤差の評価には大気乱流拡散理論に関する知識が必要とされる。そしてまた一部の農学者が想像するように人為的なCO₂の供給が作物増収に効果をもたらすものならば、人為的に供給されるCO₂の圃面上の拡散も乱流拡散理論の力をかりて制御されなければならないであろう。

6. 結 び

空気力学的測定法の根拠となる理論的な基礎には現在の所多くの条件の存在が仮定されている。その中でも重要な仮定は

- (1) 空間的に圃場の広がりが無限度であり、
 - (2) 時間的に輸送現象が定常である
- という二つである。

苗代のように面積の小さい圃場を対象とする場合には当然空気力学的方法の適用に対して幾多の困難の生ずることが予想されるが、その困難を正しく評価することによつて適用の限界を明らかにし、その限界内の適用を行うようにして同化量、放熱量、蒸発散量を評価した。空気力学的方法の一つの特色はこのように三つの量を同時に評価し得ることであり、輻射収支計の測定と相まつてエネルギー収支が部分的に検討された。

時間的定常性に関する仮定を出来るだけ満足させるためには、測定平均化時間が適当な大きさととられなければならない。この測定では計器の性能上平均化時間として約20 min がとられざるを得なかつた。実際にはCO₂の吸収も放出も時間的に変化する非定常乱流輸送現象であり、空気中のCO₂濃度も時間的に変化的なことが測定からも明らかとなつている。

空気力学的測定法を更に合理的に使用し得るようになるためには、ここに述べられたような測定を数多く実施することによつて空気力学的理論の有効性をためすことが必要である。そして理論のもつ欠陥が明らかとなつたならば、その欠陥をとりのぞくように努力がなされなければならない。このように理論と実用とが力を合せることにより、理論は一層の発展をとげ、理論の応用によつて実用的な技術の進歩が期待される。

圃場における作物の炭素同化作用を空気力学的に測定する方法に対する著者等の研究の一つの目標も、各種の空気力学的な理論を農業技術に応用しそれによつて理論の発展と技術の進歩をみたいとねがう所にある。その意味において種々予想される応用的な問題をも未解決のまま列挙しておいたが、これらの問題が各方面の研究者達にとりあげられて空気力学的な知識がますます農業技術の分野にとり入れられることを著者等は期待している。

(Mar. 23, 1958)

引用文献

- Budyko 1956: 地表面の熱収支, 水文気象出版社, Leningrad, 240 pp.
- Huber, B. 1952: Forstwiss. Clb., 71, 372~380.
- 井上栄一 1957: 農業気象, 12, 138~144.
- 井上栄一 1958: 穂波の研究 (5), 農業気象, 14, 6~8.
- 井上・谷・今井 1953: 農業気象, 8, 45~48.
- 井上・谷・今井 1955: 農技研報告, A 4, 1~36.
- 井上・谷・今井・磯部 1958a: 農業気象, 13, 121~125.
- 井上・今井・谷 1958b: 農業気象, 14, 6~14.
- Mather, J. R. 1954: Publ. Climatol., Johns Hopkins Univ., 7, No. 1.
- Monteith, J. L.: 1957: QJRM, 83, 322~341.
- Priestley, C. H. B. 1957: Proc. Roy. Soc. A, 238, 287~304.
- 谷 信輝 1958: 農技研報告 A 6, 1~80.

Summary

The aerodynamic method of measuring the rate of photosynthesis over the cultivated fields, which makes use of the equation of turbulent transfer such as

$$P = \frac{(U_2 - U_1)(C_1 - C_2)}{33.1 \left(\log \frac{Z_2 - d}{Z_1 - d} \right)^2}$$

and has been applied successfully to the unlimitedly wide fields, is to be applied with much care to the narrow fields of limited dimension such as a nursery of rice plants. The reasonable heights of Z_1 and Z_2 where the velocities U_1 and U_2 and the concentrations C_1 and C_2 are to be obtained are examined taking both the height of plants and the windward length of the field concerned into account simultaneously, and also taking account of the thermal stability of the air layer. Alternative two methods of some possibilities are presented. One is the fluctuation method making use of the mean product of the vertical components of wind velocity fluctuations and the CO_2 concentration fluctuations, and the other is the traverse method which makes use of the vertical integration of the horizontally flowing CO_2 flux.

The aerodynamic method has been applied practically to a nursery of rice plants 20 cm high of limited scales with much caution in order to avoid meeting anticipated difficulties. The profiles of U , C , Θ (air temperature) and E (humidity) over the nursery have been obtained during almost a whole day in June 1957. The net radiation flux has been obtained simultaneously by means of a Beckman-Whitley net-radiometer. The assimilation type of C -profile in daytime characterized by increasing CO_2 concentration with height and the respiration type in nighttime characterized by decreasing concentration with height have been obtained.

All of profiles have been compared with the logarithmic laws and the relevant zero-plane displacement d and roughness length Z_0 have been obtained as 20 cm and 1 cm, respectively. The fluxes of turbulent transfer of heat, water vapor and CO_2 have been calculated by the aerodynamic method and compared with each other. The amounts of heat energy required for the evapotranspiration and for the photosynthesis of rice plants have been also calculated and the heat budget of the net radiation flux has been considered briefly.

本 会 記 事

昭和 33 年度 会 計 報 告 (33 年度総会にて承認)

○ 昭和 32 年度決算

収入部

刊行費補助金(文部省)	0
広告掲載料	45,800
編集費(養賢堂)	4,500
(著者)	3,600
年報要旨等売上	9,610
展示会出品料	29,000
依託研究事務費	30,000
雑収入	8,478
前年度繰越	11,599
	142,587

支出部

刊行費補助(養賢堂)	30,000
会誌印刷負担	22,400
編集経費	3,000
学会開催費	11,000
支部事務補助	8,000
役員会開催費	4,217

旅費・交通費

4,970

通信発送費

10,572

資料印刷費

11,190

事務費

14,646

学会賞費

454

負担金(農学会等)

8,220

年報要旨等購入

5,820

次年度へ繰越

8,098

142,587

○ 昭和 33 年度予算

収入部

前年度より繰越

8,098

正会員会費

300,000

賛助会員会費

20,000

広告掲載料

60,000

売上金

8,000

編集料(養賢堂)

6,000

展示会出品料

15,000

依託研究旅費・事務費

50,000

雑収入

1,000

468,098

支出部

会誌発行費

336,000

編集委員会費

6,000

総会開催費

5,000

支部費

40,000

通信発送費

10,000

事務費

役員会開催費

5,000

旅費・交通費

25,000

事務用品

5,000

ニュース其の他印刷費

5,000

事務雑費

5,000

学会賞費

5,000

年報要旨購入

3,000

農学会等負担金

5,000

名簿印刷

13,000

予備費

5,000

次年度へ繰越

98

468,098