

ダイズの生育に伴う群落上のオゾンフラックスと 気象要因との関係

Effects of Meteorology and Plant Growth on the Ozone Flux Over Soybean Canopy

山田 千絵*・原 蘭 芳信**・岡野 通明***・西沢 利栄****

Chie YAMADA, Yoshinobu HARAZONO,

Michiaki OKANO and Toshie NISIZAWA

I まえがき

大気中の二酸化炭素濃度の上昇に伴う温暖化や大気中の汚染物質が生物圏に及ぼす影響など、大気環境と生物圏との相互作用が問題となっている。生物圏では、ガス環境に及ぼす植物の影響が重要であり、相互関係に関して多くの研究がなされてきた。植物は、気孔を通じて空気中の二酸化炭素 (CO_2) を取り込み酸素 (O_2) を放出してガス交換を行っている。ガス交換の際に、空気中に含まれる大気汚染ガスが植物体内に取り込まれ、エアークリーナーとして大気浄化に貢献する (Beennett & Hill, 1973)。アルファルファのモデル群落が大気浄化に寄与しているとの報告 (Hill, 1971) をはじめ、植物による O_3 や NO_2 、 SO_2 などの大気汚染物質の吸収、すなわち大気浄化能力に関する研究報告は多い (荒木ら, 1983; 古川ら, 1985; 戸塚, 1986; 青木ら, 1987)。

植物による CO_2 や汚染大気の吸収能力は、葉内における分解速度、葉面の気孔拡散抵抗、大気から気孔へ至る気層でのガス拡散抵抗などに左右され、ガス吸収量に植物群落内外のガス拡散輸送現象が大きい影響を及ぼすことが、Jones (1983)、Monteith

(1990) 他により報告されている。したがって、大気 CO_2 ・ O_3 環境を議論する場合、群落内外の乱流輸送特性、群落におけるガス flux 特性の把握は重要であり、気流特性とガス吸収との関連を明らかにすることは、植物の大気浄化機能の評価や、大気と植生との相互作用を明らかにするために必要である。

植物群落は、生育に伴って密度や粗度、植物体の大きさ、柔軟さが変化する他、気流の変動に伴って植物体が揺らぎ、それが群落内外の気流にも作用し、大気と群落間の乱流輸送に影響を与える (原蘭と大政, 1986; 原 蘭, 1989)。原 蘭ら (1989, 1990) は赤松群落や水稻について、空気力学的パラメータと風速、気流の乱れとの関係を明らかにし、村上ら (1990) は、群落の揺らぎ等との関係を明らかにしている。

本研究では、植物生長に伴う群落上のガス flux の変化、特に自然条件下における群落上の O_3 flux と風速や日射などの気象条件との関係をダイズ群落を対象として調べた。

*筑波大学第一学群自然学類 (現 日本電気株式会社) **農業環境技術研究所気象管理科 ***農業環境技術研究所気象管理科 (現 森林総合研究所) ****筑波大学地球科学系

II 測定方法及び解析方法

2.1 ガス濃度、気象要素の測定

農林水産省農業環境技術研究所（茨城県つくば市観音台）内の圃場にあるダイズ畑（55m×24m）を対象として植物群落上のガス flux と微気象を測定した。測定地を第1図に示す。

測定は、植物の生長に伴う $\text{CO}_2 \cdot \text{O}_3$ flux の季節変化を調べるため、1990年5月下旬からほぼ10日ごとに2～5日間、9月下旬の刈り取り直前まで行った。測定項目と測器の設置位置、使用した測器の種類等の代表例を第1表に、また測器の設置状況の一例を第2図に示す。

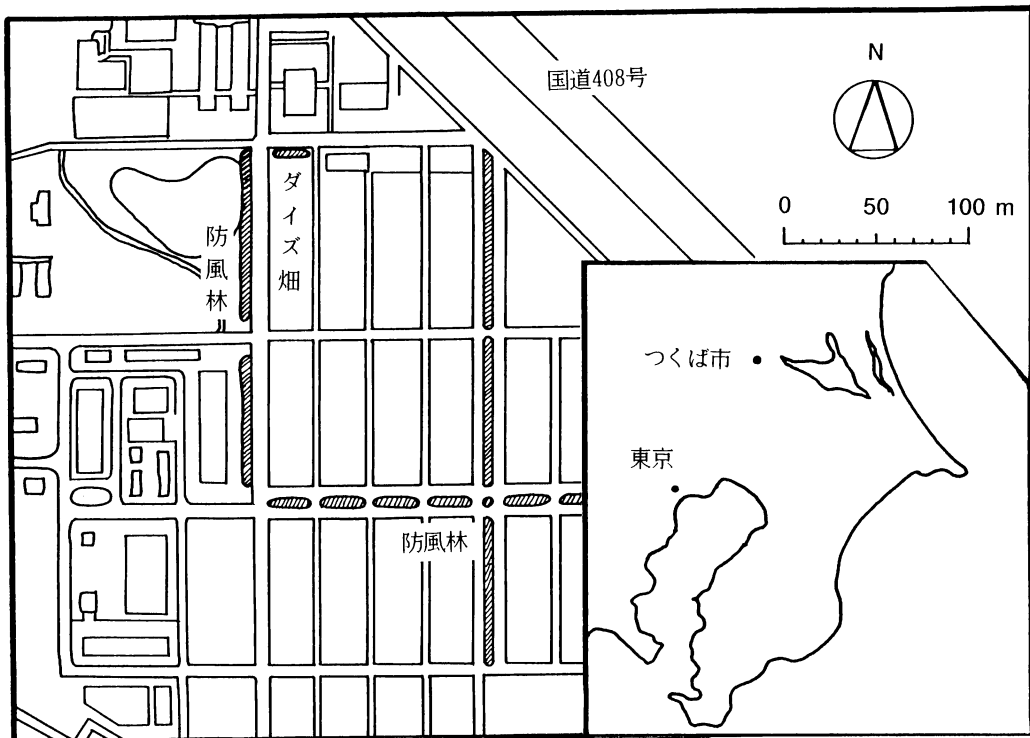
ダイズ畑のほぼ中央に測定用のポール（牧野応用測器、高さ4 m）を建て、微気象観測用センサを設置した。風速計、通風乾湿計、相対湿度計などの各センサの設置高さは、第1表に示すようにダイズの

生長に合わせて数回変化させた。

気温・湿度は、銅-コンスタンタン熱電対を感部とする通風乾湿計を用いて2高度で測定した。風速は三杯型光電式風速計（牧野応用測器、AF-750 S）を用い5高度で測定し、また風向は光電式風向計（牧野応用測器、VF016）を使用した。

CO_2 濃度の測定には赤外線吸収式 CO_2 濃度分析計（富士電機、ZFU）を用い、 O_3 濃度の測定には紫外線吸収式 O_3 濃度分析計（DASIBI、1006AHJ）を使用した。ガス吸入口を測定用ポールの3高度に設け、1分毎に電磁弁で切替えて測定した。群落直上には、日射計（英弘精機、MS-42）を設置して日射強度を測定した。

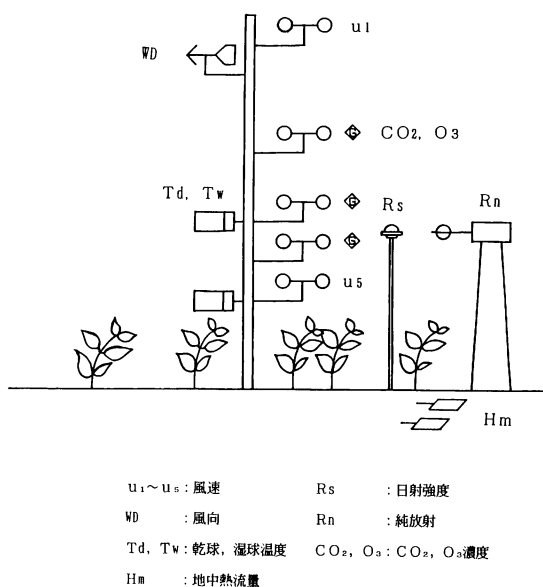
ダイズ群落における微気象要素のデータは、汎用データロガー（ESD、Green Kit 88）とパーソナルコンピュータ（富士通、FM77）を用いて、10秒毎に読み取り、それを1分間平均したものをフロッピー



第1図 測定地点と周囲の状況（農業環境技術研究所）

第1表 ダイズ群落における測器配置の代表例（設置高さ，m）

測定項目	群落高さ 葉面積指数 (L A I)	乾球・湿 球温度 (2 高度)	風速 (5 高度)	風向	地中熱流量 (2 高度)	日射量	純放射 量	CO ₂ 濃度 O ₃ 濃度 (3 高度)
5/29～6/4	0.22 (0.245)	2.2 3.4	0.4 0.8 1.4 2.2 3.4	3.1	0.02 0.05	1.17	1.1	未設定
6/15～6/19	0.35 (0.729)	0.4 1.1	0.4 0.7 1.1 1.8 3.0	同上	同上	1.1	同上	0.4 0.7 1.1
6/27～7/1	0.58 (2.035)	0.7 1.4	0.7 1.0 1.4 2.1 3.3	同上	同上	同上	同上	0.7 1.0 1.4
7/3 ～7/7	0.80 (3.354)	0.8 1.5	0.8 1.1 1.5 2.2 3.3	同上	同上	同上	同上	0.8 1.1 1.5
7/11～7/15	0.95 (6.454)	1.0 1.7	1.0 1.3 1.7 2.4 3.4	同上	同上	1.58	1.73	1.0 1.3 1.7
7/18～7/21	1.10 (8.454)	1.2 1.9	1.2 1.5 1.9 2.5 3.5	同上	同上	同上	同上	1.2 1.9 2.5
8/15～8/19	1.12 (4.487)	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上
9/18～9/28	0.90 (3.958)	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上



第2図 測定要素と測器設置状況の模式図

ディスクに記録した。

またダイズの生育状況や群落構造と気象条件との関係を明らかにするために、ほぼ2週間毎に圃場のダイズの層別刈り取り調査を行った。詳細は続報（原菌ら，1991）に空気力学的パラメータとの関係で示す。

2.2 解析方法

まず、観測時に記録した1分間平均データを器差やゼロドリフト等を補正し、単位換算を行った後、10分間平均値を求め、これを解析に用いた。測定した5高度の風速のうち、最高高度（地上高3.0～3.2m）の10分平均値を解析単位毎の平均風速とした。以下本文中では、これを風速と略称する。

植物群落上のガス輸送速度（flux）は、群落上の2高度 z_1 , z_2 のガス濃度の勾配 ΔCO_2 , ΔO_3 と拡散速度 Df の積として以下の(1), (2), (3)式から求められる（Thom, 1971；農業気象ハンドブック, 1975）。

$$Df = \frac{\kappa_2 \cdot (u(1) - u(2))}{\{\ln(z_1 - d) - \ln(z_2 - d)\}^2} \quad (1)$$

$$CO_2 \text{ flux} = Df \cdot \Delta CO_2 \quad (2)$$

$$O_3 \text{ flux} = Df \cdot \Delta O_3 \quad (3)$$

κ は karman 定数 (0.4), d は植物群落の地面修正量, $u(1)$, $u(2)$ は、高さ z_1 , z_2 における風速である。 ΔCO_2 , ΔO_3 は、3高度の測定値のうち、濃度差が明確な2高度を用いて算出した。 d や拡散速度 Df は、群落上5高度で測定した風速の鉛直勾配から傾度法によって求めた。計算手順は、原菌ほか（1989, 1990）の方法によった。

大気が中立状態でない場合には、(1)式の Df に誤差が含まれるが、本研究においては、大気安定度が中

立に近い場合の測定結果のみを対象として解析を行なうこととし、その指標としてリチャードソン数 (Ri) を用いた。 Ri は群落上 2 高度 Z_1 、 Z_2 の風速と気温の 10 分間平均値 $u(1)$ 、 $u(2)$ と $T(1)$ 、 $T(2)$ とを用いて以下の式(4)から求めた。

$$Ri = \frac{g \cdot (T(1) - T(2)) / \Delta Z}{\theta \cdot ((u(1) - u(2)) / \Delta Z)^2} \quad (4)$$

$$\Delta Z = Z_1 - Z_2 \quad (5)$$

ここで、 g は重力加速度、 θ は 2 高度間の平均温位 (単位 K) である。 Ri の絶対値が 0.05 以下の大気状態の場合を、近似的に中立とみなした。大気が中立でない場合に、拡散速度 Df を安定度 Ri で補正する方法もあるが (Thom, 1971)、補正による Df の過大評価を避けるため、補正は行わなかった。

| Ri | < 0.05 の条件を満たし、10 分平均風速の鉛直分布を対数分布式にあてはめた場合の相関係数が 0.98 以上となるデータについてのみ flux を計算した。したがって、flux を求めることができたのは全観測期間のうち約 70% であり、1 日全体の flux の日変化を求めることができたのは、全観測日の約 1/4 であった。 Ri を用いた補正の妥当性については、同時観測した熱収支解析から求められる拡散速度と比較検討し、別途報告する予定である。

III 結 果

3.1 O_3 濃度の日変化と季節変化

植物群落上の日射・気温・風速などの気象要素と O_3 ・ CO_2 濃度の日変化の例を第 3 図に示す。

O_3 濃度は一般に夜間に低く、風速が低い場合 (7 月 18 日) に 0 ppb となり、平均風速が約 1.5 m/s 以上の場合 (7 月 28 日) は約 30 ppb の濃度となっている。日中は日射強度に伴った変化をし、 CO_2 の濃度変化とほぼ逆位相となっている。濃度が最高となるのは 13 時から 14 時頃と、日射強度のピークより遅れることが多く、気温の日変化に似た傾向である。これは O_3 生成の光化学反応に関する時間遅れや、 NO_x などの前駆物質の移流や拡散の遅れ (主に東京湾一帯から移流するとされている) による影響と考えられる (溝口, 1896; 溝口ら, 1989 a, 1989 b)。

また、7 月 28 日の例のように午後日射強度が減少

しても日中の O_3 濃度がそのまま持続する場合があった。これは、午前中は日射の増大や大気中の排ガス濃度の増加に伴って O_3 濃度が増加し、午後には前駆物質やオキシダントの拡散・移流などのため、濃度が高いまま維持したと考えられる。

このような O_3 濃度の日変化は全観測期間において認められたが、 O_3 濃度の絶対値は日によって大きく変化し、低い時は日最大値が 20 ppb 以下の場合から、高い時は 140 ppb 以上に達した。

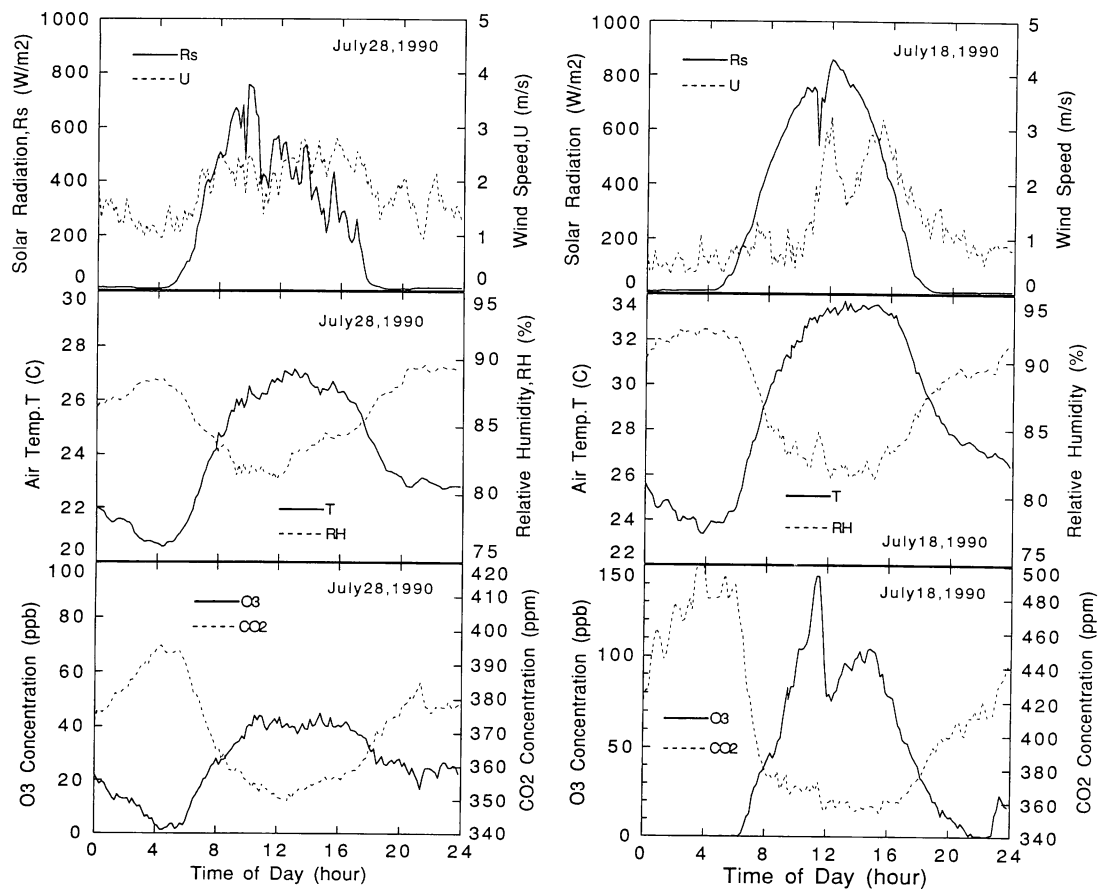
6 月中旬から 9 月下旬までにダイズ群落上で観測された O_3 濃度と季節変化との関係に特徴は認められなかった。

3.2 夜間の O_3 濃度と大気バックグラウンド濃度

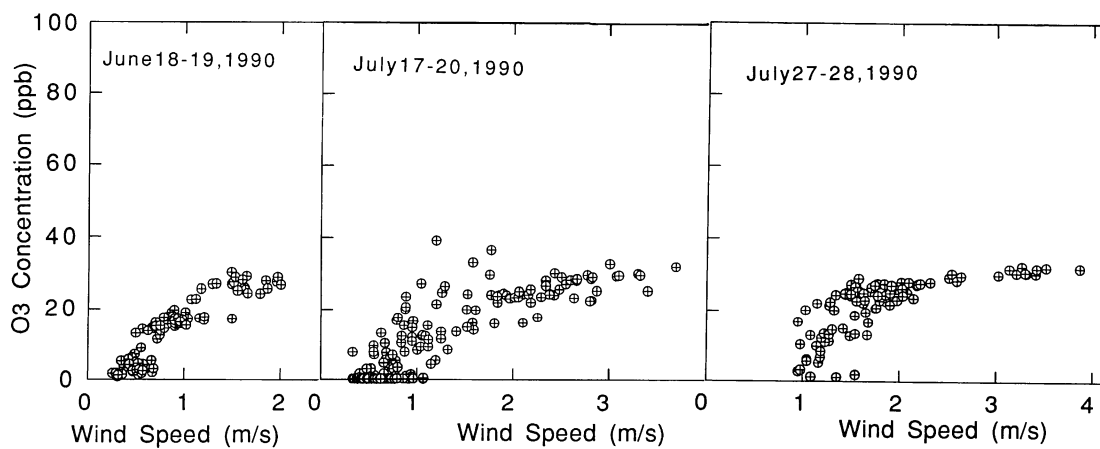
夜間の O_3 濃度と風速との関係を第 4 図に示す。全観測期間を通して、夜間、風速の増加に伴う O_3 濃度の上昇が認められた。風速が約 1 m/s 以上で O_3 濃度は急激に上昇し、約 2 m/s 以上で 30 ppb 程度になった。約 3 m/s 以上の高風速条件でも濃度はほとんど変化せず、そのままの値を維持する傾向である。この理由としては、一般に夜間は地表付近で O_3 が生成することではなく、上空から風によって O_3 が供給される。供給された O_3 は植物群落や地表面への吸着により消失するが、強風時は上空からの供給速度が地表付近での消失速度より大きく、地表付近は上空と同等の濃度に維持されるものとする。本研究により観測された夜間強風時の濃度は、溝口ら (1989 a) が報告しているバックグラウンド濃度約 30 ppb と合致する。これらのことから、夜間の最高濃度を関東地域における大気バックグラウンド O_3 濃度と判断した。

3.3 日中の O_3 濃度と気象条件

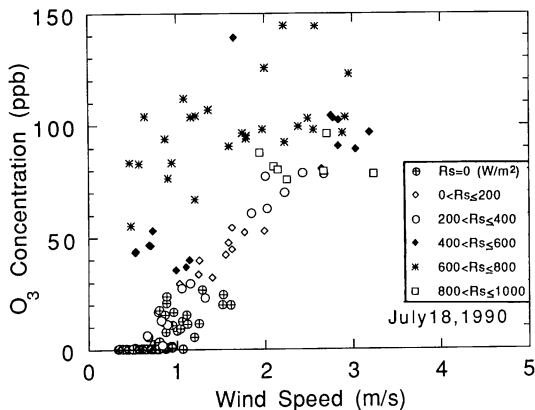
第 5 図は日中の O_3 濃度と風速の関係を日射強度別に示した代表例である。日射強度と O_3 との相関はそれほど顕著でなく、低日射条件では風速の増大に伴って O_3 濃度が増加する傾向が認められ、夜間の濃度上昇と同じメカニズムによるものとする。 O_3 濃度が最も高くなるのは日射強度が 600 W/m² 以上 800 W/m² 未満の場合であり、前述のように O_3 濃度の日変化のピークが 13 時～14 時となることによる。また、強日射条件では風速が高くなると O_3 濃度の頭打ち現象が認



第3図 ダイズ群落上のガス濃度及び気象要素の日変化例



第4図 夜間における O_3 濃度と風速の関係



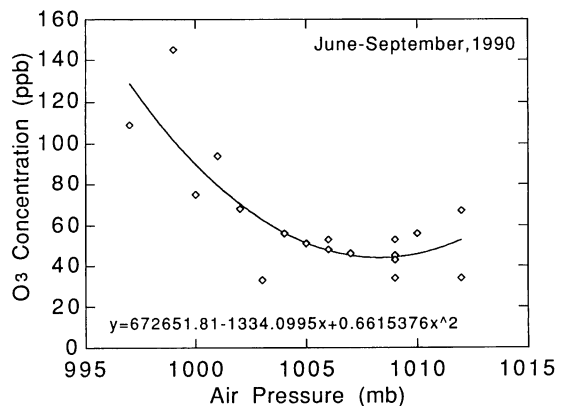
第5図 日中におけるO₃濃度と風速の関係（日射強度別）

められ、強風の場合、拡散により濃度が低下するた
めと考えられる。

観測期間中、日中のO₃濃度値が80ppb以上とな
った日は、日中の平均風速が約2.5m/s以下で、さら
に日射量が15MJ/m²以上の場合であった。しかしこの
条件を満たす日でも、最高50ppb程度までしか上昇し
ない日もあったため、さらに気圧の影響を検討した。
気圧データとしては筑波大学水理実験センターで観
測された1時間毎の値を利用した。第6図は、6月
から9月までの日最高O₃濃度とその時の気圧との関
係を示したものである。高気圧時には高いO₃濃度は
認められず、1005～1006mb以下のやや低気圧の場合
にO₃濃度が高くなる結果である。

さらに、このような高O₃濃度出現日の気圧配置を
検討した。その例を第7図に示す。O₃濃度の高い日
には、日本列島の東海上に高気圧、西には低気圧が
あり、等圧線は東西に走っていた。日本列島は高気
圧の背面もしくは気圧の谷間にあって、低気圧が進
んでくる時であった。

Reiter (1978) は、ジェット気流を伴う寒冷前線
の後面での急速な沈降により、成層圏O₃が対流圏に
移流し、地表付近で高O₃濃度となることを報告し、
また、Harthornら(1976)は、O₃濃度上昇が寒冷
前線通過後の数日間に高気圧背面で起こっているこ
とを報告している。夏季中緯度の成層圏O₃濃度は150
ppb程度であり(会田, 1982)、本観測で80–150



第6図 ダイズ群落上のO₃濃度と気圧の関係

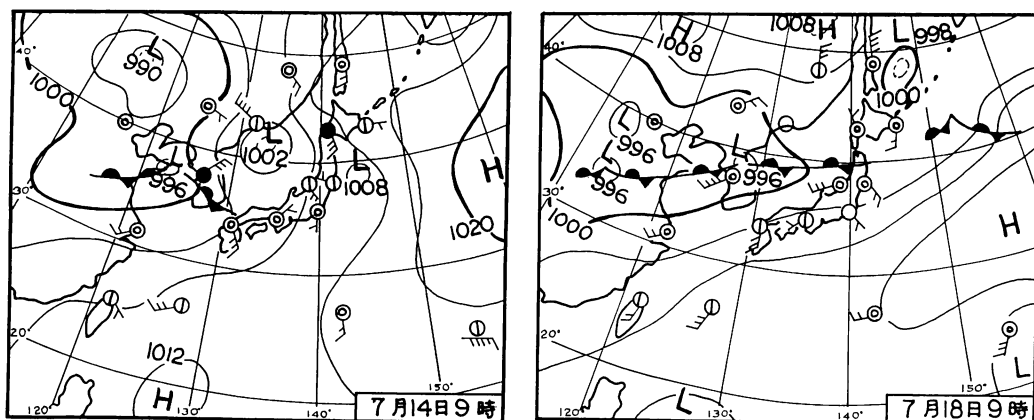
ppbの高濃度O₃が高気圧背面で観測されたことは、
Harthornらに近い結果である。しかし、天気図(第
7図)の風向からは、東京地域から前駆物質が移流
したことによってO₃が生成されたとも考えられ、さ
らに、日射量15 MJ/m²の場合に高濃度となったこと
を考慮すると、筑波地域で観測される高O₃濃度は成
層圏起因というより移流による先駆物質が反応して
生成した2次的大気汚染と考えられる。

3.4 O₃ fluxの日変化、季節変化ならびにCO₂ fluxと の関係

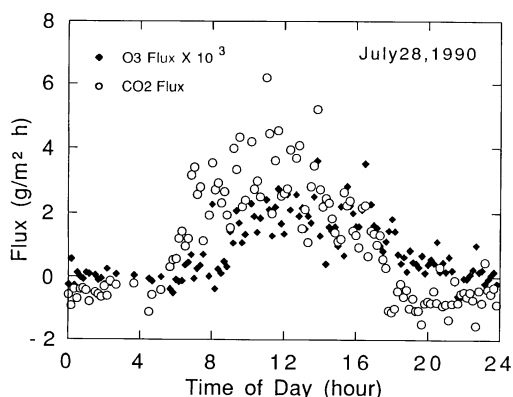
ダイズの光合成活性が高い時期(7月28日)の群落
上のO₃ fluxとCO₂ fluxの日変化例を第8図に示す。
fluxは鉛直下向きの輸送量を正の値として示してい
る。

CO₂ fluxは0時から4時頃まで負の値であり、植
物群落から大気中へCO₂が放出されている。4時を
過ぎると急激に正の値となり、大気から群落へCO₂
が吸収される。日中は11時頃にピークとなった後、
18時頃再び負の値となり、夜間その値を維持する傾
向である。日中のCO₂ fluxの変化は日射強度の日変
化によく対応していることがわかる。

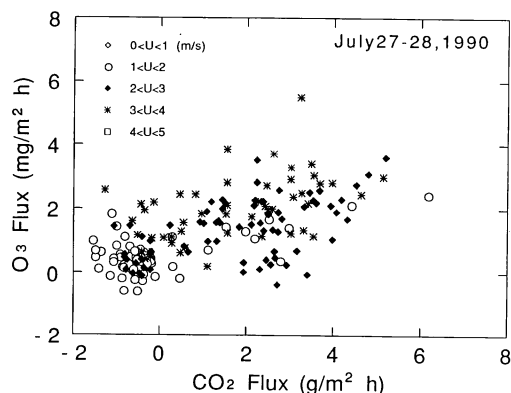
一方O₃ fluxは4時頃までほぼゼロで、4時をすぎ
た頃から下向きのfluxとなり、全体的にはCO₂ flux
と同様の日変化を示している。しかしピークとなる
のは14時頃で、CO₂ fluxが日射最大時刻にピークとな
ることと異なり、O₃濃度が最高値となる時刻とよく



第7図 O₃濃度が高い日の代表的な気圧配置 (1990年)



第8図 ダイズ群落上の O₃flux と CO₂flux の日変化例



第9図 ダイズ群落上における O₃flux と CO₂flux の関係

対応している。

この日の O₃ flux と CO₂flux との関係を第9図に示した。全体としてばらつきがあるが、植物活性の高い時期には、CO₂flux と O₃flux とには弱い比例関係が認められる。このことは、この時期、大気汚染物質のひとつである O₃が、植物の光合成によって CO₂と共に葉内へ吸収されたり、葉表面に吸着されていることを示す例といえる。比例関係が明瞭でないのは O₃濃度の日変化が時間遅れを伴うこと、O₃は植物表面や地表面での吸着や分解があることによると考える。

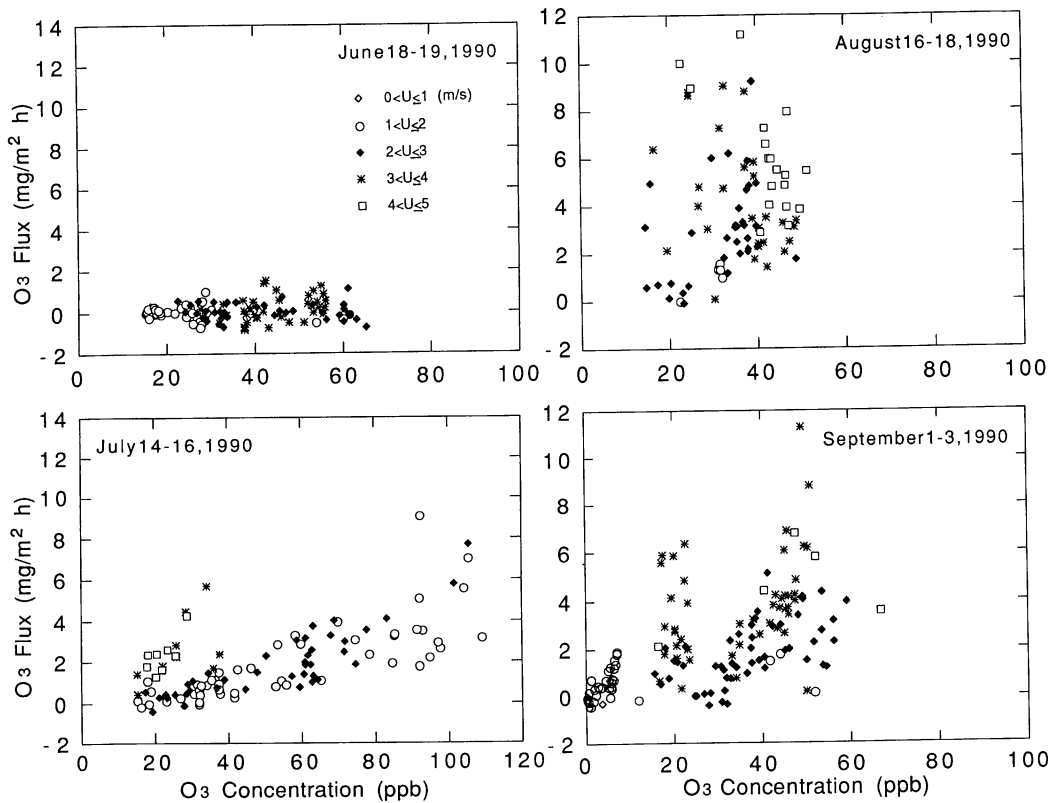
そこで次に O₃flux と気象条件の関係を検討する。

3.5 O₃flux と気象条件

ダイズの生長に伴う O₃flux と O₃濃度、風速との関係を第10図に示す。

群落としての密度が小さい6月には、日中の O₃濃度は約60ppbで、日射強度は十分であったが、濃度や風速に対して O₃flux はほとんど変化せず、ほぼゼロの状態である。

植物の活性が高くなると(7月以後)、O₃濃度の増加に伴って O₃flux が大きくなり、その増加率は、風速が強くなるほど大きい傾向が認められる。7月の例は、O₃濃度が非常に高く100ppb以上となり O₃flux も増大し、両者の関係が明瞭である。8月の例では、O₃濃度は60ppm未満であるが flux が大きい。この場



第10図 ダイズ群落上の O_3 flux と O_3 濃度との関係

合は風速が強いことが、大きい O_3 flux に影響している。しかし、風速がほぼ同じ場合についてみると、濃度と flux の関係は明瞭ではなく、高風速条件では O_3 濃度が低下することによるとみられる。9月の O_3 flux には風速依存性が見られるが、濃度の影響も顕著になっており、季節により O_3 flux と気象条件の影響の度合が変化している。

すでに述べたように光合成活性の高い時期には、 O_3 flux と CO_2 flux の間に弱い比例関係が認められ、 O_3 flux も植物の光合成に依存した吸収が明らかとなっている。6月に O_3 flux が全体的に小さかった主な原因は、植物群落が小さく、粗度としての役割が小さかったことと、葉面積が小さいことにより吸収能力が低かったことによると考えられる。

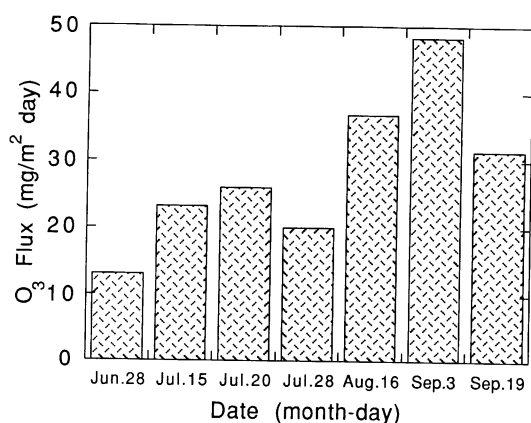
O_3 flux, CO_2 flux の季節的变化を検討するために各測定毎の代表的な日について日積算値を比較した。

これを第11, 12図に示す。 CO_2 flux は植物の生長に伴って増加し、7月下旬に最大となった後、減少している。これに比べ O_3 flux は CO_2 flux が減少している8月以後も増加しており、 O_3 flux は植物の光合成などの生理活性以外の要因でも生じていることがわかる。

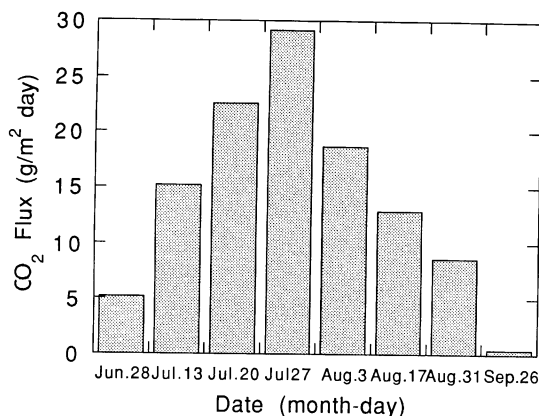
湿度や気温は日射に伴う日変化を示し、一方 O_3 flux は風速や日射強度に依存した変化を示した。このため湿度・気温と O_3 flux との関係を独立に明らかにすることはできなかった。

IV ダイズ群落上の O_3 flux の特徴

6月中旬の O_3 flux が気象条件や O_3 濃度と関係なく変化しなかったのは、植物が小さく光合成量が少なかったことと、群落の粗度としての機能も低いためと考える。



第11図 ダイズ群落上の O₃flux 日積算値の季節的变化



第12図 ダイズ群落上の CO₂flux 日積算値の季節的变化

植物が生長し、葉面積が増加すると植被面が均一になり、群落内部への乱流輸送は抑制される。しかし、葉面積の増大など植物自体の増大によりガス交換能力は高くなっており、大気中から群落表面までの CO₂、O₃ の輸送は制限されないことから、ガス flux の増加は葉面積の増大に伴うものであることがわかる。

落葉が認められるようになった8月以後は、光合成による CO₂flux が低下し、9月下旬にはほとんど認められていない。CO₂flux は、植物の光合成による吸収や呼吸による放出に起因するものが大部分を占め、植物の老化に伴う光合成活性の低下と呼吸量の増大により、大気-群落間の CO₂flux は低下したと

いえる。

O₃ の場合は、光合成に伴う植物体内への吸収の他に、乱流拡散によって大気から植物群落や地表面へ輸送され、植物や土壌への吸着・崩壊もある。またダイズの光合成機能は低下していても、蒸散機能はそれほど低下せず気孔は開いていることが考えられ(矢吹, 1985), CO₂flux がほとんどない場合にも、O₃ は気孔を経由して植物体内に取り込まれる状態がありうる。このようなことから、落葉などによって群落内部まで気流が侵入するようになった8月以後も、O₃flux がそれほど低下しなかったと考えられる。

O₃flux と気象条件との関係の中では、日射強度に対する依存性より、風速に対する依存性がより高かったことから、O₃flux は植物の光合成による積極的な吸収も重要であるが、群落上の乱流輸送による吸着の寄与も相当大きいと考えられ、群落の形状やその表面粗度の影響も大きいと考えられる。

V まとめ

本研究では、植物群落境界層における O₃flux が気象条件にどのように影響されるかを明らかにすることを目的とした。農業環境技術研究所のダイズ圃場を対象として、1990年6月から9月まで、ガス濃度や風速の鉛直分布等の微気象要素の観測を行った。傾度法により、群落上の O₃flux・CO₂flux を求め、気象要素との関係を解析した。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 群落上の O₃濃度は日射強度の増大に伴って増加した。風速が 3 m/s 以下で日射量が 15 MJ/m² 以上の場合に 80 ppb を越えることが多く、特に高気圧通過後の気圧 1005~1006 mb の場合に高 O₃濃度となった。

(2) 夜間の O₃濃度は風速が約 1 m/s 以上で急激に増加し、約 2.5 m/s 以上では約 30 ppb の一定値に収束した。この濃度は関東地域におけるバックグラウンド濃度と判断された。

(3) 群落上の O₃flux は、O₃濃度・風速の増加に伴って増大した。O₃濃度は日射強度にほぼ比例したため、日射強度と O₃flux との関係は風速や O₃濃度ほど顕著でなかった。

(4) O₃flux は、植物の光合成活性が高い時は、

CO₂ flux と弱い比例関係が認められ、光合成に伴って O₃ が吸収された。

(5) O₃ flux は植物の光合成活性が低下した時期にも、群落境界層内の乱流拡散によって促進され、風速との関係が強く認められた。

(6) 湿度や気温は、日射強度に伴った日変化をするため、flux との関係は日射強度に準じた変化となり、湿度・気温と O₃ flux との関係を明確に把握することはできなかった。

本研究には環境庁公害防止研究「広域大気汚染」ならびに科学技術庁地球科学技術特定調査研究「地球温暖化」による研究費を使用した。また、本研究における気圧データは筑波大学水理実験センターの観測値を利用させて頂いた。解析においては小林和彦主任研究官ほか農業環境技術研究所気象管理科の研究員の方々の協力を頂いた。ダイズ圃場の管理やサンプリングでは、同研究所業務科職員の方々にお世話になった。さらに、筑波大学学群生の瀬戸陽子さんにも手伝って頂いた。これらの方々に感謝致します。

文 献

- 会田 勝 (1982) : 『大気と放射過程』, 東京堂出版, 東京, 280p.
- 青木正敏・戸塚績・鈴木義則・森岡進 (1987) : 緑地の大気汚染浄化能, 国立公害研究所研究報告, No.108, 41-51.
- 荒木真之・佐々木長儀・本木茂・岡上正夫 (1983) : オゾン濃度減衰に及ぼす樹林の効果, 林業試験場研究報告, No.321, 51-87.
- 新編農業気象ハンドブック編集委員会 (1975) : 『農業気象ハンドブック』, 養賢堂, 東京, 854p.
- 戸塚 績 (1986) : 植物の大気環境浄化機能に関する研究, 国立公害研究所研究発表会予稿集, 17-25.
- 原藺芳信・大政謙次 (1987) : 大気と植物のガス交換, 国立公害研究所研究報告, No.108, 53-72.
- 原藺芳信 (1989) : 作物群落におけるガス輸送, 大気汚染と農業生態系に関する研究会資料集, 32-45.
- 原藺芳信・林 陽生・那須野正明・鳥谷 均 (1989) : 群落外環境の変化に対する赤松群落の動的応答2. 赤松群落の乱流輸送に関する空気力学的パラメータの特徴, 筑波大学水理実験センター報告, No.13, 105-112.
- 原藺芳信・村上智美・及川武久 (1990) : 気流変化と水稻およびアカマツ群落との相互作用1. 植物群落構造の差異がフラックスや群落抵抗係数に及ぼす影響, 筑波大学水理実験センター報告, No.14, 1-14.
- 原藺芳信・山田千絵・西沢利栄 (1991) : ダイズ群落上の乱流輸送特性, 筑波大学水理実験センター報告, No.16, 13-25.
- 古川昭雄・佐々木美緒子・森田茂廣 (1985) : 植物群落によるオゾンの吸収, 国立公害研究所研究報告, No.82, 123-136.
- 溝口次夫 (1986) : グローバルスケールにおける対流圏オゾンの動態, 国立公害研究所研究報告, No.102, 79-92.
- 溝口次夫・光本茂記・西川雅高・功刀正行 (1989a) : 日本列島のバックグラウンドオゾン濃度とその変動, 国立公害研究所研究報告, No.123, 99-120.
- 溝口次夫・光本茂記・西川雅高・大前利隆 (1989b) : 対流圏下層オゾンの長距離輸送, 国立公害研究所研究報告, No.123, 221-236.
- 村上智美・原藺芳信・川村隆一・西沢利栄 (1990) : 気流変化と水稻およびアカマツ群落との相互作用2. 植物の揺らぎと群落上の乱流輸送特性への影響, 筑波大学水理実験センター報告, No.14, 15-29.
- 矢吹万寿 (1985) : 『植物の動的環境』, 朝倉書店, 東京, 200p.
- Bennett, J. H. and A.C.Hill (1973) : Absorption of gaseous pollutants by a standardized canopy. *J. Air Pollut. Cont. Assoc.*, **23**, 203-206.
- Harthorn, J. W. and H. M. Warker (1976) : A "TEXUS SIZE" ozone episode tracked to its source. *Proc. Int. Conf. on Photochemical Oxidant Pollution and its control*, EPA Report No. EPA-600/3-77-001A.
- Hill, A. C. (1971) : Vegetation : A sink for atmospheric pollutants. *J. Air Pollut. Cont. Assoc.*, **21**, 341-346.
- Jones, H. G. (1983) : *Plants and Microclimate*. Cambridge University Press, Cambridge, 323p.
- Monteith, J. L. (1990) : *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, London, 291p.
- Reiter, E. R. (1978) : Impact of stratospheric ozone on tropospheric concentrations. *American Society*

for Testing and Materials, 506–519.

Thom, A. S. (1971) : Momentum, mass and heat
exchang of plant communities, in *Vegetation and*

the atmosphere, ed. by J.L.Monteith, Academic
Press, London, 57–109.