

C-062 東アジアの植生に対するオゾン濃度上昇のリスク評価と農作物への影響予測に関する研究

(1) 植生へのオゾン沈着量の観測

独立行政法人農業環境技術研究所

大気環境研究領域

宮田明

〈研究協力者〉

農業環境技術研究所

間野正美

中国科学院 土壤科学研究所 ZHU Jianguo

平成18～20年度合計予算額 25,048千円

(うち、平成20年度予算額 7,160千円)

上記の合計予算額には、間接経費5,781千円を含む

[要旨] 東アジアでは、窒素酸化物等の放出量増大にともなう地表オゾン濃度の上昇により、自然植生や農作物への悪影響が予測される。本サブテーマでは、オゾン吸収量に基づく植生への影響評価が必要とされる東アジアの代表的な植生へのオゾン沈着量を実測し、沈着速度のパラメタリゼーションやプロセスモデルの開発に必要なデータを取得することを目的とした。このため、揚子江下流域に位置する中国江蘇省江都市郊外のイネ、コムギ二毛作地帯で、2007年と2008年の両年、オゾンフラックスの観測を実施した。昼間のオゾン濃度は3月頃から徐々に上昇し、コムギの収穫期にあたる5月下旬と、イネの生育期間前半にあたり年最高気温が記録された7月に、100 ppbを越える高濃度が出現した。年間を通じて、オゾン濃度は14時から16時頃に極大、6時頃に極小となる明瞭な日変化を示し、オゾンの沈着フラックスは12時頃を中心とする緩やかな極大値を示した。イネの生育期間のオゾン沈着速度は植物の成長にともなう季節変化を示し、湛水直後は日平均値で 0.05cm s^{-1} と観測期間中の最小値を示したが、イネの成長とともに日中の沈着速度が増加し、登熟期には日最大値が約 0.8cm s^{-1} に達した。一方、コムギの出穂期から登熟期の沈着速度の日最大値は $0.5\sim 0.6\text{cm s}^{-1}$ であり、コムギの収穫後にも非生物過程により収穫期に匹敵する沈着速度が観測された。昼夜の群落コンダクタンスの違いから推定した気孔によるオゾン吸収量の全沈着量に対する割合は、2007年のコムギの生育期間後半(出穂～収穫)は66%であり、2008年のイネの生育期間については、前半(移植～出穂)の方が後半よりも気孔による吸収の割合が高く、生育期間全体では59%であった。2008年のイネの全生育期間のオゾン吸収量は約 19mmol m^{-2} で、その55%は移植から出穂期までに吸収されたと推定される。以上のように、本研究により、コムギの生育期間後半と、これまで観測データが不足していたイネの全生育期間にわたるオゾンフラックスの実測値や、沈着速度のパラメタリゼーションに必要なデータが得られた。

[キーワード] オゾン、フラックス、沈着速度、イネ、コムギ

1. はじめに

東アジアでは、窒素酸化物等の放出量の増大にともなう地表オゾン濃度の上昇により、今後、自然植生や農作物が大きな影響を受ける可能性がある。オゾン濃度の上昇による植生への影響の評

価は、従来、植生周辺のオゾン濃度と農作物収量との関係を実験的に求める方法で行われてきたが、近年、ヨーロッパでは植生によるオゾン吸収量に基づく影響評価に移行しつつある。オゾン吸収量に基づく影響評価のためには、植生へのオゾンの沈着過程を観測とモデルにより解明することが必要である。本サブテーマではこのうちの観測を担当する。すなわち、東アジアの代表的な植生を対象とするフィールド観測により、植生へのオゾン沈着量を把握するとともに、サブテーマ（2）が担当するオゾン沈着プロセスモデルの検証や改良に必要な実測データを取得する。

2. 研究目的

東アジアを代表する農作物地帯であり、オゾン濃度上昇による悪影響が予想される中国揚子江下流域のイネ・コムギ二毛作地帯で、フラックス観測の通年観測によって自然条件下でのオゾン沈着量の実測値を得る。イネ、コムギ群落へのオゾンの沈着速度の日変化、季節変化や、気象要素や群落構造との関係を明らかにし、プロセスモデルの検証・改良に必要なデータを提供する。

3. 研究方法

（1）観測点

中国揚子江下流域に位置する江蘇省江都（Jiangu）市郊外の農家圃場（北緯32° 35' 54.4"、東経119° 42' 24.9"、標高5m）に、オゾンフラックスの観測点（以下ではJND観測点）を設置した（図1）。JND観測点は、サブテーマ（5）で開放系オゾン暴露実験を実施中の圃場から直線距離で約1kmの位置にあり、周辺にはイネ・コムギの二毛作地帯が広がっている。気候帯は温帯湿潤気候（Cfa）に属し、年平均気温は2007年が15.9°C、2008年は15.1°Cであった。土壌はAquic Cambosols（Chinese Soil Taxonomy）に分類され、土性はSandy loam、容積重1.21 g cm⁻³、pHは7.1である（2007年のコムギ収穫後に調査）。



図1 中国江蘇省江都のオゾンフラックス観測点（JND観測点）の状況（2007年8月）

JND観測点の耕種概要を表1に示す。圃場では、この地域の慣行に従って、6月中旬にイネ（*Oryza Sativa*）の播種（十分な土壤水分を与えて直播、2008年は移植）、10月下旬に収穫が行われ、10月下旬～11月上旬にコムギ（*Triticum aestivum*）の播種、5月末～6月上旬に収穫が行われた。このように、二毛作田として管理されているJND観測点では非耕作期間は年間で1ヶ月足らずであり、イネやコムギの播種から出芽までの日数を除いても、植物の生育期間は10ヶ月以上の長期に及ぶ。イネの生育期間中は収穫の約1ヶ月前まで断続的に灌漑が行われ、最大湛水深は約6cmであった。イネ、コムギとも、収穫作業はコンバインで行われ、穂部は収穫物として圃場外に搬出された。茎葉部は地上約0.2mの高さで切断され、圃場で約1週間乾燥された後にその多くが焼却され、残りは刈り株とともに土中に鋤込まれた。

表1 JND観測点の圃場の耕種概要（括弧内は1月1日からの通日）

作期	2006-2007年	2007年	2007-2008年	2008年
	コムギ	イネ	コムギ	イネ
耕起日	2006/10/27(300)	2007/6/08(159)	2007/11/7(311)	2008/6/9(161)
播種（移植）日	2006/10/28(301)	2007/06/8(159)	2007/11/10(314)	2008/6/19(171)
品種	Yangmai11	Huai68	Yangmai16	WJM21
元肥（N:P:K, kg/ha）	45: 45: 45	なし	40: 40: 40	47: 47: 47
追肥（N:P:K, kg/ha）	135: 0: 0	230: 45: 45	124: 0: 0	117: 46: 46
出芽日	2006年11月中旬	2007/6/18(169)	2007年11月下旬	-
出穂日	2007/04/21(111)	2007年8月下旬	2008/4/26(117)	2008/08/22(235)
収穫日	2007/05/30(150)	2007/10/28(301)	2007/6/3(155)	2008/10/18(292)
収穫量（kg/ha）	5,700	7,875	6,000	7,500
収穫残渣処理日	2007/06/07(158)	2007/11/5(309)	2008/6/8(160)	2008/11/2(307)
処理方法	焼却	焼却	焼却	焼却

（2）観測方法

1) オゾンフラックスの測定

JND観測点の測定項目を表2に示す。JND観測点では、2006年12月にオゾン濃度と気象要素、CO₂フラックスの観測を開始し、2007年3月中旬にオゾンフラックスの観測を開始した。近年、CO₂フラックスの測定と同様に、オゾンフラックスの測定にも渦相関法を適用する例が増えている。しかし、本研究では、渦相関法用の応答性の速いオゾン分析計とその現地保守要員の確保が難しいこと、サブテーマ（2）が担当するオゾン沈着モデルの開発用にオゾン濃度の詳細な高度分布（群落内を含む）が必要なことから、ガス濃度の高度分布からガスフラックスを算定する傾度法を用いてオゾンフラックスを決定した。傾度法で必要となる渦拡散係数は、渦相関法で計測した空気力学的諸パラメータ（摩擦速度と大気安定度）から決定した（Miyata et al., 2000）。

植物群落上および群落内の6つの高度から吸引した空気を、テフロン製の電子冷却器（日本アンス製）で露点2°Cに除湿した後、紫外線吸収式オゾン濃度計（ダイレック社製、Model 1150）に導入してオゾン濃度を測定した。サンプリング高度は100秒ごとに切り替え、切り替え後40秒から100秒までの分析計の出力値を平均して、それぞれの高度の濃度とした。6高度の濃度測定を10分間サイクル（100秒×6=600秒）で繰り返し、連続する3サイクルを平均化して30分間平均のオゾンの高度分布とした。同様の方法で、CO₂濃度の高度分布も測定した。高さ2.72mと群落上0.2~0.5m（植物の成長にともなって変更）の二つの高度間の濃度勾配を、傾度法によるオゾンフラックスの算定に用いた。なお、本観測では1台のサンプリングポンプを使用して、電磁弁でサンプリング高度を切り替えながら各高度のガス濃度を測定したため、厳密には高度によりサンプリング時刻のずれが生じた。このため、同一高度の隣り合う30分間平均濃度の線形補間を行い、高度によってサンプリング時刻が異なる影響を補正してから傾度法を適用した。

2) オゾンフラックスデータの品質管理

オゾンフラックスデータ（30分値）の品質管理として、傾度法を適用することが困難な夜間の低風速時（摩擦速度が0.05 m s⁻¹未満）、または高さ2.72 mのオゾン濃度が10 ppb未満の条件で得られたオゾンフラックスは、以下の解析から除外した。また、サンプル空気中の水蒸気量の変動

がオゾンフラックスの算定に及ぼす影響を避けるため、オゾンフラックスの算定に用いる2高度のサンプル空気中の水蒸気量が大きく異なる ($>0.5 \text{ mmol mol}^{-1}$) 場合のデータも、以下の解析から除外した(サンプル空気は除湿してからオゾン濃度計に導入したが、電子冷却器を設置した小屋内の気温上昇にともなう除湿効率の低下や、ダストフィルターの汚れにともなうサンプル流量変化により、除湿後のサンプル空気中の水蒸気量が高度によって異なる場合があった)。以上の品質管理を通過したオゾンフラックスデータの割合は、2008年のイネの生育期間全体で50.9%、夜間(6時~18時)は42.8%であった。

2008年8月下旬に、空気吸引用のサンプリングポンプのダイヤフラムが破損し、サンプリング経路内でオゾンの損失が発生していることが確認された。このため、オゾン損失の可能性が疑われる2008年3月までさかのぼって、JND観測点の2.72 mのオゾン濃度を開放系オゾン暴露実験圃場の対照区(オゾンを暴露していない区)の高さ2.0 mのオゾン濃度と比較し、10日ごとに損失率を決定して、JND観測点のオゾン濃度データを補正した(損失率はサンプリング高度によらず同一と仮定した)。この方法で補正したオゾン濃度を用いて算定したオゾンフラックスは、2008年6月以降は妥当な値を示したが、2008年5月以前はコムギの登熟期から収穫期に向けてフラックスが増加するという不自然な季節変化を示しただけでなく、フラックスの絶対値が $50 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に達し、過去のオオムギ畑やコムギ畑での報告(最大 $25\sim 30 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、オゾン濃度はJND観測点と同レベル)(Gerosa et al., 2003, Gerosa et al., 2004)よりも大きな値となった。2008年5月下旬に誘導雷被害を受けてJND観測点のオゾン濃度計が破損し、交換したため、それ以前のオゾン濃度計の状況(感度変化やゼロドリフト)を確認することは困難であるが、2008年5月以前はサンプリングポンプの問題だけではなく、複合的な要因によってオゾン濃度測定が影響を受けていた可能性がある。この問題はなお検討中のため、2008年3月~5月のオゾンフラックスは本報告から除外した。

表2 JND観測点の測定項目

測定項目	測定高度・深度 (m)	測定法・測器
オゾンフラックス	2.88	傾度法
CO ₂ ・水蒸気・顕熱フラックス、摩擦速度、大気安定度	2.88	渦相関法: CSAT3 (Campbell), LI7500 (LICOR)
オゾン濃度の高度分布	0.2, 0.3, 0.6, 0.9, 1.52, 2.72*	Model 1150 (Dylec)
CO ₂ 濃度の高度分布	0.2, 0.3, 0.6, 0.9, 1.52, 2.72*	LI840 (LICOR)
群落内気温・水蒸気圧高度分布	0.1, 0.3, 0.6, 0.9	Cs215Lx (Campbell)
短波放射量(入射、反射)	2.4	CNR1 (Kipp & Zonen)
正味放射量	2.4	同上
光合成有効放射量(入射、反射)	2.28	LI190 (LICOR)
光合成有効放射量(透過)	0.08	LI191 (LICOR)
風向、風速	2.88	CSAT3 (Campbell)
気温、相対湿度	2.8, 1.45	HMP45A (Vaisala)、強制通風
地中熱フラックス	0.01	MF-180M (EKO)
地温	0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4	T型熱電対
水温	0.02, 0.05	T型熱電対
湛水深	-	6521J (STARLOG)
土壌水分量(体積含水率)	0-0.15	ECH010 (ECHO)
大気圧	1.5	PTB101B (Vaisala)
降水量	-	(開放系オゾン暴露実験圃場で測定)

*2007年4月18日現在の測定高度。

3) オゾン沈着に関わるコンダクタンスの決定

オゾンの沈着面でのオゾン濃度をゼロとすると、オゾンフラックス (F_{O_3}) は次式で表わされる。

$$F_{O_3} = V_d [O_3] = G_{tot} [O_3] \quad (1)$$

ここで、 $[O_3]$ はフラックス測定高度のオゾン濃度（本研究では高さ2.72mの濃度を用いた）、 V_d はオゾン沈着速度 (deposition velocity)、 G_{tot} はオゾン沈着に関する総コンダクタンスである。(1)式を用いて、 F_{O_3} と $[O_3]$ の実測値から $V_d = G_{tot}$ が求まる。

電気回路との相似性により、 G_{tot} は図2に示すそれぞれのコンダクタンスの総体として表される。

$$G_{tot} = (G_a^{-1} + G_b^{-1} + G_c^{-1})^{-1} \quad (2)$$

ここで、 G_a は空気力学的コンダクタンス、 G_b は群落境界層コンダクタンス、 G_c は群落コンダクタンスである。このうち、 G_a と G_b は次式で与えられる。

$$G_a = \left[\int_{z_0+d}^{z_m} [1/K_H(z)] dz \right]^{-1} \quad (3)$$

$$G_b = B_{st} u_* \quad (4)$$

ここで、 u_* は摩擦速度、 $K_H(z)$ は高さ z における顕熱輸送に関する渦拡散係数で、 u_* と大気安定度の関数、 z_0 と d は粗度長および地面修正量、 z_m はフラックス測定高度（ここでは、傾度法に用いた2つの高度、 z_1 および z_2 、の幾何平均値 $z_m = \sqrt{(z_1 - d)(z_2 - d)} + d$ とした）、 B_{st} はStanton数 (=1/6.85) である。 G_a と G_b は、(3)、(4)式を用いて気象データから計算できるので、(2)式の残差として G_c を求めることができる。

図2に示すように、 G_c は植物による気孔を通しての吸収、植物体表面への沈着、および土壌面（水面）への沈着という、3つの並列するオゾンの沈着過程に関わるコンダクタンスの総和として、次式で表される。

$$G_c = G_{stom} + G_{cut} + \left(\frac{1}{G_{inc}} + \frac{1}{G_{soil}} \right)^{-1} \quad (5)$$

ここで、 G_{stom} 、 G_{cut} 、 G_{inc} 、 G_{soil} はそれぞれ、気孔コンダクタンス、植物体表面への沈着に関わるコンダクタンス、群落内気層の輸送に関わるコンダクタンス、土壌面への沈着に関わるコンダクタンスである。これらのコンダクタンスは、気象条件、群落構造、土壌水分などの環境条件の影響を受ける (Gerosa et al., 2003)。 G_c を構成する3つのプロセスを分離することにより、オゾンフラックス (オゾンの総沈着量) から気孔を通じたオゾン吸収量を推定することが可能になる。しかし、フィールド観測から(5)式右辺の各コンダクタンスをすべて決定することは困難であり、また既存の文献からも、特に水稻群落の各コンダクタンスに関する十分な情報は得られない。そこで、本研究では簡易的に次の2つの仮定を置いて、 G_c から G_{stom} を分離した。1) 夜間は気孔を通

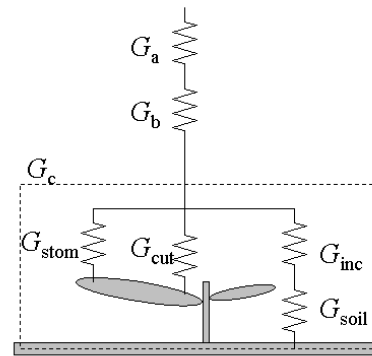


図2 植物群落へのオゾン沈着に関するコンダクタンス。

したオゾン吸収が無視できる ($G_{\text{stom}} = 0$)。2) G_{cut} 、 G_{inc} および G_{soil} の日変化は小さい。なお、実際には G_{inc} は風速の影響を受けて日変化を示す (G_{inc} は u_* に比例するというパラメタリゼーションが採用される場合が多い (Bassin et al., 2004; Emberson et al., 2004) が、その影響は生育期間初期を除いて小さいとして無視した。

4. 結果・考察

(1) オゾン濃度

JND観測点で2007年と2008年に観測されたオゾン濃度の季節変化と気象経過を図3に示す。昼間のオゾン濃度は3月頃から徐々に上昇し、コムギの収穫期にあたる5月下旬には100ppbを越える高濃度が観測された。梅雨期には高濃度オゾンの出現頻度が低下したが、年最高気温が記録された2007年7月末や2008年7月上旬には再び100 ppbを越える高濃度が観測された。なお、これらの高濃度オゾンの出現時期は、日中 (9時から17時まで) の飽差の平均値が2kPaを超える高温で乾燥した日が多かった。

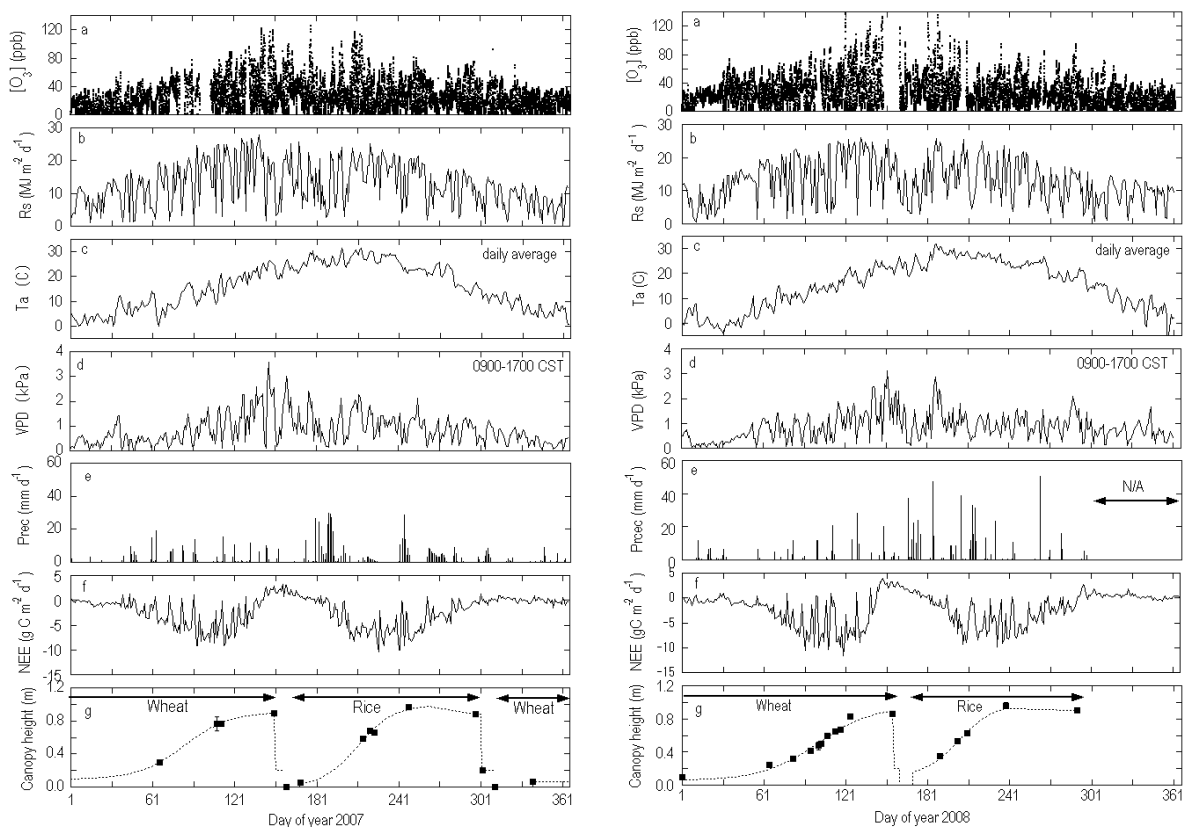


図3 JND観測点で2007年 (左図)、2008年 (右図) に観測されたオゾン濃度、気象要素、 CO_2 フラックス、群落高の季節変化。(a)高さ2.72 mのオゾン濃度の30分間平均値、(b)日積算日射量、(c)高さ2.8 mの日平均気温、(d)高さ2.8 mの飽差の9時から17時までの平均値、(e)日降水量、(f)純生態系 CO_2 交換量 (NEE) の日積算値、(g)群落高 (収穫後は切株の高さ)。横軸は1月1日を1とする通日。2007年3月下旬から4月中旬にかけて、および2008年5月下旬から6月上旬にかけては、誘導雷による測器破損のためオゾン濃度は欠測。2008年11月以降の降水量のデータは未収集。NEEは負値が下向きフラックスを表す。

純生態系CO₂交換量（NEE、光合成によるCO₂吸収量から植物体呼吸と土壌微生物の有機物分解にともなうCO₂放出量を差し引いた正味のCO₂フラックス）には、イネおよびコムギの成長にともなうCO₂吸収の明瞭なピークが観測された。オゾン濃度とNEEの季節変化を比較すると、JND観測点では、コムギは光合成によるCO₂吸収が最大となる時期以降（出穂期から登熟期）に高濃度オゾンに遭遇し、特に100ppbを超えるオゾン濃度は収穫時期が近づき、コムギの光合成活性が低下してから出現するのに対して、イネはその生育前半の植物の光合成によるCO₂吸収が増加しつつある時期に、高濃度オゾンに遭遇することがわかる。

次に、2008年のイネの生育期間を約15日間毎に区切り、各期間のオゾン濃度の平均的な日変化を求めた（図4）。オゾン濃度は時期によらず、15時から16時頃に極大値、6時頃に極小値をもつ明瞭な日変化を示した。すなわち、一般に午前に比べて大気飽差が増大し、植物の気孔が閉じ気味となる午後にオゾンの高濃度が出現した。夜間のオゾン濃度は早朝にゼロ付近まで低下する場合が多かった。これは、JND観測点ではイネの生育期間は夜間の風速（高さ2.88 mで測定）が1.0 m s⁻¹以下まで低下することが多く、接地境界層内の空気の上下混合が抑制された条件下で、非生物過程（植物の気孔を通さない過程）での地表面へのオゾン沈着が継続したためと考えられる。2008年6月下旬（DOY 171-180）は風速が高い夜間が多かったため、夜間のオゾン濃度は他の時期に比べて高かった。2007年のコムギの生育期間後半のオゾン濃度も、イネの生育期間と同様の日変化パターンを示した（図は省略）。

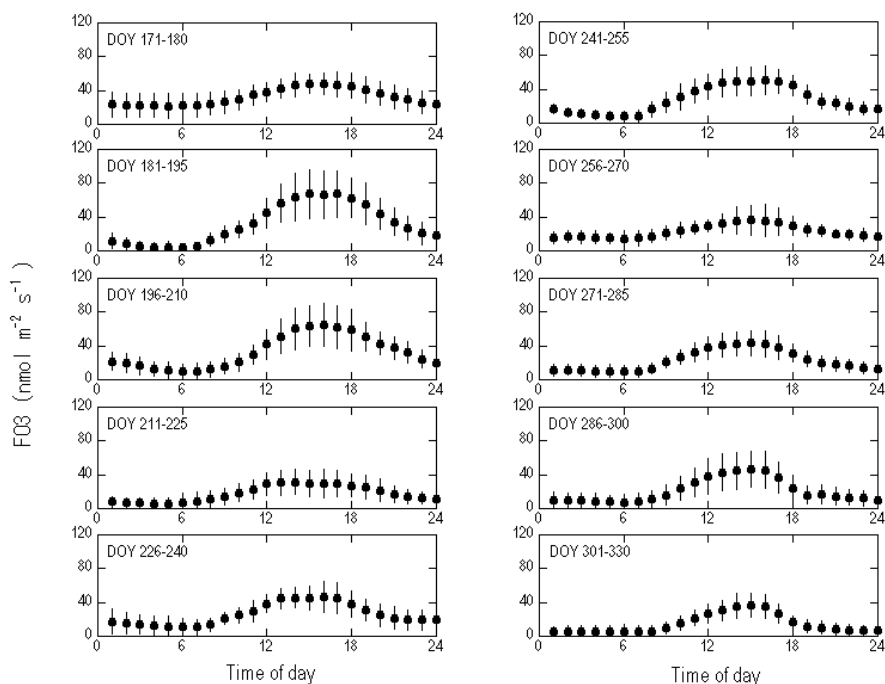


図4 高さ2.72mのオゾン濃度の日変化。2008年のイネの生育期間について、ほぼ15日間ごとに各時刻のオゾン濃度の平均値と標準偏差（エラーバー）を示す。横軸は中国標準時で、1時の値は0時から1時までの平均値を表す。DOY 301-330はイネの収穫後。

(2) オゾンフラックス

オゾンのフラックスの季節変化を、CO₂フラックスの季節変化と対比させて図5に示す。CO₂フラックスとしては、ここでは光合成にともなうCO₂吸収量（総光合成量、GPP）を示した。GPPは、渦相関法で測定される正味のCO₂フラックス（NEE）から、FLUXNETで一般に採用されている光合成・呼吸分離法（インターネット公開ツール、<http://gaia.agraria.unitus.it/database/eddyproc/>）を用いて算定した。GPPは兩年とも、コムギ、イネの成長とともに徐々に増加し、出穂期（コムギが4月下旬、イネは8月下旬）頃に最大値に達し、その後は減少するという明瞭な季節変化を示した（図5a）。オゾンフラックスについては、コムギの生育期間は欠測期間（および品質管理による除外区間）が長いので季節変化の全貌は把握しにくい、イネの生育期間はイネの成長にともなう明瞭な季節変化が観測された（図5b）。オゾンの沈着には非生物過程も関与するので、オゾンフラックスのピークはGPPよりやや遅れて出現し、イネの収穫後も日中は10 nmol m⁻² s⁻¹程度の沈着が継続した。北イタリアのオオムギ畑でも、収穫後の圃場で10nmol m⁻² s⁻¹を越えるオゾンの沈着フラックスが報告されている（Gerosa et al., 2004）。

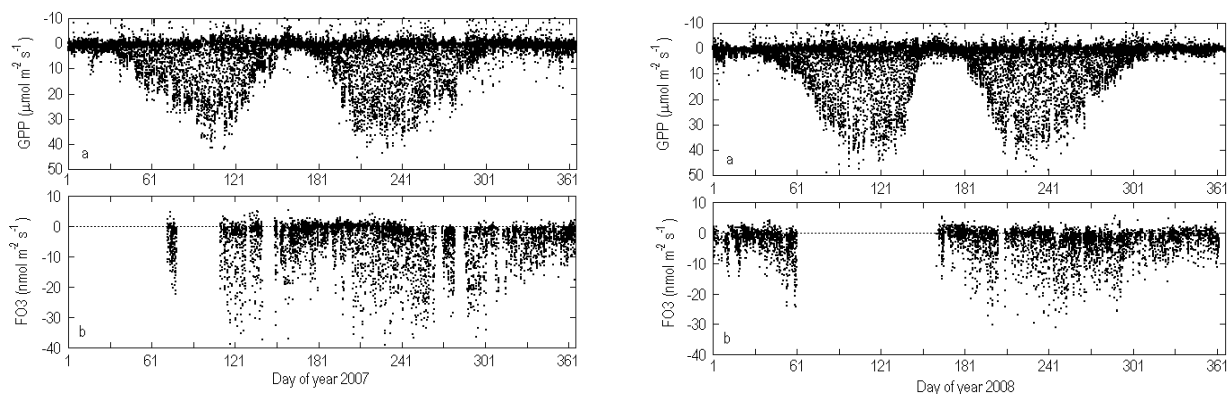


図5 JND観測点で2007年（左図）と2008年（右図）に観測されたCO₂フラックスとオゾンフラックスの30分値の季節変化。(a)総光合成量(GPP、縦軸を上下反転して示す)、(b)オゾンフラックス。オゾンフラックスの負値は地表面への沈着を表す。

2008年のイネの生育期間について、15日間平均のオゾンフラックスの日変化を図6に示す。オゾンの沈着フラックスは、昼間は午後の早い時間帯に緩やかな極大値を、また夜間はゼロに近い小さな値を示した。水面の占める割合が高いイネの移植直後（DOY 171-180）は、沈着フラックスの日変化が極めて小さく、フラックスの日平均値も観測期間を通じて最小（0.5 nmol m⁻² s⁻¹）となった。イネの生育中期から収穫期にかけては、昼間のフラックスの増加にともなって、フラックスの日変化の振幅も増大した。なお、DOY 211-225に昼間の沈着フラックスが一時的に低下したのは、曇雨天日が多くオゾン濃度が低かったためである（図5参照）。夜間のオゾンフラックスはいずれの期間も小さい値を示したが、登熟期以降（DOY 241以降）はわずかに増加した。DOY 301-330は、イネの収穫直後で圃場に切株や収穫残渣（稲わら）が残されていた期間と、収穫残渣が焼却され、引き続いて耕起やコムギの播種が行われた期間を含む。この期間にも沈着フラックスの日変化がみられたが、これは日中のオゾン濃度の上昇と風速の増加により、非生物過程によるオゾ

ン沈着フラックスが増加したことが原因と考えられる (G_a や G_b は摩擦速度とともに増加する。(3)、(4)式参照)。

2007年のコムギの生育期間後半にも、イネの生育期間と類似したオゾンの日変化が観測されたが、コムギの出穂期 (DOY 110-120) 以降は、オゾン濃度の上昇により日中の沈着フラックスが増加し、その日々変動もイネの生育期間に比べて大きかった (図7)。

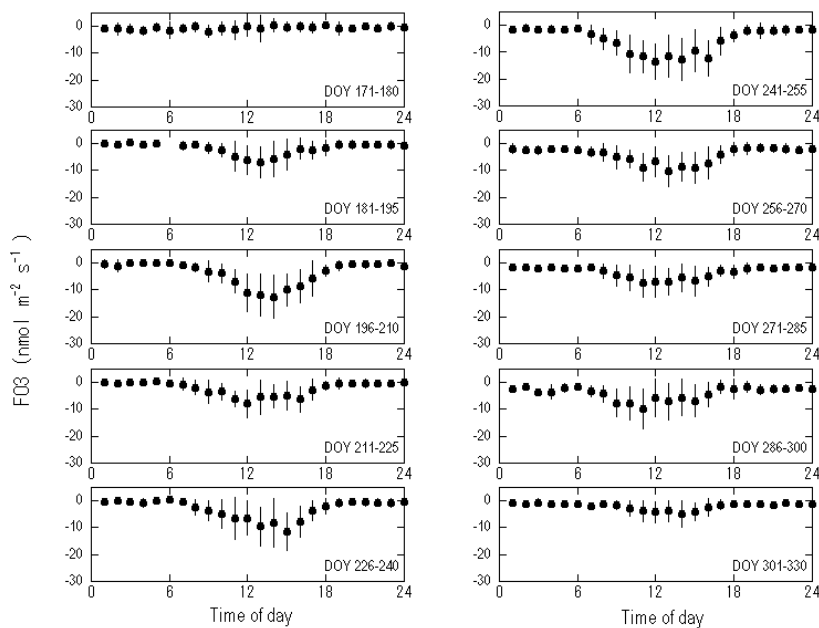


図6 2008年のイネの生育期間のオゾンフラックスの日変化。期間毎に各時刻のフラックスの平均値と標準偏差 (エラーバー) を示す。

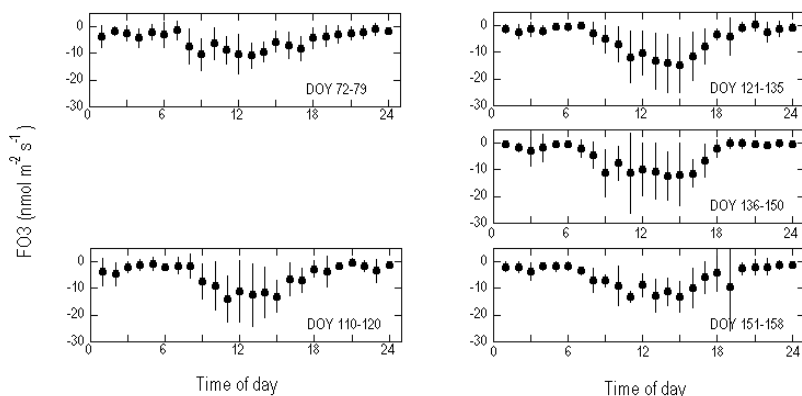


図7 2007年のコムギの生育期間後半のオゾンフラックスの日変化。DOY 80-109は欠測。DOY 151-158はコムギの収穫後で、圃場に麦わらと刈り株が残された期間。

(3) オゾンの沈着速度および群落コンダクタンス

2008年のイネの生育期間と2007年のコムギの生育期間後半について、オゾンの沈着速度 V_d の日変化をそれぞれ図8、図9に示す。一般に群落コンダクタンス G_c は G_a や G_b と比べて一桁小さいため、(2)式において G_c が $G_{tot} = V_d$ の支配要因となっており、 G_c は V_d と同様の日変化を示した (図は省略)。

イネの生育期間の V_d は、湛水直後 (図8のDOY 171-180) は小さな値を示し、その日平均値は 0.05 cm s^{-1} であった (対応する G_c は 0.08 cm s^{-1})。この期間は植物 (イネ) への沈着量は小さく、 $G_c \approx G_{soil}$ と考えられる。実際に、上記の G_c の値は湿った土壌面での G_{soil} の文献値 ($0.09 \sim 0.33 \text{ cm s}^{-1}$) (Massman, 2004) の下限値とほぼ等しかった。 V_d はイネの成長とともに増加し、登熟期 (図8のDOY 241-255およびDOY 256-270) には最大値が約 0.8 cm s^{-1} に達し、その後はやや減少した。

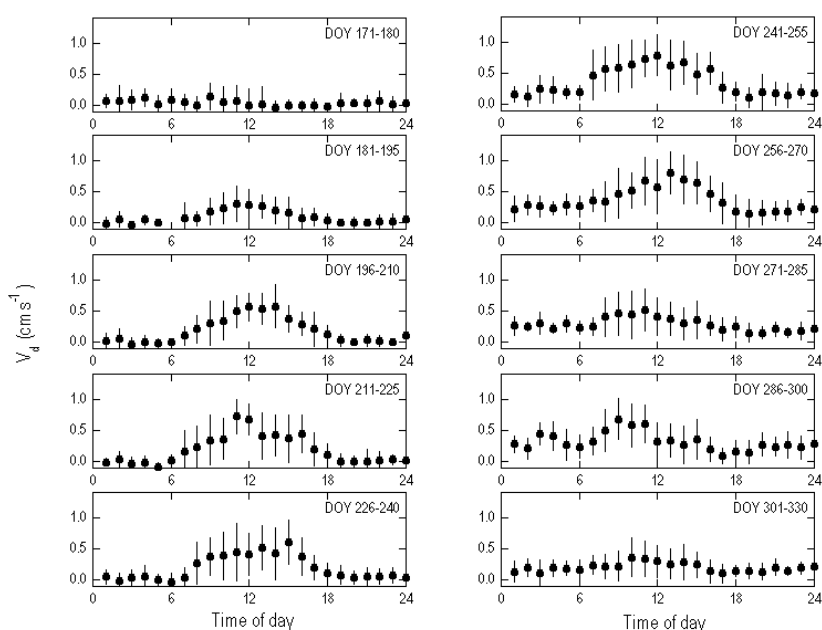


図8 2008年のイネの生育期間のオゾンの沈着速度の日変化。

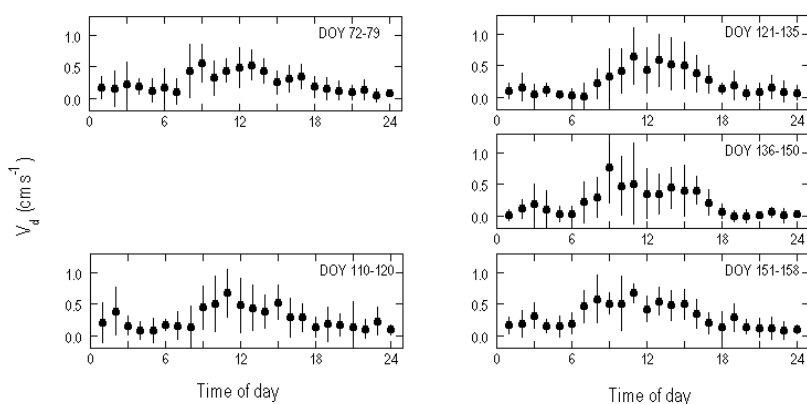


図9 2007年のコムギの生育期間後半のオゾンの沈着速度の日変化。期間毎に計算した各時刻の沈着速度の平均値と標準偏差 (エラーバー) を示す。

コムギの生育期間後半の V_d は、10時から12時頃に極大となる日変化を示した。コムギの出穂期から登熟期（図9のDOY 110-120およびDOY 121-135）の V_d の日最大値は $0.5\sim 0.6\text{ cm s}^{-1}$ であり、Gerosa et al. (2004)による北イタリアのオオムギ畑での観測値（ $0.6\sim 0.8\text{ cm s}^{-1}$ ）よりもやや小さかった。コムギの収穫後（DOY 151-158）の圃場に麦わらと刈り株が残された期間（DOY 151-158）にも、日中は収穫期に匹敵する V_d が観測された（非生物過程による沈着）。

(4) 気孔を通したオゾンの吸収フラックスの推定

2008年のイネの生育期間について、昼間と夜間との G_c の差から G_{stom} を推定し、オゾンの全フラックス（ F_{O_3} ）を気孔を通した吸収フラックス（ F_{ST} ）とその他の沈着フラックスに分離した結果を図10に示す。 F_{ST} の F_{O_3} に対する割合（図10b）は、イネの生育期間前半（DOY 181-240）には80%を超える高い比率を占めた。これは、葉面積指数（LAI）が低いため G_{cut} が小さかったことにくわえて、地面が湛水状態で G_{soil} が小さく、 G_{stom} が相対的に大きくなったことによる。 F_{ST} の F_{O_3} に対する割合は、イネの登熟期（DOY 241-270）には約60%、収穫期には約30%まで低下した。イネの生育期間後半に F_{ST} の割合が低下したのは、昼間の G_c の低下と夜間の G_c （すなわち非生物過程によるコンダクタンス）が増大した結果であり、9月下旬以降は圃場が落水され G_{soil} が増大したことも一因と考えられる。前述のように、 F_{O_3} と総光合成量（GPP）の季節変化には位相のずれが見られた（図5）が、ともに気孔を通したガス交換に関わるフラックスである F_{ST} とGPPは類似した季節変化を示した（図10c、10d）。

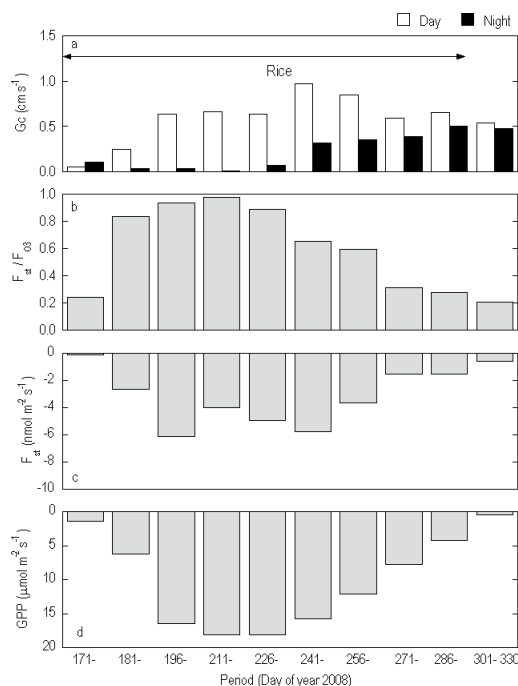


図10 2008年のイネの生育期間の群落コンダクタンスおよび気孔によるオゾンの吸収フラックスの季節変化。(a)群落コンダクタンス（ G_c ）の昼間（6時～18時）および夜間（18時～6時）平均値、(b)気孔を通したオゾンの吸収フラックス（ F_{ST} ）の全フラックス（ F_{O_3} ）に対する割合、(c) F_{ST} の昼間平均値、および(d)総光合成速度(GPP)の昼間平均値。

2007年のコムギの生育期間後半からイネの生育期間について、同じ方法で F_{ST} を推定した結果を図11に示す。イネの生育期間については、2008年とほぼ同様の結果が得られた。コムギの生育期間後半について、 F_{ST} の F_{O_3} に対する割合はコムギの出穂期 (DOY 110-120) には53%、登熟期 (DOY 121-150) には70~73%であった (図11b)。この値を、北イタリアのコムギ畑やオオムギ畑での開花期から収穫期にかけての平均値 (コムギ畑では59.7%、オオムギ畑では51.4%) (Gerosa et al., 2004) と比較すると、出穂期は同程度の値であったが、収穫期の値はやや高かった。

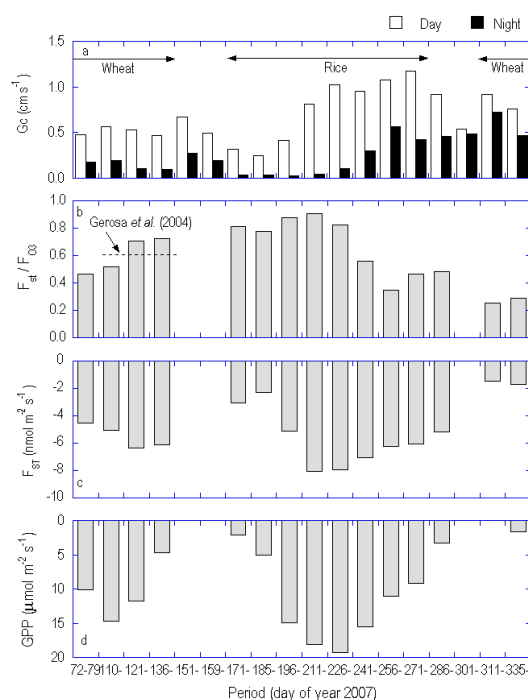


図11 2007年のコムギの生育期間後半からイネの生育期間の群落コンダクタンスおよび気孔によるオゾンの吸収フラックスの季節変化。

表3 2008年のイネの生育期間および2007年のコムギの生育期間後半のオゾン沈着量

期間	日数	全沈着量 (mmol m ⁻²)	気孔を通じた吸 収量 (mmol m ⁻²)	気孔を通じた吸 収の割合 (%)
イネ 2008年				
移植～出穂	65	12.5	10.5	83.6
出穂～収穫	57	19.9	8.6	43.2
移植～収穫	122	32.5	19.1	58.8
コムギ 2007年				
出穂～収穫	40	15.5	10.3	66.2

図10、図11の結果を用いて、2008年のイネの生育期間と2007年のコムギの生育期間後半のオゾン沈着量を計算した結果を表3に示す。2007年のコムギの生育期間後半 (出穂～収穫) における気孔を通じた吸収量とその全沈着量に対する割合は、北イタリアのコムギ畑での結果 (9.2 mmol m⁻², 59.7%) (Gerosa et al., 2004) と同程度の値であった。2008年のイネについては、全沈着量は

生育期間後半（出穂～収穫）の方が多かったが、生育期間前半（移植～出穂）の気孔を通じた吸収の割合が高かったため、気孔を通じたオゾンの吸収量は生育期間の前半の方がやや多く、生育期間全体の55%を占めた（ただし、1日当たりの吸収量で比較すると、前半と後半はほぼ同じ）。

本研究で採用した F_{ST} の分離方法は、夜間のオゾンフラックスのデータの精度に強く依存する。夜間は昼間に比べて風速が低く、オゾン濃度も低下するため、傾度法によるフラックスの測定にとっては厳しい条件となる。実際に、本研究でもデータ処理における品質管理の段階で、6割近い夜間のオゾンフラックスデータが棄却された（2008年のイネの生育期間の例）。 F_{ST} の推定精度の向上のためには、1) 渦相関法をオゾンに適用して、夜間のオゾンフラックスの測定値の信頼性を向上させる、2) 群落上でのフラックス測定と地面（水面）蒸発量や土壌呼吸量の測定を組み合わせ、水蒸気またはCO₂に関する気孔コンダクタンス G_{stom} を求めることにより、夜間のオゾンフラックスデータを使用せずにオゾンに関する G_{stom} を推定する、の2点が検討課題としてあげられる。

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

東アジアを代表する農作物地帯であり、オゾン濃度上昇による悪影響が予想される中国揚子江下流域のイネ・コムギ二毛作地帯で、オゾンフラックスの観測により、植生へのオゾン沈着に関する諸量の値を実測し、それらの日変化や季節変化を明らかにした。観測上のトラブルのため、コムギ畑を対象とするデータの取得は一部の期間に限定されたが、これまで観測データが不足していた水田については、イネの全生育期間にわたるオゾンフラックスの実測値や、沈着速度のパラメタリゼーションに必要なデータが得られた。オゾン濃度の高度分布などの観測データの一部はサブテーマ（2）のオゾン沈着量のモデル化に活用され、植生によるオゾン吸収量を指標とする農作物のリスク評価に貢献した。

（2）地球環境政策への貢献

プロジェクト課題全体として、想定されるオゾン濃度上昇による東アジア植生への影響評価により、地表オゾン濃度上昇による植生へのリスクに対する注意を喚起し、オゾン前駆物質の排出量削減などの地球環境政策に貢献することを目標としている。本サブテーマでは、東アジアを代表する農作物地帯へのオゾン沈着の実態をフィールド観測で明らかにすることにより、全体目標の達成に寄与した。なお、本サブテーマで得られた観測データは、今後、農業環境技術研究所が運営するインターネット公開型データベース（<http://ecomdb.niaes.affrc.go.jp/>）を通して公開予定である。

6. 引用文献

- Bassin S., Calanca P., Weidinger T., Gerosa G., Fuhrer J. (2004). Modeling seasonal ozone flux to grassland and wheat: model improvement, testing, and application. *Atmospheric Environment* 38, 2349-2359.
- Emberson L.D., Ashmore M.R., Cambridge H.M., Simpson D. Tuovinen J.P. (2004). Modelling stomatal ozone flux across Europe. *Environmental Pollution* 109, 403-413.
- Gerosa G., Cieslik S., Ballarin-Denti A. (2003). Micrometeorological determination of time-integrated stomatal ozone fluxes over wheat: a case study in Northern Italy. *Atmospheric Environment* 37,

777-788.

Gerosa G., Marzuoli R., Cieslik S., Ballarin-Denti A. (2004). Stomatal ozone fluxes over a barley field in Italy. "Effective exposure" as a possible link between exposure- and flux-based approaches. *Atmospheric Environment* 38, 2421-2432.

Massman W.J. (2004). Toward an ozone standard to protect vegetation based on effective dose: a review of deposition resistances and a possible metric. *Atmospheric Environment* 38, 2323-2337.

Miyata A., Leuning R., Denmead O.T., Kim J., Harazono Y. (2000). Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field. *Agric. Forest Meteorol.*, 102, 287-303.

7. 国際共同研究等の状況

中国JND観測点でのオゾンフラックスの観測は、農業環境技術研究所と中国科学院南京土壤研究所とのMOUに基づいて、同研究所の朱建国 (Jianguo Zhu) 教授と共同で実施している。観測で得られたデータのうち、CO₂と水蒸気のフラックス、および気象要素は、AsiaFlux Database (<http://www.asiaflux.net/index.html>) に登録予定である。AsiaFluxは、モンスーンアジアの陸域生態系の炭素・水収支の解明を目的とする国際観測ネットワークであり、IGBP/iLEAPS/FLUXNETの傘下に位置づけられている。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

Oue H., Motohiro S., Inada K., Miyata M., Mano M., Kobayashi K., Zhu J. (2008). Evaluation of ozone uptake by rice canopy with the multi-layer model. *J. Agric. Meteorol.* 64, 223-232.

<その他誌上発表 (査読なし)>

なし

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) 宮田明, 間野正美, 大上博基, 朱建国, 小林和彦 (2008). コムギおよび水稻群落へのオゾン沈着速度の観測. *日本農業気象学会2008年度全国大会*, 下関.
- 2) Miyata A., Mano M., Oue H., Zhu J., Kobayashi K. (2008). Diurnal and seasonal variations of ozone fluxes over rice and wheat field in eastern China. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2008*. Shimonoseki, Japan.
- 3) Mano M., Miyata A., Oue H., Motohiro S., Kobayashi K., Zhu J. (2008). Carbon dioxide exchange over the double cropping field with winter-wheat and summer-rice in China. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2008*. Shimonoseki, Japan.
- 4) Miyata A., Mano M., Oue H., Zhu J., Kobayashi K. (2009). Ozone deposition onto rice and wheat field in eastern China. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2009*. Koriyama, Japan.
- 5) Oue H., Feng Z., Pang J., Miyata A., Mano M., Kobayashi K., Zhu J. (2009). Modeling stomatal conductance and photosynthesis of a flag leaf of wheat under elevated O₃ concentration.

International Symposium on Agricultural Meteorology 2009. Koriyama, Japan, 2009.

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし