

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

(5) 東アジアのオゾン濃度上昇が農作物に及ぼす影響の予測

国立大学法人東京大学 大学院農学生命科学研究科

農学国際専攻 国際植物資源科学研究室	小林和彦
生物・環境工学専攻 生物環境情報工学研究室	大政謙次
(研究協力者) 東京大学 大学院農学生命科学研究科	野内勇
独立行政法人 海洋研究開発機構	滝川雅之
東京大学 大学院農学生命科学研究科	PANG Jing
東京大学 大学院農学生命科学研究科	伊藤真璃子
東京大学 大学院農学生命科学研究科	大澤直也
中国科学院 土壤科学研究所	ZHU Jianguo
中国江蘇省 揚州大学農学院	WANG Yulong
中国江蘇省 揚州大学農学院	YANG Lianxing
中国江蘇省 揚州大学農学院	GUO Wenshan

平成18～20年度 合計予算額 147,381千円

(うち、平成20年度予算額 43,849千円)

上記の合計予算額には、間接経費34,011千円を含む

[要旨] 中国江蘇省江都市近郊で、コムギとイネを対象にした世界最初の開放系オゾン暴露実験を行った。コムギのオゾン暴露期間の日中7時間平均オゾン濃度は、外気区の55 ppb (2007年) / 54 ppb (2008年) に対して、オゾン増加区は73 ppb (2007年) / 66 ppb (2008年) と、ほぼ32 % (2007年) / 23 % (2008年) の濃度上昇であった。オゾン濃度上昇により、コムギの収量は2年間平均で17-27% 減少したが、主な原因は粒重の低下であった。収量へのオゾンの影響に品種間差はなかったが、粒重の低下には品種間差が見られた。イネの実験は、日本型品種1、インド型品種1、ハイブリッド品種2の計4品種で行った。田植え2週間後から成熟期までの日中7時間平均オゾン濃度は、外気区の42 ppb (2007年) / 38 ppb (2008年) に対して、オゾン増加区は52 ppb (2007年) / 47 ppb (2008年) とほぼ23 % の濃度上昇であった。この結果生じた減収に、品種間で弱い有意差が見られ、ハイブリッド品種 (2品種平均で約19%) は有意であったが、通常品種は有意でなかった。品種間差は1穂あたりモミ数の減少で明瞭で、ハイブリッド品種の減少のみが有意であった。このように、開放系実験の結果は従来よりも大きな減収を示し、特にハイブリッド・イネ品種の減収が明らかに大きかった。実験結果に基づいて、2000年から2020年へのオゾン濃度上昇で生じる減収量を見積もったところ、コムギでは中国の生産量が17%、インドの生産量が16%減少するが、日本の生産量減少は2%程度と推定された。これらは、従来方法での見積もり (中国が7%、インドは8%のいずれも減収) よりもかなり大きい。同様に、2000年を基準にした時の2020年のイネの減収は、従来の推定方法では約3%に過ぎないが、開放系実験結果からは、ハイブリッド品種で40%以上、通常品種でも15%以上と推定された。予測されるオゾン濃度上昇が開放系実験処理を上回る

ため、見積もりの信頼度は高くないが、ハイブリッド品種で20%をかなり超える減収が生じる可能性は高い。今後、実験を続けて推定精度を高める一方で、影響軽減対策を急ぐ必要がある。

[キーワード] オゾン、イネ、コムギ、収量、開放系実験

1. はじめに

東アジアでは、窒素酸化物等の放出量増大にともなって地表オゾン濃度が上昇しつつあり、農作物の収量を今後大きく減少させる可能性がある (Wang & Mauzerall, 2004)。ところが、オゾンが農作物に及ぼす影響について、従来ほとんどの研究がアメリカやヨーロッパで行われており、アジアにおける研究蓄積は極めて少ない。イネはアジアで最重要の農作物であり、世界でも3大農作物の1つであるが、鉢植えでなく実際の水田に植えられた植物を使った報告は、今までに世界で1つしかない (Kobayashi et al., 1995)。また、コムギについては、アメリカで行われた実験結果に基づいて、東アジアにおける減収が予測されているが、環境が大きく異なるアジアへの適用には疑問がある。例えば地中海地方は、オゾン濃度がヨーロッパの他の地域よりも高いが、乾燥した気候のため気孔が閉じ気味で、植生へのオゾン吸収量は他地域よりも少ない。農作物への影響は、オゾン濃度よりもオゾン吸収量に依存するので、北ヨーロッパの実験で得たオゾン濃度と減収率の関係を、そのまま南ヨーロッパに適用すれば過大推定になる。オゾンによる農作物の減収は、オゾン吸収量以外にも多くの要因によって変化することが知られており、研究対象地域での圃場実験が必要不可欠である。本研究では、開放系実験によって他の要因の効果も含んだオゾンの影響を観測することにより、ほぼ現実の圃場で生じるオゾンの影響を観測し、その結果に基づいて、近い将来に東アジアで生じるオゾン濃度上昇の影響を見積る。

2. 研究目的

本サブ課題では、他のサブ課題で開発された手法を利用して、オゾン増加程度と減収率の関係を実験的に明らかにし、それを用いてオゾンの影響予測を行おうとする。アジアの農作物としての重要性と、過去の研究の少なさからイネを対象とし、オゾンに対する感受性と農作物としての重要性から、コムギをもう一つの対象とする。これら農作物について、開放系でのオゾン暴露 (オゾンFACE) 実験を実施して、オゾン増加程度と生長・収量の関係を明らかにする。その際、できるだけ広い範囲の品種を用いることで、結果の適用性を高めるとともに、オゾンの影響に品種間で差があるかどうかを明らかにする。

3. 研究方法

2007年と2008年の2年間実験を行った。以下、2007年を基本として、2008年について異なる場合にのみ《》内に記す。

(1) 開放系オゾン暴露実験装置

開放系オゾン暴露実験装置を、中国江蘇省 江都市 小紀鎮の農家圃場 (32° 35'5"N, 119° 42'0"E) に設置した。同圃場では、イネと冬コムギ (あるいはナタネ) の2毛作が1000年以上にわたって行われてきた。圃場の3か所《4か所》に高濃度のオゾンを放出する装置を設置し、オゾン濃度増加区 (E-03) とした。また同じく4か所を外気区 (A-03) とし、オゾンを放出しない以外はE-03区と

同一とした。E-03区からのオゾンの移流の影響を避けるために、各E-03区と他の区とは70 m以上離して設置した。E-03区に置いたオゾン放出装置（以下オゾンリング）は、8本のABSプラスチックパイプを差し渡し14 mの正8角形状に組み合わせたもので、パイプに開けた小孔から、高濃度のオゾンを高速で噴出させる。このオゾンリングを植物群落上約0.5 mに置き、リング中央のオゾン濃度が、外気オゾン濃度の1.5倍《1.6倍》になるよう、午前9時から日没までオゾンを放出した。オゾンは酸素から放電で生成し、高圧空気と混合した後に、大気へ放出する。放出時のオゾン濃度は約5%で、残り95%は酸素であるが、放出量が微小なため、植物群落周辺の酸素濃度に及ぼす影響は無視できる。なお、降雨時やオゾン濃度が20 ppb以下の時は、オゾン放出を止めた。

（2）コムギの開放系オゾン暴露実験

コムギ4品種：Yannong 19（YN19：山東省の強力粉品種）、Yangmai 16（YM16：江蘇省の中力粉品種）、Yangmai 15（YM15：同じく薄力粉品種）、Yangfumai 2（YFM2：同じく薄力粉品種）を用いて実験を行った。播種は2006年11月5日（2007年11月5日）で、25 cm間隔の条播とし、窒素は全量210 kgN ha⁻¹を、基肥6割：分けつ期1割：節間伸長期3割の分施とした。リン酸とカリウムは、90 kg P₂O₅ ha⁻¹及び90 kg K₂O ha⁻¹を、それぞれ基肥5割、節間伸長期5割で分施した。オゾン放出は、2007年4月11日から5月22日まで《2008年3月5日から5月28日まで》行った。開花期は、品種によってやや異なるが4月20日前後、成熟は5月末から6月初めであった。2007年4月11日から5月29日まで《2008年4月10日から5月28日まで》のM7（日中7時間平均オゾン濃度）は、A-03区が54.9 ppb《53.7 ppb》、E-03区が72.6 ppb《66.0 ppb》、また同期間のA0T40（閾値40 ppb以上の1時間平均オゾン濃度の積分値）は、A-03区が7.85 ppm h《7.23 ppm h》、E-03区が14.65 ppm h《13.64 ppm h》であった。E-03区のM7が、A-03区のそれの約1.32倍《1.23倍》に止まったのは、雨天や低オゾン濃度、停電などのために、オゾンを放出しなかった時間があったことによる。

（3）イネの開放系オゾン暴露実験

水稻4品種：Wuyujing 15（WJ15：日本型品種）、Yangdao 6（YD6：インド型品種）、Shanyou 63（SY63：標準的なハイブリッド品種）、Liangyoupeijiu（LYPJ：新しいハイブリッド品種）を用いて実験を行った。2007年5月20日《2008年5月23日》に播種し、同じく6月17日に24株m⁻²の密度で田植えをした。施肥は、窒素全量の200 kgN ha⁻¹を、基肥5割：分けつ期1割：幼穂形成期4割で分施し、リン酸とカリウムはいずれも70 kg ha⁻¹を全量基肥で施用した。田植え後の管理は、地域の慣行に従った。7月1日にオゾンの放出を開始し、その後9月末日まで3か月間のM7（日中7時間平均オゾン濃度）はA-03区の42.3 ppb《38.2 ppb》に対し、E-03区は52.4 ppb《46.9 ppb》と1.24倍《1.23倍》となった。

（4）東アジアのコムギとイネの生産に及ぼすオゾン濃度上昇の影響予測

東アジアのコムギ生産に及ぼす地表オゾン濃度上昇の影響を、開放系オゾン曝露実験結果のスケールアップで推定した。従来の方法では、まずドウスレスポンス関係を確立し、仮想的にオゾンの影響が無い時の収量を推定して、それからの減収量を求めるのに対して、この方法では、現在の農作物収量を基準として、将来オゾン濃度が上昇した時の減収を推定する。現在オゾンがどのくらい影響しているかよりは、今後どのくらい影響するかが實際上重要と考える。開放系オゾ

ン曝露実験の結果は、その答えを直接示しており、従って下記の方法により、2000年を基準とした時の2020年の減収率 RYL_{wheat} を、実験結果から見積もることが可能である。

$$RYL_{wheat} = 1 - \exp(a * (AFst6_{2020} - AFst6_{2000})),$$

$$a = \log(1 - RYL_{FACE}) / (\Delta AFst6_{FACE})$$

ここで、 $AFst6_{2000}$ および $AFst6_{2020}$ はそれぞれ2000年と2020年について、サブ課題3の方法で求めた $AFst6$ （閾値を $6 \text{ n mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ とした止葉によるオゾン吸収量の積分値）、 RYL_{FACE} と $\Delta AFst6_{FACE}$ は、開放系オゾン曝露実験の減収率と $AFst6$ 増加量である。

イネについても同様の方法で、2000年から2020年にかけてのオゾン濃度上昇の影響を開放系オゾン曝露実験結果から見積もることができる。ただし、サブ課題2で、イネについてはオゾン吸収量をオゾンの影響指標とすることに問題があることが分かったので、ここではM7（日中7時間の平均値）とAOT40（40ppb以上の日中オゾン濃度を、イネの出穂40日前から出穂30日後まで積分した値）を用いた。すなわち、

$$RYL_{rice_M7} = 1 - \exp(b * (M7_{2020} - M7_{2000})),$$

$$b = \log(1 - RYL_{FACE}) / (\Delta M7_{FACE})$$

$$RYL_{rice_AOT40} = 1 - \exp(c * (AOT40_{2020} - AOT40_{2000})),$$

$$c = \log(1 - RYL_{FACE}) / (\Delta AOT40_{FACE})$$

なお、後記のとおり、コムギと違ってイネは品種によってオゾンの影響が異なるため、実験で用いた品種が栽培されている中国に限って予測を行った。オゾン前駆物質の排出シナリオや、各地点の減収率から全体の減収量を推定する方法は、サブ課題3と同一である。

4. 結果・考察

(1) 開放系オゾン曝露装置の制御性能

オゾン放出期間について、リング中央でのオゾン濃度と目標値のずれをみると、コムギ、イネともほぼ90%の期間で、目標値から15%以内に制御できた（表1）。一方、オゾン放出期間全体

表1. リング中央でのオゾン濃度制御精度（2007年）

目標値からのずれ 作期	期間割合 (%)				
	< 5%	< 10%	< 15%	< 20%	> 20%
コムギ	37.3	71.6	88.7	92.5	7.6
イネ	45.1	73.6	90.2	94.6	5.4

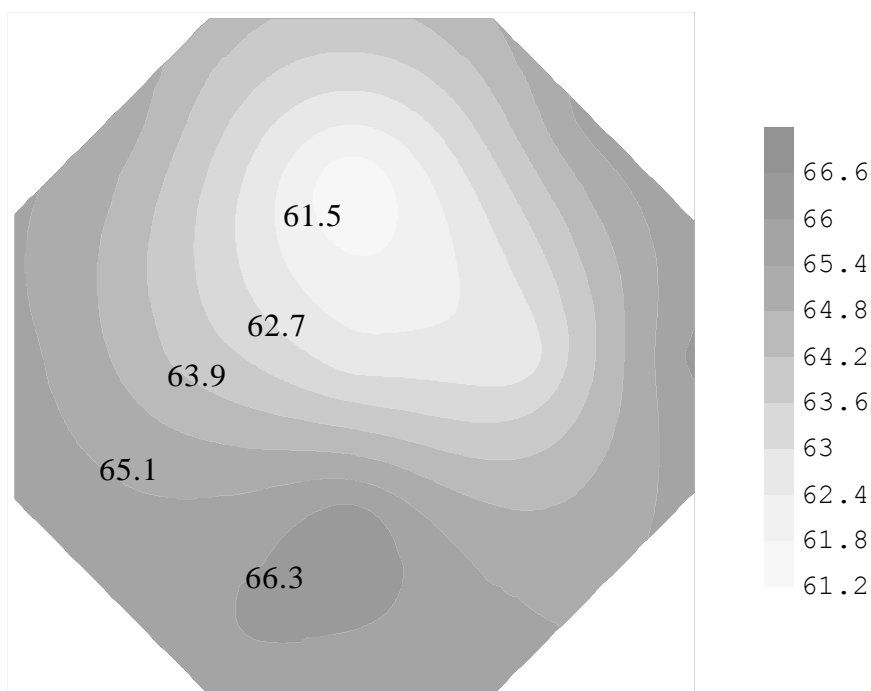


図1. オゾンリング内の平均オゾン濃度の分布. 2008年のコムギ実験における、オゾン放出期間（3月5日-5月28日）中の平均オゾン濃度

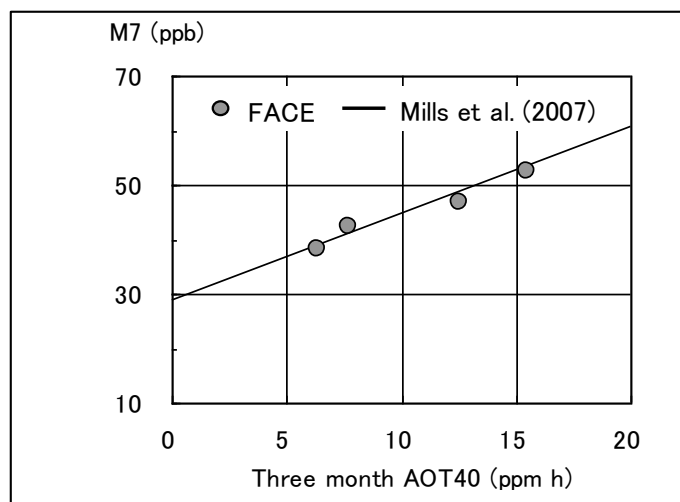


図2. 開放系オゾン曝露装置内におけるイネの栽培期間中3か月間のAOT40とM7の関係

の平均濃度は、リング内の場所によって最大5 ppb程度に収まった（図1）。オゾン濃度の空間分布は、風向の分布と対応しており、風上側が高濃度、風下側が低濃度となる傾向があった。

オゾン曝露装置内のオゾン濃度変動が現実とは異なる可能性を調べるために、AOT40とM7の関係を調べたところ、Mills et al. (2007)が見出した両者の関係と極めてよく一致しており（図2）、開放系オゾン曝露装置内のオゾン濃度変動は、現実を良く再現していると考えられた。なお、図2に示したのは、オゾン濃度の1時間平均値から計算したAOT40であるが、より短期間の時間変動の影響も調べた。その結果、1分間平均オゾン濃度から計算したAOT40と1時間平均濃度から計算したAOT40の違いは2%以下に過ぎず、短時間変動についても、問題無いことが分かった。

(2) コムギの収量に及ぼすオゾン濃度上昇の影響

2年間をこみにして解析したところ、コムギの収量は、オゾン濃度上昇によって17-27%低下したが ($p=0.0004$)、品種とオゾンの交互作用は全く有意でなく ($p=0.41$)、オゾンによる減収に品種間の差は見られなかった(図3上)。オゾンによる減収は、ほとんど粒重の低下 ($p=0.003$) と平行であったが(図3下)、粒重の低下は有意な品種間差を示した ($p=0.015$)。成熟時の粒重は、粒重の増加期間と増加速度に依存するが、オゾン濃度上昇は、期間と速度の両方を低下させた。この他、オゾン濃度上昇によって、地上部バイオマス重と収穫係数が低下する一方で、粒中のタンパク含量は、平均13% ($p=0.002$) 増加した。

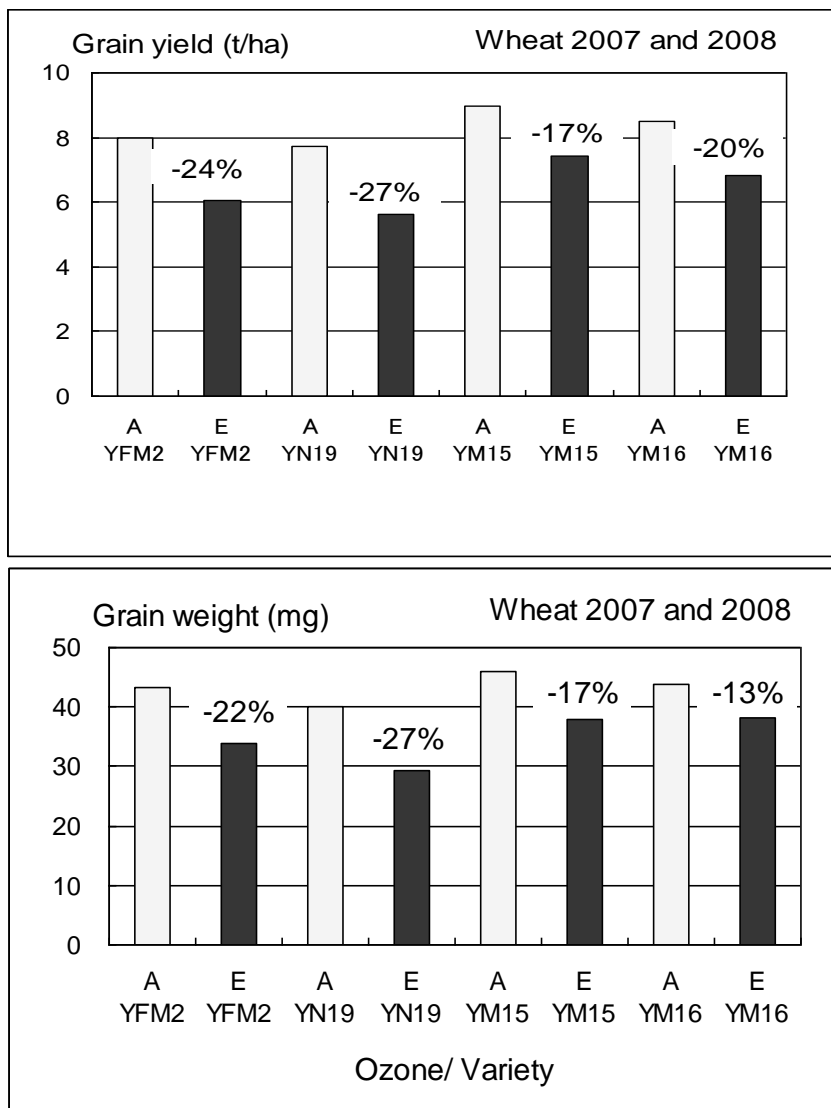


図3. オゾン濃度上昇がコムギ収量(上)と粒重(下)に及ぼす影響。EはE-03区、AはA-03区の平均値。

(3) イネの収量に及ぼすオゾン濃度上昇の影響

2年間をこみにして解析したところ、イネの収量はオゾン濃度上昇によって5-24%低下した ($p=0.0006$) (図4上)。品種とオゾンの間には弱い交互作用が見られ ($p=0.097$)、ハイブリッド品種の減収が大きい傾向にあった。オゾンによる減収は、主に1穂当たりモミ数の減少 ($p=0.007$) によっており(図4下)、しかも品種によって減少程度が明らかに異なった ($p=0.009$)。ハイブリッド品種の1穂当たりモミ数が11-18%減少したのに対して、通常品種は日本型、インド型ともに、ほとんど減少しなかった。1穂モミ数は、穎花の分化数と退化数の差し引きで決まるが、ハイブリッド品種では、この収量構成要素が最も影響を受けたことから、幼穂分化期から幼穂生長期のオゾンの影響が重要であると考えられる。これは、穀粒の肥大がオゾンで最も強く影響されるコムギとは明らかに異なっており、オゾン・ドウス算出期間にも、反映させなくてはならないと思われる。

一方、通常品種ではモミの分化数に違いがなく、退化数はわずかに増加したが、結局モミ数に大きな変化が見られなかった。1穂モミ数の減少と同様の品種間差は、草丈と主稈葉数の減少にも見られた。

(4) 従来のオゾンドウスイレスポンス関係との比較
従来、オープントップチャンバーなどを用いた実験で得られたオゾンドウスイレスポンス関係と、本実験の結果を比較した。

コムギは、止葉が気孔から吸収したオゾン量のうち、 $6 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を超えた部分を積分したAFst6を、サブ課題2で開発したモデルで推定し、Pleijelら(2007)による減収率との関係式と比較した。その際、A-03区のオゾンによる減収率が既存の関係式に一致するものとして、E-03区の減収率を示した(図5左)。

一方、イネについてはサブ課題2の結果から、AFst6が必ずしも適切なオゾン影響指標でないと考えられたので、Kobayashi et al. (1995)によるM7との関係式を比較に用いた(図5右)。

なお、Kobayashi et al. (1995)の関係式は、Jin et al. (2001)および Olszyk et al. (1988)の関係式と大きな違いは無い。

図5から、コムギ、イネともに、開放系オゾン暴露実験でみられた減収は、以前にオープントップチャンバーなどで得られた関係から推定されるよりも大きい。特にイネでは、ハイブリッド品種の減収が、従来の通常品種の結果から推定したよりも、明らかに大きい(図5右)。

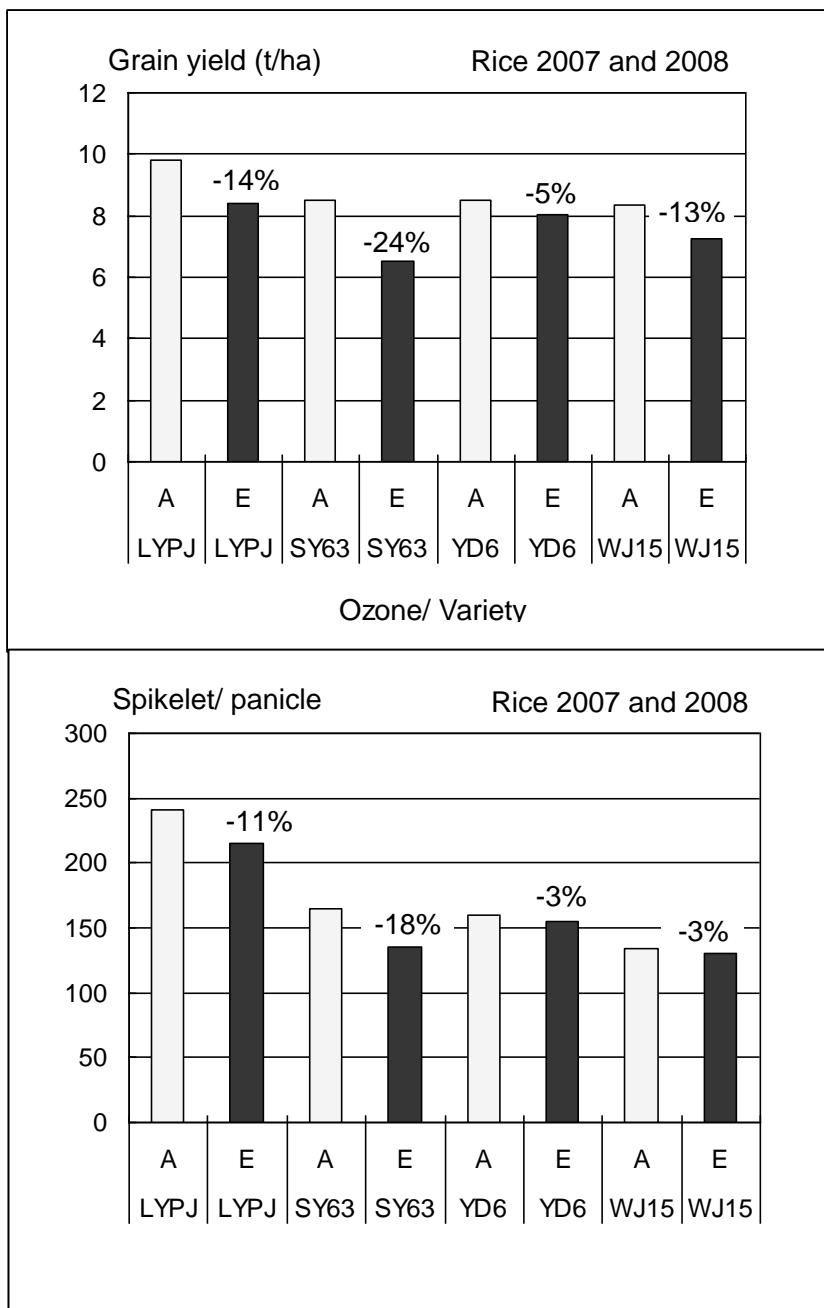


図4. オゾン濃度上昇が米収量(上)と1穂あたりモミ数(下)に及ぼす影響。EはE-03区、AはA-03区の平均値。LYPJとSY63はハイブリッド品種、YD6はインド型、WJ15は日本型のいずれも通常品種。

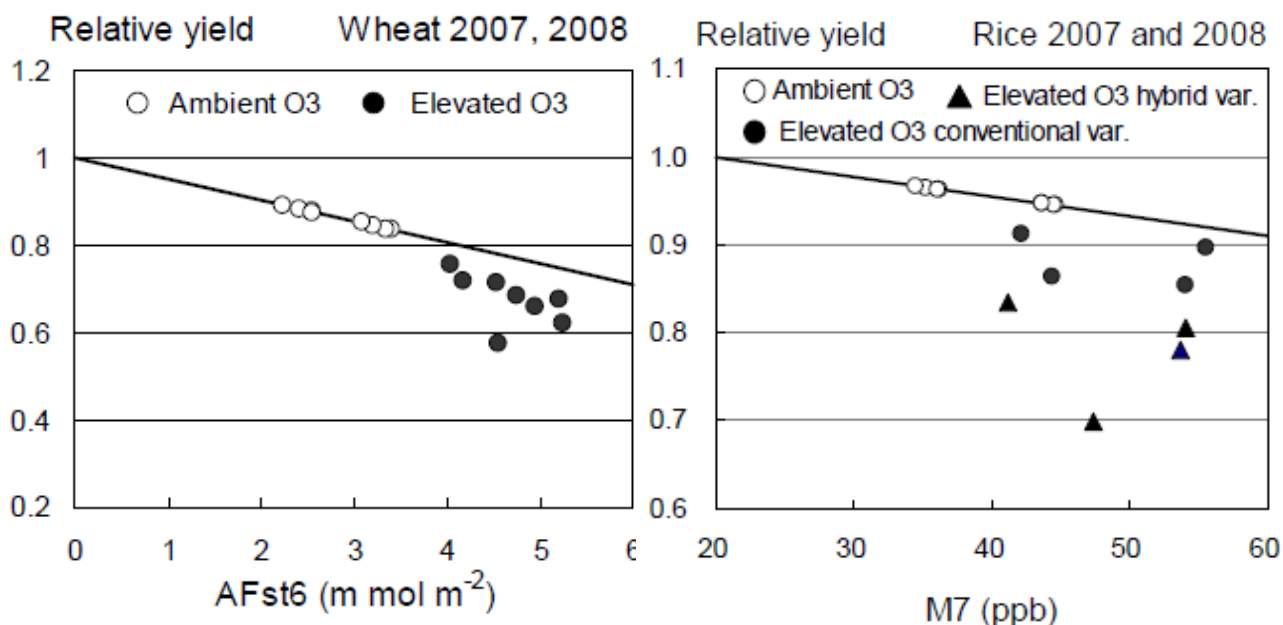


図5. 開放系オゾン暴露実験の結果と従来のドウス・レスポンス関係の比較。左：コムギ、右：イネ

(5) 東アジアのコムギ生産に及ぼすオゾンの影響

開放系実験の結果を、直接スケールアップして、東アジアのコムギ生産に及ぼす2000年から2020年のオゾン濃度上昇の影響を見積もると、中国では17%の減収が予測される(表2)。インドでも16%と大きな減収が予想されるが、日本の減収は2%弱に過ぎない。サブ課題3で、ヨーロッパの関係式を使って、AFst6から予測した減収と比べると2倍強と大きいのは、図5左の比較からもうなずける。ただし、AOT40で推定した減収とは大差ない。開放系実験でのAFst6の増加範囲は、2000年から2020年にかけて想定される増加範囲をほぼカバーしているため(サブ課題3の図8参照)、以上の見積もりの信頼性は高い。

表2. 2000年から2020年のオゾン濃度上昇が東アジアのコムギ生産に及ぼす影響。ΔRYLは2000年を基準とした減収率、ΔPLは同じく減収量。

推定方法	地域	ΔRYL (%)	ΔPL (万 t)
AFst6_FACE	中国	17.1	1945
	インド	15.8	1122
	日本	1.8	1
	合計	16.5	3068
AFst6_EMEP	中国	7.4	843
	インド	7.8	558
	日本	0.7	0
	合計	7.5	1403
AOT40	中国	13.3	1511
	インド	9.1	651
	日本	2.7	2
	合計	11.7	2164

(6) 中国の米生産に及ぼすオゾン濃度上昇の影響

サブ課題3では、Kobayashi et al. (1995) の関係式を用いて、2000年から2020年にかけてのオゾン濃度上昇が、東アジアの米生産に及ぼす影響を予測した。この関係式は、日本の主要品種に及ぼすオゾンの影響を推定したもので、オゾンへの感受性が高い中国のハイブリッド品種への影響を過小評価する。そこで、中国を対象として、開放系曝露実験の結果を、コムギと同様にスケ

ールアップして、2020年までのオゾン濃度上昇で生じる減収量を予測した。開放系オゾン暴露実験では、E-03区のM7はA-03区のそれよりも、2年間平均で8.9ppb高かった。この8.9ppbの増加幅を、サブ課題3で推定した2000年から2020年へのオゾン濃度上昇幅と比べた(図6)。イネの栽培期間が夏季であるため、窒素化合物の増加で夜間のオゾン破壊効果が強化される影響を、日中のオゾン生成速度増大の影響が上回るため、中国のイネ栽培地域でのM7は全域で増加する。早稲、晩稲などの栽培期間の違いはさほど小さくなく、全栽培域の6%程度で20ppbvを超える顕著な増加が生じ、また全栽培

域の50%程度の地点で、開放系実験のE-03とA-03の差(8.9ppbv)を超えるM7の上昇が予測される。従って、多くの地点で外挿にならざるを得ないが、M7と減収率の関係が8.9ppbvを超えても保たれると仮定して、中国におけるイネの減収を見積もった結果は、表3のとおりである。

日本の品種と比較して中国のイネ品種、とくにハイブリッド品種はオゾン濃度上昇の影響を受けやすく、ハイブリッド品種の減収率は40%を超えると見積もられた。早稲、晩稲が中稲(1期作

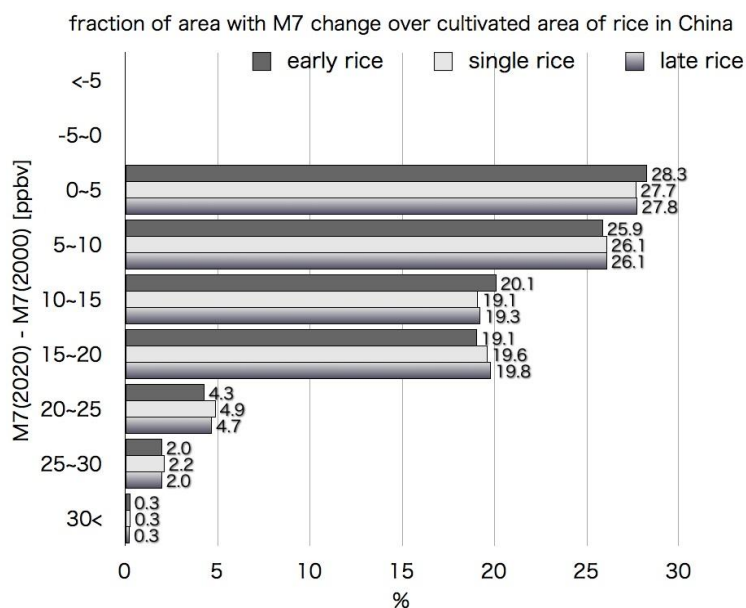


図6. 2000年から2020年にかけてのイネ栽培期間中
日中7時間平均オゾン濃度上昇幅の頻度分布。

表3. 2000年から2020年へのオゾン濃度上昇が中国の米生産に及ぼす影響。

Δ RYLは2000年を基準とした減収率、 Δ PLは同じく減収量。

推定方法	生産/減収	作型			合計
		早稲	中稲	晩稲	
Kobayashi et al. (1995) (日本品種)	Δ RYL (%)	3.9	2.5	3.8	3.1
	Δ PL(万t)	161	254	186	597
FACE M7	ハイブリッド品種 Δ RYL (%)	48.6	35.7	47.8	41.5
	ハイブリッド品種 Δ PL(万t)	1989	3654	2301	7944
	通常品種 Δ RYL (%)	20.6	15.5	20.2	17.8
	通常品種 Δ PL(万t)	842	1591	973	3406
FACE AOT40	ハイブリッド品種 Δ RYL (%)	41	31.9	40.9	36.1
	ハイブリッド品種 Δ PL(万t)	1677	3263	1968	6909
	通常品種 Δ RYL (%)	17.8	14.1	17.8	15.8
	通常品種 Δ PL(万t)	730	1448	856	3034

イネ)よりも減収率が高くなるのは、オゾン濃度上昇の変動が大きい中国南部、とくに広東省が二期作地帯であるためと考えられる。ただし、前記のとおり、開放系実験のオゾン濃度上昇幅を超える地域については外挿のために、予想した減収率の信頼性は高くない。それにしても、日中のオゾン濃度の平均値が20ppbも上昇すれば、極めて大きな影響があることは間違いなく、開放系実験で見られた20%の減収を超える影響が生じる可能性は高い。これまで中国の食料生産量増加を支えてきたハイブリッド品種が、特にオゾンで減収しやすいことは、中国の食料供給にとって危機的な意味を持つ。しかし、品種間でオゾンの影響に違いが見られることは、品種の選択や育種によって、影響を軽減する可能性も示している。今後、オゾン前駆物質の排出削減対策とともに、品種間でオゾンの影響に違いが生じるしくみを利用した影響軽減対策の確立を急ぐ必要がある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

コムギとイネについて、世界最初の開放系オゾン暴露実験を行い、コムギ、イネともに、オゾンによる減収が従来の実験から推定されるよりも大きいことを明らかにした。特に、ハイブリッドイネ品種は、通常の品種よりも大きく減収することを明らかにした。コムギでは、減収の主な要因が粒重の減少なので、出穂期から登熟期にオゾンドウスを算出することが合理的である。一方イネでは、1穂当りモミ数の減少が減収の主原因であることから、コムギとは異なり、幼穂形成期から出穂前にかけてがオゾンドウス算出に重要な期間と考えられる。オゾンによる減収とその品種間差については、今後さらに原因を追究する必要があるが、アジアにおけるイネの重要性と今後のオゾン濃度上昇を考慮すると、科学的にもまた食料生産への影響からも、極めて意義深い結果が得られたものと考えられる。

(2) 地球環境政策への貢献

食料安全保障は、どの国でも基本的な国家目標の一つであるが、中国にとってはそれがとりわけ決定的な重要性を持つ。中国は、コムギやコメといった基本的食料を自国で生産せざるを得ないが、それが地表オゾン濃度上昇によって脅かされようとしていることが明らかになった。今後、より強い環境保護に向けた政策を早急にとる上で、本成果は科学的貢献が期待できる。

6. 引用文献

- Jin M., Feng Z., Zhang F. (2001). Impacts of ozone on the biomass and yield of rice in open-top chambers. *Journal of Environmental Sciences*, 13 (2), 233-236.
- Kobayashi K., Okada M., Nouchi I. (1995). Effects of ozone on dry matter partitioning and yield of Japanese cultivars of rice (*Oryza sativa* L.). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 53, 109-122.
- Mills G., Buse A., Gimemo B., Bermejo V., Holland M., Emberson L., Pleijel H. (2007). A synthesis of AOT40-based response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural. *Atmospheric Environment*, 41, 2630-2643.
- Olszyk D.M., Cabrera H., Thompson C.R. (1988). California statewide assessment of the effect of ozone on crop productivity. *Journal of Air Pollution Control Association*, 38, 921-938.

Pleijel, H., Danielsson H., Emberson L., Ashmore, M.R., Mills G. (2007). Ozone risk assessment for agricultural crops in Europe: Further development of stomatal flux and flux-response relationships for European wheat and potato. *Atmospheric Environment* 41, 3022-3040.

Wang X., Mazuerall D.L. (2004). Characterizing distributions of surface ozone and its impact on grain production in China, Japan and South Korea: 1990 and 2020. *Atmospheric Environment*, 38, 4383-4402.

7. 国際共同研究等の状況

開放系オゾン暴露実験は、中国科学院土壤科学研究所および揚州大学の研究者との緊密な協力の下に実施している。また、米国イリノイ大学のDr. Steve Long、同プリンストン大学のDr. Denise Mauzerall、そして英国ヨーク大学のDr. Lisa Embersonからは、アドバイザーとして研究結果と研究計画について意見を頂いている。特に、Dr. Lisa Embersonが主催しているAPCEN（アジア大気汚染農作物影響ネットワーク）の集会に招かれて、講演を行った（2008年3月12-13日）。中国科学院土壤科学研究所では、今後も独自予算にてコムギとイネの開放系オゾン曝露実験を継続する計画であり、一層の進展が見込まれる。その結果、南・東南アジアの研究者とも共同研究が進むものと期待される。本研究の成果は、国連環境計画(UNEP)の主導で進みつつある、ABC (Atmospheric Brown Cloud) プロジェクトの活動の一環として、東アジアでの大気環境影響の予測に貢献する。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表<論文(査読あり)>

Pang J., Kobayashi K., Zhu J. (2009). Yield and photosynthetic characteristics of flag leaves in Chinese rice (*Oryza sativa* L.) varieties subjected to free-air release of ozone. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 132, 203-211.

Shi G., Yang L., Wang Y., Kobayashi K., Zhu J., Tang H., Pan S., Chen T., Liu G., Wang Y. (2009). Impact of elevated ozone concentration on yield of four Chinese rice cultivars under fully open-air field condition. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 131, 178-184.

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 小林和彦 (2007). オゾン濃度の上昇が植物に及ぼす影響. 資源環境対策 43 (7), 49-53.

(2) 口頭発表(学会)

- 1) Liu G., Zhu J., Han Y., Tang H., Kobayashi K. (2008). Controlled release of ozone in free air to study the impacts of rising surface ozone level on rice and wheat in the field. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2008*. Shimonoseki, Japan.
- 2) Guo W., Zhu X., Sun T., Feng C., Zhu J., Kobayashi K. (2008). Effects of increased ozone concentration on grain yield and quality in four varieties of winter wheat in China. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2008*. Shimonoseki, Japan.

- 3) Shi G., Yang L., Wang Y., Kobayashi K., Zhu J., Pan S., Chen T., Liu G., Wang Y. (2008). Impact of elevated ozone concentration on yield formation of four Chinese rice cultivars under fully open-air field conditions. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2008*. Shimonoseki, Japan.
- 4) Wang Y., Zhou J., Shi G., Yang L., Feng Z., Kobayashi K., Zhu J., Wang Y. (2008). Variance in leaf chlorophyll decline induced by elevated-ozone in four rice cultivars under fully open-air field conditions. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2008*. Shimonoseki, Japan.
- 5) Pang J., Kobayashi K., Zhu J. (2008). Decreased yield, gas exchange and chlorophyll a fluorescence of flag leaves in rice under O₃ FACE. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2008*. Shimonoseki, Japan.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Oue H., Motohiro S., Inada K., Miyata A., Mano M., Kobayashi K., Zhu J. (2008). Evaluation of ozone uptake by vegetation with the multi-layer model. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2008*. Shimonoseki, Japan.
- 9) Ito M., Kobayashi K., Takigawa M. (2008). Wheat yield loss caused by surface ozone in China: flux-based estimates and concentration-based estimates for 2000 and 2010. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2008*. Shimonoseki, Japan.
- 10) Inada H., Yamaguchi M., Sato R., Hoshino D., Nagasawa A., Negishi Y., Nouchi I., Kobayashi K., Izuta T. (2008). Effects of ozone on activity and concentration of Rubisco and radical scavenging system in leaves of rice (*Oryza sativa* L.). *International Symposium on Agricultural Meteorology 2008*. Shimonoseki, Japan.
- 11) Feng Z., Kobayashi K. (2008). Impact of elevated ozone on gas exchange and yield of wheat: (*Triticum aestivum* L.): Meta-analysis. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2008*. Shimonoseki, Japan.
- 12) Takigawa M., Niwano M., Takahashi M., Akimoto H., Kobayashi K. (2008). Projection of tropospheric ozone over East Asia in 2020. *International Symposium on Agricultural Meteorology 2008*. Shimonoseki, Japan.
- 13) 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.
- 14) 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.

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

日本農業気象学会全国大会において、オーガナイズドセッション「東アジアの地表オゾン濃度上昇と農業生態系」を主催（2008年3月20日）。

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 日本農業新聞「オゾン濃度高いと小麦減収：東大の研究班中国で実証」（2007年9月19日）と、中国での開放系オゾン暴露実験の写真とともに、オゾン濃度上昇によるコムギの減収結果を報道。
- 2) NHK「クローズアップ現代」（2007年11月5日放送）にて、中国江蘇省江都市の開放系オゾン暴露実験の状況を放映し、コメ収量が減少したことを報道。
- 3) 読売新聞「越境大気汚染でコメ収量減」（2008年3月21日、14版）で、「光化学スモッグで農作物の収量が減るのは、葉の光合成がオゾンで阻害されるため」と報道。
- 4) 朝日新聞「茶色い雲、越境」（2008年3月27日、全国版）で、当プロジェクトが主催した、日本農業気象学会のオーガナイズドセッションの報告を掲載。

(6) その他

なし