

課題名	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		
課題代表者名	小林和彦（東京大学 大学院農学生命科学研究科 国際植物資源科学研究室）		
研究期間	平成18-20年度	合計予算額	251,935千円（うち20年度 74,329千円） ※上記の合計予算額には、間接経費58,140千円を含む
研究体制			
<p>(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）</p> <p>(2) オゾン沈着プロセスモデルの開発（愛媛大学）</p> <p>(3) 東アジアの植生によるオゾン吸収量の予測に関する研究（独立行政法人海洋研究開発機構）</p> <p>(4) オゾン濃度上昇に対する農作物の生理生化学的応答の解明（東京農工大学）</p> <p>(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（東京大学）</p> <p>(6) 東アジアにおけるコムギ品種の光合成に及ぼすオゾンの影響解明（東京大学）</p>			
1. 序（研究背景等）			
<p>東アジアは、ヨーロッパ、アメリカと並んで、世界でも地表オゾン濃度が高い地域の一つであるが、次の点で他の2地域と異なる。すなわち、</p> <p>A. オゾン前駆物質の排出量が、現在も急速に増加しつつある。</p> <p>B. 世界最大の農作物生産国でしかも世界最大の食料需要国（中国）を含む。</p> <p>オゾンが、アメリカとヨーロッパの農作物や森林に大きな影響を及ぼしていることは良く知られているが、上記の理由により、今後は東アジアにおけるオゾン濃度上昇の影響が重要となる。ところが、オゾンの農作物影響に関するアジアの研究蓄積は極めて少なく、農作物減収予測にあたって、アメリカやヨーロッパで得られたオゾン濃度と農作物減収の関係をアジアに適用せざるを得ない現状にある。これには、以下の問題があり、そのため予測結果の信頼性は疑問である。</p> <p>オゾンの影響は、オゾン濃度よりはオゾン吸収量に依存するが、オゾン濃度とオゾン吸収量の関係は、気候や土壌条件によって大きく変わる。そのため、欧米で得られたオゾン濃度と減収率の関係をアジアに適用した場合の信頼性には疑問がある。同様に、オゾンの影響には農作物の品種によって違いがあり、ヨーロッパの品種で得られた関係をアジアの品種に適用できるかどうか疑問である。さらに、より根本的な問題として、従来の実験がすべて、チャンバー（圃場に設置された小温室）内で行われたことである。チャンバー自体の影響で、オゾンの植物への吸収が大きく変えられ、オゾン濃度とオゾン吸収量の関係を介して、減収率を過大あるいは過小推定する可能性がある。チャンバーによる微気象の改変はまた、農作物のオゾン感受性を変える可能性がある。</p>			
2. 研究目的			
<p>上記1の問題点を解決して、東アジアのオゾン濃度上昇の影響を的確に予測することが本研究の究極の目的である。そのために、次の3つの目標を設定した。</p> <p>a. 東アジアにおいて、オゾンが農作物に沈着・吸収される過程を観測し、その結果に基づいて農作物によるオゾンの吸収を定量的に記述するモデルを作る。</p> <p>b. チャンバーを使わない開放系実験を東アジアの農業地帯で実施し、オゾン濃度上昇の影響で農作物の生長と収量が低下する過程を、現実の圃場での観測結果に基づいて定量化する。</p> <p>c. 地表オゾン濃度を予測する大気化学輸送モデルを、農作物のオゾン沈着・吸収モデルおよび開放系実験の結果と組み合わせて、東アジアの現実に即した農作物影響予測を行う。</p> <p>東アジアの農作物生産を研究対象として、地域代表性を考えると、面積・生産量ともに、中国東部が圧倒的に大きく、そのためオゾンの沈着・吸収の観測と、開放系実験は、中国東部の農業地帯で行うのが合理的である。特にアジア最重要の農作物であるイネの生産地帯が、観測・実験場所としては最適である。ただし、オゾンの影響メカニズム解明のための実験は、地域代表性に大きく依存しないので、日本で行うことができる。こうした考慮に基づいて、観測・実験場所を設定した。</p>			

### 3. 研究の方法及び結果

#### (1) 植生へのオゾン沈着量の観測（農業環境技術研究所）

東アジアの代表的な植生へのオゾンの沈着速度を実測し、サブ課題2のオゾン沈着プロセスモデルに必要なデータを取得するため、中国江蘇省江都市郊外のイネーコムギ二毛作圃場にて、オゾン沈着量の連続観測を2006年12月から開始した。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ともなう季節変化を示し、湛水直後は日平均値で $0.05 \text{ cm s}^{-1}$ 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 $0.8 \text{ cm s}^{-1}$ 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 $19 \text{ mmol m}^{-2}$ 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、本課題によって、オゾンフラックスの実測値のほか、沈着過程のモデリングに必要な情報を、コムギとイネの全生育期間にわたって得ることができた。

#### (2) オゾン沈着プロセスモデルの開発（愛媛大学）

サブ課題1と協力して、中国江蘇省江都市郊外のイネーコムギ二毛作圃場で観測を行い、イネとコムギのオゾン吸収量を推定するためのモデリングを行った。まず、気孔を通してのオゾン吸収のモデル（ $g_s$ モデル）を、冬コムギ1品種とイネ5品種の止葉について開発した。このモデルは、気象条件、葉が展開してからの日数、群落頂部における累積オゾンドウス（AOT40：40 ppb以上のオゾン濃度を積算した量）、一日の中の時刻をパラメータとして、気孔コンダクタンス $g_s$ を記述するものである。本モデルにより、AOT40が増加するにつれて $g_s$ が低下するプロセスが再現できた。その上、コムギについては、止葉（穂の直下の葉）以外の葉の $g_s$ の測定値も良好に再現できた。また、そのモデルのパラメータがイネとコムギの間、およびイネ品種間で異なることも明らかにできた。さらに、サブ課題3の化学輸送モデルで、東アジア地域における植生のオゾン沈着量を予測するために、群落上空のオゾン濃度から群落高さのオゾン濃度を推定するサブモデルを開発した。

次に、気象条件やAOT40の影響を組み込んだ品種別の止葉光合成速度（ $P$ ）をモデリングした。その結果、オゾンの影響による $g_s$ の低下と $P$ の低下を関連付けることができ、AOT40が増加するにつれて $P$ が低下すること、その影響が品種間で異なることを明らかにした。

次いで、上記の $g_s$ モデルと $P$ モデルを用いて、止葉展開から収穫までの期間にわたり、止葉によるオゾン積算有効吸収量（AFst6： $6 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上の吸収量を積算した値）と光合成量を、品種別に推定した。コムギについては、オゾンの影響によるAFst6の増加と減収率の間のドウス-レスポンス関係から減収率を推定する方法が、ヨーロッパで行われてきた。ところが、本研究でイネ4品種を比べた結果、光合成量の低下率が最大であった品種で、AFst6の増加率が最も小さかった。このように本課題によって、AFst6から減収率を求める方法の問題点が明らかとなり、減収を予測できる新たな影響指標を検討する必要が指摘された。本課題で開発した $P$ モデルは、オゾンによる減収をより直接的に予測する方法として期待できる。

#### (3) 東アジアの植生によるオゾン吸収量の予測に関する研究（独立行政法人海洋研究開発機構）

本課題は、今後の大気汚染物質放出量の増加が、東アジアの地表オゾン濃度と植物のオゾン吸収量にどのように影響を与えるかを予測することを目的とした。用いるモデルシステムは、2.8度の水平解像度を持つ全球光化学モデルCHASERで計算された化学種の分布を外部境界条件として、領域化学輸送モデルWRF/Chemバージョン2.1.2（本研究では、水平解像度40km）を走らせるものである。この大気化学輸送モデルシステムで推定される地表オゾン濃度にサブ課題2で得られた方法を適用して、農作物群落高さのオゾン濃度を推定した。現時点でのオゾン濃度の再現性を確かめたところ、夜間のオゾン濃度を過大に推定する傾向がみられたが、植物のオゾン吸収にとって重要な日中のオゾン濃度は、概ね良く推定できた。次いで、エミッションインベントリREASを用いて、アジア領域における地表面からのオゾン前駆物質の放出量分布を想定した将来予測実験を行った。REASエ

ミッションの基準年である2000年を「現在」とし、中国の人為起源エミッションが「政策失敗」シナリオをたどった場合の2020年を「将来」として、数値計算を行った。

オゾン濃度と吸収量の予測結果は、次のとおりである。窒素化合物の放出量増加（2000年の11.2 Tg/年から2020年の25.4 Tg/年）によって、中国沿岸部のとくに南方域において地表オゾン濃度上昇が顕著に上昇する。オゾン増加量は5月に最大となり、上海から広東省にかけての広い範囲で、2000年から2020年への日中平均オゾン濃度の増加量で、20 ppbVを超える。日本など下流域での増加量は、5 ppbV程度である。5月は、中国の主なコムギ生産地帯（河北省、河南省、江蘇省、山東省、安徽省）の開花期にあたる。そのため、この期間のコムギのオゾン吸収量AFst6 ( $6 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )は、2000年に  $4 \text{ mmol m}^{-2}$  を超える地域の面積が全体のわずか0.2%に過ぎなかったが、2020年には全体の17%へと大幅に拡大する。また、2000年から2020年にかけてのオゾン吸収量AFst6の増加は、安徽省付近で  $2 \text{ mmol m}^{-2}$  に達する。こうしたオゾン吸収量の増加により、2000年から2020年にかけて、コムギの減収率が高まる。主なコムギ生産地帯では、2000年の減収率が8-14%の範囲にあるのに対し、2020年には15-20%へと上昇する。中国全体のコムギ生産量の減少率も、2000年の8%に対して、2020年は16%へと倍増する。

イネについてもオゾン吸収量を計算したところ、2000年から2020年にかけて、中国南部を中心に増加すると予測されたが、一部の地域ではむしろ減少する結果となった。これは、サブ課題2で見出されたように、オゾンの影響で気孔のコンダクタンスが低下し、その結果オゾン吸収量が減ることによるもので、オゾンの影響が小さくなるわけではない。オゾン吸収量ではオゾンの影響を的確に評価できないと考えられたので、日中平均オゾン濃度の増減から、イネへの影響を推定した。2000年から2020年にかけて、中国南部を中心に広い範囲で日中平均オゾン濃度が20ppb以上増加するが、その間、イネの減収率は中国全体で2000年の4%から2020年の7%へと上昇する。同期間に、日本のイネ減収率は2000年の3.1%から3.7%へ、同じく韓国では3.6%から4.4%へと、わずかに上昇する。このように、イネの減収程度の上昇はコムギよりもはるかに小さい。ただし、本課題でイネの減収予測に用いたのは、日本の品種を用いたチャンバー実験で得られたドウス-レスポンス関係である。サブ課題5で明らかになるように、中国のイネ品種特にハイブリッド品種の減収は、ここで推定したよりもはるかに大きなものになる可能性が高い。

#### （4）オゾン濃度上昇に対する農作物の生理生化学的応答の解明（東京農工大学）

農作物の収量に及ぼすオゾンの影響を正確に評価するためには、農作物の葉のオゾン吸収量だけでなく、オゾンの吸収から収量の低下に至る、様々な生理生化学的プロセスへのオゾンの影響を明らかにする必要がある。そのために、オゾン濃度制御チャンバーを2006年に設置し、オゾン暴露実験を2007年から行った。2007年度の実験で、過去の報告で収量へのオゾンの影響に差があるとされていたイネの品種コシヒカリとキヌヒカリを比べたが、個体乾重量と収量へのオゾンの影響程度に品種間差は認められなかった。そこで2008年度は、イネ品種コシヒカリのオゾンに対する生理生化学的応答を調べた。葉の気孔拡散コンダクタンスをオゾン暴露中に測定し、測定時の光強度、気温、湿度、時刻、出葉日からの日数またはオゾン濃度の積算値の関数を組み合わせた、気孔拡散コンダクタンスの推定モデルを得た。このモデルで算出したイネの葉の積算オゾン吸収量と光合成速度との関係を調べたところ、オゾン吸収量の増加に伴って純光合成速度が低下することが分かった。一方、葉内の抗酸化物質のうち、アポプラスト（細胞の外側で、気孔内部の気相と接する部分）中のアスコルビン酸の還元率が、積算オゾン吸収量の増加に伴って高くなること、すなわち植物はオゾン濃度が高くなると、それに対抗して抗酸化活性を高めるよう応答することが明らかになった。にも関わらず、オゾン暴露による細胞内膜脂質の損傷程度は、オゾン暴露開始後日数が経過したほうが大きかった。このことから、イネの葉の抗酸化力の上昇は、オゾンによる害作用を回避するには不十分であると考えられた。

一方、コムギ2品種（農林61号・シロガネコムギ）を、オゾンに暴露した結果、葉の光合成速度、光合成酵素濃度・活性およびクロロフィル濃度がオゾンによって低下した。また、光合成におけるシロガネコムギのオゾン感受性は農林61号のそれよりも高く、その品種間差異には活性酸素消去能力の品種間差異が関係していることが明らかになった。特に、コムギの葉においては、カタラーゼとモノデヒドロアスコルビン酸レダクターゼの2つの酵素が、葉内にできた活性酸素種を効率的に消去するために重要であると考えられた。以上の結果から、オゾンの影響を評価する際に、オゾンの吸収量だけでは不十分で、葉内の抗酸化能力とそのオゾン応答、そして品種間の差異も重要であると考えられた。

#### (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（東京大学）

オゾン濃度上昇が東アジアのコムギとイネに及ぼす影響を予測するために、中国江蘇省江都市近郊の農家圃場で、開放系オゾン暴露実験を2007年と2008年の2年間行った。コムギ、イネとも、開放系では世界最初の実験である。開放系オゾン暴露装置は、約90%の期間にわたって目標値±15%の範囲に制御できた。装置内のオゾン濃度変動は、外気オゾン濃度の変動に極めて近いことも確かめられた。中国のコムギ4品種を用いた実験の結果、日中平均オゾン濃度は18ppb（2007年）および12 ppb（2008年）増加し、コムギ収量は2年間平均で17-27%減少した。減収はほぼ粒重の低下で生じた。使用した4品種間でオゾンによる減収程度に差はなかったが、粒重の低下には品種間差が見られた。

一方イネの実験は、日本型とインド型の純系各1品種とハイブリッド品種2の計4品種を用いて行った。田植え2週間後から成熟期までオゾン暴露を行い、この間の日中7時間平均オゾン濃度は、外気区の42 ppb（2007年）ないし38 ppb（2008年）に対して、オゾン増加区は52 ppb（2007年）ないし47 ppb（2008年）とほぼ10 ppbの濃度上昇であった。このオゾン濃度上昇の結果、2年間平均でイネの収量は5-24 %減少した。減収は概ね1穂あたりモミ数の減少で説明できた。使用した4品種間で、オゾンによる減収程度に弱い有意差が見られ、ハイブリッド品種の減収（2品種平均で約19%）は有意であったが、日本型、インド型とも通常品種の減収は有意でなかった。品種間の差は、特に1穂あたりモミ数の減少で明瞭であり、ハイブリッド品種の減少のみが有意であった。

開放系実験の結果を、従来の実験で得られている減収率と比べたところ、コムギ、イネともに、従来よりも大きな減収が見られた。特にイネでは、ハイブリッド品種の減収率が従来の結果よりも明らかに大きかった。2年間の開放系実験結果で得られたコムギとイネの減収程度とオゾン吸収量増加の関係に基づいて、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。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、日本のコムギの減収は2%程度に止まると推定された。これらは、サブ課題3でヨーロッパのドウス-レスポンス関係を用いて得た見積もりよりもかなり大きかった。同様に、2000年を基準にした時の2020年の中国におけるイネの減収は、従来のドウス-レスポンス関係では約3%に過ぎないが、開放系実験の結果から見積もると、ハイブリッド品種では40%以上、通常品種でも15%以上となった。予想されるオゾン濃度上昇が、開放系実験処理を大きく超えるために、実験結果の外挿になっており、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ことは確実性が高い。今後は、実験を継続して推定精度を高める一方で、オゾン耐性のしくみを解明して、影響軽減対策の確立を急ぐ必要がある。

#### (6) 東アジアにおけるコムギ品種の光合成に及ぼすオゾンの影響解明（東京大学）

オゾン濃度上昇が冬コムギに及ぼす影響を、メタアナリシスと開放系圃場実験で明らかにした。メタアナリシスでは、1980年～2007年に出版された53編のピアレビュー済み論文でデータベースを構成し、オゾンの増加がコムギの生長、ガス交換および収量に及ぼす影響を定量的に評価した。その結果は、地表オゾン濃度の増加がコムギの収量を29%（95%信頼区間で24～34%）、地上バイオマスを18%（同じく13～24%）低下させることを示した。

一方開放系実験では、コムギ2品種の分けつ期から収穫期にかけて、外気の50%増のオゾン増加実験を行った。実際のオゾン濃度上昇は27%であったが、このオゾン濃度上昇が光合成色素、ガス交換速度、脂質酸化に及ぼす影響を、止葉の発育に沿って分析したところ、品種Y2ではオゾンによって老化が促進された。具体的には、光合成色素すなわちクロロフィルやカロテノイドの含量が低下し、光合成速度が減少、脂質の酸化が進んだ。一方、品種Y16においては、光合成色素の含量低下のみが見られた。オゾン濃度上昇はまた、品種Y2の光合成にも影響を及ぼし、気孔への影響を通してあるいは気孔以外への影響を通して、炭酸固定速度を低下させた。そうした影響は、品種Y16には見られなかった。品種Y2では、オゾンの影響が葉齢の進みとともに全般的に進行したが、品種Y16では一部の变化しか進行しなかった。また、Y2のほうがY16よりも10日ほど早くオゾンの影響が観察された。こうした結果から、品種Y2のほうがY16よりもオゾンの影響が出やすいこと、またこうした品種間の差は、気孔を通してのオゾン取り込み量では説明できないことが示された。

#### 4. 考察

本研究で得られた主な成果は、次の2つである。

A. 東アジアの地表オゾン濃度と農作物によるオゾン吸収量を、従来よりもはるかに高い精度と信

頼度で予測できるようになった。その結果、2020年には中国南部を中心に極めて大幅なオゾン濃度上昇が生じ、コムギ生産に間違いなく大きな影響を及ぼすこと、イネの減収率についてはなお不確かさが残るものの、20%以上の減収が生じる可能性が高いことが明らかとなった。

- B. 東アジアの主要農作物であるイネとコムギに対するオゾン濃度上昇について、従来になく確かで詳しい情報が得られた。コムギのオゾン応答について、中国、日本とも品種間の違いが見出された。しかも、品種間の差は、気孔を通してのオゾン吸収量の違いで説明できないことが分かった。イネについては、特に中国のハイブリッド品種において、気孔へのオゾンの影響が強いために、オゾン吸収量をオゾンの影響指標にすることができないことを明らかにした。イネ、コムギともに、オゾンに対する抗酸化活性をもっており、それが品種間差の少なくとも一部を説明できることがわかってきた。

上記成果のうちAから、オゾン濃度上昇が東アジアの農業生産にとって極めて重大でしかも緊急の脅威であることが明らかとなった。オゾンの影響予測は、実際に中国で行った開放系暴露実験に基づいており、その意味での信頼性は極めて高い。予測されるイネの減収率は、なお不確かさが多いが、今後実験を数年繰り返せば、不確かさを減らすことができる。その際、2020年に予測される大幅なオゾン濃度上昇を考慮して、オゾン濃度上昇幅をさらに高めることが必要と思われる。また、今後の実験において、特にオゾン濃度の上昇が著しいと予想される中国南部を想定した実験計画が必要であろう。品種や栽培法、土壌など、実験結果に影響を及ぼす可能性がある要因を慎重に検討し、それらの効果を定量的に把握する必要がある。

いっぽう成果Bは、オゾン濃度上昇への対策の可能性を示唆している。すなわち、オゾン耐性の高い品種を選び、葉の老化を防止し、抗酸化活性を高めることによって、オゾンの影響を軽減できる可能性がある。ただし、オゾンの吸収メカニズムはかなり分かってきたが、解毒メカニズムについては、現在定量的な知見が蓄積され始めた段階で、それを用いたモデリングは今後の課題である。そうした品種間差や対策技術を考慮に入れることにより、オゾンの影響をよりの確に予測できるものと期待される。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

世界最初の開放系オゾン暴露実験によって、中国の食料生産を支える基本的要素であるハイブリッドイネ品種が、オゾンに極めて弱いことを明らかにした。この結果は、「イネはオゾンに比較的耐性である」とする従来の見解を覆すものである。コムギについても、従来のチャンバー実験の結果よりもオゾンの影響が大きいことを、開放系実験で明らかにした。オゾンの影響の品種間差について、オゾン吸収量だけでなく、解毒活性の違いを定量的に考慮できる可能性を示したことも、今後の科学的理解にとって重要な意味がある。

### (2) 地球環境政策への貢献

オゾン沈着速度の観測と大気化学輸送モデルの結合により、従来に無く高い信頼度で地表オゾン濃度を推定できるようになった。このことは、地球環境政策立案に強力な手段を提供する。また、予想されるオゾン濃度の変化から、農作物生産に及ぼす影響を容易に予測できるので、経済的な影響評価につなげることも可能である。中国の地表オゾン濃度上昇が、同国の食料生産の基幹的技術であるハイブリッドイネに対して、危機的とも言える影響を及ぼす可能性は、同国の環境政策に重要な変更を迫るものである。

## 6. 研究者略歴

課題代表者：小林和彦

1952年生まれ、東京大学農学部卒業、農学博士、現在 東京大学 大学院農学生命科学研究科 教授

主要参画研究者

### (1) 宮田明

1959年生まれ、東京大学 大学院理学系研究科修士課程修了、理学博士、現在 独立行政法人 農業環境技術研究所 大気環境研究領域 上席研究員

- (2) 大上博基  
1963年生まれ、京都大学 大学院農学研究科修了、農学博士、現在 国立大学法人 愛媛大学農学部 教授
- (3) 滝川雅之  
1971年生まれ、東京大学 大学院理学系研究科地球惑星物理学専攻修了、理学博士、現在 独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター 研究員
- (4) 伊豆田猛  
1960年生まれ、東京農工大学 大学院連合農学研究科(博士課程)修了、農学博士、現在 国立大学法人 東京農工大学 大学院共生科学技術研究院 教授
- (5) 小林和彦 (前記)
- (6) FENG Zhaozhong  
1976年生まれ、中国科学院 生態環境研究センター大学院博士課程修了、Ph.D、現在 東京大学 大学院農学生命科学研究科 農学共同研究員

## 7. 成果発表状況 (本研究課題に係る論文発表状況)

### (1) 査読付き論文

- 1) Feng, Z., Kobayashi, K., Ainsworth, E.A. (2008). Impact of elevated ozone on growth, physiology and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.): A meta-analysis. *Global Change Biology*, 14, 2696-2708.
- 2) Yamaguchi M., Inada H., Satoh R., Hoshino D., Nagasawa A., Negishi Y., Sasaki H., Nouchi I., Kobayashi K., Izuta T.(2008). Effects of ozone on growth, yield and leaf gas exchange rates of two Japanese cultivars of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agricultural Meteorology*, 64, 131-141.
- 3) 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. *Journal of Agricultural Meteorology*, 64, 223-232.
- 4) Inada H., Yamaguchi M., Satoh R., Hoshino D., Nagasawa A., Negishi Y., Nouchi I., Kobayashi K., Izuta T. (2008). Effects of ozone on photosynthetic components and radical scavenging system in leaves of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agricultural Meteorology*, 64, 243-255.
- 5) Feng Z., Kobayashi K. (2009). Assessing the impacts of current and future concentrations of surface ozone on crop yield with meta-analysis. *Atmospheric Environment*, 43, 1510-1519.
- 6) 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.
- 7) Takigawa M., Niwano M., Akimoto H., Takahashi M., Kobayashi K. (2009). Projection of surface ozone over East Asia in 2020. *Journal of Agricultural Meteorology*, 65, 161-166.
- 8) 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.