

論文の内容の要旨

論文題目 Development of a free-air ozone control system and estimation of the ozone impacts on regional wheat production
(開放系オゾン濃度制御システムの開発とオゾンがコムギ生産に及ぼす広域的影響の推定)

氏名 タン ハオイェ

数ある大気汚染物質の中でも、対流圏オゾンが北米、欧州、そしてアジアの主要農業生産地帯において、最も重大な影響を及ぼすと考えられている。本学位論文において、まずオゾンが世界の農作物生産に及ぼす影響についての先行研究を振り返った(第1章)。1980年代以来、北米と欧州で多くの圃場実験が行われ、農作物の収量にオゾンが大きな悪影響を及ぼすことが明らかになった。こうした実験は、オープントップチャンバー(OTC)という頂部開放型の小型温室を圃場に設置して行われたものだが、OTC自体が植物の成長に影響を及ぼすために、OTC内の実験結果を外部の圃場に適用してよいかどうかについて、不確実なままであった。本研究で実験をおこなった中国長江流域は、中国の主要農業生産地帯であるとともに、近年最も経済発展が著しく、その結果オゾンによる大気汚染が顕著な地域でもある。しかし、そこにおけるオゾン汚染の実態と農作物生産に及ぼす影響は良く知られていなかった。以上の理由で、長江流域の農作物生産に及ぼすオゾンの影響を、実際の圃場条件で明らかにすることが必要となっていた。

本研究での実験は、長江流域北部の江蘇省江都市にて行った。ここは、中国の中でも主要なコメ・コムギ生産地帯であるが、地表オゾンの実態について継続的な観測が行われたことが無かった。そこで、まず長江流域北部の農作物圃場におけるオゾン汚染の実態把握を行った(第2章)。上記実験地において、2007年から2011年までの5年間にわたり地表オゾン濃度を観測した結果、100 ppb前後の高濃度のオゾンが、毎年5月と6月に頻繁に観測され、観測期間中1時間平均オゾン濃度の最高値は、144 ppbに達した。日中7時間(9:00-16:00 中国標準時)オゾン濃度の月平均値は、6月と10月にピークを持つ2峰型の

季節変化を示し、観測値から求めた AOT40 (40 ppb を閾値とするオゾン濃度の積分値) は、欧州で感受性の高い農作物に明確な影響を及ぼさないレベルを、大幅に超過していた。オゾン濃度の観測値と、風向および空気塊の流跡線を解析した結果、長江流域の工業地帯から長距離輸送される大気汚染物質が、春先の高濃度オゾン出現の原因になっていること、夏季には海洋性気団の進入により、汚染物質が希釈されることが明らかとなった。さらに、華中平原東部で大規模に行われる農作物収穫残渣の野焼きが、6月のオゾン濃度上昇に寄与しているものと推察された。このように、長江流域北部の農業地帯における高濃度のオゾン汚染の実態とその要因が、本研究によって明らかとなった。

上記のような高濃度のオゾン汚染が農作物に及ぼす影響を解明する目的で、開放系オゾン濃度上昇装置 (FACE-O₃) を開発した (第3章)。同装置を用いると、圃場の一部のオゾン濃度を何も囲いをせずに上昇させて、その中でイネやコムギを栽培することができる。本研究では、目標オゾン濃度を外気オゾン濃度の 50% 増に設定した。この装置は、100% 酸素を原料としてオゾンを生成し、加圧空気と混合の後に、圃場の作物群落上に差し渡し 14m の 8 角形状に配置したプラスチックチューブから、多数の小孔を通して高速で噴き出す。噴き出すオゾン量をコンピュータ制御することにより、8 角形中央部のオゾン濃度を目標濃度に保つことができる。2007 年から 2010 年までの実験期間中のオゾン濃度制御性能を調べたところ、1 分間平均オゾン濃度は 94% の割合で目標値の ±20% 以内に、また 73% の割合で同じく ±10% 以内に制御できていた。人為的にオゾンを放出することから、装置内のオゾン濃度の時間分布が外気のそれとどの程度異なるのかを調べたところ、この装置のオゾン濃度分布への影響は小さく、OTC のそれとほぼ同程度と見られた。

次いで、オゾンがコムギの収量に及ぼす影響を推定するために、FACE-O₃ 実験の結果を用いてオゾン吸収量と収量の関係を求めた (第4章)。まず、欧州で開発されたコムギの気孔コンダクタンスモデルについて、実験結果に合わせてパラメータ調整を行った。その結果、気孔コンダクタンスへの大気飽差の影響を小さく、日射の影響を逆に大きく、そして温度の影響は省略するとよいことが分かった。次に、この気孔コンダクタンスモデルで推定したオゾン吸収量とコムギ収量との関係を解析し、閾値を $12 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ とする直線モデルが良くあてはまることが分かった。それとともに、実験に用いた中国のコムギ品種は、欧州でのモデル推定に用いられた品種よりも、同じオゾン吸収量であっても収量への影響が大きいことが分かった。

上記のとおり求められたオゾン吸収量とコムギ収量との関係を用いて、中国とインドにおける 2000 年と 2020 年のオゾンによるコムギ減収量の推定を試みた (第5章)。推定には、対象地域全体のオゾン濃度を、従来よりも空間解像度の高い大気化学輸送モデルと、アジアに特化して開発された汚染物質放出インベントリ (REAS) を用いて推定した結果を用いた。そして、オゾン濃度に基づくドウス (AOT40) とオゾン吸収量に基づくドウス (POD_f) の両方でコムギの減収率を推定し、両者の結果を比較した。その際、AOT40 については、欧州の

コムギについてのパラメタリゼーション (90 日 AOT40) と中国での FACE-O₃ 実験に基づくそれ (75 日 AOT40) との両者を用いた。POD_Y も同様に、ヨーロッパのパラメタリゼーション (POD₆) と FACE-O₃ 実験に基づくそれ (POD₁₂; 第 4 章) の両者を用いて、コムギ減収量を推定し結果を比較した。2000 年時点で推定されるコムギの減収率は、中国が 6-15%、インドは 8-22% であった。その際、オゾンドウス間で比べると、POD₆ が特にインドで他の推定方式よりも大きな減収率を推定し、90 日 AOT40 が逆に最も小さな減収率を推定した。2000 年から 2020 年にかけて、オゾン濃度が上昇した時の減収率の増大を予測したところ、中国で 8-9%、インドでは 5-8% と推定され、オゾンドウス間の違いは小さかった。インドの減収率上昇幅が中国よりも小さいのは、この間のオゾン前駆物質放出量の増加を比較的控えめに見積もっているためと考えられた。オゾン吸収量に基づく減収率推定は、気孔コンダクタンスの推定に用いる気象要素の影響を大きく受けるが、2000 年から 2020 年へのオゾン濃度上昇による減収率増加の推定結果には、ほとんど影響を及ぼさなかった。このように、現時点でオゾンの影響で生じている減収率の推定は、オゾンドウスによってかなり異なるが、現時点から将来への減収率の変化の推定は、どの方式でも大きく変わらないことが分かった。

以上、本研究で得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- 中国江蘇省北部ではオゾンによる大気汚染が顕著であり、従来から規制対象となっている化石燃料由来の汚染に加えて、作物残渣の野焼きも規制する必要がある。
- FACE-O₃ は、オゾンが農作物に及ぼす影響を明らかにする上で理想的な実験装置である。
- 中国での実験で開発された、オゾン吸収量とコムギ減収率の関係をを用いれば、ヨーロッパの関係をそのまま用いるよりも的確な推定が可能である。
- 中国とインドにおいて、2020 年までの間にオゾン濃度が上昇して、大きなコムギ減収が生じると予想され、オゾン濃度上昇を抑えることが必要である。

今後なお上昇するオゾン濃度が、甚大な影響を農林作物や自然植生に及ぼすことを防ぐためには、より正確で信頼性の高い影響予測をめざす必要がある。それには、アジアの主要地域をカバーする FACE-O₃ 実験のネットワークが必要で、それによっではじめて、各地の気候や品種の特徴を考慮した現実的な影響予測が可能となる。その際に、現在進みつつある気候変化をも考えに入れた予測が重要である。こうして予測精度の向上をめざす一方で、上昇し続けるオゾン濃度への農学的対応も、今後の研究課題である。オゾン感受性に品種間差があることは、オゾン耐性品種の開発の可能性を示唆している。また、施肥管理によってオゾンによる減収を軽減する可能性も、予備的ではあるが得られている。こうした方法によって、オゾンが農作物に及ぼす影響を低減させることは可能であり、必要でもある。

以上の影響予測と影響軽減の両方面において、本研究で開発した FACE-O₃ 装置が重要な役割を果たし、アジアのそして世界の食料安全保障に役立つよう期待する。