

課題名	A-0806 気温とオゾン濃度上昇が水稲の生産性におよぼす複合影響評価と適応方策に関する研究
課題代表者名	河野吉久（財団法人 電力中央研究所 環境科学研究所 研究顧問）
研究実施期間	平成20～22年度
累計予算額	148,226千円（うち22年度 45,136千円） 予算額は、間接経費を含む。
研究体制	<p>研究体制</p> <p>(1) 気温とオゾン濃度上昇が水稲の収量・品質に及ぼす影響評価に関する研究 財団法人電力中央研究所</p> <p>(2) 水稲の生育時期別オゾン感受性の評価に関する研究 埼玉県環境科学国際センター</p> <p>(3) 高温・オゾン適応のための分子マーカーの探索とオゾンストレス診断アレイの開発</p> <p>1) 高温・オゾン適応のための分子マーカーの探索とオゾンストレス診断アレイの開発 独立行政法人国立環境研究所</p> <p>2) 穂と種子における分子マーカーの分析によるイネの高温・オゾン影響評価に関する研究 独立行政法人国立環境研究所</p>
研究概要	<p>1. はじめに</p> <p>地球温暖化が進行しているが、開発途上国における化石燃料に由来したエネルギー消費の急激な増加とともに二次汚染物質であるオゾン濃度の上昇も指摘されている。オゾンの植物影響評価に係るこれまでの研究により、現状濃度レベルでも植物に対してオゾンの潜在的な影響が指摘され、オゾン濃度がさらに上昇すれば植物の生産性を低下させ、影響が顕在化する可能性の大きいことが指摘されている。一方、温暖化に係る将来の影響予測については、温度上昇に対する植生の脆弱性や水稲の高温障害などが検討されているが、気温とオゾン濃度の上昇が複合した場合の影響についての検討はほとんど行われていない。</p> <p>水稲は、アジア各国の食糧供給源として重要な作物であるが、収量を指標にしたオゾンに対する品種間の感受性の差異について検討した報告は少なく、特に、アジア各国で栽培されている様々なインド型品種のオゾン感受性に係る研究はごく一部の例を除いてほとんどみられない。これまでに行われた農作物の生育時期別のオゾン感受性に関する研究によれば、収量は生殖成長期前後のオゾン濃度の影響を受けやすいと考えられているが、水稲について実験的に解明した報告はない。また、オゾンの影響が窒素施肥の時期と量などの影響を受ける可能性があることから、影響回避・軽減策として窒素施肥条件等とオゾン影響の発現との関連性について検討することにより、肥培管理面から適応方策を検討することも重要と考える。</p> <p>さらに、植物に対するオゾンと高温の複合影響については、分子レベルではほとんど調べられていない。長期暴露試験と併行して高温やオゾンにさらされた植物体内の物質の変化を分子マーカーとして検出することにより、これを利用した新しい影響評価手法やオゾンストレス診断用のDNAアレイを開発することができれば、長期にわたる暴露試験に代わって実験室レベルで影響の予測評価が可能となり、影響発現メカニズムの解明とともに適応性を示す品種の選択や育種過程の効率化にも貢献すると考える。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>内外の水稲品種を対象にして、気温とオゾン濃度上昇が複合した場合の収量・品質におよぼす複合影響について、以下の項目を中心に検討・解明する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 収量と品質を指標にした気温とオゾン濃度上昇に対する水稲の品種間差異の解明と影響を受

けにくい品種の選別

- 植物影響評価に適したオゾンの暴露指標の検討
- 日本を含むアジアの水稻生産性におよぼす温暖化時のオゾン影響の予測評価
- 水稻収量に最も大きな影響を与えるオゾンの暴露時期の解明
- オゾン影響を回避・軽減する窒素の施用条件、ケイ酸質資材類の施用効果の検討
- 分子マーカーを利用した水稻品種の高温・オゾン感受性評価手法の開発
- 高温下でのオゾンストレスを特異的に検出できるストレス診断用 DNA アレイの開発

これらの成果を基に、適応方策の一つとして高温・オゾン耐性品種の選択、施肥条件やケイ酸質資材類の施用等による影響回避・軽減策の提言、分子マーカー・ストレス診断用 DNA アレイを利用した長期暴露試験に代わる新しい診断・予測評価手法の開発、およびアジア圏を対象とした環境基準の検討に必要なオゾンの暴露指標について提言を行う。

3. 研究の方法

(1) 気温とオゾン濃度上昇が水稻の収量・品質に及ぼす影響評価に関する研究

1) オゾン暴露および加温処理方法

オープントップチャンバーシステム (OTC) に導入する空気を活性炭フィルターで浄化した浄化空気区 (CF区) と、これにオゾンを追加したオゾン添加区を設定した。オゾン添加区に用いた基準オゾン濃度は、埼玉県環境科学国際センター (埼玉県加須市上種足) において2000~2007年に観測された5月~9月の時間平均オゾン濃度を求め、これを基準 ($\times 1.0$ 区) にして、基準濃度の0.8倍、1.5倍、2.0倍および2.5倍の濃度区を設けた (CF、 $\times 0.8$ 、 $\times 1.0$ 、 $\times 1.5$ 、 $\times 2.0$ 、 $\times 2.5$ 区)。加温区は、OTCの外気浄化用活性炭フィルターの前段部に電気ヒーターを設置し、吸入空気を加温した。加温区の設定はCF区、 $\times 1.0$ 、 $\times 2.0$ および $\times 2.5$ 区を対象とした。いずれも、1処理区当たり2つのチャンバー反復を設定した。栽培期間中の平均気温は年度により異なったが加温区の平均気温は通常温度 (無加温) 区よりも1.0~1.7°C高かった。

2) 水稻栽培方法および調査方法

3年間で内外の60品種・系統をオゾン暴露試験に供試した。このうち、“きらら397、コシヒカリ、タカナリ、にこまる、日本晴、ササニシキ”の6品種は3年間共通して試験に用いた。各品種について2008年度および2009年度は1ポット当たり4個体を定植し、2010年度は1ポット当たり5個体を定植し、チャンバー当たり5ポットを準ランダムブロック配置した。ポットは1/2,000aの白色プラスチック製ワグネルポットで、クロボク土を充填し、くみあいLPコート入り複合444-D80号 (N-P-K=14-14-14) を基肥として20kgN/10a相当量を施肥し、追肥は実施しなかった。収穫後、精籾重量を測定後、籾すりを行い、玄米重量、外観形状、食味品質を計測した。また、収穫後の稲わらの家畜用飼料としての品質を評価するため、消化性、リグニン含量、フェノール類含量の測定を実施した。

3) わが国およびアジア圏のオゾン濃度分布の推定と収量、品質の推定方法

a. 県別のオゾン濃度の推定

大気常時監視測定局の1985年から2008年のデータを基にして、県別に水田地帯の主な栽培期間に相当する5月~9月の日中12時間の平均オゾン濃度を求め、これをもとにして各県別の2020、2030、2050年のオゾン濃度を推定した。また、2008年度の平均濃度が2倍になった場合についても検討した。代表的な品種について収量-オゾン濃度との関係式より相対収量、相対タンパク質含量を求め、減収率、タンパク質含量の上昇率を算出・推定した。

b. アジア圏のオゾン濃度の推定

アジア圏を対象とした広域のオゾン濃度の予測には、全球化学物質輸送モデルMOZART-4を使用して2005年を対象に1年間の月平均濃度を求めるとともに、2005年の人為起源排出量を50%増加させた場合のオゾン濃度分布を求めた。計算結果をもとに、緯度経度2.8度の格子の平均オゾン濃度とアジア圏の水田の分布データとを重ね合わせ、水稻栽培地帯に相当するメッシュ当たりの月平均オゾン濃度を求め、オゾン暴露試験結果より得られた日本型およびインド型品種の平均収量推定式により収量を算出し、オゾンによる減収率を推定した。

(2) 水稻の生育時期別オゾン感受性の評価に関する研究

1) 水稻の栽培方法

埼玉県環境科学国際センター内にある外気オゾン濃度比例追従型のOTC内で“コシヒカリ”を供試品種として栽培した。各実験処理区とも黒ボク土を詰めたプラスチック製ポット (容積6L) に1ポットあたり3個体、4ポットをランダム配置した。なお、OTC本体は、床部から外気やオゾンを含む空気を吹き出す高床式の天窓式ガラス室である。施肥は、育成スタート時にくみあいLPコート複合444-D-80号 (N-P₂O₅-K₂O=14-14-14) を基肥として20kg窒素/10a相当量を施肥し、追肥は

実施しなかった。

2) オゾン暴露方法

活性炭フィルターによってオゾンを除去した空気をOTC内に導入した浄化空気区（CF区）、外気をそのまま導入した外気区（Non Filter区、NF区）、オゾン濃度が外気の1.5倍になるように調整した処理区（1.5NF区）を設けた。なお、サブテーマ(1)では毎日同じパターンでオゾン暴露を行うのに対して、ここでは常時変動する外気濃度に追従して濃度調整がなされる点および用いたポットサイズが小さい点で差異がある。

オゾン暴露期間は、定植～栄養成長期（出穂前）、栄養成長期後半～生殖成長期前半（移行期）および生殖成長期（出穂後）に分け、暴露が終了した後はCF区に戻し、全期間無暴露（CF区）あるいは全期間暴露した場合の玄米収量と比較検討を行った。

3) 施肥方法

窒素施肥量の影響について、くみあいLPコート複合444-D-80号（N-P₂O₅-K₂O=14-14-14）を基肥として用い、追肥分は化成肥料（N-P₂O₅-K₂O=8-8-8）を用いて検討した。また、ケイ酸質資材類としてケイ酸カルシウムとケイ酸カリウムを対象に施用効果の検討を行った。

(3) 高温・オゾン適応のための分子マーカーの探索とオゾンストレス診断アレイの開発

1) 高温・オゾン適応のための分子マーカーの探索とオゾンストレス診断アレイの開発

a. イネ葉における高温・オゾン影響評価のための分子マーカーの探索

日本型品種（“日本晴、コシヒカリ、きらら397、にこまる”）とインド型品種（“タカナリ及びKasalath”）の幼苗への高温（30℃）、オゾン（150または200ppb）及び複合処理を行った。

可視障害を画像解析で数値化し、サクラネチン（ファイトアレキシン的一种）とマロンジアルデヒド（脂質分解物）の含量などを測定した。また、アジレント・テクノロジー社のイネ・マイクロアレイで遺伝子発現を解析し、影響の指標となる分子マーカーを探索した。

b. イネの収量に及ぼすオゾン影響に関する遺伝子座のQTL解析による同定

電力中央研究所赤城試験センターの温室で、“ササニシキ”/“ハバタキ”染色体断片置換系統群（CSSL系統）に外気暴露（NF区）と外気の2倍のオゾン添加（×2区）実験を行った。可視障害・純光合成速度・気孔コンダクタンス等を測定した。登熟後、地上部重量、桿長、桿数、一次枝梗数、精籾（稔実籾）数、精籾重を測定した。QTL解析ソフトJ-qt1及びQGeneを用いて、最尤法で計算し、LODスコア（対数オッズスコア）が3以上のもの、または形質に対する寄与率の高いマーカーを有意なQTL（量的形質遺伝子座）とした。データの再現性を見るために同じ実験を2009年度と2010年度の2回繰り返し行い、同定したQTLマーカー近傍に存在するAPO1遺伝子の発現解析を行った。

c. イネの高温・オゾンストレス診断用DNAアレイの開発

本研究開始前に作製したシロイヌナズナの遺伝子を搭載したプロトタイプのアレイが野外においても使えるかどうかについて検証を行った。サブテーマ(1)のOTCにてシロイヌナズナを生育させ、オゾン・気温上昇の急性及び慢性ストレス診断を行った。次に、a. で高温、オゾン及び複合ストレスにさらした6品種のイネ幼苗のDNAマイクロアレイ解析結果より、それぞれのストレス処理で2倍以上発現量が増加または1/2以下に発現量が低下した遺伝子から選択した182個のcDNAを、Multi-pin Blotter 96（アトー社）を用いてナイロン膜上に載せることによりアレイを作製した。作成したアレイの検証をオゾンまたは加温処理した“日本晴”を用いて行った。

2) 穂と種子における分子マーカーの分析によるイネの高温・オゾン影響評価に関する研究

a. 穂における分子マーカーの分析

温度25℃、相対湿度70%の自然光温室内で生育させたイネ（“日本晴、コシヒカリ、きらら397、にこまる、タカナリ、Kasalath”）を、それぞれの開花期にグロースキャビネットでオゾン（200ppb）、高温（35℃）、またはその複合環境に8時間さらし、穂における遺伝子発現を、アジレント社のイネ・マイクロアレイを用いて調べた。

b. 種子における分子マーカーの分析

2009年度に電力中央研究所赤城試験センターに設置した小型OTC内で“コシヒカリ、きらら397、タカナリ、Kasalath”を生育させ、野外オゾンまたは浄化空気にさらし、植物体の形態及び収量を調べた。また、アジレント社のイネ・マイクロアレイを用いて、“タカナリ及びコシヒカリ”の種子中のオゾンに応答した遺伝子発現を解析し、“タカナリ”の収量減少に関連している遺伝子を探索した。また、2009年度にサブテーマ(1)で得られた“日本晴、コシヒカリ、きらら397、にこまる、タカナリ、Kasalath”の玄米をマイクロアレイ分析に供し、影響の指標となる分子マーカーを探索した。

4. 結果及び考察

(1) 気温とオゾン濃度上昇が水稻の収量・品質に及ぼす影響評価

1) 水稻品種のオゾン感受性

3年間で合計60品種・系統を対象にオゾン濃度と収量反応について検討した結果、日本型品種はインド型品種よりもオゾン耐性の品種が多く、“日本晴、コシヒカリ、にこまる”などはオゾンの影響を受け難いオゾン耐性品種、“きらら397、ササニシキ、タカナリ、Kasalath、IR36”などはオゾンの影響を受けやすい感受性品種に分類された。

2) オゾン影響を評価するための暴露指標

栽培期間中の平均オゾン濃度、オゾンドース（1時間値を積分した値）、1時間値が一定濃度を超えた場合に積分するSUM、1時間値が一定濃度を超えた場合にその濃度以下を足切りして積分するAOTx、1時間値に重み付けをして積分するW126について、それぞれの24時間値、15時間値（5:00～19:59）、12時間値（6:00～17:59）、8時間値（8:00～15:59）、これらの8時間平均値の最大値の平均を求めた。“きらら397、ササニシキ、タカナリ”の収量とこれらの指標との回帰係数を求めて比較検討した。その結果、最も単純で簡便な暴露指標として平均濃度を、暴露期間の長短の影響を考慮したオゾンドースを使用するのが簡便であると考えられた。これらの指標の算出時間帯としては共通的に相関係数が高い日中12時間が適していると考えられた。

3) 収量および品質におよぼすオゾンと気温の複合影響

a. 収量におよぼす影響

2008～2010年度にかけて3回の栽培試験を実施した“日本晴、コシヒカリ、ササニシキ、きらら397、タカナリ、にこまる”の個体当たりの精籾重量（収量）を対象にオゾン、気温、年度間の差異について多元分散分析を実施し、それぞれの要因の影響について検討した。その結果、気温とオゾンの複合影響は“きらら397”と“にこまる”に見られた。“にこまる”で複合影響が検出されたのは、加温区の収量が全体的に増加したことに加えて、通常温度区でもオゾン濃度の高い区で収量が増加する傾向にあったことが反映されたものと考えられた。これらの結果から、一部のオゾン感受性の品種では複合影響が懸念されるものの、主要品種については実質的にオゾンと気温の複合影響を考慮しなくても良いと考えられた。

b. 品質におよぼす影響

上述した6品種の玄米を対象に外観品質を左右する整粒数の占める割合と食味品質を左右するタンパク質含量を対象にオゾンと気温の複合影響について検討した。その結果、気温の上昇とともにオゾン濃度が上昇した場合、両者の複合によって著しく整粒割合が低下するような現象は見られないこと、タンパク質含量はオゾン濃度の上昇とともに増加したが、気温との複合影響は見られないことが明らかとなった。

4) 稲わらにおよぼすオゾンの影響

オゾン暴露によって稲わら中の難消化性のリグニンおよび消化抑制に作用すると考えられるフェノール性物質が増加するため、消化性が低下、すなわち飼料価が低下する可能性のあることが明らかとなった。

5) 水稻の収量・品質の将来予測

a. わが国における水稻収量・品質の予測

大気常時監視測定局で記録されている光化学オキシダントデータをオゾン濃度データとみなして、5月～9月の日中12時間の平均オゾン濃度を県別に算出し、そのトレンドから2020、2030および2050年度のオゾン濃度を推定するとともに、2008年度の2倍のオゾン濃度となった場合の収量を推定した。2009年度栽培統計から各県別に主要品種の構成割合を算出し、温度影響を考慮せずに主要品種については暴露試験結果に基づいて個別の収量推計式を当てはめ、暴露試験結果のない品種については日本産品種の平均式を当てはめ相対収量を推計した。図-1の上図は県別の5月～9月の日中12時間の平均オゾン濃度の分布を示したもので、現在観察されているオゾン濃度の経年変化が将来的に継続した場合には、関東、中部、中国、近畿地方の濃度が高くなり、これに伴って、埼玉県や群馬県で水稻の収量が低下する傾向にあった。現在栽培されている主要品種の作付割合が将来的にも維持され続けると仮定した場合、2050年時点において全国平均で約2%程度の減収で済むと見積もられた。同様に、タンパク質含量について推定した結果、2050年時点において全国平均では相対含量が3.9%増加すると推定された。

b. アジア圏の水稻収量の予測

MOZART-4を用いて2005年のアジア圏の濃度分布を推定するとともに、2005年における人為起源の排出量を50%増加させた場合のオゾン濃度の分布を算出した。得られた結果から海域部分を除き、さらに水田地帯を含む格子を対象に平均オゾン濃度を求め、水稻の相対収量を予測した（図-2）。主要国の平均オゾン濃度を算出し、オゾン暴露試験結果から得られたインド型品種の平均収量予測式を当てはめて、国別の相対収量を予測した。

モデルで再現した2005年の各国の平均オゾン濃度は44.6ppbと推定され、これにインド型品種

の収量予測式を適用してオゾンの影響を推定した結果、全生産量は潜在的に約8%の減収となっていると推定された。また、2005年の人為起源の排出量を5割増とした場合のオゾン濃度は48.9ppbと推定され、この場合の減収率は約10%と見積もられた。これらの推計値は、既往の日本型品種や米国で行われた結果から誘導された推計式から求められる減収率よりも大きいことが明らかとなった。

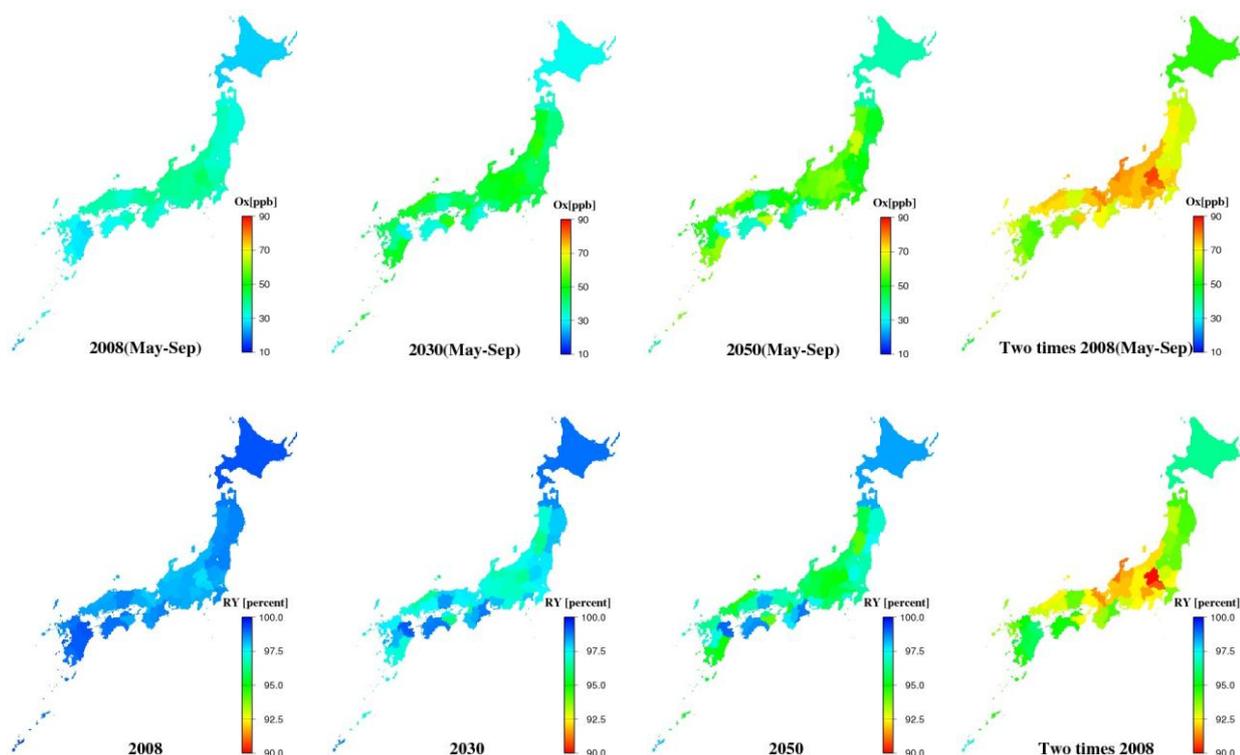


図-1 わが国の日中平均オゾン濃度の分布（上）と水稲収量（下）の予測結果

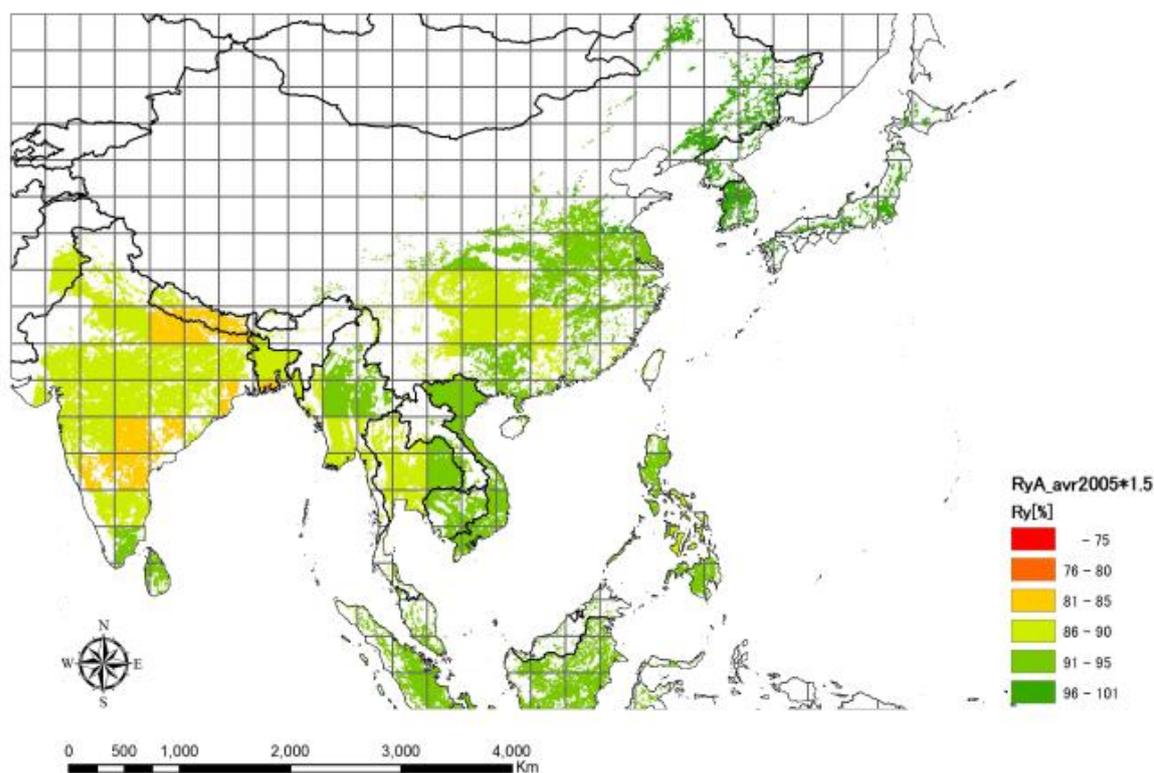


図-2 計算対象領域の水田分布と人為起源の排出量を1.5倍にした場合のオゾン濃度の分布から求めたアジア圏における水稲の相対収量予測分布図

(2) 水稻の生育時期別オゾン感受性の評価

1) 水稻の収量に及ぼす生育時期別のオゾン影響の評価

オゾンの積算ドーズであるAOT40 (Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40ppb) と各年の全期間オゾン処理をしていない処理区 (CF区) の収量を100%とした時の相対収量との関係から暴露時期の影響を評価した結果、収量低下率は移行期のオゾン暴露が一番大きく、次に栄養成長期であった。結実前後の移行期は期間が短いものの、この時期のオゾン暴露が収量に与える影響は大きいことが明らかとなった。

2) 水稻育成時の施肥条件が収量を指標にしたオゾン感受性に及ぼす影響の評価

窒素施肥量が多くなるのに伴って水稻の収量は増加する傾向にあった。しかし、水稻の収量に対するオゾンの影響は窒素施肥量が変わっても大きく変わらなかった。このため、収量レベルを維持するためには窒素を多めに施肥する必要があると考えられた。また、ケイ酸質資材を施用してもオゾンの影響を軽減あるいは回避できないことも判明した。

(3) 高温・オゾン適応のための分子マーカーの探索とオゾンストレス診断アレイの開発

1) 高温・オゾン適応のための分子マーカーの探索とオゾンストレス診断アレイの開発

a. イネ葉における高温・オゾン影響評価のための分子マーカーの探索

様々なイネ品種の幼苗に高温とオゾンの単独及び複合処理を行い、葉の分子マーカーを探索した。その結果、画像解析で数値化したオゾンによる可視障害と関連する147個の遺伝子発現マーカーが明らかになり、その機能分類から可視障害の進行に伴う細胞機能が示唆された。

また、様々な代謝産物を分析した結果、オゾンによる収量影響を受けにくい品種ではマロンジアルデヒド (脂質分解物) とサクラネチン (ファイトアレキシンの一種) の含量が、オゾン暴露により顕著に増加することが明らかになり、オゾン耐性を判定する指標として利用できると考えられた (図-3)。また、マイクロアレイで網羅的に遺伝子発現を調べた結果、多数の遺伝子の発現誘導と発現抑制が検出された。これらとサブテーマ(1)の暴露試験結果との関係を調べたところ、高温、オゾン、及びそれらの複合ストレスによる収量やバイオマス影響と発現誘導レベルが相関している遺伝子マーカーが多数明らかになり、この相関関係を利用して分子マーカーを調べることにより幼苗の段階で簡便にイネ品種の高温とオゾンに対する感受性を評価する方法を開発した (図-4)。

b. イネの収量に及ぼすオゾン影響に関与する遺伝子座のQTL解析による同定

イネのオゾンによる収量低下に関与する遺伝子座を同定する目的で、CSSL系統を解析し、QTL解析を行った結果、オゾン感受性イネ品種“ハバタキ”におけるオゾンによる収量の減少は、*APO1*遺伝子の働きが抑制されることによる一次枝梗数の減少を介して総精粒数 (総穎花数) が減少することにより生じている可能性が示唆された。

c. イネの高温・オゾンストレス診断用DNAアレイの開発

OTCで栽培したシロイヌナズナを用いてオゾン・気温上昇のストレス診断を行った。その結果、一日の最大オゾン濃度が120ppb以上の時、及び60ppbに加温が加わった時に、オゾン診断アレイによりオゾンの急性影響 (9時間暴露) が検出できた。また、一日の最大オゾン濃度が60ppb以上の時に慢性影響 (1週間暴露) が検出できた。また、イネ・マイクロアレイ解析の結果に基づき、イネの高温・オゾンストレス診断用DNAアレイを作成し、ストレス診断を行った。その結果、オ

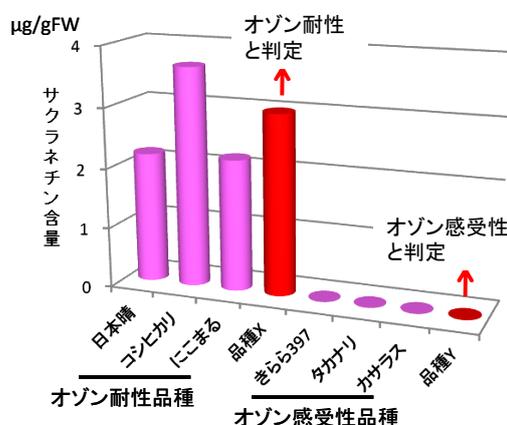


図-3 サクラネチンを利用したイネのオゾン影響評価方法

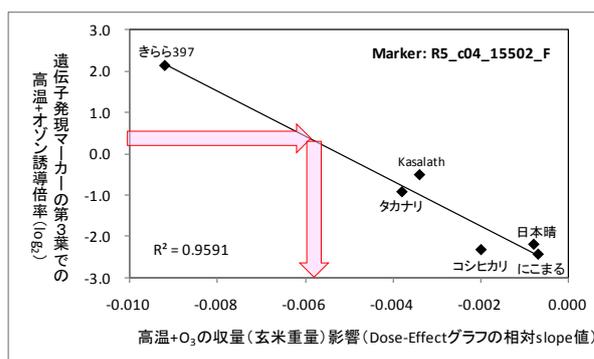


図-4 遺伝子発現マーカーによる影響評価の一例

矢印は、相関関係を利用して遺伝子発現マーカーから高温とオゾンの複合による収量影響を予測する原理を示す。

ゾンまたは高温に特異的に発現応答する遺伝子を複数同定することができ、イネのストレス診断アレイの有用性が示唆された（図-5）。

2) 穂と種子における分子マーカーの分析によるイネの高温・オゾン影響評価に関する研究

a. 穂における分子マーカーの分析

“コシヒカリ、きらら397、にこまる、日本晴、タカナリ、Kasalath”を、開花期にオゾン（200 ppb）、高温（35℃）、またはオゾンと高温の複合環境に8時間さらし、穂におけるそれぞれのストレス因子に応答する多数の遺伝子を、イネDNAマイクロアレイを用いて明らかにした。“Kasalath”を除き、高温応答遺伝子がオゾン応答遺伝子より多かったため、オゾン（200 ppb）より高温（35℃）の方が、イネの穂に対する一過的なストレスとして、より大きいことが示唆された（表-1）。また、高温、オゾン、またはこれらの複合ストレスによる収量、不稔歩合、米の品質（タンパク質含量）への影響と相関のある穂の遺伝子が明らかになった。

b. 種子における分子マーカーの分析

オゾン感受性の“タカナリ”とオゾン耐性の“コシヒカリ”における個々の遺伝子の発現パターンを、DNAマイクロアレイを用いて調べたところ、245個の遺伝子が野外オゾンにさらされた“タカナリ”の収量減少に関連していた。また、前述した6品種を対象にサブテーマ(1)で得られた収量、品質等と、これらの品種の種子における遺伝子発現パターンを比較した結果、3,300個のストレス応答性遺伝子と、これらのうちで、収量・品質等への影響と相関のある遺伝子が明らかになり、この相関を利用して、種子の遺伝子発現マーカーによる影響評価法を開発した。

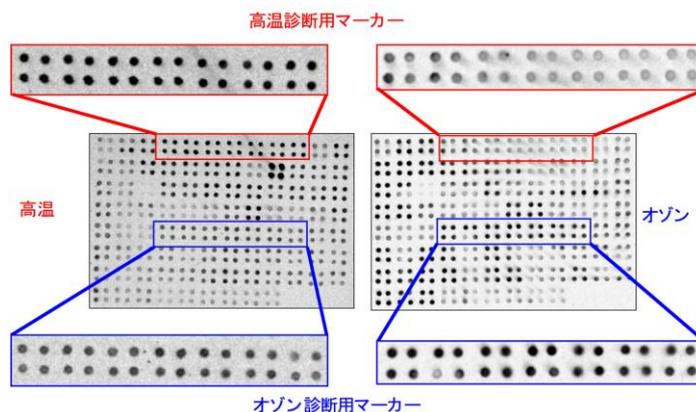


図-5 イネ・ストレス診断アレイによるオゾン、高温診断

表-1 イネ6品種の穂における、高温、オゾンまたは複合ストレスに応答した遺伝子数

品種	高温(35℃)		O ₃ (0.2 ppm)		高温+O ₃	
	誘導	抑制	誘導	抑制	誘導	抑制
日本晴	502	428	115	143	1333	739
にこまる	1601	1679	745	895	2205	1831
コシヒカリ	963	1653	176	444	873	1481
きらら397	789	622	191	276	988	625
タカナリ	1522	1300	107	49	1133	909
Kasalath	996	835	788	1083	906	503

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究により、アジアで広域に栽培されている水稻品種の収量におよぼすオゾンの影響についての品種間差異の一端が明らかとなった。また、オゾン感受性品種では加温条件下においてオゾン濃度が著しく上昇した場合には、収量低下と同時に品質が低下しやすい可能性のあることが明らかとなった。これまで水稻収量におよぼすオゾンの将来影響については日本型の品種や米国で得られた推計式を用いてアジア圏に対する収量予測が行われていたが、インド型品種で得られた推計式を適用した結果、従来報告よりも減収率の大きいことが初めて明らかとなった。また、水稻収量におよぼすオゾン影響は、栄養成長期の後半から生殖成長期の前半期（移行期）におけるオゾン暴露量が収量減収に大きな効果を持つ可能性のあることが明らかとなった点や、QTL解析により収量減少に係る遺伝子が推定できたことにより、影響発現のメカニズムや影響回避・軽減策を検討する際に重要な知見が得られたと考える。さらに、本研究によって、初めて植物に対する高温とオゾンの複合影響が分子レベルで網羅的に明らかになったことから、分子マーカーを用いたイネ品種の感受性評価に道筋が立ったと同時に、高温・オゾン影響メカニズムの解明や耐性品種の選択・育種に繋がる成果が得られたと考える。本研究によりイネ・ストレス診断アレイの試作に至ったことから、今後この有効性が広く検証できれば、植物のストレス診断用DNAアレイとして世界初の成果となる。

(2) 環境政策への貢献

温暖化時の食糧供給量を確保する上で、これまで検討されていなかった気温・オゾン濃度上昇の

複合影響について検討した結果、オゾンと気温の複合影響はそれほど顕著ではなく、むしろオゾンの影響対策を検討する必要性のあることが明らかとなったと考える。わが国の主要品種に対するオゾン濃度上昇の影響は比較的小さいと推定されたが、アジア圏で広く栽培されているインド型品種は、日本型品種よりもオゾン濃度の上昇による収量低下が大きいことが新たに明らかとなった。インド型品種の生産量は極めて多いことからアジア圏の食糧セキュリティを考慮するとインド型品種を対象にしたオゾン耐性品種の育種・導入などによる生産性の確保は持続的な発展を検討する上で非常に有効な適応方策の一つであること、さらには開発途上国における家畜飼料としてのバイオマス供給量を確保するうえでもオゾン対策の必要性を示すことができたことは、アジア圏の稲作地帯の大気環境対策の重要性を喚起するうえで重要な知見を提供するものと考えられる。また、分子マーカーを利用した新しい影響評価手法を確立できる見通しがついたことから、温暖化時の水稻をはじめとするさまざまな植物に対するオゾン影響の新しい簡易な評価手法として東アジア酸性雨ネットワーク参加国等を通じて開発途上国へ技術移転すること等により広く活用が期待されると考える。

6. 研究者略歴

課題代表者：河野吉久

1949年生まれ、東京農工大学大学院修士課程修了、博士（農学）、現在（財）電力中央研究所・環境科学研究所 研究顧問

研究参画者

(1) : 河野吉久（同上）

(2) : 米倉哲志

1972年生まれ、東京農工大学大学院連合農学研究科修了、博士（農学）
現在、埼玉県環境科学国際センター 自然環境グループ 主任

(3) 1) : 久保明弘

1958年生まれ、東京都立大学大学院理学研究科修士課程修了、博士（理学）
現在、独立行政法人国立環境研究所 生物圏環境研究領域 主任研究員
: 玉置雅紀

1969年生まれ、名古屋大学大学院農学研究科博士課程修了、博士（農学）
現在、独立行政法人国立環境研究所 生物圏環境研究領域 主任研究員

2) : Kyoungwon Cho

1974年生まれ、韓国Chonnam National University Biotechnology学部博士課程修了、博士（理学）
現在、独立行政法人国立環境研究所 生物圏環境研究領域 EFフェロー
: 久保明弘（同上）

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) Yoshida, S., M. Tamaoki, M. Aono, A. Kubo, H. Saji, and N. Nakajima (2009) Protective effects of ethylene and salicylic acid against ozone exposure in *Arabidopsis*. J. Jpn. Soc. Atmos. Environ. 44:9-15.
- 2) Yoshida, S., M. Tamaoki, M. Ioki, D. Ogawa, Y. Sato, M. Aono, A. Kubo, S. Saji, H. Saji, S. Satoh, and N. Nakajima (2009) Ethylene and salicylic acid control glutathione biosynthesis in ozone exposed *Arabidopsis*. *Physiol. Plant.* 136(3) : 284-298.
- 3) Sawada, H., and Y. Kohno (2009) Differential ozone sensitivity of rice cultivars as indicated by visible injury and grain yield. *Plant Biology* 11(suppl):70-75.
- 4) Cho, K., G. K. Agrawal, N.-S. Jwa, A. Kubo and R. Rakwal (2009) Rice OsSIPK and its orthologs: A “central master switch” for stress responses. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 379:649-653.
- 5) Cho, K., G. K. Agrawal, N.-S. Jwa, J. Shibato, N. L. Torres, A. Kubo, and R. Rakwal (2009) Rice OsSIPK: A central component of ozone-triggered physiological responses. *Plant Signaling Behav.* 4(5):448-450.
- 6) 澤田寛子、河野吉久 (2010) 水稻の葉の老化および収量に及ぼす高濃度オゾンの影響. 大気環境学会誌 45(6):283-288.
- 7) Cho, K., S. Tiwari, S. B. Agrawal, N. L. Torres, M. Agrawal, A. Sarkar, J. Shibato, G. K. Agrawal, A. Kubo, and R. Rakwal (2011) Tropospheric ozone and plants: Absorption, responses and consequences. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 212:61-111.

- 8) Frei, M., Y. Kohno, M. Wissuwa, H. O. S. Makkar and K. Becker (2011) Negative effects of tropospheric ozone on the feed value of rice straw are mitigated by an ozone tolerance QTL. *Global Change Biology*. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02379.x.
- 9) Chen, C., M. Frei, J. P. Tanaka, Y. Kohno, and M. Wissuwa (2011) Tropospheric ozone poses a rising threat to yield stability in rice: Tolerance mechanisms and underlying genetic factors. *Genes, Genomes and Genomics* (in press)

(2) 査読付論文に準ずる成果発表
なし