

A-0806 気温とオゾン濃度上昇が水稻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

(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

財団法人 電力中央研究所

環境科学研究所 河野吉久

環境科学研究所 水域環境領域 石井 孝

環境科学研究所 大気・海洋環境領域 速水 洋

〈研究協力者〉

独立行政法人 国立環境研究所 生物圏環境研究領域 玉置雅紀

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構

作物研究所 大豆生理研究チーム 小松節子

独立行政法人 国際農林水産業研究センター

生産環境領域 Matthias Wissuwa、Charles Chen

埼玉県環境科学国際センター 自然環境担当 米倉哲志

財団法人 電力中央研究所

環境科学研究所 生物環境領域 松村秀幸、澤田寛子、Nisar Ahmad Khan

ドイツ連邦共和国 University of Bonn Michael Frei

University of Hohenheim Klaus Becker、Harinder P. S. Makkar

平成20～22年度累計予算額：100,769千円（うち、平成22年度予算額：30,169千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 地表面オゾン濃度の植生におよぼす影響については現状の濃度レベルでも潜在的な影響が指摘されている。しかし、地球温暖化が進行した条件下でのオゾンの影響についてはほとんど検討されていない。本サブテーマでは、温暖化進行時のわが国を含むアジア圏の食糧・バイオマス供給量の確保を目指した適応方策の一つとしてオゾン耐性水稻品種の選択的利用を提言することを目標に、主要な栽培品種を対象に気温とオゾン濃度上昇が水稻の生産性におよぼす複合影響に関する検討を行い、下記の成果を得た。

60品種・系統の水稻にオゾンを暴露し、収穫時の地上部重量と収量（精籾重量）を指標にして品種間差異の程度について検討した。その結果、現在わが国で栽培されている“コシヒカリ”などの日本型の主要品種は海外のインド型品種よりもオゾン耐性であることが明らかとなった。気温とオゾンの複合影響について検討した結果、複合影響による収量減少は“コシヒカリ”などの主要品種にはみられないことが明らかとなった。

栽培期間中の平均オゾン濃度と収量との関係から、2050年度時点におけるオゾン濃度上昇によるわが国における水稻の減収率は約2%程度であると推定された。一方、人為起源の排出量を2005年の5割増しとした場合のオゾン濃度上昇による水稻収量は、約10%の減収となり、アジア圏における水稻生産におよぼすオゾンの影響はわが国の水稻生産に対する影響よりも大きいことが初めて明らかとなった。

アジア圏の水稻生産および家畜の餌飼料となる稲わらを量的に確保するために“コシヒカリや

日本晴”が有するオゾン耐性遺伝子のインド型品種への導入・育成が、アジア圏の持続的な発展を目指す上で重要な課題であると考えられた。

[キーワード] 地球温暖化、オゾン、品種間差、品質影響、稲わら

1. はじめに

二酸化炭素排出増にともない、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が指摘されている^{1,2)}。これまでのオゾンの植物影響に係る研究により、現状でも農作物などの植物に対してオゾンの潜在的な影響が指摘されているが、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^{3,4)}。温暖化に係る将来予測では、温度上昇に対する植生の脆弱性や水稻の高温障害などが検討されているが、気温の上昇とオゾン濃度の上昇と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。

水稻は、わが国をはじめアジア各国の主要な穀物であり、栽培方法や品種についての基本情報が他の作物よりも幅広く整備されており、広域調査・評価用植物として最適なモデル植物の一つである。また、これまでに実施されてきたオゾンの植物影響についての研究成果から、種間差異のみならず品種間差異を考慮する必要性のあることなどが明らかになっている。しかし、水稻に対するオゾンの影響評価を行う上で基本となる水稻品種のオゾン感受性について検討した報告は少なく、オゾンの影響発現メカニズム解明に係る研究のほとんどが可視障害の発現をベースとしており、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も少ない^{5,6)}。特に、アジア各国の大気汚染研究は欧米に比較して大幅に遅れており、*indica*型（以下、インド型と記す）の海外産品種のオゾン感受性に係る研究例はごく一部の例を除いてほとんどみられない⁷⁻¹¹⁾。

本研究において、内外で栽培されている主要品種の収量・品質におよぼす温度とオゾンの複合影響を実験的に解明することにより、温暖化が進んだ条件下においてオゾン耐性を有する品種を選別し、既存品種と代替することができれば、開発途上国の食糧供給量の確保に係る実行可能な適応方策の一つとして極めて意義が大きいと考える。

2. 研究目的

水稻（イネ）は、アジアを中心に広域にわたり栽培されている穀物であることからオゾンの広域影響評価を行う際の現実的なモデル植物として最も適した材料の一つと考えられる。温暖化の影響評価や様々な環境ストレスに対する水稻の感受性やそのメカニズムに係る研究が行われているが、オゾンに対する品種間差異については小林ら（2009）が実施したFACE実験の成果^{8,10)}あるいはAkhtarら⁷⁾、Maggsら^{9,11)}Yonekuraら⁶⁾の報告が見られる程度で、温暖化条件を組み合わせた条件下での品種間差異について検討した報告はない。そこで、本サブテーマでは、オゾン濃度と気温上昇に対する品種間差異を明らかにすることにより、温暖化進行時でもオゾン影響を回避可能なオゾン耐性品種の選択を目指す。また、オゾン感受性品種を特定することによりオゾン耐性品種の育成に役立つ指標を特定することを目標とする。このため、国内外で栽培されている代表的な

*japonica*型（以下、日本型と記す）およびインド型の品種を対象にして、オゾン濃度上昇と気温が上昇した場合の収量・品質におよぼす複合影響について実験的に解明する。また、オゾンの暴露指標についても検討・提言しようとするもので、本サブテーマの3ヶ年間の主な目標は以下の通りである。

- 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稻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提言
- 家畜用飼料としての稲わらにおよぼすオゾンの影響評価
- 日本を含むアジアの水稻生産性におよぼすオゾン影響の予測

3. 研究方法

(1) オゾン暴露および加温処理方法

本研究では、オープントップチャンバーシステム（以下、OTCと表記する）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（以下、CF区と記す）と、これにオゾンを添加した4段階のオゾン濃度区を設定した。また、1処理区当たり2つのチャンバー反復を設定した。

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年に観測されたデータを基に、5月～9月の時間平均値を求め、これを基準（以下、 $\times 1.0$ と表記）にして、2008年度は基準濃度の0.8倍、1.0倍、1.5倍および2.0倍の濃度区を設けた（以下、CF、 $\times 0.8$ 、 $\times 1.0$ 、 $\times 1.5$ 、 $\times 2.0$ 区と記す）。2009年および2010年度は $\times 0.8$ 区の代わりに $\times 2.5$ 区を設けた（図-1-1）。

試験期間中の屋外の6月～10月の平均気温は、2008年度は22.1℃、2009年度は19.9℃、平成2010年度は22.7℃であった（図-1-2）。

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（竹綱製作所製ユニ

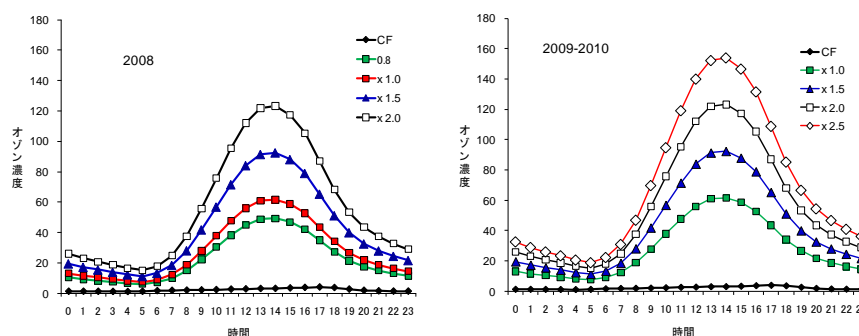


図-1-1 栽培試験に用いたオゾン暴露濃度パターン

縦軸:オゾン濃度(ppb)

基準濃度 ($\times 1.0$) : 埼玉県環境科学センターで観測した2000～2007年の5月～9月の平均濃度

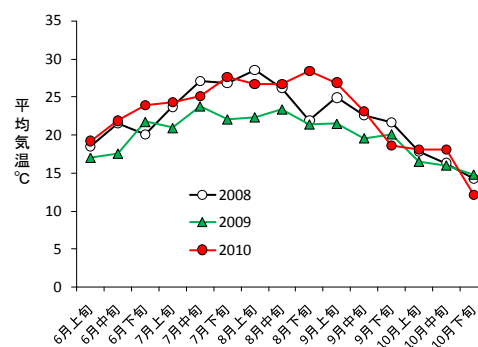


図-1-2 旬平均外気温の推移

ットヒーター（UH-25、200V-5kw）を設置し、吸入空気を加温した。加温区の設定は2008および2009年度はCF区、×1.0区および×2.0区の3段階、2010年度はこれに×2.5区を加えた4段階とし、それぞれ2チャンバーの反復を設けた。電気ヒーターを最大出力で稼働させた場合、平均気温が通常温度区よりも5℃以上に上昇したため、出力を半分にして稼働させた。その結果、2008～2010年度における6月～10月の通常温度区のチャンバー内の日平均気温はそれぞれ21.1℃、20.7℃、22.5℃で、加温区との平均温度差はそれぞれ1.7、1.0、1.6℃であった。なお、各年度の通常温度区のチャンバー内気温は外気より1.3、0.8、-0.2℃高かった。

（2）供試植物

表-1-1に供試した水稻品種・系統のリストを示した。2008年度の試験に供試した品種は、国産の主要品種を中心に20品種、海外産はインド、IRRIから収集した品種20品種を対象にした。2009

表-1-1 暴露試験に供試した水稻品種・系統の一覧

	年度		Source
	2009	2010	
あきたこまち	あきたこまち		埼玉県環境科学国際センター (CESS)
キヌヒカリ			埼玉県環境科学国際センター (CESS)
きらら 397	きらら 397	きらら 397	(独) 農業環境技術研究所 (NIAES)
コシヒカリ	コシヒカリ	コシヒカリ	(独) 農業環境技術研究所 (NIAES)
ゴロヒカリ			群馬県農業技術センター (GATC)
彩のかがやき			埼玉県環境科学国際センター (CESS)
ササニシキ	ササニシキ	ササニシキ	埼玉県環境科学国際センター (CESS)
里のゆき			山形県農業総合研究センター (YIARC)
タカナリ	タカナリ	タカナリ	(独) 農研機構・作物研究所 (NICS)
たちすがた			(独) 農研機構・作物研究所 (NICS)
つがるロマン			(独) 青森県産業技術センター・農林総合研究所 (AITC)
		東郷	(独) 農業生物資源研究所 (NIAS/Genebank)
にこまる	にこまる	にこまる	(独) 農研機構・九州沖縄農業研究センター (KONARC)
日本晴	日本晴	日本晴	(独) 農業環境技術研究所 (NIAES)
はえぬき			山形県農業総合研究センター (YIARC)
ひとめぼれ			(独) 農業環境技術研究所 (NIAES)
ヒノヒカリ	ヒノヒカリ		(独) 農業環境技術研究所 (NIAES)
まっしぐら			(独) 青森県産業技術センター・農林総合研究所 (AITC)
もみロマン			(独) 農研機構・作物研究所 (NICS)
夢つきし			福岡県農業総合試験場 (FARC)
ゆめひたち			埼玉県環境科学国際センター (CESS)
	ゆめさやか		山形県農業総合研究センター (YIARC)
		ハバタキ	(独) 農業生物資源研究所 (NIAS/Genebank)
	Ai Yeh Lu		International Rice Research Institute (IRRI) (China)
Basmati*			University of Mysore, India
	Basmati 385	Basmati 385	International Rice Research Institute (IRRI)
BPT 5204*	BPT 5204*		University of Mysore, India
He-Jiang 18	He-Jiang 18	He-Jiang 18	International Rice Research Institute (IRRI) (China)
IET 139001*	IET 139001*		University of Mysore, India
IR 8*	IR 8*		(独) 農研機構・作物研究所 (NICS)
IR 20	IR 20		University of Mysore, India
IR 36	IR 36		(独) 農研機構・作物研究所 (NICS)
IR 64	IR 64		(独) 農研機構・作物研究所 (NICS)
	IR 74		(独) 国際農林水産業研究センター (JIRCAS)
JAYA*	JAYA*		University of Mysore, India
JGL 1798	JGL 1798		University of Mysore, India
Jothi	Jothi		University of Mysore, India
Kasalath	Kasalath	Kasalath	(独) 国立環境研究所 (NIES)
KMP-101*	KMP-101		University of Mysore, India
KRH 2	KRH 2		University of Mysore, India
Lijianxintuanhegu			International Rice Research Institute (IRRI) (China)
	Milyang 23		(独) 農業生物資源研究所 (NIAS/Genebank/WRC 57)
MTU 1001*	MTU 1001*		University of Mysore, India
		ND6172 (AsA-m)	(独) 国際農林水産業研究センター (JIRCAS)
	Nepal 555		(独) 農業生物資源研究所 (NIAS/Genebank/WRC 40)
	Pai-Chiao-Tsao		International Rice Research Institute (IRRI) (China)
	Rexmont		(独) 農業生物資源研究所 (NIAS/Genebank/WRC 50)
		RIL 46	(独) 国際農林水産業研究センター (JIRCAS)
		RIL 76	(独) 国際農林水産業研究センター (JIRCAS)
Sha-Tiao-Tsao	Sha-Tiao-Tsao		International Rice Research Institute (IRRI) (China)
	SL 41	SL 41	(独) 国際農林水産業研究センター (JIRCAS)
		SL 421	(独) 国立環境研究所 (NIES)
	SL 46	SL 46	(独) 国際農林水産業研究センター (JIRCAS)
	SL 15		(独) 国際農林水産業研究センター (JIRCAS)
	SL 37		(独) 国際農林水産業研究センター (JIRCAS)
Suphanburi 1			Naresuan University Thailand
Suphanburi 90			Naresuan University Thailand
Te-Qing	Te-Qing		International Rice Research Institute (IRRI) (China)
	Urasan 1		(独) 農業生物資源研究所 (NIAS/Genebank/WRC 51)
	Usen		International Rice Research Institute (IRRI) (China)

* 不稔率50%以上

年度は、2008年度に暴露試験に用いた品種の中から“きらら397、あきたこまち、コシヒカリ、タカナリ、ヒノヒカリ、にこまる、日本晴、Kasalath”の8品種に“ゆめさやか、ササニシキ、Jothi”の3品種に加え、幼苗レベルでオゾン感受性が特定されている“IR 36、IR 64、IR 74、SL 15、SL 37、SL 41、SL 46、RIL 46およびRIL 76”の9系統^{12,13)}を試験に用いた。また、海外産品種については20品種を対象にした。2010年度は“きらら397、コシヒカリ、タカナリ、にこまる、日本晴、Kasalath”の6品種と“東郷、ササニシキ、ハバタキ、SL 421、SL 41、SL 46、ND6172、He-Jiang 18”を対象とした。また、水稻のオゾン感受性の程度を比較確認するため、ダイズ4品種

(Nakasennari、Tamahomare、Harosoy、Arlington)とインゲンマメ(R123、S156)についても試験に供した。なお、ダイズの種子はGenebank/NIAS、インゲンマメの種子は米国USDA/NCSUより入手した。

栽培試験にはいずれも表面積が1/2,000aの白色プラスチック製ワグネルポットにクロボク土を充填し、定植後、活着を確認した後、くみあいLPコート入り複合444-D80号(14-14-14;チッソ旭肥料製)を20kgN/10a相当量施肥し、追肥は実施しなかった。各品種について2008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、各年度ともチャンパー当たり5ポットを準ランダムブロック配置とした。

(3) 調査方法

1) 可視障害調査方法

収集した内外の水稻20品種を対象に、水稻用育苗土を入れたプラスチックボックス(28cm×21cm×9cm、80個体/箱)に2008年8月8日に播種し、OTC内において活性炭フィルターを通した清浄空気区(CF区)で3週間生育させた。播種から3週間後の幼植物をオゾン暴露用のOTC(×2.0区)に移し、自然光下で12時間(6:00-18:00)オゾンを暴露した。オゾンの最高濃度は123ppbで、暴露12時間の平均濃度は81ppb、日平均オゾン濃度に換算した場合は57ppbであった。

葉の可視障害は各品種の第2葉、3葉、4葉(展開途中)上の褐色斑およびクロロシスの徴候に数値(Leaf Bronzing Score、LBS)を当てはめることによって定量化した。LBSは0:障害なし、1:黄白色斑の発生程度の軽いもの、2:褐色斑の発生程度の軽いもの、3:葉の面積の10-20%に黄白色斑および褐色斑が発生、4:葉の20-40%に黄白色斑および褐色斑が発生、5:葉の40%以上に黄白色斑および褐色斑が発生、6:葉の40%以上に褐色斑にネクロシス症状が伴うもの、7:部分的に枯死した葉、とした。可視障害の判定は、12時間のオゾン暴露終了後に12時間清浄空気下のCF区に戻した後に行った。

2) 植物体の測定

水稻については、籾がほぼ黄色になった段階で、個体別に地際部から地上部を刈り取り、最大葉身長、最大稈長、穂長、穂数、地上部重量、穂重、わら重、一次枝梗数を測定した。脱穀後に自動種子精選機(藤原製作所製 FV-459A)を用いて個体別に全籾をシイナと稔実籾に選別し、それぞれをマルチオートカウンター(藤原製作所製 KC-10M3)で計数し、登熟歩合を求めた。なお、ここで得られた稔実籾を本報告では精籾として取り扱うこととした。

日本型品種については電動もみすり器(ケット科学研究所製 TR-200)で籾すりを行い、玄米を得た。精籾および玄米についてそれぞれ重量を測定した後、後述する品質測定までの間はビニール袋に入れ、冷蔵庫で保管した。なお、インド型品種の籾は、電動もみすり器を用いると砕粒米

になる割合が著しく高かったため、籾すりは行わず、精籾の収量を比較検討するだけにとどめた。

ダイズおよびインゲンマメについては、ほとんどの着莢が褐色になってから収穫を実施し、種子数、重量等を調査した。

3) 玄米品質の測定方法

日本型品種と一部のインド型品種については、精籾を対象に籾摺りを行った後、穀粒判別器（静岡精機製 Virgo ES-1000）と食味計（静岡精機製 TM-3500）を組み合わせた米品質評価システム（静岡精機製 VPA-8800X-ES-TM）を使用して品質を評価した。得られた玄米を対象に、穀粒判別器を用いて外観品質を判別した後、近赤外透過式の食味計で水分含量、タンパク質含量、アミロース含量、脂肪酸度を求め、食味品質の判定を行った。本研究で用いた穀粒判別器の測定セルは日本型の国産米を対象にしたもので、日本型の短粒米に近い形状の“タカナリ”などの一部のインド型を除いた典型的な長粒型を示すインド型の品種についてはセルに収容できないこと、また、食味計にインド型品種用の基準検量線が準備されていないことから、外観品質および食味に係る指標の測定は日本型品種だけを対象に実施した。

4) 稲わらの分析方法

OTC内で幼苗から収穫に到るまで浄化空気(CF)、外気濃度レベル（×1.0）、外気の2倍濃度（×2.0）、外気の2.5倍濃度（×2.5）のオゾンで暴露した“Kasalath、IR 64、IR 74、日本晴”および“日本晴×Kasalath”に由来する染色体置換系統である“SL 41”、および“SL 46”の稲わらを対象に、粗タンパク質含量、リグニン、フェノール性物質含量など、飼料価に影響する要因を分析した。消化性については牛の第1胃内から採取した体液を含む *in vitro* 培養システムを用い、稲わらの消化・分解によって発生するガス生成量を測定することによって評価した¹⁴⁾。

（4）オゾン濃度および水稻収穫量の推定

1) 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、県別に水田地帯の水稻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年の推定濃度を求めた。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。

2) アジア圏のオゾン濃度の推定

日本を除くアジア圏ではオゾン濃度のモニタリングデータが公開されている地点は非常に少ない。このため、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-4¹⁵⁾を使用した。このモデルは大気中におけるさまざまな物理・化学過程を考慮して、85のガス状物質と12の粒子状物質の濃度を計算することができる。Emmonsら¹⁵⁾によると、MOZART-4は南半球の一部などを除いて、2000～2007年における地表付近のオゾン濃度をほぼ再現する。

本報告では、MOZART-4を電力中央研究所の計算機に移植し、Emmonsら¹⁵⁾が使用した気象データや排出量データを入手し、Emmonsら¹⁵⁾と同じ計算を実行し、同様の計算値が得られることを確認した。しかしながらEmmonsら¹⁵⁾による検証は時間・空間解像度がやや粗いことから、世界気象機関によるGAW（世界大気監視）プログラムよりわが国のつくば、綾里、南鳥島、与那国島における日平均濃度を入手して比較を試みた（図-1-3）。その結果、遠隔地に位置する南鳥島に対し、MOZART-4はきわめて高い再現性を示した。与那国島と綾里は7、8月に過大予測の傾向にあるが、

これはMOZART-4が周辺の高濃度気塊の流入を過大に評価したためと考えられる。それ以外の期間は、両地点とも良好に再現されている。一方、つくばは原因物質の発生地域に位置し、発生したNO_xによりオゾンが消費される反応が卓越するため観測値が低くなっているが、MOZART-4はこれを再現していない。これは、MOZART-4の水平解像度が緯度経度2.8度と粗いことが原因と考えられる。元来、MOZART-4は平均的な濃度の全球的な空間分布を予測することを目的に開発されたものであり、その点では高い再現性を有することが確認された。

以上を踏まえて、全球の全人為排出量が1.5倍に増加したとして、MOZART-4による濃度シミュレーション計算を行った。計算は上述のEmmonsら¹⁵⁾と同様に実施した現況再現計算結果をベースケースとし、2004年1月1日から排出量を増加させた計算を行い、2005年の1年間を評価対象とした。図-1-4の上図および下図はそれぞれ、ベースケースおよび排出量増加ケース

で計算されたアジア地域における地表付近オゾンの月平均濃度である。人為排出量が増大すると、1年を通じてアジア全体で濃度が上昇することがわかる。汚染地域では、これに局地的なオゾン生成が上乘せされるため、最高濃度はきわめて高くなると予想された。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^{16,17)}とを重ね合わせ、水稻栽培地帯に相当する格子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、減収率を推定した。

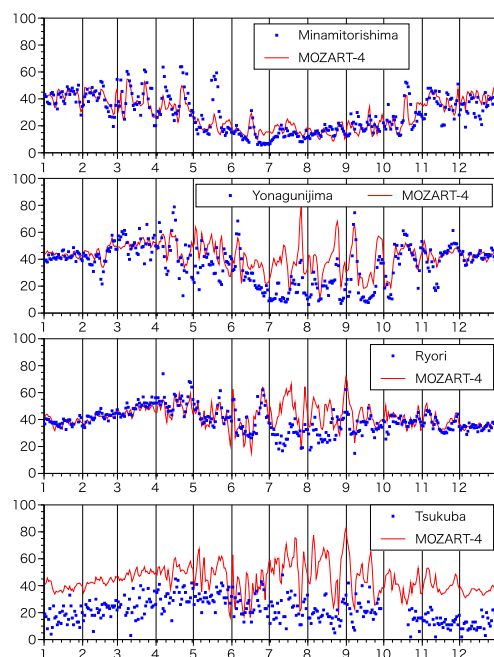


図-1-3 MOZART-4による日平均オゾン濃度の再現性の検討

縦軸：日平均オゾン濃度，横軸：月
ドット：観測値，実線：計算値

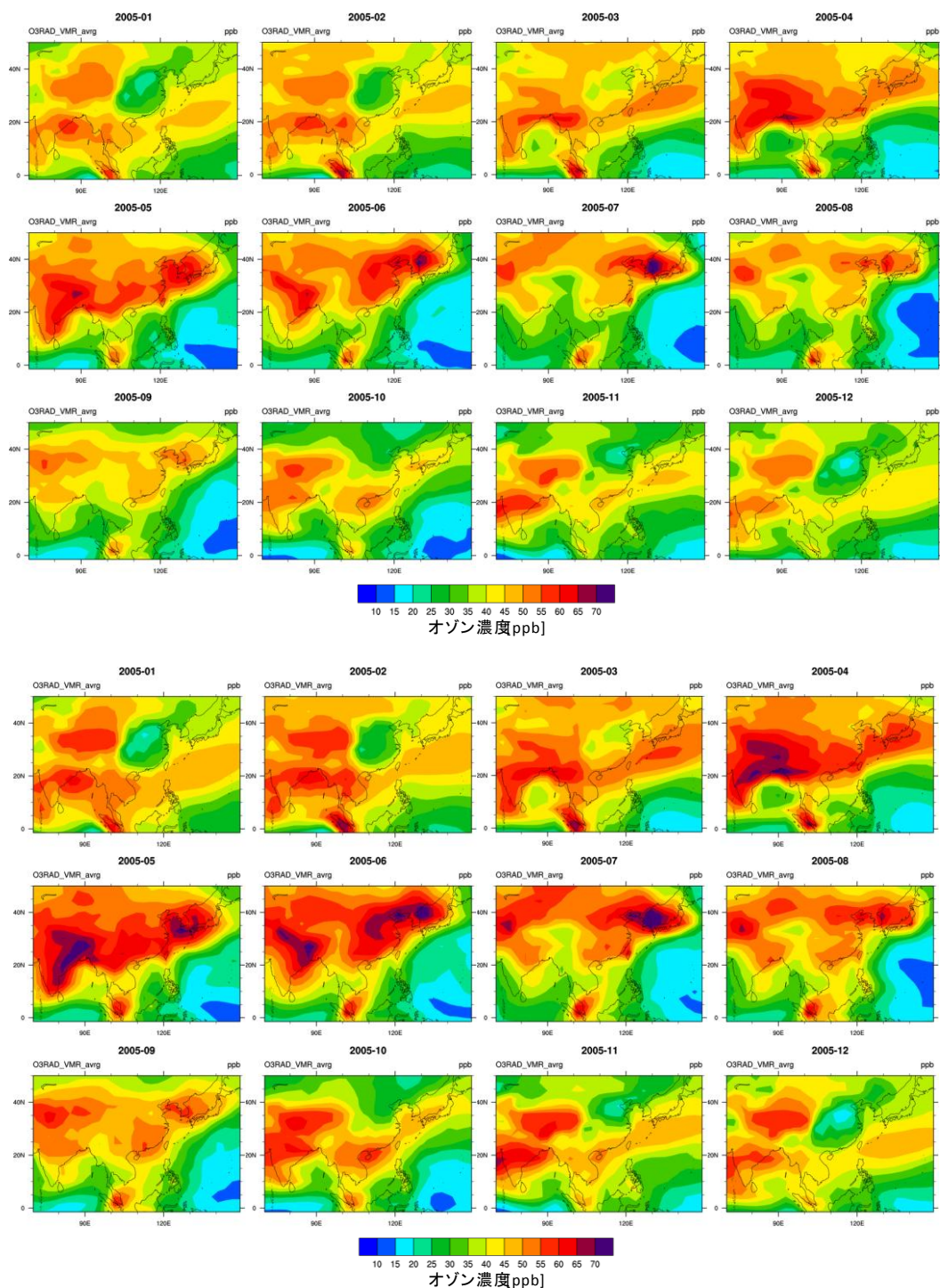


図-1-4 全球化学物質輸送モデルMOZART-4で計算した地表面付近オゾン濃度の月平均値
 上図：2005年の月平均オゾン濃度； 下図：人為起源排出量を1.5倍とした場合の月平均オゾン濃度

4. 結果・考察

(1) 水稻品種のオゾン感受性

1) 可視障害の発現程度と収量との関係

オゾンは作物の成長や収量を低下させる。特徴的なオゾン障害は葉の褐色斑や黄化症状（クロ

ロシス)で、これら症状の発現程度がオゾン感受性を判定する指標として一般的に用いられることが多い。しかし、可視障害が直接的にイネの収量減少に結びつくかどうかは明確になっていなかった。そこで、内外産の水稻品種にオゾンを暴露し、可視障害の発現と収量に及ぼす影響を調査した。イネの葉の可視障害は、葉身部に褐色斑点が発現したり、葉が黄化症状を呈したり、暴露が進行すると全体的に葉が褐緑色を呈し、緑色感が低下する。さらに症状が進行すると老化の促進によると推定される下葉からの枯れ上がりの促進がみられる。一方、展開初期の葉齢の若い葉にはほとんど症状が見られなかった。

幼苗を対象に、12時間のオゾン暴露実験を行い、翌日に症状の発現程度を観察し、LBSスコアで症状の程度を比較検討した。その結果、国産品種の中では“まっしぐら、つがるロマン、タカナリ、日本晴”などが可視障害の発現に対して耐性(スコアが小さい)で、“コシヒカリ、きらら397”は感受性の高い品種として分類された(図-1-5、上図)。外国産のインド型品種の中では、“Kasalath”が耐性であったが、他の品種は概ね可視障害の発現に対して国産品種よりも感受性の高い品種が多い傾向にあった。国産品種でもインド型の“タカナリ”のように可視障害の発現に対して比較的耐性のものもある。一方で、日本型の“コシヒカリ、きらら397”のように可視障害が発現しやすい品種もあることから、インド型、日本型による感受性の分類は難しいと考えられた。

次に、浄化空気区(CF区)の収量に対して、基準の2倍のオゾン濃度で暴露した区画(×2.0区)の収量(精穀重量)について検討した結果を図-1-5の下図に示した。オゾン暴露によって有意に収量が低下した品種は国産品種では“タカナリ、きらら397”の2品種、外国産では“Kasalath、Suphanburi 1、IR64、IR36”の4品種であった。国産品種のうち“コシヒカリ”などのほとんどの品種はオゾンの影響を受け難い傾向にあったが、北海道地方の代表的な栽培品種である“きらら397”の収量に対するオゾンの影響は大きく、約20%の減収となった。また、可視障害が発現しやすい品種として分類された“IR36”は収量の低下も大きく、オゾン感受性の品種であることが明らかとなった。一方、可視

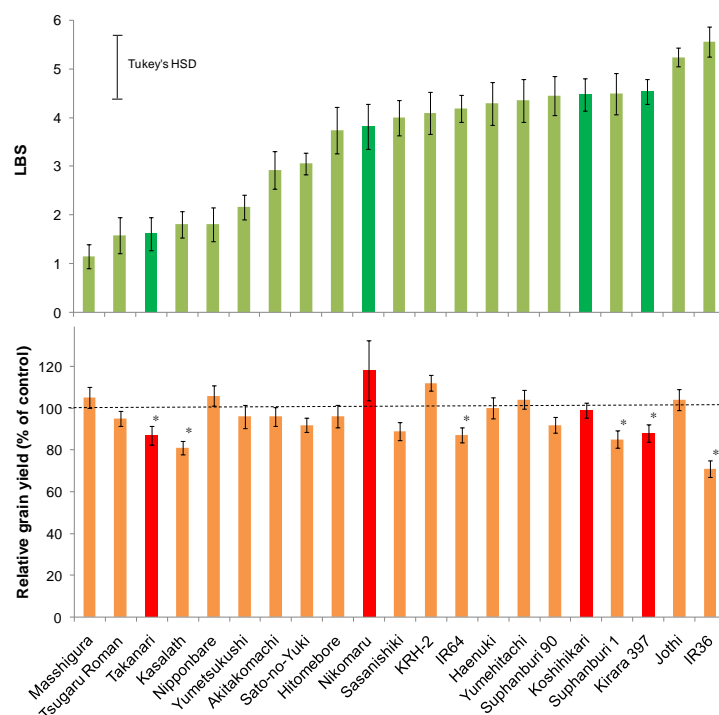


図-1-5 品種別の可視障害の発現程度(上図)と相対収量(下図)との関係

LBS (Leaf Bronsing Score) : 可視障害なし(0)~部分的に葉が枯死(7)に評点して点数化。

収量 : 個体当たりの精穀重量

相対収量 : [オゾン暴露区 (×2.0区)の収量]/[浄化空気区 (CF区)の収量]×100

障害の発現に対して耐性であった“タカナリ、Kasalath”は収量が約20%低下し、収量を指標とした場合にはオゾン感受性の品種に分類された。

2) 地上部バイオマス量と収量との関係

収穫時の個体当たりの地上部重量（精糶重を含む）と個体当たりの精糶重量（収量）との関係を図-1-6に示した。3年間に供試した全品種・系統を対象に、CF区を基準にして各オゾン濃度区の相対地上部重量を横軸に、相対精糶重量を縦軸に示した。この図から、オゾン暴露によって地上部重量が小さくなると収量も低下する傾向にあることが明らかとなった。

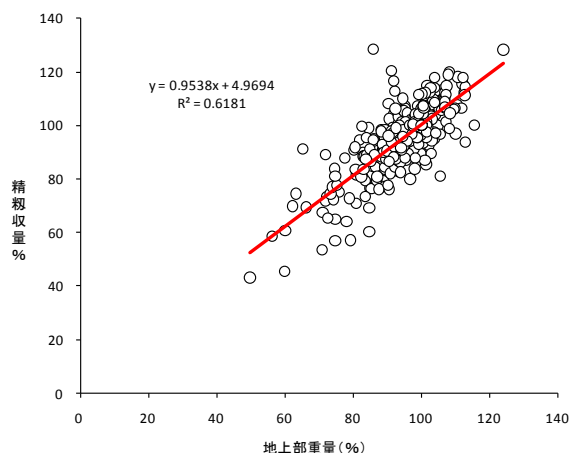


図-1-6 地上部重量と精糶重量との関係

						ゴロビカリ にこまる 日本晴 まっしぐら ゆめひたち ND 6172 SL 15 SL 37 SL 41 SL 46	
精糶重量 %	90-100	JGL 1798	(BPT 5204) (Suphanburi 90)	はえぬき RIL 76	あきたこまち コシヒカリ RIL 46 KRH 2 (Milyang 23)		
		IR 74			つがるロマン ゆめさやか (Urasan)	彩のかがやき ひとめぼれ ヒノヒカリ 夢つくし (Pai Chia Tsao)	
	80-90	(Suphanburi 1)	(たちすがた) (Usen)	キヌヒカリ (Ai Yeh Lu) IR 20 Kasalath (KMP 101) Sha Tiao Tsuao	もみロマン IR 64 SL 421	ササニシキ	
		Te Qing	ハノバタキ	He-Jiang 18	タカナリ Basmati 385 (Rexmont)	里のゆき (Lijianxintuanhegu)	
		東郷 Jothi		(Nepal 555)		(MTU 1001)	
	70-80	きらら397	IR 36				
		70-80		80-90		90-100	
		地上部重量 (%)					

図-1-7 オゾンに暴露した水稻品種の収穫時の地上部重量と精糶重量（収量）との関係

相対重量：浄化空気（CF）区に対する2倍のオゾン濃度（×2.0）区の相対値（%）

赤字：日本型品種、黒字：インド型品種、緑字：染色体断片置換系統（CSSLs）、組換え自殖系統（Recombinant Inbred Line：RIL）あるいは突然変異系統。 カッコ付き品種：CFと×2.0区の単一比較試験結果のみの品種。

一方、CF区の穂を含む地上部重量に対する×2.0区の地上部重量の比と精籾重量（収量）の比との関係をみたのが図-1-7である。これによれば、わが国で現在栽培されている主要品種は概ね右上に位置し、地上部重量および収量ともオゾンの影響を受け難い品種が多い。これに対して、インド型の品種は地上部重量および収量ともオゾン暴露により低下しやすい傾向にあった。しかし、地上部重量が確保できていても収量が低下する品種や、収量は低下しないが地上部重量がオゾン暴露によって減少する品種もあり、オゾンの影響発現メカニズムは一樣ではないことが示唆される結果となった。なお、北海道を中心に栽培されている“きらら397”は日本型品種の中では最もオゾン感受性が高い品種の一つであると考えられた。また、オゾンの影響を受け難い品種である“コシヒカリ”の祖先品種の一つである“東郷”はオゾン感受性であることが明らかとなったことから、今後、感受性のメカニズム解明に活用できる品種であると考えられた。

“SL 15、37、41および47”は“日本晴”と“Kasalath”の染色体断片置換系統群(Chromosome Segment Substitution Lines: CSSLs)であるが、いずれも“日本晴”に近い反応をしていること、“SL 421”は“ササニシキ”と“ハバタキ”のCSSLsの一つであるが、“ササニシキ”に近い反応を示していることが推察された。

3) オゾン影響を評価するための暴露指標

オゾン影響を評価するための暴露指標を検討するため、定植から収穫日までの期間を対象にして、平均オゾン濃度、オゾンドース (O_3 Dose: 1時間値を積分した値、AOT0およびSUM0に相当)、1時間値が一定濃度を超えた場合に積分するSUM¹⁸⁾、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AOTx¹⁹⁾、1時間値に重み付けをして積分するW126¹⁸⁾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)、それらの8時間平均値の最大値の平均を求め、“きらら397、ササニシキ、タカナリ”の個体当たりの精籾重量との回帰係数(R^2)を比較検討した(表-1-2)。

3年間の結果を品種毎にプールして解析した結果、品種によって相関係数の高い暴露指標は異なり、“きらら397”では24時間値のSUM20とオゾンドースの相関係数が高かった。“ササニシキ”では8時間値のSUM20およびオゾンドース、“タカナリ”では、8時間値のSUM30およびSUM20の相関係数が最も高かった。W126については“きらら397”で15時間値、“ササニシキ”および“タカナリ”では8時間値の相関係数が最も高かった。また、平均濃度の場合には“きらら397”が24時間値、“ササニシキ”と“タカナリ”では8時間値で相関係数が高かった。3品種の結果から、最も相関係数の高い指標および時間帯はそれぞれ異なったものの、同一品種内では暴露指標の差異は比較的小さいことも明らかとなった。これらのことから、最も単純で簡便な指標として平均濃度を一次指標として提案できると考えられた。一方、平均オゾン濃度を暴露指標として用いた場合には、暴露期間の長短の影響を評価できないことから、単純に1時間値を積算するだけの指標であるオゾンドース(AOT0=SUM0)を使用するのが簡便であると考えられた。また、これらの指標の算出時間帯として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。

表-1-2 個体当たりの精粗重量（収量）と暴露指標との回帰係数（R²）

Index	きらら397					ササニシキ					タカナリ					回帰式
	24h	15h	12h	8h	8h-Max	24h	15h	12h	8h	8h-Max	24h	15h	12h	8h	8h-Max	
Mean	0.7031	0.6967	0.6826	0.6714	0.6941	0.5915	0.5997	0.6027	0.6075	0.5984	0.7379	0.7466	0.7444	0.7493	0.7427	二次式
O3 Dose	0.7455	0.7419	0.7307	0.7198	0.7384	0.6767	0.6880	0.6909	0.6924	0.6886	0.7624	0.7721	0.7735	0.7744	0.7726	二次式
AOT20	0.7380	0.7361	0.7253	0.7162	0.7337	0.6617	0.6721	0.6748	0.6773	0.6749	0.7594	0.7669	0.7689	0.7717	0.7669	二次式
AOT30	0.7365	0.7345	0.7242	0.7161	0.7258	0.6289	0.6289	0.6296	0.6353	0.6150	0.7586	0.7614	0.7632	0.7678	0.7548	一次式
AOT40	0.7338	0.7346	0.7234	0.7120	0.7308	0.6498	0.6505	0.6513	0.6563	0.6448	0.7569	0.7596	0.7621	0.7661	0.7608	一次式
AOT50	0.7123	0.7138	0.7024	0.6885	0.7135	0.6556	0.6560	0.6579	0.6614	0.6563	0.7352	0.7363	0.7396	0.7427	0.7425	一次式
AOT60	0.6792	0.6796	0.6720	0.6524	0.6860	0.6456	0.6444	0.6463	0.6493	0.6471	0.6993	0.6995	0.7031	0.7043	0.7078	一次式
SUM20	0.7463	0.7408	0.7314	0.7210	0.7385	0.6708	0.6878	0.6910	0.6951	0.6892	0.7600	0.7729	0.7749	0.7773	0.7726	二次式
SUM30	0.7398	0.7388	0.7278	0.7251	0.7381	0.6670	0.6860	0.6887	0.6925	0.6887	0.7598	0.7726	0.7750	0.7794	0.7725	二次式
SUM40	0.4923	0.5065	0.5318	0.5180	0.5400	0.5224	0.5395	0.5617	0.5571	0.5644	0.5899	0.6095	0.6355	0.6322	0.6413	一次式
SUM50	0.4532	0.4601	0.4801	0.4797	0.4873	0.5176	0.5260	0.5532	0.5449	0.5620	0.5704	0.5809	0.6107	0.6040	0.6210	一次式
SUM60	0.3588	0.3619	0.3705	0.4003	0.3696	0.4861	0.4884	0.5150	0.5372	0.5175	0.5095	0.5127	0.5389	0.5668	0.5464	一次式
W126	0.7296	0.7303	0.7148	0.7016	0.7235	0.6557	0.6563	0.6553	0.6611	0.6486	0.7499	0.7512	0.7516	0.7572	0.7490	一次式

O3 Dose = AOT 0 = SUM 0
 24h: 0:00 - 23:59, 15h: 05:00 - 19:59, 12h: 06:00-17:59, 8h: 08:00 - 15:59

4) 水稲、ダイズ、インゲンマメのオゾンに対する相対感受性比較

現在栽培されている日本型品種のうち、“きらら397”以外の主要品種は基準にした平均的な濃度の2倍あるいは2.5倍のオゾン濃度の暴露を継続しても収量が低下しにくい状況にあったことから、水稲のオゾン感受性を他の主要作物と比較するため、予備試験でオゾン感受性と判定されたHarosoy、Tamahomareとオゾン耐性と判定されたArlington、Nakasennariのダイズ4品種、さらにEU-ICP Vegetation²⁰⁾で統一試験が実施されているインゲンマメ2品種（オゾン耐性のR123およびオゾン感受性のS156）を水稲と同一の条件下でオゾン暴露試験を行い、種子収量を指標に相対的なオゾン感受性について比較検討した。

水稲のオゾン感受性については前項で記載した通り品種によっては×2.5区でも収量が落ちない品種があるが、いずれの品種も現状レベル（×1.0区）ではほとんどの品種が減収を示さない。これに対して、インゲンマメのオゾン感受性品種（S156）では現状レベル（×1.0区）でも収量は5割以下で、耐性品種のR123でも2割の減収を示した。また、ダイズについては、感受性品種で約2割、耐性品種で約1割程度の減収であった。これらの結果から、水稲はダイズやインゲンマメと比較してもオゾンに対して耐性な作物であると考えられた（図-1-8）。

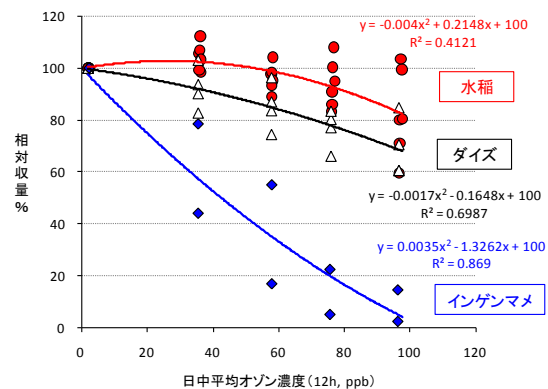


図-1-8 水稲、ダイズ、インゲンマメの収量を指標にしたオゾン感受性の相対比較
 収量（%）：CF区の個体当たりの種子重量に対する相対値

(2) 水稲の収量と品質におよぼすオゾンと温度の複合影響

1) 収量におよぼすオゾンと気温の複合影響

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”の個体当たりの精粗重量（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（表-1-3）。

検討対象とした6品種とも収量に年度間の差異が認められ、オゾンの単独影響も“にこまる”以外で認められた。

オゾンの影響には年度間の差異はみられなかったが、気温については半数の品種において年度間で交互作用がみられる結果となった。一方、気温とオゾンの複合影響は6品種のうち“きらら397”と“にこまる”に見られた。“にこまる”についてはオゾンの単独影響には有意な影響がみられなかったが“きらら397”の場合は気温およびオゾンの単独影響に加えて、気温とオゾンの複合に対しても有意な影響が見られた。“にこまる”でオゾンと気温の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推察された。

表-1-3 水稻品種の収量におよぼすオゾンと温度の複合影響

Factor	Freedom	日本晴	コシヒカリ	にこまる	きらら397	ササニシキ	タカナリ
Total (Freedom)		1241	1088	1075	1089	1081	1070
Year (A)	2	***	***	***	***	***	***
O ₃ (B)	5	*	***	ns	***	***	***
Temperature (C)	1	**	*	ns	*	*	ns
A×B	10	ns	ns	ns	ns	ns	ns
A×C	2	*	**	***	ns	ns	ns
B×C	5	ns	ns	***	**	ns	ns
A×B×C	10	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Error (Freedom)		1206	1053	1040	1054	1046	1035

*: p<0.05、 **: p<0.01、 ***: p<0.001

上述した6品種について各年度の通常温度区の浄化空気（CF）区を基準にして加温区も含めたすべての区画の相対収量をプロットしたものを図-1-9に示した。この図に見られるように、“日本晴、コシヒカリ”の2品種は通常温度条件下ではオゾン濃度が高くなってもほとんど収量は低下しないが、加温条件下では“日本晴”の収量はオゾン濃度が高くなると収量が若干低下する傾向にあった。一方、“コシヒカリ”については“日本晴”と同様に加温条件下ではオゾン濃度が高くなると収量は低下する傾向にあったが、加温区の方が通常温度区よりも収量が多く、高濃度オゾン区で収量が低下しても通常温度区と収量は変わらなかった。“にこまる”については通常温度区ではオゾン濃度が高くなると収量が増加する傾向にあり、前2品種とは傾向が異なっていた。また、加温区の収量は試験年度により大きく変動したが、傾向としてはオゾン濃度が高くなると収量は低下する傾向にあったものの、“コシヒカリ”と同様にオゾン濃度が著しく高くならなければ収量に対する影響は大きくはないと推察された。

一方、“きらら397、ササニシキおよびタカナリ”の3品種は前3品種とは異なり、明らかにオゾン濃度が高くなると収量が低下した。しかし、“ササニシキとタカナリ”では通常温度区と加温区との間に差異がみられなかった。“きらら397”については通常温度区よりも加温区で収量が低下する傾向にあった。しかし、2009年度の加温区において著しく収量が低下したデータ1点を除外した場合には“ササニシキとタカナリ”と同様に複合影響はみられなくなった。これらのことから、オゾン感受性品種においても収量に対する気温とオゾンの複合影響については実質的に考慮する必要はないものと考えられた。

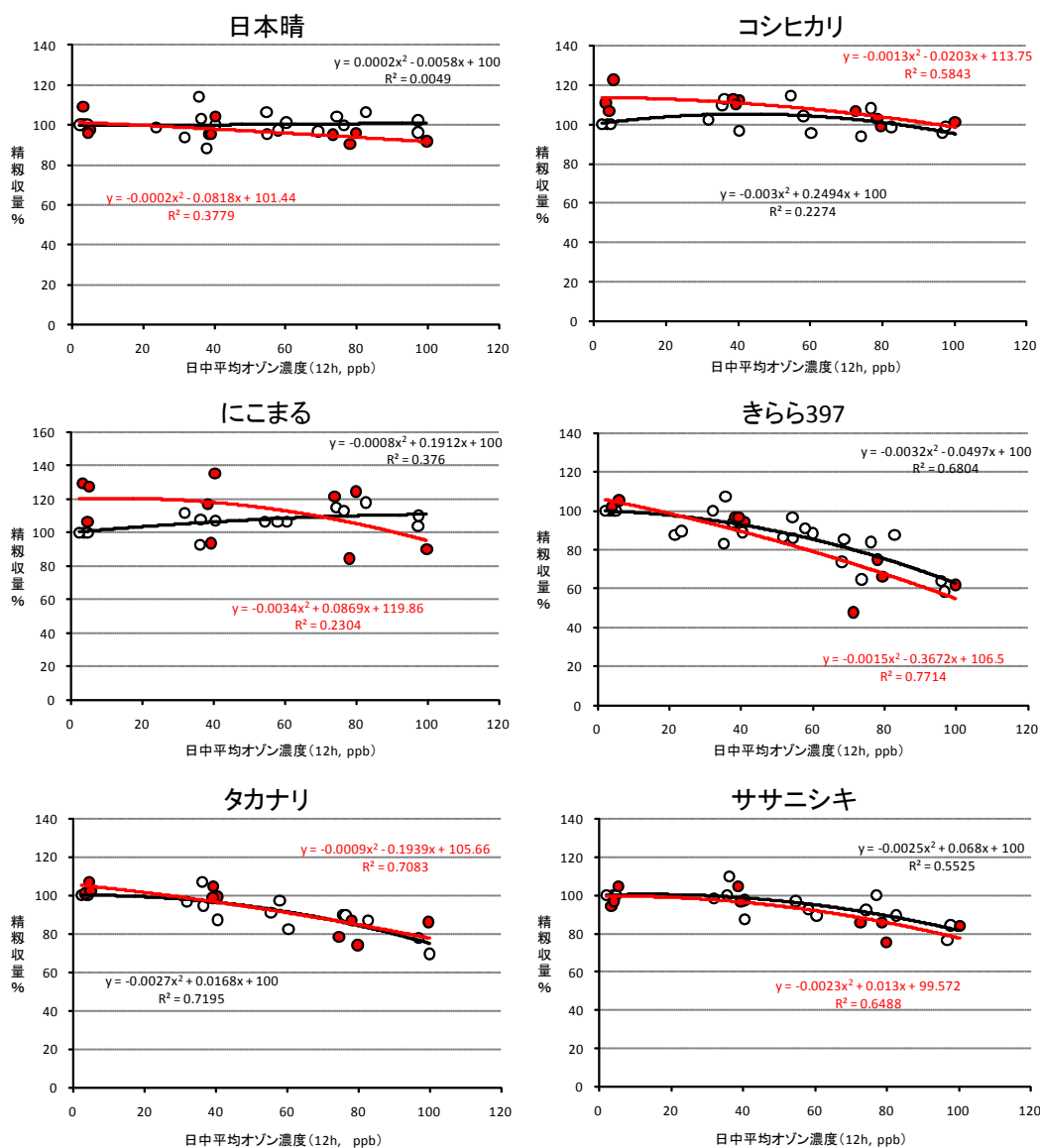


図-1-9 水稲品種の収量におよぼすオゾンと気温の複合影響
 ○：通常温度区 ●：加温区
 精稲収量：通常温度のCF区に対する相対値 (%)

収量が減少する要因を解析するため、上記6品種の単年度毎の収量構成要素について検討した結果を図-1-10に示した。“にこまる”を除く5品種については程度の差異はあるものの、オゾン濃度が高くなると不稔粒数が増加する傾向にあった。オゾン感受性に分類される“きらら397、ササニシキ、タカナリ”については、年度間に多少の相違はあるものの、オゾン濃度が高くなると不稔粒数が増加し、これに加温条件が加わるとさらに不稔粒数が増加することによって収量が減少する場合のあることも明らかとなった。一方、“にこまる”の2008年度と2009年度の結果についてみると、加温条件下で不稔粒数が減少し、オゾン濃度の上昇によってさらに不稔粒数が減少する傾向がみられ、これが加温条件下での収量増加の要因となっていると考えられた。2010年度につ

いては不稔粒数の増加が顕著であったことから、にこまるは栽培環境条件によっては温度やオゾンの影響を受けやすい可能性のある品種ではないかと推察された。

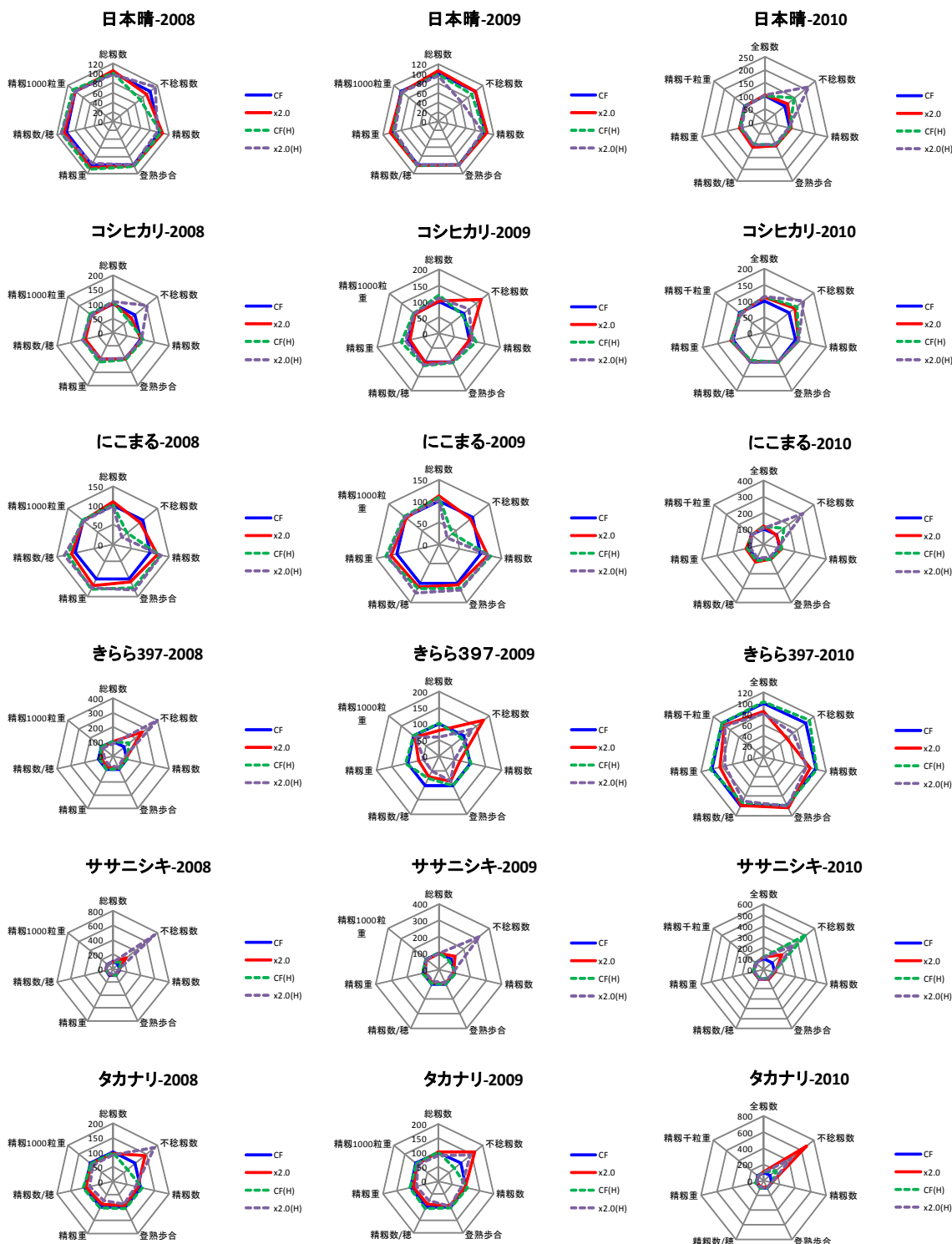


図-1-10 収量構成要素におよぼすオゾンと加温の影響
 CF区（浄化区、無加温）、×2.0（平均外気濃度の2倍のオゾン濃度区）、Hは加温区を示し、CF（無加温）区を100とした相対値で示す。

2) 水稻の品質におよぼすオゾンと温度の複合影響

a. 玄米の外観形質におよぼす影響

形態的に長粒米であることが多いインド型品種は籾摺り段階で玄米が砕粒することが多く、また穀粒判別器の測定器のセルが短粒米である日本型品種に適合するように設計されているため、長粒型のインド型品種については正確な形質判定ができないことから検討対象から除外した。

測定が可能であった日本型イネ品種および国内で改良された短粒型のインド型品種である“タカナリ”の玄米を対象に、主要な外観形質である整粒、未熟粒、被害粒、死米、着色粒の構成比率について検討した。これら5区分のうち、整粒と未熟粒の占める割合が大きく、被害粒、死米、着色粒の構成比は小さかったことから、ここでは整粒の占める割合について検討した結果を表-1-4に示した。

いずれの品種も整粒割合には年度間で差異がみられたが、オゾンと気温の単独影響のあることが明らかとなった。また、オゾンと気温の複合影響はコシヒカリ、ササニシキ、タカナリの3品種でみられることも明らかとなった。

これらの結果について3年間の試験結果を図-1-11に示した。収量を指標とした場合にオゾン感受性と判定された“きらら397”や“ササニシキ”は、オゾン濃度が上昇すると整粒割合が減少し、未熟粒が増加する傾向にあった。また、加温処理によっても未熟粒が増加する傾向がみられたがその影響は非常に小さいと考えられた。一方、オゾン感受性とされる“タカナリ”についてはオゾン濃度上昇とともに整粒割合が増加し未熟粒が減少する傾向にあった。“コシヒカリと日本晴”については年度間で整粒割合が異なった。“日本晴”については2010年度の加温区で整粒の割合が通常温度区よりも低下していた。“にこまる”については、2009年度の通常温度区の整粒割合は著しく低かったが、2009年度と2010年度の結果では通常温度区でもオゾン濃度が高くなると整粒割合が増加し、未熟粒が減少する傾向にあり、加温区では通常温度区よりも整粒割合が高かった。

以上の結果から、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みられないものと推察された。なお、晩生型の品種では、オゾン濃度の上昇にともない未熟粒が減少し、加温により整粒の割合が増加する傾向にあると考えられたが、その原因やメカニズムについては今後の検討課題であると考えられた。

表-1-4 水稻品種の整粒割合におよぼすオゾンと温度の複合影響

Factor	Freedom	日本晴	コシヒカリ	にこまる	きらら397	ササニシキ	タカナリ
Total (Freedom)		1249	1088	1089	1089	1089	1073
Year (A)	2	***	***	***	***	***	***
O ₃ (B)	5	***	***	***	***	***	***
Temperature (C)	1	***	*	***	***	***	ns
A × B	10	ns	ns	ns	ns	ns	***
A × C	2	***	**	***	ns	ns	***
B × C	5	ns	***	ns	ns	***	**
A × B × C	10	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Error (Freedom)		1214	1053	1054	1054	1054	1038

*: p<0.05、 **: p<0.01、 ***: p<0.001

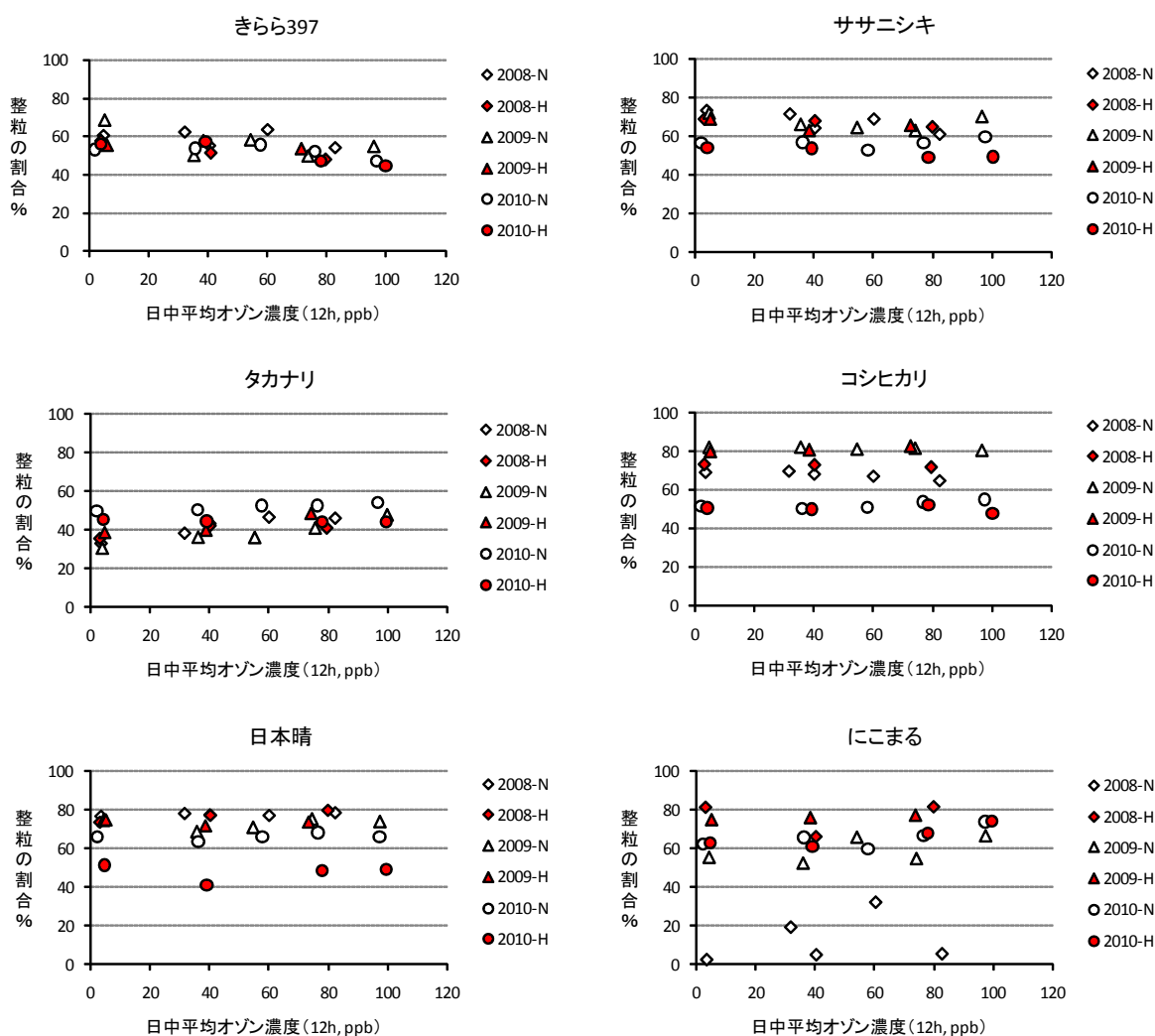


図-1-11 玄米の整粒割合におよぼす気温とオゾンの影響
N:通常温度区、H:加温区

b. タンパク質含量におよぼす影響

食味に係る成分としてタンパク質含量、アミラーゼ、脂肪酸度について検討した。このうち、アミラーゼと脂肪酸度については特定の傾向がみられなかったことから、ここではタンパク質含量について検討した。“ササニシキ”を除く5品種は年度間で差異がみられるが、6品種ともオゾン暴露の影響を受けることが明らかとなった（表-1-5）。また、“ササニシキ、きらら397、にこまる”については温度の単独影響が見られた。図-1-12に示したように、オゾン濃度が高くなると有意にタンパク質含量が増加したが、いずれの品種も温度とオゾンの複合影響はみられないことが明らかとなった。外観形質では“にこまる”は年度間の変動が大きかったが、タンパク質含量については大きな変動はみられなかった。

表-1-5 水稲品種のタンパク質含量におよぼすオゾンと温度の複合影響

Factor	Freedom	日本晴	コシヒカリ	にこまる	きらら397	ササニシキ	タカナリ
Total (Freedom)		115	99	96	97	99	96
Year (A)	2	***	**	***	***	ns	**
O ₃ (B)	5	***	***	*	***	***	***
Temperature (C)	1	ns	ns	**	**	**	ns
A × B	10	ns	ns	ns	ns	ns	ns
A × C	2	**	***	*	ns	**	***
B × C	5	ns	ns	ns	ns	ns	ns
A × B × C	10	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Error (Freedom)		80	64	61	62	64	61

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$

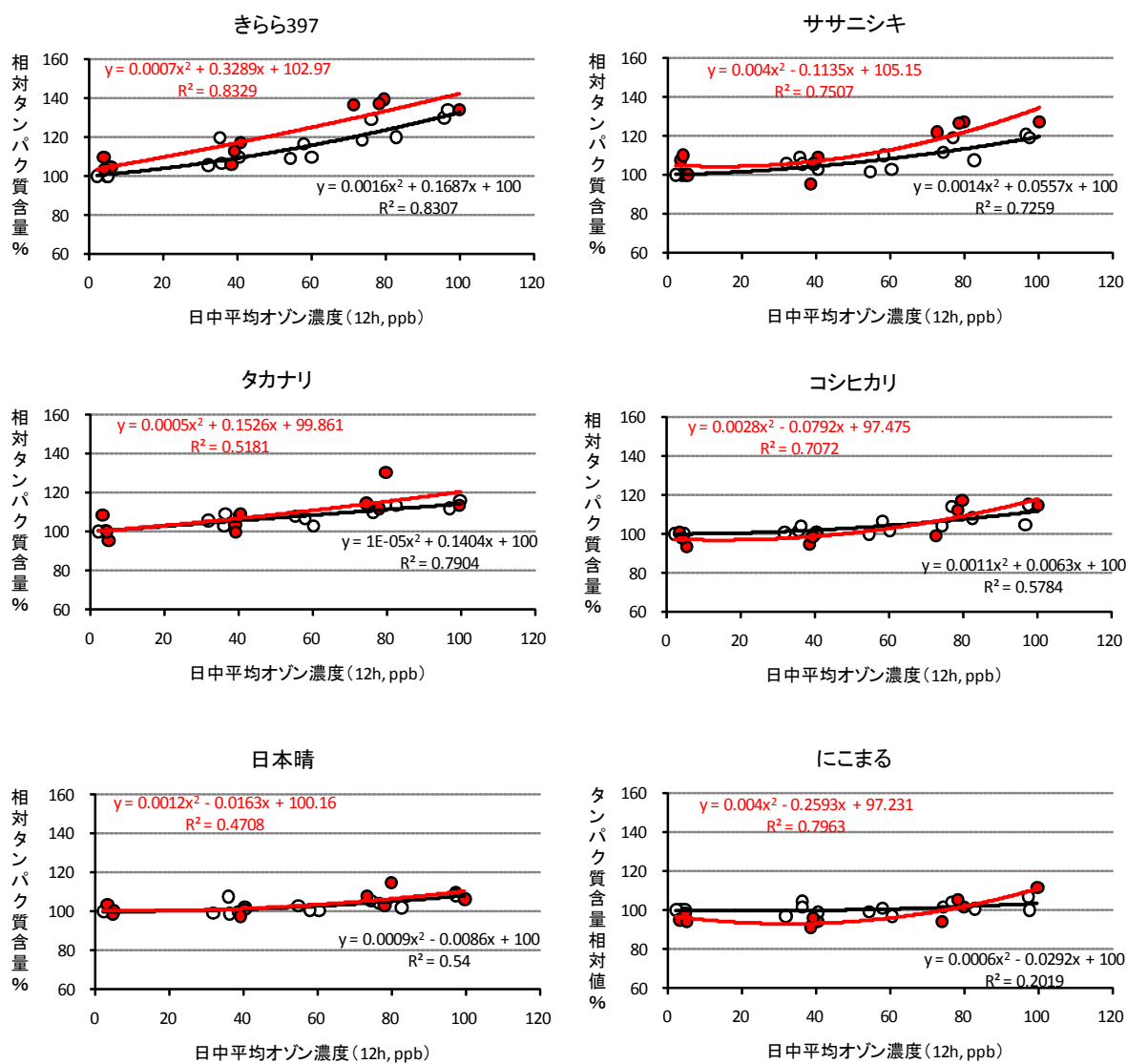


図-1-12 玄米中のタンパク質含量におよぼす気温とオゾン濃度の影響
 タンパク質含量：通常温度区の浄化空気区 (CF) に対する相対値 (%)
 ○：通常温度区 ●：加温区

(3) アスコルビン酸と収量反応との関係

アスコルビン酸含量が少ない場合やこれに関連した酵素活性が低い品種は可視障害が発現しやすくオゾン感受性と考えられているが、収量反応について検討した報告はない。そこで、オゾン感受性に係るメカニズムを解明する一環として、アスコルビン酸含有量の異なる品種あるいはアスコルビン酸関連酵素活性の異なる系統について収量反応を検討した。

Freiら¹²⁾によれば、幼植物段階では、“IR 74”は可視障害が激しく、個体重の減少が大きいことからオゾン感受性、“Kasalath”は耐性、“日本晴”の可視障害は比較的軽いものの、個体重の減少が大きいことからオゾン感受性とされている。また、“SL 41”は可視障害の程度が軽く、“SL 15”は可視障害が激しい。“RIL 46”はアスコルビン酸含量が多く、“RIL 76”はアスコルビン酸含量が少なくアンチオキシダント活性が低い系統であることが明らかとなっている。このため、“IR 74”よりも“RIL 46”の方が可視障害は発現しにくい、“RIL 76”は可視障害が発現しやすく、著しくオゾンに感受性とされている¹²⁾。

これらの中から2009年度は“日本晴、Kasalath、SL 41およびSL 46”を対象にオゾンの暴露試験を実施した。その結果、可視障害発現の程度で感受性とされた“SL 15”は現状の2倍以上のオゾン濃度でも収量は減少しなかった（図-1-13の上図）。また、2010年度は、“SL 41およびSL 46”を比較対象にしてアスコルビン酸含量が少ない突然変異体である“ND6172”のオゾン暴露試験を実施した。しかし、オゾンに感受性であると推定された“ND6172”の収量は、“SL 41およびSL 46”と同様に収量は減少しないことが明らかとなった（図-1-13の下図）。

既往の研究結果によって、可視障害の発現とオゾンの解毒剤の役割を果たすアスコルビン酸含量との関連性が指摘されてはいるものの、前述したように可視障害の発現程度と収量反応は直接的に結び付かないことや、本試験結果からもアスコルビン酸含量やアスコルビン酸活性を異にする系統の収量反応との間には直接的な関連性はみられなかった。このため、可視障害発現に係るメカニズムと収量影響が発現するメカニズムとは直接的に結び付かないことが明らかになったと考える。

(4) 稲わらにおよぼすオゾンの影響

米生産の副産物である稲わらの約80%は、アジアの多くの発展途上国では家畜飼料として用いられており、開発途上国においては最も重要な餌資源となっている。稲わらの品質に影響を与える主要な環境要因の一つとして対流圏オゾン濃度上昇の影響が想定される。アジアの水稻生産国におけるオゾン濃度は、世界の他の地域よりも大きく上昇することが予測されており、米の収量

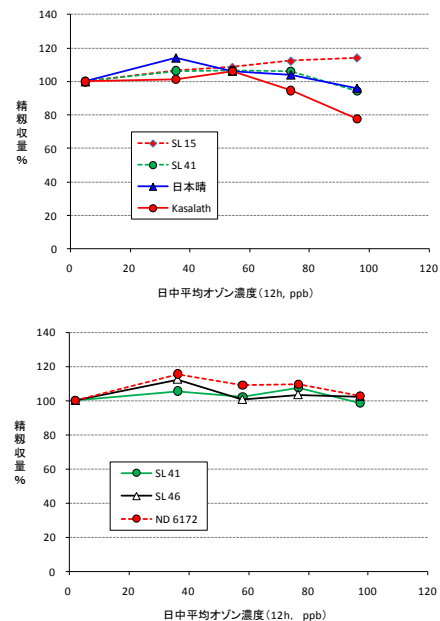


図-1-13 アスコルビン酸含量を異にする系統のオゾン暴露による収量反応

におよぼす影響のみならず、稲わらの品質におよぼす影響も想定される。しかし、稲わらの品質におよぼす影響について検討した報告は、成育初期段階の試料を対象に短期間暴露した検討結果¹⁴⁾以外の報告はみられなかった。このため、オゾン濃度上昇が稲わらの化学組成、飼料価に与える影響について検討した。

幼植物での試験結果では、オゾン暴露によってリグニンやフェノール性物質などの非栄養成分の増加や粗タンパク質含量の低下が原因でイネ茎葉部の消化により発生するガス生成量が低下し、オゾン暴露が稲わらの消化性に影響を与えることが示唆されている¹⁴⁾。既法の結果に対して、収穫期までオゾン暴露した“IR 64”の稲わらでは、暴露したオゾン濃度が高いほどガス生成量が少なく、稲わらの消化性が低下する結果が得られた(図-1-14、上図)。“IR 64”ではオゾン濃度の上昇とともにリグニン含量が増加したが、“SL 41”では外気の2.5倍濃度のオゾン処理でのみ増加した。また、フェノール

類は“IR 64”と“日本晴”においてはほぼオゾン処理濃度に応じて増加したが、“SL 41”は外気濃度区では増加せず、外気の2.5倍濃度のオゾン暴露によって増加した(図-1-14、下図)。一方、幼植物段階の試料とは異なり、粗タンパク質含量がオゾン暴露濃度に依存して増加した。

以上の結果から、オゾンの影響は水稻の成育ステージによって異なる可能性が考えられたものの、オゾン濃度の上昇はリグニン、フェノール性物質、タンパク質含量などの稲わらの飼料価を決定する要因に影響を与える可能性があると考えられた。特に、成熟した稲わらでは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オゾン暴露によって増加するため、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

1) 収量の予測

前述したように、加温区の暴露試験期間中の平均温度上昇幅が約1.0~1.7℃と比較的小さかったことから主要品種に対して気温とオゾンの複合影響は顕著に発現しなかったものと推察された。このため、オゾン濃度の変化に対する国内およびアジア圏の水稻収量の将来予測を試みた。

a. 国内の水稻収量におよぼすオゾン濃度上昇の影響予測

1980年代から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、

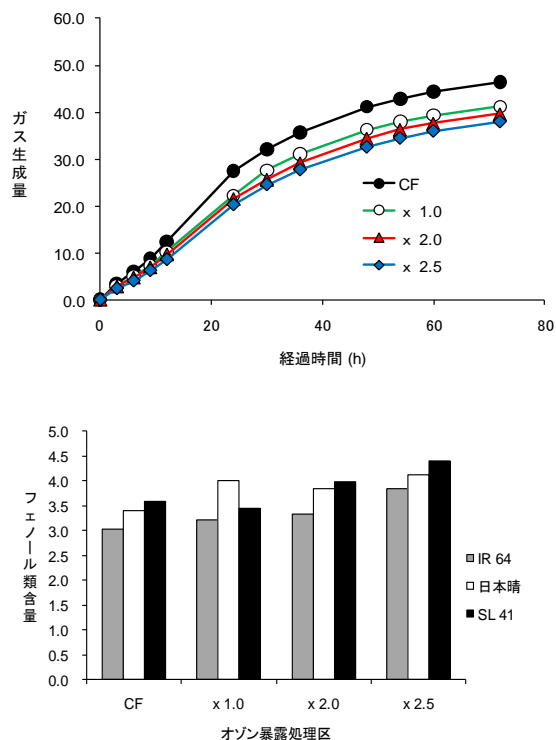


図-1-14 稲わらの消化、リグニン含量およびフェノール類含量におよぼすオゾン暴露の影響
上図: 消化にともなうガス生成量 (ml) (品種: IR64)
下図: 稲わらのフェノール類含量 (mg/g)

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倍の濃度となった場合の収量を推定した。なお、表-1-6に示した2005年度と2008年度のオゾン濃度は観測結果に基づいた値である。

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単純平均式を当てはめた。また、単純に日本産品種の平均式を当てはめた場合の収量についても比較のために算出した。図-1-15の上段は県別の5月～9月の日中12時間の平均オゾン濃度を示したもので、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る。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（図-1-15の下段）。

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、主要品種毎に推計式を当てはめた場合には、2050年時点で全国平均で約2%程度の減収で済むと見積もられた（表-1-6）。一方、品種間差異を考慮せずに平均式を適用した場合には2050年時点で3.4%の減収となると見込まれた。

なお、オゾンと温度の複合影響がみられた“きらら397”について、主産地の北海道を対象に図-1-9に示した予測式を用いて2050年のオゾン濃度での収量を予測した場合、温度条件を考慮しない場合には2.4%の増収と推定されたが、平均気温が1.0～1.7℃上昇した条件下では8.8%の減収となると推定された。

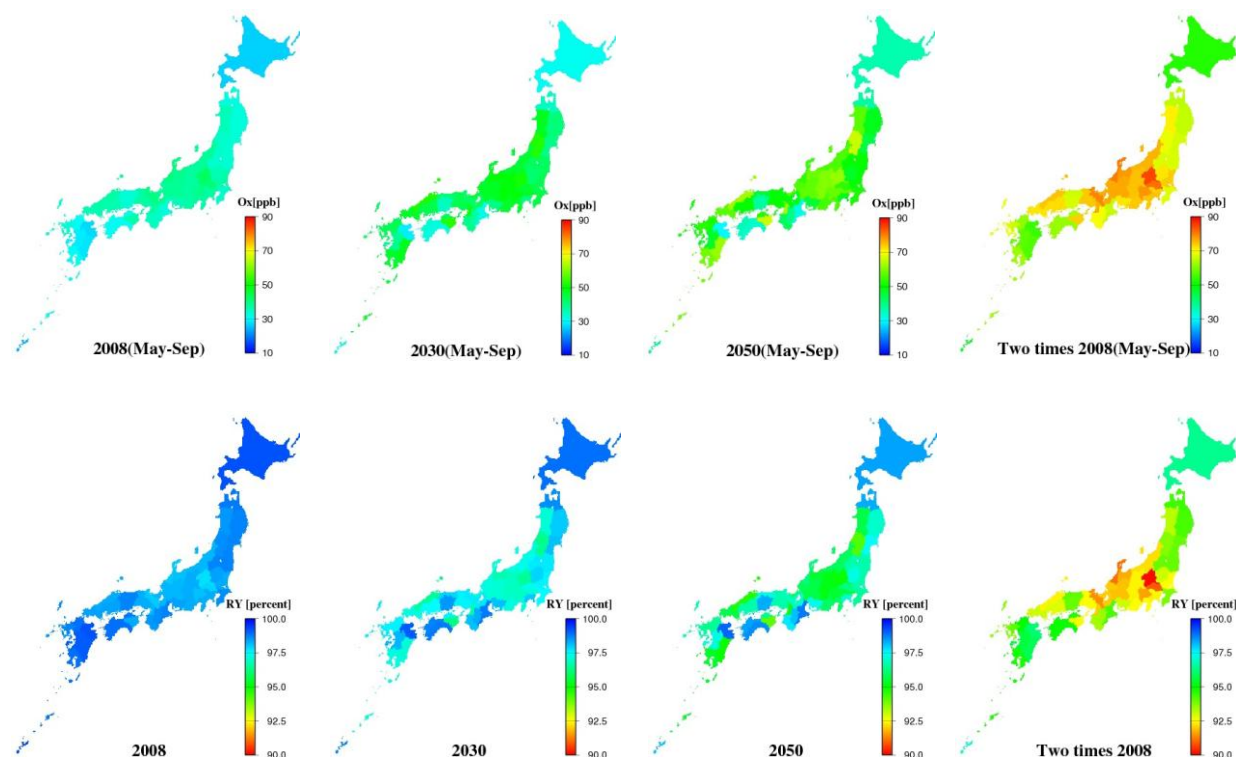


図-1-15 日中平均オゾン濃度の分布（上）と水稻収量（下）の予測結果

表-1-6 日本におけるオゾン濃度上昇にともなう水稲収量の予測

	年度					2008年 x 2
	2,005	2008	2020	2030	2050	
日中平均オゾン濃度 (12h, ppb)	33.8	34.8	39.2	42.9	50.4	69.5
県別平均収量(相対値, %)*	99.7	99.7	99.4	99.0	98.2	95.7
県別平均収量(相対値, %)**	98.6	98.5	98.1	97.6	96.6	93.4

オゾン濃度： 1985年～2008年度の5月～9月までの平均濃度を各県別に求めて水田地帯の全国平均を推計。

日中平均オゾン濃度： 県別にオゾン濃度の予測式を求めて当該年度の値を算出。

*： 主要品種に個別の収量予測式を適用し、予測式のない品種には日本産品種の平均式を適用。

**： 日本産品種の平均式を適用。

b. アジア圏の水稲収量におよぼすオゾン濃度上昇の影響予測

アジア圏を対象にした場合、オゾンのモニタリングが広域に行われ、データが公開されているのは日本以外にはほとんどない。したがって、アジア圏を対象とした予測を行う場合にはモデルによるオゾン濃度の予測計算結果に依存することになる。広域モデルについては種々のモデルが提案されているが、どのモデルも多少の違いは見られるものの、概ね類似の結果を示すとされている²¹⁾。

本報告では、MOZART-4を用いてアジア圏の濃度分布を推定した。2005年の人為起源の排出量インベントリーに基づいて、2005年のオゾン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（図-1-4）。

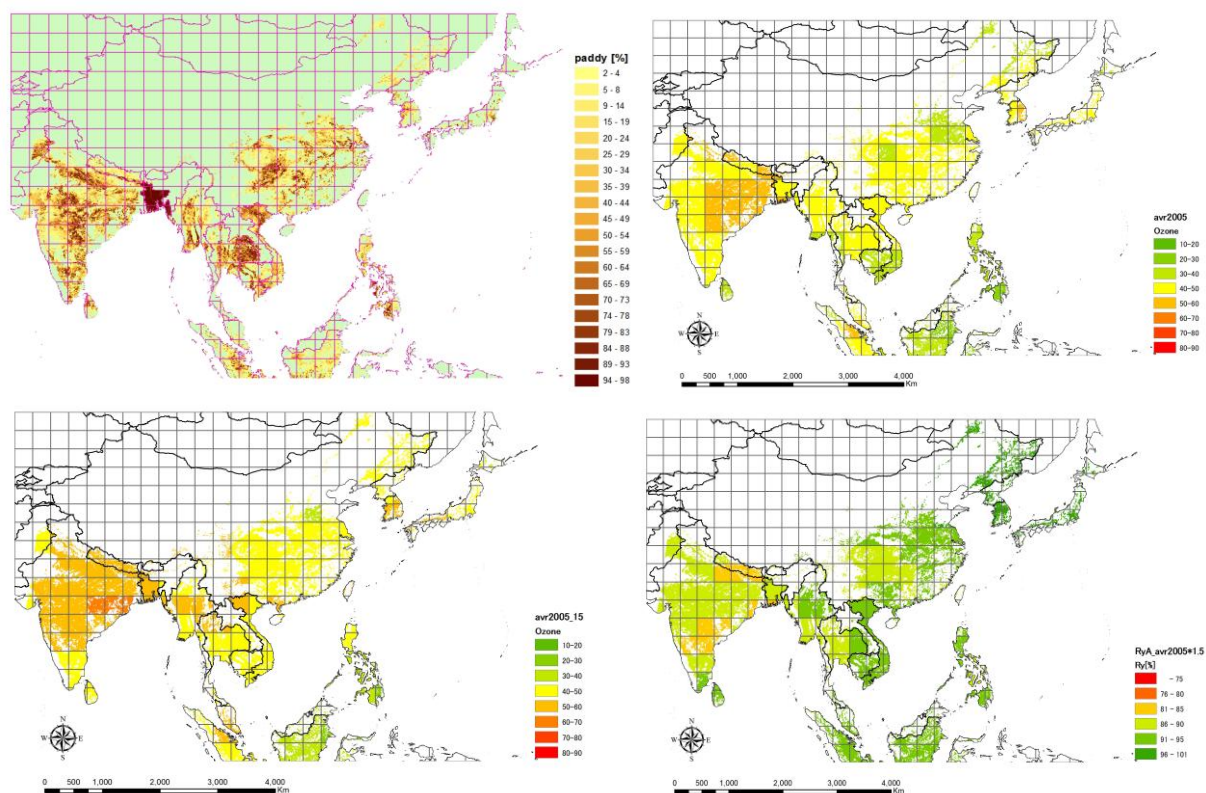


図-1-16 計算対象領域の水田分布(左上)、2005年のオゾン濃度分布(右上)、人為起源の排出量を1.5倍にした場合のオゾン濃度の分布(左下)および排出量を1.5倍にした場合の収量予測分布

図-1-16に示したように、水田地帯の分布、オゾン濃度の分布を重ね合わせ、格子毎の水稲の相対収量分布図を求めた。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オゾン濃度の平均を求め、これを国別に集約して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を対象とした収量予測式を当てはめて、国別の収量を予測した。IRRIの統計データを基に、できるだけ国別に代表的な品種を収集するように努めた。しかし、収集した品種の栽培特性から収量が得られなかったものや、温度不足で育苗できないもの等があり、国産品種と同様な比較は実質的にできなかった。このため、収量が得られたインド型品種のデータをプールして単純な平均式を求め、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をみた場合、アジア全体では44.6ppbと推定された。これを基に水稲収量に対する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。国別にみた場合、中国およびインドの生産量が他の国よりも著しく大きいことからこれらの主要生産国における減収量は圏内全域の食糧供給量の安定的な確保という観点から見ると非常に重要になると推察された。

表-1-7 アジア圏における水稲減収量の推計比較

国	2005年			2005年の排出量x1.5						
	生産量 (kt)	平均オゾン濃度(24h, ppb)	減収率 (%)		平均オゾン濃度(24h, ppb)	減収率 (%)				
			インド型	日本型		インド型	日本型	Wang & Mauzerall (2004)	高木・大原 (2003)	栗林・大原 (2008)
バングラデッシュ	39,796	48.4	9.6	5.9	53.4	12.5	7.5	3.1	5.1	6.5
ミャンマー	25,364	44.0	7.4	4.7	48.2	9.5	5.9	2.3	5.9	7.5
カンボジア	5,986	38.6	5.1	3.5	43.2	7.0	4.5	1.6	5.0	6.4
スリランカ	3,246	37.0	4.5	3.1	41.4	6.3	4.1	1.4	4.1	5.3
中国	182,042	42.1	6.6	4.3	44.8	7.8	5.0	1.8	3.8	4.9
インド	136,574	49.0	10.0	6.1	54.1	12.9	7.7	3.2	4.4	5.6
日本	11,342	44.7	7.8	4.9	48.2	9.5	5.9	2.3	6.0	7.7
韓国	6,435	47.5	9.2	5.7	49.6	10.3	6.3	2.5	5.0	6.4
ラオス	2,568	42.6	6.8	4.4	47.3	9.1	5.6	2.2	5.3	6.7
マレーシア	2,240	44.5	7.7	4.9	50.4	10.7	6.5	2.6	4.9	6.2
ネパール	4,209	51.8	11.5	7.0	57.0	14.7	8.7	3.7	5.4	6.9
フィリピン	14,603	31.2	2.5	2.0	36.0	4.1	2.9	0.8	6.5	8.3
タイ	29,201	41.9	6.5	4.2	46.6	8.7	5.5	2.1	2.9	3.7
ベトナム	35,791	43.3	7.1	4.6	48.0	9.4	5.8	2.3	4.7	6.0
その他	70,314	44.6	7.7	4.9	48.9	9.9	6.1	2.4	5.3	6.8
アジア全体	569,711	44.6	7.7	4.9	48.9	9.9	6.1	2.4	5.0	6.3

生産量: IRRI統計(2007)
 減収率予測式
 X: 平均オゾン濃度(24h, ppb)
 インド型品種 $100 - (100 - 0.0069X^2 + 0.1346X)$
 日本型品種 $100 - (100 - 0.0034X^2 + 0.0416X)$
 Wang & Mauzerall (2004) $EXP[-(X/202)^{2.47}] / \exp[-(25/202)^{2.47}]$ (Adams et al. 1989)
 高木・大原 (2003) $(1 - EXP[-0.001822(X-20)]) \times 100$ (Kobayashi et al. 1995)
 栗林・大原 (2008) $(1 - EXP[-0.002338(X-20)]) \times 100$ (Kobayashi et al. 1995)

Aunanら²⁾は、Adamsら²²⁾のWeibull推定式を用いて中国の2020年における水稲の減収は3.7~4.5%と推定している。同様に、Wang & Mauzerall²³⁾も、2020年における中国の水稲収量は7~10%、日本は5.3%減収と推定している。一方、高木・大原²⁴⁾はKobayasshiら²⁵⁾が“コシヒカリと日本晴”の結果から誘導したWeibull式を用いて関東の1996年度のイネの収量は3.6%減収と評価し、栗林ら²⁶⁾も、2000年の中国の収量はオゾンにより6.4%減収しており、2020年には排出シナリオにより6.7~9.3%の減収が見込まれると推定している。

これらの報告で用いられた推定式を使用して得られた結果と本研究で求めた推計式を適用して得られた結果とを比較検討した(表-1-7)。その結果、既往の推計式で得られる結果は日本型品種の平均式を適用して得られた結果とはほぼ類似の結果が得られることが明らかとなった。

一方、アジア圏で広く栽培されているインド型品種の平均式を用いた場合には減収率が約4%大きくなり、日本型品種が中心となるわが国を除いたアジア圏を対象に収量予測を行う場合には品

種を考慮した上での検討が必要であると考えられた。小林ら⁸⁾も、中国で栽培が普及している hybrid米はオゾン感受性が高いことを指摘していることから、食糧生産量の確保のためにはオゾン耐性品種や系統の育種、導入が持続的な開発を支えるためにも重要になると考えられた。

一方で、こういった広域の予測を行う場合にモデルの精度が非常に重要になると考える。表-1-7に示した2005年の日本の平均オゾン濃度は24時間平均で44.7ppbと算出された。しかし、国内の常時監視測定局のデータを基にした日中12時間の平均濃度は表-1-6に示した通り33.8ppbで、明らかにモデルの予測結果の方が過大な値を示していると考えられる。今後、アジア圏の予測精度を高めるためにはモデルの改良と解像度の改善に加え、検証に必要なオゾンデータの整備が望まれる。

2) タンパク質含量の予測

アジア圏で広域に栽培されているインド型品種については、穀粒判別器および食味計での分析ができなかったため、ここでは国内で栽培されている水稻を対象に予測を行った。予測方法は、収量予測と同様に、大気常時監視測定局の観測データを基に、各県別に5月～9月の日中12時間の平均オゾン濃度を算出し、その結果を基に当該年度のオゾン濃度を推定し、主要品種毎にタンパク質含量（相対値）の推定式を用いて県別のタンパク質含量の推定を行った（図-1-17）。その結果、2050年時点におけるタンパク質含量は相対値として全国平均で3.9%、最大で6.4%上昇すると見積もられた（表-1-8）。

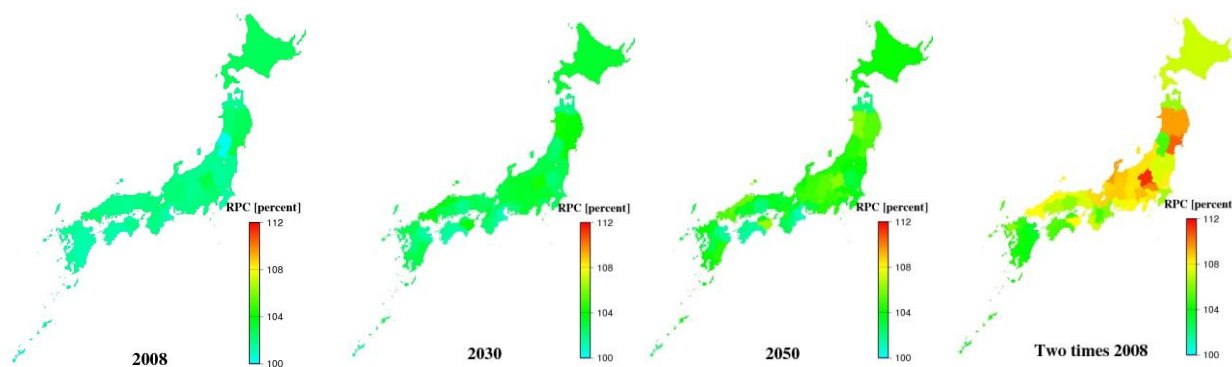


図-1-17 水稻玄米中のタンパク質含量（相対値）の予測結果

表-1-8 日本におけるオゾン濃度上昇にともなう玄米中のタンパク質含量の増加率の予測結果

	年度				2008年 × 2
	2008	2020	2030	2050	
推定日中平均オゾン濃度(12h, ppb)	34.8	39.5	43.5	51.4	69.5
県別平均タンパク質含量(相対値, %)*	101.9	102.3	102.8	103.9	107.2
最大値	103.0	103.5	104.3	106.4	111.3
最小値	100.3	101.2	101.2	101.2	103.5

推定オゾン濃度：1985年～2008年度の5月～9月までの水田地帯の平均濃度を各県別に求めて全国平均を推計。

品種構成：2009年度収穫量(8,466,000t)を基準として算出。(e-Stat:2011.1.17.公表資料)

日中平均オゾン濃度：県別にオゾン濃度の予測式を求め、当該年度の値を算出。

*：主要品種に個別の予測式を適用し、予測式のないものには日本産品種の平均式を適用。

値はオゾン浄化空気(CF)区における玄米中のタンパク質含量(DW, %)を基準にして算出した相対値。

収量と同様に、オゾンと温度の複合影響がみられた“きらら397”について、主産地の北海道を対象に図-1-12に示した予測式を用いて2050年のオゾン濃度での相対タンパク質含量を予測した場合、温度条件を考慮しない場合には8.2%の増加と推定されたが、平均気温が1.0~1.7℃上昇した条件下では15.8%の増加となると推定された。

食味品質に影響するタンパク質含量の目標は7.5%以下とされている。栽培品種や栽培条件等によってそれぞれの含量は異なるが、仮に基準となるタンパク質含量を7%とした場合には、オゾン感受性品種の占める割合が高い地域についてはオゾン濃度上昇により目標値の7%を超える可能性があり、収量が確保できたとしても品質ランクは低下することが想定された。一方、“コシヒカリや日本晴”を中心としたオゾン耐性品種の場合、収量低下や品質が低下し難いことから、これらの品種が有するオゾン耐性メカニズムに係る遺伝子の特定とインド型品種への導入・育種がアジア圏における食糧セキュリティを確保する上で今後の重要な課題になると考えられた。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本サブテーマでは、アジアで広域に栽培されているイネを対象に、温暖化時の食糧供給に影響を与える可能性の大きいオゾンと気温上昇の影響について、これまで検討されていなかった収量と品質に対する影響について評価を行い、影響回避・軽減策の1つとしてこれらの影響を受け難い品種を提言しようとしたものである。60品種・系統に対する暴露試験の結果として日本型品種の中でも“コシヒカリ、日本晴”が安定的にオゾン・温度上昇の影響を受け難く、品質の低下もし難い品種であることが明らかとなった。日本型品種に対してインド型品種はオゾンの影響を受けやすい傾向にあり、アジア圏の水稻収量はこれまでの推定よりも減収率が大きいことを明らかにできた。また、オゾンに暴露された稲わらでは難分解性のリグニンの増加とフェノール物質の増加により消化が抑制され、家畜用飼料としての栄養価が低下することが明らかとなった。また、オゾン耐性に関与していると考えられているアスコルビン酸は収量を指標としたオゾン耐性とは関連性が見られない可能性のあることが示唆された。このことは、これまでに可視障害の発現を指標にして解明されてきたオゾンの影響発現メカニズムでは慢性影響として発現する収量影響を説明することができないことを示唆し、オゾンの影響発現メカニズムを再検討する必要性のあることを示唆する点で重要な結果が得られたと考える。また、これまでほとんど検討されていなかった収量や品質を指標としたオゾンに対する水稻の品種間差異が明らかになってきたことから、品種間差異の顕著な品種の組み合わせやサブテーマ(3)の成果を活用することによって慢性影響が発現するメカニズム解明の糸口が解明できれば、新しい品種の育成・選抜に大きく貢献できると考える。

(2) 環境政策への貢献

今後、地球温暖化の影響評価に係る課題等において、本研究の成果が活用されることが期待される。また、平成21年度に設置された越境大気汚染・酸性雨検討会（生態影響分科会）傘下のオゾンの植生影響評価方法、指標の見直しに係る検討会等において本研究の成果が活用されることが期待される。特に、米国や欧州では独自のオゾンの暴露指標を採用しているが、本研究成果が

ら、わが国あるいはアジア諸国の稲作地帯を対象にした暴露指標として平均オゾン濃度あるいはオゾンドースが単純で算出しやすい指標として提言できたので、わが国を含む東アジア酸性雨モニタリングネットワーク（EANET）を中心に有効な指標として活用されることを期待したい。

6. 引用文献

- 1) Aardenne, J. A. van, G.R. Carmichael, H. Levy II, D. Streets, and L. Hordijk (1999) Anthropogenic NO_x emissions in Asia in the period 1990–2020, *Atmos. Environ.* 33:633–646.
- 2) Aunan, K., T. K. Berntsen and H. M. Seip (2000) Surface ozone in China and its possible impact on agricultural crop yields. *AMBIO* 29(6):294–301.
- 3) Hayes, F., G. Mills, H. Harmens, and D. Norris (2007) Evidence of widespread ozone damage to vegetation in Europe (1990–2006), Center for Ecology & Hydrology, Natural Environment Research Council, UK.
- 4) USDA (2010) Effects of ozone air pollution on plants.
<http://www.ars.usda.gov/Main/docs.htm?docid=12462>
- 5) Yamaguchi, M., H. Inada, R. Satoh, D. Hoshino, A. Nagasawa, Y. Negishi, H. Sasaki, I. Nouchi, K. Kobayashi, and T. Izuta (2008) Effects of ozone on the growth, yield and leaf gas exchange rates of tow Japanese cultivars of rice (*Oryza sativa* L.), *J. Agric. Meteorol.* 64(3):131–141.
- 6) Yonekura, T., T. Shimada, M. Miwa, A. Arzate, and K. Ogawa (2005) Impacts of tropospheric ozone on growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.). *J. Agric. Meteorol.* 60:1045–1048.
- 7) Akhtar, N., M. Yamaguchi, H. Inada, D. Hoshino, T. Kondo, M. Fukami, R. Funada and T. Izut (2010) Effects of ozone on growth, yield and leaf gas exchange rates of four Bangladeshi cultivars of rice (*Oryza sativa* L.), *Environ. Pollut.* 158(9):2970–2976.
- 8) 小林和彦（研究代表者）（2009）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，環境省地球環境研究総合推進費終了報告書（C-062）
- 9) Maggs, R., and M.R. Ashmore (1998) Growth and yield responses of Pakistan rice (*Oryza sativa* L.) cultivars to O₃ and NO₂. *Environ. Pollut.* 103:159–170.
- 10) Shi, G., L. Yang, Y. Wang, K. Kobayashi, J. Zhu, H. Tang, S. Pan, T. Chen, G. Liu, and Y. Wang (2009) Impact of elevated ozone concentration on yield of for Chinese rice cultivars under fully open-air field conditions, *Agric. Ecosys. Environ.* 131:178–184.
- 11) Wahid, A., R. Maggs, S. R. A. Shamsi, J. N. B. Bell, and M.R. Ashmore (1995) Effects of air pollution on rice yield in the Pakistan Punjab. *Environ. Pollut.* 90(3):323–329.
- 12) Frei, M., J. O. Tanaka, and M. Wissuwa (2008) Genotypic variation in tolerance to elevated ozone in rice: dissection of distinct genetic factors linked to tolerance mechanisms. *J. Exp. Bot.* 59:3741–3752.
- 13) Frei, M., J. P. Tanaka, C. P. Chen, and M. Wissuwa (2010) Mechanisms of ozone tolerance in rice: characterization of two QTLs affecting leaf bronzing by gene expression profiling and biochemical analyses. *J. Exp. Bot.* 61:1405–1417.
- 14) Frei, M., H. P. S. Makkar, K. Becker, and M. Wissuwa (2010) Ozone exposure during growth

- affects the feeding value of rice shoots. *Animal Feed Sci. Technol.* 155:74-79.
- 15) Emmons, L. K., S. Walters, P. G. Hess, J.-F. Lamarque, G. G. Pfister, D. Fillmore, C. Granier, A. Guenther, D. Kinnison, T. Laepfle, J. Orlando, X. Tie, G. Tyndall, C. Wiedinmyer, S. L. Baughcum, and S. Kloster (2010) Description and evaluation of the Model for Ozone and Related chemical Tracers, version 4 (MOZART-4). *Geosci. Model Dev.* 3:43-67.
 - 16) Takeuchi, W., and Y. Yasuoka (2004) Estimating spatio-temporal patterns of paddy fields over southeast Asia using MODIS time series. 25th Asian Conference of Remote Sensing (ACRS): Changmai, Thailand, 2004 Nov. 24., p.835-840.
 - 17) 東京大学生産技術研究所 WebMODIS - MODIS データサービスセンター,
<http://webmodis.iis.u-tokyo.ac.jp/PADDY/index.php?yyyy=2007>
 - 18) EPA (2010) National ambient air quality standards for ozone - Proposed rule. Federal Register 75(11)2938-3052.
 - 19) Fuhrer, J., L. Skarby and M. R. Ashmore (1997) Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe, *Environ. Pollut.* 97(1-2):91-106.
 - 20) ICP Vegetation (2010) Ozone experimental protocol- 2010 standardised protocol- Yield response and ozone injury on *Phaseolus vulgaris*.
http://icpvegetation.ceh.ac.uk/manuals/experimental_protocol.html
 - 21) Han, Z., T. Sakurai, H. Ueda, G. R. Carmichael, D. Streets, H. Hayami, Z. Wang, T. Holloway, M. Engardt, Y. Hozumi, S. U. Park, M. Kajino, K. Sartelet, C. Fung, C. Bennet, N. Thongbonchoo, Y. Tang, A. Chang, K. Matsuda, and M. Amann (2008) MICS-Asia II: Model intercomparison and evaluation of ozone and relevant species, *Atmospheric Environment* 42:3491-3509.
 - 22) Adams, R. M., J. D. Glycer, A. L. Johnson, and B. A. McCarl (1989) A reassessment of the economic effects of ozone on U.S. agriculture, *J. Air Pollut. Contr. Assoc. (JAPCA)* 39(7):960-968.
 - 23) Wang, X., and D. L. Mauzerall (2004) Characterizing distributions of surface ozone and its impact on grain production in China, Japan and south Korea: 1990 and 2020. *Atmos. Environ.* 38:4383-4402.
 - 24) 高木健作, 大原利眞 (2003) 関東地域におけるオゾンによる植物影響評価—ダメージ関数を用いたインパクト推計—, *大気環境学会誌* 38(4):205-216.
 - 25) Kobayashi, K., M. Okada, and I. Nouchi (1995) Effects of ozone on dry matter partitioning and yield of Japanese cultivars of rice (*Oryza sativa* L.), *Agric. Ecosys. Environ.* 53:109-122.
 - 26) 栗林正俊, 大原利眞, 山地一代 (2008) 中国におけるオゾンによる稲作影響の現状評価と将来予測, *大気環境学会誌* 43(1):55-66.

7. 国際共同研究等の状況

現時点で国際共同研究計画はないが、将来的に本研究で得られた成果の検証、実証等を行う場合には、(独)国際農林水産業研究センター (JIRCAS) を通じたアジアの研究機関やアジア大気汚染研究センターを介して東アジア酸性雨モニタリングネットワーク (EANET) 参加国機関との連携が想定される。なお、ドイツ・ボン大学の研究者が提案した開発途上国における持続的な食糧生産システムにおよぼすオゾンの影響評価に関する研究計画の基本情報として本サブテーマの成果が引用され、プロジェクトが採択されたことから、JIRCAS所属の研究者と情報交換およびオゾン暴露試験等に協力する予定である。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり) >

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Frei, M., Y. Kohno, M. Wissuwa, H. P. 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
- 4) 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)

<査読付論文に準ずる成果発表>

なし

<その他誌上発表 (査読なし) >

- 1) 河野吉久 (2011) 「特集 グローバル大気汚染の現状と植生影響 - 水稻の収量・品質および稲わらに及ぼすオゾンの影響」, *生物の科学・遺伝* 65(2): 45-50.

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 米倉哲志, 嶋田知英, 三輪 誠, 河野吉久 (2009) 水稻の収量におよぼすオゾン暴露時期の影響. 第50回大気環境学会年会 (横浜), 講演要旨集, p. 488.
- 2) 河野吉久, 澤田寛子, 松村秀幸, 米倉哲志 (2009) 気温とオゾン濃度上昇が水稻品種の収量におよぼす影響. 第50回大気環境学会年会 (横浜), 講演要旨集, p. 489.
- 3) 河野吉久, 澤田寛子 (2009) 気温とオゾン濃度上昇が水稻品種の品質におよぼす影響. 第50回大気環境学会年会 (横浜), 講演要旨集, p. 490.
- 4) 澤田寛子, 河野吉久 (2009) 水稻の可視障害および収量低下に基づいたオゾン感受性の品種間差異. 第50回大気環境学会年会 (横浜), 講演要旨集, p. 345.
- 5) Kohno, Y., H. Sawada, N. A. Khan, H. Matsumura, and S. Komatsu (2010) Yield responses of rice and soybean plants exposed to ozone. UNECE/ICP Vegetation/23rd Task Force

- Meeting, Feb.1-3, Tervuren, Belgium
- 6) Sawada, H., and Y. Kohno (2010) Effect of elevated ozone on leaf senescence, growth and yield of rice cultivars. UNECE/ICP Vegetation/23rd Task Force Meeting, Feb.1-3, Tervuren, Belgium
 - 7) Frei, M., Y. Kohno, H. P. S. Makkar, and K. Becker (2010) The effect of elevated tropospheric ozone on the feeding value of rice straw. UNECE/ICP Vegetation/23rd Task Force Meeting, Feb.1-3, Tervuren, Belgium
 - 8) 河野吉久(2010) 改善されない光化学大気汚染問題に我々はどのように対応するか-濃度評価指標-植物への影響、生態系への影響を対象として、大気環境学会関東支部講演会、平成22年6月4日、渋谷.
 - 9) Kohno, Y., H. Sawada, H. Matsumura, and T. Yonekura (2010) Effect of ozone on the growth, yield and quality in rice cultivars under global warming condition. 42nd Air Pollution Workshop, April 12-15, Ashville, NC, USA.
 - 10) Yonekura, T., S. Shinohara, T. Izuta, and Y. Kohno (2010) Tentative critical levels of ozone for Japanese agricultural crops. 42nd Air Pollution Workshop, April 12-15, Ashville, NC, USA.
 - 11) 河野吉久, 澤田寛子, M. Frei (2010) 稲ワラの品質におよぼすオゾンの影響, 第51回大気環境学会年会 (大阪), 講演要旨集, p. 231.
 - 12) 河野吉久, 澤田寛子, M. Frei (2010) オゾン暴露にともなう水稻収量とアスコルビン酸との関連性について, 第51回大気環境学会年会 (大阪), 講演要旨集, p. 232.
 - 13) 澤田寛子, 小松節子, Nisar Ahmad Khan, 河野吉久 (2010) オゾン暴露による収量低下に関する水稻葉タンパク質のプロテオーム解析, 第51回大気環境学会年会 (大阪), 講演要旨集, p. 234.
 - 14) Khan, N. A., S. Komatsu, H. Sawada and Y. Kohno (2010) Visible injury symptoms and proteomics analysis of young soybean seedlings under the ozone stress, 第51回大気環境学会年会 (大阪), 講演要旨集, p. 233.
 - 15) Kohno, Y., and H. Sawada (2010) Differential chronic responses of rice, soybean and bush bean plants under ozone stress. 4th International Conference on Plant and Environmental Pollution (ICPEP-4), Dec. 8-11, Lucknow, India.
 - 16) 澤田寛子 (2010) 水稻収量におよぼすオゾンの影響と収量減少機構の解明に向けて, 大気環境学会関東支部植物影響部会講演会, 平成 22 年 12 月 10 日, 東京都環境科学研究所
 - 17) Kohno, Y., H. Sawada, T. Ishii, H. Hayami, and T. Yonekura (2011) Predicting rice production in Asia by response of *indica* varieties of rice (*Oryza sativa* L.) to ozone. 43rd Air Pollution Workshop, May 23-26, Fort McMurray, Alberta, Canada

(3) 出願特許

- 1) 久保明弘, 菅 晃源, ラクワール ランディープ, 柴藤淳子, 河野吉久: (独) 国立環境研究所, (財) 電力中央研究所; 「サクラネチンを利用したイネのオゾン影響評価方法」, 特願2009-181643号, 平成21年8月4日

2) 澤田寛子, 河野吉久, 小松節子, 南條洋平: (財) 電力中央研究所, (独) 農業・食品産業技術総合研究機構 作物研究所; 「イネ収量のオゾン影響評価方法」, 特願2011-081335号, 平成23年3月31日

(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