

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
 (2) 水稻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	自然環境担当	米倉哲志
	温暖化対策担当	嶋田知英
	自然環境担当	三輪 誠

<研究協力者>

財団法人 電力中央研究所	環境科学研究所	河野吉久
--------------	---------	------

平成20～22年度累計予算額：11,698千円（うち、平成22年度予算額：4,013千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 本サブテーマでは、水稻の収量に対するオゾン影響の回避・軽減の効果について検討するため、水稻の育成段階別にオゾンを暴露し収量に最も大きな影響を与える暴露時期を特定するとともに、窒素施肥量やケイ酸肥料の施用によるオゾン感受性の変化を検討した。

栄養成長期、栄養成長後期から生殖成長前期（移行期）、生殖成長期にオゾンを暴露して収量に及ぼすオゾンの影響について全期間暴露の結果と比較検討した結果、移行期のオゾン暴露が水稻の収量に大きく影響を及ぼすことが明らかになった。また、窒素施肥量が多いとオゾン暴露の有無にかかわらず収量は増加し、窒素施肥量が極端に少ないとオゾン感受性は高いが、ある程度以上の窒素施肥量があればオゾン感受性はほとんど変わらなくなることが明らかになった。また、ケイ酸肥料の施用によるオゾン影響の軽減効果はないことも明らかになった。

これらのことより、オゾンの影響回避・軽減策としては、移行期に高濃度オゾンに出来るだけ曝されないように作付け時期等を変更することや、オゾンの影響を受け難い品種を選択する必要があると考えられた。また、オゾン影響の程度は変わらないが、窒素施肥量を増やすことによって増収を図ることが重要であると考えられた。

[キーワード] オゾン，水稻収量，施肥，感受性，暴露時期

1. はじめに

光化学オキシダントは、日本のみならず世界的に問題となっているガス状大気汚染物質である¹⁾。我が国においては環境基準を唯一達成できていない汚染物質であり、近年においても濃度増加が進行している。この光化学オキシダントの主要成分はオゾンであり、人体のみならず植物にも悪影響を及ぼす²⁾。特に農作物においては、葉への可視障害を引き起こしたり、成長や収量の低下を引き起こす^{2, 3)}。オゾンの農作物への影響は世界各国で調べられているが作物種や品種などによりその影響程度が異なるだけでなく、作物の生長過程における時期によって影響程度が異なるためオゾン影響の軽減・回避策を提唱するには至っていない。

2. 研究目的

水稻の収量は出穂期前後のオゾン濃度の影響を受けやすいと一般的に考えられているが、これ

を実験的に解明した報告はない。また、水稻については病害や倒伏耐性をつけるためにケイ酸カリ肥料が施用される。二酸化硫黄の影響を軽減するために過去においてケイ酸カリ肥料の施用が検討されたことはあるが^{4, 5)}、オゾン被害対策としての検討例はみられない。そこで、本サブテーマでは、わが国でもオゾン濃度が最も高い地点である埼玉県において、外気条件下でOTCを用いて水稻の成育段階別（幼苗期～出穂期～登熟等）にオゾンに暴露し、成長段階別の感受性について検討・解析を行う。また、窒素施肥量やケイ酸肥料の施用効果についても検討を行い、オゾンの水稻収量に対する被害軽減あるいは回避策について検討を行う。

このため、2008年度～2010年度の3年間の繰り返し実験において、我が国の水稻主要品種である“コシヒカリ”を対象に生育段階別にオゾン暴露を実施して、収量に最も大きな影響を与える暴露時期を特定することを試みる。

さらに、オゾンの水稻収量に対する影響の回避・軽減策を検討するために、窒素施肥量やケイ酸肥料の施用が水稻の収量に及ぼすオゾン影響を変化させるか平成2009年度～2010年度の2年間の繰り返し実験において検討する。

3. 研究方法

（1）水稻の収量に及ぼす生育時期別のオゾン影響の評価

1) 水稻の栽培

水稻品種として“コシヒカリ”を用い、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オープントップチャンバー（OTC）内で育成した（写真-2-1）。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、その内部の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り、フロート板ガラスで覆われている。施肥は、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相当量を育成スタート時に施肥し、追肥は実施しなかった。なお、試験は2009年～2010年度の3か年において3回実施した。

2) オゾン処理

オゾン処理条件については、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，以下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）で実施した。1.5NF区には、オゾン発生器（M0-5A, Nippon Ozone Co., Japan）で外気の1.5倍のオゾン濃度になるようにオゾンを添加した外気を導入した。OTC内において、植物体の高さのオゾン濃度を5分おきにUV吸収型分析計（Model 1100, Dylec Inc., Japan）を用いて測定した。吸着によるオゾン濃度の低下を防ぐために、オゾンを含む空気が接する配管はすべてテフロン製とした。



写真-2-1 外気オゾン濃度比例追従型のオープントップチャンバー

実験処理区は、“コシヒカリ”の育成期間について出穂を境に、栄養成長期（出穂前）と生殖成長期（出穂以降）に分け、以下の9処理区を設けた。

- ① 全期間×CF区：全期間、浄化空気での育成
- ② 全期間×NF区：全期間、外気オゾン条件下での育成
- ③ 全期間×1.5NF区：全期間、外気空気の1.5倍オゾン濃度での育成
- ④ 栄養成長期×NF区：栄養成長期のみ外気オゾン条件下での育成
- ⑤ 栄養成長期×1.5NF区：栄養成長期のみ外気空気の1.5倍オゾン濃度での育成
- ⑥ 移行期×NF区：栄養成長後期から生殖成長前期のみ外気オゾン条件下での育成
- ⑦ 移行期×1.5NF区：栄養成長後期から生殖成長前期のみ外気空気の1.5倍オゾン濃度での育成
- ⑧ 生殖成長期×NF区：生殖成長期のみ外気オゾン条件下での育成
- ⑨ 生殖成長期×1.5NF区：生殖成長期のみ外気空気の1.5倍オゾン濃度での育成

3) 収量の測定

全個体の9割以上が登熟した後に各個体の地上部を収穫し、個体別に玄米重を計測し、それを収量とした。

(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

1) 水稻の栽培

前述した(1)の実験と同様に、水稻品種として“コシヒカリ”を用い、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内で育成した。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、試験は2009～2010年度の間に2回実施した。

2) 施肥処理

くみあいLPコート複合444-D-80号(N-P₂O₅-K₂O=14-14-14)もしくは、化成肥料(N-P₂O₅-K₂O=8-8-8)を用いて、以下の窒素濃度相当量を施肥した。施肥処理区は、それぞれの年において以下の処理区を設けた。

2009年度は、以下の9処理区を設けた。

- ① 基肥5kgN区：窒素濃度5kg/10a相当量の14-14-14肥料を基肥として施肥
- ② 基肥15kgN区：窒素濃度15kg/10a相当量の14-14-14肥料を基肥として施肥
- ③ 基肥20kgN区：窒素濃度20kg/10a相当量の14-14-14肥料を基肥として施肥
- ④ 基肥25kgN区：窒素濃度25kg/10a相当量の14-14-14肥料を基肥として施肥
- ⑤ 基肥15kgN+穂肥5kgN区：窒素濃度15kg/10a相当量の14-14-14肥料を基肥として、窒素濃度5kg/10a相当量の8-8-8肥料を穂肥として施肥
- ⑥ 基肥20kgN+穂肥5kgN区：窒素濃度20kg/10a相当量の14-14-14肥料を基肥として、窒素濃度5kg/10a相当量の8-8-8肥料を穂肥として施肥
- ⑦ 基肥20kgN+ケイカル150kg区：窒素濃度20kg/10a相当量の14-14-14肥料および、ケイ酸カルシウム（ケイカル）肥料400kg/10aを基肥として施肥
- ⑧ 基肥20kgN+ケイ酸カリ200kg区：窒素濃度20kg相当量の14-14-14肥料および、ケイ酸カリ肥料200kg/10aを基肥として施肥
- ⑨ 基肥20kgN+ケイ酸カリ400kg区：窒素濃度20kg相当量の14-14-14肥料および、ケイ酸カリ肥

料400kgを基肥として施肥

また、2010年度は、以下の10処理区を設けた。

- ① 基肥10kgN処理区：窒素濃度5kg/10a相当量の14-14-14肥料を基肥として施肥
- ② 基肥20kgN処理区：窒素濃度20kg/10a相当量の14-14-14肥料を基肥として施肥
- ③ 基肥25kgN処理区：窒素濃度25kg/10a相当量の14-14-14肥料を基肥として施肥
- ④ 基肥30kgN処理区：窒素濃度30kg/10a相当量の14-14-14肥料を基肥として施肥
- ⑤ 基肥40kgN処理区：窒素濃度40kg/10a相当量の14-14-14肥料を基肥として施肥
- ⑥ 基肥20kgN+穂肥5kgN処理区：窒素濃度20kg/10a相当量の14-14-14肥料を基肥として、窒素濃度5kg/10a相当量の8-8-8肥料を穂肥として施肥
- ⑦ 基肥20kgN+ケイ酸カリ200kg/10a処理区：窒素濃度20kg/10a相当量の14-14-14肥料および、ケイ酸カリ肥料200kgを基肥として施肥
- ⑧ 基肥20kgN+ケイ酸カリ400kg/10a処理区：窒素濃度20kg/10a相当量の14-14-14肥料および、ケイ酸カリ肥料400kgを基肥として施肥
- ⑩ 基肥20kgN+ケイ酸カリ600kg/10a処理区：窒素濃度20kg/10a相当量の14-14-14肥料および、ケイ酸カリ肥料600kgを基肥として施肥

3) オゾン処理

それぞれの施肥処理区において、前述の(1)の実験と同様に、活性炭フィルターによってオゾン除去した空気をOTC内に導入した浄化空気区(CF区)、外気を導入した外気区(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)の合計3処理区を設けた。

4) 収量の測定

全個体の9割以上が登熟した後に各個体の地上部を収穫し、個体別に玄米重を計測し、それを収量とした。

4. 結果・考察

(1) 水稻の収量に及ぼす生育時期別のオゾン影響の評価

試験は、2008年～2010年度の3か年において3回実施したが、実施年度により外気オゾン濃度の差異、気温などの生育条件が異なるためオゾン影響程度が異なっており、単年度の実験結果だけでオゾン影響を評価することは困難であった。そこで、3回の試験をまとめて水稻の収量に及ぼす生育時期別のオゾン影響の評価をおこなった。

図-2-1にオゾンの積算ドースであるAOT40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割合の関係を示し、それらの近似直線を求めた。AOT40(Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40ppb)とは40ppb以上のオゾン濃度の積算値であり、主に欧州で農作物等の植物を保護するためのオゾンの許容閾値(クリティカルレベル)の評価に用いられているオゾンインデックスで、UNECEやWHOなどにおいて採用されている。

AOT40当たりの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は短いものの、収量に与える影響は大きいことが明らかとなった。ダイズやコムギなどによる先行研究⁶⁾においても結実期のオゾン処理が収量低下を引き起こすことが報告されており、本研究においてもほぼ同様な結果であった。一方、生殖成長期のAOT40当たりの収量低下率は最も少なく、生殖成長期のオゾンは収量にはあまり悪影響を及ぼさないと考えられた。

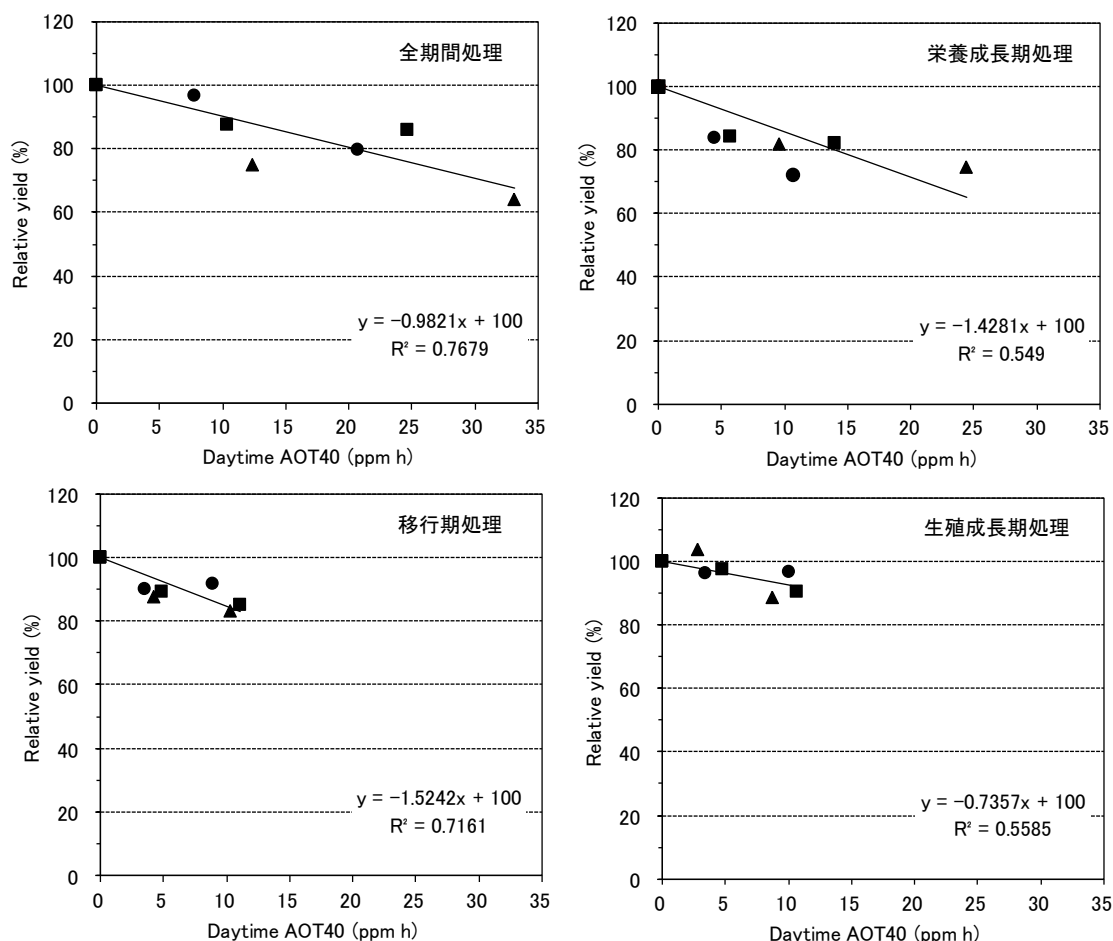


図-2-1 各処理区における水稻の収量に及ぼすオゾンの影響
縦軸：空気浄化（CF）区の収量を100とした時の相対収量率

（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

1) 2009年度の試験結果

図-2-2に、施肥量およびオゾン暴露が水稻の収量に及ぼす影響を示した。水稻の収量は、基肥の増加に伴って増える傾向にあった。一方、穂肥およびケイ酸カルシウム施用による収量への影響は、本試験においては明瞭ではなかった。また、ケイ酸カルシウムの施肥によって収量が若干増加する傾向が認められた。施肥量にかかわらず、オゾン処理によって水稻の収量は減少傾向にあった。処理区によっては、外気オゾン濃度区では収量の低下が認められない場合もあったが、高濃度オゾン処理区である1.5NF区において著しい収量低下が認められた。

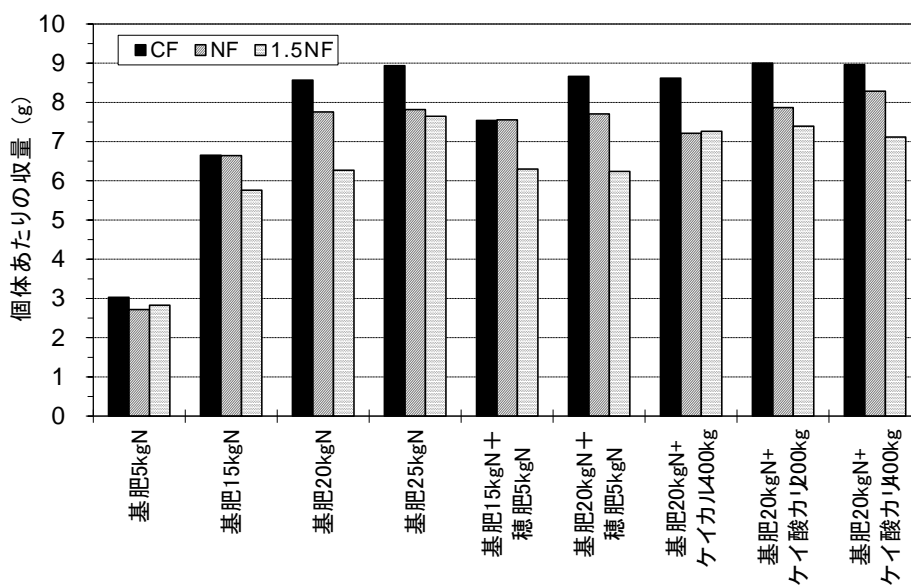


図-2-2 2009年度の各施肥処理区における水稲の収量に及ぼすオゾンの影響

2) 2010年度の実験結果

図-2-3に、施肥量およびオゾン暴露が水稲の収量に及ぼす影響を示した。水稲の収量は、元肥の増加に伴って増える傾向にあった。また、穂肥やケイ酸カリの施肥によって収量の若干の増加傾向が認められた。施肥量にかかわらず、オゾン処理によって水稲の収量は減少傾向にあり、処理区によっては、外気オゾン濃度区、および高濃度オゾン処理区である1.5NF区において収量低下が認められた。また、ケイ酸肥料施用の有無によるオゾン影響を検討するために基肥20kg区と基肥20kg+ケイ酸カリ200kg区、基肥20kg+ケイ酸カリ400kg区、基肥20kg+ケイ酸カリ600kg区を比較

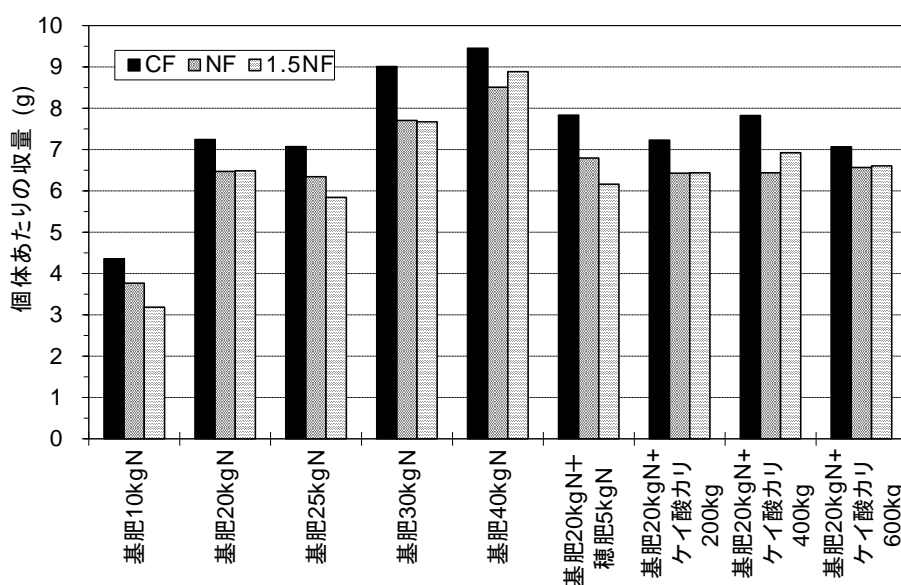


図-2-3 2010年度の各施肥処理区における水稲の収量に及ぼすオゾンの影響

したところ、基肥20kg+ケイ酸カリ600kg区においてオゾンによる収量低下割合が若干減少していたが、その他のケイ酸カリ施肥区においてはオゾン影響の軽減効果は明瞭ではなかった。

2010年年度の結果によれば、施肥方法（窒素施肥量、ケイ酸施肥）を変えてもオゾンによる水稻の収量減少割合はほとんど変化せず、オゾン感受性はほとんど変わらないと考えられた。

本試験は、2009年～2010年度の2か年において2回実施したが、同じ施肥処理区においても年により外気オゾン濃度の差異、気温などの生育条件が異なるため、オゾン影響の程度が異なっていた。そこで、2年2回の試験結果をまとめて、水稻の収量に対する窒素施肥量やケイ酸施肥とオゾンの関係について検討をおこなった。

2009年と2010年の実験において、窒素施肥量が多くなるに伴ってオゾン処理にかかわらず水稻の収量は増加する傾向にあった

（図-2-2、図-2-3）。そこで、水稻の収量に対する窒素施肥量とオゾンの積算ドースであるAOT40の関係を検討した（図-2-4）。なお、基肥5kg区（図-2-2および図-2-3）は極端に収量が少なかったことから、肥料欠乏が考えられるため、オゾン影響の評価に適さないと判断し、除外して検討を行った。その結果、水稻の収量に対する窒素施肥量とオゾンの関係においては明瞭な関係は認められなかった。すなわち、窒素施肥によって水稻の収量に対するオゾン感受性は大きく変わらないと考えられた。

一方、水稻の収量に対するケイ酸肥料施肥とオゾンの積算ドースであるAOT40の関係を検討したところ（図-2-5）、ケイ酸肥料施用の有無によってオゾン感受性は変化せず、収量に及ぼすオゾンの影響にはほとんど変化が認められなかった。ケイ酸カリ肥料は二酸化硫黄の収量に対する悪影響を軽減する効果があるとする報告^{4, 5)}があるものの、本実験結果によると、ケイ酸肥料はオゾンの悪影響を軽減させる効果はないと考えられた。

これらの結果より、窒素施肥量

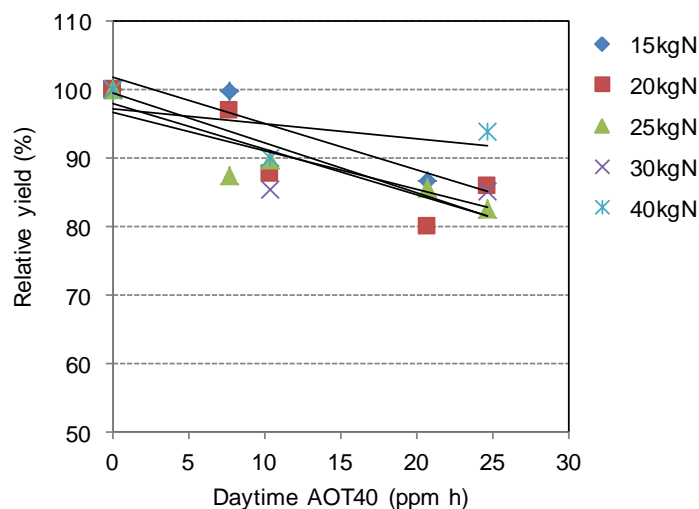


図-2-4 水稻の収量に対する窒素施肥量とオゾンの関係

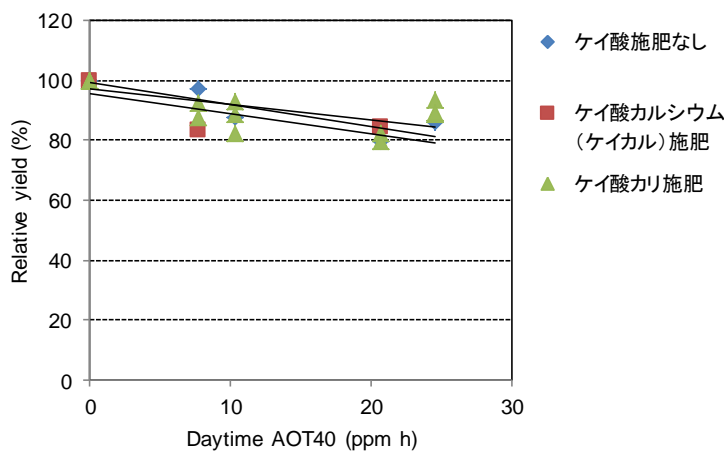


図-2-5 水稻の収量に対するケイ酸施肥とオゾンの関係

を変えたり、ケイ酸肥料を使用しても、水稻の収量に対するオゾン影響そのものを軽減させることはできないことが明らかになったと考える。

一方、窒素施肥量を多めにすることで収量のレベルを引き上げることができることから、オゾン濃度の高い地域では、窒素施肥を十分に行う必要があると考えられた。また、成育時期別にオゾンの影響を検討した結果から栄養成長期の後半から生殖成長期に相当する移行期のオゾン暴露が収量を低下させることからオゾン濃度が高い時期に移行期がかからないように作付時期を検討することも影響を回避するうえで重要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、光化学オキシダント（オゾン）が水稻の収量に及ぼす悪影響の回避・軽減策を検討する一つとして、これまで検討されていなかった「水稻の収量に及ぼす生育時期別のオゾン影響」と「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」を検討したものである。「水稻の収量に及ぼす生育時期別のオゾン影響の評価」により、栄養成長期後半から生殖成長の前半に相当する移行期のオゾン影響が、水稻の収量の低下に大きな影響を及ぼしていることが明らかになった。オゾン影響が最も大きい成育段階が明らかとなったことから収量低下メカニズム検討する糸口が見つかり、今後のメカニズム解明研究に貢献すると考える。

(2) 環境政策への貢献

光化学オキシダント（オゾン）が水稻の収量に及ぼす悪影響の回避・軽減策を検討するうえで基礎となる情報が本試験より得られたことより、今後、アジアの開発途上国において持続的な開発を支援する上で、本研究の成果が活用されることが期待される。

6. 引用文献

- 1) Ashmore M. R., S. Toet, and L. Emberson (2006). Ozone - a significant threat to future world food production? *New Phytologist* 170: 201-204.
- 2) 野内 勇（編著）（2001）大気環境変化と植物の反応，養賢堂，東京.
- 3) 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. Agricultural Meteorology*, 60(5): 1045-1048.
- 4) 青木正則，小川 正，石川春彦（1975）タバコの耐SO₂性と珪酸質肥料との関係，電力中央研究所 研究報告 476011.
- 5) 青木正則，小川 正（1977）トマトの耐SO₂性とケイ酸質肥料との関係，電力中央研究所 研究報告 74002.
- 6) Heagle, A. S., J. E. Miller, J. O. Rawlings, and S. F. Vozzo (1991) Effect of growth stage on soybean response to chronic ozone exposure. *J. Environmental Quality*, 20:562-570.

7. 国際共同研究等の状況

なし

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

〈論文（査読あり）〉

なし

〈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）〉

なし

(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) 水稲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)
- 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稲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)
- 3) 米倉哲志, 篠原慎弥, 伊豆田猛, 河野吉久 (2009) 10種の作物に対するオゾンのクリティカルレベルの検討. 日本農業気象学会2010年全国大会 (名城大学)
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Yonekura, T. (2010) Tentative critical levels of tropospheric ozone for agricultural crops in Japan. 2010 American Geophysical Union Fall Meeting, Dec. 14, San Francisco, USA.
- 7) 米倉哲志 (2011) 水稲の収量に対するオゾンのクリティカルレベルの検討. 日本農業気象学会2011年全国大会 (鹿児島大学)

(3) 出願特許

なし

(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