

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：82405

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26450027

研究課題名(和文) 高濃度二酸化炭素環境下におけるオゾンが水稻に及ぼす影響とその品種間差の要因解明

研究課題名(英文) Elucidation of the effect of ozone on yields of rice cultivars under high carbon dioxide concentration and factors of difference in its influence among cultivars

研究代表者

米倉 哲志 (Yonekura, Tetsushi)

埼玉県環境科学国際センター・自然環境担当・専門研究員

研究者番号：40425658

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：高濃度CO₂環境下において、水稻の収量に対するO₃影響が変化するか調べた。O₃とCO₂の暴露実験を実施するために、1年目に小型オープントップチャンバーにO₃発生装置やCO₂添加装置を導入した実験装置を作成した。2～3年目の2作期において、水稻4品種に対するO₃とCO₂の暴露実験を実施し、収量などに及ぼす影響を調べた。全品種とも高CO₂(+140ppm)により収量が増加する傾向、O₃の増加に伴う収量の有意な低下が認められた。高O₂環境下におけるO₃による収量低下程度は現状レベルのCO₂でのO₃影響とほぼ同様で、140ppmのCO₂濃度上昇ではO₃感受性は大きく変化しないのではないかと考えられた。

研究成果の概要(英文)：We investigated whether the influence of O₃ on the yield of rice plants changes under a high concentration CO₂ environment. In 1st year, in order to carry out O₃ and CO₂ exposure experiments, we improved the small open top chamber. The O₃ generator and CO₂ addition device were introduced into the chamber. In 2nd and 3rd year, we investigated the influence of O₃ and CO₂ on the yield of 4 cultivars of Japanese rice. The yield of all cultivars tended to increase in the high concentration of CO₂ treatment. On the other hand, the yield of all cultivar decreased with increasing O₃. The reduction rate of yield affected by O₃ was not changed even when the CO₂ concentration changed. As a result, it seems that O₃ sensitivity of rice yield does not change greatly with increasing CO₂ concentration of 140 ppm.

研究分野：植物生理生態

キーワード：オゾン 二酸化炭素 水稻

1. 研究開始当初の背景

オゾン (O_3) や二酸化炭素 (CO_2) の高濃度化が植物に及ぼす影響に関する研究背景・経過を示す。

(1) オゾン (O_3) の植物影響

我が国を含むアジアにおいて地表オゾン濃度 (O_3) が上昇しつつある。 O_3 は光化学オキシダントの大部分を占めている成分であり、環境基準が全く達成されていない大気汚染物質である。我が国では 1970 年代より O_3 濃度は改善傾向にあったが、近年再び、濃度上昇傾向が認められている。また、国外からの越境大気汚染物質の流入などによって、高濃度 O_3 の発現地域の広域化も進んでいる。さらに、 O_3 は窒素酸化物等の光化学反応による二次生成物質であるため、温暖化によって生成反応が促進され、更なる O_3 濃度上昇が危惧されている (IPCC, 2007)。

この O_3 は酸化性の高い物質で、植物への毒性が高く、比較的高濃度の O_3 に曝されると葉のクロロフィルの低下、光合成阻害、老化促進等による成長や収量の低下が引き起こされる (Fiscus et al, 2005、米倉ら, 2000)。日本国内で観測される O_3 濃度 (日中平均 40-75ppb) で多くの農作物の生育や収量が低下することが明らかになっている (野内ら, 1988)。我が国の主要農作物の水稲においても O_3 による収量低下などの悪影響が指摘されており (長谷川ら, 2008)、その O_3 による水稲の収量低下は国内外の品種間で大きく異なっている (Yonekura et al., 2005)。我々は、 O_3 暴露を簡易に行える小型オープントップチャンバーを開発し (河野・米倉, 2012)、水稲 8 品種に対し O_3 の収量に及ぼす影響を評価した結果、水稲の O_3 感受性が品種や生育環境等によって変わる可能性を示した (米倉・河野, 2011)。しかしながら、この品種間差の要因は明らかになっておらず、現状および将来的な水稲生産に対する O_3 リスクを評価するためには、収量低下の品種間差を決める要因を明らかにする必要がある。

(2) 二酸化炭素 (CO_2) の植物影響

地球規模で大気中の二酸化炭素 (CO_2) 濃度が上昇し続けており、大気中の CO_2 濃度は、排出削減に向けた取り組みが今後なされたとしても上昇を続け、現在の約 390ppm から、今世紀半ばには 470-570ppm、今世紀末には 540-970ppm に到達すると予測されている (IPCC, 2007)。

この CO_2 濃度上昇によって植物の光合成は促進され、多くの植物の成長や収量が増加する (Ainsworth and Long 2005 など)。一方で、高 CO_2 環境下で長期間栽培すると、光合成速度が高まる結果、初期生育が促進されるが、葉に同化産物が早く蓄積することになり、長期的に高濃度 CO_2 下に植物が置かれると光合成の抑制が起こることが指摘されている (Ainsworth and Long 2005)。また、葉面積

の促進にともなう、単位面積当たりのクロロフィル含量などの葉内成分量が減少する傾向にあることも指摘されている。また、植物の形態的な違いによって CO_2 影響も異なり、シンク形態の異なるコマツナとハツカダイコンの比較実験で、シンク容量の大きいハツカダイコンで CO_2 による成長促進効果が大きい事を示した (Yonekura et al., 2005)。水稲においても籾数の多い品種や粒の大きい品種のように形態的にシンク容量が大きい品種で増収率が高い傾向がある (Hasegawa et al., 2013)。このように、高 CO_2 環境下で初期成長が促進されたとしても水稲の増収が期待されるほど大きくならない可能性が示唆されるとともに、増収率も品種間で異なることが十分に予想される。

(3) オゾン (O_3) と二酸化炭素 (CO_2) の複合的な植物影響

植物に対する O_3 や CO_2 の単独影響についての知見は多数あるものの複合的な影響に関する知見は少なく、特に収量に対する長期慢性影響にかかわる知見はダイズやコムギのみである。 O_3 は気孔を介して葉内に入り被害を与えるため、オゾン濃度が高くて気孔が閉じていれば O_3 による植物被害は小さいと考えられている。そのため高濃度 CO_2 の長期暴露によって引き起こされた気孔閉鎖により、 O_3 吸収量が減るため、高 CO_2 環境下では O_3 の悪影響が緩和されるとの報告もある (McKee et al., 1997 など)。一方、 O_3 は気孔の開閉機能を鈍らせるため高 CO_2 による気孔閉鎖反応を誘発させにくくなり、 O_3 の悪影響の程度が変わらない、もしくは増大させる可能性があるとの報告もある。前述のように O_3 の悪影響に対する感受性や高 CO_2 による成長促進や収量増大は、植物種や品種によっても異なるとともに、長期的応答は初期応答と異なってくるため複合影響についてはまだ一定の見解は得られていない。これに加えて、日本の水稲品種に対する O_3 と CO_2 の複合影響に関する研究報告はない。 CO_2 と O_3 の濃度が同時に上昇した場合の水稲の収量に対する影響の解明は、温暖化対策を品種レベルで検討するうえでも非常に重要な喫緊の課題である。

2. 研究の目的

日本の水稲の収量に対する O_3 や CO_2 の影響には品種間差異が認められるが、その要因はあまり良く分かっていない。また、近い将来十分に起こりうる高濃度 CO_2 環境下における O_3 影響を明らかにしなければ水稲生産への O_3 リスクは評価できない。さらに、将来の水稲生産への影響を考えるうえで、既存の品種だけでなく新しい品種においても検討することが必要である。

そこで本研究では、既存の水稲品種と埼玉県農林総合研究センター水田研究所で育種している新しい品種を対象に、相反する影響

を及ぼす O₃ と高 CO₂ が複合的に作用した場合、収量への O₃ の悪影響発現が高 CO₂ 環境下で変化するか明らかにし、O₃ と CO₂ の複合影響の品種間差異が発現する要因を調べる。そのために、私たちが開発した小型オープントップチャンバーを改良し、O₃ 発生装置や CO₂ 添加装置を加えた簡便で低コストの装置を用いて暴露実験を実施する。また、各品種の O₃ や CO₂ に対する葉内成分や光合成や収量構成要素を計測し、影響の品種間差異を検討する。さらに、O₃ ドースと清浄空気で作成した水稻収量を 100% とした時の相対収量との関係を調べ、CO₂ 環境が変わった際の水稻収量に対するオゾン感受性に変化があるのかを検討する。

3. 研究の方法

本研究では、小型オープントップチャンバー（写真 1）を用い、O₃ 発生装置や CO₂ 添加装置を導入して比較的簡便で低コストの実験装置を作成し、暴露実験手法を確立する。さらに、それを用いて水稻への O₃ と CO₂ の暴露実験を実施した。

1 年目（2014 年度）は、小型オープントップチャンバーに、O₃ や CO₂ を添加する装置を新たに追加し、それぞれの濃度制御等の評価を行い、O₃ と CO₂ 添加実験を実施できる体制を整えた。

2～3 年目（2015～2016 年度）に、1 年目に改良した小型オープントップチャンバーを用いて、埼玉県で多く用いられている水稻品種である“コシヒカリ”や“彩のかがやき”、“キヌヒカリ”、および埼玉県農林総合研究センターで育種した“彩のきずな”の新しい品種について収量とその収量構成要素に対する O₃ と CO₂ の単独および複合影響について暴露実験を実施し調べた。暴露実験は O₃ 暴露処理を 3 段階、CO₂ 暴露処理を 2 段階設定し、各暴露処理を掛け合わせ合計 6 処理区で実施した。2 作期の暴露実験に基づき、収量や収量構成要素などへの影響をオゾンドースと清浄空気で作成した水稻の収量を 100% とした時の相対収量との関係などで評価した。



写真 1. 小型オープントップチャンバー

4. 研究成果

(1) ①小型オープントップチャンバーの改造と性能試験

埼玉県環境科学国際センター生態園内に設置している 18 基の小型オープントップチャンバー（写真 1）の改造を行った。これらは、O₃ の植物影響を評価するために作製したもので、育成環境中の O₃ を除去した環境と O₃ を除去しない野外と同等の環境を設けることが可能である。今回、さらに、高濃度 O₃ 環境、高濃度 CO₂ 環境を作り出すために O₃ 発生装置や CO₂ 添加装置を加えたチャンバーに改造した。

小型オープントップチャンバーに隣接して物置を設置し、ガス制御室（写真 2）とした。ガス制御室内には CO₂ ガスの供給量を制御するためのコントローラー（写真 2-①）を作成し、CO₂ 計測器（写真 2-②）、市販の 30kg 入り CO₂ ボンベ（写真 2-③）等を配置し、6 基のチャンバーに一定流量の CO₂ を導入させ、野外の CO₂ 濃度+100～400ppm の生育環境を作り出せるように設定した。また、同ガス制御室内に O₃ 発生器（写真 2-④）や O₃ 計測器（写真 2-⑤）を設置し 6 基のチャンバーに

ガス制御室内



ガス制御室背面



チャンバー背側面



写真 2. 小型オープントップチャンバーの CO₂、O₃ 制御装置:

- ① CO₂ ガス配給量コントローラー、② CO₂ 計測器、③ CO₂ ボンベ(30kg × 3 本)、④ O₃ 発生器、⑤ O₃ 計測器、⑥ 窒素酸化物等除去用ウォータートラップ、⑦ 余剰 O₃ 除去用活性炭タンク、⑧ CO₂ 導入口、⑨ O₃ 導入口、⑩ フィルター(O₃ 除去区:ニチアスハニクル ZV、その他:ニチアス 担体ハニクル)

一定流量の O_3 を導入させ、野外の O_3 濃度 +10 ~100ppb の生育環境を作り出せるようにした。使用した O_3 発生器は、空気から無声放電により O_3 を生成するものであり、その O_3 生成の際に窒素酸化物なども生成される。そこで、それらの副生成物質を除去するためにチャンバーへ導入する前にウォータートラップ（写真 2-⑥）を設置した。また、 O_3 発生器より発生した余剰の O_3 ガスを浄化して排気するための活性炭入りタンク（写真 2-⑦）を備えた。それぞれのガスのチャンバーへの配管には、 CO_2 ガスはタイロンチューブを、 O_3 ガスにはテフロンチューブを用い、チャンバーの側面より空気導入ファンの部分にガスを導入した。

また、チャンバー背面の空気導入口（写真 2-⑩）に、オゾン除去区はハニカム構造のオゾン除去フィルターを、野外オゾン区とオゾン添加区にはオゾン除去フィルターと同様の構造をした無機繊維ペーパーフィルターを配し、チャンバーへ空気が導入される際の抵抗に処理区差が無いようにした。

(1)②小型オープントップチャンバーの性能試験

改良した小型オープントップチャンバーの CO_2 と O_3 の濃度制御の性能試験を行った。チャンバー内に CO_2 を添加し、野外濃度 +100 ppm、200 ppm、400 ppm になるように流入量を調整し、その精度を検証した。その結果、野外 +100 ppm 設定時の平均 CO_2 濃度は野外 +112 ppm（図 1-③）で標準偏差は ± 14 ppm、野外 +200 ppm 設定時の平均 CO_2 濃度は野外 +225 ppm（図 1-①）で標準偏差は ± 25 ppm、野外 +400 ppm 設定時の平均 CO_2 濃度は野外 +419 ppm（図 1-②）で標準偏差は ± 28 ppm であり、全ての濃度段階において本実験で目標とする精度で CO_2 が制御されていた。

また、チャンバー内に O_3 を添加し、野外濃度 +20 ppb、40 ppb になるように流入量を調整し、その精度を検証した。その結果、野外 +20 ppb 設定時の平均 O_3 濃度は野外 +21 ppb（図 2-①）で標準偏差は ± 4.3 ppb、野外 +40 ppb 設定時の平均 O_3 濃度は野外 +42 ppb（図 2-②）で標準偏差は ± 7.2 ppb となり本実験で目標とする精度である程度制御できていた。チャンバーの O_3 制動試験においては、 O_3 除去区の O_3 除去フィルターによる O_3 除去効率についても検討した。チャンバーの O_3 除去効率は、 O_3 除去区では O_3 濃度が高い夏期においても野外の O_3 の 70%以上が除去され、ほとんどの時間帯で 20ppb 以下であり、 O_3 除去区の濃度は植物に悪影響を与えないレベルであった（図 2）。このように小型オープントップチャンバー改良により、 O_3 と CO_2 添加実験に利用可能な仕様となった。

(2) 水稻 4 品種に対する O_3 および CO_2 の単独および複合影響評価実験

上記 (1) において改良した小型オープン

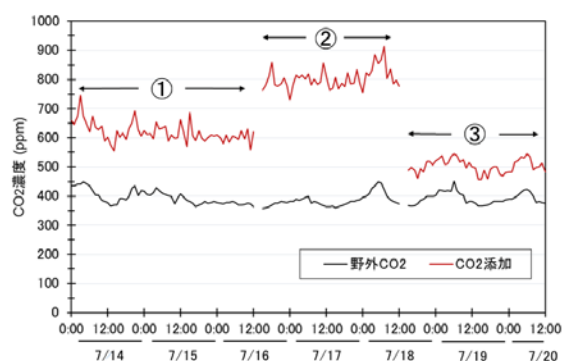


図 1. 小型オープントップチャンバー内の CO_2 濃度の制御状況（1 時間平均値）。図中①は +200 ppm CO_2 、②は +400 ppm CO_2 、③は +100 ppm CO_2 に設定。

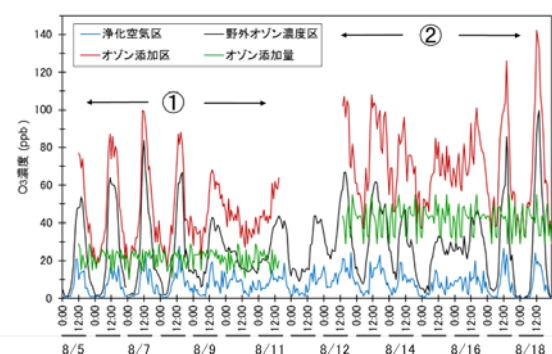


図 2. 小型オープントップチャンバー内の O_3 濃度の制御状況（1 時間平均値）。図中①は +20 ppb O_3 、②は +40 ppb O_3 に設定。

トップチャンバーを用いて、2 作期にわたって水稻品種に対する O_3 と CO_2 の単独および複合影響評価実験を実施した。

実験には、水稻 4 品種（コシヒカリ、キヌヒカリ、彩のかがやき、彩のきずな）を用いて、 O_3 濃度 3 段階： O_3 除去区 (CF 区)、野外 O_3 濃度区 (NF 区)、野外 O_3 濃度 +30 ppb 区 (O_3 添加区)、 CO_2 濃度 2 段階：野外 CO_2 濃度区、野外 CO_2 濃度 +140 ppb 区) を設け、それぞれの処理条件を掛け合わせた 6 処理区を設けた。 O_3 添加は、8 時～18 時までの 10 時間、 CO_2 添加は 4 時～20 時まで 16 時間行った。各処理区は 3 チャンバー反復で実施した。

1 作期目における実験期間中の各処理区の日中の平均 CO_2 濃度は、野外 CO_2 濃度区で 384 ppm、高濃度 CO_2 区で 527ppm であった。また、昼間の平均 O_3 濃度は、CF 区で 13.9 ppb (AOT40 で 0 ppm・h)、NF 区で 46.4 ppb (AOT40 で 9.8 ppm・h)、 O_3 添加区で 73.4 ppb (AOT40 で 28.4ppm・h) であった。また、2 作期目における実験期間中の各処理区の日中の平均 CO_2 濃度は、野外 CO_2 濃度区で 385 ppm、高濃度 CO_2 区で 519ppm であった。また、昼間の平均 O_3 濃度は、CF 区で 13.6 ppb (AOT40 で 0 ppm・h)、NF 区で 44.5 ppb (AOT40 で 10.4 ppm・h)、 O_3 添加区で 71.5 ppb (AOT40 で 30.8 ppm・h)

であった。なお、AOT40 とは、40ppb 以上の O_3 を積算した O_3 ドースであり、 O_3 の植物影響評価の際に良く用いられる。

1 作期目において、各処理条件で育成したコシヒカリと彩のかがやきの収量および収量構成要素について検討した。その結果、全品種とも CO_2 添加による収量の増加傾向は認められたものの有意な影響ではなかった。その要因として、例えばコシヒカリにおいては、

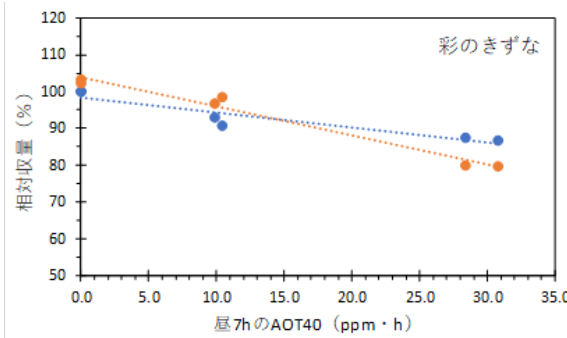
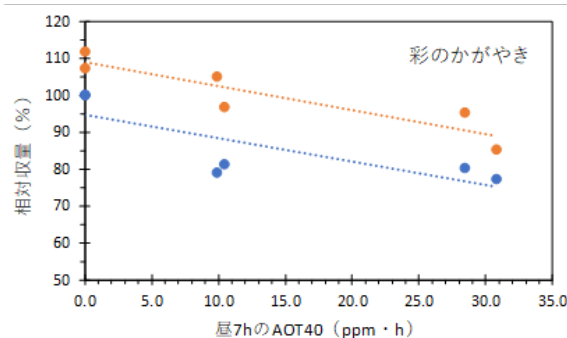
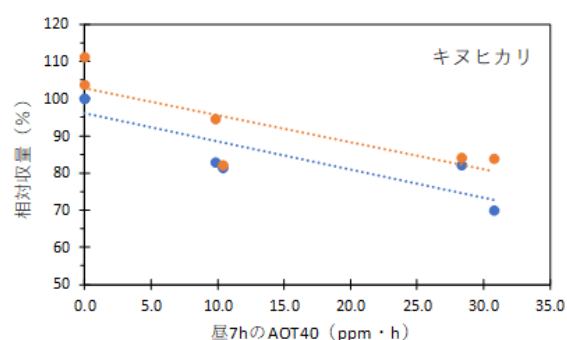
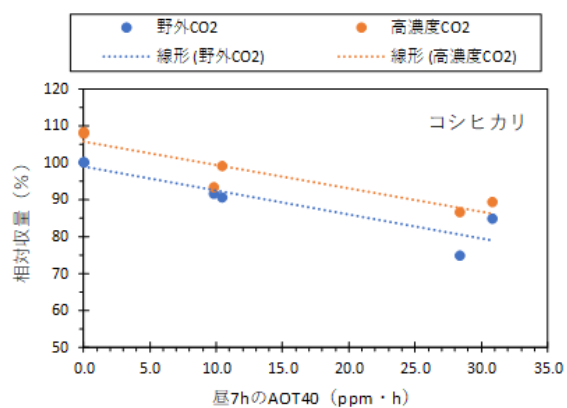


図 3. 各作期の CF-野外 CO_2 区の収量を 100% とした時の相対収量と昼間 7 時間の AOT40 との関係

CO_2 添加によって子実の総数は増加したが不稔実数も増加し不稔実割合が増加したため、稔実数の明瞭な増化が認められなかったことなどが考えられる。一方、 O_3 により収量が低下する傾向が認められた。 O_3 による収量低下の主な要因は、例えばコシヒカリにおいては一穂当たりの稔実数の低下、彩のかがやきにおいては一穂当たりの稔実数の低下と個体あたりの穂数の低下であった。また、 O_3 と CO_2 の有意な複合影響は認められなかった。

2 作期目において各処理条件で育成した 4 品種の収量について検討した結果、全品種とも CO_2 添加による収量の増加傾向が認められた。また、 O_3 による有意な収量低下が全品種で認められた。

2 作期間にわたる曝露実験結果を用いて、各年の O_3 除去区 (CF 区) の収量を 100% とした時の相対収量と育成期間中の昼間 7 時間 40ppb 以上の積算 O_3 ドースである AOT40 との関係を各品種において検討した (図 3)。その結果、すべての品種で O_3 により収量は低下し、現状レベルの O_3 で 8~14% 程度の低下、現状レベル+30ppb で 12~22% 程度の低下が認められた。一方、140ppm の CO_2 濃度上昇によって収量は、8%~15% 程度増加していた。また、それぞれの影響に品種間差が認められたため、収量構成要素 (穂数、稔実数、稔実割合、1000 粒重) について検討したが、応答が 1 作期目と 2 作期目で異なるなど明瞭な品種間差異の要因を突き止めることはできなかった。よって、さらなる実験の繰り返しが必要であると考えられる。

また、コシヒカリ、キヌヒカリおよび彩のかがやきにおいて、高濃度 CO_2 (+140ppm) 環境下においても O_3 による収量の低下程度は、現状レベルと大きく変化しておらず、このことより、約 140ppm 程度の CO_2 濃度上昇環境下においては、水稻の収量に対する O_3 感受性は大きく変化しないのではないかと考えられた。

<引用文献>

- ① Hasegawa T. et al., Rice cultivar responses to elevated CO_2 at two free-air CO_2 enrichment (FACE) sites in Japan, Functional Plant Biology, Vol. 40, 2013, 148-159
- ② 河野吉久、米倉哲志、可搬型小型オープントップチャンバーシステムの開発、大気環境学会誌、47 巻 2012、186-193
- ③ 米倉哲志、河野吉久、オゾン濃度上昇が水稻の生産性に及ぼす影響、関東の農業気象、37 巻、2011、10-13
- ④ IPCC, Climate Change 2007 - IPCC Fourth Assessment Report, 2007
- ⑤ 長谷川利拓、日本海沿岸部における農作物収量の推移-地表オゾン濃度上昇との関連-、日本農業気象学会大会講演要旨集、2008、0S2-6
- ⑥ Ainsworth EA. and Long SP., What have

we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂, Vol.165, 2005, New Phytologist, 351-372

- ⑦ Yonekura T. et al., Impacts of O₃ and CO₂ enrichment on growth of Komatsuna (*Brassica campestris*) and Radish (*Raphanus sativus*), Phytton, Vol.45, 2005, 229-235
- ⑧ Fiscus EL. et al., Crop responses to ozone: uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning, Plant, Cell and Environment, vol.28, 2005, 1365-30409.
- ⑨ 米倉哲志ら, 2000 米倉ら. 大気環境学会誌, 35:36-50 (2000)
- ⑩ 野内勇ら、光化学オキシダントに対する農作物及び園芸作物の相対的感受性比較、大気汚染学会誌、23 巻、1988、643-651
- ⑪ McKee IF. et al., Will elevated CO₂ concentrations protect the yield of wheat from O₃ damage?, Plant Cell Environment, No.20, 1997, 77-84

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 米倉哲志、農作物に対する光化学オキシダント (オゾン) の影響、大気環境学会誌、51 巻、2016、A57-A66

[図書] (計1件)

- ① Tetsushi Yonekura, Takeshi Izuta, Effects of Ozone on Japanese Agricultural Crops, In: Air Pollution Impacts on Plants in East Asia (Takeshi Izuta Ed.) 2017, 57-72

6. 研究組織

(1) 研究代表者

米倉 哲志 (YONEKURA, Tetsushi)
埼玉県環境科学国際センター・自然環境担当・専門研究員
研究者番号：40425658

(2) 研究分担者

増富 祐司 (MASUTOMI, Yuji)
茨城大学・農学部・准教授
研究者番号：90442699