

令和 5 年 10 月 26 日現在

機関番号：82405

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12200

研究課題名(和文) オゾンの農作物影響評価モデルの構築と広域的リスク評価

研究課題名(英文) Construction of the model of crop impact from ozone, and evaluate the ozone risk in a broad region

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・担当部長

研究者番号：40425658

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：コマツナなどを対象に、オゾン曝露試験を埼玉と長崎で実施し、オゾンのクリティカルレベルを検討した。また、オゾンが農作物に及ぼすリスクについて、関東地方を対象地域として評価した。コマツナを対象としたオゾン曝露試験に基づくと、リスク評価に用いるオゾン指標はAOT20やAOT30が適性を示した。欧州で検討されているオゾンのクリティカルレベル(収量が-5%時におけるAOT40値)を検討した結果、1カ月のAOT40値で、約1.2ppm・hであった。さらに、関東地方の大気常時監視データを用いてAOT40の空間分布図を作成し、夏季の昼間のオゾンによるコマツナの成長に及ぼす影響について地図化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国のコマツナなどの近郊野菜を対象にしたオゾン曝露実験に基づいた、作物の成長に及ぼすオゾン影響評価モデルを構築することによって、オゾンのクリティカルレベル(影響閾値)の評価を行うとともに、オゾンのリスクについて関東地方を対象地域として検討した。この結果は、我が国の植物保護のためのオゾンの環境指針値の提唱に向けた貴重なデータともなると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order to examine the critical level of ozone in agricultural crops, ozone exposure experiments were conducted in Saitama and Nagasaki for such as Komatuna (Japanese mustard spinach). In addition, the risk of ozone on crops was evaluated in the Kanto region. Based on ozone exposure experiments on Japanese mustard spinach, the AOT20 and AOT30 are suitable ozone indices for risk assessment. As a result of examining the critical level of ozone (AOT40 value when the yield is -5%) considered in Europe, the AOT40 value for one month was about 1.2ppm h. In addition, we created a spatial distribution map of AOT40 using continuous atmospheric monitoring data in the Kanto region, and mapped the effect of summer daytime ozone on the growth of Japanese mustard spinach.

研究分野：植物生理生態学

キーワード：オゾン 作物 クリティカルレベル リスク評価

1. 研究開始当初の背景

オゾンは、光化学オキシダントの大部分を占めている成分であり、我が国においても環境基準が全く達成されていない大気汚染物質である。

このオゾンは酸化性の高い物質で、植物への毒性が高く、成長や収量の低下が引き起こされる。日本国内で観測されるオゾン濃度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（米倉ら, 2016）。また、欧米を中心に、オゾンの農作物生産への影響リスク評価に関する研究が進められており、このリスク評価には、農作物に対するオゾン曝露試験を行い、オゾンの積算暴露量を基にした様々なオゾン指標（平均オゾン濃度、AOT40、SUM06、W126 など）と農作物のオゾン応答との関係を検討しオゾン影響評価モデルを作成し、オゾンのクリティカルレベル（影響閾値：明らかに成長等が減少が発現するオゾンレベル）を評価する手法を用い、リスク評価は進められている（UN ECE, 2015）。一方、我が国において植物に対するオゾン被害のリスク評価手法に関する研究はほとんど実施されていない。

2. 研究の目的

本研究では、比較的短期間（1 か月程度）で栽培する農作物（主にコマツナ）を対象に、様々なオゾン指標（日平均濃度・AOT40・SUM06・W126 など）と農作物の成長に対するオゾン応答、生育環境要因（気温）との関係を検討し、農作物成長に及ぼすオゾンリスク評価モデルを確立し、1 か月単位でのオゾンのクリティカルレベル（影響閾値）を検討する。さらに、このオゾンリスク評価モデルを用いて、オゾンの農作物へのリスクを関東地方をモデル地域として広域的な評価法を検討し、地図化を図る。

3. 研究の方法

埼玉環境科学国際センター（CESS）と長崎大学（長崎大）において、比較的短期間（1 か月程度）で栽培する農作物（主にコマツナ）を対象にオゾン曝露試験を行った。

供試する農作物として比較的短期間（1 か月程度）で栽培されるコマツナ、ホウレンソウ、チンゲンサイ、ハツカダイコン、コカブなどを候補として挙げ、予備実験を複数回行った。その結果、埼玉と長崎の二地域での試験の実施という観点や、年間を通して安定的に栽培できる点などを考慮して、本研究では、コマツナを対象としてオゾン影響評価を行う事とした。

オゾン曝露試験は、CESS ではガラス温室型のオゾン濃度条件の変化可能な3連のオゾン曝露オープントップチャンバー（大 OTC）を用いて、長崎大では小型オープントップチャンバー（小 OTC）を用いて実施した。大 OTC ではオゾン除去空気を導入した処理区（浄化区）、外気のオゾンを導入した処理区（野外オゾン区）、オゾン添加区として外気オゾン濃度の1.5倍になるようにオゾンを添加した処理区（1.5倍オゾン区）のオゾン3段階で育成し、小 OTC では、（浄化区）、外気のオゾンを導入した処理区（野外オゾン区）のオゾン3段階で育成した。市販の園芸培土を詰めた容積約1.4Lポットにコマツナを播種し、本葉展開直後に、其々の OTC 内に配置し、約1か月間生育し、各処理区個体の個体乾重量や個体

葉面積を測定した。2020～2022年の5～10月上旬においてCESSでは10回、長崎大では同期間の春と秋に計6回実施した。

オゾン暴露実験の結果を基に、「オゾンに対する成長応答」と「様々なオゾン指標（例えば、日平均オゾン濃度や様々なオゾンドース（AOT40、SUM06、W126など）、生育時の気温などの気象要因との関係性について統計解析手法を用いて検討し、オゾン被害のリスク評価モデル式の検討、ならびに1か月単位でのオゾンのクリティカルレベル（影響閾値）を検討した。

さらに、関東地方の大気常時監視データ中の光化学オキシダント（オゾン）濃度の値を用いてAOT40の空間分布図を作成し、夏季の昼間のオゾンによるコマツナの成長に及ぼす影響について地図化を試みた。

4. 研究成果（結果と考察）

オゾン暴露試験は、CESSでは10回実施した。しかしながら、夏季の高温等で明らかな成長不良が観察され、オゾン影響評価に用いられる実験は一部に限られた。オゾンによる成長（個体乾重量）の有意な低下は、5回の時期において認められた。また、オゾンによる明瞭な葉の可視害は認められなかったが、古い葉でオゾンにより退色が促進され、クロロフィル濃度の低下傾向が認められた。一方、長崎大で実施したコマツナのオゾン暴露試験では、実施した6回の試験において、浄化区、野外オゾン区の間でオゾン暴露による成長（個体乾重量）の低下傾向は認められたものの有意な影響ではなかった。両地点の各実験の浄化区の個体乾重量を100%とした時の相対成長率とオゾン指標値の一例として昼間12時間のAOT40との関係を図1に示した。なお、AOT40とは閾値である40ppbを超える1時間値の閾値超過分を積算したオゾン値で、欧州で植物のオゾン影響評価に用いられているオゾン指標値である。その結果、コマツナの成長に対するオゾンの影響は、AOT40の増加（積算オゾン暴露量の増加）に伴って成長量が減少するが、減少程度は、地点間で異なっていた。CESSではオゾン添加区

（1.5倍オゾン区）が設けられたので高濃度オゾンによる著しい低下も示された。

更に、CESSのオゾン暴露試験結果を基に、コマツナの成長に対するオゾン影響をより良く評価できるオゾン暴露指標値を検討した。評価方法としては、図1のように、コマツナの相対成長率とオゾン暴露指標との

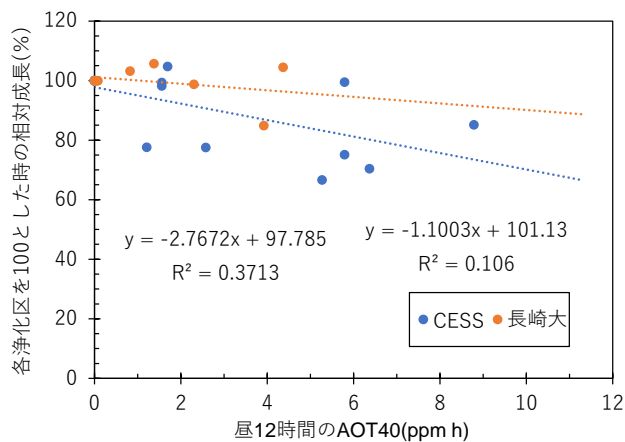


図1. 各浄化区の個体乾重量を100%とした時の各オゾン処理区の相対成長率と昼間12時間のAOT40との関係

直線回帰モデル式の相関係数を用いて検討した。オゾン暴露指標値には、「平均オゾン濃度」、「閾値 X ppb を超える 1 時間値の閾値超過分の累積値 (AOTx)」、「閾値 X ppb を超過した濃度の累積値 (SUMx)」、「高濃度に対して重み付けした積算値 (W126)」を用いた。また、AOTx のオゾンの閾値濃度 X ppb には、20、30、40 ppb を、SUMx のオゾンの閾値濃度 X ppb には、20、30、40、60 ppb を用いた。更に、1 日当たりのオゾンの累積時間は 24 時間、昼 12 時間 (6-18 時)、昼 7 時間 (9-16 時) を用いた。すなわち、9 つのオゾン指標 × 3 つの累積時間の計 27 パターンを対象に検討を行い、結果を表 1 に示した。相関係数は昼 12 時間、昼 7 時間の平均オゾン濃度で比較的高かった。AOTx、SUMx、W126 のオゾン累積値 (オゾンドース) では、1 日当たりのオゾンの累積時間が長くなるほど相関係数が高くなる傾向が認められた。一方、オゾンの閾値濃度は、20、30、40 ppb で相関係数に大きな差は認められなかったが、低濃度で相関係数が高くなる傾向であった。また、W126 より AOTx や SUMx で相関係数が高い傾向であった。これらの事より、オゾン暴露指標値として、昼間の平均オゾン濃度、もしくは、24 時間値の AOT20~AOT40、SUM20~SUM40 は比較的良好のではないかと考えられた。なお、欧州においては、国連欧州経済委員会の下で、オゾンドースについて様々な検討が行われてきており、現在では「昼間の AOT40」が採用されオゾン影響閾値 (オゾンのクリティカルレベル) が検討されており (米倉、2016)、当研究の「昼 12 時間 AOT40」に相当する。また、クリティカルレベルのエンドポイントは、清浄空気 (浄化空気) の 5% の減少を用いている。コムギの収量へのオゾン影響評価を用いて、農作物のクリティカルレベルは、3 か月間の AOT40 値で 3 ppm・h が提唱されている。本研究の CESS と長崎の結果を用いて、コマツナの相対成長率と、オゾン暴露指標として欧州と同様に昼間の AOT40 (昼 12 時間 AOT40) の直線回帰モデル式より、相対成長 5% の減少時のオゾンのクリティカルレベルを検討したところ、1 か月間値で 1.2 ppm h であった。

表 1. コマツナの相対成長率とオゾン暴露指標値との相関係数

オゾン指標値 (24時間)	相関係数	オゾン指標値 (12時間)	相関係数	オゾン指標値 (7時間)	相関係数	平均
平均オゾン濃度 (24h)	0.46	平均オゾン濃度 (12h)	0.59	平均オゾン濃度 (7h)	0.57	0.54
AOT40(24h)	0.56	AOT40(12h)	0.52	AOT40(7h)	0.48	0.52
AOT30(24h)	0.58	AOT30(12h)	0.53	AOT30(7h)	0.49	0.53
AOT20(24h)	0.58	AOT20(12h)	0.54	AOT20(7h)	0.50	0.54
SUM06(24h)	0.53	SUM06(12h)	0.50	SUM06(7h)	0.46	0.49
SUM04(24h)	0.57	SUM04(12h)	0.51	SUM04(7h)	0.46	0.52
SUM03(24h)	0.58	SUM03(12h)	0.52	SUM03(7h)	0.49	0.53
SUM02(24h)	0.57	SUM02(12h)	0.52	SUM02(7h)	0.49	0.53
W126(24h)	0.55	W126(12h)	0.52	W126(7h)	0.49	0.52
平均	0.55	平均	0.53	平均	0.49	—

さらに、CESS と長崎大で、オゾンによるコマツナの成長の減少程度は異なっていたことより (図 1)、地域による気温の差異もオゾン感受性に関与している可能性もあるため、気温を考慮に入れた重回帰モデル式を検討した。その結果、下記のような式が得られた。

$$\text{相対成長率} = -3.1 \cdot \text{AOT40(12h)} + 0.71 \cdot \text{平均気温(24h)} + 78.1 \quad (\text{相関係数 } R^2 = 0.54)$$

しかしながら、偏回帰係数の有意性の検定を行った結果、気温は目的変数 (相対成長率)

に対する影響は統計的に有意ではなかった。同様に他のオゾン暴露指標（AOT_x、SUM_x、W126 など）を用いて検討を行ったが同様の結果であり、本研究のみでは、気温という要因をオゾン応答モデル式に組み込むことは出来なかった。

加えて、本研究で得られたコマツナの相対成長率とオゾン暴露指標の直線回帰モデル式を用いて、関東地方の大気常時監視データ（国立環境研究所 環境展望台（<https://tenbou.nies.go.jp/download/>））の光化学オキシダント濃度（光化学オキシダント≡オゾン）を用いてAOT₄₀の空間分布図を作成し、夏季の昼間のオゾンによるコマツナの成長に及ぼす影響について地図化した（図2）。地図化には、地理情報システム（Esri社、ArcGIS Pro）を用いた。大気常時監視データは、2000年～2010年の夏季（6～9月）のデータより1か月平均の昼12時間AOT₄₀を算出し、それぞれの地点のコマツナの相対成長率と、オゾン暴露指標として欧州と同様に昼間のAOT₄₀（昼12時間AOT₄₀）の直線回帰モデル式より成長の減少率を算出した。地点間の空間補間にはスプラインを用いた。その結果、

関東地方の中でも地域によってオゾンの影響程度は異なるが、10～15%程度のコマツナの収量低下が起こっている事が示唆された。なお、茨城県に収量低下程度が大きい地域が認められたが、今後、発生要因の検討を進めていく。また、本研究では空間補間にスプラインを用いたが、他の空間補間法（クリギング、IDWなど）でも検討していく。更に、モデルによるオゾン濃度の推計も進められているので（木村ら、2023）、それらへの適用も検討し、オゾンの作物影響リスク評価を行っていく予定としている。

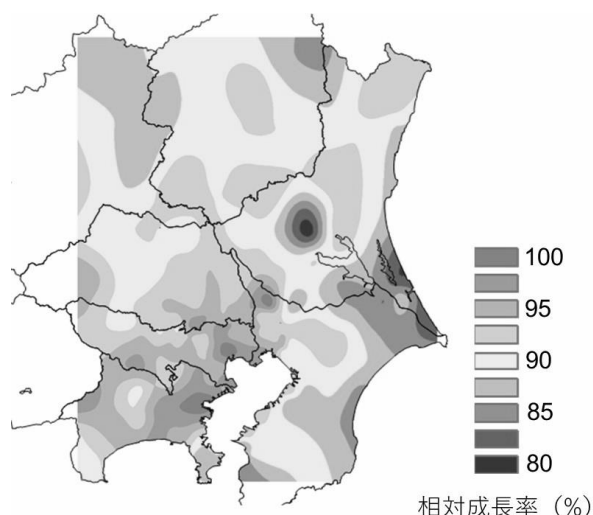


図2. 夏季の昼間のオゾンがコマツナの成長に及ぼす影響

・引用文献

木村知里, 森野 悠, 永島達也, 荒木 真, 上田佳代, 米倉哲志. 大気オゾンの環境影響評価に向け たバイアス補正手法の検討. 大気環境学会誌, 58, 74-85 (2023)

UN ECE: Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads and Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends, Chapter 3: Mapping Critical Levels for Vegetation. p.134 (2015)

米倉哲志.大気環境と植物 一第3講 農作物に対する光化学オキシダント（オゾン）の影響一. 大気環境学会誌, 51, A57-A66 (2016)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 木村 知里、森野 悠、永島 達也、荒木 真、上田 佳代、米倉 哲志	4. 巻 58
2. 論文標題 大気オゾンの環境影響評価に向けたバイアス補正手法の検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 大気環境学会誌	6. 最初と最後の頁 74～85
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11298/taiki.58.74	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 遠藤ゆりの、布施剛、張雅卓、米倉哲志、渡辺誠、伊豆田猛
2. 発表標題 チンゲンサイの収量と品質に対するオゾンと施肥の単独および複合影響
3. 学会等名 第63回大気環境学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口真弘、太田みわ、鈴木つづり、米倉哲志、河野吉久
2. 発表標題 オゾン耐性の異なるインゲンマメ2品種の葉における抗酸化物質質量とその還元能力の違い
3. 学会等名 第63回大気環境学会年会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	王 効学 (Oh Kokyo) (20415392)	埼玉県環境科学国際センター・自然環境担当・担当部長 (82405)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	山口 真弘 (Yamaguchi Masahiro) (60736338)	長崎大学・水産・環境科学総合研究科（環境）・准教授 (17301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関