

日本の農作物へのオゾンの影響に係る科学的知見の整理(案)

目次

1		
2		
3		
4		
5	1. はじめに.....	2
6	2. 成長や収量に及ぼす影響.....	2
7	2.1. イネ (<i>Oryza sativa</i>).....	2
8	2.2. ダイズ (<i>Glycine max</i>).....	8
9	2.3. オオムギ (<i>Hordeum vulgare</i>).....	9
10	2.4. ラッカセイ (<i>Arachis hypogaea</i>).....	9
11	2.5. バレイショ (ジャガイモ : <i>Solanum tuberosum</i>).....	9
12	2.6. トマト (<i>Solanum lycopersicum</i>).....	10
13	2.7. キュウリ (<i>Cucumis sativus</i>).....	10
14	2.8. コマツナ (<i>Brassica rapa</i> var. <i>perviridis</i>).....	11
15	2.9. ホウレンソウ (<i>Spinacia oleracea</i>).....	11
16	2.10. ハツカダイコン (<i>Raphanus sativus</i> var. <i>sativus</i>).....	12
17	2.11. メロン (<i>Cucumis melo</i>).....	13
18	2.12. 果樹.....	13
19	2.13. 複数の作物種を調査した研究.....	14
20	3. オゾン影響のリスク評価事例.....	15
21	4. 作物種間、品種間、あるいは生育段階別の感受性差.....	16
22	5. まとめ.....	18
23	6. 参考文献.....	19

24

25

26

1. はじめに

本資料では、日本の農作物（果樹を含む）に対する成長や収量に及ぼすオゾンの影響について示す。本文中に「オゾン」と「光化学オキシダント」の表記が文献の引用等の都合で、混在しているが、基本的に同義である。

我が国における光化学オキシダント（オゾン）の農作物被害は、1965年頃より近畿、中国、四国地方でタバコの葉に、原因不明の斑点状の可視障害が確認され始め、1969年頃には、関東地方から南の地域のタバコの葉に同様の可視障害が発現し、その被害程度とオゾン濃度との関係が確認されたのが、日本で最初の報告とされている（黒田ら、1973; Shinohara *et al.*, 1973; 須山ら、1973）。その後、農作物へのオゾンの影響評価に関する調査・研究が数多く行われるようになった。特に、1970年代から80年代において精力的に実施されてきており、その時期の調査研究の変遷については「大気汚染による植物影響研究の変遷と動向：山添(1987)」に示されている。また、1980年代までのオゾンの農作物などの植物に及ぼす影響評価研究に係る文献については、現在入手可能な研究目録集として、「植物に関する大気汚染研究文献目録集（第2集）：大気汚染研究(1974)」、「植物に関する大気汚染研究文献集（第3集）：大気汚染研究(1977)」、「植物に関する大気汚染研究文献集（第4集）：大気汚染学会誌(1982)」、「植物に関する大気汚染研究文献集（第5集）：大気汚染学会誌(1987)」などに、他の大気汚染物質に関する研究文献目録とともに示されている。

また、山添(1987)によると、1970年代の主要な研究として、農林水産技術会議事務局の1977～1981年度にわたる5か年のプロジェクト研究「光化学オキシダントの農林作物の生育収量に及ぼす影響の解析」や9都府県の農業試験場が参画した農林水産省総合助成試験「光化学スモッグによる農作物被害の解析と対策(1983)」が挙げられている。さらにその後1990年代初頭にかけて、1982～1985年度の「大気汚染物質による農作物の生理・遺伝的影響に関する研究(農林水産技術会議事務局編 1989)」、1986～1990年度の「長期・低濃度広域大気汚染が主要農作物に及ぼす影響の解明と評価法の開発に関する研究(農林水産技術会議事務局編 1993)」など国公立機関を中心とした調査研究が進められてきた。それらの報告書などの研究文献は、現在入手困難なものが多く含まれている。以下、実際に入手できた文献や引用、最近の文献に基づいて作物種別にオゾンが主に成長や収量に及ぼす影響について取りまとめる。

30

2. 成長や収量に及ぼす影響

2.1. イネ (*Oryza sativa*)

オゾンによるイネの収量減少に関する報告はいくつもある。以下に代表的な報告を時系列的に示す。

中村ら(1976, 1979)は、空気浄化 (FAC: Filtered Air Chamber) 試験を用いてオ

1 ゾンによるイネ 4 品種（コシヒカリ、レイメイ、日本晴、トヨニシキ）の減収影響につい
2 て検討した。FAC 試験とは、野外のオゾン除去した大気を導入する浄化室と、そのま
3 まの大気を導入する非浄化室を設置し、この両室内で植物を育成し、実際の野外における
4 オゾンによる植物影響を比較検討する方法である。草丈と茎数は日本晴、トヨニシキ、レ
5 イメイで、非浄化区において低下し、地上部重と、もみ重は、コシヒカリ、日本晴、トヨ
6 ニシキ、レイメイで非浄化区において低かった。また、穂数、登熟歩合（全もみ数に対す
7 る登熟したもみ数の割合）、千粒重（子実千粒の重量）は、日本晴、トヨニシキ、レイメ
8 イにおいて非浄化区の方が低く、コシヒカリでは明確な差がなかった。もみ重は、浄化区
9 に比べ非浄化区で、コシヒカリは-11.5%、日本晴は-26.2%、トヨニシキは-23.5%
10 であった。この時の光化学オキシダントは、浄化区で 70~80%除去されており、非浄化
11 区の濃度は、50 ppb 超過時間が 765 時間、日平均値は 37.4 ppb であった。併せて、生
12 育前期においてオゾンの悪影響が大きいことを指摘している。

13 浅川ら(1981a)は、1976 年に、イネ 8 品種（せとわせ、ハウネンワセ、日本晴、ヤマ
14 ビコ、中生新千本、金南風、はりま、山田錦）を用いた FAC 試験（浄化区は光化学オキ
15 シダントを約 50%除去）を行った。出穂期以前まで、せとわせ、ハウネンワセ、ヤマビ
16 コの浄化区の草丈が高いが、茎数は全品種で処理区間の差がなかった。成熟期では、全品
17 種で稈長は浄化区で長く、穂長、穂数及び一穂もみ数は差がないが、登熟歩合（ヤマビコ、
18 はりまを除く）や千粒重が非浄化区で低下し、ヤマビコ、はりまを除く大部分の品種で、
19 非浄化区で収量（もみ重）が減少した。早生品種において減収が著しかったが、その原因
20 として、光化学オキシダントの高濃度曝露が幼穂形成~穂ばらみ期（幼穂形成期の終了か
21 ら出穂期までの期間、花粉形成期にもあたる）にあったためであると考察した。なお、非
22 浄化区の収量低下率は、山田錦（-27.1%）>ハウネンワセ（-23.1%）>せとわせ
23 （-20.7%）≧日本晴（-18.5%）>金南風（-15.5%）>中生新千本（-2.3%）>
24 はりま（+4.6%）>ヤマビコ（+31.4%）の順に高かった。

25 浅川ら(1981b)は、1977 年にイネ 2 品種（ハウネンワセ、中生新千本）を用いた FAC
26 試験で、品種間とオゾン曝露された生育時期による収量の違いを検討した。穂数や一穂も
27 み数はオゾンによって変わらなかったが、千粒重が減少した。精もみ重は、浄化区に比べ
28 非浄化区で、ハウネンワセは-13.6%、中生新千本は-6.5%であった。また、穂首分化
29 期（幼穂形成期）から出穂期までがオゾンの影響による減収効果に最も影響があり、特に、
30 穂ばらみ期が重要であると指摘している。なお、このような成育時期でのオゾンによる影
31 響の違いは、ハウネンワセの方のみで、中生新千本では明瞭でなかった。さらに著者らは、
32 オゾン曝露指標についても言及しており、オゾン濃度（c）と時間（t）の関係として、 c^2
33 $\times t$ を提案している。なお、今回の実験結果では、早生品種のハウネンワセにおける穂ば
34 らみ期の曝露量（ $c^2 \times t$ ）は、5163（8/1~8/16）、中生新千本の曝露量は、3594（8/16
35 ~9/2）であった。

1 沖野ら(1981)のイネ(品種:日本晴)を用いた FAC 試験の結果によると、草丈は、浄
2 化区と非浄化区で差がないが、茎数・穂数は非浄化区で少なく、穂重の減少により収量
3 (玄米重)は非浄化区で減少した。また、分けつ期の積算光化学オキシダント曝露量
4 (ppb・h)と浄化・非浄化区の穂数の差に正の相関関係が認められた。この時の光化学
5 オキシダントは、浄化区で 95%以上除去されており、非浄化区の濃度は、24 時間平均で
6 30 ppb であった。

7 松山ら(1983)は、イネ 4 品種(トヨサト、晴々、トヨニシキ、クサブエ)を対象に、
8 1976 年~1981 年に FAC 試験を実施した結果、非浄化区の収量が減少すること、幼穂形
9 成期が最も光化学オキシダントの影響を受けやすく、登熟割合の低下が主なオゾンによる
10 収量低下の要因として考えられた。

11 真弓と山添(1983)は、イネ(品種:日本晴)を対象に自然光型ガス接触装置(温室型
12 オゾン曝露チャンバー)によるオゾン曝露試験を実施し、生殖成長・登熟期のオゾンが収
13 量に及ぼす影響を評価した。出穂から 10 日毎に乳熟、糊熟、黄熟とし、それぞれの期間
14 に 75 ppb のオゾンを昼夜連続曝露した。その結果、すべての期間でオゾン曝露により登
15 熟歩合が低下しているが、出穂期においてオゾンによる低下が著しかった。そのため、更
16 に、出穂開花期にオゾン曝露時間を変えて試験を行った。この試験では、150 ppb のオゾ
17 ン曝露を 3 つの異なる時間帯、6:30~9:30 区(開花受精のほとんど行われてない時間)、
18 9:30~12:30 区(開花受精が最も盛んな時間)、12:30~15:30 区(開花受精があまり盛
19 んでない時間)に行った。その結果、9:30~12:30 区と 12:30~15:30 区で、玄米重、登
20 熟歩合が低下し、米粒の厚さが減少しており、オゾンによる受精の直接障害(花粉の発芽
21 や花粉管の伸長への影響)とともに光合成低下に伴う同化産物の減少や転流障害が収量低
22 下につながったのではないかと考察している。

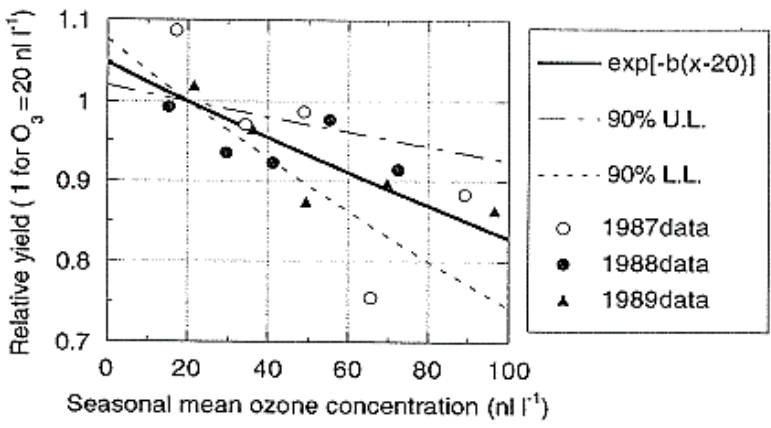
23 農業技術研究所(1985)は、イネ 5 品種(秋晴、日本晴、クサブエ、ハウネンワセ、関
24 東 53 号)を用いた FAC 試験を行い、オゾンによる葉の可視影響と収量減少との関係、及
25 び品種間差を検討した。その結果、葉の可視障害程度と収量の減少との関連は無く、葉の
26 可視障害におけるオゾン感受性品種と収量低下のオゾン感受性品種が一致しなかった。

27 Nouchi *et al.* (1991)は、イネ(品種:コシヒカリ)にオゾン曝露試験を行った。栄
28 養成長期から出穂初期の 8 週間において、3 段階のオゾン(浄化、50、100 ppb)に曝露
29 した。その結果、100 ppb 区において、5 週目、6 週目で個体乾重量が 50%減少し、そ
30 の後、乾重量の減少は徐々に緩和された。また、50 ppb 区、100 ppb 区において、地下
31 部/地上部比の低下が認められた。

32 矢島(1993)は、1987 年~1989 年にオープントップチャンバー(OTC)試験を行った。
33 供試した品種は、1987 年と 1989 年がコシヒカリ、1988 年が日本晴であり、オゾン濃度
34 は、野外の 0.5 倍、1 倍、1.5 倍、2 倍、2.75 倍の 5 段階で実施した。その結果、オゾン
35 曝露量の増加に伴って、イネの収量が減少し、1988 年(日本晴)と 1989 年(コシヒカ

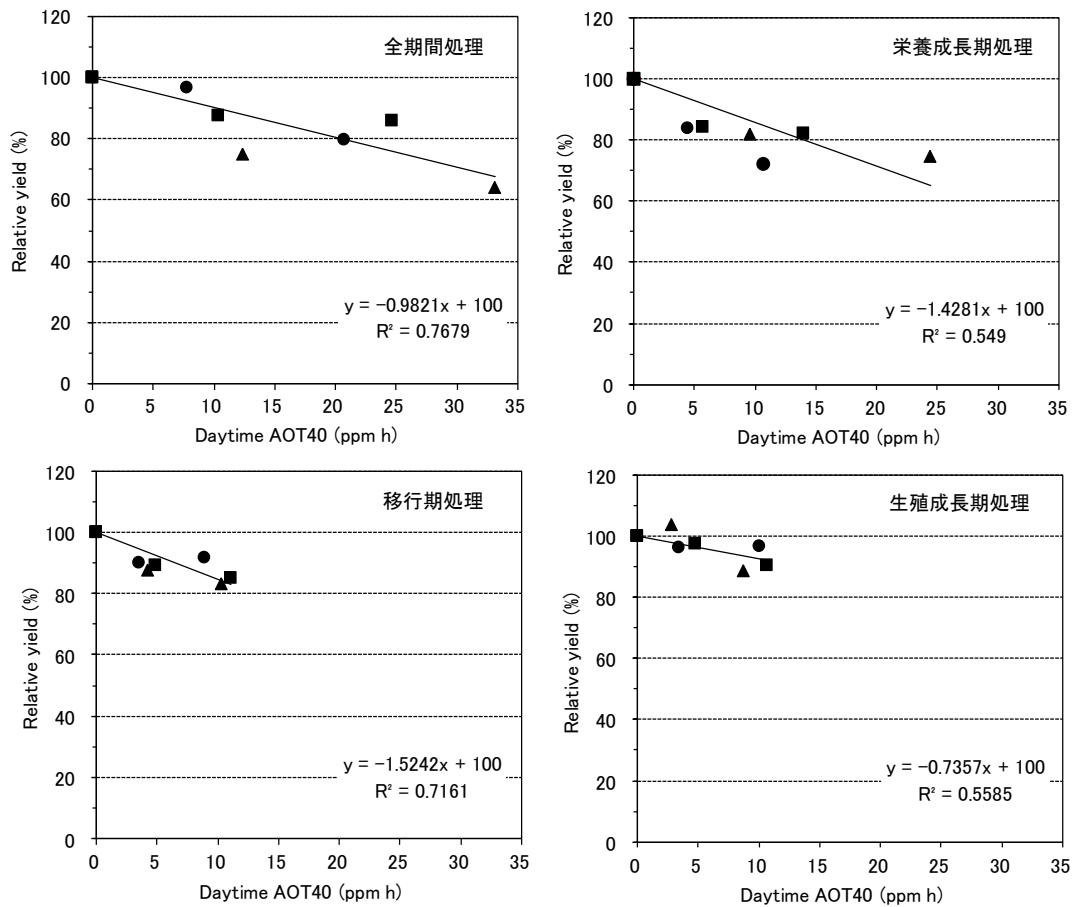
1 リ)の精玄米重の結果を基にオゾン曝露応答関係式(相対収量 $=1.0537-0.0015\times$ 日平均
 2 平均オゾン濃度)を導き出した。この関係式は、日平均オゾン濃度 10 ppb 増加に伴って、
 3 収量が 1.5%減少することを意味している。なお、ここでの相対収量は、対象年の野外 1
 4 倍区の収量を 1 としている。

5 Kobayashi *et al.* (1995)では、上記、矢島(1993)と同じ OTC でのオゾン曝露試験の
 6 結果より、新たなオゾン曝露応答関係式を検討している(図 1)。オゾン濃度 20 ppb での
 7 収量を 1 とした相対収量、オゾン濃度は、昼 7 時間(9:00~16:00)平均値を用いてい
 8 る。本文献では関係式そのものは示されていないが、平均オゾン濃度が 50 ppb で収量は
 9 3~10%減少すると推計している。高木と大原(2003)は、本文献 Kobayashi *et al.*
 10 (1995)を引用し、オゾン曝露応答関係式を、相対収量減少 $=1-\exp[-0.001822\times$
 11 (平均オゾン濃度 ppm-0.02)]とした。(オゾン曝露応答関係式を用いたリスク評価に
 12 ついては 3.を参照。)



13 図 1. イネの収量とオゾン積算曝露量との応答関係
 14 (Kobayashi *et al.*, 1995)

15
 16 米倉ら(2010)では、イネ(品種:コシヒカリ)の生育段階別のオゾン曝露が収量に及
 17 ぼす影響の評価、ならび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 3
 18 か年の OTC によるオゾン曝露試験により検討している。オゾン曝露による収量低下程度
 19 は、全期間、栄養成長期(出穂前まで)、移行期(穂ばらみ期~出穂後 10 日(登熟期前))、
 20 生殖成長期(出穂以降)の順に大きかったが、単位オゾン曝露指標 AOT40 当たりの収量
 21 低下率は栄養成長から生殖成長への移行期のオゾン曝露が一番大きく、次に栄養成長期で
 22 あった(図 2)。出穂前後の移行期は、約 20 日程度と期間は短いものの、収量に与える影
 23 響は大きいことが明らかとなった。(窒素施肥量等によるオゾン感受性の変化については
 24 4.を参照。)



1

2

図2 イネの生育段階別のオゾン曝露が収量に及ぼす影響

3

(縦軸：空気浄化区の収量を100とした時の相対収量率)

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

Yonekura *et al.* (2005a)は、3段階のオゾンレベル（浄化、野外、1.5倍野外）による OTC 試験を日本の品種 9 種：コシヒカリ、キヌヒカリ、朝の光、日本晴、あきたこまち、ひとめぼれ、トヨニシキ、彩のかがやき、サキハタモチ、外国の品種 7 種（産出国）：Lemont（アメリカ）、M401（アメリカ）、Dawn（アメリカ）、IR8（フィリピン）、Boro8（パキスタン）、Te-tep（ベトナム）、WSS-2（ベトナム）について行い、収量に対するオゾンの影響を検討し（図 3）、日本のイネ 9 品種よりオゾン曝露応答関係式として、相対収量 = $-0.67 \times \text{AOT40} + 99.3$ を導出している。さらに、イネの相対収量と AOT40 との関係に基づき、我が国のイネの収量に対するクリティカルレベル（エンドポイントは 5%減収）を検討した結果、この実験で日本のイネ 9 品種のうちオゾン感受性が中庸であったコシヒカリにおいて 100 日間の昼間の AOT40 で 5.4 ppm・h であった。（オゾン曝露応答関係式を用いたリスク評価については 3. を参照。）

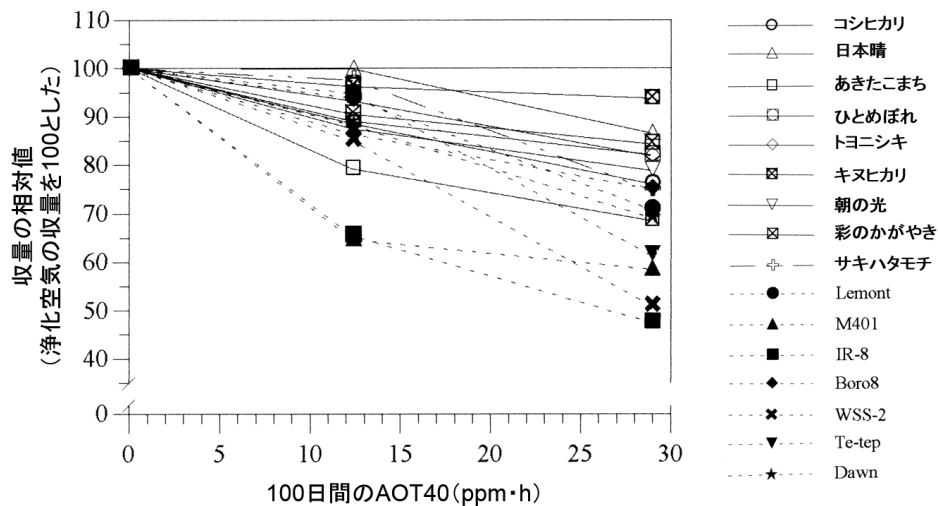


図3 イネの収量に及ぼすオゾンの影響(Yonekura *et al.*, 2005a)

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22

Yamaguchi *et al.* (2008)は、イネ2品種(コシヒカリ、キヌヒカリ)を対象に3段階のオゾン曝露(浄化空気、60 ppbもしくは100 ppbのオゾン曝露(10:00~17:00))の試験をグリーンハウス型 OTC で実施した。その結果、コシヒカリは、浄化に比べ60 ppb 曝露で3%、100 ppb 曝露で23%の収量減少、キヌヒカリで浄化に比べ60 ppb 曝露で18%、100 ppb 曝露で34%の収量減少が認められたが、明瞭な品種間の差異は認められなかった。収量構成要素のうち、個体あたりの穂数、一穂あたりの稔実粒数及び稔実率でオゾン曝露による有意な低下が認められた。また、栄養成長期における個体成長と生殖成長期における穂への乾物分配率がオゾンによって低下していた。

Sawada and Kohno (2009)は、日本とアジアのイネ21品種を対象としたオゾン曝露試験をガラス温室型 OTC で実施した。外気の2倍のオゾン濃度(24時間平均値で57 ppb)により有意な収量低下が生じた品種は「きらら397」を除き、すべてインディカ型品種であり、「コシヒカリ」などほとんどのジャポニカ型品種は有意な収量の低下を示さず、ジャポニカ型品種はインディカ型品種より収量に対するオゾンの影響が小さい傾向にあることを示した。

Yamaguchi *et al.* (2014)は、イネ(品種:コシヒカリ)を対象に3段階のオゾン曝露(浄化空気、野外の1倍または1.5倍のオゾン濃度)の試験をグリーンハウス型 OTC で実施し、収量に対するオゾン曝露応答関係式をAOT40と、水蒸気気孔コンダクタンスなどより算出したオゾン吸収量(POD₁₀)に基づいて検討し、相対収量 = $-0.039 \times \text{AOT40} + 0.975$ 、相対収量 = $-0.487 \times \text{POD}_{10} + 0.996$ を導出している(図4)。

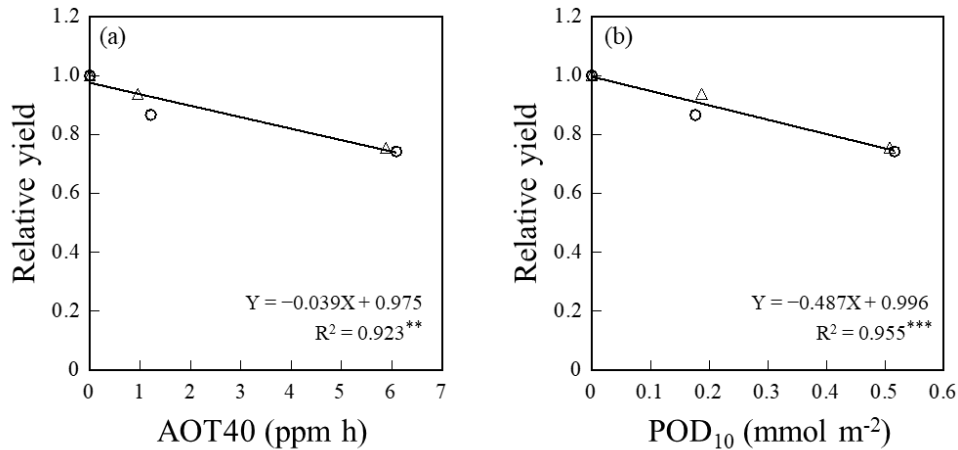


図4 イネの収量と (a) オゾン曝露量 AOT40 及び (b) オゾン吸収量 (POD₁₀) との関係(Yamaguchi *et al.*, 2014)

澤田ら(2017)は、イネ 17 品種 (コシヒカリ、ひとめぼれ、ヒノヒカリ、あきたこまち、はえぬき、キヌヒカリ、きらら 397、つがるロマン、まっしぐら、夢つくし、にこまる、日本晴、彩のかがやき、ゆめひたち、ゴロピカリ、ササニシキ、里のゆき) について、ガラス温室型 OTC を用い、オゾン濃度上昇が玄米の白未熟粒 (デンプンの詰まりが悪い粒で品質低下の一因となる) 発生に及ぼす影響の品種間差異を検討した。玄米アミロース含有率とオゾン処理による白未熟粒の発生割合との間に有意な負の相関があり、アミロース含有率の低い品種ほどオゾンによる外観品質の低下が生じやすいことを示した。

2.2. ダイズ (*Glycine max*)

矢吹ら(1983)は、オゾン (光化学オキシダント) によるダイズの収量影響について検討した。夏蒔きダイズ 12 品種を用いて FAC 試験を行った。収量に及ぼす影響は、エンレイ、東山 104、112 号、小糸在来、津久井在来がオゾン高感受性、東山 113、95 号、ナカセンナリが低感受性であった。

川方と矢島(1993)は、ダイズ 2 品種 (オオソデフリ (実施年: 1988 年)、エンレイ (実施年: 1989、1990 年)) を対象とし、5 段階 (0.4 倍、野外 (1 倍)、1.5 倍、2 倍、2.7 倍) のオゾン曝露による収量への影響をフィールドチャンバーを用いた実験で評価した。1988 年のオオソデフリ、1990 年のエンレイで、オゾン濃度上昇に伴う収量の低下が認められ、乾物生産量の低下がもたらされた。また、3 か年の試験によるオゾン曝露応答関係に基づくと、オゾン濃度 10 ppb 上昇により収量が約 6%減少すると推定した。

米倉ら(2000)は、ダイズ (品種: エンレイ) を対象とし、自然光型ファイトトロンにて昼間 (9:00~17:00) に 60 ppb オゾンを曝露した結果、子実数 (粒数) の低下に伴う収量低下が認められ、浄化区に比べ 10%程度低下した。

1 2.3. オオムギ (*Hordeum vulgare*)

2 千葉農業試験場(1985)は、1980、1981年度(それぞれ12月~5月)にオオムギ(品
3 種:カシマムギ)を対象としたFAC試験を行った。その結果、分けつ盛期(莖数増加期)
4 頃から非浄化区において草丈、莖数の低下が認められ、収量(子実重)が減少した。
5 1980年度の育成期間においては、60 ppb以上のオゾン濃度が観測された時間は209時
6 間で、非浄化区での収量低下率は6.1%、1981年度では、60 ppb以上の時間は247時
7 間で収量低下率は20.3%であった。

8

9 2.4. ラッカセイ (*Arachis hypogaea*)

10 千葉農業試験場(1985)は、1975~1977年と1979~1980年の5月~10月にラッカセ
11 イ(品種:千葉半立)を対象としたFAC試験を行った結果、収量(子実重)が減少した。
12 60 ppb以上のオゾン濃度が観測された時間帯のオゾン曝露量(SUM06と同義)と非浄
13 化区における収量低下率は、1975年ではそれぞれ6,600 ppb・hで12.2%、1976年で
14 は11,820 ppb・hで16.3%、1977年では13,140 ppb・hで2.5%、1979年では
15 25,180 ppb・hと15.5%、1980年では14,690 ppb・hと14.6%であり、実験年によ
16 る収量低下程度の違いはオゾン曝露量の違いのみでは説明できなかった。

17

18 2.5. バレイシヨ (ジャガイモ: *Solanum tuberosum*)

19 松丸と高崎(1991)は、1984年、1985年、1987年にバレイシヨ2品種(ダンシャクイ
20 モ、ワセシロ)を対象としたFAC試験を行い葉の可視障害と収量への影響について調査
21 した。葉の可視障害発現では、ワセシロがダンシャクイモよりも大きく、光化学オキシダ
22 ントに対し高感受性であるが、収量影響では、ダンシャクイモがワセシロより減収し光化
23 学オキシダントに対し高感受性であることを示し、光化学オキシダントに対する感受性の
24 品種間差異は葉の可視障害と収量への影響で一致しないことを示唆した(表1)。また、
25 著者らは、収量影響の光化学オキシダントの閾値についても検討し、日平均光化学オキシ
26 ダント濃度で40 ppb(ダンシャクイモ:43 ppb、ワセシロ:38 ppb)と推定した。

27

表 1. バレイショに対する光化学オキシダントの影響

(松丸と高崎, 1991 より作成)

年	品種	濃度		可視障害の生じた葉の数 ³⁾		塊茎の生体重 (kg/アール) ⁴⁾		
		平均値 ¹⁾	60 ppb 超過時間 ²⁾	浄化区	非浄化区	浄化区	非浄化区	比率 ⁵⁾
1984	ダンシャクイモ	50	205	2.1	5.9	229	186	81
	ワセシロ	50	205	0	9.2	269	237	88
1985	ダンシャクイモ	54	244	0	1.1	195	124	64
	ワセシロ	54	244	0.6	2.8	226	183	81
1986	ダンシャクイモ	42	61	0	7.5	238	249	105
	ワセシロ	42	61	0	5.5	284	272	96

1) 4～5月の昼間10時間(8～18時)の光化学オキシダント濃度の平均値

2) 4～5月の総超過時間

3) 収穫日の前日(1984年6月5日、1985年6月4日、1987年6月3日)の被害状況

4) 1個当たり31g以上の塊茎について重量を調査

5) 非浄化区/浄化区×100

2.6. トマト (*Solanum lycopersicum*)

野菜試験場(1985)は、1979年～1980年にトマト(品種:栄寿)を対象としたオゾン曝露試験を行った。1979年は、オゾン3段階(0、50、100 ppb)で1日8時間の曝露を28日間実施した結果、オゾンによる個体乾重量の低下が認められ、特に葉の乾重量の低下が認められた。果実重については文献中では考察されていないが、影響は認められなかったと推察される。

中島(1989)は、トマト(品種:ポンテローザ)を対象とし、グロースクャビネットを用いたオゾン曝露試験を行った。100 ppbのオゾンを10日間曝露した結果、草丈や茎数などに影響は認められなかったが、地上部重量はオゾン曝露によって12%減少した。

2.7. キュウリ (*Cucumis sativus*)

野菜試験場(1985)は、1979年～1981年にキュウリ(品種:ときわ光3号P型)を対象としたオゾン曝露試験を行った。1979年は、オゾン3段階(0、50、100 ppb)で1日8時間の曝露を26日間と56日間実施し、1980年は、0、50 ppbで同様に26日間曝露した結果、葉身と根の有意な成長抑制が認められた。また、1979年の試験において、キュウリの収量低下が50 ppb曝露では認められなかったが、100 ppb曝露で認められ、-38%であった。また、キュウリの生育に関するオゾン曝露応答関係式について検討されており、「 \log 全乾物重 = $3.846 - 0.0116 \times$ 積算オゾン曝露量」などが推定されている。

中島(1989)は、キュウリ(品種:立秋)を対象とし、グロースクャビネットを用いたオゾン曝露試験を行った。オゾン濃度100 ppbを10日間処理した結果、草丈、茎数などでは、差が認められなかったが、地上部重では、オゾン処理区で22%減少した。

Izuta *et al.* (1995)は、キュウリ(品種:霜知らず地這いキュウリ)を対象にオゾン

1 曝露試験を行った。播種後 7～21 日目の 15 日間に、合計 6 回、1 日当たり 6 時間（9:00
2 ～15:00）、3 段階のオゾン（100、150、200 ppb）を曝露した。その結果、150 ppb 以
3 上のオゾン曝露により、葉面積及び乾物成長が低下した。

4

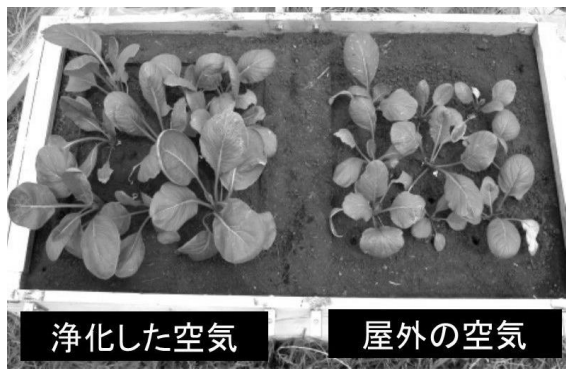
5 2.8. コマツナ (*Brassica rapa* var. *perviridis*)

6 Izuta *et al.* (1999)は、コマツナ 10 品種を対象にオゾン曝露試験を行った。播種後 8、
7 10 及び 12 日目に 130 ppb のオゾンを 4 時間（10:00～14:00）曝露した。播種後 15 日
8 目における個体乾重量の低下率に基づいたオゾン感受性は、みすぎ>プララ>新晩生>丸葉
9 >晩生=楽天>ごぜき晩生>はるみ>夏楽天>さおりの順に高かった。この品種間差異は、オ
10 ゾン曝露による葉の可視障害の程度、個体当たりの乾物成長速度、気孔密度では説明でき
11 なかったが、単位オゾン吸収量当たりの純光合成阻害率のオゾン感受性と一致した。

12 Yonekura *et al.* (2005b)は、コマツナ（品種：楽天）を対象に、4 段階のオゾン曝露
13 （浄化、60、90、120 ppb）試験を人工気象室にて実施した。その結果、オゾン濃度上
14 昇に伴って成長（個体乾重量）の低下が認められ、相対成長と AOT40 とのオゾン曝露
15 応答関係式は、相対成長 = $-3.3 \times \text{AOT40} + 100$ であった。（オゾン曝露応答関係式を用
16 いたリスク評価については 3. を参照。）

17 米倉(2016)は、コマツナ（品種：楽天）を対象に、埼玉県環境科学国際センター（埼
18 玉県加須市）で 2005 年 7 月に OTC 試験を実施した。育成期間中の浄化区のオゾン濃度
19 は 10 ppb 以下で、野外区（非浄化区）の昼間の平均オゾン濃度：52 ppb（最大オゾン濃
20 度：143 ppb）であった。1 か月間の育成をした結果、個体乾重量は野外区で 42%の成
21 長低下が認められた（図 5）。

22



23

24

図 5 コマツナの成長に及ぼすオゾンの影響(米倉, 2016)

25

26 2.9. ホウレンソウ (*Spinacia oleracea*)

27 佐藤ら(1983)は、1980 年にホウレンソウ（品種：深緑）を対象としたオゾン曝露試験
28 を行った。処理区は、0 ppb、60 ppb（20 日間曝露）、120 ppb（10 日間曝露）の 3 段
29 階である。乾物重量はオゾンにより減少した。

1
2 2.10. ハツカダイコン (*Raphanus sativus* var. *sativus*)

3 伊豆田ら(1988a)は、ハツカダイコン(品種:コメット)を自然光型ファイトトロンに
4 て、20/13℃、25/18℃、30/23℃(日中/夜間)の3種類の温度条件下で育成しながら、
5 100 ppb のオゾンを経日4時間(10:00~14:00)、7日間にわたり曝露した結果、育成
6 温度25/18℃区及び30/23℃区の個体当たりの乾物成長が20%減少した。

7 伊豆田ら(1988b)、ハツカダイコン(品種:コメット)を対象にOTC試験を実施した。
8 野外(非浄化区)の個体当たりの葉面積(特に、子葉)及び乾重量が浄化区に比べて有意
9 に低下した。葉面積や個体乾重量の相対成長割合と日平均8時間(8:00~16:00)オゾン
10 曝露量との関係を検討した結果、それぞれの相対値はオゾン曝露量の増加に伴って直線的
11 に減少し、浄化区の個体乾重量を100とした時の相対個体乾重量 $= -0.038 \times$ 日平均8時
12 間オゾン曝露量 $+106.9$ のオゾン曝露応答関係式を得ている。

13 Izuta *et al.* (1993)は、ハツカダイコン(品種:コメット)を対象にOTC試験を実施
14 した。3年間にわたる17回のオゾン曝露試験の結果、育成期間中の午前9時における平
15 均気温が20℃以下の場合、個体乾重量の明瞭なオゾンによる低下は認められなかつた
16 が、20℃以上の場合において、オゾン濃度の増加に伴う個体乾重量の低下が認められた。
17 個体乾重量の相対成長割合と日平均8時間(8:00~16:00)オゾン曝露量との関係を検討
18 した結果、浄化区の個体乾重量を100とした時の相対個体乾重量 $= -0.029 \times$ 日平均8時
19 間オゾン曝露量 $+102.1$ のオゾン曝露応答関係式を得ている。

20 Izuta *et al.* (1994)は、ハツカダイコン3品種(ユキコマチ、コメット、ホワイトチ
21 ェリッシュ)を対象にOTC試験を実施した。播種10日後から150 ppb のオゾンを経日4時
22 間(10:00~14:00)、5日間/週で曝露した。播種17日後の個体当たりの乾物成長に基
23 づいたオゾン感受性は、ユキコマチ(浄化区に比べ44%減少)>コメット(38%減少)>
24 ホワイトチェリッシュ(9%減少)の順に高かった。また、純同化率及び平均純光合成阻害
25 率におけるオゾン感受性も同様な傾向が認められた。

26 Yonekura *et al.* (2005b)は、ハツカダイコン(品種:赤丸(コメット))を対象に、
27 4段階のオゾン曝露(浄化、60、90、120 ppb)試験を人工気象室にて実施した。その
28 結果、オゾン濃度上昇に伴って個体乾重量の低下が認められ、浄化区の個体乾重量を
29 100とした時の相対成長とAOT40とのオゾン曝露応答関係式は、浄化区の個体乾重量を
30 100とした時の相対個体乾重量 $= -3.0 \times$ AOT40 $+100$ であった。(オゾン曝露応答関係
31 式を用いたリスク評価については3.を参照。)

32 中島ら(2018)は、ハツカダイコン(品種:コメット)を対象にOTC試験を通年で9回
33 実施した。地上部乾重量にオゾンの有意な影響は認められなかつたが、5月中旬、9月及
34 び10月に実施した実験において、オゾンによる地下部乾重量の有意な低下が認められた
35 ため、相対地下部乾重量と平均オゾン濃度との関係を調べたが、有意な相関は認められな

1 かった。この原因として、育成下の平均気温や相対湿度がオゾン感受性に影響していると
2 考察している。

3

4 2.11. メロン (*Cucumis melo*)

5 中島(1989)は、メロン(品種:パール)を対象とし、グロースキャビネットを用いた
6 オゾン曝露試験を行った。オゾン濃度 100 ppb を 10 日間処理した結果、草丈、茎数など
7 では差が認められなかったが、地上部重では、オゾン処理区で 11.4%減少した。

8

9 2.12. 果樹

10 三重大学(1985)は、ウンシュウミカン (*Citrus unshiu* (品種:林系)) の果実の肥大
11 や落果等にオゾンが及ぼす影響について検討した。オゾン曝露は、4 つの時期に行った。①
12 5 月下旬の開花後、生理的落果が発生する期間である 6 月中下旬に 0、0.1、0.2 ppm の
13 オゾンを 1 日 3 時間、1 週間にわたり曝露、②生理的落果期の終わり頃である 6 月下旬～
14 7 月上旬に 0、0.12、0.25 ppm のオゾンを 1 日 6 時間、9 日間にわたり曝露、③生理的
15 落果が終わり、結実が安定する 7 月下旬に 0、0.1、0.3 ppm のオゾン 1 日 6 時間、4 日
16 間にわたり曝露、④さらに③よりも遅い 8 月中旬より 0、0.15、0.4 ppm を 1 日 4 時間、
17 20 日間にわたり曝露した。その結果、①と②のオゾン曝露試験においてオゾン曝露によ
18 り落果率が高くなる傾向がみられたが③と④のオゾン曝露試験では、落果率にオゾンの影
19 響は認められなかった。著者らは、開花後まもない時期は低濃度、短時間のオゾン曝露で
20 も落果率が高くなり、果実の生育が進むとオゾン曝露の影響は小さくなると考察している。

21 三重大学(1985)は、モモ (*Prunus persica* (品種:大久保)) の果実の肥大や落果等
22 にオゾンが及ぼす影響についても検討した。5 月中旬より 0、0.07、0.15 ppm のオゾンを
23 1 日 3 時間、15 日間にわたり曝露した。果実の落果率はオゾン濃度の増加に伴い高くなっ
24 たが、落葉数や果実肥大率には影響がほとんど認められなかった。果実の肥大は、葉果比
25 に依存することが大きく、落果数と落葉数の違いにより高濃度オゾン曝露ほど葉果比が高
26 くなり、オゾンによる落果率の増大によるマイナス影響と葉果比の増大によるプラス影響
27 が相殺したため果実肥大率にオゾン影響が認められなかったと考察している。

28 川瀬ら(1989)は、ナシ (*Pyrus pyrifolia* var. *culta*) の受精にオゾンが及ぼす影響
29 を検討した。ナシ(品種:長十郎)の花粉に 200、400 ppb のオゾンを 1 時間人工気象
30 室で曝露したところ発芽率が低下した。また、オゾンが受精に及ぼす影響を評価するため
31 に、ナシ(品種:長十郎)に受粉する際に 200、400 ppb のオゾンを人工気象室で曝露
32 したところ、受粉直後のオゾン曝露により結実率の低下傾向が認められたが受精への影響
33 は大きくないとしている。さらに、5 品種のナシ(長十郎、二十世紀、幸水、豊水、菊水)
34 を対象としたオゾン曝露による収量構成要因(一果重、落果率)に対する影響を検討した。
35 この試験の曝露は人工気象室で行い、オゾン曝露濃度は 400 ppb で、曝露期間は 4 時間

1 である。長十郎では、全ての項目で、オゾン曝露の影響は見られなかったが、二十世紀、
2 幸水は落果率以外の項目で減少影響が認められ、特に、幸水のオゾン感受性が高いと考え
3 られた。

4 大村ら(1989)は、ナシ 8 品種の花粉へのオゾンの影響を検討した。開花直前に採取し
5 た花粉に 200 ppb のオゾンを曝露したところ、花粉の発芽率への影響があり、その品種
6 間差も認められた。オゾンによる発芽率の低下は、二十世紀、菊水で大きく、早玉、新水、
7 晩三吉、慈梨が中庸で、長十郎、豊水は阻害が少なかった。

8

9 2.13. 複数の作物種を調査した研究

10 前述した山添(1987)によると、1970 年代の主要な研究として、①「光化学オキシダン
11 トの農林作物の生育収量に及ぼす影響の解析(農林水産技術会議事務局, 1985)」や②「光
12 化学スモッグによる農作物被害の解析と対策(群馬県農業試験場ら, 1983)」が挙げられて
13 おり、それらにおいてオゾン影響のリスクを検討している。

14 ①の農林水産技術会議事務局(1985)においてはオゾン影響のリスクについて下記のよ
15 うに取りまとめられている。

16 1) イネについては、40 ppb オゾンの日中全生育期間接触で必ずしも収量への有意な差
17 を生ずるとは限らないが 50 ppb 曝露で有意差がみられる場合が多い。また、汚染の影響
18 を受けやすいのは登熟期であって、光化学オキシダント濃度の日最高値が 60 ppb 以上の
19 時間数、日数またはドース(濃度と時間数の積)と減収率との間に高い相関がみられる。
20 特に出穂後で 60~80 ppb のドースと減収率との相関が高い。

21 2) オカボ(陸稲)、オオムギ、ビールムギ、コムギ、ソルガム、ソバ、ダイズ、ラッカ
22 セイなどの一般畑作物については、オゾン濃度 40 ppb ではまれに生育抑制などの不可障
23 害を生ずる程度で、一般にはほとんど影響がみられず、60 ppb 以上で生育抑制や収量低
24 下をもたらす場合が多くなる。

25 3) 野菜については、一般にオゾンに対する感受性が高く、トマト、キュウリでオゾン
26 濃度 50 ppb 接触により乾物生産の低下をもたらす。また、光化学オキシダント濃度の日
27 最高値が 50 ppb を超えると、ハツカダイコン、ハウレンソウ、インゲンマメなどでは収
28 量への影響が有意に現れやすくなる。

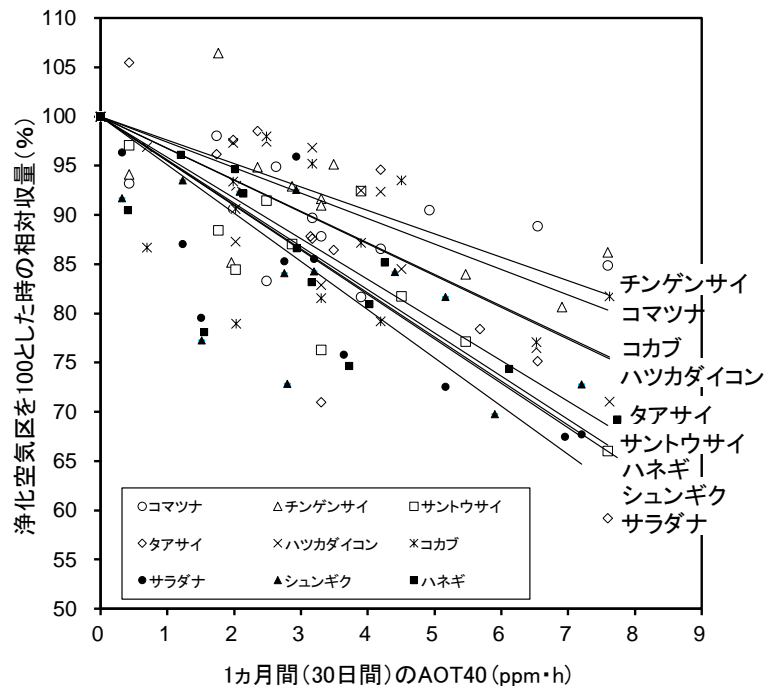
29 また、①、②の研究データ並びに既往の研究成果から、光化学オキシダントによる農林
30 作物被害の判定条件に関する資料「光化学オキシダントによる農林作物被害の判定条件に
31 関する資料：農林水産技術会議事務局連絡調整課(1982)」がとりまとめられ、収集され
32 た結果を総合的に判断し、光化学オキシダント(オゾン)による農作物被害の限界濃度に
33 関して下記の提言がなされている。

34 1) 農林作物の生育収量に有意な被害を及ぼす光化学オキシダントの限界濃度は、感受
35 性の高い作物(例えばイネ、トマト、ダイズ、インゲンマメなど)を主体に考えるとき、

1 1時間値として 50 ppb 前後にあるものと判断される。
 2 2) また、ガス曝露量、すなわち、ガス濃度の積算量 (pphm・h (0.01 ppm・h もし
 3 くは 10 ppb・h)) を考える場合には、1時間値 5~6 pphm (50~60 ppb) 以上の曝露
 4 量で示すのが適当と思われる。このオゾン曝露量の限界値については、作物、品種等によ
 5 って異なり、なお検討を要するが、100 前後又は数 10 pphm・h (0.01 ppm・h) 程度
 6 の値が汚染による障害の発生する目安と考えられる。

7 米倉ら(2007)は、比較的短期間 (1~2 ヶ月) で収穫する近郊野菜のコマツナ、チンゲ
 8 ンサイ、サントウサイ、タアサイ、ハツカダイコン、コカブ、サラダナ、シュンギク、ハ
 9 ネギを、埼玉県環境科学国際センター内にあるオゾン濃度を 3 段階に設定可能な外気オゾ
 10 ン濃度假比例追従型の OTC 内で複数回にわたって育成した。それぞれの農作物において、
 11 30 日間の平均積算値に換算した AOT40 と、浄化空気区の収量を 100 とした時の各オゾ
 12 ン処理区の収量の相対値 (相対収量) との関係について検討した。各農作物について
 13 AOT40 と相対収量との直線回帰式を求め、オゾンのクリティカルレベル (収量が-5%
 14 時における AOT40 値) を検討した結果、30 日間の AOT40 値で、1.2 (サラダナ) ~
 15 2.1 (チンゲンサイ) ppm・h であった (図 6)。

16



17

18 図 6 10 種の農作物における AOT40 と相対収量との関係(米倉ら, 2007)

19

20 3. オゾン影響のリスク評価事例

21 個々の実験から導出したオゾン曝露応答関係式を常時監視測定局で測定されたオゾン濃
 22 度と組み合わせることで、現状の大気中オゾン濃度によるイネの減収率を推計した研究が

1 ある。

2 高木と大原(2003)は、Kobayashi *et al.* (1995)の提案した成長期間の昼 7 時間
3 (9:00~16:00) の平均値を曝露指標としたオゾン曝露応答関係式を用い評価した結果、
4 1996 年の関東地方のイネの減収率は 3.6%と推定した。中西ら(2009)は、Kobayashi
5 *et al.* (1995)と仁紫ら(1985)のデータを元に AOT30 を曝露指標としたオゾン曝露応答
6 関係式を導出し評価した結果、2002 年の関東地方の平均減収率は 9.22%と推定した。
7 Yonekura *et al.* (2005a)は、AOT40 を曝露指標としたオゾン曝露応答関係式を用いて
8 1990~2000 年の関東地方のイネの平均減収率を 5~10%と推定した。

9 Feng *et al.*(2022)は、中国、日本、韓国のイネ、コムギ、トウモロコシの収量に対す
10 るオゾン影響を AOT40 と相対収量との関係に基づいて検討した(日本については、イネ
11 とコムギのみ)。その結果、日本における現状レベル(2015~2017 年)のオゾンによっ
12 て、清浄空気と比べ、イネの収量は 15.8%、コムギの収量は 5.1%程度の減収していると
13 推定した。なお、本報告で用いられているイネやコムギの品種は、日本、中国、インドの
14 品種が含まれている。

15 イネ以外には、Yonekura *et al.* (2005b)がコマツナとハツカダイコンについて評価を
16 行っている。Yonekura *et al.* (2005b)は、AOT40 を曝露指標としたオゾン曝露応答関
17 係式を用い、1990~2000 年の関東地方のコマツナとハツカダイコンの成長低下率を評価
18 した結果、その低下率は約 5~10%と推定した。(オゾン曝露応答関係式は、2.8 と 2.10
19 を参照。)

20

21 4. 作物種間、品種間、あるいは生育段階別の感受性差

22 成長や収量低下に対するオゾン感受性については、作物種によって異なることがこれま
23 での様々な研究により明らかになっている。

24 野内ら(1988)は、農事試験場(1985)を取りまとめて、オゾンに対する成長(原著では
25 生長)・収量の作物種間の相対的な感受性の比較をしている(表 2)。農事試験場(1985)で
26 は、40、60 及び 100 ppb のオゾンを主要な畑作物に、生育期間別あるいは全生育期間の
27 曝露実験を行ない、作物の成長・収量に対するオゾン被害発現の限界値を求めた。オカボ
28 (原著では陸稲)、ダイズ、ラッカセイ、ソバは、60 ppb 以下で成長や収量に影響があり、
29 一方で、トウモロコシ、オオムギ(六条大麦)、ビールムギ(二条大麦)は 60 ppb を超
30 えた濃度で成長や収量に影響があった。

31

表 2 作物の成長・収量や可視障害のオゾン被害発現限界の推定値

(pphm (0.01 ppm もしくは 10 ppb・h)) (野内ら, 1988)

作物名	生育初期	生育中期	登熟期		可視被害 発現濃度
			乾物生産	収量	
陸稲 (農林 12 号)	<6	<6	6~10	<6	<6
ソルガム (NK129)	6~10	>10	>10	>10	>10
ダイズ (フジミジロ)	4~6	<6	6~10	<6	4~6
ダイズ (エンレイ)	4~6	4~6	>6	4~6	>6
ラッカセイ (白油 7-3)	<6	— ^{a)}	—	—	>10
ラッカセイ (千葉半立)	4~6	—	4~6	4~6	4~6
ラッカセイ (タチマサリ)	—	—	4~6	4~6	4~6
トウモロコシ (交 7 号)	>6	—	—	—	>6
コムギ (農林 61 号)	—	—	>10	>10	>10
オオムギ (関取)	—	—	>10	6~10	>10
ビールムギ (アズマゴールド)	—	—	>10	6~10	>10
ソバ (信濃 1 号)	<6	<6	—	—	<6

0.04 ppm、0.06 ppm および 0.10 ppm の低濃度オゾンによる主要な畑作物の生育初期、生育中期あるいは登熟期に長時間曝露し、生育時期別のオゾンによる作物の成長、収量被害発現の限界値を示した。

a: 限界値の推定不能

米倉ら(2007)は、先に図 6 に示したように、10 種の農作物における AOT40 と相対収量との関係について調べ、収量低下に対するオゾン感受性は、サラダナ>シュンギク≧ハネギ≧サントウサイ>タアサイ>ハツカダイコン≧コカブ>コマツナ>チンゲンサイの順に高かったと報告している。

また、小林(1999)は、イネ (品種: コシヒカリ) やトウモロコシに比べワタ、春コムギやダイズは収量に対するオゾン感受性が高く収量が低下しやすいと報告している (図 7)。なお、この比較において、イネ以外の作物種は、欧米の品種の結果を用いている。

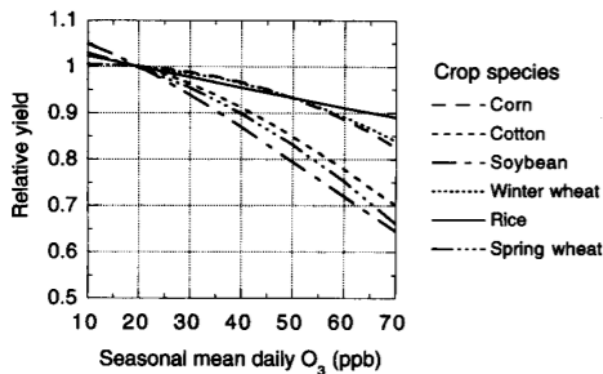


図 7 様々な作物の相対収量と日平均オゾン濃度との関係 (小林, 1999)

1 作物種間の感受性差のみならず、品種間においても感受性差があることが知られている。
2 特にイネについては様々な報告がなされており、例えば、早生品種においてオゾン感受性
3 が高い傾向にあること（浅川ら, 1981a, b）、また、先に図 3 に示したように、日本の品
4 種と外国の品種を比べると、日本の品種においてオゾンによる収量低下が比較的少なく、
5 低オゾン感受性であること（Yonekura *et al.*, 2005a）が示されている。Sawada and
6 Kohno (2009)は、ジャポニカ型品種の収量に対するオゾンの影響がインディカ型品種よ
7 り小さい傾向にあることを示した。アミロース含有率の低い品種ほどオゾンによる外観品
8 質の低下が生じやすいことも示されている（澤田ら, 2017）。こうした品種間の感受性差
9 異については、コマツナにおける個体乾重量の低下（Izuta *et al.*, 1999）やハツカダイ
10 コンにおける乾物成長の減少（Izuta *et al.*, 1994）においてもみられている。

11 生育段階によるオゾン感受性の違いも指摘されており、いくつかの研究において（浅川
12 ら, 1981b; 米倉ら, 2010）、特に出穂時期がオゾンの影響による減収効果が最も大きい時
13 期であることが報告されている。また、松山ら(1983)は、登熟割合の低下が主なオゾン
14 による収量低下の要因と考えられるとしている。

15 さらに米倉ら(2010)では、窒素施肥量が多いとオゾン曝露の有無にかかわらず収量は
16 増加し、窒素施肥量が少ないとオゾン感受性は高い（オゾンによる収量低下の割合が高ま
17 る）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
18 とや、ケイ酸肥料の施用による収量に対するオゾン影響の軽減効果（オゾン感受性の変化）
19 はなかったことを指摘している。

20 Tatsumi *et al.* (2019)は、イネ（品種：コシヒカリ）を対象に異なる 2 段階の窒素施
21 肥条件（無施肥と 6g 窒素/10a）下で 3 段階のオゾン曝露（浄化空気、野外の 1 倍また
22 は 1.5 倍のオゾン濃度）を行う試験をグリーンハウス型 OTC で実施し、成長や収量に対
23 する影響を検討した。収穫時の葉、茎、根、及び個体乾重量に対するオゾンの影響は、無
24 施肥区では認められず、施肥区において 1.5 倍のオゾン濃度区で低下が認められたこと
25 による、オゾンと窒素施肥の有意な相互作用効果があった。一方、収量に対するオゾンの影
26 響は、無施肥区では認められず、施肥区においてオゾンの増加に伴う収量低下が認められ
27 た。

28

29 5. まとめ

30 我が国における農作物の成長や収量などにオゾンが及ぼす影響に係る文献を取りまとめ
31 た。多岐にわたる農作物についてオゾンの影響の検討がなされており、それらによると、
32 オゾンは農作物の成長や収量などに対して悪影響を及ぼす点は明白である。さらに、オゾ
33 ンに対する感受性（影響の受けやすさ）は、作物種の間で異なっているだけでなく、同一
34 種でも品種による差異が認められている。また、イネなどの比較的長期的にオゾン曝露さ
35 れる作目においては、生育段階によってオゾン感受性が変化することが十分に予想される。

- 1
2 6. 参考文献
- 3 Feng, Z., Xu, Y., Kobayashi, K., Dai, L., Zhang, T., Agathokleous, E.,
4 Calatayud, V., Paoletti, E., Mukherjee, A., Agrawal, M., Park, R.J.,
5 Oak, Y.J. & Yue, X. (2022) Ozone pollution threatens the production
6 of major staple crops in East Asia. *Nature Food*, 3, 47-56.
- 7 Izuta, T., Miyake, H. & Totsuka, T. (1993) Evaluation of air-polluted
8 environment based on the growth of radish plants cultivated in small-
9 sized open-top chambers. *Environmental Sciences*, 2, 25-37.
- 10 Izuta, T., Ohtsu, G., Miyake, H. & Totsuka, T. (1994) Effects of ozone on dry
11 weight growth, net photosynthetic rate and leaf diffusive conductance
12 in three cultivars of radish plants. *Journal of Japan Society of Air
13 Pollution*, 29, 1-8.
- 14 Izuta, T., Takahashi, K., Matsumura, H. & Totsuka, T. (1999) Cultivar
15 difference of *Brassica campestris* L. in the sensitivity to O₃ based on
16 the dry weight growth. *Journal of Japan Society for Atmospheric
17 Environment*, 34, 137-146.
- 18 Izuta, T., Takahashi, S., Aoki, M. & Totsuka, T. (1995) Effects of ozone and
19 ultraviolet-B radiation, alone and in combination, on growth of
20 cucumber plants. *Journal of Japan Society of Air Pollution*, 30, 126-
21 136.
- 22 Kobayashi, K., Okada, M. & Nouchi, I. (1995) Effects of ozone on dry matter
23 partitioning and yield of Japanese cultivars of rice (*Oryza sativa* L.).
24 *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 53, 109-122.
- 25 Nouchi, I., Ito, O., Harazono, Y. & Kobayashi, K. (1991) Effects of chronic
26 ozone exposure on growth, root respiration and nutrient uptake of
27 rice plants. *Environmental Pollution*, 74, 149-164.
- 28 Sawada, H. & Kohno, Y. (2009) Differential ozone sensitivity of rice cultivars
29 as indicated by visible injury and grain yield. *Plant Biology*, 11, 70-
30 75.
- 31 Shinohara, T., Yamamoto, Y., Kitano, H. & Fukuda, M. (1973) The relation
32 between ozone treatment and the injury in tobacco. *Japanese Journal
33 of Crop Science*, 42, 412-417.
- 34 Tatsumi, K., Abiko, T., Kinose, Y., Inagaki, S. & Izuta, T. (2019) Effects of
35 ozone on the growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.) under different

- 1 nitrogen fertilization regimes. Environmental Science and Pollution
2 Research, 26, 32103-32113.
- 3 Yamaguchi, M., Hoshino, D., Inada, H., Akhtar, N., Sumioka, C., Takeda, K.
4 & Izuta, T. (2014) Evaluation of the effects of ozone on yield of
5 Japanese rice (*Oryza sativa* L.) based on stomatal ozone uptake.
6 Environmental Pollution, 184, 472-480.
- 7 Yamaguchi, M., Inada, H., Satoh, R., Hoshino, D., Nagasawa, A., Negishi, Y.,
8 Sasaki, H., Nouchi, I., Kobayashi, K. & Izuta, T. (2008) Effects of
9 ozone on the growth, yield and leaf gas exchange rates of two
10 Japanese cultivars of rice (*Oryza sativa* L.). Journal of Agricultural
11 Meteorology, 64, 131-141.
- 12 Yonekura, T., Kihira, A., Shimada, T., Miwa, M., Arzate, A., Izuta, T. &
13 Ogawa, K. (2005b) Impacts of O₃ and CO₂ enrichment on growth of
14 komatsuna (*Brassica campestris*) and radish (*Raphanus sativus*).
15 Phytion, Annales Rei Botanicae, Horn, 45, 229-235.
- 16 Yonekura, T., Shimada, T., Miwa, M., Arzate, A. & Ogawa, K. (2005a) Impacts
17 of tropospheric ozone on growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.).
18 Journal of Agricultural Meteorology, 60, 1045-1048.
- 19 浅川 富美雪, 田中平義, 日下昭二. (1981a) 大気の浄化が水稲の生育収量に及ぼす効果 :
20 光化学オキシダント等の大気汚染が水稲の生育収量に及ぼす影響 (第1報). 日
21 本土壌肥料学雑誌, 52, 201-206.
- 22 浅川 富美雪, 田中平義, 日下昭二. (1981b) 光化学オキシダントが水稲早晩品種の生育収
23 量に及ぼす生育時期別の影響の差 : 光化学オキシダント等の大気汚染が水稲の生
24 育収量に及ぼす影響 (第2報). 本土壌肥料学雑誌, 52, 289-296.
- 25 伊豆田 猛, 船田 周, 大橋 毅, 三宅 博, 戸塚 績. (1988a) 異なる温度条件下におけるハツ
26 カダイコンの生長に対するオゾンの影響. 大気汚染学会誌, 23, 209-217.
- 27 伊豆田 猛, 滝川正義, 堀江勝年, 三宅 博, 戸塚 績. (1988b) ハツカダイコンの生長を指標
28 とした小型オープントップチャンバーによる大気環境の評価. 大気汚染学会誌,
29 23, 284-292.
- 30 大村三男, 松田長生, 森口卓哉, 小崎 格, 秋浜友也. (1989) 果樹の花粉に及ぼす影響. 農林
31 水産技術会議事務局 (編) 大気汚染物質による農作物の生理・遺伝的影響に関す
32 る研究, 216, pp. 145-149.
- 33 沖野英男, 今村三郎, 井戸 豊, 田辺仁志. (1981) 光化学オキシダントが水稲の生育収量に
34 及ぼす影響 フィルタードエアチャンバー法による検討. 愛知県農業総合試験場研
35 究報告, 13, 85-88.

- 1 川方俊和, 矢島正晴. (1993) ダイズの物質生産に及ぼす影響の定量的解析. 農林水産技術
2 会議事務局 (編) 長期・低濃度広域大気汚染が主要農作物に及ぼす影響の解明と
3 評価法の開発に関する研究, 279, pp. 26-31.
- 4 川瀬信三, 岡本美知, 長門寿男, 松丸恒夫. (1989) 数種の汚染物質のガス暴露がナシの受
5 精に及ぼす影響. 農林水産技術会議事務局 (編) 大気汚染物質による農作物の生
6 理・遺伝的影響に関する研究, 216, pp. 132-136.
- 7 黒田昭太郎, 篠原俊清, 東瀬士郎, 矢野文雄, 木村俊雄. (1973) タバコの生理的斑点病に関
8 する研究 第3報 生理的斑点病 (タイプ II, III) 発生の実態調査. 岡山たばこ試
9 験場報告, 33, 15-24.
- 10 群馬県農業試験場, 埼玉県農業試験場, 千葉県農業試験場, 東京都農業試験場, 神奈川県農
11 業試験場, 愛知県農業試験場, 大阪府農林技術センター, 兵庫県農業総合センター,
12 岡山県農業試験場 (編) (1983) 光化学スモッグによる農作物被害の解析と対策.
13 小林和彦. (1999) 対流圏オゾンが農作物生産に及ぼす影響の評価. 大気環境学会誌, 34,
14 162-175.
- 15 佐藤賢一, 林 雄, 柴 英雄, 長谷川英世. (1983) オゾンの低濃度連続接触が農作物の生育収
16 量に及ぼす影響—カブ、インゲン、ホウレンソウ、水稻—. 群馬県農業総合試験
17 場, 埼玉県農業試験場, 千葉県農業試験場, 東京都農業試験場, 神奈川県農業試験
18 場, 愛知県農業試験場, 大阪府農林技術センター, 兵庫県農業総合センター, 岡山
19 県農業試験場 (編) 光化学スモッグによる農作物被害の解析と対策, pp. 183-
20 186.
- 21 澤田寛子, 河野吉久, 玉置雅紀. (2017) 米 17 品種の外観品質に及ぼすオゾンと気温上昇
22 との複合影響. 大気環境学会誌, 52, 59-67.
- 23 須山 勇, 黒田昭太郎, 篠原俊清, 木村敏雄, 正田充慶, 三宅嘉之, 栗原 恒. (1973) タバコ
24 の生理的斑点病に関する研究 第7報 感受性の品種間差異について. 岡山たばこ
25 試験場報告, 33, 55-62.
- 26 大気汚染研究協会植物影響調査研究分科会. (1982) 植物に関する大気汚染研究文献集
27 (第4集). 大気汚染学会誌, 17, S1-S37.
- 28 大気汚染研究協会植物影響調査研究分科会. (1987) 植物に関する大気汚染研究文献集
29 (第5集). 大気汚染学会誌, 22, 159-198.
- 30 大気汚染研究全国協議会植物影響調査研究分科会. (1977) 植物に関する大気汚染研究文
31 献集 (第3集). 大気汚染研究, 11, 413-444.
- 32 大気汚染研究全国協議会第7小委員会. (1974) 植物に関する大気汚染研究文献目録集 (第
33 2集). 大気汚染研究, 9, 21-37.
- 34 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
35 を用いたインパクト推計—. 大気環境学会誌, 38, 205-216.

- 1 千葉県農業試験場公害研究室. (1985) 空気浄化法による畑作物の生育・収量影響の解析.
2 農林水産技術会議事務局 (編) 光化学オキシダントの農林作物の生育収量に及ぼ
3 す影響の解析に関する研究, 164, pp. 148-153.
- 4 中島武彦. (1989) 野菜の生育・収量に及ぼすオゾン及び二酸化窒素ガス接触の影響. 農林
5 水産技術会議事務局 (編) 大気汚染物質による農作物の生理・遺伝的影響に関す
6 る研究, 216, pp. 116-123.
- 7 中島健太郎, 西祐理子, 川田彩香, 山口真弘. (2018) オープントップチャンバー法を用い
8 たハツカダイコンの生長に対するオゾンの影響を指標とした長崎の大気環境評価.
9 大気環境学会誌, 53, 186-193.
- 10 中西準子, 篠崎裕哉, 井上和也. (2009) 詳細リスク評価書シリーズ 24 オゾン—光化学オ
11 キシダント—, 丸善.
- 12 中村 拓. (1979) 光化学オキシダントによるイネの被害に関する研究. 農業技術研究所報
13 告, 24, 1-68.
- 14 中村 拓, 太田保夫, 橋本俊一, 沖野英男. (1976) 光化学オキシダントによる稲の被害につ
15 いて: 第2報 空気浄化法による生育収量の解析. 日本作物学会紀事, 45, 630-
16 636.
- 17 仁紫宏保, 阿江教治, 脇本賢三. (1985) 低濃度オゾンの長期間接触による水稻への影響.
18 中国農業試験場報告, E22, 55-69.
- 19 農業技術研究所. (1985) 空気浄化法によるイネ品種間差の検討. 農林水産技術会議事務局
20 (編) 光化学オキシダントの農林作物の生育収量に及ぼす影響の解析に関する研
21 究, 164, pp. 8-10.
- 22 農事試験場. (1985) オゾンによる畑作物の生育・収量被害発現の限界濃度. 農林水産技術
23 会議事務局 (編) 光化学オキシダントの農林作物の生育収量に及ぼす影響の解析
24 に関する研究, 164, pp. 140-148.
- 25 野内 勇, 高崎 強, 戸塚 績. (1988) 光化学オキシダントに対する農作物および園芸作物の
26 相対的感受性比較. 大気汚染学会誌, 23, 355-370.
- 27 農林水産技術会議事務局 (編) (1985) 光化学オキシダントの農林作物の生育収量に及ぼ
28 す影響の解析に関する研究, 164.
- 29 農林水産技術会議事務局連絡調整課. (1982) 光化学オキシダントによる農林作物被害の
30 判定条件に関する資料, pp. 1-53.
- 31 松丸恒夫, 高崎 強. (1991) バレイショの光化学オキシダントによる被害 第2報 オキシダ
32 ントがバレイショの生育, 収量に及ぼす影響の空気浄化法による解析. 大気汚染
33 学会誌, 26, 385-391.
- 34 松山基一, 斎尾健二, 木村良仁. (1983) 大気汚染が水稻の生育収量に及ぼす影響について.
35 群馬県農業総合試験場, 埼玉県農業試験場, 千葉県農業試験場, 東京都農業試験場,

1 神奈川県農業試験場，愛知県農業試験場，大阪府農林技術センター，兵庫県農業総
2 合センター，岡山県農業試験場（編）光化学スモッグによる農作物被害の解析と
3 対策，pp. 206-211.

4 真弓洋一，山添文雄（1983）植物に及ぼす光化学大気汚染の影響の解析．農業技術研究所
5 報告．B，土壤肥料，35，1-71.

6 三重大学．（1985）果樹の生育・収量に及ぼすオゾン及びエチレンの影響．農林水産技術会
7 議事務局（編）光化学オキシダントの農林作物の生育収量に及ぼす影響の解析に
8 関する研究，164，pp.161-167.

9 野菜試験場．（1985）トマト・キュウリの生育に及ぼす低濃度オゾン接触の影響．農林水産
10 技術会議事務局（編）光化学オキシダントの農林作物の生育収量に及ぼす影響の
11 解析に関する研究，164，pp. 153-156.

12 矢島正晴．（1993）水稻の物質生産に及ぼす影響の定量的解析．農林水産技術会議事務局
13 （編）長期・低濃度広域大気汚染が主要農作物に及ぼす影響の解明と評価法の開
14 発に関する研究，279，pp. 14-19.

15 矢吹駿一，大嶋保夫，松崎敏英．（1983）水稻、ラッカセイ、ダイズのオキシダントに対す
16 る感受性の品種間差異．群馬県農業総合試験場，埼玉県農業試験場，千葉県農業
17 試験場，東京都農業試験場，神奈川県農業試験場，愛知県農業試験場，大阪府農林
18 技術センター，兵庫県農業総合センター，岡山県農業試験場（編）．光化学スモッ
19 グによる農作物被害の解析と対策，pp. 48-52.

20 山添文雄．（1987）大気汚染による植物影響研究の変遷と動向．大気汚染学会誌，22，199-
21 210.

22 米倉哲志．（2016）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
23 ゾン）の影響一．大気環境学会誌，51，A57-A66.

24 米倉哲志，大嶋香緒里，服部 誠，伊豆田 猛．（2000）ダイズの成長，収量，子実成分および
25 発芽率に対するオゾンと土壤水分ストレスの単独および複合影響．大気環境学会
26 誌，35，36-50.

27 米倉哲志，篠原慎弥，伊豆田 猛，三輪 誠，小川和雄．（2007）都市近郊農作物の収量に対す
28 るオゾンのクリティカルレベルの評価．第48回大気環境学会年会．

29 米倉哲志，嶋田知英，三輪 誠．（2010）気温とオゾン濃度上昇が水稻の生産性におよぼす複
30 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
31 価に関する研究．平成22年度環境研究総合推進費終了成果報告書(A-0806(2)).
32 環境省地球環境局総務課研究調査室．