

オーブントップチャンバーを用いた活性炭処理空気暴露によるキヌア栽培の試み

¹和田龍一 ²江頭睦雄 ²市來裕人 ³谷 晃
⁴花園 誠 ⁵永沼 充 ⁶田中禪价

¹生命環境学部自然環境学科

²生命環境学部自然環境学科卒業生

³静岡県立大学食品栄養科学部環境生命科学科

⁴こども学部こども学科

⁵こども学部学校教育学科

⁶臨済宗建長寺派真福寺住職

Trial cultivation of *Chenopodium quinoa* with application of air treated
with activated carbon in open-top chambers

¹Ryuichi WADA ²Mutsuo EGASHIRA ³Hiroto ICHIKI ³Akira TANI
⁴Makoto HANAZONO ⁵Mitsuru NAGANUMA ⁶Zenkai TANAKA

キーワード：キヌア、大気汚染、オゾン、オーブントップチャンバー、植物
Key words : Quinoa, Atmospheric pollution, Ozone, Open-top chamber, Plant

英文抄録 Summary

Chenopodium quinoa is a pseudocereal that has been cultivated in the Andean region for thousands of years. Quinoa grain is highly nutritious due to its outstanding protein quality and wide range of minerals and vitamins. Quinoa has been started to cultivate in Yamanashi prefecture and Uenohara city in which Teikyo University of Science locate; however the ecological characteristics of Quinoa has not been well understood in order to establish the appropriate cultivation condition. There are no experimental data of sensitivity against atmospheric pollution, such as photochemical oxidant, *i.e.* ozone. Open-top chambers (OTCs), which can eliminate the ozone and other pollutants from atmospheric air with activated carbon, was used to investigate how Quinoa was affected by ozone and other pollutants in 2015 in a farm field near the University campus in Uenohara. The elimination efficiency of ozone by the activated carbon was obtained as 85 ± 7 %. Fresh and dry matter weights and a grain weight of Quinoa which grown up in OTCs with purified and non-purified atmospheric air were measured. The mean weights of Quinoa in an OTC with purified air were apparently bigger than those in one with non-purified air. However there was no significant difference between them.

1. 緒言

キヌア (*Chenopodium quinoa*) はヒユ科アカザ亜科アカザ属植物に含まれ、我々にとって身近な野菜であるホウレンソウ (*Spinacia oleracea*) に分類上近縁とされている。南米アンデス山脈の高地において数千年前から食用として栽培されており¹⁾、疑似穀物 (アワやヒエといった雑穀に準じる作物でありソバなどが該当)²⁾ に分類される。茎の頂部に直径約 2 mm の黄緑色の種子が250–500粒房状につき、その種子が食用に供される。キヌアは良質なタンパク質、鉄やマグネシウムといった多種類のミネラルやビタミンを多く含んでいる。さらに他の穀物

と異なり、リジンやメチオニンといったアミノ酸を多く含んでおり、栄養バランスのよい作物として近年ヨーロッパや日本などで注目され、試験的な栽培が行われている^{1,2)}。

キヌアの原産地である南米高地は、冷涼で雨がほとんど降らない地域である。山梨県は日照時間が長く、冷涼で雨も少ないといったキヌア原産地の気象条件に類似していることからキヌア栽培の取り組みが2003年より始まった³⁾。帝京科学大学・上野原キャンパスが所在する山梨県上野原市においても、キヌアの栽培に取り組んでおり (図1)⁴⁾ キヌアの栽培に資する知見を得ることを目的にキヌアのオ

ゾン耐性を調査した。



図1. 山梨県上野原市にて栽培されているキヌアの様子。

オゾンは大気汚染物質の一種であり、森林衰退や農作物の収量減少など、植物に悪影響を与えることが知られている⁵⁾。オゾンによる生理障害の例として、細胞の破壊に起因する植物体上の茶褐色や白色の斑点の発生、植物体の生長量の低下、子実収量の低下、などが報告されている^{6,7)}。オゾンによる可視障害の発現は、植物種ごとに閾値が異なる。分類上キヌアに近縁とされるホウレンソウ (*Spinacia oleracea*) は、100 ppb 以下のオゾン濃度で可視障害が発現する^{8,9)}。一方コマツナ (*Brassica rapa var. perviridis*) の一品種であるミスギヤラクテン

では、130 ppb のオゾン濃度でも可視障害が発現していない¹⁰⁾。

大気汚染による植物への影響を評価する方法として、野外の汚染物質を除去した大気を導入する浄化室と、そのま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生育させ、実際の野外における大気汚染による植物影響評価を比較する方法がある¹¹⁻¹⁶⁾。この比較にはオープントップチャンバー (OTC) と呼ばれる装置が使用されることが多い。OTCは天蓋部が解放された形になっており、チャンバー下方から導入された大気は天蓋部から排気される。そのため、この装置内で生長する植物の土壌、光、温度および水分等の環境条件は、大気の浄化、非浄化を除いて同一であり、野外の環境下で大気汚染物質が植物に与える影響を評価するのに有効な装置のひとつである。伊豆田らは OTC を使用し、ハツカダイコンを対象に、大気汚染物質の影響を調べた。その結果、オゾン濃度が高かった非浄化室での培養苗に、可視的な生育障害が確認された¹⁷⁾。この研究事例以外でも、オゾンがさまざまな植物の生育に対し、負の影響を及ぼす例が報告されている¹⁸⁻²⁰⁾。本研究では、OTC を用いてキヌアのオゾンによる可視障害、および生長量・子実収量への影響を実験により評価した。

2. 材料および方法

2.1 オープントップチャンバー (OTC) の構造

実験に用いた OTC の構造と写真を図2に示す。OTCは幅60cm、奥行き120cm、高さ120cmの大

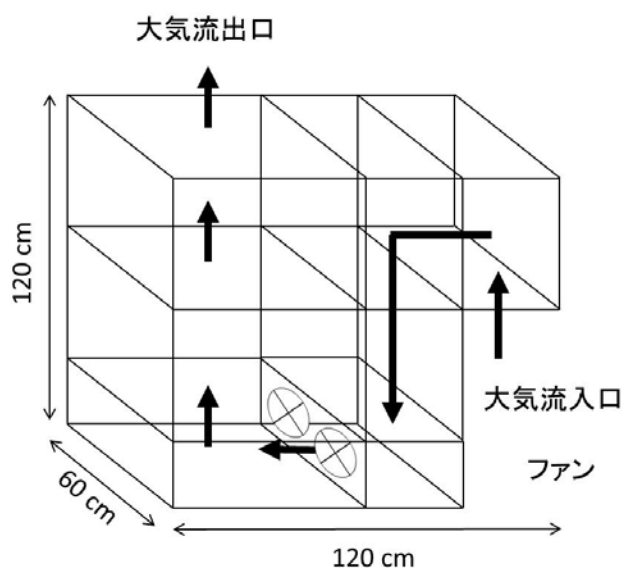


図2. (左) オープントップチャンバーの構造概要図：



(右) 実験で用いたオープントップチャンバーの写真。

きさである。PMMAの透明板とアルミ製の支柱により構成されており、植物生育可能な面積は0.36 m²、容積は0.43m³である。OTCは静岡県立大学谷研究室が作成したOTCを改良して用いた。直流のファンを2台並列に取り付け、OTC背部から空気を取り込み、チャンバー内部に空気が流れるようにした。OTCの空気の流路にオゾン进行活性炭を2段設置し、大気中のオゾン进行活性炭に吸着させることで、オゾン进行含まない清浄な空気を植物に供給できるようにした。オゾン进行吸着する活性炭フィルターを使用した浄化OTCと活性炭フィルターのない非浄化OTCを圃場に1台ずつ設置し、OTC内部のオゾン濃度について実験区間で差が生じるよう、生育環境を設定した。浄化OTC、非浄化OTCでは、フィルターの有無により空気抵抗が異なるが、ファンの電圧を可変コンデンサーにより調整し、空気の流量が1.0 ms⁻¹になるようにした。

2.2 実験方法

本実験にはキヌア「NL-6」を用いた。キヌア「NL-6」は、日本での栽培に適していると考えられる。この品種はSea-level typeと呼ばれる系統に含まれ、夏季高温となる地域での栽培に適した品種の一つである。加えて草丈が低く、耐倒伏性に優れ、子実収量が安定しているなど、商品作物として優れた点が多い^{3,21)}。キヌア「NL-6」は農業法人上野原ゆうきの輪より入手した。土壌は畑の土（栽培を行った面積3.2m²）に鶏糞肥料2kgを加えたものを用いた。種子の播種を2015年8月19日に行い、キヌア各個体の丈が10cm程度に成長した9月18日に15cm間隔で間引きを行った。9月28日に、各OTCに3個体のキヌアを配置し、OTCを用いた実験を開始した。OTC未設置でのキヌアの栽培は行わなかった。10月3日よりキヌアの草丈と可視被害の観察を開始し、11月27日にキヌアの刈り取りを行った。生育日数は100日である。キヌアの栽培期間中、水遣りは行わなかった。

実験は、帝京科学大学上野原キャンパス裏の圃場（北緯35° 37' 25"，東経139° 5' 48"）で行った。圃場は周りより少し低くなった窪地に位置しており、日陰になる場所や時間帯はない（栽培期間中の日照時間：389時間）²²⁾。圃場の写真を図3に示す。大学キャンパスから電源ケーブルを圃場へ引き、OTCのファンおよび分析装置を稼働した。刈り取ったキヌアは、15cm間隔に細断し、個体ごとにビーカーに入れ、超音波洗浄機を用いて付着物を

落とした。濡れたキヌアをパルプ製タオルの上におき、パルプ製タオルを用いて軽く触るようにして水分を拭きとり、24時間自然乾燥を行った後、新鮮重量をさざら電子分析天秤（島津 AEG-220）を用いて測定した。乾物重量は、乾燥機（Isuzu SNS-114）を用いて植物体を80℃で48時間乾燥後、計測した。子実の収量は、乾燥させたキヌアを手ですりつぶし、櫛を用いて子実のみ取り出す作業を行った後、子実の重量を測定した。無作為に選んだ20粒の重量を計測し、この作業を3回行った平均値を20で割ることでキヌアの子実1粒の重量を求めた。植物体の生育の違いは、浄化OTC区、非浄化OTC区それぞれで結実した全子実重量、子実1粒の重量、キヌアの新鮮重量および乾物重量について、2標本t検定による統計解析によって評価した。

実験開始時および実験終了時に、改良したOTCのオゾン除去性能の評価を圃場にて行った。オゾン濃度の計測には、紫外吸収オゾン分析装置（島津：UVA-1000A）を用いた。実験セットアップを図4に示す。外気とOTC内にPFA製のチューブ（外径：1/4インチ，長さ5m）を設置し、PFA製のバルブを手動で切り替えることで外気とオープントップチャンバー内の空気をオゾン分析装置へ交互に供給し、オゾン濃度を各3回ずつ計測した。1回のオゾン濃度計測時間は10分とした。サンプル空気のPFAチューブ内の滞留時間と分析装置の分析にかかる時間遅れを考慮して最初の5分間のデータは除き、残り5分間のデータを平均して計測値とした。実験期間中の大気中のオゾン濃度は環境省大気汚染物質広域監視システム²³⁾のデータを使用した。



図3. 帝京科学大学上野原キャンパス裏の圃場。当圃場にてキヌアを生育し、OTCを用いた実験を行った。

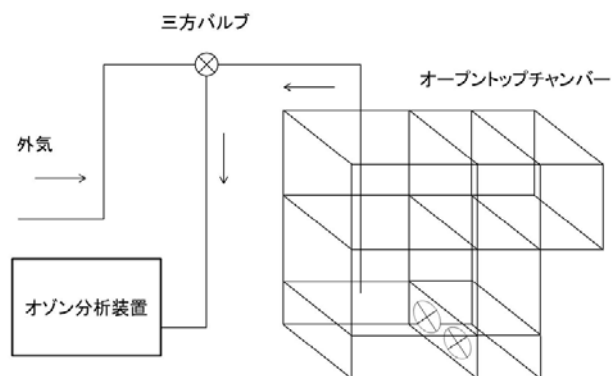


図4. オーブントップチャンバーのオゾン除去性能を評価するための実験セットアップ。

3. 結果と考察

3.1 OTCのオゾン除去性能の評価

OTCのオゾン除去性能評価の実験結果を表1に示す。大気中のオゾン濃度は 48 ± 3 ppb、活性炭フィルターを設置した浄化OTC内のオゾン濃度は 7 ± 2 ppbであった。活性炭フィルターを設置しない非浄化OTCでは、大気中のオゾン濃度は 34 ± 6 ppb、OTC内のオゾン濃度は 32 ± 1 ppbであった。実験終了後の浄化OTCでは、大気オゾン濃度は 48 ± 1 ppb、OTC内のオゾン濃度は 7 ± 2 ppbであった。実験結果から浄化OTCでは実験期間中、大気中のオゾンの浄化効率が $85 \pm 7\%$ であることが分かった。非浄化OTCの内部と外部とでは、オゾン濃度に有意な差は認められなかった。

活性炭により窒素酸化物といったオゾン以外の大気汚染物質も合わせて除去される可能性がある。窒素酸化物の一種である二酸化窒素(NO_2)も植物の生長に悪影響を与えることが知られている²⁴⁾。しかしながら NO_2 が植物に悪影響を与えるには、大気の濃度に比べて高い濃度が必要であることから²⁵⁾、 NO_2 が本実験に与える影響はほとんどないと考えられる。

表1. OTCのオゾン除去性能の評価

	浄化 OTC		非浄化 OTC	
	外気	OTC 内	外気	OTC 内
実験開始時 /ppb	48 ± 3	7 ± 2	34 ± 6	32 ± 1
実験終了時 /ppb	48 ± 1	7 ± 2	-	-

±以下の数値は標準偏差(1σ)を示す。

3.2 草丈、新鮮重量、乾物重量、子実1粒あたりの重量

キヌアの播種は8月19日に行い、8月27日に発芽、刈り取りは11月27日に行った。生育日数は100日である。OTC設置日(10月3日)からキヌアの刈り取りを行った日(11月27日)までのキヌア草丈の生長観察結果を図5に示す。浄化OTC、非浄化OTCで生長したキヌアの刈り取り時の草丈に、有意な差は観測されなかった。しかしながら、浄化OTCで生育したキヌアの枝は非浄化OTCで生育したキヌアに比べて横方向に成長している傾向がみられた。斑点などの可視被害は浄化OTC、非浄化OTCで生長したキヌアともに確認されなかった。非浄化及び浄化OTCで育成した播種後約2か月のキヌアを図6に示す。

OTC内で生育後に刈り取ったキヌアの新鮮重量と乾物重量の結果を表2に示す。浄化OTCと非浄化OTCで生育したキヌアの新鮮重量の平均値はそれぞれ 34.7 ± 31.9 g、 25.1 ± 23.9 gであった。また乾物重量の平均値はそれぞれ 10.4 ± 10.8 g、 7.9 ± 6.6 gであった。新鮮重量、乾物重量はともに平均値では浄化OTCにて生育したキヌアが1.3倍大きかったものの、OTC内のキヌアの生長にばらつきが大きく、浄化、非浄化OTCで生育したキヌアの新鮮重量と乾物重量に有意な差は見られない結果となった($p > 0.05$)。同一のOTC内でキヌアの生長にばらつきが生じた理由として、キヌアの安定した栽培が難しいことが考えられる。

キヌアの全子実重量と子実1粒あたりの重量の結果を表2に示す。全子実重量の平均値は、浄化OTCで 5.0 ± 6.2 g、非浄化OTCで 2.1 ± 1.0 gであった。全子実重量の平均値は浄化OTCにて、2.4倍大きかった。1粒重量の平均値は、浄化OTCで 3.0 ± 0.7 mg、非浄化OTCで 1.7 ± 1.5 mgであった。全子実重量1粒重量の平均値は浄化OTCにて

非浄化 OTC に比べて1.7倍大きかった。しかしながら浄化、非浄化 OTC で生育したキヌアの全子実重量と子実 1 粒あたりの重量に有意な差はなかった ($p>0.05$)。

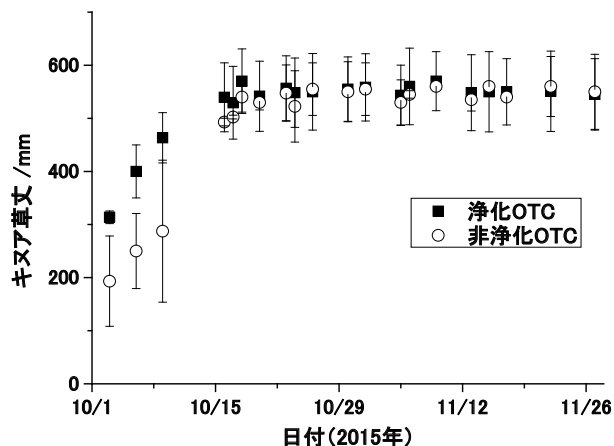


図5. 2015年10月3日から11月27日のキヌア草丈の生長観察結果. ■: 浄化 OTC, ○: 非浄化 OTC で生長したキヌアの草丈を示す. エラーバーは3個体の標準偏差 (1σ).

3.3 キヌア生育期間中のオゾン濃度

キヌア生育期間中のオゾン濃度を図7に示す。黒線はオゾン濃度の1時間平均値、丸印は日中の平均オゾン濃度 (9:00-18:00) を示す。生育期間中 (100日間)、オゾンの環境基準値である60 ppb h^{-1} を超過した日は11日あった。最高オゾン濃度は9月5日に観測した91 ppb h^{-1} 、生育期間中の日中平均オゾン濃度は30 ppbであった。

オゾンが植物に悪影響を与える基準として、AOT40と呼ばれる指標が使用される。AOT40 (accumulated exposure over threshold of 40 ppb) は、オゾン濃度のうち40 ppbを超えた1時間値の超過分を積算したドース (Dose: 濃度×時間) を表す²⁶⁾。キヌア生育期間 (2か月半) における AOT40は、2.9 ppm hと得られた。この値は UNECE (United Nations Economic Commission for Europe, 2004) が報告している農作物収量が5%低下するクリティカルレベル (3 ppm h, 3か月間)²⁷⁾ に相当した。



図6. OTCの非浄化区(左)と浄化区(右)で生長したキヌア。

表2. 浄化 OTC と非浄化 OTC で生育したキヌアの新鮮重量と乾物重量, および全子実重量と子実 1 粒あたりの重量

	浄化 OTC	非浄化 OTC
新鮮重量/ g	34.7 ± 31.9	25.1 ± 23.9
乾物重量/ g	10.4 ± 10.8	7.9 ± 6.6
全子実重量/ g	5.0 ± 6.2	2.1 ± 1.0
子実 1 粒あたりの重量/ mg	3.0 ± 0.7	1.7 ± 1.5

±以下の数値は標準偏差 (1σ) を示す.

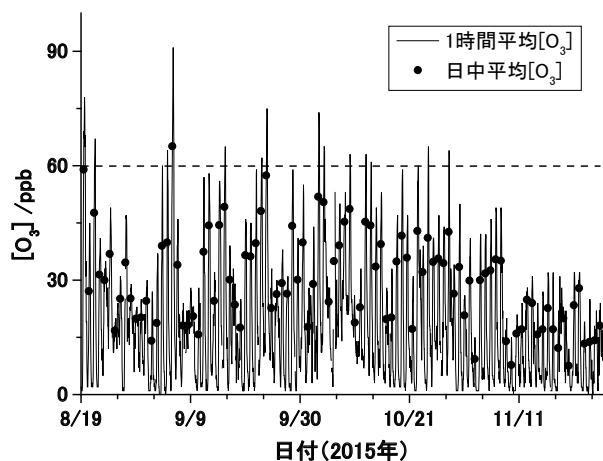


図7. 2015年8月19日から11月27日の1時間平均O₃濃度(—)と日中平均O₃濃度9:00-18:00(●). 図中の点線はオゾンの環境基準値(60 ppb h⁻¹)を示す.

4. まとめ

キヌアの生長および子実収量に、大気汚染物質の一つであるオゾンが影響を及ぼすか否かを調査した。非浄化区と浄化区の植物体重量、全子実重量および子実の一粒重量をそれぞれ比較したところ、オゾン浄化による有意な生育差はみられなかった。しかし、植物体重量、全子実重量および子実の一粒重量の平均値は、非浄化区よりも浄化区のそれらが高かった。キヌアを生育した期間におけるオゾンの基準値の一種であるAOT40は、農作物の収量が5%低下するとされるクリティカルレベル(UNECE, 2004: 3 ppm h)に相当しており、汚染除去に一定の効果があった可能性が推定された。今後各試験区のOTC台数及びキヌアの供試個体数を増やすことで実験の精度を向上させ、オゾンがキヌアの生長へ与える影響を評価する。

謝辞

本研究の一部は帝京科学大学「地域連携活動」の支援により実施した。またキヌアの生育に関して、上野原ゆうきの輪大神田良行様および上野原地域おこし協力隊戸澤高広様にご助言頂いた。記して謝意を表す。

引用および参考文献

1. A. Bhargava, S. Shukla, D. Ohri: Chenopodium quinoa - An Indian perspective, *Industrial Crops and Products*, 23:73-87, 2006.
2. 濱岡未恵: 穀物と疑似穀物の特徴, 東大阪大

- 学・東大阪大学短期大学部教育研究紀要, 2:87-93, 2005.
3. 石井利幸: 山梨県におけるキヌア生産に向けた取り組み, 特産種苗, 8:17-20, 2010.
4. 上野原市役所: キヌア栽培促進に関する情報, <http://uenohara-job.jp/seminar01/>, 2016.
5. H.E. Heggstad, J.T. Middleton: Ozone in high concentrations as cause of tobacco leaf injury, *Science*, 129: 208-210, 1959.
6. 伊豆田猛: 植物と環境ストレス, コロナ社, 東京, 2006.
7. 中西準子, 篠崎裕哉, 井上和也: オゾン-光化学オキシダント-, 丸善, 東京, 2009.
8. 野内勇: オゾン, PANの濃度および暴露時間と植物被害, *大気汚染学会誌*, 14:489-496, 1979.
9. 久野春子: 光化学オキシダントが園芸植物に及ぼす影響, *東京都農業試験場研究報告*, 21:33-166, 1988.
10. T. Izuta, K. Takahashi, H. Matsumura, T. Totsuka: Cultivar difference of *Brassica campestris* L. in the sensitivity to O₃ based on the dry weight growth, *Journal of Japan Society for Atmospheric Environment*, 34:145-154, 1999.
11. A.S. Heagle, D.E. Body, W.W. Heck: An Open-Top Field Chamber to Assess the Impact of Air Pollution on Plants, *Journal of Environmental Quality*, 2:365-368, 1972.
12. B.G. Drake, P.W. Leadley, W.J. Arp, D. Nassiry, P.S. Curtis: An Open-Top Chamber for Field Studies of Elevated Atmospheric CO₂ Concentration on Saltmarsh Vegetation, *Functional Ecology*, 3:363-371, 1989.
13. J.V.H. Constable, M. Litvak, J.P. Greenberg, R.K. Monson: Monoterpene emission from coniferous trees in response to elevated CO₂ concentration and climate warming, *Global Change Biology*, 5:255-267, 1999.
14. 相原敬次, 武田麻由子: 可搬型オープントップチャンバー(OTC)の開発, *神奈川県環境科学センター研究報告*, 27:77-81, 2004.
15. T. Vuorinen, A.M. Nerg, E. Vappavuori, J.K. Holopainen: Emission of volatile organic compounds from two silver birch (*Betula pendula* Roth) clones grown under ambient and elevated CO₂ and different O₃ concentrations,

- Atmospheric Environment*, **39**:1185-1197, 2005.
16. T. Mochizuki, T.Saito, G.Hirai, M. Miwa, T. Yonekura, A. Tani:Development of a reliable method to determine monoterpene emission rate of plants grown in an open-top chamber, *Journal of Agricultural Meteorology*, **71**:271-275, 2015.
 17. 伊豆田猛, 滝川正義, 堀江勝年, 三宅博, 戸塚績: ハツカダイコンの生長を指標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*, **23**:284-292, 1988.
 18. M.R. Ashmore, J.N.B. Bell: The role of ozone in global change, *Annals of Botany*, **67**: 39-48, 1991.
 19. 伊豆田猛, 松村秀幸, 河野吉久, 清水英幸: 樹木に対するオゾンの影響に関する実験的研究, *大気環境学会誌*, **36**:60-77, 2001.
 20. 伊豆田猛, 大津源, 堀江勝年, 三宅博, 戸塚績: オープントップチャンバー法による東京都奥多摩町における大気環境評価, *大気汚染学会誌*, **27**:329-335, 1992.
 21. 氏家和広, 笹川亮, 山下あやか, 磯部勝孝, 石井龍一: 我が国におけるキノア (*Chenopodium quinoa Willd.*) 栽培に関する作物学的研究 - 第1報 子実収量からみた関東地方南部における播種適期の検討 -, *日本作物学会紀事*, **76**: 59-64, 2007.
 22. Japan Meteorological Agency, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>, 2016.
 23. 環境省大気汚染物質広域監視システム, <http://soramame.taiki.go.jp/>, 2016.
 24. H. Saxe, N.S. Murali: Diagnostic parameters for selecting against novel spruce(*Picea abies*) decline : II . Response of photosynthesis and transpiration to acute NO_x exposures, *Physiologia Plantarum*, **76**: 362-367, 1989.
 25. M.S. Gunthardt-Goerg, P. Schmutz, R. Matyssek, J.B. Bucher: Leaf and stem structure of poplar (*Populus euramericana*) as influenced by O₃, NO₂, their combination, and different soil N supplies, *Canadian Journal of Forest Research*, **26**: 649-657, 1996.
 26. J. Fuhrer, L. Skarby, M.R. Ashmore: Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe, *Environmental Pollution*, **97**:91-106, 1997.
 27. UNECE, Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone, http://www.unece.org/env/lrtap/multi_h1.html, 2004.