

## 開放系暴露装置によるブナとシラカンバの光合成機能へのオゾンの影響

北海道大学大学院 農学院 稲田 直輝  
北海道大学大学院 農学研究院 星加 康智・渡辺 誠・小池 孝良

## はじめに

近年、北半球において、対流圏オゾン（以下オゾン）濃度が増加している(1)。オゾン濃度は今後も増加し、植物の成長に悪影響を与えると考えられており(2)、オゾンの植物に対する影響評価の研究への取り組みがなされてきた(9)。しかし、従来のオゾンの植物に対する影響評価に関する研究の多くは、人工環境下で行われてきたものであり、人工環境下と自然環境下では、その微気象環境の違いも考慮せねばならず、野外での検証が必要とされる。そこで冷温帯に広く分布するブナとシラカンバの樹高3m程度の幼樹を対象とした開放系暴露装置を用いたオゾン付加実験を行った。

従来の実験からは、ブナはオゾンの影響を受けやすいとされ、シラカンバは影響の受けやすさが中程度とされている(4)。本研究では、これらブナおよびシラカンバにおける光合成機能に対するオゾンの影響を調べ、樹種ごとの感受性の評価を行うことを目的とした。また、ブナにおいては、樹冠の発達が見られ、樹冠上部と下部では葉の形態的な違いが確認されたため、樹冠上部と下部とに分けてオゾンの光合成機能への影響を調べた。

## 材料と方法

実験は北海道大学北方生物圏フィールド科学センター札幌研究林実験苗畑に設置された開放系オゾン暴露装置を用いて行った(5.0 m × 7.2 m × 5.5 m)。植物材料はブナとシラカンバで、それぞれ2003年植栽の10年生、2011年6月植栽の3年生幼樹を各処理区10本ずつ用いた。樹冠上部と下部での葉の形態的な違いを利用して(平均LMA(葉面積あたりの乾重量; g m<sup>-2</sup>): 樹冠上部 63.5 g m<sup>-2</sup>, 樹冠下部 33.1 g m<sup>-2</sup>,  $p < 0.001$ )、樹冠上部と下部の個葉に対するオゾンの光合成機能への影響を調べた。植栽土壌は褐色森林土である。オゾン暴露実験は日中 60 ppb を目標にした制御で2011年8月から11月まで行った。実際の平均オゾン濃度は対照区で 20.2 ppb、オゾン区で 54.4 ppb であった。10月初旬(オゾン暴露実験開始から 8-9 週目)に携帯型光合成蒸散測定装置(LI-6400, Li-Cor, Nebraska, USA)を用いて葉のガス交換速度を測定した。測定中の葉温と飽差は、それぞれ 24-28 °C と 1.2-1.7 kPa であった。純光合成速度-葉内 CO<sub>2</sub> 濃度曲線を作成し、最大カルボキシル化速度( $V_{cmax}$ )と最大電子伝達速度( $J_{max}$ )を算出した(3)。また CO<sub>2</sub> 濃度が 380 ppm の時の純光合成速度( $A_{380}$ )と気孔コンダクタンス( $gs_{380}$ )を求め、CO<sub>2</sub> 飽和時(1500ppm)の光合成速度( $A_{max}$ )を求めた。そ

の際の光量子束密度は光飽和をもたらす 1500 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> に設定した。そして、同一の葉を用いて CO<sub>2</sub> 濃度が 380 ppm の時の光-光合成曲線を作成し、光飽和時の水利用効率 ( $WUE_{sat}$ )と光量子収率、暗呼吸速度を算出した。葉のガス交換速度の測定後に、リーフパンチ(直径 9mm, リーフパンチ, 藤原製作所, 東京)で採取した葉を 70 °C で 60 時間乾燥させ、乾重量を測定し、LMA を測定した。以上の項目からオゾンの光合成機能への影響を検定した。統計解析として t 検定を用い、 $p < 0.05$  で有意差ありとした。

## 結果

表はそれぞれブナ樹冠上部、下部、そしてシラカンバの光合成機能のパラメータを示す。ブナ樹冠上部では、オゾン区において対照区と比較して、 $A_{380}$  (-60.1%),  $gs_{380}$  (-36.7%),  $V_{cmax}$  (-45.6%),  $J_{max}$  (-32.9%),  $A_{max}$  (-32.9%),  $WUE_{sat}$  (-40.1%) が有意に低下し、暗呼吸速度が有意に上昇した(84.6%)。一方で、光量子収率は両実験区間に有意差はみられなかった。ブナ樹冠下部ではオゾン区と対照区とを比較して、すべてのパラメータにおいて有意差は見られなかった。またシラカンバでは両実験区間の光合成速度や気孔コンダクタンスのあいだに有意差がみられなかったものの、光飽和時の水利用効率が有意に低下した(-29.2%)。

## 考察

ブナ樹冠上部の光合成機能は、オゾンにより光量子収率以外のパラメータが有意に低下した。オゾンにより気孔が閉鎖気味になり、光飽和時だけではなく弱光時の光合成機能も低下していることがわかる。またオゾンを解毒あるいはオゾンによる障害を修復するために暗呼吸速度が上昇したと考えられる(5)。ここで注目すべきは光合成速度や気孔コンダクタンスが低下したにも関わらず、光量子収率が低下しなかったことである。これはオゾンにより集光機能ではなく、生化学的機能が阻害されたことを意味する。また、ブナ樹冠下部でオゾンによる光合成に関するパラメータへの影響は確認できなかった。この理由として、気孔コンダクタンスが低いためにオゾン吸収量が少なかったことなどが考えられるが、本研究では原因説明はできなかった。

シラカンバではオゾンによる光合成速度および気孔コンダクタンスの低下は確認できなかったが、 $WUE_{sat}$  が低下していた。Matyssek et al. (4) は、*Betula pendula* を用い

Naoki INADA (Graduate School of Agriculture, Hokkaido Univ., Sapporo 060-8589), Yasutomo HOSHIKA, Makoto WATANABE, Takayoshi KOIKE (Research Faculty of Agriculture, Hokkaido Univ., Sapporo 060-8589)

Effects of ozone on the photosynthesis of *Fagus crenata* and *Betula platyphylla* var. *japonica* treated with a free-air ozone fumigation system

表 プナ樹冠上部と下部, シラカンバの光合成機能 (値は平均値, ()内は標準偏差を示す)

		$A_{380}$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	$gS_{380}$ ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	$V_{\text{cmax}}$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	$J_{\text{max}}$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	$A_{\text{max}}$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	$WUE_{\text{sat}}$ ( $\text{mol mol}^{-1}$ )	光量子収率 ( $\text{nmol } \mu\text{mol}^{-1}$ )	暗呼吸速度 ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
ブナ樹冠上部	対照	9.2 (0.4)	0.24 (0.05)	50.2 (2.3)	116.7 (10.7)	21.4 (2.2)	3.1 (0.6)	0.055 (0.009)	0.89 (0.31)
	オゾン	3.7 (1.5) ***	0.15 (0.03) *	27.3 (6.9) ***	78.3 (16.7) **	14.4 (2.9) **	1.9 (0.8) **	0.040 (0.018) n.s.	1.64 (0.78) *
ブナ樹冠下部	対照	4.6 (1.0)	0.10 (0.02)	24.4 (4.3)	67.7 (12.2)	12.8 (2.3)	2.9 (1.1)	0.036 (0.011)	0.57 (0.43)
	オゾン	4.7 (1.0) n.s.	0.09 (0.03) n.s.	24.7 (3.5) n.s.	64.0 (9.3) n.s.	11.7 (1.4) n.s.	2.6 (1.1) n.s.	0.029 (0.003) n.s.	0.51 (0.54) n.s.
シラカンバ	対照	9.1 (2.0)	0.28 (0.11)	43.8 (8.9)	109.2 (20.5)	20.6 (4.1)	3.4 (0.5)	0.064 (0.011)	1.05 (0.59)
	オゾン	8.7 (1.1) n.s.	0.24 (0.07) n.s.	42.6 (4.9) n.s.	105.7 (9.3) n.s.	19.3 (1.8) n.s.	2.4 (0.7) *	0.060 (0.011) n.s.	1.57 (0.68) n.s.

T-Test n.s : not significant \* :  $p < 0.05$  \*\* :  $p < 0.01$  \*\*\* :  $p < 0.001$

てオゾンの影響はまず先に葉緑体の崩壊を引き起こし、その次に気孔閉鎖を起こすことにより水利用効率が低下すると報告している。これよりシラカンバにおける水利用効率の低下は支持される。

ブナとシラカンバのオゾン感受性の評価に関しては、本研究からは明らかにブナの方がシラカンバより感受性が高いということがわかった。また、ブナ樹冠の上部と下部の比較より上部の方がオゾン感受性が高く、下部では影響が確認できなかった。Matsumura et al. (6) の OTC (オープントップチャンバー) を用いたポット実験では、ブナとシラカンバのオゾン感受性に関して本研究と同様にブナが高く、シラカンバでは低かった。しかし苗木と成木のオゾンに対する応答はメカニズム自体が異なるということが指摘されている (8)。今年の結果からオゾンの影響には樹種による感受性の差、また樹冠上部と下部による差があることがわかった。樹冠上部と下部の葉におけるオゾン吸収量の違いなどが考えられるとともに、水力学的制限を受けやすいと考えられる葉の着生高ではなく、受光量の違いによるオゾン影響が異なる可能性もある。したがって、今後は次年度も継続してオゾン暴露の慢性的な影響による樹種の影響比較、さらに受光量の違いによるオゾンの影響評価などを検討している。

謝辞

本研究は環境省地球環境研究推進費(B-1105)の支援を得た。記して感謝する。

引用文献

(1) Akimoto H. (2003) Global air quality and pollution. *Science* **302**: 1716-1719.  
 (2) Ashmore MR. (2005) Assessing the future global impacts of ozone on vegetation. *Plant Cell Environ.* **28**: 949-964.  
 (3) Farquhar GD., von Caemmerer S. and Berry JA. (1980) A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C3 species. *Planta* **149**: 78-90.

(4) 伊豆田 猛・松村秀幸・河野吉久・清水英幸 (2001) 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.  
 (5) Kitao M., Löw M., Heerdt C., Grams T E E., Haberle K. and Matyssek R. (2009) Effects of chronic elevated ozone exposure on gas exchange responses of adult beech trees (*Fagus sylvatica*) as related to the within-canopy light gradient. *Environ, Pollut.* **157**: 537-544.  
 (6) Matsumura H., Mikami C., Sakai Y., Murayama K., Izuta T., Yonekura T., Miwa M. and Kohno Y. (2005) Impacts of elevated O<sub>3</sub> and/or CO<sub>2</sub> on growth of *Betula platyphylla*, *Betula ermanii*, *Fagus crenata*, *Pinus densiflora* and *Cryptomeria japonica* seedlings. *J. Agric. Meteorol.* **60**: 1121-1124.  
 (7) Matyssek R., Gunthardt-Georg M S., Theodor K. and Scheidegger C. (1991) Impairment of gas exchange and structure in birch leaves (*Betula pendula*) caused by ozone concentrations. *Trees* **5**: 5-13.  
 (8) Matyssek R., Wieser G., Ceulemans R., Rennenberg H., Pretzsch H., Haberle K., Löw M., Nunn A., J., Werner H., Wipfler P., Oßwald W., Nikolova P., Hanke D., E., Kraigher H., Tausz M., Bahnweg G., Kitao M., Dieler J., Sandermann H., Harbinger K., Grebenc T., Blumenröther M., Deckmyn G., Grams T E E., Heerdt C., Leuchner M., Fabian P. and Häberle K. (2010) Enhanced ozone strongly reduces carbon sink strength of adult beech (*Fagus sylvatica*) - Resume from the free-air fumigation study at Kranzberg Forest. *Environ. Pollut.* **158**: 2527-2532.  
 (9) Yamaguchi M., Watanabe M., Matsumura H., Kohno Y. and Izuta T. (2011) Experimental Studies on the Effects of Ozone on Growth and Photosynthetic Activity of Japanese Forest Tree Species. *Asian J. Atmos. Environ.* **5-2**: 65-78.