

開放系オゾン暴露実験を用いたブナ葉のオゾン吸収量推定

北海道大学大学院農学研究院 星加 康智・渡辺 誠
 北海道大学大学院農学院 稲田 直輝・毛 巧芝・王 曉娜
 北海道大学大学院農学研究院 小池 孝良

はじめに

近年、北半球において、オゾンの前駆物質の排出量が增大していることとともに、対流圏のオゾン濃度が上昇している(1)。オゾンは気孔を介して葉内に入り植物に被害を与えるため、オゾン吸収量の推定は、オゾンの植物影響評価における重要な要素と考えられている。欧州においては、これまでいくつかのオゾン吸収量推定モデルによる影響評価の研究がみられるが、これらの研究では、オゾンによる気孔コンダクタンスへの影響がオゾン吸収量推定の際に考慮されていなかった。そのため、オゾン吸収量を推定するモデルの計算結果における不確実性が指摘されている(3)。一般的に、オゾンは気孔コンダクタンスの低下を促すとされる(5)。そこで、本研究は、オゾンの影響を受けやすいとされる日本の代表的な冷温帯森林の構成種であるブナを対象に、開放系オゾン暴露実験を用いて気孔コンダクタンスモデルのパラメータを導出し、オゾンによる気孔コンダクタンスの低下(f_{O_3})がオゾン吸収量推定値におよぼす影響を検討した。

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付加施設を用いて行った。実験対象はブナの10年生幼樹とし、オゾン暴露実験は、2011年8月6日に開始した。ガス処理は対照区(オゾン無付加, 日中平均 $25.7 \text{ nmol mol}^{-1}$)とオゾン付加区(日中 60 nmol mol^{-1} に制御)の2処理区とした。

オゾン吸収量の推定は、気孔底界面オゾン濃度を 0 nmol mol^{-1} と仮定し、水蒸気に関する気孔コンダクタンス(g_s)をもとに推定する Water vapour surrogate method を用いた。気孔コンダクタンスは、携帯型蒸散測定装置(LI-1600, Li-Cor, Lincoln, NE, USA)を用いて、日当たりの良い樹冠上部の葉を対象に、2011年7月28日から10月28日まで測定した(13日間, 合計767測定点)。欧州では、オゾン吸収量の推定の際、気孔コンダクタンスの推定に関して、以下の式が用いられている(2)。

$$g_s = g_{\max} \cdot f_{\text{phen}} \cdot f_{\text{light}} \cdot \max\{f_{\min}, (f_{\text{temp}} \cdot f_{\text{VPD}} \cdot f_{\text{SMD}})\} \quad (1),$$

ここで、 g_{\max} は、最大気孔コンダクタンス ($\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) を示し、そのほかの関数は、0 から 1 までのスケールをとる。 f_{\min} は、最小気孔コンダクタンスである。 f_{phen} は、

気孔コンダクタンスの葉齢における変化を示し、 f_{light} は、光合成有効放射波長域の光量子束密度 (PPFD: Photosynthetic Photon Flux Density) に対する気孔コンダクタンスの応答を示す。 f_{temp} , f_{VPD} , f_{SMD} は、温度、飽差、土壌水分に対する気孔コンダクタンスの応答を示す。

Emberson らの提案した式では、オゾンによる気孔コンダクタンスの低下は考慮に入れられていなかったため、著者らは、式(1)を改良することとした。

$$g_s = g_{\max} \cdot f_{\text{phen}} \cdot f_{O_3} \cdot f_{\text{light}} \cdot \max\{f_{\min}, (f_{\text{temp}} \cdot f_{\text{VPD}} \cdot f_{\text{SMD}})\} \quad (2),$$

f_{O_3} は、オゾンによる気孔コンダクタンスの低下を示すパラメータである。以上の式に基づき、測定結果をまとめ、気孔コンダクタンスモデルの各パラメータを導出し、オゾン吸収量の推定を行った。

結果および考察

ブナを対象にオゾン付加区と対照区で気孔コンダクタンスの比較を試みた結果、オゾン暴露実験開始後にオゾン付加区の気孔コンダクタンスが対照区に比べて低い値を示した(図-1)。このオゾン付加による気孔コンダクタンスの低下は、オゾンによって引き起こされる光合成速度の低下にともなう気孔閉鎖(5)およびオゾンの吸収をふせぐために気孔を閉じ気味にするため(4)であると考えられている。

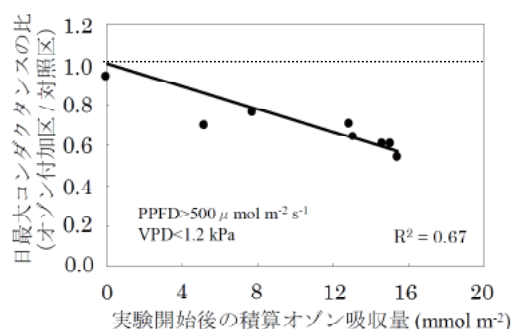


図-1 測定日ごとのオゾン付加区と対照区における最大気孔コンダクタンスの比と積算オゾン吸収量の関係

次に、このオゾン付加による気孔コンダクタンスの低下(f_{O_3})を考慮に入れた改良モデルおよび Emberson らの

Yasutomo HOSHIKA, Makoto WATANABE, Naoki INADA, Qiaozhi MAO, Xiaona WANG, Takayoshi KOIKE (Research Faculty of Agriculture, Hokkaido Univ. Sapporo 060-8589)
 Estimation of stomatal ozone uptake for *Fagus crenata* grown under free air ozone enrichment system

既存モデルの推定値と、オゾン付加区における気孔コンダクタンス測定値の比較を行った結果を図-2 に示す。既存モデルはオゾン付加区の気孔コンダクタンスを過大に推定した。一方で、 f_{O_3} を考慮した改良モデルの推定値は改良前と比べ、決定係수에 違いは認められなかったが、誤差が小さくなった(既存モデル: RMSE(Root Mean Square Error, 平均二乗誤差)=112.2 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; 改良モデル: RMSE=84.9 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。さらに、既存モデルと改良モデルの両者を用いて、2011年の実験期間におけるブナ葉のオゾン吸収量の推定を試みた(図-3)。両者の比較結果から、オゾン吸収量推定の際に f_{O_3} を考慮にいたした場合、積算オゾン吸収量の推定値が約 20%低下した。このモデル間の比較により確認された積算オゾン吸収量の差は、 f_{O_3} によるオゾンの取り込み量の制限と解釈できる。気孔閉鎖により、オゾンの取り込み量が制限されることで、オゾン暴露条件下におけるオゾンのダメージは軽減されると推察される。一方で、より長期のオゾン暴露下では、気孔開閉の機能の低下を促し、気孔コンダクタンスを増加させるとの報告もあり(6), オゾンの取り込み量が増加する可能性もある。よって、モデルのさらなる改良の向け、成長期間を通じた測定から、 f_{O_3} のパラメータに関する季節変化を今後検討していく必要がある。

本研究の結果から、気孔コンダクタンスモデルに、オゾンによる気孔コンダクタンスの低下を考慮することで、モデルの推定誤差が小さくなった。継続した測定によりオゾンの取り込み量を正確に評価することで、ブナを対象としたオゾン影響の評価における高精度化につながると思われる。

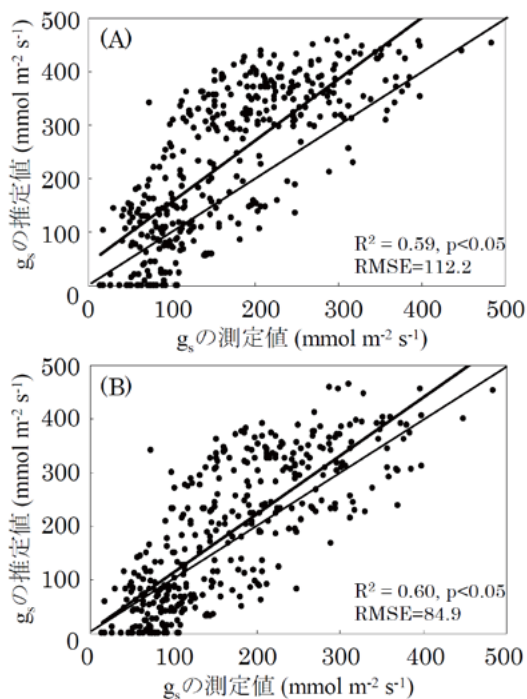


図-2 オゾン付加区における気孔コンダクタンス測定値とモデル推定値の比較
(A: Emberson らの既存モデル; B: 改良モデル)

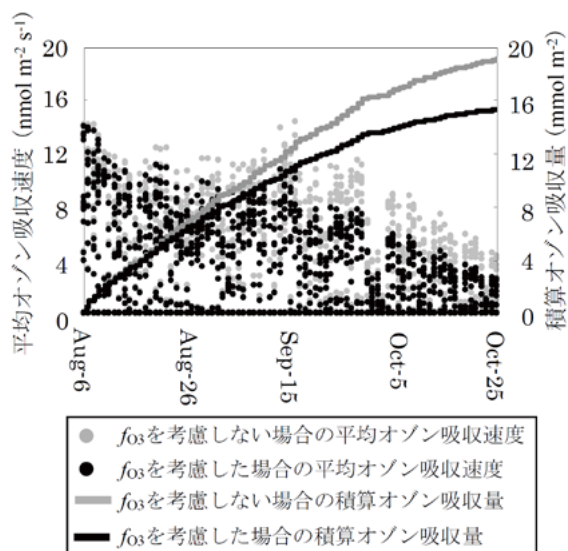


図-3 オゾンの気孔コンダクタンスにおよぼす影響(f_{O_3})の考慮の有無によるブナ葉のオゾン吸収量推定値の違い(オゾン付加区、2011年)

謝辞

本報告は環境省地球環境研究推進費(B-1105)、科学研究費補助金基盤研究(B-23380078)および若手研究(B-24710027, B-24780239)の一部支援を得た。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) Emberson L.D., Ashmore M.R., Cambridge H.M., Simpson D. and Tuovinen J.P. (2000) Modelling stomatal ozone flux across Europe. *Environmental Pollution* **109**: 403-413.
- (3) Grulke N.E., Paoletti E., and Heath R.L. (2007) Comparison of calculated and measured foliar O_3 flux in crop and forest species. *Environmental Pollution* **146**: 640-647.
- (4) Kitao M., Löw M., Heerdt C., Grams T.E.E., Häberle K.-H., 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. *Environmental Pollution* **157**: 537-544.
- (5) Weber J.A., Clark C.S., and Hogsett W.E. (1993) Analysis of the relationships among O_3 uptake, conductance, and photosynthesis in needles of *Pinus ponderosa*. *Tree Physiology* **13**: 157-172.
- (6) Yamaguchi M., Watanabe M., Iwasaki M., Tabe C., Matsumura H., Kohno Y. and Izuta T. (2007) Growth and photosynthetic responses of *Fagus crenata* seedlings to O_3 under different nitrogen loads. *Trees* **21**: 707-718.