

神奈川県丹沢産ブナ苗に与えるオゾン曝露と水欠乏の複合影響の実験的解析

伊藤祥子*・笹川裕史**・相原敬次***・清水英幸*

Experimental analyses of the combined influence
of ozone exposure and water shortage on beech seedlings
from Tanzawa, Kanagawa, Japan

Shoko ITO*, Hiroshi SASAKAWA**, Keiji AIHARA*** and Hideyuki SHIMIZU*

要 旨

伊藤祥子・笹川裕史・相原敬次・清水英幸：神奈川県丹沢産ブナ苗に与えるオゾン曝露と水欠乏の複合影響の実験的解析 神奈川県自環保セ報告9:23-32, 2012 神奈川県丹沢産の3年生ブナ苗を用いて、環境制御室でオゾン曝露と水欠乏処理による慢性影響の検討を行った。3段階のオゾン濃度を設定した曝露チャンバーに3段階の灌水処理区を設け、ポットに植栽した苗木を12週間育成した。その結果、オゾン濃度が増加するにしたがって、植物の個体および各器官の乾物生長は抑制された。また、灌水処理区を比較すると、水欠乏が強くなるにしたがって、植物の生長は抑制された。相対生長率や純同化率も、オゾン濃度や水欠乏が大きくなるにしたがい、減少傾向を示した。結果として12週間のオゾンと水欠乏の単独および複合処理によってブナの個体乾重は抑制され、光合成速度などの生理活性の低下が確認された。また、両要因は相加的に作用していた。

キーワード：可視障害、環境制御室、乾物生長、蒸散、光合成

I はじめに

神奈川県の北西部に位置する丹沢山地では、1970年代からブナ林の衰退が報告され、様々な調査研究が進められてきた（相原ら，2004；丹沢大山総合調査団，2007など）。これらの調査研究によって、衰退要因としてオゾン（O₃）や水欠乏が指摘されたが、ブナの衰弱や枯死との直接的な結びつきに関する現地での調査結果は少なく、水ストレスとブナの衰弱との関係については、O₃ストレスとの複合影響

も含めて、さらに調査・研究を進めていくことが課題とされた（山根ら，2007 a）。

これまで、いくつかの農作物や樹木でO₃と水ストレスの複合影響について検討されているが、植物の種類、年齢、曝露期間や濃度によって様々な結果が示されている（Harkov & Brennan, 1980；Greitner *et al.*, 1994；米倉ら，2000；Shimizu & Feng, 2007）。また、O₃感受性には種間差異や系統間差異などもあり（伊豆田ら，2001）、複合影響のメカニズムに関しては未だ解明されていない。ブナについては、

* 国立環境研究所地域環境研究センター（〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2）

** 国立環境研究所地域環境研究センター（〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2）

（現所属：一般社団法人日本森林技術協会（〒102-0085 東京都千代田区六番地7））

*** 神奈川県自然環境保全センター研究企画部研究連携課（〒243-0121 神奈川県厚木市七沢657）

Yonekura *et al.* (2001) や Watanabe *et al.* (2005) が、 O_3 と水ストレスに関する複合実験を行っているが、主として葉の生理活性に着目しており、個体生長への影響および生長解析によるメカニズムの解明に関しては明確には示されていない。

そこで、本研究では、神奈川県丹沢産のブナ苗を用いて、環境制御室において長期間の O_3 曝露と水欠乏処理を行い、これらストレスのブナ (*Fagus crenata*) への慢性影響について、乾物生長や生理生態的応答の観点からその影響解析を行った。

II 実験材料と方法

冬季に平均樹高 50 cm ほどの神奈川県産のブナ苗 (3 年生) を、赤玉土などを加えたポット (12 cm ϕ $\times$ 20 cm H) に 1 本ずつ植栽し、野外において適宜灌水しながら育成した。その後、ブナ苗 (3 年生) の展葉がほぼ完了した時期 (5 月中旬) から 12 週間、実験を行った。この時期は、丹沢などの野外でもブナが伸長、展葉して生育する時期である (田村, 2007)。実験開始前に十分に灌水した後、自然光中型環境制御室 (2 m $\times$ 2 m $\times$ 2 m: 小糸工業 S 型) にブナ苗を移動し、育成実験を行った。

実験には 3 台の環境制御室を用いた。各環境制御室の O_3 濃度は、日平均 70 ppb (夜間 10 時間 40 ppb / 5 時間移行期 / 昼間 4 時間 120 ppb / 5 時間移行期)、日平均 50 ppb (夜間 10 時間 20 ppb / 5 時間移

行期 / 昼間 4 時間 100 ppb / 5 時間移行期) および 0 ppb (O_3 無処理) に設定した。 O_3 無処理以外の処理区の濃度は、丹沢地域 (犬越路・檜洞丸) の平均濃度 (42 ppb) より 7 割あるいは 2 割程度高い濃度である (河野ら, 2007)。各環境制御室の実験期間中の O_3 曝露総量を AOT-40 (40 ppb を越える 1 時間平均 O_3 濃度の積算値) で示すと、各々約 108 ppm $\cdot$ h、約 78 ppm $\cdot$ h、0 ppm $\cdot$ h である。全ての環境制御室は、気温: 25 / 15 $^{\circ}$ C (昼 / 夜)、相対湿度: 65 / 70% (昼 / 夜) に設定した。

各環境制御室で 3 つの灌水处理区を設定した。すなわち、3 日に一度 250 ml (以下、wet 処理とする)、175 ml (以下、semi-dry 処理とする) あるいは 125 ml (以下、dry 処理とする) の灌水を行った。各水处理区にはそれぞれ 12 個体のブナ苗を供試した。各環境制御室内には合計 36 ポットをランダムに配置し、定期的に位置を変えて、環境制御室内の位置による影響の偏りを防いだ。wet 処理は、丹沢山地など太平洋側のブナ林域のブナ生長期にあたる 6 月～8 月の降水量に相当し (村井ら, 1991; Yoshidome *et al.*, 2004; 山根ら, 2007 b)、wet 処理の灌水量の約 70% が semi-dry 処理、50% が dry 処理に相当する。実験期間中の土壌の水ポテンシャルは、pF メータ (大起理化工業 DIK-3060) を用いて連続計測を行った (図 1)。

実験開始および終了時に、可視障害率 (個体当たりの総葉面積に占める障害面積の割合: 目視判定に



図 1 環境制御室でのオゾン曝露 $\times$ 水欠乏複合実験

A: 自然光型環境制御室でのブナ苗木の育成、B: pFメータによる水ポテンシャルの連続計測

より個体毎に5%刻みで記録)と葉緑素量(SPAD値:SPAD-502,(株)コニカミノルタセンシング社製)を計測後、植物を収穫した。葉面積(3100型,Li-Cor. Corp. USA)を計測後、根、茎、葉に分けて通風型乾燥器(90℃)で最低3日間乾燥させ、乾重を計測した(AB204-S, Mettler Instruments A. G., Switzerland)。さらに実験開始6週および12週間後に蒸散量と光合成速度の計測を行った。蒸散量は上皿天秤重量法(メトラー・トレド, SB32001 Delta Range)により個体毎に計測し、光合成速度は、CIRAS-1(PP SYSTEMS社製)を用いて、各個体2葉ずつ計測した(図2)。生長量に関する統計処理には、Turkeyの多重比較を用いた。相対生長率(Relative Growth Rate、以下RGR)および純同化率(Net Assimilation Rate、以下NAR)は以下の式を用いて計算した(Evans, 1972)。

$$RGR = 1/W \cdot dW/dt = (\ln W_2 - \ln W_1) / (t_2 - t_1)$$

$$NAR = 1/W \cdot dW/dt = [(W_2 - W_1) / (A_2 - A_1)] * [(\ln A_2 - \ln A_1) / (t_2 - t_1)]$$

ここで W_1 、 W_2 および A_1 、 A_2 は、各々、 t_1 (実験開始)、 t_2 (実験終了)時における個体乾重および葉面積を示す。葉面積比(Leaf Area Ratio、以下LAR)は個体乾重に対する葉面積の比率、葉重比(Leaf Weight Ratio、以下LWR)は個体乾重に対する葉乾重の比率、比葉面積(Specific Leaf Area、以下SLA)は葉乾重当たりの葉面積から算出した。地下部/地上部比(Root/Shoot Ratio、以下R/S ratio)は

地上部バイオマス(葉乾重+茎乾重)に対する地下部バイオマス(根乾重)の比率である。

III 結果と考察

1 可視障害への影響

実験終了時(12週間後)の苗木を図3に示す。O₃濃度が増加するにしたがい、個体の葉の付き方が疎らになっている。同時期の葉身の可視障害の状態を図4に示す。O₃に曝露していないブナの葉身がほぼ緑色であったのに対して、O₃に曝露したブナの葉身には白緑色や褐色の斑点が観察される場合があった。このような可視障害はO₃曝露個体にのみ認められ、特にO₃濃度70ppb曝露区で多かった。このような障害は、個葉の位置にあまり関係無く全体的に発症した。

複合実験12週間後の各処理区の可視障害率を図5に示す。全水処理区において、O₃濃度0ppb処理区の植物には可視障害が認められず、O₃濃度が高くなるに従い、植物の可視障害率は高くなった。また、O₃曝露区で比較すると、水欠乏が強い、つまり水ストレスが大きい処理区ほど、可視障害率が増加する傾向が認められた。これまでも、O₃は植物葉に可視障害を発現させることが報告されている(Ashmore *et al.*, 1980; Mortensen, 1992; 大黒ら, 1993; Sawada & Kohno, 2009など)。特に樹木に関して、Shimizu *et al.* (1993)は100ppb O₃に3~4週

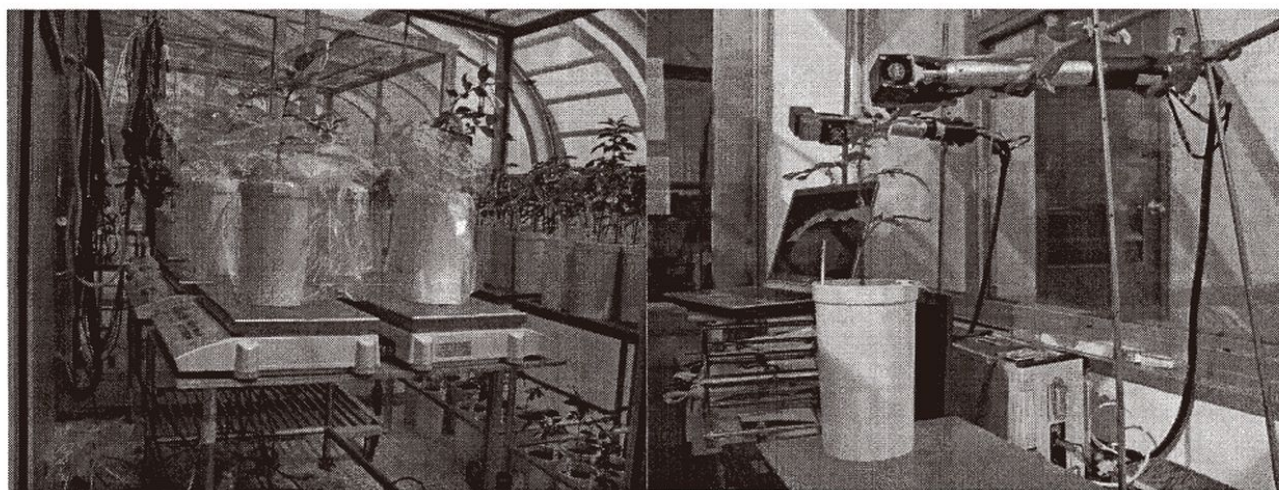


図2 複合実験中のブナ苗の生理活性の計測

A: 上皿天秤を用いた重量法での蒸散量計測、B: CIRAS-1による純光合成速度の計測

間曝露したポプラの交雑種 (*Populus maximowiczii* × *Populus plantierensis*) やヤマブキ (*Kerria japonica*) の葉に可視障害が発現したことを報告している。また、ヨーロッパブナ (*Fagus sylvatica*) とスイカズラ科の1種 *Viburnum lantana* の可視障害の発現割合は O_3 に曝露すると高まり (Novaka *et al.*, 2008)、シラカンバ (*Betula platyphylla* var. *japonica*) とケヤキ (*Zelkova serrata*) を外気の2～3倍の O_3 に曝すと白色斑点や黄色化などの可視障害が発現し、早期落

葉が引き起こされることが報告されている (松村ら, 1998)。今回の実験においても O_3 濃度が高いほど、発現する可視障害の割合が増加したことから、 O_3 濃度の増加は、丹沢産ブナにも可視障害を発現させる可能性があると考えられた。

2 生長への影響

O_3 曝露や水欠乏を与えない対照区 (0 ppb O_3 - wet 処理区) を基準としたときの、実験終了時 (12

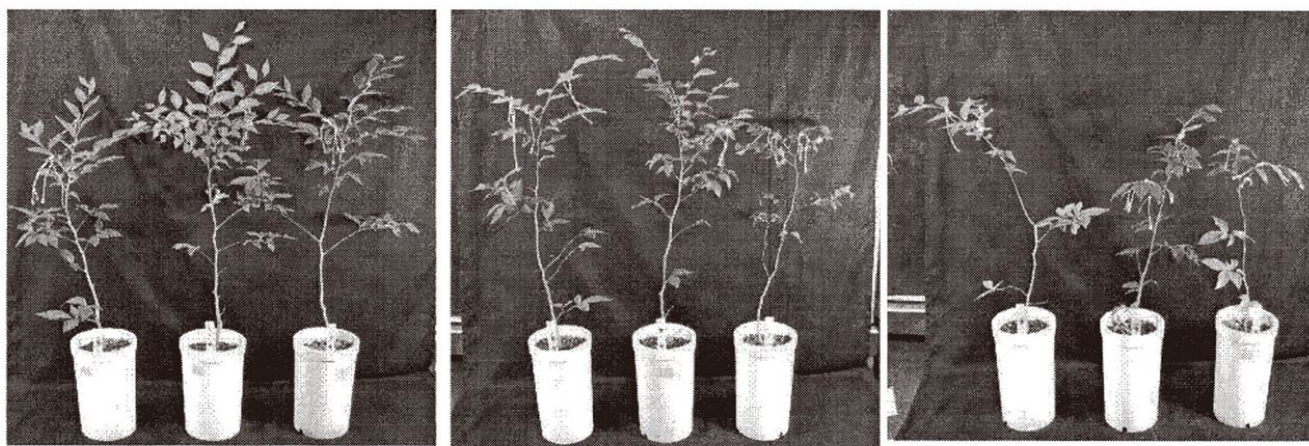


図3 複合実験開始後12週目のブナの苗木

左から(3個体ずつ)、0、50、70ppbの O_3 曝露処理
各組の左からwet、semi-dry、dryの水欠乏処理

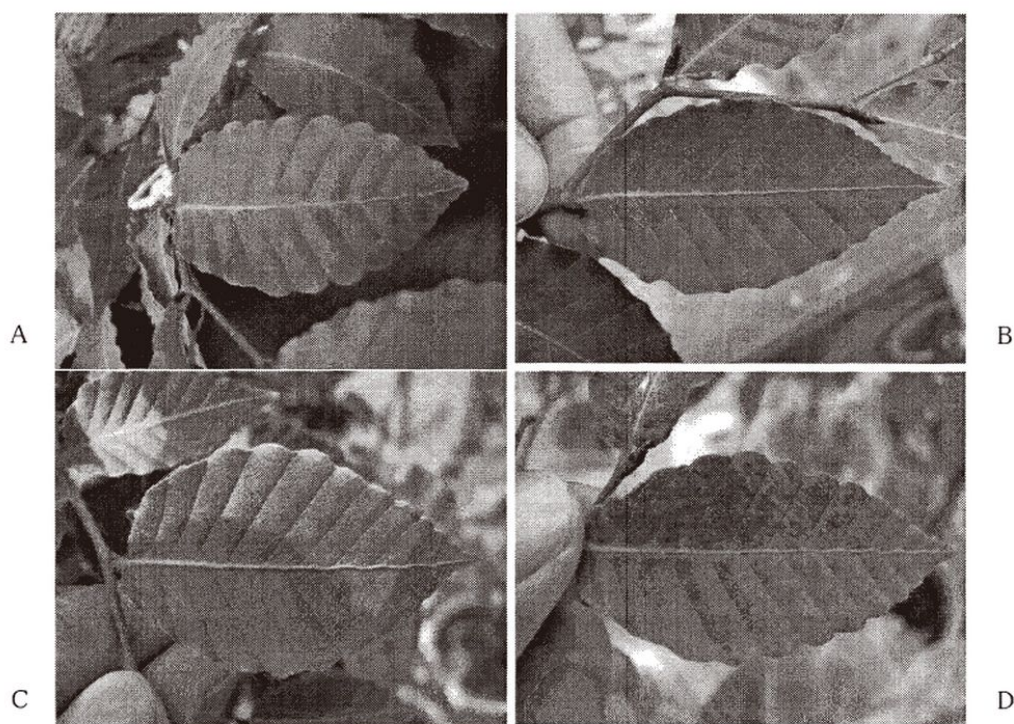


図4 複合実験開始後12週目のブナ葉身

A : 0 ppb O_3 - wet 処理、B : 0 ppb O_3 - dry 処理、C : 70 ppb O_3 - wet 処理、D : 70 ppb O_3 - dry 処理

週間後)の各処理区の個体乾重(%)を図6に示す。O₃曝露区を比較するとO₃濃度が増加するにしたがって個体乾重は減少した。また、灌水処理区を比較すると、水欠乏が増加するにしたがって、個体乾重は減少した。各器官の乾重は個体乾重とほぼ同様に変動した。

O₃濃度が最も高く、水ストレスが最も強い処理区(70ppbO₃-dry処理区)のブナの個体乾重は、対照区に比較して約40%減少した。wet処理の間でO₃濃度の影響を比較すると、50ppbO₃は約25%、70ppbO₃は約34%、個体乾重を減少させた。一方、

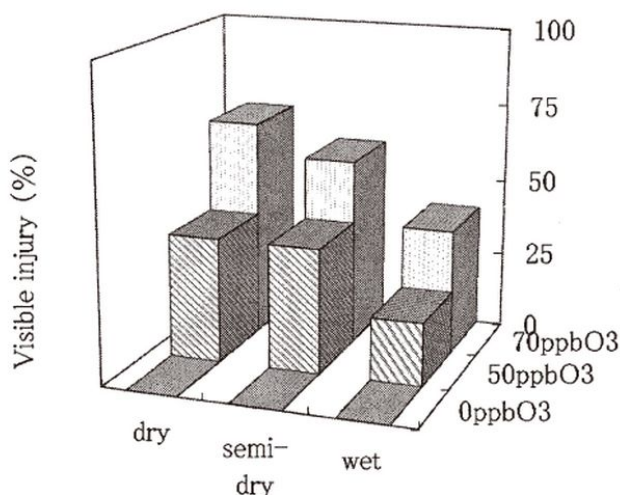


図5 複合実験開始後12週目のブナ葉の可視障害率
各処理区の個体の平均値(実験材料と方法を参照)

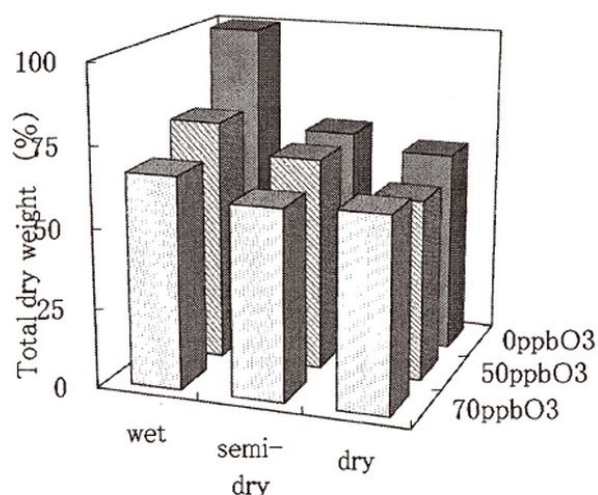


図6 複合実験開始後12週目のブナの個体乾重
各処理区の値は0ppbO₃-wet処理区の平均値を100%としたときの相対値

semi-dry 処理や dry 処理では、wet 処理に比べ、O₃濃度処理間の個体乾重の差はそれほど顕著ではなく、対照区と比べると押し並べて低かった。

Tseng *et al.* (1988) は、水ストレスをかけたモミ(*Abies fraseri*)をO₃に曝露した結果、水ストレスは生長を低下させたが、O₃の単独影響やO₃と水ストレスの有意な交互作用は認められなかったと報告している。今回の実験では、丹沢産ブナ苗の乾物生長に対して、O₃曝露と水欠乏という環境ストレスが各々単独で生長を抑制したが、統計的にはそれらの交互作用は認められなかった。したがって、O₃と水ストレスは、丹沢産のブナに対して相加的に影響すると考えられた。

次に、生長解析を行い(Evans, 1972)、RGR、NAR、LAR、LWR、SLAなど、いくつかの生理的、形態的パラメータに分けて、ブナへのO₃曝露と水欠乏の影響を比較解析した。最初に、対照区(0ppbO₃-wet処理区)を基準としたときの、各処理区のRGR(%)を図7に示す。個体乾重の変動と同様に、O₃濃度が増加するにしたがい、また水欠乏が増加するにしたがい、RGRは減少傾向を示した。ただし、70ppbO₃処理における水ストレスの影響、およびdry処理におけるO₃曝露の影響については明確ではなかった。

RGRは、生理的特性をあらわす純同化率(NAR)と形態的特性をあらわす葉面積比(LAR)の積とし

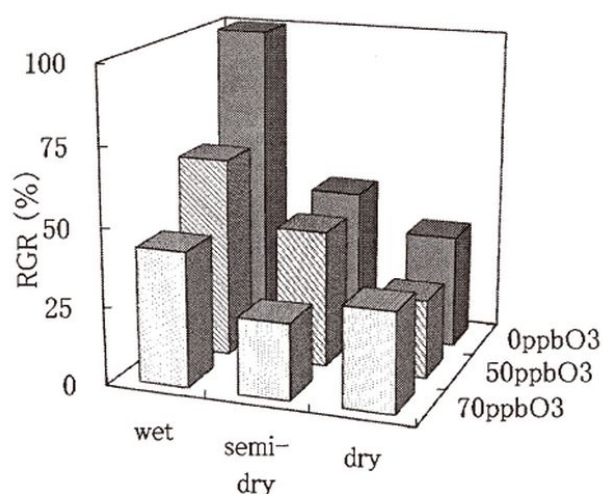


図7 複合実験開始後12週目のブナの相対生長率(RGR)

各処理区の値は0ppbO₃-wet処理区の平均値を100%としたときの相対値

て表すことができる。さらにLARは、葉の重さの割合を表す葉重比 (LWR) と葉の薄さを表す比葉面積 (SLA) の積として表すことができる。まず、NARとLARについて、対照区を基準としたときの各処理区の値 (%) を図8に示す。NARは、O₃濃度が増加するにしたがい、また水ストレスが増加するにしたがい減少傾向を示した。ただし、70ppbO₃処理区における水ストレスの影響、およびdry処理区におけるO₃の影響については明確ではなかった。これらの傾向はRGRの結果と類似していた。一方、LARはどの処理区においてもほぼ一定で、O₃や水ストレスによる顕著な影響は認められなかった。

LWRとSLAについて、対照区を基準としたときの各処理区の値 (%) を図9に示す。両パラメータとも顕著な変動は示さなかったが、LWRは、O₃濃度

や水ストレスが増加するにしたがい、僅かに減少傾向を示した。一方、SLAは、O₃濃度や水ストレスが増加するにしたがい、僅かに増加し、葉が薄くなる傾向を示唆した。

さらに、対照区を基準としたときのR/S ratioとSPADの値を図10に示す。R/S ratioとSPADともに、O₃または水ストレスが増加しても顕著な変動傾向は認められず、O₃濃度や水欠乏による明確な影響を確認できなかった。

O₃によって様々な生長パラメータが影響を受けるが、O₃によるNARの低下は、多くの農作物などで確認されており (Shimizu *et al.*, 1981; 伊豆田ら, 1988; 米倉ら, 2000)、O₃による純光合成速度の低下が示唆されている。今回の実験においても、O₃曝露や水欠乏による丹沢産ブナ苗の生長の低下傾向

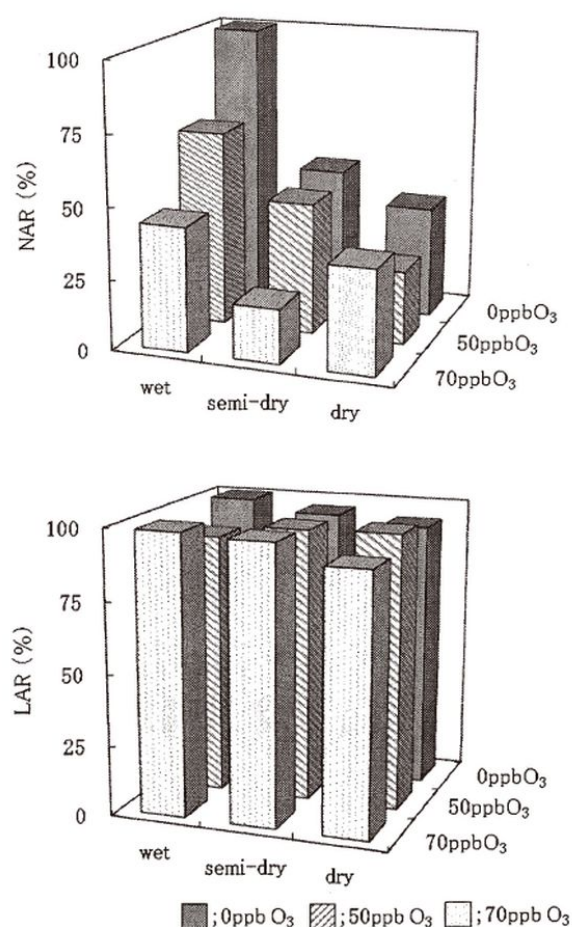


図8 複合実験開始後12週目のブナの純同化率(NAR)と葉面積比(LAR)

上段: NAR、下段: LAR
各処理区の値は0 ppbO₃-wet処理区の平均値を100%としたときの相対値

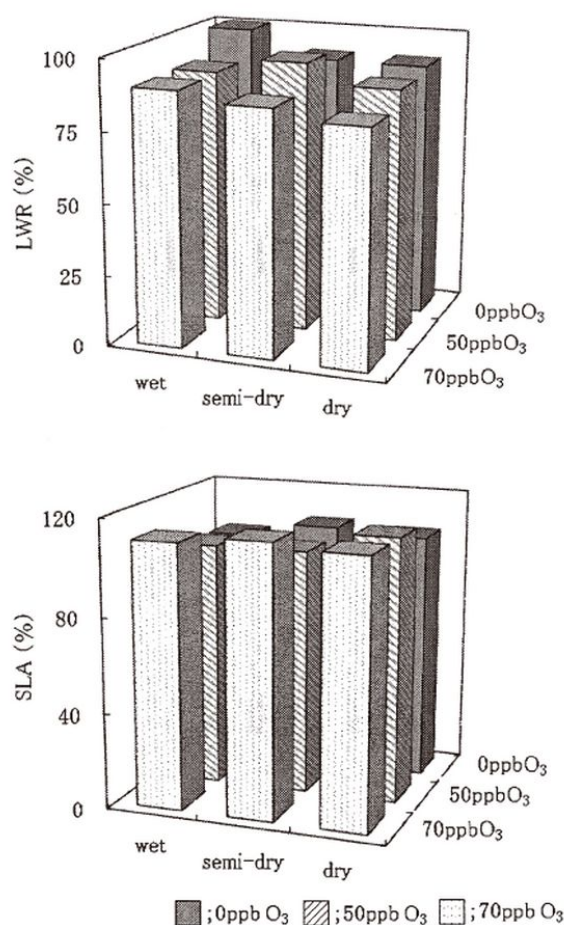


図9 複合実験開始後12週目のブナの葉重比(LWR)と比葉面積(SLA)

上段: LWR、下段: SLA
各処理区の値は0 ppbO₃-wet処理区の平均値を100%としたときの相対値

は、光合成の低下による可能性が考えられた。

そこで、光合成速度と蒸散速度について計測した結果を、対照区を基準としたときの各処理区の値(%)として図11に示す。O₃濃度が増加するにしたがい、また水ストレスが増加するにしたがい、純光合成速度は低下する傾向を示した。これらの変動は、生長解析で認めた純同化率とほぼ同じ傾向であった。一方、蒸散速度も、O₃濃度が増加するにしたがい、また水ストレスが増加するにしたがい、低下する傾向を認めたが、純光合成速度に対する影響ほど顕著ではなかった。O₃曝露や水欠乏によって引き起こされるブナの純光合成速度の低下には、気孔閉鎖以外の要因が関与している可能性が示唆された。

Rechi (1983) は、O₃曝露によって、ポプラ交雑種 (*Populus maximowiczii* × *Populus trichocarpa*) の最大純光合成速度が低下し、通常の老化による純光合成速度の低下が早まったことを報告している。Yang *et al.* (1983) は、このような影響が、O₃濃度の上昇に伴って、著しくなることも報告している。さらに、水ストレスとO₃の両ストレスを与えたポプラ (*Populus tremuloides*) では、個体当たりの純光合成速度が相加的に低下したことが報告されている (Greitner *et al.*, 1994)。今回の実験でも、O₃と水ストレスは、丹沢産ブナ苗の光合成速度を低下させており、丹沢のブナもO₃と水ストレスの影響で光合成活性ひいては生育が抑制されていることが示唆された。

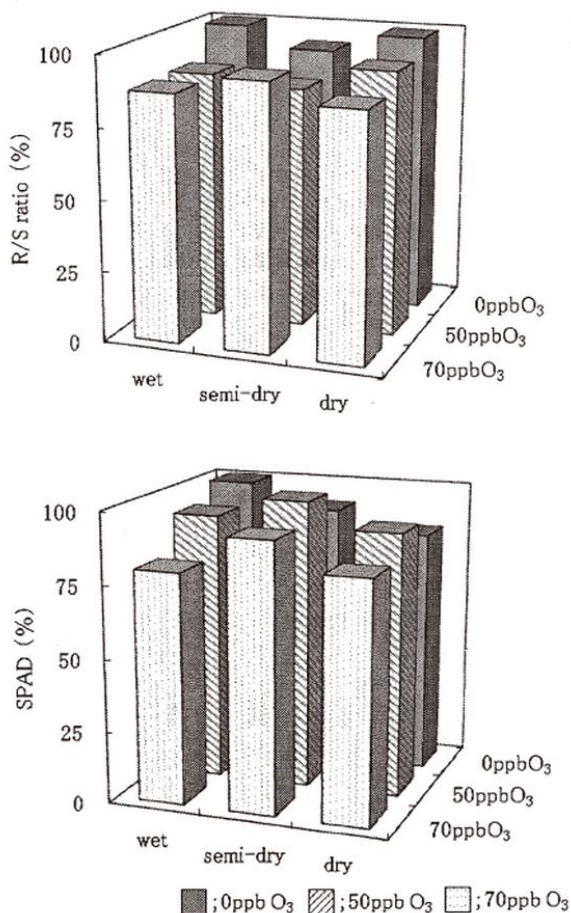


図10 複合実験開始後12週目のブナの地下部/地上部比(R/S ratio)と葉緑素量(SPAD値)

上段：R/S ratio、下段：SPAD値
各処理区の値は0ppbO₃-wet処理区の平均値を100%としたときの相対値

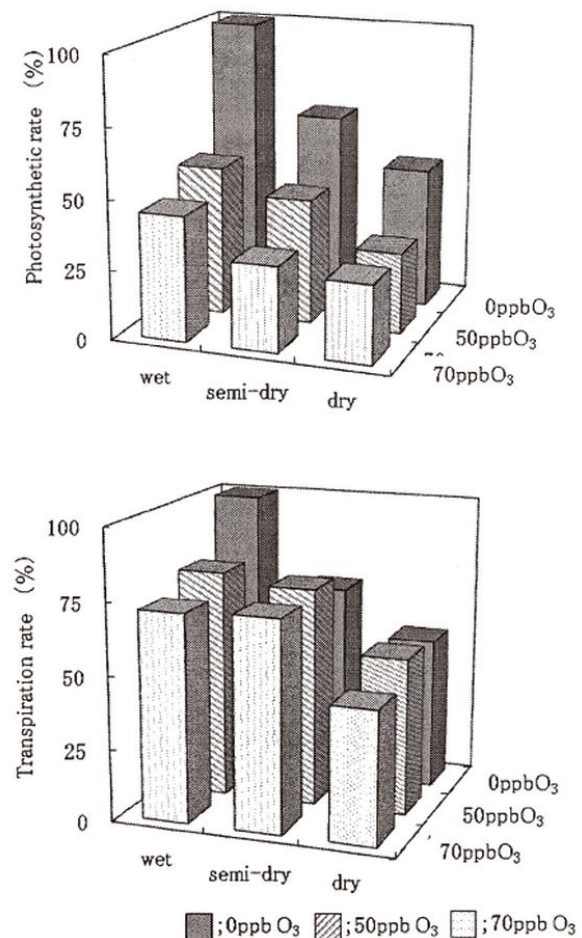


図11 複合実験開始後12週目のブナの光合成と蒸散

上段：純光合成速度、下段：蒸散速度
各処理区の値は0ppbO₃-wet処理区の平均値を100%としたときの相対値

IV 結 論

これまで、O₃曝露や水欠乏がブナに影響を及ぼすことが報告されているが(Yonekura *et al.*, 2001; Watanabe *et al.*, 2005; Yamaguchi *et al.*, 2007)、今回ほぼ3か月間の長期複合実験においても、O₃曝露や水欠乏によって、可視障害が増加し、個体乾重、純同化率、さらに光合成速度などが減少することが確認された。つまり、O₃や水ストレスはブナの光合成に影響を及ぼすことにより、生長抑制という慢性影響を引き起こすことが推測された。また、O₃と水ストレスの両要因は相加的に影響すると考えられた。

今後、ブナの出葉・展葉時期(野外でO₃濃度が高くなる春季)を含む全生育期間におけるO₃曝露および水ストレスの複合実験を行い、各時期における生理活性への影響を詳細に解析することにより、丹沢山地におけるブナ林の衰退メカニズムの解明やその保全対策にも貢献する所存である。

V 謝 辞

本研究を行うにあたり、神奈川県山林種苗協同組合にブナの苗木購入の便宜を図っていただいた。また、株式会社川上農場には、国立環境研究所でのブナ苗木の栽培育成管理を、住友精化株式会社、小糸電工(株)、計測器サービス株式会社には環境制御室やO₃ガス曝露の調整をしていただいた。また、国立環境研究所の鈴木貞子さん、後藤友加里さん、加藤まどかさん、下田恵子さん、中崎知香子さんには、実験中の計測等で協力していただいた。以上の方々並びにこれまでご指導とご協力を賜ったすべての方々に心から感謝します。

VI 参考文献

- 相原敬次・阿相敏明・武田麻由子・越地正 (2004) 森林衰退の現状と取り組み(Ⅱ)神奈川県の丹沢山地における樹木衰退現象. 大気環境学会誌 39 (2) : 29-39.
- Ashmore M.R., Bell J.N.B., Dalpra C., Runeckles V.C. (1980) Visible injury to crop species by ozone in the United Kingdom. Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological 21 (3) : 209-215.
- Evans G. C. (1972) The quantitative analysis of plant growth. 734pp. William Clowes and Sons Ltd., London.
- Greitner C., Pell E. J., Winner W. E. (1994) Analysis of aspen foliage exposed to multiple stresses: ozone, nitrogen deficiency and drought. New Phytol 127 : 579-589.
- Harkov R., Brennan E. (1980) The influence of soil fertility and water stress on the ozone response of hybrid poplar trees. Phytopathology 70 (10) : 991-994.
- 伊豆田猛・船田 周・大橋 毅・三宅 博・戸塚 績 (1988) 異なる温度条件下におけるハツ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.
- 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 (2) : 60-77.
- 河野吉久・須藤 仁・石井 孝・相原敬次・内山佳美 (2007) ブナ林の立地環境調査(大気) 丹沢山地周辺のオゾン濃度の実態とブナに対する影響. 丹沢山地のブナ林衰退機構の解明に関する研究調査報告書 : 48-62.
- 松村秀幸・小林卓也・河野吉久 (1998) スギ、ウラジロモミ、シラカンバ、ケヤキ苗の乾物生長とガス交換速度に対するオゾンと人工酸性雨の単独および複合影響. 大気環境学会誌 33 (1) : 16-35.
- Mortensen L. M. (1992) Effects of ozone on growth of seven grass and one clover species. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science 42 (4) : 235-239.
- 村井宏・山谷孝一・片岡寛純・由井正敏 (1991) ブナ林の自然環境と保全. 399pp. ソフトサイエンス社.
- Novak K., Schaub M., Fuhrer J., Skelly J. M., Freya B., Krauch N. (2008) Ozone effects on visible foliar injury and growth of *Fagus sylvatica* and *Viburnum lantana* seedlings grown in monoculture

- or in mixture. *Environmental and Experimental Botany* 62 (3) : 212-220.
- 大黒俊哉・根本正之 野内勇 (1993) 人工酸性雨とオゾンの曝露が数種雑草および農作物の可視被害の発現に及ぼす影響. *雑草研究* 38 (3) : 223-229.
- Reich Peter B. (1983) Effects of low concentrations of O₃ on net photosynthesis, dark respiration, and chlorophyll contents in aging hybrid poplar leaves. *Plant Physiol.* 73 : 291-296.
- Sawada H. Kohno Y. (2009) Differential ozone sensitivity of rice cultivars as indicated by visible injury and grain yield. *Plant Biology* 11 : 70-75.
- Shimizu H., Feng Y.W. (2007) Ozone and/or water stresses could have influenced the *Betula ermanii* Cham. forest decline observed at Oku-Nikko, Japan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 128, 109-119.
- Shimizu H., Fujinuma Y., Kubota K., Totsuka T., Omasa K. (1993) Effects of low concentrations of ozone (O₃) on the growth of several woody plants. *J. Agric. Meteorol.* 48 (5) : 723-726.
- Shimizu H., Motohashi S., Iwaki H., Furukawa A., Totsuka T. (1981) Effects of exposures to ozone on the growth of sunflower plants. *Environ. Control. Biol.* 19(4) : 137-147
- 田村 淳 (2007) ブナの生理・生態調査 丹沢山地におけるブナのフェノロジー. 87-88. 平成13～平成18年度丹沢山地のブナ林衰退機構の解明に関する研究調査報告書. 神奈川県自然環境保全センター研究部編, 111pp, 神奈川県自然環境保全センター, 神奈川.
- 丹沢大山総合調査団 (2007) 丹沢大山総合調査学術報告書. 794pp. 丹沢大山総合調査実行委員会監修, (財) 平岡環境科学研究所.
- Tseng Elizabeth C., Seiler John R., Chevone Boris I. (1988) Effects of ozone and water stress on greenhouse-grown fraser fir seedling growth and physiology. *Environmental and Experimental Botany* 28 (1) : 37-41.
- Watanabe M., Yonekura T., Honada Y., Yoshidome M., Nakaji T., Izuta T. (2005) Effects of ozone and soil water stress, singly and in combination, on leaf antioxidative systems of *Fagus crenata* Seedlings. *J. Agric. Meteorol.* 60 (6) : 105-1108.
- Yamaguchi M., Watanabe M., Iwasaki M., Tabe C., Matsumura H., Kohno Y., Izuta, T. (2007) Growth and photosynthetic responses of *Fagus crenata* seedlings to O₃ under different nitrogen loads. *Trees-Structure and Function* 21 (6) : 707-718.
- 山根正伸・相原敬次・鈴木 透・笹川裕史・原慶太郎・勝山輝男・河野吉久・山上 明 (2007 a) ブナ林の衰退機構と再生の方向. 104-111. 平成13～平成18年度丹沢山地のブナ林衰退機構の解明に関する研究調査報告書. 神奈川県自然環境保全センター研究部編, 111pp, 神奈川県自然環境保全センター, 神奈川.
- 山根正伸・藤沢示弘・田村 淳・内山佳美・笹川裕史・越地 正・中嶋伸行・齋藤央嗣 (2007 b) I 丹沢山地における最近の気象の特徴. 375-382. 丹沢大山総合学術報告書. 丹沢大山総合調査団編, 794pp, 財団法人平岡環境科学研究所, 神奈川.
- Yang Y. S., Skelly J. M., Chevone B. I., Birch J. B. (1983) Effects of long-term ozone exposure on photosynthesis and dark respiration of eastern white pine. *Environ. Sci. Technol.* 17 (6) : 371-373
- Yonekura T., Honda Y., Okasanen E., Yoshidome m., Watanabe M., Funada R., Koike T., Izuta T (2001) The influences of ozone and soil water stress, singly and in combination, on leaf gas exchange rates, leaf ultrastructural characteristics and annual ring width of *Fagus crenata* seedlings. *J. Society for Atmospheric Environment* 36 (6) : 333-351.
- 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, 子実成分および発芽率に対するオゾンと土壌水分ストレスの単独および複合影響. *大気環境学会誌* 35 (1) : 36-50.
- Yoshidome M., Watanabe M., Honda Y., Ogiwara I., Izuta T. (2004) Carry-over effects of ozone and water stress on leaf phenological characteristics and bud frost hardiness of *Fagus crenata* seedlings. *Trees-Structure and Function* 18 (5) : 581-588.

Summary

In the Tanzawa Mountains (Kanagawa, Japan) the decline of beech forests has been observed since 1980. Various studies were conducted thereafter, and ozone (O₃) and water shortage in addition to beech sawfly were suspected as major factors causing the decline. We examined the growth and ecophysiological activities of beech seedlings using environment-controlled chambers to clarify the chronic damages of O₃ and water stress singly or in combination. These seedlings were exposed to 70, 50 or 0 ppbO₃ with different water treatment of 1200, 840 or 600 mm in terms of growing period precipitation for 12 weeks. The dry weight growth of seedlings decreased with increasing O₃ concentration or water shortage, which suppressed the NAR as similar to the RGR. In the present experiments, some ecophysiological activities and biomass production of beech seedlings were influenced by increasing O₃ concentration and/or water shortage, while these two factors acted additively according to statistical analysis. We concluded that O₃ and water shortage were strongly related to causing the decline of beech forests observed in the Tanzawa Mountains.

Key words: environment-controlled chamber, growth, photosynthesis, transpiration, visible injury