

論文

大気汚染と酸性雨の複合暴露が植物に与える影響 I — ポプラの生長に及ぼす影響 —

大橋 毅 菅 邦子 青木 一幸
栗田 恵子

要 旨

大気汚染と酸性雨が樹木に与える複合暴露の大きさ及び影響の寄与率を知ることを目的として複合暴露実験を実施した。空気浄化チャンバー (FAC) を利用して環境大気をそのまま導入する非浄化区と活性炭により浄化空気を導入する浄化区の2区を設定し、それぞれの区を更に人工酸性雨噴霧区 (1/1000N 硫酸:硝酸=1:1, pH3.0) とイオン交換水噴霧区の2区に分け、合計4区でポプラさし木苗 (品種 I 45/51) に複合暴露を行った。その結果、1か月後の乾物生長量は、酸噴霧、水噴霧の相違に係わらず、非浄化区では浄化区を約30%下回った。一方、浄化区、非浄化区とも酸噴霧と水噴霧との間には統計的に有意な生長量の差は認められなかった。従って、落葉広葉樹のポプラについては、大気汚染 (主としてオゾン) がその生長に大きな影響を与えていることが明らかになったが、酸性雨に関しては、東京都内で見られる雨の酸性度ではポプラの生長にほとんど影響を及ぼしていないと考えられた。

1 はじめに

ヨーロッパや北アメリカでは森林衰退が目立ち、その原因として酸性雨が注目されてきた。しかし、石灰岩地域にも同様な衰退がみられたり、オゾンの影響が大きいとする報告もある。現在、いくつかの衰退仮説が提出され検討されているが、全体の地域に適合するものはない。日本でも、平野部のスギや山間部のモミなど針葉樹の枯損が注目を集めている。スギについては、先端部枯損の原因として酸性雨やオキシダント等の汚染物質や都市化にともなう乾燥化等が考えられている。いずれも原因は複合的であるとしており、衰退のプロセス及び人為的要因の大きさについては、まだほとんどわかっていない。

そこで、東京都の大気汚染及び酸性雨のもとで、樹木にどのような影響があるのかを明かにし、影響の寄与率を知ることを目的として複合暴露実験を計画した。手始めとして落葉広葉樹のポプラを対象とし、FACを利用して環境大気と人工酸性雨の複合暴露を行い、大気汚染と酸性雨が樹木の生長に与える影響の大きさを比較した。

その結果、これらの要因がポプラ苗の生長に与える短期的な影響の寄与について一定の結論を得たので報告する。

2 方 法

(i) 苗の育成

樹木のうち、簡単に同一クローンが得られるポプラのさし木苗 (品種: I 45/51) を用いた。ポプラの穂木を1昼夜水に浸せき後、さし木し、活性炭付き人工気象室で育成した。その後、生長量 (高さ × (根元直径))

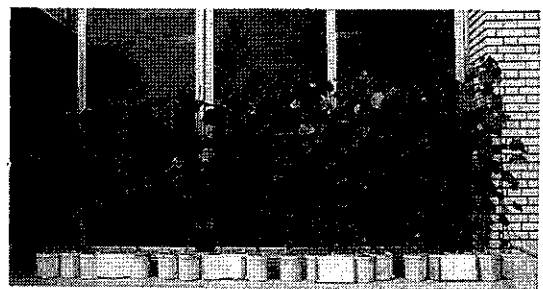


写真1 複合暴露後のポプラ生長量及び落葉数の比較

1992.7.26から31日間大気暴露, 酸性雨暴露は7.29から週5日間, 夜間のみ4回にわけて各区500ml pH3 混合液噴霧

苗高では浄化区 > 非浄化区, 落葉数は非浄化区 > 浄化区であった。

表1 ポプラ苗の育成、配置条件

ポプラの品種	1 45/51
穂木の重さ	5-6.4g
挿し木日	5/28 500mlポリポット
苗の選定	7/17 苗高, 苗径, 葉面積
移植日	7/23 1/5000 a ワグネルポット
初期サンプリング日	7/26 5株
育成場所	浄化空気導入の人工気象室
育成温度	昼/夜, 5月:15/25℃, 6月:18/25℃, 7月:20/27℃ 昼夜温度切り替え時間 6:00/18:00
大気暴露開始日	7/26
酸性雨噴霧開始日	7/29
配置株数	各区5株
用土	黒ぼく土:ピートモス=6:4
肥料	8:8:8化成肥料 12g
(1/5000 aポットあたり)	緩効性コーティング肥料(ロング100) 4.8g 苦土石灰 4g

(DHI), 葉面積) がそろった苗を選定し, 500mlポリのポットに移植した。選定した苗は, できるだけ生長量の平均が等しく, 標準偏差が小さくなるように分け, FAC内に各区5株ずつ配置した。初期値は5株を抜き取って測定した。用土及び育成条件の詳細は表1のとおりである。なお, ポプラの穂木は東京都農業試験場から入手した。

(2) 暴露方法

ガラス製空気浄化室と非浄化室(各4m角)の2区を, 図1のように温室用ビニールシートで更に2分し, それぞれ人工酸性雨を噴霧する区(酸区)と水だけを噴霧する区(水区)の合計4区を設定し, 各々の区における生長を比較した。

噴霧は, クロマト用噴霧ノズルで行った。噴霧角度を広げるために扇風機のファンをはずし後ろ向きにしてノズルを固定し, 首振り機能を利用した。噴霧用の扇風機とエアポンプ及びFACの空気導入ファンのON-OFFはタイマーの組み合わせで行った。また, 位置効果を減らすため, ポットは1週間に1度位置をずらし, 苗の生長に従って噴霧ノズルの高さを調整した。

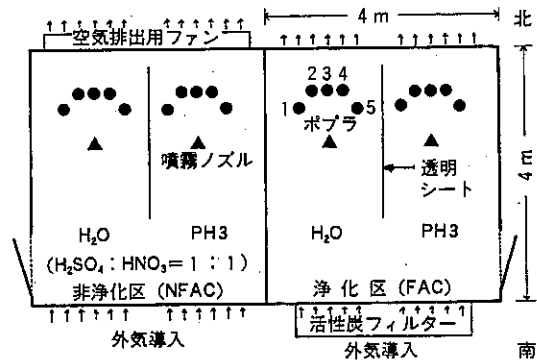


図1 FACによる大気汚染と人工酸性雨の複合暴露実験

(3) 人工酸性液の調製と暴露条件

実験にあたっては現状の汚染に近い酸濃度(pH)を前提とし, 葉上の酸性雨が, その後降るきれいな雨で流されることなく付着していると想定して噴霧条件を決めた。従って酸の噴霧量が少なく, 葉からの栄養塩類のリーチングや, ポット土壌の酸性化などの影響は無視できるとみられる。

人工酸性雨は硫酸:硝酸=1:1 (1/1000N, pH3.0)と

した。噴霧は葉に付着した液滴の急速な乾燥を防ぐため、夜間のみとし、更に噴霧中及びその後約1時間は外気導入ファンを止めた。噴霧時間は7分間、5日/週とし、夜間10:30から2時間サイクルで4回繰り返した。噴霧量は500 mg/日/区とした。

7月26日にFACに苗をセットし、7月29日から酸性噴霧を開始し、8月26日に終了した。暴露期間を短かくしたのは、チャンバーの大きさ及び噴霧方法の限界のため苗が大きくなると均一に噴霧できなくなることによる。

(4) 大気汚染及び気温等の測定

オゾンは荏原実業㈱のオゾンモニターで連続測定し、二酸化イオウ及び二酸化窒素は都環境科学研究所開発のディフュージョン・エア・サンプラーを用い、1週間ごとの平均値を求めた。

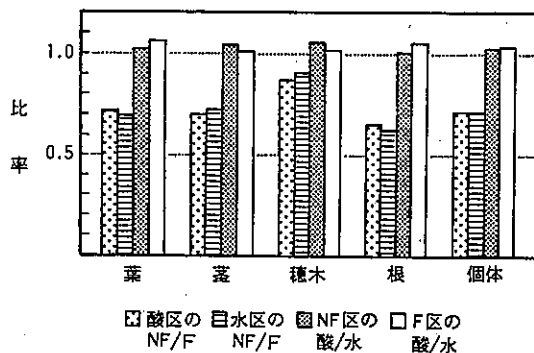


図2 器官別の乾物重比率 (NF, Fは非浄化区, 浄化区を示す)

表2 ポプラの生長量計測結果

	区	(cm ²) (cm) (cm ²)			乾物重 (g)					全被害 (%)			% / day mg/cm ² , day cm ² /mg			
		葉面積	苗高H	D ² H	葉	茎	穂木	根	個体	全葉数	落葉数	葉数	T/R*	RGR	NAR	LAR
浄化	酸区	3594a	138a	126a	20.6a	12.8a	4.9a*	5.8a	44.1a	41.0	4.2	4.6	662	0.0488	0.6185	0.0789
	水区	3483a	133a*	115a	20.2a	12.2a	4.6ab	5.7a	42.8a	42.0	3.8	3.8	647	0.0478	0.6069	0.0789
非浄化	酸区	2672b	119b*	87b	14.8b	9.0b	4.3b	3.8b	31.9b	39.8	17.4	25.6	739	0.0384	0.4799	0.0801
	水区	2602b	113b	80b	14.0b	8.9b	4.2b*	3.6b	30.7b	39.2	19.4	26.6	761	0.0371	0.4600	0.0807
初期値		728	58	14	4.3	1.9	2.8	0.7	9.7	22.6	3	3	1320	—	—	—

Duncan's-New-Multiple Range test : 同列間で異なるアルファベットは有意差あり(但し*印間は5%,その他は1%)
*T/Rは(地上部乾物重/地下部乾物重)×100

表3 各処理区の生長量の比率

比率の種類	区	葉面積 苗高H D ² H			乾物重 (g)					全被害			T/R RGR NAR LAR			
		葉面積	苗高H	D ² H	葉	茎	穂木	根	個体	全葉数	落葉数	葉数	T/R	RGR	NAR	LAR
非浄化	酸区	0.743	0.858	0.693	0.719	0.702	0.874	0.661	0.724	0.971	4.143	5.565	1.115	0.787	0.776	1.014
	水区	0.747	0.847	0.694	0.692	0.726	0.909	0.630	0.717	0.933	5.105	7.000	1.176	0.776	0.758	1.023
酸水	浄化区	1.032	1.041	1.093	1.021	1.045	1.060	1.009	1.030	0.976	1.105	1.211	1.023	1.020	1.019	1.001
	非浄化区	1.027	1.055	1.092	1.062	1.011	1.018	1.060	1.041	1.015	0.897	0.962	0.971	1.035	1.043	0.992

気象条件は、気温、湿度(浄化、非浄化、外気)と日射量(非浄化、外気)を測定した。

(5) ポプラ生長の計測

暴露1か月後の8月26日を終了日とした。葉位ごとに可視被害を調査し、苗を抜き取って高さ、葉面積、D²Hを測定した。その後、80℃、48時間熱風乾燥し、各器官(葉、茎、穂木、根)ごとの乾物重を測定した。また葉位ごとに節間の距離(節間伸長量)を記録した。な

お、葉面積は葉の長径と短径を測定し、次の式で算出した。

$$\text{面積 (cm}^2\text{)} = 0.71 \times (\text{縦cm} \times \text{横cm}) - 9.2$$

3 実験結果

(1) 最終サンプリング結果

浄化-酸区, 浄化-水区, 非浄化-酸区, 非浄化-水区についてそれぞれの生長量の5株平均値及び初期生長

量平均値を表2に示した。また相対生長率（RGR）、純同化率（NAR）、葉面積比（LAR）を含めた各生長指数を酸区/水区及び非浄化区/浄化区について比較し、表3及び図2に示した。

一見して明らかな差が認められたのは、可視被害葉数と落葉数及び苗の高さで、この様子を写真に示した。

可視被害の特徴は、オゾンによる症状と一致し、その大部分が下位葉の黄化であった。全葉数は浄化区が非浄化区より少し多かったが、4区とも有意な差はなかった。乾物重では、穂木重を除き浄化区が非浄化区を明らかに上回っていた。一方、酸区と水区の比較では浄化区、非浄化区とも有意な差は認められなかった。RGRは乾物重と同じように浄化区で有意に高かった。RGRをNARとLARとに分解して調べるとLARには差がなく、非浄

化区のRGRの低下は専らNARの低下によることがわかった。

(2) 環境条件の測定結果

ア FAC内温度と外気温度

図3に配置期間中の浄化区、及び外気温度の推移を示した。浄化区と非浄化区の温度差をみると、平均値では浄化区が非浄化区を約0.5℃上回った。これは浄化区のファンによる熱など、構造的な原因と考えられた。外気温度とFAC内温度との差については、外気が30℃までは外気とFAC内温度にも大きな差がなかった。しかし、外気が30℃を越えると一気にFAC内温度が上昇し、最高温度では外気より2-3℃高くなった。期間中の室内最高温度は38℃であった。

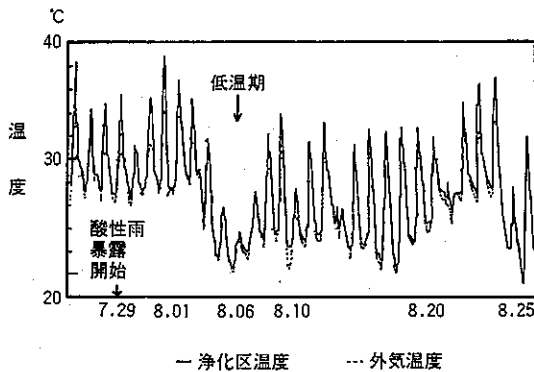


図3 期間中の気温推移

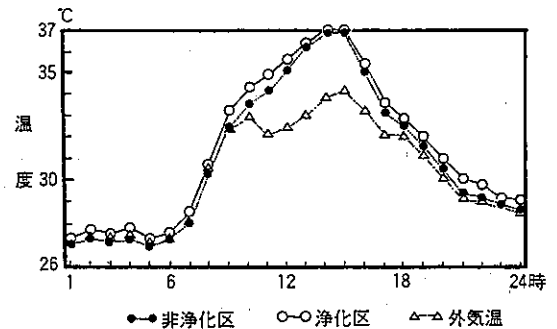


図5 浄化区、非浄化区の気温の変化（1991年8月2日）

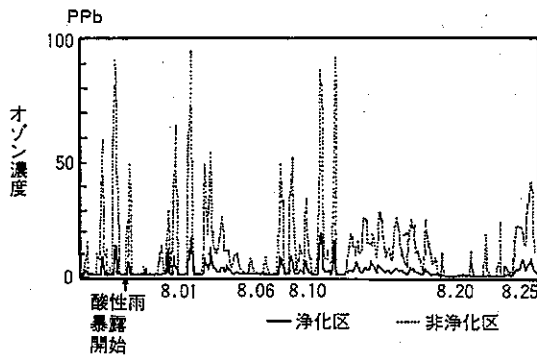


図4 オゾン濃度の推移（1時間平均値）

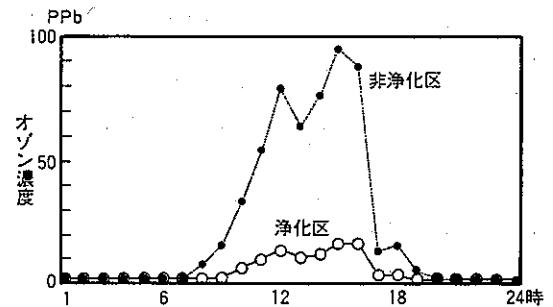


図6 浄化区、非浄化区のおゾン濃度の変化（1991年8月2日）

期間中の温度推移は、7月末から8月はじめに高かったが、8月5日から7日にかけて異常低温となり日射量も少なかった。8月6日の浄化区の最高温度は23.5℃であった。その後徐々に気温が上がり8月下旬には7月下旬と同じレベルに達した。

イ 大気汚染濃度

表4に期間中の二酸化硫黄と二酸化窒素及びオゾンの

1週間ごとの平均値を示した。図4にオゾン濃度の1時間平均値の推移を示した。二酸化硫黄とオゾンの浄化率は平均でそれぞれ91%、76%と高いが、二酸化窒素では約24%であった。非浄化区のオゾン最高濃度は100 ppb以下であった。オゾンの最高濃度が90 ppb程度に達したのは7月28日、8月2日、8月11日、8月12日の計4日間であった。

表4 1週間ごとの濃度平均値 (ppb)

週	NO ₂		SO ₂		O ₃		平均 期間		
	NF	F	NF	F	NF	F	NO ₂ , SO ₂		O ₃
	非浄化	浄化	非浄化	浄化	非浄化	浄化	hrs	days	date
1	34.0	25.9	7.88	0.89	14.2	3.30	161	6.71	8.29-8.04
2	33.8	25.6	6.68	0.27	10.9	2.78	162	6.76	8.05-8.11
3	15.8	12.3	0.94	0.10	13.8	2.90	163	6.78	8.12-8.18
4	19.8	14.5	4.34	0.30	6.9	1.80	163	6.77	8.19-8.25

代表事例として8月2日の浄化区及び非浄化区の気温及びオゾン濃度の経時変化を図5、図6に示した。

なお、一酸化窒素は植物に対する影響がごく小さいので測定しなかった。

(3) ポプラの生長と環境条件との関係

ア 気温や日射量の影響

前述のように、室内気温は外気に比べかなりの高温となったが、ポプラには高温障害の形跡は認められなかった。一方、図3をみると8月6日を中心として数日間低温が続いた。図7は浄化の酸区の葉位ごとの節間伸長を示したもので、節間伸長は22-24葉位付近で大きく低下していた。7月26日の調査からみて、これらの葉位は8月上旬にはまだ若く、茎及び葉が伸長している部分にあたり、節間伸長は気温及び日射量の低下と対応していたとみられる。つまり、気温や日射量の低下は、ポプラの伸長生長に大きな影響を与えることが示された。

イ 大気汚染の影響

ポプラ (I 45/51) はオゾンに敏感で、環境レベルの濃度で生長阻害が起こることが報告されている。非浄化区の二酸化硫黄や二酸化窒素の濃度からみて、浄化区と非浄化区の生長の差は主にオゾンによるものと考えられる。しかし、実験期間中のオゾン濃度は1時間最高値でも100 ppbを越えず、7月から8月の濃度としてはそれは

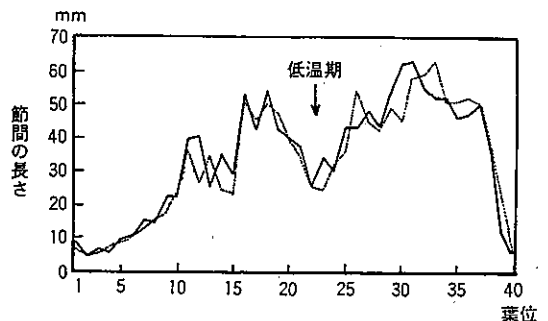


図7 ポプラ2個体の葉位ごとの節間伸長 (mm) (浄化区+水区の例)

ど高い値ではない。それにも係わらず、個体乾物重でみた場合、非浄化区の生長が浄化区のそれを30%弱も下まわっており、1か月間にこのような大きな差が現れるのは問題である。浄化区と非浄化区の空気質の違いは、活性炭で除去されるガス及びエーロゾル、粉じんなどである。従って、オゾン以外の何らかの物質がポプラの生長に複合的に関与している可能性も無視できないと思われる。

ウ 人工酸性雨の影響

葉の表面に付着した pH3.0の人工酸性雨は、ポプラの葉に可視被害を与えなかった。また生長に与える影響も

ごく小さく、浄化区、非浄化区とも酸区と水区との間の統計的な有意差は認められなかった。

なお、人工酸性雨の噴霧量が少ないので、葉からの栄養塩類の溶出やポット土壌の酸性化等が生長に与える影響は無視できるものと考えられたが、結果的にこれが裏付けられた。

4 結 論

既に表示したように浄化区の生長は酸区、水区の区別なく明らかに非浄化区を上回った。反対に、酸区と水区の生長差は浄化区、非浄化区に関係なく認められなかった。従って、次のように結論できる。

本実験条件下でポプラの生長に与える環境要因の影響を比較すると、「活性炭で除去できる大気汚染物質」(主としてオゾン)の寄与が大きく、人工酸性雨による生長影響は認められなかった。

今後は、酸濃度、噴霧量、暴露期間などについてもっときびしい条件で実験し、影響の有無を確認してみることが必要であろう。更に、対象樹種では、ポプラはオゾンに敏感すぎることもあり、常緑広葉樹や針葉樹の同一クローンでテストする必要がある。

おわりに、ポプラ植木については東京都農業試験場の久野 春子氏、横山 仁氏に協力いただいた。また、有意差検定にあたり農工大4年生の青木 博氏の協力を得た。ここに感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Schutt, P. Cowling, B. : Waldsterben, a General Decline of forest in central Europe, Symptoms, Development and possible causes, *Plant Disease*, 69, p. 548-558 (1985).
- 2) Matzner, E., Ulrich, B. : Results of Studies on Forest Decline in Northwest Germany. In : *Effects*

of Atmospheric Pollutants on Forests, Wetlands, and Agricultural Ecosystems, ed. Hutchinson, T. C. Meema, K. M., Berlin, Springer-Verlag, p. 25-42 (1985).

- 3) Prinz, B., Krause, G.H.M. : Development and Causes of Novel Forest Decline in Germany. In : *ibid.*, p. 1-24.
- 4) Sekiguchi, K., Hara, Y., Ujii, A. : Dieback of *Cryptomeria japonica* and Distribution of Acid Deposition and Oxidant in Kanto District of Japan, *Environmental Technology Letters*, 7, p. 263-268 (1986).
- 5) 高橋 啓二, 沖津 進, 植田 洋匡: 関東地方におけるスギの衰退と酸性降下物による可能性, *森林立地*, 28, p. 11-17 (1986).
- 6) 高橋 啓二, 沖津 進, 植田 洋匡: 関東・甲信地方におけるスギの衰退と大気二次汚染物質の分布, 98回日林論, p. 177-180 (1987).
- 7) Morikawa, Y., Maruyama, Y., Tanaka, N. Inoue, T. : Forest declines in Japan : mature *Cryptomeria japonica* declines in the kanto plains, *Proceeding of XIX IUFRO World Congress, Montreal*, p. 397-405 (1990).
- 8) 松本 陽介, 丸山 温, 森川 靖: スギの水生理特性と関東平野における近年の気象変動一樹木の衰退減少に関連して一, *森林立地*, 34, 1, p. 2-13 (1992).
- 9) 関東地方公害対策推進本部大気汚染部会: 昭和58年度, 光化学スモッグによる植物影響調査報告書, p. 48 (1984).
- 10) 久野 春子: 光化学オキシダントがポプラさし木苗の生育に及ぼす影響 第1報 空気浄化法によるポプラさし木苗の生長量, 落葉数などの経日・経年変化, *大気汚染学会誌*, 14, 7, p. 265-274 (1979).

Effects of Air Pollutants and Simulated Acid Mist on the Clonal *populus*.

Takeshi Oohashi, Kuniko Suga, Kazuyuki Aoki
and Keiko Kurita

(Abstract)

The seedlings of clonal *populus* were grown in the four treatments: non-filtered air + acid mist (pH 3.0), non-filtered air + deionized water (pH 5.6), charcoal-filtered air + acid mist and charcoal-filtered air + deionized water. The mist treatment (100ml per plant) was conducted during the night-time, 4 times a day, 5 days a week, for 4 weeks. The simulated acid mist consisted of a 1:1 mixture of 1/1000N H_2SO_4 and 1/1000N HNO_3 . The maximum concentration of ambient ozone during the experimental periods for 4 weeks was ca. 100ppb.

No visible foliar injury was observed in the seedlings grown in the charcoal-filtered chamber. In the seedlings grown in the non-filtered chamber, however, severe leaf damage was observed and the total plant dry weight was decreased by ca. 30% compared with that of the seedlings grown in the charcoal-filtered chamber. On the other hand, there was no significant effects of acid mist on the dry weight growth of the seedlings cultivated in both charcoal-filtered and non-filtered chambers.

From the results obtained in this study, it was considered that the seedlings of *populus* were relatively sensitive to ambient air pollutants such as photochemical oxidants, but not sensitive to acid mist.