

塩類化土壌とオゾン暴露に対するカラマツ属 3 種苗木の生理応答

～クロロフィル蛍光応答に着目して～

北海道大学農学部 坪奈津美

北海道大学農学院 汪 雁楠・菅井徹人

北海道大学農学研究院 渡部敏裕・斎藤秀之・澁谷正人・小池孝良

はじめに

今日、世界的な人口増加を受けて食糧と木材の需要が増加している。特に、環境資源としての森林と持続的な木質資源の生産のためには、激変する無機環境ストレスに対する応答を解明し、対策を建てる必要がある。一方、世界の灌漑地の5分の1が塩害によって経済的損失を受けており、過去20年間、75カ国の乾燥・半乾燥地帯の農地では毎日平均2,000 haが塩の蓄積が進んでいるといわれている⁽¹⁾。農耕・造林に適した土地面積は限られているため、現在ある造林地の維持だけではなく、塩類化した土壌の下での造林技術の向上を進めていく必要がある。

塩類化土壌は世界の内陸乾燥地において多く見られるが、とりわけ中国においては、国土面積の約1.03%に分布している^(8,10,11)。中国政府は、1999年から農地に適さない土地に植栽をして森林に戻していく退耕還林政策を行っており、中国東北部においてはダフリアカラマツ (*Larix gmelinii*) を植林している。なお、このカラマツ属樹木は、東シベリアから中国北部にかけて広く生息し、中国東部の主要造林樹種である。

また、中国東北部において土壌劣化とともに懸念されているのが、対流圏オゾン濃度の増加である。人為活動に由来する窒素酸化物や揮発性有機化合物が増加したことによって、地上0~11kmの高さである対流圏において紫外線を介しオゾンが大量発生している⁽²⁾。対流圏オゾン（以下、O₃）は、産業革命頃から増加を続けており、その濃度増加は特にアジア地域で顕著であることが報告されている

^(1,6)。

このような環境条件を考えると、中国東北部においてはカラマツ属林に対してNaCO₃やNaHCO₃といった炭酸塩の集積とO₃によるストレス両方が影響を与えていると考えられる。実際、土壌中の塩濃度が高いことで、根圏の水ポテンシャルが低下し、気孔が閉鎖気味になる。さらに、吸収する金属イオンの過不足が生じ、水と必須元素が得られずNaが過剰集積する。これらの結果、体内の酵素の働きが阻害されて光合成速度の低下が起こる⁽³⁾。また、O₃が植物体に吸収されることで気孔の開閉、光合成、養分貯蔵・分配機能などの生理活動を阻害する。とりわけ塩類による気孔閉鎖は気孔を介して取り込まれるO₃の抑制効果としても働く可能性があり、結果として成長は抑制されてもO₃による光合成機能低下が軽減される可能性がある。本研究では、この点に注目した。

植林された人工林は間伐期を迎えるため、続く主伐後の再造林を見据えて、塩類集積とO₃濃度の上昇による影響を、苗木の成長・光合成能力に注目して評価する必要がある。そこで中国東北部で植林されているダフリアカラマツの変種であるグイマツ (*Larix gmelinii* var. *japonica*) と同じカラマツ属であるカラマツ (*Larix kaempferi*)、この二つを両親とするグイマツ雑種F₁を用い、塩類付加とO₃暴露の影響を光合成の初期過程 (PS II : 酸素発生系) を診断できるクロロフィル蛍光反応に着目して調べた。

Natsumi TSUBO(School of Agriculture, Hokkaido Univ.,Sapporo, 060-8589), Yannan WANG, Tetsuto SUGAI(Graduate School Agriculture, Hokkaido Univ., Sapporo), Toshihiro WATANABE, Hideyuki Saito, Masato SHIBUYA, Takayoshi KOIKE(Research Faculty of Agriculture, Hokkaido Univ.,Sapporo)

Evaluation of photosynthetic activities of 3 kinds of larch seedlings treated with simulated soil salinization and elevated ozone.

材料と方法

本研究は、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て行った。材料として、道総研・林業試験場から提供された2年生のニホンカラマツ、グイマツ、F₁を用いた。4月中旬に苗木を1Lポットに植栽し、9月末まで育成した。土壌は、従来の研究成果⁽⁹⁾との比較と水分調製が容易な鹿沼土と赤玉土を1:1で混合して用いた。

植栽した2か月後に、天井の開いた開放系の OTC (Open Top Chamber : 1.2 x 1.2 x 1.2 m) の内部へ苗木を移動し、6月中旬から9月末の約3か月間 O₃ を暴露した。処理区は対照区、O₃区、塩類区、複合 (O₃+塩類付加) 区の4処理4反復を設け、樹種ごとに4個体用いた。ただし、F₁は4処理3反復でそれぞれ3個体用いた。O₃区、複合区の平均 O₃ 濃度は約 70 ppb (nmol O₃mol⁻¹) とした。対照区と塩類付加区では大気条件 (約 30 ppb) とした。また塩類付加処理は、中国東北部における土壌の組成を参考にし、NaCl と NaHCO₃ を 1:9 に混合した濃度 20 mmol/L の溶液を 200ml, 3~4 日に1回塩類付加区と複合区に与えた。雨水による影響を回避するため一雨毎に OTC 天井部にフィルムを開口部 20%程度になるように養生した (図1)。

クロロフィル蛍光の測定は、PAM 蛍光測定器 (PAM-2000, Waltz, Germany) を用い、Fv/Fm (酸素発生系の効率の指標) と ETR (電子伝達速度 : 光合成ガス交換機能と対応関係がある) を測定した⁽⁶⁾。苗木を農学部暗室にて約12時間暗順化させた後 (午後8時から翌朝8時)、長枝の葉数枚をリーフクリップで挟んで測定した。測定は7月、8月、9月に行った。

統計解析には統計ソフト R パッケージ (ver.3.3.2) を用い、固定因子を塩類付加と O₃、従属変数を各測定値として、二元配置分散分析 (ANOVA) を行った。



図1 オープントップチャンバーと雨水防止用天蓋 (A 領域紫外線を透過する)

結果と考察

Fv/Fm, ETR ともに処理間における有意差は検出されなかった (表 1, 2, 3, 4)。また、ETR は Fv/Fm と同様の傾向であった。用いた土壌が貧養であり塩類付加による養分不均衡、乾燥による気孔閉鎖などが重なって対照区においても成長が抑制されたと考えられる。

また、O₃暴露による有意差も検出されなかった。これは、塩類付加による土壌水ポテンシャルの低下によって気孔が閉鎖し、O₃の吸収も抑制されたためと考えられる。

塩類付加区においては、Fv/Fm の値においてカラマツと F₁で増加傾向が見られた (表 1,2,4)。乾燥ストレスを与えられた個体では葉の窒素濃度が上昇し光合成速度が高くなるという事例がある⁽⁴⁾。今回塩類付加により吸水阻害が起き、乾燥状態になったことで葉の窒素濃度が増加して一時的に光合成能力が高くなった可能性がある。今後 LMA や葉内窒素濃度を測定し、考察する必要がある。

グイマツに関しては、Fv/Fm, ETR ともに複合区で増加傾向が見られた (表 1, 3)。グイマツにおいて塩類付加と O₃暴露によるストレスが緩和される可能性があることが示唆された。これらの複合影響を調べるため、気孔コンダクタンスや水ポテンシャルを測定することを今後の課題としたい。

表1 3樹種における Fv/Fm

	対照区	塩類	O ₃	複合
カラマツ	0.702 (±0.010)	0.719 (±0.022)	0.698 (±0.009)	0.730 (±0.015)
グイマツ	0.733 (±0.016)	0.685 (±0.026)	0.709 (±0.014)	0.727 (±0.014)
F ₁	0.699 (±0.020)	0.744 (±0.014)	0.714 (±0.020)	0.740 (±0.010)

表2 分散分析表 (カラマツ) (有意差 : * : p<0.05)

	自由度	平方和	平均平方	F 値	P 値
塩類	1	0.008	0.008	2.557	0.116
O ₃	1	0.001	0.009	0.298	0.587
塩類×O ₃	1	0.002	0.002	0.567	0.455
残差	53	0.160	0.003		

表 3 分散分析表 (グイマツ) (有意差 : * : p<0.05)

	自由度	平方和	平均平方	F 値	P 値
塩類	1	0.001	0.001	0.216	0.644
0 ₃	1	0.004	0.004	0.868	0.356
塩類×0 ₃	1	0.013	0.013	2.917	0.094
残差	53	0.244	0.005		

表 4 分散分析表 (F₁) (有意差 : * : p<0.05)

	自由度	平方和	平均平方	F 値	P 値
塩類	1	0.008	0.008	3.581	0.069
0 ₃	1	0.000	0.000	0.001	0.975
塩類×0 ₃	1	0.000	0.000	0.117	0.734
残差	28	0.065	0.002		

謝辞

実験材料 (カラマツ類 3 樹種) を提供いただいた道総研・林業試験場の来田和人, 今博計, 石塚航氏はじめ皆様に深く感謝いたします。

引用文献

- (1) Ainsworth, A., et al. (2012) The effects of tropospheric ozone on net primary productivity and implications for climate change. *Ann Rev Plant Niol.*, **63**: 637-661.
- (2) アジア大気汚染研究センター 増え続ける対流圏オゾンの脅威 <http://www.acap.asia/acapjp/doc/ozone.pdf>

- (3) Asish KP and Anath BD (2005) Salt tolerance and salinity effects on plants: a review *Ecotoxicology & Environ Safety* **60**: 324-349
- (4) 北岡哲 (2007) カラマツ不成績造林地に侵入した落葉広葉樹雅樹の環境応答に関する研究 北大演研報 **64**: 37-90
- (5) 北尾光俊 (2004) 樹木の光合成に及ぼす環境ストレスの影響 日林誌 **86**: 42-47
- (6) Mori R and Boreal FR (2000) Characteristics of the forest in Hokkaido. *Bor. For. Res.* **105**: 101-104.
- (7) UNU; World Losing 2,000 Hectares of Farm Soil Daily to Salt Induced Degradation, <http://unu.edu/mediarelations/release/world-losing-2000-hectares-of-soil-daily>, 28 October
- (8) 王遵亲 (1993) 中国塩類土壌 (中国盐渍土), 科学出版社, 北京.
- (9) Sugai, T., Kam, D-G., Agathokleous, E., et al. (2018) Growth and photosynthetic response of two larches exposed to O₃ mixing ratios ranging from pre-industrial to near future. *Photosynthetica* **56**: DOI:10.1007/s11099-017-0747-7.
- (10) Xu L, Wang ZC, et al. (2011) A Review of Saline-sodic Soil and Tillage Amelioration in Northeast of China, *Chinese Agricultural Sci Bull.*, **27**:23-31.
- (11) Zhang SW, Yang JC, et al. (2009) Changes of Saline-alkali land in Northeast China and its cause since the Mid-1950s, *Jou Nature Sources*, **25**: 435-442.