

塩類化土壌で生育させたグイマツ苗木初期成長に対するオゾン付加の影響

北海道大学農学院 汪 雁楠・菅井 徹人

北海道大学農学部 坪 奈津美

北海道大学農学研究院 渡部 敏裕・小池 孝良

はじめに

乾燥地や半乾燥地において、灌漑による浅層地下水の上昇が農地の塩類集積を促進するという問題が指摘されている。実際に、世界の多くの内陸乾燥地では土壌の塩類化がみられており、中国でも塩類化土壌は国土面積の約1.03%に分布している^(14,19,21)。中国東北部では、高温の夏には毛細管現象によって地表面に塩類が集積し、降水量が400~700mm/年と少ないため、塩類の流出は少なく、さらに塩類が地表に運ばれる過程をたどる。このため、中国東北部では土壌の塩類化は進行する一方であり、また、塩類（主にNa₂CO₃やNaHCO₃）の集積が進行することによる土壌の強塩基性化も深刻化している。例えば、黒龍江省のソンネン平原では、1,700万haの平原のうち、320万haが塩類集積の影響を受けており、また、毎年20,000haの面積で新たに塩類集積や土壌のアルカリ化の問題が発生している⁽¹⁶⁾。

塩害が樹木に及ぼす影響は、主に、土壌の高い塩分濃度による土壌水ポテンシャルの低下（吸水阻害）と、樹体内に侵入した塩分が代謝を攪乱するイオン・ストレスの両者が挙げられる。吸水阻害は樹体内の水不足を引き起こして樹体内の塩分濃度を上昇させ、代謝阻害が生じて光合成機能が低下する。加えて、気孔が閉鎖することで蒸散が押さえられることで、さらに吸水が阻害される。そして、ナトリウムは流亡しやすいカチオンであり、テンサイなど特定の植物しか必要としていない^(6,7)。しかし、アルカリ塩類の影響評価を行うためには塩類制御が困難なため研究例は極めて限られている^(11,17)。炭酸塩が過剰な土壌環境では、限られた作物しか生育出来ない^(12,13)。

土壌の塩類化に関する問題に加えて、東アジアにおける越境大気汚染として、対流圏（地表付近から11km）オゾン（O₃）の増加に伴う悪影響が注目されている⁽¹⁾。気孔から吸収されたO₃は酸化ストレスとして光合成をはじめとする生理反応を阻害し、成長様式も変化させる。このため、造林樹種に対するO₃の影響評価が必要であるが、その知

見は極めて限られている^(1,3,4)。

中華人民共和国（中国）では、1999年から「退耕還林政策」を試行し、傾斜地など生産性の低い農地を林地に変換することで、森林のもつ公益的機能のうち特に水土流出防止機能の強化に努めてきた。また、2003年からは本政策を中国全土で本格的に推進している。中国東北部の乾燥・半乾燥地域では1999年から同政策のもとでカラマツ類の植林が進められており、約25年後の間伐時期を経て、主伐と再植林の時期を迎える。この地域では、先述の通り広域で土壌の塩類化が進行し、表層へのナトリウム塩の過剰蓄積に加え、高pHという状況が生じている。さらに、将来的には地表付近でのO₃濃度の上昇も懸念される。

そこで、将来の再植林に備えて、中国北東部の主要造林種であるダフリアカラマツ（*Larix gmelinii*）の成長に対する土壌塩類濃度とO₃の影響を検討することが求められる。

本研究では、中国東北部主要造林種ダフリアカラマツの変種であるグイマツ（*Larix gmelinii* var. *japonica*）を用いて、アルカリ塩類を付加した土壌で生育したグイマツ苗のO₃への成長応答を調査した。

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(N43.07, E141.38, 50m a.s.l.)にて行った。O₃付加は天井の開いた開放系（1.2×1.2×1.2m；A領域紫外線を透過するビニルフレーム：農ビ）の施設：オープントップチェンバー(OTC) 16基を用いた（詳細はSugaiら⁽¹⁰⁾を参照）。

実験材料には、道総研・林業試験場から提供された2年生のグイマツ苗木（実生苗）を用いた。ポットに植栽した直後の地際直径と苗高はそれぞれ1.13±0.23mmと9.3±1.35cm（平均±標準偏差）となっており、4つの実験処理区（後述）間で均一なサイズになるよう個体を分配した。2017年5月に苗木を1Lポットに移植し、9月末まで育成した。土壌は、ポットでの植栽実験に多く用いられる

Yannan WANG, Natsumi Tsubo, Tetsuto Sugai, (School of Agriculture, Hokkaido Univ., Sapporo 060-8589), Toshihiro Watanabe, Takayoshi Koike (Research Faculty of Agriculture, Hokkaido Univ.)

Soil salinization affects the growth of larch seedlings under elevated O₃

土壌性質が既知の鹿沼土と赤玉土を1:1で混合して用いた。これは、貧栄養の火山灰土壌を模して用いている。

実験は、対照区、O₃付加区、塩類付加区、複合区(O₃+塩類付加)の4処理4反復とし、それぞれ4個体を配置し、処理区毎に合計16個体を用いた。

塩類化土壌の処理は濃度20 mmol/LのNaClとNaHCO₃の混合溶液(NaCl:NaHCO₃=1:9)を7月上旬から9月末まで、3-4日に1回付加した。

植栽後、活着を確認して1か月半後に苗木をOTCへ移動し、O₃付加区および複合区では6月下旬から9月末の約3か月間、6~18時までO₃暴露を行った。実験期間中のOTC内のO₃濃度は、対象区で約40 nmol/mol(以下ppb)、O₃付加区及び複合区で約70 ppb(日本の環境基準値を10 ppb上回る値)となっていた。降雨時には、雨水による影響を回避するため、OTCの天井部に紫外線を透過できる上記のフィルムを降雨の期間中のみ天井部の20%を開けて設置した(図-1)。



図-1 OTCの雨水対策

測定項目には、以下の3項目を設定した。

(1) 土壌分析: 9月25日、ポットの上層と下層を分けて土壌サンプリングし、化学性について、土壌のpH(1:2.5法)と土壌中の塩類濃度の指標として電気伝導率(EC)(1:5法)(機械名:東亜 DKK, ポータブル電気伝導率・pH計 WM-32EP, ディーケー株式会社, 日本製)を測定した(土壌環境分析法編集委員会, 1997)。

(2) 成長: 根元径と苗高の測定を7, 8, 9月に行った(1成長期間の変化を解析するため、9月の最終結果を解析に用いた)。根元径はノギスで、苗高はコンバックスで測定した。

(3) 乾燥重量: 光合成産物の各器官別への分配を推定するため、乾燥重量を測定した。9月25日~27日に全個体を掘り取った後、地上部と地下部に分けて、70℃に設定したオープンにて1週間乾燥させ、器官(葉, 枝, 幹, 根)ごとに乾燥重量を測定した。また、個体全体の乾物量に占める各器官の乾物量と茎根比(shoot-root ratio)を調べた。

pHの測定には試料の乾土質量と蒸留水の比が1:2.5になるように、蒸留水を試料に加えてよくかき混ぜてから1時間放置した。測定前に軽くかき混ぜて懸濁状態とし、ガ

ラス電極を静かに液中に浸し、30秒以上経過してpH計の表示が安定したらpH計を読み取った。ECについては、試料の乾土質量と蒸留水の比が1:5であることを除いて同じであった。

解析には統計解析ソフトRのver.3.4.2を用いた。測定した苗高と根元径から解析には苗高の成長量(9月苗高-初期値)と根元径の成長量(9月根元径-初期値)を用いた。統計処理は一般化線形混合モデルGLMMを用いて、対照区、O₃付加区、塩類付加区、複合区の比較を行った(応答変数:根元径成長量, 苗高成長量, 乾燥重量;説明変数:処理区;変量効果:OTC)。そして、TukeyHSD法を用いて、4処理区間の土壌pHとECの多重比較を行った。

結果

(1) 土壌pHと電気伝導率(EC: mS/m)

塩類付加により、土壌の表層, 下層ともにpHとECは上がっていた(表1-a, b)。

表1-a 土壌pHと電気伝導率(EC)

処理	pH		EC	
	表層	下層	表層	下層
対照	6.34	6.06	13.91	9.72
O ₃	6.42	6.07	10.33	9.07
塩類	7.91	7.26	45.81	43.02
複合	8.08	7.10	38.84	45.51

表1-b 土壌pHとECの多重比較の結果p値表

処理	pH		EC	
	表層	下層	表層	下層
O ₃	n.s.	*	n.s.	n.s.
塩類	***	***	**	***
複合	n.s.	*	n.s.	n.s.

(***: p<0, **: p<0.001, *: p<0.01)

(2) 成長量の比較

① 根元径成長量(図2): 根元直径に対して、全ての処理区において有意な効果は検出されなかった(表2)

② 苗高成長量(図3): 苗高に対して、全ての処理区において有意な効果は検出されなかった。しかし、苗高成長量はO₃付加区でやや高くなる傾向が見られた。O₃の影響で、対照区に比べて約46%の増加が期待される(表2)。

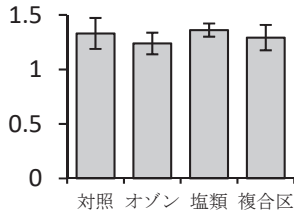


図-2 根元径成長量(mm)

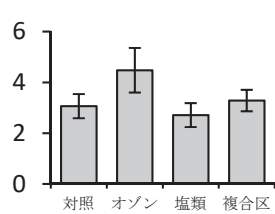


図-3 苗高成長量(cm)

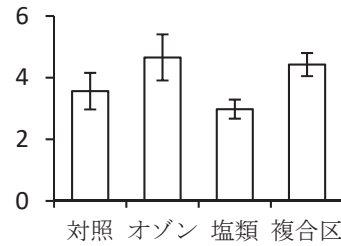


図-5 個体全量に占める枝重の割合 (%)

表-2 根元径と苗高成長量の GLMM 結果

項目	根元径成長量			苗高成長量		
	推定値	標準誤差	t 値	推定値	標準誤差	t 値
(切片)	1.33	0.11	12.25	3.07	0.59	5.19
O ₃	-0.09	0.15	-0.60	1.41	0.80	1.77
塩類	0.03	0.15	0.20	-0.34	0.80	-0.44
複合	-0.04	0.15	-0.25	0.22	0.80	0.28

(3) 乾燥重量の比較

O₃ 付加区, 塩類付加区, 複合区でも乾燥重量に有意な効果は見られなかった。しかし, 個体全体としての乾燥重量は塩類付加により低くなる傾向が見られた (表 3)。また, GLMM での比較から, 塩類付加の影響で約 14% の乾燥重量の抑制が期待される (表 3)。

器官別の重量には, 処理区間の差は見られなかった (図 4)。塩類付加区と複合区における枝の乾燥重量比 (個体全乾物量に対する枝乾物量の割合, 他の器官は有意な差が出てないため検討しない) には影響が見られなかったが (図 5), O₃ 区では係数推定値の値が大きく, 増加する傾向があった (表 3)。

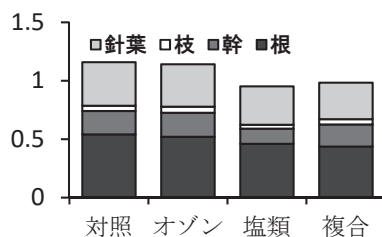


図-4 光合成産物の器官別分配 (g)

表-3 全重量の GLM 結果

項目	根			枝			幹			葉			全重量		
	推定値	標準誤差	t 値	推定値	標準誤差	t 値	推定値	標準誤差	t 値	推定値	標準誤差	t 値	推定値	標準誤差	t 値
(切片)	0.54	0.05	10.35	0.05	0.01	5.95	0.20	0.02	8.82	0.37	0.05	7.86	1.16	0.10	11.40
O ₃	-0.02	0.07	-0.28	0.01	0.01	0.75	0.01	0.03	0.17	-0.01	0.07	-0.16	-0.02	0.14	-0.13
塩類	-0.08	0.07	-1.08	-0.01	0.01	-1.30	-0.07	0.03	-2.22	-0.05	0.07	-0.76	-0.16	0.14	-1.14
複合	-0.10	0.07	-1.40	0.00	0.01	0.03	-0.01	0.03	-0.35	-0.06	0.07	-0.92	-0.18	0.14	-1.22
項目	根%			枝%			幹%			葉%			S/R		
項目	推定値	標準誤差	t 値	推定値	標準誤差	t 値	推定値	標準誤差	t 値	推定値	標準誤差	t 値	推定値	標準誤差	t 値
(切片)	46.76	1.27	36.73	3.56	0.54	6.64	19.02	1.77	10.73	30.81	1.92	16.06	1.15	0.06	19.14
O ₃	-1.66	1.56	-1.06	1.10	0.55	1.00	0.33	2.51	0.13	0.08	2.71	0.03	0.03	0.08	0.40
塩類	-1.01	1.56	-0.65	-0.58	0.55	-1.07	0.20	2.51	0.08	1.25	2.71	0.46	0.04	0.08	0.59
複合	-1.84	1.56	-1.18	0.86	0.55	1.57	0.86	2.51	0.34	-0.03	2.71	-0.01	0.09	0.08	1.24

考察

グイマツ苗木の成長 (苗高成長量と乾燥重量) は, O₃ 処理区でやや高い傾向にあったものの, いずれの処理も成長量に対する有意な効果は認められなかった (図 2, 3)。塩類処理は施さず O₃ と CO₂ 付加処理をカラマツ属に行った先行研究でも, 高 O₃ がグイマツ苗木の苗高成長量や根元径成長量に与える有意な抑制効果は見られなかったが, グイマツ雑種 F₁ では高 O₃ で肥大成長が抑制される傾向を確認した⁽⁵⁾。グイマツとグイマツ雑種 F₁ の成長速度の違いによって, O₃ の影響の有無が存在すると思われる。

一方, 本研究では, O₃ 処理区では枝の乾燥重量比が有意に増加した (図 5)。この結果に類似した現象は 35 年生の欧州ブナや日本のコナラの O₃ 暴露研究でも報告されており, サイトカイニンの影響であることが報告されている^(8,18)。本研究と同様の枝重量の増加は, グイマツ雑種 F₁ に対する高 O₃ 処理でも確認された^(2,10)。

塩類処理によって, pH と EC は塩類付加の行われていない処理区に比べ有意に増加していた。そして, 塩類付加処理区のグイマツ苗木の成長と幹重量では有意な差は無かったが, 幹重量は塩類付加によって抑制される傾向が見られた。今回の実験では, 塩類付加がやや低い濃度設定 (中国東北部塩類化地域では pH が 8.5 以上, さらに, 9-10.5 に達する地域もある) であったことから, 大きな成長量の低下が見られなかったと考えられる。また, 幹の肥大成長に対する大きな影響は見られなかった。しかし, 頂芽の分化 (苗高成長) や乾燥重量では, 塩類付加区だけでなく, O₃ 付加によって苗高成長の増加が期待される複合区においても苗高成長量が低下しており, 塩類処理の効果は出て

いると考えられる。そして、中国東北部のソンネン平原での調査によると、同地域では、一様に塩類集積が生じているわけではなく、パッチ上に塩が白く集積している部分と草場が入り混じっている⁽⁹⁾。このことから、土壌塩類化で成長が抑制されてしまう更新困難地帯では高濃度の塩類集積があり、今回の実験結果は、更新困難地域の中の弱度の塩害を再現したと考えている。

全体的に見て、グイマツ苗木では約 70 ppb 付近の O₃ 濃度では顕著な成長低下はないと考えている。O₃ 単体付加はホルモン量の変化等で樹高成長を促進するような効果があるものの、塩類付加のストレス（複合区含む）は地上部現存量を低下させる影響を与えている。

今後、針葉を中心にした栄養生理的解析を進め⁽²⁰⁾、高 O₃ と塩類化の影響を評価したい。これは、グイマツは外生菌根菌に依存した成長をするため、特にリンは感染の指標になるからである。

謝辞

本実験を進めるにあたり、貴重な材料を提供下さった道総研・林業試験場の来田和人、今博計、石塚航各氏と施設を管理下さった北大北方生物圏フィールド科学センターの市川一氏の支援を得た。また、北大農学部造林学研究室の学生諸氏から多大なる協力を頂いた。記して謝意を示す。

引用文献

- (1) 伊豆田猛 (2006) 植物と環境ストレス, コロナ社, 東京.
- (2) Kam D-G, Shi, C., Watanabe, M., Kita, K., et al. (2015) Growth of Japanese and hybrid larch seedlings grown under free-air O₃ fumigation—an initial assessment of the effects of adequate and excessive nitrogen. *Journal of Agricultural Meteorology* **71**: 239-244.
- (3) 小池孝良 (2004) 樹木生理生態学, 朝倉書店.
- (4) Koike T. et al. (2013) Effects of ozone on forest ecosystems in East and Southeast Asia. *Developments in Environmental Science*. **13**, Elsevier, 371-390.
- (5) Koike T, Mao Q, Inada N, et al. (2012) Growth and photosynthetic responses of cuttings of a hybrid larch (*Larix gmelinii* var. *japonica* x *L. kaempferi*) to elevated ozone and/or carbon dioxide. *Asian Journal of Atmospheric Environment* **6**:104-110.
- (6) 間藤 徹 (1997) 植物の耐塩性メカニズム. 植物の化学調節, **32**: 198-206.
- (7) 間藤徹, 馬建鋒, 藤原徹 (2010) : 植物栄養学, 文栄堂, 東京.
- (8) Matyssek R, Wieser G, Ceulemans R, et al. (2010)

Enhanced ozone strongly reduces carbon sink strength of adult beech (*Fagus sylvatica*): Resume from the free-air fumigation study at Kranzberg Forest. *Environmental Pollution* **158**: 2527-2532.

(9) 西村拓 ら (2012) 中国黒龍江省ソンネン平原の浅層地下水地域における塩類集積, 農業農村工学会論文集 **80**: 267-276.

(10) 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.

(11) Shi DC, Wang DL (2005) Effects of various salt-alkaline mixed stresses on *Aneurolepidium chinense* (Trin.) Kitag. *Plant and Soil* **271**: 15–26.

(12) 但野利秋 (2009) 約 40 年間の作物栄養学研究を振り返って, 肥料科学 **31**:1-74.

(13) 内山泰孝 (1988) 塩性環境の農業利用. 化学と生物 **26**: 650-659.

(14) 王遵亲 (1993) 中国塩類土壌(中国盐渍土), 科学出版社, 北京.

(15) Wang WJ et al. (2011) Changes in soil organic carbon, nitrogen, pH and bulk density with the development of larch (*Larix gmelinii*) plantations in China, *Global Change Biology* **17**: 2657-2676.

(16) Wang L, Seki K, Miyazaki T. et al. (2009) The Causes of Soil Alkalinization in the Songnen Plain of Northeast China, *Paddy and Water Environment*, **7**: 259-270.

(17) Wang HM, Wang WJ, Wang HZ, et al. (2013) Effect of inland salt-alkaline stress on C4 enzymes, pigments, antioxidant enzymes, and photosynthesis in leaf, bark and branch chlorenchyma of poplars, *Photosynthetica*, **51**:115-126.

(18) Winwood J, Pate AE, Price J, et al. (2007) Effects of long-term, free-air ozone fumigation on the cytokinin content of mature beech trees. *Plant Biology*, **9**: 265-278.

(19) Xu L, Wang ZC, et al. (2011) A Review of Saline-sodic Soil and Tillage Amelioration in Northeast of China, *Chinese Agricultural Science Bulletin*, **27**:23-31.

(20) Wang, X., Qu, L., Mao, Q., et al. (2015) Ectomycorrhizal colonization and growth of the hybrid larch F₁ under elevated O₃ and CO₂. *Environmental Pollution* **197**: 116-126.

(21) Zhang SW, Yang JC, et al. (2009) Changes of Saline-alkali land in Northeast China and its cause since the Mid-1950s, *Journal of Nature Sources*, **25**: 435-442.