

土壌の最大容水量がクロマツの根と生長に与える影響について（予報）

福山厚子¹・長谷川和久²・木下栄一郎¹・竹林文枝³・奥野正幸¹

1: 金沢大学 〒920-1192 石川県金沢市角間町 e-mail: fukuyama@staff.kanazawa-u.ac.jp

2: 石川県立大学 〒921-8836 石川県野々市市末松 1-308

3: 竹林造園株式会社 〒923-0915 石川県小松市細工町 73

The effect of soil maximum water capacity on root growth of Japanese black pine

Atsuko FUKUYAMA¹, Kazuhisa HASEGAWA², Eiichiro KINOSHITA¹, Masayuki OKUNO¹

1: Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa, 920-1192 Japan

2: Ishikawa Prefectural University, 1-308, Suematsu, Nonouchi-City, Ishikawa, 921-8836 Japan

3: Takebayashi Landscape Co., Ltd., Saikumachi, Komatsu-City, Ishikawa, 923-0915 Japan

Abstract

Three-year-old Japanese black pine seedlings were planted in pots with different maximum water holding capacity properties of soil, and measured one year later for investigate the effect of maximum water capacity, an indicator of soil drainage, on the growth of black pine. As a result, black pine trees in low maximum water capacity environmental soils had more leaves and better leaf color than black pine trees in high maximum water capacity environmental soils. They also grew taller and had longer roots. Tests of the average difference in viable bacterial counts in soils showed that low maximum water capacity soils had significantly higher bacterial counts at the 1% level than high maximum water capacity soils. This indicates that there are many bacteria in the soil and that the microorganisms are active.

Keywords: growth of black pine trees, soil drainage, soil environment

はじめに

福山 (2009), 福山ほか (2010) はマツ枯が問題となっている福井県坂井市三国町安島地域において表層地層の断面調査を実施した結果, 地表~深度 20cm は排水性が高く保水性の低い土壌層であるものの, 深度 20 cm~30 cm は難透水性の粘土層で, 深度 30cm 以深は直径 12~15 cm の礫を挟んで不透水性の固結度の高い地層であることを確認した. この場所ではマツ根が表層付近で横に広がる形で張っており, 倒木したマツ根の張り方も浅かった. これは, 排水性が悪く地質に起因する過湿によって根が生育阻害を受け, 粘土層以深には根が伸びなかった結果と考えられる. 観察場所の近くには水が滞留した沢もあるため, 排水性の低い地質が雨水を滞留させ, 根先端の伸長が阻害された可能性がある.

加えて, 近年の植物生理学的研究では, ケイ素 (Si) が植物の根の構造強化やストレス耐性に寄与することが報告されており, 排水性の低い土壌環境では Si が蓄積しやすく, 根の生育様式に影響を与える可能性も示唆されている (Epstein, 1994). また, カルシウム (Ca) は細胞壁の形成や根の伸長に不可欠な栄養素であり, その移動性は土壌の水動態に強く依存する (Marschner, 2012). 排水性の高い土壌では Ca の供給が活発となり, 根の伸長や分岐が促進される傾向がある.

さらに, 土壌の排水性は根の酸素供給にも関与し, 排水性が低く, 結果として通気性の悪い土壌では根の呼吸が阻

害され, 成長が抑制される (Kozłowski, 1997). 特にマツのような乾燥に強い樹種では, 過湿環境が根の生理機能に悪影響を及ぼす可能性が高い (三木, 2005).

一方, 筆者が関与して作成した人工的な土壌改良材は, 小松精練 kk 製の染色汚泥と珪藻土を混合し焼成スラグとしたものと, 凝灰岩を粉砕したものとを等量混ぜて作ったもので, Si が少なく Ca が多い特性を持つ. そこで, 本研究ではこの改良材を用いて排水性を示す最大容水量の異なる土壌を用いて, クロマツの樹と根の生長に与える影響について, 地質的・植物生理学的観点から試験を予想的に行なった.

ポット試験の概要

最大容水量の異なる土壌を充填したポット (A, B) を用意し, それぞれに 3 年生のクロマツ苗を植え, マツの生長 (樹長と根長) の観察・分析および土壌の理化学性について分析を行った. ポットからマツ苗を移植後, 約 2 カ月間の養生期間を置き 2011 年 8 月 26 日に試験をスタートし, 1 年後の 2012 年 8 月 30 日に供試マツの測定および土壌の分析を行った.

試験場所

試験地は石川県立大学の附属農場の屋外で, 日照を妨げる建物や樹木等の無い耕作地域において実施した (Fig.1). 試験には直径 16cm, 高さ 20cm の 1/5000a ポット (ポット側面下部に直径 3cm の排水口付き) を用いた. 試験区は A



Fig. 1 The arrow indicates the experimental area on the farm on the Ishikawa Prefectural University campus. The experimental area is located 36° 30' 35.6" N, 136° 35' 49.5" E. (Additions to aerial photograph taken by the Geospatial Information Authority of Japan on April 30, 2009).

と B の 2 箇所で (以降 A 区, B 区と呼ぶ), 1 区あたりのポット数は 3 連 (3 ポット) とした (試験区構成 Fig.2 を参照).

供試マツ

マツ苗は 3 年生クロマツを用いた. 鳥取大学乾燥地研究センター構内の実生 2 年生クロマツを植木鉢に移植し, 1 年間富山県小矢部市で養生した後, 試験に用いた. A 区には樹長約 20 cm・根長約 9 cm, B 区には樹長約 20 cm・根長約 11cm のマツ苗を用いた.

供試土壌

A 区では砂と土壌を 1 : 1, B 区では砂と土壌を 1 : 3 の重量比で混合した. この砂は粒径 2 mm 以下に粉砕した凝灰岩に, 染色汚泥と珪藻土を混合した小松マテレー kk (旧小松精練 kk) 製の焼成スラグ (以下スラグと称する) を等量混ぜたものである. この焼成スラグは 0.5mm~2mm の小粒で, 水はけを良くする土壌改良材 (小松マテレー HP より <https://www.komatsumatere.co.jp/greenbiz/category/karyu/>) としてマツ林などの一部の地域で現在使用されている. 土

A (sand : soils = 1 : 1)	Pot	Pot	Pot	N ↑
B (sand : soils = 1 : 3)	Pot	Pot	Pot	

Fig. 2 Experimental plots for the relationship between pine seedling growth and maximum water holding capacity of soil at Ishikawa Prefectural University Farm.

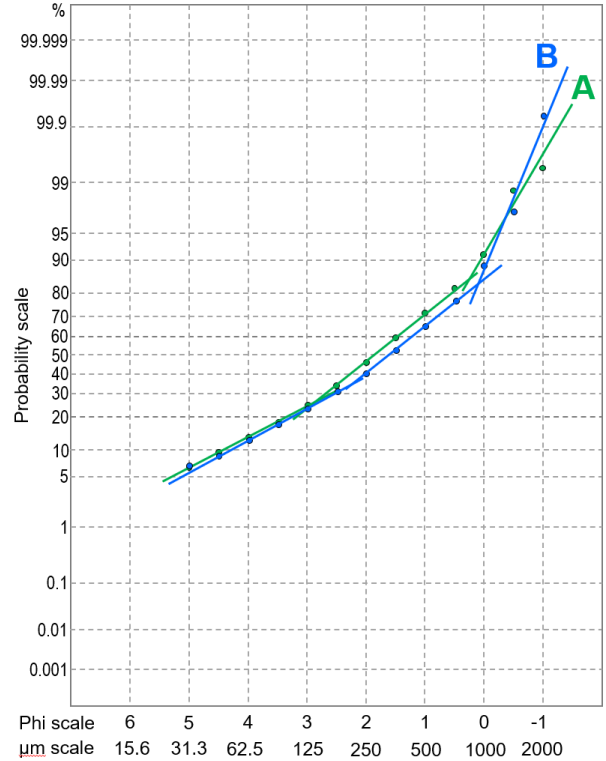


Fig. 3 Distribution of soil grain Phi scale of the experimental plots A and B.

壤は石川県立大学附属農場の砂壤土 (畑土) を用いた. この土壌は団粒構造を形成し, 色は標準土色帖 (小山・竹原, 2003) によるオリーブ黒色 5Y3/2 を呈し, pH は 6.8 である.

土壌の理化学分析方法

土壌分析および生菌数測定は, ポットの土壌を採取し, 土壌環境分析法 (日本土壌肥料学会監修, 1997) に準拠して分析を行った.

エネルギー分散型蛍光 X 線分析

風乾した供試土壌を乳鉢で粉末にし, ペレットを作成した後, エネルギー分散型蛍光 X 線装置 (日本電子(株)製 ED-XRF: JSX-3201, Rh-K α 線源) を用いて, 加速電圧 30kV, 測定時間 900 秒で分析値の合計が 100%になるよう計算する半定量的元素分析を行った.

最大容水量と地層の透水性

A 区・B 区の土壌は, 排水性や土壌の保水性を相対的に比較するため, 一定容器に試料を詰め底面から自然吸水さ

Table 1 Chemical composition of slag by ED-XRF.

Al	Si	K	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Sr	Total
11.55	30.50	2.18	42.75	2.40	0.02	4.80	5.45	0.35	100.00

(Wt.%)

Table 2 ED-XRF analysis of the soil A and B. Values in weight percent.

	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Sr	Total
A	0.88	11.13	45.04	1.05	7.26	17.40	2.05	1.05	14.02	0.12	100.00
B	0.81	11.61	46.98	0.87	7.75	13.92	2.16	1.10	14.80	-	100.00

(Wt.%)

- : not detected.

Table 3 The average value of number of new leaf needles, tree growth and root elongation in the experimental plots (n=3).

Experimental plots	Number of new leaf needle	Tree growth (cm)	Root elongation (cm)
A	900	11.7	112.9
B	700	5.1	72.7

Table 4 Maximum water holding capacity of soil in the experimental plots A and B.

Experimental plots	Mixture ratio	Maximum water holding capacity
A Penmeability improved experimental plot	sand : soils = 1 : 1	41ml/100g
B Penmeability control experimental plot	sand : soils = 1 : 3	44ml/100g

Table 5 Measurements of pH and EC.

	A		B	
	pH	EC (mS/cm)	pH	EC (mS/cm)
2011/6/26	7.7	0.178	7.5	0.12
2011/8/26	7.2	0.083	7.2	0.092
2012/8/30	7.1	0.068	6.6	0.088

Table 6 Analysis of cation exchange capacity (CEC), exchangeable cations (Ca, Mg, K), and humus.

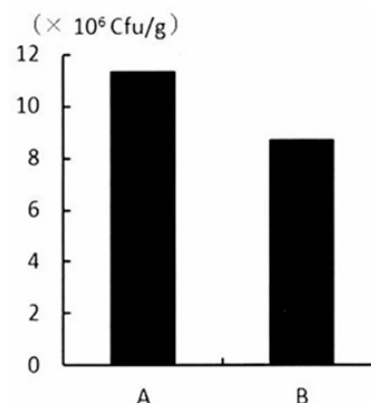
Experimental plots	CaO(mg/100g)	MgO(mg/100g)	K ₂ O(mg/100g)	CEC(meq/100g)	humus(%)
A	1282	15	14	9.0	2.39
B	1103	62	12	13.8	2.59

せてその増加量を計る Hilgard 法により最大容水量（日本土壤肥料学会監修，1997）を求めた．この値が小さい方は保水性が低く灌水が速く排水することを意味する．

透水性については，植物の根があり不攪乱試料の採取が困難なため，A 区と B 区の土壤を乱した試料として 100g～200g 採取し，風乾後，粒度分析を行い，これを基に Creager et al. (1944) による地層の粒径と地層の透水係数との関係から，各区の土壤の透水係数を求めることとした (Fig.3)．そこで各区の土壤の粒度分析はメッシュの目開きが 0.5 φ ほどの篩により行い，10 分間振とうさせた後，篩上に残った試料の重量を測定し求めた（宮本ほか，1983）．

土壤 pH，伝導度 EC

pH (H₂O) は，土壤：水 = 1:2.5 の懸濁液を HORIBA 製 pH メータにより測定した．操作は 125ml 容器に風乾した土壤 10g に水 25ml を加えて振とうして 1 時間放置後，ガラス電極棒を浸して測定した．

**Fig. 4** Elongation example of the black pine seedling of A (sand : soils = 1:1) and B (sand : soils = 1:3)**Fig. 5** Viable cell count in soils (n=5).

EC は，土壤：水 = 1:5 の懸濁液を HORIBA 製の電気伝導度計により測定した．操作は乾土 10g 相当量の未風乾土壤に水を添加して 1:5 に調整し，1 時間振とう後，電極を浸して測定した．

陽イオン交換容量 (CEC)・交換性陽イオン (Ca, Mg, K), 腐植

陽イオン交換容量 (CEC) はショーレンベルガーのセミマイクロ法によった．

交換性陽イオンは pH 7.0 の酢酸緩衝液で溶出させ，カルシウム (Ca)，マグネシウム (Mg) はキレート滴定法，カリウム (K) は炎光度法にて求めた．

腐植はチューリン法により土壤中の炭素含量を求め，炭素含量%に 1.724 を乗じて算出した．

生菌数測定

生菌数の測定については希釈平板法により未風乾土を

用いて以下のように行った。カゼイン-スイ消化ペプトン 5g, 酵母エキス 2.5g, ブドウ糖 1g, 寒天 15g で作成した培地を用い, 1つの試料に5枚の平板を使用した。10⁵まで希釈した試料を培地表面に塗布した後, 28°Cで7日間培養し, 出現したコロニーを計数した。さらに, 5枚の培地の計数値より算出した値を平均して各試料の値とした。

結果および考察

エネルギー分散型蛍光 X線

Table1 にスラグの組成, Table2 に A 区・B 区の土壌の組成を示す。特に, 根の生長に影響を与える Si と Ca に着目すると, スラグの組成は Si が一般の土壌に比べて 30.50% と少なく, Ca が 42.75% と非常に多く, 土壌改良材としての有効性が期待できる。A 区・B 区の土壌の組成についてみると, Si は A の土壌の方がやや少なく, Ca は A の土壌の方が多いことから土壌改良材の影響が成分的にも読み取れる。また, Table2 に示すように, A 区および B 区の土壌からはいずれもリンが検出された。これは, 既述の通り大学付属農場由来の砂壤土が混在しているためと考えられる。さらに, A 区の土壌からはストロンチウムが検出され, これはスラグ由来である可能性が高い。

最大容水量と地層の透水係数

最大容水量を求めた結果 (Table 4), 土壌 100g 当たり A 区は 41 ml, B 区は 44 ml であった。最大容水量は小さいほど保水性が低く, 灌水が速く排水する指標ともなるので, A 区の土壌は B 区の土壌より約 3ml 排水性が高いことを示す。

地層の透水性を求めるために行った粒度分析の結果については, 各篩を通過した重量比の正規確率スケールを縦軸に, ϕ スケールの粒度を横軸としてグラフを作成した (Fig. 3)。両区の土壌は粒度組成が近似しており, 透過率 50% の時の粒径である中央粒径は, A 区が 273 μ m (1.875 ϕ) の中粒砂, B 区が 324 μ m (1.625 ϕ) の中粒砂と, わずかに B 区の方が粗い。Creager et al. (1944) の透水係数を求めるのに必要な透過率 20% の時の粒径は, A 区が 96 μ m (3.375 ϕ), B 区が 103 μ m (3.275 ϕ) である。これより透水係数は, A 区が 1.5×10^{-3} cm/sec, B 区が 1.8×10^{-3} cm/sec であり, わずかに B 区の方が透水性が良い。現場での実測値は, この Creager et al. (1944) による推定値に対し, 泥質分含有量による影響が稲崎・小西 (2010) により指摘されていることから, 両区の試料の 4 ϕ (62.5 μ m) 未満の泥質分含有量を見てみると, A 区で 13.1%, B 区で 12.5% とこの含有量に大きな差は認められない。以上のことから, A 区と B 区の土壌の透水性には大きな違いは認められない。

以上のことから A 区と B 区の土壌について, 粒度組成はほぼ同じで地層の透水性についてもほぼ同様であるものの, 最大容水量は B 区の方が A 区よりも 3ml 多く, 排水性が悪いことが明らかとなった。

排水性の異なる土壌のマツの生長比較および土壌環境

樹木および根の伸長量を 1 年間測定した結果 (Fig. 4, Table 3), 樹高は A 区で平均 11.7 cm, B 区で 5.1 cm, 根長は A 区で 112.9 cm, B 区で 72.7 cm であり, いずれも A 区で有意に大きかった (樹: $t = 7.655$, $df = 4$, $p < 0.01$; 根: $t = 8.671$, $df = 4$, $p < 0.01$)。葉数については有意差が認められなかったものの ($t = 2.123$, $df = 4$, $p > 0.05$), A 区の葉色は B 区より濃緑であった。

根圏の観察では, A 区において白色菌糸が豊富に確認され, B 区ではほとんど認められなかった。生菌数も A 区 (11.32 Cfu/g) が B 区 (8.72 Cfu/g) より有意に高く ($t = 3.937$, $df = 8$, $p < 0.01$), A 区は微生物活性が高い環境であったことが示唆される (Fig. 5)。

土壌化学性の変化について, 試験開始時 (2011 年 6 月 26 日) の pH は A 区で 7.7, B 区で 7.5 と弱アルカリ性を示したが, 2 か月後には両区とも pH 7.2 と中性に変化した (Table 5)。EC は A 区で 0.178 mS/cm から 0.074 mS/cm へ, B 区で 0.120 mS/cm から 0.092 mS/cm へと低下した。これは苗の活着過程で窒素や塩基類が植物に吸収されたためと考えられる。さらに 1 年後, A 区では pH が 7.1 と変化はほとんどなく, EC が 0.068 mS/cm と減少し, 窒素や塩基類が植物に吸収されたことが示唆される。これに対し, B 区では pH が 6.6 と低下し土壌環境の悪化が見られ, EC は 0.088 mS/cm と減少量が少なく窒素や塩基類が植物にあまり吸収されていないことが示唆される。

交換性塩基量 (Table 6) から, B 区ではマグネシウムが相対的に少ないことが要因と推察される。

CEC 値は B 区の方が高く, これは畑土の割合が影響したと考えられる。一方, 腐植含有率は A 区で高く, 窒素供給が豊富であったことが樹木および根の生長促進に寄与したと考えられる。この傾向は生菌数の結果とも一致している。

XRD 分析による元素組成比較では, A 区の Ca 濃度が高く, 微生物の細胞壁形成や酵素活性を促進する要因となった可能性がある (Sylvia et al., 2005)。一方, Si 濃度は B 区で高く, Si は植物のストレス耐性や根の構造強化に寄与するが, 過剰な蓄積は微生物群集構成や栄養吸収を制限する可能性がある (Epstein, 1994; 田中ほか, 1987; Ma & Yamaji, 2006)。

以上の結果から, 土壌の排水性の良い A 区では, 微生物活性および養分移動性に影響があり, Ca 供給が良好となることで A 区ではクロマツの根・樹の生長が顕著に促進されたと考えられる。また, XRD 分析で得られた元素濃度の差異は, 微生物活性および植物生長の差異と密接に関連するとともに, 土壌の排水性が複合的に作用している可能性があると考えられる。

今後は最大容水量の 3ml の違いが, このように大きな生長の差となった主因なのかについて, 最大容水量を段階的に変えて生長に及ぼす影響をさらに検討する必要がある。

まとめ

本研究により, 土壌の排水性を示す最大容水量や土壌中の Si, Ca の含有量の違いが, クロマツの根および樹の生長

に顕著な影響を与えることが示唆された。排水性の良好な土壌では、Ca 供給と微生物活性が促進され、根の伸長と樹の生長が有意に増大したことが示された。一方、排水性の劣る土壌では Si の蓄積や塩基類の減少がみられ、微生物活性が低下し、生長が抑制されたと考えられる。以上より、土壌の排水性は養分移動性と微生物環境を介してクロマツの生育に複合的な影響を及ぼすことが示唆された。

謝辞：金沢大学の柿川真紀子准教授には生菌数測定に関するご指導をいただいた。さらに内田新二、福山健一、伊東志穂の各位には試験協力いただいた。千葉県環境研究センター地質環境研究室の風岡修博士からは、地層の粒度分析と透水性についてご指導いただいた。これらの方々に心から感謝申し上げる。

引用文献

- Creager, W.P., Justin, J.D., and Hinds, J., 1944, Chap. 16 soil test and their utilization. In *Engineering for dams, Vol. III Earth, Rock-fill, Steel and Timber Dams*, John Wiley & Sons, 645–654.
- Epstein, E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 91, 11–17.
- 福山厚子・鈴木祐恵・佐藤禮子・内田新二・田崎和江, 2009, 福井県坂井市三国町安島のクロ松大量枯死に見られる酸性雨の影響について, 地質汚染—医療地質—社会地質学会, Vol.5 p.71–83.
- 福山厚子・長谷川和久・奥野正幸・田崎和江・風岡修・古野邦雄・川辺孝幸, 2010, 福井県坂井市三国町安島のクロ松の立ち枯れと表層地質の関係, 第 20 回環境地質学シンポジウム論文集, 255–258.
- 稲崎富士・小西千里, 2010, 堤防基礎地盤における透水係数と粒度特性の関係. 河川技術論文集, 16 卷, 377–382.
- Itamar, A. S. Roland, C.W. Steffen A. S. Daniel, H. B. & Johannes, L. 2023. Calcium promotes persistent soil organic matter by altering microbial transformation of plant litter. *Nature Communications*. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-42291-6.pdf>
- 国土地理院, 2009, 空中写真. 整理番号 CCB20092, コース番号 C7, 写真番号 1. https://service.gsi.go.jp/map-photos/app/map?search=photo&limit=200&search_date_from=2005&search_date_to=2015&color_type_ids=1%2C2&scale_from=0&scale_to=99999999&lon_min=136.5717315935763&lon_max=136.62014010187707&lat_min=36.49604095095128&lat_max=36.520048920246566#14/36.513777779999984/136.5965 (2025 年 12 月 22 日閲覧)
- Kozłowski, T. T. 1997. Responses of woody plants to flooding and salinity. *Tree Physiology Monograph*, vol.1, 1–29.
- Marschner, P. 2012. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic Press, 490P.
- Ma, J. F., & Yamaji, N. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*, 11(8), 392–397.
- 三木直子. 2005, アカマツ(*Pinus densiflora* Sieb. Et Zucc.)の生態生理学的特性とマツ材線虫病発現の関係. 岡山大学農学部学術報告, 94 卷, 91–94.
- 宮本隆実・鈴木一久・志岐常正, 1983, 第IV章 砂・砂岩 C. 粒度組成. 碎屑性堆積物研究会編 地学双書 24 堆積物の研究法, 地学団体研究会, 164–212.
- 日本土壌肥料学会監修, 土壌環境分析法編集委員会編, 1997, 土壌環境分析法. 株式会社博友社, 427P.
- 小山正忠・竹原秀雄, 2003, 新版標準土色帖. 日本色研事業株式会社.
- Sylvia, D. M., Fuhrmann, J. J., Hartel, P. G., & Zuberer, D. A. 2005. *Principles and Applications of Soil Microbiology* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall, 640P. https://www.researchgate.net/publication/265885976_Principles_and_Applications_of_Soil_Microbiology_Edited_by (2025 年 9 月 28 日閲覧)
- 田中 明・長 智男, 1987, 土壌の保水性及び透水性と作物根への水分供給力, 九大農学芸誌 41 卷, 63–70.