

松葉の有効利用による屋上緑化に関する研究

真鍋 将一 ・ 田中 明

佐賀県唐津市松南町152-1 佐賀大学海浜台地生物環境研究センター

Research on the roof tree planting by effective use of pine needles

Shouichi MANABE, Akira TANAKA

Marine and Highland Bioenvironment Center, 152-1 Shounan-cho, Karatsu, Saga 847-0021, Japan

要 約

虹の松原の衰退につながる松葉の堆積の対策として、松葉を屋上緑化の土壌代替材として利用することを試みた。保水性・軽量性を比較するために、「松葉」「松葉炭」「粉碎松葉」「粉碎松葉炭」「木炭」「マサ土」の6種類を用意した。保水性は芝生が無灌漑で枯れない期間と可能蒸発量・蒸発散量の関係を調べることにより検証した。その結果、松葉、マサ土、松葉炭、粉碎松葉炭、木炭、粉碎松葉の順に枯れ、松葉以外はマサ土より保水性が高いことがわかった。HYDRUS-2Dによるシミュレーションを行った結果も、完全には一致しなかったものの実験通りの順番に蒸発散比が減少し始めた。軽量性についてはマサ土以外で飽和密度が約 $1(\text{g}/\text{cm}^3)$ と屋上緑化に利用できる数値であった。保水性・軽量性を考えると粉碎松葉、粉碎松葉炭については屋上緑化の土壌代替材として利用できることがわかった。

Summary

As deposition's measure of pine needles that lead to a decline of Niji no Matsubara Pines, we tried to use pine needles as soil substitution material of roof tree planting. In order to compare water retentivity and lightness, six kinds, the "Crude Pine Needles", the "Carbonized Pine Needles", the "Ground Pine Needles", the "Ground Carbonized Pine Needles", the "Charcoal", and the "Masa soil", were prepared. Water retentivity was verified by investigating the relation between the period when grass does not wither without irrigation, and the amount of potential evaporation and evapotranspiration. Consequently, it withered in order of the Crude Pine Needles, the Masa, the Carbonized Pine Needles, the Ground Carbonized Pine Needles, the Charcoal, and the Ground Pine Needles, and it turns out that water retentivities of four kinds materials except the Crude Pine Needles are higher than the Masa soil. Although the result simulated by HYDRUS-2D was not completely in agreement, evapotranspiration ratio began to decrease in order as the experiment. It was the numerical value which can be used for roof tree planting about lightness since saturation density is about $1(\text{g}/\text{cm}^3)$ except the Masa. Having considered water retentivity and lightness, we turn out that the Ground Pine Needles and the Ground Carbonized Pine Needles can be used as soil substitution material of roof tree planting.

1.はじめに

近年、虹の松原では松原の衰退が進んでいるが、原因の一つとして松葉の堆積による土壌の腐植化が挙げられている。以前は家庭用の燃料などとして利用するために頻繁に松葉かきが行われていたが、電気やガスの普及につれてその必要がなくなり松葉は放置されるようになった。その結果この数十年で厚さ30~40(cm)の腐植層を形成し、松の生育に悪影響を与えている。最も簡単な解決法は松葉を堆積させないようにすることではあるが、松葉かきをしても今日では回収した松葉を利用する方法は特に見当たらない。そこでこの現状を打開できるような松葉の有効利用法はないかと考えた。

一方、都市部ではヒートアイランド現象に悩まされている。対策の一つとして屋上緑化が挙げられており、例えば東京都では条例により新しく建設する一定規模以上の建物の屋上緑化を義務付けている。また屋上緑化にはヒートアイランド現象の緩和だけではなく癒し効果も期待できるが、反面問題点もある。まず工事費、維持費が高額で、維持費だけでも空調費などの節約分を上回ってしまう。次に水の問題がある。地上と違い屋上緑化の土壌厚は数十センチメートルが限界で、植物が利用できる水もそのわずかな土壌からしか供給されない。足りない水は灌漑しなくてはならないが、我が国は水道水を大量に使用できる水資源の余裕はないため、できるだけその量を少なく抑えることが望ましい。そのため屋上緑化の重要な課題の一つは使用する土壌の保水性である。通常土壌では重過ぎて建物に負担がかかり、厚くすることができないため供給できる水に限界がある。よって通常より軽量で保水性の高い土壌(加えて排水性も良くなければならない)が求められる。

これらを踏まえ、虹の松原に堆積した松葉を屋上緑化の土壌代替材として有効利用するために松葉の保水性に関する実験、シミュレーションを行うことにした。松葉は軽量ではあるがそのまま加工せずに使用しても保水性は殆どないので、細かく砕いたり炭にしたりすることで保水性の向上を図った。

表1 実験に使用した土壌(代替材)

土壌(代替材)名	形 状
松葉炭	松葉を炭にしたもの
粉碎松葉	松葉を粉碎したもの
粉碎松葉炭	松葉炭を粉碎したもの
木炭	土壌改良用の針葉樹の木炭
マサ土	無加工のマサ土
松葉	無加工の松葉

2.実験方法

保水性を比較するために蒸発散実験を行った。6種類の土壌または土壌代替材(表1、以下土壌)を使用して無灌漑で芝生が枯れない期間を測定し、蒸発散量の推移や可能蒸発量との関係を調べた。まず土壌を底部が網目状のプラスチック容器に詰めてその上に芝生を置き、根がある程度定着するまでガラスハウス内で2~3週間養生した。灌漑は適宜行い、施肥は液肥を一度だけ使用した。

平成15年10月15日に芝生を土壌ごと切り取り、それぞれ蒸発散量測定用のプラスチック製容器(外寸354×242×120(mm)、内寸 310×207×115(mm))に移し替えた。この際、全ての芝生を1~2(cm)の長さに刈り揃えた。また各容器に水を1283(ml)(容器に入れたとき水深2(cm)になる)加えた。これは、蒸発散速度2(mm/day)でも10(日)は枯れないようにするためで、以降は実験終了まで無灌漑である。さらに水面蒸発量を測定するために水を張ったプラスチック容器(内寸 310×235×110(mm))も用意した。

6種類の容器の蒸発散量と別容器の可能蒸発量は、容器ごと電子天秤に載せて前日との重量差を量ることにより測定した。可能蒸発量の測定は、毎日の測定終了後に蒸発した分だけ水を追加して同じ条件で測定できるようにした。実験期間は平成16年1月13日までの90日間。原則として毎日17:00~19:00の間に行い蒸発散比(蒸発散量/可能蒸発量)の変化を調べた。ここでは可能蒸発量として水面蒸発量を使用した。

3.実験結果

重量の経日変化は図1のようになった。粉碎松葉とマサ土は電子天秤で量れる重量を超えていたので最初の数日間はデータがない。

図2は蒸発散量の経日変化を示したもので、6種類の土壌に加え可能蒸発量(蒸発量測定容器の底面積は他の6種類の容器と異なるため補正してある)の変化も併記している。測定開始から2週間はまだ気温が高い時期であったので、可能蒸発量と6種類の容器の蒸発散量は全体平均より高い。その後は低下するが気温や湿度などの気象条件の違いにより、最大で70(g)程度の増減が見られる。

グラフが途切れている箇所は計測できなかった日で、その次の日は2日分の値が示してある。これは半分の値で読むとおおよそ1日あたりのものになる。後述のシミュレーションにおいてもそのように扱っている。

図3は6種類の土壌の蒸発散量を可能蒸発量で除した蒸発散比を示したもので、容器からの蒸発散量が可能蒸発量と同じならば蒸発散比は1、逆に全く蒸発散がなければ蒸発散比は0となる。蒸発散比がマイナスとなっている日があるのは、土壌による吸湿やガラスハウス天井からの水滴の落下などが考えられる。土壌が水を十分に含んでい

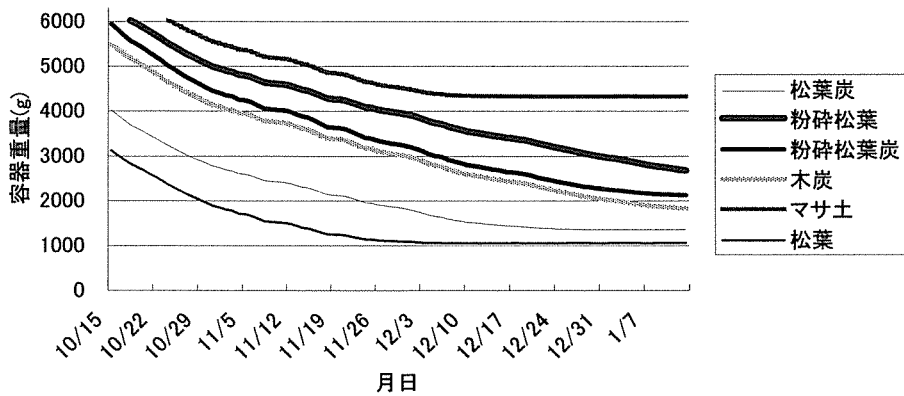


図1 重量の経日変化

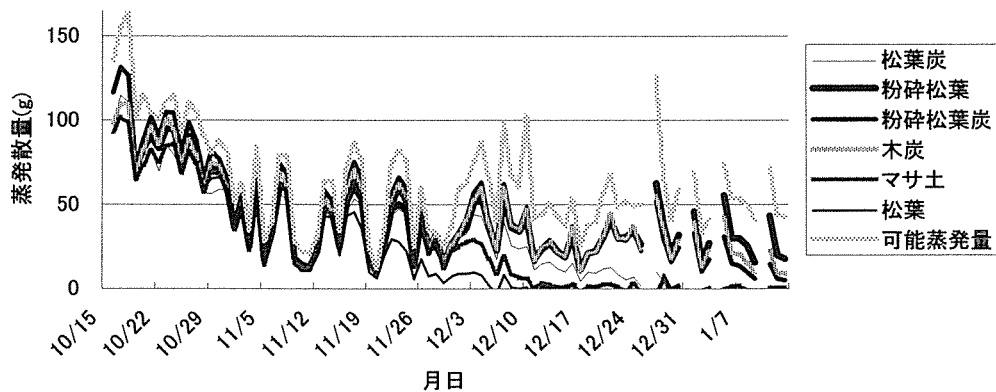


図2 蒸発散量の経日変化

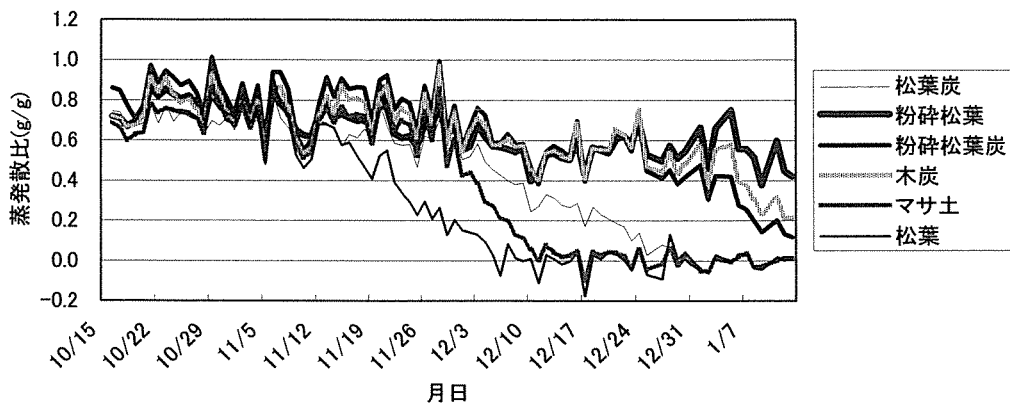


図3 蒸発散比の経日変化

る間は蒸発散比が約0.6~1.0の間で推移しているが、土壌水分が減少すると蒸発散比が下がり芝生が枯れ始める。蒸発散比約0.4までは見ただけでわからないが、それ以下になると枯れ始めていることが確認でき、約0.3でほぼ完全に枯れた。屋上緑化では植物の蒸散により温度を低下させる働きがあるので、一定の蒸散を維持できなければその効果が減少することになる。そのため蒸散量の維持は特に重要である。図3を見ていくと、まず松葉の容器が最初に枯れ(11月下旬)、マサ土(12月上旬)、松葉炭(12月中旬)、粉碎松葉炭(1月上旬)、木炭(1月上旬)と続いた。粉碎松葉は1月中旬まで枯れなかった。

松葉は保水性が小さいので最初に枯れた。松葉炭は炭にすることにより脆く崩れやすくなったため間隙が小さくなったことと、多孔質であることが保水性の向上に影響したと考えられる。マサ土は粒径が粗いものを使用したので保水性が低く、松葉の次に枯れてしまった。粉碎松葉、粉碎松葉炭、木炭は同じような蒸発散比を示しているが、土壌が水を十分に含み供給できている間は粉碎松葉>木炭>粉碎松葉炭の順に蒸発散量が多かった。しかし、十分に供給できなくなると逆に粉碎松葉>木炭>粉碎松葉炭の順になった。この傾向から、粉碎松葉炭を土壌として使用すれば、水に余裕があるときは高い蒸発散を得て周囲の温度を下げ、余裕がない時は低い蒸発散で節水できると思われる。

以上をまとめると、松葉はマサ土より保水性が悪く土壌としての機能を果たすことはできない。松葉炭はマサ土より保水性があり、軽量性もある。粉碎松葉、粉碎松葉炭、木炭は先の3種類より格段に保水性が良く、軽量性も兼ね備えているため実用的であるといえる。

4. Hydrus-2Dによるシミュレーション

Hydrus-2D(Rassam, D. et al., 1999)は二次元不飽和土中の水分と溶質の移動予測プログラムである(本研究では溶質に関しては取り扱っていない)。シミュレーションに特に必要とされるのは対象となる土壌の水分特性曲線で、湿潤、蒸発、排水などによって生じる圧力変化に対する土中水分の応答を判断するために利用される。

(1)水分特性曲線について

土の体積含水率とマトリックサクシオンとの関係を表したグラフを水分保持曲線(soil water retention curve, SWRC)、または水分特性曲線(以下SWRC)という。マトリックサクシオンとは間隙空気圧と間隙水圧との差で、絶対値をとったものをサクシオンといい水柱の高さ(cm)やその常用対数をとってpFとして表す。水分平衡状態に保たれている土中のある一部において水分量の変化が生じると、その部分のマトリックサクシオンが変化する。このエネルギーの差が土中水の流れを引き起こし、新しいサクシオンの平衡条件に到達するまで継続する。また、土は乾燥過程、湿潤過程で異なったSWRCを持つ(ヒステリシス特性)が、本研究においては考慮してない。

(2)SWRCの形状について

主な形状は3つのパラメータで特徴付けられる。

①飽和体積含水率・・・ θ_s

サクシオン0(cm)のときの体積含水率。理論上は土の間隙率と等しいが、実際は溶存または封入された空気が存在するので10~25%小さいことがある。

②空気侵入圧(air entry value, AEV)

土中のもっとも大きな間隙において水が抜け始めるサクシオン。言い換えれば空気が侵入し始める限界のサクシオン。後述のvan Genuchtenモデルでは α, m, n のフィッティングパラメータにより調整する。

③残留水分量・・・ θ_r

土中のサクシオンを上昇させていったとき量がほとんど変化しなくなる状態の水分量で、残留水分を液状水として抽出できる限界の値。砂やシルトなどはSWRCの漸近線から推測するのが簡易的である。

(3)SWRCのモデル(van Genuchten モデル)

不飽和土中の水分移動を数値モデルで解析するためにはSWRCをモデル化することが必要である。Hydrus-2Dでは、van Genuchten、修正van Genuchten、Brooks and Coreyの3つのモデルから選択することができる。本研究ではvan Genuchtenモデルを使用した。van Genuchtenモデルは、片対数グラフにプロットしたときのS字型曲線のSWRCを次のように数学的に表現したモデルである。

$$S_e = (1 + |\alpha h|^n)^{-m}$$

α, m, n はフィッティングパラメータ(通常は $m=1-1/n$)。 S_e は規準化した体積含水率(有効飽和度)で次のように定義される。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

ここで θ はある圧力水頭に対応する体積含水率、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は残留体積含水率である。

3つのフィッティングパラメータはSWRCに異なる影響を与える。

- ① α …土中の空気侵入圧の逆数に関連する。このパラメータが増加すると空気侵入圧が減少する。
- ② n …SWRCの勾配を変化させ土壌の粒径の大きさを反映する。このパラメータが増加するとS字型の曲線になる。つまり飽和体積含水率近辺や残留体積含水率より低い含水率の範囲においては勾配が平坦になり、その間では急勾配となる。
- ③ m … n と関連付けられるパラメータで $m=1-1/n$ と表される。この場合、透水係数Kの理論モデルとSWRCを結びつける際にKを比較的簡単な式で表すことができ、SWRCの2箇所の曲率も相互に関係し合う。本研究ではすべて $m=1-1/n$ としているが、 m と n を関連付けずにそれぞれに値を与えると、SWRCの2箇所の曲率が異なるという影響が出る。

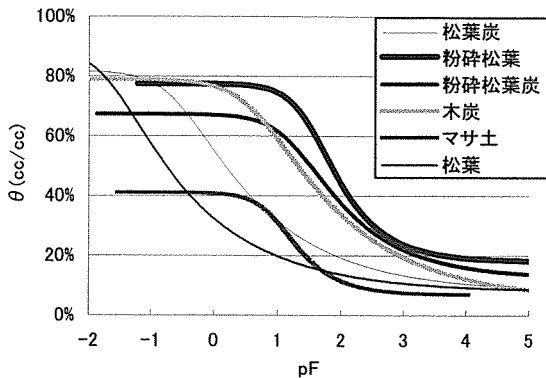


図4 水分特性曲線 (SWRC)

各土壌のvan Genuchten モデルを作成するためには、これらのフィッティングパラメータを求めなければならない。本研究では吸引法(サクション200(cm)以下)と遠心法(サクション200(cm)以上)により各土壌の十数点の水分特性を測定し、

非線形最小二乗法により α と n をもとめた。その結果得られたvan Genuchten モデルのSWRCが図4である。このモデルを使ってHydrus-2Dによるシミュレーションを行い、蒸発散に関して実験結果と一致するかどうか検証することにした。

(4)シミュレーション条件

以下のパラメータの入力が必要である。

- ①SWRCを構成するパラメータ(表2参照)である残留水分量 θ_r 、飽和体積含水率 θ_s 、フィッティングパラメータ α 及び n 、飽和透水係数Ks。
- ②芝生の根の吸水に関するFedessのパラメータ(P0、P0pt、P2H、P2L、P3、r2H、r2L、表3参照)。
- ③初期条件・・・圧力水頭、時間刻み幅
- ④境界条件・・・土壌の厚さを入力。芝生面が大気境界、側面及び底面はゼロフラックス。根の密度は全層で均一。
- ⑤時間変動条件・・・圧力水頭の下限値を設定するhCritA。可能蒸発散量の入力。

表2 SWRC Parameters

	θ_r	θ_s	α	n	Ks(cm/day)
松葉炭	0.080	0.818	3.537	1.321	144288
粉碎松葉	0.180	0.775	0.030	1.684	390
粉碎松葉炭	0.125	0.673	0.057	1.434	1184
木炭	0.050	0.790	0.226	1.301	6852
マサ土	0.069	0.410	0.105	1.838	3577
松葉	0.080	0.900	44.99	1.317	164160

表3 Fedess' Parameters (全土壌共通)

P0	2	根が土から吸水を始める上限の圧力水頭
P0pt	2	根による吸水が可能蒸散量となる上限の圧力水頭
P2H	-100	可能蒸散量が $r2H$ の時、根による吸水が最大となる下
P2L	-300	限の圧力水頭 可能蒸散量が $r2L$ の時、根
P3	-24000	による吸水が最大となる下限の圧力水頭
r2H	0.07	根が吸水を停止する下限の圧力水頭(永久しおれ点)
r2L	0.04	P2Hを与える圧力水頭 P2Lを与える圧力水頭

初期条件の圧力水頭が不明であったため、蒸発散比が落ち始め可能蒸発散量を維持できなくなった時点

をpF3.0(生長阻害水分点)とし、それまでに蒸発散した水量をあわせて初期条件を設定している。その結果、初期状態で飽和体積含水率以上の水を含んでいる土壌があったがこれは土壌面より上に湛水していたため、シミュレーションにあたっては飽和体積含水率を下回る日から開始するようにした。また、本シミュレーションではhCritAはFedessのパラメータP3より絶対値で大きい値になっているのでシミュレーション結果に影響しない。他のパラメータ、初期条件などは表4に示す。

表4 初期条件

	圧力水頭 (cm)	計算期間 (日)	初期時刻幅 (日)	最小時刻幅 (日)	土壌厚 (cm)	可能蒸発散比
松葉炭	-0.731	90	0.0001	0.0001	8	0.654
粉碎松葉	-0.1	81	0.1	0.1	8	0.651
粉碎松葉炭	-0.1	78	0.1	0.1	8	0.732
木炭	-0.01	83	0.1	0.1	7	0.691
マサ土	-0.1	78	0.001	0.001	6	0.691
松葉	-0.111	90	0.00001	0.0001	6	0.688

(5)シミュレーション結果

表5に示す通り可能蒸発散日数は9~82日の間となり、松葉以外は実験結果とほぼ一致した。松葉のずれはシミュレーションの計算の不安定さが影響していると見られる。その原因として有効水分率(pF1.8~pF3.0間の体積含水率)の少なさや、土壌としてシミュレーションするには無理がある形状、性質が考えられるが今回は解決には至らなかった。しかし松葉も含めて可能蒸発散日数を見ると、有効水分率が多ければ可能蒸発散日数も長くなる傾向が表れている。

蒸発散比が0になった日は3種類の土壌でシミュレーション、実験共に90日以降と比較ができなかった。比較ができる3種類も内2種類は可能蒸発散日数のときより実験結果と合わない。この原因はシミュレーションでの蒸散と蒸発の取り扱い方にあると思われる。本シミュレーションでは芝生容器からの蒸発散は全て蒸散として扱っており蒸発は0としている。しかし実際はサクシオン

がFedessのパラメータP3(-24000(cm))に達して根が吸水を停止し蒸散が0になったあとでも蒸発は続いておりその差がずれとなって表れている。重量差をはかることで蒸発散量は判っても、蒸発量と蒸散量それぞれの値は不明であるためこのように取り扱ったが、実際の屋上緑化では根が吸水を停止して枯れるまで灌漑しないということはない。蒸発散比0すなわち永久しおれ点が判らなくとも可能蒸発散を維持できなくなる日数を把握して、生長阻害水分点を超える乾燥状態にならないようにするだけで十分であると思われる。

表5 シミュレーションと実験の比較

	可能蒸発散日数		蒸発散日数		有効水分率 (%)
	シミュ	実験	シミュ	実験	
松葉炭	46	48	56	74	7.7
粉碎松葉	82	88	90~	90~	28.2
粉碎松葉炭	67	72	90~	90~	20.6
木炭	69	72	90~	90~	18.5
マサ土	45	46	47	56	6.2
松葉	9	31	47	50	3.8

5.軽量性について

各土壌の乾燥密度、飽和密度について表6にまとめた。乾燥密度は絶乾状態($\theta=0$)で、飽和密度は飽和含水状態($\theta=\theta_s$)で測定した。屋上緑化に使用する土壌には耐震性を考慮しない場合で200~300(kg/m²)、考慮した場合は100(kg/m²)以下の軽量性が求められる。これは土壌厚を10(cm)にした場合でそれぞれ2~3(g/cm³)、1(g/cm³)以下の密度でなければならないことになる。飽和含水状態での値を見るとマサ土だけは約2(g/cm³)と耐震性を考慮しない場合でも余裕がないが、その他の土壌は約1(g/cm³)と耐震性を考慮できる値となった。実際には今回の実験のように側面、底面ともにゼロフラックスという境界条件ではなく排水が行われるように施工するため、飽和状態が長時間継続することはない。したがって安全率の上昇が見込める。

表6 軽量性について

	乾燥密度(g/cm ³)	飽和密度(g/cm ³)
松葉炭	0.11	0.93
粉碎松葉	0.29	0.90
粉碎松葉炭	0.35	1.02
木炭	0.23	1.02
マサ土	1.57	1.98
松葉	0.06	0.96

6.おわりに

松葉以外はマサ土より有効水分率が高いため芝生が枯れるのを遅らせることができたが、中でも粉碎松葉、粉碎松葉炭、木炭の有効水分率が高かった。特に粉碎松葉は28.2(%)であることから松葉を使つての屋上緑化に最適であるように思えるが、可能蒸発散比を見ると粉碎松葉炭が0.732と一番高く、逆に粉碎松葉は0.651と一番低かった。蒸発散による温度低下は粉碎松葉炭の方が高い効果を期待できるため、有効水分率だけを見て粉碎松葉が最適であるとは言い切れない。

また松葉炭の有効水分率は7.6(%)とあまり高くはないが、炭にすることにより松葉よりも高い値となっている。松葉炭は脆いので細かくする手間はあまりかからないため、さらに少し細かくすることで有効水分率の向上が見込められると思われる。

軽量性に関してマサ土以外は飽和含水状態で約1(g/cm³)と軽量で、屋上緑化に必要な軽量性を有している。大きな違いはないので土壌間での優劣はない。

今回の松葉関係4種類の土壌に関して、

- ①松葉…土壌としての使用価値なし
- ②松葉炭…保水性は低いが改良の余地あり
- ③粉碎松葉と粉碎松葉炭…保水性が高く実用的である。今後は実際に屋上を使つての実験を行い、特に粉碎松葉と粉碎松葉炭の比較、検討を重ねる必要がある。

参考文献

1. Rassam, D., J. Simunek and M. Th. van Genuchten (1999) : Modelling Variably Saturated Flow with HYDRUS-2D(取出伸夫、井上光弘監訳(2003) : HYDRUS-2Dによる土中の不飽和流れの計算、農業土木学会)