

9326 淡水・海水および汽水と植物成育

助成研究者:古在 豊樹(千葉大学 園芸学部)

共同研究者:原 道宏(岩手大学)

加藤 茂(東京農業大学)

杉 二郎(東京農業大学)

本研究の目的は、Ⅰ. 塩生植物の塩応答性、Ⅱ. 培地の水分供給能力の概念について、実験的に検討を加えることである。各実験について、研究結果を以下に要約する。

Ⅰ. 塩生植物の塩応答性について — マングローブと塩環境 —

沖縄県西表島には6種のマングローブ植物が分布成育している。マングローブ植物の分布は塩分(NaCl)に対する耐性に依存し、自然林における分布の様相は種類ごとに帯状分布する。西表島のクイラ川の流域面積は狭いが、河口から上流に向かい、ヒルギダマシ、ヤエヤマヒルギ、メヒルギ、オヒルギの順でその個体数が増加する。河口の表面水の塩分濃度は海水と同じであるが、最上流部の表面水では0.18%であり淡水の影響を強く受けている。葉中の各種イオンは、河口部に分布するマングローブ葉中に高濃度で認められた。葉中の有機酸は主としてシュウ酸とリンゴ酸、また、糖類はフラクトースとグルコースであった。高塩濃度の成育環境にマングローブが対応するには、植物体に取り込まれた過剰のカチオン類に対処するために、あるいは過剰塩の蓄積に対応するために、有機酸類や糖類の合成を促進し細胞内浸透圧を調節維持していると推察される。マングローブ種の適応塩分濃度に従い植林を行うことにより、マングローブ林は復興するものと考えられる。

Ⅱ. 培地の水分供給能力の概念について — 環境要因としての培地の水理特性 —

植物根における吸水を促す要因を、(1)植物根の吸水態勢、(2)培地の水分供給能力、(3)培地と植物根の境界の水分伝導度、に分離することを提案した。この研究では、培地の水分供給能力に対して定義を与え、測定方法を考案、実施し、それに考察を加えた。吸引圧が2.1 mH₂Oに達すると、単位吸引圧当たりの微砂質土壌の1時間水分供給量は水分飽和時の9.5%にまで低下した。水分容量 c [m³m⁻³/mH₂O]、水分拡散係数 D [m²/s]、透水係数 $k=cD$ [m²/(s·mH₂O)]の培地中に直径 d [m]の円柱状の根が粗に分布し、根の単位長さ当たりの吸水速度 [m³ water/(m root·s)]が周期 T [s]の正弦波状 $(1+\cos 2\pi t/T)$ に起こるとき、培地が供給する水量の単位吸引圧当たりの値WSC(培地の水分供給能力) [(m³ water/m root)/mH₂O]が、線形モデルにより、近似的に、 $WSC=2\pi kT/\ln(F)$ と導かれた(π , C は定数で $\pi=3.14$, $C^2=3.17$ 。Fは $F=8DT/(C^2\pi d^2)$ なる無次元数)。これにより、培地の水分供給能力を培地の水理特性から具体的に評価することが可能になった。供試土壌についてWSCを試算し、WSCの値が土壌の透水係数に強く依存することが示された。

9326 淡水・海水および汽水と植物成育

助成研究者:古在 豊樹(千葉大学 園芸学部)

共同研究者:原 道宏(岩手大学)

加藤 茂(東京農業大学)

杉 二郎(東京農業大学)

本研究の目的は、Ⅰ. 塩生植物の塩応答性、Ⅱ. 培地の水分供給能力の概念、について、実験的に検討を加えることである。以下では、各実験について、方法、結果、考察および今後の課題を概説する。

Ⅰ. 塩生植物の塩応答性について

— マングローブと塩環境 —

1. まえがき

21世紀中葉には、世界人口が100億人を越えるという推定が多くの研究者により報告されている。人口増加にともない確実に問題とされるのは食糧の不足である。一方では、灌漑農業による土壌の塩性化が進み、農耕地としての機能が低下し、その1/3が作物生産の出来ない農地となり、終局的には放棄される土地が徐々に増加している。また、地球温暖化効果ガス(炭酸ガスやメタンガスなど)の蓄積により徐々に平均気温が上昇し、海面が上昇することが危惧されている。海面上昇が進むと、現在重要な米栽培地域へ海水が流入しその生産が大きく影響を受けるのではないかとされている。しかし、塩性地において分布成育する塩生植物は塩害を回避あるいは軽減し、また炭酸ガスの植物による一時固定効果(特に樹木による)も期待できるとされている。

地球上には多数の塩生植物が分布しているが、その中でもマングローブは海水の出入する熱帯・亜熱帯の感潮河川域に分布し、海水中でも成育している。しかし、その分布域は相次ぐ開発により減少している。特に東南アジアを中心とするマングローブ植物分布地域では、人口増加にともない燃料等のエネルギー源としての活用、住宅建設用地、えび養殖場などへの変換利用が盛んにおこなわれている。一例ではあるがタイ国におけるマングローブ林は、この30年間で50%以下にその面積が減少している。相次ぐ過剰伐採によりマングローブ林は荒廃しており、マングローブ林復興への取り組みが開始され始めているが種々の問題が山積している。本研究は、マングローブ植物が種独特の分布林を形成(带状分布)していることに着目し沖縄県西表島のクイラ川での現地調査を実施し、マングローブ植林への基礎的知見を得ることを目的としている。

2. 試料および方法

2.1 マングローブ植物の採集と河川水の調査

沖縄県西表島のクイラ川において、下流(河口部)から川の源まで約4 kmを上流に進みながら河川水のpH、電気伝導度、濁度、溶存酸素、温度、塩分濃度を一定間隔で測定した。河口部と最上流部に分布するマングローブ植物の若い葉(Y)と成熟葉(O)を採集した。試料葉は次のように分類した。メヒルギ(*Kandelia candel*)は図中でKCで表し、その分布域については上流部は(U)、河口部は(M)で示す。例えば、KC-Y(U)は、上流部で採集したメヒルギの若い葉を表している。オヒルギ(*Bruguiera gymnorhiza*)はBGで、ヤエヤマヒルギ(*Rhizophora styloza*)はRSで、マヤブシキ(*Sonneratia alba*)はSAで、ヒルギモドキ(*Lumnitzera racemosa*)はLRで、ヒルギグマシ(*Avicennia marina*)はAMで示した。

2.2 分析試料の調整

採集マングローブ葉は蒸留水で洗浄後、デシケーター中に保存し乾燥した。マングローブ葉の一定量を精秤後、蒸留水とともにホモジナイズした。このホモジナイズ調整液について各種無機イオン、有機酸及び糖類の分析をおこなった。

2.2.1 各種無機イオンの分析

各種無機イオンの分析にはShimadzuイオンクロマトグラフHIC-6A型(島津製作所製)を用いた。1価陽イオン(Na^+ , NH_4^+ , K^+)の分析には、5 mM- HNO_3 (電気伝導度約 $2500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)を移動相として使用した。分析用カラムはShim-pack IC-C1を用いた。2価陽イオン(Mg^{2+} , Ca^{2+})の分析には、移動相として4 mM-酒石酸と2 mM-エチレンジアミン溶液(電気伝導度約 $800 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)を使用した。分析用カラムにはShim-pack IC-C1を用いた。陰イオン(F^- , Cl^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , NO_3^- , Br^- , SO_4^{2-})の分析には、移動相として1 mM p-Hydroxybenzoic acidと1.1 mM Diethylethanolamine溶液(電気伝導度約 $130 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)を用いた。分析用カラムとしてShim-pack IC-A1を用いた。これらの移動相の調整および試料調整には、Milli-Q Water Reagent System(日本ミリポア・リミテッド社製)で精製した水をさらに脱気処理をおこない使用した。

2.2.2 有機酸の分析

高速液体クロマトグラフShimadzu HPLC-6A型(島津製作所製)に分析用カラムとしてULTRON C-18(Shim-pack)を装着し、0.1 M- KH_2PO_4 (pH:2.20~2.21)溶液を分離液とし1 ml/minで分析した。UV(紫外部)検出器を用い、検出波長として210 nmでおこなった。分析は40°Cでおこなった。

2.2.3 糖類の分析

高速液体クロマトグラフShimadzu HPLC-6A型(島津製作所製)に分析用カラムとしてCLC-NH2(Shim-pack)を装着し、Acetonitrile : H_2O (7:3) 混合溶液を分離液とし1 ml/minで分析した。検出器としてRI(示差屈折)検出器を用いた。分析は30°Cでおこなった。

3. 結果及び考察

3.1 クイラ川の状況

クイラ川では、西表島でも最西部に位置し小型の船でしか入れない、ほとんど人為的な影響の見られない流域にヤエヤマヒルギ、オヒルギ、メヒルギを中心に分布している。水深は河口部で満潮時に約3 mであるが、最上流部においては満潮時にも1 mにも満たない。最上流部の塩分濃度は表面水で0.18%、底部では2.36%を示した。中流域の塩分濃度は表面水で2.33%、底部では2.84%を示した。河口部の塩分濃度は表面水で3.61%、底部でも3.61%を示した。溶存酸素は各測定地点ともに表面水中での濃度が高く底層部の濃度は低い値であった。最上流部にはオヒルギが分布していた。中流域ではオヒルギ、メヒルギが約7~8mの樹高で分布し、中流域から河口に向かうと共にヤエヤマヒルギが増加し、河口部ではこれら3種と共にヒルギダマシが加わり、4種でマングローブ林を構成している。

3.2 各種マングローブ葉の無機イオン濃度

沖縄に分布する6種マングローブ葉のイオン分析結果をFig.1 (a), (b)に示す。ヒルギダマシ以外の5種マングローブの成熟葉中に分布したイオンは共に若い葉よりも高濃度であった。海水の直接的な影響の少ない上流部に分布していたメヒルギ葉中には、河口部に分布していたものよりも Na^+ で約1/6、 Cl^- で約1/4の濃度であった。マヤプシキは最も海水の影響を強く受けるマングローブ林の先端域に分布している種であり、若い葉の中の Na^+ 濃度に比べ成熟葉中の濃度は約5倍の高濃度であった。マヤプシキは、液胞中に多量の NaCl を蓄積することが可能であり落葉前にはその葉厚を2 mm位まで厚くする。ヒルギモドキも同じように液胞に多量の NaCl を蓄積し落葉することにより過剰塩を体外へ捨てている。マングローブ自然林におけるメヒルギは、直接海水の影響の及ぶところに分布するのではなく中流域あるいは内側に分布する。河口部に分布するメヒルギの樹形は、盆栽のように丸みを呈し樹高も極端に低いものでありまたその葉も上流部に分布する個体に比較し厚く小さなものであった。これは海水中の NaCl によるストレスを強く受けながら成育した結果と推察される。オヒルギ、ヤエヤマヒルギについても同様に上流部に分布する個体の葉中の Na^+ 、 Cl^- ともに低い濃度であった。マングローブ葉中の2価カチオンの Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ともに河口部に分布する葉の中に高い濃度で分布する傾向が認められた。

3.3 各種マングローブ葉中の有機酸

多くの植物は高い塩濃度の環境下で成育すると過剰吸収カチオン類に対して浸透圧を調節する上から有機酸類の合成を促進することが知られている。各地点で採集したマングローブ葉中の有機酸類分析結果をFig.2 (a), (b)に示す。図は2塩基酸と3塩基酸のみの表示であるが、ギ酸、酢酸、プロピオン酸などが低濃度ではあるが検出された。6種のマングローブ葉中に分布していた有機酸は主にシュウ酸とリンゴ酸、次いで、クエン酸であった。マヤプシキの成熟葉にはリンゴ酸が約80 meqの高濃度で認められ、次いで、ヒルギダマシの約27 meqであった。シュウ酸は、ヒルギダマシ葉中に約15 meqの濃度であり、次いで、河口部のメヒルギとオヒルギの成熟葉であった。シュウ酸とリンゴ酸がともに成熟マングローブ葉中に高濃度で分布していたことは、過剰に取り込んだカチオンと塩を形成して植

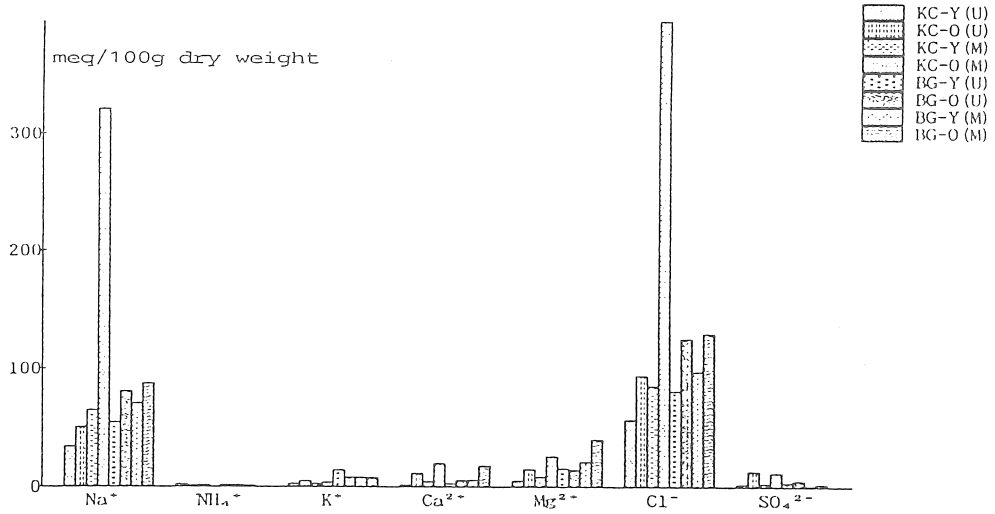
物の生理機能を損なわないように調節しているものと推察される。しかし、ヒルギモドキについては、6種のマングローブの中で最も過剰にカチオンが蓄積されていたが、その濃度に相当する有機酸類は存在していない。他の浸透圧調節物質により浸透圧が調節されているか否かについては、今後の検討を待たなければならない。

3.4 各種マングローブ葉中の糖類

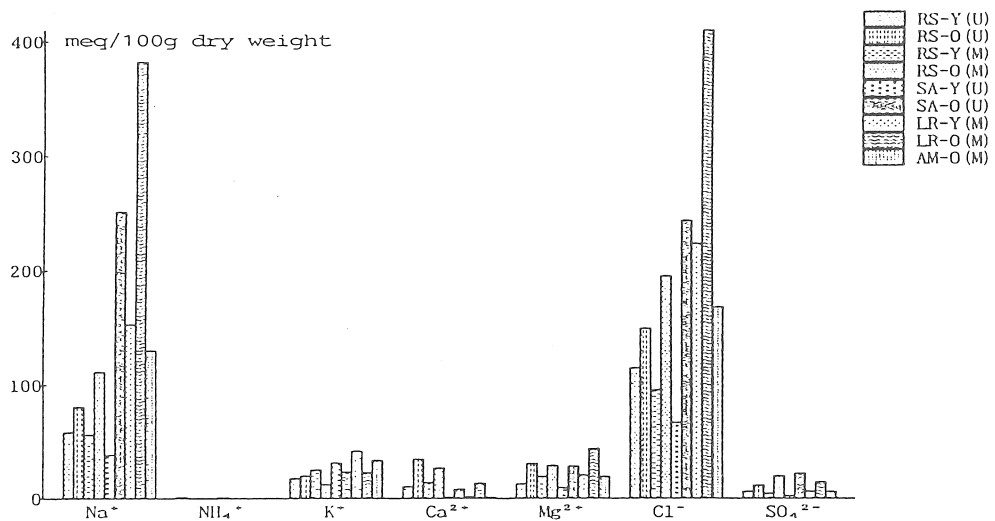
有機酸類と同じように浸透圧調節に関する物質の一つとして糖類が知られている。また、グリセロールも浸透圧調節に関係する物質であることから併せて分析をおこなった。糖類とグリセロールの分析結果をFig. 3 (a), (b)に示す。葉中のグリセロール濃度が若い葉よりも成熟葉中にわずかではあるが高い濃度での分布が認められた。このことは、過剰に取り込んだカチオン類と有機酸類が塩を形成し中和されているが、分布濃度が高いことから、さらにグリセロールの存在により水の吸収がより促進され希釈されることにより細胞の浸透圧維持に関与していることが推察される。メヒルギ、オヒルギ、ヤエヤマヒルギの葉中にはフラクトースの分布濃度が高いが、これが、フラクトース合成を優先していることによるのか、あるいは葉中から貯蔵組織や種子への移動が速やかにおこなわれにくいことによるのか、今後の検討に待たねばならない。葉中の糖類分布濃度から、若葉での光合成が成熟葉よりも盛んであることが明らかである。河口のメヒルギ若葉中のフラクトース(約67 meq)とグルコース(約76 meq)、ヒルギモドキ若葉中のグルコース(約98 meq)は、他の糖類、他の試料に比べて極端に高濃度であることから、今後さらに検討を加えることが必要と推察される。

要 約

沖縄県西表島には6種のマングローブ植物が分布成育している。マングローブ植物の分布は塩分(NaCl)に対する耐性に依存し、自然林における分布の様相は種類ごとに帯状分布する。西表島のクイラ川の流域面積は狭いが、河口から上流に向かい、ヒルギダマシ、ヤエヤマヒルギ、メヒルギ、オヒルギの順でその個体数が増加する。河口の表面水の塩分濃度は海水と同じであるが、最上流部の表面水では0.18%であり淡水の影響を強く受けている。葉中の各種イオンは、河口部に分布するマングローブ葉中に高濃度で認められた。葉中の、有機酸は主としてシュウ酸とリンゴ酸、また、糖類はフラクトースとグルコースであった。高塩濃度の成育環境にマングローブが対応するには、植物体に取り込まれた過剰のカチオン類に対処するために、あるいは過剰塩の蓄積に対応するために、有機酸類や糖類の合成を促進し細胞内浸透圧を調節維持していると推察される。マングローブ種の適応塩分濃度に従い植林を行うことにより、マングローブ林は復興するものと考えられる。



(a)



(b)

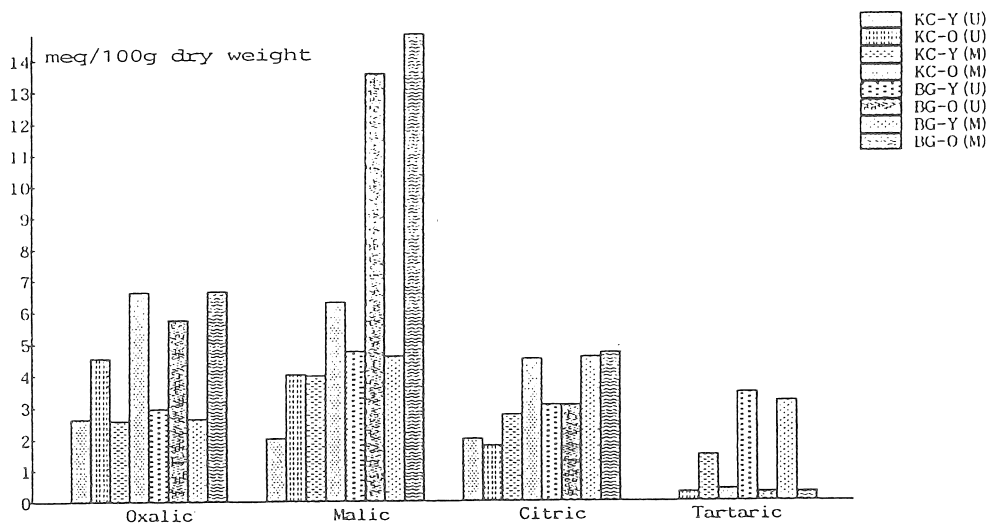
Fig.1 Ion concentration in mangrove leaves.

Young(-Y) and old(-O) leaves of mangrove plants in the upper stream(U) and the mouse(M) of Kuira River are indicated for

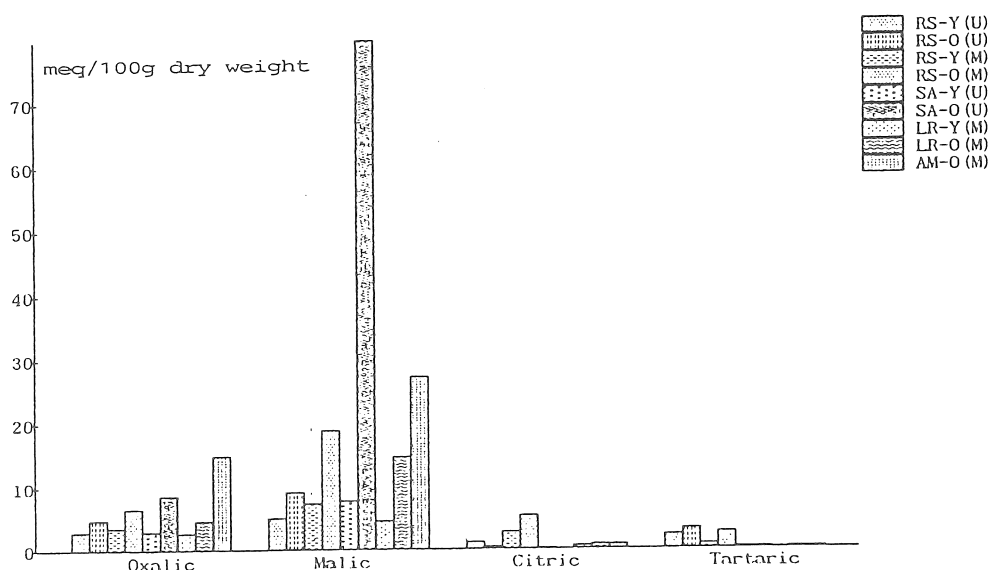
(a) Kandelia candel(KC), and Bruguiera gymnorrhiza(BG).

(b) Rhizophora styloza(RS), Sonneratia alba(SA),

Lumnitzera racemosa(LR), and Avicennia marina(AM).



(a)



(b)

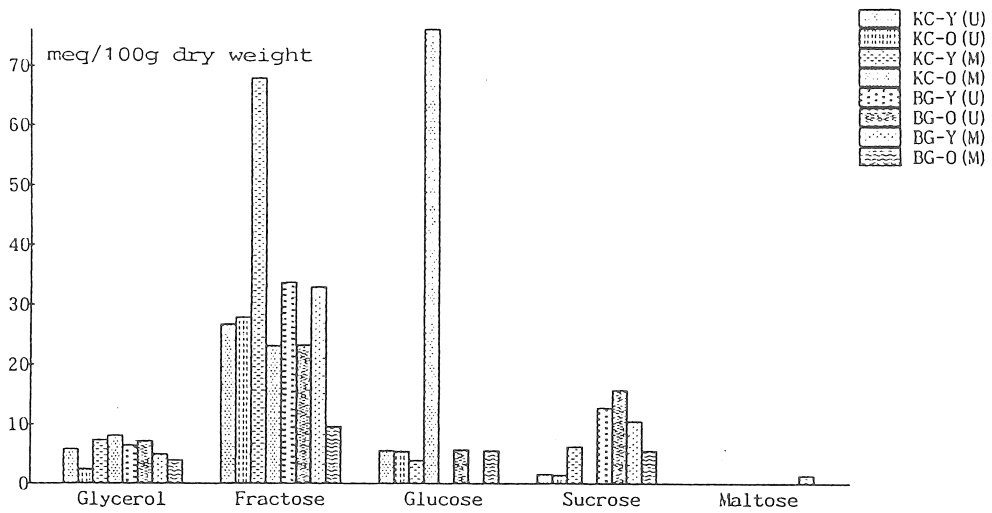
Fig.2 Organic acid concentration in mangrove leaves.

Young(-Y) and old(-O) leaves of mangrove plants in the upper stream(U) and the mouse(M) of Kuira River are indicated for

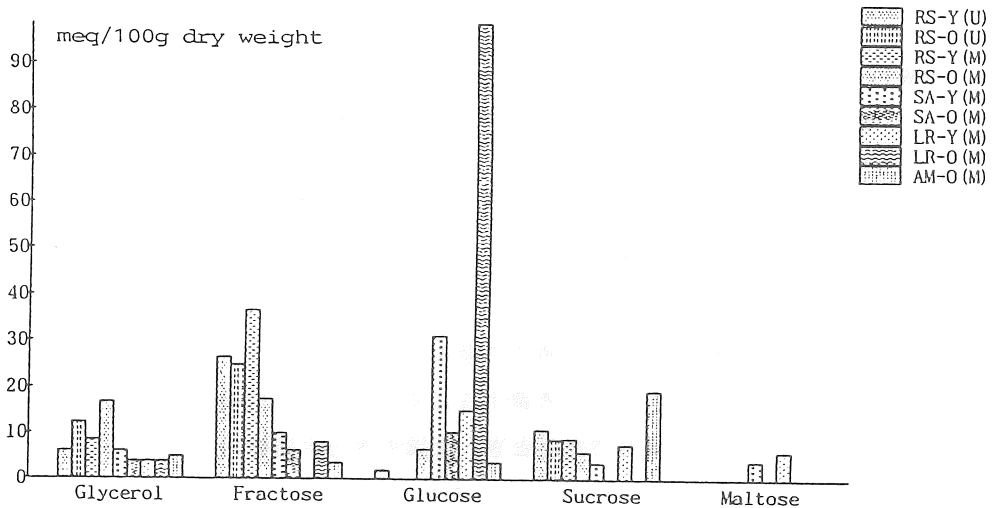
(a) Kandelia candel(KC), and Bruguiera gymnorrhiza(BG),

(b) Rhizophora styloza(RS), Sonneratia alba(SA),

Lumnitzera racemosa(LR), and Avicennia marina(AM).



(a)



(b)

Fig. 3 Saccharide concentration in mangrove leaves.

Young(-Y) and old(-O) leaves of mangrove plants in the upper stream(U) and the mouse(M) of Kaira River are indicated for

(a) Kandelia candel(KC), and Bruguiera gymnorrhiza(BG).

(b) Rhizophora styloza(RS), Sonneratia alba(SA).

Lumnitzera racemosa(LR), and Avicennia marina(AM).

II. 培地の水分供給能力の概念について

— 環境要因としての培地の水理特性 —

1. はじめに

植物は蒸散により水を失うので、根から吸水し体内の水分不足を補う必要がある。晴天の日中に植物が気孔を閉じ、光合成を停止する、いわゆる「植物の昼寝現象」が報告されているが、そこでは、水分不足により植物成育が阻害されている。植物根における吸水速度が何によって規定されるかは従来から議論があり、植物に基づく要因、土壌に基づく要因、およびその境界に基づく要因があるとされるが、実時間の根の吸水に関するダイナミズムは必ずしも明確にされていない。土壌を代表とする培地の水分環境の良否は、根が要求する水分量を実時間で供給できるか否かにかかっている。土壌物理学では培地の水理特性は保水性と透水性であるとされるが、ここでは、それらが培地の実時間における水分供給能力にどのように関わるかを実験および理論解析により検討した。

2. 水分供給能力の定義について

筆者らは、植物根における吸水を促す要因を、(1)植物根の吸水態勢、(2)培地の水分供給能力、(3)培地と植物根の境界の水分伝導度、に分離することを提案し、培地の水分供給能力をつぎのように定義した。

(定義)根に隣接する培地の水ポテンシャルが一定の時間パターンで低下したときに

培地から根の直傍まで供給される水分量が培地の水分供給能力である。

植物根が水を吸うためには植物根は自身の水ポテンシャルを低下させ、培地から植物根への水流を促さなければならない。培地の水分供給能力が低ければ、一定量の水が植物根の表面まで運ばれるためには、隣接する培地の水ポテンシャルが余分に低下しなければならない。ただし、植物はそれだけ強い水ストレスにさらされることになる。ただし、培地の水分供給能力が高くても、根の分布が悪いなど植物の吸水態勢が悪ければ同様の事態が起こり得るのであり、植物根の吸水態勢も同時に考慮する必要がある。植物の吸水態勢および培地と植物根の境界の水分伝導度が同じであるとき、土壌の水分供給能力の優劣が問題になる。

3. 水分供給能力測定を試み

今回、ワンステップメソッドを応用し、微砂質土壌について飽和から50 cmH₂O刻みで吸引圧を働かせたときの脱水量と吸水量を測定した。脱水量が水分供給量に相当する。

3.1 試料 粒度が比較的均一とみなされる微砂質土壌(沼山鋳物砂)を測定試料とした。

3.2 方法 Hainsの装置によるワンステップメソッド(one step method)によった。

3.3 測定装置の構成 a. JIS-G5ガラスフィルタ付き円筒ロートの上に内径5 cmの透明円筒筒を載せた。 b. 同ロートに厚肉ビニールチューブをつなぎ、全体を脱気水で満たした。 c. ビニールチューブは、ストップコックを介して細管につなぎ、デジタル天秤上の円筒容器の蓋の穴を通し、容器内の水中に細管の先端を入れた。 d. 同形同士の円筒容器で水重を測り、蒸発量を補正した。 e. 静電容量型水分センサで試料先端の水分量を測った。

3.4 測定方法 a. 試料を吊り上げ、飽和から50 cmH₂O刻みで吸引圧を上げ、植物の時間経過をデジタル天秤で測定した。 b. 水柱差が2.6 mH₂Oに達したら、逆に吸引圧を下げ、吸水量の時間経過をデジタル天秤で測定した。

3.5 結果 測定結果をFig. 4およびTable 1に示した。記号Dは土壤からの脱水(desorption)を示し、植物根への水分供給に相当する。記号Sは土壤の吸水(sorption)である。

3.6 考察 水分吸引圧の低下に伴い、特に1時間脱水量はいちじるしく減少し、2.1 mH₂Oでは0.1 mH₂Oの場合の9.48%へと低下した。この量は十分時間をかければ脱水されるであろう量の26%(=0.707/2.712)に過ぎない。すなわち、水分吸引圧が大きい状態での実時間における水分供給量は、十分時間をかけた場合の水分供給量にくらべ、かなり少ない。

4. 植物根への水分供給について(理論解析)

植物根への培地の水分供給能力の評価式を線形モデルにより導いた。

4.1 植物根の吸水態勢

直径d[m]の円柱状の根が培地中に粗に分布しているものとした。

4.2 根における吸水速度

根における吸水は、平均流量 q_0 [(m³ water/m root)/s]で、周期T[s]の正弦波状に起こり、根の単位長さ当たりの流量 q [(m³ water/m root)/s]が

$$q = q_0 \cdot [1 + \exp(i\omega t)] \quad [1]$$

で表されるものとした。 $\omega = 2\pi/T$ は角周波数[rad/s]、 $i = \sqrt{-1}$ は虚数単位、 π は円周率である。複素数による表現は、その実部(real part)が物理量になるものとする。

4.3 培地の水理特性

培地は水分容量 c [m³m⁻³/mH₂O]、水分拡散係数 D [m²/s]とした。これらは培地の水分量により値が変わるが、ここでは、適切な重みつき平均値を用いるものとした。透水係数(不飽和透水係数) k [m²/(s·cmH₂O)]は $k=cD$ である。

4.4 線形モデルによる解

培地中の水流は円柱状の根の表面に向かう半径方向の移動とした。このとき、半径 r における土壤の水ポテンシャル(マトリックポテンシャル) ϕ [cmH₂O]は、

$$\phi_r - \phi = (q_0/4\pi k) [-Ei(-r^2/4Dt) + 2\exp(i\omega t)K_0[r(i\omega/D)^{1/2}]] \quad [2]$$

となる。 ϕ_r は初期ポテンシャル[cmH₂O]、 $-Ei(-x)$ は積分指数(exponential integral)、 $K_0(z)$ は変形Bessel関数である。絶対値の小さい x 、 z については次の近似式が成り立つ。

$$Ei(-x) = \gamma + \ln x - x + x^2/4 + O(x^3) \quad [3]$$

$$K_0(z) = (1/2) \cdot \ln(4/z^2) - \gamma + O(z^2) \quad [4]$$

ただし、 $\gamma = 0.5772 \dots$ (オイラーの定数)である。

したがって、 $2\exp(i\omega t)K_0[r(i\omega/D)^{1/2}] = 2R\exp[i(\omega t + \theta)]$ と表せば、次式が得られる。

$$2R = \sqrt{[\{\ln[2DT/(C^2\pi r^2)]\}^2 + (\pi/2)^2]} \quad [5.a]$$

$$\tan \theta = -(\pi/2)/\ln[2DT/(C^2\pi r^2)] \quad [5.b]$$

ただし、 $C^2 = \exp(2\gamma) = 3.172 \dots$ である。

このとき、水ポテンシャルの1周期内の最大値と最小値の差は、

$$\phi_{\max} - \phi_{\min} = (q_0/2\pi k)(2R) \quad [6]$$

になる。周期 $T[s]$ 間の供給水分量 $W[m^3 \text{ water}/m \text{ root}]$ は、 $W=q_0 \cdot T$ であり、これが水ポテンシャルの変化 $\phi_{\max} - \phi_{\min} [mH_2O]$ によっておこなわれるので、単位水ポテンシャルあたりの供給水分量 $WSC(\text{water supply capability})[(m^3 \text{ water}/m \text{ root})/mH_2O]$ は、

$$WSC = q_0 T / (\phi_{\max} - \phi_{\min}) = 2\pi kT/2R \quad [7]$$

と見積もられる。直径 $d[m]$ の根の表面直近の土壌では、無次元数 F を、

$$F = 8DT/(C^2 \pi d^2) \quad [8]$$

と定義すれば、

$$2R = \sqrt{[\ln(F)]^2 + (\pi/2)^2}, \quad \tan \theta = -(\pi/2)/\ln(F) \quad [9. a, b]$$

さらに、後述(Table 3)のように $K_0(z)$ の実部 $(\ln(F))$ が虚部 $(-\pi/2)$ にくらべ絶対値において十分大きいときは、つぎのように近似できる。

$$2R = \ln(F), \quad \theta = -(\pi/2)/\ln(F) \text{ (radian)} \quad [10. a, b]$$

したがって、この培地の水分供給能力 $WSC[(m^3 \text{ water}/m \text{ root})/mH_2O]$ は、

$$WSC = 2\pi kT/\ln(F) \quad [11]$$

と表せる。ここで、培地の水分供給能力は、「培地から直径 $d[m]$ の円柱状の植物根の直傍まで周期 $T[s]$ の間に供給される総水量 $[m^3 \text{ water}]$ の、植物根の単位長さ $[m \text{ root}]$ 当たり、植物根直傍の単位水ポテンシャル差 $[mH_2O]$ あたりの値」と定義されるものである。

なお、流量のピーク出現時から水ポテンシャルのピーク出現時までの時間遅れ $\Delta t[s]$ は、

$$\Delta t = -\theta/\omega = T/4\ln(F) \quad [12]$$

と見込まれる。

4.5 培地の水分供給能力WSCの線形モデル解に対する考察

培地の水分供給能力WSCに関する上記の線形モデル解[11]は、極めて示唆に富む。植物根の直径が変わらなければ、WSCは $kT/\ln(F)$ に比例する。無次元数 F は $F = 8DT/(C^2 \pi d^2)$ であるので、植物根の直径が変わらなければ、 F は培地の水分拡散係数 D に比例する。

Table 1から、脱水過程の水分容量を $c = (\theta_i - \theta_e)/(0.5 \text{ mH}_2\text{O})$ (θ_i, θ_e は、それぞれ、初期および境界水分量 $[m^3 m^{-3}]$)により、また、Fig. 1の積算水量 $Q[m]$ を、 $Q = 2(\theta_i - \theta_e) \sqrt{(Dt/\pi)}$ で近似して供試土の水分拡散係数 D を推定し、Table 2の結果を得た。植物根の直径を、ヒマワリの3次根(Nagano et al., 1993)の $d = 0.3 \text{ mm}$ とし、上式[11]によりWSCを見積もるとTable 3のようになる。土壌水分吸引圧の $2 \text{ mH}_2\text{O}$ の差により生ずる水分拡散係数の53倍($= 284/5.32$)の違いは $\ln(F)$ において1.37倍($= 14.60/10.62$)の違いしかもたらず、WSCの106倍($= 263/2.48$)の違いは主として透水係数の144倍($= 706/4.9$)の違いを反映しており、水分拡散係数の変化はそれをわずか1.37分の1に弱める効果しかないことが示された。

5. 今後の課題

水分供給能力の測定については、現実の植物根における水分吸収の時空パターンに近づけて実測する必要があるだろう。解析については、土壌物性の非線形性を考慮した理論を追求する必要があると考えられる。

要 約

植物根における吸水を促す要因を、(1)植物根の吸水態勢、(2)培地の水分供給能力、(3)培地と植物根の境界の水分伝導度、に分離することを提案した。この研究では、培地の水分供給能力に対して定義を与え、測定方法を考案、実施し、それに考察を加えた。吸引圧が2.1 mH₂Oに達すると、単位吸引圧当たりの微砂質土壌の1時間水分供給量は水分飽和時の9.5%にまで低下した。水分容量 c [m³m⁻³/mH₂O]、水分拡散係数 D [m²/s]、透水係数 $k=cD$ [m²/(s·mH₂O)]の培地中に直径 d [m]の円柱状の根が粗に分布し、根の単位長さ当たりの吸水速度 [m³ water/(m root·s)]が周期 T [s]の正弦波状 $(1+\cos 2\pi t/T)$ に起こるとき、培地が供給する水量の単位吸引圧当たりの値WSC(培地の水分供給能力) [(m³ water/m root)/mH₂O]が、線形モデルにより、近似的に、 $WSC=2\pi kT/\ln(F)$ と導かれた(π , C は定数で $\pi=3.14$, $C^2=3.17$ 。Fは $F=8DT/(C^2\pi d^2)$ なる無次元数)。これにより、培地の水分供給能力を培地の水理特性から具体的に評価することが可能になった。供試土壌についてWSCを試算し、WSCの値が土壌の透水係数に強く依存することが示された。

文 献

Nagano, T., Ishida, T., Morita, S. 1993. Internal plant-water-status and its control(4). Environ. Control in Biol. 31:147-153(in Japanese with English summary).

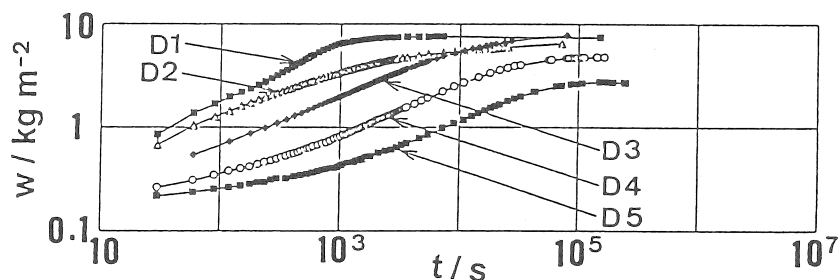


Fig. 4 Desorption with 50 cm suction increases.

Released amounts of water, w [kg/m²], with respect to time, t [s], are indicated for the desorption of the test soil. Symbols, D1 through D5, correspond to those in Tables 1, 2, and 3.

Table 1 Amount of water released or absorbed with a 12cm soil column in 1 hour and finally, due to step-wise 50cm-changes in the suction head.

D/S		$S(0)^{\#}$	$S(\infty)^{\#}$	$w(1h)^{\$}$	Λ^*	$w(\infty)^{\$}$	B^*
		mm	mm	kg m ⁻²	%	kg m ⁻²	%
D	D1	116 →	616	7.460	100.00	7.441	100.00
	D2	616 →	1116	4.797	64.30	6.492	87.24
	D3	1116 →	1616	3.686	49.41	7.768	104.39
	D4	1616 →	2116	1.557	20.88	4.794	64.42
	D5	2116 →	2616	0.707	9.48	2.712	36.45
S	S1	2616 →	2116	0.358	4.79	0.639	8.59
	S2	2116 →	1616	0.368	4.93	0.975	13.11
	S3	1616 →	1116	0.444	5.95	2.883	38.74
	S4	1116 →	616	0.351	4.70	7.858	105.61
	S5	616 →	116	1.020	13.67	n. a.	n. a.

Notes:
 &) D=Desorption, or S= Sorption.
 #) S(0) and S(∞)=Initial and final suction heads, respectively.
 \$) w(1h) and w(∞)=Amount of water exchanged in 1h and finally, respectively.
 *) A and B= Ratios of w(1h) and w(∞) to those for D1, respectively.
 n. a. : not available.

Table 2 Estimated water capacity(c), moisture diffusivity(D), and hydraulic conductivity(k) of the test soil.

	$S(0)^{\#}$	$S(\infty)^{\#}$	c	D	k
	mm	mm	m ³ m ⁻³ mH ₂ O ⁻¹	10 ⁻⁸ m ² s ⁻¹	10 ⁻⁹ m s ⁻¹
D1	116 →	616	0.249	284	706
D2	616 →	1116	0.216	42.8	92.6
D3	1116 →	1616	0.260	17.8	46.3
D4	1616 →	2116	0.153	8.33	12.7
D5	2116 →	2616	0.0913	5.32	4.9

note #) S(0) and S(∞)=Initial and final suction heads, respectively.

Table 3 Calculated values of the non-dimensional number F, and WSC(water supply capability) of the test soil when the water supply is required sinusoidally with the period of 1 d for plant roots that had uniform diameter, which was assumed as 0.3 mm, as seen in the third root of sunflower plants(Nagano et al., 1993).

	$S(0)^{\#}$	$S(\infty)^{\#}$	F	ln(F)	WSC
	mm	mm	10 ^a	1	10 ⁻⁴ m ³ m ⁻¹ mH ₂ O ⁻¹
D1	116 →	616	2190	14.60	263
D2	616 →	1116	330	12.71	39.6
D3	1116 →	1616	137	11.83	21.2
D4	1616 →	2116	64	11.07	6.24
D5	2116 →	2616	41	10.62	2.48

note #) S(0) and S(∞)=Initial and final suction heads, respectively.

Plant Growth as Affected by Fresh, Brackish and Sea Water

Toyoki Kozai(Chiba University), Michihiro Hara(Iwate University),
Shigeru Kato and Jiro Sugi(Tokyo University of Agriculture)

Summary

The objectives of the present research are to give several considerations on (1) response of salt tolerant plants to various saline conditions, (2) the concept of water-supply capability of media based on the corresponding experimental results.

Experiment 1: Response of salt tolerant plants to various saline conditions

— The salinity relations of mangrove plants —

In Iriomote Island, Okinawa, Japan, there lived six(6) species of mangrove plants making a zonal distribution according to the salt tolerance. Mangrove plants along Kuira River were analyzed to reveal the mechanism of the tolerance to sodium chloride(NaCl) in water. Concentrations of ions, organic acids, and saccharides in leaves of mangrove plants grown at the river mouth were higher than those at the upper stream where NaCl concentration in the water was much lower. The organic acids and saccharides might have been produced to adjust the osmotic pressure in the plant cells, thus to adapt to the excess cations and salts. Plantations of the mangrove plants depending upon their adaptability to the environmental salinity would lead the recovery of mangrove forests.

Experiment 2: The concept of water-supply capability of media

— Hydraulic characteristics of media as environmental factors —

Hydraulic characteristics of silty soil were measured using the one-step method from saturation up to 2.6 mH₂O in soil-water suction. The supplied amount of water in 1 h was very much restricted when suction became higher compared to the amount that would be attained in infinite duration of time. The water-supply capability(WSC) was defined as the amount of water per unit length of root and unit water-suction that would be supplied from the media to just outside the root in a cycle of period when water was absorbed harmonically with the plant root. New simple formula were deduced to evaluate the WSC. The test-soil's WSC was calculated with the formula and the hydraulic characteristics of the soil. Hydraulic conductivity was a dominant soil factor in determining the value of WSC, whereas soil-moisture diffusivity affected a little.