

# 琉球大学学術リポジトリ

## マヤプシキ(Sonneratia alba)の葉のガス交換特性とNa<sup>+</sup>含量

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学農学部 公開日: 2008-02-14 キーワード (Ja): マングローブ, マヤプシキ, 水ポテンシャル, 気孔伝導度, ガス交換速度 キーワード (En): Gas exchange, A, Ci curve, Na content, Mangrove, Sonneratia alba, Stomatal conductance, Water potential 作成者: 川満, 芳信, 吉原, 徹, 川元, 知行, 徳丸, 慶太郎, Kawamitsu, Yoshinobu, Yoshihara, Toru, Kawamoto, Tomoyuki, Tokumaru, Keitarou メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/3592">http://hdl.handle.net/20.500.12000/3592</a>

マヤブシキ (*Sonneratia alba*) の葉のガス交換特性とNa<sup>+</sup>含量

川満芳信・吉原 徹・川元知行・徳丸慶太郎

Yoshinobu KAWAMITSU, Toru YOSHIHARA, Tomoyuki KAWAMOTO and Keitarou TOKUMARU

Gas exchange characteristics and Na<sup>+</sup> content of the leaf in *Sonneratia alba*

キーワード：マングローブ, マヤブシキ, 水ポテンシャル, 気孔伝導度, ガス交換速度.

Key words : Gas exchange, A/Ci curve, Na content, Mangrove, *Sonneratia alba*, Stomatal conductance, Water potential.

## Summary

The mangrove has a special salt filtration, thus salt tolerance mechanism. The photosynthate produced in the leaf is transferred to each organ and used for the salt tolerance process.

In this report, we examined the gas exchange characteristics and Na<sup>+</sup> content of the leaf in *Sonneratia alba*, a high salt tolerance species. *Sonneratia alba* had the highest leaf photosynthetic rate as 20  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , *Rhizophora stylosas* = 13  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , *Bruguiera gymnorrhiza* = 8  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , *Kandelia candel* = 15  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , *Avicennia marina* = 13  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , *Nyssa fruticans* = 9.3  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , and *Lumnitzera racemosa* = 9  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Na<sup>+</sup> concentration in the leaf was higher in *Avicennia marina* than other species due to the salt glands on the leaf.

## はじめに

沖縄県西表島東部の由布島対岸には、海岸線に沿ってマヤブシキ (*Sonneratia alba*) が群落を形成している。根圏が常時、海水の影響を受ける環境にあるにも関わらず、沿岸部に生育する他種に較べて樹勢は旺盛である。マヤブシキには直立気根があり、その気根の表皮の下には葉緑素を有する組織があり、光合成を行い、それにより生成したO<sub>2</sub>が泥中の根に拡散して呼吸に利用されていることが報告されている(矢吹ら, 1990a,b)。このように、マヤブシキの気根を含めた地下部についてはその生理学的研究が進められているものの、地上部に関する生理生態学的な研究は僅か Bjorkman (1988) の例に限られる。

本報では、マヤブシキの葉身の光合成速度と葉の水ポテンシャル特性について調査し、また、葉の全窒素含量およ

びイオン含量についても調査を行い、他種との比較も行った。次に、幼木をガラス室内にてポットで育成し、環境制御した条件下で葉の光合成特性について詳細に調べた。

## 材料及び方法

野外調査: 供試材料は、マヤブシキ科 (Sonneratiaceae) のマヤブシキ (*Sonneratia alba* J. Smith) である。また、比較のために、オヒルギ (*Bruguiera gymnorrhiza*)、メヒルギ (*Kandelia candel*)、ヤエヤマヒルギ (*Rhizophora stylosa*) およびヒルギダマシ (*Avicennia marina*) を用いた。

調査は、西表島(北緯24.2', 東経123.6')で実施した。マヤブシキの調査は美原地区内の由布島対岸で行い、他種については船浦湾の内陸側および、浦内川河口にて行った。調査は、1995年8月16日から8月20日、1996年3月10日から3月12日および同年6月26日から6月29日に実施した。

葉身のガス交換特性は、携帯型光合成蒸散測定装置 (SPB-H4, 島津社製) を用いて測定した。測定部位は、地上約1~1.7mの高さにある対になった第2完全展開葉を4葉選び、各葉身当り3回の測定を行った。

葉身のガス交換特性や水ポテンシャルの日変化については、日の出前の午前6時から測定を開始し、2時間毎に12枚の葉身を対象に測定を行った。そのうち、5枚については、光合成測定直後に水ポテンシャルの測定に用いるため枝から切り放し、残りの7枚については印をつけ午後6時までの測定に用いた。測定には、太陽光が十分当たっている葉身を使用し、午後からは、同じ木の太陽光が当たる西側に移動し、新しい葉を選んで印をつけ直し測定に用いた。被測定葉は、葉緑素計 (SPAD-502, ミノルタ社製) を用い

てSPAD値を測定した。葉の水ポテンシャルは、プレッシャーチャンバーを用いて測定した。光合成測定直後に葉を枝との付け根付近からカッターナイフで切り取り、素早くチャンバー内にセットした。チャンバー内に圧を徐々に加え、葉柄の木部から汁液が浸出した瞬間の目盛りを読み取り葉の水ポテンシャル値とした。この値は、双子葉植物の場合、葉身細胞内の水ポテンシャルに等しいとみなされ、また、正確には木部圧ポテンシャルと呼ばれている。

葉身のイオン含量は、川満ら (1997) に準じて定量した。水ポテンシャル測定後、各葉身を紙封筒にいれ実験室に持ち帰り、80℃で48時間以上乾燥した。また、1996年3月12日の調査では、各種の葉身を採取し、葉面積を測定後、上記と同様の条件で乾燥した。十分に乾燥したのを確認した上で乾物重を計量し、摩砕して乾燥粉末とした。各種葉身の採取に関しては、第1及び第2展開葉の若い葉身を採取し分析に用いたが、採取場所の違いや、樹齢、樹高に関しては考慮にいれていない。

イオンの抽出は、乾燥粉末を0.25g秤量し、カチオンは0.5%硝酸水溶液、アニオンは超純水を50ml加え、80℃で24時間振透した。イオン分析には、イオンクロマトグラフィー (DX-Q, DIONEX社製) を用い、カチオン ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) は、分離カラム (IonPac CS12) とサプレッサー (CSRS-I) を用いて、溶離液には20mMメタンスルホン酸を使用した。アニオン ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ) の分析は、分離カラム (IonPac, AS4A-SC), サプレッサー (ASRC-I) を用いて行い、溶離液には4 mM  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ と1.5mM  $\text{NaHCO}_3$ を使用した。それぞれの溶離液の調整には、Milli-RX (日本ミリポア社製) で精製した超純水を使用した。全窒素含量の分析は、N/Cアナライザー (NC-90A, 島津) を用いて行った。試料は、イオン分析に用いたものと同様の乾燥粉末を0.02g秤量し用いた。

**環境制御下におけるガス交換特性:** 供試材料は、マヤブシキ (*Sonneratia alba* J. Smith) である。1996年3月12日に、由布島対岸に生じていたマヤブシキの幼齢木の根を傷つけないように採取した。3月13日に海砂:腐葉土を1:1 (v/v) に詰めた1/2000aワグネルポットに移植し、液体肥料を100mM  $\text{NaCl}$ 水溶液に混ぜて4日毎に500ml与えガラス室で育成した。施肥の際には、一度ポット内の水溶液を抜取ってから行い、湛水状態を維持した。液体肥料の組成は、既報 (川満ら, 1995) と同様である。ポット栽培の途中、葉身に黄化が認められたため、Fe欠乏と判断し、5月28日からは、0.1mM  $\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7$ に換えて0.1mM EDTA-Na-Fe ( $\beta$ ) を与えた。

塩処理区として、100および400mM区をもうけた。100mM区については移植時の濃度をそのまま維持した。400mM区については4月12日から50mM単位で徐々に $\text{NaCl}$ 濃度を上げていき400mMになった時点で測定までその濃度を維持した。0mM区については、1994年3月に由布島対岸で採取した幼齢木をガラスハウス内にて液体肥料のみを与え育成した。

ガス交換速度は、光合成・蒸散同時測定装置を用いて行っ

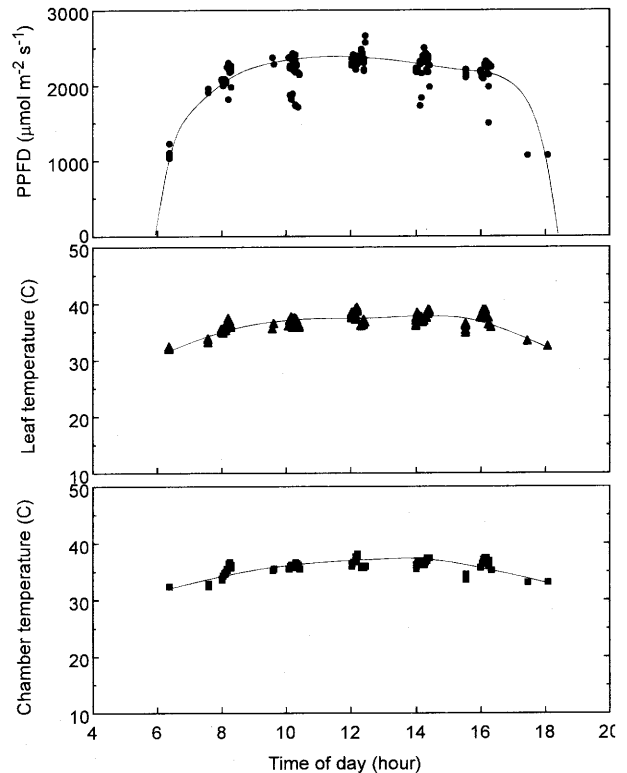


Fig. 1. Time changes in photon flux density (PPFD), leaf temperature, and chamber temperature under field conditions at Iriomote Island. Measurement was done on June 28, 1996.

た。エアーコンプレッサーにより取り込んだ大気空気をマスフローコントローラー (SEC-4400, STEC社製) によって流量を調節し、ソーダ石灰を通過させて $\text{CO}_2$ -freeガスを作成した。その後、湿度コントローラーを通過させ、マスフローコントローラー (SEC-4500, STEC社製) により流量制御された5% $\text{CO}_2$ とミキシングボックス内で混合され、目的とする $\text{CO}_2$ 濃度に調整した後、同化箱内へと送られる。葉温及び導入空気の露点は、クールニクス (CTE82W, ヤマト社製) によって制御した。光源には、陽光ランプ (D-400, 東芝社製) を3個使用し、光源と同化箱の間に水槽を設けて熱線をカットした。葉温は、熱伝対 (T型) を測定葉の裏面に2ヶ所クリップで挟んで測定した。同化箱出入口の $\text{CO}_2$ 濃度及び相対湿度の差は、各々、赤外線分析計 (LI-6251, LI-COR社製)、相対湿度センサー (HMP-112Y, バイサラ社製) で測定した。これらの信号は、A/D変換 (HR-1300, 横河社製) を経由しパーソナルコンピューターに取り込まれ、予め入力した葉面積を基に全ての関連パラメーターを算出した。

“光-光合成曲線”は、光源と同化箱の間に遮光ネットを重ねていくことにより、最強光の207.0から始め、弱光の8.0  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ までの8段階の光量子密度下で測定した。測定は、露点温度を15℃に設定し、葉温を20, 25, 30及び35℃の4段階とした。“ $\text{CO}_2$ -光合成曲線”は、添加する $\text{CO}_2$ 濃度を0から1000ppmまで、順次濃度を上げていく方法で行っ

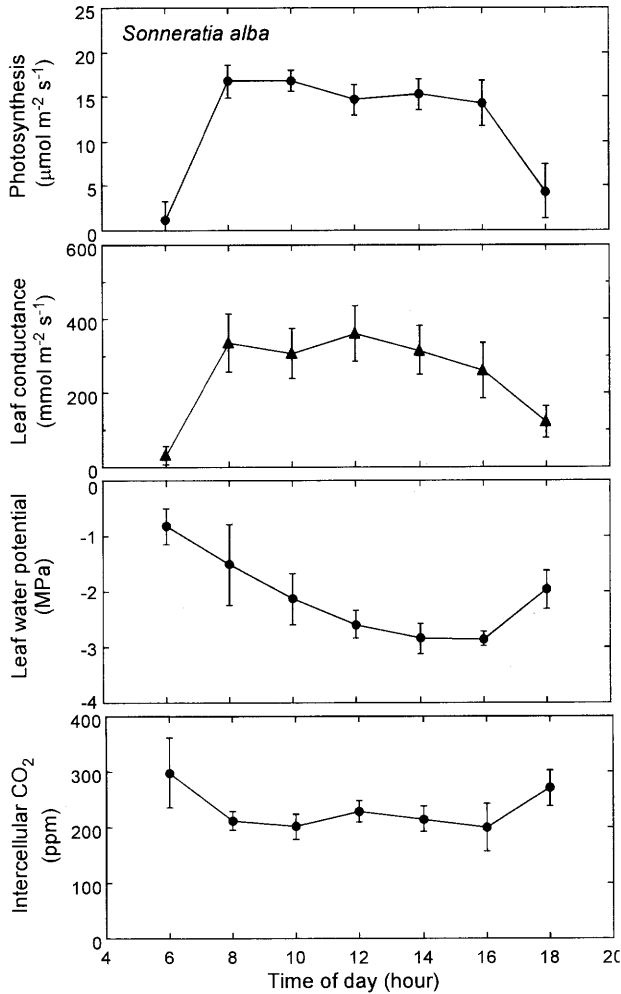


Fig. 2. Time changes in photosynthesis, leaf conductance, and water potential ( $\Psi_w$ ) under field conditions at Iriomote Island.

た。測定条件は、光量子密度 $1400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、葉温 $30^\circ\text{C}$ 及び露点温度 $20^\circ\text{C}$ で行った。測定に際しては、材料の第1及び第2展開葉のうち1枚または葉面積が小さい場合には数枚を同時に同化箱にセットした。

## 結果

自然条件下におけるマヤブシキの光合成及び水ポテンシャルの日変化

1996年6月28日の気温および相対湿度は、最高気温は $32.2^\circ\text{C}$ 、最低気温は $28.5^\circ\text{C}$ であり相対湿度は75~85%であった。携帯型光合成装置に内蔵されたセンサーで計測された測定日の光量子密度、葉温及びチャンパー内の温度を図1に示した。光量子密度は、日の出から上昇し始め日中はほぼ $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 付近で推移し、午後5時以降急激に低下したが、比較的安定した光条件であった。葉温及びチャンパー温度は、 $32\sim 37^\circ\text{C}$ の間にあり、チャンパー内の温度は、大気温度より高く推移した。光合成速度は、光量子密度が $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に

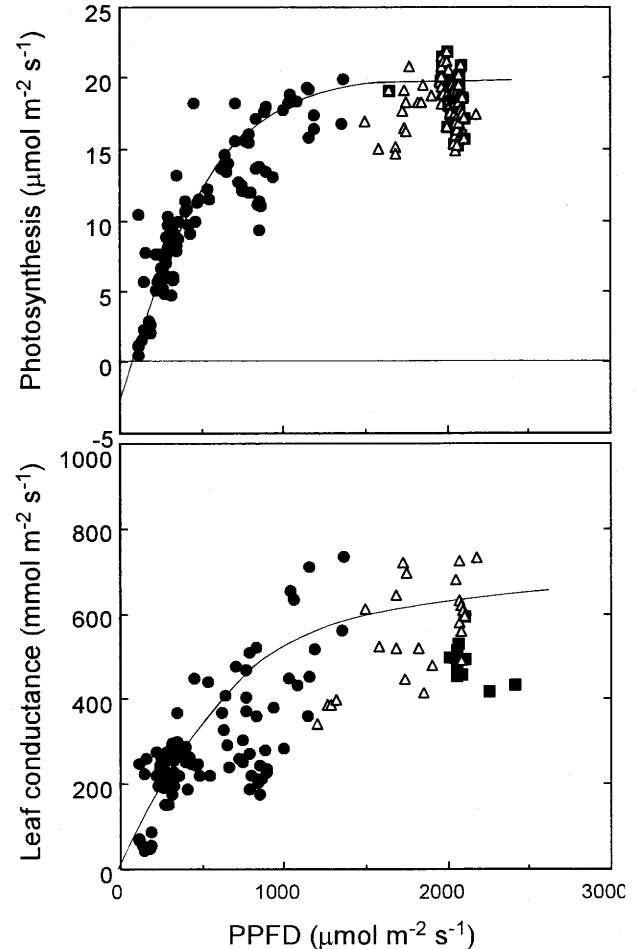


Fig. 3. Effect of irradiance on photosynthesis and leaf conductance of *Sonneratia alba* under field conditions at Iriomote island. Leaf temperatures were  $<34^\circ\text{C}$  (●),  $34 - 37^\circ\text{C}$  (■),  $>37^\circ\text{C}$  (△) on August 16-20, 1995.

達する午前8時頃には最大値に達し、午後は僅かに低下するものの、1日を通してほぼ一定に推移した(図2)。光合成速度は、午前中 $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 付近を維持し、西表島に生息するマングローブ樹種中最も高い値を記録した。また、この値は、水稻や小麦など、 $\text{C}_3$ 植物の光合成速度に匹敵する。気孔開度を表す気孔伝導度は、午前中 $300 \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 前後で推移し、12時に最大値を示した後、徐々に低下に転じた。これら光合成速度と気孔伝導度との関係をすべて込みにして検討した結果、相関係数 $r=0.81$ と極めて高かった。しかし、午前と午後で比較した場合、相関係数は午前で高く、午後低下する結果が得られ、午後の気孔伝導度の低下に対し光合成速度は変動しなかった。水ポテンシャルは、夜明け前では $-0.8 \text{MPa}$ と高い値を示したが、日中徐々に低下し午後4時には $-2.9 \text{MPa}$ まで低下し、その後上昇に転じた。水ポテンシャルは1日を通して $2.1 \text{MPa}$ も低下したにも関わらず、光合成速度には殆ど影響を与えなかった。水ポテンシャルが最低の $-2.9 \text{MPa}$ となる午後4時の光合成速度は $14.2 \pm 2.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と、他の高等植物では考えられな

Table 1. Effects of plant size on the gas exchange characteristics and water potential in *Sonneratia alba*.

Items	Plant size		
	Mature	Middle	Young
Gas exchange			
Photosynthesis <sup>1)</sup>	15.6±0.8	15.7±0.9	19.8±2.7
Leaf conductance <sup>2)</sup>	261.7±38.2	313.3±46.8	390.0±81.1
Transpiration rate <sup>2)</sup>	4.9±0.6	5.6±0.6	6.2±0.7
C <sub>i</sub> <sup>3)</sup>	204.7±13.8	218.1±15.8	203.7±24.0
WUE <sup>4)</sup>	3.21±0.41	2.84±0.40	3.24±0.73
Water potential (MPa)	-2.34±0.06	-2.58±0.72	-1.95±0.57

Note: 1)  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 2)  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 3)  $\mu\text{l l}^{-1}$ , 4)  $\mu\text{mol mmol}^{-1}$   
 Measurements were done at Iriomote Island on 26th June, 1996.  
 Gas exchange was measured over  $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  of PPFD.  
 Water potential was measured by pressure chamber from 9:00 to 11:00.

Table 2. Leaf gas exchange characteristics and water potential under field conditions in mangrove species in Iriomote island.

Species	Photosynthesis ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Conductance ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Transpiration ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	C <sub>i</sub> ( $\mu\text{l l}^{-1}$ )	WUE ( $\mu\text{mol mmol}^{-1}$ )	Water potential (MPa)
<i>S. alba</i> *	18.9±1.2	207.8±68.5	4.1±0.6	237.7±22.3	4.76±0.97	-2.4±0.1
<i>A. marina</i> **	15.8±1.4	171.8±98.0	5.2±0.1	248.9±16.4	3.02±0.23	-3.2±0.6
<i>B. gymnorhiza</i> *	7.5±0.9	483.8±91.2	3.7±0.8	293.6±14.6	2.11±0.43	-2.4±0.2
<i>K. candel</i> **	9.2±0.7	375.8±141.5	5.8±0.9	272.4±22.6	1.65±0.41	-3.0±0.3
<i>R. stylosa</i> **	10.1±1.7	363.8±183.4	5.5±1.2	262.6±30.2	1.96±0.64	<-4.0

Note: The measurements were performed at \*Yufu and \*\*Urauchi in Iriomote Island (Aug. 16-20, 1995).  
 PPFD was  $>1300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , VPDs were 34.1mb and 34.3mb in Yufu and Urauchi, respectively.

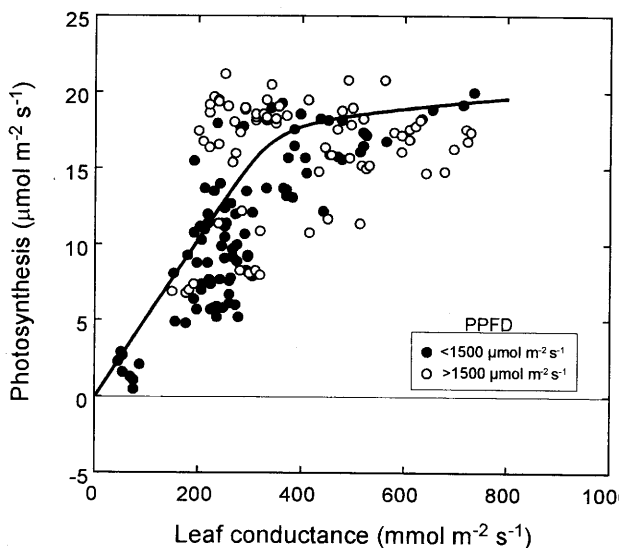


Fig. 4. Relationship between photosynthesis and leaf conductance in *Sonneratia alba*. Data was drawn from Figure 3.

い状態である。

気孔伝導度は気温及び葉温が最も高い12時の測定で最大値を示し、午後からは徐々に低下した(図2)。葉内CO<sub>2</sub>濃度は、光強度が低下する午前6時と午後6時には高く、日中は低下してほぼ一定に推移した。葉内CO<sub>2</sub>濃度は、C<sub>3</sub>植物の場合200ppm、C<sub>4</sub>植物では130ppm前後で、その値から判断する限り、C<sub>3</sub>植物に属する。光合成速度と蒸散速度の比で表される水利用効率でみると、光合成が最大になる午前8時には最大の $3.5 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$ を示し、蒸散速度が最大となる正午には最低の $2.6 \mu\text{molCO}_2 \cdot \mu\text{molH}_2\text{O}^{-1}$ を示した。しかし、午後4時には $3.0 \mu\text{molCO}_2 \cdot \mu\text{molH}_2\text{O}^{-1}$ まで回復した。気孔伝導度および蒸散速度と水ポテンシャルは、いずれも負の関係にあるものの蒸散速度の方が密な関係( $r=0.64$ )を示した。

自然条件下における光強度及び葉温と光合成速度との関係

調査は、1995年8月16日から同年8月20日にかけて実施した。8月は測定中にスコールに見回れ、また、光量子密度の安定した日がなく、日変化を調べることはできなかった。

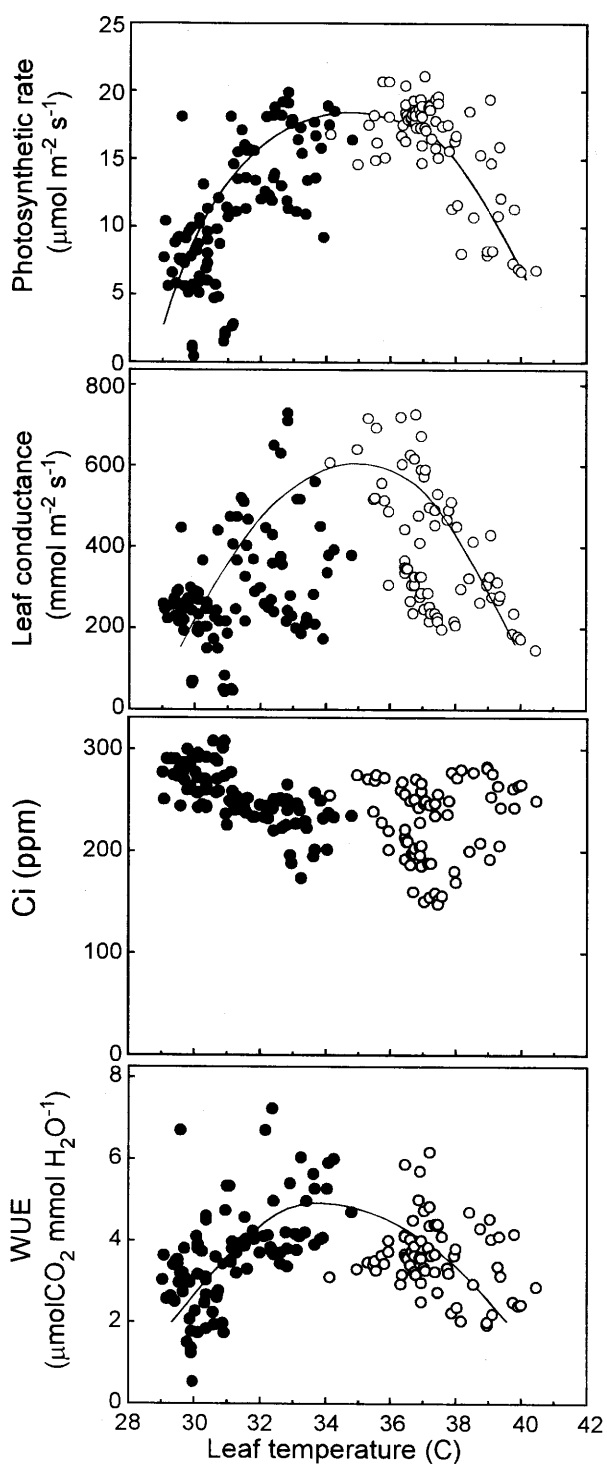


Fig. 5. Effect of leaf temperature on photosynthesis and leaf conductance and intercellular CO<sub>2</sub> concentration for *Sonneratia alba* under field condition at Iriomote island. Irradiance were < 1500 (●) and > 1500 (○)  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

た。そこで、晴れ間を見計らって測定したデータを整理し、マヤブシキの光に対する光合成及び気孔伝導度の反応として、葉温別にプロットした(図3)。光合成速度及び気孔伝導度は、光量子密度 $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 付近で飽和した。ま

た、葉温 $34^\circ\text{C}$ 以上は、飽和した所に分布した。光合成と気孔伝導度との関係を見ると(図4)、光量子密度が $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下では、高い相関関係( $r=0.801$ )を示すが、 $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上では横ばいになった。これより、飽和点以下の光条件では光合成速度は気孔伝導度と密な関係にあり、飽和点以上では気孔以外の要因に支配されることが認められた。

葉温に対する光合成、気孔伝導度、蒸散速度、葉内CO<sub>2</sub>濃度及び水利用効率を光量子密度 $1500$ 以上と $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下で分けプロットした(図5)。光合成、気孔伝導度、蒸散速度及び水利用効率は、 $34\sim 36^\circ\text{C}$ の間にそれぞれの最適値を示した。それらは、光量子密度 $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上と以下の境目にあった。葉内CO<sub>2</sub>濃度は、 $36^\circ\text{C}$ を超えると変動の幅が大きくなった。

#### 樹齢別にみたガス交換、水ポテンシャル、イオン含量及び全窒素含量の比較

マヤブシキは日中の水ポテンシャルが大きく低下するにも関わらず高いガス交換速度を維持していた。マヤブシキが、日中の高い光合成を維持するためには、根系による水の選択的吸収が極めて重要であると考えられる。そこで、根の発達程度が異なると考えられる樹齢別に、イオン含量及び全窒素含量の比較を行い、加えて各々のガス交換速度も調査した(表1)。光合成速度は、壮齢木及び若齢木に比べて幼齢木が高かった。気孔伝導度及び蒸散速度についても、壮齢木及び若齢木より幼齢木が高い値を示した。また、葉身の水ポテンシャルは、壮齢木及び若齢木に比べて幼齢木が高く、根の発達程度が劣ると予想され水の選択的吸収が劣るとの考えはこの結果からは支持できない。つまり、幼齢木の時点で、すでに、マヤブシキは最大の光合成能力を発揮し、そのための水確保も十分に行われていることが明らかになった。葉内CO<sub>2</sub>濃度には樹齢による違いはなかった。

イオン含量の比較でみると、樹齢が若くなると葉身のNa<sup>+</sup>とCl<sup>-</sup>含量は増加した。一方、K<sup>+</sup>含量は、壮齢木及び若齢木に比べて、幼齢木で値は低下した。したがって、細胞の浸透圧調節に関係が深いとされるK<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比は、壮齢木及び若齢木に比べて幼齢木で半分程度の値となった。全窒素含量をみると、幼齢木が高い値を示したが、大きな差ではなかった。クロロフィル含量の指標となるSPAD値は、幼齢木がやや高い値を示したが、これも大きな差ではなかった。

#### ガス交換速度に及ぼす塩濃度、葉温、光強度の影響。

ポット栽培したマヤブシキのガス交換速度に及ぼす塩濃度、葉温、光強度の影響を厳密に制御した条件下で測定した(図6)。100mM区では、光量子密度が $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 付近で光飽和に達した。一方400mM区では、葉温 $25$ と $30^\circ\text{C}$ ではやや不飽和型に近い“光-光合成曲線”を示した。しかし、光量子密度が $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を超えたあたりで曲線は緩やかになるため、両処理区とも自然条件下での動きに一致するといえる。葉温の影響についてみた場合、100mM区では、葉温 $25^\circ\text{C}$ において光合成速度の最適温度が得られたが、 $30^\circ\text{C}$ との明確な差はなくほとんど同一曲線上であっ

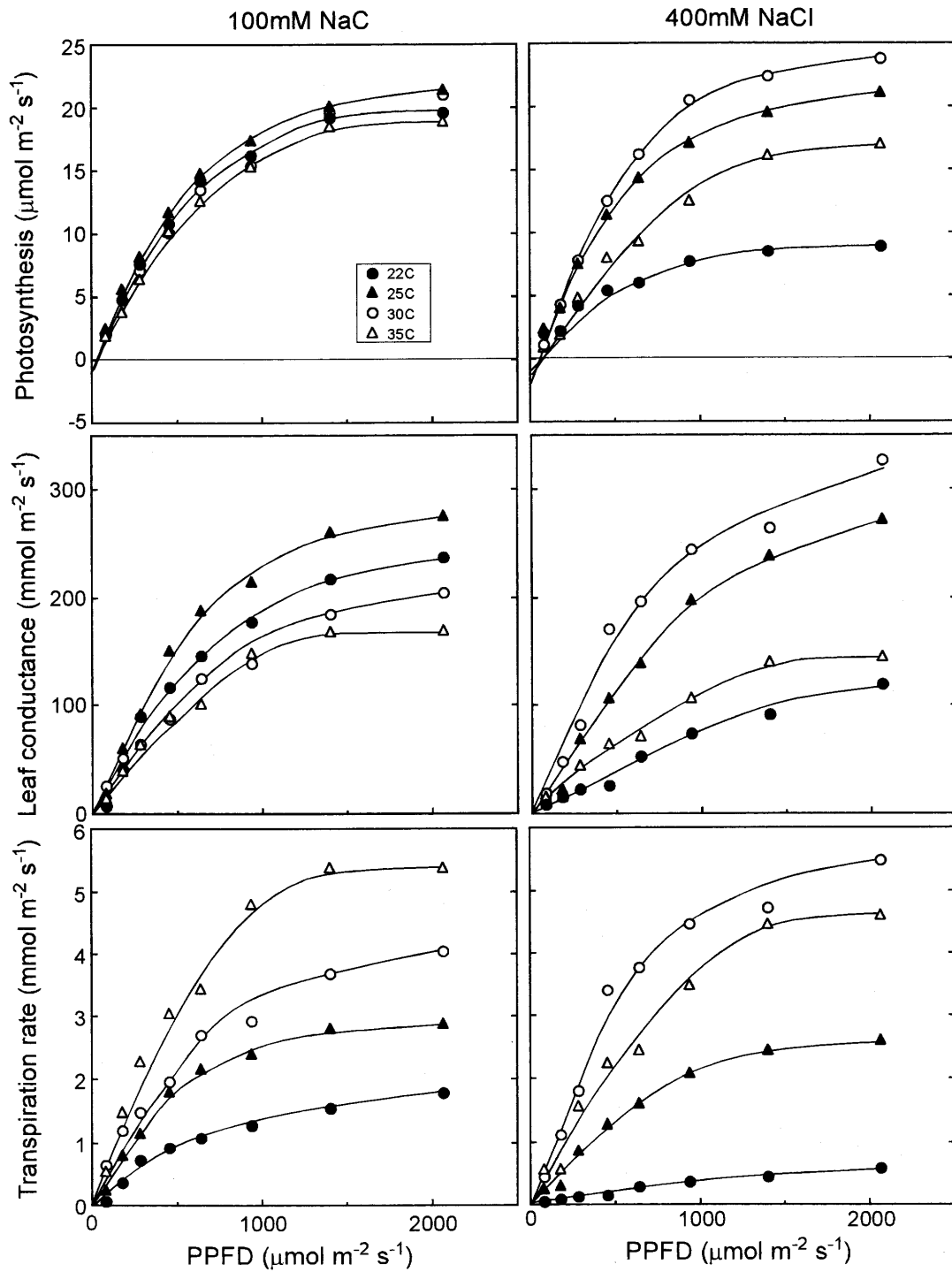


Fig. 6. Photosynthesis, leaf conductance and transpiration rate as a function of irradiance at different leaf temperature in *Sonneratia alba* grown at 100 and 400 mM NaCl. Dew point was 15 °C.

た。400mM区では、葉温30°Cに最適値がみられた。また、葉温による最大値の違いは100mM区に比べて著しかった。光合成の最大値は100mM区より400mM区で高かった。

次に、気孔伝導度及び蒸散速度に及ぼす光量子密度の影響をみると(図6)、100mM区では、葉温の変動と連動して

おこる葉面飽差の変動に対し、葉温が高いと気孔が閉じ、蒸散速度が上昇することが確認できた。一方400mM区では、葉温30°Cにおいて、気孔が最も開き且つ蒸散も高い結果となった。また、気孔伝導度においては25と30°Cで不飽和型の反応を示し、100mM区の反応とは異なる動きを示した。

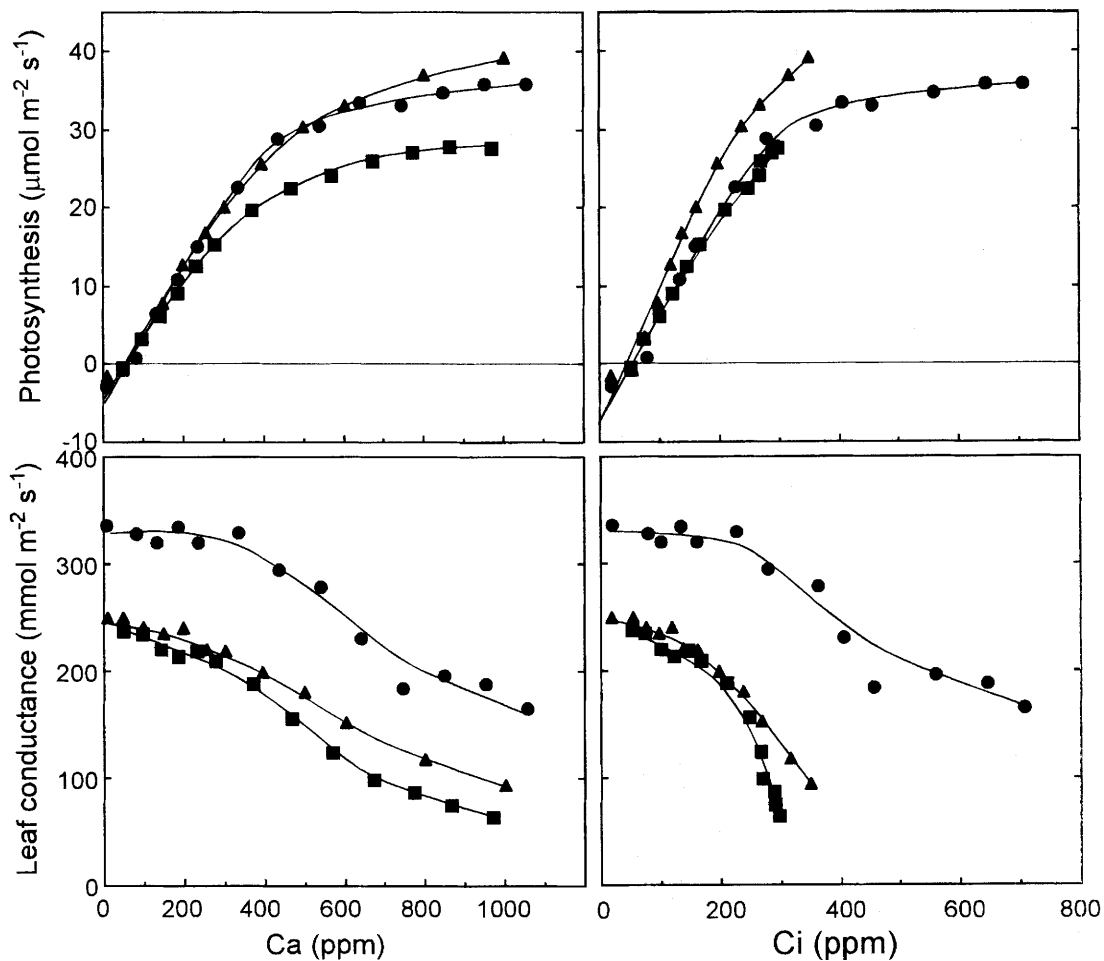


Fig. 7. Effect of ambient CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis and leaf conductance (gs) in *Sonneratia alba* grown at 0 (●), 100 (▲) and 400 (■) mM NaCl. Leaf temperature and dew point were 30°C and 20°C, respectively. Photon flux density was 1400 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>.

本実験では、露点温度を15°Cに固定して葉温のみを変化させてガス交換を測定した。従って、葉温の変動による葉面飽差の変動の影響は、いずれの測定項目でも400mM区において顕著に表れていることが認められた。

CO<sub>2</sub>濃度が塩処理したマヤブシキのガス交換速度に及ぼす影響

外気のCO<sub>2</sub>濃度を0から1000ppmまで変化させたときの光合成および気孔伝導度の反応について図7に示した。マヤブシキは、光合成速度が低CO<sub>2</sub>濃度では飽和しない典型的なC<sub>3</sub>型のCO<sub>2</sub>反応を示し、全区ともCO<sub>2</sub>濃度が約800ppmで飽和に達した。しかし、最大光合成速度は400mM区が他の処理区より低い値を示した。大気中のCO<sub>2</sub>濃度である350ppmでは、やや400mM区の値が小さくなるものの処理間に大きな違いはみられず、ここでも耐塩性の著しい植物であることが強調される。気孔伝導度については、最大値において処理区間に大きな違いが認められ、塩処理は、光合成速度よりも気孔伝導度に大きく影響を及ぼすことが明らかになった。

次に、CO<sub>2</sub>濃度を変化させたとき、計算に依って求めた葉内CO<sub>2</sub>濃度を横軸に取り、光合成及び気孔伝導度との関係をプロットした(図8)。光合成速度は、0mM区では400ppm付近飽和した。しかし、100及び400mM区では、気孔が急激に閉鎖したため飽和点には至らなかった。気孔伝導度は、0mM区では、250ppm付近から緩やかに低下し、100及び400mM区では、150ppm付近から急激に低下した。また、塩処理により、気孔伝導度の最大値が大きく低下しているのが観察できた。光合成と葉内CO<sub>2</sub>濃度との関係を初期勾配で比較すると、100mM区が0及び400mM区に比べて高い傾きを示した(図8)。また、光合成速度と葉内CO<sub>2</sub>濃度との関係式よりCO<sub>2</sub>補償点を算出したところ、100mM区では62ppmに、0mMおよび400mM区ではそれぞれ47と52ppmにみられ、塩分濃度に伴って光呼吸速度が変化すると予想される。

CO<sub>2</sub>濃度が350ppm時の水利用効率を塩処理間で比較すると、400mM区において最も高い値7.3を示し、100mM区では6.7、0mM区では4.3μmolCO<sub>2</sub>・mmolH<sub>2</sub>Oと処理濃度の増加による水利用効率の増大がみられた(図9)。



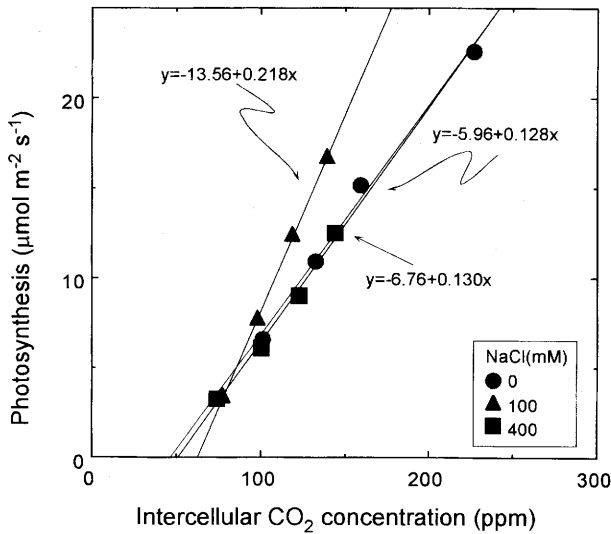


Fig. 8. Initial slope of A/Ci curve in *Sonneratia alba* grown at different NaCl concentrations. See Figure 7 for the measurement conditions.

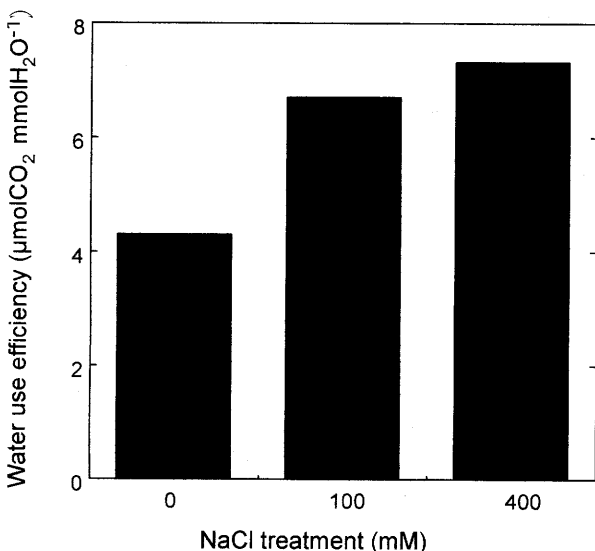


Fig. 9. Comparisons of water use efficiency at different NaCl treatment.

## 考 察

葉のガス交換特性を、他のマングローブ樹種と比較すると、調査地の違いや天候不順による測定時刻のずれはあるものの、マヤブシキの光合成能力には特筆すべき点がある。自然条件下における比較的高い光合成速度について、葉に塩類腺を有するヒルギダマシでは約 $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と報告 (Scholanderら, 1962; Cloughら, 1989) されている。マヤブシキの水利用効率は他種に比べて高いことが認められ、単位水分子当りの炭酸ガス固定量が高く、効率的に水を利用していることを示している。マヤブシキの葉の水ポテン

シャルは、オヒルギと同様であり他種に比べて高かった。

西表島に分布する各種マングローブを葉身のイオン含量及び全窒素含量で比較すると (表3), 塩類腺を有するヒルギダマシは他種に比べ $\text{Na}^+$ 含量が高く、次いで、マヤブシキが高い濃度を蓄積していた。また、全窒素含量においても両種は、他種に比べて高かった。葉身の全窒素含量と $\text{Na}^+$ 含量との間には高い正の相関関係があり、耐塩性機構と窒素との関係が示唆される (川満ら, 1997)。本報でも、ヒルギダマシに次いでマヤブシキの葉の全窒素含量は高かった。これは、両種の生育場所が、潮の干満差の小さいところに多く分布しており堆積物が豊富にある環境であると共に、最沿岸部で生きる両種にとって窒素が重要な役割を果たしていることが考えられる。しかし、窒素レベルは茎や根の生長には影響を及ぼすが、組織の水ポテンシャルに何ら影響を与えないと言われ (Naidoo, 1987), 耐塩性を獲得する上で多量の窒素が必要不可欠のものであるのか、偶然両種が生育する環境的要因によるものであるのか、今後明らかにする予定である。ヒルギダマシについては、窒素代謝物であり耐塩性に重要な因子としてとり上げられている浸透圧調節物質のグリシンベタインの蓄積が報告されており窒素の積極的要求があると考えられる。

一般に、100mM NaCl存在下でも生存可能な高等植物を塩生植物 (halophyte) とよび、その中のホソバナアカザ (アカザ科) について、耐塩性機構が明らかにされている (間藤, 1991)。ホソバナハマアカザは、根圏の高塩濃度溶液に対し、 $\text{Na}^+$ を葉身に溜め込んで根圏より高い葉身浸透圧を生み出し、この $\text{Na}^+$ 塩を液胞に隔離して細胞質の $\text{Na}^+$ 濃度を下げ、液胞にベタインを蓄えることで浸透圧バランスをとっている。しかし、高塩濃度条件下で生育を維持できてもその成長量は著しく抑制される (間藤, 1991)。

自然条件下で測定した“光-光合成曲線”をみると (図3), 光量子密度が $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 付近で光飽和していることがわかる。さらに、この時の光合成と気孔伝導度との関係を見ると (図4), 光量子密度が $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下のときは、高い相関関係 ( $r=0.801$ ) を示すが、光量子密度が $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上になると関係はなくなる。Ballら (1988) は、気孔伝導度の作用に対する光合成速度の傾きには、種間差異があり、その違いは水利用効率の違いを意味し、耐塩性と関係することを示唆している。しかし、彼らが示したオヒルギで0.072, ヤエヤマヒルギでは0.101の値と今回測定したマヤブシキの0.029は、西表島の分布とは必ずしも一致しなかった。

次に、自然条件下で測定したガス交換速度の結果を葉温との関係で検討する。光合成、気孔伝導度、蒸散速度および水利用効率において、葉温 $35^\circ\text{C}$ 付近に最適値がみられた。この場合、葉温が上昇するとそれに伴って葉面飽差も変化するため、その影響も考慮しなければならない。光量子密度が $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下の時、葉温が低いと葉内 $\text{CO}_2$ 濃度はやや高めに推移し、光合成の低下は葉温の影響による気孔伝導度の低下よりも光条件にあることが窺える。一方、光量子密度が $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上の時には、葉温の増加に伴って光合

Table 3. Comparisons of contents of cation, anion and total nitrogen among the three mangrove in Iriomote island.

Items	<i>K. candel</i> *	<i>B. gymnorrhiza</i> **	<i>R. stylosa</i> **	<i>S. alba</i> ***	<i>A. marina</i> *
----- Cation (mmol g <sup>-1</sup> DW) -----					
Na <sup>+</sup>	0.452±0.124	0.635±0.155	0.654±0.118	0.879±0.199	1.393±0.135
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.043±0.006	0.034±0.007	0.035±0.005	0.049±0.007	0.054±0.006
K <sup>+</sup>	0.335±0.085	0.106±0.017	0.206±0.050	0.346±0.090	0.187±0.062
Mg <sup>2+</sup>	0.205±0.068	0.322±0.060	0.333±0.068	0.246±0.041	0.305±0.044
Ca <sup>2+</sup>	0.201±0.058	0.485±0.104	0.526±0.077	0.341±0.074	0.227±0.025
K <sup>+</sup> / Na <sup>+</sup>	0.783±0.246	0.174±0.041	0.329±0.125	0.405±0.110	0.137±0.055
----- Anion (mmol g <sup>-1</sup> DW) -----					
Cl <sup>-</sup>	nd	0.725±0.143	1.125±0.178	1.257±0.322	nd
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	nd	0.065±0.037	0.059±0.028	0.025±0.013	nd
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	nd	0.016±0.003	0.016±0.002	0.022±0.003	nd
-----					
Total N <sup>1)</sup>	0.057±0.006	0.049±0.009	0.043±0.003	0.068±0.007	0.096±0.009
SLA <sup>2)</sup>	62.6±4.7	61.3±8.0	51.1±3.3	60.0±6.2	64.7±4.9
SPAD	64.4±6.4	72.4±4.3	68.1±4.5	62.2±4.1	57.5±4.0

Note: 1) mmol g<sup>-1</sup>DW, 2) cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>DW. nd means no data.

Measurements was at \*Urauchi, \*\*Funaura bay, \*\*\*Yufu in Iriomote Island on March 12, 1996.

成速度及び気孔伝導度は低下し、葉内CO<sub>2</sub>濃度にばらつきがみられた。光飽和点以上での葉温の上昇とその結果生じる葉面飽差の増大は、マヤブシキのガス交換に影響を及ぼすことが明かとなった。Andrews (1985) は、自然条件下におけるヤエヤマヒルギについて調査し、光合成速度と気孔伝導度の両方に影響を及ぼす主な環境的変動は、光強度と高い葉温およびその結果としておこる葉面飽差の上昇であると報告し、本結果と一致する。マヤブシキのガス交換速度の日変化についてみると(図3)、光合成速度は、気孔が閉じ始める12時以降でも影響を受けない。これは、光が十分にあれば気孔よりも非気孔要因に光合成速度が律速されていることを意味している。また、葉内CO<sub>2</sub>濃度は、光強度の低下する午前6時と午後6時に増加し、日中はほぼ一定であった。これは、CO<sub>2</sub>固定系の活性が日中を通して維持されていることを示している。

葉の水ポテンシャルは、夜明け前の-0.8MPaと高く、午

後4時頃-2.9MPaと最低値に達した(図2)。しかし、その水ポテンシャルの低下と光合成速度の低下は必ずしも一致しなかった。夜明け前は、蒸散速度がほぼゼロであり、その時の水ポテンシャルは植物自体が持つ純粋なイオン排除能を表すといわれる(Boyer and Kramer, 1995)。測定当日、夜明け前は満潮であり、根圏の水ポテンシャルは-2.4MPa程度で、水ポテンシャルの勾配から水の移動を判断すると、水は植物体から外部へと流れ出ることになる。以上より、マヤブシキは根系でほとんどの塩分を積極的に排除していると推察される。

マングローブは、葉齢が進むにつれ葉身内のNaCl含量が増加することが知られている(川満ら, 1997)。しかし、葉身のイオン含量は、Na<sup>+</sup>およびCl<sup>-</sup>含量がやや増加する傾向はあるものの大きな日変動はなかった(図10)。すなわち、マヤブシキの葉身内では1日の内で蒸散流によって僅かな量のNa<sup>+</sup>およびCl<sup>-</sup>が根から地上部へ上昇し蓄積されるものの、ガ

ス交換機能を損ねるほどの大幅な動きではないことが明らかとなった。しかし、長期的には、その僅かな増加分が葉身に蓄積されていくものと考えられる。

マヤブシキが1日を通して高い光合成を維持するためには、根における水の選択性が重要であることが予想される。そこで、根の発達程度が異なると考えられる樹齢別にみたガス交換、水ポテンシャル、イオン含量および全窒素含量について検討した(表1)。幼齢木に比べて、壮齢木及び若齢木の光合成速度が低いのは、調査時期がマヤブシキの開花時期と重なり、葉身の窒素が花芽へ転流されSPAD値から示されるクロロフィル含量も低下したためと考えられる。実際の観察とSPAD値からみて幼齢木の葉は、比葉面積が低下し、厚くなっている。葉面積ベースで表される光合成速度はやや高めに値が見積られていることが予想される。しかし、そのことを考慮しても、幼齢木の光合成速度は高い。しかも、気孔伝導度、蒸散速度ともに壮齢木及び若齢木に比べ高い値を示し、幼齢木のほうが活発にガス交換を行っていることが窺える。さらに、水ポテンシャルが $-1.95\text{MPa}$ と根系の海水より高く、本来ならば根からの吸水は不可能である。これは、幼齢木の段階で根には、ほぼ完全と言える塩分排除能または、浸透圧調節機構が完成していることを示唆している。一方、樹齢が若いものほど蒸散速度の上昇が観察され、幼齢木では壮齢木の1.2倍の蒸散速度が認められた。土屋ら(1992)は、耐塩性程度の異なるイネ品種を供試し、大気湿度を違えてNaCl濃度処理をした結果、蒸散量の多少によって $\text{Na}^+$ の吸収移行における分離排除の効率が変わることを明かにし、各々のイネ品種の耐塩性程度の差異には、蒸散量の大小に基づく根部での $\text{Na}^+$ の分離排除の効率の違いが関与することを報告している。このことより、根部の発達が未熟であるマヤブシキの幼齢木の蒸散速度の大きさは、塩分排除に関係していることを示唆している。しかし、マングローブの特徴は水利用効率が極めて高いことであり、これらの現象は少なくとも、水利用の点では幼齢木は負担を強いられていると考えられる。

葉身の $\text{Na}^+$ と $\text{Cl}^-$ 含量で比較すると、壮齢木及び若齢木に比べて幼齢木で高い値を示している。 $\text{Na}^+$ に関しては、壮齢木の約1.8倍の量が蓄積していた。葉身におけるイオンの蓄積には、樹齢、樹高、葉齢及び木全体の葉数によって異なると考えられるが、葉身の $\text{Na}^+$ 含量が1.8倍に増加しても光合成能力は全く影響を受けていない。高濃度の $\text{Na}^+$ は、根での $\text{K}^+$ の取り込みを制限するために葉身の $\text{K}^+$ 濃度は、塩濃度の増加で低下する可能性がある(Munnusら, 1983)。Ballら(1987)は高塩濃度で育てたヒルギダマシにおいて、光合成活性が低下したのは、葉身でのNaClの毒性というよりむしろ、塩誘導された $\text{K}^+$ の欠乏による可能性が示唆され、高塩濃度環境に置かれた時の葉身における $\text{K}^+$ の不足はクロロフィル含量の低下を引き起こすと報告している。今回の調査で、幼齢木の葉身での $\text{K}^+/\text{Na}^+$ 比は壮齢木及び若齢木に比べて著しく低く、葉身の $\text{Na}^+$ 含量の増加による $\text{K}^+$ の吸収抑制が認められた。

植物は、土壌中の水ポテンシャルの低下に対し、葉細胞

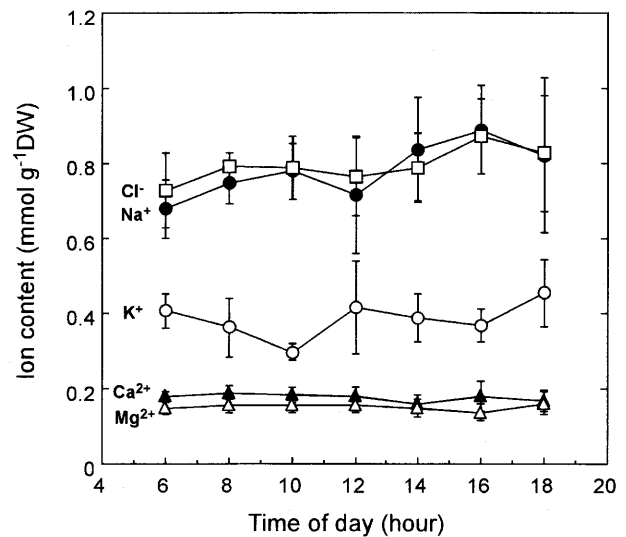


Fig. 10. Diurnal changes in ion content for leaves of *Sonneratia alba* at field conditions. Sampling was done in front of Yufu, Iriomote island.

に浸透圧調節物質を蓄積するか、または、葉組織のシンプラストな水の動態によって応答していることが知られている(Radaら, 1989)。1996年3月12日の調査(表3)でサンプリングしたマヤブシキの葉身には、浸透圧調節物質であるグリシンベタインおよびプロリンを蓄積していないことが確認された(高倍と和田, 私信)。従って、マヤブシキの葉身内における浸透圧調節の仕組みとして葉組織のシンプラストな水の動態が関与していることが予想されるものの、それに関してはさらに検討する必要がある。

光条件が塩処理したマヤブシキのガス交換に与える影響をみると、100mM区では、葉温 $25^\circ\text{C}$ で光合成速度が最大値を示すものの、 $30^\circ\text{C}$ とほぼ同じ曲線を描き、葉温による違いはみられなかった。しかし、400mM区では、葉温 $30^\circ\text{C}$ で光合成速度が最大値を示し葉温の違いによる差が顕著にみられた。本実験では、導入空気の露点温度を $15^\circ\text{C}$ に固定して行った。したがって、葉温を上昇させるとそれとともない葉面飽差も増加した。Andrewsら(1985)は、自然条件下でヤエヤマヒルギのガス交換特性を調べ、光合成速度と気孔伝導度は葉温よりもそれとともなって生じる葉面飽差に律速されることを報告している。したがって、高塩処理においては、葉温上昇による葉面飽差の影響が顕著に表れたものと考えられる。自然条件下でのマヤブシキは、光合成の最適温度が葉温 $35^\circ\text{C}$ にあった。このずれは、測定装置の違いによることも考えられるが、測定条件での葉面飽差の違いによる所もあると考えられる。気孔伝導度及び蒸散速度に関しては、100mM区では、葉温が上がると気孔が閉じ蒸散速度が上昇する傾向がみられた。400mM区では、葉温 $30^\circ\text{C}$ で気孔伝導度、蒸散速度ともに最大を示した。処理の違いが葉温及び葉面飽差に対する反応の違いとなって表れた。

マヤブシキの $\text{CO}_2$ 固定系の反応をみるために、周囲 $\text{CO}_2$ 濃

度を変化させ光合成速度及び気孔伝導度の反応を調べた。周囲CO<sub>2</sub>濃度を変化させると0 mM及び400mM区においては、800ppm付近で飽和に達した。しかし、100mM区では測定した濃度範囲では不飽和型を示した。処理における光合成速度の最大値は、0mM区は35.8、100mM区は36.9、400mM区は27.8  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。400mM区が、他の2処理区に比べて大きく低下した。気孔伝導度に関しては、0mM区が高い値で推移した。塩処理をした2区は、低CO<sub>2</sub>濃度では差は認められないが濃度が増えるにしたがい、400mM区の低下程度は大きくなった。

一般の植物は塩および乾燥ストレスに遭遇すると、まず、体内の水分を失わないように葉の気孔を閉じることが知られている。ストレス初期には、植物ホルモンのABAの合成が誘導され、これが気孔の閉鎖を引き起こすとされている。マヤブシキの気孔についても、塩処理によって気孔伝導度の最大値を低下させた。加えて、葉内CO<sub>2</sub>濃度の増加に敏感に反応し急激に気孔を閉鎖している。しかし、光合成については、100mM区が不飽和型を示し、CO<sub>2</sub>固定系の働きは根圏のNaCl濃度が100mM程度で活発になることが認められた。これを、葉内CO<sub>2</sub>濃度に対する光合成の反応でみてみると、0mM区では、300ppm付近で飽和に達し、100mM区及び400mM区では飽和に達せず気孔の急激な閉鎖により350ppm付近までの測定にとどまった。これを、初期勾配の傾きで比べると、100mM区の傾きが0.218と最も高く、0 mM区と400mM区では差はなかった。したがって、100mM区でCO<sub>2</sub>の固定系が最も活性化されたことが認められた。しかし、周囲のCO<sub>2</sub>濃度が350ppm付近における水利用率は、400mM区が最も高く根圏の塩濃度に適応した応答をしていることが認められた。川満ら (1995) は、塩濃度勾配に沿って分布域の異なる3種のマングローブを用いた実験のなかで、水ポテンシャルと水利用率の関係について述べ、最も海側に分布するヤエヤマヒルギでは、水ポテンシャルの低下によって水利用率が増加することを報告している。つまり、根圏の塩濃度が高い場所に分布するには、高い水利用率の作用を持つことが重要であると言える。そのために、塩環境におかれたマングローブは蒸散をなるべく最小に抑えるように気孔開度を調節し、光合成に関しては気孔開度に関係なく内部の高い活性を維持するための方策がとられていると考えられた。

沖縄に分布するマングローブ種の中で、自然条件下でのマヤブシキの光合成速度の高さはヒルギダマシを除いて他に類をみない(Cloughら, 1989)。ヒルギダマシは、塩類腺(salt glands)を有し塩分を葉身から排出している。塩類腺を有するマングローブ種は、有しない種よりも10倍もの塩分が木部液から検出される(Scholanderら, 1962)。マヤブシキは塩類腺を有しない種であり、高塩環境での耐塩機構は明かにヒルギダマシとは異なる。それでも、ヒルギダマシと同等の光合成能力を自然条件下で発揮していることが、本研究により明らかとなった。西表島の由布島対岸での測定で、光合成速度の最大値は23  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった(図2, 5)。光合成特性としては、光飽和点が1500  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ にあり、

最適温度が30℃から自然条件下では35℃付近にみられ、C<sub>3</sub>植物としてはかなり高いことが窺える。また、日中を通しての水ポテンシャルの低下にも影響されることなく、高い光合成速度を維持していた(図2)。マヤブシキの高い光合成は、葉身の全窒素含量の高さによって支えられていることが窺える(表3)。マヤブシキの群落がみられる由布島対岸は、潮の干満差が小さいため、土壌堆積物の豊富さが予想される。一方で、葉身の窒素含量とナトリウムイオン含量には高い相関があることが報告されており(川満ら, 1997)、慶佐次川流域の調査においても、下流域の海水の影響が大きいところに分布するヤエヤマヒルギの葉身に全窒素含量が高いことが確認された(川満ら, 2003)。高塩環境での窒素とマングローブの関係については、高塩条件がシュートと根の窒素濃度を減少させるとの報告がある(Naidoo, 1987)。それによると、自然条件下でのマングローブの生長における窒素の制限は、高いナトリウム濃度によってアンモニウムの取り込みが拮抗的に阻害されることに起因し、その他の要因として、根圏の高いナトリウム及び塩化物濃度、根圏の酸素不足と、嫌気性堆積物中にかなりの量で生産される硫化水素のような代謝的毒素があげられるとしている。これらの点を考慮して、マングローブ種の生長における塩濃度と窒素の関係については、さらなる検討が必要である。

次に、高塩環境で育つマヤブシキの光合成特性にみられる高い水利用率について検討する(表2)。水利用率とは光合成速度を蒸散速度で除した値であり、これは単位水分子当りのCO<sub>2</sub>分子の固定量を表し、どれだけ水を有効利用しているかを示す指標である。マングローブ種は、十分に水のある環境に生育し、著しく高い保水性を示すにも関わらず、C<sub>3</sub>植物の中でも水利用率は極めて高い(Ball, 1986)。加えて、耐塩性種であるほど高く、マングローブ種が生育する根圏の塩分濃度の増加によっても保水性は増加する(Ball, 1988)。ポットで育成したマヤブシキに塩処理をすると、CO<sub>2</sub>固定能は100mM NaCl処理が高い値を示すが、水利用率は400mM NaCl処理で高いことが確認された。マヤブシキの水の利用は、取り込んだ水に対する経済的な炭素固定及び炭素-塩-水のバランスを有利な状態で維持できた結果であろう。そのために、シュートにおける水の要求に応じるためにかなり大きな根系を維持していることが考えられる(Ball, 1988)。そこで、その問題を検討するために樹齢別にガス交換を調査した結果、樹齢が若くなるにつれて蒸散速度が高くなり、ナトリウムイオン含量及び塩化物イオン含量も増加することが認められた(表1)。マングローブ種は、根から水が吸収される時、ほとんどの塩を排出している(Passiouraら, 1992)。一方、塩条件下で膨圧を維持し、イオンストレスから代謝部位を敏感に防御するためには、イオンの取り込みと分配を調節しなければならない(Flowerら, 1986)。根系の発達が未熟であると思われる幼木の蒸散速度は成木の1.2倍の速度であった。これは、根系が未発達である場合、塩分排除能が十分でないため、シュートにおける炭素-塩-水のバランスを保つために水の要求量が増すものと考えられた。従って、表1の成木及び中木が開花

期ではなく、通常の光合成速度の $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 付近にあったとすると、水利用効率は樹齢が増す程高くなることが予想される。

## 摘 要

マングローブ樹種の中で塩分濃度の高い潮間帯地域に自生するマヤブシキを対象に、その著しく高い耐塩機構を解明するため、葉身のガス交換、水ポテンシャル、イオン・窒素吸収特性を調査した。次に、マヤブシキの幼齢木にNaCl処理を加え、“光-光合成曲線”と“CO<sub>2</sub>-光合成曲線”を調べ、自然条件下の測定結果と比較しながらガス交換特性を種々検討した。

1. マヤブシキの光合成速度は、他種と比較して著しく高く、 $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 前後であった。また、光飽和点は、 $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 付近にあり、光合成最適温度は $35^\circ\text{C}$ 付近にあった。
2. マヤブシキのガス交換の日変化についてみると、光合成速度は、午前8時には最大値をとり、光強度が低下する午後6時まで一定に推移した。気孔伝導度及び蒸散速度は、正午に最大値を示し午後からは徐々に低下した。従って、1日の水利用効率は、午前と午後が高く蒸散速度の最大値を示す正午で低かった。葉内CO<sub>2</sub>濃度は、日中ほぼ一定であり、CO<sub>2</sub>固定系の活性が維持されていた。
3. 水ポテンシャルは、夜明け前の $-0.8\text{MPa}$ から午後4時の $-2.9\text{MPa}$ まで大きく低下しその後上昇した。しかし、水ポテンシャルの低下に伴う光合成の低下はみられず、葉のクロロプラスト内の浸透圧調節機構の充実度が高いことが予想された。
4. マヤブシキの光合成速度をA/Ciカーブの初期勾配で見ると、 $0\text{mM}$ 及び $400\text{mM}$ 区よりも $100\text{mM}$ 区で高く、CO<sub>2</sub>固定系が活性化されていることが認められた。しかし、CO<sub>2</sub>濃度が $350\text{ppm}$ の時の水利用効率は $400\text{mM}$ 区が最も高く、塩濃度が高い場合水を有効に利用していることが認められた。
5. マヤブシキの根は、幼齢木の段階ですでに塩分排除機能を有しており、壮齢木、若齢木に比べて高い水ポテンシャル及び高い気孔伝導度及び蒸散速度を示した。マヤブシキ幼齢木の葉身には、壮齢木に比べ1.8倍のNa<sup>+</sup>が含まれ、K<sup>+</sup>は低く、K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比は低かった。マヤブシキの葉には浸透圧調節物質であるグリシンベタイン及びプロリンの蓄積は認められなかった。

## 参考文献

- Andrews, T. J. and G. J. Muller 1985. Photosynthetic gas exchange of the mangrove, *Rhizophora stylosa* Griff., in its natural environment. *Oecologia* 65: 449-455.
- Ball, M. C. 1986. Photosynthesis in mangroves. *Wetlands (Australia)* 6:12-22.
- Ball, M. C. 1988. Salinity tolerance in the mangroves *Aegiceras corniculatum* and *Avicennia marina*. I. Water use in relation growth, carbon partitioning, and salt balance. *Aust. J. Plant Physiol.* 15: 447-464.
- Ball, M. C., I. R. Cowan and G. D. Farquhar 1988. Maintenance of leaf temperature and the optimisation of carbon gain in relation to water loss in a tropical mangrove forest. *Aust. J. Plant Physiol.* 15: 263-276.
- Ball, M. C., W. S. Chow and J. M. Anderson 1987. Salinity-induced potassium deficiency causes loss of functional photosystem II in leaves of the grey mangrove, *Avicennia marina*, through depletion of the atrazinbinding polypeptide. *Aust. J. Plant Physiol.* 14: 351-361.
- Boyer, J. S. and P. J. Kramer 1995. Water relations of Plants and soils. Academic Press.
- Bjorkman, O., B. Demming and T. J. Andrews 1988. Mangrove photosynthesis: Response to high-irradiance stress. *Aust. J. Plant Physiol.* 15:43-61.
- Clough, B. F. and R. G. Sim 1989. changes in gas exchange characteristics and water use efficiency of mangroves in response to salinity and vapour pressure deficit. *Oecologia* 79: 38-44.
- Flowers, T. J., M. A. Hajibagheri and N. J. W. Clipson 1986. Halophytes. *Q. Rev. Biol.* 61: 313-337.
- 川満芳信・北原良太・野瀬昭博 1995. 沖縄産マングローブの葉の光合成速度及び水ポテンシャルに及ぼすNaCl濃度の影響. *琉大農学報*. 42: 9-22.
- 川満芳信・川元知行・吉原 徹・村山盛一 1997. 植物体中の各種イオン動態からみたマングローブ3種の耐塩性の比較. *琉大農学報* 44: 91-105.
- 川満芳信・吉原 徹・川元知行・徳丸慶太郎 2003. マングローブ3樹種の葉のガス交換特性に与えるNaCl濃度および環境要因の影響. *琉大農学報* 50: 1-19.
- 間藤 徹 1991. 高等植物の耐塩性機構. *植物細胞工学* (3) 4: 268-278.
- Munnus, R., H. Greenway and G. O. Kirst 1983. Halotolerant eukaryotes. In 'Physiological plant ecology III. Responses to the chemical and biological environment'. (Eds. O. L. Lange, P. S. Nobel, C. B. Osmond and H. Ziegler) *Encycl. Plant Physiol. New Ser.* 12C: 59-135. Springer-Verlag.
- Naidoo, G. 1987. Effects of salinity and nitrogen growth and water relations in the mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. *New Phytol.* 107:317-325.
- Passioura, J. B., M. C. Ball and J. H. Knight 1992. Mangrove may salinize the soil and in so doing limit their transpiration rate. *Functional Ecology* 6: 476-481.
- Rada, F., G. Goldstein, A. Orozco, M. Montilla, O. Zabala, and A. Azocar 1989. Osmotic and turgor relations of three mangrove ecosystem species. *Aust. J. Plant Physiol.* 16: 477-486.

Scholander, P. H., H. T. Hammel, E. Hemmingsen and W. Garey 1962. Salt balance in mangroves. *Plant Physiol.* 37: 722-729.

土屋幹夫・内藤 整・江原 宏・小合龍夫 1992. 塩分濃度に対するイネの生理反応に関する研究. *日作紀* 61 (1): 16-21.

矢吹万寿・北宅善昭・杉 二郎 1990. マングローブ気根のガス交換機能に関する研究 (1). *生物環境調節* 28 (3): 95-98.

矢吹万寿・北宅善昭・杉 二郎 1990. マングローブ気根のガス交換機能に関する研究 (2). *生物環境調節* 28 (3): 99-102.