西表島海岸域マングローブ林の土壤水塩分濃度とヤエヤマヒルギ およびオヒルギ葉中成分について

塚本 剛正・中西 康博*

(株)泰正・*東京農業大学宮古亜熱帯農場

The Salinity of Soil Water and the Chemical Elements of Leaves of
Rhizophora stylosa and *Bruguiera gymnorrhiza* of
the Mangrove Forest in the Coastal Area of Iriomote Island, Okinawa

Takamasa TSUKAMOTO and Yasuhiro NAKANISHI*

Taisei Co. Ltd. Nagoya branch, Nagoya 454-0911, Japan

*Miyako Farm, Tokyo University of Agriculture, Miyako, Okinawa 906-0103, Japan

This study primarily deals with the mangrove forest, which is mainly composed of *Rhizophora stylosa* and *Bruguiera gymnorrhiza*, and is located in Iriomote Island. Its focus was the mechanism which *Rhizophora stylosa* and *Bruguiera gymnorrhiza* represent in the visible zonation pattern. The change of chemical elements of soil water and leaves were analyzed to clarify the mechanism. As a result, B and Ca of the leaves of *Rhizophora stylosa* showed correlations with the soil water EC at a depth of 60 cm. On the other hand, the elements of the leaves of *Bruguiera gymnorrhiza* that showed correlations with the soil water EC were N, P, S, Ca, Mn, and Fe. Particularly, the change of B content of *Rhizophora stylosa* and Mn content of *Bruguiera gymnorrhiza* were assumed to be restrictive factors in the zonation pattern of mangroves.

(Received September 10, 1997)

1997年9月10日受付

緒 言

これまでに筆者らはマングローブの塩生湿地における生育適応機作を、沖縄県西表島東南部の海岸に分布するヤエヤマヒルギ (*Rhizophora stylosa*) およびオヒルギ (*Bruguiera gymnorrhiza*) 群落を主な対象として、微地形-土壤-水-植物の相互関連性から検討してきた。

初報 (Tsukamoto, 1997) では、土壤水塩分濃度および微地形と植生分布との関係を調査した結果、上記2樹種はグランドレベルにより帯状に分布し、この分布域の違いは土壤水塩分濃度で説明されることを示した。

前報 (Tsukamoto and Nakanishi, 1997) では還元土壤における硫化水素害に対するマングローブの適応機

作について検討した結果、マングローブの落葉や根から供給されるタンニンが土壤中の鉄を水溶化し、これとイオウ化合物とを反応させることにより硫化水素の発生を抑制し、根に対する害を軽減している可能性を示した。またこの機作に関連して、ヤエヤマヒルギの海側への進出限界は、植物栄養の観点からすると、Bの過剰吸収によって制限され、またオヒルギの生育範囲はMnの過剰吸収により制限されるとの推論を示した。

本報では、この推論をより詳しく検討するために、土壤水中イオン濃度と葉中成分含有率を詳細に調査し、それらの相関関係を解析することによって、上記2樹種の生育分布を決定する機作について考察した。

Fig. 1 Location of study area.

調査および分析方法

調査地はこれまでの報告と同様、沖縄県西表島東南部とした。調査地の位置を Fig. 1 に示した。調査地は西表島東部の後良川から仲間崎の間に設けた。本報では、調査地中、海岸域に成立する群落、すなわちベルトトランセクト 3 から 5 (以下、T3~5) を調査対象とした。

調査は 2 段階に分けて行った。まず調査 1 において、T4 の土壤水を I~V の 5 地点において土壌の深さ 80 cm まで 10 cm おきに行った。この際、8 個の土壤溶液採取器 (DIK-8390, 集液カップ径 8 mm) を用い、深さ

別に同時に採取した。採取は陸側の地点 V から始め、海側の地点 I へと漸時移動した。採取した深さ別の土壌水中イオン濃度と葉中成分含有率との関係を検討した。

調査 2 では、T3~5 の土壤水を I~V の 5 地点において、一定の土壌の深さ (60 cm) から採取した土壌水中イオン濃度と葉中成分含有率との関係を検討した。調査 2 において土壌の深さを 60 cm とした理由については、初報 (Tsukamoto, 1997) に記載した。

なお各トランセクトにおける調査地点は初報にも示したと同様、地点 I~V の 5 地点とした。すなわち、地点 I はヤエヤマヒルギ林の海側林縁、地点 II はヤエヤ

Fig. 2 Mangrove vegetation in the transect 4.

The study sites are located in the southeast coast of Iriomote Is., Okinawa.

Site I : The seaward edge of a range of *R. stylosa* stand.

Site II : The middle of a range of *R. stylosa* stand.

Site III : The border between a range of *R. stylosa* stand and a range of *B. gymnorrhiza* stand.

Site IV : The middle of a range of *B. gymnorrhiza* stand.

Site V : The landward edge of a range of *B. gymnorrhiza* stand.

Ground level 0 cm was set to be the same as the datum line in Ishigaki Is. in 1990.

マヒルギ林帯の中央部、地点 III はヤエヤマヒルギ林とオヒルギ林との分布境界、地点 IV はオヒルギ林帯の中央部、および、地点 V はオヒルギ林の陸側林縁とした。上記した地点 II および地点 IV は、それぞれの林帯が成立するグランドレベルの幅のほぼ中間点とした。この位置関係は T4 を例として Fig. 2 に示した。採取日は 1990 年 9 月 27 日～10 月 14 日であった。

採水直後に土壌水 EC を EC メーター (CM-1K, TOA Electronics Ltd.) で測定した。また研究室での分析に供する土壌水・海水を窒素測定用とその他の成分測定用に分け、それぞれ 100 ml 容ポリ瓶に入れた。窒素測定用の試料水には硫酸を加えて、pH2 とした (Kime, 1981)。試料水は保冷して、東京農業大学土壌学研究室で、次の分析に供した。Ca, Mg, K, Na および $\text{SO}_4\text{-S}$ は ICP 発光分析法 (Goto, 1994)、Cl はモール法で測定した。 $\text{NH}_4\text{-N}$ は、アンモニア電極法により、 $\text{NO}_3\text{-N}$ はデバルタ合金還元法による前処理の後、アンモニア電極法により定量した。全窒素は、硫酸分解法による前処理の後、フローインジェクション分析法 (Haga *et al.*, 1988) で定量した窒素量に $\text{NO}_3\text{-N}$ 量を加算して求めた。全リンは、硫酸分解法による前処理の後フローインジェクション分析法で定量した。

葉の採取方法は、調査 1 については前報と同様、ヤエヤマヒルギ林では、まず、I～III の各地点で、各 10 個体を無作為に選抜した。次に、地点 I の 10 個体から最新葉一対を採取し、これら計 20 枚をあわせて 1 試料とした (以下、これを第 1 葉という)。同様に第 2～5 葉

を採取し、これらを供試した。II, III の地点においても地点 I 同様に採取した。オヒルギ林においても III～V の各地点で、ヤエヤマヒルギ林同様に供試葉を採取した。

調査 2 では、各調査地点で 10 個体から第 3 葉を一対ずつ計 20 枚採取し、これらを併せて 1 試料とした。

供試葉は蒸留水で洗浄、風乾後、粉碎した。全窒素は炭素・窒素自動分析装置 (Sumigraph Model NC-80 Auto, 住友化学) を用いて定量した。Ca, Mg, Na, K, S, B, P, Mn および Fe は濃硝酸を用いたテフロン加圧分解容器-ICP 発光分光分析法 (Goto *et al.*, 1992) により定量した。

結 果

1. 調査 1

(I) T4 における深さ別土壌水中イオン濃度と葉位別葉中成分含有率

T4 におけるヤエヤマヒルギ (以下 *R. s*) およびオヒルギ (以下 *B. g*) の海側から陸側への分布範囲で採取した土壌水の深度別の EC, Ca, Mg, K, Na, $\text{SO}_4\text{-S}$, Cl, Total-N, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, および Total-P の濃度を Fig. 3 に示した。

また T4 における *R. s* および *B. g* の海側から陸側への分布範囲で採取した葉位別の葉の Ca, Mg, K, Na, S, B, N, P, Mn および Fe の含有率を Fig. 4 に示した。

以上の分析結果をもとに T4 における深さ別土壌水中イオン濃度と葉位別葉中成分含有率との相関関係を

Fig. 3 The chemical characteristics of soil water in the mangrove forest in the southeast coast of Iriomote Is., Okinawa.

Site I : The seaward edge of a range of *R. stylosa* stand.

Site II : The middle of a range of *R. stylosa* stand.

Site III : The border between a range of *R. stylosa* stand and a range of *B. gymnorrhiza* stand.

Site IV : The middle of a range of *B. gymnorrhiza* stand.

Site V : The landward edge of a range of *B. gymnorrhiza* stand.

mean (1) : mean of Site I, II and III as the range of *R. stylosa* stand.

mean (2) : mean of Site III, IV and V as the range of *B. gymnorrhiza* stand.

mean (3) : mean of 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 and 80.

Soil water samples were taken from depths of 10–80 cm at each of sites in the transect 4 from Sep. 27 to Oct. 14 in 1990.

Fig. 4 The chemical elements of leaves of *B. gymnorhiza* and *R. stylosa* at Transect 4.

Site I : The seaward edge of a range of *R. stylosa* stand.

Site II : The middle of a range of *R. stylosa* stand.

Site III : The border between a range of *R. stylosa* stand and a range of *B. gymnorhiza* stand.

Site IV : The middle of a range of *B. gymnorhiza* stand.

Site V : The landward edge of a range of *B. gymnorhiza* stand.

mean (1) : mean of Site I, II and III as the range of *R. stylosa* stand.

mean (2) : mean of Site III, IV and V as the range of *B. gymnorhiza* stand.

mean (3) : mean of 1, 2, 3, 4 and 5 of leaf positions.

Leaf positions 1 : The youngest leaf leaves ; 2 : The second youngest leaves ; 3 : The third youngest leaves ; 4 : The fourth youngest leaves ; 5 : The fifth youngest leaves ; mean : The mean of each element in all leaf positions at each site.

Sample leaves of *R. stylosa* and *B. gymnorhiza* were taken from 10 individuals chosen by random sampling at each of sites.

Table 1 Correlation matrix between the chemical characteristics of soil water and the chemical elements of leaves.

<i>R. stylosa</i>						
Correlation matrix to Ca						
Ca of soil water	depth (cm)	1st	2nd	3rd	4th	5th
	20	0.430	0.208	0.383	0.563	0.310
	40	0.866	0.766	0.870	<u>0.954</u>	0.496
	60	<u>0.951</u>	0.944	<u>0.986</u>	0.996	0.501
	80	0.791	0.645	<u>0.774</u>	0.883	0.495
<i>B. gymnorhiza</i>						
Correlation matrix to Mn						
EC of soil water	depth (cm)	1st	2nd	3rd	4th	5th
	20	-0.951	<u>-0.924</u>	<u>-0.915</u>	<u>-0.911</u>	<u>-0.932</u>
	40	-0.981	-0.991	-0.991	-0.997	-0.991
	60	-0.977	-0.992	-0.994	-0.991	-0.986
	80	<u>-0.938</u>	<u>-0.944</u>	<u>-0.939</u>	<u>-0.930</u>	<u>-0.923</u>
Correlation matrix to N						
EC of soil water	depth (cm)	1st	2nd	3rd	4th	5th
	20	-0.676	-0.732	-0.700	-0.770	-0.782
	40	-0.811	-0.848	-0.807	-0.871	-0.859
	60	<u>-0.906</u>	<u>-0.933</u>	<u>-0.909</u>	<u>-0.949</u>	<u>-0.933</u>
	80	-0.789	-0.841	-0.849	<u>-0.883</u>	-0.853
Correlation matrix to P						
EC of soil water	depth (cm)	1st	2nd	3rd	4th	5th
	20	-0.705	-0.669	-0.444	-0.606	-0.455
	40	<u>-0.922</u>	<u>-0.899</u>	-0.722	-0.860	-0.725
	60	<u>-0.924</u>	<u>-0.940</u>	-0.823	<u>-0.911</u>	-0.833
	80	-0.783	-0.819	-0.733	-0.774	-0.686

Boldface : $p < 0.01$; double underline : $p < 0.02$; underline : $p < 0.05$

The sample sizes of *R. stylosa* and *B. gymnorhiza* were 4 and 5, respectively.

The soil water samples were taken from depths of 20, 40, 60 and 80 cm at Transect 4.

The leaves were taken from *R. stylosa* and *B. gymnorhiza* at Transect 4. The first leaf was the youngest leaf.

求めた。その中の危険率 5%以下の相関が認められる関係を検討し、深さ別土壌水と葉中成分との関係を推察可能な関係を選び、その相関係数を Table 1 に示した。その結果、*R. s* では深さ 60 cm の土壌水中 Ca と第 1, 3 および 4 葉の葉中 Ca との正の相関が認められた。

一方 *B. g* では深さ 20~80 cm の土壌水 EC と第 1~5 葉の葉中 Mn との負の相関が認められた。特に深さ 40 と 60 cm で強い負の相関が認められた。また、深さ 60 cm の土壌水 EC と第 1~5 葉の葉中 N との負の相関が認められた。さらに、深さ 60 cm の土壌水 EC と第 1, 2 および 4 葉の葉中 P との負の相関が認められた。

これらの相関関係から見て、T4 において *R. s* と

B. g の双方で、他の深さの土壌水に比べて、深さ 60 cm の土壌水が葉中要素に与える影響は強いと考えられた。この結果は Kyuma *et al.* (1988) が深さ 60 cm の土壌水 EC と *R. s* と *B. g* の生育に相関を認めた結果と良く対応した。また Tsukamoto (1997) が深さ 60 cm の土壌水 EC と *R. s* と *B. g* の植生分布と明瞭な関係があるとした結果と矛盾しなかった。

2. 調査 2

(1) T3, T4 および T5 における分布範囲と土壌水中イオン濃度

T3, T4 および T5 における *R. s* および *B. g* の海側から陸側への分布範囲の深さ 60 cm で採取した土壌水の EC, Ca, Mg, K, Na, SO₄-S, Cl, Total-N, NH₄-N,

Fig. 5 The chemical characteristics of soil water in the mangrove forest in the southeast coast of Iriomote Is., Okinawa.

Site I : The seaward edge of a range of *R. stylosa* stand.

Site II : The middle of a range of *R. stylosa* stand.

Site III : The border between a range of *R. stylosa* stand and a range of *B. gymnorhiza* stand.

Site IV : The middle of a range of *B. gymnorhiza* stand.

Site V : The landward edge of a range of *B. gymnorhiza* stand.

mean (1) : mean of Site I, II and III as the range of *R. stylosa* stand.

mean (2) : mean of Site III, IV and V as the range of *B. gymnorhiza* stand.

mean (3) : mean of Transect 3, 4 and 5.

Soil water samples were taken from a depth of 60 cm at each of sites in the transect 3, 4 and 5 from Sep. 11 to 27 in 1990.

Fig. 6 Elemental contents of the third leaves of *B. gymnorhiza* and *R. stylosa* at Transect 3, 4 and 5.

Site I : The seaward edge of a range of *R. stylosa* stand.

Site II : The middle of a range of *R. stylosa* stand.

Site III : The border between a range of *R. stylosa* stand and a range of *B. gymnorhiza* stand.

Site IV : The middle of a range of *B. gymnorhiza* stand.

Site V : The landward edge of a range of *B. gymnorhiza* stand.

mean (1) : mean of Site I, II and III as the range of *R. stylosa* stand.

mean (2) : mean of Site III, IV and V as the range of *B. gymnorhiza* stand.

mean (3) : mean of Transect 3, 4 and 5.

Sample leaves of *R. stylosa* and *B. gymnorhiza* were taken from the 3rd youngest leaves of 10 individuals chosen by random sampling at each of sites.

NO₃-N および Total-P の濃度を Fig. 5 に示した。

土壌水の EC は T3, T4 および T5 での平均値で、地点 I で 46.0 mS/cm と高く、陸に向かうにしたがい低下し、地点 V では 26.5 mS/cm であった。*R. s* と *B. g* の生育範囲の平均値は前者で 42.3 mS/cm、後者で 33.3 mS/cm であった。

Ca 濃度の平均値は、地点 I で 436 ppm と高く、陸に向かうにしたがい低下し、地点 V では 254 ppm であった。*R. s* と *B. g* の生育範囲での平均値は前者で 380 ppm、後者で 289 ppm であった。

Mg, K, Na および Cl 濃度は Ca 濃度とほぼ同じ傾向を示した。

SO₄-S 濃度の平均値は、地点 I で 827 ppm と高く、陸に向かうにしたがい急減することが特徴的であった。

Total-N 濃度の平均値は、地点 I で 0.783 ppm と低く、陸に向かうにしたがい上昇し、地点 V では 2.82 ppm であった。*R. s* と *B. g* の生育範囲での平均値は前者で 1.10 ppm、後者で 1.95 ppm であった。

NH₄-N, NO₃-N および Total-P 濃度は Total-N 濃度とほぼ同じ傾向を示した。

(2) T3, T4 および T5 における分布範囲と葉中成分含有率

T3, T4 および T5 における *R. s* および *B. g* の海側から陸側への分布範囲での第 3 葉中 Ca, Mg, K, Na, S, B, N, P, Mn および Fe の含有率を Fig. 6 に示した。

第 3 葉中 Ca 含有率の平均値は、*R. s* の生育範囲である地点 I では 1.40% と高く、地点 II では 1.09%, 地点 III では 1.06% であった。また、*B. g* の生育範囲でもある地点 III では 1.23% と高く、地点 IV では 1.18%, 地点 V では 0.811% と最も低かった。*R. s* と *B. g* の生育範囲の平均値は前者で 1.18%, 後者で 1.07% であった。

第 3 葉中 Na 含有率の平均値は、*R. s* の生育範囲である地点 I では 2.19% とやや低く、地点 II では 2.22%, 地点 III では 2.00% であった。また、*B. g* の生育範囲でもある地点 III では 1.70% で、地点 IV では 1.57%, 地点 V では 1.52% であった。*R. s* と *B. g* の生育範囲での平均値は前者で 2.14%, 後者で 1.60% であった。

第 3 葉中 B 含有率の平均値は、*R. s* の生育範囲である地点 I では 85.1 ppm と最も高く、陸に向かうにつれてしだいに低下し、地点 II では 80.2 ppm、地点 III では 73.7 ppm であった。また、*B. g* の生育範囲でもある地点 III では 53.8 ppm で、地点 IV では 54.3 ppm、地点 V では 51.8 ppm であった。*R. s* と *B. g* の生育範囲で

の平均値は前者で 79.6 ppm、後者で 53.3 ppm であった。

第 3 葉中 N 含有率の平均値は、*R. s* の生育範囲である地点 I では 1.12%, 地点 II では 1.08%, 地点 III では 1.20% であった。また、*B. g* の生育範囲でもある地点 III では 1.29% で、地点 IV では 1.36%, 地点 V では 1.54% であった。*R. s* と *B. g* の生育範囲での平均値は前者で 1.13%, 後者で 1.40% であった。

第 3 葉中 P 含有率の平均値は、*R. s* の生育範囲である地点 I では 0.098% で、地点 II では 0.090%, 地点 III では 0.090% であった。また、*B. g* の生育範囲でもある地点 III では 0.089% で、地点 IV では 0.094%, 地点 V では 0.098% であった。*R. s* と *B. g* の生育範囲での平均値は前者で 0.093%, 後者で 0.092% であった。

第 3 葉中 Mn 含有率の平均値は、*R. s* の生育範囲である地点 I では高く 105 ppm で、地点 II ではやや低下し 88.7 ppm、地点 III では再び上昇し 135 ppm であった。また、*B. g* の生育範囲である地点 III では低く 29.6 ppm で、陸に向かうにつれて上昇し、地点 IV では 57.9 ppm、地点 V では 85.9 ppm であった。*R. s* と *B. g* の生育範囲での平均値は前者で 110 ppm、後者で 57.8 ppm であった。

第 3 葉中 Fe 含有率の平均値は、*R. s* の生育範囲である地点 I では高く 47.4 ppm で、陸に向かうにつれて低下し、地点 II では 40.0 ppm、地点 III では 36.4 ppm であった。また、*B. g* の生育範囲でもある地点 III では低く 50.4 ppm で、地点 IV では 54.7 ppm、地点 V では 53.4 ppm であった。*R. s* と *B. g* の生育範囲での平均値は前者で 41.2 ppm、後者で 52.8 ppm であった。

考 察

1. 葉中成分間の相関について

Table 2 に T4 における第 1 葉から 5 葉までの葉中成分間の相関を示した。*R. s* の葉中 B 含有率は葉中 N, P および K 含有率に負の相関が認められ、S, Ca, Mg, Mn および Fe 含有率に正の相関が認められた。このように *R. s* の葉中 B 含有率は葉中の他の成分と明瞭な関係が認められた。

一方、*B. g* の葉中 Mn 含有率は葉中 N および P 含有率に正の相関が認められ、S, Ca および Mg 含有率に強い負の相関が認められた。このように *B. g* の葉中 Mn 含有率は葉中の他の成分と明瞭な関係が認められた。

Tsukamoto and Nakanishi (1997) は *R. s* の葉中 B

Table 2 Correlation matrix of the chemical elements of leaves of *Rhizophora stylosa* and *Bruguiera gymnorhiza*.

		N	P	S	Ca	Mg	K	Na	Mn	Fe	B
<i>R. stylosa</i>	N	1.000									
	P	0.849	1.000								
	S	-0.802	-0.977	1.000							
	Ca	<u>-0.575</u>	-0.371	0.361	1.000						
	Mg	-0.402	-0.287	0.281	0.737	1.000					
	K	0.464	0.767	-0.743	-0.251	-0.166	1.000				
	Na	-0.231	<u>-0.550</u>	<u>-0.626</u>	-0.100	-0.148	-0.296	1.000			
	Mn	-0.424	-0.402	<u>0.397</u>	0.895	0.717	-0.381	0.108	1.000		
	Fe	-0.707	-0.658	0.659	0.724	0.473	<u>-0.520</u>	0.168	<u>0.633</u>	1.000	
	B	-0.789	-0.809	0.833	<u>0.615</u>	<u>0.632</u>	<u>-0.607</u>	0.373	<u>0.565</u>	0.781	1.000
<i>B. gymnorhiza</i>	N	1.000									
	P	0.649	1.000								
	S	<u>-0.561</u>	<u>-0.547</u>	1.000							
	Ca	-0.777	-0.411	0.730	1.000						
	Mg	-0.835	-0.324	<u>0.457</u>	0.838	1.000					
	K	-0.437	-0.073	0.284	0.231	<u>0.447</u>	1.000				
	Na	-0.058	-0.297	0.787	0.410	0.021	0.019	1.000			
	Mn	0.811	0.731	-0.679	-0.720	-0.579	-0.236	-0.289	1.000		
	Fe	0.443	-0.028	-0.213	-0.592	<u>-0.552</u>	0.072	0.119	0.460	1.000	
	B	-0.083	-0.197	0.101	-0.033	-0.039	-0.002	0.112	-0.340	-0.257	1.000

Boldface : $p < 0.01$; double underline : $p < 0.02$; underline : $p < 0.05$

The sample sizes of *R. stylosa* and *B. gymnorhiza* were 15 and 20, respectively.

The sample leaves were taken from the 1st, 2nd, 3rd, 4th and 5th leaf positions of *R. stylosa* and *B. gymnorhiza* at Transect 4.

の増減と *B. g* の葉中 Mn の増減が植生分布の制限因子の一つとして働く可能性を示唆したが、葉中成分間の関係もその可能性を支持するものと考えられた。

なお、Table 2 において、例えば *R. s* の葉中 Mn と Ca には正の相関関係が認められたが、*B. g* の葉中 Mn と Ca には負の相関関係が認められた。この例は Fig. 4 で見られるように、*R. s* では Mn と Ca は古い葉に蓄積される傾向にあるが、*B. g* では Mn は若い葉に、Ca は古い葉に蓄積される傾向にあることが反映されたものであり、樹種による葉位別蓄積傾向の違いによるものである。

2. 土壌水塩分濃度と葉中成分との関係について

Table 3 に T3, T4 および T5 における深度 60 cm の土壌水中成分と第 3 葉葉中成分含有率との相関を示した。

R. s の第 3 葉葉中成分で、土壌水 EC と相関が認められたのは、Ca と B であった。Ca と B 含有率は土壌水中の Mg, Na, K, および Cl 濃度とも正の相関があり、Ca と B が土壌水塩分濃度に強く影響を受けることを示した。特に B は、これまでに述べたように *R. s*

の植生分布の制限因子として働く可能性がある。海側に向かうにつれて土壌水 EC が上昇するに伴い葉中 B 含有率は上昇した。

また *B. g* の第 3 葉葉中成分で、土壌水 EC と相関が認められたのは、N, P, S, Ca, Mg, Mn および Fe であった。特に Mn は、これまでに述べたように、*B. g* の植生分布の制限因子として働く可能性がある。海側に向かうにつれて土壌水 EC が上昇すると、それに伴い葉中 Mn 含有率は下降した。

3. 土壌水塩分濃度と強い関係のある葉中 B および Mn 含有率変化からみた分布制限

(1) 植物体における酸化還元的状態

Fig. 7 に本稿で明らかになった土壌水 EC の変化に対して *R. s* と *B. g* の B および Mn の葉中含有率にどのような変化が生じるかを模式的に示した。また Tsukamoto and Nakanishi (1997) で明らかになった葉中タンニン含有率の変化も参照し、葉中での Mn とタンニンの含有率の変化から植物体中での酸化還元的状態を推察した。

ここで酸化還元的状態について注目した理由は以下

Table 3 Correlation matrix between the chemical characteristics of soil water and the chemical elements of leaves of *Rhizophora stylosa* and *Bruguiera gymnorrhiza*.

	(Leaves)	N	P	S	Ca	Mg	K	Na	Mn	Fe	B
<i>R. stylosa</i>											
(Soil water)											
EC		-0.416	0.330	0.125	0.858	0.507	<u>0.615</u>	0.130	-0.356	0.393	<u>0.698</u>
pH		0.068	0.195	-0.389	0.553	-0.018	-0.226	-0.243	0.463	0.214	<u>0.169</u>
NH ₄ -N (a)		0.214	-0.273	-0.253	-0.428	-0.203	-0.522	-0.518	0.742	-0.188	-0.197
NO ₃ -N (b)		0.251	-0.110	-0.213	-0.170	0.025	-0.361	-0.297	0.502	0.049	-0.298
(a) + (b)		0.260	-0.228	-0.266	-0.356	-0.117	-0.510	-0.476	0.719	-0.095	-0.272
Total-N		-0.047	-0.366	-0.070	-0.360	-0.265	-0.397	-0.519	0.515	-0.285	-0.200
Total-P		-0.024	-0.185	-0.218	-0.101	-0.163	-0.279	-0.310	0.310	-0.190	-0.122
Ca		-0.136	0.529	0.000	0.858	0.464	0.570	0.259	-0.290	0.465	0.595
Mg		-0.420	0.324	0.234	0.780	0.556	<u>0.714</u>	0.135	-0.392	0.343	0.751
SO ₄ -S		-0.078	0.475	0.094	0.480	0.262	<u>0.430</u>	0.394	-0.418	0.477	0.395
Na		-0.430	0.325	0.135	0.841	0.568	0.576	0.171	-0.343	0.456	<u>0.686</u>
K		-0.436	0.344	0.155	0.858	0.520	0.560	0.174	-0.340	0.477	<u>0.662</u>
Cl		-0.477	0.249	0.246	0.796	0.594	0.567	0.199	-0.326	0.392	<u>0.675</u>
<i>B. gymnorrhiza</i>											
EC		-0.886	-0.813	0.682	0.537	0.532	0.309	0.111	-0.873	-0.665	0.300
pH		0.328	0.238	0.011	-0.145	-0.115	-0.059	-0.268	0.169	0.597	0.084
NH ₄ -N (a)		<u>0.520</u>	0.218	-0.402	-0.448	-0.243	-0.535	-0.247	0.633	0.290	0.020
NO ₃ -N (b)		0.444	0.366	-0.217	-0.239	-0.078	-0.084	-0.057	0.482	0.337	0.002
(a) + (b)		0.522	0.246	-0.385	-0.429	-0.225	-0.482	-0.225	0.628	0.305	0.018
Total-N		0.458	0.152	-0.150	-0.228	-0.087	-0.507	-0.323	0.526	0.461	0.271
Total-P		0.530	0.396	0.014	-0.059	-0.048	0.046	-0.158	0.331	0.832	0.343
Ca		-0.835	-0.682	0.518	0.395	0.360	0.320	0.149	-0.817	-0.697	0.187
Mg		-0.877	-0.823	<u>0.578</u>	0.424	0.458	0.242	0.082	-0.817	-0.728	0.240
SO ₄ -S		-0.728	-0.656	0.245	0.250	0.294	0.127	0.225	-0.555	-0.916	-0.126
Na		-0.859	-0.815	0.705	0.581	0.579	0.323	0.133	-0.855	-0.632	0.330
K		-0.868	-0.822	0.708	0.565	<u>0.575</u>	0.295	0.113	-0.857	-0.639	0.338
Cl		-0.900	-0.832	0.695	0.554	<u>0.583</u>	0.318	0.088	-0.876	-0.668	0.319

Boldface : $p < 0.01$; double underline : $p < 0.02$; underline : $p < 0.05$.

Sample sizes of *R. stylosa* and *B. gymnorrhiza* were 11 and 16, respectively.

Soil water was taken from a depth of 60 cm at Transect 3, 4 and 5.

Sample leaves were taken from the 3rd youngest leaves of *R. stylosa* and *B. gymnorrhiza* at Transect 3, 4 and 5.

Fig. 7 Change of EC in soil water and B, Mn, Tannin and oxidation-reduction in leaves.

Site I : The seaward edge of a range of *R. stylosa* stand.

Site II : The middle of a range of *R. stylosa* stand.

Site III : The border between a range of *R. stylosa* stand and a range of *B. gymnorhiza* stand.

Site IV : The middle of a range of *B. gymnorhiza* stand.

Site V : The landward edge of a range of *B. gymnorhiza* stand.

による。すなわち、Levanidov (1957, 1961) は、植物体中での Mn 含有率とタンニン含有率との間に正の相関があることを認めた。この現象はタンニンが細胞成分に対して強力な還元剤として働き、一方 Mn が細胞成分に対して強力な酸化剤として働くことから、植物体中の酸化還元電位調節のために、タンニンと Mn の含有率の間にバランスが保たれると考えた。また Asada (1987) は Mn の植物体中での役割の一つとして酸化還元電位調節をあげた。さらに Aoba (1982) はチャなど、Mn 含有率の高い植物がカテキン(タンニンの主要構成物質)を多量に含むことで、マンガンの害

作用に高い耐性をもつ傾向のあることを明らかにした。これらのことから、マングロープのようなタンニンを植物体中に多量に含有する植物では、植物体中での酸化還元的傾向のバランス変化により生ずると考えられる酸化的ストレスおよび還元的ストレスが植物に害作用を及ぼし、その結果、これらの酸化的ストレスおよび還元的ストレスが分布制限要因となる可能性が考えられる。

(2) *R. s* の分布制限機作

分布制限機作については前報においても考察したが、本報ではあらたに土壤水塩分濃度との関係を含め

て、さらに考察を進めた。

まず *R. s* では、海側に向かうにつれ土壌水 EC が上昇した。この時、葉中では B 含有率も上昇した。植物体中で B は古い組織に集積され、過剰症状はその古い組織に現れるとされる (Baba, 1987) ように、*R. s* でも若い葉に比較して古い葉に、また陸側に比較して海側の個体に多量の B が蓄積される傾向が見られた。

また、B 含有率とともにタンニン含有率も上昇した。これはタンニンの主要構成物質であるカテキン等のフラボノイド生合成には B が密接に関与し、B が欠乏すると、フェノール性物質の縮合を弱化させ (Dutta, 1964)、フラボノイドの生合成が困難になる (Rajaram *et al.*, 1971) ことから、B 含有率の上昇がタンニン含有率の上昇につながったと考えられた。

また、葉中 Mn 含有率も上昇した。Mn 含有率が上昇するのは、増加したタンニンの土壌中での還元作用によって、土壌中から Mn^{2+} が溶出しやすくなり、容易に植物体中に取り込まれることによると考えられた。

一方、陸側に向かうにつれて土壌水 EC が下降した。この時、葉中では B 含有率も下降した。また、B 含有率とともにタンニン含有率も下降した。しかし、Mn 含有率は地点 I で高く、地点 II でいったん下降するものの、地点 III で再び上昇した。これは、地点 III では土壌中 Mn 含有率は増加傾向にあり、葉中タンニン含有率の下降に伴い、土壌水中のタンニン濃度が下降し、その還元作用による Mn^{2+} の溶出量が減少しても、土壌水中の Mn^{2+} 濃度は高かったためと考えられた。

以上の考察から *R. s* の分布制限要因を推察すると、海側では、土壌水 EC の上昇に伴い葉中 B 含有率が上昇する。このことが葉中での B 過剰を招き、この B 過剰が海側での制限要因となると推察された。また陸側では土壌水 EC の下降に伴い葉中 B 含有率の下降が起こる。葉中 B 含有率の下降とともに葉中タンニン含有率の下降が起こる。加えて、土壌水 EC の下降に伴い葉中 Mn 含有率の上昇が起こる。このように陸側では、葉中タンニン含有率の下降と葉中 Mn 含有率の上昇が同時に起こる。このため、Mn のもつ細胞成分を酸化する傾向が強まり (Asada, 1987)、またタンニンのもつ抗酸化作用が弱まる (Okuda, 1994)。このため、活性酸素などの生体毒の生成が増加すると考えられ、相対的に植物体中の酸化還元的傾向が酸化側に向かうと考えられる。このような酸化的ストレスが生ずることが、陸側の分布制限要因となると推察された。

(3) *B. g* の分布制限機作

B. g では、海側に向かうにつれて土壌水 EC が上昇した。この時、葉中 B 含有率は土壌水 EC が変化しても、ほとんど変化しなかった。また、葉中タンニン含有率もほとんど変化しなかった。しかし、葉中 Mn 含有率は急激に下降した。土壌水 EC の上昇する海側で葉中 Mn 含有率が下降したのは、土壌中の Mn 含有率が低下し、そのため土壌水中の Mn^{2+} 濃度も低下したことによると考えられた。

一方、陸側に向かうにつれて土壌水 EC が下降した。土壌水 EC が下降したが、葉中 B および葉中タンニン含有率はほとんど変化しなかった。しかし葉中 Mn 含有率は急激に上昇した。土壌水 EC の下降する陸側で急激に Mn 含有率が上昇したのは、土壌中に Mn 含有率が高く、還元的土壌環境のなかで、土壌水中に Mn^{2+} が高濃度で存在したことによると考えられた。

以上の考察から *B. g* の分布制限要因を推察すると、海側では土壌水 EC の上昇に伴い葉中 Mn 含有率が下降する。しかし、葉中タンニン含有率は陸側から海側までほとんど変化がない。このように海側では、葉中 Mn 含有率の下降が起こる。このため、Mn のもつ細胞成分を酸化する傾向が弱まり、また相対的にタンニンのもつ細胞成分を還元する抗酸化作用が強まる。このため、植物体中の酸化還元傾向が還元側に向かうと考えられる。このような還元的ストレスが生ずることが、海側の分布制限要因となると推察された。しかし、タンニンのマングローブ体中における役割やその過剰害についての研究はほとんど無く、今後の研究課題である。また陸側では土壌水 EC の下降に伴い Mn 含有率が急激に上昇する。しかし、葉中タンニン含有率は陸側から海側までほとんど変化がない。このように陸側では、葉中 Mn 含有率の上昇が起こる。このため、Mn のもつ細胞成分を酸化する傾向が強まり、またタンニンのもつ抗酸化作用が弱まる。このため、活性酸素などの生体毒の生成が増加すると考えられ、相対的に植物体中の酸化還元傾向が酸化側に向かうと考えられる。このような酸化的ストレスが生ずることが、陸側の分布制限要因となると推察された。

ま と め

本稿において、土壌塩分濃度が *R. s* の葉中 B 含有率、また *B. g* の葉中 Mn 含有率と密接な関係をもつことが明らかになった。土壌塩分濃度の変化が、B および Mn の葉中含有率の変動に関わり、その結果として

R. s と *B. g* の分布が制限される可能性が示唆された。

文 献

- Aoba, K. (青葉幸二) 1982. Absorption and movement of manganese in the fruit tree (果樹のマンガンの吸収と体内挙動). Plant and Metallic Elements (植物と重金属). (Japanese text) Hakuyusha, Tokyo, p 167-212.
- Asada, K. (浅田浩二) 1987. Physiological effect of manganese (マンガンの生理作用). Plant nutrition (植物栄養). "Encyclopedia of Plant Nutrition and Soil Science" (植物栄養土壌肥料大事典). (Japanese text) Youkendou, Tokyo, p 113-115.
- Baba, K. (馬場 昂) 1987. Physiological effect of boron (ホウ素の生理作用). Plant nutrition (植物栄養). "Encyclopedia of Plant Nutrition and Soil Science" (植物栄養土壌肥料大事典). (Japanese text) Youkendou, Tokyo, p 123-125.
- Dutta, T. R., McIlrath, J. 1964. Effects of boron on growth and lignification in sunflower tissue and organ culture. Bot. Gaz. **125**(2): 89.
- Goto, I. (後藤逸男), Muramoto, J. (村本穰司), Ninaki, M. (蜷木 翠) 1992. Analysis of minerals in plant by closed PTFE vessel acid digestion method and ICP-AES (テフロン加圧分解容器—ICP 発光分光分析法による植物の無機成分分析). (Japanese text) Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr. **63**: 345-348.
- Goto, I. (後藤逸男) 1994. Soil diagnosis in inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP 分析による土壌診断). (Japanese text). Analysis of Soil Component (III) (土壌構成成分解析法 (III)). Hakuyusha, Tokyo, p 5-35.
- Haga, K. (羽賀清典), Nagata, T. (長田 隆), Harada, Y. (原田靖生) 1988. Quantitative analysis of Total Nitrogen and Total Phosphate of stock raising sewage in the flow injection analysis (フローインジェクション分析法による畜舎排水中の全窒素・全リンの定量). (Japanese text) J. Jpn. Soc. Sewer. **25**: 74-80.
- Kime, S. (藁目清一郎) 1981. Methods for Chemical Analysis of Waters (水の分析). The Japan Society for Analytical Chemistry, Hokkaido, pp 504.
- Kyuma, K., Nishimura, K., Hirai, H., Funakawa, S. 1988. Characteristics of soil/sediment under the mangrove forest. Studies on Dynamics and Conservation of Mangrove Ecosystem. p 123-147.
- Levanidov, L. Ja. (Леванидов Л. Я.) 1957. Biological roles of Mn in plants which accumulates Mn. (Биологическая роль марганца в растениях-манганофилах.) Univ. Zap. Chlyabinsk. Ped. Inst. **3**: 267.
- Levanidov, L. Ja. (Леванидов Л. Я.) 1961. Relationship of Biochemical roles between Mn and Tannin. (Биохимические факторы миграции марганца в биосфере. В сб.: Марганец как микроэлемент в связи с биохимией и свойствами танинов.) Chlyabinsk: 4.
- Okuda, T. (奥田拓男) 1994. Japanese and Chinese medicinal plants (和漢薬). (Japanese text) Antioxidants-Free Radicals and Biological Defense (抗酸化物質—フリーラジカルと生体防御). Japan Scientific Societies Press, Tokyo, p 263-275.
- Rajaram, J. A., Lowry, J. B., Avadhani, P. N., Corley, R. H. V. 1971. Boron: possible role in plant metabolism. Science **172**: 1142.
- Tsukamoto, T. 1997. The relation of the soil water qualities, the ground level and the distribution of *Bruguiera gymnorhiza* and *Rhizophora stylosa* in the south east of Iriomote Island. Environ. Control in Biol. **35**: 157-169.
- Tsukamoto, T., Nakanishi, Y. 1997. Iron, manganese, sulfur, boron and tannins in the soil environment of mangrove forest in the coast area of Iriomote Island, Okinawa. Environ. Control in Biol. **35**: 203-215.