

耐塩限界濃度におけるホテイアオイ中14種の元素含有量の変化

村本 茂樹・青山 勲・沖 陽子*・八木 正一

緒 言

ホテイアオイ (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) は耐塩性の低い水生植物とされており、その生育限界の塩分濃度は従来の報告では、2.0—3.0%¹⁾であった。しかし、やや高濃度の、6.0—8.0%、すなわち海水率20—25%まで生育可能であること³⁾および同時に洗剤等に含まれる界面活性剤の共存の影響^{7,10)}に関しても先に報告した。

他の植物に対する塩分及び金属の影響に関する研究は数多くある。すなわち水稻はじめ穀物の土壤中塩分に対する耐性の研究^{2,3,4,6,12,15,16,19)}及びホテイアオイに対する金属毒性の影響に関する研究、特にカドミウム^{7,9)}、亜鉛⁸⁾、鉛^{8,17)}、銅¹⁴⁾、水銀^{8,17)}、ニッケル¹⁰⁾、ストロンチウム¹⁸⁾、コバルト¹⁸⁾等がある。しかし、ホテイアオイの生育に対する塩分の影響に関する研究^{5,10)}及びホテイアオイ中の化学組成に対する塩分の影響の研究はほとんど見当たらない^{10,13)}。

そこで、本報ではホテイアオイを塩分の低濃度から生育限界濃度までの広範囲にわたり暴露を行い、ホテイアオイの生育状況に対する影響及び地上部（ライゾームを含む）と根部中の14種類の元素、Ca, Mg, P, Si, Fe, Al, B, Mn, Cu, Sr, Mo, Ba, Ti, Vの塩分による濃度変化について検討した。

本研究を遂行するに当たり、特に耐塩性に関する有効な助言と文献の提供を頂いた当研究所の形質発現部門の松本英明教授に謝意を表します。またICP発光分析装置の御指導と使用の御援助を頂いた信州大学繊維学部 渡辺義人助教授に対し、深く感謝の意を表します。

実験材料及び方法

ホテイアオイは約3カ月間、水槽中で育成した葉数5—6枚の成株を使用し、子株及びその原基は切除した。根は約10cmに切り揃え、根量もほぼ一定にして、実験開始前に無肥料で7日間育成した。実験はホテイアオイ各1株を2L容のポリエチレンポットに入れ、ファイトトロン (25±2℃, 全日長, 風速0.5m/sec) の条件下で12日間育成した。栽培水は児島半島、山田湾で採水の海水を用い、水道水で希釈してそれぞれ所定の塩分濃度区(%), 0.01 (海水率0%), 1.57 (5%), 3.12 (10%), 4.70 (15%), 6.25 (20%), 7.82 (25%),

平成3年1月18日受理

*現在 岡山大学農学部

9.38 (30%) を作製した。各濃度区は4反復とした。

次に実験に用いた海水の水質を示す (mg/L) : Ca 397.7, Mg 359.0, $\text{NH}_4\text{-N}$ 0.3, Na 8530, K 368, Cl 17500mg/L であり, pH 8.2, 電気伝導度は $46.7 \times 10^4 \mu\text{S}$ (25°C) であった。同様に水道水は (mg/L) : Ca 12.3, Mg 1.21, Na 4.3, K 0.89, SO_4 5.2, Cl 4.1, SiO_2 12.3, アルカリ度38.5 (CaCO_3 として), 蒸発残渣 64.7, Cd 0.001, Cu 0.04, Zn 0.05, Pb 0.07mg/L であり, pH 6.9—7.2 であった。栽培水の換水は毎日行なった。電気伝導度及び塩分濃度は Salinometer (YSI Scientific Co. LTD 製) で行なった。塩分濃度(‰) は International Oceanographic Table¹⁰⁾ から, 次式の, $S(\%) = 1.8065 \text{ Cl}\%$ を用いて計算した。

栽培終了時の植物は水道水で十分洗浄し, 地上部 (ライゾームを含む) と根部に分けた。各試料は 60°C, 48時間, 熱風乾燥器で乾燥後, ミキサーで粉碎した。その粉試料を硝酸—過塩素酸 (2 : 1) の混酸で湿式灰化し, 0.5N-HCl 溶液で一定容とし, DDTC-MIBK で

Table 1. ICP operating parameters

operating power	1.34kw		
auxiliary gas flow	1.5L/min		
nebulizer gas flow	1.2L/min		
aspiration rate	0.75mL/min		
observation height	16mm above the coil		
wave length			
Fe, 259.9nm	Cu, 324.7nm	Al, 308.2nm	Cr, 267.7nm
Zn, 213.9nm	Mn, 257.6nm	Si, 251.6nm	Mo, 313.3nm
Ti, 276.8nm	V, 292.4nm	B, 209.0nm	Sr, 407.8nm
P, 213.6nm	Ba, 455.4nm		

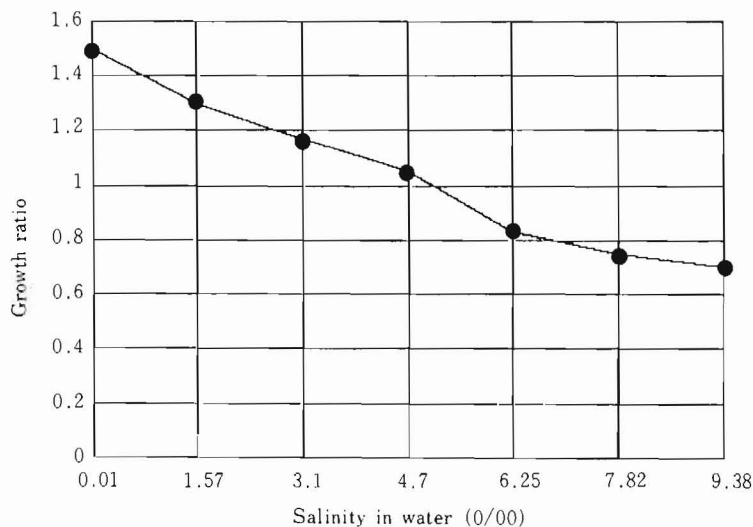


Fig. 1. Correlation between the increase of fresh weight and salinity (‰) after exposure for 12 days. (Initial fresh weight = 1.0).

抽出後、原子吸光分析装置 (Nippon-Jarrell-Ash, AA-1) を用いて、Ca, Mg, Sr, Cu, Fe, Mn の測定を行なった。また Al, Si, Ti, V, B, P, Ba, Mo は誘導プラズマ ICP 発光分析置 (Seikosha BK-500) 及びデータ処理装置 (沖電気, Model if-800) を用いて測定した。ICP 発光分析の測定条件を Table 1 に示した。

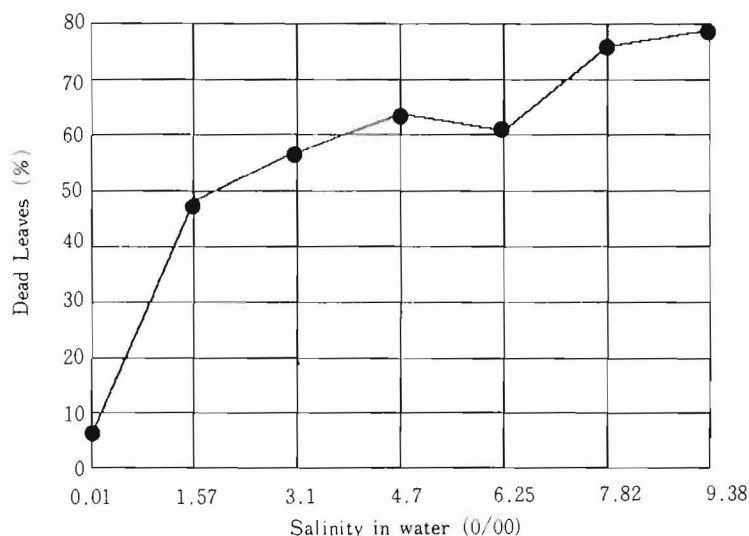


Fig. 2 . Correlation between the percentage of dead leaves of water hyacinth (in comparison with total) and the salinity (%) of water.

Table 2 . The average content of control water hyacinth (salinity 0.01%) in some elements ($\mu\text{g/g}$ in dry matter).

Elements	Top		Root	
Ca	28,000	$\pm 1,500$	17,500	$\pm 1,200$
Mg	25,000	$\pm 1,200$	20,000	± 800
P	15,000	± 900	4,400	± 500
Si	4,600	± 800	7,000	± 600
Fe	550	± 40	440	± 70
Al	105	± 9	760	± 70
Sr	170	± 30	110	± 40
Mn	53	± 7	20	± 5
Cu	50	± 10	47	± 3
Mo	48	± 7	36	± 9
Ba	47	± 8	44	± 10
Ti	4.8	± 2.5	34	± 7
V	0.01	± 0.005	4.8	± 0.9
B	0.01	± 0.005	0.8	± 0.5

実験結果と考察

1. 生育状況

ホテイアオイの生育状況に対する塩分暴露濃度の影響を新鮮重、正常葉数の調査により検討し、それぞれ Fig. 1 及び Fig. 2 に示した。正常葉数の割合 (%) は栽培水中の塩分濃度の上昇に伴い、減少する傾向を示した。

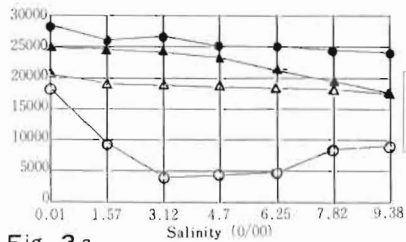


Fig. 3a

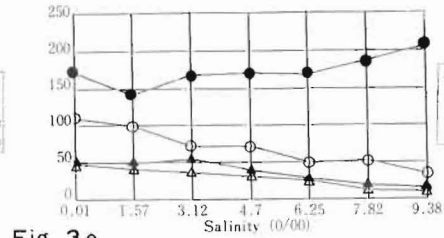


Fig. 3e

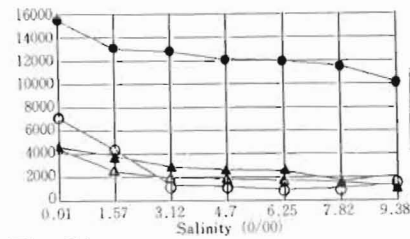


Fig. 3b

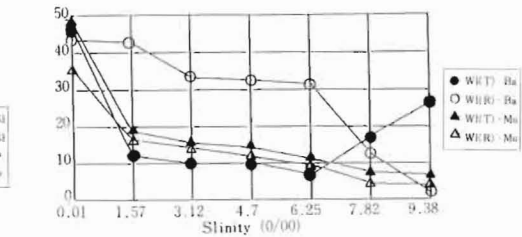


Fig. 3f

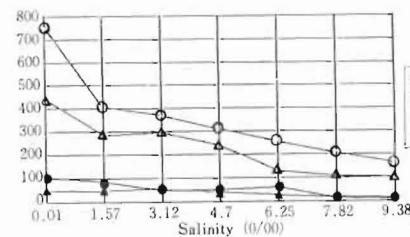


Fig. 3c

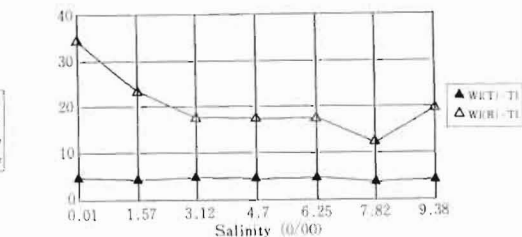


Fig. 3g

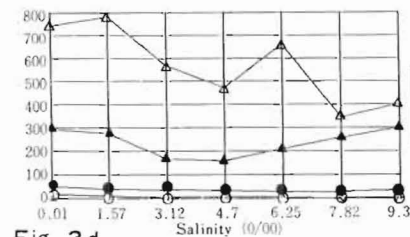


Fig. 3d

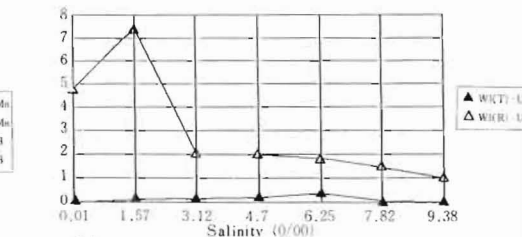


Fig. 3h

Fig. 3a-3h. Relationships between the element concentrations in tops and roots of water hyacinth and salinity (%).

WH (T) : Top, WH (R) : Root

また、塩分6.25%（海水率20%）以上からはホテイアオイの生育障害が強く出現した。これは先の実験結果⁹⁾とほぼ類似の結果である。塩分濃度7.82%（海水率25%）以上では、実験開始時に比較して新鮮重の有意な減少が見られ、ホテイアオイ生育限界の塩分濃度は6.25—7.82%（海水率20—25%）であることが確認された。

2. 栽培水中の塩分濃度と植物体中の元素含有量

Table 2 に対照区（塩分0.01%）として使用した、ホテイアオイ中の14元素の平均含有濃度を示した。地上部＞根部の傾向にある元素は、多量元素では Ca, Mg, P, 微量元素では Fe, Al, Sr, Mn, Cu, Mo, Ba であった。逆に、根部＞地上部の関係にあったのは極微量元素の V, B 等であった。塩分濃度9.38%（海水率30%）までの栽培水中の塩分濃度とホテイアオイの根部、地上部中の各元素含有量との関係を Figs. 3a—3h に示した。また、各部位における元素含有量と栽培水中の塩分濃度との関係式及び相関係数を Table 3 に示した。概して、栽培水中の塩分濃度が上昇するに伴って、ホテイアオイ中の元素は

Table 3. Correlation coefficients and equations between element concentrations in tops and roots of water hyacinth and salinity (%). (n=7)

Elements	Parts	Correlation coefficient	Significance	Correlation equation
Ca	A	-0.909	**	$Y = -574.5 \log x + 26000$
	B	-0.922	**	$Y = -2142 \log x + 8460$
Mg	A	-0.376	—	$Y = -1838 \log x + 2000$
	B	-0.930	**	$Y = -361.3 \log x + 8900$
P	A	-0.921	**	$Y = -620.9 \log x + 12800$
	B	-0.990	**	$Y = -434.8 \log x + 2460$
Si	A	-0.886	**	$Y = -365.7 \log x + 3150$
	B	-0.938	**	$Y = -915.9 \log x + 3090$
Fe	A	-0.878	**	$Y = -51.90 \log x + 341$
	B	-0.873	*	$Y = -4520 \log x + 258$
Al	A	-0.789	*	$Y = -1.40 \log x + 61.8$
	B	-0.977	**	$Y = -80.38 \log x + 406$
B	A	-0.209	—	$Y = -5.506 \log x + 256$
	B	-0.284	—	$Y = -20.93 \log x + 676$
Mn	A	-0.924	**	$Y = -3.041 \log x + 39.3$
	B	-0.979	**	$Y = -2.313 \log x + 10.1$
Cu	A	-0.581	—	$Y = -3.832 \log x + 39.0$
	B	-0.755	*	$Y = -4.370 \log x + 31.9$
Sr	A	0.265	—	$Y = 2.54 \log x + 172$
	B	-0.723	—	$Y = 11.87 \log x + 151$
Mo	A	-0.996	**	$Y = -5.930 \log x + 21.4$
	B	-0.975	**	$Y = -4.358 \log x + 16.6$
Ba	A	-0.803	*	$Y = -4.706 \log x + 21.6$
	B	-0.463	—	$Y = -4.125 \log x + 33.6$
Ti	A	-0.437	—	$Y = -0.064 \log x + 4.49$
	B	-0.928	**	$Y = -2.725 \log x + 22.2$
V	A	-0.335	—	$Y = 0.142 \log x + 3.28$
	B	-0.549	—	$Y = -0.534 \log x + 3.28$

A : Top, B : Root, * : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$

減少傾向にあり、Ca, P, Si, Fe, Al, Mn, Mo は根部、地上部ともに有意な負相関(5%有意水準)を示した。しかし、B, Sr, V は根部、地上部ともに有意な負相関は認められず、Mg, Cu, Ti も地上部では、有意な負相関は認められなかった。

Table 4 に、0.01—9.38%の塩分濃度範囲の暴露におけるホテイアオイ中の14元素含有量の根部と地上部間の有意差を比較し示した。5%水準で有意差が認められた元素はCa, Mg, Mn, P, Sr, Ba であり、地上部>根部の関係にあった。しかし、Si, Fe, Al, Cu, Mo には有意差は認められなかった。概して、栽培水中の塩分濃度の増大で各元素含有量は低下傾向にあったが、Ba, Sr 含有量が地上部において増加傾向を示した。一般的にCa, Sr, Ba 等は植物体中では難移動性元素とされており¹⁾、本実験のホテイアオイについても同様の結果が示された。Ca と Si は根部では減少するが、逆に地上部では増加傾向がみられた。この現象は高塩分に起因する根部組織の障害により、根部中の元素量は減少し、蒸散作用に伴い葉組織への移行が行なわれたためとも推察される。特に、塩分濃度の上昇に伴い植物体中の含有濃度が急激な減少傾向を示した元素は 易移動性の元素と考えられるP, Cu, Mn, Fe, Mo であり、高塩分による根部組織の損傷により根部内での急速な移行が示され、地上部では更にこの減少傾向が顕著に示された。

Table 5 に塩分濃度6.25%以上の塩分濃度区における、ホテイアオイの根部、地上部中のSi, Ca, Mg, Ba, B, Ti, Mn, Sr の各元素含有量と栽培水中の塩分濃度との相関関係を示した。生育障害を強く受けた後に、植物体中の元素濃度が上昇傾向にあるものは、根部ではSi, Ca, Ti, 地上部ではBa, Sr であった。なかでも根部のSi, 地上部のSr, Ba には有意な濃度上昇が認められた。逆に、地上部では、Ca, Mg, 根部ではMg, Sr が有意に減少を示した。Mg は根部、地上部ともに有意な減少を示し、高塩分の影響による地上部の葉組織中のクロロフィル含有量の低下による腿色現象と関連しているものと推測される。

Table 4. Significance of differences in element content between tops and roots of water hyacinth treated with saline water (salinity up to 9.03%).

Elements	Significant difference	t-value
Ca	**	5.27
Mg	*	3.10
P	**	14.03
Si	—	0.44
Fe	—	1.16
Al	—	-2.25
B	**	-6.12
Mn	**	7.81
Cu	—	0.92
Sr	**	8.28
Mo	—	0.62
Ba	**	21.41
Ti	**	-5.93
V	**	-4.55

** : Significant difference at $p < 0.01$,

* : Significant difference at $p < 0.05$,

— : No significant difference at $p < 0.1$

Table 5. Correlation coefficients and equations between metal contents of tops and roots in water hyacinth and salinity over 6.25‰ in test water. (n=3)

Elements	Parts	Correlation coefficient	Significance	Correlation equation
Si	A	-0.392	—	$Y = -105.9x + 2968$
	B	0.987	*	$Y = -146.6x + 9.180$
Ca	A	-0.995	*	$Y = -303.6x + 26800$
	B	0.418	—	$Y = -616.6x + 3180$
Mg	A	-0.999	**	$Y = -1118x + 28200$
	B	-0.952	*	$Y = -287.4x + 2030$
Ba	A	0.999	**	$Y = -6.230x - 31.93$
	B	-0.873	—	$Y = -12.64x + 114.2$
B	A	-0.164	—	$Y = -2.908x + 312.4$
	B	-0.305	—	$Y = -51.41x + 1036$
Ti	A	-0.502	—	$Y = -0.147x + 5.432$
	B	0.248	—	$Y = 0.612x + 11.60$
Mn	A	-0.502	—	$Y = 1.831x + 17.36$
	B	-0.9046	—	$Y = -0.735x + 10.49$
Sr	A	0.999	**	$Y = 11.82x + 94.90$
	B	-0.999	**	$Y = -11.82x + 144.7$

A: Top, B: Root, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

また、植物体中の元素含有濃度が対照区のものに対し、10%以上の濃度変動が認められた元素について、どの塩分濃度（海水率%）において、その変動が発生したかを次に示す。まず、塩分濃度1.57%（海水率5%）に暴露で、ホテイアオイ中の地上部、根部ともに元素含有濃度に10%以上の変動が認められた元素は Si, P, Fe, Al, Mn, Mo であった。これらの元素は塩分に対して、ホテイアオイ中で極めて影響を受けやすい元素だと考えられる。同様に、地上部の Ca, Cu が塩分濃度4.70%（海水率15%）で、6.25%（海水率20%）では根部の B が、また Mg が根部、地上部のいずれでも含有濃度の変動を示した。しかし、根部の Ba および地上部の Ti, V は7.82%（海水率20%）までもほとんど含有量の変化は認められなかった。

ホテイアオイ中の元素の濃度変動は栽培水中の塩分⁹⁾、重金属等^{8,10)}水質に依存し、しかも比較的短期間の暴露でも、植物体中の元素組成に変化を生じることが判明した。この様な元素組成の変化は耐性獲得機構の1つの機序を示唆したものと考えられる。すなわち、ホテイアオイ等の低耐塩性の植物においても、あらかじめ低塩分濃度の水に暴露する前処理を行なうことにより、植物体中の金属組成は栽培水の水質に対応して変化し^{8,11)}、この元素組成の変化が更に高塩分濃度暴露に対する新たな耐塩性獲得の手段となっている可能性が考えられる。

摘 要

ホテイアオイ (*Eichhornia crassipes*. (Mart.) Solms) の耐塩分濃度は6.0—8.0%（約20—30%海水率）であることが確認された。ホテイアオイ中の14元素含有量は概して栽培

水中の塩分濃度上昇に伴い減少した。特に、P, Si, Fe, Al, Mn, Mo は根部及び地上部ともに、Ca, Cu, Ti, V は根部で、また Ba は地上部で有意な減少を示した。すなわち比較的低塩分濃度で、しかも短期間の暴露によって、植物体中の元素含有量に変動が生じることが判明した。一方、生育限界を超えた塩分濃度（6.25%）では根部組織の明らかな障害および脱水、萎凋現象が惹起された状態において、地上部の Ba, Sr, V, 根部中の Ca, Si, Ti 等の含有量は栽培水中の塩分濃度の上昇に伴い増加傾向を示した。これは根部組織への元素の転流あるいはファイトロン中での風量の影響もあり、強制的な蒸散作用による葉組織への移行に基因する地上部中の元素増加が考えられる。しかし、そのいずれであるかは本実験からは判明しない。

これらのことから、あらかじめ低塩分濃度に植物体を暴露することにより、環境水に適応する植物体中の元素組成の変動が比較的早期に起こり、このような新たな元素組成の変化による耐塩性獲得機構が推測された。

引用文献

1. Bukovac, and Wiffer, S. H. 1957. Absorption and movility of foliar applied nutrients. *Plantphysiology* 32 : 428-435.
2. Donovan, T. J., and Day, A. D. 1969. Some effects of high salinity on germination and emergence of barley (*Hadeum vulgare* L. emend Lam.). *Agron J* : 236-238.
3. Haller, W. T., and Sutton, D. L. 1974. Effects of salinity on growth of several aquatic macrophytes. *Ecology* 55 : 891-894.
4. Koddah, M. T., and Ghowail, S. I. 1964. Salinity effects on the growth of corn at different stages of development. *Agron J* 56 : 214-217.
5. Maas, E. V., Ogata, G., and Garber, M. J. 1972. Influence of salinity on Fe, Mn, and Zn uptake by plants. *Agron J* 64 : 793-795.
6. Michael, T. T., and Reinhard, F. M. S. 1988. Effects of salinity and phosphate on ion distribution in lupin leaflets. *Physiol Plant* 73 : 317-322.
7. Muramoto, S., and Oki, Y. 1974. Influence of anionic surface-active agents on the uptake of heavy metals by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Bull Environ Contam Toxicol* 33 : 444-449.
8. Muramoto, S., and Oki, Y. 1983. Removal of some heavy metals from polluted water by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Bull Environ Contam Toxicol* 30 : 170-177.
9. Muramoto, S., and Oki, Y. 1988. Effects of surface active agents on the salinity tolerance of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *J Environm Sci Health A-23* : 603-611.
10. Muramoto, S., Oki, Y., Nishizaki, H., and Aoyama, I. 1989. Variation in some element contents of water hyacinth due to cadmium or nickel treatment with or without anionic surface active agents. *J Environ Sci Health A-24* : 925-934.
11. National Institute of Oceanography of Great Britein & UNESCO. 1966. *International Oceanographic Tables*. p 1128. England.
12. Ravikovitch, S., and Porath, S. 1967. The effects on nutrients on the salts tolerance of crops. *Plant Soil* 26 : 49-71.
13. Reimer, D. N., and Toth, S. J. 1968. A survey of chemical composition of aquathc plants

- in New Jersey Agri Expt Sta Bull : 820-827.
14. Sutton, D. L., and Blackburn, R. D. 1971. Response of aquatic plants to combinations of endothall and copper. Weed Science 19,643-651.
 15. Toru, M., Matsushita, N., and Takahashi, E. 1988. Salt tolerance of the reed plant *Phragmites communis*. Physiol Plant 73 : 317-322.
 16. Van Steveninck, R. F. M., Stevenick, M. E., Stelzer, R., and Lauchli, A. 1982. Studies on the distribution of Na and Cl in two species of Lupin (*Lupinus Luteus* and *Lupinus angustifolius* differing in salt tolerance. Physiol Klant 56 : 465-473.
 17. Wolverton B. C., and Mcdonald, R. C. 1975. Water hyacinth and alligator weeds for removal of lead and mercury polluted waters. Nasa Technical Memorandum TM-X-727232.
 18. Wolverton B. C., and Mcdonald, R. C. 1975. Water hyacinth and alligator weeds for removal of silver, cobalt, and strontium from polluted waters. Nasa Technical Memorandum TM-X-72727.
 19. Yeo, A. R., and Flowers, T. J. 1982. Accumulation and localisation of sodium ions within the shoots of rice (*Oryza sativa*) varieties differing in salinity resistance. Physiol Plant 56 : 343-348.

Variation of 14 Elements in Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) due to Salinity at Critical Levels

Shigeki MURAMOTO, Isao AOYAMA, Masakazu YAGI, and Yoko OKI

Summary

The lethal level of salinity for water hyacinth was about 6.0-8.0‰ S (about 20-25% of sea water) and was higher than the level of 2.3‰ S, reported several years ago. Also, the levels of salinity and surface-active agents in water affecting plant growth were determined. Some element contents of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) were affected by the salinity in culture water. Especially the contents of P, Si, Fe, Al, Mn, Mo in both tops and roots, Ca, Cu, Ti, V in roots, and Ba in tops changed at relatively low salinity levels. On the contrary, the contents of Ba, Sr, V in tops, and Ca, Si, Ti in roots increased with increasing salinity in water. The metal concentration of water hyacinth is assumed to change quickly after exposure to salinity for a relatively short time. Whether or not the pre-treatment with exposure to low salinity water can help improve the tolerance of water hyacinth remains to be studied.