

中国太湖の水質と水面植栽による水浄化の可能性 — 五里湖, 梅梁湖 —

村本 茂樹^{1*)}・窪田 文武²⁾・宋 祥甫³⁾・鄒 国燕¹⁾⁴⁾・縣 和一⁵⁾
 岡山大学資源生物科学研究所¹⁾, 九州大学農学部栽培学科²⁾, 中国水稻研究所³⁾,
 岡山大学大学院自然科学研究科博士課程⁴⁾, 西日本グリーン研究所⁵⁾
¹⁾ 〒710-0046 倉敷市中央 2-20-1, ²⁾ 〒812-0053 福岡市東区箱崎 6-10-1
³⁾ 〒310006 中国杭州市体育場路 356, ¹⁾⁴⁾ 〒811-0214 福岡市東区和白東 11-2-15⁵⁾

(平成 13 年 6 月 25 日受理)

Water Quality of L. Taihu in China and the Possibility of Water cleaning by Plant floating culture system — L. Wuli and L. Meiliang —

Shigeki Muramoto^{1*)}, Fumitake Kubota²⁾, XiangFu Song³⁾, Guoyan Zou¹⁾⁴⁾, and Waichi Agata⁵⁾

Research Institute for Bioresources of Okayama University¹⁾, and Department of Planting,
 Faculty Agriculture of Kyusyu University²⁾, China National Rice Research Institute³⁾,
 Graduate School of Natural Science and technology of Okayama University⁴⁾ and The
 Nishinohon Green Research Institute⁵⁾

Chuo 2-20-1, Kurashiki 710-0046, Japan¹⁾⁴⁾, 6-10-1 Hakozaki 812-0053, Japan²⁾, 359 Tiyuchang Rd.
 Hangzhou, 310006.P.R. China³⁾, 1-2-15, Wajirohigashi, Higashi-ku, Fukuoka 811-0214, Japan⁵⁾

Abstract: The water quality of L.Wuli and L.Meiliang of L. Taihu in China, and the possibility of water cleaning by plants floating culture system were examined. The eutrophication of lake water are strongly affected by both domestic and industrial wastewater because of the about 90% of wastewater without any treatments. Eutrophication has increased in most of the Chinese lake by high anthropogenic input of nutrients with the rapid progress human activity after the 1980s. For almost elements of water of L.Wuli were more polluted compared with those of L.Meiliang. The relation of nitrogen concentration of water was $\text{NH}_3\text{-N} > \text{NO}_3\text{-N} > \text{NO}_2\text{-N}$ in L. Wuli, and $\text{NO}_3\text{-N} > \text{NH}_3\text{-N} > \text{NO}_2\text{-N}$ in L.Meiliang, respectively. From the results of water quality analysis, the nutrient concentrations were increased, but not polluted by some heavy metals and slightly increased by surfactants, anionic surface active agents. It seemed to be able to clean the lake water by plant floating culture methods with using many kinds of plants by the data of another experiments in phytotron and in natural field.

Key words: L.Taihu, Water pollution, Metals, Bottom soil, Anionic surfactant, Phytoremediation, Plant floating culture system

1. 緒 言

近年,中国の都市化,工業化のスピードは極めて速い。南部沿岸工業地帯への農業従事者の移動に伴う農作物生産の低下による食糧不足が危惧されつつあり,従来の農業形態の変化に対応するためにも水田,畑地のみならず水域を活用した生産が注目されはじめている。中国の天然湖沼の面積は耕地面積の約 1/5 に当たり,

世界の湖沼の 1/10 を占める。産業拡大が進行する一方で排水処理施設の整備は立ち遅れ,湖沼の水質悪化は魚の斃死のみならず水道水の原水として利用不可能な事態も招きつつある。そこで,本報告では工業都市の無錫市(Wuxi C.)および蘇州市(Suzhou C.)の間に湖岸を接する太湖(L.Taihu)の一部である五里湖(L.Wuli)およびその沖合の湖心側に位置する梅梁湖(L.Meiliang)を対象に水質調査を行い,現状の汚濁状況を比較した。中国の湖沼の水質に関する論文は少ない。

*連絡先, Corresponding author

主なものは除、須藤らの中国の湖沼の富栄養化に関する一連の報告[1,2,3,4,5]の他に調査地点数が少ないが中国科学院がまとめた五里湖、梅梁湖の報告等[6,7]がある。

また今回の水質調査の目的は汚濁の現状把握と同時に、これらの湖の水質汚濁の内容から、別に行った植物を用いた環境負荷低減に関する室内実験および現場実験の結果から植物の水面栽培による太湖の水浄化の可能性についても検討した。

2. 実験方法および材料

2.1 湖水、底泥の採取及び分析

中国太湖の五里湖、梅梁湖(江蘇省)を対象に予備調査の後、1996年9月4日～5日に採水、採泥及び水質調査を行った。現場での簡易分析は溶存酸素(DO, pH, 水温, 電気伝導度($\mu\text{S}/\text{cm}$, 25°C))は水質チェッカー(HORIBA U-10)及び水質測定器(CORNING V1200)により測定した。パックテスト(共立化学研究所)を用い、COD, Phenol, 陰イオン界面活性剤, リン酸, フッ素, 塩化物, 硫酸塩, 珪酸, 硝酸態窒素, 亜硝酸態窒素, アンモニア態窒素を分析した。試料の一部は研究室に持ち帰り、重金属および陰イオン界面活性剤を分析した。重金属は原子吸光法により、陰イオン界面活性剤は水はそのまま、底泥は適量を用い一定容の水を加えてEDTA-Cuおよび CHCl_3 で振盪抽出後、原子吸光装置(HITACHI D7000)により測定した[8]。

2.2 結果および考察

2.2.1 湖水中の主な成分の濃度分布

五里湖 および梅梁湖における採水地点および電気伝導度の分布を Fig.1 に示した。湖水は pH 8.18-9.08, 電気伝導度 $347\text{--}408\mu\text{S}/\text{cm}$, 溶存酸素 $4.7\text{--}8.1\text{mg}/\text{L}$ (水温 $25.8\text{--}28.9^\circ\text{C}$)であり比較的高濃度であった。調査2ヶ月前に大洪水が発生しており、通常よりやや汚濁が少ない状況であったと推察される。太湖はいくつかの湖の集合体であり、今回調査の五里湖への排水流入量は生活排水から1日当たり約 $10^5\text{m}^3/\text{day}$ 及び約4倍量の工場排水が流入している。無錫市の都市部からの排水は主に梁溪河を通じて五里湖の西五里梁湖に排出され、その後、溪南水産養殖場(Xinan Culture Pond)から鹿頂山を経て梅梁湖へ流入する。太湖への主な流入河川は杭州市(Hangzhou C.)および宣興市(Yixing C.)からの2河川で、流出は東洞庭山の南東に位置する呉江市の太浦河および蘇州市の楼江はじめその中間に位置する望虞河等の10河川である。太湖への流入量は $1950\text{m}^3/\text{sec}$, 貯水量は $4,400 \times 10^1\text{m}^3$ であり、滞留時間は約264日と試算されている[1]。また平均水深2.5mと極めて浅い湖である五里湖-梅梁湖間の湖水中含有成分の濃度の有意差を Table1 に示した。1%以上の有意差

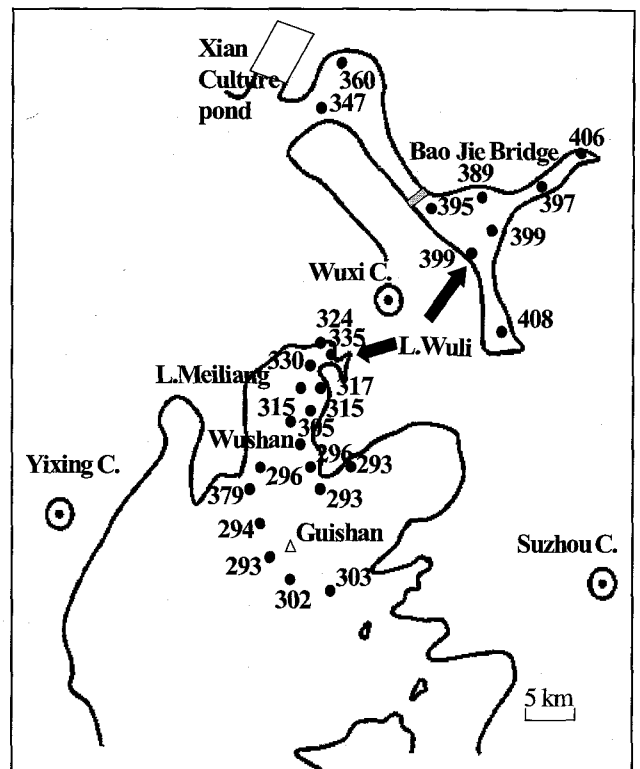


Fig.1 Distribution of electron conductivity in L.Wuli and L.Meiliang ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 25°C).

が認められた項目は電気伝導度, 陰イオン界面活性剤, NO_2 , NH_3 , 無機態総窒素, Total-Fe であり, 5%以上の有意差は DO, Cl, COD, NO_3 に認められた。また主な項目について五里湖と梅梁湖の比較をしてみると, それぞれ pH は 7.67-8.58, 8.01-9.00 とアルカリ性を示した。これは HCO_3 および Ca による揚子江中流域の淡水湖の特徴を示している。電気伝導度は $347\text{--}408\mu\text{S}/\text{cm}$, $293\text{--}379\mu\text{S}/\text{cm}$ であった。また無機態窒素の平均はそれぞれ $2.32\text{ mg}/\text{L}$, $0.24\text{ mg}/\text{L}$ であり, 五里湖は過栄養, 梅梁湖は中栄養の段階にあると判断された。特に窒素の形態別特徴を見ると, 五里湖では $\text{NH}_3 > \text{NO}_3 > \text{NO}_2$ の関係にあり, $\text{NH}_3\text{-N}$ が総窒素の63%と高率であった。これに対し梅梁湖では, $\text{NO}_3 > \text{NH}_3 > \text{NO}_2$ の関係にあり湖岸から離れるに従い酸化状態が進み, NO_3 が総窒素の61%と卓越したものと推察される。窒素による汚濁の

Table 1 Significant differences for some elements in water between L. Wuli and L. Meiliang.

Elements	Cond.	DO	COD	NO_3	NO_2	NH_3	T-Fe	Anionic Surfactant
Sig. Dif.	***	**	**	**	***	***	***	***

** : $p < 0.05$; *** : $p < 0.01$, T-Fe: Total-Fe,

Cond. : Conductivity, Sig. Dif. : Significant differences

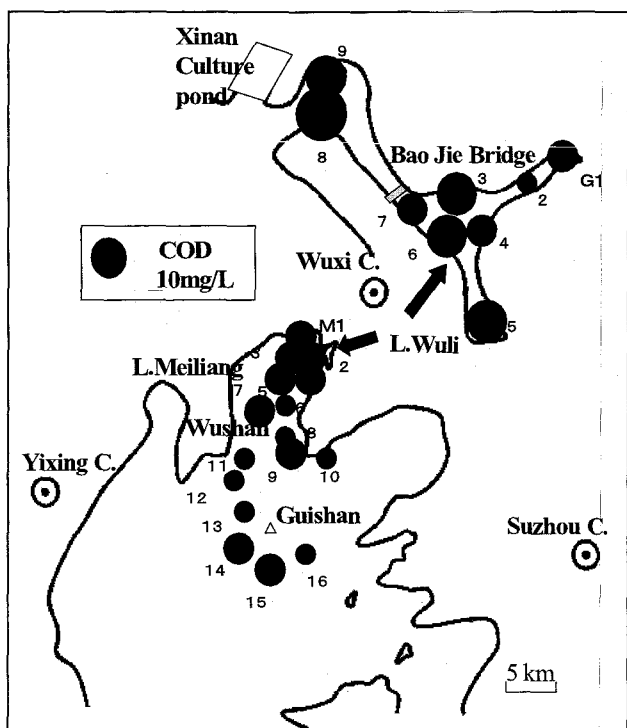


Fig. 2 Distribution of COD concentration in L. Wuli and L.Meiliang in China.

状況はCOD濃度分布 (Fig.2) と良く一致しており、五里湖の方が梅梁湖に比べ有機汚濁の進行が著しいことが判明した。しかし梅梁湖においても烏山鎮沖、無錫市の湖岸に近接した地点では栄養塩、COD とともに高濃度であり、烏山鎮沖では水道水原水として湖水を取水しているだけに汚濁の進行は深刻な問題である。特にリン酸は梅梁湖>五里湖の関係にあった。平均濃度はそれぞれ 0.43 mg/L, 0.28 mg/L であり、梅梁湖の烏山鎮沖においては藍藻(Microcystis) の大量発生が確認されこれを裏付ける結果であった。一方、緑藻類等の繁殖に関与する溶解性鉄(Fe)の濃度は五里湖に有意に高く(P<0.01), 五里湖では濃度範囲 0.11-0.28mg/Lであった。平均 0.17mg/L, 梅梁湖では濃度範囲 0.03-0.18 mg/L であり、平均 0.08mg/L であった。

2.2.2 湖水および底泥中の重金属濃度

調査地点における湖水中の重金属濃度は総じて低濃度であった。五里湖においては Total-Fe の濃度範囲は 0.11-0.28mg/L であった。Al は G2,G7,G8 地点で 0.05 mg/L 以下であり、Cr は 0.005mg/L 以下であった。同様に梅梁湖においても Total-Fe の濃度範囲は 0.05-0.14 mg/L, 平均 0.075mg/L であった。また Cr, Al および Ni もそれぞれ 0.03 mg/L, 0.05 mg/L および 0.5 mg/L 以下であった。現在の重金属濃度は日本の諏訪湖など [9,10] に比べて総じて低濃度と考えられるが、湖水に比べて底泥中では汚染がやや進行しつつあると推測された。底泥中の重金属濃度の平均値を Table2 に示した。

市街地に隣接する五里湖の方が梅梁湖に比べて、Cu, Cr, Ni 等の重金属濃度が高い傾向にあった。

Table 2 Average concentration and significant differences of some heavy metals of bottom soil in L. Wuli and L. Meiliang.

Lake	Content (µg/g in dry matter)						
	Mn	Ni	Cr	Pb	Cu	Cd	Co
L.. Wuli	1230	61	65	14	128	6.3	18
L.. Meiliang	1100	29	70	17	70	5.9	6
Significant differences		**	*		***		

*: p < 0.1, **: p < 0.05, ***: p < 0.01

2.2.3 湖水および底泥中の陰イオン界面活性剤

また排水処理設備の普及率は排水の10%にも満たない現状であるために、重金属、農薬、洗剤など難分解性物質による水質汚濁も見逃せない。特に洗剤の反映が大きいと考えられる陰イオン界面活性剤の湖水中の濃度分布を見ると (Fig. 3), 五里湖>梅梁湖の関係にあった (P<0.01)。無錫市に近接する五里湖では濃度範囲 118-256µg/L であり、平均 183µg/L と高濃度であるが、梅梁湖のそれはそれぞれ 38-134µg/L, 72.4µg/L であった。湖心に向かうに従い濃度は減少傾向にあった。これらの結果は日本の市街地河川および児島湖の陰イオン界面活性剤の濃度レベルとはほぼ同程度であり [8], 工業排水のみならず生活排水の影響も大きいと推測される。各地点における濃度分布をみると五里湖では市街地排水の流入の影響の大きい G1 (256 µg/L) から G6 (148 µg/L) の地点にかけて漸減した。梅梁湖では流入地点の M1 では 138 µg/L であるが、湖心に向けて濃度は減少し、烏山鎮沖から龜山周辺では 70-38 µg/L 濃度範囲であった。また五里湖、梅梁湖の底泥中の陰イオン界面活性剤濃度範囲はそれぞれ湿重中 14.1-40.8µg/g (平均 27.2µg/g), 10.4-17.9µg/g (平均 11.5µg/g) であり、梅梁湖では五里湖に比べて約 58%の濃度減少が認められた。また底泥中の陰イオン界面活性剤濃度は水中濃度に比べ、五里湖および梅梁湖ともに 148-160 倍の濃縮比率であった。水中の有機物やタンパク質等との結合により沈降し、分解を受けないまま底泥に集積しているものと推測され、今後の追跡調査も必要と考える。さらに五里湖では市街地に近い G1,G2,G3 では他に比べて高濃度を示し、梅梁湖でも都市部からの排水の影響を受ける地点の M1,M2 は五里湖と同程度の濃度に上昇し、湖心に近い M15 に向かい濃度分布は徐々に減少傾向を示した。これらの濃度分布は窒素等の栄養塩類の濃度分布と類似して、底泥でも流入地点および湖岸から離れるに従い濃度は漸減傾向にあった。

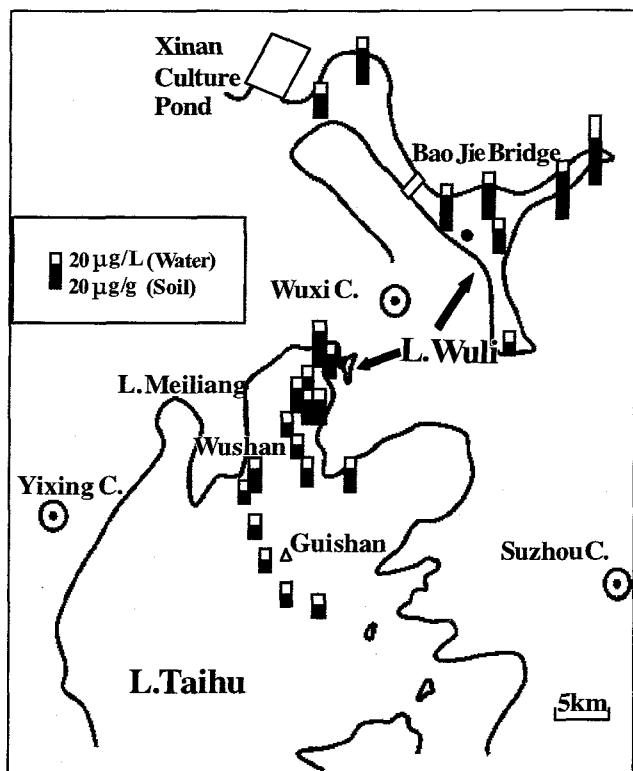


Fig.3 Distribution of anionic surfactants of water (upper) and bottom soil (down) in L.Wuli and L.Meiliang.

2.3 植物水上栽培による汚濁湖水浄化の可能性

共同研究を行っている中国水稻研究所(杭州市)に設置されたビニールハウス内に実験タンクを設け、窒素、リンおよび COD 等の小麦への吸収移行実験を行った結果を Fig. 4 に示した。各タンクの大きさは 3x4x1.5m であり、水深 1.3m(全水量 15.6m³)とした。実験は河川水(N 2.9mg/L, P 0.28mg/L, K 1.76mg/L)を用いた。小麦栽培による水面の被覆度を 0, 20, 40, 60%とした。実験開始時(1月21日)2.9mg/L(窒素量 45.25g)であり、実験終了時(5月15日)の対照区の濃度は 2.85mg/L となった。これを硝化作用による実験タンクにおける自然浄化率とした。供試小麦は播種後 16 日目に発泡スチロール製 1.5×1.0m の筏に移植した。栽植密度は 33.3 株/m² 株で、20cm×16cm の間隔に直径 5cm の穴をあけスポンジに包んだ苗を 1 株当たり 3 本で水上栽培を行った。施肥は特性の緩効性複合肥料とし、水田の約 1/10 に相当する 10a 当たり N 1.5kg, P 1.0kg, K 1.0kg を追肥として添加した。収穫量は当実験所の水田栽培における平均的な小麦収量は 250-300kg/10a に対し、1/2-1/5 の範囲の減収であった。これは水中栄養塩濃度が水田や畑地に比べて低く、分けつ期の遅れをはじめ出穂期、登熟期を通じて作物の根が希薄な栄養状態にあるためと推測される。しかし、発泡スチロールでの水面被覆にも関係し、日照量の減少と水温の影響も考えられるが、栽培に使用した河川水で十分に出穂、結実も可能であった。COD も対

照区に比べて低下傾向にあった。これは小麦の水上栽培により栄養塩類等の水中養分が吸収され、プランクトンや藻類の増殖を抑制したためと推測される。また小麦による窒素吸収率は 50-60%に達し植物が水中窒素を有効に利用していることが判明した[11]。これを今回の五里湖、梅梁湖の水質の現場分析結果に当てはめると、総窒素は五里湖で 1.39-3.68mg/L, 梅梁湖で 0.07-1.12mg/L の範囲であり、リンについても五里湖 0.28mg/L, 梅梁湖 0.43mg/L でいずれの湖も水上栽培には適合しているが、今回の調査からは五里湖の方がより水上栽培には適合した水域と推察された。

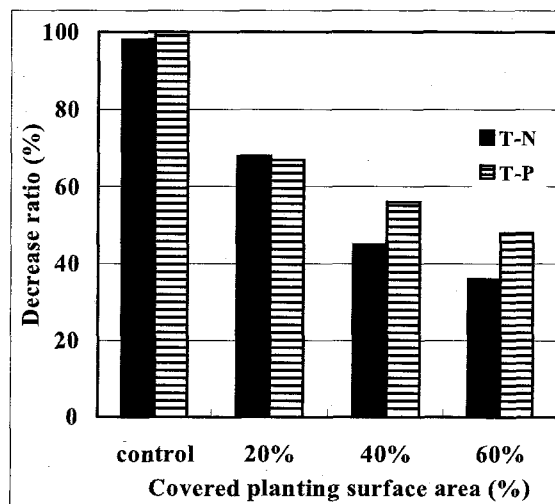


Fig. 4 Decrease of concentration ratio (%) for Total nitrogen and Total phosphorus in lake water treated with wheat floating culture system.

一方、シュロガヤツリによる界面活性剤のファイトロン内(25℃)、2L ポット中での Sodium dodecyl sulfide (SDS) 25-500mg/L の濃度範囲における実験の結果[14]は Fig. 5 に示すように陰イオン界面活性剤である SDS の水中濃度の上昇に伴って吸収濃度も上昇した。シュロガヤツリによる陰イオン界面活性剤の収奪量を試算すると、水中 SDS 25mg/L, 5-mg/L, 100mg/L, 250mg/L, 500mg/L においてはそれぞれ 11.5kg/ha, 168kg/ha, 242kg/ha, 196kg/ha であった。なお 500mg/L の高濃度においても生育阻害は認められず、汚濁水の修復には有効であることが判明した。すなわち、栄養塩類および界面活性剤による汚濁の進みつつある五里湖の湖岸水域ではシュロガヤツリやカンナ等の花卉類の水上栽培による水浄化を図り、有害化学物質による汚濁の少ない水域では、水稻や小麦などの作物の水上栽培が可能であり、水域の有効利用が考えられる。さらにシュロガヤツリは密植も可能でバイオマスも大きく、水浄化に利用後は製紙等の材料として有効活用できる事例の一部を報告している[13]。五里湖における 2000 年 9 月~10 月の間に行った水上栽培による水浄化実験の様子を Fig. 6

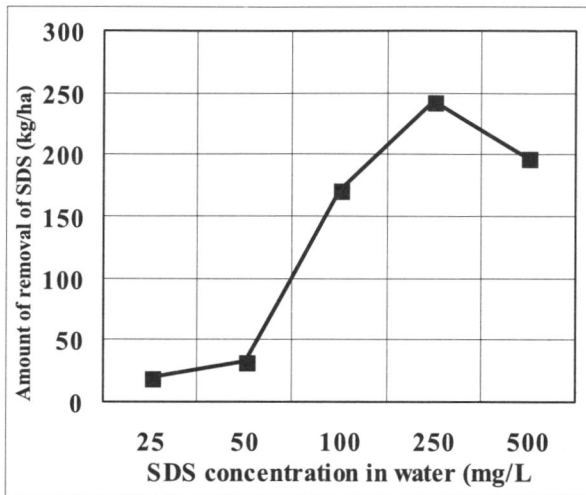


Fig. 5 Calculated mean values (kg/ha) for removal of SDS by *Cyperus alternifolius* L.

に示した。これらの結果から、五里湖、梅梁湖に代表される都市近郊の湖沼水域においては、有害化学物質などの汚染が発生しない限り水上栽培での食糧生産、さらには多種類の陸生植物を含む有用な植物を用いた環境水質の浄化法[11, 12, 13, 14, 15]も十分適用できると考えられる。21世紀は環境修復の時代でもある。湖沼

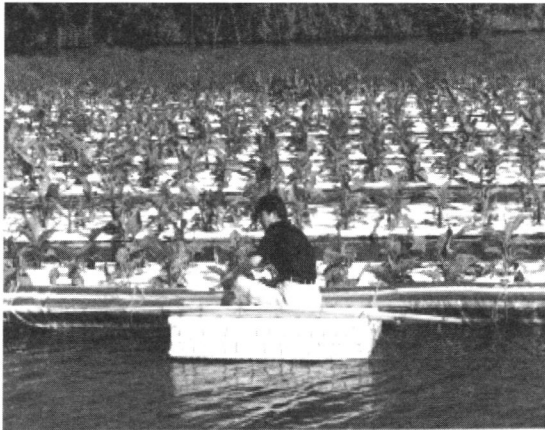


Fig.6 Photograph of experiment on water cleaning by plants floating culture system in L.Wuli.

はじめ市街河川などの水質汚濁に対する、緩やかな環境改善並びに予防策の一つとしての未利用植物の活用による可能性が示唆されたと考えられる。

謝辞

本研究は中国水稻研究所と日本との共同研究であり、調査の一部は文部省科学研究費(海外学術研究, 代表者 縣 和一)及び大原奨農会の援助を得て行った。また現地調査の条件の難しいなか中国科学院の協力を得て船上調査が遂行できたことを深謝いたします。

文献

1. K.Qin Xu, R. Sudo. Eutrophication of lake water in China (1). (in Japanese), *Yosui-to-Haisui* **36(3)**, 217–224(1994).
2. K.Qin Xu, R. Sudo. Eutrophication of lake water in China (2), (in Japanese), *Yosui-to-Haisui* **36(2)**, 409-421 (1994).
3. K.Qin Xu, R. Sudo. Eutrophication of lake water in China (3), (in Japanese), *Yosui-to-Haisui* **36(6)**, 521-535 (1994).
4. K. Qin Xu, R. Sudo. Eutrophication of lake water in China (4), (in Japanese), *Yosui-to-Haisui* **36(7)**, 621-630 (1994).
5. K.Qin Xu, R. Sudo. Eutrophication of lake water in China (5), (in Japanese), *Yosui-to-Haisui* **36(9)**, 805-814 (1994).
6. Jin XianCan, Liu HangLiang, Tu Qing Ying, Zhang Zangshe, Zhu Xuan. Eutrophication of lake water in China. China Environmental Science Press. Beijing, p92-613(1992).
7. Xu JianHua. Present state of water supply and effluent in China (in Japanese). *Yosui-to-Haisui*. **34(8)**, 10–14 (1992).
8. S.Muramoto, I.Aoyama, A.Kunglos, K.Hashimoto. Distribution and fate of surface active agents in river and lake water, affected by domestic and agricultural wastewater in an area in Japan. *J. Environ Sci. Health*. **A-31**, 9205-215 (1996).
9. J. Kobayashi, F. Morii, S. Muramoto, S. Nakashima. Heavy metal pollution in Lake Suwa. *Yosui to Haisui*. (in Japanese) **13(7)**, 809-814(1971)..
10. J. Kobayashi, F. Morii, S. Muramoto, S. Nakashima. The contents of As, Cd, Zn, Mn of bottom sediments in Lake Biwa(in Japanese). *Jpn. J. Limnol.* **36(1)**, 6-18 (1975).
11. X.Song, W.Agata, G. Zou, W. Wu, H. Yin, Q. Yu, Y., Huang, F. Kubota, and S.Muramoto. Bio-production and water cleaning by plants grown with floating culture system. 1. Effect of floating culture area of rice plants on water quality criteria and bio-production. 6th Int. Conf. On the Conservation and Management of lakes, Kasumigaura '95. p.426-429 (1995)
12. S.Muramoto, I.Aoyama, and Y.Oki. Effect of salinity on the concentration of some elements in waterhyacinth (*Eichhornia crassipes* L.) at critical levels. *J. Env. Sci. Health*. **A18**, 787-795(1988).
13. S.Muramoto, Y.Oki, H.Nishizaki, and I.Aoyama. Variation in some elements contents of water hyacinth due to cadmium or nickel treatment with or without surface active agents. *J.Environ.Sci. Health* **A24**, 925-934 (1989).
14. H.Tanaka and W.Agata. Pulp from the umbrella plant by an alkaline process. *Holzforschung* **51**, 435-438 (1997).
15. S.Muramoto, S.Tezuka. Effect of anionic surface active agents on the uptake of aluminum by *Cyperus alternifolius* L. exposed to water containing high levels of aluminum. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* **64**, 122–129 (2000).