

## ホテイアオイを利用した水質浄化について

### A Survey of Water Quality Improvement Using Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms)

大森 利春\*      多田 薫      藤井 裕士      藤田 淳二  
Toshiharu OMORI    Kaoru TADA    Hiroshi FUJII    Junji FUJITA  
美澤 禎\*\*  
Takeshi MIZAWA

ホテイアオイを用いて、自然生態系を利用した堀水の浄化を試みた。栄養塩類が低い水質環境であったため、速度生長係数は、 $0.053 \sim 0.062/d$ と低かった。しかし、収穫時には生鮮物量として $34.0 \text{ kg/m}^2$ までに生長し、窒素 $31.1 \text{ g/m}^2$ 、リン $6.44 \text{ g/m}^2$ 、鉄 $2.98 \text{ g/m}^2$ 、マンガン $3.52 \text{ g/m}^2$ の吸収があった。ホテイアオイの実験区でT-COD、SS、T-N、T-P、クロロフィルaが減少し、堀水の浄化が認められた。

### はじめに

丸亀城は、国の史跡であるが、近年、その内堀は生活雑排水や農業用水の流入でニッチア属の珪藻が1ml中10万個を越えて発生するなど富栄養化現象が著しく、環境保全上問題を呈している。このようなことから、風光を乱すことがないように自然生態系を利用した堀水の浄化を試みた。浄化方法としては、繁殖力が旺盛で、窒素、リンの吸収能が良く、系外への除去が比較的小さいブラジル原産の浮漂多年草であるホテイアオイを用いた。ホテイアオイを用いた水質浄化については、米国NASAによる研究がよく知られているが、我国でも水処理に関連した基礎的研究<sup>1) 2)</sup> から水処理への利用の研究<sup>3) 4) 5)</sup> さらに自然水域の浄化の研究<sup>6) ~ 10)</sup> など広範囲に検討されている。しかし、植物プランクトンが多く発生し無機態の栄養塩類が低い水質環境で長期間観察したものは少ない。本実験の目的は、無機態の栄養塩の低い水質環境においてもホテイアオイが藻類と競合しながら生育し、十分に水質浄化能を発揮するかどうか明らかにすることである。

### 実験方法

実験を行った丸亀城内堀は、水面積約 $50,000 \text{ m}^2$ 、平均水深約1mでその形状を図1に示す。St1から流入し、St5でオーバーフローしている。このほぼ中間部において、

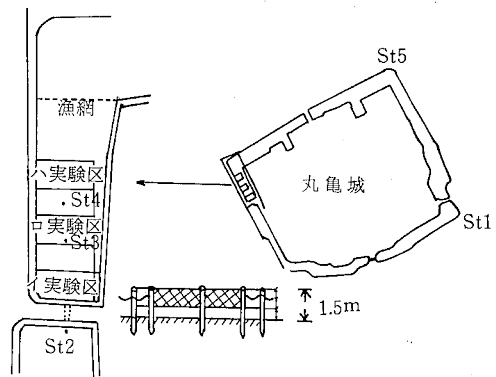


図1 丸亀城内堀と実験区の概略

鉄の支柱を立て漁網をくくりつけ $32 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ 、 $30 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ 、 $30 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ に仕切り、イ、ロ、ハの3実験区を設けた。1984年6月1日に、中讃環境衛生組合より苗を譲り受け、イ、ロ、ハの実験区にそれぞれ1200株、450株、340株投入した。しかし、ハ実験区に白鳥が侵入しホテイアオイを傷めたため、6月13日に外側に高めの漁網を張り510株を追加投入した。実験開始後、最初は7日後に、それ以後は14日間隔でホテイアオイの生長と水質の変化を観測した。生長の変化は、現地で湿重を測定したが、8月3日以降は $1 \text{ m}^2$ 当りの湿重に被覆面積を乗じて求めた。実験は、9月28日まで続け、10月15日に撤去した。

\*：転出（公害課へ）

\*\*：退職（KK伏見製薬所へ）

ホテイアオイの水分、窒素、リン、鉄、マンガン含有量は、イ、ハ実験区については投入時及び撤去時の2回、ロ実験区については投入時から撤去時までに6回測定した。窒素は、柳本製CHNコーダーで、リンは硝酸・過塩素酸分解後モリブデン青（アスコルビン酸）吸光光度法で、鉄、マンガンは硝酸・過塩素酸分解後原子吸光光度法で測定した。

また、水質は、流入水（St1）、実験区入口（St2）、ロ実験区（St3）、ロ、ハ実験区中間点（St4）の4地点で採水し、アンモニア態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）、亜硝酸態窒素（ $\text{NO}_2\text{-N}$ ）、硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）、リン酸態リン（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）はテクニコンオートアナライザーで、総窒素（T-N）はケルダール窒素に $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ を加えて求め、総リン（T-P）は硝酸・過塩素酸分解後モリブデン青（アスコルビン酸）吸光光度法で、全鉄、全マンガンは硝酸・過塩素酸分解後原子吸光光度法で、溶解性鉄、溶解性マンガンは $0.45\ \mu\text{m}$ メンブランフィルターで濾過後原子吸光光度法で測定した。クロロフィルaはガラス繊維濾紙（Whatman GF/C）で濾別後吸光光度法で測定した。

## 結果及び考察

### 1. ホテイアオイの生長

実験期間中の旬間平均気温、旬計日照時間、調査時の水温を図2に示す。気温、日照時間は、実験地から4km離れている多度津測候所の値を引用した。

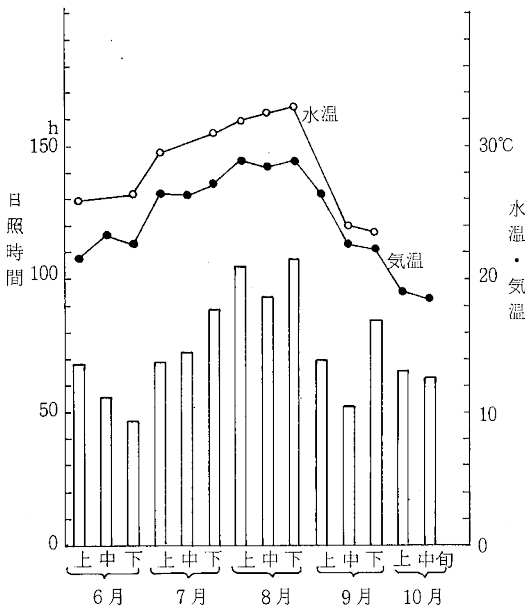


図2 気温、日照時間、水温の変化

実験期間中は、平年に比べ気温が高く日照時間も多く、水温も $23.5\sim 33.0\text{°C}$ の範囲で変化し、ほぼ良好な生育条件であったと考えられる。

各実験区の現存量変化（生長曲線）を図3に示す。6月1日に投入されたホテイアオイは、8月3日には被覆度がイ、ロ、ハ実験区で85%、95%、100%にまで達した。その時の新鮮物量は、 $10.3\text{kg}/\text{m}^2$ 、 $5.4\text{kg}/\text{m}^2$ 、 $4.1\text{kg}/\text{m}^2$ と大差があったが、しかし、10月15日の撤去時には $36.8\text{kg}/\text{m}^2$ 、 $33.6\text{kg}/\text{m}^2$ 、 $32.3\text{kg}/\text{m}^2$ にまで生長していた。各実験区とも投入1週間後から8週間は相関係数0.99以上で指数関数的生長をした。この時の速度生長係数は、イ、ロ、ハ実験区でそれぞれ $0.055/\text{d}$ 、 $0.062/\text{d}$ 、 $0.053/\text{d}$ であり、倉敷川の $0.113/\text{d}$ 、児島湖の $0.115/\text{d}$ <sup>6)</sup>、手賀沼の $0.073\sim 0.132/\text{d}$ <sup>9)</sup>、霞ヶ浦高浜入の $0.0722/\text{d}$ <sup>10)</sup>より低かった。このことは、T-N、T-Pが手賀沼の $1/4\sim 1/2$ と低く、また倉敷川、児島湖とは同一レベルであるもののホテイアオイに利用され易い無機態の窒素、リンが著しく低いために起ったと考えられる。

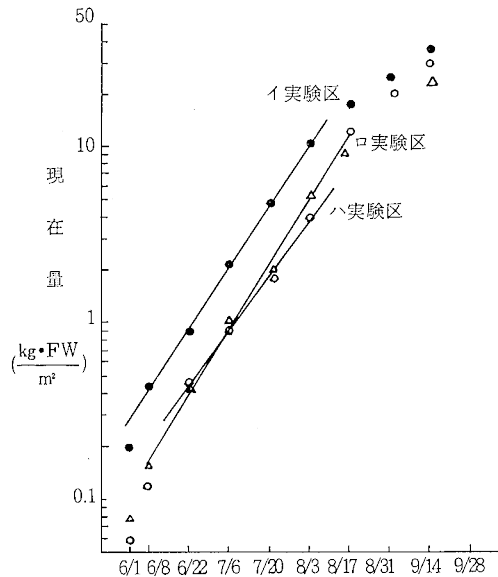


図3 ホテイアオイの現存量変化

ロ実験区における部位別割合を表1に示す。本実験区のように無機態の栄養塩類が低い場合は、まず根部が旺盛に生長し、その後茎部の生長が起こるようである。

表1 ホテイアオイの部位別割合（%）

項目	日時	6月1日	6月8日	7月20日	8月17日	9月14日	10月15日
新鮮物	茎葉部	84.5	61.9	57.2	61.1	73.5	75.6
	根部	15.5	38.1	42.8	38.9	26.5	24.4
乾物	茎葉部	83.0	62.3	58.7	64.1	78.7	83.9
	根部	17.0	37.7	41.3	35.9	21.3	16.1

表2 各調査地点における水質の範囲及び平均値

地点	項目	(m <sup>3</sup> /d)	pH	(mg/ℓ)	(cm)	(mg/ℓ)	(mg/ℓ)	(mg/ℓ)	(mg/ℓ)
		流入量		D O	透視度	S S	全C O D	溶解性C O D	全窒素
流入水	範囲	324~5,010	6.8~8.3			6 ~18	12.1~28.9	9.7~24.6	2.39~7.80
	平均	2,190±1,460	7.3±0.4			12 ± 3	20.6± 5.9	17.1± 4.7	5.86±1.79
実験地入口	範囲		6.8~9.4	3.5~14.5	9.5~50	7 ~39	13.1~25.7	9.2~12.1	1.12~3.43
	平均		8.0±0.9	8.9± 4.2	23.3±15.4	22.1±10.4	20.0± 4.6	10.9± 1.0	2.13±0.78
ロ実験区	範囲		6.5~9.4	0.3~15.8	6 ~50	6 ~74	11.3~48.6	8.0~20.3	0.99~3.96
	平均		7.8±1.1	5.8± 5.3	25.3±18.4	28.7±21.9	22.7±11.5	12.2± 3.5	2.28±1.10
ロ実験区中間点	範囲		6.5~9.5	2.6~13.3	4 ~50	2 ~83	10.0~50.1	8.2~20.3	0.90~3.91
	平均		7.9±1.1	6.3± 4.0	25.4±19.0	31 ±26	23.3±12.8	12.0± 3.7	2.23±1.30
大手前	範囲		7.5~8.9	5.5~10.9	6.5~27.0	28 ~73	16.8~43.0	8.8~19.4	1.14~4.55
	平均		8.1±0.5	8.0± 1.6	3.3± 6.9	44.3±17.0	25.7± 9.5	12.5± 3.3	2.44±1.12

地点	項目	(mg/ℓ)	(mg/ℓ)	(mg/ℓ)	(mg/ℓ)	(mg/ℓ)	(mg/ℓ)	(mg/ℓ)	(mg/m <sup>3</sup> )
		無機態窒素	全リン	リン酸態リン	全鉄	溶解性鉄	全マンガン	溶解性マンガン	クロロフィルa
流入水	範囲	1.35 ~7.01	0.29~1.77	0.232~1.05	0.46~1.46	0.17~0.58	0.04~0.22	0.01~0.10	6.5~ 69.0
	平均	4.15 ±1.81	0.92±0.47	0.587±0.276	0.73±0.32	0.31±0.12	0.10±0.06	0.05±0.03	37.5± 20.3
実験地入口	範囲	0.035~0.785	0.13~0.66	0.010~0.303	0.15~1.40	0.03~0.21	0.04~0.20	0.01~0.05	51.2~223
	平均	0.248±0.231	0.32±0.16	0.066±0.096	0.68±0.39	0.08±0.06	0.13±0.06	0.01±0.01	132 ± 51
ロ実験区	範囲	0.014~0.501	0.14~0.83	0.014~0.200	0.16~1.70	0.04~0.44	0.03~0.20	0.01~0.03	36.0~255
	平均	0.131±0.155	0.34±0.21	0.074±0.070	0.80±0.52	0.13±0.12	0.10±0.06	0.02±0.01	116 ± 81
ロ実験区中間点	範囲	0.011~0.112	0.15~0.76	0.011~0.240	0.16~1.86	0.04~0.48	0.03~0.20	0.01~0.03	22.8~276
	平均	0.056±0.037	0.34±0.24	0.069±0.076	0.85±0.58	0.14±0.13	0.11±0.07	0.02±0.01	131 ± 97.4
大手前	範囲	0.016~0.156	0.19~0.67	0.007~0.227	0.22~2.24	0.02~0.54	0.04~0.26	0.01~0.03	61.6~310
	平均	0.064±0.044	0.41±0.18	0.071±0.078	1.14±0.70	0.12±0.15	0.14±0.07	0.01±0.01	139 ± 78.9

2. 実験期間中の水質変化

各地点の測定値の範囲及び平均値を表2に、COD窒素・リンの存在割合を表3にそれぞれ示す。流入水、実験地入口の全CODの平均値はそれぞれ20.6、20.0 mg/ℓと同濃度であったが、前者の方は溶解性の占める割合が高かった。SSは内堀に入り10~20mg/ℓ増加し、クロロフィルaは約3倍に増加するなど植物プランクトンによる内部生産が認められた。流入水のT-N、T-Pの平均値は5.86mg/ℓ、0.92mg/ℓでその約7割が無機態であった。実験地入口に移動する間にT-Nは2.13mg/ℓに、T-Pは0.32mg/ℓにまで減少し、無機態の占める割合が低下し有機化が図られていた。

ホテイアオイ栽培のロ実験区内、ロ・ハ実験区

表3 COD、窒素、リンの存在割合

項目	(%)			全COD
	溶解性COD	無機態窒素	リン酸態リン	
地点	全COD	全窒素	全リン	全COD
	溶解性COD	無機態窒素	リン酸態リン	
流入水	範囲	75.1~91.3	50.4~98.5	41.4~81.3
	平均	83.5± 5.7	69.2±16.9	66.9±14.1
実験地入口	範囲	44.3~77.6	1.7~43.4	0.4~70.5
	平均	56.9±11.4	12.7±12.7	15.1±21.1
ロ実験区	範囲	41.8~88.0	0.5~34.8	6.1~60.9
	平均	59.5±15.9	8.4±11.8	21.4±17.8
ロ実験区中間点	範囲	40.3~84.0	0.4~ 8.2	4.8~45.3
	平均	58.3±16.9	3.4± 2.5	19.4±14.1
大手前	範囲	40.7~58.9	0.8~ 6.9	3.7~36.6
	平均	50.3± 7.2	2.8± 2.0	13.9±11.1

中間地点におけるCOD、SS、透視度、クロロフィルaの経時変化を図4に示す。両地点の全CODは、ホテイアオイの被覆度がほぼ100%に達する8月3日まで減少し、その後は9月14日に僅かに増加した。しかし、溶解性CODは、ホテイアオイの投入初期に減少したが、その後はほぼ一定の値を示した。SS、クロロフィルaも全CODと同様の傾向を示し、特に表4に示すように粒子状COD(全CODから溶解性CODを差し引いたもの)と相関が高く、堀水の有機物汚濁はプランクトン

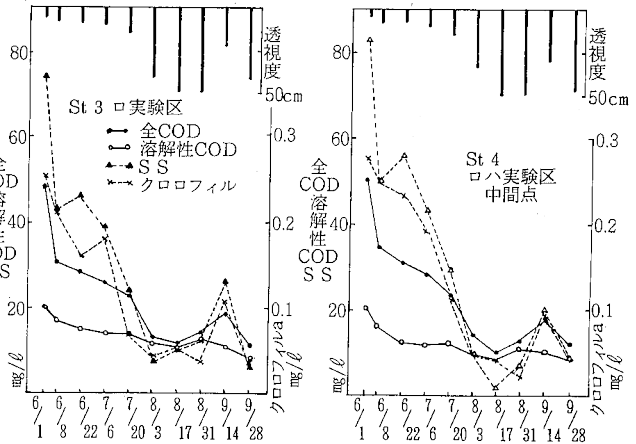


図4 COD、SS、クロロフィルaの経時変化

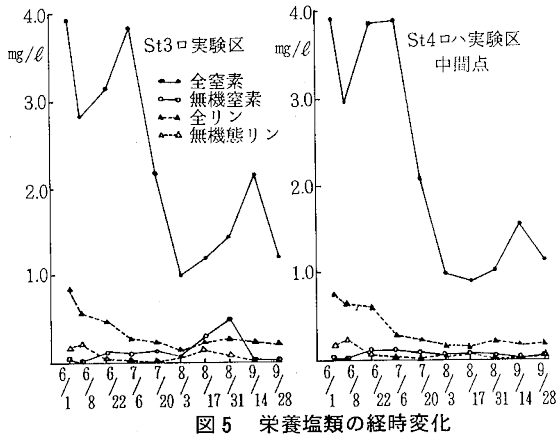


図5 栄養塩類の経時変化

表4 粒子状COD、SS、クロロフィルa間の相関係数

	粒子状COD	S	S	クロロフィルa
粒子状COD				
S	0.991			
クロロフィルa	0.951	0.962		

による内部生産に負うところが大きいことが明らかになった。透視度も8月3日以降に回復し堀の底が見えだした。

T-Pについても、全CODと同じ傾向を示したが、T-Nは投入後1ヶ月程高い値を維持し、その後減少した。PO<sub>4</sub>-Pは、ホテイアオイの投入初期に減少したが、被覆度がほぼ100%に達した8月3日以降溶存酸素の低下に伴い増加した。DINは、ロ実験区では投入後にわずかに増加しその後はほぼ一定の値であったが、溶存酸素が著しく低下した8月17日、8月31日に増加し、その後は激減した。この増加分は、NH<sub>4</sub>-Nに負うものであった。しかし、ホテイアオイの栽培地を通過したロ、ハ実験区中間点では、ほぼ同じ傾向を示しながらも8月17日、8月31日の増加は認められなかった。これらの無機態の栄養塩類の増加は、沈殿したプランクトンの分解等による底泥からの回帰によるものであると考えられる。

### 3 ホテイアオイによる窒素、リン、鉄、マンガンの吸収

表5に1㎡当りに存在するホテイアオイ内の窒素、リン、鉄、マンガンの量を示す。また、図7にロ実験区における部位別含有量の経時変化を示す。ただし、ハ実験区で6月13日に投入したのも6月1日に加えた。

栽培期間中にイ、ロ、ハ実験区において、1㎡当りで吸収した窒素量は、それぞれ36.9g、28.3g、28.7gであり、リン量は7.16g、6.83g、5.34gであり、鉄量は2.33

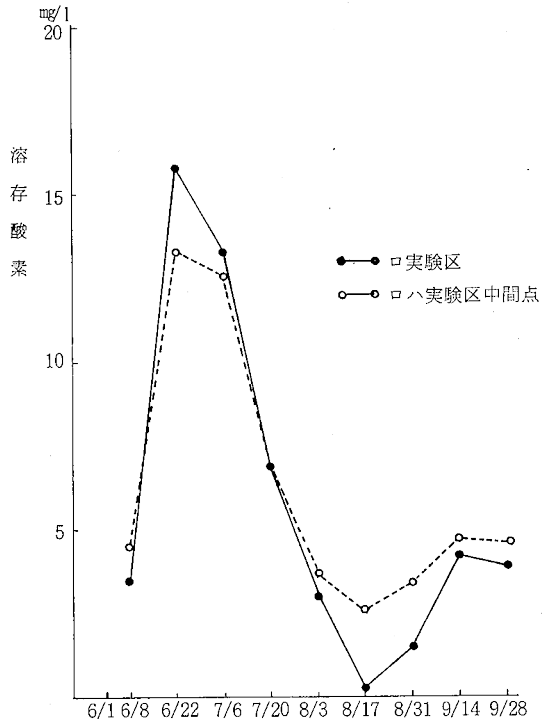


図6 溶存酸素の経時変化

表5 ホテイアオイ内の窒素、リン、鉄、マンガン量

場所	調査日	生鮮物量 (kg/㎡)	乾物量 (g/㎡)	窒素 (g/㎡)	リン (g/㎡)	鉄 (g/㎡)	マンガン (g/㎡)
イ実験区	6月1日	0.198	10.3	0.327	0.0265	0.0162	0.0180
	10月15日	36.9	2,060	36.9	7.19	2.35	2.33
ロ実験区	6月1日	0.078	4.0	0.129	0.0104	0.0063	0.0070
	6月22日	0.429	25.6	0.618	0.0573	0.0540	0.0422
	7月20日	2.00	136	2.49	0.212	0.284	0.240
	8月17日	12.2	662	11.8	2.58	1.97	1.91
	9月14日	22.7	1,120	18.2	5.67	3.11	1.91
	10月15日	33.6	1,930	28.4	6.84	3.76	4.64
ハ実験区	6月1日	0.147	7.7	0.244	0.0198	0.0122	0.0135
	10月15日	33.2	1,930	28.9	5.36	2.96	3.73

g、3.75g、2.95gであり、マンガンは、2.31g、4.63g、3.72gであった。

ホテイアオイの窒素含有量は、投入時には茎葉部が根部に対し高かったのが、ホテイアオイの生長とともに茎葉部の濃度が減少し、収穫時にはほぼ同濃度になり倉敷川や児島湖の実験結果<sup>1)</sup>と異っていた。個体全体の含有濃度は、倉敷川、児島湖<sup>6)</sup>や手賀沼<sup>9)</sup>と同じくホテイアオイの生長に伴い減少していた。リン含有量は、茎葉部では生長に伴い減少していたが、堀水のDOが減少しPO<sub>4</sub>-Pが増加した8月以後で増加が著しかった。しかし、根部ではこの傾向はなく、変動は小さかった。個

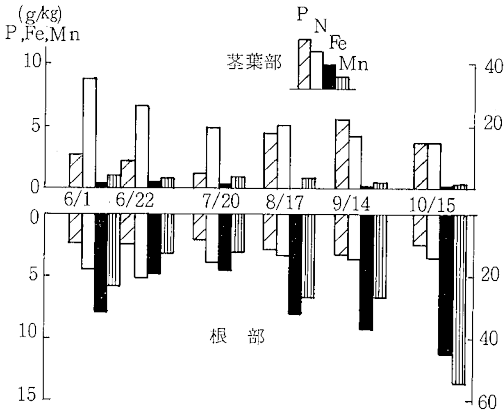


図7 部位別含有量の経時変化

体全体のリン含有量は、生長に伴い減少していたが、8月以後は茎葉部の影響を受け増加していた。個体全体の窒素、リン含有量は、水中の無機態栄養塩濃度に影響を受けるといわれているように<sup>1)</sup> 堀水の低濃度を反映して、手賀沼、倉敷川、児島湖よりも低く霞ヶ浦より少し高かった。

鉄、マンガンの含有量は、茎葉部に対し根部が著しく高く、茎葉部ではホテイアオイの生長に伴い減少した。しかし、根部では生長とともに減少していたが茎葉部のリンと同じように8月以後増加した。

イ、ロ、ハ3実験区におけるホテイアオイによる除去量は、1㎡当り窒素で31.1g、リン6.44g、鉄2.98g、マンガン3.52gであった。

## ま と め

1. 無機態栄養塩類が少ない悪条件下でもホテイアオイは、十分に生長増殖し、137日間で1㎡当り34.0kgの生鮮物の生産があった。

2. 生長初期の速度生長係数は、平均で0.057±0.005/dで倉敷川(0.113/d)、児島湖(0.115~0.125/d)、手賀沼(0.073~0.132/d)、霞ヶ浦高浜入(0.0722/d)に比べ低い値を示した。

3. ホテイアオイを自然放置栽培(137日)し収穫して、窒素31.1g/㎡、リン6.44g/㎡、鉄2.98g/㎡、マンガン3.52g/㎡を除去した。

4. ホテイアオイの増殖でT-COD、SS、T-N、T-P、クロロフィルaが減少し、堀水の浄化が認められた。

なお、この研究は丸亀市の丸亀城堀の浄化事業に協力し実施したものである。

- 1) 徳永隆司, 北喜代司, 北直子, 森本昌宏: ホテイアオイの生長と無機態栄養元素の貯蔵, 日本水処理生物誌, 14, 1, 1 (1978)
- 2) 沖陽子, 伊藤操子, 植木邦和: ホテイアオイ ( *Eichhornia crassipes* (mart) Solms ) の生育および繁殖に関する研究 ( 第1報 ), 雑草研究, 23, 15 (1978)
- 3) 酒井英市: ホテイアオイによる豚ふん尿汚水の浄化処理, 畜産の研究, 27, 533 (1973)
- 4) 喜納政修, 安里辰夫, 田仲康彦, 高良保英: ホテイアオイ池による有機廃水処理実験, 下水道協会誌, 13, 146, 37 (1976・7)
- 5) 鈴木和雄: 水草によるし尿処理液中の窒素除却について, 用水と廃水, 10, 185 (1978)
- 6) 青山勲, 沖陽子, 西崎日佐夫, 中川恭二: 自然水域における水質変動とホテイアオイ *Eichhornia crassipes* (Mart) Solms の生長特性, 農学研究, 3, 3, 125 (1981)
- 7) 歌崎秀夫: ホテイアオイを用いた水質浄化, 公害と対策, 17, 2, 110 (1981)
- 8) 小川修一, 塚原滋: 印旛沼放水路に繁茂するホテイアオイに関する調査 第16回水質汚濁研究会学術講演会論文集, 252 (1982)
- 9) 千葉県水質保全研究所: 手賀沼におけるホテイアオイ植栽実験 (1982)
- 10) 大槻晃: ホテイアオイによる水質回復—水質及びプランクトンの変化—, 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究, 111, 79 (1984)