

## 12. 水路と植物を利用した河川水質浄化に関する研究

1. はじめに
  2. 実験材料並びに方法
  3. 実験結果並びに考察
  4. 要 約
- 参考文献

大阪大学工学部教授 藤田正憲  
大阪大学工学部助教授 古川憲治  
大阪大学工学部助手 岩堀恵祐  
大阪大学工学部助手 池道彦



## 1. はじめに

近年、人口や産業の集中する都市内河川流域では、下水道整備が人口増加に追いつかないのが実状で、都市近郊の河川で生活雑排水による汚濁が大きな社会問題となってきている。一方、都市化の進んだ中で、河川は地域住民にとり重要なオープンスペースである上、その親水機能が再認識されるようになってきている。

このような状況下、河川が本来もっている自浄作用を人為的に高めた“礫間接触酸化法”が河川の直接浄化施設として注目されるようになってきた。これまで大阪大学工学部環境工学科水質管理工学研究室では、低成本の下水最終仕上げ処理法として、開水路と多段水耕栽培槽とからなる『水耕栽培型水処理法』を開発し、その浄化機能並びに食糧生産能をパイロットプラント並びに実施設を用いて検討してきた。<sup>1)~3)</sup> これまで集積してきた知見から判断して、接触酸化水路と水生植物の水耕栽培を組み合わせた『水耕栽培型水処理法』を汚濁河川水の浄化に適用することは十分可能であると思われる。そこで、開水路施設部分には多孔性コンクリートブロックを充填材として敷き詰め汚水中のBOD成分を除去し、続く多段植物栽培槽で汚水中の窒素、燐等の栄養塩を植物に摂取除去させることによって、汚濁河川水をどの程度まで浄化することが可能か検討した。今回nutrient absorberとして、河川汚濁に対する住民意識の向上と、河川水質浄化への住民参加を期待し、栽培人気の高まることが期待できるミニトマトを、また河川敷で花が楽しめることによる河川のイメージアップを期待して花卉植物をそれぞれ選択し、これら供試植物を汚濁河川水程度の希薄栄養塩濃度下で水耕栽培できるかどうか実験的に検討した。

## 2. 実験材料並びに方法

### 2-1 実験装置

#### (1) 水路型自然表面曝気槽

図-1に水路型自然表面曝気槽の模式図を示した。本処理装置は、三段のアクリル製の水路

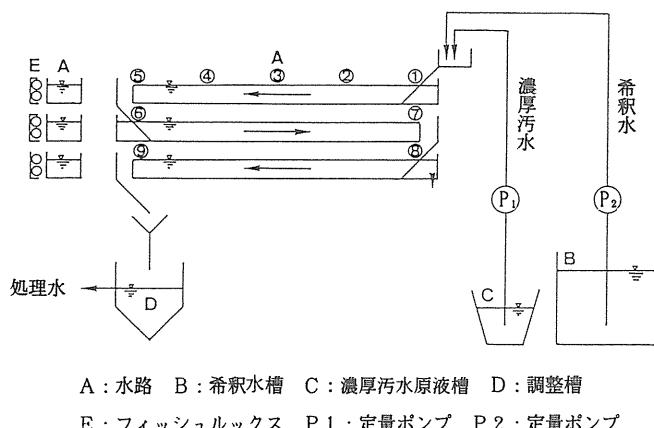


図-1 水路型自然表面曝気槽の模式図

(幅 250mm、水深 150mm、長さ 8,000mm、有効容量300 L) と調整槽 (130 L) で構成されている。水路側面には、水路内での藻類の生育を高めるために、40Wのフィッシュルックスを各段12本ずつ取り付け、毎日午前 6 時から午後 6 時までの12時間点灯した。

水路充填剤として、海水浄化にその有用性が明らかにされている空隙率30%の多孔性コンクリートブロック（直径 100mm、長さ 200mm）<sup>4), 5)</sup> を用いた。希硫酸で中性化処理を施した多孔性コンクリートブロックを、円柱の断面が水流方向に対して垂直になるよう二列二段で直列に積み上げ、水路一段目に敷き詰めた。

実験では、オゾン処理に伴う酸素供給を期待して、溶存酸素が十分ではなくなると思われる地点 4（流入地点からの距離 6 m）からの水を60～ 145L／日で引き抜きオゾン処理を施した後、再び水路に戻した。

オゾン発生機には、三菱電気株式会社製の三菱オゾナイザ OS-6 N（オゾン発生量 6 L/Hr）を使用した。

## (2) 多段式水耕栽培槽

図-2 に多段式水耕栽培槽の模式図を示した。幅32.4cm、長さ56.5cm、高さ17.5cm、栽培面積 0.18m<sup>2</sup> のプランターを、1 系列 6 槽で 2 列並列階段状に並べ水耕栽培槽とした。直径約 3 cm の礫を水面と一致するように敷き詰めた礫充填の水耕栽培槽表面を園芸用の黒いビニールでカバーし遮光し、藻類の生育を防止した。

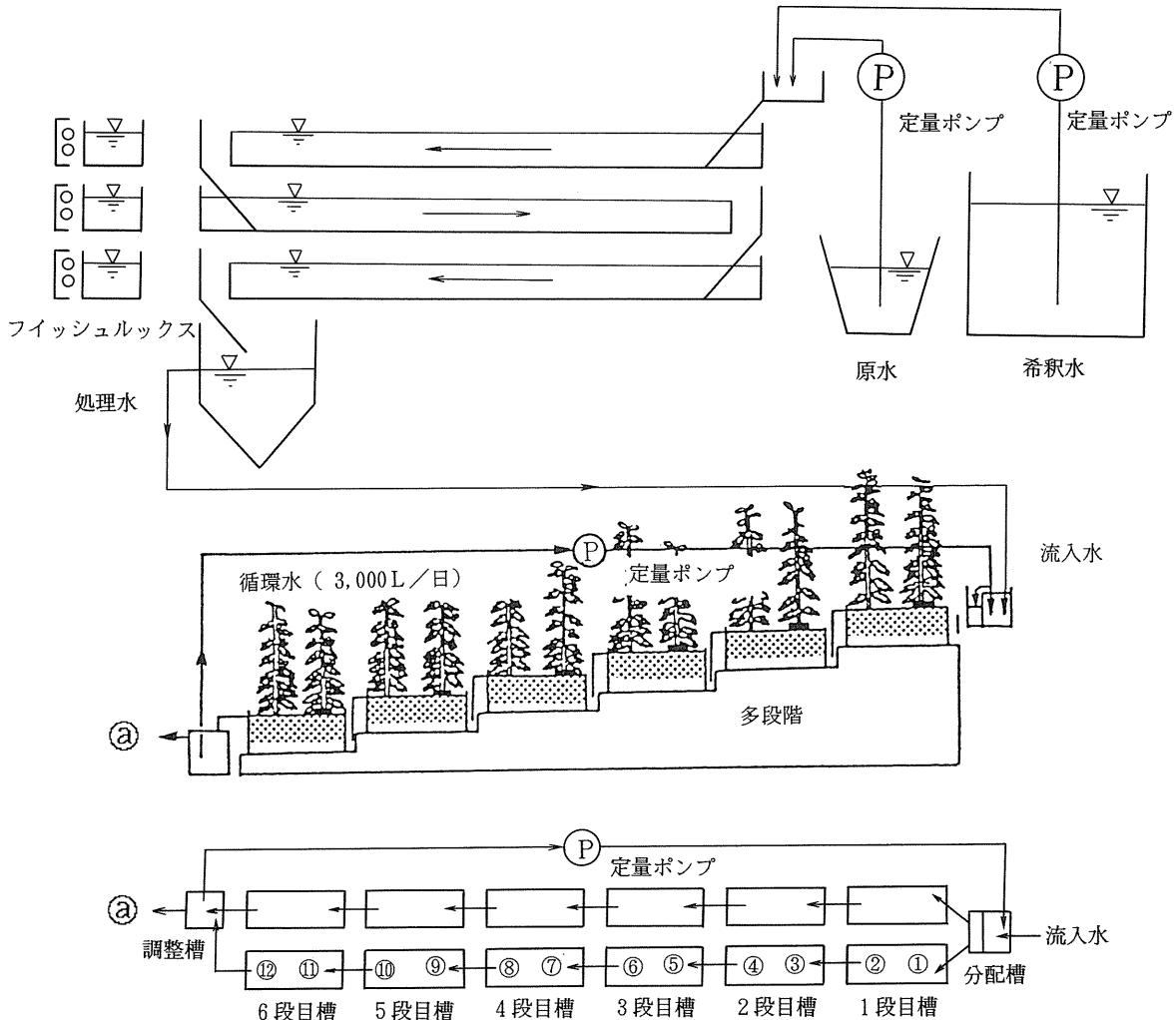
供試植物として家庭園芸で人気のあるトマトと花卉植物を取り上げた。供試トマトは福井県立短期大学森義夫助教授らの研究グループによって選抜・育成された青枯病耐性の高糖度のミディトマトを選択した。分与を受けたミディトマトは F 2 株であることから、その育苗は親株をロックウールに挿し木によってクローン株を作成する方法によった。

花卉植物としては、春咲きのベビーパンジー、クリサンセマス、スイートピーを用いた。浅いプランターに供試花卉植物を播種したロックウールを並べ、底に水道水を薄くはり、保湿の為にビニールのカバーをはり数週間育苗した。これらの花卉植物を各槽に 4 株づつプランターに植え付け実験に供した。

## 2-2 実験方法

実験水路の運転条件を表-1 に示すように種々変化させて、RUN 1～7 の実験を行った。表-2 に示す組成の汚濁河川水を想定した希薄合成下水を、1,000L／日の流量で一段目水路に供給した。

水路型自然表面曝気槽からの処理水の一部を、多段式水耕栽培槽への流入水として 350L／日の流量で供給した。多段式水耕栽培槽では、各槽の低部から汚水を流入させて、上部から流出させる上向流れ方式を採用した。処理水は 3,000L／日で返送循環し、水耕栽培槽の内部が嫌気状態にならないように留意した。各槽に、ミディトマトの場合には育苗したクローン株を各槽に 2 株ずつ植え付け、花卉植物の場合にはロックウールで育苗した株を各槽に 4 株ずつ植え付け、実験に供した。



\* 注 ① ( $n = 1, 2, \dots$ ) は株番号

図-2 実験装置模式図

### 2-3 測定項目および分析方法

#### (1) 水路型自然表面曝気槽

水質測定は、採水した後直ちに東洋濾紙（東洋濾紙社製）No.5 Bで濾過し、pHおよびTOC, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, TKN, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>濃度の各測定項目について分析した。水質の分析はすべて下水試験方法<sup>6)</sup>によった。

各System終了後に、生成汚泥量の測定および汚泥生物相の顕微鏡観察を行った。System Iでは、水路壁面、及び底面に付着した生物膜を全てナイロンタワシではぎ取って、水路内に発生した汚泥量を測定した。System II以降の実験では、一段目に充填した多孔性コンクリートブロックを一

表-1 水路型自然表面曝気槽の試験別施設条件

system No.	RUN No.	試験期間	流入汚水水質 (BOD mg/l)	充填剤の 有無	オゾン装置	
					有無	槽有効容量 (ml)
I	1	5/29~10/3	10	-	-	
II	2	10/4~11/7	10	+	-	
	3	10/8~12/4	15	+	-	
III	4	12/5~1/13	15	+	+	850
	5	1/14~1/19	20	+	+	850
	6	1/20~1/25	20	+	+	1,000
	7	1/26~2/18	25	+	+	1,000

表-2 流入水組成

成 分	濃 度
グルコース	20.0 ~ 50.0 mg/l
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	47.6 ~ 119.0 mg/l
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	8.8 ~ 22.0 mg/l

注) BOD : N : P = 5 : 5 : 1 となるように調整した。  
 RUN1, RUN2 は流入水TOC 濃度を 8 mg/l に、 RUN3, RUN4 は 12 mg/l に、 RUN5 は、 16 mg/l 、 RUN6, RUN7 は 20 mg/l に調整した。

定間隔毎に取り出した後、その地点での水路壁面に付着した生物膜をブラシではぎ取り、充填材除去後の水域での浮遊汚泥濃度を測定し、一段目水路に存在する壁面付着汚泥とした。二、三段目水路では、一定間隔毎に壁面 (5 cm × 5 cm) から歯ブラシで付着汚泥をかき取り、100mL の水道中で懸濁させてその濃度を測定し、壁面付着汚泥とした。多孔性コンクリートブロックに付着した生物量は、約 1 L の水道水中で、一定間隔毎に取り出した多孔性コンクリートブロックに付着した汚泥を歯ブラシで十分にはぎ取った後、その汚泥濃度を測定することで全体量を見積った。汚泥のクロロフィル含有量は試料を超音波破碎機（日本精機製作所、5 分間）にかけた後、80%アセトンで抽出する方法<sup>7)</sup>によって測定した。

オゾン濃度はヨウ素滴定法<sup>8)</sup>にて測定した。

## (2) 多段式水耕栽培槽

トマトの生長の状況、並びに水耕栽培槽流入水及び流出水の水質測定を行った。水耕栽培槽流入水及び流出水は、直ちに前処理を施しTOC, T-N, TKN, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, pHの各測定項目について分析した。ミディトマトの生長量は、トマトの茎の直径(D)と茎の長さ(H)から計算できる生長指標( $\Sigma D^2 H$ )を測定することで経時的に追跡した。果实については、その収穫数、糖度、直径および重量を適宜測定した。糖度については、手持屈折計(アタゴ社製、N-1)を用いて測定した。また、これらの生長状況を検討する際の比較のため、花の土に植え、液肥としてハイポネックスを適量投入した鉢植えの株も作成し、その生長も追跡した。

実験終了時に、栽培床から根および蓄積した汚泥を回収し、それぞれ乾燥重量(80°C、24時間)、磷含有量及び窒素含有量を測定した。また、トマトの実、葉茎についても同様に測定した。

## 3. 実験結果並びに考察

### 3-1 多孔性コンクリート充填水路の処理機能

#### (1) 処理成績

System I、System II、System IIIにおける流入水、一段目水路流出水、並びに水路最終処理水のTOC, T-N, T-P濃度および水温の経日変化を図-3に示した。

##### ① pHの変動

多孔性コンクリートブロックには、ペーストとしてセメントを用いているため、水中ではそのアルカリ成分が溶出し水路のpH値を高めることが予想された。pH値が余りにも高くなると、多孔性コンクリートブロックへの微生物の付着が妨げられ、水路の処理機能が低下するばかりか、水路処理水を植物栽培槽の流入水として利用できなくなる。中性化処理を施した多孔性コンクリートブロックを使用したにもかかわらず、水路への流入水量が少ないとあり、水路のpHが生物反応に影響を及ぼさないと考えられる値(pH 8程度)にまで低下するのに、約1ヶ月も要した。1ヶ月後、多孔性コンクリートブロックに微生物が付着するようになり、2ヶ月後には一段目流水および処理水ともpH値は約7.5程度にまで低下した。

##### ② DO濃度の変動

各RUNにおけるDO濃度の流れ方向に沿った変化の様子を図-4、5に示した。水路処理における酸素の供給源としては、①水路表面からの再曝気、②流入水からの持ち込み溶存酸素、③付着藻類の光合成による酸素供給、④水路接続部の流れ落ち部での酸素供給、⑤人工的な曝気による酸素供給が考えられる。それ故水路内溶存酸素の物質収支は次式で示すことができる。

$$[\text{水路における酸素供給量}] - [\text{水路処理における酸素要求量}]$$

$$= [\text{水路内からの流出DO量}] \cdots \cdots (1)$$

水路での酸素供給に関しては、一段目水路では流入水から持ち込まれる溶存酸素量が、二段目、三段目水路では水路接続部での再曝気作用により供給される溶存酸素量が一番多いことが

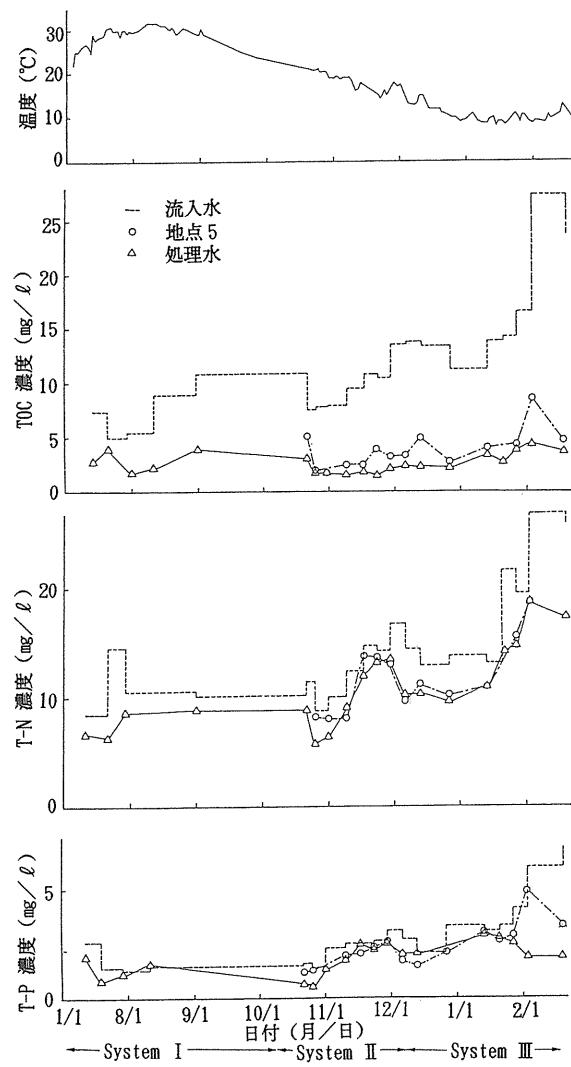


図-3 System I, II, IIIにおける流入水と処理水の経日変化

明らかとなっている。<sup>9)</sup> 三段目水路においては、前段でほぼ有機物の除去が完了しているため、有機物の酸化分解に伴って消費されるDOが少なくて済み、藻類の光合成作用によって水路内のDO濃度は流下に伴って飽和濃度近くまで上昇した。

多孔性コンクリートブロックの空隙率が高いことから、水路に酸素を供給する藻類の付着する表面積が高まり、低負荷域の実験では水路内DO濃度が0 mg/Lになることはなかった。しかし、流入負荷量を高めたRUN 5～7の実験では、流入口から2 m地点のDO濃度が大幅に減少し、4 m地点で少し増加した後再び減少した。これは、流入口から2 m地点ほどまでが有機物濃度が高く、糸状菌等の生物膜の付着・蓄積が進み、水路内が微好気性になったためであると思われる。

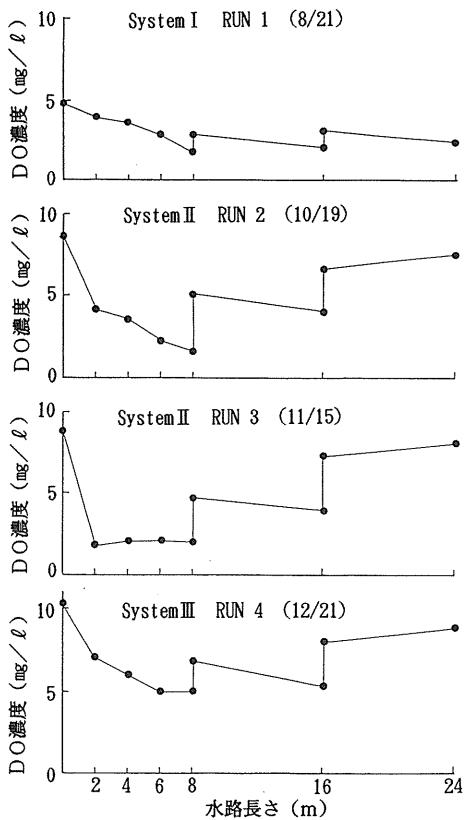
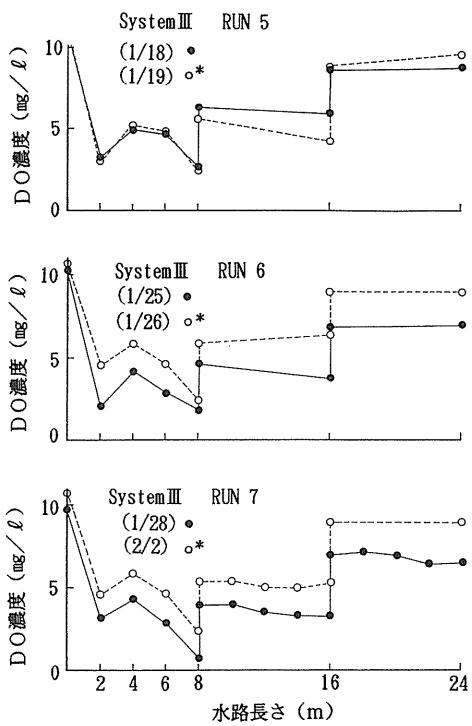


図-4 水路の流れ方向に沿っての  
DO濃度の変化（Ⅰ）



\*は夜間に測定

図-5 水路の流れ方向に沿っての  
DO濃度の変化（Ⅱ）

一段目後部でオゾン処理を施すことによって、4 m地点のDO濃度より5 m地点のDO濃度が高くなると期待したが、そのような現象は見られなかった。

### ③ TOC除去について

各System別、各試験別での処理水TOC濃度は、流入水TOC濃度の上昇に伴って多少上昇しているが、RUN 6まではほぼ同じレベルの濃度であった。

### ④ 窒素除去について

全処理期間中での処理水中の各態窒素濃度の経日変化を図-6に示した。多孔性コンクリートブロックを充填していないSystem IにおけるT-N除去率は13%程度であったが、多孔性コンクリートブロックを水路に充填することにより、一段目流出部（地点5）におけるT-N除去率は平均して約18%、三段目水路流出口ではT-N除去率は約24%とやや向上した。

### ⑤ 磷除去について

System IにおけるT-P除去率は28%程度であったが、多孔性コンクリートブロックを水路に充填することによりT-P除去率は約50%程度（1段目水路での除去割合；約50%）にまで高まった。これには多孔性コンクリートブロックから溶出すると思われるCa<sup>2+</sup>が大きく関与

しているものと推察される。

## (2) 水路浄化機能の検討

### ① TOC容積負荷とTOC容積除去速度の関係

各RUNにおける定常時の処理水TOC濃度、一段目流出水TOC濃度を用い、水路処理におけるTOC容積負荷とTOC容積除去速度の関係を検討した(図-7)。この結果、水路に何も充填しない場合は、TOCは約70%の効率で除去されるが、多孔性コンクリートブロックを充填したSystemⅡ、Ⅲの実験では約78.9%もの効率でTOCが除去され、このうち充填材を敷き詰めた1段目水路のみでTOCは約70%も除去された。

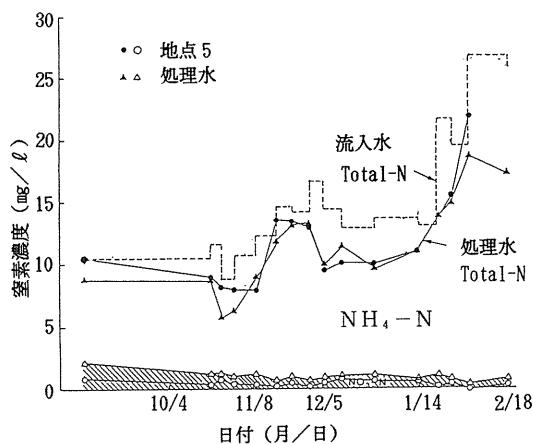


図-6 窒素処理の経日変化

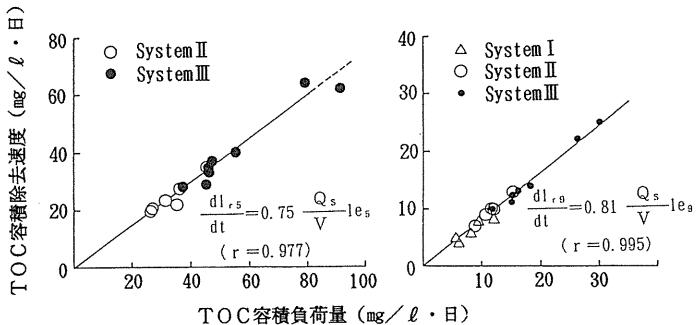


図-7 TOC容積負荷量とTOC容積除去速度の関係

### ② 処理水TOC濃度に及ぼすTOC容積負荷量の関係

一段目流出水のTOC濃度とTOC容積負荷量の関係を図-8に示した。この結果、多孔性コンクリートブロックを充填した水路による処理で、2~5 mg-TOC/L程度の極めて清浄

な処理水を得るために、図-7および図-8より40~80mg-TOC/L・日以下のTOC容積負荷量で水路を運転する必要のあることが明らかとなった。

### ③ TOC濃度の水路の流れ方向に沿う変化

System I、II、IIIでの水路内TOC濃度の流れ方向に伴う変化の例を図-9に示した。また、オゾン処理を組み入れたSystem IIIでのTOC濃度変化が流下距離4m以降その傾きが大きくなり、オゾン処理効果を認めることができた。

### (3) 水路における汚泥収支

水路処理にともなって発生する汚泥量についての知見は、水路の処理機能の定量的評価に必要であるばかりか、水路維持管理の重要な指針ともなることから、適宜水路内に発生する汚泥を定量した。

#### ① 付着状況の経時変化

付着状況の経時変化および水路の流れ方向に伴う変化と、多孔性コンクリートブロックへの汚泥付着状況の変化をそれぞれ写真-1、2に示した。

#### ② 汚泥蓄積量の変化

RUN 1、4、7終了後に回収した汚泥について行った分析成績を表-3に一括表示した。また各RUNの水路付着生物分布状況を図-10に示した。

System Iで一段目水路で生成した汚泥量が全体の40%を占めたが、System IIでは一段目水路に多孔性コンクリートブロックを敷き詰めたことで、一段目水路に存在する汚泥量が全体の80

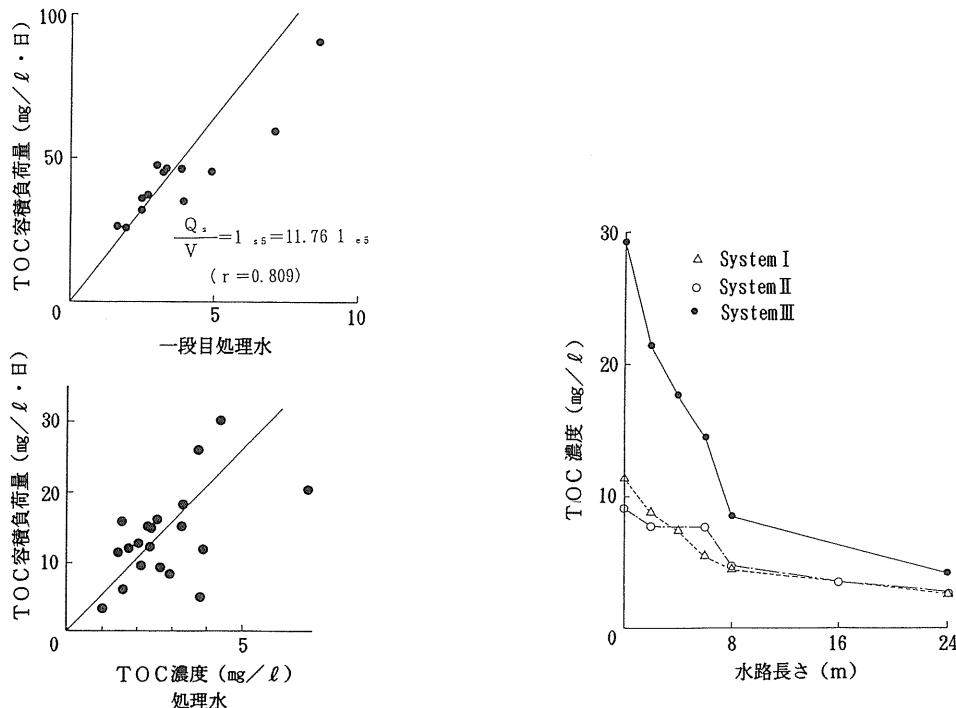
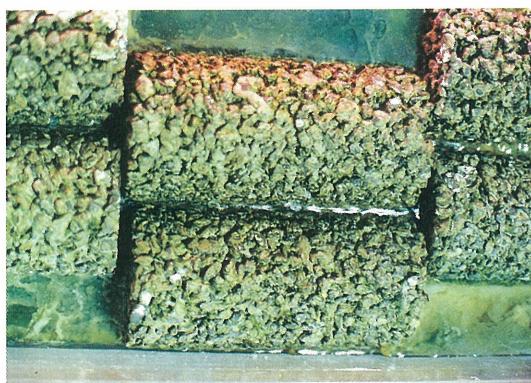


図-8 TOC濃度とTOC容積負荷量の関係

図-9 水路流れ方向によるTOC濃度の変化



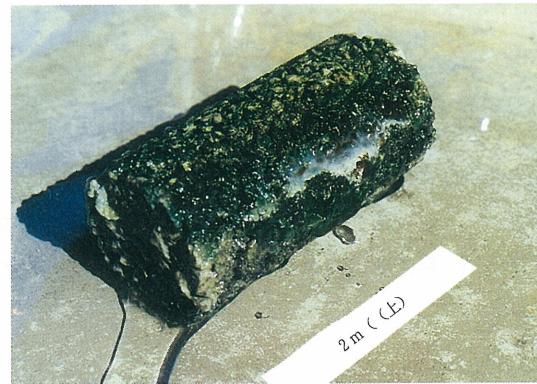
a) 1月9日 水路地点2（流入口から1.5m）  
水質に濁りが発生



a) 1月11日 水路地点2（上段）  
水中上部のフィッシュルックス側に寒天様物質と藻類が付着



b) 2月2日 水路地点1  
壁面と多孔性コンクリートの間にも寒天様物質が充満



b) 2月17日 水路地点2  
Beggiatoa特有の白い薄膜及び藻類が多量に付着



c) 2月17日 水路地点3  
Beggiatoa特有の白い薄膜がみられる



c) 2月17日 水路地点5  
Beggiatoa特有の白い薄膜及び藻類が付着

写真-1 生物付着状況の経時変化

写真-2 多孔性コンクリートブロックの付着生物の変化

表-3 回収汚泥の分析成績

RUN	測量地点	分析項目		
		生成汚泥量 (g)	MLSS/MLVSS (%)	クロフィル(a+b) (mg/l)
1	1段目水路	181.8	—	—
	2段目水路	127.2	—	—
	3段目水路	122.1	—	—
	総汚泥生成量	433.1	—	—
4	1段目水路(充填剤) (壁面)	87.8	59.2	—
		223.9	80.0	1.45
	2段目水路	28.9	—	—
	3段目水路	30.5	—	—
	総汚泥生成量	301.7	—	—
7	1段目水路(充填剤) (壁面)	101.9	52.0	—
		291.9	80.0	—
	2段目水路	55.9	—	—
	3段目水路	3.5	—	—
	総汚泥生成量	345.9	—	—

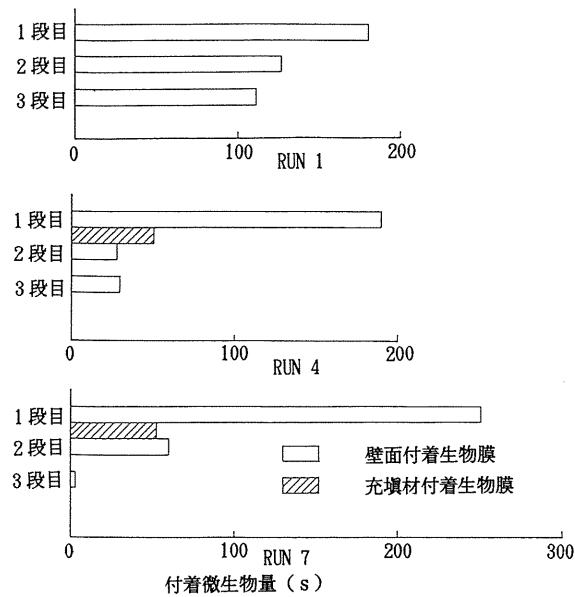


図-10 水路付着生物分布状況

%を占め、充填材の優れた微生物保持能力を確認することができた。流入負荷量を高めると、一段目水路に捕捉される微生物量が大幅に増加し、水路が嫌気状態となりどぶ臭の発生が認められた。

表-4には、一段目水路内に存在する汚泥のクロロフィル量（a+b）の含有量を示した。図-11にはRUN 4における水路壁面に付着した生物膜のクロロフィル含有量の測定結果を示した。これらの結果は有機物が除去された後、藻類が優占するという生態遷移を反映している。

### ③ 汚泥の収率

水路内に発生する全汚泥量（△S）と、水路で除去されたTOCから汚泥収率（Y<sub>ob</sub>）を求め、表-5に示す結果を得た。System I終了時での汚泥収率（Y<sub>ob</sub>）は0.52 (g-MLVSS/g-TOC) で、活性汚泥法等の通常の廃水処理における見かけの汚泥収率と大差が見られなかった。RUN 4終了時点（1月14日）、RUN 7終了時点でのY<sub>ob</sub>はそれぞれ0.27、0.20(g-MLVSS/g-TOC) で、System Iでの見かけの収率の約1/2の値となった。

表-4 クロロフィル含有量

水路地点	クロロフィル含有量 (mg/g-MLSS)
2	0.43
3	0.71
4	1.30

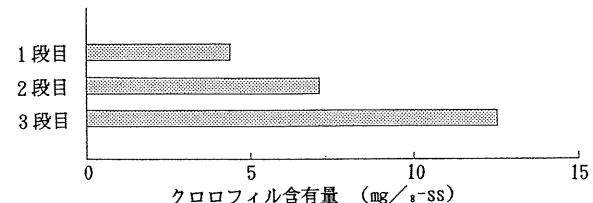


図-11 水路流れ方向によるクロロフィル含有量の変化 (RUN 4)

表-5 汚泥の収率

RUN 1 (5/29-10/3)	RUN 4 (10/4-1/13)	RUN 7 (10/4-2/18)
0.52	0.33	0.25

注) 1. 汚泥収率はTOC 1 g 当りの汚泥収率として表した。  
2. 単位は全て g-MLVSS/g-TOC

見かけの汚泥収率（Y<sub>ob</sub>）は平均汚泥滞留時間（θ）の関数として、次式で示される。

$$Y_{ob} = \frac{Y}{1 + b \theta} \quad \dots \quad (2)$$

ここで、Y： 真の収率（-）

b： 汚泥の自己分解係数（1／日）

(2)式から $Y_{\text{obs}}$ の低下は、水路内に汚泥補足能力の高い多孔性コンクリートブロックを投入したことにより、 $\theta_b$ が長くなり、汚泥の自己分解が進行し見かけの汚泥収率が減少したことを意味している。

#### (4) 生物相の変化

水路内の生物相の顕微鏡観察をRUN 1、RUN 2、RUN 4、RUN 7終了時に行った。表-6に、水路壁面および充填剤に付着した生物膜の顕微鏡および肉眼による観察結果を示した。

##### ① 細菌群

実験期間中、廃水流入口付近で糸状菌Geotrichum candidumが多量出現した。流入負荷量が高まり水路の有機物除去能が限界に達したと思われるRUN 7においては、微好気状態を好む糸状細菌Beggiatoaが一段目水路全域で優占となるとともに、廃水流入口付近でのみにしか観察されなかった糸状菌によって生産されたと思われる寒天様物質が一段目水路全域に広がって存在するようになった。さらに、Beggiatoaが集積した際に特異的に観察される白い薄膜で充填剤表面が覆われたり、付着生物がこの白い薄膜でプリッジされている様子が肉眼で観察できた。

##### ② 付着藻類

多孔性コンクリートブロックを水路に充填したRUN 2以降の実験では、藻類の付着が助長

表-6 生物相観察結果

実験番号	RUN 1					RUN 2					RUN 4					RUN 7			
species	sampling point					sampling point					sampling point					sampling point			
	1	3	5	7	9	1	3	5	1	3	5	7	9	1	2	3	4		
<i>Geotrichum candidum</i>	+++					+++			++					++++	++++	+++	++		
<i>Beggiatoa alba</i>														++	++	++	+++		
<i>Chroococcus sp.</i>						+++			++++					++					
<i>Dactylococcopsis sp.</i>							++++	+											
<i>Microcystis sp.</i>									+++	++									
<i>Oscillatoria sp.</i>						+													
<i>Navicula sp.</i>						++			++	+++				++	+		++		
<i>Scenedesmus sp.</i>							+++			++				++	+		+		
<i>Quadrigula sp.</i>														+++					
<i>Oicomonas sp.</i>														+	+	+			
<i>Amoeba sp.</i>														+	+++	++	+		
<i>Paramecium caudatum</i>	++						++		++				+	+					
<i>Aspidiscia sp.</i>	+	+++	++	+		++								+					
<i>Spirostomum ambiguum</i>			+																
<i>Vorticella sp.</i>							++	+++	+				+						
<i>Rotaria sp.</i>	++	++	+++	+									++	++++	+		+		
<i>Trichocerca sp.</i>								+											
<i>Diplogaster sp.</i>						+	+				++	+			++	+			
<i>Lymnaea pervia</i>													++	++					
<i>Nais elonguis</i>	++		++	+		+													

され、藍藻類ではChroococcus属、Dactylococcopsis属、Microcystis属、Oscillatoria属、珪藻類ではNavicula属、緑藻類ではScenedesmus属、Quadrigula属が観察された。

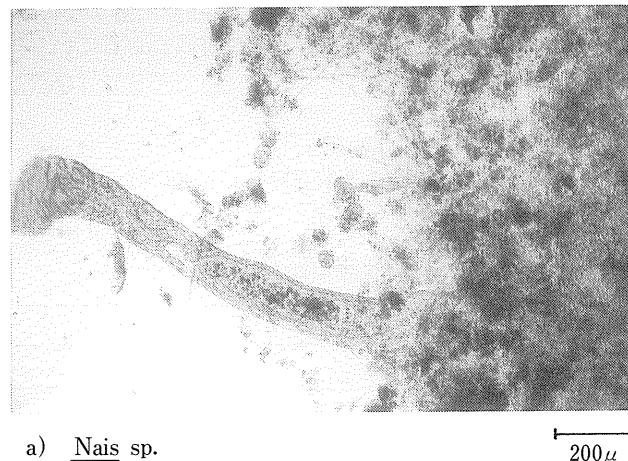
### ③ 原生動物、後生動物

原生動物、後生動物については実験期間中水路全体にわたって様々な種が観察された。高負荷域で運転したRUN 7では、それまで出現しなかった鞭毛虫類のMastigophora属、Amoeba属が観察されるとともに、一段目流出水の濁りが顕著となった。特に濁りの原因としては、沈澱効率の低いAmoeba属の大量出現が深く関係していると考えられる。<sup>10)</sup>

### ④ 付着生物膜からみた水路処理能力の評価

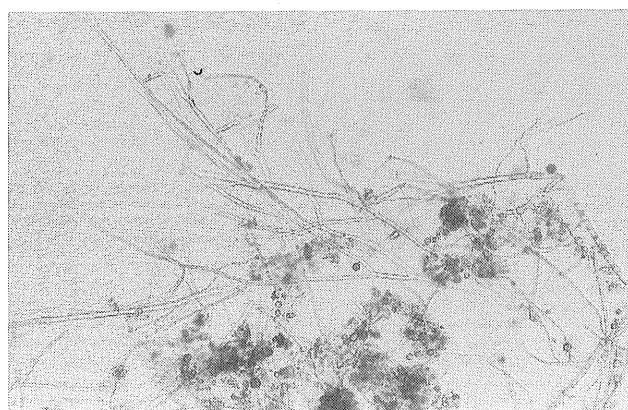
細菌類、藻類、微小生物から構成されている水路付着生物相から処理水質を判定する場合、微生物の個体数ではなく、生物相の多様性が大切である。表-6に示したように、実験水路では、種多様性の高い生物膜が形成され、安定した水路による水処理が可能であることを示している。

付着微生物の顕微鏡写真を写真-3に示した。



a) Nais sp.

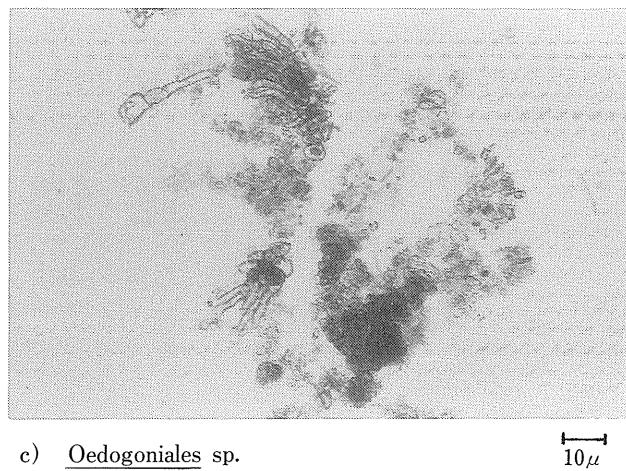
200μ



b) Geotrichum canndidum

10μ

写真-3 出現生物の顕微鏡写真



c) Oedogoniales sp.

10 $\mu$

写真-3 出現生物の顕微鏡写真（続き）

### 3-2 多段式水耕栽培槽によるミディトマトの栽培

#### (1) ミディトマトの生育状況

##### ① 概略

ミディトマトの多段式水耕栽培槽での栽培歴を図-12に示した。6月1日に育苗したミディトマトを多段式水耕栽培槽に定植したが、早い株は植え付け10日程度で着花し、約1カ月後に着果した。着果約1カ月後の7月末に完熟し収穫が可能となった。8月中旬になると、下部から順に葉が枯れ始めたが、9月初旬まで連続して完熟したミディトマトを収穫することができた。水耕栽培試験でのミディトマトの生育状況および着果した実の状況を写真-4、5に示した。

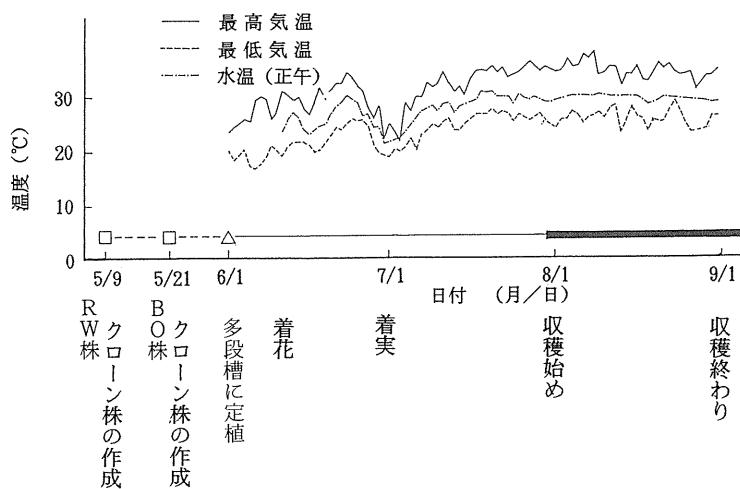


図-12 気温、水温の変動と栽培歴



(a) 6月28日



(b) 8月7日

写真-4 ミディトマトの生育状況



写真-5 着果した実の状況

た。3カ月の栽培試験期間中、病害にまったくかかることなく、水耕栽培槽に植え付けた全22株で、約350ヶの甘いミディトマトを収穫することができた。

### ② ミディトマトの生長指標

実験終了後に測定した乾燥重量（W）と $\Sigma D^2 H$ の関係を図-13に示した。この結果、Wと $\Sigma D^2 H$ の間には、次の(3)式の関係が成立することが明らかになった。

$$W = 0.00833 \Sigma D^2 H + 0.0759 \quad (r = 0.982) \cdots (3)$$

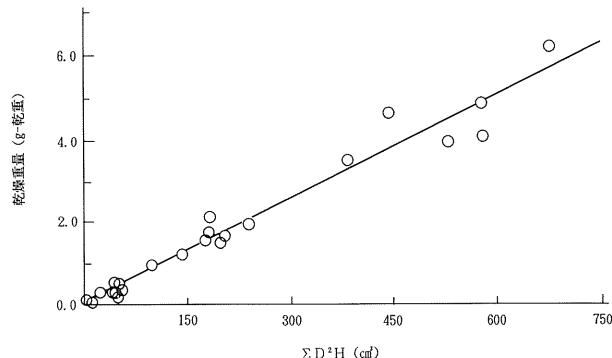


図-13  $\Sigma D^2 H$ と乾燥重量の関係

### ③ ミディトマトの生長状況

礫栽培床に直植えした株（B O株）、ロックウールにて育苗した株（R W株）、それに鉢で育てた株（C R株）それぞれについての $\Sigma D^2 H$ の経日変化を図-14に示した。水耕栽培開始当初、B O株に比べてR W株の方が良好な生育を示したが、収穫時期にはほとんど両者の差はなくなった。栄養塩濃度の低い水路流出水を用い水耕栽培したミディトマトは、栄養塩量、日照量共に十分なC R株に比べるとほぼ半分程度の生長量であることがわかる。

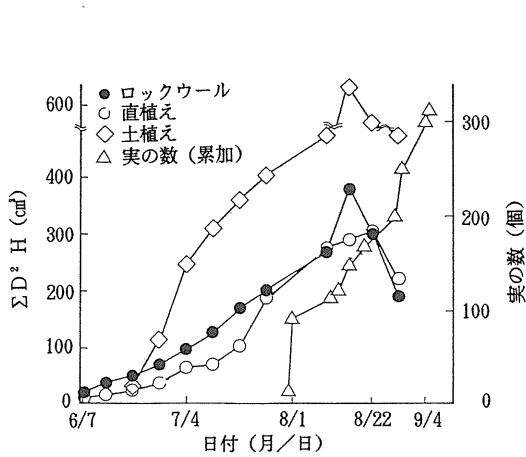


図-14 トマトの生育と収穫量の経日変化

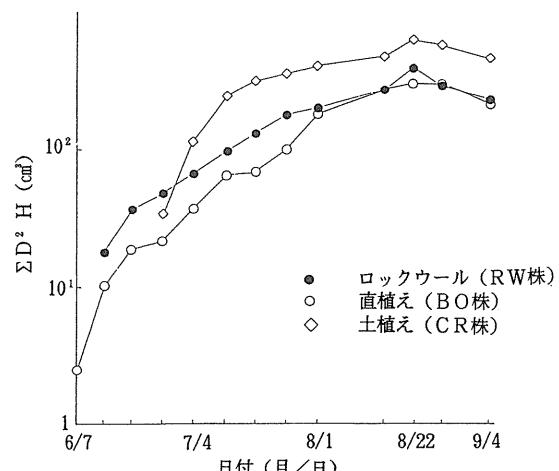


図-15 トマトの生育速度

#### ④ ミディトマトの比生長速度について

実測した $\Sigma D^2 H$ 値から、(3)式を用いてミディトマトの乾重量を推定し、水耕栽培試験期間中のミディトマト生長の経時変化を求めた（図-15）。生長曲線の直線部の傾きから比生長速度（ $\mu$ ）を計算した結果、図-16に示すように今回の試験においてミディトマトの生長は $\mu$ の異なる二つの対数生长期で示されることがわかった。水耕栽培開始当初の第一対数生长期における $\mu$ 値は、RW株の方がBO株よりも高く、RO株の方が良好な成長を示した。しかし、6月半ばからの第二対数生长期での $\mu$ 値はRW株で0.019（1/day）、BO株が0.024（1/day）と逆転し、ミディトマトの収穫時期には両者の生長量にほとんど差が見られなくなった。CR株では、第一生長段階における $\mu$ 値が0.061（1/day）と高い上、対数生长期の継続期間も長い。CR株の第二対数生长期における $\mu$ 値は0.009（1/day）と水耕栽培株の第二対数生长期での $\mu$ 値に比べて低くなるが、これはCR株では長く続く第一対数生長段階で十分葉茎の生長が進み、第二生長段階では光合成エネルギーが葉茎よりも、主として実の肥大、熟成に振り向けられた結果と判断出来る。

	6/1	6/13	6/20	7/4	7/18	7/25	8/16
RW株				0.019			
BO株			0.041		0.024		
CR株			0.061			0.009	

図中の数値の単位は1／日

図-16 トマトの比生長速度

#### ⑤ ミディトマトの収穫量

水耕栽培槽に植え付けた全22株から収穫した実の数の累積を図-14に示した。写真-6に収穫したミディトマトと普通のトマト（桃太郎）、ミニトマトとの対比を示した。栽培槽に植え

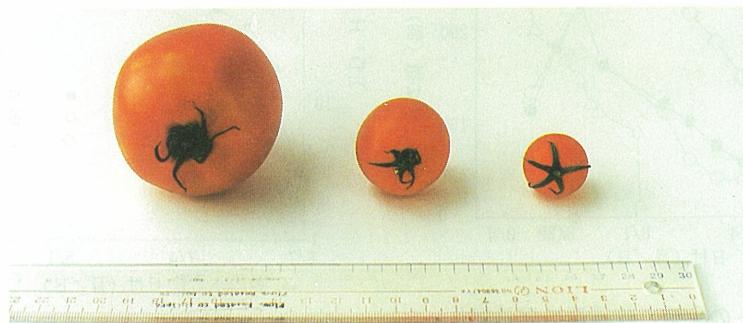


写真-6 ミディトマトの大きさ比較

付けた全22株で、約350ヶのミディトマトを7月末から約1カ月間連続して収穫することができた。RW株とBO株との間でミディトマトの生育量、果実の収穫量ともに大差の無かったことから、高価なロックウールを使わなくても礫栽培床に直接トマトの苗を植え付けることで汚濁河川水の処理を兼ねながらトマトを水耕栽培できるので、実用面からすると水耕栽培型水処理装置によるミディトマトの栽培は実用的であると言える。

#### (6) ミディトマトの糖度

表-7に収穫したミディトマトの糖度の分析結果を示した。収穫されたミディトマトの糖度は平均7.7%で、普通のトマト(桃太郎)の5.9%、ミニトマトの7.1%に比べて糖度の高いことが明らかになった。

表-7 トマトの糖度

ミディトマト		ミニトマト	トマト (桃太郎)
水耕栽培株	C R 株		
max.	9.4(%)	10.7	7.8
min.	6.0	6.8	6.8
mean.	7.7	8.7	7.1
			5.9 <sup>x1</sup>

\*1 福島農試 60年 8月15日

#### (7) 障害症状とその原因

本実験では、青枯病抵抗性のミディトマトを用いたこともあり、病虫害障害を受けることはなかった。ただ、供試汚濁河川水の栄養濃度が通常の水耕栽培液の栄養塩濃度に比べて低いことからくる栄養生理障害と、栽培槽設置場所が共同実験等の西側軒下であることからくる日照不足による生長阻害を受けていた。

#### (2) ミディトマトの水耕栽培槽での窒素、燐除去に関する検討

##### ① 処理成績

表-8に多段式水耕栽培槽での処理成績を一括表示した。ミディトマトの水耕栽培槽でTOCは約40%、T-Nは20~40%、T-Pは約60%の効率で除去され、水路に比べてトマトの水耕栽培槽の窒素、燐除去能の大きいことが明らかになった。

多段式植物栽培水槽での栽培歴と処理水温、各態窒素濃度並びに窒素除去率の経日変化を図-17に示した。処理の進行に伴って、処理水中のT-Nに占めるNO<sub>3</sub>-Nの割合が徐々に増加し、処理水温が30°C程度の高温期には処理水T-Nの約50%がNO<sub>3</sub>-Nであった。T-N除去率は処理の前半では20%程度であったが、着実、収穫時期に入ると40%程度に高まった。

ミディトマトの水耕栽培槽においてT-Pは約60%の効率で除去され、処理水中のT-P濃度は約0.5mg/Lまで低下した。トマトのように実を付ける植物の水耕栽培においては、燐濃度の管理が大切であることが明らかになった。

表-8 処理成績一覧表

日付	$\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/l)			$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/l)			TKN (mg/l)		
	流入水	処理水	除去率	流入水	処理水	除去率	流入水	処理水	除去率
6/20	9.5	7.6	20.7	0.57	0.32	3.1			
7/11	6.7	0.28	95.8	1.1	2.5	32.0	7.6	2.9	62.4
7/28	7.4	0.58	92.2	0.80	2.5	30.1	7.8	4.4	42.8
8/10	8.8	1.6	82.0	1.1	2.7	27.4	10.0	4.3	56.7
8/30	5.7	1.6	72.6	1.1	1.6	23.5	6.7	2.7	59.0

日付	TOC			T-P			T-N (mg/l)		
	流入水	処理水	除去率	流入水	処理水	除去率	流入水	処理水	除去率
6/20				1.5	0.6	56.6			
7/11	2.7	1.7	37.5	1.9	0.8	55.6	8.7	5.4	37.9
7/28	1.7	1.1	35.3	1.2	0.5	57.1	8.6	6.9	19.8
8/10	2.2	1.5	30.1	1.7	0.5	71.6	11.1	4.0	64.0
8/30	2.8	1.9	32.1				8.3	4.3	48.2

## (2) 多段式水耕栽培処理における窒素の物質収支

多段式水耕栽培槽の持つ栄養塩除去能を正確に評価するため、生長段階にあり、実の収穫も可能になった7月25日から8月9日の15日間におけるT-P, T-Nの物質収支をとり、図-18に示す結果を得た。

流入した窒素のうちミニトマトの各部位に吸収除去された割合は、葉茎部、根部でそれぞ

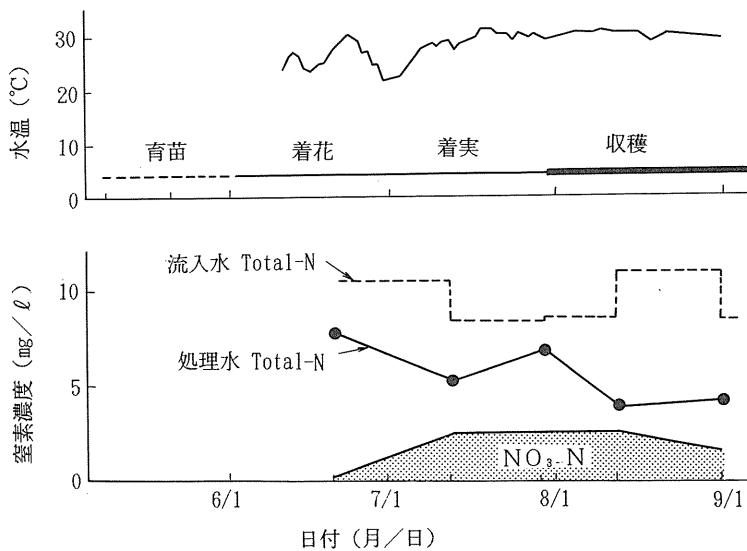


図-17 窒素処理の経日変化

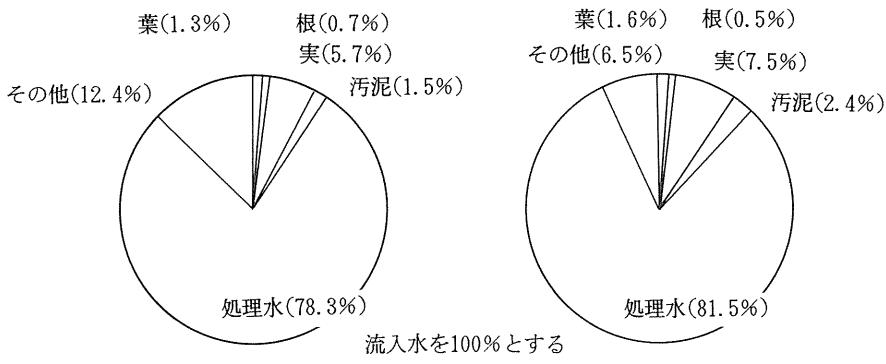


図-18 物質収支

れ 1.3%、 0.7%と低いのに比して、実部で 5.1%と高くなかった。一方、流入した燐のうち、ミディトマトの各部分へ吸収除去された割合は、葉茎部、根部でそれぞれ0.83%、0.28%と低いのに対し、実部で4.11%と高くなかった。

この結果、ミディトマトをnutrient absorberとして使用した場合、葉、茎、根に吸収、移行して除去されるよりも、実に移行して除去される割合が大きいことが判明した。

### 3-3 多段式水耕栽培槽による花卉植物の栽培

#### (1) 環境条件の変化

栽培期間中の水温、および気温の変化を図-19に示した。実験期間中の流入水中の全窒素濃度は10~17mg/L、全燐濃度は 1.2~ 4.5mg/Lの範囲で変動した。

#### (2) 花卉植物の生育状況

供試花卉植物の生育状況につき観察した結果の概略を表-9に、試験栽培歴を図-19にそれぞれ示した。1月初旬にクリサンセマスにつぼみがつき始めたのを皮切りに、2月にはパンジーおよびスイートピーもつぼみをつけた。2月下旬クリサンセマスには花が咲き始めた。多段式植物栽培槽を設置した場所が共同大実験棟の西側の軒下であったことから、日照不足により1カ月程度開花が遅れた。スイートピーはつる性のマメ科の植物であることから、支柱を設ける必要があった。本法の実用化に当たっては、維持管理が少なくてすむ花卉植物を用いる必要があることから判断して、支柱等を必要とするマメ科の植物は実用性に乏しい。水耕栽培型水処理装置での花卉植物の成育状況および開花した花の状況を写真-7に示した。

表-9 植物の生育状況のおおよその変化（冬期）

実験期間	播種日	10	11	12	1	2	3
クリサンセマス	9/8	—	—	つぼみが付く	—	開花	—
ベビーパンジー	9/8	—	—	—	つぼみが付く	—	開花
わすれな草	9/8	—	蔓が伸びる	—	—	つぼみが付く	—

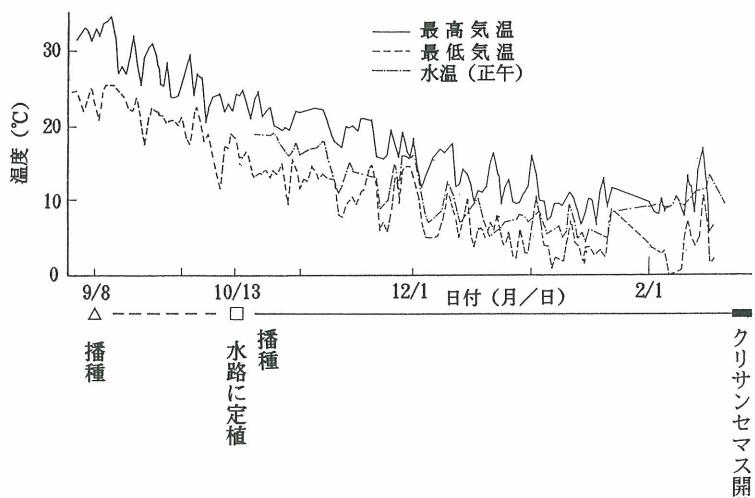
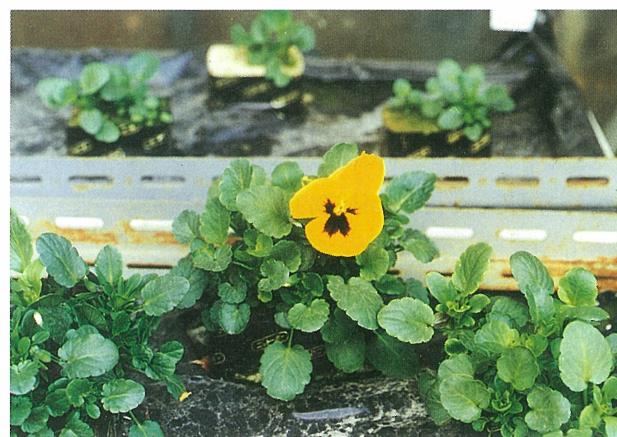


図-19 水温、気温の変動と栽培歴



(a) クリサンセマス  
パルドーサム



(b) ベビーパンジー

写真-7 開花した冬期における花卉植物

### (3) 水質の改善

花卉植物を植え付けた多段式水耕栽培槽による処理成績は、夏期ミニトマトを水耕栽培した時の成績には劣った。しかし、T-Nは35%、T-Pは40%程度それぞれ除去されていることから、冬期においても本試験装置はかなりの浄化能力を有していることが明らかとなった。

花卉植物の生長に伴う栄養塩の除去機能は、トマトのように窒素、磷の含有比が高い果実を持たず、生長量の少ないことから、決して大きなものではないが、汚濁河川の河川敷や下水処理場にこのシステムを導入することにより年間を通じて花を咲かせることができるので、汚濁河川水の浄化を兼ねながら周辺住民の河川に対する親水意識が向上し、街のイメージアップにつながる等大きな付随効果が期待できる。

## 4. 要 約

多孔性コンクリートブロックを充填材として敷き詰めた水路型自然表面曝気槽と礫を充填した多段式植物栽培槽からなる『水耕栽培型水処理装置』で、河川水の浄化を兼ねながらミニトマトと花卉植物の水耕栽培を行い、その浄化機能と水耕栽培の可能性について検討し、次の結論を得た。

1. 水路型自然表面曝気槽に多孔性コンクリートブロックを充填すると、生物膜の付着・蓄積が進み、水路のTOCおよび磷除去効率が向上した。しかし、流入負荷量を高めると水路が微好気性となり、悪臭が発生すると共にその除去能に限界が見られた。
2. 水路型自然表面曝気槽にオゾン処理を組み込むことにより、水路のTOC除去能が向上した。さらに、低負荷域でオゾン処理によって壁面付着生物量の減少することを確認した。
3. 汚濁河川水程度の希薄栄養塩濃度下でも、多段式植物栽培槽で汚水処理を兼ねながら甘いミニトマトの水耕栽培が可能であった。水耕栽培槽の窒素、磷の除去能は水路型自然表面曝気槽よりも大きく、水耕栽培槽で除去された窒素、磷のうち約20%がミニトマトの生長によって摂取除去された。さらに、葉茎よりも果実の生長にともなって除去される栄養塩量の方が大きいことが明らかとなった。
4. 希薄栄養塩濃度下で、年間を通じて花卉植物の水耕栽培が可能であることを実験的に確認した。その生長に伴う栄養塩類の除去機能は大きくはないが、維持管理の容易な花卉植物種をうまく選択すれば、河川水浄化を兼ねながら年間を通じて花を楽しむことが可能である。

<参考文献>

- 1) Susumu Hashimoto, Kenji Furukawa and Yasuo Ozaki: A Channel Flow System for Wastewater Treatment and Food Production, J. Ferment. Technol., Vol. 63, No. 4, pp. 343-356(1985)
- 2) 橋本獎、古川憲治、松村尚人：水耕栽培型水処理装置による汚水処理と食糧生産に関する研究、水処理技術、Vol. 27, No. 4, pp. 243-252 (1986)
- 3) 橋本獎、古川憲治、金柱洪：水耕栽培型水処理施設による水処理と酸素・食糧生産、第26回下水道研究発表会講演集、p. 433-435 (1989)
- 4) 玉井元治、河合章、西脇裕治：ポーラスコンクリートへの海洋生物付着に関する研究、第44回セメント技術大会講演集、pp. 822-827 (1990)
- 5) Motoharu Tamai : Water Permeability of Hardened Materials with Continuos Voids, CAJ REAVIEW, pp. 446-449 (1988)
- 6) 日本下水道協会：下水試験方法1984年版
- 7) A. Vonshak, S. Boussiba, A. Abeliovich, and A. Richmond : Production of Spirulina Biomass ; Maintenance of Monoalgal Culture Outdoors, Biotechnology and Bioengineering, Vol. 15, pp. 341-349 (1983)
- 8) 出口富雄：オゾンを中心とした高度浄水処理施設
- 9) 古川憲治、播口光、尾住秀樹、藤田正憲：水路によるフェノール排水の処理に関する研究、衛生工学研究論文集、Vol. 27, p. 87-95 (1991)
- 10) 滝口洋：糸状菌と排水処理、水処理技術、Vol. 20, No. 4 (1979)