

# クリーク水質に及ぼす底泥と水生植物の影響

山本 史子\*

## 1. はじめに

我が国においては、平成13年6月の土地改良法の改正により、農業農村整備事業を行うにあたって、環境との調和への配慮が義務づけられた。

当協会では、クリーク防災事業において佐賀県からの委託を受け、クリークの整備・設計を行う前に環境調査を行っている。

佐賀平野は水田を中心とした大農業地帯であるとともに、クリーク地帯という特徴的景観を持っている。クリークは、古くから地域の自然や住民の生活に密着しながら存在しつづけてきた。近年では農業用水源のみならず、貴重な親水空間としての役割が期待されており、農業的機能、生活的機能、防災・環境保全的機能、生態的機能など多面的な機能を持つ、地域資源である。

しかし、農業形態の変化や住民の生活様式の変化、地域社会の都市化、水利施設の管理状態の変化など様々な理由によってクリーク水質は悪化し、富栄養化したクリークが多いのが実態である。特に、非灌漑期のクリークでは、水流の停滞や水位の低下に起因するヘドロ化、底泥からの栄養塩類の溶出が問題になっている。また、クリークに繁茂する水生植物が水質に及ぼす影響は大きく、灌漑期は通水障害、水中への日射遮断等を引き起こし、非灌漑期は腐敗した水生植物がヘドロ化、悪臭等、水環境悪化の一因となっている。

そこで今回は、クリーク環境に大きな影響を及ぼす水生植物の一つであるホテイアオイと水質の関係、維持管理の課題について、私が九州大学大学院当時に研究した内容を一部紹介する<sup>1)</sup>。

## 2. 調査地区の概要

佐賀県佐賀郡東与賀町は、佐賀市、大和町、三日月町、牛津町、久保田町、諸富町、芦刈町、川副町、小城町とともに佐賀土地改良区に属している。これら1市9町の水田約10,000haが、一級河川嘉瀬川、北山ダム、川上頭首工、水路の施設を利用している。

東与賀町は、肥沃な土地と有明海の恵みを受け、農業と漁業を中心に繁栄してきた。東は八田江川を挟み川副町、西は佐賀市西与賀町、嘉瀬町、北は佐賀市本庄町に接している。南は直線状コンクリート堤防によって有明海に臨み、さらに南方に雲仙岳や多良岳を遠望することができる。東西約3.5km、南北約7kmで南北に長く、総面積は15.39km<sup>2</sup>、標高は最も高い所で海拔2.8m、低い所で0.4mであり、平坦地である。図1に東与賀町の位置を示す。

## 3. 実験の概要

### 3.1 クリーク水質調査

佐賀県佐賀郡東与賀町のクリークを対象に、灌漑期にあたる平成15年10月9日と非灌漑期にあたる平成15年11月20日及び12月11日の計3回水質調査を行った。調査日の天候は10月9日、11月20日が晴れ、12月11日は雨であった。

水生植物の影響を検討するため、植物被覆なしのクリーク（クリーク1）、ヒシが繁殖するクリーク（クリーク2）及びホテイアオイが繁殖するクリーク（クリーク3）の3か所を選定し、灌漑期、非灌漑期ともに午前8時から2時間間隔で5回、データのサンプリングを行った。クリークの位置図を図2に示す。

\*（財）九州環境管理協会 計画部



図1 東与賀町の位置



図2 調査位置図

測定項目は水温、電気伝導度 (EC)、溶存酸素 (DO)、水素イオン濃度 (pH)、硝酸イオン濃度 ( $\text{NO}_3^-$ )、全窒素 (T-N)、全リン (T-P) の7項目とした。

### 3. 2 室内実験

九州大学農学部貝塚圃場内のガラス室に2個の栽培ポットを設置し、ポット1は東与賀町から採取してきたクリーク底泥とクリーク水のみ、ポット2は同様の条件で水面にホテイアオイを栽培した。両ポットには取水口があり、底泥からの高さが0cm、10cm、20cm、30cm、50cm、70cmの各深さで採水できるようにした。実験装置について図3に示

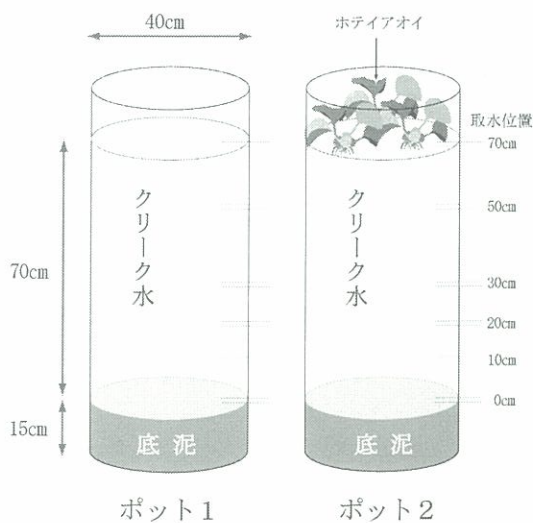


図3 実験装置

す。

室内実験期間を平成15年11月28日から12月12日までの15日間と設定し、実験開始日と実験終了日は、午前9時から午後9時まで2時間間隔で水質測定を行った。測定項目について表1に示す。蒸発散、採水等で減少した水は実験期間終了後、クリーク水を補給した。なお、ポット2はホテイアオイの腐敗による影響を検討するため、実験期間終了後も栽培を続け、1月17日に水質測定を行った。

底泥間隙水は、実験開始前と実験期間終了後、遠心分離法で抽出しT-N、T-Pを測定した。ホテイアオイは葉基部及び根部に分け、60°Cで72時間乾燥させた後、財団法人日本穀物検定協会の協力を得、硝酸態窒素、T-N、T-Pを測定した。

表1 室内実験測定項目

分析対象	測定項目	測定日時
上層水	水温, EC, pH, DO, $\text{NO}_3^-$	11/28, 12/12 (9時~21時:2時間間隔) 1/17 (9時, 11時, 15時, 19時, 21時)
	T-N, T-P	11/28, 12/12, 1/17 (9時, 15時, 19時)
底泥間隙水 底泥 ホテイアオイ	T-N, T-P	実験開始前 実験終了後

## 4. 結果と考察

### 4. 1 クリーク水質調査結果

灌漑期10月9日と非灌漑期11月20日の水質調査



結果を以下に示す。なお、T-N、T-Pについては、灌漑期10月9日と非灌漑期12月11日の結果を示す。12月11日の水温、EC、DO、pH、 $\text{NO}_3^-$ の結果は省略する。

#### 4. 1. 1 水温

クリーク1では、灌漑期、非灌漑期ともに深さごとの変化はほとんど見られなかった。灌漑期は14時をピークとした時間変化が表れ、非灌漑期は時間の経過とともに上昇していく結果となった。

クリーク2では、灌漑期はクリーク1と同様の時間変化を示し、水面付近の値が若干大きくなった。非灌漑期は、時間の経過とともに上昇していき、午後は水面の値が大きくなった。

クリーク3では、灌漑期はクリーク1、2と同様の時間変化が見られたが、変動の幅は両者より小さかった。非灌漑期は時間変化がほとんど見られず、クリーク1、2よりやや高い水温で一定に保たれていた。これは、水面を覆ったホテイアオイが外気を遮断する蓋のように保温の役割を果たし、水中の温度低下を防いだ影響であると考えられる。

#### 4. 1. 2 EC

灌漑期のクリーク1、2では時間変化、鉛直分布がほとんど見られないが、非灌漑期には時間の経過とともにEC値が大きくなる傾向が見られた。

クリーク3では両日ともにEC値の時間変化、鉛直分布における変化は見られなかった。

EC値は水温に支配され、イオン成分の濃度にほぼ比例する。クリーク3ではホテイアオイが水面全体を被覆したことにより、水温と同様に時間変化、鉛直分布が見られなかったと考えられる。

#### 4. 1. 3 DO

各クリークともに、非灌漑期の値が灌漑期の値を上回った。夏季に酸素が水中に溶け込む量は冬季の半分程度であるため<sup>2)</sup>、水温の低い非灌漑期の値が大きくなったと考えられる。

クリーク1の灌漑期は、15時30分を最大値と

した時間変化が表れた。非灌漑期は時間の経過とともに大きくなった。

クリーク2の灌漑期は、表層部でDOが大きくなった。これは、植物プランクトンが活発に光合成をしている影響と考えられる。非灌漑期はクリーク1と同様に、時間経過とともに大きくなった。

クリーク3では、クリーク1、2よりも季節変化が小さく、DO値も小さい。水温、ECと同様にホテイアオイが水面を被覆した影響と考えられる。これに関連して、手賀沼で行われているホテイアオイ植栽の圃場における水質は、水中に脱落したホテイアオイからの根、根茎、葉などの分解無機化に伴う酸素消費によって、圃場外に比較してDOが小さいという報告がある<sup>3)</sup>。

#### 4. 1. 4 pH

pHはDOと連動するため、DOと同様の変化を示した。

クリーク1、2では非灌漑期のpHが高く、灌漑期のクリーク2ではDOと同様に水面のpHが高くなった。これは盛んに光合成が行われ、二酸化炭素が消費されたものと考えられる。また、非灌漑期のクリーク2では底泥付近のpHが低くなっているが、これは底泥中の微生物が呼吸したことによって、二酸化炭素が放出されたものと推測できる。

クリーク3は変動が小さく、ホテイアオイの影響が示唆される。

#### 4. 1. 5 $\text{NO}_3^-$

各クリークともに、非灌漑期の $\text{NO}_3^-$ は灌漑期の約10倍の値を示した。また灌漑期は、いずれのクリークも時間変化、鉛直分布がほとんど見られないのに比べ、非灌漑期はクリーク1、2で時間変化が表れた。

クリーク3では灌漑期と同様、時間変化は表れなかった。

#### 4. 1. 6 T-N

ここからは灌漑期10月9日と非灌漑期12月11日の結果を比較しながら、考察を進める。

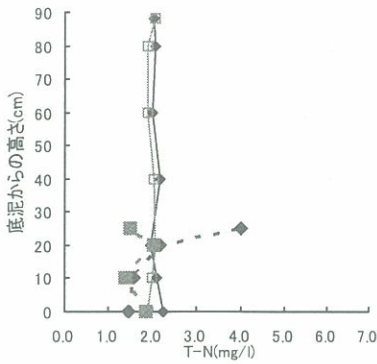


図 4. 1 T-Nの経時変化(植物なし)

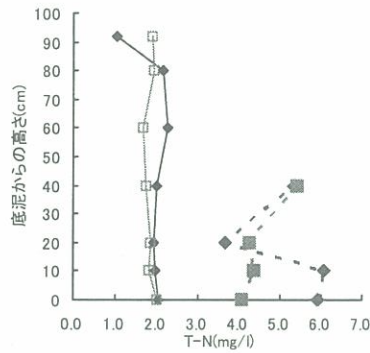


図 4. 2 T-Nの経時変化(ヒシ)

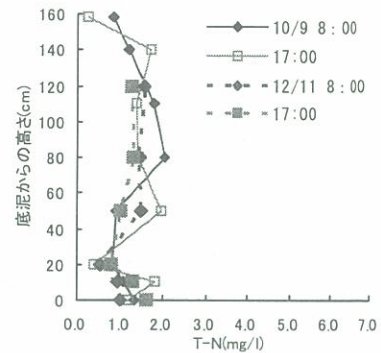


図 4. 3 T-Nの経時変化(ホテイアオイ)

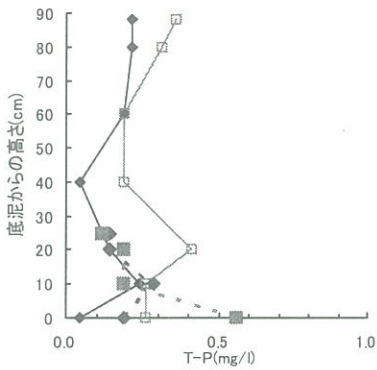


図 5. 1 T-Pの経時変化(植物なし)

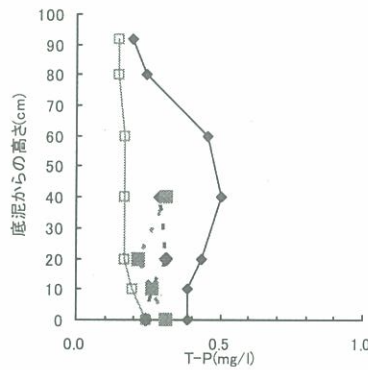


図 5. 2 T-Pの経時変化(ヒシ)

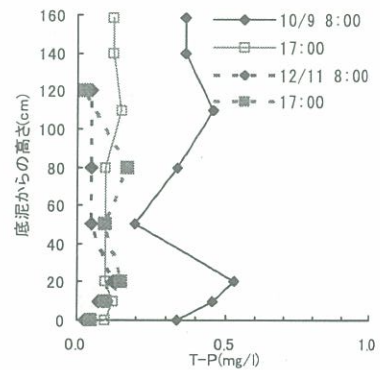


図 5. 3 T-Pの経時変化(ホテイアオイ)

クリーク1における灌漑期、非灌漑期のT-Nの経時変化を図4.1に示す。クリーク1では、底泥からの高さが20cm以下で灌漑期と非灌漑期の変化はほとんどないが、表層部では12月11日のT-Nが高い。これは光によって植物プランクトンが増殖していると考えられる。非灌漑期17時の値が低いのは、測定日に降雨があったことによる希釈と考えられる。

クリーク2の経時変化を図4.2に示す。クリーク2は非灌漑期のT-Nの方が大きく、冬季になりヒシが腐敗した影響が考えられる。また、クリーク2は民家に隣接していたため、汚水が流入した可能性もあると考えられる。

クリーク3の経時変化を図4.3に示す。クリーク3では灌漑期と非灌漑期との間に大きな変化は見られなかった。非灌漑期の測定時、ホテイアオイの葉部は枯れかけていたが、腐敗は認められなかった。このため灌漑期と同様に、水面を覆うホテイアオイにより水中への日光の供給が妨げられ、水中の植物プランクトンの活性が低下した

ため、両者の変化が表れなかったと考えられる。

#### 4. 1. 7 T-P

クリーク1における灌漑期、非灌漑期のT-Pの経時変化を図5.1に、クリーク2の経時変化を図5.2に、クリーク3の経時変化を図5.3に示す。

T-Pは灌漑期と非灌漑期の大きな変化は表れなかったが、植生の有無による違いが表れた。植物なしのクリーク1では灌漑期、非灌漑期ともに17時のT-Pが高い傾向であるが、植物があるクリーク2、3では8時のT-Pが高い傾向を示した。このT-Pの変化には、腐敗したヒシや水面を覆いつくしたホテイアオイが何らかの影響を及ぼしていると考えられるが、考察し難い。溶出実験においても同様の現象が表れた。

#### 4. 1. 8 まとめ

今回のクリーク水質調査では、植生の違いにより3つのクリークを選定し、灌漑期と非灌漑期の水質を比較した。

水生植物が繁殖していないクリークでは、日射



や気温の影響を受け、水質の変動が見られた。

ヒシが繁殖するクリークの水質は、灌漑期と非灌漑期で大きく異なる。ヒシの活性がある灌漑期は、水面を覆いつくしたヒシの薄い葉を光が透過し、水中の植物プランクトンによる光合成の結果、水中のDOは上昇する。しかし、非灌漑期になると腐敗したヒシはEC、T-N値を上昇させ、クリークを富栄養化させる原因となる。ヒシは耐寒性が低く、11月には腐敗してしまうため、腐敗する前に除去が必要である。

ホテイアオイが繁殖するクリークでは、各水質項目ともに鉛直分布、時間変化がほとんど見られないという結果が得られた。背の高い群落で水面を覆ったホテイアオイは前述のヒシとは異なり、大気から水中への酸素供給を減少させ、水中への日光の到達を遮り、水中の植物プランクトンの光合成作用を低下させる。しかし、ヒシより耐寒性に優れ、適切な維持管理が行われていれば、優れた浄化機能を持つ植物である。

水生植物が繁殖するクリークでは、維持管理を徹底させることが重要な課題の1つとなる。

## 4. 2 室内実験結果

ポット1とポット2、実験開始日11月28日と実験終了日12月12日を比較しながら、各水質項目について以下に示す。

### 4. 2. 1 水温

ポット1、ポット2ともに17時の値をピークとした時間変化が表れた。時間変動は12月12日が小さい。また、1月17日の天候は晴天で気温が上昇したため水温も上昇し、ほとんど低下しなかった。

### 4. 2. 2 EC

ポット1では、11月28日は各時間ともに底泥直上で最大値を示し、底泥からの高さが10cm以上では一定で、時間変化も見られなかった。12月12日も底泥直上で最大となり、底泥からの高さが20cm以上ではほぼ一定値を示した。実験前後を比較すると、12月12日が大きく、上層部と下

層部の濃度差が大きくなった。

ポット2では、11月28日がポット1より高い傾向を示したが、これは2つのポットを安定させるため、準備から6日後を実験開始日としたことが原因であり、2つのポットの初期値は等しかったことをここで補足しておく。12月12日は全体的に上昇し、底泥直上と上層部との間に濃度差が表れた。1月17日は、最大で2000 $\mu$ S/cmまで上昇し、時間変化や鉛直分布は見られなくなった。

### 4. 2. 3 DO

ポット1では、12月12日のDOが11月28日より底泥付近で低く、上層部では高くなり、濃度勾配が大きくなった。

ポット2では、12月12日が全体的に大きい傾向を示している。底泥付近では上層部と比較して小さい値を示した。1月17日は、実験期間中と比較すると全体的に小さくなり、鉛直分布がほとんど見られなくなった。1月17日は、日光を遮っていたホテイアオイの葉がほとんど枯れ、活性が失われていたため、実験期間中に見られた鉛直分布が見られなくなったと考えられる。

### 4. 2. 4 pH

ポット1では底泥付近で小さく、水面付近で大きくなった。実験前後を比較すると、12月12日が高い傾向を示した。

ポット2では、ポット1と比較して深さごとの変化が小さく、12月12日が高い傾向を示した。1月17日は、鉛直分布がほとんど見られず、9時を最小値とする時間変化が見られた。

### 4. 2. 5 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

11月28日、12月12日のポット1におけるNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の経時変化を図6.1に示す。実験前後ともに底泥直上が最も大きく、底泥から20cm以上ではほぼ一定値を示した。12月12日は、実験開始前より濃度勾配が小さくなった。初期値と比較して、底泥直上では濃度が低く、底泥から10cm以上では高くなっているため、拡散による均等化が起こったものと考えられる。

また、図6.2に示すポット2の経時変化で

は、実験前後ともに底泥直上に最大値が表れ、底泥からの高さが20cm以上ではほぼ一定の値を示した。時間の経過とともに底泥直上水と上層水との濃度差が小さくなり、1月17日の測定ではほとんど濃度差は認められなくなった。

図6. 3に示す実験前後のホテイアオイ成分分析の結果、ホテイアオイに含まれる硝酸態窒素の値が大幅に減少しており、茎葉部ではT-Nも減少していることから、ホテイアオイの茎葉部からの $\text{NO}_3^-$ 溶出が起きたと考えられる。

#### 4. 2. 6 T-N

ポット1における11月28日と12月12日のT-Nの経時変化を図7. 1に示す。ポット1では、実験前後でほとんど変化は見られなかった。実験前後ともに底泥直上の値が大きく、上層で低くなる傾向にあった。大きな日変化も見られず、時間経過とともに大きくなる傾向が表れた。

図7. 2に示すポット2の経時変化では、底泥直上から底泥上10cmまでの下層部に実験前後の違いが顕著に見られた。12月12日の底泥直上の値が、ポット1と比較すると高い値を示した。底

泥からの高さが10cm以上の上層部でも、12月12日は初期値より高い値を示した。1月17日になると底泥付近の値は小さくなったが、全体的にT-Nは高くなり、拡散による均等化が見られた。ポット1では実験前後の変化がほとんどなかったことから、ポット2では窒素を大量に含んだホテイアオイの根部や茎部が腐敗して沈降したために、下層部で高濃度を示したものと考えられる。

#### 4. 2. 7 T-P

ポット1における11月28日と12月12日のT-Pの経時変化を図8. 1に示す。11月28日のポット1では底泥直上のT-P値が最大で、底泥からの高さが10cm以上では、ほぼ一定値を示した。12月12日には底泥直上水と上層水との濃度差が大幅に小さくなり、全体的にT-Pは低下した。

図8. 2に示すポット2の経時変化では、底泥からの高さが20cm以下の下層部で、実験後のT-Pが初期値に比べ高い傾向を示した。図8. 3に示す実験前後のホテイアオイ成分分析の結果、ホテイアオイの茎葉部のリンが若干減少したことから、腐敗したホテイアオイの茎部が沈降し、リン

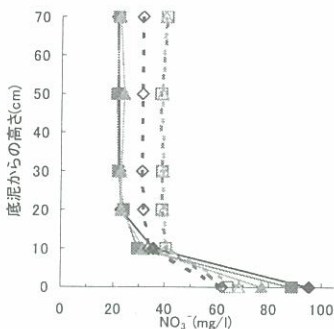


図6. 1  $\text{NO}_3^-$ の経時変化  
(ポット1：植物なし)

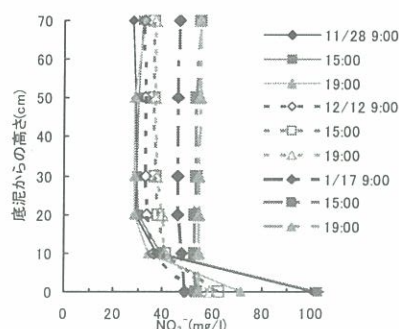


図6. 2  $\text{NO}_3^-$ の経時変化  
(ポット2：ホテイアオイ)

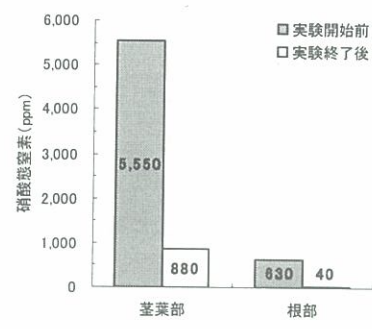


図6. 3 ホテイアオイに蓄積された硝酸態窒素  
協力：(財) 日本穀物検定協会

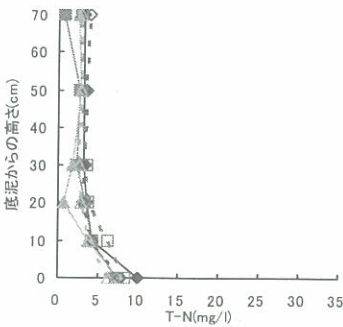


図7. 1 T-Nの経時変化  
(ポット1：植物なし)

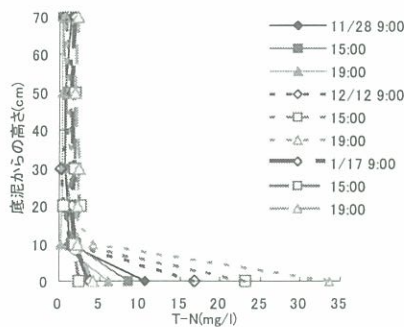


図7. 2 T-Nの経時変化  
(ポット2：ホテイアオイ)

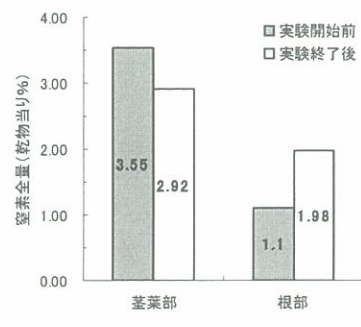


図7. 3 ホテイアオイに蓄積された窒素全量  
協力：(財) 日本穀物検定協会



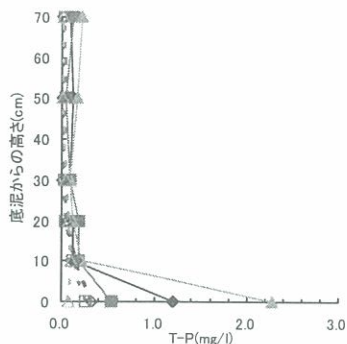


図 8. 1 T-Pの経時変化  
(ポット1：植物なし)

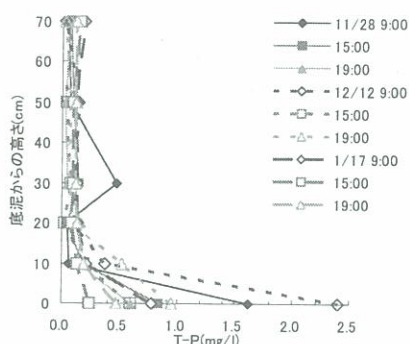


図 8. 2 T-Pの経時変化  
(ポット2：ホテイアオイ)

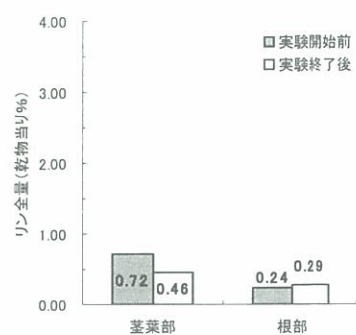


図 8. 3 ホテイアオイに蓄積されたリン含量  
協力：(財) 日本穀物検定協会

が溶出したものと考えられる。また、ポット2の底泥付近では9時にT-Pの最大値が表れている。同様の現象は、前述のクリーク水質調査でも起こっており、水生植物と日光の透過が何らかの影響を及ぼしているものと考えられ、今後は水生植物と日光との関係を解明する実験が必要である。

#### 4. 2. 8 まとめ

今回の室内実験では、水流が停滞する非灌漑期のクリークを想定し、降雨や風の影響を受けないガラス室で実験を行い、植物を栽培しなかったポットと、ホテイアオイを栽培したポットを比較することによって、ホテイアオイの腐敗が水質に及ぼす影響を調査した。

その結果、水温は水面付近が高く、下層へ向かって低下する傾向、EC、 $\text{NO}_3^-$ 、T-NおよびT-P等栄養塩類を表す項目は、底泥付近で最も大きく、上層部に向かって一定値を示す傾向を表した。ホテイアオイを栽培したポットでは、ホテイアオイの腐敗に伴い、ECや底泥付近のT-N、T-Pが上昇し、富栄養化の傾向が見られた。また、ホテイアオイの活性がある時は水温やDOの上昇を妨げるが、活性を失い茎部や根部が沈降すると、植物体に蓄積されていた栄養塩類が水中へ溶出することが明らかになった。

本実験では、底泥からの栄養塩類溶出が起こったのか確認できなかったが、非灌漑期における水質悪化は、底泥からの溶出も一因であるが、水生植物の腐敗による影響が大きいという結果が得られた。水生植物の管理が、クリーク水質を保全す

るための重要な課題の1つである。

### 5. 今後のクリーク管理

水生植物を用いた浄化技術は、植物が持つ栄養塩類吸収能力を利用した技術である。具体的には、①富栄養化した水域で栄養塩類を吸収して生長した在来水生植物を刈り取りなどによって回収する方法、②水生植物を人為的に植栽し生長後に回収する方法などがあり、これらを焼却、埋め立てなどにより処理・処分、または、餌料、肥料などとして再利用することで、水域の栄養塩類の負荷を間接的に削減し、富栄養化の抑制を図っている。

しかし、浄化に利用できる水生植物は栄養塩類の吸収能が高いという条件のみで優先されるべきではなく、植栽・回収のしやすさ、利活用の可能性などの条件を兼ね備えていることが必要である。

水質浄化に利用可能な水生植物としては、ホテイアオイ、オランダガラシが代表として挙げられる。植栽を条件とすると、水深と無関係に水面を自由に利用できるホテイアオイが最も理想的である。ホテイアオイは、温暖な気候と豊富な栄養塩類に恵まれると旺盛に繁殖する植物であるため、世界各地の水域では害草とされ、水域によっては航行の妨害、排水障害、親水障害、灌漑施設・洪水調節施設への被害など、様々な水利障害をもたらしている。しかし一方では、その旺盛な繁殖特性から、し尿、畜産、食品加工などの各種有機排水の処理、池・湖沼の水域浄化に利用されている。また、ホテイアオイが重金属類を特異的に吸収し蓄積しやすいという

性質を利用して、それらの除去にも利用されてきた。

ホテイアオイの水質浄化能力を發揮させるためには、利用方法、維持管理方法について十分検討する必要がある。ホテイアオイが水面を覆いつくすと、①大気から水中への酸素供給の減少、②太陽光の遮断による他の水生植物の光合成作用低下など、水域の生態系へ影響を及ぼす可能性がある。また、腐敗したホテイアオイを放置しておくと、植物体からの栄養塩類溶出が起こり、富栄養化・水質悪化を招く結果となる。ホテイアオイの過繁茂を防ぎ、腐敗したホテイアオイは確実に回収するような維持管理が望まれる。

クリーク水質浄化に水生植物を利用する際は、適切な維持管理が行われることが前提となる。

## 6. 本研究のまとめ

本研究では、灌漑期と非灌漑期のクリーク水質特性を比較検討した。特に、水位が低下し水流が停滞する非灌漑期の水質動態に着目するため、ホテイアオイを栽培し室内実験を行った。これらの調査及び実験の結果は、以下のように要約できる。

- ①クリークの水質変動にクリーク植生は大きく影響する。ホテイアオイが繁殖するクリークでは、水質の鉛直分布及び時間変化がほとんど見られなかった。
- ②ホテイアオイは繁殖力が大きく水中からの栄養塩類などの吸収能力が高いが、腐敗が進み茎部や根部などが沈降すると、植物体に蓄積されていた栄養塩類が溶出することが明らかになった。
- ③非灌漑期の水質悪化は、底泥からの栄養塩類溶出も一因であるが、水生植物の腐敗による影響が大きい。腐敗した水生植物の一部が沈降し、底泥となる。

本研究では9月から1月までを実験期間としたが、今後はホテイアオイの生長を考慮して1年を通じた調査及び実験が必要である。またクリークのみを対象とするのではなく、クリーク・水田系として

水質をとらえ、流入・流出を考慮に入れることが今後の課題である。

農業農村整備事業では、環境との調和に配慮した調査・計画が行われており、環境への意識が高まっている。クリークを取り巻く水環境の保全には、地域住民参加型の対策が必要である。具体的には、子どもたちの環境教育の場として利用する、周辺の環境を生かした農村ビオトープとして地域おこしにつなげるなどの方法がある。行政や地域住民が一体となって意識を高め、適切な維持管理を進めていく必要がある。

## 参考文献

- 1) 山本史子：クリーク水質に及ぼす底泥と水生植物の影響，九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻修士論文（2003）
- 2) 西條八束・三田村緒佐武：新編湖沼調査法，講談社サイエンティフィク，53－116（2000）
- 3) 本橋敬之助：水質浄化マニュアル 技術と実例，海文堂，44－56（2001）
- 4) また，論文作成に当たっては，以下の文献を参考にした。
  - ・楠田哲也：自然の浄化機能の強化と制御，技報堂出版，72－86，166－176（2001）
  - ・社団法人農業土木学会：平成10年度曾於東部農業水利事業中岳ダム水質保全検討委託事業報告書（1999）
  - ・水質環境学編集委員会：地域環境工学シリーズ 4 清らかな水のためのサイエンス－水環境学－，農業土木学会，50－66，155－174（1998）
  - ・鈴木光剛：水利システムと水管理，株式会社公共事業通信社，235－252（1987）
  - ・松梨史郎・井野場誠治・下垣久・宮永洋一：手賀沼における流動・水質・底質の時空間シミュレーションと底泥からの栄養塩溶出の水質への影響，土木学会論文集NO.712/II－60，161－173（2002）