

運輸省港湾技術研究所

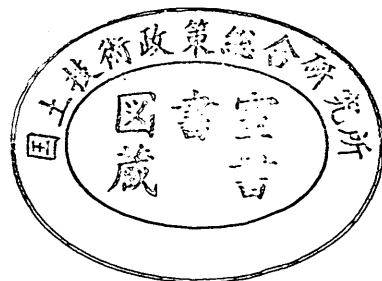
港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 30 NO. 1 MAR. 1991

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I)

第30巻 第1号 (Vol.30, No.1) 1991年3月 (Mar.1991)

目次 (CONTENTS)

1. 遠地津波の外洋伝播計算
.....後藤 智明.....3
(Numerical Simulation of the Trans-oceanic Propagation of Tsunami
.....Chiaki GOTO)
2. 碎波および反射を考慮した波浪変形計算
.....高山 知司・池田 直太・平石 哲也.....21
(Practical Computation Method of Directional Random Wave Transformation
.....Tomotsuka TAKAYAMA, Naota IKEDA and Tetsuya HIRAISHI)
3. 多方向不規則波を用いた波浪変形模型実験
.....高山 知司・池田 直太・小杉 宜史.....69
(Hydraulic Model Test on Wave Diformation by using Directional Random Waves
.....Tomotsuka TAKAYAMA, Naota IKEDA and Yoshifumi KOSUGI)
4. 波の連なりを考慮した長周期波の波高の推定
—波崎海洋研究施設における現地観測における現地観測にもとづく検討—
.....加藤 一正・中村 聡志・池田 直太.....137
(Estimation of Infragravity Waves in Consideration of Wave Groups
—An Examination on Basis of Field Observation at HORF—
.....Kazumasa KATOH, Satoshi NAKAMURA and Naota IKEDA)
5. 現地データによる移動床模型実験の検証
—河原子海岸におけるケース・スタディー—
.....加藤 一正・井上 浩司・柳嶋 慎一.....165
(Inspection of Movable-bed Model Experiments with Field Data
—Case Study at Kwarago Beach—
.....Kazumasa KATOH, Kouji INOUE and Shin-ichi YANAGISHIMA)
6. ヨシ原による水質浄化の特性
.....細川 恭史・三好 英一・古川 恵太.....205
(Characteristics of Water Purification in Coastal Reed Field
.....Yasushi HOSOKAWA, Eiichi MIYOSHI and Keita FURUKAWA)
7. 空港コンクリート舗装の不同沈下管理に関する考察
.....八谷 好高・横田 弘.....239
(Differential Settlement Management of Airport Concrete Pavements
on Reclaimed Ground
.....Yoshitaka HACHIYA and Hiroshi YOKOTA)

8. 大変形する単杭構造による接岸ドルフィンの残留変位と累積疲労損傷度
上田 茂・白石 悟.....267
 (Residual Deflection and Cumulative Fatigue Damage Ratio
 of Breasting Dolphin by Single Pile Structure
Shigeru UEDA and Satoru SHIRAISHI)
9. カラーコンクリートの材料特性に関する研究
 —強度特性, 色彩特性, および耐久性—
福手 勤・山本 邦夫・濱田 秀則.....313
 (A Study on the Material Properties of Coloured Concrete
 —Strength, Colouring, and Durability—
Tsutomu FUKUTE, kunio YAMAMOTO and Hidenori HAMADA)
10. 捨石による基礎マウンドの形状および力学特性に関する考察
口田 登・辻垣 武彦・森田 博史.....347
 (Study on Configuration and Mechanical Properties of Rubble Mounds
Noboru KUTIDA, Takehiko TSUJIGAKI and Hirohumi MORITA)

6. ヨシ原による水質浄化の特性

細川恭史*・三好英一**・古川恵太**

要 旨

沿岸での水質浄化が内湾に及ぼす影響について概観し、内湾湾奥部などの水際で水質浄化能力を高めることの重要性を検討した。水際の浄化作用には各種あるが、在来の沿岸大型水生植物(ヨシ)を用いた栄養塩の除去作用を検討対象とした。底泥粒子および生物体という高濃度栄養塩保持体の挙動に関連し、ヨシ原の懸濁粒子の沈降促進作用・生物への吸収同化作用の2つの作用について検討した。現地での観察と室内実験とを併用し、時間スケールの異なる解析法により作用の大きさの比較を試みた。塩分の共存するときの栄養塩吸収作用の大きさについては、従来ほとんど知られていない。また、ヨシ原内の水理的特徴や沈降特性は未解明であった。

ヨシの成長にともなう栄養塩の吸収同化作用の速度として、三浦半島のヨシ原での現地観察で、1日にヨシ1本当たりNでは 1.2mg/d 、Pでは 0.1mg/d の値を得た。室内栽培実験でも類似の値を得、吸収同化作用は栽培液の塩分・栄養塩濃度・ヨシの大きさによって変化することを確認した。又、秋に枯れた後、海水に浸湿するとPの溶出が起きるが、ヨシ原内干陸部への堆積ではNの再溶出は遅いことがわかった。ヨシ原へのN、P貯留量及び貯留速度は、ヨシの生息密度・面積との積で推定できる。

ヨシ原内の表層流は、水深が浅く流速が遅いという特徴がある。このような流れの中でのヨシ茎の粗度効果を、水路実験と現地仮設水路実験から検討した。その結果、粗度効果は、流速・水位勾配と相互に関連しており、茎の抗力係数を流速・水位などと共に適切に選べれば、流れの推定が可能であることがわかった。又、粒子の沈降拡散状況は、粒子の鉛直濃度分布が一樣とする完全混合モデルに近く、沈降速度がわかれば与えられた速度場で沈降堆積量が予測できることがわかった。仮想沿岸ヨシ原を対象とした数値解析から、ヨシ原の沈降促進効果は、特に微細な粒子に対し顕著であることがわかった。現地ヨシ原でも、ヨシ原域の拡大や粒径分布から沈降促進作用が確認できた。

キーワード：水質，ヨシ，栄養塩，生物作用，水理実験，沈降

* 海洋水理部海水浄化研究室長

** 海洋水理部海水浄化研究室

6. Characteristics of Water Purification in Coastal Reed Field

Yasushi Hosokawa*

Eiichi Miyoshi**

Keita Furukawa**

Synopsis

Studies were carried out for the feasibility of the application of an emergent type of aquatic macrophytes to the water quality improvement along eutrophic coasts. Common Reed (*Phragmites communis*) is selected for its toughness to saline water.

Several investigations have been made with the combination of laboratory experiments and field observation. Nutrients are removed by the complex variety of biological, physical and chemical processes. Among them, nutrient-uptake rate and particles-settling rate were tried to be estimated under coastal environment.

Nitrogen and phosphate are consumed and synthesized at the rate of 1.2 mg-N/day/shoot and 0.1mg-P/day/shoot. Each rate changes slightly with the nutrient concentration, reed size and salinity concentration. Nitrogen release from dry reed in winter is measured to be slow.

Surface flow in reed field is in transitional region close to laminar flow. Mean velocity can be expressed by the superposition of bed roughness and resistance of reed stems. Both of these two effects depend on mean velocity for low Reynolds' number region. We show a numerical estimation method for the mean velocity in reed field. Particle settling and accumulation flux can be also calculated by this method in the coastal flow field with reed.

Key Words : water quality, reed, nutrient, biological activity, hydraulic experiment, settling

* chief of Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

** member of Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

目 次

要 旨	205
1. はじめに	209
2. 内湾水質の改善法と沿岸自浄作用	209
2. 1 内湾の平均水質の規定要因	209
2. 2 内湾沿岸部での自浄作用の役割	210
2. 3 自浄作用の種類と重要さ	210
2. 4 環境容量への影響の検討	211
2. 5 水質浄化促進のための沿岸生物の利用	212
3. ヨシ原の浄化作用	212
3. 1 沿岸大型植物の分類とヨシの特徴	212
3. 2 ヨシの浄化作用	213
3. 3 浄化作用の研究手法	215
4. ヨシの栄養塩吸収除去特性	215
4. 1 ヨシの成長と栄養塩の取り込み	215
4. 2 ヨシの成長の観察手法と結果	216
4. 3 ヨシの栄養塩吸収実験と結果	220
4. 4 枯れヨシの処分方法と栄養塩再溶出量の評価	222
4. 5 ヨシの栄養塩吸収除去特性のまとめ	224
5. ヨシ原での粒子沈降特性	225
5. 1 ヨシ原内の表層流	225
5. 2 円柱粗度のある実験水路での流れ実験	225
5. 3 ヨシ原内水路での粒子沈降実験	227
5. 4 ヨシ原の拡大と堆積規模の検討	231
5. 5 粒子の沈降・堆積の数値計算による検討	231
6. 沿岸ヨシ原の役割	234
6. 1 各作用の規模と予測法	234
6. 2 沿岸ヨシ原の水質浄化の役割	234
7. おわりに	234
参考文献	234
使用記号一覧	236

1. はじめに

閉鎖性内湾における富栄養化の進行は、赤潮、底層貧酸素水塊などの発生に及ぶことがあり、在来生物の生息上や環境保全上の重要な問題となっている。生物の生息条件が厳しくなるにつれて、些細なじょう乱が生物の生存そのものを脅かしかねず、港湾工事にとっても見過ごせない問題となっている。また、都市域と隣接した内湾湾奥海域では、水際線へのアクセスの要請が高いにもかかわらず水際線前面海域の水質は特に悪く、アメニティーを大きく損なっていることが多い。

内湾水質の改善には、流入汚濁負荷、特に富栄養化の原因物質である栄養塩の流入を減らすことがもっとも重要な対策となる。同時に、沿岸での自浄作用を手助けし増大させ、負荷に強い海域とすることも必要であろう。浅海沿岸部での浄化作用は、作用場所、作用原理・機構等で様々なものがある。ここでは、沿岸干潟や河口部によくみられる大型水生植物のヨシを対象に、この植物の存在による水質浄化の特性を調べてみた。

この報告は、先ず2.において沿岸自浄能力を増やすことの内湾水質管理上の意味を述べ、3.においてヨシの特徴と研究法について示す。主要な作用である栄養塩の吸収除去特性を4.で、次いで5.で懸濁粒子の沈下除去特性を検討している。これらの調査結果を取りまとめ、沿岸ヨシ原の役目を6.にて取りまとめている。

2. 内湾水質の改善法と沿岸自浄作用

2. 1 内湾の平均水質の規定要因

内部の水がよく混合し均一の水質濃度になっている内湾を想定してみる。図-1に示すように、海域海水への単位時間当りの負荷重量を W 、単位時間当りの淡水流入量を q 、潮汐作用などによる単位時間当りに換算した外海水の海水交換流入量を Q 、内湾の水体积を V 、内湾の水質を C などとすればこの湾の物質収支が計算できる。ここでは、水質項目に栄養塩濃度（例えばリン）をとる。流入外海水の水質濃度を、0（ゼロ）とする。単位時間当りに流出する内湾水量は $Q+q$ 、流出水質は C であるから、濃度変化は次式となる。

$$d(CV) / dt = W - C(Q+q) - kCV \quad (1)$$

ここで、 k は自浄作用に関する速度係数で、自浄作用は濃度 C の1乗に比例する1次反応式で表せるとしている。1次反応式を以下に示す。

$$dC / dt = -kC \quad (2)$$

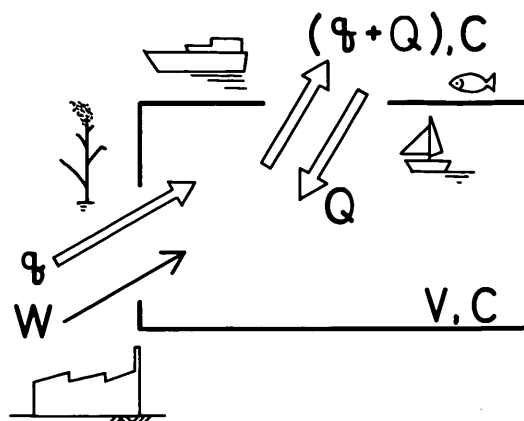


図-1 仮想海域での物質収支（ W ：汚濁負荷， V ：内湾水体积， C ：内湾水質， q ：淡水流入量， Q ：海水交換流入量）

つまり、1次反応式で示される自浄作用は、自浄速度係数(k)が大きいほど、また周辺の汚染物濃度(C)が高いほど、濃度の減少速度が大きい。

夏場の平均濃度のように、長期的な平均濃度に対しては、定常解で推定できる。定常解 C_e は、式(1)の左辺をゼロと置けば求められ、

$$C_e = \frac{W/V}{k + (Q+q)/V} \quad (3)$$

と書ける。 $V/(Q+q)$ は水の湾内平均水理滞留時間 t_0 と置き換えられる。 t_0 の逆数は、見かけの平均海水交換率となる。式(3)は、 t_0 を用いてさらに次のように書き換えられる。

$$C_e = \frac{W/V}{k + (1/t_0)} \quad (4)$$

Vollenweider¹⁾は、湖沼の富栄養化の解析に式(4)を改変して用いており、分子を水面積負荷で表示している。著者らは、夏期の成層化した湾域で有機態リンと無機態リンの定常濃度について、さらに検討している²⁾。自浄作用として、沈降、微生物分解、負の自浄作用として1次生産（有機物の内部生産）を考慮し、負荷として底泥からの溶出なども考慮している。これらの諸作用を1次反応式で表示し、式(1)の右辺第3項を書き直している。得られた定常解は、基本的には式(4)と相似な形となり、 k 値の代わりに各自浄作用に対する速度係数の和が入り、 W には溶出負荷も含まれるようになる。大阪湾奥部に対して地理的な条件を代入し、パラメーターの感度解析も実

施している。結局、式(4)の k は各自浄係数を加えた見かけの自浄係数であり、 W は底泥からの溶出も含んだ総括負荷を表示していることになる。

式(4)は、内湾の平均水質 C_0 について次の事を教えてくれる。

① C_0 は流入負荷 W に比例し、受け入れ海域の水体積 V に反比例し、

② C_0 は、自浄速度係数 k と平均海水交換率 $1/t_0$ との和に反比例する。

②では、自浄係数(k)と平均海水交換率($1/t_0$)とを比較し、いずれか一方が卓越しているシステムでは他方は水質改善への寄与が小さいことを示している。例えば、潮通しの良い海域では多少の k 値の増加では水質の変化が小さい事になる。通常の内湾でみると、海水の交換率は1日あたり0.01~0.1/dのオーダーの速さ(海水交換の日数が10~100日のオーダー)であり、自浄作用や生産の速度係数は、やはり0.01~0.1/d程度である。内湾全体の平均的な水質に対しては、 k も $1/t_0$ も両者ともに重要であることがわかる。

2. 2 内湾沿岸部での自浄作用の役割

前節での検討は、内湾全体を一つの均一な水塊と仮定した場合に成り立つ議論である。実際の湾域では、平面的にも鉛直的にも水質濃度の分布が観測される。夏期の赤潮時には、有機物の生産速度が $1/d$ に近付くことも局所的に起こり、赤潮プランクトンの挙動が水質を大きく規定してしまうこともある。また、東京湾湾奥の荒川河口沖では塩分濃度が15~30‰、大阪湾湾奥淀川河口部では20~30‰と言ったように、湾奥部では外洋の塩分(約35‰)に比べて塩分濃度が低く、淡水の混合割合が大きくなっている。湾奥部沿岸では、陸域からの負荷の作用や流入河川の影響を大きく受けることになる。潮間帯から、水深2~3 mにかけては、生物相や活性も独特であり、多様な水質浄化の作用が認められる。

湾口部での海水交換の促進や沿岸部での自浄作用の増大が、湾内の沿岸から沖合いまでの各々の海域で、どの程度の効果を持っているのかについての定量的評価は難しい。堀江³⁾は、東京湾沿岸の護岸形状を砂浜としたり直立護岸とした場合の湾内水質の変化を、数値計算により思考実験した。この計算結果より、①水質の濃度変化は湾奥ほど大きく、湾口部で小さい。②水質の変化は沿岸近辺に留まらず湾内中央部にまで及ぶ。等の特徴が得られた。自浄作用が式(2)に示される1次反応式に従うのであれば、汚染物質濃度の高い場所での k 値の増大は平均的な濃度場での k 値の増大よりも効果が大きくなる。上

記①の結果は、こうした事情によるものと思われる。濃度の改善幅と k 値との定量的な応答関係性は湾の水理構造や水質特性に依存する。モデルで与えている k 値の妥当性・自浄作用場の広がり等についてさらに検討する必要があるが、流入負荷の影響が大きい沿岸浅海域では、自浄作用の促進による水質改善効果が大きく表れ易いことは確認できた。沿岸部での自浄作用の促進がその場の水質改善のみならず、湾内水質の改善にとっても重要な役割があることも理解できる。

2. 3 自浄作用の種類と重要さ

それでは、沿岸での如何なる作用が自浄作用として重要なのであろうか。問題としている水質項目と汚濁の機構とによって異なる。一般に、対象海域内の物質循環にとって大きな除去量(単位時間当りの汚染物質の除去速度)となる作用が特に重要となる。汚染物質の量(m)は、濃度(C)と体積(V)との積で表される。式(2)の両辺に、自浄作用が生起している水体積(V)を掛ければ除去速度(dm/dt)が求められる。

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(CV)}{dt} = -kCV \quad (5)$$

この式でみると、除去速度が大きいとは、 k の大きな作用で、作用の起こっている水域 V も広く、 C の大きな場所での作用と言うことになる。

まず、COD等として測定される有機物について考えてみる。有機物の除去は、①水中の微生物による分解、②底泥や岩礁に付着している微生物による分解、③粒状有機物の沈降、④大型底生生物や貝などによる餌としての粒状有機物の吸収・同化、⑤特殊な有機物の紫外線の作用による光分解、⑥難溶解有機物の揮発などが考えられる。①の作用は微生物量が少なく k 値が小さい、⑤、⑥の作用はCODに占める対象有機物濃度が小さい。沿岸でのCOD除去量が大きい作用は、②、③、④等と言うことになる。ただし、③の沈降作用や④の生物の増殖は、大量に起こるとかえって生態系や水質・底質に悪影響を及ぼすことがあり、必ずしもいつも有機物の除去による自浄作用の側面ばかりを有しているものではない。未分解有機物や同化有機物の、蓄積と分解・酸素消費・嫌気化作用の大きさについての評価も重要となる。

次いで、富栄養化の原因である栄養塩について、沿岸での物質循環機構を考えてみる。栄養塩は、陸域からと底泥からの溶出とによって水域内に持ち込まれる。沿岸部での栄養塩の水塊からの除去機構は、①粒子状の栄養塩の沈降、②生物による取り込み、③脱窒による大気へ

の揮散等である。取り込んだ栄養塩を高濃度に抱えた生物は、底面などについて生息しているかあるいは浮遊していることになる。除去されなかった溶解性栄養塩と、浮遊している生物体・粒状体の一部とは、沖合いに流出して行く。結局、沖合いへの負荷を減らす沿岸での機構は、a)陸から流入した栄養塩が水質上安定な形となって水系から除去されること、または、b)栄養塩が高濃度に特定の場所に貯留され沖合いに運ばれないこと、となる。a)での安定な形としては、固体(沈降堆積粒子、非浮遊生物体)、大気中ガス、生物に利用不可能な溶解化合物などがある。いずれも、海水への再溶解と生物的可利用化の過程の大きさが、除去作用の大きさの評価と共に重要である。

以上の除去作用を担っている機構は、生物が介在するものと非生物的なものがある。ほとんどの生物は、周辺の栄養塩を何らかの形で自己の生物体へと作り替えている。中でも、水質の変化にとって重要な生物作用は、①単位生物量当りの栄養塩の取り込み速度の大きな作用や、②それほど大きな速度でなくとも作用生物が密生して生息していたり、広く分布しているために総取り込み量は大きくなる作用で、③濃度の高い場所での作用である。潮間帯から水深10m 辺りまでの浅場は、底生生物の種も量も多く活発な生物活動が営まれている場とされ、海底面が緩傾斜であれば接している水体積に対する浅場面積の比も大きくなる。沿岸海底面付近では流入栄養塩や有機物の濃度も高いことから、底生生物の取り込み作用も大きいと予想される。

非生物的作用についても、反応速度が速かったり、広い地域で生起するような作用に着目する必要がある。沈降作用は、粒子と海水の比重差に起因する物理的過程であるが、①沿岸域では流入淡水に比べて塩分が高く凝集作用が大きく沈降速度(w_0)が増加すること、②沿岸では水深(h)が浅くすぐ底面に到達すること、などから沈降による粒子除去の速度係数($k=w_0/h$)が沖合いよりも速くなる。さらに、③沿岸では懸濁濃度(C)も高く、各懸濁粒子の含有栄養塩や有機物の濃度も高いことから除去のフラックスが大きく、重要な浄化作用の一つである。粒子が、溶解性の物質をよく吸着する場合には、溶解物の除去にとっても重要となる。

沿岸域での自浄作用としては、様々の種類・機構があると予想されるが、生物体もしくは粒子が関係する浅場での機構には注意しなければいけないことがうかがえる。

2. 4 環境容量への影響の検討

式(5)は、単位時間当りの汚濁物の除去速度を表してい

る。沿岸に単位時間当りに流入する汚濁負荷が除去速度と等しいとき、その水域での濃度 C は定常値を維持することとなる。汚濁物質として、分解除去されればそれ以上水質に影響しなくなるCODを考えてみる。目標水質濃度を C^* とすると、積(kC^*V)に等しいだけの負荷を水域は引き受けられることになる。一般に、この値を環境容量と称している。1日当り1人当りの汚濁負荷量原単位で除してやると、集水域に定住できる適正人口(即ち人口容量)が推定できることになる。既に、式(4)で検討したように、この議論は厳密には、外海水との交換が無視できかつ水域水質が均一な水系(例えば湖沼)で成立する。

式(1)に戻って考えれば、内湾では、式(1)の右辺の第2、3項の和が単位時間当りの汚濁物の除去速度となる。従来、内湾の環境容量を増大するための主要な政策手段として、湾口での海水交換の促進(Q の増加)が検討されてきた。内湾湾奥の限られた海域にとっては、自浄作用の促進(k の増加)によっても環境容量の向上が図られる可能性があり、環境容量の概念の整理とともに技術的検討が必要であることがわかる。

さらに、陸域での人間の活動と外部の環境との境界を水際線に求め、内湾から外洋へと至る環境への負荷を拡散型の対策によって増やすのではなく、境界水際線から陸域へのフィードバックを考えるクローズドシステム型の対策により社会の構造や生活の仕方を変えるべきだとの主張⁴⁾もある。この主張によれば、外海水との交換促進は、①外海への汚染物質の流出を促進することになり、②境界を広く取る(V が大きくなる)ことになり見かけ上 C^* もしくは C_e が殆ど上昇することなく負荷(W)が増え、汚染物質の種類によっては必ずしも環境の保全のための容量設定に結び付かないとしている。逆に、増大する負荷を陸域もしくは境界部にとどめ、人間の活動や生活に対し受け入れられる限度迄を、上記の容量とは区別した「環境容量」とすべきとしている。水際線部に汚染物質を貯留し分解・安定化することができれば、湾口から外海への負荷を増やさずに済む。また、水際線部に貯留し・安定化した汚染物質を、陸域に戻し再利用できれば社会的に閉じたサイクルが形成できる。こうして、外への影響を増やさずに内部で処理できる社会システムや生活方法への、改変へのきっかけとなるであろうものである。環境政策のあり方に関するこうした提言・主張も、同じく境界部処理の種々の技術的方策に裏打ちされることが必要であらう。

2. 5 水質浄化促進のための沿岸生物の利用

以上の検討で沿岸に生息する生物等を利用し、自然の浄化能力を活用して栄養塩の負荷削減を図ることの重要性が理解できた。栄養塩の除去を目的として生物作用を利用するための具備要件をまとめ直すと以下になる。

栄養塩除去効率の観点から、①成長が速く取り込み速度のなるべく大きいこと。できれば生物体として広い範囲に密生していること。②水系への栄養塩の再回帰が小さく、生物体又はその枯死体などとして安定していること。あるいは、容易に陸上に回収し再利用できること。③その生物の存在が、他の生物の取り込み作用や、非生物学的な浄化作用を保証し、促進すること。

一方、維持管理の面からは、④その海域での気候や季節変動にも強く、手を加えなくても生息・繁殖して行くこと。⑤その海域への移植が容易であること。他の在来生物への影響が少ないこと。等である。

こうした条件さえ満足できれば、どのような生物でも浄化の作用を担える事になる。わが国沿岸に広く分布し、成長が速く、よく目につく自然な生物として、アサリやイガイ等の貝類⁹⁾・アオサ等の大型藻類・沿岸のヨシ等の大型植物も有力である。②の条件からは、脱窒菌による脱窒作用も注目される。ここではヨシをとりあげ、浄化の機構と効率を検討した。

わが国沿岸にも広く分布し、水際線付近から水深1 m以浅域に生息している。図-2にヨシの形態を示す。地下茎は良く発達し、泥中の深さ10cm~1 m程まで深くはいまわる。地上茎は中空のストロー状で、春に芽生え夏にかけて背丈1~3 m程度にまで達する。茎径は3~10 mm程度である。葉は細長く、葉鞘を経て茎より左右交互に伸びている^{8,9,10,11)}。

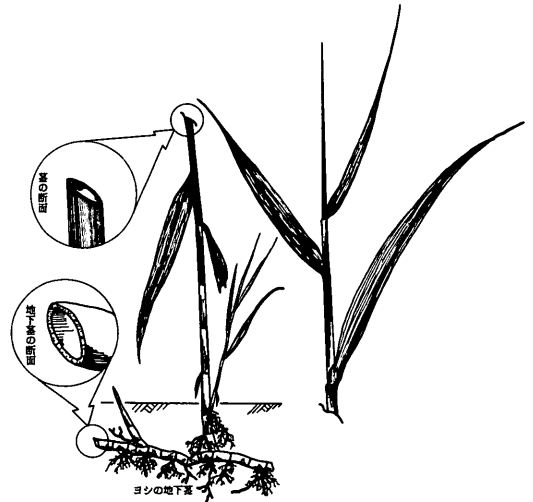


図-2 沿岸ヨシの形態

3. ヨシ原の浄化作用

3. 1 沿岸大型植物の分類とヨシの特徴

海域沿岸に生息する植物には水中を浮遊するプランクトンのような微細な単細胞植物から、根・茎・葉の区別を持った大型の高等植物まで各種のものがある。大型の高等水生植物は、生息の形態によっていくつかに分類される⁶⁾。1)葉を水面に広げ水と一緒に移動し漂う浮漂性植物、2)底面に根を張り葉や茎を水中に直立もしくは浮遊させている水没した沈水性植物、3)底面に根を張り、茎または葉を水上にまでのばし直立している抽水性植物、等である。

波や流れが大きく、底面の砂が常に移動している海域では、ほとんど高等水生植物は見あたらない。沿岸のやや静穏な場を中心に、干潟や砂浜の潮間帯前後に見られることが多い。高等水生植物のうちでも抽水性植物は、岸近くの浅い水際に良くみられる。沿岸に生息する塩分に強い抽水性の植物には、フトイ、ヨシ、アイアシ、イグサ、ヒメガマ、ウキヤガラ等がある⁷⁾。

ヨシはイネ科に属し、塩分や酸性にも強く、亜寒帯から温帯までの広い気候範囲にわたって分布がみられる。

春には地下茎の節部より出芽し、出芽は秋まで観察される。地上茎は豊富な日照と水分に支えられると急速に成長する。初夏より複穂状花序を頂部につけ始める。花には雄しべ雌しべが観察される。穂が出るのと徐々に枯れ始め、秋には立ち枯れた状態になる。地下茎部は越冬し、春に再び出芽する。地下茎部は横に匍匐しながら節を作り、根毛や芽を伸ばしながら増えて行く。また、穂より飛び出した種子でも増える。

立ち枯れた茎は葉を落とし、強風・高波浪や大型動物等の作用により倒れ地上に堆積する。規模の大きいヨシ原では、周辺のヨシにより内部には大気や地表水の運動が抑えられ静穏な状況域が作られる¹²⁾。こうしたキャノピー効果により、立ち枯れたまま1~2年は倒れないとの湖畔での観察例¹³⁾もある。この例では、夏期の最大繁茂期重量のうち75%が枯れたまま残っていたとの事である。地表に倒れたヨシは、干陸部に打ち上げられたり沖合に流出することもあるが、やがて土壌となる。潮間帯より陸側では、枯れヨシが堆積し、歩くとフワフワとする柔らかい土壌となっているところもある。こうした土壌

中には、ヨシの茎の破片や繊維組織様のものが多く含まれているのが観察できる。

沿岸部でのヨシ原の分布を踏査した筆者らの例¹⁴⁾では、生育地の土壌は粒径の細かい粘土質から粗い砂レキ質まで様々であった。粘土質底泥は有機分に富み、ごく表層を除いて概して嫌氣的な状態のものが多かった。周辺表層水の塩分濃度は、おおむね20‰以下であった。背丈は2～3 m・茎の地際径は5～10mmと、各地ともほぼ似た値であった。

底泥泥質を選ばず、どのような土壌でも生息できる理由の一つにヨシの酸素供給能¹⁵⁾がある。地上茎の中空部気管を経て、地下の毛細根へと運ばれ土中に供給される。この酸素が、毛細根周りの嫌気腐敗を防ぎ、生息を可能にしている。酸素の供給速度は、地際茎気管部での酸素濃度と、大気中濃度との差に比例するとされる。この比例常数は通導係数とも呼ばれている。淡水湿地のヨシでの実測例¹⁶⁾では、 $1 \sim 2 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / \text{shoot} / \text{s}$ 程度とされている。地際茎での酸素濃度が大気濃度の2割とすると、1本の茎当り1日当り25～50mgの酸素が土中に供給されることになる。この酸素は通常直ちに土壌中の有機物に消費されてしまい、底泥全体では嫌氣的状態が維持されている。つまり、ヨシの生息している有機土壌中には、局所な好気領域が嫌気環境に接して存在することになる。

ヨシは水分の蒸散量の大きいことでも知られている。根から吸収された水分は、1日当り茎1本あたり40～50 ml 大気中へと蒸散される¹⁷⁾。

3. 2 ヨシの浄化作用

ヨシの生理的な特性および密生している場の特性から、ヨシまたはヨシ原の浄化作用や機構が想定される。Brix¹⁸⁾は、生物作用・化学作用など作用機構に応じて分類している。ここでは、浄化作用の種類について2.3での分類を参考にし、表一1のように分類してみる。以下に各作用を概観する。

(1)沈降促進作用

ヨシ自体には自ら粒状物に働きかけ、これを捕捉したり凝集させる作用を持つてはいない。しかし、ヨシの茎が密集して高密度に林立しているヨシ原では、ただの水表面とは水理的様相がやや異なる。茎が水の流れを遮るため浅い緩やかな流れはいつそう静穏化し、微細粒子の沈降を促進し、一度沈積した粒子の再懸濁を防ぐとされている。また、発達した地下茎や根毛は地形の変状や侵食に強いとされている。Takedaら¹⁹⁾は蒲生干潟のヨシ原で底泥の粒径分布を調べた。その結果、ヨシ原の水際部から潮干帯上部にかけて細かいシルト・粘土の堆積がみられ微細粒子の沈降促進と再懸濁防止の効果が示唆されたとしている。従来、河川高水敷等のヨシは洪水時の通水能に対する阻害要因としてみられてきた。そのため、洪水時の大きな流速での粗度効果の検討^{20,21)}はあるが、通常時の微弱な流れの中での水理特性の検討例^{22,23)}は少ない。ヨシ原や湿原での浅い表層流れは、水深を代表長さに採ったレイノルズ数で $Re = \sim 10^2 \sim 10^3$ 程度となり、ちょうど層流と乱流の遷移領域にはいる。このため、乱流開水路流れの平均流速を表すマニング式は、ヨシ原流れに直接適用することが難しい。しかし、湿原・干潟・

表一1 ヨシの浄化作用

浄化作用	対 象 物	最終的先行	変化・変質の内容	浄化作用を担うもの	
				生 物	場 所
沈降促進作用	粒状物, 濁り	底泥沈積	水中浮遊状態から底泥表面への沈降。沈積後安定し再浮遊しにくくなること。	ヨシの茎部, 根毛, 芽	ヨシ原内の水中
吸収同化作用	栄養塩類	ヨシの植物体	土壌中の間隙水栄養塩の吸収と, 光合成による同化。	ヨシの根, 茎, 葉	ヨシ原内の土中～地上部
酸素供給作用	重金属類 酸 素	土壌中	土壌中の間隙水含有物の吸収。大気中の酸素を気管等を経て土中の根毛へ運搬。	ヨシの茎, 根	土中の根毛周辺
硝化作用	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	大気, 水, もしくはヨシ根毛から酸素の補給を受け, $\text{NH}_4\text{-N}$ を酸化し $\text{NO}_3\text{-N}$ とする。	土中の硝化菌	土中の根毛周辺
脱窒作用	$\text{NO}_3\text{-N}$	大気中 N_2	$\text{NO}_3\text{-N}$ を嫌氣的環境下で還元し, 生成 N_2 がガスとして大気中に放出。	土中の脱窒菌	根毛周辺を除く土中
分解作用	有機物 COD, Org-N等	CO_2 $\text{NH}_4\text{-N}$	微生物による好氣的もしくは嫌氣的な分解。	分解バクテリア	土中

ヨシ原などでの水質変化予測に際しては、他に適当な方法がないので便宜的にマニング式を援用している例^{23,24)}が多く、粗度係数は実測値を用いるなどしている。

粒状物の沈降作用の大きさは流れの状況や粒子の大きさによって変化するため、ヨシ原での沈降作用の大きさの測定例や評価例はあまりない。僅かに、ヨシ原内の流速を周辺条件から切り離して仮定し、粒子の沈降や栄養塩の取り込み仮想速度を独立に与えての算定例^{23,25)}などがある程度である。

(2)吸収同化作用

ヨシは栄養塩を根から取り込み自己の体へと同化する。ヨシ1本当りの吸収同化量は、ヨシの成長の結果葉・茎などへと合成された生物体量で見積れる。その場所の吸収量は、植生密度を考慮した単位時間当りの取り込みフラックス量として表される。淡水の水生植物を中心に、平均的な植生密度での栄養塩の植物体への貯留量(Maximum Standing Crop)と年当りの収量(同化フラックス)との測定例^{26~29)}を表2にまとめてみる。

1年に1回の全量収穫をするときには、貯留量と年当りの取り込み速度とは同じ値となる。成長につれ途中で刈り取ったりあひる等に補食させれば再び芽生えるので、面積当りの年間取り込み量は最大貯留量より増えることになる。ヨシについても、春の終わりに1~2度刈取りをすると、秋までの年間の栄養塩取り込み量が増えると

の試算³⁰⁾が示されている。一方、自己の体の一部に栄養塩を蓄えて越冬し翌春の生育に蓄えた栄養を使えば、その年の根からの吸収量は生物体内の総貯留量よりも小さい。ヨシについては、秋に地上から地下茎へと同化栄養の移動と貯蓄が行われ、春の成長期に再び利用されると言われている。毎冬の地下への貯留量は、地上での成長必要量の25~50%との試算¹³⁾もある。秋口に地上の茎・葉の栄養含有率が低下することは認められても、地下茎の含有量の季節変化や、地下茎の成長の履歴の観測が困難であり、定量的な測定はほとんどなされていない。また、水中に葉を広げる沈水性植物では、根からの吸収栄養を葉より溶出させるとされている。沈水性植物は、底泥中に安定して存在していた栄養塩をくみ出し、葉から水中へと供給するポンプの役割があるとの意見も出てくる。この場合、年間の根からの取り込み値は、最大貯留量を溶出分だけ上回る。ほとんどの葉を空中に広げている抽水性植物に対しては、茎が水に接しているのだが、生きている植物体からの溶出は無視できるとされている³¹⁾。特に浅い水際で生息するヨシでは、極めて少ない。

表2のヨシに関する値は、地表部の茎や葉についての値である。自然のヨシ原では、地表部に100~400kg/haの窒素、10~50kg/haのリンが貯留されている。取り込み速度は、地下貯留量の寄与を無視している。貯留量・取り込み速度ともに、研究者により観測場所や条件によ

表2 淡水性水生植物の栄養塩吸収同化作用

植物の種類	栄養塩の貯留量と取り込み速度				栽培条件
	窒素		リン		
	貯留量	取り込み速度	貯留量	取り込み速度	
[浮漂性]	kg/ha	kg/ha/y	kg/ha	kg/ha/y	
ホテイアオイ ²⁶⁾ (<i>Eichhornia crassipes</i>)	300～900	1950～5850	60～180	350～1125	
ホテイアオイ ²⁷⁾ (<i>Eichhornia crassipes</i>)	—	—	—	600	
アオウキクサ ²⁶⁾ (<i>Lemna spp.</i>)	4～50	350～1200	1～16	116～400	
[抽水性]					
イグサ ²⁶⁾ (<i>Juncus</i>)	200～300	800	40	110	
ガマ ²⁶⁾ (<i>Typha spp.</i>)	250～1560	600～2630	45～375	75～403	
ヨシ ²⁶⁾ (<i>Phragmites australies</i>)	140～430	225	14～53	35	
ヨシ ²⁸⁾ (高栄養負荷ポット栽培)	720	—	67	—	150本/m ² T-N 95mg/l T-P 10mg/l
ヨシ ²⁹⁾	—	200～400	—	20～45	T-N 0.8～2.0mg/l T-P 0.04～1.0mg/l

り大きくバラつく。塩分のある場所での貯留量の測定例はほとんどない。

自然のヨシ原では、地上茎は秋に立ち枯れた後やがて倒れ堆積する。枯れた後の茎や葉からの栄養塩の再溶解については、測定例が少ない。倒壊した茎はセルロース等の分解されにくい成分を多く含み、かつ N、P に対し炭素のみを多く含むため微生物分解を受けにくいとされている。淡水ヨシ原では、枯れ茎中の含有有機物を半分解するのに要する時間は数カ月から 1 年以上かかるとの試算¹³⁾もある。この場合、同化された有機物のかなりの部分が未分解のまま土中に堆積し埋没することとなる。また、堆積ヨシを粉碎・分解したり、ヨシ破片を補食し成長する動物等もヨシ原には多く存在する。ヨシ原の生態系の連鎖の中で、栄養塩の循環を評価する試みは、栗原などによって行われている^{9,10,11)}。しかし、その詳細は未だ不明な点が多く、定量的評価は遅れている。

(3) 酸素供給作用

酸素の供給は、栄養塩を直接には除去しない。土壌中の有機物等の酸化分解には必要となる。

(4) 硝化作用

酸素供給作用のおかげで、毛根周辺で有機態窒素・アンモニア態窒素の酸化が起きている。この酸化作用を硝化作用と呼び、最終的には硝酸態窒素が生成される。硝化菌の活性と酸素供給速度とが硝化の速度を大きく決めているが、硝化速度の定量評価は難しい。

(5) 脱窒作用

硝化作用のおかげで、硝酸態窒素が作られる。硝酸態窒素が嫌気環境に接し、結合していた酸素分子が取り去られると、窒素は窒素分子 (N_2) として遊離して大気中に逃げて行く。これが脱窒作用である。干潟や河口有機底泥中等では、脱窒の作用が起きておりそのおおきさは $50 \sim 100 \text{ mgN/m}^2/\text{d}$ 程度³²⁾とされることが多い。作用の場所が遍在しているためか、ヨシ原での測定例は少ない。この作用が大きい場所では、底泥中の含有 N/P 比が通常の 7~10 程度の値に対し、やや小さくなる傾向がある。

(6) 有機物分解作用

ヨシ原流入有機物 (BOD や COD) が、流下後どれほど減ったかについての測定例³³⁾はあるものの、土壌中の分解機構や、ヨシの酸素供給作用との関連を定量的に示した研究はない。

こうした作用を下水の処理に用いようとする研究が、近年ヨーロッパを中心に進められてきている。多くは、根域法 (Root Zone Method)¹⁸⁾と呼ばれる方法で、地中にレキを積み表層にヨシを密生させた場に、2 次処理

水を地下浸透させ掛け流すものである。上記(2)による栄養塩除去と、(3)、(6)による有機物除去、さらにレキによる粒子の除去を狙ったものである。運転条件や所要規模についてのデータ取得のため、実スケールに近い実験が行われている^{34,35,36)}。

3. 3 浄化作用の研究手法

表一 1 に見られるように、ヨシもしくはヨシ原の浄化作用は、諸機構が複雑に関連し合う作用である。現在、個々の機構を分離して評価することが難しく、時間スケールの大きく異なる現象が混在している。そこで、自然のヨシもしくはヨシ原の様子を観察と、実験室での栽培実験などと併用して研究を進めることとした。前者は、比較的長時間での変化を平均的に把握するのに適しており、後者は、個々の機構が様々の環境条件下でどう影響されるかの比較に適している。

内湾への栄養負荷を削減する作用のうち、①ヨシ植物体への栄養塩の吸収取り込みの役割と、②粒状物の沈下堆積の促進作用との 2 作用を中心に検討を進めた。2.3 に示したように、高濃度で栄養塩を保持している植物体と粒子との浅場での挙動解析が、沿岸水質の改善の観点からまず必要と考えたからである。

4. ヨシの栄養塩吸収除去特性

4. 1 ヨシの成長と栄養塩の取り込み

ヨシの成長後の背丈や地上茎の太さは、全国的にみてそれほど大きくは変化しないようである。淡水域での栄養塩取り込みは、表一 2 に示された程度の速度であり、栽培栄養条件でも変動するらしい。

1 年を成長の基本周期とするヨシでは、初夏の最も成長の進んだ時期に、最も大量の栄養塩を植物体として同化し貯留した事になる。最大の貯留量は、現場ヨシ原での成長の観察により評価できる。成長の期間で最大貯留量を割れば、成長期間の平均的な栄養塩取り込み速度となる。

栄養塩の取り込みは、ヨシの置かれた成長段階・環境条件・地中の栄養条件などによっても変動する可能性がある。特に、沿岸での生育には土壌間隙水中の塩分濃度の影響が大きい可能性がある。こうした影響は、他の条件をそろえた室内栽培実験で比較検討できる。室内での栽培に際しては、現場ヨシ原での生息条件の測定と、なるべくその条件に近い環境の再現が必要になる。

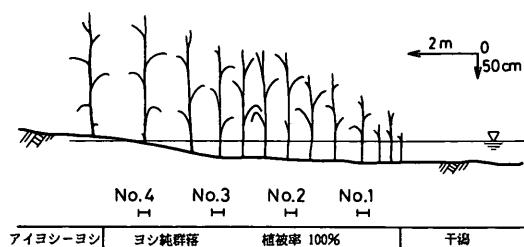
以下に、現場ヨシの観察による検討結果と、室内栽培実験による検討結果とを示す。

4. 2 ヨシの成長の観察手法と結果

(1) 観察対象ヨシ原

観察の対象としたヨシ原は、三浦半島の先端に近い東京湾湾口部江奈湾の松輪地区の干潟である。ヨシ原の位置図を図一3に示す。江奈湾の二次湾として東側を開口し、水深の浅い静穏な干潟を形成している。開口部から湾奥までの干潟部は約4.3haの面積がある。湾奥部南岸から西岸にかけてと、小河川を挟んで西岸から北岸にかけて水際線に添って0.3haのヨシ原が形成されている。ヨシ原の中心になるのは南岸で、ヨシ原背後は低い干陸部となっている。さらに南には崖が控え、小山が迫っている。崖下には地下水の湧水が認められ、干陸部の一部を潤している。干潟西側の河川は晴天時 $1 \sim 4 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ 程度の流量があり、主に背後畑地の排水などを集めて流れている。河川水は、低潮時には干潟のミズミチを流れるが、ミズミチは蛇行し少しずつ位置を移動させている。干潟内底泥は非常に軟弱で水をよく含んでいる。表層は黄褐色から黒褐色を呈しているが少し掘ると黒い嫌気的な底泥となる。この干潟部には、蟹や有孔虫類・貧毛類のほか、線虫類を中心にメイオベントス・付着珪藻が認められる。この干潟部を対象にした底生生物分布調査例³⁷⁾でも、上記の生物が確認されている。

南岸ヨシ原の植生を図一4に示す。水際10m程の幅でヨシの純群落があり、背後の干陸側ではアイアシが混在してくる、さらに陸側は、年間を通して1度も海水が侵入しなくなる。雑草地となり松なども見られるようになる。水際部のヨシは、高潮時に30~40cm程度の水深とな



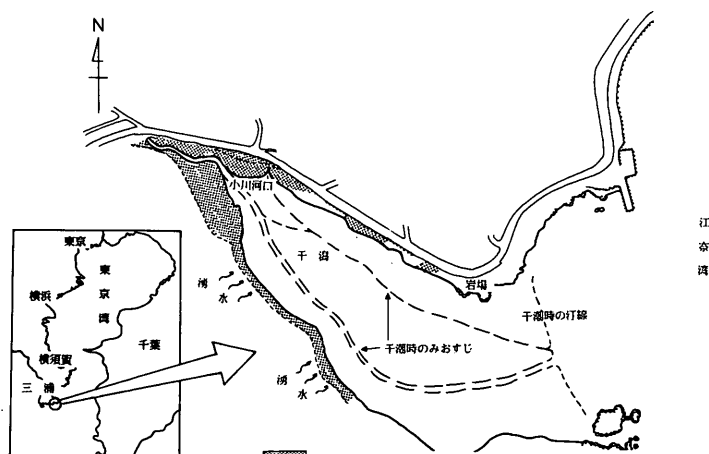
図一4 松輪地区南岸ヨシ原の植生

る位置まで前進している。

(2) 観察の項目と方法

a) ヨシ生息地の環境条件として、土壌の性質と間隙水の性状を調べた。採泥は夏期に実施し、塩化ビニル管を用いたコアサンプラーもしくはスコップによる表層30cmまでの採泥とした。採泥後直ちに実験室に持ち帰り、N、Pの含有量及び間隙水の分析に供した。N、Pの含有量は、ケルダール分解による方法を用いた。間隙水は遠心分離法により分離後、海洋観測指針³⁸⁾による方法で分析した。また含水率、強熱減量についてJIS³⁹⁾による方法で分析した。塩分は、コアサンプルを凍結し深さごとに分割後間隙水を採取し、塩分計で測定している。

b) ヨシの成長の様子と栄養塩の取り込みの状況を、出芽時から立ち枯れ時まで経時的に観察した。図一4に示すラインに沿ってNo. 1~4までの測点を決め、各点に50cm角の枠(コードラート)を埋め込んだ。この枠内の



図一3 三浦市松輪地区の観察対象ヨシ原

ヨシに出芽順に番号を付し、地上茎密度・背丈・地際径・葉の枚数・色合いなどを、おおむね月に1度の頻度で観察した。別に、季節を変えた何回かの時期に様々の大きさのヨシを地際より刈り取り、背丈と重量との関係・背丈と葉面積との関係等を調べた。また、ヨシの各部位に含有されているN・Pの含有量を分析した。N・Pの分析法は、底泥に対する方法と同じ方法を用いた。乾重量は、20℃恒温室中で緩く風を当てながら2週間風乾後恒量になるまで毎日風乾ひょう量をくり返している。葉面積は、採取直後の葉を複写機で複写し、複写像の面積を重量法もしくは方眼紙などで測定した。

(3)観察結果

a) ヨシ原内を10cmほど掘るとヨシの地下茎や毛根が多数見られ、地下茎は深さ1m近くまで達しているものもある。地下茎の太さは、同じヨシ原内でも分布がありヨシ原周辺部で細いようである。地下茎や毛根を取り除いた周辺底泥の泥質を、表-3に示す。ヨシ原内外ともに、有機分に富み含水率の大きな微細泥であることがわかる。N・Pの含有量も大きく、特にPが高濃度に含まれている。ヨシ原外の干潟泥には、リン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)や、窒素が多く含まれており、アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)の濃度が高い。ヨシ原内泥の間隙水中には、リン酸態リンとアンモニア態窒素が含まれている。いずれの底泥も嫌氣的であることを示している。硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)の濃度からは、ヨシ原内底泥でやや嫌気性が強い可能性がある。この表には、後述の仙台湾蒲生地区で採取した、ヨシ原外の入り江海底泥の分析結果も掲げた。これと比較すると、松輪地区ヨシ原の底泥はN/P比がかなり小さく、P濃度に比してN濃度が低い。蒲生入り江よりも強い脱窒作用を受けていることを予想させる。

ヨシ原内先端部の位置での間隙水塩分の測定結果を図示すると、図-5のようになる。この位置では、満潮時水深が地表上30cmとなり、図示した結果は満潮時に採泥したサンプルについての鉛直分布である。ごく表層の塩分濃度は直上水濃度に近いものの、10cm程の深さか

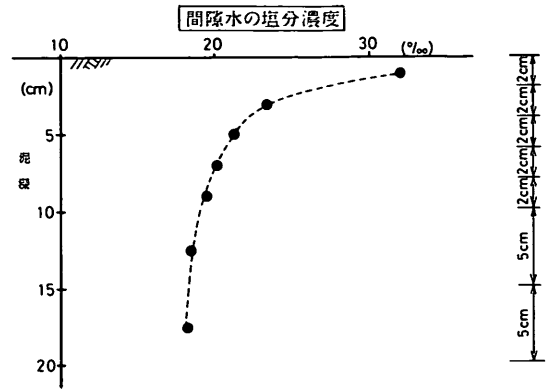


図-5 ヨシ原内底泥の間隙水塩分鉛直分布

らは塩分濃度は20‰を下回り、海水の浸透の影響が少ないことをうかがわせる。

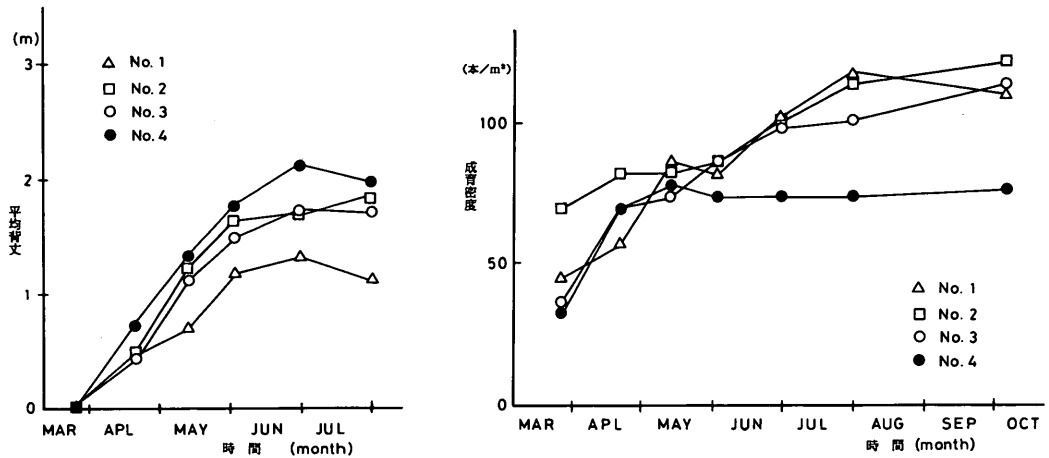
b) ヨシ原内のヨシの平均背丈と地上茎の生息密度の経時変化を図-6に示す。芽ぶきは既に2から3月に始まり、3から5月に出現本数が増える。出芽後6月にかけて背丈が伸び、下部の葉が枯れ落ちながらも7月には背丈がピークに達する。8月から9月にかけて出穂し枯れてゆく。陸側のNo. 4地点では、生息密度が低い背丈は高い傾向がある。海側のNo. 1地点では背丈が低い。

1987年2月から9月にかけての刈り取り測定値に基づき、背丈の伸びと葉面積、湿重量の関係をプロットすると図-7となる。この地区では、茎の背丈が約50cm程に達すると葉を伸ばし広げ始める。ヨシ体のサイズとして背丈でほぼ代表でき、背丈から湿重量を推定できることがわかる。そこで、図-6、7の両結果をもとに、単位面積当たりのヨシの湿重量をプロットすると図-8の様な季節変化が得られる。地上部の生育湿重量は春から初夏にかけて増加し、7～8月にピークとなる。

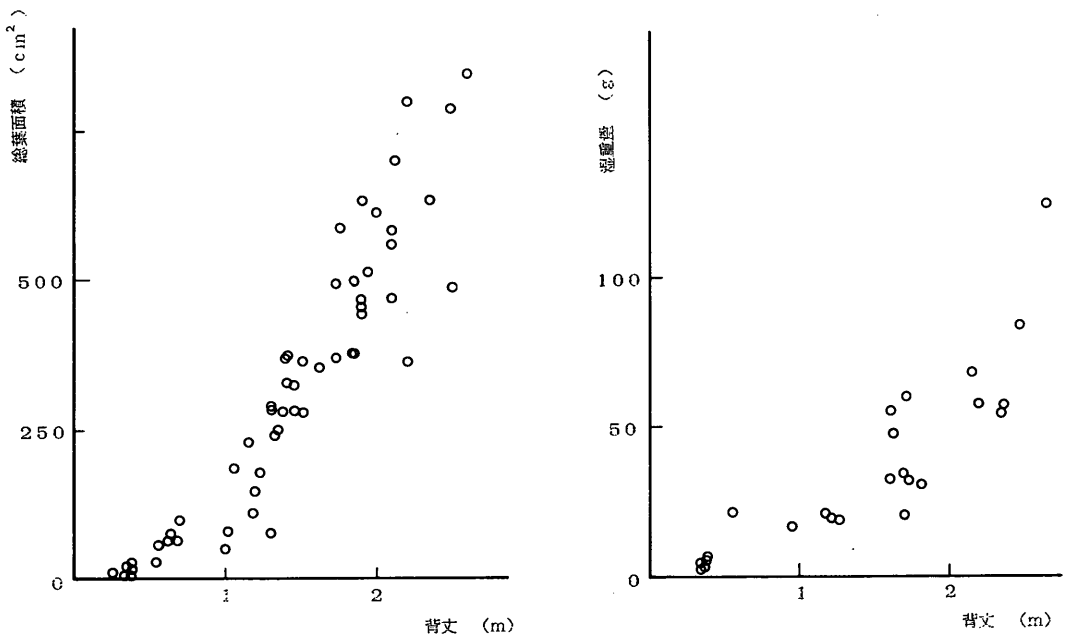
成長しきった8月中旬のヨシの、乾重量当りのN・P含有率を調べた結果を表-4に示す。湿重量の8割が茎である。葉は、乾重量当りの栄養塩含有量は大きい

表-3 ヨシ原周辺の底泥と間隙水の特性

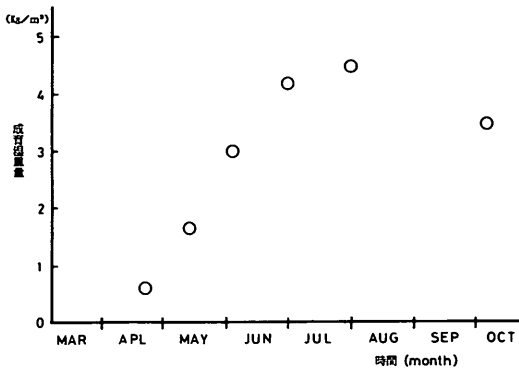
場 所	含水率 (%)	強熱減量 I.L.(%)	T-N量 (mg/kg)	T-P量 (mg/kg)	泥の間隙水栄養塩濃度(mg/l)			
					$\text{PO}_4\text{-P}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$
松輪	ヨシ原外海側	89.2	12.4	1270	1560	0.058	4.58	0.016
	ヨシ原内	97.8	11.6	1770	1290	0.050	0.31	0
蒲生	'87	89.7		1107	255			
	'87	43.7		676	236			
	'87	47.1		921	231			
	'88実験使用	82.5		1285	331			



図一六 松輪地区ヨシ原のヨシの平均背丈と地上茎生息密度の経時変化
(観測地点 No. 1～4 は図一四に示す。)



図一七 松輪地区ヨシ原のヨシの背丈と葉面積, 湿重量との関係



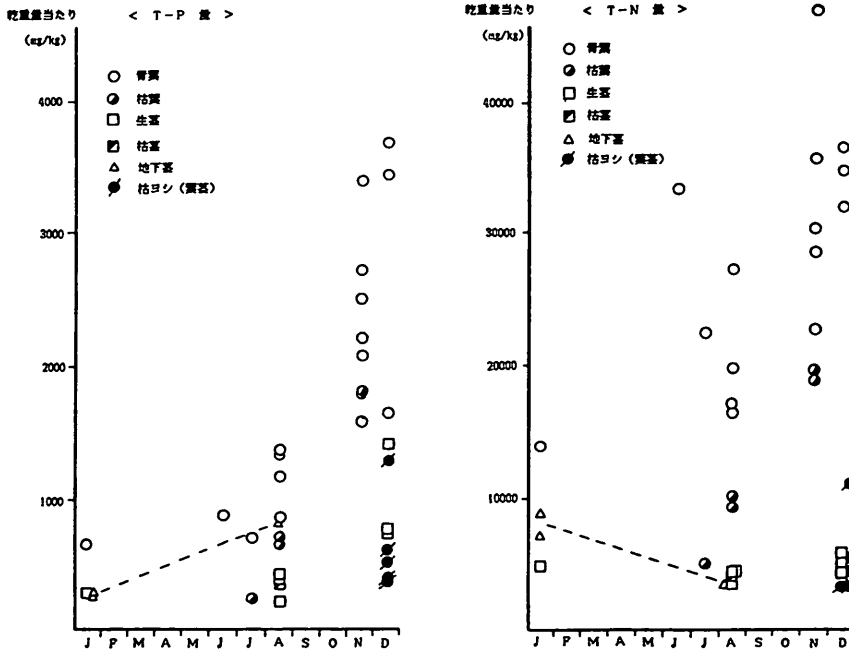
図一 8 松輪地区ヨシの単位面積当りの湿重量経時変化

1本のヨシに占める湿重量が少ない。表一4の値は枯れていないヨシについての分析値である。葉・茎・地下茎などの部位ごとに、枯れたものと枯れていないものとを区別して含有割合を分析してみた。結果を、図一9に示す。乾重量当りで表記するとかかなりバラつく。その中で、春から秋にかけての葉の含有量の伸びがあること、枯れると茎・葉の含有量が低下することなどがうかがえる。含有率の低下は、葉およびPで特に大きいことがわかる。葉のPの減少は2～5割程度、茎では含有割合の減少が余りはっきりしない。枯れる途中での落下した葉・茎先端なども考慮しないと、地下茎への栄養塩の季節移動量は押さえられない。図では地下茎のP含有率は春先

表一 4 松輪地区ヨシの各部位毎のN・P含有率

各 部 位	含 有 量 (mg/kg)	1本当たりの重量 (g)	密 度 (本/m ²)	成 育 面 積 (m ²)	各部位での総量 (kg)
P	葉 1,400 茎 420 地下茎 820 ヒゲ根 160 合 計 2,800	14 (5.6) 56 (22.6) () 乾燥重量	120	3,000 総本数 360,000本	2.8 3.4
N	葉 20,000 茎 4,500 地下茎 3,400 ヒゲ根 >0 合 計 27,900	14 (5.6) 56 (22.6) () 乾燥重量	120	3,000 総本数 360,000本	40. 36.

1本当たりの平均重量：70g (乾重28g)



図一 9 各部位毎のN・P含有率

に比べて秋に増加し、N含有率は反対の傾向がみられる。しかし、地下茎の含有率についても、その地下茎がその年に作られたものなのか前年から存在していたものかの区別ができない等、数値の差が季節変化を表しているかどうかハッキリしない。単位面積当りの地下茎・根毛の存在量は測定していない。

(4) 栄養塩の貯留量と平均取り込み速度

表-4の測定時の平均生息密度は、120本/m²であった。1本当りの栄養塩の貯留量を参考にすれば、このヨシ原では地上部への窒素の貯留量は、250kg/ha、リンは20kg/haと見積れる。ヨシの地上部湿重量は、84t/haとなる。このヨシ原0.3haでの貯留量が、葉と茎とに分けて表-4の右端の欄に示してある。リンで6kg、窒素で77kgになる。地下部の貯留量は不明である。

3月から8月までの6ヶ月かけてこれだけの栄養塩が貯留されたことになる。成長期間180日での平均取り込み速度は、ヨシ1本当り、窒素1.2mgN/d、リン0.1mgP/dとなる。ヨシ原の面積当りでは、窒素1.4kg/ha/d、リン0.11kg/ha/dに相当する。湿重量で表した平均成長速度は、ヨシ1本当り0.4g/dである。

4. 3 ヨシの栄養塩吸収実験と結果

(1) 栽培条件

ヨシの水耕栽培を様々の条件・装置で試み、短期間であれば可能となった。現地環境条件は、高温・多湿・高照度であり、土壌中には嫌気性の細菌類が活動している。これらの条件の完全な再現は困難であったため、次のような条件で栽培を行っている。恒温室内に栽培液を入れた1000ml三角フラスコ等を静置し、根つきのヨシを静かに挿入する。フラスコ容器表面を遮光し、綿で緩く栓をし茎を直立させる。培養照度は、葉表面で3000lxとし、16時間明8時間暗状態を繰り返した。この照度は夏の日中の日向の照度に比べかなり弱い。装置の関係でこの照度以上は安定して与えることができなかった。照射紫外線量の不足もあり、栽培1週間から2週間後には昆虫の発生が目立ち、葉が巻いたり黄変するなど成長に影響を与え始める。このため栽培期間は7~10日間程度とした。

実験に供したヨシは、成長時期や成長条件を揃えるため、松輪地区から移植し研究所内のは(圃)場で増殖させて用いた。地下茎の傷口から腐敗するのを防ぐため、なるべく3節以上の節を持つように長く切って現地地下茎を採取し、移植している。圃場で背丈20~50cmに成長した若い茎を根つきのまま取り出し、各茎ごとに分株後付着泥をよく洗い落とした。さらに、根を一昼夜蒸留水

に浸した後、濾紙上に置き水を切り、湿重量を測定し、実験に用いている。栽培液には、リン酸態リン、硝酸態窒素などの無機リンと窒素とを添加した。その他の微量栄養塩等は与えていない。したがって、栽培液は無菌ではない。根に付着した微量栄養塩などの僅かな持込みは避けられない。

(2) 栽培実験の方法とケース

栽培実験は2つの実験から構成される。実験-1では淡水を用い、異なる栄養塩レベルの栽培液でN・Pの取り込み速度を比較した。一方、実験-2では異なる塩分濃度の栽培液に同一の栄養塩濃度を与え、取り込み速度を比較した。

栽培液の栄養塩濃度は表-3などを参考に次の通り与えた。単位はいずれもmg/lである。

実験-1	低濃度条件	高濃度条件
PO ₄ -P	0.03	0.6
NH ₄ -N	0.14	1.4
NO ₂ -N	0	0.2
NO ₃ -N	1.4	1.4
実験-2		
PO ₄ -P	0.6	
NH ₄ -N	1.4	
NO ₂ -N	0	
NO ₃ -N	0	

表-3の(NH₄-N)/(PO₄-P)比に対して、実験に用いた栽培液ではややリンが過剰である。

栽培液の塩分は、塩化ナトリウム、カルシウム、マグネシウム塩等を混合した改変 Burkholder 人工海水⁽⁴⁾を用いて調整した。実験に用いた塩分濃度は、0, 10, 20, 30‰の4種である。

栽培液中の栄養塩の測定は、自動採水と自動分析のできる測定装置⁽⁴⁾を開発し用いている。採水用のマイクロチューブを容器内に差し込み、24時間ごとに測定している。測定項目は、リン酸態リン、アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素の4項目である。1回の採水量は、共洗い分も含め10ml以下である。10回の採水を行っても、採水による損失は1000mlの栽培液に対しては1割以下の液量となる。

取り込み速度の算定は、栽培液中の溶存栄養塩量の経時的減少から求める。濃度分析用の採水の影響は、その都度補正する。n回目の分析時にビーカー中に残っている栄養塩量(m_n)は次式で算定できる。

$$m_n = \sum_{i=1}^n (C_i \cdot v_i) + C_n \cdot V_n \quad (6)$$

ここで、 i は採水回数、 C_i は i 回目の濃度分析値、 v_i は i 回目の分析用採水量、 V_n は n 回目の分析終了時の栽培液残量、である。 m_n を栽培経過時間に対しプロットすると、栄養塩濃度が高い期間では直線的な減少となる。最小自乗法により直線の勾配を求め、取り込み速度としている。

実験ごとの栽培ケースを表-5 に示す。実験-1 では容器 7 が、実験-2 では容器 1, 5, 9, 13 が、対照容器で

あり、ヨシを植えずに同時に実験に供し分析・測定を実施している。

(3)実験結果

実験-1 で容器 5, 6 のケースについて、窒素濃度の変化例を図-10 に示す。この図から、硝酸態、亜硝酸態窒素が高濃度にあっても、アンモニア態窒素が共存すると、選択的にこれを吸収し取り込むことがわかる。茎一本当りのアンモニア態窒素の取り込み速度は 0.5mg/d 以上

表-5 ヨシの栽培実験ケースと N・P 最大吸収速度

	実験-1					
容器番号	1	2	3	4	5	6
ヨシの茎丈(cm)	30.0	25.5	23.5	30.0	42.9	44.4
湿重量(g)	2	1	1	2	3	4
成育状況	(6日間成長した)					
培養液塩分濃度(%)	0%					
栄養塩濃度レベル	L	H	L	H	L	H
栄養塩最大吸収量 N (mg/d/shoot)	0.23	0.44	0.35	0.41	0.21	0.69
P	0.014	0.066	0.003	0.102	欠	0.100

H：高濃度レベル

L：低濃度レベル

	実験-2 (1, 5, 9, 13は対照容器)											
容器番号	2	3	4	6	7	8	10	11	12	14	15	16
ヨシの茎丈(cm)	22.0	27.5	29.0	33.0	32.5	40.0	20.0	33.0	19.0	20.0	40.0	29.0
湿重量(g)	3	2	4	4	3	4	3	3	2	2	3	3
成育状況	(新根の発生あり)			(新根の発生あり)			(葉や茎の色が退色)			(葉茎が退色し枯れた)		
培養液塩分濃度(%)	0%			10%			20%			30%		
栄養塩濃度レベル	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
栄養塩最大吸収量 N (mg/d/shoot)	0.14	0.06	0.14	0.17	0.10	0.06	0.03	0.05	0.05	0.03	0.06	0.05
P	0.063	0.022	0.061	0.074	0.066	0.036	0.017	0.018	0.018	0.012	0.015	0.011

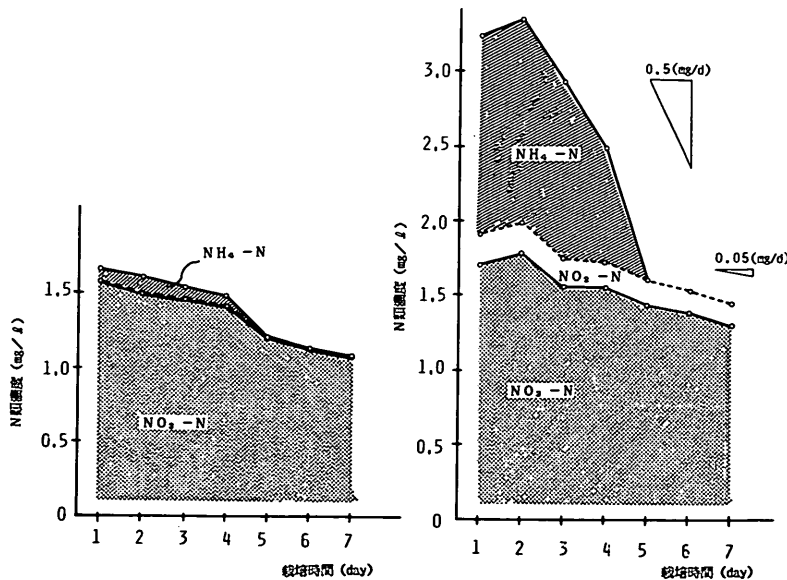


図-10 ヨシ栽培による栽培液中の窒素濃度の減少

になることもあるが、硝酸態窒素の取り込み速度は1オーダー小さい。栽培期間中のN・Pの最大吸収速度を、表一5に示す。類似のサイズのヨシを相互比較する。容器2と3では2の方が、容器1と4では4の方が、容器5と6では6の方が、いずれもより速い速度で栄養塩が吸収されている。ヨシの大きさが似ていれば、栄養濃度レベルが高いほど最大吸収速度もやや大きくなっていることがわかる。同じ栄養塩レベルでは、ヨシのサイズが大きいほど吸収速度も大きくなる傾向もリンでうかがえるが、これだけの実験からは、N/P比の影響・濃度とサイズとの関係など不明であり、必ずしもはっきりしない。

実験-2で栽培液のリン濃度の変化を図-11に示す。図中で黒点は対照容器の濃度変化を示し、白丸はヨシの植えてある容器の濃度変化を示す。ヨシの大きさなどによって濃度の減少速度はややバラつくが、塩分濃度10‰以上では塩分が高くなるに連れてリンの取り込み速度が遅くなる傾向がわかる。各容器の最大吸収速度を同様に表一5に示す。塩分濃度0から10‰迄は、取り込み速度や生育状況にほとんど差がない。

(4)生育への塩分阻害と栄養塩取り込み速度

栄養塩吸収に対する塩分の阻害は、20‰を超えると著しいことがわかる。目視観察によれば、塩分濃度0から10‰迄は、1週間程度の栽培では生育状況にほとんど差がない。

塩分の阻害がない条件下では、N・Pが豊富であれば、茎丈20~50cmのヨシに対しNで0.1~0.7mg/d、Pで0.06~0.1mg/dの取り込み速度が測定された。

4. 4 枯れヨシの処分方法と栄養塩再溶出量の評価

(1)粉碎した枯れヨシからの再溶出実験

松輪地区ヨシ原で1988年12月に採取した立ち枯れヨシを用い、海水中に浸漬した時の栄養塩の再溶出速度を測定した。枯れヨシを1もしくは5 cm程度の長さに切り

刻み、定量ずつプラスチックネットの袋にゆるく詰めた。ビーカーに500mlの試水を入れ、枯れヨシを詰めた袋を水中に垂下した。アクリル板で蓋をし、22℃暗状態で静置した。

試水としては、①自然海水、②煮沸自然海水に抗生物質を添加したもの、③水道水、の3種を選んだ。水際で自然腐敗していたヨシの茎を数日漬けて置き実験直前にこれを取り除いき濾別した液を、①、②の自然海水に対しあらかじめ少量ずつ添加してある。②のケースでは、その後煮沸している。また、枯れヨシの量は、1袋当たり1もしくは3 gとした。

2週間にわたり試水中の栄養塩濃度 ($\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$) を測定し、記録した。測定は自動分析装置を用いている。水中濃度の上昇の様子から、枯れヨシからの $\text{PO}_4\text{-P}$, DIN ($=\text{NH}_4\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$) の溶出速度を、取り込み速度算定と同様に最小自乗法により求めた。結果を、表一6に示す。開始直後の0~1日目の測定が一部欠測等となっているため、2日目からのデータについての算定結果も掲げた。自然海水中では、Nについては $\text{NH}_4\text{-N}$ を中心に溶出がおり、1日あたり枯れヨシ1 kg あたり80~120mg-N程度の溶出速度であった。一方、Pでは7~10mg/kg/d程度の溶出速度であった。生物活性を煮沸や抗生物質により抑えると、溶出速度は著しく小さくなっている。水中への溶出は微生物分解に負うところが大きいことがわかる。また、①水道水よりも自然海水に垂下した方が溶出速度は大きいこと、②この程度の刻み方の差では溶出速度に大差がないこと等がわかる。ヨシ1本当りの地上部の乾重量を30gとすると、1本あたりNで2~4 mg/d、Pで0.2~0.3mg/d程度の再溶出速度に相当する。これは、ヨシ原での平均取り込み速度の約2~3倍ほどになり、かなり速い速度である。秋から冬にかけての低温状況を考えると、細かく粉碎され水中に沈下したとしても、

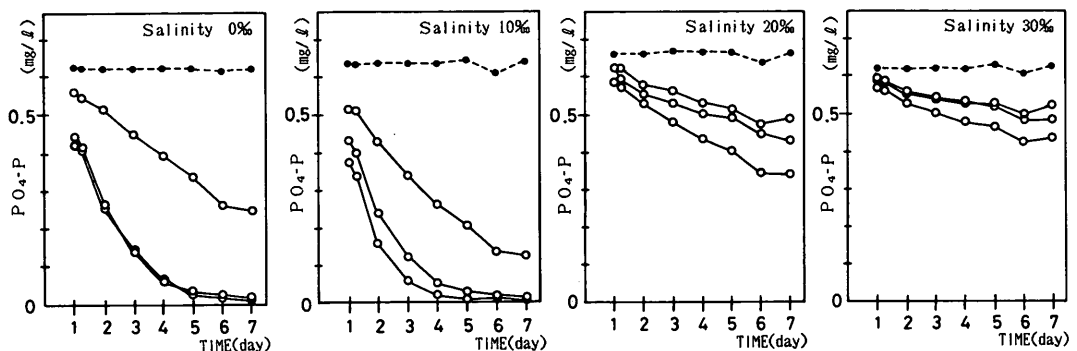


図-11 異なる塩分濃度栽培液で栽培したときのリン濃度の減少 (塩分濃度は左より0, 10, 20, 30‰)

現実の再溶出速度はこれよりもかなり小さなものとなる。温度依存性などは、更なる検討の余地がある。

(2)枯れヨシの処分法による栄養塩含有量の変化実験

枯れヨシはすべて水中に沈積するわけではない。ヨシ原内に倒れ湿気を運びながらも茎の形を保っている陸上堆積ヨシも多い。また、枯れヨシを焼却し灰を肥料として利用することもある。こうした処分法により、栄養塩の含有量がどう変化するか実験してみた。

焼却は、実験室内でマッチによる通常の焼却の他、定温マッフル炉を用いて200℃から1000℃で定温焼却した。枯れヨシの発熱を考慮していないので、設定温度がどれだけ維持できていたかは不明である。また、枯れヨシを背丈の長いままビニル袋に積み、水分を与えて気密のまま22℃で約2ヶ月(52日間)放置し、堆肥処理とした。

同様に、枯れヨシを切り刻まずに海水に浸し22℃で約2ヶ月放置し、海水漬け込み処理とした。使用枯れヨシは、(1)での再溶出実験と同じ時期に採取したものである。

処理前の枯れヨシの含有量と共に、処理後のN・P含有量の分析結果を表一七に示す。処理後の含有量は、灰の乾重量当りの値を最後の欄に示している。灰化すると乾重量自身も減少するので、元の乾重量に対する焼却残率もかかげてある。この残率から、処理前の枯れヨシの乾重量1 kg 当りに換算した含有量を求め、最初の欄に示した。また、堆肥処理と漬け込み処理については、付着水もしくは漬け込み海水中の可溶栄養塩の測定値から換算した、枯れヨシ1 kg あたりの溶出量算定値も示してある。溶出量と残存量の和が、当初含有量と一致しない。水中で懸濁態のN・Pとなっていることも一因であ

表一六 枯れヨシからのN・P溶出速度 (—: 相関係数0.7以下)

ヨシの大きさと 量 (g) 水 の 条 件			PO ₄ -Pの溶出速度		T-Nの溶出速度	
			0～11日目 (mg/kg/d)	2～11日目 (mg/kg/d)	0～11日目 (mg/kg/d)	2～11日目 (mg/kg/d)
大 刻	1g	自 然 海 水	6.6	7.8	—	100.
"	3g	"	9.7	8.6	84.	92.
小 刻	1g	"	8.3	9.6	111.	122.
"	3g	"	11.6	10.3	98.	103.
大 刻	1g	煮沸滅菌海水 + 抗生物質	—	—	—	—
"	3g	"	—	1.8	—	—
小 刻	1g	"	—	—	—	—
"	3g	"	—	—	—	—
大 刻	1g	水 道 水	—	—	—	—
"	3g	"	—	3.5	—	18.

表一七 枯れヨシの処理によるN・P含有量の変化 (表示: 平均値±σ_{n-1})

状態等 処 理 方 法	刈り取り枯れヨシ1 kgあたりの		当初乾燥重量に対 する焼却灰の 残率	処理後の焼却灰乾燥重量あたりの	
	T-N残量	T-P残量		T-N含有量	T-P含有量
生体	(mg/kg)	(mg/kg)	(%)	(mg/kg)	(mg/kg)
ヨシ葉 風乾	34300±2300	2700±940			
ヨシ茎 風乾	5100±700	830±290			
枯れたもの ヨシ茎葉 風乾	4500±1100	430±130	100		
堆肥処理 (堆肥湿潤水への持ち出し)**	4500±700 140±50	310±90 20±2	—		
丸ごと海水へ浸漬 (浸漬海水への溶解持出し)**	3800±1500* 340±70	20±20 140±60	—		
200℃ 炉焼燃 マッチによる焼燃	4000±900 1800±240	420±70 300±6*	69 30	5700±1300 6100±700	610±140 1000±70*
400℃ 炉焼燃	0	250±50	7	0#	3800±1200
600℃ 炉焼燃	0	290±50	8	0	3700±500
1000℃ 炉焼燃	0	210±120	8	0	2500±1100

定量限界 (40mg/kg) 以下

* サンプル数 n = 2, 他は通常のサンプル数 n = 3。

** 茎等を少量の蒸留水で洗い流し、周辺水を孔径1μm濾紙にて濾過した濾液中の濃度より算定。

と思われる。

窒素の変化を見てみる。元々の枯れヨシにはNが4500 mg/kg含まれているが、堆肥処理ではほとんどNが減っていない。海水漬け込みでは、約2ヶ月で15%程減っている。低い温度での焼却ではNの減り方は少ないが、通常の焼却（マッチでの焼却）では当初含有量の6割が揮散している。焼却温度が極めて高くなると、Nのほとんどは揮散することになる。一方リンは、堆肥処理でもやや減少し、海水漬け込み処理では9割以上が海水へ再溶出している。高温焼却では、その機構は不明であるが、当初含有量の半分が飛散しているらしい。

通常の焼却では、N/P比6～10程度の肥料となる。焼却残率が小さいため高温焼却灰のP含有量は著しく高くなり、Nは含まないものの良いリン肥料となろう。

22℃2ヶ月間の漬け込み処理実験の結果から、切り刻まないときの平均溶出速度を求めてみる。減少量を漬け込み期間で単純に割れば、ヨシ1本（乾重量30g）当り、Nで0.4mg/d、Pで0.2mg/d程度となる。Pの残存量が小さく、Pについては速度算定値の誤差が大きい。同じ温度条件でも、Nでは切り刻んだときの約1/8の値となっており、物理的な粉碎の効果が大きいとおもわれる。

(3) 秋冬期のヨシ原における栄養塩挙動

図一9にみられるように、秋に立ち枯れると地上部の栄養塩含有量、特にPはやや減る。Pは地下茎などに運ばれている可能性¹³⁾があるが詳細は不明であった。ただし、立ち枯れに伴ってほとんどの同化栄養が地下へ移動すると言うことはなく、立ち枯れヨシにもかなりの栄養塩が残存している。

立ち枯れたヨシが倒れ海水に触れると、Nはゆっくりと分解・再溶出してくる。1本当り0.4mg/dの溶出速度は、吸収速度（平均1.0mg/d）の4割であり、冬季の水温が22℃であっても、吸収量を溶出するのに約1年かかることになる。倒壊したヨシ中のNは、地上に堆積したりヨシ原小動物により摂取利用されるなど、様々な生物物理的過程を経て土壌化して行くのであろう。細かく粉碎されたヨシは、未粉碎のヨシより8倍程度早い溶出速度となった。この早い溶出には、微生物の分解活性が関連している。一方、Pは比較的再溶出速度が速く、22℃の海水に浸かると取り込み速度を上回る速度で再溶出してくる。

倒れても、陸上で湿気を帯びながらも海水には触れなければ、Nはほとんど再溶出せずにPも比較的高い濃度のまま堆肥化がすすむ。また、数年間にわたって立ち枯れたまま倒れない茎もある。取り込まれた栄養塩の再溶出量の定量的評価には、立ち枯れ後の茎の挙動の解析(立

ち枯れの割合や平均立ち枯れ期間、倒壊後の堆肥化過程、動物による粉碎摂取など)も含めさらに検討が必要であろう。さらに、Pはヨシ体内外に大きく移動することがわかったが、ヨシ原底泥中では他の土壌よりもN/P比が小さくPの含有割合が大きい。ヨシ原土壌中では、NよりもPが保持され易いことも予想される。

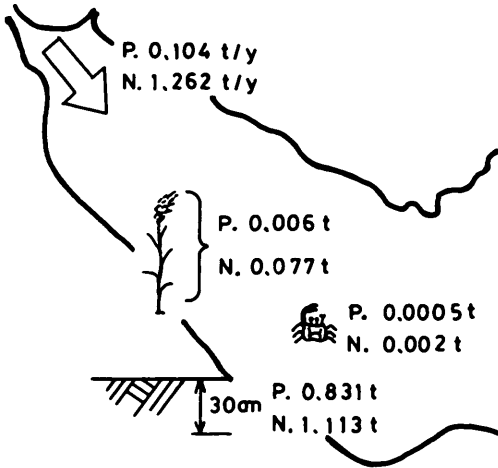
4. 5 ヨシの栄養塩吸収除去特性のまとめ

観察によれば、このヨシ原は、以下の条件下で成立していることになる。①水際に存在し、強い波や流れを受けず、静穏な水面に接している、②日当たりが良く、冬季にも凍結しない、③背後からの地下水の浸透の影響を受け、海水面下に水没する底泥内でも間隙水塩分濃度が低下している、④底泥は含水率が高く有機質に富む微細泥であり、底泥内は嫌氣的に腐敗している、⑤底泥内の栄養塩濃度が高く、間隙水栄養塩濃度が高く、無機態窒素ではアンモニア態窒素の割合が大きい。

こうした条件では、栄養塩の吸収は間隙水塩分濃度によって大きく影響され、20%を超える塩分濃度では極端に吸収が悪くなる。塩分の吸収阻害がなければ、栽培実験の濃度レベル程度までの範囲では、間隙水栄養が豊富なほど速い吸収速度となる。窒素の取り込みではアンモニア態窒素を選好し、アンモニア態窒素の取り込みは硝酸態窒素の取り込み速度の5倍程度であることがわかった。ヨシ一本当り一日当りの取り込み速度は、栽培実験ではNで0.1～0.7mg/d、Pで0.06～0.1mg/dとなる。これは、松輪地区ヨシ原の平均取り込み速度1.2mgN/d、0.1mgP/dよりNでやや小さい。しかし、栽培液の栄養塩濃度とヨシ原内間隙水栄養塩濃度との差を考えるとよく似た大きさであり、ヨシ原の観察によって平均取り込み速度が把握できていることがわかる。

面積当りの地上部貯留量(Maximum Standing Crop)は、松輪地区で250kgN/ha、20kgP/haと見積られた。この値は淡水域での値とよく似ている。条件を整えば、沿岸ヨシ原でも、淡水ヨシ原と同程度の地上部貯留能力があることがわかる。

西端に流入する小河川の晴天時の流入負荷は、Nで3500g/d、Pで280g/d程度¹⁴⁾である。ヨシ原の地上部に貯留される栄養塩は、晴天時流入負荷365日分の約6%(20日分)に相当する。干潟部の蟹、ヨシ原底泥の深さ30cmまでの部分、にそれぞれ貯留されている栄養塩量を比較すると、図一12のようになる。秋から冬の立ち枯れ時の再溶出量の定量評価は、困難であった。しかし、①秋口に地上部のPの含有率がやや減る。地下茎へのPの移動によると思われる。②浸水時の枯れ茎からの再溶



図一12 松輪地区ヨシ原の夏期 N・P 貯留量の分布

出は、Pではよい。Nでは、22°Cでも取り込み速度の4割程度のゆっくりした溶出がある。茎を粉碎すると溶出速度が増加する。③再溶出は、微生物の分解活性に依存している。等の特性がわかった。流出栄養塩の水系からの除去と再溶出負荷の削減にとって、枯れヨシの刈り取りと再利用は、可能であればより望ましい。同時に、水質の悪化する春先から秋口にかけての生育ヨシ体内への栄養塩貯留と、枯れヨシ内貯留栄養の地上部への堆積・土壌化とは、沖合いの富栄養化に対する沿岸ヨシ原の大きな負荷抑制効果の一つであろう。

5. ヨシ原での粒子沈降特性

5. 1 ヨシ原内の表層流

沿岸ヨシは、水際部でも特に浅い岸部から陸側にかけて生息している。ヨシの生息する水深は1 m以浅等とされているが、通常は満潮時でも水深30~50cmより浅い場所であることが多い。ヨシ原として密生している場所では水深はさらに浅く、10cm前後とみられる。ヨシの密生地を行き来する流れは、波・潮汐・河川流などにより起こされる。静穏な海域の沿岸部であり、さらに水深が浅い場所であるため、流れは小さいことが多い。水深を代表長さとするレイノルズ数は、 $Re=10^2 \sim 10^4$ 程度とかなり小さいことになる。暴風が過ぎた後、打ち寄せられた浮遊ごみや倒壊ヨシが、ヨシ原内干陸部に打上げられたり長くトラップされていることもある。しかし、ヨシ原内の波も通常時は小さい。

広い幅のヨシ原内での懸濁粒子の3次元的な濃度変化

は、一般に次式で表せる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} - w \frac{\partial C}{\partial z} + E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + E_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{w_0}{h} C - kC \quad (7)$$

ここで、 u 、 v 、 w は x 、 y 、 z 方向の流速、 E_x 、 E_y 、 E_z は x 、 y 、 z 方向の拡散係数、 w_0 は粒子の沈降速度、 h は水深、 k は粒子のヨシ茎付着などによる減少速度係数である。普通、 k は無視できる。上式の各項の大きさ、各係数の値とヨシ原の諸元との関係を把握することが、ヨシ原内での沈降作用を評価することに他ならない。

ここでは、水深が浅く流れが緩やかなヨシ原内流れの水利特性を、水路実験で検討している。水路内での微細粒子の沈降の様子も観察している。また、土粒子の沈降堆積の様子を現地ヨシ原の地形変化からも検討してみた。水路実験は、研究所内の実験水路、およびヨシ原内に立てた仮設水路、の両水路を用いている。

5. 2 円柱粗度のある実験水路での流れ実験

まず、条件が制御し易く測定が容易な2次元水路にて、円柱粗度による流速の低減効果を実験した⁴²⁾。円柱粗度は、ここではヨシの地上茎に擬している。低湿地に生息する背の低い草に比べ、ヨシは①茎の断面は円太さ(直径)がそろっており、②茎は背が高く直立し、③緩い水流では茎が曲がったり揺れることがなく、④葉が生え始める位置は水面上にある。このため、水中にあるヨシ茎の形状を、円柱と見なすことはそれほど無理がない。わずかに、ヨシ茎の表面を短い細毛が覆っていることなどに差異がみられる。

(1)水深の変化と円柱粗度の関係

粗度効果の定量的な比較のため、便宜的ではあれ比較よく使われてきているマニングの粗度係数として評価することとした。抵抗則としては、平均流速公式として広く用いられているマニングの公式をとりあえず採用した。マニングの公式を下に示す。

$$u = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (8)$$

ここで、 u は平均流速、 R は径深、 I はエネルギー勾配であり、 n がマニングの粗度係数である。水深が浅く流速が遅いため、水路内の流れは乱流領域でも層流に近い性質を帯びてくる。マニングの粗度係数 n は、 Re と相当粗度との関数になり、流速によって変化してくる。変化

の関数形は、現在明確には示されていない。

水路床が水平な水路では、水深 h の変化が緩やかであれば、エネルギー勾配は次式で見積れる。

$$I = \Delta h(1 + Fr) \quad (9)$$

ここで、 Δh は二点間の水深の差、 Fr は平均流速と水深を用いたフルード数である。水路内の水深の変化を流下方向に測定することにより、式(9)から I が求められ、次いで式(8)により n が求められることになる。

(2)実験方法

水路は、長さ24m、幅0.8m、深さ0.6mのコンクリートブロック製のものを使用した。定水頭タンクが上流側に設けてあり、バルブの操作で流量を調節できる。水路に導かれた水は、整流され、5mの助走区間を経て11mの測定区間を流れた後、4mの緩衝区を流れ下流の越流堰から流出する。下流の堰で水深が調節できる。測定区間にはアクリル板を敷き詰め、5mm径もしくは10mm径のアクリル円柱を差し込めるようにした。

水深として5cmと10cmの2ケースを選ぶ。流量を変化させおおむね1～7 cm/s程度の流速範囲内で、水深の変化を測定した。又、測定区間にヨシに見立てた円柱を置き、同様に水深の変化を測定した。

(3)実験結果

水路横断方向の流速分布の測定、トレーサーによる溶解物輸送に関する平均流速の測定などを繰り返し、流量を流下断面積で除した値を平均流速として良いことを確かめた。又、トレーサー実験からは、この実験ケースに対して水平拡散係数がおおむね $10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ のオーダーであることがわかった⁽⁴²⁾。円柱が存在する時、浅い水深内のトレーサー濃度は鉛直方向に一樣とみなせた。

式(8)、(9)より求めた n を、水深と平均流速で求めた Re に対して両対数グラフにプロットしてみる。ここでの n 値は5%程度の誤差を有する。ヨシのないケースでは、 Re が $10^2 \sim 10^4$ の範囲で左上がりの直線になる。この直線を水深別に図-13に示す。ヨシのあるときの結果を、図中に丸印で示した。同じ水深で比較すれば、ヨシが存在すると n 値が大きく上昇していることがわかる。流れに対するかなりの粗度効果が認められた。図-13には、滑面水路での Kouwen の測定例⁽⁴³⁾も同時に直線で示してある。

(4)円柱粗度の評価方法と流速低減効果

人工的なヨシ茎として並べられた円柱の、粗度効果を見積る方法を考えてみる。一本のヨシ円柱に働く抗力(τ_d)を、一樣流中に置かれた円柱の抗力係数 C_d を用いて表せば、

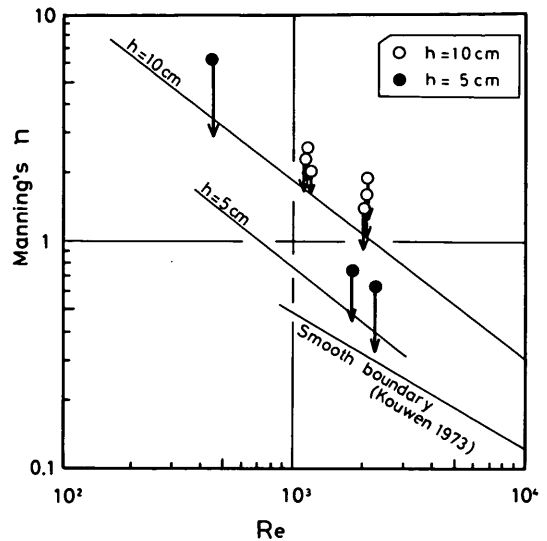


図-13 低 Re 流れにおけるレイノルズ数 Re とマニング粗度係数 n との関係
(直線はヨシなしの場合、丸印はヨシ有りの場合の水路実験結果。Kouwen⁽⁴³⁾の滑面水路実験を同時に示す。)

$$\tau_d = C_d \cdot D \cdot h \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (10)$$

となる。ここで、 D は円柱の径、 g は重力加速度。個々の円柱の効果が重なりあって円柱列の効果となる。ヨシ原円柱列の効果として、単位流下距離当りのエネルギー損失 I_d を考える。 I_d は、ヨシ密度 A_r を考慮して次式であらわせる。

$$I_d = \tau_d \frac{A_r}{R} \quad (11)$$

この I_d を式(8)の I に代入すれば、 I_d 値に相当する粗度係数値 n_d が求められる。

水路の底面粗度と、円柱の粗度とが共存するときの関係は次のようになる。水路全体でみた全エネルギー損失 I は、底面粗度による損失 I_b と円柱による損失 I_d との和である。式(8)より、水路の見かけのマニング粗度係数 n の二乗は、底面粗度による粗度係数 n_b と n_d の二乗和となる。

円柱の抗力係数 C_d は、 Re 数の小さな領域では Re の関数となる。図-13のヨシありケースの結果に対し、シュレヒティングの図⁽⁴⁴⁾などを参考に各ケースの測得 Re 値に對し対応する C_d を見積り、上記の手続で I_d 、 n_d を求め

た。ヨシありケースでの見かけの n の実測値と算定 n_d との比較から、底面粗度のみによるマンニングの粗度係数 n_b を求めてみた。ヨシありケースの丸印から下ろした矢印の先端が、算定した n_b 値である。ヨシ無し条件での測得 n_b 値に近い値が見積れている。 C_d さえ適切に評価できれば、ヨシ茎の粗度効果が見積れることがわかった。 n_b と n_d とはほぼ同じオーダーの値であり、低 R_e 水深10cm のケースでは n_d が n_b の2倍程度となった。ヨシによる流速低減の効果が大きいことがわかる。

シュレヒティングの図でも明かであるが、 R_e が小さい領域では、同じ形状でも C_d 値が大きくなる。 C_d の増加は n_d の増加を意味し、粗度効果の増大により水位勾配が大きくなり流速が減少する。流速の減少は、 R_e 数の減少を意味し、 C_d 値に影響する。このように、低 R_e 領域では、水位、流速、粗度が相互に関係しあっている。そこで、流速や水位が実測されていない場合の C_d 値評価に際しては、流速・水位・粗度（抗力係数と底面粗度）の3者の適切な組み合わせを同時に推定する必要がある。低 R_e 領域での $C_d \sim R_e$ の関数を当てはめられれば、何回かの繰り返し計算によって3者の値を収束させ、適切な組合せを選び出すことができた。こうして、ヨシ茎群の粗度効果については推定が可能になった。

5. 3 ヨシ原内水路での粒子沈降実験

(1) 粒子沈降による濃度分布

ヨシ原内の2次元流れについては、5.2の方法により流速の見積が可能になった。この流れの中での粒子の沈降を考えてみる。式(7)を解くためには、水理量の他に、ヨシ原流れの中での粒子沈降速度などがわかれば良い。簡単のため、式(7)の吸着などの項がなく、水深が一定で単一の沈降速度粒子のみが存在するとする。流れが定常であり、上流からの粒子流入負荷が一定で濃度の時間変化がないとする。すると式(7)は次のように書き直せる。

$$0 = -u \frac{\partial C}{\partial x} + E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + E_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{w_0}{h} C \quad (12)$$

さらに、対象として微細な粒子 ($w_0 \sim 10^{-1} \text{ cm/s}$) を考え、浅い水深内で十分に鉛直混合しているとする。粒子濃度の鉛直分布がなくなり上記右辺第3項が省略できる。すると、式(12)は解析的に解け、定常解 C_e が以下のように書ける。

$$C_e = C_0 \exp \left(\frac{u - (u^2 + 4w_0 E_x / h)}{2 \cdot E_x} x \right) \quad (13)$$

ただし、 C_0 は投入点 $x=0$ での濃度。今、 h が10cm、 E_x が $1 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 u が 1 cm/s 等としてオーダーを評価すると、エスチュアリー数⁽⁴⁵⁾ (kE/u^2 、ここの k は $k = w_0/h$) が1より充分小さくなり、式(13)の分子が簡略化できる。 C_e は結局、

$$C_e = C_0 \exp \left(- \frac{w_0 x}{hu} \right) \quad (14)$$

となる。この式は、定常時には懸濁粒子濃度が流下方向に指数関数的に減少していることを示している。 x/u に対する C_e 値を片対数グラフ用紙上にプロットすれば、直線となる。直線の傾きは、 $(-w_0/h)$ となる。

式(14)を用い、定常時の濃度分布測定値から見かけの沈降速度 w_0 を求め、これがヨシの有無や生息密度によりどう変化するのか比較する実験を行った。

(2) 実験方法

仙台湾の蒲生干潟ヨシ原の北端に仮設の水路を立てた。ヨシは $130 \text{ 本}/\text{m}^2$ 程の密度で密生している。水路は、長さ20m、幅1mのものを6本平行に並べている。側壁の高さは20cmとした。水路内の生息ヨシを隣接する水路一本おきに刈り取り、ヨシ有りの水路3本とヨシなしの水路3本とを作った。そのうちの1組2本の水路 (B-3, A-3) については、底面の凹凸を均すために底面に薄く砂を撒き手で均した。水路の位置と6本の水路の構成を図-14, 15に示す。

a) 貯留槽内で微細干潟泥と入江海水とを混合し、所定の濃度の懸濁水を作成した。懸濁水は、撹はんポンプで濃度を維持しながら定水頭タンクより定量投入した。懸濁濃度は、 $20 \sim 200 \text{ mg/l}$ 程度の範囲とした。1回の実験につき、6水路とも等しい流量を流下させている。水深は10cmとし、下流側の越流堰で調整した。流量は、1ケースを除き、平均流速が0.5ないし 1 cm/s となるようにした。1ケースのみ 8 cm/s 程度とし、ヨシの粗度効果の検討用とした。投入濁りの濃度および流下流量を変え計6ケースの実験を行った。

懸濁水は、図-15の採水足場を用い、st. 1～5の5地点から採水した。充分な助走時間後、30分ごとに各点で3回づつ採水している。採水資料は、懸濁粒子濃度 (SS) をJIS法⁽³⁹⁾に基づき分析した。また水路底にシャーレを置いて約1時間にわたって沈降粒子の捕集を行い、沈降フラックスを算定している。

b) 流速の速いケースでは、塩分トレーサーによるトレーサー実験を実施し、また水面形を観測した。塩分トレーサーは、あらかじめ食塩をぬるま湯に溶かしておき st. 1 から瞬間的に投入した。st. 2, 4 に導電率計を配置



し、投入後の塩分濃度変化を連続して記録した。

(3)実験結果

a) ヨシの生えている水路 (A-1) とヨシを刈り取った水路 (B-1) について、懸濁濃度の分布例を図-16に、沈降フラックスの分布例を図-17に示す。ばらつきながらも流下につれて減少し、減少は指数関数的であると見れる。式(13)もしくは(14)がほぼ成立しているとして良い。

式(14)に基づき見かけの沈降速度を求めた結果を、表-8にまとめる。全般にデータはばらつきがちである。括弧でくくった数字は、見かけ沈降速度を最小自乗法で見積る際に相関係数が0.7より小さいケースを示している。表中には、実測沈降フラックス値をその場所の懸濁濃度で割って得られた沈降速度も、下段に示した。下段の値は、算定の過程に水理量を用いておらず、水理条件の測定誤差の影響を受けていない。

懸濁濁りの作成に用いた投入泥を静水中で沈降させ、50%沈降速度値 (w_{50}) を測定した結果も一部掲げている。攪はんタンクや整流区間で大きな粒子の先行した沈

降がみられ、水路内に導かれた懸濁粒子の粒径分布とは必ずしも一致しない。しかも、投入泥自体の w_{50} も実験のつど2割ほど変化している。

表-8のデータはおおむね1.5~3.0m/d程度の値となっている。括弧の値を除き、全ての見かけ沈降速度をまとめると平均2.1m/d (2.4×10^{-3} cm/s)、標準偏差0.7m/dの分布となる。同じケースについての上段の値と下段の値では、比較的良好似た値となることが多く、ばらつきはあるものの、見かけ沈降速度としてそれほど外れた値ではないと思われる。流速の変化や懸濁濃度の変化があっても、見かけ沈降速度の増減には決まった傾向がない。また、ヨシ有りとヨシなしとを比較しても決まった傾向がうかがえない。この程度のばらつきの中では、見かけ沈降速度に差異が生じていても検知できない程度のものであると想定される。

採水濁りを詳しく観察すると、下流側で微細な粒子の割合が多くなっているようであった。微細泥を用いた実験ではあるが、水路内では比較的大きな粒子から先に沈降している可能性が高い。従って、もし高い精度で懸濁

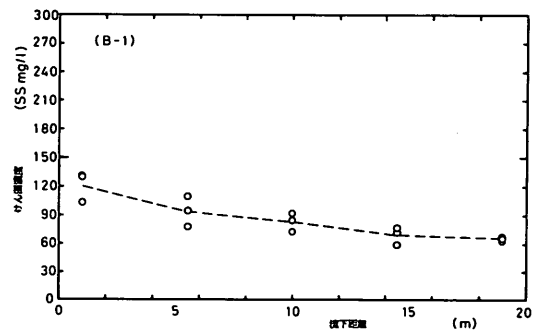
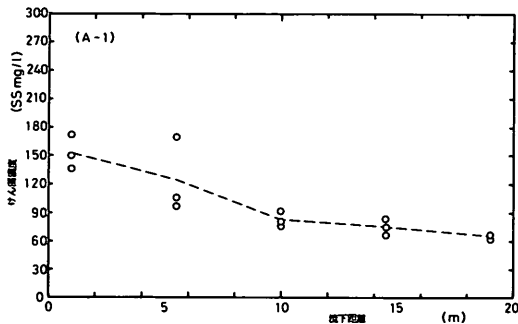


図-16 懸濁濃度の流下方向分布 (A-1: ヨシの生えている水路, B-1: ヨシを刈り取った水路)

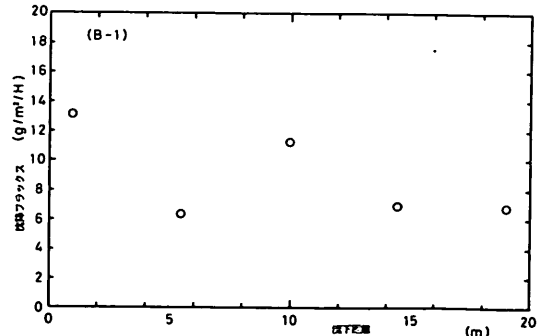
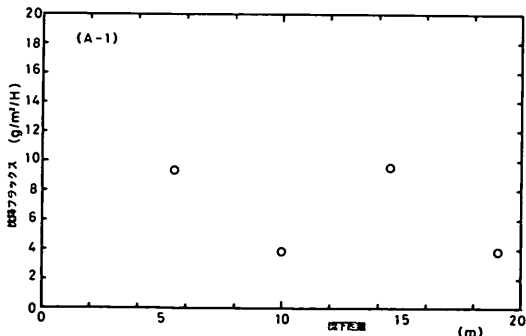


図-17 粒子の沈降フラックスの流下方向分布 (A-1: ヨシの生えている水路, B-1: ヨシを刈り取った水路)

表一 見かけ沈降速度の算定結果

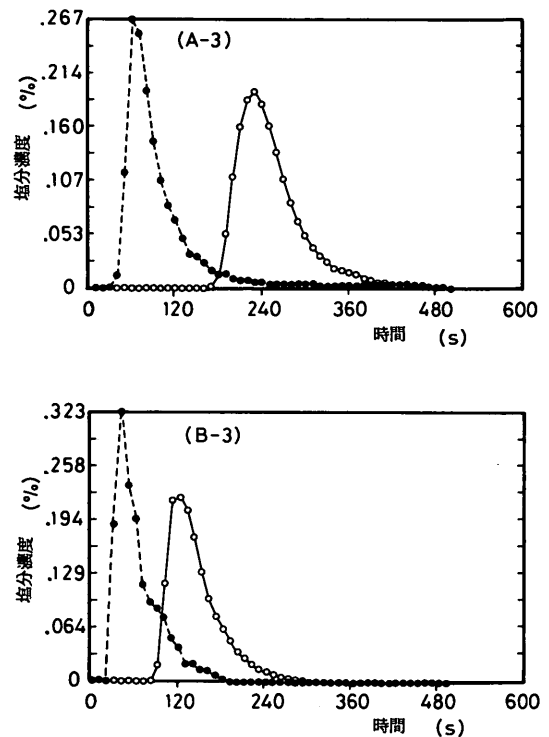
実験番号	87A	87B	87C	87D	87E	87F	備考
流入条件							
濁り濃度(mg/l)	40	220	70	150	190	20	概略値
流速 (cm/s)	1	0.5	0.5	1	1	8	概略値
路床/水路 (ヨシ)							〔単位:〕 m/d
泥面							
B-1(無)	(2.0)	1.5	1.5	2.4	(2.2)	—	
	1.6	2.2	—	2.5	2.3	—	
A-1(有)	2.5	2.1	2.8	3.5	(2.1)	—	
	3.3	1.8	2.6	3.8	2.9	—	
B-2(無)	(0.9)	1.6	1.1	1.6	(1.4)	—	
	—	—	—	—	—	—	
A-2(有)	(0.3)	(1.3)	1.0	2.1	(1.2)	—	
	1.5	1.7	2.0	3.0	2.1	—	
覆砂							
B-3(無)	(1.1)	1.5	0.8	1.9	2.0	—	
	1.8	2.0	1.8	3.1	2.0	—	
A-3(有)	(1.3)	3.0	(1.8)	3.1	1.4	—	
	1.8	1.7	1.6	1.9	1.5	—	
静水時							投入泥 に対し 吸上げ法
w_{50}	—	—	3.9	4.3	4.8	—	

上段の値：濁り濃度(SS)の流下に伴う減少割合から算定。
下段の値：沈降フラックス測定値と水中濁り濃度との比から算定。

濃度分布が測定できたならば、得られたデータに対しては、単一の沈降速度としては充分解析できない可能性がある⁴²⁾。

b) 流速の速い実験ケースでの塩分トレーサの伝達状況測定例を図一18に示す。黒丸はトレーサ投入点から4.5m (st. 2), 白丸は13.5m (st. 4) 下流側で測定した塩分トレーサ濃度である。ヨシのある水路(A-3)についての結果が上側のグラフにプロットされている。ヨシなしの水路に比べ、黒丸・白丸ともピークが通過する時刻が遅く、ピーク幅が大きくなっておりいつまでも濃度が残っている。ヨシが繁茂していると、同じ流量でも流達時間が遅れていることを示し、ヨシ原内では流速が小さくなり水位が上昇していることを確認できる。ピーク幅や濃度のテイリングからは、ヨシあり水路で水平拡散係数がやや大きくなっていることをうかがわせる⁴²⁾。ただし、拡散係数の値そのものは、ヨシあり・なしのいずれでも小さく $10^0 \sim 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$ のオーダーであった。

5.2に示した水路実験解析に習って、水面形の測定値から粗度係数を求めた。水面高さは、水路壁に張り付けた物差しを用いて読み取ったため、誤差が大きい。算定値を表一9に示す。同じ R_e に対しては、図一13の結果よりもやや小さな n 値となった。ヨシあり水路では、ヨシ無



図一18 蒲生干潟水路でのトレーサ濃度の経時変化
(黒丸：投入点から4.5m 流下地点、
白抜き丸：投入点から13.5m 流下地点)

し水路よりも4倍ほど大きな n となり、実際のヨシ原でもヨシ茎の粗度効果が大きいことが確かめられる。

平均流速が相互に異なるのだが、隣あったヨシ無し水路の粗度係数と比較して、ヨシのみの粗度効果を推測した。ヨシの生息密度、径深、平均流速などを与えて粗く C_d 値を算定したところ、表中に掲げたように2~4程度の値となった。水面高さの測定誤差や、読み取り区間の粗さ、平均流速の違う水路の n の差からヨシの効果を取り出したこと、などを考慮するとオーダーとしては5.2での議論とあっていると言える。室内実験で求められた円柱粗度での C_d 値はこの流速に対して1.3程度⁴⁴⁾である。

(4) 粒子沈降量の見積法

2次元水路での沈降実験から次の事がわかった。ヨシ原内の水深や流速など流れの状況から、鉛直方向に完全混合している押し出し流れに近い流れであると思われる。懸濁粒子の濃度分布からは、定常状態では式(14)で粒子の濃度分布がほぼ表せる事が確認された。ヨシの有無や懸濁濃度などの条件によっては、見かけの沈降速度は有意な差異がみられなかった。ヨシ原内での粒子の挙動や沈

表一 9 蒲生干潟水路での粗度係数測定値

$$U_m = 6 \sim 12 \text{ cm/s} \quad Re = 6 \sim 12 \times 10^3$$

水路	路床	ヨシ密度	測点数	i	$\partial(h+u^2/2g)/\partial x$	f'	n	R	U _m	Cd
B-1	覆砂	0	3	-.00250	-.00255	.024	.024	.111	.066	
A-1		130	4	.00336	(.00214)	.32	.085	.090	.082	(2.)
B-2	泥地	0	3	.00406	.00385	.036	.029	.088	.100	
A-2		118	3	.00872	.00678	.457	.102	.090	.088	(4.)
B-3	覆砂	0	4	.00243	.00215	.025	.023	.069	.123	
A-3		135	4	.00392	.00187	.341	.087	.084	.100	(3.)

(i: 水路底面勾配, f': 摩擦係数, n: マニング粗度係数, R: 径深, U_m: 平均流速, Cd: 推定抗力係数)

降水量の見積に対しては、ヨシ原のない場所に対するとときに用いる沈降速度をそのまま用いても大きな誤りにはならないようである。ヨシ原内のゆっくりした流速では、静水中の沈降速度が適応されても良いと思われる。幅の広いヨシ原では、式(7)を用いれば、2次元的に解くことができる。ヨシ原内では、ヨシ茎の粗度効果により流速が減少し滞留時間が長くなり、粒子の沈降が進むことになる。

5. 4 ヨシ原の拡大と堆積規模の検討

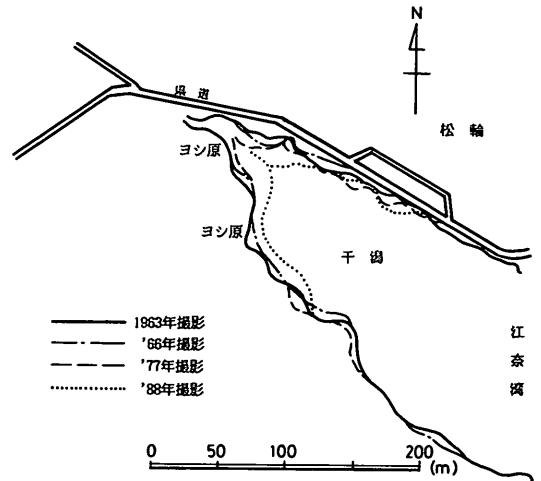
水路実験で検討した沈降促進特性が、実際のヨシ原ではどう作用しているのか調べてみた。

(1)ヨシ原の拡大速度

松輪地区のヨシの観察期間中に、ヨシ原が少しずつ海側に拡大していることに気が付いた。そこで、過去25年間の航空写真を探し、陸上部の5～7の不動点を基準にヨシの生え際線を一枚の地図にプロットしてみた。結果を図一19に示す。最近の10年間に大きく前進していることがわかる。25年間での平均増加面積を算定すると、1年あたり140m²/yとなる。

ヨシ原の生え際に打ち込んだ基準杭の地上高さを測った。2年間で20cmほどの泥の沈積厚になった。少しヨシ原内にはいるとこれよりも沈積厚は小さくなるようである。平均沈積厚は5～10cm/y程度であろう。ただし、この値は、①圧密や含水率の変化を無視している、②他所での沈降物が波などで移動してきた分も含まれている、という値である。

平均増加面積と沈積厚さの積がほぼ泥の沈積量であるとする、泥体積で7～14m³/yの沈積速度となる。底泥の比重、乾泥率、N・P含有量等から大ざっぱにN・Pの沈積速度を見積れる。表一3の値を参考にし乾泥率を0.51とするとNで15～30kg/y、Pで10～20kg/y程度になる。ただしこの見積には、ヨシの地下茎の拡大分は含まれていない。



図一19 過去25年間の松輪地区ヨシ原面積の拡大

(2)ヨシ原周辺の粒度

上記の検討結果を確認するため、ヨシ原周辺の4地点で底泥の粒度を調べた。平均粒径と比重からストークス式で求めた沈降速度値の分布を表一10、図一20に示す。ヨシ原内の底泥は、用水路河口部と共に沈降速度の小さな粒子であることがわかる。これに対し、用水路の流れや干潟の波の影響を受ける地点では粒径が粗く沈降速度が大きくなっている。ヨシ原内に微細粒子が沈積し易いことがうかがえる。

5. 5 粒子の沈降・堆積の数値計算による検討

(1)ヨシ原の表層流計算

ヨシ原の粗度効果が見積れるようになったことを利用し、沿岸ヨシ原での流れと粒子の沈降・堆積の見積を数値的に試みた。図一21に示す仮想の海岸に、長さ50m、幅20m、ヨシの茎径10mm、ヨシ生息密度150本/m²のヨシ原を設けた。100m離れた左右の境界に1cmの水位差を

表-10 松輪地区ヨシ原周辺の底泥の泥質・平均粒径・平均沈降速度

採泥場所	強熱減量率 IL (%)	T-N (mg/kg)	T-P (mg/kg)	平均土粒径 d_{50} (μm)	比重 (g/cm^3)	沈降速度 w_{50} (cm/s)
用水路内泥	8.7	—	1200	350	2.65	11.00
河口部泥	10.3	1280	1490	180	2.58	2.79
干潟中央部泥	12.8	1270	1560	390	2.46	12.12
ヨシ原内泥	12.1	1770	1270	175	2.42	2.36

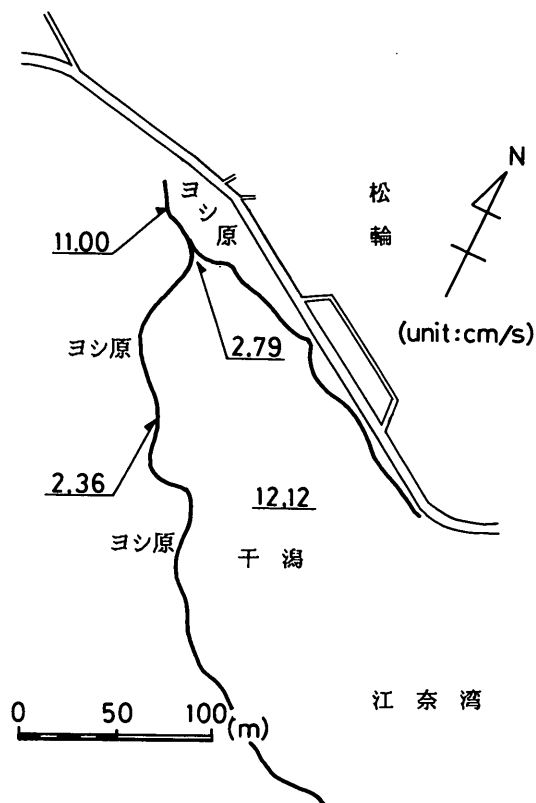
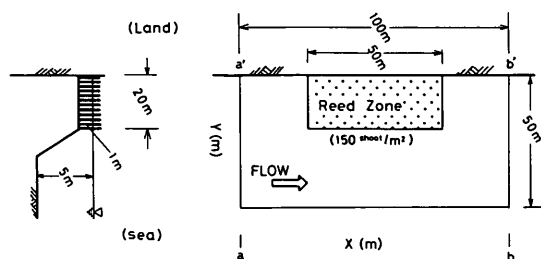
図-20 松輪地区ヨシ原周辺の底泥平均沈降速度
 w_{50} 分布

図-21 数値計算に用いた仮定の海岸地形

与えている。低レイノルズ領域での海底面の粗度 n_b として、次の Kouwen らの滑面粗度での曲線⁴³⁾を用いた。

$$n_b = 10^{(1.453 - 0.589 \log Re)} \quad (15)$$

また、ヨシ茎の C_d 値は、円柱に対する $C_d \sim Re$ 図⁴⁶⁾より、茎の径を用いたレイノルズ数 (Re_d) の関数として $Re_d = 2 \times 10^1 \sim 10^3$ の区間を次式で近似した。

$$C_d = 3.25 Re_d^{-0.17} \quad (16)$$

これらの関数を用いて、格子間隔 5 m の単層 ADI 法で流れ場を解いた。仮の $n_b \cdot C_d$ 値を与え、得られた流れ場から $Re \cdot Re_d$ を求め、新たな $n_b \cdot C_d$ を求める事を収束するまで繰り返した。

ヨシ原のある場合の流れの計算結果をベクトル図で図-22に示す。ヨシ原前面で沖側に向かう流れが、背後で岸側に向かう流れが形成されている。ヨシ原内は微弱な流速となっている。ヨシのない場合とある場合の x 方向の流速値の分布を比較すると、図-23のようになる。図中の数字は、 cm/s 単位で表した流速値 (u) であり、等流速値を結んだコンター線を引いてある。ヨシのない場合には、岸に平行な流れとなり、沖合いで速い流速となる。ヨシがある場合には、沖合い流れはほぼ同じであるが、ヨシ原周辺で流速が低減し、ヨシ原内では $1/3$ 程度に低下しているところも見られる。また図示はしてな

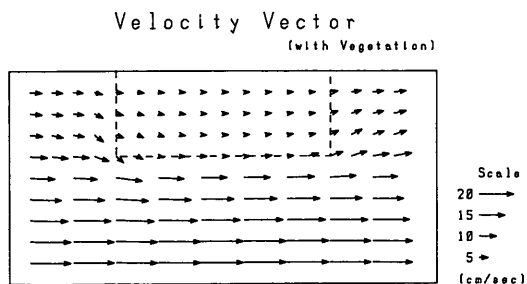


図-22 ヨシ原周辺の流れのベクトル図

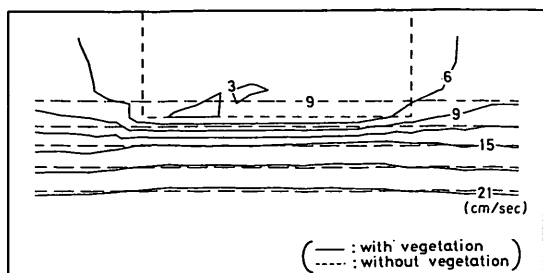


図-23 ヨシ原の有無による流速値の比較
(実線：ヨシ原あり，破線：ヨシ原無し)

いが、ヨシがあると、ヨシがない場合に比べ、ヨシ原前面で0.2～0.6mm水位が上昇し、背後で0.2～0.8mm水位が降下する。汀線に直角な岸～沖断面内では、水位の上昇・降下が岸側で大きく沖に出るに連れて小さい。ヨシ原の粗度効果と流速低減の状況が数値計算で無理なく表現できた。

(2)沈降計算

計算された流速場を用いて懸濁粒子の沈降拡散状況を計算した。ヨシ原内又はヨシ原外の投入点に、連続して一定負荷を投入し、緩和法で定常状態の濃度分布を求めている。水平拡散係数は $10\text{cm}^2/\text{s}$ を与えている。

沈降速度 w_0 が $0.1\text{cm}/\text{s}$ の場合の濃度分布を、図-24に示す。濃度は、投入点濃度(C_0)に対する比で表し、図中に濃度(C/C_0) 0.9, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1のコンター線を引きいてある。ヨシ原外に投入すると、卓越流れに流され楕円状の分布となる。分布形や楕円の大きさは、ヨシ原の有無に影響されずほぼ重なる。一方ヨシ原内に投入した懸濁物は、卓越流れが小さいため、円に近い楕円となる。ヨシ原がないときに比べ、楕円の大きさが小さく投入点周りから遠くには広がっていない。

w_0 が $0.001\text{cm}/\text{s}$ の粒子をヨシ原内に投入したときの濃度分布を、図-25に示す。ヨシがないときには下流へ

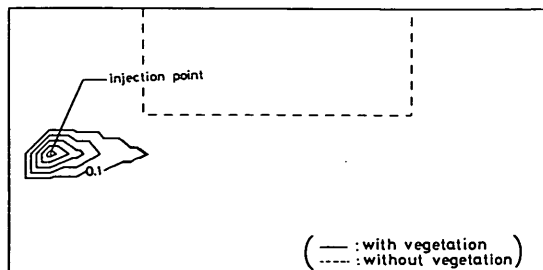


図-24 ヨシ原の有無による無次元懸濁粒子濃度(C/C_0)の分布比較(沈降速度 $0.1\text{cm}/\text{s}$)
実線：ヨシ原あり，破線：ヨシ原無し)

と大きな濃度で流出している。ヨシ原があると、ヨシ原内にはほとんど沈降し、下流への影響は少なくなっている。

定常濃度の算定結果であるので、底面への堆積フラックス分布は濃度の分布と相似形になる。堆積量も濃度分

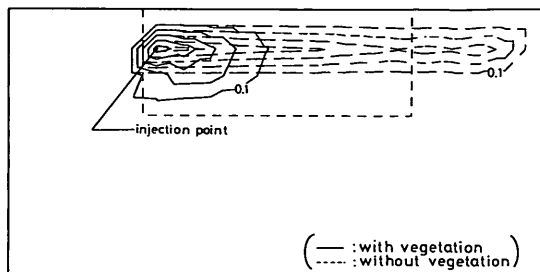


図-25 ヨシ原の有無による無次元懸濁粒子濃度(C/C_0)の分布比較(沈降速度 $0.001\text{cm}/\text{s}$)
実線：ヨシ原あり，破線：ヨシ原無し)

布と同様に、ヨシ原内で大きいことがわかる。ヨシ原の沈降・堆積効果は、特に微細粒子で大きく表れる。

(3)仮想ヨシ原の効果

2次元数値計算の結果からも、ヨシ原の粗度効果と流速低減作用が確かめられた。流速低減のおかげでヨシ原内滞留時間が延び、ヨシ原での粒子沈降促進の効果が発現できている。沈降速度の遅い微細泥に対してはヨシ原の効果が特に大きい。濁りの流入負荷源の前面に適切な規模形状のヨシ原があると、沖合いへの濁りの負荷が減ることになる。また、濁り粒子の含有している有機物や栄養塩も、ヨシ原内に堆積されることになる。しかし、ヨシ原の位置や規模、濁り粒子の沈降速度などによっては、ヨシ原の存在によって流れが沖に向かい多くの濁りを沖合いに押し出す可能性もある。ここで示した数値計算法などを用い周辺およびヨシ原内の流速分布が計算できれば、懸濁粒子の広がりや沈降堆積状況についてもあ

らかじめ見積ることができる。こうして、沿岸における適切なヨシ原の配置・規模等の検討が可能となった。

松輪地区のヨシ原域の拡大状況は、流入粒子負荷が不明なことなどから数値計算での検証ができなかった。

6. 沿岸ヨシの役割

6. 1 各作用の規模と予測法

表一1に示した各作用のうち、沈降促進作用、吸収同化作用について検討してきた。松輪地区のヨシ原を例に各作用の規模を比較すると共に、各作用の大きさの推定・予測の方法をまとめてみる。

a) 松輪地区のN・Pの貯留量は、部分的ではあるが図一12に掲げられている。生育期間途中に刈り取り等を行わなければ、この貯留量が年間のヨシ地上部への栄養塩吸収同化量となる。吸収同化速度は、Nで77kg/y, Pで6 kg/yとなる。立ち枯れ後の再溶出は、①立ち枯れても余り地上に倒れていない、②地上に倒れた茎の多くが干陸部に堆積している、等の観察結果からNについてはそれほど大きくないと思われる。刈り取り後低い温度で焼却処分をすると、重量は立ち枯れ時の1割程度にまで減少する。Pのほか、Nの4割は揮散せずに残り、焼却灰は良い肥料となる。

また、沈降促進作用は、5.4のヨシ原域の拡大速度より、Nで15~30kg/y, Pで10~20kg/yと推定された。Pについて比較すると、このヨシ原では、沈降促進作用がやや大きいものの、沈降・吸収同化の両作用の大きさはほぼ同じオーダーであることがわかる。ただし、Nについては地中での脱窒による含有量の減少を受けた後の値であり、沈降による実際の堆積速度よりもかなり小さい値と思われる。またこの見積値には、いったん干潟海底に沈降した粒子が、波などの作用でヨシ原内に運ばれたものも含んでいる。

b) 栄養塩の同化吸収作用の大きさは、ヨシの生育量、生育密度、生育面積などの観察と、ヨシの栄養塩含有量の測定とから見積れる。観察・測定ができないときは、表一2等から類似の地点での値を参考に推定できる。

粒子の沈降促進の作用は、ヨシ原の置かれた水理条件や懸濁粒子の沈降速度によって大きく影響されるため、一概に大きさを推定できない。境界条件や懸濁粒子径等がわかれば、5.5に示した数値計算手法により推定ができる。

6. 2 沿岸ヨシ原の水質浄化の役割

表一1の作用のうち粒子の沈降促進作用と栄養塩吸収同化作用とについて、その機構と速度を検討した。速度

値評価にやや粗さがあるものの、両者とも重要な水質浄化作用であることがわかった。

表一1の作用のうちでも脱窒作用は重要と思われるが、ここでは検討できなかった。干潟の夏期の脱窒速度として、50~100mgN/m²/dと言った値が報告されている³²⁾。半年にわたりこの値だとし、松輪地区のヨシ原に当てはめると、ほぼ25~50kg/yの値となる。ヨシのNの同化吸収と似たオーダーとなり、無視できない作用であると推定される。上記脱窒作用(25~50kg/y)と6.1aに示した沈降促進作用の見かけの作用(15~30kg/y)との和が、Nに関する沈降促進作用となる。脱窒作用や沈降促進作用は、ヨシ原がそこに存在することに起因する作用であり、人為的な刈り取り処分などとは無関係に働く作用である。この地区のヨシ原では外海への栄養塩負荷を削減する効果として、栄養塩吸収作用と共に重要であることがわかる。表一1の残された各作用についての評価もさらに検討する必要がある。

各作用による栄養塩の最終的姿(底泥や生物体)は、他の動物や細菌などによって利用されるようになる。底泥やヨシ体以後の栄養塩のフローについても、ヨシ原の生態系の連鎖の中で検討する必要がある。ヨシ原は、表一1に示した直接的な浄化作用と共に、豊富な生物を抱えた系としてもその役割を評価・認識される必要がある。又、野鳥観察場・水辺の景観改善等の特性からの検討もヨシ原の評価にとって重要であろう。このように、ヨシ原の水質浄化の多面にわたる役割について、今後も検討が必要である。

7. おわりに

ここにまとめた研究は、昭和59年より5年間にわたって国立機関公害防止等試験研究費により実施してきた調査・検討を中心にし、その後実施した補足調査等を加えたものである。ヨシの生理およびヨシ原の生態系について、元東北大学理学部栗原康教授には適切な御指導・御助言を受けた。現地調査に当たっては、環境庁自然保護局、宮城県保健環境部、三浦市、および第二、三、五の各港湾建設局の協力を得た。研究の進め方について、当所海洋水理部長堀江毅博士の御指導を受けた。ここに記して深く感謝致します。

(1990年11月30日受付)

参考文献

1) Vollenweider, R. A. : Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and flowing Waters, with

Particular Reference to Nitrogen and Phosphorus as Factors in Eutrophication, Technical Report DAS/CSI/68. 27, OECD, Paris, 1968

2) Hosokawa, Y. and T. Horie : Water quality improvement by retardation of nutrient release - Estimation and analysis by a simplified model-, in "Management of Bottom Sediments Containing Toxic Substances", US Army Corps of Engineers, 1982, pp.82-106

3) 堀江毅：海域の物質循環過程のモデル化と浄化効果の予測手法について，港湾技術研究所報告第26巻第4号，1987，pp.57-123

4) 中田喜三郎：対話「環境容量」，海洋科学，第9巻第1号，1977，pp.7-14 もしくは，末石富太郎：都市環境の蘇生，中公新書405，1975，228p.等に「環境容量II」として述べられている。一方，海水交換なども含めた環境容量論としては，例えば，柳哲雄：大阪湾の物理過程(大阪湾の緩衝容量)，海と空，第62巻第2-3合併号，1986，pp.81-88

5) 細川恭史：水質環境改善のための生態活動の利用について，昭和63年度港湾技術研究所講演会，1988，pp.1-40

6) 大滝末男・石戸忠：日本水生植物図鑑，北隆館，1980

7) 大槻忠：水草と海草，埋立と浚渫，No.114，1983，pp.31-37

8) Environmental Effects Laboratory : Feasibility of the Functional Use of Vegetation to Filter, Dewater, and Remove Contaminants from Dredged Material, Waterways Experimental Station, US Army Corps of Engineers, 1976

9) 栗原康：干潟は生きている，岩波新書，(1980)

10) 栗原康：海・陸境界面の生態学的諸問題，沿岸海洋研究ノート，第24巻第1号，1986，pp.21-32

11) 鈴木孝男ら：塩性湿地，"栗原康編著，河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー，東海大学出版会，1988"のうち pp.142-149

12) 神田学，日野幹夫：植生による気候緩和効果に関する基礎的研究，第33回水理講演会論文集，1989，pp.685-690

13) Graneli, W and D. Solander : Influence of aquatic macrophytes on phosphorus cycling in lakes, Hydrobiologia, Vol.170, 1988, pp.245-266

14) 堀江毅ら：植物体(ヨシ)による浄化能力の検討，港湾技研資料 No.591，(1987)

15) Brix, H. : Treatment of wastewater in the

rhizosphere of wetland plants the root-zone method, Wat. Sci. Tech. , Vol.19, 1987, pp.107-118

16) Yamasaki, S. : Role of plant aeration in zonation of *Zizania latifolia* and *Phragmites australis*, Aquat. Bot., Vol. 18, 1984, pp.287-297

17) 竹中肇・江崎要：干拓地の土質と植生-主として八郎潟干拓地について-，土と基礎，No. 916，1976，pp.19-26

18) Brix, H. and H.-H. Schierup : The use of aquatic macrophytes in water-pollution control, AMBIO, Vol. 18, No.2, 1989, pp.100-107

19) Takeda, S and Y. Kurihara: The effects of the reed, *Phragmites australis* (Trin.), on substratum grain-size distribution in a salt marsh, Jour. Oceanographical Society of Japan, Vol.44, No.3, 1988, pp.103-112

20) 室田明・福原輝幸：水生植物を有する開水路流れの乱流構造に関する実験的研究，土木学会論文集，Vol. 338，1983，pp.97-103

21) Li, R.-M. and H.W. Shen: Effect of tall vegetation on flow and sediment, ASCE Vol.99 HY 5, 1973, pp.793-814

22) Kadlec, R.H.: Overland flow in wetlands: Vegetation resistance, ASCE Vol.116 HY 5, 1990, pp. 691-706

23) Bowmer, K.H.: Nutrient removal from effluents by an artificial wetland; influence aeration and preferential flow studies using Bromide and dye tracers, Wat. Res., Vol.21, 1987, pp. 591-599

24) 例えば，Mitsch, W.J. et al., Ed.: WETLAND MODELLING, Developments in Environmental Modelling 12, Elsevier, 1988 または Reed, S.C. et al.: NATURAL SYSTEMS FOR WASTE MANAGEMENT AND TREATMENT, McGraw-Hill Book Co., 1988

25) 川島博之，鈴木基之：湖沼葦帯の自然浄化能，第21回水質汚濁学会講演集，1987，pp.139-140

26) Reddy, K.R. and W.F. DeBusk: Nutrient storage capabilities of aquatic and wetland plants, Magnolia Publ. Inc., (1987)

27) 今岡努・寺西靖治：ホテイアオイの栄養吸収能を利用した水質浄化に関する研究，水質汚濁研究，第8巻第5号，1985，pp.314-322

28) 栗原康・鈴木孝男：砂ろ過システムでのN,P除去率に及ぼすヨシの影響，文部省「環境科学」研究報告所，

B281-R12-1, 1986, pp.87-92

29) 三島亭:水生植物による水域浄化システム, HEDORO, No.33, 1985, pp.43-47

30) Suzuki, T. et al.: Amplification of total dry matter, nitrogen and phosphorus removal from stands of *Phragmites australis* by harvesting and reharvting regenerated shoots, in " CONSTRUCTED WETLANDS FOR WASTEWATER TREATMENT", Lewis Publishers Co., 1989, Chelsea, Michigan, pp.530-535

31) van der Linden, M.J.H.A.: Phosphorus economy of reed vegetation in the Zuidelijk Flevoland polder (The Netherlands): seasonal distribution of phosphorus among shoots and rhizomes and availability of soil phosphorus. -Acta Oecologie Oecol. Plant., Vol.7, 1986, pp.397-405

32) 佐々木克之:干潟域の物質循環, 沿岸海洋研究ノート, 第26巻第2号, 1989, pp.172-190

33) Wathugala, A.G. et al.: Removal of nitrogen, phosphorus and COD from waste water using sand filtration systems with *Phragmites australis*, Wat. Res., Vol. 21, 1987, pp.1217-1224

34) Brix, H.: The applicability of the wastewater treatment plant in Othfresen as scientific documentation of the root-zone method, Wat. Sci. Tech., Vol.19, 1987, pp.19-24

35) Gersberg, R.M. et al.: Wastewater treatment by artificial wetlands, Wat. Sci. Tech., Vol.17, 1984, pp. 443-450

36) Cooper, P.E. et al.: Sewage Treatment by Reed Bed Systems, J.IWEM, Vol.3 No.1, 1989, pp.60-74

37) 石川雄介:三浦半島江奈湾干潟における底生生物の分布性状, 電力中央研究所報告・調査報告485027, 1987, 11p.

38) 気象庁:海洋観測指針, 日本気象協会, 1985

39) 日本規格協会: JIS-K0102 工場排水試験方法, 1985

40) 人工海水(改変 Burkholder 人工海水)の組成は, 堀江毅ら:海水の AGP 試験法とその適用, 港湾技術研究所報告, 第17巻第2号, 1978, p.61・表一7

41) 細川恭史ら:無機栄養塩類の自動測定システムの開発, 港湾技研資料, No.613, (1988)

42) 細川恭史ら:植物体(ヨシ)による浄化能力の検討(その2)-ヨシ原の粗度効果と濁りろ過作用の水路実験-, 港湾技研資料, No.667, (1990)

43) Kouwen, N. and T. E. Unny: Flexible roughness in

open channels, ASCE Vol.99 HY 5, 1973, pp.713-728

44) Schlichting, H.: Boundary-Layer Theory, 7th ed., McGraw-Hill, 1979, p.17, Fig.1.4

45) 細川恭史:ガストレーサーを用いた流水の再曝気係数の測定, 港湾技研資料 No.562, (1986)

46) 土木学会:水理公式集, 1985, PP.74
または 上記39)

使用記号一覧

A_r	: 単位面積当りのヨシ生息密度
C	: 水質濃度, 汚染物質濃度
C_e	: 時間変動のない定常状態での水質濃度, 定常解
C_d	: 円柱の抗力係数
C_i	: i 回目の分析濃度値
C_o	: 投入点 ($x = 0$) での水質濃度
d	: 円柱の径, ヨシの茎径
E_x	: x 方向の水平拡散係数
E_y	: y 方向の水平拡散係数
E_z	: z 方向の水平拡散係数
F_r	: 平均流速と水深とで表したフルード数
g	: 重力加速度
h	: 水深, 平均水深
Δh	: 2 点間の水位差
I	: エネルギー勾配
I_b	: 底面摩擦によるエネルギー損失率
I_d	: ヨシ円柱列によるエネルギー損失率
k	: 浄化作用に関する 1 次反応式速度係数, 式(6)ではヨシの茎などへの付着等による除去速度係数
m	: 汚染物質質量
m_n	: n 回目の分析時まで, ヨシに取り込まれずに残った栄養塩量
n	: マニングの粗度係数
n_b	: 底面摩擦による粗度係数
n_d	: 円柱の抵抗による粗度係数
Q	: 海水交換流入量
q	: 淡水流入量
Re	: 水深を代表長さとして表したレイノルズ数
Re_d	: 円柱径を代表長さとして表したレイノルズ数
t	: 時間
t_o	: 湾内平均滞留時間
u	: x 方向の流速

ヨシ原による水質浄化の特性

V	: 内湾水体積	w_o	: 粒子の沈降速度
V_i	: i 回目の分析終了時にビーカー内に残存している栽培液量	w_{50}	: 50%平均粒径の相当する平均沈降速度
v	: y 方向の流速	x	: 流れの流下方向の距離
v_i	: i 回目の分析に要した採水量	y	: 流れの横断方向の距離
W	: 汚濁負荷量	z	: 流れの鉛直下向き方向の距離
w	: z 方向の流速	τ_d	: 1 本の円柱に働く抗力