

卒業論文

# 筑後川河口域における 堆積物中のリンの動態

北九州市立大学 国際環境工学部  
環境化学プロセス工学科  
山口 達人

## 目次

1. 要旨	P3
2. 緒言	P4
3. 調査方法	P5
4. 結果と考察	P7
5. 参考文献	P15
6. 謝辞	P15

## 1. 要旨

In order to explain the high productivity of an estuary community, we analyzed the dynamics of phosphorus in pore water in sediments at the estuary of the Chikugogawa River. ORP is lower within *Phragmites* community than the open site. Phosphorus concentration within and outside the *Phragmites* community were 5.24mg/L and 1.40mg/L, respectively. Thus, anoxic condition with sufficient supply of organic matter from vegetation accelerate mineralization of insoluble-P and the consequent enrichment of soluble-P in river water column.

筑後川が流入する有明海は、河川から流入するリンや窒素による栄養過剰により赤潮がたびたび発生している。一般に河川河口域は流域全体で特に一次生産の高い場所であることが知られており、九州最大の河川である筑後川河口域における栄養塩の動態を解明することは、周辺流域・海域の生態系管理のみならず、海産資源の保全の観点からも重要である。

本研究では水圏、土壌、水生植物の相互関係に着目し、筑後川河口干潟において、ヨシの生育地と非生育地での堆積物間隙水中のリン酸イオンの分布を調査することで、河口域におけるリンの動態に対するヨシの寄与を明らかにすることを試みた。

調査は2008年11月～2009年1月の期間に福岡県大川市の筑後川河口域左岸(ヨシ群集)および右岸(無植生区)で行った。

堆積物中の酸化還元電位(ORP)の測定にはホリバ製 ORP 計 (D-54) の電極を土壌用に改良したものを用いた(Ag/Cl 比較電極を使用)。また、ORP を測定した場所の表層から40cmまでのコアを採取し、3cm ごとに分画して遠心分離で分取した間隙水中のリン酸イオン( $\text{PO}_4^{3-}$ )濃度をモリブデン青法を用いて測定した。有機物含量、イオウ含量は元素分析計にて測定した。

堆積物表層から深度が深くなるにつれて ORP が低下し、それとともに間隙水中のリン酸イオン濃度が上昇した。このことから上流から運ばれ表層の酸化層に堆積した不溶性の無機態リンは、深部の還元層で可溶化し、これが濃度勾配による拡散と植物根からの吸収によって水相や地上部に輸送されていることが示された。

また、低密度のヨシ群落内では、還元条件が強まり、堆積物中の  $\text{PO}_4^{3-}$  は 20cm 以深の層で最大 5.24mg/L になった。無植生区では堆積物中の ORP は深度 40cm まで酸化状態で、 $\text{PO}_4^{3-}$  は 1.40mg/L 以下であった。

$\text{PO}_4^{3-}$  が低濃度である深度では堆積層中にイオウが検出されなかったが、高濃度の深度では平均 1.06%含有していたことから、 $\text{PO}_4^{3-}$  の溶出に硫酸還元菌が関与していることが推定された。

## 2. 緒言

### 2.1 筑後川河口域の栄養塩動態を調査する意義

①有明海は 1980 年前後に漁業生産性で日本一を誇ったが、それ以降漁獲量は減少し続けている。その背景には諸説があり、原因究明に向けてこれまで数多くの研究がなされてきた。未だにその原因について決定的な解答は得られていないが、有明海において 80 年代までほとんど観測されていなかった赤潮や貧酸素水塊が近年頻発していることから、海域での栄養塩循環になんらかの異変が起こっており、それが生産性を低下させる一因となっていることは間違いないだろう。

②一般に栄養塩の海域への負荷の主たるものは河川からの流入であると考えられている。筑後川は有明海に注ぐ最大の河川であり、その河口域における栄養塩の動態を調査することは周辺流域・海域の生態系管理、海産資源の保全に関して大きな役割を果たすだろう。

### 2.2. 河口域でリンの動態に寄与する要素

#### 2.2.1 リンについて

リンは生物の必須元素であるが、その一方で過剰に蓄積すると富栄養化を引き起こす原因となる。②リンは環境中に様々な形態で存在する。その形態の中で植物プランクトンが利用できるのが溶解性  $PO_4$  の形態である。しかし水中でそのような溶解性の形態であるのは全リンのおよそ 10%に過ぎず、水中におけるリン負荷の大半は土壌粒子の無機態、あるいは有機体の粒子に吸着した不活性なものである。

③筑後川河口域におけるリンに関する研究は土壌物質への吸着・溶脱作用についての研究がなされている。

#### 2.2.2 干潟について

③栄養塩の動態に対する干潟の役割としては、河川から流入するリンや窒素などの栄養塩を一旦堆積層内に取り込むことで栄養塩の直接的な海域への流入を緩衝する作用があげられる。

#### 2.2.3 ヨシについて

④ヨシは水中からの栄養塩の除去効果が認知されており、植栽水路による実験では季節による変化はあるものの年間を通じて TN で 20%、TP で 30%前後の除去率があることが報告されている。筑後川においてヨシは河口域でもっとも生息面積の広い植物である[⑤河口から 4km までの地点で 3.6ha の生息面積がある]という事実を踏まえると、筑後川河口域における栄養塩の動態に関してヨシ群落の存在を無視することはできない。

このように、これまで河川河口域における栄養塩の動態に関して、水相、土壌、植物それぞれの役割が着目され、研究されてきた一方でそれらの相互作用に関する研究例は少なく未解明なままである。

そこで本研究では水圏、土壌、水生植物の相互関係に着目し、筑後川河口干潟において、ヨシの生育地と非生育地での堆積物間隙水中のリン酸イオンの分布を調査することで、河口域におけるリンの動態に対するヨシの寄与を明らかにすることを試みた。

### 3.調査方法

#### 3.1 調査地

本研究の調査は 2008 年 11 月から 2009 年 1 月まで行った。

調査地は福岡県柳川市の筑後川河口域である。(Fig.1(a))



Fig.1(a)調査地 筑後川河口

[出典：Google マップ]

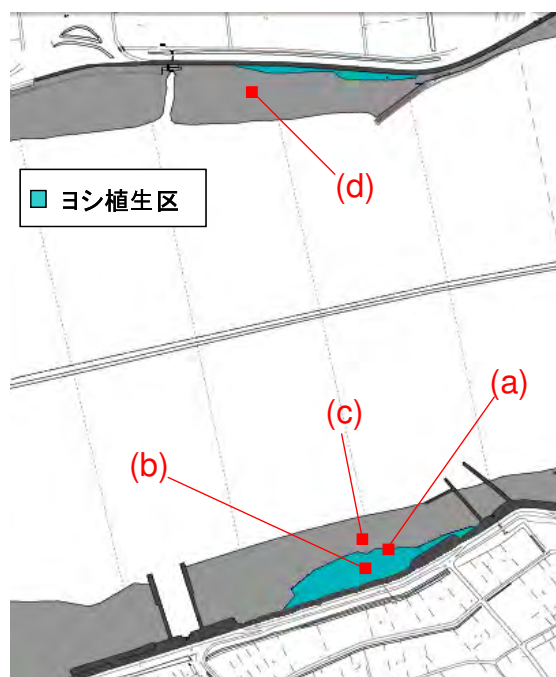


Fig.1(b)調査地 筑後川河口

[出典：筑後川 植生図・植生面積一覧表]

河口域において以下の 4 地点を調査地とした。(Fig.1(b))

(a)ヨシ群生内で密度が低い(58 本/m<sup>2</sup>) (以下(a)地点)

(b)ヨシ群生内で密度が高い(242 本/m<sup>2</sup>) (以下(b)地点)

(c)無植生区であるが、地下にヨシの根などの遺体が存在する (以下(c)地点)

(d)無植生区で表層にも地下にもヨシは存在しない (以下(d)地点)

上記の 4 地点で、堆積層の深さごとに(40cm まで)以下の項目を測定し、結果を比較した。

## 3.2 調査項目

### 3.2.1 堆積物中の酸化還元電位の測定

#### 3.2.1.1 使用機器および材料

堆積物中の酸化還元電位(ORP)の測定には堀場製作所製のハンディーpHメーター(D-54)を用い、測定電極は白金電極を銅線につないだものを、比較電極には同社市販品のKCl3.33mol/L溶液のAg/AgCl電極を使用した。測定電極の銅線部は硬化接着剤で約60cmの亚克力棒に固定した。この棒に目盛をつけることで、表層からの深さを測りながら電位が測定できるようにした。

#### 3.2.1.2 電位の測定方法

測定は表層から20cmまでは1cmごとに行い、20cm以深は5cmごとに40cmまで測定した。また、測定に際して現場の水溜りの水、あるいは間隙水を3.0μmのメンブランフィルターでろ過したものに比較電極を浸した。

### 3.2.2 間隙水中のリン酸イオン濃度の測定

#### 3.2.2.1 間隙水の分取

ORPを測定した場所の表層から40cmまでのコアをアルミ製の円筒を用いて採取し、現場にて遠沈管をコアに突き刺して3cmごとに分画して実験室に持ち帰った。

持ち帰ったコアサンプルを遠心分離機にかけ(コクサンH-30R:2500RPM、15min)、堆積物中に含まれている間隙水を分取した。

#### 3.2.2.2 リン酸イオン( $\text{PO}_4^{3-}$ )濃度の測定

間隙水中のリン酸イオン( $\text{PO}_4^{3-}$ )濃度の測定を、L-アスコルビン酸還元モリブデン青法を用いて測定した。

##### 操作1：発色試薬の調整

酒石酸アンチモニルカリウム三水和物 0.024g、L-アスコルビン酸 0.72g、七モリブデン酸六アンモニウム四水和物 0.6gを38mlの水に溶かし、12Mに調整した硫酸12mlを加えた。

##### 操作2：検量液の調整

リン酸二水素カリウムを105℃で約5時間乾燥し、放冷後に適量を水に溶かして検量液とした。検量液の濃度は0、0.25、0.5、0.75、1.0mg/Lで、液量は10mlである。

##### 操作3：試料の希釈

遠心分離によって得られた間隙水を3.0μmのメンブランフィルターでろ過し、全体で5mlとなるように希釈した。

希釈した試料に発色試薬0.4mlを、検量液には0.8mlを加え、青色の発色が安定するまで約15分間静置した後、分光光度計(JASCO V-530)を用いて880nmの吸光度を測定して

濃度を求めた。

### 3.2.3 炭素含量、イオウ含量の測定

間隙水を抜き出したコアサンプルを風乾した後、試料 0.5g を 100ml の蒸留水で洗浄して脱塩素を行い、再度試料を風乾して元素分析装置(ヤナコ MT6 CHN Corder)にて炭素含量、イオウ含量を測定した。

なお、脱塩素の洗浄に用いた蒸留水は全有機炭素計(SHIMADZU TOC-V CSN)にて TOC を測定し、堆積物中の炭素含量に換算して元素分析の測定値に加算した。

### 3.3 検証実験

3.2 の調査の結果から還元条件で間隙水中のリン酸イオンが高濃度になるという結果が得られたことを受けて、その実証を室内実験にて行った。

密閉したポリ容器の中に堆積物(表層から 10cm 程度)30g と現場の間隙水 1 L を入れ、役 8 時間静置した後、窒素と空気それぞれ 1 週間ばっ気を行った。その間定期的に酸化還元電位、溶存酸素濃度、リン酸イオン濃度を測定した。

## 4. 結果と考察

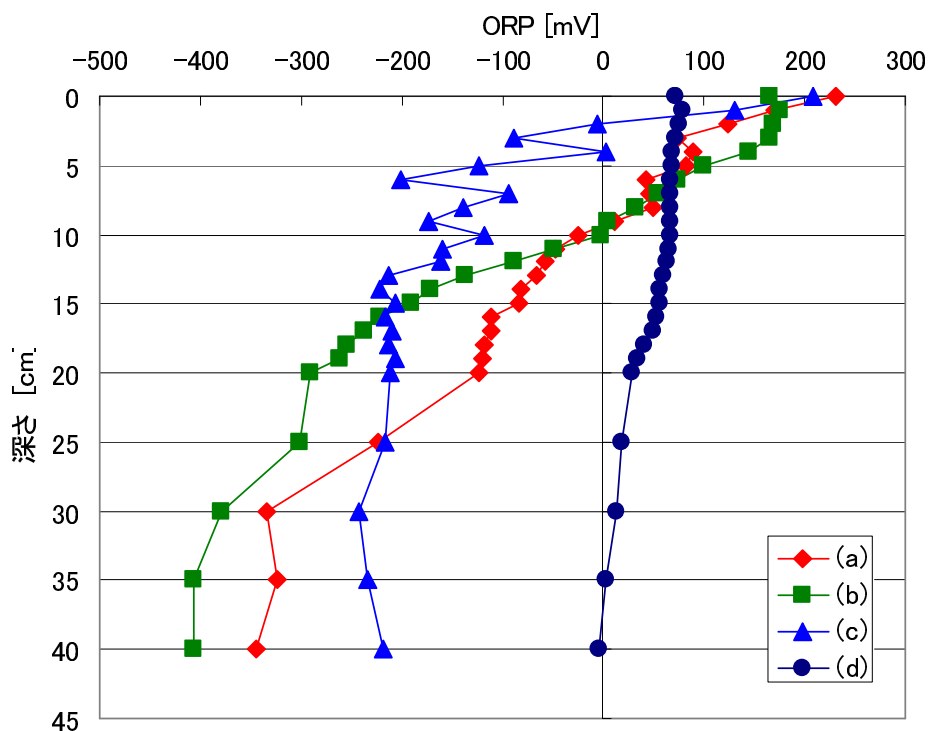


Fig.2 各調査地における酸化還元電位(ORP)の堆積層深さごとの変化 (a)ヨシ群生内で密度が低い(b)ヨシ群生内で密度が高い(c)無植生区であるが、地下にヨシの根などの遺体が存在する (d)無植生区で表層にも地下にもヨシは存在しない

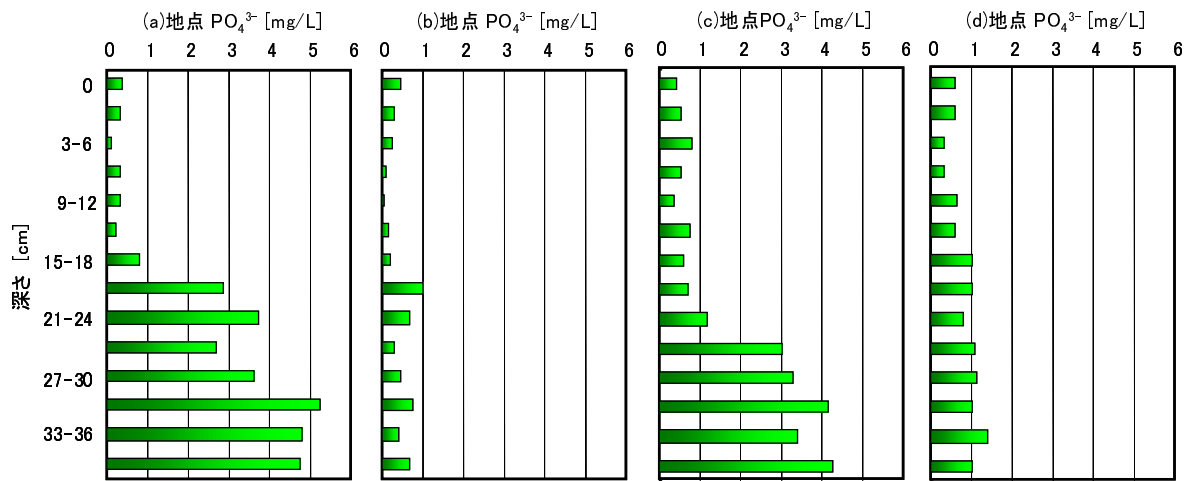


Fig.3 各調査地における間隙水中のリン酸イオン濃度の堆積層深さごとの変化 (a)ヨシ群生内で密度が低い(b)ヨシ群生内で密度が高い(c)無植生区であるが、地下にヨシの根などの遺体が存在する (d)無植生区で表層にも地下にもヨシは存在しない

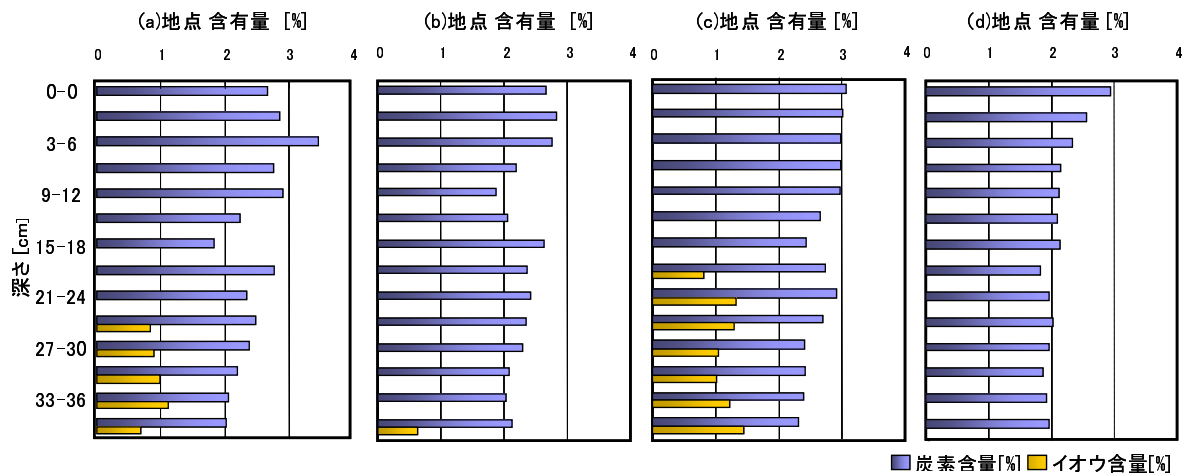


Fig.4 各調査地における炭素及びイオウ含量の堆積層深さごとの変化 (a)ヨシ群生内で密度が低い(b)ヨシ群生内で密度が高い(c)無植生区であるが、地下にヨシの根などの遺体が存在する (d)無植生区で表層にも地下にもヨシは存在しない

#### 4.1.1 酸化還元電位について

Fig.2 は各地点で測定した酸化還元電位の堆積層深さごとの値である。どの地点も深度が深くなるにつれて堆積層が還元化していく傾向を持つことがわかる。

ヨシ群生内である(a)、(b)地点と(c)地点を比較すると、(c)地点は値にばらつきがあるものの、表層 6cm までの電位の低下が(a)、(b)地点と比べて急である(6cm 層で(c)地点は-201mV であるのに対し、(a)、(b)地点はそれぞれ 42、74mV)。この表層付近での電位の低下の違いはヨシの存在の有無によるものであると考えられる。<sup>6)</sup>ヨシは維管束植物であり、地上部で取り込んだ酸素を体組織を通じて地下部の根にまで輸送する働きがある。その輸送され



た酸素によって堆積層が酸化される。ヨシの遺体しかない(c)地点では電位が急降下するが、生きたヨシが存在する(a)、(b)地点ではヨシの酸素輸送による根圏の酸化によって還元化が緩和されるため、表層部での電位の降下が(c)地点に比べて緩やかになっていると思われる。また、(a)地点と(b)地点を比較した場合にもヨシの密度が高い(b)地点の方が(a)地点よりも表層部の還元化が緩やかであり、生きた根の集積度合いが酸化還元電位の変化に影響を与えていることが見てとれる。表層から 5、6cm までの電位変動に差が現れるのは、この付近の層にヨシの根が集中して存在するからであろう。

(d)地点の電位の変化は他の(a)、(b)、(c)地点と比較すると電位低下の勾配が極端に緩やかになっており、表層で 72mV、40cm で-4mV である。(d)地点と他点との違いは堆積層中の有機物含量の違いではないかと推察される。(a)、(b)地点には生きたヨシが存在し、ヨシ自身のみならず、ヨシ群落を住处とする生物による有機物の堆積層への供給がある。また、(c)地点には表層に生きたヨシこそ存在しないが、堆積層内には朽ちたヨシの根がみられ、これが有機物の供給源となっている。堆積層に有機物が供給されると好気性細菌が活発に活動し、堆積層内の酸素を消費して還元化を促進する。一方、ヨシの遺体すらない(d)地点では有機物の供給がないために好気性細菌の活動が小さく、堆積層の還元化は進行していないのだと考えられる。

#### 4.1.2 リン酸イオン濃度について

Fig.3 は間隙水中のリン酸イオン濃度の各地点の堆積層深さごとの値である。堆積層間隙水中のリン酸イオン濃度の変化に影響を与える要因としては、堆積物の構成物質である Fe イオンや Al イオンと結合して固定化されていたリン酸イオンが pH や ORP の変化にともない、結合を解き間隙水中に溶出してくることがあげられる。

(a)地点は 18cm 以深、(c)地点は 24cm 以深から急激にリン酸イオンの濃度上昇がみられる。一般的にリン酸イオンは還元条件で溶出しやすいといわれており、4.1.1 で述べた酸化還元電位の対応からも、電位の低下にともなって間隙水中にリン酸イオンが溶出しているものであると考えられる。加えて(a)地点、(c)地点ともに 20cm 前後より深い層で堅密な粘土層を形成しており、粘土層の透水性の低さから、還元条件で溶出したリン酸イオンが蓄積されやすい条件を作り出し、急激な濃度上昇をもたらしているのではないかと推定される。

(b)地点と(d)地点は図を見る限り、似た傾向であるように思えるが、両者のリン酸イオン濃度が低い理由はまったく異なるであろう。

Fig.2 より、(b)地点は(a)地点、(c)地点よりも最終的な電位は低く、リン酸イオンの溶出に十分な還元化が進行していることがわかる。ゆえに(b)地点も(a)地点、(c)地点と同程度のリン酸イオンが存在していたと考えられるが、高密度に存在するヨシがリン酸イオンを吸収するために、堆積層の間隙水中に含まれるリン酸イオンの実質的な測定値は低くなっているのだと考えられる。

(d)地点に関しては Fig.2 より、堆積層の還元化があまり進行していないことがわかる。よって、堆積物から間隙水へのリン酸イオンの溶出が起こりにくい条件となっており、間隙水中のリン酸イオン濃度は(a)地点、(c)地点よりも低い値となっているのである。

#### 4.1.3 炭素含量、イオウ含量について

Fig.4 は堆積層深さごとの炭素含量とイオウ含量を比較したものである。

本研究では炭素含量を堆積層内の有機物含量の指標と捉えることとした。堆積層の深さごとの炭素含量の変化をみると、どの地点も堆積層深部よりも表層の方が炭素含量が多い傾向にあり、4.1.1.で述べたような、有機物含量が多ければ酸化還元電位が低くなるという対応関係は必ずしも成立しない。しかしながら堆積層全体の炭素含量の平均値を計算すると(a)地点は 2.50%、(b)地点は 2.33%、(c)地点は 2.71%、(d)地点 2.13%となっており、平均値で考えれば有機物含量の多い地点で電位の低下が起こるということは言えそうである。

イオウ含量については(a)地点では 24cm より深い層で検出され、平均 0.90%、(b)地点では 36-39cm の層でのみ 0.64%が検出された。(c)地点では 18cm 以深の層で検出されて平均は 1.17%、(d)地点ではどの深さの層でも検出されなかった。

(a)地点、(c)地点ともにイオウが検出された層とリン酸イオンが高濃度となっている層は類似しており、(d)地点からはイオウが検出されなかったことから、リン酸イオンの溶出にイオウが関与していることが示唆されている。

その例として、硫化水素とリン酸鉄の反応からリン酸イオンが放出されるプロセスが考えられる。河口域には海水も流入するので、海水中に大量に含まれる硫酸イオンが堆積層内部にも侵入している。<sup>8)</sup>堆積層の還元層で硫酸イオン硫酸還元菌の働きによって硫化水素に還元される。発生した硫化水素は堆積層を構成するリン酸鉄と反応して硫化鉄を生成し、それと同時にリン酸イオンを放出する。これが還元条件で堆積物から間隙水へリン酸イオンが溶出してくる原因のひとつだと推定される。

## 4.2. 検証実験について

### 4.2.1 検証実験の意義

4.1 より、堆積層の酸化還元電位が低い層で、間隙水中のリン酸イオン濃度が高くなることが示された。リン酸イオンが還元条件で土壌の固相から間隙水の水相に放出されることは一般に知られることではあるが、自然環境という不確定な要素が多分に含まれる条件下で、筑後川の河口干潟においても実際にそのような現象が起こりうるのかを確かめる事は重要である。また本研究では都合上、調査項目の反復データを取ることができなかったため、その不確かさを補う面でも意義がある。

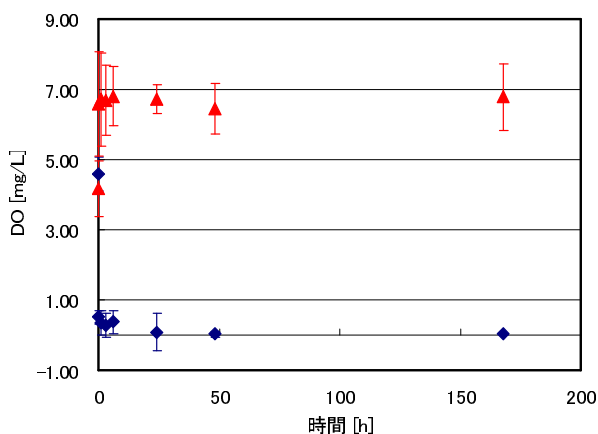


Fig.5(a) 堆積物から水相へのリン酸イオンの溶出検証実験の DO の時間ごとの変化

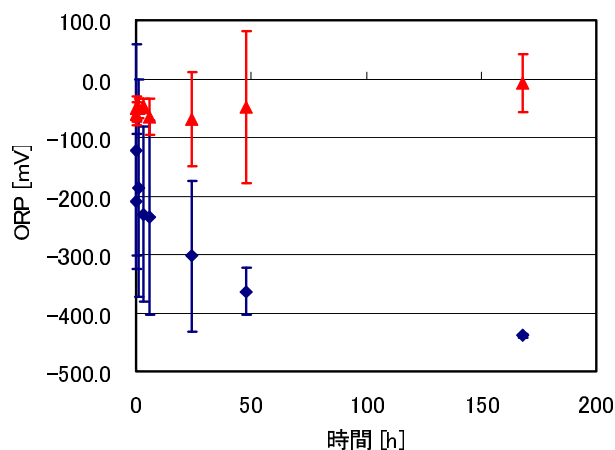


Fig.5(b) 堆積物から水相へのリン酸イオンの溶出検証実験の ORP の時間ごとの変化

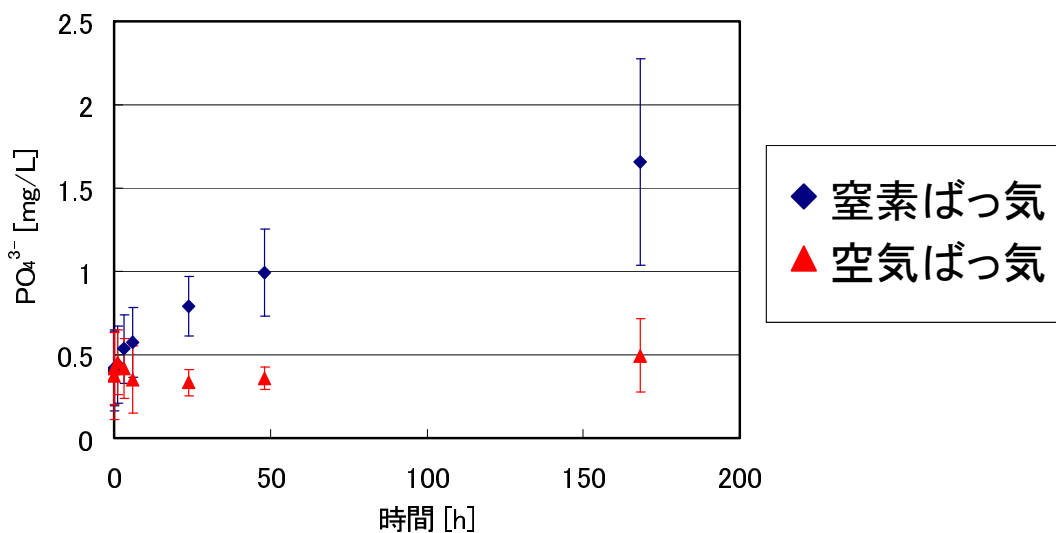


Fig.5(c) 堆積物から水相へのリン酸イオンの溶出検証実験のリン酸イオン濃度の時間ごとの変化

#### 4.2.2 検証実験の結果

Fig.5(a)より、空気ばっ気では DO の値は初め 4.18mg/L で一週間後に 6.78mg/L と上昇しており、窒素ばっ気では 4.59mg/L から時間経過とともに値が低下していき、一週間後には 0.02mg/L となった。また Fig.5(b)より、空気ばっ気の ORP は-51.0mV から始まり、上昇と下降を繰り返しながら最終的に一週間後には-6.33 と値が上昇しているが、対して窒素ばっ気では-122mV からはじまり、時間経過にともない電位が低下していき 1 週間後には -439mV となっている。これらの結果から、本実験系で空気ばっ気によって酸化条件が、窒素ばっ気によって還元条件が再現されていることがわかる。

Fig.5(c)は時間経過に対するリン酸イオンの濃度変化を表したものである。空気ばっ気では初期濃度 0.373mg/L から、1 週間後で 0.494mg/L となっており大きな変化は見られない

が、一方で窒素ばっ気では初期濃度 0.420mg/L から 1 週間後 1.66 mg/L で 4 倍近い値となっている。このことから筑後川河口干潟の堆積層においても、還元条件で堆積物から間隙水へリン酸イオンが溶出することが実証された。

#### 4.3 季節変動、反復調査の必要性

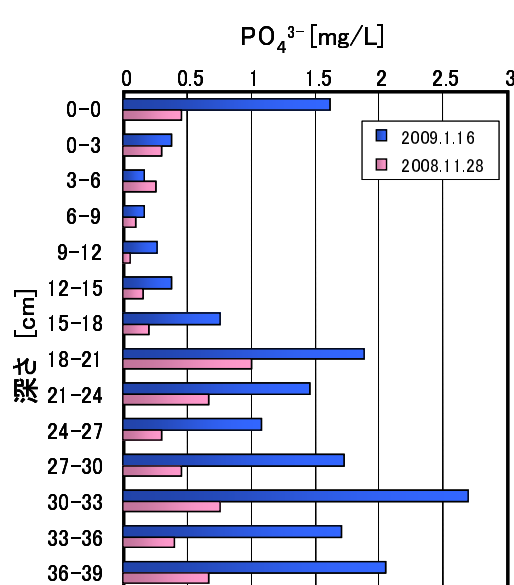


Fig.6(a) 2008年11月と2009年1月の(b)地点における間隙水中のリン酸イオン濃度の堆積層深さごとの変化の比較

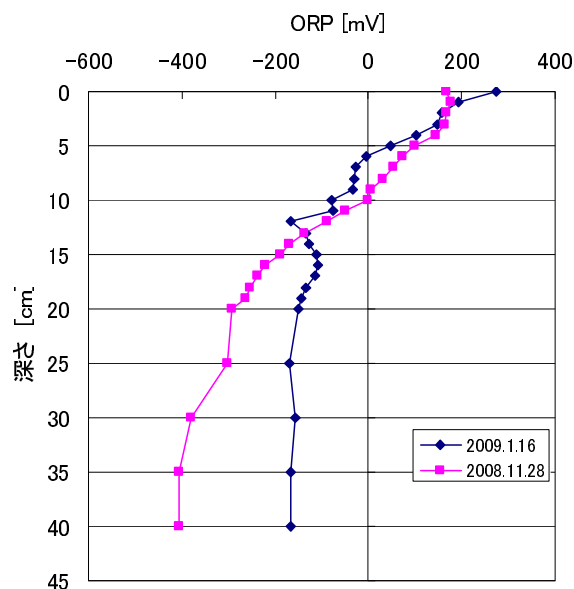


Fig.6(b) 2008年11月と2009年1月の(b)地点における間隙水中の ORP の堆積層深さごとの変化の比較

Fig.6(a)(b)は(b)地点におけるリン酸イオン濃度と ORP の値を 2008 年 11 月 28 日と、2009 年 1 月 16 日に測定したものを比較した図である。

Fig.6(a)より、リン酸イオン濃度は深さごとの濃度変化の傾向はほぼ一致しているが、濃度の値は 11 月よりも、1 月測定値の方が全体的に高くなっている。これは、気温の低下とともにヨシが枯れ、活動が低下したために間隙水中からのリンの吸収が少なくなったからであると考えられる。この考えを支持するならば、河口域のリンの動態へのヨシの寄与を評価するには、季節変化に伴うヨシの活動の変化を追従して調査を行う必要があるだろう。

Fig.6(b)より、酸化還元電位について比較すると、13cm 以深の層から差が大きくなり、1 月の測定値は 40cm で-165mV、11 月は-407mV となっており、1 月は 11 月に比べてあまり還元化していない。これに関しても気温(あるいは堆積層内の温度)の低下によって堆積層を還元化させている好気性細菌の活動が低下したために還元化が緩和したものと考えられる。

また、酸化還元電位の測定値は変動しやすく、同じ調査地とみなせる場所でも測定点のわずかなズレによって値が大きく異なる場合がある。ORP 値を比べる場合はその点も考慮

しなければならない。

以上のことから、河口域のリンの動態を研究するにあたっては季節変化に伴う生物の活動の変化を視野に入れた長期的な調査と、測定値のばらつきを考慮した反復データの取得が必要であることがわかった。

#### 4.4 まとめ

これまでの結果から考察をまとめると以下ようになる。

ヨシが存在すると有機物が堆積層に供給され、堆積層の還元化が進行し、リン酸イオンが溶出する。リン酸イオンの溶出過程には硫酸還元菌による硫酸イオンの還元反応が関与している可能性がある。

ヨシの生息する密度が比較的低い場合にはリン酸イオンが間隙水中に溶出して、無植生区よりも高濃度のリン酸イオンを蓄える。しかし、高密度に生息する場合にはヨシ自身のリン吸収の為に逆に間隙水中のリン酸イオンは低濃度となる。

すなわち、筑後川河口域に生息するヨシは生息する密度によってリン酸イオンの貯蔵庫となったり、逆に吸収して除去したりするのである。

ただし、これらの結果は冬季(11月～1月)の調査によるものであるから、真に河口域におけるリンの動態に関する水相、土壌、植物の相互関係を評価する場合にはすべての季節変化を網羅した通年調査の結果を待たねばならない。

Fig.7では筑後川河口域におけるリンの動態について、これまでなされてきた研究報告を参考にしながら、本研究で明らかとなった部分がどのような位置関係にあるかを説明している。

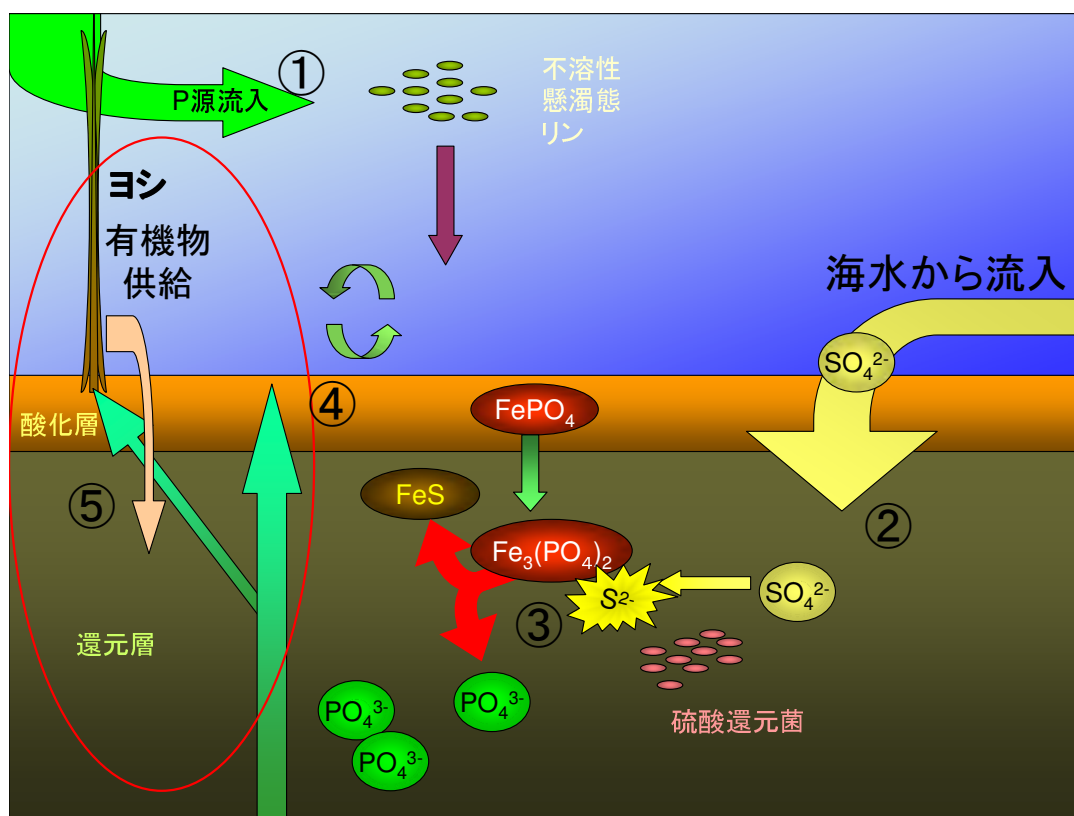


Fig.7 河口域でのリンの動態のまとめと本研究の位置関係

⑤で丸く囲った領域が、本研究で明らかになった部分である。

図の左側が河口上流、右側が海域である。

- ①②河川上流からリンが流入する。河川でのリンの負荷として大きなものは不溶性のものや懸濁物に吸着したものである。これらは流れが緩やかになる河口域で沈降し、堆積していく。
- ②③河口域には海水も流入するので、海水に含まれる高濃度の硫酸イオンが堆積層の中にも侵入している。すると、還元層内において硫酸イオンは硫酸還元菌によって硫化水素に還元される。
- ③④リン酸鉄を例にとると、リン酸鉄(Ⅲ)は還元層にてリン酸鉄(Ⅱ)へ還元される。硫酸還元によって発生した硫化水素はリン酸鉄(Ⅱ)と反応すると硫化鉄を生成し、その反応過程でリン酸イオンを溶出させる。
- ④⑤還元層で多量に溶出したリン酸イオンは濃度勾配を駆動力とした拡散によって表層に運ばれ、③潮汐による堆積物の巻上げを介して水相へと放出されていく。
- ⑤本研究で明らかになったのは、ヨシが存在することで有機物が堆積層に供給され還元化を促進させること、堆積層の還元化に伴い間隙水中のリン酸イオンに濃度勾配が存在すること、溶出したリン酸イオンはヨシによる吸収も行われていることである。

## 5.参考文献

- 1) 日本海洋学会編 2005 : 有明海の生態系再生をめざして 恒星社厚生閣発行 P1-2
- 2) A.J.ホーン、C.R.ゴールドマン 1999 : 陸水学 京都大学学術出版会発行 P167-188
- 3) 田中勝久 1994 : 沿岸・河口域のリン循環過程に及ぼす土壌物質の影響 西南水研技報,NO.28,73-119
- 4) 田畑 真佐子 加藤 聡子 川村 晶 鈴木 潤三 鈴木 静夫 1996 : ヨシ植栽水路における河川水中の窒素・リンの除去効果 水環境学会誌、第 19 卷 第 4 号 331-338
- 5) 国土交通省 九州地方整備局 筑後川河川事務所 2006: 筑後川 植生図・植生面積一覧表
- 6) William J. Mitsch James G. Gosselink 2007 : Wetlands Fourth Edition John Willy&Sons, Inc. P169-170
- 7) 土壌微生物研究会編 1966 : 自然界における元素循環と微生物、土と微生物 岩波書店発行 P249
- 8) 土壌微生物研究会編 1997 : 新・土の微生物(2) 植物の生育と微生物 博友社 p153
- 9) Watanabe Y. and Tsunogai, 1985: Adsorption-desorption control of phosphate in anoxic sediment of a coastal sea Funka Bay, Japan. Marine Chemistry, 15, 71-83

## 6.謝辞

国土交通省 九州地方整備局 筑後川河川事務所  
河川環境課 水質調査係長 諸石 新 様

貴重な資料の提供に感謝いたします。