

## 論文の内容の要旨

生物・環境工学 専攻  
平成 19 年度博士課程 進学  
氏 名 中田 達  
指導教員名 塩沢 昌

論文題目 湖岸湿原における水・物質循環と水質浄化機能の研究  
-霞ヶ浦妙岐ノ鼻湿原を事例として-

### 1. 序論

氾濫源や河岸の湿原は独特の自然環境を保持する自然の重要な構成要素である。その高い生物多様性や、水質保全、洪水緩和機能といった生態系サービスの価値が高く評価され、近年、保全への動きが高まっている。しかし、湿原は周囲の環境の変動によって大きな影響を受け、劇的に生態系が変化する危険性を有している。特に水環境に対する応答は顕著であり、湿原内の水位や水質は優占植生種の選択や保全上重要な種の生育に大きな影響を及ぼす。

また、湿原は水質浄化機能を有するとされており、洪水によって運ばれる懸濁態物質の沈降や、土壌の還元状態によって活性化される脱窒などの機能を持つ。人工湿原の窒素除去能力の研究は数多くの蓄積があり、実用化され、処理排水に含まれる高濃度の窒素の除去を可能にしている。これに対して、自然湿原を対象として水質浄化機能を定量した研究は、流入・流出する水量と物質量を把握することが難しいため非常に限られている。

本研究で対象とする妙岐ノ鼻湿原は、霞ヶ浦最大のヨシ原である。霞ヶ浦における富栄養化等の水質問題は解決には至っておらず、このような富栄養な水系において自然湿原がどれほどの浄化機能を発揮しているかを定量的に明らかにすることは、自然湿原の存在価値を認知させ、保全へとつながる重要な研究となる。また、湿原内には、絶滅危惧種や固有種らが 19 種確認されているが、近年、植生の変化が進行し、保全種の生育面積が減少している。人為的な湖の水位上昇が、湿原内の水・物質動態を変化させ、植生分布の変化の原因となった可能性がある。

そこで本研究では、妙岐ノ鼻湿原とその周囲の環境との間でやりとりされる水収支・窒素収支を算定し、水質浄化機能を定量化すること、湿原内部における水・物質動態を明らかにすることを目的とした。

## 2. 妙岐ノ鼻湿原の概要

妙岐ノ鼻湿原は茨城県霞ヶ浦（西浦）東南岸，新利根川河口左岸に位置する面積約 52 ha に及ぶ高水敷である（図-1）．大部分が高低差約 30 cm 以下のきわめて平坦な土地（YP+ 1.1 m 程度、YP とは利根川水系の基準面標高）である。湿原北岸の湖岸には自然堤防（YP+ 1.7 m 程度）が存在し湖との水の出入りを妨げているが，湿原東部（先端部）の河川側には自然堤防は見られない。湿原西端から南端の橋脚部までは護岸され，水の出入りは生じない。湿原内には，3 本の水路が走り，東端で新利根川と通じている。

湿原内の優占植生種はヨシ (*Phragmites australis*) である。ヨシの下層にはカサスゲ (*Carex dispalata*)，カモノハシ (*Ischaemum aristatum* var. *glaucum*) といった丈の低い植生が生育し，湿原東側（新利根川河口部）にはヨシ・カサスゲ群落，西側にはヨシ・カモノハシ群落という植生分布になっている。保全上重要な植物の多くはヨシ・カモノハシ群落内に生育している。また，湿原西側の一部では，毎年，萱材としてヨシ・カモノハシ等の刈り取りが行われている。

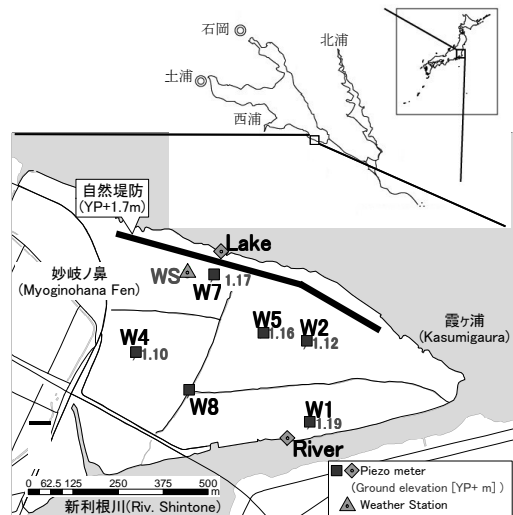


図-1 調査地および観測機器設置点  
Fig. 1 Study site and water level observation points

## 3. 水位変化のメカニズムと水循環

妙岐ノ鼻湿原内での水位変化のメカニズムの解明と、氾濫時における湿原内と河川・湖との間を流入・流出する交換水量の定量化を目的とし、湿原内外において水位計・気象観測タワーを設置し、水位・気象観測を行い、湿原の水収支を算定した。

氾濫時の水位変化は以下の3つのメカニズムを持つことがわかった。1) 氾濫時の湿原の水位は一樣な水面で、湖の水位で決まる。2) YP+ 1.35 m を下回ると、水位低下速度に地点間のばらつきが生じ、それは地形により決まるものである。3) 水位が地表以下に低下した際には、貯留量低下は蒸発散によって生じる。現地で測定した比浸出量は 0.2 程度であり、この値と蒸発散量とで水位変化がきまる。

氾濫イベントは一年間で平均 3~4 回生じ、2007 年には 4 回の氾濫イベントにおいて、新利根川からの流入量は 1472 mm と計算された。これは氾濫期間中に年間降雨量よりも多い流入量が生じていることを示している。また、水位上昇に占める河川からの流入水の割合は 72~82 % となり、氾濫による河川からの水、および栄養塩類の影響が大きいことが示唆された。の 7~8 割が河川からの流入であることを示しています。

## 4. 氾濫時における窒素濃度の動態と窒素浄化機能

妙岐ノ鼻湿原における窒素収支の算定とそれを元にした窒素除去量の定量化を目的とし、湿原内外の窒素濃度の観測、氾濫による窒素交換量の算定を行った。月一回程度の現地踏査の際のサンプリングと、自動採水機による氾濫時の河川からの流入水・流出水の採取により、平水時と氾濫時の水質分析を行った。TNは河川水、湿原の地表水ともに  $1 \text{ mg L}^{-1}$  程度であったものの、組成は大きく異なり、湖・河川は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$  の無機態窒素が 6 割を占めるのに対し、湿原内は有機態窒素が主で、 $\text{NO}_3\text{-N}$  はほとんど 0 に近い値であった。

水収支とここで得られた窒素濃度を用いて窒素収支を算定した。それぞれの窒素量は、降雨由来窒素量  $P_N$  5.8、河川からの流入  $In_N$  40.2、流出  $Out_N$  26.2  $\text{kg ha}^{-1}\text{year}^{-1}$  と求められた。また、湿原北西部では、萱材の利用に地上植生の刈り出しが毎年行われており、植生刈り出し量は、植生地上部の乾重量  $1 \text{ kg m}^{-2}$  に窒素含有率 0.5 % を乗じて求め、 $50 \text{ kg ha}^{-1}\text{year}^{-1}$  と算定した。湿原内の窒素循環は 1 年単位で見れば平衡していると考えられ、湿原内の窒素貯留量の変化  $\Delta S_N$  は 0 とみなせる。これらの残差として求められるのは、大気と湿原との間でのフラックスとなる。このフラックスは、湿原から大気に向かう「大気放出」と、大気から窒素を取り込む「生物的窒素固定」の差し引きのネット値となる。これらはともに直接測定することは難しく、その差し引き量としてのフラックスが窒素収支としての意味を持つ。大気間のフラックスが湿原から大気へ向かう方向である場合（つまり脱窒やアンモニア揮散に代表される大気放出が生物的窒素固定よりも卓越している場合）、そのフラックスが窒素浄化機能として定量化される。2007 年の窒素収支においては植生の刈り出しも加え、窒素除去量は  $19.8 \text{ kg ha}^{-1}\text{year}^{-1}$  と算定できた。

ただし、湿原北西部では、植生の刈り出しがあり、かつ、河川水の水質の影響が小さい。そのため、北西部とそれ以外の区域に分けて窒素収支を算定する必要がある。湿原北西部の大気間フラックスは、インプットである降雨由来窒素量とアウトプットである植生の刈り出し量との差であり、大気から湿原へ向かう生物的窒素固定のネット値が  $44.2 \text{ kg ha}^{-1}\text{year}^{-1}$  となった。

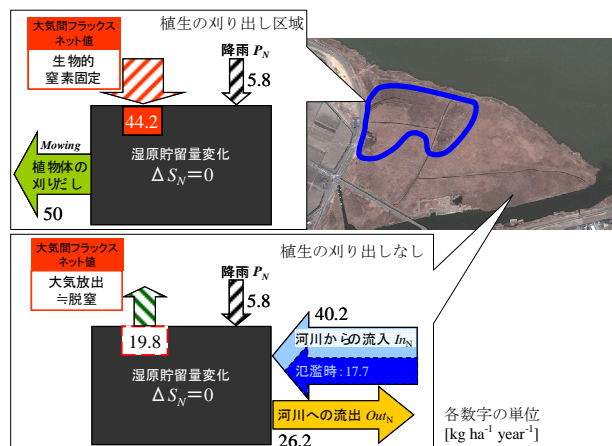


図-2 植生の刈り出しの有無による窒素収支の違い  
Fig. 2 Difference of Nitrogen budgets by mowing vegetation

### 5. 氾濫時の EC 分布とその変化

氾濫によって河川からは多量の栄養塩類が供給されているであろうことがわかったので、河川からの流入水の水質が及ぶ範囲と程度を明らかにすることを目的とし、氾濫時の湿原内を踏査して EC 電気伝導度分布を測定した。降雨の EC は  $0.1 \text{ dS m}^{-1}$  程度、それに対して河川の EC は  $0.4 \sim 0.5 \text{ dS m}^{-1}$  と十分区別できるほどの差があり、多地点での観測が容易である。

2008 年 9 月の氾濫を対象とし、水位がピークに達した 9 月 2 日に 45 地点、水位が低下した 9 月 9 日に 85 地点で測定を行い、EC 分布を明らかにした。湿原の奥の北西部は氾濫が生じてても低 EC を維持し、1 週間程度で水位低下とともに EC が低下するため、河川からの栄養塩類供給の影響をほとんど受けない地域と言える。

### 6. 水・物質移動の物理モデルによる数値解析

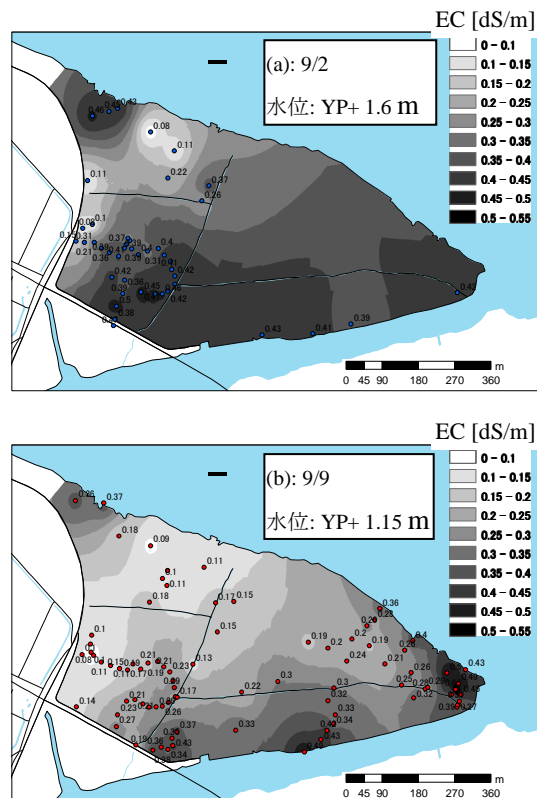


図-3 2008 年 9 月の氾濫における湿原内 EC 分布  
(a):9 月 2 日 (水位ピーク), (b):9 月 9 日 (水位低下後)  
Fig. 3 EC distribution in the floodplain with a flood event in Sep. 2008  
(a): 9/2 (peak of flooding), (b): 9/9 (after drawdown)

氾濫時に湿原に流入する河川水が運搬する溶質の到達範囲をマッピングするために、湿原内の流れの水理モデルを構築した。水移動の基礎方程式は、流量フラックスの式と連続の式、溶質移動は移流拡散方程式である。

$$\mathbf{q} = -T(d)\nabla h \quad \dots \text{流量フラックス}$$

$$e(d) \frac{\partial h}{\partial t} = -\nabla \mathbf{q} + (P - ET) \quad \dots \text{連続式}$$

$$\frac{\partial SC}{\partial t} = \nabla(D\nabla C - \mathbf{q}C) \quad \dots \text{移流拡散方程式}$$

ここで、 $q$  は流量ベクトル、 $h$  は水位(水面標高)、 $T(d)$ は流量コンダクタンス、 $d$ は水深、 $e(d)$ は比浸出量、 $P$ は降雨量、 $ET$ は蒸発散量、 $S$ は貯留水量、 $C$ は溶質濃度、 $D$ は拡散係数である。

流量は水頭勾配に比例する形で表現し、流量ベクトル  $q$  は、水位勾配と流量コンダクタンス  $T(d)$  の積で表される。流量コンダクタンス  $T(d)$  は水位  $h$  と地表面標高  $Z$  との差である水深  $d$  の関数である。水深  $d$  が正(水位が地表面よりも上)であるときには流量はマンニング式で表すとし、水深  $d$  が負(水位が地表面下)であるときには、流量コンダクタンス  $T(d)$  は透水量係数で表すとした。水移動は陰の差分による反復法を用いて水位  $h$  と流量ベクトル  $q$  を計算し、溶質移動は陽解法にて溶質濃度  $C$  を求めた。

このモデルを用いて、2008年9月の氾濫イベントを再現した。境界条件として、湖の境界節点に湖の実測水位を与え、湿原西側と南側の堤防域は流量フラックスを0とした。初期条件は湿原内の水位を一様に与えた。氾濫時には主に河川側から流入・流出が生じていることが流量ベクトルにより図示できた。また、溶質の濃度分布から、河川水の水質の影響をうける範囲を明らかにできた。

## 7. 研究の総括

植生の刈り出しのない湿原における窒素に関する水質浄化機能は、脱窒による生化学的大気放出である。この大きさは、他の外部からの窒素インプットに依存する。もしも高層湿原のように降雨以外に水の流入がない場合や、本研究の妙岐ノ鼻湿原の北西部のように水の流入があっても富栄養な水質の影響を受けない場合は、降雨(湿性沈着)と乾性沈着による窒素供給しかなく、これとほぼ釣り合う大気放出(脱窒-窒素固定)となり、窒素流出はほとんどないであろう。一方、氾濫原や湖岸湿原では、氾濫時に河川や湖からの水の流入・流出があり、これによって窒素等の物質の交換が生じる。したがって、浄化機能(脱窒)の大きさは、流入水に含まれる窒素濃度と氾濫時の水交換量に基本的に依存する。

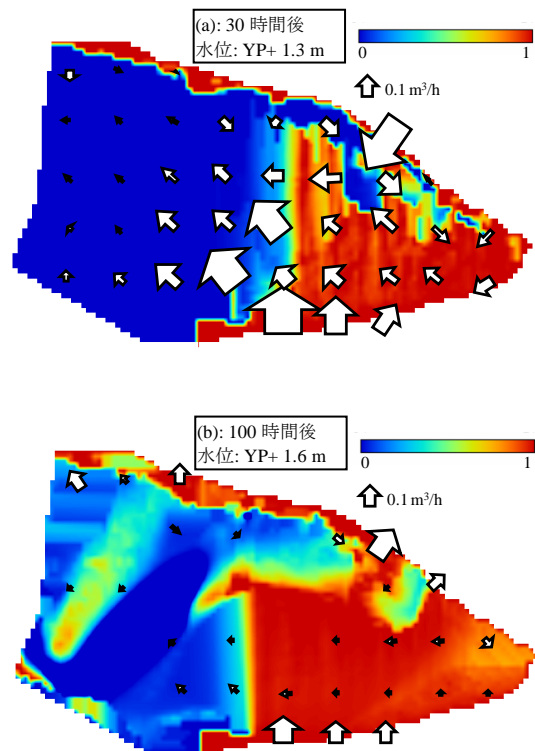


図-4 湿原内溶質分布の計算結果  
(a):氾濫開始後 30 時間後, (b):100 時間後  
Fig. 3 Estimation of solute distribution in the floodplain  
(a): 30 hours later, (b): 100 hours later