

刈り取りがヨシ湿地土壤中の窒素動態に与える影響

山内孝太¹・湯谷賢太郎²・田中規夫³

¹学生会員 工学士 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

²正会員 工修 埼玉大学工学部助手 建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

³正会員 工博 埼玉大学工学部助教授 建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

8月におけるヨシの刈り取りが土壌内窒素動態に及ぼす影響を解明するため、湿地において観測を行った。観測により、刈り取り直後はヨシの吸収同化量及び酸素輸送量が低下し、アンモニア態窒素の蓄積が生じるが、葉茎の再生長と根の増加に伴い酸素輸送量が増加し、硝酸態窒素が生成されることが示唆された。しかし、11月の最終観測で対象区と刈り取り区において大きな濃度差が見られなかったため、生長期におけるヨシの刈り取りは窒素の季節動態に変化を及ぼすものの、最終的な脱窒量に大きな影響を与えないと考えられる。

Key Words : *Phragmites australis, cutting, nitrogen, root biomass, water quality*

1. はじめに

高濃度の栄養塩類を含む家庭・農業・工業排水などの河川や湖沼などへの流入が、富栄養化の原因となっている。このような人為的要因による富栄養化を抑えるために、抽水植物の生育する湿地を利用した水質浄化施設が各地で研究・実用化されている¹⁾。

ヨシなどの抽水植物は、浮遊物質を流れの減衰効果により沈降させ、また、土壌中の栄養塩類を生長に伴い吸収同化する²⁾。さらに、地上部の葉や茎から空気を吸収し、通気組織を通じて吸収した空気を根圏へ輸送するため、嫌氣的な状態にある土壌内においても、根圏が好氣的になる³⁾。この酸素供給作用により、根圏で有機態窒素・アンモニア態窒素の酸化が生じ、最終的に硝酸態窒素が生成される²⁾。そして、硝酸態窒素が嫌氣的な環境に接することで脱窒作用を受け、窒素ガスとなって大気中に放出される²⁾。このようにして、系内の窒素は除去される。大型の多年生植物であるヨシは、枯死すると葉や茎が土壌内に蓄積するために、浄化施設の除去効率が年々低減する。これを未然に防ぐため、地上部を刈り取って維持管理を行う事が主流となっている¹⁾。通常、刈り取りは、窒素・リン等の栄養塩類の直接除去量は少ないが地下部へのダメージを考慮して、冬場実施することが多い。一方では、地上部へ栄養が蓄積されている生長期に刈り取りを実施した場合、直接除去量は多く、さらに、刈り取った地上部を堆肥として用いるなど、栄養塩類をリサイクル

利用することが可能である⁴⁾。しかし、ヨシを生長期に刈り取ると、次年度への貯蔵物質の準備が少なくなり、以後の生長に悪影響を与えるとされている⁵⁾。ただし、ヨシ生長期の刈り取りに関する近年の研究では、生長期に刈り取りを実施しても、数年後には回復するという報告もある⁶⁾。上述のように、ヨシは吸収同化作用や土壌中への通気作用によって、土壌内の窒素動態に多大な影響を及ぼしている。そのため、栄養塩除去を目的として生長期にヨシの刈り取りを行うと、土壌中への通気作用等が影響を受け、土壌中の窒素動態に何らかの変化が生じるものと考えられる。刈り取りの結果、土壌内の脱窒能力が低下した場合、刈り取りによる直接除去が脱窒量の低下で相殺され、十分な効果を得られないことも考えられる。このように、ヨシ生長期の刈り取りが土壌中の窒素動態に与える影響は、湿地を水質浄化目的に用いる場合には無視できない。しかし、ヨシ刈り取りによる土壌内窒素動態への影響に関する知見は少ないのが現状である。

本研究では、ヨシの生長期の刈り取りによってヨシ湿地の土壌内における窒素動態がどのような影響を受けるのかを、現地観測と湿地土壌内における窒素動態を考慮した土壌モデルを用いることにより、現地における計測が困難な脱窒量などを評価することを目的とする。さらに、構築されたモデルを用い、観測地点の湿地の窒素除去ポテンシャルについて検討を行った。

2. 方法

(1) 現地観測

a) 調査場所

調査場所は埼玉県南部に位置する湿地である見沼たんばにて行った。調査地点の広さは、約15m×10m（水深約5cm）であり、この範囲を対照区、刈り取り区、植生なし区（ヨシが生えていない区域）に三分割して、それぞれにおいて2003年3月から11月まで、毎月観測を行った。刈り取り区におけるヨシの刈り取りは夏場（2003年8月1日）に実施した。

b) ヨシの調査

現地において、ヨシの高さ、密度をそれぞれ10回ずつ毎回の調査で計測した。ヨシの試料は25cm×25cm、深さ約30cmまで採取した。地上部は室内で各器官（葉・茎・枯死葉・枯死茎）に分け、バイオマスを測定した。地下部は、土壌内でのバイオマスの鉛直方向の分布を計測するために、現地において深さ5cmごとに包丁を用いて切り分けて、各器官（根、地下茎、新芽）のバイオマスを測定した。

c) 土壌の調査

毎月1～2回調査を行い、各サイトで計3箇所サンプリングを行った。土壌は、塩化ビニル管（内径56mm、長さ1m）と傘袋を組み合わせたコアサンプラーを用い、鉛直方向に乱さないように採取した。また、間隙水の移動を防ぐため、直ちに5cm間隔で切断してビニル袋に小分けし、冷蔵して持ち帰った。この土壌は乾燥させて含水率を計測した後、CHNコーダーにより全窒素の計測、また、インドフェノール法及びヒドラジン還元法により、アンモニア態窒素、硝酸態窒素の計測を行った。

d) 水質の調査

ヨシ湿地の流入水について、全窒素、アンモニア態窒素、硝酸態窒素の計測をそれぞれ水酸化ナトリウム・ペルオキシ二硫酸カリウム法、インドフェノール法、ヒドラジン還元法にて行った。

(2) 土壌モデル

Martin & Reddy⁷⁾は、湿地系を、水層、好気土壌、嫌気土壌Ⅰ（植物の影響のあるところ）、嫌気土壌Ⅱ（植物の影響が無いところ）の4層に区分けて窒素動態を考えた。これを元に本研究では、気温の変化に伴う定数や、各層における根のバイオマスな

どを考慮し、土壌内の鉛直分布を計算によって求めることが出来るようなモデルを構築した。

a) 支配方程式

第*i*層でのPON（有機態窒素）、SON（溶存有機態窒素）、NH₄-N（アンモニア態窒素）、NO₃-N（硝酸態窒素）の支配方程式を以下に記す。

$$\frac{dPON_{(i)}}{dt} = K_{set(i)} \cdot PON_{(i-1)} + AD - K_{set(i)} \cdot PON_{(i)} - K_{enz(i)} \cdot PON_{(i)} + (f_{PON}Flowin + f_{PON}Flowout) \quad (1)$$

$$\frac{dSON_{(i)}}{dt} = K_{enz(i)} \cdot PON_{(i)} - K_{mine(i)} \cdot SON_{(i)} \pm Flux(SON_{(i)}, SON_{(i+1)}) \pm (Flux(SON_{(i-1)}, SON_{(i)}) + f_{SON}Flowin + f_{SON}Flowout) \quad (2)$$

$$\frac{dNH_{4(i)}}{dt} = K_{mine(i)} \cdot SON_{(i)} - K_{nit(i)} \cdot NH_{4(i)} \pm Flux(NH_{4(i)}, NH_{4(i+1)}) \pm (Flux(NH_{4(i-1)}, NH_{4(i)}) - veguptake - Volatilization \pm Soilexchange + f_{NH_4}Flowin + f_{NH_4}Flowout) \quad (3)$$

$$\frac{dNO_{3(i)}}{dt} = K_{nit(i)} \cdot NH_{4(i)} - K_{den(i)} \cdot NO_{3(i)} \pm Flux(NO_{3(i)}, NO_{3(i+1)}) \pm (Flux(NO_{3(i-1)}, NO_{3(i)}) - veguptake + f_{NO_3}Flowin + f_{NO_3}Flowout) \quad (4)$$

ここで、 $K_{set(i)}$ は第*i*層における沈降係数、 AD はLitterからの好気分解、 $K_{enz(i)}$ は第*i*層における酵素分解係数、 $K_{mine(i)}$ は第*i*層における無機物化係数、 $K_{nit(i)}$ は第*i*層における硝化係数、 $K_{den(i)}$ は第*i*層における脱窒係数、 f_{PON} 、 f_{SON} 、 f_{NH_4} 、 f_{NO_3} は水層においては1であり、水層以外は0の定数である（流入、流出は水層内のみで起きるとしている）。また、 $veguptake$ は植物による同化、 $Volatilization$ はアンモニア態窒素の揮発、 $Soilexchange$ はアンモニア態窒素と土壌粒子に吸着されているアンモニア態窒素の入れ替わりを表現している。 $Flux(SON_{(i)}, SON_{(i+1)})$ は第*i*層と第*(i+1)*層において計算されるSONのFlux量である。他のFluxも同様に第*i*層と第*(i+1)*層および第*(i-1)*層の濃度差によって決定するものとした⁸⁾。

植生による酸素輸送量は考える層の根のバイオマスに比例するものとし、硝化係数 $K_{nit(i)}$ および脱窒係数 $K_{den(i)}$ において以下のように考慮した。温度の変化による影響を考慮するため、Reddy & Patrick⁸⁾を根拠としたアレニウス定数を掛け合わせて表現した。

$$K_{nit(i)} = K_{nit(i)20} \times \min\{1, \alpha_{root} \times rootbiomass \times rootrate\} \times \theta^{(T-20)} \quad (5)$$

$$K_{den(i)} = K_{den(i)20} \times [1 - \min\{1, \alpha_{root} \times rootbiomass \times rootrate\}] \times \theta^{(T-20)} \quad (6)$$

$$K_{enz(i)} = K_{enz(i)20} \times \theta^{(T-20)} \quad (7)$$

$$K_{mine(i)} = K_{mine(i)20} \times \theta^{(T-20)} \quad (8)$$

ここに、 $K_{nit(i)20}$ 、 $K_{den(i)20}$ 、 $K_{enz(i)20}$ 、 $K_{mine(i)20}$ はそれぞれ 20℃の時の硝化係数、脱窒係数、酵素分解係数および無機物化係数で、 θ は温度変化影響を表すアレニウス定数⁸⁾である。

ここで表-1 にモデルで用いたパラメータとその根拠を示す。

b) 植生モデルの組み込み

土壌モデルを構築するに当たり、ヨシの日々の窒素吸収量や、土壌内の硝化や脱窒に影響する根のバイオマスの変化を知る必要がある。これらは日々変化する値であり、窒素吸収量は日射量や気温等によっても変化する。しかし、モデル中においては簡略化して扱う必要があるため、ヨシの窒素吸収量や根のバイオマスの季節変化に関しては、湯谷ら⁷⁾によるヨシ刈り取りモデルを用いて現地観測の値を再現し、得られた日々の値を土壌モデルに用いることとした。窒素吸収量に関しては、植物の光合成量との間に相関があると考え、ヨシ刈り取りモデルより得られる光合成量から窒素吸収量を算出した。モデルで得られた根のバイオマスは現地観測により得られた根の鉛直方向の分布を考慮して、土壌モデルの各層に与えた。

3. 結果及び考察

(1) ヨシについて

図-1 に地上部(Shoot)バイオマスと根のバイオマスの観測結果及びヨシ刈り取りモデルの計算結果を示す。地上部バイオマスは計算により再現できていると考えられるが、対照区で計算値と観測値のピークが1ヶ月ほどずれている。これは、観測を行った年の夏の気温が例年よりも低かったことが原因ではないかと考えられる。根のバイオマスの変化は、観測値より生長初期及び老化開始期に増加傾向を示すことがわかる。また、刈り取り後、根のバイオマスが増加することが読み取れる。これは、刈り取りにより、地下部の栄養を用いて葉茎を再生長させるために必要な栄養を吸収するため、増加したのではないかと考えられる。また、刈り取り後、新芽が観測されたことから、表層付近で地下茎が分化して生長し、表層付近での地下茎の増加に伴って根のバイオマスが増加したのではないかと考えられる。計算結果は、これら刈り取りによる根のバイオマスの変化をある程度再現しているといえる。

表-1 モデルパラメータ

パラメータ	意味	値	単位	根拠
K_{set1}	水層から水層の沈降率	1	無次元	Reddy(1997) ⁷⁾
K_{set2}	水層から好気層の沈降率	0.04	無次元	Reddy(1997) ⁷⁾
K_{set3}	好気層から好気層の沈降率	0.02	無次元	Reddy(1997) ⁷⁾
K_{set4}	好気層から嫌気層の沈降率	4.20×10^{-4}	無次元	Reddy(1997) ⁷⁾
K_{set5}	嫌気層から嫌気層の沈降率	2.10×10^{-5}	無次元	Reddy(1997) ⁷⁾
K_{enz1}	水層の酵素加水分解率	4.20×10^{-7}	無次元	Reddy(1997) ⁷⁾
K_{enz2}	好気層の酵素加水分解率	6.30×10^{-7}	無次元	Reddy(1997) ⁷⁾
K_{enz3}	嫌気層の酵素加水分解率	3.30×10^{-7}	無次元	Reddy(1997) ⁷⁾
K_{mine1}	水層の無機物化率	3.00×10^{-4}	無次元	Reddy(1997) ⁷⁾
K_{mine2}	好気層の無機物化率	6.30×10^{-4}	無次元	Reddy(1997) ⁷⁾
K_{mine3}	嫌気層の無機物化率	2.10×10^{-4}	無次元	Reddy(1997) ⁷⁾
K_{nit1}	水層の硝化率	4.20×10^{-3}	無次元	Reddy(1997) ⁷⁾
K_{nit2}	好気層の硝化率	0.05	無次元	Reddy(1997) ⁷⁾
K_{den}	嫌気層の脱窒反応率	0.1	無次元	Reddy(1997) ⁷⁾

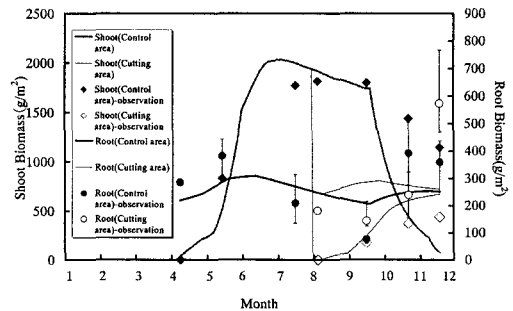


図-1 刈り取りモデル計算結果

(2) 土壌について

図-2, 3 に土壌アンモニア態窒素濃度、硝酸態窒素濃度（それぞれ深さ 25cm までの和）の季節変化を示す。図-4 は 6 月と 9 月のアンモニア態窒素濃度、硝酸態窒素濃度の鉛直分布である。

植生区（対照区・刈り取り区）においては、観測開始日（3月27日）から6, 7月にかけてアンモニア態窒素濃度、硝酸態窒素濃度が減少している（図-2, 3）。また、植生無し区の濃度よりも低い（図-4: a, c）。この期間はヨシの生長時期であるため、ヨシによる吸収同化が主な減少要因ではないかと考えられる。

7月から8月半ばにかけて植生区のアンモニア態窒素濃度が植生無し区よりも低いことが分かる（図-2）。これとは逆に硝酸態窒素濃度は高いことがわかる（図-3）。気温の高いこの時期は、土壌内の有機物の分解が盛んになり、アンモニア態窒素が増加することも考えられる。しかし、観測ではアンモニア態窒素に増加傾向は見られず、硝酸態窒素が増加した。その理由として、この時期はヨシが十分に生長した時期にあたり、ヨシによる酸素輸送により土壌が好気化され、アンモニア態窒素の硝化が促進されたためではないかと考えられる。9月後半の観測

では、対照区と刈り取り区において、アンモニア態窒素と硝酸態窒素の両者において、対照区よりも高い濃度が観測された。対照区では、ヨシの老化期における吸収同化が行われ、硝酸態窒素及びアンモニア態窒素濃度が低下したことが考えられる。一方、刈り取り区では、刈り取り直後には一時的にヨシによる吸収同化と酸素輸送が低下し、それにより窒素、特にアンモニア態窒素の蓄積が起きていたのではないかと考えられる。そして、再生長葉茎や根の増加に伴う酸素輸送の増加により、蓄積していたアンモニア態窒素の硝化が起こったと推測される。以上のような要因で図-4:b のような状態が観測されたと考えられる。

11 月の最終観測では対照区と刈り取り区の濃度に大きな違いが観測されなかった。このことから、刈り取りは、窒素動態に影響を及ぼすものの、最終的な脱窒量に大きな影響を与えない可能性があるのではないかと考えられた（図-2,3）。

(3) 収支計算

アンモニア態窒素・硝酸態窒素の計算結果は、観測結果の年間変化の傾向をおおむね再現できたものの、アンモニア態窒素に関しては窒素濃度が観測よりも高く計算される傾向となった。これは無機物化率および硝化率を Reddy & Patrick⁶⁾ による値を用いているためであると考えられ、観測結果をより正確に再現するためには、見沼田んぼにおける詳細な無機物化率や硝化率を計測する必要があることが示唆された。

図-5,6 は土壌モデルにより求めた対照区、刈り取り区の窒素収支である。対照区と刈り取り区を比較すると、刈り取り区での全硝化量は対照区に比べてわずかに高い値であることがわかる。これは、観測で見られた刈り取り後における根のバイオマスの増加を考慮したために、根のバイオマスに比例した形で嫌気層内に硝化の起きる好気的な部分が増加し、その結果として、硝化量が増加したためである。また、脱窒量に関しても、対照区と刈り取り区を比較して、刈り取り区のほうがわずかに多い結果となった。これは、硝化量の増加により硝酸態窒素濃度が増加し、それに伴って脱窒量が増加したためである。これらの結果は、アンモニア態窒素と硝酸態窒素の観測結果で、最終観測日における濃度の違いがほとんどなかった点から、妥当な計算結果ではないかと考えられる。

(4) 水質浄化について

本研究で構築したモデルを用いて、観測地である

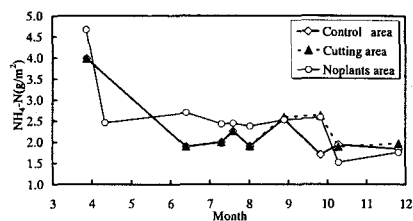


図-2 アンモニア態窒素の観測値

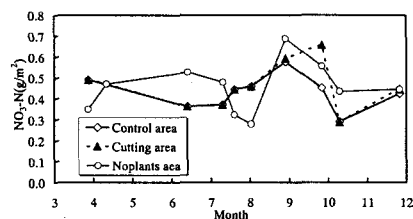
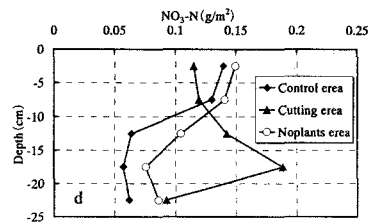
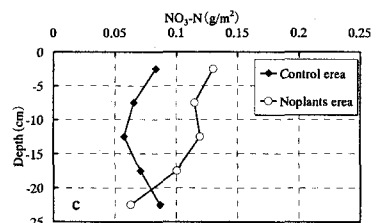
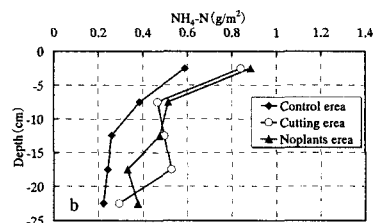
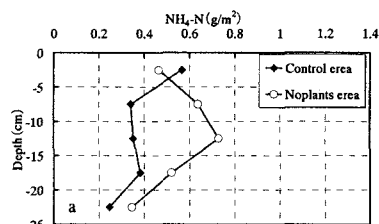


図-3 硝酸態窒素の観測値



(a:6 月 b:9 月におけるアンモニア態窒素の鉛直分布, c:6 月 d:9 月における硝酸態窒素の鉛直分布)

図-4 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ の鉛直分布

見沼たんばの窒素除去能力のポテンシャルを計算することを試みた。また、計算結果は、北アメリカにおいて水質浄化に用いられている湿地の窒素除去率のデータ (Knight ら (1992) ⁹⁾) と比較した。検討した水質の窒素濃度は 10, 20, 40 mg/L である (図-7)。また、表-2 に水面積負荷 (HLR: Hydraulic Loading Rate) と滞留時間 (HRT: Hydraulic Retention Time) の比較を示す。

これより、窒素濃度が高い場合は、HLR を短くしても (HRT=長) 土壌内からの溶出が少ないが、窒素濃度が低い場合においては、HLR を短くすると土壌内からの溶出が起き、マイナスの作用を及ぼす恐れがあることがわかる。HLR が 24 のときに各濃度における窒素除去率がほぼ収束してしまうのは、本モデルにおいて用いた土壌の窒素量によるものであると考えられる。また、土壌条件や流入水の窒素条件が求められれば、窒素除去率を最適にする滞留時間を求めることができると考えられる。

4. 結論

本研究で得られた結論を以下に列挙する。

- 1) 生長期にヨシの刈取りを行うと、刈り取り以降に根の量が増加する。
- 2) 刈り取り以後、葉茎が再生し根が増加するまでの間は窒素の蓄積が生じる。
- 3) 刈り取り以後、再生が進む段階で地上部からの酸素の輸送が起き、土壌内ではアンモニア態窒素の硝化が起きる。
- 4) 刈り取りを行うことにより、土壌内での窒素動態には影響があるものの、最終観測日における硝酸態窒素の濃度が対照区と刈り取り区で変わらないこと、モデル計算により一年を通しての脱窒量がほとんど変わらないことから、生長期における刈り取りは湿地の脱窒量に関しては大きな影響を与えない可能性がある。
- 5) 本土壌モデルは表層水と土壌内の窒素動態を考慮して構築しており、水質浄化を目的とした湿地の計算にも有用なモデルである。

謝辞：現地調査を行うにあたり、観測地点を管理する川口グラウンドワーク実行委員会の皆様より快諾を頂きました。また、本研究は (財) 河川環境管理財団の河川整備基金助成事業および科学研究費補助金 (研究代表：湯谷) による援助を受けました。記して謝意を表します。

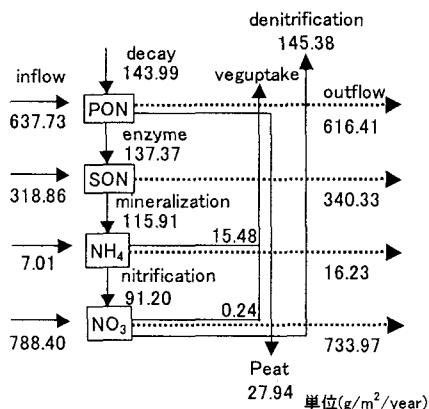


図-5 対照区の窒素収支

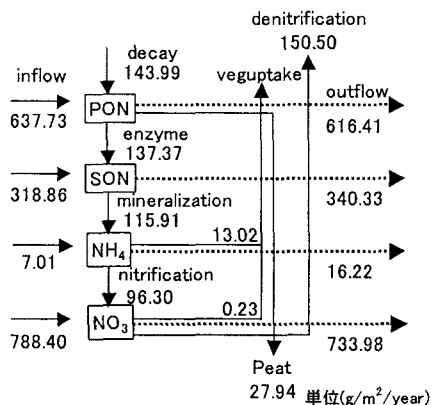


図-6 刈り取り区の窒素収支

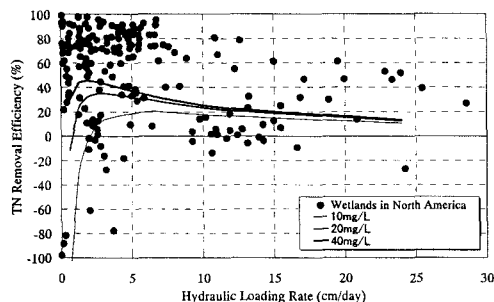


図-7 水質の違いによる窒素除去率とHLRの関係

$$HLR=100/As: (\text{cm/day})$$

$$As = (\text{面積}) / (\text{流れる水の体積}) / (\text{時間}): (\text{m}^2/\text{m}^3/\text{day})$$

表-2 水面積負荷(HLR)と滞留時間(HRT)の比較

HLR(cm/day)	24	8	3	1.5	0.6
HRT(hour)	5	15	40	80	200

参考文献

- 1) (財)河川環境管理財団・河川環境総合研究所: 植生浄化施設計画の技術資料, 河川環境総合研究所資料第5号, 2002.
- 2) 藤川恭史, 三好英一, 古川恵太: ヨシ原による水質浄化の特性, 港湾技術研究所報告, 第30巻第1号, pp. 205-237, 1991.
- 3) 細見正明: 内陸湿地における自然浄化のメカニズムと浄化機能の積極的利用, 水環境学会誌, Vol.17, No.3, pp 149-153, 1994.
- 4) Hansson, P.A., Fredriksson, H: Use of summer harvested common reed (*Phragmites australis*) as nutrient source for organic crop production in Sweden, *Agriculture Ecosystems & Environment*, Vol. 102, Issue 3, pp. 365-375, 2004.
- 5) 吉良竜夫: ヨシの生態おぼえがき, 琵琶湖研報, Vol.9, pp. 29-37, 1991.
- 6) 湯谷賢太郎, 浅枝隆, 田中規夫, Shiromi Karunaratne: 観測と再成長モデルによる刈り取られたヨシ *Phragmites australis* の回復過程の評価, 応用生態工学, 6巻第2号, pp 177-190, 2004.
- 7) Martin, J.F., Reddy, K.R.: Interaction and spatial distribution of wetland nitrogen processes, *Ecological Modeling*, Vol. 105, pp. 1-21, 1997.
- 8) Reddy, K.R., Patrick, W.H.: Nitrogen transformations and loss in flooded soils and sediments, *CRC Critical Reviews in Environmental Control*, Vol. 13, No. 4, pp. 273-309, 1984.
- 9) Hammer, D.A., Knight, R.L.: Designing constructed wetlands for nitrogen removal, *Wat. Sci.*, Vol. 29, No. 4, pp. 15-27, 1994.

THE EFFECTS OF CUTTING ON THE NITROGEN DYNAMICS IN THE SOIL OF REED WETLAND

Kota YAMAUCHI, Kentaro YUTANI and Norio TANAKA

Field observations were conducted to investigate the effects of the reed cutting in August on nitrogen dynamics in the wetland soil. Stem cutting induced decrease of nitrogen uptake and oxygen transport by reed. As a result of cutting, ammonia nitrogen was accumulated just after cutting, and then nitrate nitrogen was produced simultaneously with the formation of re-growth shoots and roots. It is assumed that stem cutting of reed in the growing season is not affected on the annual nitrogen losses by denitrification, because almost same concentrations of ammonia and nitrate nitrogen were observed in November.