

強混合河川感潮部における硝化・脱窒過程のシミュレーション

二渡 了*・金元 圭**・楠田哲也***・古米弘明****

強混合河川感潮部での各無機態窒素の濃度変動のシミュレーションモデルを、移動座標系で表現した物質収支式を用いて作成し、20日間にわたる数値計算を行った。このモデルでは、硝化反応の諸係数や菌体濃度を実験結果を基に与え、底泥による脱窒反応を考慮した。この濃度計算結果より、感潮部における窒素変換過程を定量的に評価し、SS濃度の長期的な変化にともなって硝化量も変化すること、水塊中の硝酸性窒素濃度の低下に底泥での脱窒が大きく寄与することを明らかにした。

Key Words : well-mixed estuary, nitrification, denitrification, numerical simulation

1. 緒 論

河川感潮部における自然浄化機能を評価するためには、感潮部における物質循環機構を明らかにする必要がある。栄養塩でもある窒素は、その形態により酸素消費物質ともなる。したがって、水域でのその挙動を把握することは、水環境の保全・制御のために重要である。感潮部における窒素について見ると、アンモニア性窒素として流入してきたものが、感潮部を流下する間に懸濁物質に付着する微生物や底泥表層部の好気的な環境下で硝化され、亜硝酸性窒素・硝酸性窒素へと変換される。さらに、底泥中の無酸素部では脱窒反応が生じている。しかし、感潮部では潮汐作用によって流れが周期的に変化する上に、塩化物イオンがこのような微生物反応に影響を及ぼしている。したがって、感潮部のある地点において観測される各無機態窒素の濃度変動は、感潮部水塊の移動特性、硝化・脱窒の反応特性、そして流入負荷の変動により生じているものと考えられる¹⁾。また、感潮部水塊の移動特性は、大潮・小潮のように半月周期でも変化する。

河川感潮部での物質変換過程は長期的な変動要因の影響を受けるため、そのシミュレーションは数潮汐間連続して行う必要がある。しかし、感潮部での物質収支を一般的な固定座標系で計算すると、移流項の差分化に起因する数値拡散のため誤差が大きくなり、長期間の計算が困難となる。そこで、物質収支式をラグランジェ的な移動座標系での表現に改めて移流項を消去すると、数値拡散による影響を減少させることができ、長期的な計算が可能となる²⁾。

本研究では、感潮部における窒素の挙動を明らかにするために、移動座標系で表現したシミュレーションモデルを作成し、半月周期における各無機態窒素濃度の計算を行う。さらに、現地調査結果と比較検討し、感潮部における窒素変換過程を定量的に評価する。

2. シミュレーションモデル

本研究では、佐賀県白石平野を流れ有明海湾奥部に注いでいる六角川を対象とした³⁾。六角川は強混合型の感潮河川であり、塩化物イオンや各態窒素のような溶存態の物質では、横断面内での濃度差が小さく、河道方向に特徴のある分布をしている。一方、SS濃度は横・縦断面内において層状の分布をしているが、断面平均濃度を用いてもその時間的・空間的な変動を表現することができる。したがって、ここでのシミュレーションモデルは一次元で考えることにする。また、濃度計算の対象とする物質は、塩化物イオン、SS、各無機態窒素とする。なお、一般に水域での物質変換過程をモデル化する際には、BOD₅やDO濃度も重要な水質項目とされる。本感潮部での一潮汐間の調査では、表層のみでDO濃度の測定を行ったが、その結果、DO濃度は夏季の水温が高い時期を除いて、水域において自浄が行われる限界DO濃度(4mg l⁻¹)⁴⁾以上であること、一潮汐間においてSS濃度が高くなったときにBOD₅濃度が高くなり、DO濃度が低下することが示されている⁵⁾。さらに、本論では感潮部における窒素の挙動に着目していることから、物質変換過程としては硝化・脱窒過程のみを考え、後述するように、DO濃度をSS濃度との関数として与えるものとする。

(1) 物質輸送モデル²⁾

一次元不定流モデルにおける距離基準の固定座標系での連続の式及び運動方程式は、流水断面積 A と流量 Q を変数として次のように表される。

* 正会員 工博 九州大学助手 工学部附属環境システム工学研究センター (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

** 大韓民国釜山大学校助手 工科大学土木工学科

*** 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科

**** 正会員 工博 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{n^2 |Q| Q}{R^{4/3} A^2} = 0 \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 q は単位長さ単位時間当りの横流入量、 H は水位、 n はマンニングの粗度係数、 R は径深、 g は重力の加速度である。また、物質収支式は次式のようになる。

$$\frac{\partial (AC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (QC) = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_L \frac{\partial C}{\partial x} \right) + A \sum S_i (C_i) + q' \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 C は物質濃度、 D_L は移流分散係数、 $S_i(C_i)$ は i なる物質からの内部変換速度、 q' は横流出入フラックスである。

ここで、座標系を (x, t) から水量を基準とする移動座標系 (V, t) に変換するために、次式で示される累加水量 V を用いる。

$$V = \int^x A(x, t) dx \dots \dots \dots (4)$$

累加水量 V は感潮部上流端から x 地点までの貯溜量である。したがって、式(3)は次のようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + Q_C \frac{\partial C}{\partial V} = \frac{\partial}{\partial V} \left(A^2 D_L \frac{\partial C}{\partial V} \right) + \sum S_i (C_i) \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 Q_C は河川固有流量である。ここで、隣り合った水塊間の交換フラックス

$$j = -A^2 D_L \frac{\partial C}{\partial V} \dots \dots \dots (6)$$

が、両水塊間の交換水量 Q_e を用いて次式で表しえらる。

$$j = -Q_e \Delta C \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 ΔC は隣り合った水塊間の濃度差である。さらに、 $D_L = \alpha u_* R$ (u_* は底面摩擦速度、 α は係数)とする。

計算の手順は次に示すとおりである。まず、水量量の計算を固定座標系上でリーブ・フロッグ法⁵⁾により行う。この水量量の計算結果をもとに、移動座標系の微小要素である分割水塊(ΔV)を満潮時において各境界間の距離がほぼ等間隔になるように設定し、分割水塊の境界の各時刻(Δt ごと)における位置を定める。すなわち、全計算期間を通して分割水塊の境界の走時曲線が得られる。なお、分割水塊の水量は、数種類のものを設定するが、河川固有流の流入により水塊の個数が増える。このため、ある水塊(ΔV_n)の個数が順次増え、増えた分の水量の和が次の水塊の水量(ΔV_{n+1})に等しくなった時点で、 ΔV_n で分割されている区間の下流側の水塊の ΔV_{n+1}

の水量に相当する分を ΔV_{n+1} の分割水塊とし、その個数を1個増やす。このような操作を他の水量の分割水塊についても順次行う。

続いて、塩化物イオン濃度の計算において観測値と計算値が一致するように移流分散係数の係数 α を各分割水塊毎に決定する。このようにすることにより、移動座標系での数値拡散による影響は、本質的にそれぞれの分割水塊内だけで生じることになる。したがって、固定座標系での計算に比べて数値拡散による物質輸送を大きく減少させることができる。SS濃度の計算では、式(5)の右辺第2項の反応項において巻き上げフラックス及び沈降フラックスをそれぞれ塩化物イオン濃度及びSS濃度の関数で与え、さらに浮泥流による堆積底泥の輸送を考慮する⁶⁾。

(2) 窒素変換モデル

河川感潮部における窒素変換過程には、流入してきたアンモニア性窒素が河道内のSSや底泥に付着する硝化菌により亜硝酸性及び硝酸性窒素へと変化する硝化過程、底泥中の無酸素部における脱窒過程、アンモニウムイオンの懸濁物質による吸脱着がある。なお、本感潮部では、SSと底泥の輸送特性が異なり、それらに付着する硝化菌の反応特性も異なる⁷⁾。したがって、ここではSSと底泥の硝化反応をそれぞれ考えることとする。ただし、本感潮部でのSSは、潮汐作用による流れの変化に伴って巻き上げ・沈降を繰り返しながら感潮部内を移動し、SS高濃度塊を形成しており、空間的に分布するSSの質的な差はないものと考えられる。

硝化過程のアンモニア酸化及び亜硝酸酸化において、水中のSS濃度が上昇するとき、SSを構成する有機物の酸化によってDOが消費されるために硝化が抑制される可能性があるため、このDO濃度の影響を考慮する。ただし、アンモニアの生成はわずかなため考えないこととする。したがって、アンモニア酸化及び亜硝酸酸化の反応速度 R_{NH_4} 、 R_{NO_2} は次のように表されると仮定する。

アンモニア酸化：

$$R_{NH_4} = \frac{1}{Y_a} \mu_{max a 1} \frac{C_{NH_4}}{K_{S a 1} + C_{NH_4}} \frac{C_{DO}}{K_{DO} + C_{DO}} X_{a 1} C_{SS} + \frac{1}{Y_a} \mu_{max a 2} \frac{C_{NH_4}}{K_{S a 2} + C_{NH_4}} X_{a 2} C_{SED} \dots \dots \dots (8)$$

亜硝酸酸化：

$$R_{NO_2} = \frac{1}{Y_b} \mu_{max b 1} \frac{C_{NO_2}}{K_{S b 1} + C_{NO_2}} \frac{C_{DO}}{K_{DO} + C_{DO}} X_{b 1} C_{SS} + \frac{1}{Y_b} \mu_{max b 2} \frac{C_{NO_2}}{K_{S b 2} + C_{NO_2}} X_{b 2} C_{SED} \dots \dots \dots (9)$$

注) なお、ここでの塩化物イオン濃度及びSS濃度の計算方法が前報²⁾と異なる点は、六角川本川のみを対象としていること、分割水塊の水量を細分化していることである。このため、それらの計算結果に若干の違いが生じている。

ここに、 C_i は i 物質の濃度、 K_s は飽和定数、 K_{DO} は DO 消費についての飽和定数、 Y は増殖収率、 X は単位 SS 量当たりの菌体濃度、 μ_{max} は最大比増殖速度であり、添字は、 a がアンモニア酸化、 b が亜硝酸酸化、 1 が SS、 2 が底泥を示す。なお、 C_{SED} は単位面積当たりの SS 量を一定として与え、各時刻各断面の径深で除して濃度に換算する。また、アンモニア酸化菌及び亜硝酸酸化菌の菌体収支式は、菌体の死滅を考慮すると次のようになる。

$$\frac{\partial X_{a1}}{\partial t} = \mu_{max a1} \frac{C_{NH4}}{K_{Sa1} + C_{NH4}} \frac{C_{DO}}{K_{DO} + C_{DO}} X_{a1} C_{SS} - K_{da} X_{a1} C_{SS} \dots \dots \dots (10)$$

$$\frac{\partial X_{a2}}{\partial t} = \mu_{max a2} \frac{C_{NH4}}{K_{Sa2} + C_{NH4}} X_{a2} C_{SED} - K_{da} X_{a2} C_{SED} \dots \dots \dots (11)$$

$$\frac{\partial X_{b1}}{\partial t} = \mu_{max b1} \frac{C_{NO2}}{K_{Sb1} + C_{NO2}} \frac{C_{DO}}{K_{DO} + C_{DO}} X_{b1} C_{SS} - K_{db} X_{b1} C_{SS} \dots \dots \dots (12)$$

$$\frac{\partial X_{b2}}{\partial t} = \mu_{max b2} \frac{C_{NO2}}{K_{Sb2} + C_{NO2}} X_{b2} C_{SED} - K_{db} X_{b2} C_{SED} \dots \dots \dots (13)$$

ここに、 K_d は死滅係数である。

底泥中での脱窒による上層水中からの硝酸性窒素の輸送フラックス F_{NO3} ($g m^{-2} h^{-1}$) は、有機炭素源が豊富にある場合には上層水中の硝酸性窒素及び DO 濃度の関数として次式で示される¹⁾。

$$F_{NO3} = \alpha_{DO} C_{NO3} + \beta_{DO} \dots \dots \dots (14)$$

ここに、 α_{DO} 及び β_{DO} は各々上層水中の硝酸性窒素濃度と輸送フラックスとの関係を示す直線の傾きと切片であり、DO 濃度の関数となる。なお、硝酸性窒素の輸送フラックスは、塩化物イオン濃度の相対的な変化による影響を受けることも考えられるが、ここではその影響が上層水中の硝酸性窒素の濃度変化による影響に比べて小さいとして考えないこととする。

したがって、式(5)の右辺第 2 項の反応項は、各無機態窒素についてそれぞれ次のようになる。

$$\Sigma S_{NH4} = -R_{NH4} \dots \dots \dots (15)$$

$$\Sigma S_{NO2} = R_{NH4} - R_{NO2} \dots \dots \dots (16)$$

$$\Sigma S_{NO3} = R_{NO2} - F_{NO3} \frac{A}{R} \frac{DX}{DV} \dots \dots \dots (17)$$

ただし、 ΔX は ΔV に対応する固定座標上の分割距離である。

(3) 計算条件

a) 硝化反応の係数

硝化過程の動力学的な反応係数である最大比増殖速度と飽和定数は、それらについての現地試料を用いた室内実験結果¹⁾に基づいて、それぞれ SS 及び底泥について塩

化物イオン濃度の関数で与えることにする。その関数形を **Table 1** に示す。また、菌体の死滅を考慮すると、菌体濃度がほぼ定常になると考えられるため、SS 及び底泥における菌体濃度は常に一定とする。**Table 2** に計算に用いた諸係数の値を示す。なお、亜硝酸酸化菌の濃度は、アンモニア酸化菌のものにそれらの増殖収率の比を乗じたものである。最大比増殖速度に対する温度の影響は、文献値⁹⁾を参考にして適用した。また、水温は 10 °C に設定した。

b) 脱窒による硝酸性窒素の輸送フラックス

底泥中での脱窒による上層水中からの硝酸性窒素の輸送フラックスを表す式(14)における係数 α_{DO} 及び β_{DO} は、 β_{DO} を近似的に 0 とし、 α_{DO} ($m h^{-1}$) と DO 濃度 C_{DO} ($mg l^{-1}$) の関係を実験結果¹⁾に基づいて求めると、 α_{DO} は $C_{DO} < 10 mg l^{-1}$ の範囲において次式のような DO 濃度の 2 次関数で与えられる。

$$\alpha_{DO} = (0.00136 C_{DO}^2 - 0.026 C_{DO} + 0.3) \times 10^{-3} \dots \dots \dots (18)$$

c) DO 濃度

DO 濃度は、DO についての物質収支式を解くのではなく、SS 濃度との関係で与えることにする。すなわち、感潮部河川水の DO 濃度は、主として再曝気と酸素消費の影響を受けるが、本感潮部では SS 濃度が高くなったときに BOD₅ 濃度も高くなるといった関連が見られ、SS を構成する有機物の酸化による DO の消費が支配的であると考えられる。**Fig.1** に一潮汐間の調査時(1983年12月27~28日実施)における SS 濃度と DO 濃度の関係を示す。SS 濃度の上昇に伴って、DO 濃度は減少している。したがって、両者の関係は、

$$\begin{aligned} C_{SS} \leq 2.3 kg m^{-3} \text{ のとき} \\ C_{DO} &= -0.52 C_{SS} + 7.5 (mg l^{-1}) \\ 2.3 < C_{SS} \leq 12.0 kg m^{-3} \text{ のとき} \\ C_{DO} &= -0.268 C_{SS} + 6.92 (mg l^{-1}) \\ C_{SS} \geq 12.0 kg m^{-3} \text{ のとき} \\ C_{DO} &= 3.7 (mg l^{-1}) \end{aligned}$$

で表されるものとする。

d) 流入負荷

負荷の流入は常に一定とするのではなく、各流入地点の水位変化に応じて与えることにする。すなわち、水位がある設定水位より低いときは単位時間当たりの負荷量が流入し、上げ潮時に水位が設定水位より高くなったときには感潮部への流入が停止し、その間流入負荷が蓄積され、さらに下げ潮に反転した後は、設定水位になるまでその蓄積した負荷が水位の減少分に応じて流入するようにする。ただし、各負荷流入地点での 1 日当たりの流入負荷量は長期的には変わらないものとする。

Table 1 Kinetic parameters as the functions of chlorides in SS and sediments.

chlorides (kg m ⁻³)	suspended solids		sediments	
	ammonium oxidation		nitrite oxidation	
	μ_{max} (d ⁻¹)	K_s (mg l ⁻¹)	μ_{max} (d ⁻¹)	K_s (mg l ⁻¹)
$C_{cl} \leq 0.15$	0.7	1.7	0.55	0.6
$0.15 < C_{cl} \leq 0.36$	$0.6 + 0.1(0.36 - C_{cl})/0.21$	$2.0 - 0.3(0.36 - C_{cl})/0.21$	$0.6 - 0.03(0.36 - C_{cl})/0.21$	$0.3 + 0.3(0.95 - C_{cl})/0.76$
$0.36 < C_{cl} \leq 1.1$	0.6	$0.8 + 1.2(1.1 - C_{cl})/0.74$	$0.6 - 0.03(1.1 - C_{cl})/0.74$	$0.6 - 0.2(4.75 - C_{cl})/3.8$
$1.1 < C_{cl} \leq 3.3$	0.6	$1.0 - 0.2(3.3 - C_{cl})/2.2$	$0.56 + 0.04(3.3 - C_{cl})/2.2$	$0.7 + 0.05(9.5 - C_{cl})/4.75$
$3.3 < C_{cl} \leq 9.0$	$0.6(9.0 - C_{cl})/5.7$	$1.2 - 0.2(9.0 - C_{cl})/5.7$	$0.35 + 0.21(9.0 - C_{cl})/5.7$	$1.4 - 0.8(9.5 - C_{cl})/4.75$
$9.0 < C_{cl} \leq 16.0$	0	-	$0.35(0.36 - C_{cl})/7.6$	$1.1 + 0.3(15.2 - C_{cl})/4.3$
$16.0 < C_{cl}$	0	-	0	-

Table 2 Kinetic parameters and bacteria concentrations in calculation.

kinetic parameters		ammonium oxidization	nitrite oxidization
growth yield coefficient	Y	0.098	0.017
saturation constant in DO	K_{DO} (kg m ⁻³)	0.0013	0.0013
temperature constant*	β_T (°C ⁻¹)	0.0413	0.0255
bacteria concentration in SS	X_1 (g kg ⁻¹)	0.05	0.0087**
bacteria concentration in sediments	X_2 (g kg ⁻¹)	0.025	0.0043**

* $\mu_{max T} = \mu_{max 20} 10^{\beta_T(T-20)}$ where, $\mu_{max T}$ and $\mu_{max 20}$ are the maximum specific growth rates at a temperature of T and 20 °C, respectively, and T is the temperature.
 ** these figures are multiplied the bacteria concentrations of ammonium oxidization by the ratio of growth yield coefficients (Y_b / Y_a).

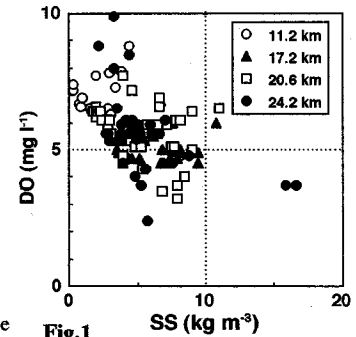


Fig.1 Relationship between SS and DO.

3. 計算結果

計算領域は、六角川本川のみを対象とし、河口より29.6 km 上流までとした。また、計算期間は、現地調査を行った1988年11月27日から12月16日までの20日間すなわち27,540分間とした。7,000分前後が小潮、20,000分前後が大潮であった。なお、調査地点は河口から11.2 km、17.2 km 及び24.2 km 上流の3地点である。各地点において河床から0.2~0.5 m の高さの1点において1時間間隔で採水し、塩化物イオン、SS、各無機態窒素の濃度を測定した。

(1) 水理量及び塩化物イオン、SS濃度の計算

まず、固定座標系での水理量の計算では、 $\Delta x = 600$ m, $\Delta t = 120$ sとし、境界条件として上流端で流量を、下流端で実測水位を与えた。水位の観測結果及び計算結果をFig.2に示す。なお、水位の観測値は建設省資料によるものであり、図中の距離は河口からの距離である。

24.2 km 地点のものでは満潮位の計算値が観測値より低くなっているが、いずれの地点においても計算結果は長期的な水位変化を示しており、観測値をほぼ再現しているものといえる。

続いて、水理量計算結果をもとに、所定の水塊に分割した。分割水塊の水量は、2,500 m³, 5,000 m³, 10,000 m³, 20,000 m³, 40,000 m³, 80,000 m³, 160,000 m³, 320,000 m³ の8種類とし、それぞれの水量について5~10個を設定した。

Fig.3に塩化物イオン濃度とSS濃度の観測結果及び計算結果を示す。なお、SS濃度の観測値はかなり高く、同図中ではその値を1/10倍して示している。塩化物イオン濃度の周期的変動は各地点ごとに異なり、上流側地点では1日2回の周期(満干潮)に対して各周期での極大濃度のみが変動し、下流側地点では各周期での極大、極小濃度とも変動している。これより、海水の侵入状態が潮相によって変化することが分かる。SS濃度は

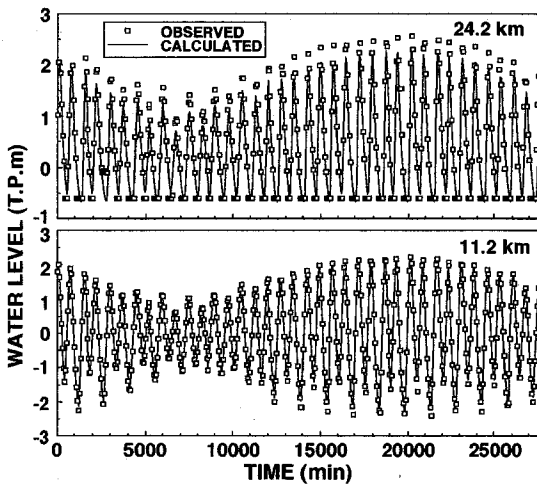


Fig.2 Temporal change of observed and calculated water level.

全体的に大潮時に高く、小潮時に低くなる傾向を示しているが、これは潮相によって流れが変化し、小潮時には底泥の巻き上げ量が減少するためである。なお、SS濃度の観測値がかなり高かったのは、SS濃度の鉛直分布からみて比較的河床に近いところの1点からのみ採水してSS濃度を求めたことによると考えられる。一潮汐間の調査結果³⁾によれば、断面平均濃度は下流側地点で最大 10 kg m^{-3} 程度、上流側地点では浮泥流の流下により 30 kg m^{-3} 程度が示されており、今回の計算結果（計算濃度は断面平均値を表す）はこれに比べやや低いもののは観測値を再現している。したがって、塩化物イオン濃度、SS濃度ともに半月周期における長期的な濃度変動傾向をほぼ再現しているといえる。

(2) 無機態窒素濃度の計算

各無機態窒素濃度の計算は、実験的に求められた反応係数等を用いて行った。また、汚濁負荷の流入地点とその負荷量は、現地調査結果並びに流域の主要な負荷源を考慮して定めた。Fig.4に設定した流入負荷を示す。最下流の負荷流入点を河口より 9.6 km 上流地点としたが、そこでは下流河口部付近での底泥からのアンモニア性窒素の供給が考えられたため、周辺流域からの負荷にこの分を加えてアンモニア性窒素の負荷量を設定した。なお、計算の初期条件は、採水地点を河道方向に9地点配した調査を計算開始時刻に合わせて行い、その結果に基づいて設定した。

Fig.5, 6及び7に各無機態窒素濃度の経時変化（観測結果及び計算結果）を示す。アンモニア性窒素の観測結果では、いずれの地点においても観測値の変動が大きく、一潮汐間での変動特性が大潮～小潮周期において変化している。この原因には、SS濃度の長期的な変化によって硝化量が変化することの他に、流入負荷量に経日的な変動があったものと思われる。一方、計算結果では

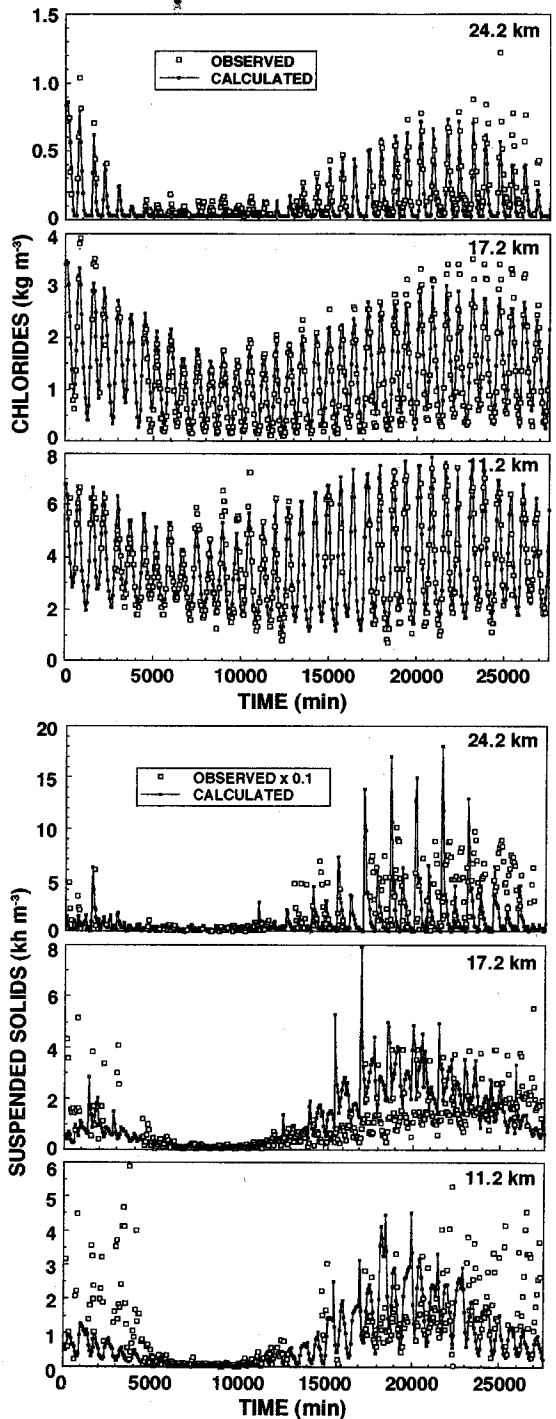


Fig.3 Temporal change of observed and calculated chlorides and suspended solids concentration.

17.2 km 地点及び 11.2 km 地点での一潮汐間の濃度変動幅が長期的に変化している。下流側 11.2 km 地点では、大潮時前後(20,000分以降)ではSS濃度の上昇により硝化量が小潮時に比べ増加するので、アンモニア性窒

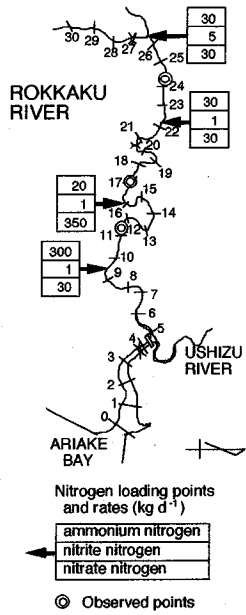


Fig.4 Nitrogen loading points and rates.

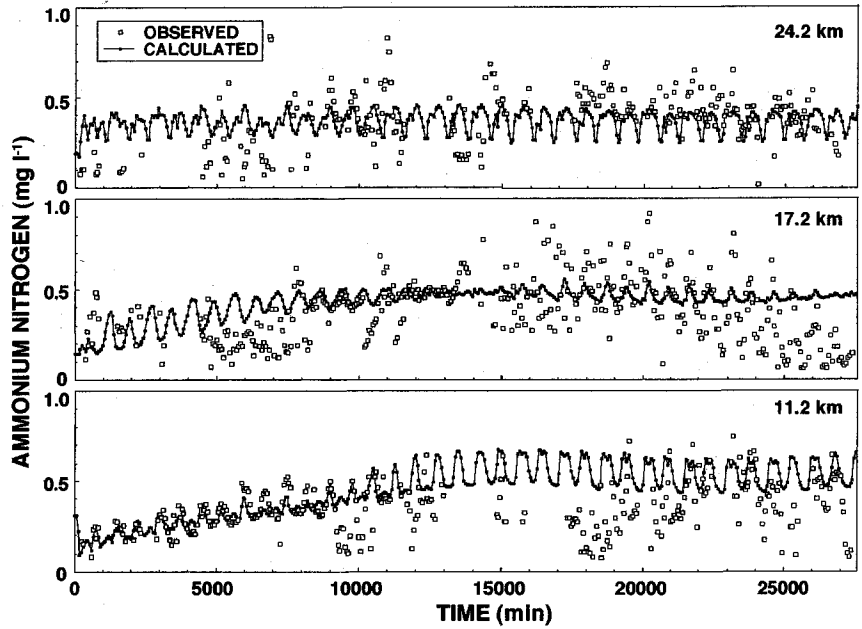


Fig.5 Temporal change of observed and calculated concentration of ammonium nitrogen.

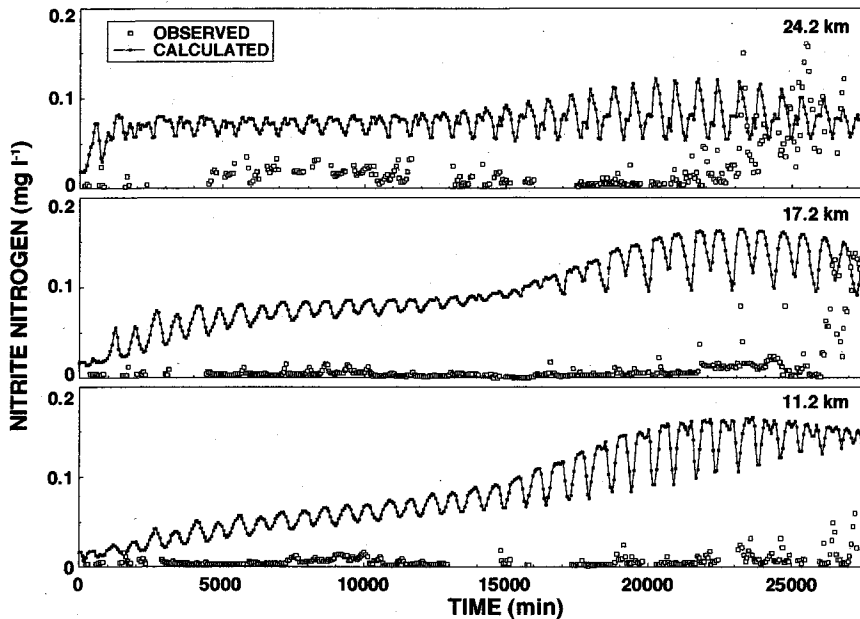


Fig.6 Temporal change of observed and calculated concentration of nitrite nitrogen.

素濃度が低くならなければならないはずであるが、計算結果ではそうっていない。これは、大潮時には塩化物イオン濃度も高くなるために、その塩化物イオン濃度の硝化に対する阻害の影響が相対的に大きくなったことによる。

次に、亜硝酸性窒素濃度の変化では、いずれの地点においても観測値に比べ計算値の方が高く、計算濃度が徐々に高くなっている。これは、亜硝酸化の反応速度

が小さく、硝化反応の中間物質である亜硝酸性窒素が蓄積していったものと思われる。この原因には、実験により得られた亜硝酸化の最大比増殖速度が小さかったことや亜硝酸化菌の菌体濃度をアンモニア化菌のものにそれらの増殖収率の比を乗じて与えており、亜硝酸化菌の濃度が相対的に低かったことが考えられる。計算時にこれらの係数を調整することも可能であったが、亜硝酸性窒素濃度のオーダーがアンモニア性・硝酸性窒素

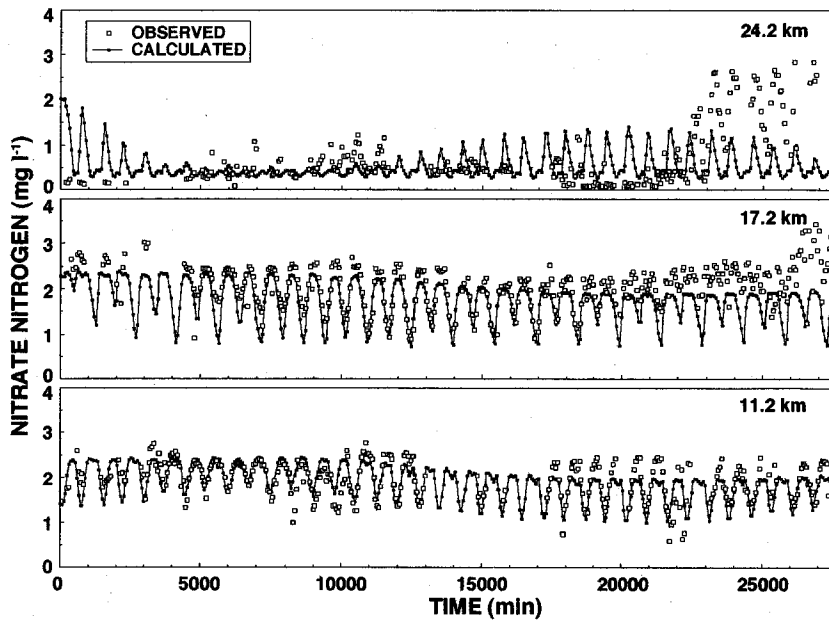


Fig.7 Temporal change of observed and calculated concentration of nitrate nitrogen.

のものより1桁以上小さかったのでそのままにした。

硝酸性窒素の濃度変化を見ると、観測値・計算値とも17.2 km 地点では各周期の満潮時に各周期での濃度極大値を、11.2 km 地点では満潮時に極小値を示しており、ほぼ良好な結果が得られた。

以上のように、今回の計算ではアンモニア性窒素濃度の観測結果を完全に再現することはできなかった。これは、実際の感潮部では濃度変動が流入負荷の変動による影響を大きく受けるのに対して、計算では汚濁負荷の流入を定常的に与えたためと考えられる。また、実験結果を基に反応係数や菌体濃度を設定したために、亜硝酸性窒素の濃度変化においてその蓄積（長期的な濃度上昇）が見られた。室内実験と実際の感潮部での諸条件の相違を考慮して、反応係数等を修正することも必要であろう。しかしながら、細部では問題はあつたものの全体としては感潮部における各無機態窒素濃度の長期的な変動傾向をほぼ再現することができた。

4. 窒素変換過程の定量的評価

河川感潮部における窒素変換過程を定量的に評価するために、感潮部上流端より流入した各無機態窒素の濃度が0の水塊が感潮部を流下する間にどのようにその水塊に負荷が加わり、SSと底泥によって硝化・脱窒されるのかを検討する。Fig.8は、計算領域の上流端より流入してきた水塊を追跡し、その重心位置と水塊中の各無機態窒素の濃度、そして30分間にその水塊へ流入した負荷量及びアンモニア酸化量、亜硝酸酸化量、脱窒による底泥への硝酸性窒素の輸送量を示したものであり、計算

開始時と6日目(8,640分)の小潮時に流入してきた水塊について見たものである。

(1) 水塊中の濃度変化と流入負荷の影響

まず、水塊の位置を見ると、計算開始時に上流端より流入した水塊が、一潮汐間での上下流方向への移動を繰り返しながら、次第に下流側へ押し流されていることが分かる。その一潮汐間の水塊の移動距離は、空間的な位置が異なるので厳密な比較にはならないが、小潮時には約5 km、大潮時には約10 kmである。

水塊中の各無機態窒素の濃度では、アンモニア性・亜硝酸性窒素があまり変化していないのに対して、硝酸性窒素は大きく変化している。計算開始時に流入した水塊のアンモニア性窒素では、12,000分位までの水塊が上流部にあるときには、その濃度は 0.3 mg l^{-1} である。その後水塊が下流部に達し、河口より9.6 km上流地点での負荷が流入するようになってくると、 0.5 mg l^{-1} まで濃度が上昇してきている。一方、6日目に流入してきた水塊では、12,000分以降も水塊がまだ9.6 km地点の負荷流入点に達していないため、濃度は上昇していない。

計算開始時に流入した水塊の硝酸性窒素の濃度は、8,000分位に水塊が河口より15 km上流付近にあるときに最高濃度を示し、その後水塊の流下にともなってその濃度は低下している。水塊が河口より15 km上流付近にあるときに最高濃度を示すのは、16.0 km地点での硝酸性窒素の負荷流入によるものである。ここで、計算開始時に流入した水塊と6日目に流入してきた水塊の硝酸性窒素濃度の変化を比較すると、前者では最大2.5

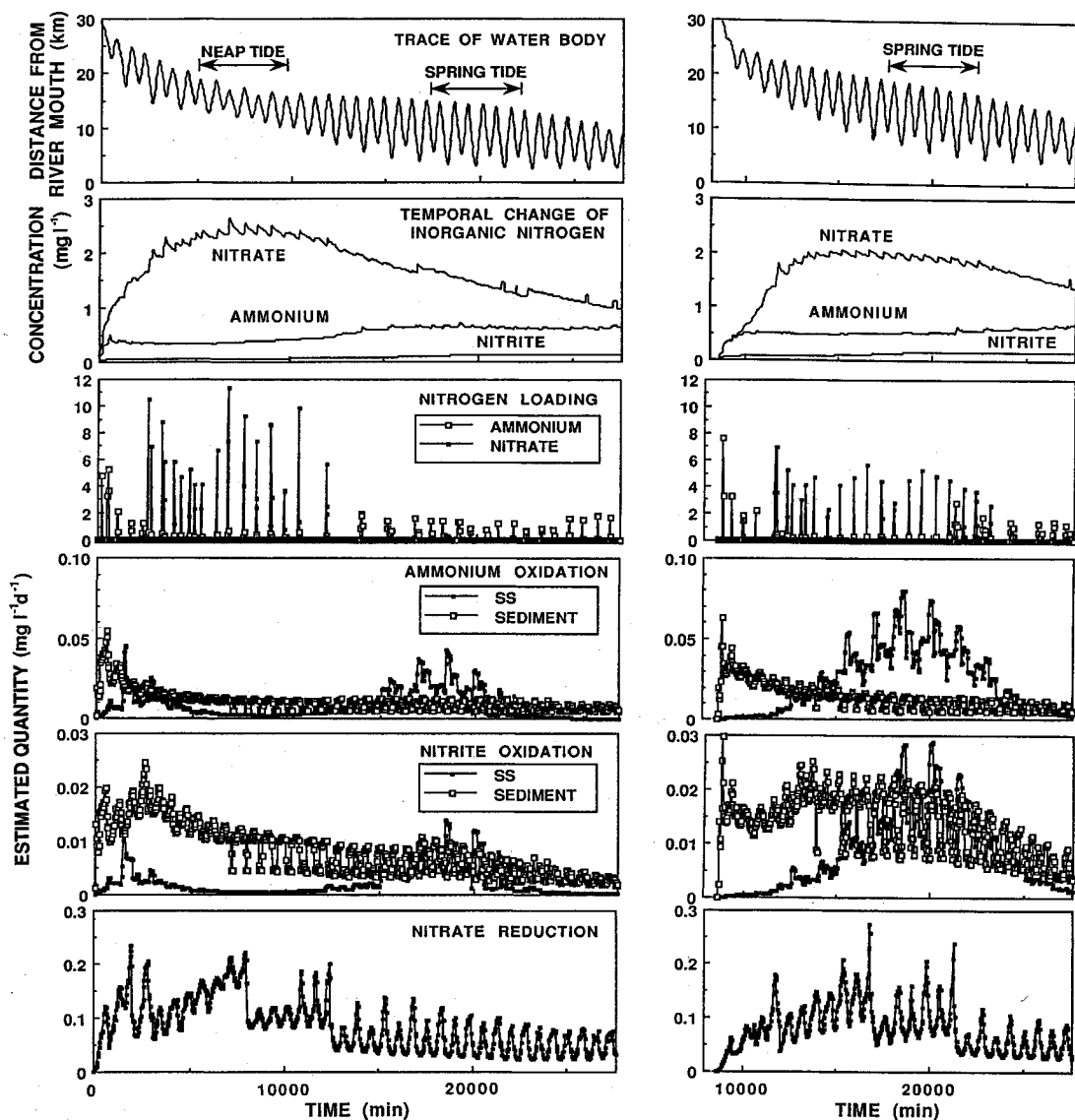


Fig.8 Results of quantitative evaluation: trace of water bodies which flow into the estuary at the beginning of calculation and at the time of 8,640 min; temporal changes of inorganic nitrogen concentrations in water bodies; and nitrogen loading, ammonium oxidation, nitrite oxidation, and nitrate reduction, where their quantities for 30 min are expressed with their estimated quantity.

mg l⁻¹, 後者では同じく 2.0 mg l⁻¹ となっている。これは、河口より 16.0 km 上流地点での硝酸性窒素の負荷流入による影響と考えられる。すなわち、計算開始時に流入した水塊が 16.0 km 地点を通過するときにはちょうど小潮であり、一潮汐間の水塊の移動距離が相対的に小さいためにその水塊に流入する負荷が 0.2 mg l⁻¹ に達するほどになっている。一方、6 日目に流入してきた水塊が 16.0 km 地点を通過するときにはすでに大潮になっており、水塊の移動距離が大きく、移動速度が速いためにその水塊に流入する負荷が 0.1 mg l⁻¹ 程度に

しかっていない。したがって、1 日当たりの流入負荷量は同じでも、流況の違い(大潮・小潮)によって負荷が流入する水塊中での濃度は異なることがいえる。

(2) 硝化・脱窒反応の影響

次に、アンモニア酸化及び亜硝酸酸化を見ると、それはSSと底泥により行われている。SSによる硝化量は、SS濃度の長期的な変化に伴って、小潮時には小さく、大潮時に大きくなっている。底泥による硝化では、水塊が上流側にあるときは、塩化物イオンによる阻害の影響が小さいために硝化量が大きく、水塊が下流側に流

下するにしたがって次第に底泥による硝化量が減少している。なお、6日目に流入してきた水塊について見ると、計算開始時に流入してきたものに比べて、SSや底泥による硝化量が大きくなっている。

計算開始時に流入した水塊のアンモニア酸化量は、SSで最大 $0.043 \text{ mg l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、底泥では $0.014 \text{ mg l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 程度であり、アンモニア性窒素の濃度低下にはほとんど寄与していない。すなわち、15,000分以降アンモニア性窒素の濃度がほとんど変わらないのは、その水塊への流入負荷とアンモニア酸化がほぼ同程度になっているためと考えられる。一方、6日目に流入してきた水塊では、SSによるアンモニア酸化量は最大 $0.082 \text{ mg l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ となっており、計算開始時に流入した水塊に比べて塩化物イオン濃度が低いこととSS濃度が高いことによるものと考えられる。亜硝酸酸化においても6日目に流入してきた水塊の方の酸化量が大きく、同様のことがいえる。

脱窒による底泥への硝酸性窒素の輸送量は半日毎の周期的な変化を示している。計算では硝酸性窒素の単位面積当たりの輸送フラックスを上層水中の硝酸性窒素濃度とDO濃度の関数で与えているが、硝酸性窒素の濃度は各周期においてあまり変化していないので、水塊の位置によって硝酸性窒素の輸送が生じる面積が変化する影響と考えられる。すなわち、一潮汐間での水塊の位置と対比すると、水塊が下流側に来たときに硝酸性窒素の輸送量が大きくなっている。

ここで、計算開始時に流入した水塊の小潮及び大潮の下げ潮時にSS濃度が極大となった時刻におけるその水塊のSS濃度及び各無機態窒素の濃度、ならびにアンモニア酸化、亜硝酸酸化及び脱窒による底泥への硝酸性窒素の輸送の各速度を求めると、Table 3 のようになる。大潮時のSS濃度は、小潮時のものに比べかなり大きくなっている。アンモニア性・亜硝酸性窒素の濃度は、水塊が下流側に達した大潮時の方が高くなっているが、硝酸性窒素は大潮時の方が低くなっている。これは、水塊への負荷流入及び各反応が空間的に異なるからである。アンモニア酸化・亜硝酸酸化の速度について見ると、底泥では小潮・大潮でそれほど変わらないのに対し、SSでは大潮時の方が小潮時より1桁大きくなっている。これは、SS濃度の変化によるものである。脱窒による底泥への硝酸性窒素の輸送速度は、水塊が上流側にある小潮時には硝化速度に比べ1~2桁大きくなっている。このときには、水塊に流入する硝酸性窒素の大半が速やかに脱窒されており、硝酸性窒素が水塊中に蓄積し、その濃度が高くなることはない。一方、水塊が下流側に達した大潮時には、硝酸性窒素の輸送速度は、硝化速度よりやや大きい程度であり、硝酸性窒素の負荷流入もないため、水塊の硝酸性窒素の濃度が徐々に減少している。

水塊中の硝酸性窒素の濃度低下に対する底泥への硝酸性窒素の輸送による寄与は、次のように概算できる。例

Table 3 Concentrations and rates in water body at neap and spring tides.

		neap tide (8,700 min)	spring tide (18,510 min)
concentrations			
suspended solids (kg m^{-3})		0.100	2.70
ammonium nitrogen (mg l^{-1})		0.379	0.655
nitrite nitrogen (mg l^{-1})		0.0572	0.106
nitrate nitrogen (mg l^{-1})		2.40	1.58
rates			
ammonium oxidation ($\text{mg l}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	SS	0.00185	0.0432
	sediments	0.00468	0.00490
nitrite oxidation ($\text{mg l}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	SS	0.000363	0.0137
	sediments	0.00442	0.00372
nitrate reduction ($\text{mg l}^{-1} \text{ d}^{-1}$)		0.113	0.0639

えば、計算開始時に流入した水塊の15,000~20,000分間において、30分間当たりの底泥への硝酸性窒素の輸送量を平均的に $0.07 \text{ mg l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ とすると、同時間で 0.24 mg l^{-1} の硝酸性窒素の濃度低下となる。同時間での水塊中の硝酸性窒素の濃度変化は 0.24 mg l^{-1} であり、底泥への硝酸性窒素の輸送量とほぼ一致する。なお、亜硝酸酸化による硝酸性窒素濃度への寄与は、その間の亜硝酸酸化量をSSと底泥合わせて $0.01 \text{ mg l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ とすると、同時間で 0.03 mg l^{-1} の濃度増加となる。したがって、この分が硝酸性窒素濃度の低い海水との混合による濃度低下と考えられる。これらのことより、水塊中の硝酸性窒素の濃度低下には、底泥での脱窒による硝酸性窒素の輸送が大きく寄与しているといえる。

(3) 河川感潮部での窒素循環とその制御

水域における水質汚濁制御・管理のためには、各水域での自然浄化能力を定量的に把握することが重要である。しかし、河川感潮部のように流況の変化が相対的に大きな水域での自然浄化能力を定量的に把握することは、場の非定常性のためにより困難である。本研究では、硝化・脱窒反応を考慮したシミュレーションモデルを作成して、感潮部における窒素変換過程を定量的に検討した。その結果、河道内のSSや底泥表層部での硝化反応、そして本感潮部のように底泥中に有機炭素源が豊富にある場合には、底泥中の無酸素部における脱窒反応が生じていることを示した。また、今回計算を行ったのは冬期の比較的水温が低い時期であったにもかかわらず、硝化・脱窒反応が速やかに生じていた。したがって、感潮部での窒素循環に関する自然浄化能力はかなり高いといえる。しかしながら、今回の計算では流域からの負荷流入の全量を正確に把握していなかったために、部分的に負荷流入点及び流入負荷量を設定せざるを得なかった。Fig. 4に示したアンモニア性窒素の流入負荷について見ると、9.6 km地点を除いた負荷の合計は80 kg

d' となる。流域の規模や土地利用状況から見てはほぼ妥当な値といえる。感潮部全域を対象にすると、この感潮部が一つの反応槽として、その領域内の局所的な流入負荷の変動に無関係に、硝化菌総量が流入アンモニア性窒素総量に対応して存在することになり、硝化菌総量はほぼ一定値を保っていると考えられる。また、脱窒速度は、底泥への全フラックスで決まっている。

河川感潮部での窒素除去とくに硝酸性窒素の除去には、底泥中の無酸素部での脱窒が大きく寄与していることを示したが、そこでの脱窒は底泥表層 2 cm 程度までのところで生じている¹⁾。したがって、式(14)、(17)からも明らかなように、感潮部での窒素除去機能をさらに強化するためには、硝酸性窒素濃度の高いときに脱窒させること、底泥への輸送フラックスを増すために底泥表面積を拡大させることが有効と考えられる。

5. 結 論

本研究では、河川感潮部における窒素変換過程についてのシミュレーションモデルを作成し、半月周期にわたる各無機態窒素の濃度計算を行った。このモデルの特徴は、1) 基礎式を移動座標系で表現することにより、長期的な計算が可能となったこと、2) SSと底泥による硝化反応を考え、反応係数を塩化物イオン濃度の関数で与えたこと、3) 底泥中における脱窒による上層水中からの硝酸性窒素の輸送フラックスを上層水の硝酸性窒素濃度及びDO濃度の関数で与えたこと、である。このシミュレーションモデルを用いた濃度計算結果より、河川感潮部での窒素変換過程について以下のようなことが明らかとなった。

(1) SS濃度の半月周期における変化に伴って、SS

による硝化も、小潮時には小さく、大潮時には大きくなる。

(2) 1日当たりの流入負荷量は変わらなくても、流況の半月周期における変化によって、水塊中での窒素濃度に対する影響は異なる。

(3) 底泥での脱窒による上層水中の硝酸性窒素の輸送量は、空間的に変化する。また、水塊中の硝酸性窒素の濃度低下には、底泥での脱窒による上層水中の硝酸性窒素の輸送が大きく寄与する。

最後に、本研究は文部省科学研究費重点領域研究人間環境系(研究代表者 楠田哲也)の補助を受けて行ったものであり、記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 二渡了・大石京子・古米弘明・楠田哲也：強混合河川感潮部における硝化・脱窒過程に関する研究，土木学会論文集(投稿中)。
- 2) 二渡了・楠田哲也：強混合河川感潮部における懸濁物質輸送のシミュレーション，土木学会論文集，No.452/II-20，pp.61~70，1992。
- 3) 二渡了・楠田哲也・大石京子：強混合河川六角川感潮部における懸濁物質濃度の変動特性，土木学会論文集，No.452/II-20，pp.71~79，1992。
- 4) 宗宮功編著：自然の浄化機構，技法堂出版，p.86，1990。
- 5) 土木学会編：水理公式集(昭和46年改訂版)，土木学会，pp.186~187，1971。
- 6) Knowles, G., Downing, A.L. and Barrett, M.J.: Determination of kinetic constants for nitrifying bacteria in mixed culture, with the aid of an electronic computer, J. Gen. Microbiol., Vol.38, pp.263~278, 1965.
- 7) 前出 4) に同じ，pp.1~37。

(1992. 9. 14 受付)

SIMULATION OF NITRIFICATION AND DENITRIFICATION PROCESSES IN WELL-MIXED ESTUARY

Tohru FUTAWATARI, Won Kyu KIM, Tetsuya KUSUDA and Hiroaki FURUMAI

Modeling of nitrification and denitrification processes in a well-mixed estuary is performed and long term variations in nitrogen concentration are simulated for a fortnightly cycle, in which a Lagrangian reference frame is used to reduce numerical dispersion. In this model, kinetic parameters and the concentrations of nitrifying bacteria are given through experiments, and the denitrification in sediments is considered. On the basis of the simulation results, the process is quantitatively evaluated, and it shows that nitrification is affected by the change of suspended solids concentration during spring-neap cycles, and that the decrease in concentration of nitrate in water body is caused by nitrate reduction due to denitrification in sediments.

図 書 案 内

土木情報処理の基礎

—FORTRAN77に即して—

土木学会土木情報システム委員会
教育問題小委員会

B 5 版 / 331頁
定 価 / 3,399円
会員特価 / 2,980円
〒480円

土木情報処理の基礎 II

(BASIC, Pascal, Cによる)

サンプルプログラム収録 フロッピーディスク(5inch)

土木学会土木情報システム委員会
教育問題小委員会

B 5 版 / 272頁
定 価 / 3,800円
会員特価 / 3,400円
〒480円

学 術 用 語 集

～土木工学編 (増訂版)～

B 5 版 / 931頁
定 価 / 3,770円
〒550円

海 岸 工 学 用 語 集

「シソーラス付」「和英対照付」

A 5 版 / 430頁
定 価 / 2,000円
会員特価 / 1,800円
〒480円

フォース橋の100年

100YEARS OF THE FORTH BRIDGE

B 5 版 / 160頁
定 価 / 5,000円
会員特価 / 4,500円
〒480円

コンストラクション クレーム

～予防と解決～

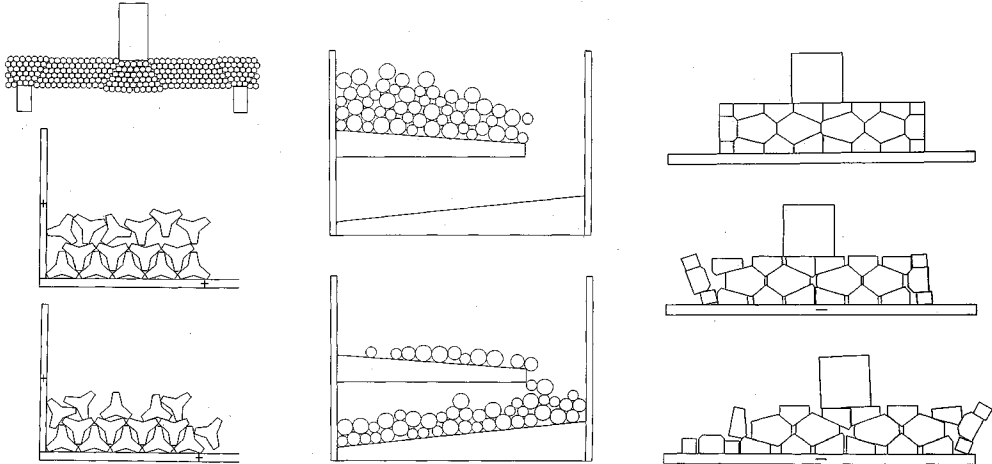
B 5 版 / 244頁
定 価 / 9,500円
会員特価 / 8,550円
〒480円

■お申込は土木学会刊行物販売係へ

〒160 東京都新宿区四谷1丁目無番地 土木学会 電話03-3355-3411 内線144・145・146 振替東京4-763225
FAX.03-3355-3446

個別要素法プログラムシリーズ

■開発元 Dr.Cundall (ITASCA社)



UDEC

個別要素、差分要素を基本とする汎用2次元コードです。

- ・転倒、滑落解析
- ・地震応答解析
- ・地盤、不連続性岩盤の安定解析
- ・岩盤の掘削解析
- ・コンクリートの亀裂進行解析
- ・流れ解析 (Coupled flow-mechanical analysis)
- ・熱解析 (Coupled thermal-mechanical analysis)

BALL2D/3D

解析対象を円あるいは球でモデル化する手法のコードで、この手法は数多くの個別要素法プログラムに採用されています。

BALL2D-Polygon

BALL2Dに多角形ブロックを機能追加したバージョンです。任意剛体壁境界あるいは、飛翔体等を多角形ブロックとし、円ブロックとの相互作用解析が可能です。

BFLOW

解析対象を任意多角形でモデル化する手法のコードで、接触判定ロジック、特に凹型のブロックの接触判定の難点を解決したものです。

UDECではやや困難な完全崩壊、流動解析に適します。

CASK-3D

キャスク等の3次元円筒構造物の地震時の転倒解析コードです。

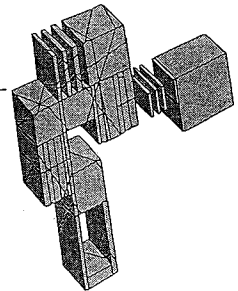
3DEC

UDECの3次元バージョンです。充実した3次元グラフィック機能をもっています。

- ・転倒、滑落解析
- ・地震応答解析
- ・地盤、不連続性岩盤の安定解析
- ・コンクリートの亀裂進行解析
- ・岩盤の掘削解析

■価格

● UDEC	SUN/IBM-PC (Barton-Bandis Model等の機能追加も可能です。)	ソース・コード	260万円
● BALL2D/3D	SUN/IBM-PC/FACOM/HITAC	ソース・コード	各200万円
● BALL2D-Polygon	SUN/IBM-PC	ソース・コード	260万円
● BFLOW	SUN/IBM-PC	ソース・コード	260万円
● CASK-3D	SUN/IBM-PC	ソース・コード	200万円
● 3DEC	SUN/IBM-PC	ロード・モジュール	680万円



プログラムはいずれも最新バージョンを提供いたします。また、問題に応じた個別要素法プログラムの開発も行っています。

* 当社は1988年7月からITASCA社の販売代理店をしています。

OKL 株式会社 応用工学研究室

〒151 東京都渋谷区上原2-2-7 カマタビル201
TEL.(03)3485-9360 FAX.(03)3485-6955

地盤の非線形解析プログラム

■開発元 Dr.Cundall (ITASCA社)

FLAC-2D (Fast Lagrangian Analysis of Continue)

1950年代に有限要素法が出現し、コンピュータの発展と共に進歩をとげていったのと並行して、衝撃分野での解析を目的に始まった差分法に基づく、“Hydrocodes”もすくなくならぬ成功をおさめていました。応力波伝播を基本とする弾塑性固体の大変形、スライド・ライン手法による滑り・剝離挙動の解析には目覚ましいものがありました。しかし、これらを取り扱うプログラムの多くは公的機関での開発のため、公開されたものは余りありませんでした。FLAC-2Dはこの流れをくむ地盤非線形解析プログラムです。

プログラムの特徴

- ・幾何学的大変形及び材料非線形を取り扱うことができます。微小変形・歪解析も可能です。
- ・要素の大きくながみの発生からくる数値不安定を避けるため3角形差分要素を採用しています。
- ・要素間の滑りを考慮できるスライド・ライン機能(大変形)を備えています。

要素ライブラリー

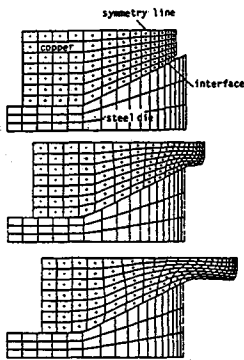
- ・2次元平面歪/応力要素
- ・ケーブル要素
- ・ビーム要素
- ・ロックボルト要素(point anchor/grouted)

適用分野

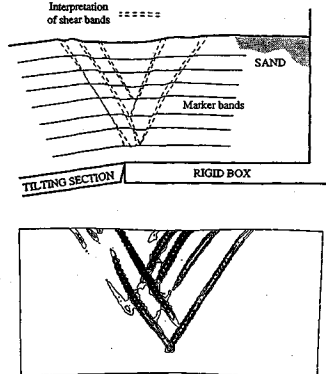
- ・斜面・盛土の設計及び安定解析
- ・浅/深基礎解析
- ・アースダム及びコンクリートダム解析
- ・トンネル、鉱山掘削解析
- ・圧密、流れ解析
- ・固体と流体の相互作用解析

構成則

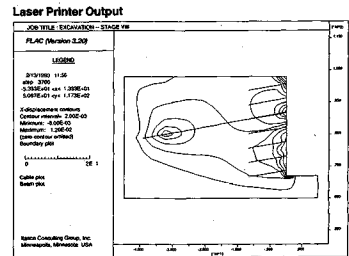
- ・等方性、非等方性弾性
 - ・弾塑性(Mohr-Coulomb, Von Miseses, Drucker-Prager等)
 - ・偏在ジョイント・モデル(Ubiquitous joint)
 - ・歪硬化/軟化
 - ・ヌル要素
 - ・体積歪依存の間隙水圧発生モデル 等
- その他の構成則の機能追加も可能です。



スライド・インターラクション



断層解析



地盤安定解析

価格

- FLAC-2D SUN/IBM-PC ロード・モジュール 標準バージョン……80万円
- ※追加オプションとして、動解析、クリープ解析及び熱解析があります。
- 追加オプションを含む一括購入の場合……150万円

プログラムはいずれも最新バージョンを提供いたします。また、問題に応じた地盤非線形プログラムの開発も行っています。

* 当社は1988年7月からITASCA社の販売代理店をしています。

OKL 株式会社 応用工学研究室

〒151 東京都渋谷区上原2-2-7 カマタビル201
TEL.(03)3485-9360 FAX.(03)3485-6955

移流拡散解析プログラム

未来設計企業

CRC

MATRAN EX

地下水汚染
の解析に!

塩水くさび
農薬汚染
廃棄物処理
その他

飽和・不飽和浸透解析に、移流分散・拡散を考慮。
EXtensiveな問題に適用可能なEXcellentなプログラム。

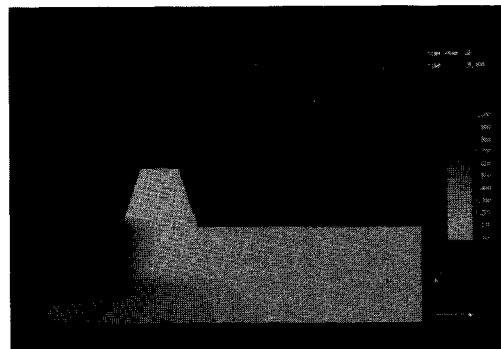
プログラムの特長

- 断面(EXV)および平面(EXH)の解析が可能
- 充実した解析機能
 - 定常・非定常解析 (断面、平面)
 - 軸対称解析 (断面)
 - 降雨 (断面、平面)
 - 揚水・注水 (断面、平面)
 - 浸出面 (断面)
 - 材質変更 (断面、平面)
 - 境界条件の変更 (断面、平面)
 - 水位・濃度の経時変化 (断面、平面)
- 豊富なグラフィック出力 (濃度コンター図、流速ベクトル図、濃度の時間推移グラフ 他)



濃度コンター図(平面解析例)

画面出力図



濃度コンター図(断面解析例)

画面出力図

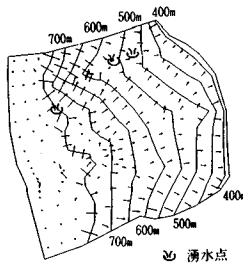
株式会社 **CRC総合研究所** 西日本支社

〒541 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06) 241-4121 営業担当: 岩崎
(03) 3665-9741 本社窓口: 菅原

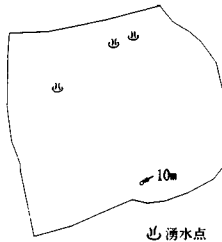
あの地下水解析ソフトがさらに機能充実!

UNISSE_{ユニセフ}(V-2)

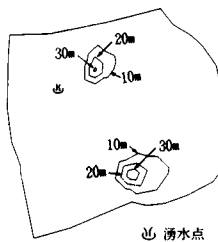
スピーディな同定・安価な解析



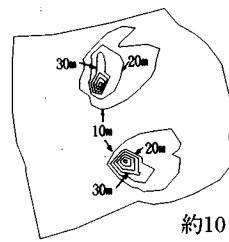
初期状態の地下水流



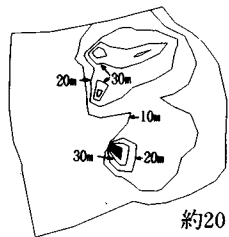
トンネル掘削開始直後



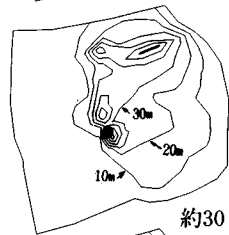
約4日後



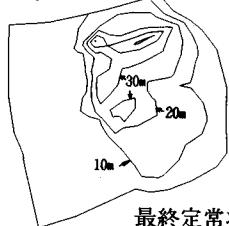
約10日後



約20日後



約30日後



最終定常状態

特長 ○有限要素法による準3次元解析を中心とした地下水の流れのトータルシステムです。

○観測水位と計算水位より、非線形最小二乗法を用いて帯水層定数の同定が可能です。(逆解析手法)

○建設・土木工事(掘削・ディープウェルその他)の解析に対応する多くの機能を備えています。

○メッシュ・ジュネレータにより、モデル(要素分割)作成の手間を軽減できます。

○凶化处理プログラムにより、結果の確認が容易に行えます。

適応機種: SUN, NEWS, HP,
IBM 30XX, FACOM-Mシリーズ 他

この製品は、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。
通商産業省 特別認可法人

IPA 情報処理振興事業協会

株式会社 **CRC総合研究所** 西日本支社

〒105 東京都港区芝公園三丁目1番38号
TEL. (03) 3437-2301

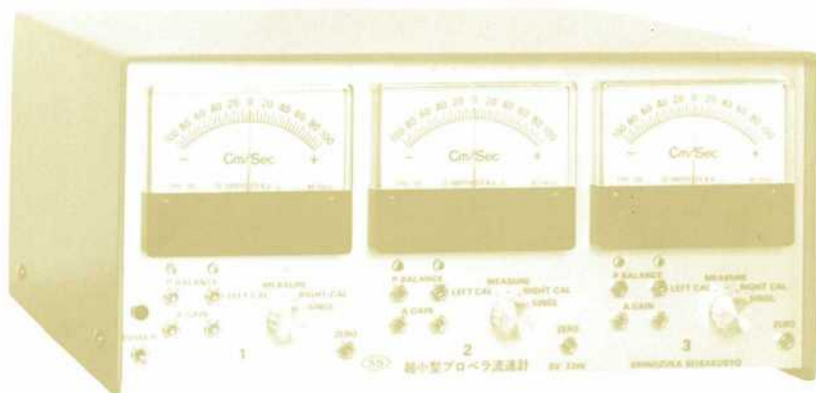
問合せ先

〒541 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06) 241-4121 営業担当: 岩崎
(03) 3665-9741 本社窓口: 菅原

直径3ミリ

水理実験用に理想的

超小型プロペラ流速計 3チャンネル SV-33W型



米粒とプロペラ

- プロペラ検出器軸長
30~50cm, 軸の曲ったものも製作致します。

特徴

- ◎ 赤外線回転検出で水温や水質に影響されません。
- ◎ 往復流の正逆判別は高感度で確実です。
- ◎ 正逆判別のないシングルプロペラも使用出来ます。
- ◎ 独自の楕円軸に依り流れを乱すことが非常に小さくて済みます。
- ◎ プロペラが小さいので流速100^{cm}/secで800~900パルスと高い分解能です。

水理実験用測定器専門

SS 篠塚製作所

〒196 東京都昭島市玉川町2-8-21 電話 0425-44-1731

昭和二十七年五月二十八日第三種郵便物認可
平成五年十一月十五日印刷
平成五年十一月二十一日発行
土木学会論文集(毎月)二〇二〇日、二二〇一日発行

定価 1,000円(本体価格・九七二円)