

地下水によって輸送される陸域由来栄養塩 が河川水質に及ぼす影響に関する研究

STUDY ON INFLUENCE OF LAND YIELDED NUTRIENTS TRANSPORTED THROUGH GROUNDWATER FLOW ON NUTRIENT CONCENTRATION IN A RIVER

神田太朗¹・赤松良久²・池田駿介³・赤堀良介⁴

Taro KANDA, Yoshihisa AKAMATSU, Syunsuke IKEDA, And Ryosuke AKAHORI

¹正会員 修(工) 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (現 国土交通省国土技術政策総合研究所)
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

²正会員 博(工) 琉球大学准教授 工学部環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1)

³フェロー会員 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科土木工学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁴正会員 Ph.D. 東京工業大学助教 大学院理工学研究科土木工学専攻

Groundwater flow may play an important roll in nutrients supply from terrestrial area to river and coastal area. This paper reports the result of field observation in a basin about influence of groundwater flow on nutrients concentration in the river water and estimates groundwater flux based on conservation equations of discharge, nutrients concentration, and oxygen isotope ratio. Comparisons of nutrients concentrations and oxygen isotope ratios between soil moisture and groundwater show fine correlations, indicating groundwater flow from the terrestrial area to ground below the river. Longitudinal distributions of the oxygen isotope ratio and nutrients concentration show nutrients transport through groundwater flow. According to the groundwater flux estimation, 58.1% of ammonia passing through the end of the river is yielded in the terrestrial area, on the contrary the groundwater flow occupies 37.6% of the river discharge at the end of the river.

Keywords: Land yielded nutrients, Groundwater flow, River water quality, Stable isotope,

1. はじめに

陸域において投入された人間活動に由来する物質は河川や地下水、海の流れによって輸送され、河川や沿岸域の広範囲で生態系に影響する可能性がある。物質の陸域から河川への流出過程の一つである地下水による輸送は、平水時を含めて常に生じている可能性があるため、生態系への影響を検討する際に大変重要と言える。しかし、地下水による物質の輸送は、地下水の流れの計測が困難であることから、出水時の表面流による輸送など他の輸送過程に比べて研究事例が少ない。

従来、地下水の流れやそれに伴う物質の輸送についての研究として、水温や溶存イオンなど水と類似の動態を示すと考えられるトレーサーを用いた手法^{1) 2)}や地下水

の流れをモデル化した数値シミュレーションによる手法³⁾、または両者を併用した手法⁴⁾による研究はなされてきた。水温や溶存イオンなどのトレーサーは地下水と共に輸送される他に分子拡散や生物化学的な作用によって移動や生成・消失するため、水自体をトレーサーとして地下水の流れを検討することが理想的であると考えられる。そこで、水の酸素安定同位体比や水素安定同位体比を指標として地下水の流れを検討する研究⁵⁾も行われてきた。水の安定同位体比を指標とした地下水の流れに関する既往の研究によって、水の安定同位体比は流量の成分分離⁵⁾や降水の流達時間の算出⁶⁾に有効であることが認知されつつある。これらの研究は安定同位体比の時間的な変動パターンに着目して単一の土地利用の流域を対象として行われることが多いが、人間活動に由来する物質が河川や沿岸域の生態系へ及ぼす影響を評価するためには、

人間活動から生じる水とそれ以外の水を土地利用などに基づいて分離することが重要になる。

一方で、生元素による土壤汚染や沿岸域の富栄養化などに関心のある研究^{7) 8)}では生元素濃度と共にその安定同位体比がしばしば活用され、生元素動態を含めて環境影響が議論される。しかしながら、これらの研究は「地下水」や「(河口から) 沿岸域」といった単一のフィールドを対象としており、筆者らの知る限りでは、陸域・地下水・河川・沿岸域と流域圏を包括的に扱った研究⁹⁾は稀である。

本研究は、農業活動による栄養塩の投入が盛んな小流域を対象として、陸域から地下水を通した河川への水・栄養塩の輸送について酸素安定同位体比をはじめとしたトレーサーを用いて検討し、これらの輸送について単純なモデルを仮定して陸域由来栄養塩が河川水質に及ぼす影響を定量的に評価することを目的とする。

2. 現地観測

(1) 観測対象地

観測対象地は沖縄県石垣島の名蔵川流域(図-1)である。流域の上流は山地が支配的であるが、下流はサトウキビ畑や水田などの農業用地に開発されている。名蔵川流域では土地利用の改変を背景として農地から流出した土砂や栄養塩が下流のマングローブやサンゴ礁の発達した名蔵湾近海の生態系の衰退を招いていると危惧されている。名蔵川流域の土地利用を表-1に示す。

観測対象地において平水時の地下水位が比較的高い土地利用は森林と水田であり、2008年9月の平水時においては陸域表層から20cm程度下に地下水面があった。河川内の9地点の断面測量から、河床と陸域表層の標高差は平均3.4mであった。また河川の両岸はコンクリートで固められている区間もあるが、河床は固められていない状態である。

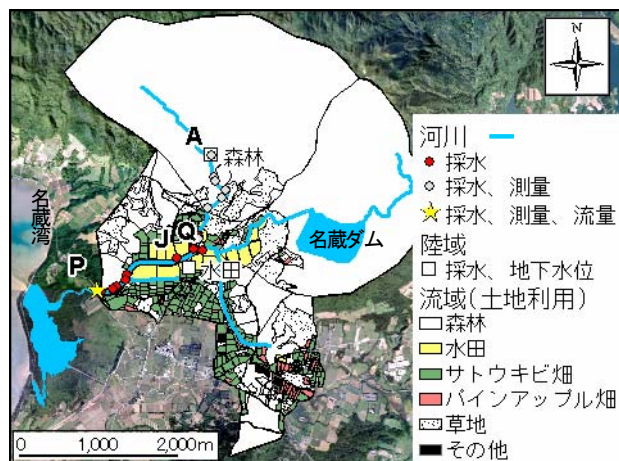


図-1 観測対象地

(2) 観測方法

a) 観測概要

陸域から河川へ地下水および栄養塩の流出が生じているならば、水の酸素安定同位体比や栄養塩濃度などのトレーサーの値は流出起源と流出先とで近似の値を示すはずである。ただし、陸域表層や河川の浅層などの境界付近においては化学的・微生物学的作用がトレーサーの値に影響する可能性がある。また河川表層の水質は上流からの積分によって決定される。そこで、以下に示す3点について検討し、陸域から河川への水や栄養塩の流出を検討する。まず、陸域の流出源におけるトレーサーの値を土地利用ごとに整理する。次に、陸域地下と河川地下におけるトレーサーの値の関連について整理し、陸域から河川地下への水・栄養塩の流出について検討する。最後に、河川地下におけるトレーサーの分布と河川表層水におけるトレーサーの流下方向変化の整合性を検討し、河川地下から河川表層への水・栄養塩の浸透を把握する。なお、対象とする陸域の土地利用は、平水時において地下水位が高く地下水の流出が盛んであると予想される水田と森林とする。

b) 観測方法

現地観測を2008年9月の平水時に名蔵川流域において行い、陸域の水田と森林において土壌水を、河川の上流から流域末端までの16地点(St.A-P、上流から順にSt.A, B, ..., Pであり、St.K-Pは感潮域)において地下水と表層水を採水した。またダムからの支流が合流する直前の地点(St.Q)において表層水を採水した。採水地点は図-1に示すとおりである。土壌水と地下水は多孔質の先端部を有する導水管(ミズツール、(株)大起理化工業)を対象とする深さまで挿入し、減圧吸引することによって採取した。採水深さは陸域表層または河床を基準として、水田の土壌水は15, 30, 60, 100, 150, 200cm, 森林の土壌水は15, 30, 60, 100cm, 河川地下水は15, 30, 60, 100cmとした。採取した水試料は採水ボトルに密閉し、分析に供するまで冷暗所で保存した。

c) 分析方法

水試料の溶存無機態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$)濃度、酸素安定同位体比 $\delta^{18}\text{O}$ を分析した。溶存無機態窒素濃度は自動分析機(TRAACS-2000, BRAN+LUEBBE)を用いて比色法によって分析し、安定同位体比は前処理装置を備えた質量分析計(DELTA^{plus} Advantage, Finnigan TM)によって分析した。 $\delta^{18}\text{O}$ の前処理には水-二酸化炭素平衡法¹⁰⁾を用いた。

表-1 研究対象流域の土地利用状況(2008年9月)

LU	森林	水田	畑地	草地	その他	合計
km ²	11.0	0.5	1.3	1.7	0.1	14.6
%	75.4	3.2	9.0	11.7	0.7	100.0

(3) 観測結果

a) 陸域の各土地利用の水質

水田と森林から採取した土壌水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度と $\delta^{18}\text{O}$ の鉛直分布を図-2に示す。溶存無機態窒素濃度については、水田、森林共に $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度（平均値：0.01mg/L（水田）、0.40mg/L（森林））よりも高かった。水田においては鉛直方向の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度変化が顕著であり、特に表層から 60cm までの浅い地点において著しい高濃度化を示した。また $\delta^{18}\text{O}$ は表層から 60cm までの深さにおいて顕著な変化を示すものの、60cm 以上の深い地点においてはほぼ一定の値を示した。陸域表層付近における顕著な水質変化は化学的・微生物学的作用によるものであると考える。水田における $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度と $\delta^{18}\text{O}$ の鉛直方向の平均値（本研究において代表値と見なす）はそれぞれ 12.1mg/L、-3.1‰であった。一方で、森林においては $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度、 $\delta^{18}\text{O}$ 共に表層から最深部までほぼ一定値を示した。それらの平均値はそれぞれ 0.7mg/L、-4.4‰であった。図-2を見る限り、水田と森林における $\delta^{18}\text{O}$ の平均値は鉛直分布を概ねよく代表していると考えられる。さらに、水田で1月、6月、9月に実施した3度の観測における $\delta^{18}\text{O}$ を比べると、1月と6月は9月に比べて高い値を示した。したがって、季節変動についても、水田の $\delta^{18}\text{O}$ は年間を通じて本研究で得た値よりも高い値を示すと考えられることから、森林の値が他の季節においてより低い値を示すか、高くなったとしてもその変動が水田における季節変動と同程度である限り、水田と森林の $\delta^{18}\text{O}$ の高低が逆転することはない。以上から、水田と森林における $\delta^{18}\text{O}$ の違い（およそ 1‰）は、土地利用ごとに水を識別するために十分な差であると考えられる。

水田と森林で $\delta^{18}\text{O}$ が異なる理由として、森林の土壌水の $\delta^{18}\text{O}$ は年間平均の降水の値を反映する一方で、水田の土壌水の $\delta^{18}\text{O}$ は灌水の時季の降水や水源の値の影響を強く受けるためと考えられる。石垣島の降水の $\delta^{18}\text{O}$ は、降雨をもたらす水蒸気団の由来によって、冬季から春季にかけて高く、夏季から秋季にかけて低くなるとの報告がされている¹¹⁾。

b) 陸域と河川地下の水質の比較

図-3に陸域における水質の代表値と河川地下の代表値の比較を示す。河川地下の水質の代表値として最深部

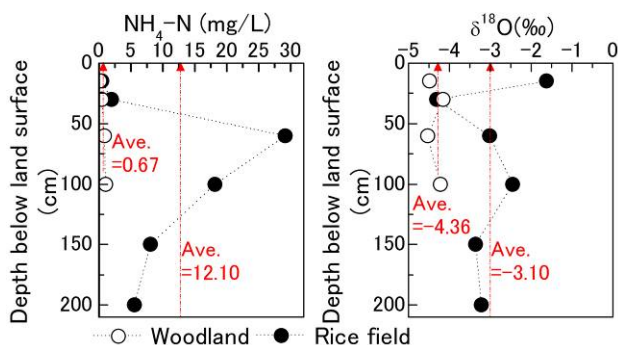


図-2 陸域における $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度と $\delta^{18}\text{O}$ の鉛直分布

の値を用いた。図の横軸は河川に設けた各採水地点の集水域に占める各土地利用の面積率を表す。陸域における水質の代表値として鉛直方向の平均値をバーで図示した。図-3から、河川地下における水質は、水田と森林が集水域に占める割合が大きくなると、それらの陸域の代表値に収束する傾向が見られる。このことから、河川地下における水質は集水域の陸域の水質に影響されていることが推察され、その原因は水田や森林の地下から河川地下へと水や栄養塩の流出が生じているためと考えられる。

c) 河川地下から河川表面の水質の縦断分布

河川における表層水および地下水の水質の縦断分布を図-4に示す。河川表層水（図-4 (b)）の $\delta^{18}\text{O}$ は流下方向に緩やかに高くなる傾向を示す。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は支流の合流地点（St.I-J 間）を除いて流下方向に漸減する一方で、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は流下方向に漸増する傾向を示す。

地下水の水質の縦断分布を見ると、 $\delta^{18}\text{O}$ の等値線（図-4 (c)）は上流の深い地点から下流の浅い地点へと向かっており、 $\delta^{18}\text{O}$ は下流ほど高い傾向にある。 $\delta^{18}\text{O}$ が異なる水同士の混合が生じていない場合、 $\delta^{18}\text{O}$ の等値線は流線に平行になると考えられるため、この結果は上流の深い地点から下流の表層へと地下水の流出が生じているためと解釈できる。図-3から陸域地下から河川地下までは陸域における地下水面の空間的広がりによって地下水の浸透が生じていると考えられるが、河川地下に達した地下水は河川の水面勾配に強く影響を受けて表層へ浸透しているものと考えられる。

溶存無機態窒素濃度を地下水と表層水とで比較すると（図-4 (d) および (e)）， $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は地下水においてより高く、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は地下水においてより低くなっている。高い $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度と低い $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を持った地下水が河川へ浸透しているという推察は、河川表層の水質

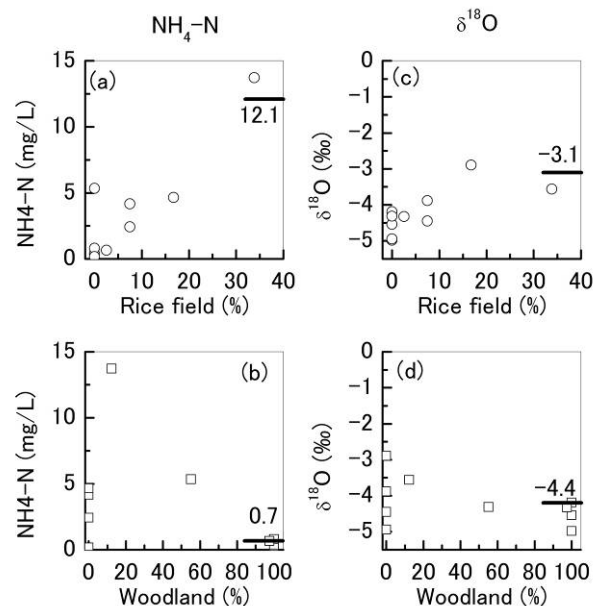


図-3 陸域土壌水と河川地下水の水質の比較

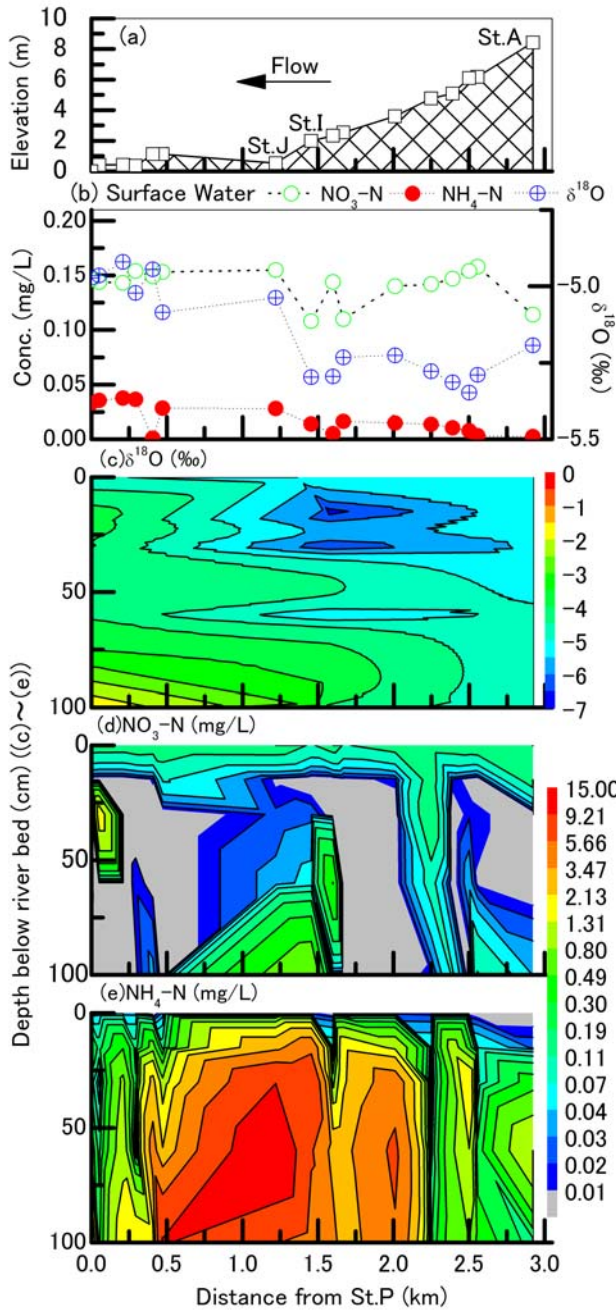
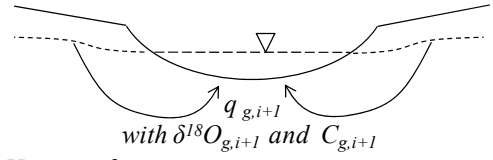


図-4 河川表層水および地下水の水質縦断分布

の縦断分布と整合している。なお、河川地下の一部において $\text{NO}_3\text{-N}$ の高濃度域が見られることは、周囲の陸域から全般的に高濃度な栄養塩が流出しているためか、一部の $\text{NH}_4\text{-N}$ が硝化によって $\text{NO}_3\text{-N}$ に変化したためと考えられる。

以上の水質に関する比較から、陸域から河川表層への地下水の流出とそれに伴う栄養塩の浸透が生じ、河川表層水の水質に影響していることが推察される。陸域からの地下水の流出は河川水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を上昇させ、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を低下させている。支流の合流は $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度に強く影響するが、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度にはほとんど影響しない。

(a) Cross sectional view



(b) Horizontal view

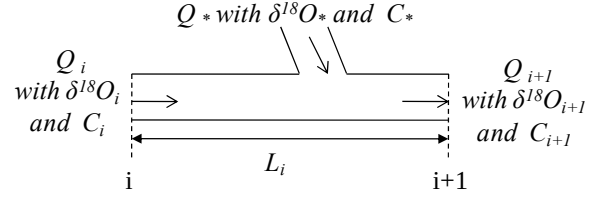


図-5 地下水浸透モデルと変数の定義

3. 地下水を通した物質輸送の定量化

(1) 定量化方法

現地観測の結果から示された陸域からの地下水の流出が河川水質に及ぼす影響を定量化するために、地下水の浸透と支流の合流を考慮した図-5 に示す流出過程を仮定する。この流出過程において、以下に示す流量、物質濃度、酸素安定同位体比に関する保存式が成立する。

$$Q_{i+1} = Q_i + q_{g,i}L_i + Q_* \quad (1)$$

$$Q_{i+1}\delta^{18}O_{i+1} = Q_i\delta^{18}O_i + q_{g,i}L_i\delta^{18}O_{g,i} + Q_*\delta^{18}O_* \quad (2)$$

$$Q_{i+1}C_{i+1} = Q_iC_i + q_{g,i}L_iC_{g,i} + Q_*C_* \quad (3)$$

ここで、 Q ：河川流量、 q ：単位流下距離当たりの地下水浸透量、 L ：隣り合う断面間の距離、 $\delta^{18}O$ ：酸素安定同位体比、 C ：溶存無機態窒素濃度であり、添え字 $i, g, *$ は、それぞれ、採水地点を示す番号 ($i=A, B, \dots, P$)、地下水成分、支流からの合流成分を表す。これらの式を図-5 に示す $Q_i, Q_*, q_{g,i}L_i$ について解くことで以下の式を得る。

$$\frac{Q_i}{Q_{i+1}} = \frac{(C_{i+1} - C_*)\delta^{18}O_{g,i} + (C_* - C_{g,i})\delta^{18}O_{i+1} + (C_{g,i} - C_{i+1})\delta^{18}O_*}{(C_i - C_*)\delta^{18}O_{g,i} + (C_* - C_{g,i})\delta^{18}O_i + (C_{g,i} - C_i)\delta^{18}O_*} \quad (4)$$

$$\frac{Q_*}{Q_{i+1}} = \frac{(C_i - C_{i+1})\delta^{18}O_{g,i} + (C_{i+1} - C_{g,i})\delta^{18}O_i + (C_{g,i} - C_i)\delta^{18}O_{i+1}}{(C_i - C_*)\delta^{18}O_{g,i} + (C_* - C_{g,i})\delta^{18}O_i + (C_{g,i} - C_i)\delta^{18}O_*} \quad (5)$$

$$\frac{q_{g,i}L_i}{Q_{i+1}} = 1 - \frac{Q_i}{Q_{i+1}} \quad (6)$$

支流からの合流がない区間については Q_* 成分を 0 とすることで Q_i と $q_{g,i}$ は酸素安定同位体比のみを変数とする式で表現する事ができ、このとき $C_{g,i}$ は変数とみなして次式によって計算される。

$$C_{g,i} = \frac{(\delta^{18}O_i - \delta^{18}O_{g,i})C_{i+1} - (\delta^{18}O_{i+1} - \delta^{18}O_{g,i})C_i}{\delta^{18}O_i - \delta^{18}O_{i+1}} \quad (7)$$

これらの式に流域末端で計測した流量を代入し、順次上流側へ計算を行うことで任意の採水地点における流量

を3成分に分離することが可能である。代入する地下水成分として用いる観測値は、原則として河川地下における最深部の値とした。流域末端の流量は潮汐の影響を受けて1日の中でも大きく変動していたが、一潮汐の最大流量はおおよそ $1\text{m}^3/\text{s}$ であったことから、 $1\text{m}^3/\text{s}$ と定める。定量化の対象は地下水による輸送が顕著と考えられた $\text{NH}_4\text{-N}$ とする。

土地利用に基づく成分分離は人為活動に由来する成分が河川水質に及ぼす影響を評価する上で重要であるが、このためには式 (8) と (9) によって $\delta^{18}\text{O}$ の地下水成分 $\delta^{18}\text{O}_{\text{gi}}$ を水田と森林の代表値 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{R}}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{W}}$) によって表し、それぞれの寄与 (f_{R} , f_{W}) を算出すればよい。

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{g},i} = f_{\text{R}}\delta^{18}\text{O}_{\text{R}} + f_{\text{W}}\delta^{18}\text{O}_{\text{W}} \quad (8)$$

$$f_{\text{R}} + f_{\text{W}} = 1 \quad (9)$$

(2) 定量化結果

定量化結果を表-2に示す。地下水の浸透のみを考慮している St.A-I の区間で流量は4倍に増大し、 $\text{NH}_4\text{-N}$ フラックスは40倍に増大した。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の地下水成分濃度 (C_{gi}) は地点によって大きく異なったが、いずれの地点においても河川表層の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度よりも高く、陸域の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度よりも低い値となった。支流が合流する St.I-J 間の浸透量を分離すると、流量については支流から

表-2 定量化結果

採水地点	河川流量 (Q_i または Q^*)	$\text{NH}_4\text{-N}$ フラックス ($Q_i C_i$ または $Q^* C^*$)	地下水浸透量が河川流量に占める割合 (定量化精度 $q_{\text{gi}} L_i / Q_{i+1}$)		地下水成分 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度 (C_{gi})
	(m^3/s)	(mg/s)			(mg/L)
A	0.132	0.303	○	4.8E-01	0.004
B	0.255	0.843	○	1.8E-01	0.028
C	0.312	2.431	○	2.9E-02	0.102
D	0.321	3.370	○	3.7E-02	0.092
E	0.333	4.497	○	1.5E-01	0.023
F	0.393	5.849	○	1.9E-02	0.083
G	0.400	6.483	○	2.0E-01	0.035
H	0.503	10.132	×	5.1E-03	0.786
I	0.506	12.174	×	1.7E-03	(4.650)
J	0.955	26.747	—	—	—
P	1.000	33.100	—	—	—
Q	0.448	7.210	—	—	—
St.A-J の 地下水成分浸透量	$\Sigma q_{\text{gi}} L_i$ 0.38 (37.6%)	$\Sigma q_{\text{gi}} L_i C_{\text{gi}}$ 19.23 (58.1%)			

$0.45\text{m}^3/\text{s}$ 、地下水から $0.01\text{m}^3/\text{s}$ 未満の流出が生じており、 $\text{NH}_4\text{-N}$ については支流から $7.2\text{mg}/\text{s}$ 、地下水から $7.4\text{mg}/\text{s}$ の流出が生じている結果となった。St.A-J まで地下水の浸透量とそれに伴う $\text{NH}_4\text{-N}$ の輸送量を積分すると、地下水の浸透量は $0.38\text{m}^3/\text{s}$ (流域末端の流量の37.6%)、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の輸送量は $19.2\text{mg}/\text{s}$ (同58.1%) となった。

土地利用による成分分離は、地下水の $\delta^{18}\text{O}$ として用いた値は上流側では森林の $\delta^{18}\text{O}$ よりも低く、下流側では水田の $\delta^{18}\text{O}$ よりも高いケースが多く見られたため、非常にラフにならざるを得ない。しかしながら、仮に森林の $\delta^{18}\text{O}$ よりも低い $\delta^{18}\text{O}$ を示す水は森林から、水田の $\delta^{18}\text{O}$ よりも高い $\delta^{18}\text{O}$ を示す水は水田から流出しているとする、地下水成分の0.4%にすぎない水田由来成分の浸透が地下水由来 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浸透量の38.3%を占めている計算になる。この結果を表-1の土地利用面積と比較すると、単位面積当たりの地下水流出量は森林において水田の10倍程度の値となる。

(3) 考察

a) 定量化手法の適用性

精度よく定量化するためには、定量化に用いる代入値の違いが分析精度に比べて大きい必要がある。支流からの合流がない場合、 $\delta^{18}\text{O}$ の流下方向の変化は以下の式で表される。

$$\delta^{18}\text{O}_{i+1} - \delta^{18}\text{O}_i = \frac{q_{\text{gi}} L_i}{Q_{i+1}} (\delta^{18}\text{O}_{\text{gi}} - \delta^{18}\text{O}_i) \quad (10)$$

流下方向の $\delta^{18}\text{O}$ の変化を地下水の浸透によって説明するためには流下方向の $\delta^{18}\text{O}$ の変化が分析精度よりも大きい必要がある。式 (10) から、地下水浸透量が河川流量に占める割合が大きいほど、 $\delta^{18}\text{O}$ の値が地下水と表層水とで異なるほど分析に求められる精度は低くなる。図-6に定量化の適用性 (分析精度) とこれらのパラメータの関係を示す。図中の直線よりも上側では十分な精度の定量化が可能であり、下側では定量化は難しい。筆者らの実験室における $\delta^{18}\text{O}$ の分析精度をサブスタンダードの分

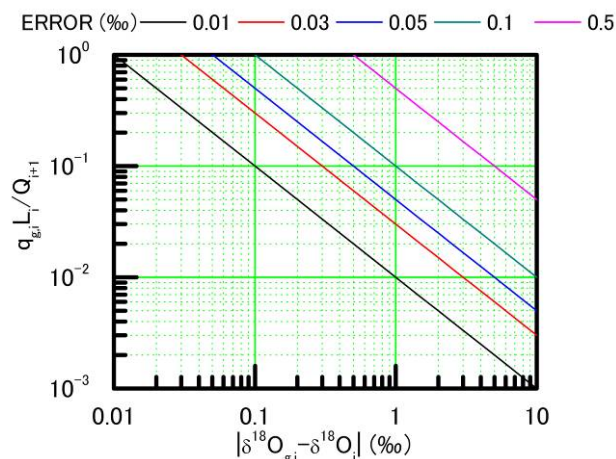


図-6 定量化手法の適用性

析結果から求めると 0.03‰であった。地下水と表層水の $\delta^{18}\text{O}$ の差は 2‰程度であったため、地下水浸透量が河川流量の $1.5\text{E-}02$ 以上であれば精度よく定量化が可能である。今回の定量結果については、St.A-G までこの条件が満たされていることから(表-2)、妥当な定量化がなされていると評価できる。ただし、より下流の地点においてはこの条件を満たさない地点もあったことと、式(4)~

(6)による成分分離は下流側の定量結果が上流側の定量結果に影響することから、下流側の計算誤差が上流側の定量結果に影響している可能性は否めない。

b) 定量結果の妥当性

本研究で用いた定量化手法は、物質の輸送は地下水の移流によって生じていることを仮定している。 $\text{NH}_4\text{-N}$ が地下水の移流のみによって輸送されるならば、計算された地下水成分 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度 (C_{gi}) は計算に用いた地下水由来 $\delta^{18}\text{O}$ と同一の水試料の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度と同程度になるはずである。しかしながら、 C_{gi} は河川地下において観測された $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度に比べて低い値を示し、計算に用いた $\delta^{18}\text{O}$ と同じ水試料の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の $1/4\sim 1/88$ 倍の値であった。これは、河川地下において堆積した土砂に含まれていた有機物の分解によって間隙水に $\text{NH}_4\text{-N}$ が蓄積される結果、実際の河川地下における $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は計算された地下水成分 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度 (C_{gi}) より高い値をとるためであると考えられる。また、この他に $\text{NH}_4\text{-N}$ 動態に影響する要因として、分子拡散や化学的・微生物学的作用が考えられる。中でも分子拡散の影響については、地下水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の縦断分布に関する観測結果(図-4(e))が $\delta^{18}\text{O}$ の縦断分布(図-4(c))と一致せず、高濃度地点を中心とする楕円型の分布を示したことから、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 動態に大きな影響を与えている可能性がある。

4. 結論

陸域における人為的な窒素投入がなされている農業流域を対象として地下水による河川への窒素流出について検討した。陸域、河川地下、河川表層の水質の比較によれば、陸域から河川地下へと陸域の地下水面の空間的広がりに応じた地下水の浸透が生じており、河川地下から河川表層へと河川の水面勾配に応じた地下水の流出が生じていることが分かった。流量、溶存物質、酸素安定同位体比の保存式に基づく定量化によって、流域末端における河川水と $\text{NH}_4\text{-N}$ の流量に占める地下水由来成分の割合は、それぞれ 37.6%, 58.1%と算定された。提案した定量化手法は地下水の流出がより顕著な淡水域においてさらに高い適用性を示すと考えられる。

謝辞: 本研究の遂行にあたり小沢聖氏をはじめとする国際農林水産業研究センター熱帯・島嶼拠点の関係者の方々、および干川明氏に施設の利用や観測の補助の援助を受けた。石垣島在住の宮城博光氏からは観測のため所有地をお借りした。心からお礼を申し上げます。本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(S)(課題番号:17106006, 研究代表者:池田駿介)の補助を受けた。

参考文献

- 1) 池田光良・三浦均也・操上広志:地下水温による北海道美々川周辺の地下水流動解析,応用地質, Vol.40, No.2, pp.70-85, 1999
- 2) 近藤洋正・田瀬則雄・平田健正:沖縄県宮古島における地下水中の硝酸性窒素の窒素安定同位体比について,地下水学会誌, Vol.39, No.1, pp.1-15, 1997
- 3) 赤松良久・池田駿介:マングローブ水域における物質循環,土木学会論文集, No.768/II-68, pp.193-208, 2004.8
- 4) Yusuke Uchiyama, Kazuo Nadaoka, Peter Rolke, Kumiko Adachi, Hiroshi Yagi: Submarine groundwater discharge into the sea and associated nutrient transport in a sandy beach, WATER RESOURCES RESEARCH, Vol.36, No.6, pp.1467-1479, 2000.6
- 5) 一柳錦平・加藤喜久雄: $\delta^{18}\text{O}$ をトレーサーとした流出成分の分離,水文・水資源学会誌, Vol.11, No.3, pp.260-265, 1998
- 6) Tomas Vitvar, Werner Balderer: Estimation of mean water residence times and runoff generation by ^{18}O measurements in a Pre-Alpine catchment (Rietholzbad, Eastern Switzerland), Applied Geochemistry, Vol. 12, pp.787-796, 1997
- 7) R. Aravena, M.L. Evans, J.A. Cherry: Stable Isotopes of Oxygen and Nitrogen in Source Identification of Nitrate from Septic Systems, GROUND WATER, Vol. 31, No.2, pp.180-186, 1993
- 8) Yû Umezawa, Toshihiro Miyajima, Masumi Yamamuro, Hajime Kayanne, Isao Koike: Fine-scale mapping of land-derived nitrogen in coral reefs by $\delta^{15}\text{N}$ in macroalgae, Limnol. Oceanogr., Vol.47, No.5, pp.1405-1416, 2002
- 9) 中嶋洋平・池田駿介・赤松良久・宮本泰章・山口悟司・戸田祐嗣:石垣島名蔵川における土砂・栄養塩の流出に関する現地観測,土木学会論文集, No.747/II-65, pp.173-185, 2003.11
- 10) 酒井均・松葉谷治:安定同位体比の測定法,日本化学界編,新実験化学講座, Vol.10, pp.471-510
- 11) 東田盛善・隈田昌良・佐竹洋:石垣島の降水の水素・酸素同位体組成および化学組成の特徴,地球科学, Vol.40, pp.111-123, 2006

(2009. 9. 30 受付)