

黄河デルタにおける物質輸送過程

小野寺真一（広島大）、齋藤光代（広島大・院）、
石飛智稔、谷口真人（地球研）、宮岡邦任（三重大）、陳建耀（中山大）

1. はじめに

5年間を通して、デルタ地下水の水質形成と物質輸送を明らかにするとともに、海洋の栄養塩供給過程について明らかにし、断流の影響を議論することを目的とした。ここでは、その一部として栄養塩輸送過程の概要を紹介する。

2. 地下水中の窒素濃度

図1に、黄河デルタにおける観測を行った観測井の分布を示す。ここでは、図1に示す各井戸において地下水を深度別に採水し、多項目水質計 (SONDE model 6600; YSI ナノテック社) を用いて地下水の水温、EC、DO、pHの鉛直プロファイルを測定した。また、採水した試料水は実験室に持ち帰り HCO_3^- 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 SiO_2 、DOC、DN濃度の定量分析を行った。

図2に、黄河デルタの北部と南部における地下水中の窒素蓄積量の分布を示す。ここでは、地下水を地表から深度20mまでとして積算した。多いところでは、1haあたり3000kgにもなるのに対して、少ないところでは、400kg以下である。主に、農地では綿花やとうもろこしが栽培されており、綿花の場合1年間で1haあたり200kg程度、とうもろこしの場合（小麦とセットで）500kg程度の肥料が散布されている (Wang et al.,

2006)。3000kg蓄積されているところでは、綿花の場合で15年分、とうもろこしの場合で6年分の蓄積量ということになり、綿花の場合ではほぼ農地化されて以来の窒素肥料が作物に吸収されることなくすべて蓄積していることになる。黄河に近い地域で蓄積量が多く、沿岸に近い地域で蓄積量が少ない傾向を示す。これは、地下水に負荷された溶存窒素の一部が、地下水中で消失している可能性を示すものである。

黄河デルタ地域においては、地下水は、概ね黄河から渤海湾の方向へ流動している。図3に、地下水の硝酸性窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 濃度と窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) との関係を示す。デルタの扇頂～扇中部の地下水涵養域に分布する井戸と比較して、デルタ扇端部の地下水流出域に分布する井戸においては、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が低く、 $\delta^{15}\text{N}$ 値が高い傾向

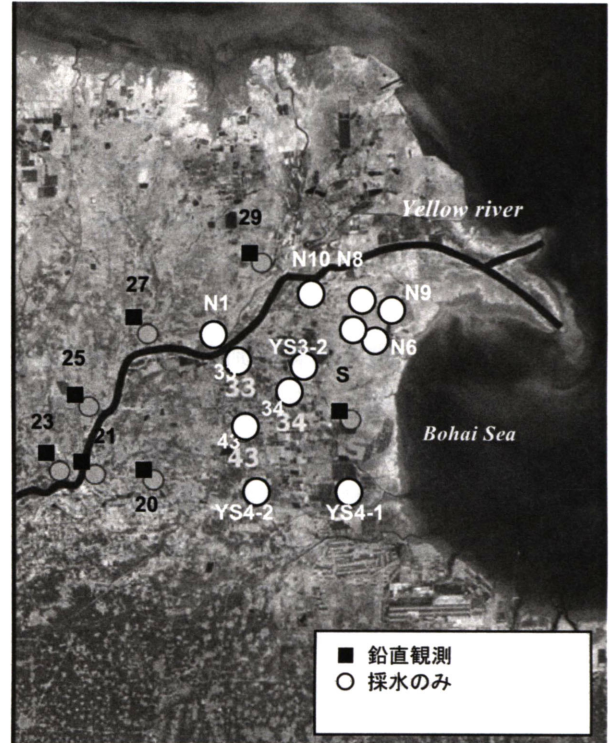


図1 黄河デルタにおける観測井分布

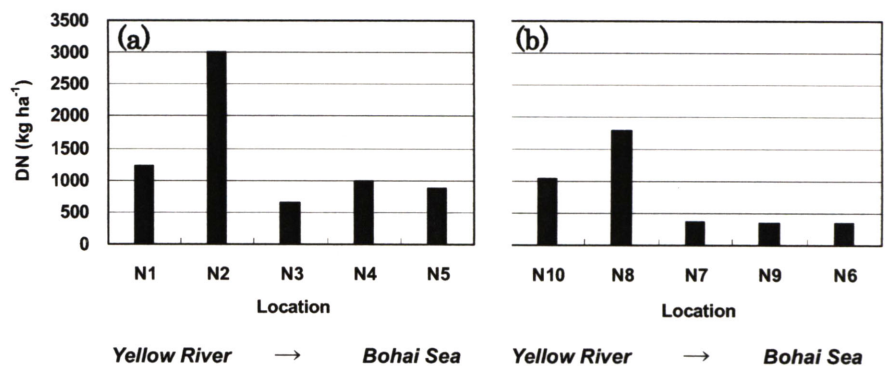


図2 黄河デルタ(a)北部、(b)南部における地下水中の溶存窒素蓄積量

を示す。一般的に、脱窒反応が起こる場合、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は減少する一方で、 $\delta^{15}\text{N}$ 値は増加する。また、有機物由来の高い窒素同位体比でも20‰程度であるのに対して、流出域の同位体比が35‰にまで達している。以上の点を考慮すれば、黄河デルタの流出域では、地下水流動にともない脱窒作用による $\text{NO}_3\text{-N}$ の減衰が起こっていることが示唆される。

地下水中における脱窒作用の有無を確認するため、地下水流出域に位置する井戸 (N6) において、原位置脱窒実験を行なった。井戸孔内にDN濃度の高い水を注入し、濃度の時間変化を確認した。実験の結果、Cl濃度は注入直後の濃度の約7%に減少したのに対し、DN濃度は約0.5%にまで減少した。すなわち、地下水流出域において、希釈のみではなく、脱窒作用による $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の減衰が起こっている可能性が高いことが明らかになった。脱窒速度は、1時間あたり全窒素の30%以上になると見積もられた。以上の原位置実験の結果も、黄河デルタの地下水において、脱窒が優先的に生じることを指示した。すなわち、散布された肥料由来の溶存窒素は、地下水流動にともなって海洋まで流出する可能性が低いことを示唆した。

これらの結果を踏まえた黄河デルタにおける地下水流動、物質輸送概念モデルを図4に示す。

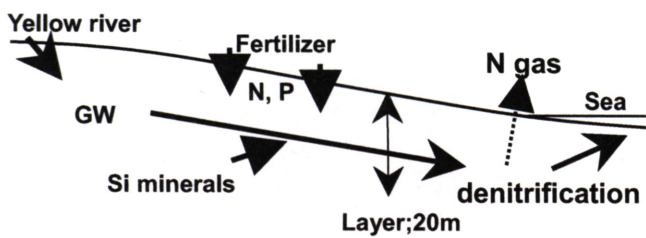


図4 黄河デルタの地下水流動・物質輸送概念モデル

3. 地下水流出にともなう栄養塩流出

黄河デルタにおける地下水流動量は、これまでの調査結果から、デルタ形成過程にともなう不均一性は存在するものの、浅層地下水に限れば、河川から涵養されていること、またその後地形勾配に依存する方向で、海に向けてデルタを放射状に流動することが、明らかになっている。そこで、下記のような仮定のもとに地下水流動量を推定し、各地下水中の栄養塩濃度を考慮し栄養塩流出量を見積もった。

まず、地下水流動はマトリックス中の流動を仮定し、

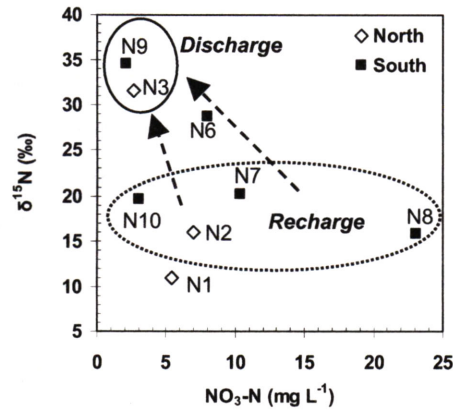


図3 地下水の硝酸性窒素濃度と $\delta^{15}\text{N}$ との関係



図5 黄河デルタの地下水流動と計算領域

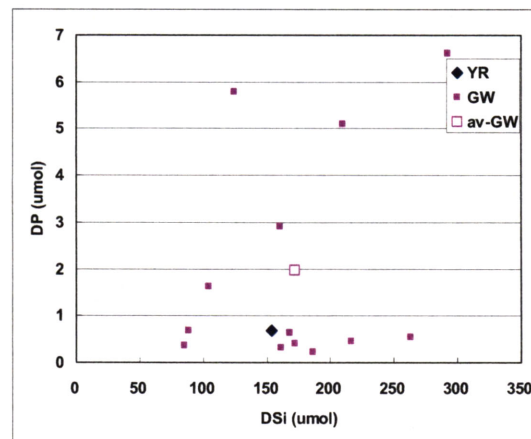


図6 黄河デルタの地下水・河川中の溶存シリカ・溶存リン濃度

ダルシー式 (Freeze and Cherry, 1978) によって見積もる。対象とする帯水層のスケールは 20m と仮定した。この場合の動水勾配は、地形勾配で与え、特に、海洋に近い沿岸部でのものを使用した。5km の側線における簡易測定の結果、最大で 0.001 となっていたので、その値を採用した。また、飽和透水係数は、100cc スケールでは $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{ cm s}^{-1}$ (Liu, 2004) であったが、帯水層スケールでは、一般に割れ目などの不均一な粗大間隙の影響でその値より大きいといわれている (Freeze and Cherry, 1978) ので、ここでは、未固結の砂層ということを考慮し $10^{-1} \sim 10^{-2} \text{ cm s}^{-1}$ と仮定した。また、流動断面は、海洋に出て行く部分、すなわち海岸線の長さ (170km ; 図 5 中の点線で囲まれた範囲) に帯水層の厚さを加味したものとした。

計算の結果、海洋に流出する地下水流動量は $4.4 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ となり、河川流量の $9 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ (Mie, 2005) の 5% と見積もられた。

さらに、濃度 (図 6) を加味して見積もった地下水を經由した栄養塩流出量と河川を經由した栄養塩流出量の比は、次の通りである。DN (溶存窒素) 濃度の比は、河川と地下水で 2 : 1 であり、結果として窒素流出量は 100 : 2.4 である。Si 濃度の比は、1 : 11.9 であり、シリカ流出量は 10 : 6 である。リン濃度は、1 : 10 であり、リン流出量は 10 : 5 である。すなわち、窒素が極めて地下水由来が少ないのに対して、リンやシリカは地下水由来が河川とほぼ同等であることが明らかになった。

(2) 地下水浸出域における栄養塩動態

地下水が実際に浸出する場において、浸出水の化学組成を明らかにするため、観測井及びピエゾメータの沖合いに当たる A ライン及び B ラインで調査を行った (図 7)。2005 年の調査では、シーページメータの設置とともにピエゾメータの設置を行い、地下の間隙水の採水を試みたが、海岸線から 2km 程度の範囲であったため、十分ではなかった。そのため、2006 年の調査では、沖合い 7km まで側線を延ばして、調査を試みた。調査では、海岸から 1km ごとに 7km 沖まで海水、間隙水の採水を行なった。間隙水の採水は、パイプ (径 3cm) を海底から深度 50cm まで埋め込みながら、10cm、30cm、50cm で採水を行なった。

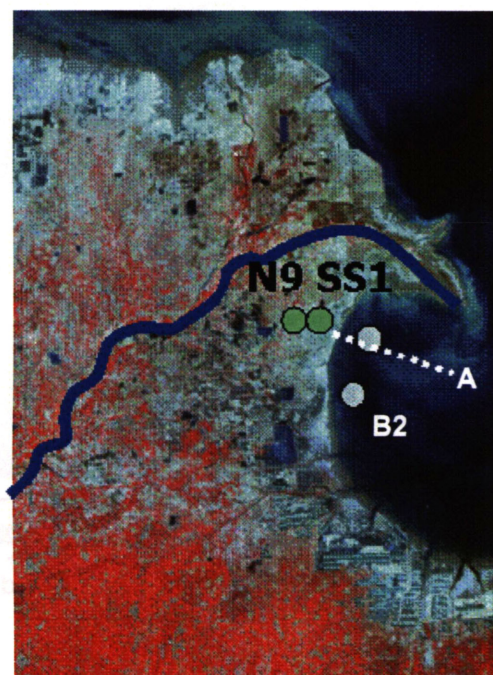


図 7 黄河デルタ沖合い調査地点 A, B

*N9: 沿岸観測井, SS1: 沿岸ピエゾメータ

今回は、水圧の測定を行なう時間がなかったため、動水勾配を求めることはできなかった。採水した試料は、分光法により栄養塩類を分析した。

図 8 に海岸線から 7km 地点までの海水及び海底間隙水の塩分濃度分布を示す。間隙水の塩分濃度が、海水の値に比べて低い 1km、3km 地点では、地下水の湧出が示唆される。しかし、それ以外の地点では、海水と同様かそれよ

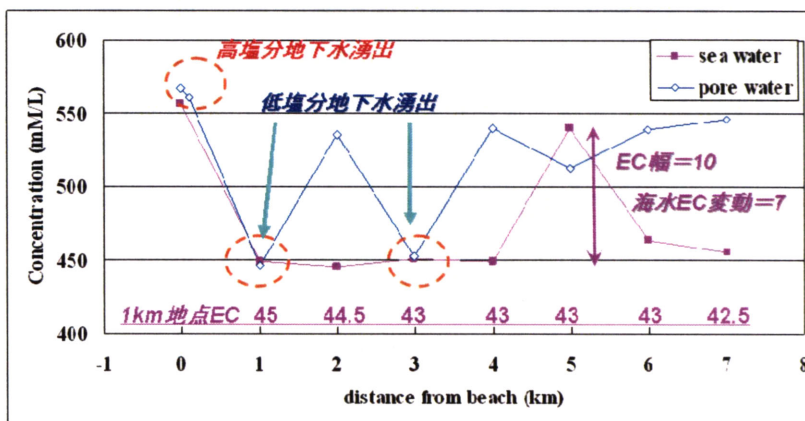


図 8 黄河デルタ沖合 (A ライン) における電気伝導度の分布

り高い値を示し、明瞭な地下水湧出の傾向が示されなかった。ただし、海岸線付近では、明らかに海水よりも高い値を示し、陸域で濃縮された高濃度の塩分を含む地下水が湧出していることが示唆された。

続いて、図9に海岸線から7km地点までの海水及び海底間隙水の溶存窒素(DN)濃度分布を示す。図10に、シリカ濃度の分布をそれぞれ示す。DN濃度の場合、間隙水中の濃度が0km、1-3km、6-7kmの範囲が海水よりも高く、地下からの窒素の供給を示唆した。また、シリカ濃度の場合、0km、1-3km、6-7kmの範囲で供給を示唆した。結果として、3つの栄養塩類の供給を示した地点は比較的似かよっていた。ただし、これらは、地下水によって陸域から輸送されてきたものとみるのは問題である。すなわち、図7でみられるように、地下水の湧出の可能性があるエリアは、1km及び3km地点であるため、この地点以外では、別な過程(再生産)によって、生じたと考えることが出来る。

現状は、地下水湧出域が狭く、一方で、海底における再生産が多いことが特徴である。しかし、このあたりは、河川が運んできた懸濁物質が堆積しているエリアであり、これらが栄養分を含んでいることが予想され、これらからの供給もありうる。ただし、シーページ(石飛, 2007)による結果は、3km付近で淡水流出量が最大になっていて、その点では本結果と一致している。しかし、0km、2km、4km、6-7kmにおいて、海水のEC以上になっている点では、隣接して計測されたシーページメータの結果と一致しなかった。

これに対して、窒素濃度の深度プロファイルの測定結果を図11に示す。図は0kmから7km地点まで示す。図から明らかなように、深部ほど濃度が高い。特に、2km、6km、7kmがその傾向が強い。2km地

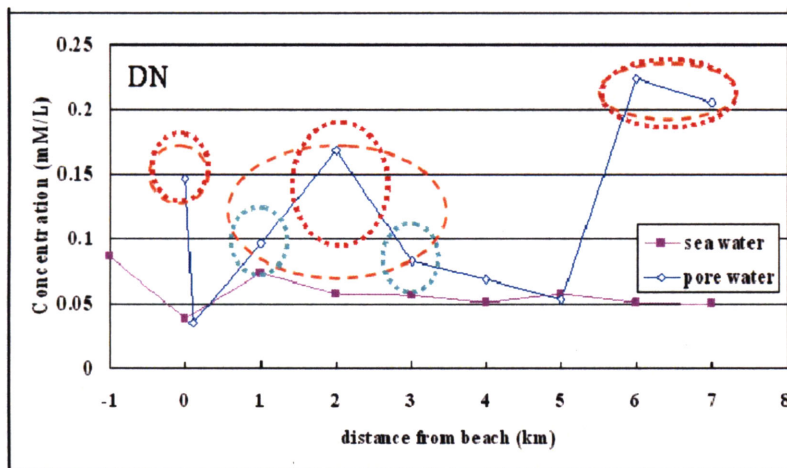


図9 海岸線から7km地点までの海水及び海底間隙水の溶存窒素(DN)濃度分布。

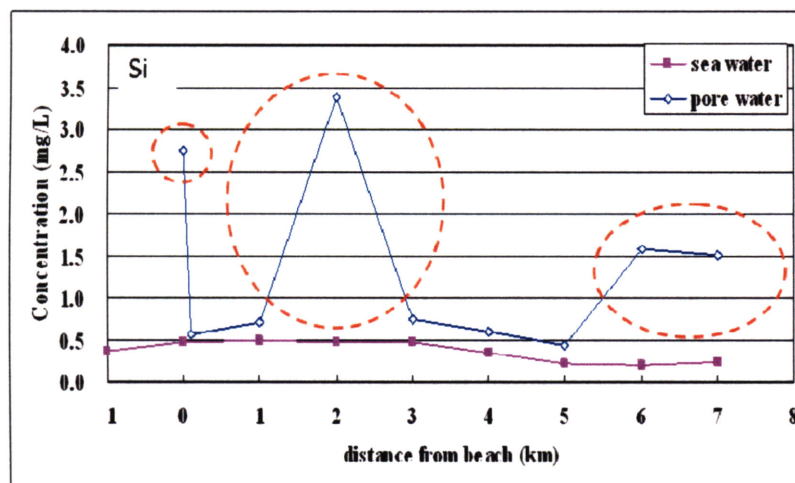


図10 海岸線から7km地点までの海水及び海底間隙水の溶存珪素(Dsi)濃度分布。

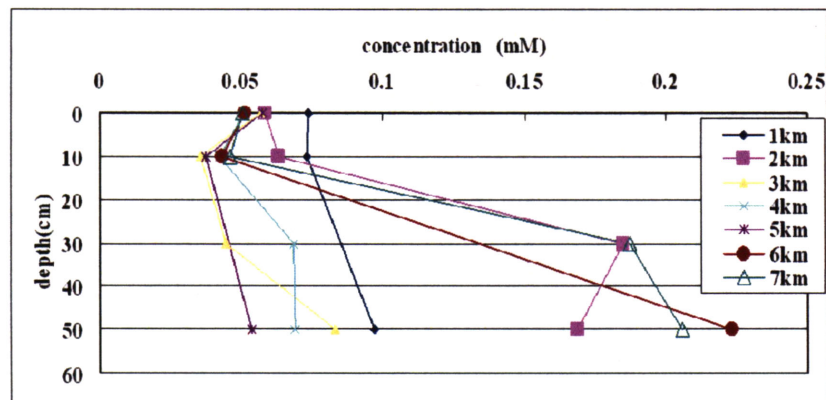


図11 海岸線から7km地点までの海水及び海底間隙水中の溶存窒素濃度プロファイル

点では地下水流出が想定されていたので、陸域からの可能性があるが、それ以外の地点では、一旦表層で生成した溶存窒素が、海水の再循環の過程で地下に移動していることが示唆される。

また、栄養塩流出に関しては、陸域地下水のダイレクトな流出が濃度の点で重要であるが、前述したように、地形勾配が小さいため、河川流量に比べるとさほど大きな流出量にはならない。しかし、河川流出の激減した断流の時代には、そこまで劇的に変化していなかったと考えられる地下水流出の果たした役割は少なくなかったであろう。さらに、現在は、養殖や製塩などの沿岸域での活発な人間活動により、人工的な海水再循環が生じていて栄養塩流出に大きく貢献している可能性がある。一方で、沿岸には、深度 20m より深部にも帯水層が存在している。しかも、電気伝導度が低く (5mS/cm)、一方で栄養塩濃度の高い帯水層である (YS4-1 の深度 30m)。しかし、この深度 30m の地下水の年代は、1 万年以上前で、ほとんど動いてないことが確認されていて、現在の栄養塩流出への寄与は期待できない。このように地形勾配の緩い地下水ゆえに、最終氷期以降、海水面が回復した際に流出が阻害されてしまった化石地下水が深部には存在しているのも大きな特徴であろう。