

黄河デルタ地下水の海洋への物質負荷

小野寺真一（広島大学総合科学部），谷口真人（総合地球環境学研究所），宮岡邦任（三重大学），齋藤光代（広島大学大学院），石飛智稔（総合地球環境学研究所），陳建耀（中山大学）

1. はじめに

陸域からの物質輸送は、沿岸海洋環境に大きな影響を及ぼすため、従来から多くの研究が行われてきた（Burt et al., 1993；福岡，2004 など）。近年、世界の大河流域における水・物質収支にもとづき、地下水による海洋への物質輸送の重要性が指摘されてきた（Zektser and Loaiciga, 1993；Burnett et al., 2001 など）。ただし、世界の大河川の一つである黄河は、上・中流域における最近 20 年間の過剰な水利用にともない、下流域で断流が生じていることが報告されている（陳ら，2004）。このことは、河口デルタ地域における地下水および海洋に対して、大きな影響を及ぼしていると想定されるが、その現状は解明されていない。これらを解明していくために、総合地球環境学研究所の福島を代表とする国際共同研究（Fukushima, 2003；

Taniguchi, 2003）が 2003 年から始まった。

本研究では、黄河デルタ地域における地下水の物質輸送について、地球化学的なデータと水理学的な情報を基に、評価することを目的とした。



図1 調査地域

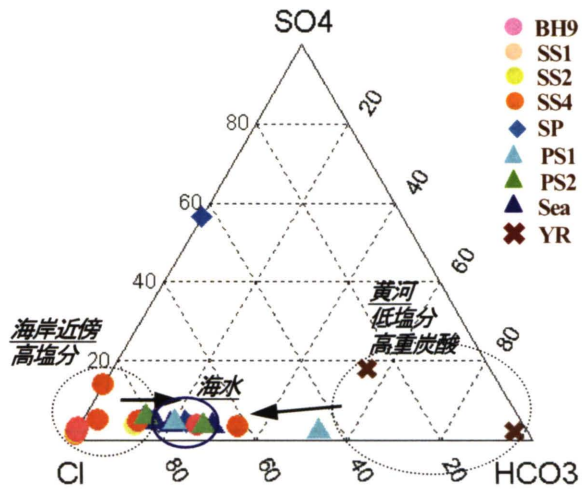


図2 地球化学特性；陰イオン組成

2. 研究方法

黄河河口域において、ピエゾメータ（SS 地点他）及び既存の井戸（BH9 他）から地下水を採水し、ピエゾメータ及びシーページメータ（A 地点、B 地点）から海底地下水を採水した（図1）。採水時期は、2003 年 9 月、2004 年 5 月と 9 月、2005 年 5 月の計 4 回である。海底地下水については、後半 2 回の採水のみである。なお、5 月は乾季で低水流量時期であり、9 月は雨季で高水流量時期である。

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-} はイオンクロマトグラフィで、 SiO_2 、及び主要塩基は ICP 発光分析器で、DOC、DN 濃度は TOC 分析器で、P は分光光度法で定量分析を行った。

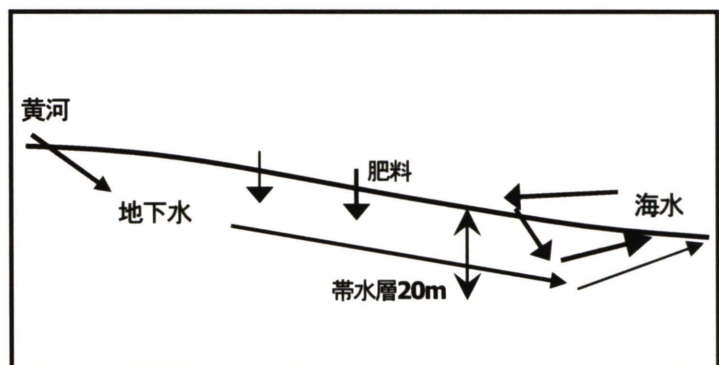


図3 地下水流動の概念

3. デルタ地域の地下水流動と地球化学特性

河川近傍、海岸近傍のピエゾメータの水圧分布は、それぞれ河川から周辺地下水、デルタ地下水から海洋への地下水流動を示した。ただし、地球化学特性

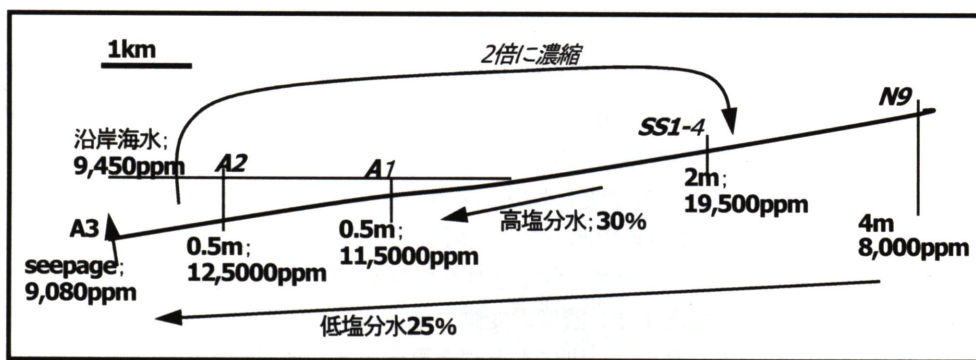


図4 沿岸付近における塩分 (Cl 濃度) 分布と海洋への地下水流出率 (2004 年 9 月)

(図2) は、河川から地下水、地下水

から海洋への一連の濃度上昇傾向という傾向を示していない(齋藤ら, 2006)。河川近傍では河川水の影響を受けて低濃度であり、河川から地下水への涵養が活発に起きていることが示された。一方、沿岸域地下水では、海水の影響を受けていることが示された。特に、一部では、海水中の塩分濃度の5倍にも達する地下水も確認された。これは、単なる蒸発濃縮過程ではなく、堆積物との相互作用もあることが示唆された。

このように、デルタ地下水に関する物質循環には、窒素の農地での選択的な供給、不均一な塩分の淡水への置き換わり、沿岸域における養殖池などからの塩水の再涵養(図4)などの影響を受けるため、複雑な傾向を示すものと考えられる(図3)。また、肥料起源の栄養塩は、流出域まで到達していない傾向を示した(齋藤ら, 2006)。

4. 海底地下水湧出

海洋への地下水による物質負荷に関しては、主に黄河起源の地下水と海水起源の人為的再循環水との混合した沿岸地下水がそれぞれ流出していると考えられる。海底地下水湧出に関わる水として、A1,A2,A3の各3地点でピエゾメータまたはシーページメータから採水された。2004年9月に採水されたそれぞれの水の塩素イオン濃度は、A1,A2地点では海水中の濃度より高く、A3地点では海水中の濃度より低かった。これは、より沿岸では高塩分の沿岸地下水が、より沖では低塩分の黄河起源地下水が流出していることを意味する。

ここで、各海底地下水湧出水に関して、塩素イオン濃度(図4)を基に地下水流出と潮間帯付近で浸透した海水の再循環水を分離する。その結果、A1,A2地点では、高塩分地下水が30%程度海底地下水湧出に寄与し、残りは潮間帯において海水が浸透し再流出したものである。一方、A3地点では、低塩分地下水が25%程度流出に寄与していることを示した。すなわち、沖に行くほど潮間帯で浸透し再流出する海水の割合が

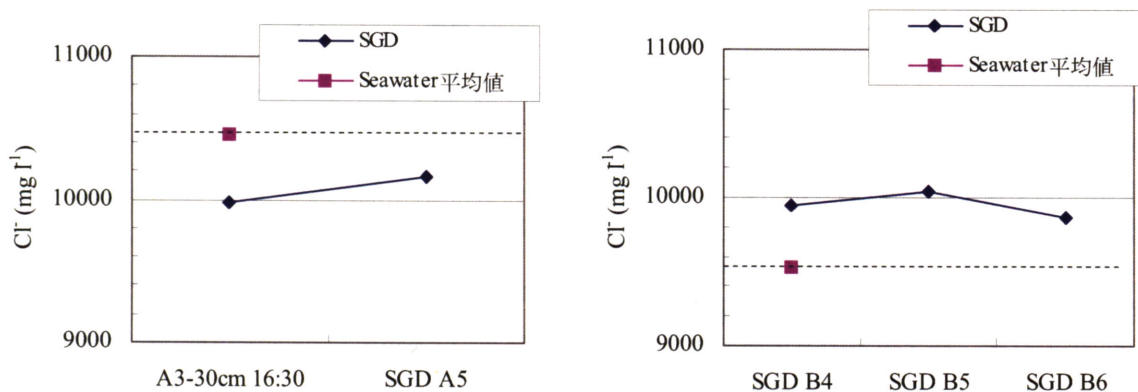


図5 潮間帯地下水の塩分 (Cl 濃度) 分布. 地点名の数字が大きいほど沖 (2005 年 5 月)

増加する傾向を示した。

図5は、2005年5月にA地点及びB地点周辺において採水した海水の塩素イオン濃度の平均値と潮間帯地下水の塩素イオン濃度を示したものである。この時期、潮間帯地下水の塩素イオン濃度は、地点による差は大きくない。一方で、海水は地点による差が大きい傾向を示す。すなわち、この時期、2004年9月(図4)でみられたような、A地点の沿岸と沖合いにおける地下水の塩素イオン濃度の差はみられなくなっている。これは、5月期に河川流量の減少にともなって、黄河起源の地下水の動水勾配が小さくなり、9月期には沖合いに湧出していた低塩分地下水が、湧出できなくなっている可能性が示唆される。ただし、海岸線の位置が、9月期にはA1付近であったのに対して、5月期にはA3付近になっており、また、海水の塩素イオン濃度も高くなっているため、高塩分地下水の流出を考慮しなくても地下水流出を説明できる。今後、海岸線の変化、海水の塩素イオン濃度の変動、地下水中の濃度分布を考慮した評価が必要である。

また湧出量について、ダルシー則にもとづき算出する。黄河起源の地下水流出量は、動水勾配がデルタの勾配(0.001)に一致し、滞水層の厚さが20m、飽和透水係数が 10^1 cm s^{-1} とすれば、 $2 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ となる。また、再循環水の流出量は、沿岸部のピエゾメータより観測された動水勾配が0.002、滞水層の厚さが4mとすれば、 $0.8 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ となる。2つの合計で、 $3 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ となる。また、黄河の利津付近から放射状にデルタを地下水が流動しているものとして、扇状の末端である海岸線の距離を170kmとして積分すると、地下水流出量は $4.4 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ と見積もられた。Mi (2006)によれば、2005年5月の河川流出量が $9 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ であることから、地下水流出量は、河川の5%程度であることが明らかになった。これは、従来の研究(Zektser and Loaiciga, 1993; Burnett et al., 2001など)の大河川流域の結果とほぼ同等である。

表1 河川、地下水、海水の各栄養塩濃度

	Si	P	N
河川;	0.11	0.0024	0.51
BH9 地下水;	1.38	0.028*	0.25
A3 海底地下水 0.3m;	1.33		0.30
A5 SGD;	1.30		0.20
海水 A5;	1.20	0.001**	0.13

*N5 地下水を使用、**海班No.3 地点の値
***濃度の単位:(mmol L^{-1})

5. 栄養塩流出

前述の地下水流出量と栄養塩濃度との積から、栄養塩流出量を見積もる。それぞれの地下水及び河川の栄養塩濃度(2005年5月)は、表1の通りである。地下水中の濃度は、窒素が河川に比べて低いのに対して、リンやシリカは河川の濃度より1オーダー以上高い。

栄養塩流出量を見積もった結果を、表2に示す。河川流出量を100とした値で表している。溶存窒素に関しては、地下水流出の寄与は河川のわずかに2%に過ぎない。これは、農業起源の窒素が海岸までたどり着いていないことなども影響していると考えられる。しかし、リンやシリカに関しては、河川流出量に匹敵する流出量が見積もられた。これらの成分の海洋へのインプットとして、地下水流出が重要であることを、改めて示した。今後は、季節変化などの要素も含めて評価していくことが必要である。

また、地下水(BH9)と海水(A5)の混合で海底地下水が形成されていて、その混合比が前述のよ

表2 水の流出及び栄養塩(溶存窒素、溶存シリカ、全リン)流出量

	river	groundwater
Flow	100	5
DTN 濃度	100	50
流出量	100	2.4
DSi 濃度	100	1190
流出量	100	60
TP 濃度	100	1000
流出量	100	50

* 河川を100とした指標で表す

うに3:7であるとする、海底地下水 (A5) の濃度は計算によって見積もることができる。溶存窒素及びシリカについて見積もった結果を表3に示す。それぞれ、溶存シリカが1.29、溶存窒素が0.25となる。実測値は、それぞれ1.30、0.20であり、溶存シリカは実測値の方が高く、溶存窒素は実測値の方が低い。これは、溶存シリカが、潮間帯で海水が海底地下水に浸入し混合したときに溶出していることを意味する。すなわち、わずかではあるが、海水の再循環にもなって栄養塩を流出していることになる。この点に関して、今後より高い精度で評価していくことが必要である。一方で、溶存窒素は、地下水が海底にたどり着く前に、一部消失していることを意味する。すなわち、脱窒などの影響であろうと考えられる。

結果として、栄養塩のバランスは、河川が窒素流出に主に寄与し、地下水がリン流出及びシリカ流出に寄与していることが確認できた。もし、断流によって地下水流出成分が減少すれば、海洋の栄養塩バランスも、シリカやリンの減少という形へ、大きく変化していたと考えられる。

引用文献

- Fukushima (2003) 黄河プロジェクトニュースレター
- Mi (2006) 黄河河川調査報告書
- 齋藤ら (2006) 黄河プロジェクト論文集
- Taniguchi (2003) 黄河プロジェクトニュースレター

表3 海底地下水の実測栄養塩濃度と推定濃度
(地下水と海水の混合のみを考慮して算出)

	実測地	計算値
N	0.20	0.25
Si	1.30	1.29

* 濃度の単位;(mmol L⁻¹)

**リンは海底地下水の計測値がない