

黄河P地下水班の成果と残された課題

谷口真人(総合地球環境学研究所)

1. はじめに

黄河プロジェクトのデルタ地下水班の役割は、黄河流域の最下流にあるデルタ地域における水と物質の移動を、“黄河断流”および“渤海湾への影響”の観点から明らかにすることにある。2003年から2006年にかけて計5回の集中的な観測(内3回は渤海調査班と合同観測)を行い、モニタリングシステムによる地下水連続測定、利津での河川水調査・分析(中国側に依頼)、沿岸・河口での調査(フロリダ州立大学との共同)とあわせて、解析を行った。最終年度を迎える黄河プロジェクトのデルタ班としての総括と成果の取りまとめ、および残された課題を検討した。

2. デルタ内での地下水動態

黄河デルタの地下水の動態を明らかにするために、地下水流動、帯水層構造、塩水・淡水分布などの解明を主な目的とした調査解析を行った。コアボーリングによる水理・水文地質調査、比抵抗による塩水・淡水分布調査、地下水ポテンシャル調査などを行った結果、平坦地であるデルタにおける地下水ポテンシャルを詳細に明らかにする手法として、GPSを用いた広域地下水調査の有効性を確認することができた。また、その結果得られた地下水ポテンシャルと、比抵抗測定による塩水・淡水分布、コアボーリング結果により、デルタ域における地下水の動態を明らかにすることができた(図1)。流量が比較的多い時期(通常期)と流量の少ない時期(断流時想定)における地下水流動の違いを明らかにした。

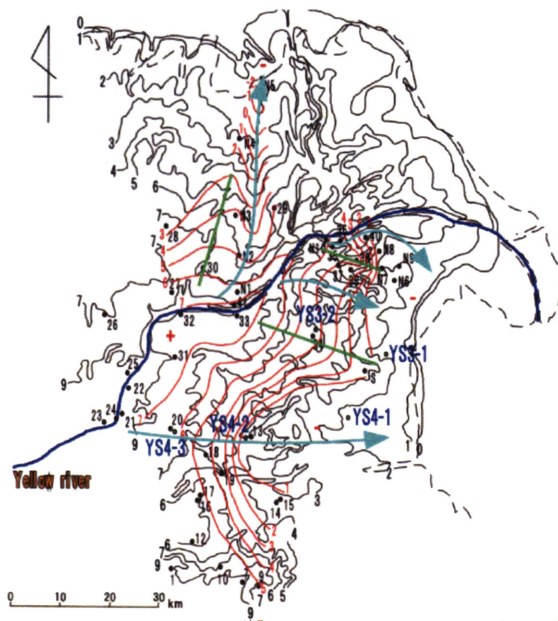


図1：地下水流動状況
(通常期、2004年9月)

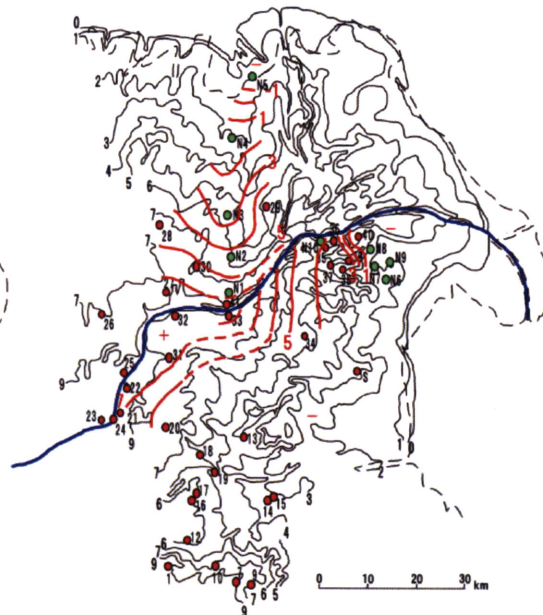


図2：地下水流動状況
(断流時想定、2005年5月)

流量の少ない時期(断流時想定)には、動水勾配が小さくなるものの、河川流量が減少することから、地下水流出の役割が相対的に大きくなることが明らかになった。

3. 河川水・地下水・海水相互作用

黄河流域デルタ地域は、河川水・地下水・海水が接する地域であり、黄河断流がデルタ地域の環境に与える影響を明らかにする上で、3者の流動方向、大きさなどを明らかにすることが重要である。これまでの調査の結果、黄河河川水から地下水への水の流動、黄河デルタから渤海への地下水流出が認められた(図3)。また、黄河—地下水—渤海の連続測線による地下水の水質分布(図4)から、淡水(黄河河川水起源)と海水(渤海起源)の置換の様子が明らかになった。

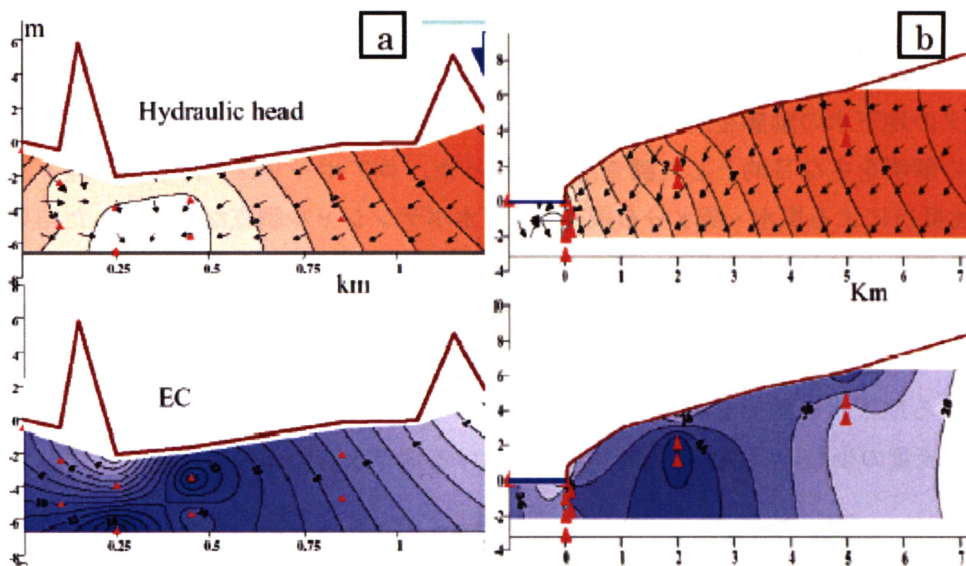


図3：地下水流動方向

上図：地下水ポテンシャルと地下水流動方向、下図：地下水電気伝導度

左図：河川—地下水境界(右が黄河)、右図：地下水—海水境界(左が渤海湾)

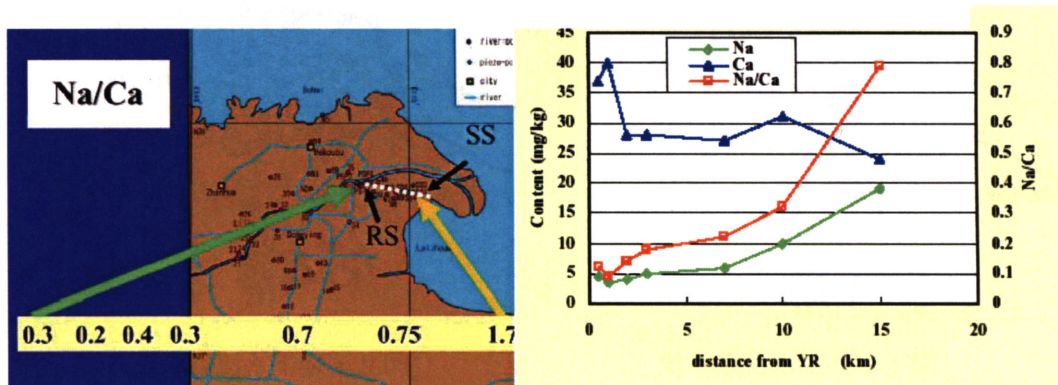


図4：黄河(RS)－渤海(SS)間の地下水水質(Na, Cl)分布

4. 黄河影響圏

新たに設けたモニタリング用観測井を用いた地下水連続測定により、黄河河川水と周辺地下水の連続性の解析から、黄河下流域の **impact zone** が少なくとも両岸 40km に及んでいることが水理的・水質的連続性から明らかになった(図 5)。このことは、地形学的流域界を超える水と物質の移動を示しており、海への地下水流出もふくめて、下流域におけるトランスバウンダリー現象として一般化できる概念である。

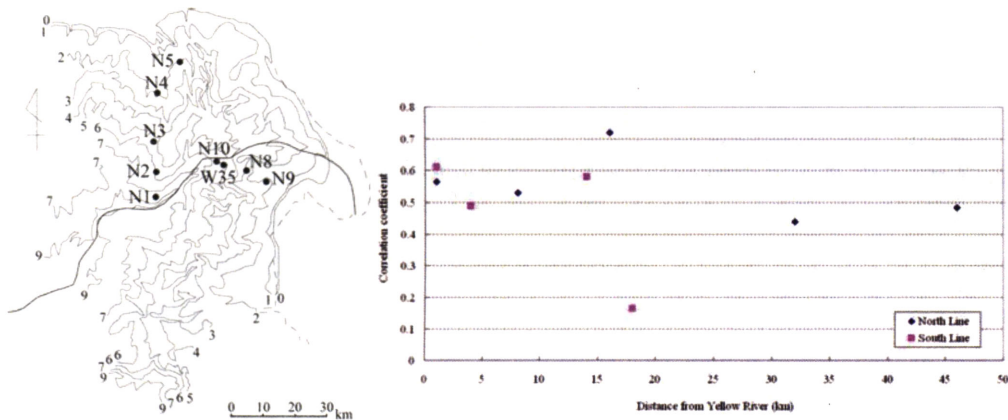


図 5：黄河河川流量変動と各井戸内地下水位変動との相関係数

また、デルタを含んだ黄河下流域（花園口より下流部）の水収支解析により、花園口—利津(デルタ内)間の水損失 128 億トン/年は、灌漑水で約 6 割が消費され、天津や青島へ約 2 割が越境水として輸送されていることが明らかになった。

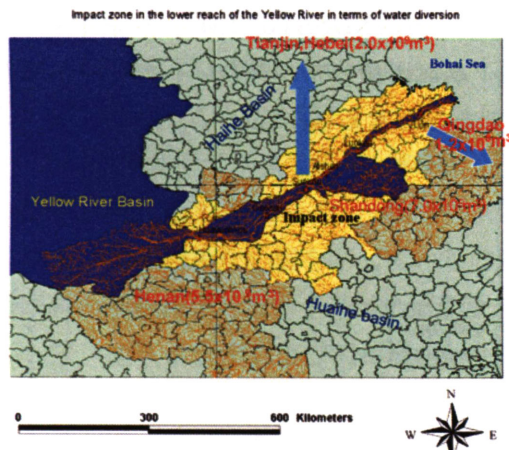


図 6：黄河下流域の灌漑地と越境水

表 1：黄河下流域（花園口—利津）における水収支

黄河下流域水収支 (128億t/y)	
(1) 灌漑 (その後蒸発+地下水)	371mm = 74億t 灌漑面積(2x10 ⁶ ha)→ 全体の6割
(2) 黄河川面からの蒸発	1km(幅)x780km(長さ)x 1400 mm = 11億t
(3) 飲料水(黄河下流域:2500万人)	50t/人/年 x 2500万人 = 12億t
(4) 流域を越えた水輸送	22億t
Hebei Province, Tianjin City :20億t	
Qingdao 2億t	

5. デルタ域から渤海への水・物質輸送

研究期間中計 4 回にわたり、渤海への沿岸地下水流出状況の調査を行った。この調査は、黄河断流時の想定も含めて、流量の異なる時期を選定して行われた。2004年9月（通常流量）のデルタ沿岸域での地下水流出量調査と利津での黄河河川流量との比較から、デ

ルタから渤海湾への地下水流出量は河川流出量の3-8%であることが明らかになった(河川水:地下水=15:1、図5、図6)。一方、2005年5月(河川流量が2004年9月の5分の1)の調査では、渤海への地下水流出量自体は2004年9月(通常流量)の3分の2と少ないものの、河川水と地下水との割合は3:1程度と地下水流出の重要性が増すことが明らかになった。つまり河川流出と地下水流出の渤海への影響については、断流時には地下水の寄与率が通常時よりも大きくなるといえる。

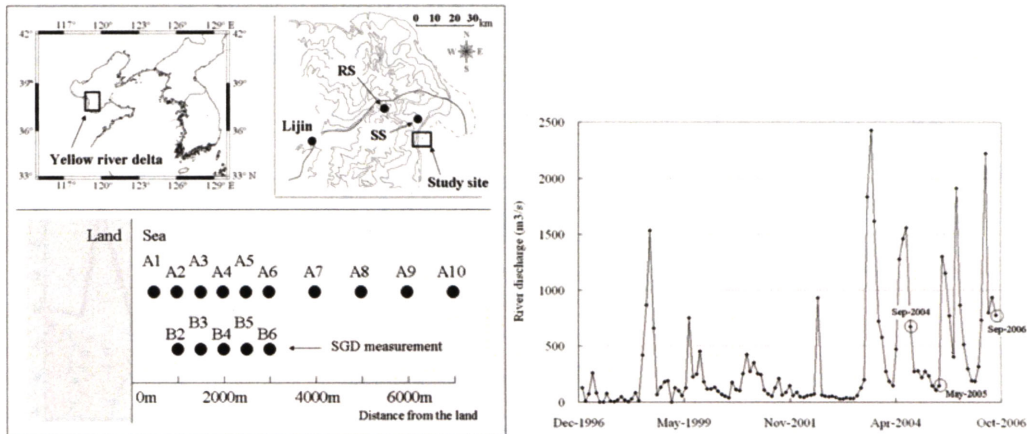
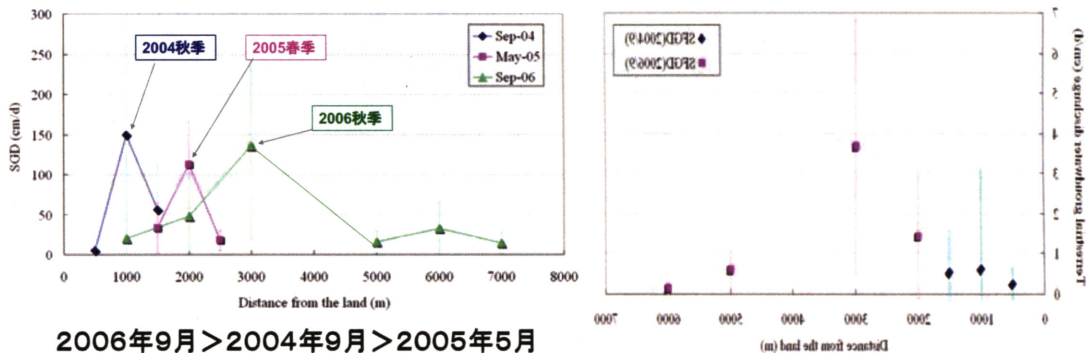


図7：シーページメータの設置位置(左)と黄河流量変化(右)

自動シーページメータを用いて測定した地下水流出量(SGD)と、分離した淡水成分(SFGD)の分布の経年変化を検討した結果、両者ともピークが沖合いに2年間で約2 km移動した様子が明らかになった。これはLANDSAT data (LANDSAT5, TM sensor, FASTB)により解析した海岸線の移動と一致しており、地下水流出量分布の沖合いへのシフトは、この堆積物による海岸線の沖合いへの移動が原因であると考えられる。

地下水湧出量測定結果(経年変化)



2006年9月 > 2004年9月 > 2005年5月

図8：全地下水湧出量の分布(左)と淡水地下水湧出量の分布(右)

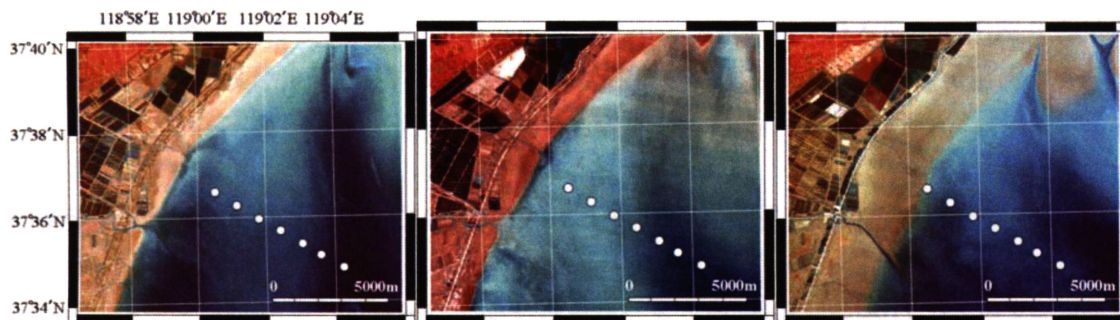


図9：2004年9月（左）、2005年5月（中）、2005年9月（右）の海岸線の位置

黄河デルタにおける自動式シーページメータを用いた地下水流出調査の結果、地下水流出量（SGD）は2004年9月が $2,300 \text{ m}^3/\text{m day}$ 、2005年5月が $304 \text{ m}^3/\text{m day}$ 、2006年9月が $3065 \text{ m}^3/\text{m day}$ であった。黄河デルタの海岸線を350 kmと仮定すると、デルタ全域からの地下水流出量は2004年9月が $9,300 \text{ m}^3/\text{s}$ 、2005年5月が $1,200 \text{ m}^3/\text{s}$ 、2006年9月が $12,000 \text{ m}^3/\text{s}$ となる。それぞれの時期の黄河河川水の流量(利津)は $676 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $145 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $778 \text{ m}^3/\text{s}$ であったので、デルタ域から渤海湾への全地下水流出は河川流出量のそれぞれ13.8、8.5、16.0倍になる。ただしこれは正味の地下水流出(SFGD;淡水成分)だけではなく、再循環水(RSGD;海水)も含むことに注意を要する。

一方、陸域からの淡水地下水流出成分を全地下水流出成分から分離するために、海水と陸水の2つのエンドメンバーを用いた成分分離を行い、淡水成分の漏出面を海岸から2 kmとすると、地下水流出淡水成分(SFGD)は2004年9月で $18 \text{ m}^3/\text{m/day}$ 、2006年9月28日 $28 \text{ m}^3/\text{m/day}$ となった。海岸線の長さ350 kmと観測地域の透水係数データを重み付けしてデルタ全域の値に換算すると、正味の地下水流出(SFGD; 淡水成分)は2004年9月で $110 \text{ m}^3/\text{s}$ 、2006年9月には $170 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。これらの値は、それぞれ黄河河川流量の4.5%と7.0%を占めることになる。

これらの黄河デルタでの値(SGD、SFGD)を世界の各地の値と比較すると、淡水成分の地下水流出量(SFGD)は、勾配がなだらかな地形的特色や透水係数などの地質的特色を受けて、比較的少ない値を示しているのに対し、全地下水流出量(SGD=SFGD+RSGD)は、緩傾斜の沿岸による広い干潮域の影響を受けて、大きな値となっている。

一方、地下水流出および河川流出に伴う物質負荷に関しては、それぞれの水フラックスとそれぞれの濃度の積から求められる。水フラックスを河川水：地下水=100：5とした時の、各溶存成分の河川水と地下水の割合を評価すると、シリカの負荷に関しては、河川水：地下水=100：60、総リンの負荷は河川水：地下水=100：50となり、地下水寄与率がこれまで考えられた以上に大きいことなどが明らかになった。

窒素に関しては、地下水流動に伴う還元環境下での脱窒の影響を受けて、寄与率は河川：地下水=100：2.4と小さい値になった。このことは、直接地下水流出(SFGD)では、渤海における最近の窒素濃度上昇を説明できないことを意味する。ただ、海底間隙水の窒素濃度は陸域地下水の様に脱窒の影響を受けておらず、黄河起源の堆積物が再循環

水により溶出・生産されて渤海湾に流出している可能性は否定できない。黄河本流だけではなく小河川からの窒素流入とあわせて、今後の課題として残された問題である。

6. 測定手法の統合

デルタ域における河川水・地下水・海水相互作用研究においては、様々な評価手法を同じ研究対象地域で行うことで、評価方法の統合化を図ることが試みられた。地球物理的探査手法としては、GPS を用いた地下水面の詳細評価方法の確立、比抵抗法による間隙水の塩分濃度分布評価、地下水流出量計による直接地下水流出量の測定、光ファイバーによる地下水流出地点の特定、地下水位・ポテンシャルの連続測定による黄河河川水と地下水との圧力伝播からインパクトゾーンの特定などを行った。また、地球化学的評価方法としては、各種安定同位体・放射性同位体の測定による水の起源と滞留時間の評価、溶存成分の化学分析による陸域から海域への物質負荷量の評価、ボーリングおよび間隙水の解析による堆積環境の推定などである。これらの手法は、それぞれが新しい測定手法であるばかりでなく、同じ研究対象地域で異なる手法を併用することで明らかになったことも多い。このことはプロジェクト研究の「手法」の確立方法・評価方法として特記できる。

また、黄河デルタグループは、渤海グループと合同で計 3 回観測を行った。渤海グループのモデル解析の境界条件としての陸側データの受け渡しとしてのみではなく、モデル自体の改良（地下水流出成分の組み込み）などが行われた点で、異なる分野（陸水学と海洋学）の共同研究がプロジェクト研究をとおして図ることができた。

7. 結論

黄河プロジェクト「デルタ地下水班」の結論は以下のとおりである。

- (1) 標高データのない平坦な黄河デルタ域において、GPS による広域地下水位計測の有効性を明らかにすることができた。
- (2) 井戸のない黄河デルタ域深部の情報を得る方法として、リモート比抵抗測定により深部地下水淡水・塩水分布を評価することができた。
- (3) デルタ域の水の流動方向として、黄河から地下水、地下水から渤海湾の流れがあることが確認できた。
- (4) 黄河下流域の水理学的連続性を表す impact zone は 40km 以上であること、流域外への水供給を含めた impact zone の設定が重要であることが示された。
- (5) 流量の異なる時期の比較研究により、黄河断流時は地下水の渤海への寄与率が大きくなることが明らかになった。
- (6) 陸域デルタから渤海湾への地下水流出分布は、堆積による海岸線の移動により沖合いにシフトとすることが明らかになった。
- (7) 地形勾配が緩慢な黄河デルタでの SFGD (淡水成分) は小さい (黄河河川流出の 5-8%) が、干潮帯の広いデルタでの SGD は大きい(黄河河川流量の 8-16 倍) ことが明らかに

なった。

- (8) デルタ全域から渤海湾への淡水地下水成分は数パーセントに過ぎないが、渤海へのシリカ・リンの地下水寄与率は、黄河による負荷量のそれぞれ 60%・50%と、大きいことが明らかになった。
- (9) 渤海における最近の窒素増加の原因として、黄河起源の堆積物が再循環水により溶出・生産された可能性がある。
- (10) 黄河下流域（花園口―利津）の水損失の 6 割が灌漑水として使われ、2 割が天津・青島などの流域外へ輸送されていることが水収支により推定された。
- (11) 沿岸海洋学と陸水学(地下水学)の両者による補完的な共同研究により、境界領域の新しい研究分野に踏み込むことができた。

8. 今後の課題

- (1) 渤海の窒素濃度上昇に対する原因として、いくつかの仮説を提案することはできたが、特定するまでにはいたらなかった。
- (2) 沿岸海底地下水流出の状況を定量的に把握することはできたが、再循環プロセス(特にどのように再循環水が流入するか)については、明らかにすることができなかった。
- (3) 様々な物理学手法と化学手法の統合を図ることはできたが、沿岸域の生物・生態への影響については今後の課題となった。