

黄河デルタ地域における比抵抗法を用いた塩水淡水分布調査

石飛智稔（総合地球環境学研究所）

1. はじめに

黄河は 5464km の全長を持ち、世界で 2 番目に堆積物運搬量の多い大河である。その堆積物により黄河下流域には広大なデルタ地域が広がっており現在もその拡大が続いている。他方、近年においては黄河下流域にて様々な水問題が勃発しており、その代表的なものとしては過剰取水に伴う河川流量の低下により河川水が河口まで流れなくなるいわゆる「断流」現象が生じている。また、地表水の問題以外にも、地下水汚染や塩分集積といった地下水に関する問題など、深刻な水環境問題が発生している（陳ほか、2004）。

黄河の河川本流については、有史以来、その流路は河口から約 500km の開封付近から山東半島の北や南へと自然にその流路の変更を繰り返してきた。これまでの黄河の流路変更に関する研究によると、過去 3000 年に 26 回の大きな流路変動があったことが確認されている（Yu, 2002 ; Saito *et al.*, 2001）。現在は山東省北部に黄河河口が位置し渤海湾へと流入しているが、1855 年以前は山東半島より南の江蘇省北部に河口が位置しそこより黄海へと流入していた。黄河河口が山東省に位置した 1855 年以来、黄河由来の堆積物により現在の黄河デルタ地域は急速な拡大を続けている。

このように水環境の変化が激しい黄河デルタ地域において、黄河デルタ地域地下水の汚染状況・実態の把握を目的とした調査・研究がこれまでにいくつか行われている。例えば山東省政府による地下水の水位および塩分濃度の観測（He *et al.*, 1999）や、塩分集積および硝酸汚染の実態把握（陳ほか、2004 ; Chen *et al.*, 2007）などがそれらの例として挙げられる。これらの研究は観測井を用いておりその調査結果によると、黄河デルタ地域の地下には塩水が広く分布していることが確認されている。しかし観測井を用いる地下水調査では、その調査の精度が観測井の位置分布および対象深度に大きな制約を受ける。そこで、本研究では観測井を必要としない手法であり、かつ塩水のシグナルを捉え易い手法である物理探査法の一つの比抵抗法を用いて、観測井のストレーナが無く地下水試料の採取が困難な深度も含めて、黄河デルタ地下の塩水淡水分布の把握およびその水の起源の評価を目的として地下水観測を行った。

2. 調査方法

本研究の目的は、観測井の位置分布および対象深度に制約を受けない比抵抗法を用いて、現在の黄河デルタ地下水の塩水淡水分布を評価し、その起源を明らかにすることである。一般に、堆積層の場合には地層の比抵抗 ρ は、地層の孔隙率 ϕ と地層水の比抵抗 $\rho\omega$ とにより関係付けられ以下の式で表される。

$$\rho = \rho\omega \phi^{-m} \quad (1)$$

この式は Archie の式と呼ばれ、指数 m は膠結係数を示す。また比抵抗値と電気伝導度は逆数の関係にあるため、地下水の電気伝導度は比抵抗測定の結果に大きな影響をおよぼす。この両者の関係から、地下の比抵抗測定を行うことにより、地下水の電気伝導度の推定、つまり塩水淡水分布の評価を行うことが可能であると考えられる。比抵抗測定より地下水の塩水淡水の評価を行う手法は、近年、沿岸域の塩淡水境界の評価を行う際にしばしば適用されている（Kroeger *et al.*, 2007 ; 石飛ほか、2007）。

本研究の比抵抗測定に用いた測器は McOHM Profiler-4（応用地質株式会社製）である。なお、こ

これらの測定は地下水の電気伝導度との比較を行うために観測井の存在する地点にて測定を行っている。測定方法は、作業性が良く汎用性が高いという理由より二極法を適用している。電極の配置については155mの測線に5m間隔で電極を32本配置し、遠電流電極および遠電位電極は測線からそれぞれ両方向に約700m離れた地点に配置し測定を行った。その結果を比抵抗解析ソフトウェア「Elecimager2D」(応用地質株式会社製)にて解析を行った。

比抵抗測定のほかには黄河デルタ地域の地下水流動を把握するために、観測井を用いて地下水位の測定も行った。また、地下水の塩水淡水分布を評価する最も直接的な方法としては、観測井より地下水を採取しその塩分濃度もしくは電気伝導度を測定することが挙げられる。そのため比抵抗測定の結果との比較のために、黄河デルタ地域に存在する観測井から地下水を採取し、それらの電気伝導度の測定も行った。本研究で地下水位測定および地下水の電気伝導度測定を行った観測井は計52本である。またこれらの測定に加えて、地下水の起源を推定するために、地下水の酸素同位体測定および ^{14}C の測定による放射性炭素年代測定法を行った。

地下水試料の採取および比抵抗測定は、2003年9月11日～18日、2004年5月8日～12日、2004年9月11日～16日にそれぞれ行った。

3. 調査結果および考察

図1にデルタ地域における地下水面図を示す。それを見ると黄河本流付近において地下水の水面の高さが高く、黄河本流から離れるに連れ水位が低下する傾向が見られる。地下水は水位の高い所から低い所に向かって流動するため、黄河本流より放射状に地下水が流動していることがわかる。また地下水位の高い地点は黄河本流にあたるため、黄河から地下水が涵養されていると考えられる。

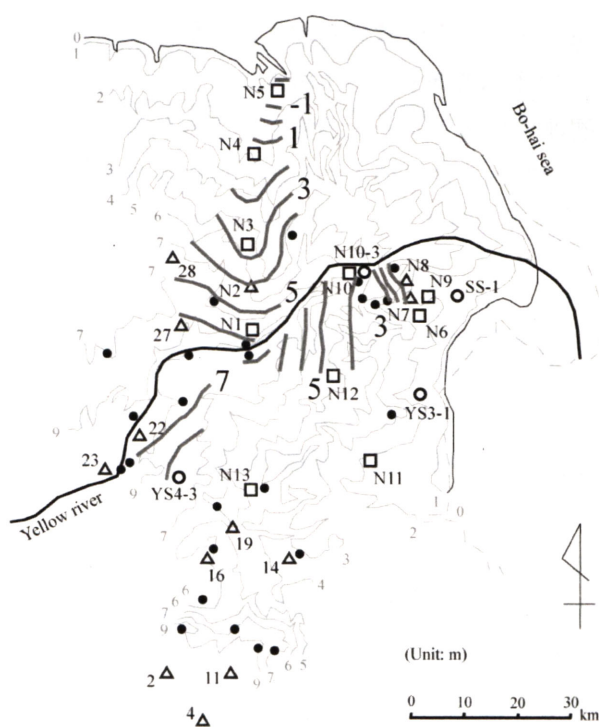


図1. 黄河デルタ地域における地下水面図

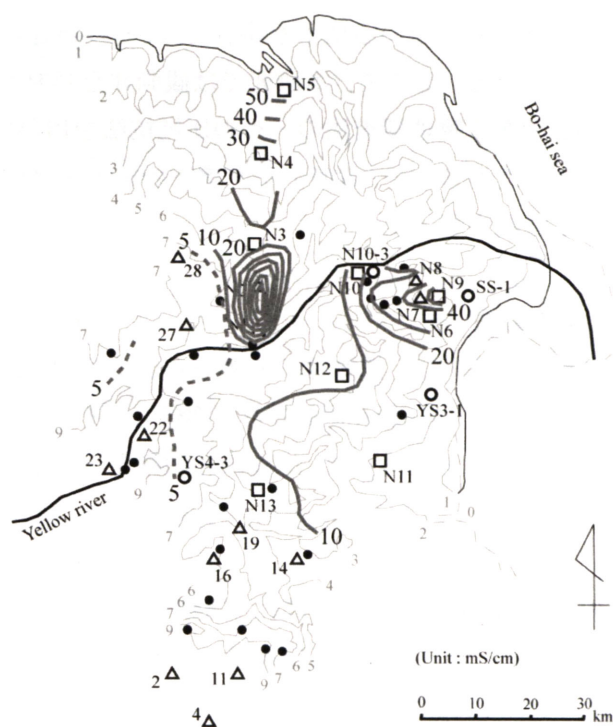


図2. 地下水の電気伝導度分布

次に図2に地下水の電気伝導度の分布図を示す。それを見ると電気伝導度の値はデルタ南部地域において1桁台の値（より淡水）を示しているが、他の地域においてはおおむね2桁以上の値を示している。特に、黄河デルタ中心部、沿岸域のデルタ北部および東部において50mS/cm以上と一般的な海水の電気伝導度の値と同等もしくはそれ以上と、所々に濃度の高い塩水が存在することが分かる。

図2に対応して、図3に地下水の電気伝導度と井戸の深度を比較した図を示す。それを見ると、観測結果はほとんど20m以浅にプロットされ、それより深い深度の結果については井戸が存在しないため、ほとんど得られていないことがわかる（実際には200m以深の結果についても、2・3本存在するが、図3では割愛している）。

井戸が存在しない地点にて地下水の塩水淡水把握を行うために、比抵抗法による観測を適用した。比抵抗法は地質調査法の1つであり、地下に電気を流し地下の比抵抗値を測定することにより、地質構造、地下水の有無等を測定する手法である。ここで、電気伝導度と比抵抗値には逆数の関係がある。本研究にて扱っている電気伝導度は、地下水を採取して測定を行うものであり、地下水のみを対象と

しているものであるが、比抵抗法により測定される比抵抗値は、地下水の値に加えて地質の影響を含むものである。しかしながら、黄河デルタ地下の地質は300～400m深度に基盤が存在し、その上に黄河由来の堆積物により形成されている。

図4に比抵抗測定結果を示す。それを見ると地下の比抵抗分布にはいくつかの分布パターンが見られ、それらを大きく分けると、1) 地下浅部に低比抵抗領域・地下深部に高比抵抗領域（N1、YS3-2、YS4-1など）、2) 地下浅部に高比抵抗領域・地下深部に低比抵抗領域（N3、N4、YS4-2、YS4-3など）、3) 地下浅部・地下深部ともにあまり変化が見られないもの（N4、YS3-1など）、の3つに大別される。

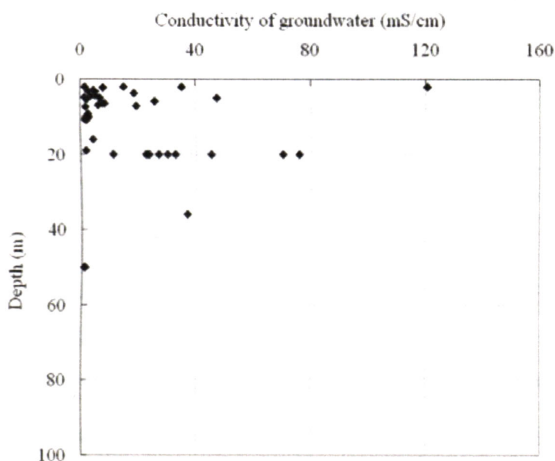


図3. 地下水の電気伝導度 vs 深度

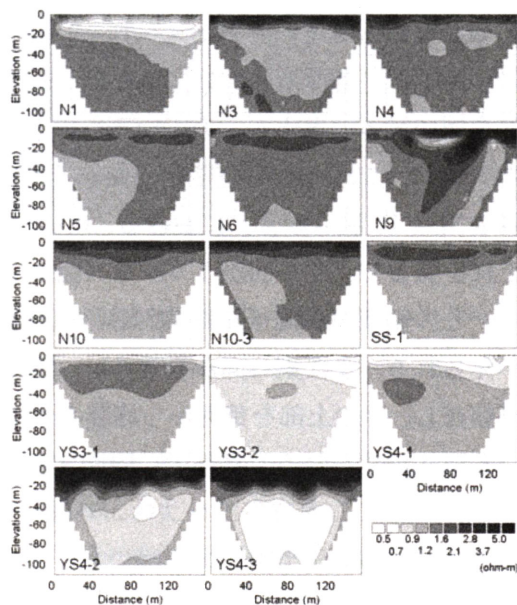
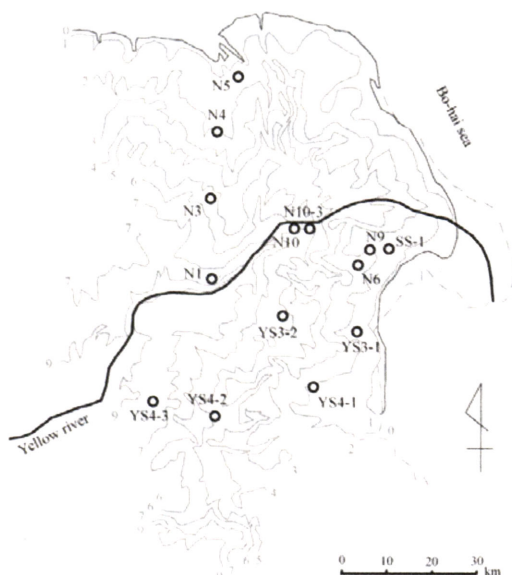


図4. 比抵抗測定結果

また、地下水の電気伝導度と地下の比抵抗値を比較した結果を図5に示す。ここで、電気伝導度は地下水のみを対象にしているのに対し、比抵抗値は地下水に加え地質の影響も含むものであるが、戦術のとおり黄河デルタの地質は深度300~400mに基盤があり、それより上部は黄河由来の堆積物で占められているため地質条件の変化による比抵抗値への影響は無いものと仮定している。

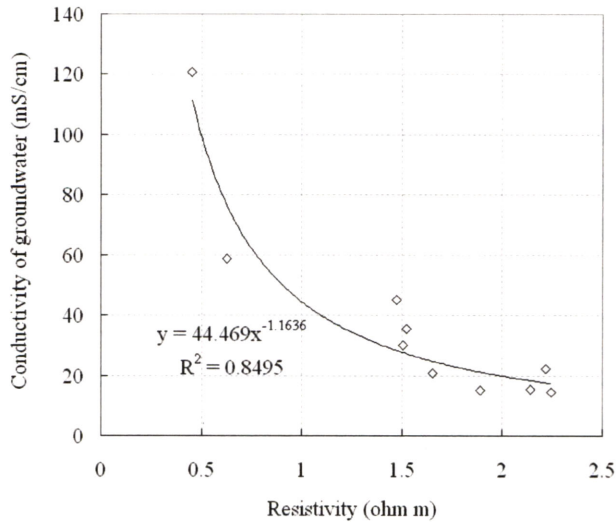


図5. 地下水の電気伝導度 vs 深度

図5を見ると、地下水の電気伝導度と地下の比抵抗値には明瞭な負の相関が見られ、両者の関係は以下の式で表される。

$$C_g = 44.469 \rho^{-1.1636} \quad (1)$$

従って、井戸が無い地点で、地下水の採取が困難な地点においても、地下の比抵抗値を測定することにより、地下水の電気伝導度の推定を行うことが可能であると考えられる。そこで比抵抗測定値の結果に、(1)式を適用し地下水の電気伝導度の推定を行った。その結果を深度10m毎に表したものを図6に示す。比抵抗測定は深度100mまで行っているが、図4で記したとおり深部においては比抵抗値にあまり変化が見られないため、図6では60mの深

度まで示している。それらを見ると深度10mの結果においては、デルタ南部のYS4-3やN13では5mS/cm程度と低い値が見られ、デルタ東部のN9付近や北部のN5付近においては電気伝導度が20mS/cm程度と周囲と比較すると比較的低い値を示している。それに対してデルタ中心部のN1やN12では100mS/cmを超える非常に高い値を示している。図2の実測の結果と比較すると、YS4-3やN13では実際に電気伝導度の低い地下水が、N1やN12においては非常に高い電気伝導度の地下水の存在がそれぞれ実際に確認されている。次に深度20mの結果では、深度10mの結果と同様にN9付近やYS4-3・N13において20~30mS/cm程度と周囲に比べて低い値を示している。また、N1・N12においては周囲と比べて高い値が見られる。従って、深度20mの結果についても図2の実測結果と同様な電気伝導度の分布が見られる。図2の結果にはほとんど含まれていない深度30m以深の結果については、各深度において値が低い地点でも30mS/cm程度と全体的に高い値を示しており、デルタ全域に渡って塩水が占めているものと推測される。

また、図7に黄河本流から北へ向かうライン(N1-N5、図4参照)および東へ向かうライン(YS4-3-YS4-1、図4参照)における、比抵抗値より推定された電気伝導度の鉛直2次元断面図を示す。それを見ると、北へ向かうライン(図7、左図)では、黄河本流付近に電気伝導度の高い領域が存在し、その領域が海側(N5の方向)へと向かう地下水流動の流れに乗って、広がっているような様子が見られる。また東へ向かうライン(図7、右図)については、地下深部に電気伝導度の高い地下水が存在し、その上部を黄河から涵養された電気伝導度の低い水が海側へと(YS4-1の方向)流動している形状が見られる。従って、両図とも図1の地下水流動方向を反映した結果が得られている。

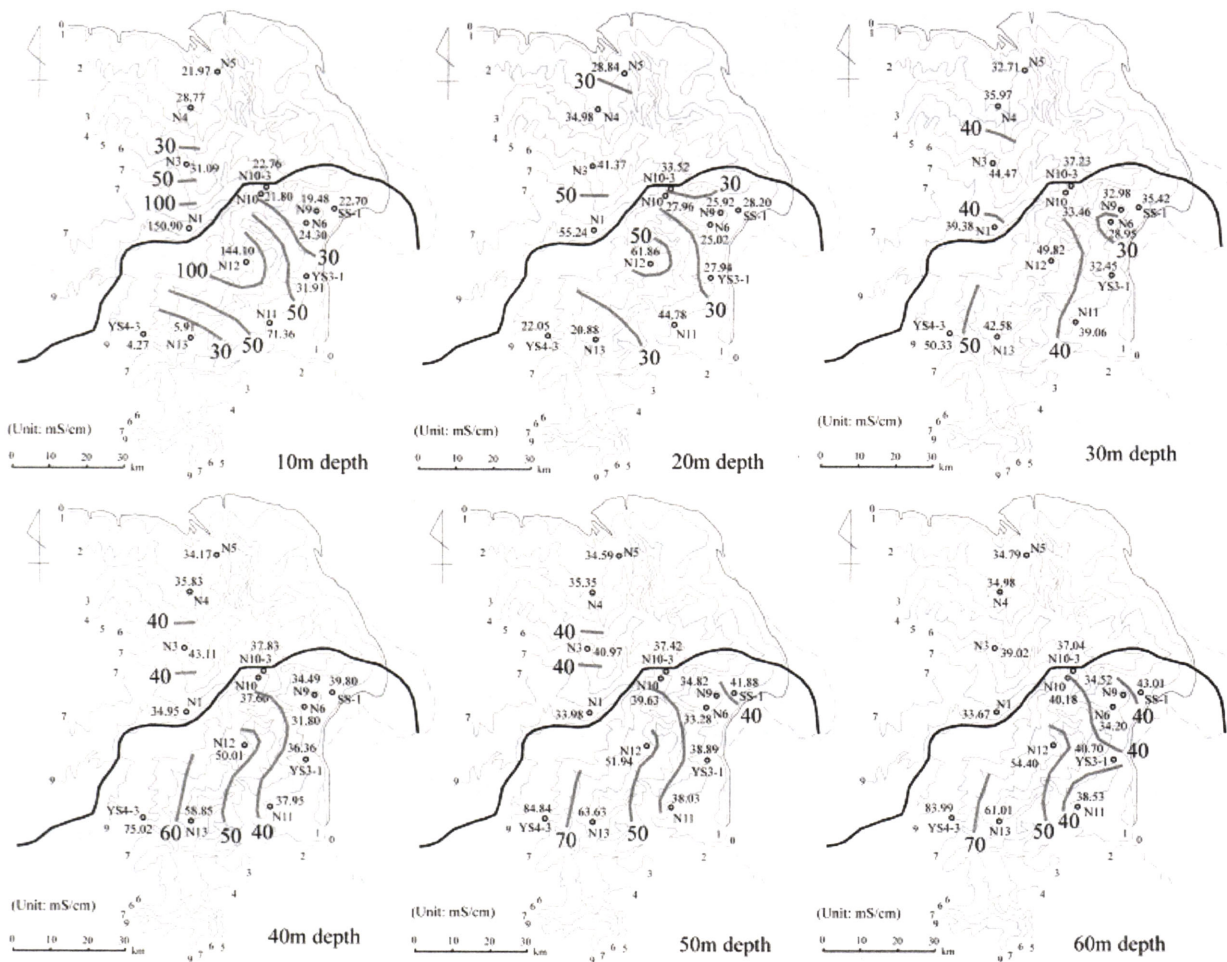


図 6. 比抵抗値より推定した地下水の電気伝導度分布

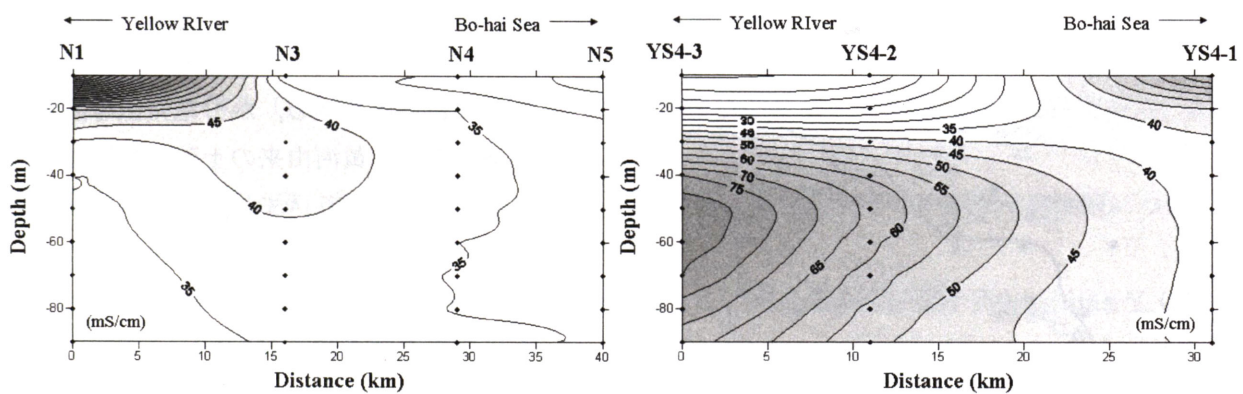


図 7. 比抵抗値より推定した地下水の電気伝導度の鉛直 2 次元断面図

(左図—北ライン (N1-N5)、右図—南ライン (YS4-3-YS4-1))

地下水を採取しての電気伝導度計測および比抵抗測定より地下水の電気伝導度の推定の結果より、黄河デルタ地下においては電気伝導度の高い塩水が広い領域にわたって存在することが明らかになった。次にそれらの塩水の起源を明らかにするために、地下水の酸素同位体比および放射性炭素年代測定法を用いた地下水の年代測定を行った。

図8に黄河河川水・渤海における海水・黄河デルタの地下水の、それぞれ酸素同位体比と電気伝導度の比を示す。それを見ると、5地点における地下水の分析結果は大きく分けて、酸素同位体比が-6‰程度を示すもの（海岸地域の地下水）と、-3‰程度を示すもの（デルタ中心部の地下水）の2つに分類される。

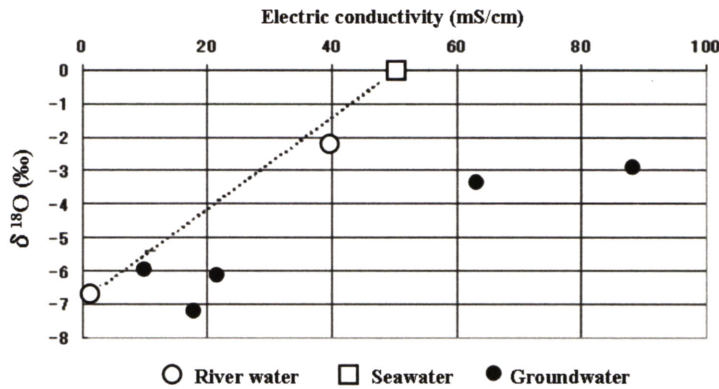


図8. 地下水の酸素同位体比と電気伝導度

次に放射性炭素年代測定法による地下水の年代測定を行った結果を図9に示す。それを見ると地下水の年代は50yrBPより若いものから10000yrBPを超えるものまで地域により大きな差を持つ。地域的な傾向としては、N5やN9のような沿岸域においては50yrBPよりも新しいという結果が多く得られている。それに対して、N1やN12など黄河デルタの中心部に位置する地域では、4000yrBPから12000yrBPと古い値を示している。またNo.19やNo.14などデルタ南部においては千数百年の年代を持つ地下水が広く分布している。

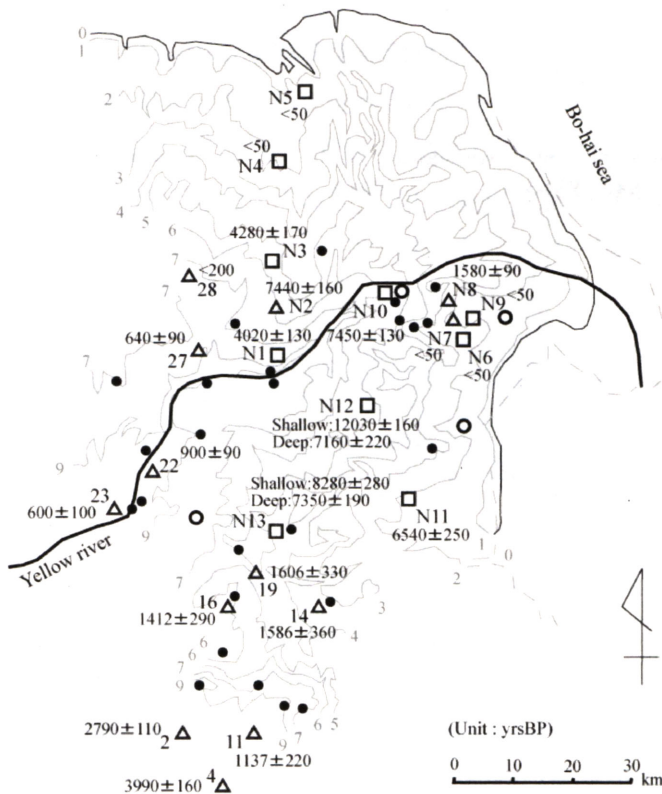


図9. 放射性炭素年代測定法による地下水の年代測定

ここで、もし黄河デルタ地下の塩水が河川水と海水の混合物であれば、地下水の値は河川水と海水を結ぶ直線付近にプロットされるはずである。しかしながら、酸素同位体比が-3‰程度を示す地下水はその直線から大きく離れた所にプロットされる。従って、この-3‰程度の値を示す電気伝導度の高い地下水については、河川水と海水の混合物ではなく他の起源を考えねばならない。

ここで黄河デルタの海岸線位置の変遷を見ると(図10), 1855年以降急速な速さでデルタが拡大しており、N5やN9など海岸に近い地点は近年の堆積により陸化したことが分かる。従って、これらの海岸付近の新しい年代を示し、かつ電気伝導度が高い地下水は、黄河由来の土砂の急速な堆積により海水が取り込まれ、未だ内陸から沿岸域へと流動する淡水に置換されていない海水を示すものではないかと推測される。次にデルタ中心部のN1やN12周辺に存在する年代が古く電気伝導度が非常に高い地下水については(図2および図6), 地質構造よりこの地域に地下水が停滞し濃縮したため、このような地下水が存在するのではないかと推測される。実際に、図10と比較するとN1やN12は黄河が渤海湾に流入する1855年より以前から陸上に存在した地点に位置し、N5やN9地点とは形成され

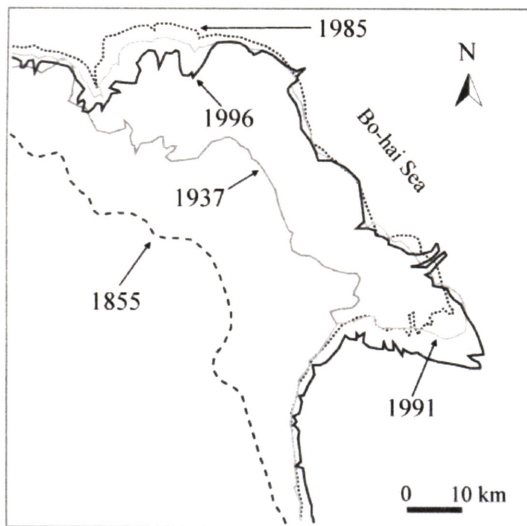


図 10. 黄河デルタの海岸線位置の変遷

た年代が大きく異なる。またデルタ南部の地域は概ね千数百 yrBP の年代の地下水が存在するが、図 2, 図 6 より、地下浅部に電気伝導度の低い地下水、つまり淡水の存在が認められ、これは、より内陸から沿岸域へと流動する淡水の地下水が起源ではないかと推測される。

以上のことから黄河デルタ地域では、地下水の賦存状況については以下の 3 つの領域に大きく区分される。

1. 沿岸域の電気伝導度が高く年代の若い塩水,
2. デルタ中心部の電気伝導度が非常に高く年代が古い塩水,
3. デルタ南部の地下浅層部に存在する淡水, の 3 つの領域である。

4. まとめ

比抵抗測定, 電気伝導度測定・放射性炭素年代測定より, 黄河デルタ地下の塩水淡水分布およびその起源の評価を行った。比抵抗測定および地下水の電気伝導度測定の結果, デルタ南部地域の地下浅層部に淡水が存在し, その他の地域においてはほぼ全域にわたって塩水が分布していることが明らかにされた。また放射性炭素年代測定法により地下水の年代の評価を行った結果, 沿岸部においては近年の黄河由来土砂の堆積により取り込まれた海水起源の塩水が, デルタ中心部においては古くに地下にとりこまれた地下水が濃縮を経て高濃度の塩水として賦存している状況が, デルタ南部においては内陸からの淡水地下水の供給により淡水が存在している状況がそれぞれ明らかになった。

5. 参考文献

- 石飛智稔・谷口真人・嶋田 純 (2007): 沿岸海底湧出量測定による塩淡水境界変動と地下水流出の評価, 地下水学会誌, 49(3), 191-204
- 斉藤文紀・楊 作升 (1994): 黄河: 河川流量, 浮遊堆積物運搬量と堆積物収支, 堆積学研究, 40, 7-17
- 陳 建耀・福寫義宏・唐 常源・谷口真人 (2004): 黄河下流域で起こっている水環境問題について, 水文・水資源学会誌, 17(5), 555-564
- Chen J., Taniguchi M., Liu G., Miyaoka K., Onodera S., Tokunaga T., and Fukushima Y. (2007): Nitrate pollution of groundwater in the Yellow River delta, China. *Hydrogeology Journal*, doi 10.1007/s10040-007-0196-7.
- He Q., Duan Y., Zhang J., Xu J., Kang F., Zhou Y. (1999): Comprehensive management for the coastal zone in the Delta of the Yellow River (in Chinese), Ocean Publishing, Beijing.
- Kroeger K.D., Swarzenski P. W., Greenwood W. J. And Reich C. (2007): Submarine groundwater discharge to Tampa Bay: Nutrient fluxes and biogeochemistry of the coastal aquifer, *Marine chemistry*, 104, 85-97.
- Yu L. (2002): The Huanghe (Yellow) River: a review of its development, characteristics, and future management issues, *Continental Shelf Research*, 22, 389-403.