

# 華北平野の地下水位の低下

玉生 志郎<sup>1)</sup>・村岡 洋文<sup>1)</sup>・石井 武政<sup>1)</sup>

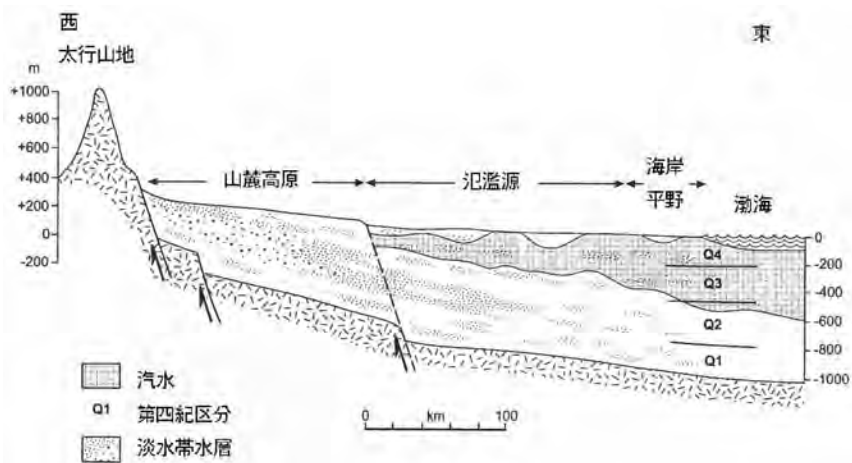
## 1. 華北平野とは

Wu, *et al.* (1996)によると, 華北平野 (The North China Plain) は, 中国沿岸部の中央に広がる海河およびその支流の流域から成る平野で, 南は黄河下流, 西は太行山地, 北は燕山山地, 東は渤海に画された地域と定義されています (第1図). しかし, しばしば華北平野は華北平原と同義として用いられ, 海河流域のみならず黄河南部の淮河流域を含んだ, より広域の地域として使用される場合もあります. ここではWu, *et al.* (1996)の定義に従って, 狭義の華北平野として使用することとします. この地域は総面積135,000km<sup>2</sup>で, 人口約1億1,200万人の地域であります. 北京, 天津, 石家庄などの大都市が含まれる人口密集地であるとともに, 中国最大の小麦, トウモロコシの穀倉地帯でもあります.

華北平野の水理地質断面はFoster, *et al.* (2004)により第2図のように描かれています. それによると華北平野は水平的には西から東に向かって山麓高原,



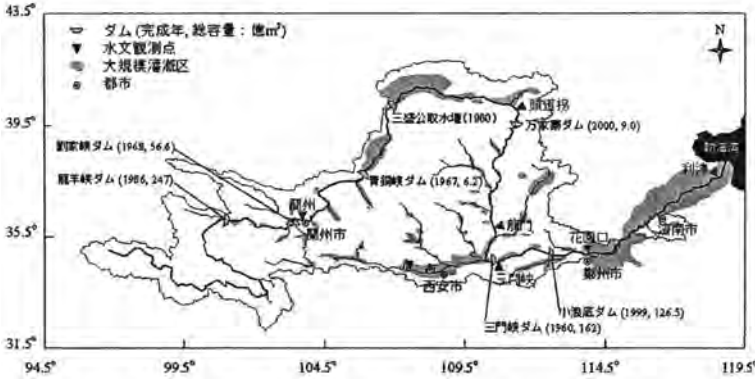
第1図 華北平野の位置と地形区分 (Wu, *et al.*, 1996).



第2図 華北平野の東西水理断面図 (Foster, *et al.*, 2004).

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 華北平野, 地下水, 水位低下, 第四系, 地盤沈下



第3図 黄河流域で開発された大規模ダムと大規模灌漑区(楊, 2005).

汎濫原, 海岸平野に区分され, 垂直方向には第四系が4層準に区分されています。

影響の大きさを考えると, その研究は, 国際協力のもと世界的視野で進めるべき課題と考えられます。

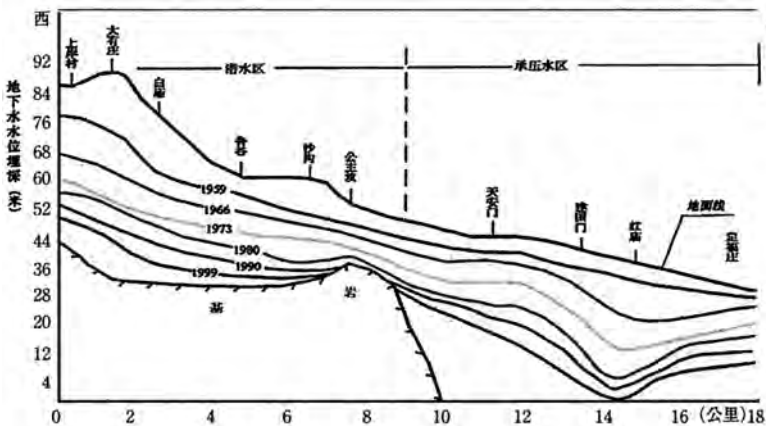
## 2. 華北平野の地下水位低下は, 世界的な食糧問題を引き起こす

レスター・ブラウン(Brown, 2003)は, 中国, 華北平野での地下水位低下が世界的な食糧危機をもたらすと警鐘を鳴らしています。以下, その一部を引用します。「中国の小麦の半分以上, トウモロコシの3分の1を生産する華北平原では, 地下水位の低下速度が10年前の平均1.5m/年から現在3m/年にまで上がっている。浅い帯水層が過剰揚水でほぼ枯渇したので, 汲み上げられる水は降水によって涵養された分だけとなった。このため深い帯水層まで井戸を掘り下げざるを得なくなるが, 不幸なことに深い帯水層の水は涵養されない。北京地質環境監測院の責任者何卿誠(He Quincheng)氏は, 華北平原の深い帯水層が枯渇することで「最後の水がめ」も失われると指摘する。」

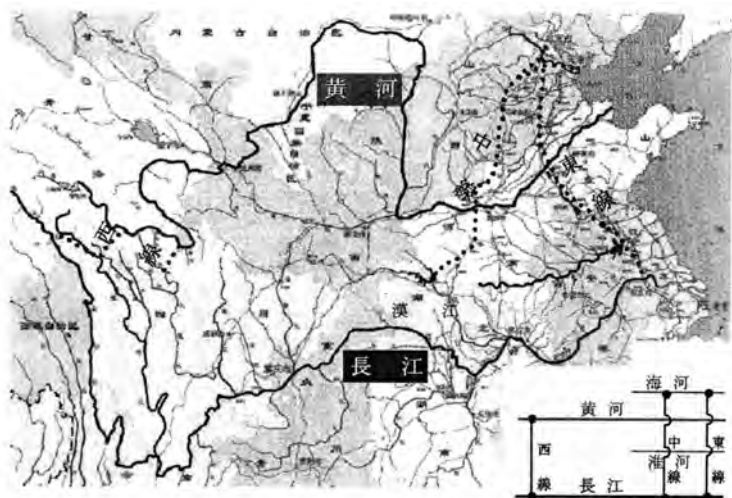
以上のように, 華北平野の地下水位低下が及ぼす

## 3. 黄河流域の水資源問題

楊(2005)は, 黄河流域の水資源問題を以下のように紹介しています。「黄河の断流は1972年から始まり, 90年代に最悪となった。断流の原因は膨大な灌漑用水にある。そこで2001年に全国大規模灌漑区の節水計画ができ, 黄河全流域の用水計画は統一管理となった。その結果, 懸念されることは上-中流の大規模灌漑区での水不足と砂漠化である。具体的には青銅峡灌漑区と河套灌漑区である。第3図に黄河流域の灌漑区を示す。また, 黄河下流の北側に広がる華北平野を流れる海河流域でも, 大量の農業用水, 都市部での工業用水, 生活用水の使用で, 深刻な水不足に陥っている。北京では昔から都市用水として地下水を利用してきたが, 最近の地下水位の低下は著しく, 遷都論が出てくるほどである(第4図)。このような問題の打開策として, 「南水北調」の計画が進められ



第4図 北京における地下水位の低下(楊, 2005).



第5図 「南水北調」のルート図(楊, 2005).

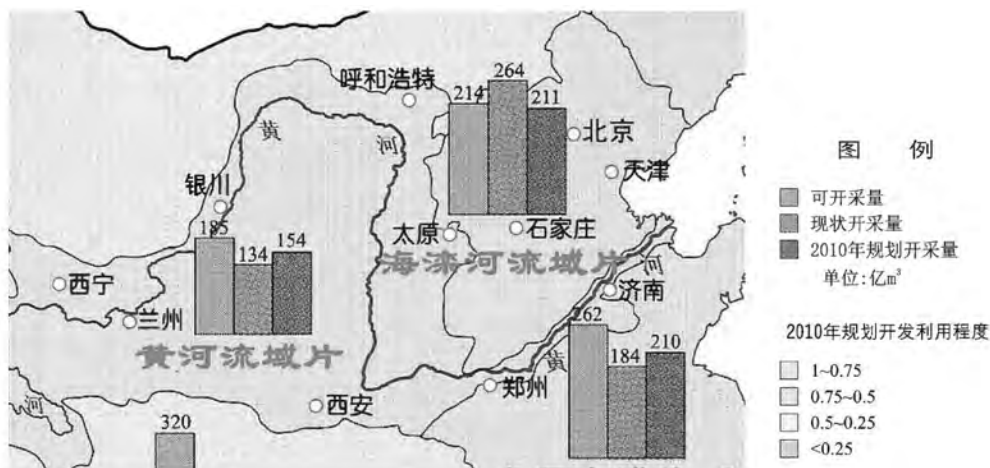
ている。これは揚子江の水を、東線、中線、西線の3ルート(第5図)で、黄河流域に水を運ぼうとするものである。そのうち東線・中線は北京と天津の都市用水を賄おうとするもので、現在、黄河から天津に供給されている水が、黄河下流部の灌漑にまわせる予定である。また、西線は黄河の上流に供給される予定である。」

しかしながら、これらの黄河の水資源統一管理や南水北調計画で、どれだけ水不足、水環境汚染問題が解決できるか不明な部分が多く、今後の課題となっていると言えます。

水利部水資源司 南京水利科学研究院(2004)は中国の各流域の水採取量と採取可能量を取りまとめ

ています。それによると、華北平原北部での現在の採取量は、採取可能量を上回っています(第6図)。それゆえ、2010年での計画採取量はほぼ採取可能量にする計画です。一方、黄河流域での現在の採取量は、採取可能量を下回っており、2010年での計画採取量は増産する計画です。

武選民(2005:資料)は黄河流域の地下水のみならず地表水も併せて、その資源量を、第1表のようにまとめています。これによりますと、黄河流域の地下水資源は、地表水に匹敵する量であることがわかります。ただし、深い地下水ほど化石資源としての色彩が強まるので、補給可能な再生可能資源ではないことには十分配慮する必要があります。



第6図 中国の地下水利用の実績と利用計画(水利部水資源司, 南京水利科学研究院, 2004).

第1表 黄河流域水資源及び開発利用状況(武選民, 2005:資料).

		億m <sup>3</sup> /年
地下水資源	地下水補給資源量	468.52
	地下水可採資源量	259.03
	地下水已採資源量 (1998年当時)	139.61
	地下水剰余資源量	119.42
地表水資源	地表水資源量	580.00
	地表水地下水重複量	277.26
黄河流域水資源総量		771.26

4. 「黄河領域地下水循環モデルの構築と地下水資源の将来予測」プロジェクトでの本研究の概要

本プロジェクトの全体概要は、石井(2004)および石井(2007)に紹介されているので、それをご参照下さい。

産業技術総合研究所は大学や研究機関と協力して2002年度から2006年度までの5カ年計画で、文部科学省の新世紀重点研究創生プラン「人・自然・地球共生プロジェクト」課題6:水資源予測モデルの開発「アジアモンスーン地域における人口・自然変化に伴う水資源変化予測モデルの開発」のサブテーマ(5)「黄河領域地下水循環モデルの構築と地下水資源の将来予測」に取り組んできました。華北平野の地下水位低下に係わる本研究は「帯水層区分および地質構造の解析」の一部として、黄河下流域から北京、天津に至る華北平野全体を対象に、地下水位の低下を起こしている帯水層の特徴を地質学的観点から検討してきました。

地下水の流動は基本的に容れ物としての地層とその構造に支配されています。したがって、地層の重なり具合や厚さ、分布、層相、透水性などを把握することは極めて重要であります。本研究では、第四系が

厚くまとまって分布する黄河下流域一帯の地質図あるいは地質柱状図資料などに基づいて帯水層を区分し、水理地質構造を明らかにすることを目的としています。

いままで、中国側の水位データと第四紀地質図に基づいて、1960年から2002年までの地下水過剰生産による水頭の急激な低下は、3次元的な空間分布において第四系岩相分布と密接不可分に関連していることを明らかにしました。いわば浅層の不圧地下水でも、深層の被圧地下水でも、パッチ状に分布する砂・礫が帯水層を形成し、粘土やシルトなどが難透水層を形成しています。地域的に見ると、華北平野の西側丘陵地では主に扇状地堆積物中で、華北平野中央部は旧河川堆積物中で、海岸沿いは海成堆積物中で、それぞれ水理地質構造に応じた透水性分布に支配されて地下水の水位低下が生じています。一方、第四系の下位の基盤岩類では、一部の断層に伴う裂か性帯水層以外には、孔隙性の帯水層は期待できないことも明らかとなっています。

以下、これらの検討結果について、具体的に報告します。

5. 研究計画と年度展開

本研究は2002年度から2006年度までの5カ年にわたって現地調査結果や既存の様々な地質・水文地質資料に基づいて帯水層を区分し、水理地質構造を明らかにします。また、各地層・岩体の透水性の評価を行うために、平面図のみならず代表的な断面線に沿う鉛直方向の透水性評価断面図について検討します。更に、別途研究されている地下水流動シミュレーション結果との比較から、各帯水層や難透水層の三次元分布や透水係数の相対値、絶対値、および水文基盤を第四系基底とすることなどの妥当性等についても検討します。最後には、全体とりまとめと今後の予測を行います。年度展開は、以下の通りです。

- ・ 2002年度:既存の地質・水文地質資料収集
- ・ 2003年度:現地で水文地質調査実施,地下水障害事例の把握
- ・ 2004年度:現地で水文地質調査実施,地下水障害事例の考察
- ・ 2005年度:帯水層の分布状況と地下水位の低下および黄河の河川水位低下との関連検討

第2表 河北平原における地下水環境を取り巻く問題点と対策(張ほか, 2001a).

	平原西側と内陸都市域	平原中央部	平原東側	沿岸域
浅層地下水	<ul style="list-style-type: none"> <li>都市域周辺の地下水位のロート状陥没</li> <li>地下水汚染も進行</li> <li>既設揚水ポンプが使用不能</li> <li>数十年後は地下水涸渇の危険性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水位低下は比較的緩慢</li> <li>適量の近揚水は塩類集積を防止</li> <li>土壌汚染(?)</li> <li>土壌劣化(?)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水は高塩分で利用不能</li> <li>深層地下水で土壤中塩分を希釈</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>塩素集積域</li> </ul>
深層地下水	<ul style="list-style-type: none"> <li>都市域周辺の地下水水頭のロート状陥没</li> <li>地下水汚染</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水水頭の著しい低下(海拔下数十m)</li> <li>都市域で地盤沈下</li> <li>広範囲に海水の浸入の危険性 →影響は甚大</li> <li>地盤沈下に伴う重金属汚染の懸念</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>海水の内陸部への侵入</li> </ul>
対策等	<ul style="list-style-type: none"> <li>節水</li> <li>灌漑法の改良</li> <li>水のリサイクル</li> <li>導水事業(南水北引中線)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水田に転換しない限り特に問題ナシ(?)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>節水</li> <li>灌漑法の改良</li> <li>水のリサイクル</li> <li>導水(南水北引東線)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>耐塩性植物の開発</li> <li>一部土壌改良</li> <li>河川水の導水</li> </ul>

- ・ 2006年度：全体の取りまとめと今後の地下水障害の傾向予測

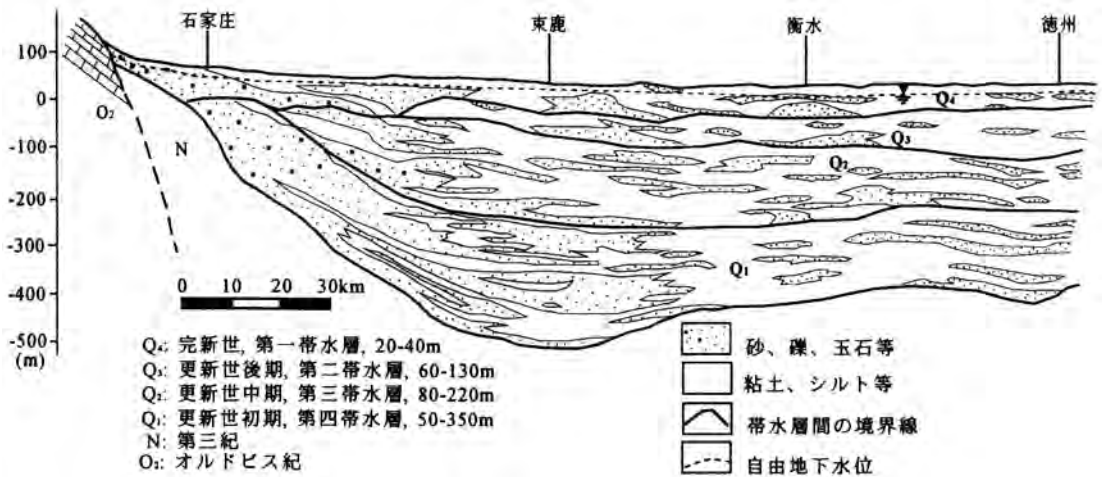
## 6. 華北平野の地下水低下に関する文献調査

華北平野の地下水問題の概要を把握するために、まず文献調査を行いました。そのうち、筆者らが主に参考にした文献名とその概要は、以下に記すとおりです。

- 1) 張ほか(2001a)は、河北平原における1970年代後半から1990年代前半にわたる期間の年間水収支を解析し、河北平原の地下水資源の耐用年数を見積もっています。ここで彼らが用いた河北平原という地域名は、本報告で用いる華北平野と同義です。見積りものの概算結果によると、華北平野全体として見れば、現状の水収支では浅層帯水層は年々減少するものの、21世紀中には枯渇する心配はないとしています。しかし、この計算には浅層から深層への流出量が算定されていません。一方、深層帯水層は、涵養域からの流入は僅かで上部帯水層からの涵養に頼っている状況です。したがって深層からの揚水量が現状レベルのまま推移すれば、被圧地下水の水位は絶えず低下し続けることとなります。そうすると、浅層地下水の自由地下

水面も影響を受けざるをえません。この点を考慮すると、「21世紀中には枯渇する心配はない」という結論は問題があると思われます。張ほか(2001a)は、上記の概算見積りとは別途、地下水位変化のシミュレーションを行い、2030年の将来予測をしています。この計算では、このシミュレーションでは揚水量が現状レベル(農業用は1994年の実績で一定、工業用は6%/年、生活用は2%/年の増加を見込む)として計算しております。また、この計算では、浅層地下水と深層地下水の移動が考慮されているように伺えます。その計算結果は以下の通りです。「浅層の場合、平原西側の山麓沿いに点在する大都市を中心に水位低下が進行し、深刻な地域では低用量が30mにも及ぶという結果になった。東側で地下水が低下しないのは、塩分濃度が高く利用できないためである。深層の場合、東側を中心に地下水頭が40m以上も下がった地域があり、河北平原の西側の山麓地域を除いた全域の被圧地下水面が海拔0m以下になるという深刻な結果となった」。以上の検討結果は、第2表のように取りまとめられています。

- 2) 張ほか(2001b)は、河北平原の水文地質条件と地下水流動特性を明らかにした上で、地下水利用が環境へ及ぼす影響を評価しました。彼らによると、



第7図 石家庄-德州における水文地質断面図(張ほか, 2001b).

本地域の地下水資源は以下のような特徴を有しています。「帯水層は4つに分けられ(第7図), 第一帯水層は不圧地下水で, 第二, 三, 四帯水層は被圧地下水である。特に第一帯水層と第三帯水層は透水層が厚く, 砂礫の粒径も大きいので, 揚水量が多い。1997年度における統計では, 地下水揚水量のうち72%は浅層(第一帯水層)の淡水地下水, 25%は深層(第二~第四帯水層)の淡水地下水, 残り3%は浅層の塩水地下水(塩分濃度2g/L以上の地下水)である。浅層地下水は天水によって涵養されるので, 利用しうる不圧地下水は93.34億m<sup>3</sup>/年と見積もられている。一方, 被圧地下水は涵養量が限られているため, 持続的に利用できる量は9.85億m<sup>3</sup>/年だけである。1980年代以降, 揚水量の増加につれて, 地下水位の大幅な低下と地盤沈下等の問題が発生した。今後の水資源対策としては, 節水, 汚水の再利用, 塩水の利用, 管理の強化, 長江からの導水などを行う必要がある」。

- 3) 近藤ほか(2001)は中国華北平原の水問題という表題で, プロジェクト研究の成果を取りまとめています。その中で華北平野の地下水位低下の経緯を, 1959年と1992年の地下水位分布図を基に以下のように説明しています。「1959年にはほとんどの地域で地下水面は地表面下3m付近にあり, 場所によっては自噴帯も認められた。一方, 1992年にはほとんどの地域で地下水位低下が生じ, 30m以上低下した地域が広がっている。大都市部周辺

では円錐形の低下が多数認められる。水位低下の主要な要因は農業用水, 工業用水, 都市用水としての地下水の揚水にあるが, なかでも農業用水の利用割合が大きい。石家庄近郊では, 1959年の主な地下水取水層は第一帯水層であったが, 1992年までにはほぼ利用し尽くし, 現在は第二帯水層からの取水が主体となっている。」

- 4) Foster, et al. (2004)は, 華北平野の水文地質と社会経済の検討を行い, 水理特性と地下水資源の再生可能性への戦略を明らかにしました。それによると, 華北平野を支配している水理特性は, 西側の山地から東側の海岸にかけての地形勾配と第四紀地質であるとしています。また, 再生可能な水資源利用の成功の鍵は「農業用水の節減」と「灌漑用水と工業用水を増加させないこと」としてしています。また, 水位の低下している深層地下水については, 戦略的な資源として保存するよう勧告しています。
- 5) 国際協力銀行開発金融研究所(2004)は, 黄河流域を対象に水資源利用の現状と今後予想される需要逼迫の度合いを考察し, 問題解消のための技術的, 政策的な課題について検討しています。その中で, 中国水資源公報2000に基づいて, 流域別の降水量, 地表水, 地下水, 重複計算量, 水資源総量をまとめています(第3表)。華北平野の主要流域となる海河の数値は, 他の流域と比較すると, 水資源総量は降水量の17%で黄河流域とほぼ同程度ですが, 他の流域と比較すると最低値で

第3表 中国の流域別水資源量の比較(2000年原データ)(国際協力銀行開発金融研究所, 2004). (億m<sup>3</sup>)

流域	降水量 (A)	地表水 (B)	地下水 (C)	重複計算量 (D)	水資源総量(E) B+C-D	E/A	C/B	D/E
松遼河	5,415.68	1,122.74	577.78	305.47	1,395.05	0.26	0.51	0.22
海河	1,599.36	125.18	221.95	77.57	269.56	0.17	1.77	0.29
淮河	3,062.29	877.09	498.77	142.99	1,232.87	0.40	0.57	0.12
黄河	3,043.46	456.07	351.56	241.78	565.85	0.19	0.77	0.43
長江	19,561.45	9,924.09	2,516.30	2,407.97	10,032.42	0.51	0.25	0.24
珠江	8,548.94	4,401.16	1,110.60	1,082.37	4,429.40	0.52	0.25	0.24
東南諸河	3,723.67	2,117.04	546.80	534.92	2,128.92	0.57	0.26	0.25
南西諸河	9,517.54	6,122.46	1,690.54	1,689.75	6,123.25	0.64	0.28	0.28
内陸河	5,659.95	1,416.11	987.56	880.17	1,523.50	0.27	0.70	0.58
全国	60,092.34	26,561.94	8,501.86	7,362.99	27,700.82	0.46	0.32	0.27

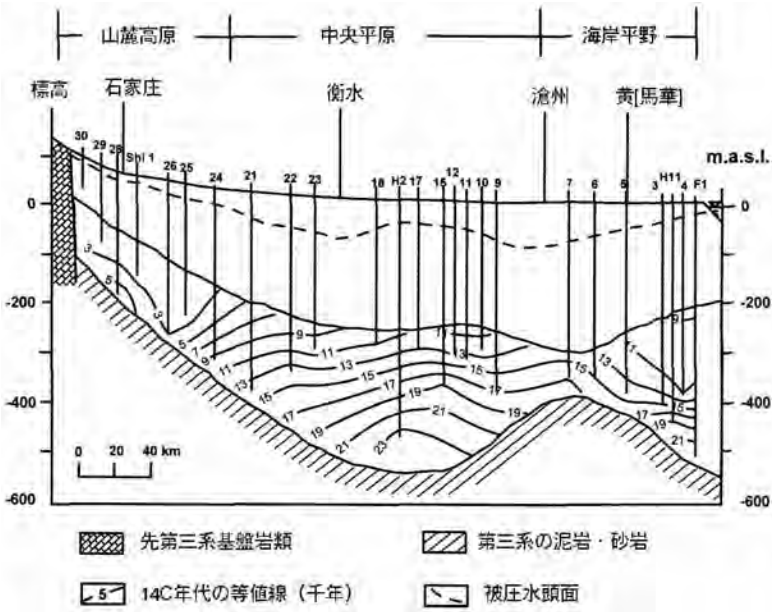
出所:「中国水資源公報2000」

あります。また、地下水と地表水との比率は地下水の方が2倍近く大きい値です。他の流域では、すべて地表水の方が地下水より圧倒的に多い状況です。これらの解釈については原著者によって考察されていませんが、われわれは、華北平野では第四系が他流域よりも厚く、多くの水資源が地下水として貯留されているためであると考えています。

- 6) 新藤(2005)は、華北平野の地形・地質の特徴の説明の中で、高鹹度地下水域を以下のように記述しています。「更新世以降において、最大海進時には華北平野の大部分は海域となり、その地層中にトラップされた海水は現在も鹹度の高い被圧地下水として海岸部から内陸に向かって楔状に存在し続けている。華北平原内陸部の浅層部にパッチ状に存在する高鹹度地下水域はその海退期の海が残した塩湖の名残を留めたものと言える」。また、本地域の地下水の特徴を、以下のように記述しています。「華北平野の深層地下水は西部の太行山地域およびそれに接する台地・丘陵地を涵養域として、渤海湾岸地域を流出域として流動しているが、その滞留時間は極めて長く(数千年~数万年とされている)、事実上枯渇性地下水とってよい。石家庄から德州に至る東西方向の水頭断面では、地下水位が海面下まで下がっている地域は平原の大半を占めている。比較的浅い地下水は農業用水として利用され、深い地下水は工業用水

や都市用水としての開発が進んでいる。華北平野の第四系帯水層は大きく4層準に区分されており、最深部は400m以上に達している。水質が良く、また安定した地下水の開発が進んでいる。

- 7) Chen *et al.* (2004)は華北平野の地下水流動と地化学的な特徴を取りまとめています。その中で地下水流動は深度100-150mを境にして二つのゾーンに区別されると指摘しています。浅部では人間活動の影響を受けて化学特性は大きく変化しています。一方、深部(150-250mと341-456m)の流体は<sup>36</sup>Cl測定法で25-30万年と大変古い年代値が報告されています。
- 8) Chen *et al.* (2005)は地下水の酸素・水素同位体測定と<sup>14</sup>C測定を行っています(第8図)。その中で、以下のようなことを述べています。「華北平野中央部と沿岸部の地下水の多くは、1-2.5万年と測定された。また、これらの地下水の酸素・水素同位体は、西部の山麓部の値より低いことから、最終氷期の寒冷期に涵養された流体と考えられる」。
- 以上の文献調査の結果をまとめると、華北平野の地下水は以下のような特徴を有していると言えます。
- ・帯水層は不圧地下水1層と被圧地下水3層に区分される。
  - ・不圧地下水および被圧地下水の揚水によって自由地下水と被圧地下水の水理水頭は低下しているが、それに応じた不圧地下水と被圧地下水の水の移動については明確に判っていない。



第8図  
深層地下水の<sup>14</sup>C年代を示した断面図 (Chen, et al., 2005).

- ・ 華北平野全体としては地下水位が30m以上低下した地域が広がっている。
- ・ 再生可能な水資源利用のためには、農業用水の削減と工業用水を増加させないことが重要である。
- ・ 地下水が地表水の2倍近く利用されている特異な地域である。
- ・ 地下水の滞留時間が数万年に及ぶことから、枯渇性地下水といえる。
- ・ 地下水の同位体から、深層の地下水は最終氷期に涵養された水と考えられる。

## 7. 華北平野の地下水低下

玉生ほか(2005, 2006)は、華北平野の地下水の水位低下が、どのような地下地質の場所で生じているか水理地質学的な検討を行っています。その検討結果について、以下に報告します。

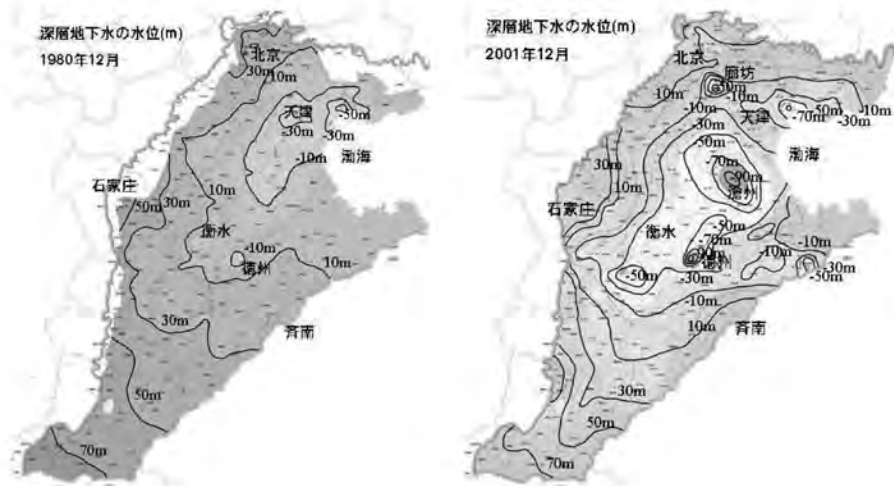
### 7.1 地下水位低下の実態

中国地質科学院水文地質環境地質研究所(内部資料)は、華北平野の地下水位分布図を浅層と深層に区別して取りまとめています。それによると顕著な地



第9図  
華北平野の浅層地下水の水位変化(1984年と2001年の比較)(中国地質科学院水利地質研究所のデータに基づく)。





第10図  
華北平野の深層地下水の水位変化(1980年と2001年の比較)  
(中国地質科学院水利地質研究所のデータに基づく)。

地下水低下が生じたのは1980年代以降で、現在も歯止めがかかっていません。これらのデータに基づいて、過去の地下水の水位変化の様子を紹介します。

1) 浅層

第9図は華北平野浅層地下水位分布図(1984年12月)と同(2001年12月)を比較した図面です。これにより、北京周辺と石家庄周辺の山麓高原と扇状地で、他の中央部や東部地域より著しい水位低下が生じていることがわかります。これは、天水涵養域での浅層地下水の過剰な汲み上げによるものと考えられます。一方、華北平野の中央部の氾濫原や東部の海岸平野では、若干低下していますが、西部ほど顕著な水位低下は認められません。これは浅層地下水が塩水のため、あまり利用されていないことによると考えられます。

2) 深層

第10図は華北平野深層地下水位分布図(1980年12月)と同(2001年12月)を比較した図面です。1984年の分布図は、北京、天津、德州で局所的な低下が認められますが、全般的には地形高度に対応した地下水の水位レベルを示しています。これは基本的には自然状態を反映した水位分布と言えます。一方、2001年では、その分布の様子が大きく変化しています。具体的に言いますと、最南部を除いて、全域で平均約20-40mの顕著な水位低下が生じています。水位の低いところほど(一般的には低地ほど)、大きな水位低下が生じています。これは浅層地下水が、

中央部から東部では塩水のため、深層地下水の淡水を農業用水に使用しているためと思われます。平均的な水位低下速度は1-2m/年です。一方、廊坊、滄州、德州などでは、平均的な地下水低下に加えて、更に局所的に17年間で50mほどの漏斗状の水位低下域が生じています。これは主に工業用水と都市の生活用水に使用されたものと思われます。このように、世界の穀倉地帯である華北平野は、その深層地下水が急激に低下して、ますますより深い深層地下水に頼らざるを得なくなってきています。しかしながら、深層地下水は涵養量が僅かであることから、再生可能な資源ではなく、使えば近い将来に汲み尽くすこととなります。また、現状の地下水位の低下レベルでさえも、深刻な地盤沈下や水質悪化などの問題が生じています。

7.2 第四紀地質図

華北平野の第四紀地質は邵 吋雄・王 明德主編(1986)により「中国黄淮海平原地貌図(縮尺1:1,000,000)と同説明書」として取りまとめられています。この地質図では広義の華北平野が図面化されています。また、いくつかの測線に沿った第四紀地質断面図も示されています。

7.3 華北平野での地下水位低下と水理地質との対比

上記の地下水位断面図と、ほぼその近傍の地質断



第11図  
地下水位断面と地下水断面の  
測線位置図。

面を比較検討することで、どの帯水層でどの程度の地下水低下が生じているの明らかにしました。以下、測線毎に説明します。地下水位断面図と地質断面図の側線位置は第11図に示す通りです。

(1) 北京-天津における地下水位低下と地質との対比

1) 浅層(地表から標高0m準)不圧地下水(第12図)

北京周辺の浅層地下水は16年間で20m以上の急激な水位低下が生じています。これは第四系区分 $Q_3$ の山麓扇状地に堆積した礫層部に相当しています。後背地の山地に降った天は浅層地下水に涵養されているはずですが、それ以上のスピードで揚水量が増大しているために、地下水位は、水理基盤である先第四系基盤岩に近づきつあると思われます。一方、断面線の中-東部では、浅層地下水の帯水層は第四系区分 $Q_4$ に局所的に発達する砂層を中心に存在すると考えられます。しかし、顕著な水位低下は認められません。それは中-東部の浅層地下水が塩水のた

め、農業用水として利用されていないことに起因しています。また、天津市内では第四系からの地下水汲み上げは禁止されています。

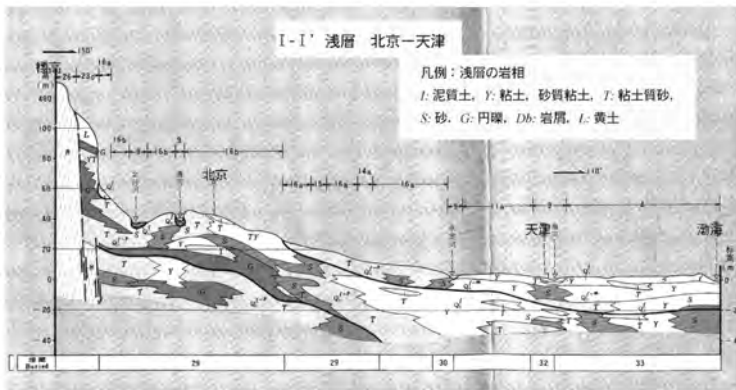
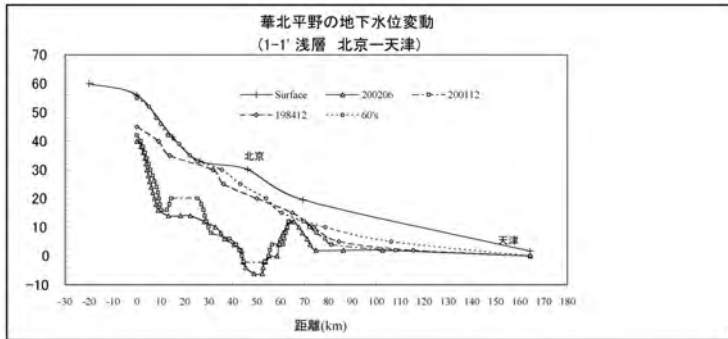
2) 深層(地表から標高-100m準)被圧地下水(第13図)

両者の断面位置が少し斜交していますが、北京北東方での急激な水位低下は第四系区分 $Q_{2-3}$ の山麓礫層部で生じていると思われます。天津の東方から大港にかけては、標高-20mから-80mの砂層で急激な水位低下が生じています。これは第四系区分 $Q_3$ の砂層に相当します。この帯水層では海成粘土層が帯水ゾーンを上下に区分しています。これらの帯水層での地下水位の低下は、渤海湾からの海水の進入を促していると思われます。

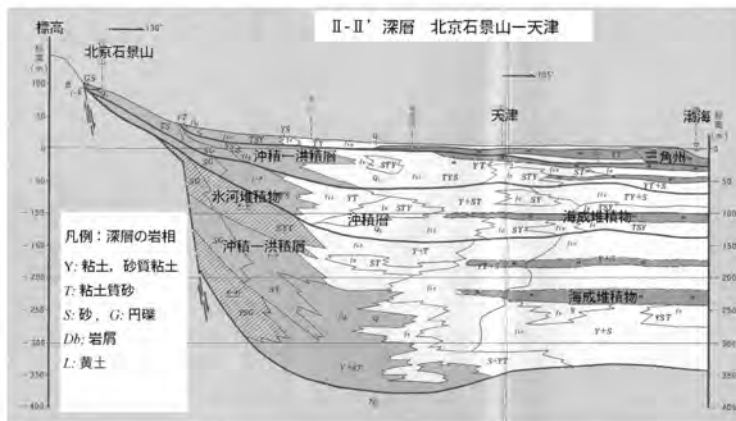
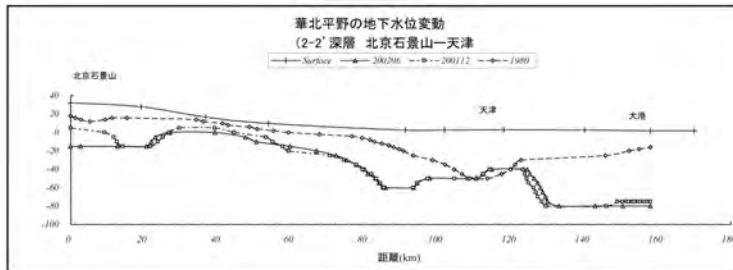
(2) 石家庄-齐河における地下水位低下と地質との対比

1) 浅層(地表から標高0m準)不圧地下水(第14図)

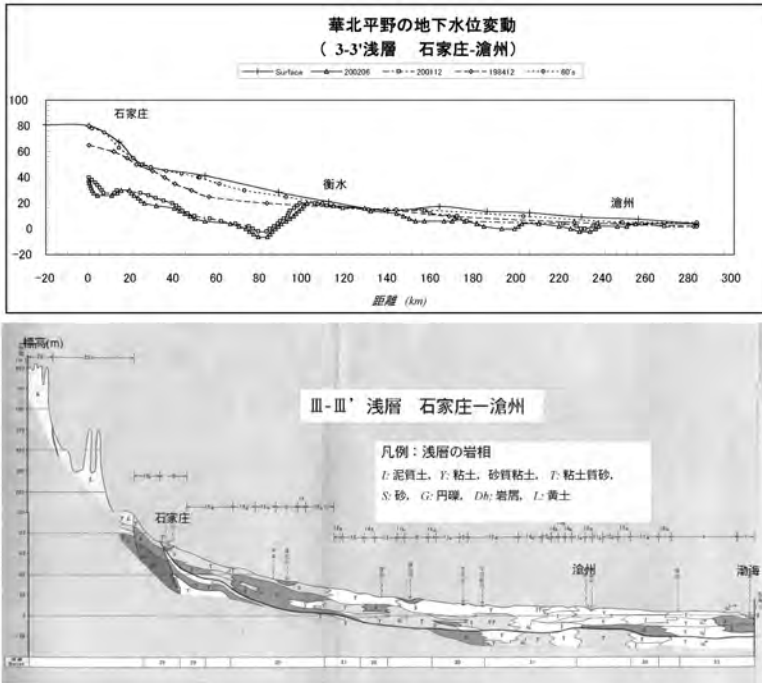
両者の断面位置は中央部で大きくずれていますが、



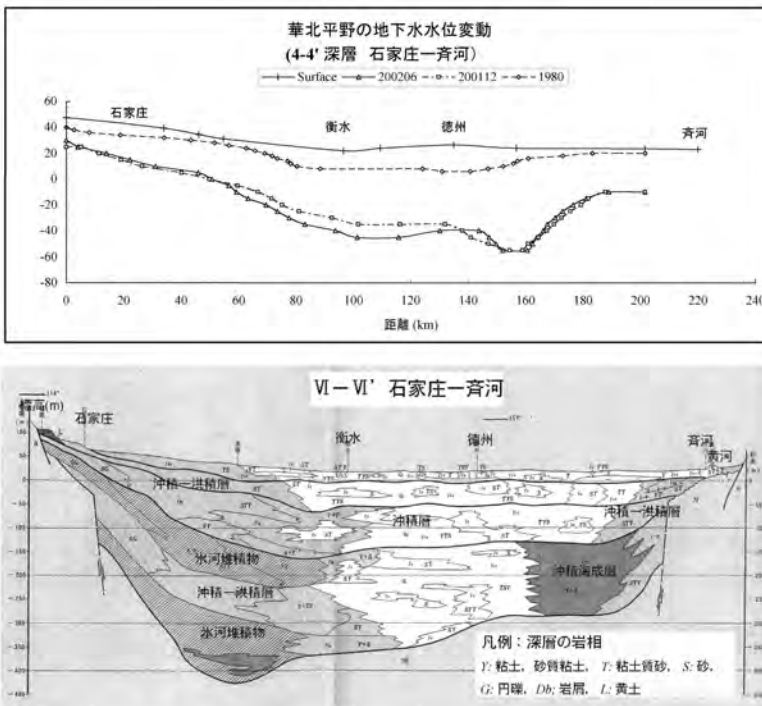
第12図  
北京-天津における浅層地下水の  
低下と第四紀地質断面との比較。



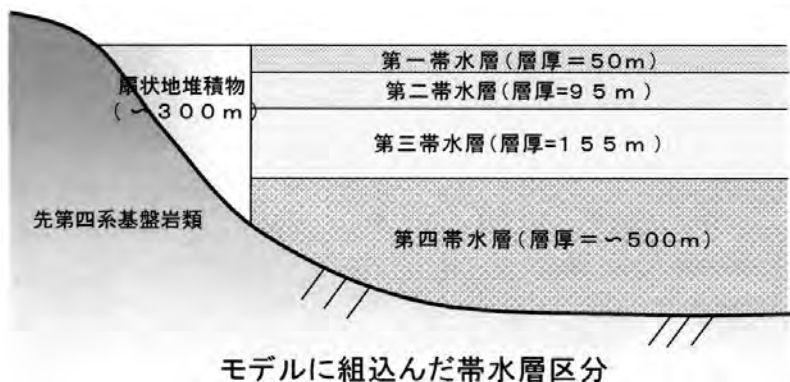
第13図  
北京-天津における深層地下水の  
低下と第四紀地質断面との比較。



第14図  
石家庄-滄州における浅層地下水の低下と第四紀地質断面との比較。



第15図  
石家庄-齊河における深層地下水の低下と第四紀地質断面との比較。



第16図  
モデルに組み込んだ帯水層区分  
(森ほか, 2006).

地質層序は南北方向ではさほど変化していないので、対比に問題はないと判断します。石家庄から衡水における急激な水位低下は、第四系区分 $Q_4$ の扇状地堆積物の砂層部分に対比できます。涵養域からの水供給が不足しているため、揚水量に応じて地下水面が低下しています。一方、衡水から滄州では浅層地下水位はほとんど地表付近で変化していません。ここでは帯水層は局所的に分布する第四系区分 $Q_4$ の砂層部分のみです。全体的に帯水層が薄く乏しい上に、塩水のため、農業用には使用されていないと推定されます。したがって、顕著な水位低下が生じていないと思われる。

2) 深層(地表から標高-50m準)被圧地下水(第15図)

両者の断面位置は、一部ずれています。地質層序を考慮すれば、対比に問題はないと判断します。急激な水位低下は、全域に亘って広く生じています。その低下量は両端の第四系区分 $Q_3$ の扇状地堆積物で30m程に対して、第四系区分 $Q_3$ の沖積層砂層部分では50m近くに達しています。深層帯水層では涵養域からの水供給が少ないので、このまま揚水を継続すると、水位は $Q_{1-2}$ の砂層の帯水層まで低下し、ついには水理基盤である先第四系基盤岩に到達し、汲みつくす事になります。 $Q_{1-2}$ での砂層の発達はあまり良くないので、ここには十分な地下水量を期待することは難しいかもしれません。

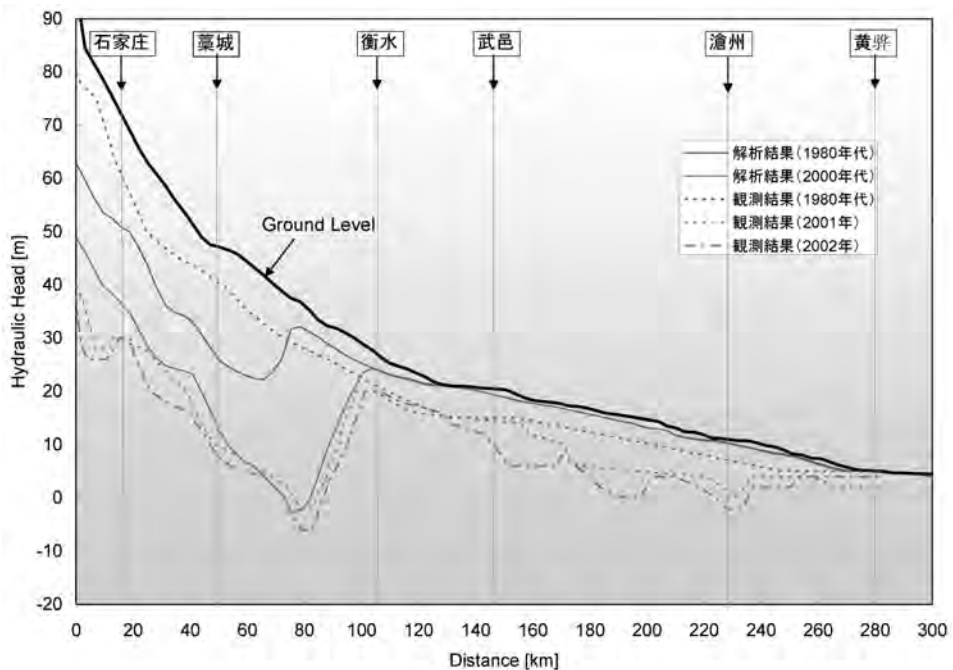
8. 流体流動シミュレーション結果との比較

森ほか(2006)は黄河流域全域の地下水流動のシミュレーションを行っています。それによると上流域、中流域、下流域でそれぞれ特徴的な流動パターンが

得られています。下流域の華北平野では西から東への広域地下水流動がシミュレートされています。但し、正確な地下の透水性分布が不明である上に、経年的な降水量や揚水量が不明であるため、あくまでも現時点で得られているデータに基づいて広域的な流体流動シミュレーションを行っています。その一つとして、水位低下とのマッチングを行っています。はじめに華北平野に対して第16図のような帯水層区分モデルを設定し、それぞれの帯水層に対して、第4表のような透水係数を付与しています。第1帯水層と第3帯水層で透水係数を相対的に大きく、第2帯水層と第4帯水層で透水係数を相対的に小さく与えています。また、鉛直方向の透水性は水平方向の透水性の1/10と仮定しています。さらに、それぞれの透水性の間には帯水層間の中間粘土層を設定して、その透水係数は極めて低く設定しています。これらの透水係数は、1960年代の水頭分布を再現できるよう、試行錯誤して求めています。こうして得られた透水係数を用いて、石家庄から滄州および黄[馬華]にかけての浅層地下水の水位低下(3-3'の深層地下水位に対応)のマッチングを行っています。その結果は第17図に示すとおりです。これによりますと、全体的な傾向は復元できています。しかし、詳細に見ると1980年代の水位へのマッチングでは、石家庄から衡水西方にかけては低下量が過大評価され、逆に衡水から滄州にかけては過小評価となっています。一方、2000年代の水位へのマッチング結果では、石家庄から衡水西方にかけては良く一致していますが、衡水から滄州にかけては大きく過小評価となっています。これは、それぞれの帯水層の間に設定した中間粘土層の垂直方向の透水係数を、あまりにも小さく設定したこと、および扇状地

第4表 数値シミュレーションのために付与した各地層単元毎の透水係数 (森ほか, 2006).

地質名	区分	層厚分布 (m)	透水係数 (cm/s)		有効空隙率 (%)
			水平	鉛直	
火成岩	全層		$1.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^5$	10
新生代堆積岩	全層		$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$	20
湖成堆積物	上部層	0~500	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	15
	下部層	500~	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	10
黄土	全層		$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	15
河床堆積物	上部層	0~500	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$	20
	下部層	500~	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	15
崖錐堆積物	上部層	0~500	$1.0 \times 10^3$	$1.0 \times 10^3$	20
	下部層	500~	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	15
砂丘	全層		$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$	20
砂漠	上部層	0~300	$1.0 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-2}$	25
	下部層	300~	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$	20
氷河堆積物	全層		$1.0 \times 10^4$	$1.0 \times 10^4$	15
扇状地堆積物	全層		$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	20
沖積地堆積物	表土	0~10	$1.0 \times 10^1$	$1.0 \times 10^1$	20
	第一帯水層	10~50	$1.0 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-2}$	20
	帯水層間		—	$1.0 \times 10^{-7}$	—
	第二帯水層	50~145	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-4}$	20
	中間粘土層		—	$1.0 \times 10^{-7}$	—
	第三帯水層	145~300	$1.0 \times 10^2$	$1.0 \times 10^{-3}$	20
	中間粘土層		—	$1.0 \times 10^{-7}$	—
	第四帯水層	300~	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-5}$	10



第17図 石家庄-滄州における深層地下水の水位低下マッチング結果 (森ほか, 2006).

堆積物の垂直方向の透水係数が小さ過ぎることに関係しているように思われます。しかしながら、これらの入力パラメータの精度を上げるためには、まず透水係数の三次元分布や各水井戸からの揚水量について、もっと正確なデータを得ることが先決と思われます。

## 9. 華北平野の地下水低下の水理地質学的な解釈

玉生ほか(2005)は中国側の水位観測データと第四紀地質図に基づいて、1960年から2002年までの地下水過剰生産による水頭の急激な低下が、どのような地質条件の場所で生じているか検討しました。その結果、水位低下の生じている場所は第四系岩相分布と密接不可分に関連していることが明らかになりました。浅層の不圧地下水においても、深層の被圧地下水においても、地下でパッチ状(局所的)に分布する礫・礫が帯水層を形成しているのに対して、薄く水平に広く分布する粘土やシルトなどは難透水層となっています。これらの礫・砂・シルト・粘土の岩相分布は、西部の山麓部では扇状地堆積物として、中央部の汎濫原では河川堆積物として、また東部の沿岸部では三角州堆積物などの沿岸堆積物として、それぞれ形成され、それらの堆積環境を反映しています。そのうち、帯水層として地下水を貯留し得る多孔質な部分は礫・砂の堆積した箇所です。そのため、このような場所で、特に塩水でない中央部から西部にかけての深層地下水が集中的に揚水されてきました。過去30-40年間汲み上げを継続したために、地下水の水位は著しく低下しました。これらの地下水は年代が約1万年前後と大変古い水で、地表からの天水の補給もわずかです。華北平野の深層地下水は長年かけて貯留された化石的な資源であり、決して再生可能な資源ではありません。したがって、地下水を汲み上げれば、それだけ水位が低下することになります。一方、第四系の下位の基盤岩類中では、一部の断層に伴う裂か性帯水層以外は、孔隙性の帯水層は期待できません。そのため、このまま地下水の生産を継続すると、水位が第四系基底の地下300-400mほどに達した時に地下水は完全に枯渇することになります。それ以前の段階でも、井戸の掘削費用は深くなるほど高価になるため、水井戸を掘削することが困難となります。また、地下水水位が低下するに従って、地盤沈下、不飽和帯の拡大、地下の酸化還元状態の変化、溶存ガス

の脱ガス、地下水の引き込み、水質の悪化、塩害などが発生し、深刻な環境悪化をもたらすこととなります。すでに天津などのいくつかの都市では、地盤沈下や塩害などの問題が生じています。

最後に、再生利用可能な水利用の方法の一つ提案します。それは都市における下水を浄化し、地下に還元・貯留させるシステムを構築することです。このような地下還元がうまくいけば、将来的な水資源の再生利用の可能性が生まれてきます。まずは、モデルフィールドとして難透水層に囲まれた不圧帯水層を選定し、その内面を漏水対策としてシーリング処理をします。その後、テストフィールドに処理水を充填し、どの程度の期間、貯留維持できるかテストしてみる必要があります。このような地下貯留システムが、技術的にも経済的にも成立し得るか否か、検討するに値すると思われます。

**謝辞：**本研究を進めるに当たり、中国地質調査局天津地質鉱産研究所、中国水文地質環境地質研究所、中国地質環境監測院を訪問し、貴重な情報を得ました。張 兆吉氏には華北平野の水理地質について教示して頂きました。韓 占涛氏、高 存栄氏、徐 慧珍氏には、現地調査に同行して頂きました。また、2003年当時、日本石油公団 北京事務所に駐在していた石田 聖氏には、北京での情報収集活動に便宜を図って頂きました。2005年3月につくば市で開催された日中共同「黄河プロジェクト」ワークショップでは、武 選民氏をはじめ多くの中国側参加者から、最新の情報を教えて頂きました。石井武政氏をはじめとする黄河地下水グループの方々には、日頃から種々、便宜を図って頂きました。以上の方々から心から感謝申し上げます。

## 引用文献

- Brown, L. R. (2003) : 「持続不可能な水使用で食料バブルが世界で起こっている」(Eco-Economy Updates 2003-2). <http://www.worldwatch-japan.org/NEWS/ecoeconomyupdate2003-2.html>.
- Chen, J., Tang, C., Sakura, Y., Kondoh, A., Yu, J., Shimada, J. and Tanaka, T. (2004) : Spatial geochemical and isotopic Characteristics associated with groundwater flow in the North China Plain. *Hydrological processes*, 18, 3133-3146.
- Chen, Z., Nie, Z., Zhang, Z., Qi, J. and Nan, Y. (2005) : Isotopes and sustainability of ground water resources, North china Plain. *Ground Water*, 43 (4), 485-493.
- 中国地質科学院水文地質環境地質研究所(内部資料)「華北平原地下水可持続利用前景」項目中間成果図。

- Foster, S., Garduno, H., Evans, R., Olson, D., Tian, Y., Zhang, W. and Han, Zaisheng (2004) : Quaternary aquifer of the North China Plain - assessing and achieving groundwater resources sustainability. *Hydrogeology Journal*, vol.12, p. 81-93.
- 石井武政 (2004) : 中国黄河流域の水文環境. *Green Report 2004 第1部講演要旨*, 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門, p. 9-12.
- 石井武政 (2007) : 本報告. *地質ニュース*, no. 629, p. 11-14.
- 国際協力銀行開発金融研究所 (2004) : 中国北部水資源問題の実情と課題 - 黄河流域における水需給の分析. *JBIC Research Paper No. 28, 83P.*, 付-15, 補論33.
- 近藤昭彦・田中 正・唐 常源・佐倉保夫・嶋田 純・芝野博文・劉 昌明・張 万軍・胡 春勝・劉 小京・李 紀人・陳 建耀・沈 彦俊 (2001) : 中国華北平原の水問題. *水文・水資源学会誌*, vol. 14, p. 376-387.
- 森 康二・西岡 哲・多田和宏・登坂博行 (2006) : 地下水循環モデルの構築とシミュレーション. H17年度RR2002課題6 成果報告会. 2006年4月14-15, 総合地球環境学研究所 (京都市).
- 水利部水資源司 南京水利科学研究院 (2004) : 21世紀初期中国地下水資源開発利用. 中国水利水電出版社, 北京, 315p.
- 邵 吋雄・王 明德主編 (1986) : 中国黄淮海平原地貌図 (縮尺1 : 1,000,000) と同説明書. 地質出版社.
- 新藤静夫 (2005) : 日さくジオドクターの野帳から. 第5回 中国の水問題. 22P. <http://www.nissaku.co.jp/geo/05/geo05.01.html>.
- 玉生志郎・村岡洋文・石井武政, 張 兆吉・韓 占濤・高 存榮・徐 慧珍 (2005) : サブテーマ (5) 課題1④ 帯水層区分および地質構造の解析 (その2). 「アジアモンスーン地域における人工・自然改変に伴う水資源変化予測モデルの開発」平成16年度研究成果報告書. p.129-133.
- 玉生志郎・村岡洋文・石井武政, 張 兆吉・韓 占濤・高 存榮・徐 慧珍 (2006) : サブテーマ (5) 課題1④ 帯水層区分および地質構造の解析 (その3). 「アジアモンスーン地域における人工・自然改変に伴う水資源変化予測モデルの開発」平成17年度研究成果報告書. p.139-143.
- 楊 大文 (2005) : 黄河流域の水資源問題. *河川文化 河川文化を語る会講演集<その十九>*, p. 5-65.
- Wu, C., Xu, Q., Zhang, X. and Ma, Y. (1996) : Palaeochannels on the North China Plain: types and distributions. *Special Issue "Studies of the palaeochannels on the North China Plain"*, *Geomorphology*, vol.18, Issue 1, p.5-14.
- 武 選民 (2005) : “黄河流域地下水均衡, 循環和利用的模擬和予測研究” 進展概況 (シンポジウム講演/パワーポイント資料) 日中共同「黄河研究課題」研究会, つくば市, 2005年3月23日.
- 張 兆吉・大坪国順・石井武政 (2001a) : 中国の河北平原における地下水資源の現状と将来予測. *水工学論文集*. Vol. 45, p. 361-366.
- 張 兆吉・大坪国順・石井武政 (2001b) : 中国河北平原における過度な土地利用活動が地下水資源へ及ぼす影響. *環境科学会誌*, vol. 14, p. 297-300.

---

TAMANYU Shiro, MURAOKA Hirofumi and ISHII Takemasa (2007) : Groundwater level lowering in the North China Plain.

---

<受付: 2006年11月2日>