

地下水循環モデルの構築とシミュレーション

森 康二¹⁾・多田 和広¹⁾・西岡 哲¹⁾

1. はじめに

黄河上流域では、地下水の入れ物となる水盆構造が少なく利用可能な地下水資源は限られる。そのため、生活用水や農業用水などの水利用の多くは河川水を主とした地表水に拠っている。下流域は、上流域での河川水取水によって、必然的に利用可能な地表水資源が制限される一方、広大な地下水盆を水がめとした豊富な地下水資源に恵まれ、上流とは水資源貯存量の傾向が逆転する事態となる。

近年世界的に知られるようになった黄河の断流は、こういった水資源の偏在性をもつ流域での過剰な水利用と需給バランスの不均衡を背景として顕在化した1つの姿であろう。黄河における地下水資源の実態把握は、地表水との係わりはもちろん、上流から下流までが互いに関係をもったシステムとしての姿を正しく捉える必要があり、源流から河口に至る流域全体を模擬した数値モデルによる総合シミュレーションが有効な手段である。

本研究では、黄河源流から河口に及ぶ約160万km²の領域について、地下水資源量予測のための三次元水循環モデルを構築した。本モデルには地形、地質、気象、観測井戸等の現時点で利用可能な様々なデータを反映している。数値シミュレーションは、約140万格子規模の三次元モデルを用いて、クラスタ計算機による地表水・地下水連成解析を実用化した。構築モデルの再現性は、中国側資料との比較および中国地質調査所との情報交換に加えて、現地水文調査データとの比較を通じて検証を行っている。

本小論では、現在構築中の黄河領域地下水資源予測モデルの現状について述べる。

2. 黄河領域の三次元数値モデリング

2.1 対象領域

数値シミュレーションの対象領域は、黄河源流から河口を含む2,200km×1,100kmの範囲とする(第1図)。本対象領域は、良く知られる黄河流域界とは異なり、幾分広い範囲を含めている。特に下流部は、本来の黄河流域が図中に示されるごとく本流近傍の非常に限られた範囲であるのに対し、対象領域は河北平野を含む広い領域を考える。一般に言われる流域界の多くは、主に地形から推定されるが、地下水を含めて考えた場合、流域界は地下の地質構造とも関係するため必ずしも地形のみでは決まらない。雨季、乾季などの季節的な違いも存在するだろうし、また、人間の水利用によっても影響を受けるであろう。

以上のことから、本研究では対象領域を黄河流域と河北平野を含む範囲として定義し、ここでは「黄河領域」と呼ぶことにする。一般的に用いられる黄河の流域界とは区別して考える。



第1図 解析対象の範囲。

1) (株)地圏環境テクノロジー

キーワード:黄河, 地下水資源, 数値シミュレーション

2.2 地表水および地圏流体の支配方程式

地下地盤中に存在する水や空気等の地圏流体は地上における様々な状態変化を受けながら相互に干渉し合いながら流動している。地上で観察される水がこういった地圏流体流動と密接に関係する点は言うまでもない。

水循環を構成する地表水と地下水は流速が極端に異なり、両者を同時に解くことは通常困難である。Tosaka, et al. (2000)は、地表流動を一般化されたダルシー則と同型の運動方程式として定式化することで実用規模の3次元問題を高速で解くことを可能にした。

いま、対象とする水循環過程を地表及び地下の水・空気2相流れとして考え、これを以下に示す一般化されたダルシー則で表す。

$$\nabla \left(\frac{Kkr_g}{\mu_g B_g} \nabla \Psi_g \right) - q_{gs} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_g}{B_g} \right)$$

$$\nabla \left(\frac{Kkr_w}{\mu_w B_w} \nabla \Psi_w \right) - q_{ws} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_w}{B_w} \right)$$

ここで、 K は絶対浸透率 (m^2)、 kr_p は相対浸透率 (frac.)、 μ_p は粘性係数 ($Pa \cdot s$)、 B_p は容積係数 (m^3/m^3)、 ϕ は空隙率 (frac.)、 S_p は飽和率 (m^3/m^3)、 q_p は標準状態における単位体積、単位時間当たりの生産圧入速度 ($m^3/m^3/s$)である。添え字 $p=w, g$ は水及び空気の各流体相に関する諸量であることを示す。

沿岸域では海水の進入によって塩分を含む水が存在するため、上記の水・空気2相流れと同時に、以下に示す水相中の溶存塩分の移動 (移流分散方程式)を考慮する必要がある。

$$\nabla \left(\frac{Kkr_w R_s}{\mu_w B_w} \nabla \Psi_{cw} \right) + \nabla \left(D_s \nabla \frac{R_s}{\alpha_{cw}} \right) - q_{cs}$$

$$= \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_w R_s}{B_w} \right)$$

ここに、 R_s は水相中に溶存する塩分濃度 (m^3/m^3)、 D_s は分子拡散と力学的分散を重ね合わせた分散係数 (m^2/s)、 q_{cs} は標準状態における単位体積、単位時間当たりの塩分の生産圧入速度 ($m^3/m^3/s$)である。

以上の3式は、幾つかの補助方程式と組み合わせることで、①空気相の圧力、②水相飽和率および③塩分濃度を主変数として数値的に解くことが可能で

ある。

2.3 数値シミュレーション手法

上述した支配方程式を積分型有限差分法 (IFDM) によって空間離散化すると、7重対角行列を係数行列とした連立方程式を得る。行列の各成分は解くべき変数である圧力、水相飽和率および塩分濃度を未知数とした 3×3 の小行列となり、システム全体の自由度は格子数 \times 未知数となる。

これをNested Factorizationと呼ばれる三次元構造格子の入れ子構造に着目した前処理を行い共役残差法で解く。流体の圧縮性や2相流パラメータの非線形性はニュートン・ラプソン法により繰り返し収斂させる。

また、大容量計算を高速処理するため、非線形反復過程の中で収斂した格子をソルバーから自動的に除外する逐次陽化処理 (Successive Locking Process) や領域分割 (Domain Decomposition) 法によるカラー並列計算等を採用し、実用規模の三次元問題をより効率的に解く。

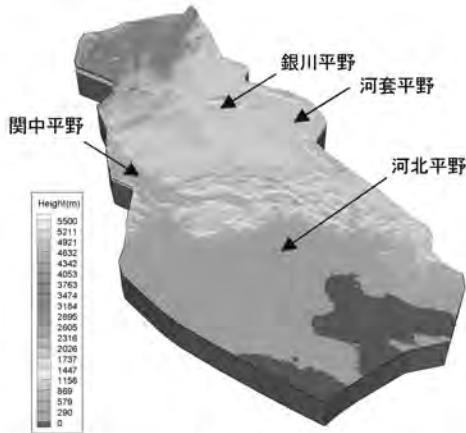
3. 黄河領域モデルの基本仕様

3.1 三次元格子システムと解析条件の基本設定

第2図に黄河領域の三次元モデル図を示す。総格子数は1,413,600、平面内は黄河本流と主要な支流形状、地形形状および地下水位・水温等の地上観測点の配置を勘案し、東西方向372分割 \times 南北方向190分割 (平面70,680格子)に分割した。空間分解能は平均で 0.1° (約10km)程度となるよう作成している。鉛直方向は深度20kmまでを20分割の格子に割り当て、地表付近の地下水盆は幾分精緻に分割した。

同図下段は、構築した三次元格子モデルに水理地質構造を組み込んだものである。領域全体における第四系等層厚面、地殻熱流量から推定される浸透率基盤面、断層、浸透率の深度 (圧力) 依存性等の基本構造をモデル化した。浸透率基盤は脆性-塑性境界の深度より深い部分と定義し、基盤内での流体の可動性は考えない (浸透率=0) こととした。

脆性-塑性境界は、地殻熱流量より推定される地温勾配を用いて、温度 $380^\circ C$ になる深度とした (村岡ほか, 2005)。また、主要な断層破碎帯についても、平均的な角度 (正断層 70° 、横ずれ断層 90° 、逆断層



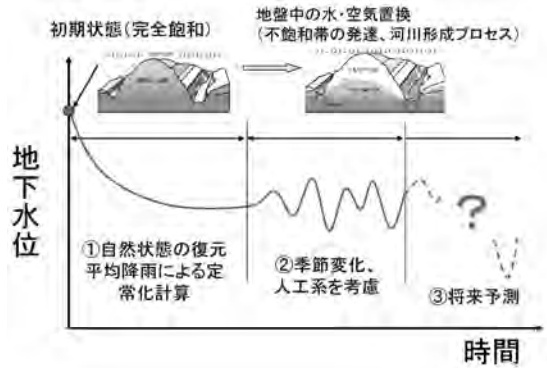
第2図 黄河領域モデル鳥瞰図.

50°)でその水理性状を考慮した。下流域の河北平野については第1~4帯水層とこれを挟む粘土層、扇状地堆積物を表現した。

第1表に構築モデルの基本仕様を要約する。

3.2 解析手順

上記で設定した基本条件を組み込み、対象流域における平均的な流況(平衡流動場)を再現するための領域初期化を行った。まず始めに、地上に水が無く、水面を地形に同じくした完全飽和の状態を作成する。この状態から出発し、流域の平均降水量を与え続け、水、空気、の2相流挙動を追跡する。その間、低地では湧水が起こり、また河川が形成される。同時に高地では地盤内に空気が侵入し、不飽和帯が発達する。次第に、与えられた降水量・地形・地質構造とバラ



第3図 解析手順の概念.

し、地表水・地下水が完全に一体化された流況が描き出される。この状態が地表水分布、水位、流量、湧水などのフィールドで観測されている諸量と一致するよう条件設定を再検討し繰り返し計算を実施する。具体的には、以下に示す諸情報を検証データとして用いた。

- ・ 源流域である青海省から河口域の山東省にかけて取得された全96地点の水位観測データ
- ・ 水素・酸素安定同位体および一般水質から推定される広域地下水流動の概念
- ・ ¹⁴C年代測定データ
- ・ 中国側からの提供資料(主要地下水盆の帯水層構造と水位)
- ・ 一般文献(河川流量、地下水揚水量など)

次に、季節変化や水利用を考慮したときの水位、流量等の時間変化データの再現性を検証する。現時点では、利用可能なデータが限られ、これらの検証作業は必ずしも十分ではない。しかしながら、本プロジェクトで取得した水位観測データ、中国地質調査局がインターネット上で公開中の地下水位長期観測データが蓄積されてきているため、これらのデータをもとに、検証を充実させる計画である。

将来予測については、水資源の需給バランスを予測した上でシナリオを立て、今後20年の地下水資源量の予測を行う計画である。

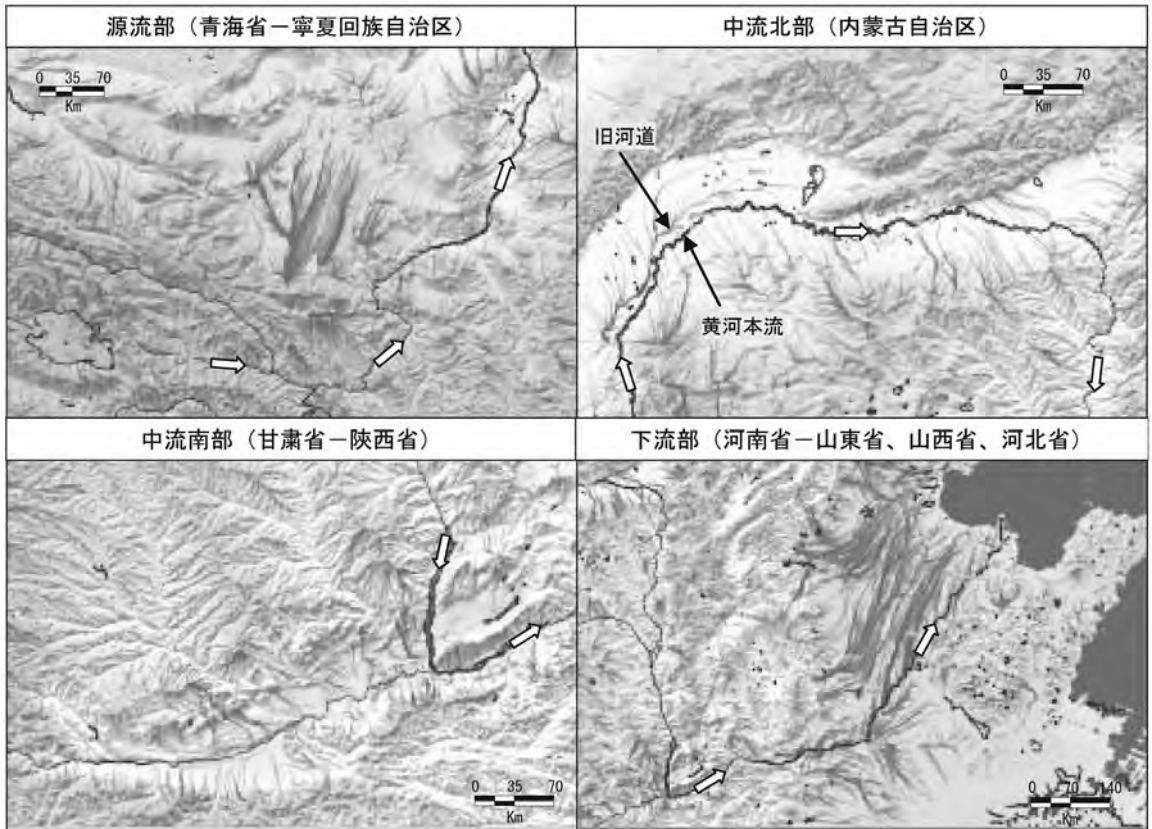
4. シミュレーション結果と考察

4.1 黄河領域の地下水循環システム

地下水利用などの人工的要因を考慮しない自然状

第1表 黄河領域モデルの基本使用.

項 目		基 本 仕 様		備 考																																																																																																																																	
基本条件	対象期間	自然状態(1960年以前), 1980年~2020年																																																																																																																																			
	解析領域	EW2,200km×NS1,100km (160万km ²)×深度20km																																																																																																																																			
	解析格子数	1,413,600 (372×190×20)																																																																																																																																			
	空間分解能	平均0.1° (10km)																																																																																																																																			
地 形	標高データ	陸域: SRTM3 (3秒メッシュ), 海底: ETOPO2 (2分メッシュ)		NASA, NGDC																																																																																																																																	
気象条件	降水データ	1971-2000, 1951-1990地上観測データ																																																																																																																																			
	気温データ	同 上																																																																																																																																			
	蒸発散量	気温分布に基づきハーモン式より推定した可能蒸発散量を設定																																																																																																																																			
	気圧データ	標高を考慮した標準大気圧																																																																																																																																			
流体条件	地表水流動	マニング型の開水路流れ																																																																																																																																			
	地下水流動	一般化ダルシー流れ																																																																																																																																			
	流体相	水, 空気2相流動系																																																																																																																																			
	流体物生	水相	密度 : 1.0 [g/cm ³ 粘性係数 : 1.0 [Pa・s] 圧縮率 : 0.45 [GPa ⁻¹]	理科年表2002 (国立天文台, 2002)																																																																																																																																	
ガス相	密度 : 1.3×10 ⁻³ [g/cm ³ 粘性係数 : 1.0×10 ⁻² [Pa・s] 圧縮率 : 容積係数として入力 (圧力の逆数に比例)																																																																																																																																				
水理地質	地質区分	先第四系基盤岩類, 第四系堆積層群, 浸透基盤, 断層		村岡ほか(2005, 2006)																																																																																																																																	
	絶対浸透率 有効空隙率	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">地質名</th> <th rowspan="2">区 分</th> <th rowspan="2">層厚分布 (m)</th> <th colspan="2">透水係数 (cm/s)</th> <th rowspan="2">有効空隙率 (%)</th> </tr> <tr> <th>水 平</th> <th>鉛 直</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>火成岩</td> <td>全 層</td> <td></td> <td>1.0×10⁵</td> <td>1.0×10⁵</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>新生代堆積岩</td> <td>全 層</td> <td></td> <td>1.0×10⁻³</td> <td>1.0×10⁻³</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">湖成堆積物</td> <td>上部層</td> <td>0~500</td> <td>1.0×10⁻⁴</td> <td>1.0×10⁻⁴</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>下部層</td> <td>500~</td> <td>1.0×10⁻⁵</td> <td>1.0×10⁻⁵</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>黄 土</td> <td>全 層</td> <td></td> <td>1.0×10⁻⁴</td> <td>1.0×10⁻⁴</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">河床堆積物</td> <td>上部層</td> <td>0~500</td> <td>1.0×10⁻³</td> <td>1.0×10⁻³</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>下部層</td> <td>500~</td> <td>1.0×10⁻⁴</td> <td>1.0×10⁻⁴</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">崖錐堆積物</td> <td>上部層</td> <td>0~500</td> <td>1.0×10⁰</td> <td>1.0×10⁰</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>下部層</td> <td>500~</td> <td>1.0×10⁻⁴</td> <td>1.0×10⁻⁴</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>砂 丘</td> <td>全 層</td> <td></td> <td>1.0×10⁻³</td> <td>1.0×10⁻³</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">砂 漠</td> <td>上部層</td> <td>0~300</td> <td>1.0×10⁻²</td> <td>1.0×10⁻²</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>下部層</td> <td>300~</td> <td>1.0×10⁻³</td> <td>1.0×10⁻³</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>水河堆積物</td> <td>全 層</td> <td></td> <td>1.0×10⁴</td> <td>1.0×10⁴</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>扇状地堆積物</td> <td>全 層</td> <td></td> <td>1.0×10⁻⁴</td> <td>1.0×10⁻⁴</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td rowspan="7">沖積地堆積物</td> <td>表 土</td> <td>0~10</td> <td>1.0×10⁰</td> <td>1.0×10⁰</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>第一帯水層</td> <td>10~50</td> <td>1.0×10⁻¹</td> <td>1.0×10⁻²</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>帯水層間</td> <td></td> <td>—</td> <td>1.0×10⁻⁷</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>第二帯水層</td> <td>50~145</td> <td>1.0×10⁻³</td> <td>1.0×10⁻⁴</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>中間粘土層</td> <td></td> <td>—</td> <td>1.0×10⁻⁷</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>第三帯水層</td> <td>145~300</td> <td>1.0×10⁰</td> <td>1.0×10⁻³</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>中間粘土層</td> <td></td> <td>—</td> <td>1.0×10⁻⁷</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>第四帯水層</td> <td>300~</td> <td>1.0×10⁻⁴</td> <td>1.0×10⁻⁵</td> <td>10</td> </tr> </tbody> </table>		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		1.0×10 ⁵	1.0×10 ⁵	10	新生代堆積岩	全 層		1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	20	湖成堆積物	上部層	0~500	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴	15	下部層	500~	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵	10	黄 土	全 層		1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴	15	河床堆積物	上部層	0~500	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	20	下部層	500~	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴	15	崖錐堆積物	上部層	0~500	1.0×10 ⁰	1.0×10 ⁰	20	下部層	500~	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴	15	砂 丘	全 層		1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	20	砂 漠	上部層	0~300	1.0×10 ⁻²	1.0×10 ⁻²	25	下部層	300~	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	20	水河堆積物	全 層		1.0×10 ⁴	1.0×10 ⁴	15	扇状地堆積物	全 層		1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴	20	沖積地堆積物	表 土	0~10	1.0×10 ⁰	1.0×10 ⁰	20	第一帯水層	10~50	1.0×10 ⁻¹	1.0×10 ⁻²	20	帯水層間		—	1.0×10 ⁻⁷	—	第二帯水層	50~145	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻⁴	20	中間粘土層		—	1.0×10 ⁻⁷	—	第三帯水層	145~300	1.0×10 ⁰	1.0×10 ⁻³	20	中間粘土層		—	1.0×10 ⁻⁷	—	第四帯水層	300~	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁵	10	地下水ハンドブック編集委員会編(1979), 他 沖積層の各帯水相区分は黄河下流域(河北平野)のみで考慮 透水係数, 有効空隙率は一般的な値に基づき推定
	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		1.0×10 ⁵	1.0×10 ⁵	10																																																																																																																															
新生代堆積岩	全 層		1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	20																																																																																																																																
湖成堆積物	上部層	0~500	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴	15																																																																																																																																
	下部層	500~	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵	10																																																																																																																																
黄 土	全 層		1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴	15																																																																																																																																
河床堆積物	上部層	0~500	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	20																																																																																																																																
	下部層	500~	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴	15																																																																																																																																
崖錐堆積物	上部層	0~500	1.0×10 ⁰	1.0×10 ⁰	20																																																																																																																																
	下部層	500~	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴	15																																																																																																																																
砂 丘	全 層		1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	20																																																																																																																																
砂 漠	上部層	0~300	1.0×10 ⁻²	1.0×10 ⁻²	25																																																																																																																																
	下部層	300~	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	20																																																																																																																																
水河堆積物	全 層		1.0×10 ⁴	1.0×10 ⁴	15																																																																																																																																
扇状地堆積物	全 層		1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁴	20																																																																																																																																
沖積地堆積物	表 土	0~10	1.0×10 ⁰	1.0×10 ⁰	20																																																																																																																																
	第一帯水層	10~50	1.0×10 ⁻¹	1.0×10 ⁻²	20																																																																																																																																
	帯水層間		—	1.0×10 ⁻⁷	—																																																																																																																																
	第二帯水層	50~145	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻⁴	20																																																																																																																																
	中間粘土層		—	1.0×10 ⁻⁷	—																																																																																																																																
	第三帯水層	145~300	1.0×10 ⁰	1.0×10 ⁻³	20																																																																																																																																
	中間粘土層		—	1.0×10 ⁻⁷	—																																																																																																																																
第四帯水層	300~	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁵	10																																																																																																																																	
相対浸透率	水相飽和率の関数として一般的傾向を一律に設定																																																																																																																																				
毛細管圧力	水相飽和率の関数として一般的傾向を一律に設定																																																																																																																																				
フレーム	水利用	文献値, 中国側資料に基づき浅層・深層水分分布と近年の水位低下から帯水層毎の必要揚水量を推定(河北平野のみ)		張ほか(2001)																																																																																																																																	
その他	土地利用	水田, 灌漑地, 草地, 森林地, 永久雪地, 砂漠, 塩地, 寒冷砂漠, 裸地, 湖沼ダム, 主要城市など全20区分		Geoinfo.China digital 400																																																																																																																																	
	境界条件	海域(渤海湾)の該当格子を海水境界, 側方境界はすべて閉境界(不透水境界)																																																																																																																																			



第4図 源流域・中流域・下流域の流況(図中⇒は黄河本流を示す).

態について、上で述べた領域初期化を行い、黄河領域全体の広域地下水流動の把握を行った。

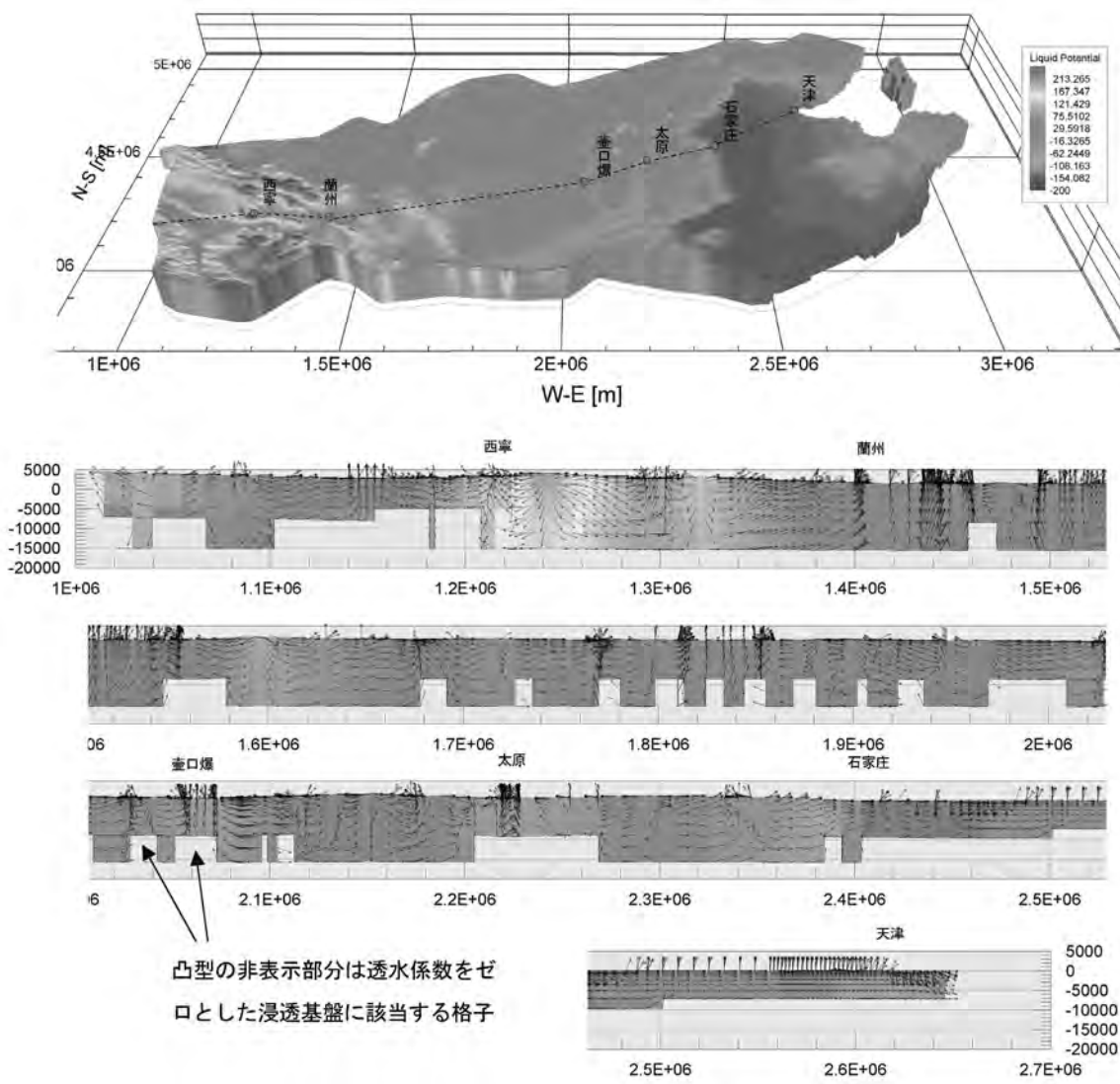
ここで示す数値シミュレーションの結果は、水位観測データや文献値等の検証データとの比較に加えて、中国地質調査局との幾度かのワークショップを通じて改定を重ねてきたものであり、現段階ではほぼ妥当な結果と考えられるものである。ここでは、これらの結果に基づいて、黄河領域の地下水循環システムの特徴について考察する。

第4図に数値シミュレーションの結果得られた黄河領域の流線網を示す。これは、地表面から涵養された地下水が湧出し、地表水となって流下する三次元経路を平面に投影して表示したものである。1つ1つの流線は地表水、地下水を区別していない。

それぞれの流動経路について滞留時間を求めた結果、上流域では滞留時間が長く流動経路が短いものが多く、下流域でそのほとんどの滞留時間が短く流動経路が長いものとなることがわかった。このことは、

水素・酸素安定同位体、一般水質に基づく地下水流動系の推定結果と整合する(内田ほか, 2005)。

中流北部の河套平野では、河道が北方から東方へ変化する現在の黄河本流に沿った旧河道の形跡が明瞭に再現されている。このあたりは、南から北方へ向かう地下水が北側の後背山地から涵養された地下水流と迎合し、地上へ湧出する特徴的な傾向が現れる結果となった。河套平野に多数の湧水や湖が存在するのはこういった流況と整合するものと考えられる。一方、下流域では上流域に対して滞留時間が短い、流動経路が数百kmと非常に長く、比較的透水性の高い帯水層中の安定な地下水流動を示している。このあたりの黄河本流は上流からの土砂輸送によって天井川となり地形もやや高い。涵養された地下水は河北平野の帯水層に供給される。また、河套平野に見られた旧河道と同様の流況が認められ、河南省を基点として黄河本流の経路が変化していた形跡が見られる。これらの流況は現地の状況と一致する。

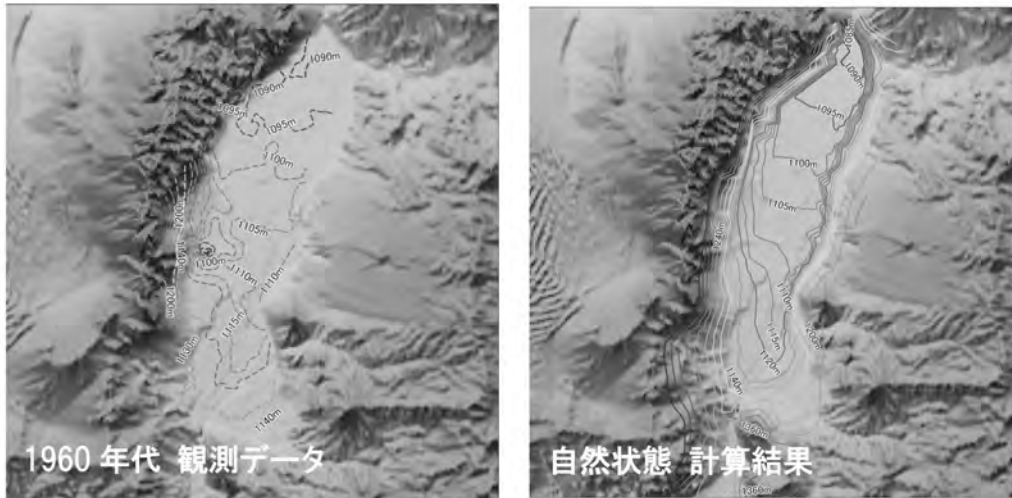


第5図 黄河領域の“水理ポテンシャル”分布図。

第5図は黄河領域の水理ポテンシャル分布を鳥瞰図及び黄河上流から河口までの深度断面図で示したものである。深度断面の位置は、上流域の西寧市周辺から黄河下流の天津市に至る約1,700kmとし、水理基盤に該当しない透水層の該当格子のみを表示した。図中に併記した流速ベクトルは地下水の流動方向のみを示すものであり、すべて同じ長さで示している。流速の大小関係に対応させたものではないことに留意されたい。

これより、黄河上流部で涵養した地下水はより深部へ潜り込み、低地で湧出する。地形起伏が著しい

ため、地下水は比較的近い谷地に湧き出し、湧出点も多数存在する。上流域の深部地下水は2,000km以上も離れた河口部まで到達することはなく、比較的近くの低域に湧出しており、閉鎖的な流動系を示している。それでも、滞留距離は数百km程度と非常に大きいため、一般的なスケールとは随分と感覚が異なる。中流域および下流域では、上流域に比較して地形起伏が少ないため、深部への潜り込みの傾向は少なく、また、湧出地点は黄河本流や主要な地下水盆に限られる。



第6図 銀川平野の不圧水位分布(左図：中国側資料, 右図：シミュレーション結果)。

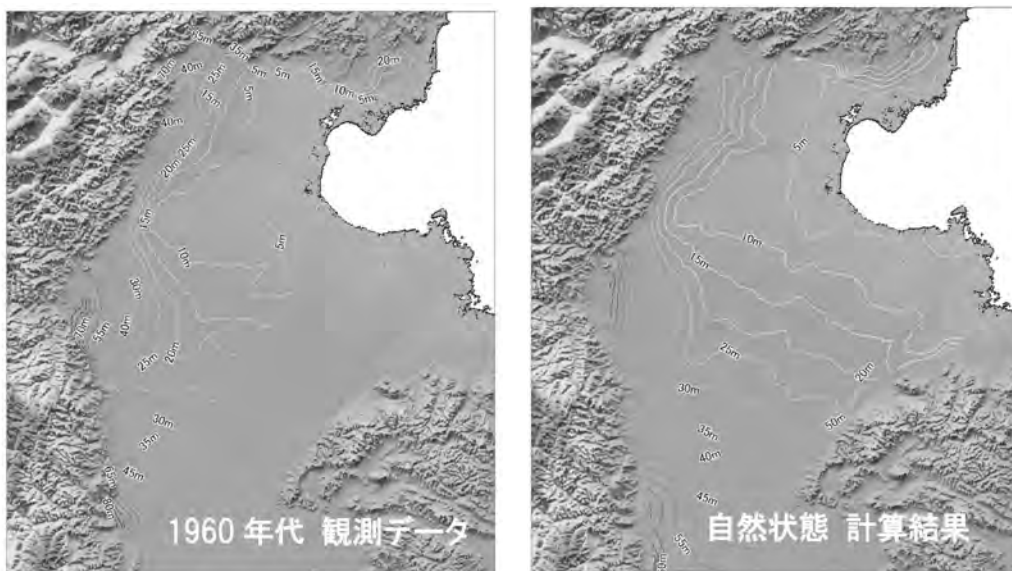
4.2 主要地下水盆の地下水と揚水量

上記の黄河領域全体のシミュレーション結果について、銀川平野、河套平野、関中平野、河北平野などの主要な地下水盆に着目し、それぞれの平野内の地下水水位分布を観測データと比較した。

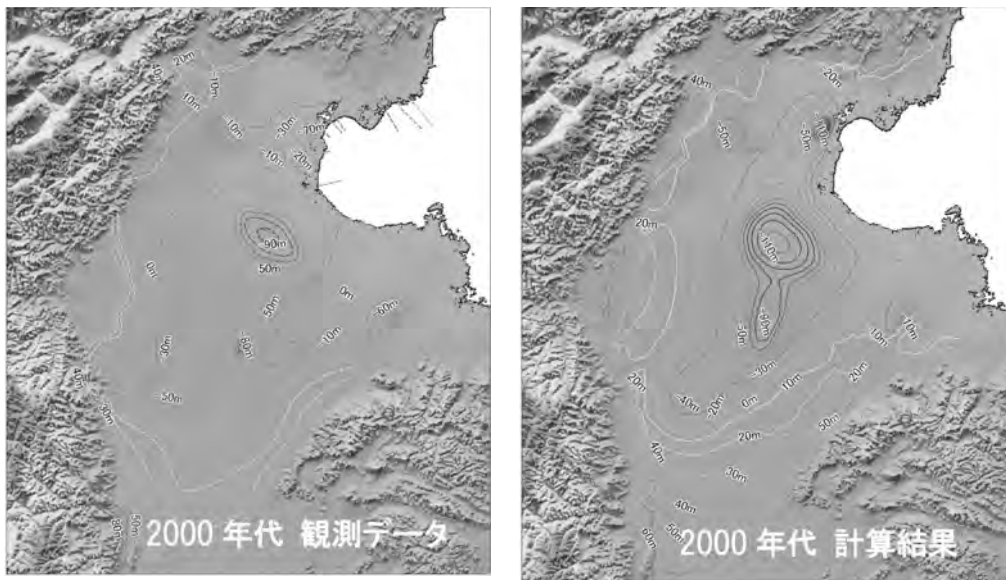
河北平野では、中国側の多数の井戸による水位観測が行われており、1960年代、1980年代、2000年代の浅層及び深層の等水位線図が作成されている。ここでは、これらの情報を基に行ったシミュレーション

結果と近年の地下水位の低下を説明する揚水量を推定した結果を示す。

第6図に銀川平野(寧夏回族自治区)の不圧水位コンターを示す。銀川平野の第四系堆積層は層厚2,000m以上と推定されている。深度300m前後の複数の観測井から作成された地質図によると銀川平野は4つの帯水層に区分される。第6図左は1960年代の観測値に基づいて中国側が作成したものであり、所々で揚水による水位低下域が認められる。同図右



第7図 河北平野の不圧水位分布(上図：中国側資料, 下図：シミュレーション結果)。



第8図 河北平野の深層水位コンター(2000年代)(上図:中国側資料, 下図:シミュレーション結果).

は、揚水条件を考慮しない自然状態のシミュレーション結果である。両者の比較から、平野内の主要な地下水流動とそれに沿った動水勾配 ($3 \times 10^{-4} \text{m/m}$ 程度) は概ね整合する結果が得られた。

同様に、河北平野(河北省・山東省)における不圧水位について観測データとシミュレーション結果を比較した(第7図)。

河北平野には一万本以上のボーリングによる浅層、深層地下水のモニタリングが行われており、主要な帯水層は4つに区分されている。水利用は全ての帯水層から行われており、特に第一、第三帯水層中の砂礫層は主要な給水層となっている(張ほか, 2001)。

第7図に示した比較結果から、観測値と計算結果は良く一致しており、涵養域となる後背山地から平野へ向かう比較的大きな水位勾配と平野中心部から渤海湾へ向かう緩やかな水位勾配がいずれも良く再現されている。このような傾向は、河北平野の帯水層構造とその水理特性に着目し、試行錯誤を繰り返すことによって得られた結果であり、特に扇状地堆積物の分布と透水性は平野内の流況を大きく左右する重要因子であることが明らかになった。

なお、紙面の都合上割愛するが、その他の主要な地下水盆についても同様の比較を行い、中国側から提供された観測データを概ね再現できることを確認し

ている。

上記のとおり、河北平野では1960年代、1980年代、2000年代の浅層及び深層の地下水位観測が行われている。この間の地下水利用の実態は明らかでないが、各年代の等水位線図からそれらを逆推定することができる。すなわち、地下水利用が盛んでなかった1960年代の地下水位に対して、2000年代の地下水位を説明するための必要な揚水量を試行錯誤により推定した。

第8図は2000年代の深層水位を再現した結果を観測データと比較した結果である。平野内の水位低下域は両者で良く一致している。同様に、浅層水位についても再現を行い、揚水量を推定した。第2表は1960年～2000年の40年間の浅層、深層の各揚水量

第2表 推定揚水量と水位低下量。

		解析結果		文献値 (張ほか, 2001)
		～1980	～2000	1975-1984
揚水量 (億 m^3/y)	浅層	27.2	65.3	91.68
	深層	8.5	12.1	8.905
水位低下率 (m/y)	浅層	0.3		0.11-0.67
	深層	2.6		1.44-3.33

と水位低下率を推定し、張ほか(2001)の報告する値と比較した結果をまとめたものである。両者は概ね一致しており、1980年から2000年の20年間でみると浅層で年間65億 m^3 、深層で年間12億 m^3 の揚水が行われたものと推定される。

5. おわりに

黄河領域の水資源貯存量の実態把握と将来予測のため、源流から河口に至る160万 km^2 の領域を対象に三次元地下水循環モデルを構築した。

対象領域内の地質条件や水利用の実態など、詳細なデータの入手が必ずしも容易ではない中、現時点で利用可能なデータを組み込んだ黄河領域の数値モデルを完成した。現バージョンのモデルの検証は、中国側より入手した資料および現地観測データとの比較を行い、概ね整合した計算結果を得られることで確認した。その結果、黄河領域の地下水循環系は源流域から河口に至る2,000kmに及ぶ距離を長い年月をかけて大移動するものではなく、上流部、中流部、下流部とそれぞれの流域がもつ主要な地下水盆地へ湧出する比較的閉じた集水構造の繋がりがとることが明らかになった。

本プロジェクトの最終目標は、過去20年の地下水循環系の復元と今後20年の水資源貯存量に着目した将来予測にあり、中国の水資源政策に本質的に貢献可能な情報提示が望まれる。今後は、長期水位観測データを元に、主要な地下水盆地の水理地質構造の精

査、水利用データ(農業・工業・生活)の組み込みを行うとともに、将来の地下水需給バランスを予測したシナリオに基づき水資源貯存量の予測結果を提示する予定である。

引用文献

- Tosaka, H., Itoh, K. and Furuno, T. (2000) : Fully Coupled Formation of Surface flow with 2-Phase Subsurface Flow for Hydrological Simulation, Hydrological Process, 14, 449-464.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA)
<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
- National Geophysical Data Center (NGDC)
<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html>
- 国立天文台(2002) : 理科年表, 丸善株式会社.
- 地下水ハンドブック編集委員会編(1979) : 地下水ハンドブック, 20-25.
- 村岡洋文・玉生志郎・石井武政・内田洋平・高 存栄・徐 慧珍・韓 占涛(2005) : サブテーマ(5) 課題1③帯水層区分および地質構造の解析(その1), RR2002課題6平成16年度研究成果報告書, 文部科学省研究開発局, 122-128.
- 村岡洋文・玉生志郎・石井武政・内田洋平・高 存栄・徐 慧珍・韓 占涛(2006) : サブテーマ(5) 課題1③帯水層区分および地質構造の解析(その1), RR2002課題6平成17年度研究成果報告書, 文部科学省研究開発局, 134-138.
- 張 兆吉・大坪国順・石井武政(2001) : 中国の河北平野における地下水資源の現状と将来予測, 水工学論文集, 第45巻, 361-366.
- 張 兆吉・大坪国順・石井武政(2001) : 中国河北平野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, 4(3), 297-304.

MORI Koji, TADA Kazuhiro and NISHIOKA Tetsu (2007) : Groundwater Flow Modeling and Simulation for the water resource management of Yellow River Basin, China.

<受付: 2006年12月7日>