

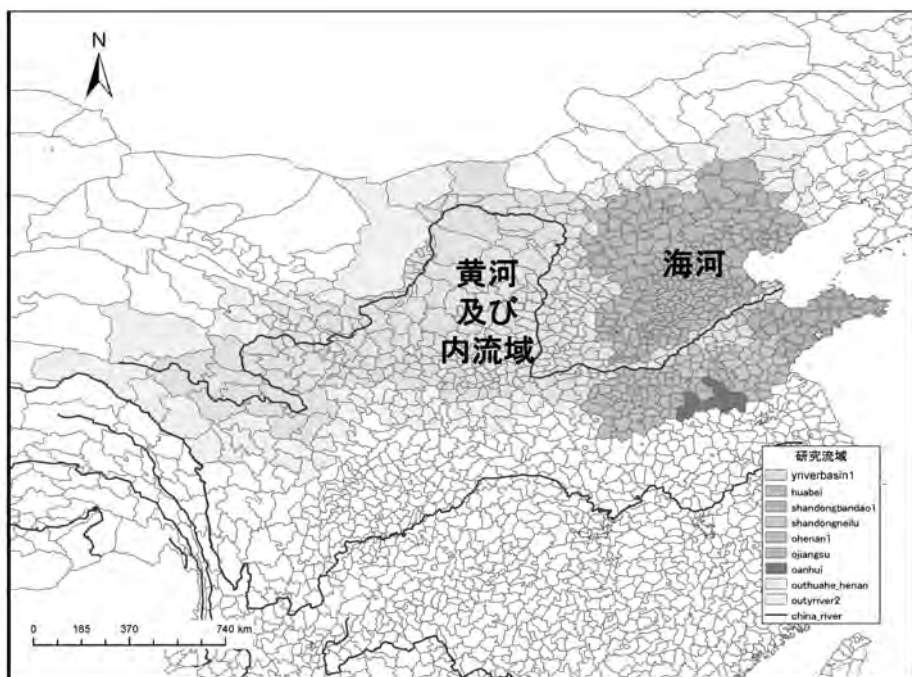
黄河全流域の地下水利用空間構造

一ノ瀬 俊明¹⁾・大坪 國順¹⁾

1. はじめに

アジアモンスーン地域は、特有の気象、地質構造の上に特徴的な水文、地形、土壌条件を形成し、人間の生存もその自然条件に適合した様式で維持されている。当該地域のうち半乾燥地域の代表である黄河流域は、著しい人口増、西部地域の大開発などに伴い、上下流の水配分問題が顕在化し、上流域での非効率灌漑、下流部での水不足、断流、土砂の堆積、地下水位低下など深刻な事態に直面している(井村ほか, 2005)。

この問題解決に資するべく著者らは、黄河流域(華北平原を含む)および地下水位低下の著しい都市域における浅層(自由)および深層(被圧)地下水位変動の再現と将来予測に不可欠な両層地下水資源の揚水量(消費量)の現状マップと将来予測マップ(2020年頃)の整備を目指してきた。具体的には、黄河流域における地下水位挙動の数値シミュレーションによる再現に必要な地下水需要の空間分布を、高解像度のグリッド(0.1度グリッド、都市域については2 kmグリッド)ベースで把握するというものであり、そのための各種手法開発を行ってきた(一ノ瀬ほか、



第1図 研究対象地域の流域区分。黄河流域には内流域(海洋に流出しない領域)を含めている。また研究対象地域ではないが、数値シミュレーション上人為的な入力条件の空間的ギャップを避けるため、同様の手法で地下水需要のデータを作成したところもある。

1) 独立行政法人 国立環境研究所

キーワード: 地下水, 水需要, 都市, 黄河, 中国, リモートセンシング, DMSP, 濟南, 空間情報基盤, ポリゴン

第1表 都市用水（生活用水・工業用水）の主な水源（一ノ瀬ほか, 2004）.

濟南～鄭州	黄河の河川水
洛陽	黄河支流の河川水（ダム）
三门峡	豊富な泉水（浅層地下水）
西安	渭水支流の河川水（ダム）と地下水
宝鸡	渭水の河川水（ダム）（水資源は不足気味）
天水	豊富な泉水

2004；2005）。これは、最終的には黄河流域全体の地下水資源変動予測シミュレーションに資するものである。特に黄河上流域では地下水の涵養が進みにくい（滞留時間が長く、移動距離が短い）化石水のような地下水が利用されている現状にかんがみ、持続可能な地下水利用は必須と考えられる。

対象地域における地下水位の季節変動に関しては、当該地域における地下水位のデータ入手が容易ではない現状にかんがみ、地下水取水量分布に対し、合理的な季節変動（週単位）を与えての数値シミュレーションにより、求められるものと考えられる。地下水位による週単位の変動は、降雨量と蒸発量の日変動に加え、生活用水利用や農業用水利用の季節変化によりもたらされるが、地下水の利用実態自身がほとんど不明である。中国の地方行政機関はハードルが高く、一般には中国国内の研究者に対してもデータを公表することはない。つまり、地下水利用の詳細に関しても、アンケート用紙を送付しようが電話しようがまったくの無駄骨なのである。

著者が黄河支流の渭水（鄭州～西安～蘭州）に沿って、一定規模の都市周辺地域における水資源の状況を概観すべく、2004年3月中旬に現地にて一般人民よりヒアリングを行い、地下水資源に対する認識を調査したところ、都市用水（生活用水・工業用水）の主な水源は、第1表に示すとおり非常に多様なものであった。

また、相対的に給水総量の多い西安では夏の渇水がしばしば問題になるということであった。洛陽付近では降水量に依存した農業が一般的であるのに対し、蘭州に近づくにつれ水路や井戸など、河川水や地下水を灌漑に用いるための設備が目立つようになる。このように都市によって水資源の深刻さはまちまちであり、人口や生産額などの社会経済統計指標のみから力任せに取水量を推計しようとするれば、大きな

見込み違いをしかねない。

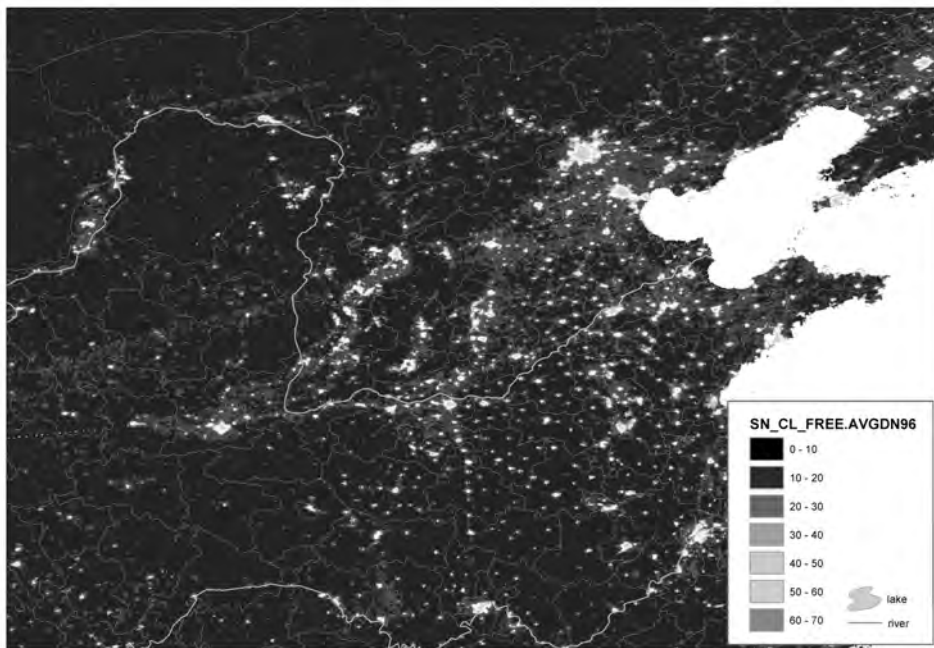
2. 利用可能な公開統計情報の限界

現在、研究対象地域（約50地級行政単位）における利用可能な各種社会経済統計データとしては、中国城市統計年鑑等により、以下の項目が存在する。水資源利用に直接関係すると思われる項目としては、人口指標（総人口、就業総人口、第3次産業就業人口、従業者総数）、面積指標（総面積、都市区域面積、都市建物総面積）、エネルギー指標（電力消費量、生活用電力消費量）、経済指標（国内総生産、1人当たり国内総生産、工業生産総額、第3次産業生産額、労働者賃金総額、労働者平均賃金）がある。また、水資源利用指標としては、給水総量、生活用給水量の2つがある。

上述の指標を用いて、地級行政単位毎の水資源利用状況が説明できるならば、データの存在しない地域における水資源利用状況を推定し、黄河流域をカバーする情報の整備が可能となると考えられたため、研究対象地域のうち、以上に挙げた各種統計データを利用することができた52の地級行政単位を分析対象地域とし、各種統計データ（1996年）のそれぞれと給水総量との相関関係を調べた。回帰直線で近似した場合、給水総量に対して最も決定係数の高くなる説明変数は、電力消費量と従業者総数であった。しかし、こうした関係を用いたとしても、地級行政単位よりも小さな空間単位での情報が与えられなければ水資源利用状況の空間分布を把握することは困難であり、本研究が目標として掲げる10kmメッシュでのマッピングは到底不可能である。

3. DMSP/OLS輝度値を利用した地下水資源需要推計マップの試作

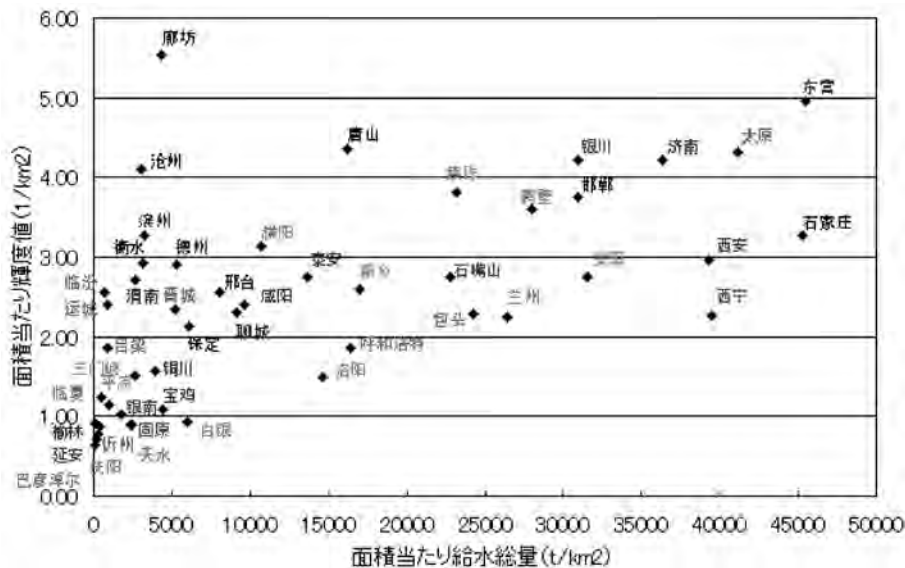
米国軍事気象衛星による地上夜間光画像データDMSP/OLSの輝度値（Ichinose *et al.* (2002) および一ノ瀬編 (2002) による1996年の値）は解像度約560mで中国全土をカバーしており、あらかじめ地級行政単位別に集計された輝度値で上述の給水総量データが説明できるのであれば、地級行政単位別に水資源需要推計のための原単位を作成し、黄河全流域水資源需要推計マップを作成することが可能となる。



第2図 北京周辺における1996年のDMSPOLS輝度値(一ノ瀬編, 2002). 解像度約1,120m.

第2図は地下水資源需要推計マップのイメージ(解像度約1,120m)として試作された北京周辺における1996年のDMSPOLS輝度値マップである。残念ながら統計データとして入手できる水資源利用状況には水源構成に関する情報が含まれていないため、給

水総量から地下水に依存する量だけを分離する方法の検討が必要である。大西ほか(2004)は、産業連関表にもとづく経済学的手法から地域(西安市など地級行政単位)の水需要構造を推定しており、著者らの研究とは異なるこうしたアプローチは参考となりうる。



第3図 面積当たり給水総量と面積当たりDMSPOLS輝度値の関係(一ノ瀬ほか, 2004). 北京, 天津, 烏海を外し, 省級行政単位別に色分けしたもの。

第3図に面積当たりの給水総量と輝度値の関係を示す。給水総量が増加すると輝度値も増す傾向が見られるほか、地域の水資源状況（気候条件、都市化の度合いなど）を反映するためか、類似の性格を示すと考えられる地域が似たような場所にプロットされている。一方、ここでは輝度値と給水総量に直線関係を仮定したものの、系統的な残差も見出せる。残差をマッピングしたところ、明瞭な地域性の存在が窺われた。これらは水資源の逼迫度や降水量など、自然条件との関係性が深いものと思われる。

4. 特定事例解析都市における高解像度水資源需要マップの作成

以上より、特定の事例解析都市において水資源需要量と夜間光強度との関係をピクセルベースで見出せれば、第3図に示される原単位（原点と各プロットを結ぶ直線の傾きに相当）を用い、黄河流域についてシームレスに都市域における水資源需要分布を与えることが可能と思われる。そこで、黄河下流域の山東省済南市（東西30km・南北17km）を対象に、航空機画像（1998年度）に建築物ポリゴンデータ（2000年度調査）を貼り付けた画像をベースマップとして使用し、原単位法による地下水資源需要マップの描画作業（解像度250m）を行った（一ノ瀬ほか、2005）。当該地域の輝度との関係性が一定見出せるのであれば、DMSP/OLSの輝度値を用いる手法の合理性が担保されるであろう。

今回利用させていただいた上述のデータは市政府所有の空間情報基盤（済南市政府遥感総合調査による）であり、政府の保秘（機密）情報であるため、日本の研究者は中国の大学（ここでのカウンターパートは山東師範大学）に具体的な作業を委託するしかない。また市水利局の供水区別配水量データ（2000年）を利用し、原単位法で描かれた水需要分布とこの配水量が一致するよう調整を行っている。

済南市は温帯半湿潤の大陸性気候に属する地域にある。年降水量は600～700mm程度であり、その6割が6月から9月に集中する。市の南部は古生代の石灰岩よりなる丘陵地帯であり、かつては市内のあちこちに泉が湧き出るほど地下水量は豊富であった。しかし2004年2月現在、地下水保護を目的として、済南市における地下水利用は厳しく制限されており、現在

では黄河の河川水を主たる水源としている。本研究では、再び黄河の断流が生じた際の地下水資源需要マップを描くことになる。

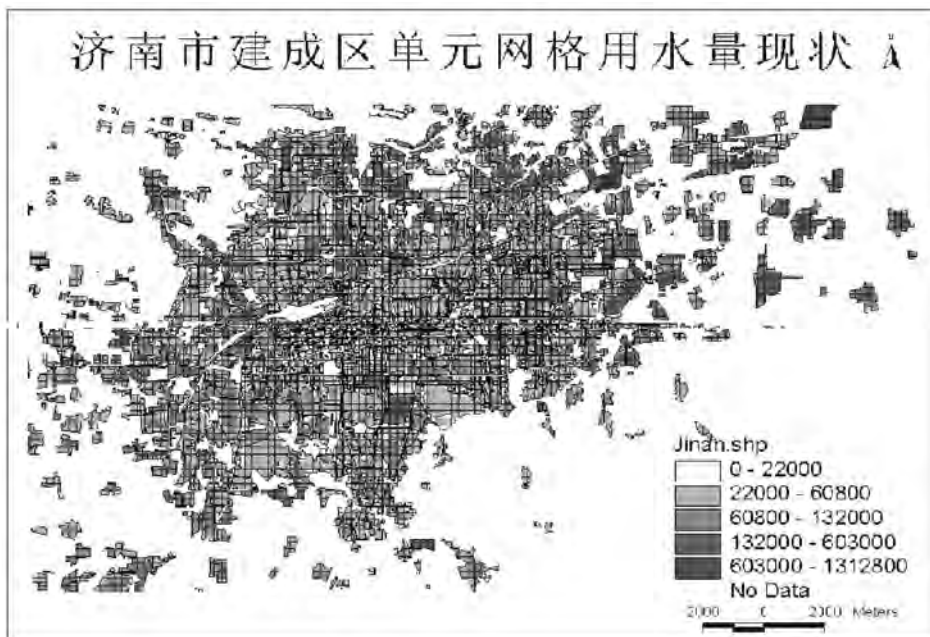
またこの高精度のマッピングにあたっては、用水量の原単位作成のため、居住者や事業者への広範なヒアリング、アンケートを実施している。その結果、5つの調査対象地域（区）で土地利用や用水量の原単位に顕著なばらつきが見られた。

具体的な情報処理としてはまず、幾何補正後の航空写真をベースにして土地利用分類を行っている。区分は類似の用水特性を示すと考えられるカテゴリーをまとめ、居住用地、工業用地、商業娯楽宿泊用地、機関用地、緑地、医療衛生用地、教育用地、その他用地の8区分としている。航空写真の判読に当たっては、地物の色、形状、陰影、配列などを手がかりに、目視を主体として膨大なデータの判別を行っている。また、多数の地点において現場での目視による確認を行っている。GISでの作業に当たっては5つの区のそれぞれで、その他用地を除く7種類の土地利用種毎の用水量シェイプファイルを作成している。

近年における済南市の水平規模の拡大発展は急速である。1976～1986年には東北に向かって市域が拡充し、1986～2002年には東西方向に拡充が起こっているほか、南方、東北、西北への展開も見られる。市の北部には以前低平な耕作地が広がっていたが、最近では徐々に工業用地や居住用地へと転換している。

東の郊外にある高新技术開発区における総用水量は $0.38 \times 10^8 \text{m}^3/\text{年}$ である。これはこの地域を含めた済南市の用水量の11.7%を占める。ここには大量に水を必要とする大型重工業（大型製鉄所、発電所など）も分布している。高新技术開発区における工業用水量は $0.34 \times 10^8 \text{m}^3/\text{年}$ である。

済南市の城区で最も用水量に占める割合の大きい用途類型は工業用水である。特に重工業やビール工場、発電所などの寄与が大きいものと思われる。工業用地は全体の49%を占める。また2003年の総用水量は $1.69 \times 10^8 \text{m}^3/\text{年}$ に達し、済南市城区における値の55%に及ぶ。つまり、済南市は依然典型的な工業都市といえる。用水量が比較的多いのは建成区の北部、西部および東部である。また済南市では、工業の郊外への移転が順調に行われ、その跡地が居住用地や商業用地へと転用されている。



第4図 济南市における水資源需要マップ：解像度250m（一ノ瀬ほか, 2004）.

济南市城区の居住用地における用水量は $0.80 \times 10^8 \text{m}^3/\text{年}$ である。これは城区全体の値の26%を占める。その水源の内訳は、70%が地表水であり、30%が地下水である。

広場や緑地は城区全体の14.0%を占める。これはつまり、济南市の緑化の度合いを示しており、2000年段階での12.1%よりも増加している。主に、居住地区での小規模緑地公園や公共の緑地が増加している。総用水量は $0.09 \times 10^8 \text{m}^3/\text{年}$ であり、城区全体の値の5.8%を占める。この用水量は降水量など天候の影響を強く受ける。

本研究で得られた情報を統合し、用水量を5段階で表示したのが第4図である。

济南市の建成区を250mグリッドで区切ると8,040のグリッドに分割され、うち4,082グリッドに用水が存在する。今回の積算では全市で $3.09 \times 10^8 \text{m}^3/\text{年}$ の用水量となったが、政府の公式統計では $3.50 \times 10^8 \text{m}^3/\text{年}$ （济南市自来水公司）である。今回の積算に個別に開削された井戸の寄与が含まれていないことも関係しよう。本研究では工業用水の寄与が5割を超えているが、実際は居住用地における用水の寄与が6割と考えられてきた。また、本研究では市の東部の開発区における工業用水を計上していることも関係しよ

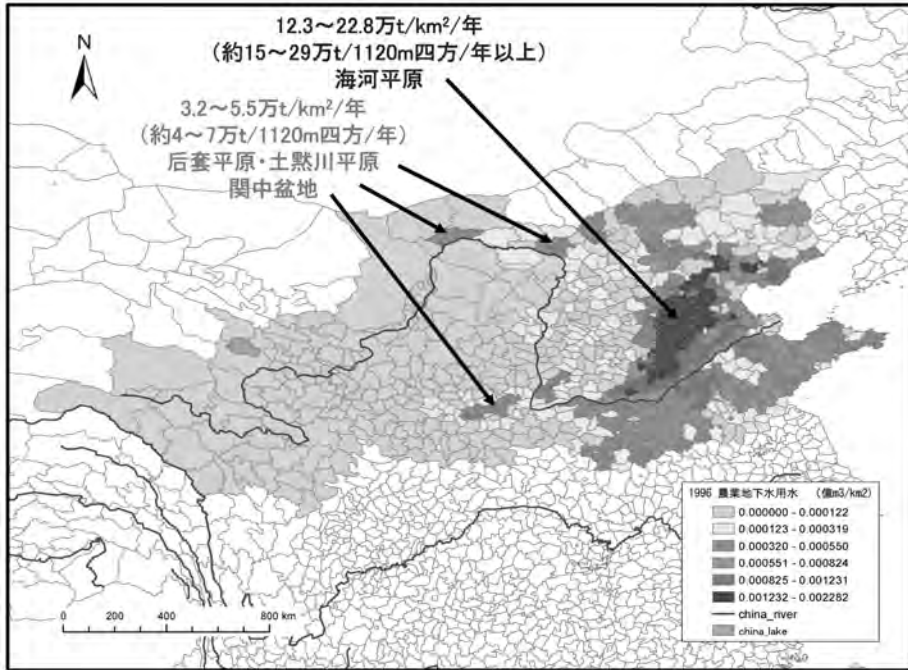
う。第2図と第4図をくらべる限り、DMSP/OLS輝度値は現実の水資源利用分布を反映しており、著者らの提唱する手法は一定合理的といえるだろう。

5. 地下水取水量のマッピング

ここまでに試作された黄河全流域地下水資源需要推計マップ（一ノ瀬ほか, 2004）では、用水カテゴリーとして生活用水と工業用水を扱っているのみであり、資料上の制約から、自來水（上水道）における供水量を地下水需要量とみなしたものに過ぎなかった。これでは地下水需要の大半を占める農業用水の実態を反映していないため、さらなる調査で入手された新たな資料より、用水カテゴリー別のマッピングを行う必要がある。よって、農業・工業・生活の3大カテゴリーについて、1996年時点におけるそれらの空間分布の推計を行った（一ノ瀬ほか, 2006）。なおマッピングの対象としては、地下水位に直接関係する「取水量」という概念を採用する。

(1) 農業用水

耕地面積当たりの地下水取水量が一定という仮定のもとに、耕地面積の多寡で取水量をグリッド（実際



第5図 黄河流域および華北平原における農業用水としての地下水取水量分布（一ノ瀬ほか, 2006）.

は県級行政単位ごとのポリゴン：平均的には20km²グリッドに相当するサイズ）へ配分する。具体的な方法は以下のとおりである。

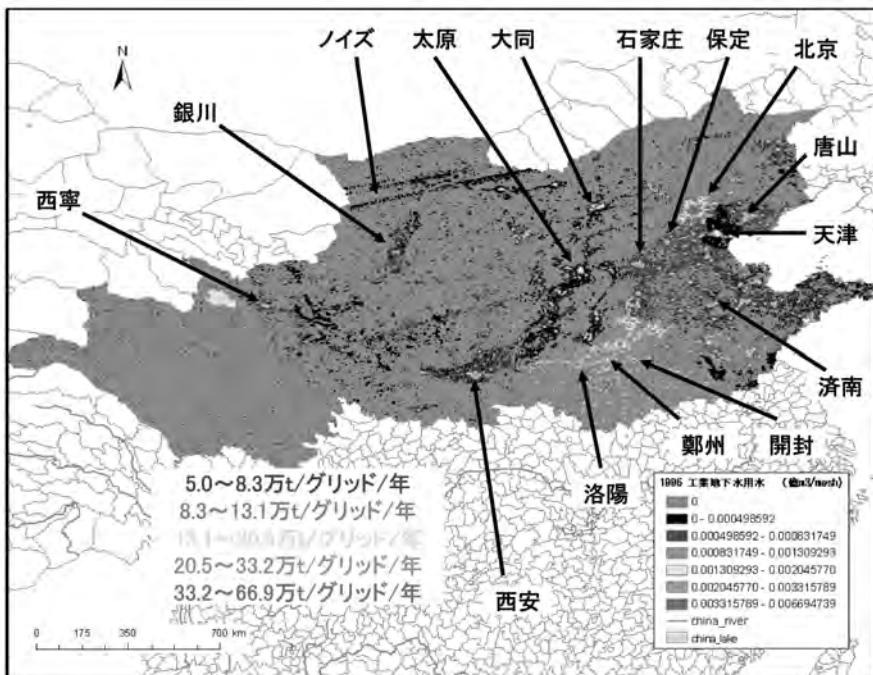
- ①省級行政単位別耕地面積（中国統計年鑑：1994年および1996年）より、省級行政単位別に耕地面積の変化率を求め、1994年時点の県級行政単位別耕地面積（Geoinfo China Digital 400）より1996年の値を推定する。
- ②黄河流域の省級行政単位別農業地下水取水量（黄河水資源公報：1998年～2004年の平均値）および河北省、北京市、天津市における農業地下水供水量（海河流域水資源公報：1998年～2003年の平均値）を省級行政単位別耕地面積で除することにより、省級行政単位別の単位耕地面積当たり地下水取水量を求める。数値シミュレーション上人為的な入力条件の空間的ギャップを避けるため、上述の地域の外側においても同様の手法でデータを作成する。
- ③これに県級行政単位別耕地面積を乗じることにより、県級行政単位別地下水取水量を求める。
大都市の近郊を中心に、華北平原の半分ほどの地域において1km²当たり年間12～23万tをくみ上げて

いる（第5図）。これは、1,120m四方に換算して年間約15～29万tに相当する。また、黄河本流に沿った地域の上流～中流においては、地表水に依存できるためか取水量は少ない。多いところでも、1,120m四方に換算して年間約4～7万t程度である。

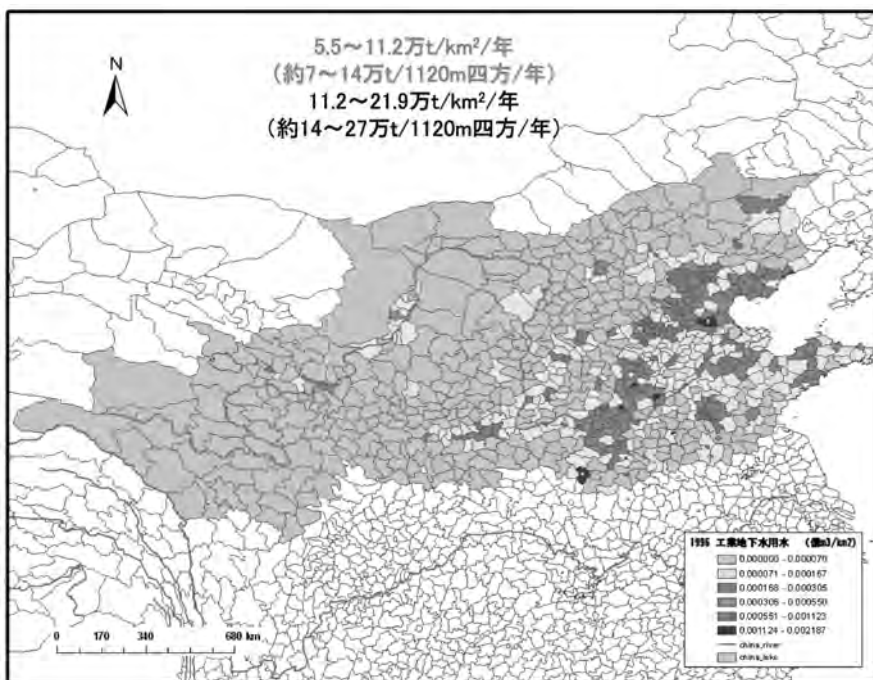
(2) 工業用水

DMSP/OLSの輝度値当たりの地下水取水量が一定という仮定のもとに、輝度値の多寡で取水量をグリッド（約1,120m四方）へ配分する。具体的な方法は以下のとおりである。

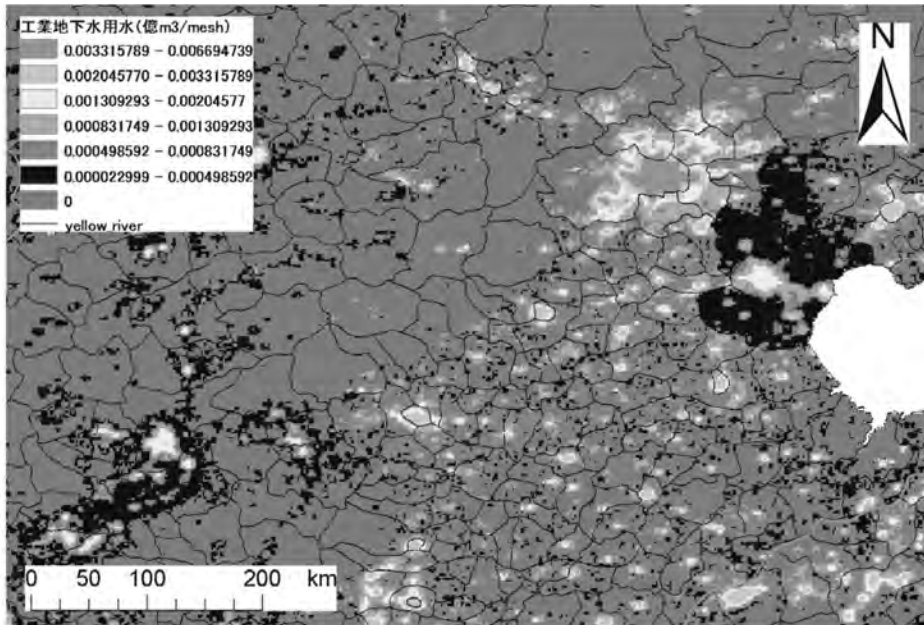
- ①黄河流域の省級行政単位別工業地下水取水量（黄河水資源公報：1998年～2004年の平均値）および河北省、北京市、天津市における工業地下水供水量（海河流域水資源公報：1998年～2003年の平均値）を省級行政単位別輝度値（合計値）で除することにより、省級行政単位別の輝度値当たり地下水取水量を求める。数値シミュレーション上人為的な入力条件の空間的ギャップを避けるため、上述の地域の外側においても同様の手法でデータを作成する。
- ②これに輝度値を乗じることにより、グリッド別地下



第6図 黄河流域および華北平原における工業用水としての地下水取水量分布 (約1,120mグリッド;一ノ瀬ほか, 2006).



第7図 黄河流域および華北平原における工業用水としての地下水取水量分布 (県級行政単位ごとのポリゴンに集計したもの;一ノ瀬ほか, 2006).



第8図 第6図の北京周辺のみを拡大したもの。

水取水量を求める。

華北平原の大都市(北京, 唐山, 保定, 石家庄周辺)や鄭州, 洛陽, 西安, 銀川, 蘭州, 西寧などにおいてグリッド(約1,120m四方)当たり年間13~67万t(ポリゴンベースではグリッド当たり年間約7~27万t)をくみ上げている(第6図;第7図)。山西省の汾河流域ではその数分の1程度の水準である。衛星画像上のノイズと思われるゾーン(内蒙古地区や黄土高原付近など)もこの水準の値を示している。また, 黄河本流に沿った地域の上流~中流においては, 地表水に依存できるため取水量は少ない。さらに, グリッドベースとポリゴンベースとの値に最大2倍程度の開きが存在し, これは高輝度地域の連担状況, つまり, 光に埋もれた闇の部分の存在による(第8図)。

(3) 生活用水

DMSP/OLSの輝度値当たりの地下水取水量が一定という仮定のもとに, 輝度値の多寡で取水量をグリッド(約1,120m四方)へ配分する。具体的な方法は以下のとおりである。

①黄河流域の省級行政単位別生活地下水取水量(黄河水資源公報:1998年~2004年の平均値)および河北省, 北京市, 天津市における生活地下水供水量(海河流域水資源公報:1998年~2003年の平均

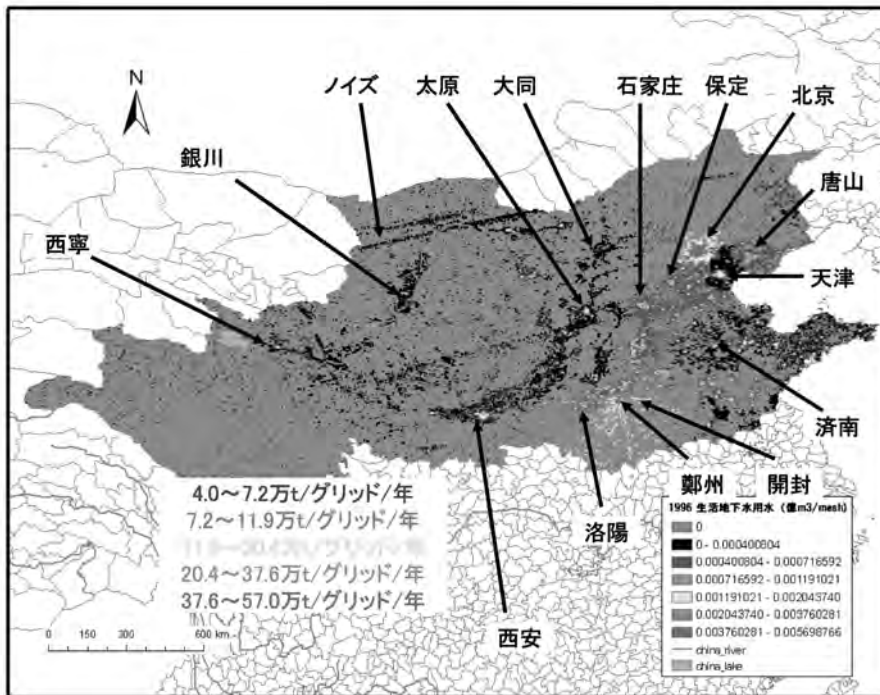
値)を省級行政単位別輝度値(合計値)で除することにより, 省級行政単位別の輝度値当たり地下水取水量を求める。黄河水資源公報における生活用水の定義は, 2002年までが都市生活用水+農村人畜用水, 2003年以降が都市公共用水+居民生活用水+生態環境用水(緑化灌漑など)となっている。数値シミュレーション上人為的な入力条件の空間的ギャップを避けるため, 上述の地域の外側においても同様の手法でデータを作成する。

②これに輝度値を乗じることにより, グリッド別地下水取水量を求める。

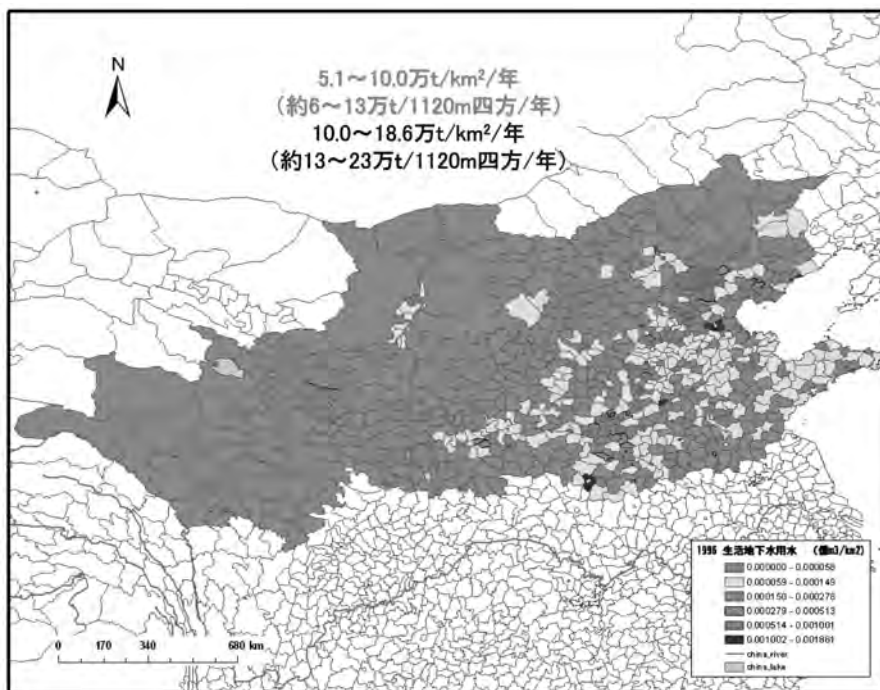
華北平原の大都市や鄭州, 洛陽, 西安などにおいてグリッド(約1,120m四方)当たり年間12~57万t(ポリゴンベースではグリッド当たり年間約6~23万t)をくみ上げている(第9図;第10図)。つまり, 工業用水と生活用水はほぼ同じ水準といえる。山西省の汾河流域ではその数分の1程度の水準である。また工業用水と同様, グリッドベースとポリゴンベースとの値に最大2倍程度の開きも存在する。

(4) 考察

耕地への作付け種類や農地の立地(気候・地質など)により, 各季節(月あるいは週)への配分曲線が異なることを考慮すべきである。南京・河南大学におけ



第9図 黄河流域および華北平原における生活用水としての地下水取水量分布 (約1,120mグリッド; 一ノ瀬ほか, 2006).



第10図 黄河流域および華北平原における生活用水としての地下水取水量分布 (県級行政単位ごとのポリゴンに集計したもの; 一ノ瀬ほか, 2006).

るヒアリング調査(2006年1月)によれば、一般に渠井(地表水と地下水)両系統での灌漑システムが採用され、河川流量の状況に応じてシステムを切り替えて使っているケースが多い。

従前試作された推計マップ(一ノ瀬ほか, 2004)では、中国城市年鑑に収録されている地級行政単位別給水総量(上水道による工業用水および生活用水)を輝度値に比例するようマッピングしていたため、地級行政単位間の差異がある程度考慮されたものであった。今回は、黄河水資源公報に加え、複数の地域別の水資源関連報告書(例えば、秦ほか編著, 1998)などを参照し、一部の地級行政単位においては、年次こそ統一的ではないが具体的な地下水取水量データが示されていることを確認している。その意味では、今回作成されたマップにも改善の余地が見出せる。総体的に見て、近年金子(1999)が別の手法で推計・提示してきた黄河流域の用水使用量分布(地表水を含んだ値)などとも整合的なマップが得られたものと考えている。

6. まとめ

本研究の意義の一つは、中国人研究者にとってさえ困難な、チャレンジングなテーマを成し遂げたということであろうか。著者らの分担してきたテーマは、それ単独では学術論文になりにくい課題である。データの存在しないデータを推計して作り、そのデータを必要としているモデルに引き渡す仕事である。当然、少なくとも「当たらずとも遠からず」のデータであることが求められているわけである。

また、中国で初めて、都市の電子空間情報基盤(高解像度グリッドベースのGISデータ)を作成し、研究に使用したことであろうか。その計画立案、交渉は先方

諸機関と慣れない中国語で進めざるをえなかった。結果の質はどうあれ、こういうアクションを経なければ、果実を得られない内容が中国環境研究には非常に多いのではないだろうか。著者らのこの経験が、後続の日本人研究者になにがしかの光明となれば幸いである。

引用文献

- Ichinose, T., K. Matsumura, T. Nakaya, Y. Nakano, C. Elvidge and M. Imhoff (2002): Estimation on regional intensity of economic activity in Asia: An application of nocturnal light image by DMSP/OLS, *2nd Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Remote Sensing for Developing Countries, Bonn; (Proceedings)*.
- 一ノ瀬俊明編(2002):夜間光衛星画像データDMSPによるアジアの地域別経済活動強度推定,平成12年度~平成13年度科学研究費補助金研究成果報告書。
- 一ノ瀬俊明・大坪國順・王 勤学・張 祖陸・衣笠聡史(2004):黄河流域における地下水利用の現状把握と将来予測手法の開発,環境システム研究論文発表会講演集, 32, 551-556.
- 一ノ瀬俊明・大坪國順・王 勤学・張祖陸(2005):中国・済南市における高解像度水資源需要マップ作成の試み,地球環境シンポジウム講演論文集, 13, 329-334.
- 一ノ瀬俊明・原田一平・イーモンシャン・大坪國順(2006):黄河全流域地下水水位数値シミュレーションにむけた地下水資源需要推計マップの試作,環境システム研究論文発表会講演集, 34, 201-205.
- 井村秀文・大西暁生・岡村実奈・方 偉華(2005):黄河流域の縣市別データに基づく水資源需給空間構造の把握に関する研究,環境システム研究論文集, 33, 477-485.
- 金子慎治(1999):「東アジアの開発と環境長期将来予測のための手法開発とその適用に関する研究」,九州大学大学院工学研究科博士論文, 162p.
- 大西暁生・小澤亮輔・森杉雅史・奥田隆明・井村秀文(2004):西安市における流域水資源需給将来予測に関する研究,地球環境シンポジウム講演論文集, 12, 87-93.
- 秦 毅蘇・朱 延華・曹 樹林・余 国光・李 俊亭編著(1998):「黄河流域地下水資源合理開発利用」,黄河水利出版社, 114p.

ICHINOSE Toshiaki and OTSUBO Kuninori (2007): Spatial structure of ground water use in the Yellow River Basin.

<受付:2006年10月10日>