

黄河プロジェクトの最終に際して

福嶋義宏（黄河プロジェクト責任者）

黄河プロジェクトは2種類の研究費によって実施された。まず、2002年度から5カ年計画で開始された文部科学省の「人・自然・地球共生プロジェクト」の中で、メコン班と共に、水文モデル構築に関して、半乾燥地の黄河流域のモデル構築を地球研の渡邊紹裕・早坂忠裕両教授と共に担当した。一方では、何故黄河断流が1997年に激しくなったのか、そしてそれは下流の渤海と周辺環境にどのような影響を与えたか、を明らかにするための、「近年の黄河の急激な水循環変化とその意味するもの」という題名で地球研プロジェクトとして2003年度から、これも5カ年計画で研究を開始した。

幸い、前者では自然要因と人為要因を分離できるモデル構築が完成して、1950(1960)～2000年までの黄河の6区間について適用した結果、従来、単に灌漑農地の過剰な取水と降水不足が原因であると思われていた「黄河断流」の原因は、上記2要因以外に、流域の40%を占める黄土に覆われた黄河中流部で、「水土保持」と呼ばれる山腹植栽等の事業によって蒸発量の増加、流出量の減少が起こっていたため、この事が1970年代以降の水不足を加速したことが推測された。中国の若手研究者による無定河の流出と土砂量の長期解析でも明白に洪水流量減少と、土砂量減少が明らかになってきている。

一方では、黄河流量の減少によって、土砂流送能力が減ったために、花園口より下流の天井川は未だに解消していないから、洪水氾濫の危険性は依然として残っている。さらに、渤海では基礎生物生産の律速条件が窒素からリンに変化したこと、黄海との海水交換が減少していることが判明してきた。これは渤海の海洋生物相の変化を招くかも知れず、今後の監視が必要であろう。

なお、本研究では黄河の流量変化に焦点を絞ってきたが、同時に現地調査と資料から黄河の水汚染についても見聞きしている。私どもの研究班では水質の現地調査は難しく、水質悪化とその復元は中国側に任さざるを得ない問題である。その場合には、私どもの水量変化についての研究成果が有用であろうと思われる。

黄河流域の水不足のメカニズム

佐藤嘉展・大西暁生・福嶋義宏・馬 燮銚・徐 健青・松岡真如・鄭 紅星・陳 建耀

急激に河川流量が減少した黄河流域の水不足のメカニズムを明らかにするために、気候変動と人間活動の影響を考慮した分布型水文モデルを用いて、黄河全流域を対象とした長期水収支解析を試みた。モデルへの入力データには、気象データと衛星リモートセンシングデータを用い、それぞれ 0.1 度グリッドスケールに内挿した。様々な土地被覆条件の違いによる地表面からの蒸発散量の変化を考慮するために、高解像度の土地被覆分類図を利用した。次に、各地表面植生別の植生活性度の季節変化特性を反映させるために、月別の NDVI データを用い、それを LAI に換算して蒸発散量を算出した。さらに乾燥に伴う蒸発抑制の影響を考慮するために、土壌水分の関数で実蒸発散量を求めた。人間活動の影響としては、大型ダムによる貯水池操作の影響、灌漑取水の影響、および人為的な土地利用の影響を考慮した。本研究で構築したモデルは、長期的な土地利用変化の影響を考慮することで黄河全流域の水収支を良好に再現できることがわかった。また、過去 40 年間における黄河下流域の河川流量の減少 (36 億 m³) は、黄河上流および中流域から下流域への供給水量の減少と、下流域内での水消費量の増加に起因し、それぞれの寄与率は約 69%と 31%であることがわかった。また、下流域への供給水量の減少は、黄河中流域で 1960 年代と 1990 年代に降水量が急激に減少したことが主な原因で、下流域内での消費水量の増加は、農地面積の増加に伴う灌漑用水量の増加の影響が大きいことがわかった。本研究で構築したモデルと得られた知見は、今後の黄河流域の水資源管理に貢献する解析ツールとなり、有用な情報を与えることができると期待される。

黄河プロジェクトにおける大気境界層研究

檜山 哲哉 (名古屋大学 地球水循環研究センター)

大気境界層研究班は、1)黄河中流域に位置する黄土高原における総観気象場と降水量はどのように変化しているのか、2)その原因は何か(地表面改変は何らかの影響を及ぼしているのか)、3)地表面や大気境界層は降水活動に対して能動的か、4)湿潤域と乾燥域の大気境界層過程の本質的な差異は何か、5)地形は大気境界層の発達過程や境界層乱流にどのような影響を及ぼすのか、という5つの問題意識を共有し、研究してきた。これらの問いに答えるべく、我々は、1)黄土高原を含む黄河中・下流域における降水量や対流活動の年々変動とそれに影響を与える総観気象場、特に、季節内変動の様相を明らかにする。2)黄土高原における地表面過程や大気境界層過程の対流活動や降水に与える能動的側面を確認する。3)中国の湿潤域と(半)乾燥域における大気境界層の日変化過程や季節変化過程の差異を調べる。4)黄土高原における地形が、大気境界層内の乱流組織構造や局地循環の生成に及ぼす影響を調べる、という4項目を研究目的として設定し、観測とそのデータ解析を行った。

我が班は、中国科学院・水土保持研究所・長武黄土高原農業生態試験所(緯度 35.24 °N 経度 107.68 °E 標高 1224 m)の小麦観測圃場内に大気境界層観測システムを2004年5月末に設置し、以来、2007年9月末までの3年4ヶ月間にわたり、停電・故障による欠測を除き、継続的に下記の観測データを取得してきた。大気境界層観測システムは、1)フラックス・放射観測システム(FROS)、2)ウィンドプロファイラレーダ(WPR)、および、3)マイクロ波放射計(MR)の3システムから構成された。FROSは高度2m、12m、および32mにおける3次元風速、気温、湿度の乱流変動データを出力した。我々はそのデータをオフラインで処理し、それぞれの高度における30分毎の地表面フラックス(顕熱輸送量と潜熱輸送量)を計算した。WPRは風速ベクトルと風向、大気エコー強度とドップラースペクトル幅の鉛直分布データを出力した。MRは気温、相対湿度、雲水量の鉛直分布データを出力した。WPRとMRは、約1分毎にデータを出力した。これら独自の観測データの他に、1)NCEP/NCAR再解析データ、2)静止気象衛星GOES・9号による放射輝度温度データ、および、3)平涼における高層気象データ、を解析に用いた。

黄河中流域の年降水量は、統計的に有意ではないが若干の減少傾向にあった。降水量は年々変動が大きく、夏季の季節内変動の振幅とその年々変動が、降水量の年々変動に大きく関わっていた。夏季の降水量は蒸発散量より卓越し、その差(水余剰量)は土壌水分として表層土壌に保持され、翌年の天水農業のための重要な水資源となっていた。春季~夏季の降水量と潜熱輸送量は4~5日周期で変動した。この変動には、低気圧性擾乱の通過頻度が関係していた。大気境界層高度は数日周期の変動が卓越した。これは、当該地域への寒気の流入周期と地表面からの顕熱輸送量の短期変動周期に起因していた。春季~夏季にかけての積雲生成と低気圧性擾乱に対し、地表面は大気境界層を介して能動的に作用する

ことがあり、夕方～夜間にかけて、強雨を誘引することがあった。その結果、この時期の降水量には明瞭なダブルピークをもつ日周期がみられた。雲解像モデル (Cloud Resolving Storm Simulator; CReSS) を用いて、当該地域の対気境界層の日変化過程と積雲発生に関する数値実験を行った。仮想的に地表面を平坦にした場合、蒸発効率と相対湿度は、ともに積雲発生に対して重要な因子であった。平坦地表面の場合、ベナール・レイリー型の対流セル構造がみられたものの、局地循環は生成しなかった。一方、黄土高原の実地形を下端に設定した場合、午後に対気境界層の急激な発達を促し、数 km 程度の空間スケールをもつ局地循環が形成された。この場合、蒸発効率が大きいほど、積雲の生成量が大きくなった。

晴天日の対気境界層高度 (日最大値) の季節変化特性を中国湿潤域と比較した結果、黄土高原における対気境界層高度の季節変化に顕著な周期性は無かった。その原因として、地表面状態 (土地利用) の不均一性によって顕熱輸送量と潜熱輸送量に明瞭な季節変化が無いことと、総観規模での沈降流が湿潤域に比べて弱く、地表面近傍から鉛直的に生成するサーマルやプルームが比較的高高度にまで達し、積雲などの下層雲の生成とリンクすることによって対気境界層の上端が不明瞭になること、の 2 点が考えられた。接地境界層乱流に及ぼす地形の影響を調べた結果、黄土高原のような急峻な地形は風速の鉛直成分には大きく影響を及ぼさなかった一方、水平成分には長波長スケールの乱渦の生成に大きく寄与した。この原因として、地形が乱流組織構造を容易に生成・増幅させることが考えられた。衛星リモートセンシングから精度良く地表面温度を算出する場合、衛星の方位角、天頂角、太陽入射角、地形傾斜角を考慮する必要があることが、当該地域を対象とした衛星リモートセンシング研究から明らかとなった。また、日中の観測頻度が少ない衛星リモートセンシング観測から蒸発散量を推定する場合、日々変化が日変動に埋もれず検知可能かどうかについて解析した。その結果、ES (下向き短波放射量に対する潜熱輸送量の比) は、EF (有効放射エネルギーに対する潜熱輸送量の比) よりも日変化幅が小さく、日々変化を検出することが可能であった。

地表面変化が降水量の長期トレンドに影響を及ぼしているか否かについて、観測的研究からは明らかに出来なかった。総観気象場の効果と地表面変化の効果の分離が、観測的研究では不可能であったためである。対気大循環モデル (AGCM) を用いて地表面変化が降水量の増減に与える影響を仮想実験として行う手法の確立、特に、地表面変化が対気境界層過程を介して総観気象場と降水量変動にフィードバックする過程を表現できるモデルの確立が、今後望まれる。

黄河デルタ域における地下水・海水相互作用研究

谷口真人（総合地球環境学研究所）

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、沿岸・河口での調査とあわせて、解析を行った。黄河プロジェクトのデルタ班としての成果は以下とおりである。(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、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。(2) 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、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。(3) 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り、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。(4) 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、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り、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指摘された。(5) 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ていることが水収支により推定された。また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。

渤海におけるクロロフィル a 濃度の経年変動

柳 哲雄（九州大学・応用力学研究所）

SeaWiFS 衛星画像から得られたクロロフィル a 濃度と現地観測したクロロフィル a 濃度の関係式を得て、この関係式を使って 1998 - 2005 年の渤海中央部のクロロフィル濃度の経年変動を明らかにした。その結果渤海中央部のクロロフィル a 濃度は 1998 年から 2001 年まで低下し、その後増加していることがわかった。このような経年変動は水温・日射量の経年変動とは無関係で、黄河流量の経年変動とよく対応していた。すなわち、黄河流量の多い（少ない）年は渤海のクロロフィル a 濃度は高い（低い）。これは渤海の基礎生産の律速栄養塩であるリン濃度が黄河流量の多い（少ない）年は高く（低く）なるからである。

治水事業の思想的背景

木下鉄矢（総合地球環境学研究所）

治河に関わる思想的背景に存在する最も大きな対立は、治河政策の立案と実施に働く主要動機に関わる対立、すなわち民政の観点と国防・軍事の観点との対立であった。

後漢(Hou Han)・王景(Wang Jing)による治河事業は、漕渠(Canal Bian)という漕運兼灌漑水路、地域民生の安定、向上に不可欠な施設のインフラ整備を主要な工事とし、その渠水系の水源、すなわち黄河からの取水施設の整備、また平原地域全般への脅威である水害を防ぐための安定した河道の確定を行う工事からなっていた。地域民生の安定、向上を主要動機とする民政の思想がその工事の企画、実施を動かしていた。

一方、北宋時代、北流への自然な河水の流路替えを無理にも東流に引き戻そうとして莫大な浪費を沿岸地域の住民に強い、地域経済社会を疲弊、荒廃させたのは、中央政府のキタイ国の進攻に対する国防・軍事的な戦略を主要動機とする政策意志からであった。この観点から、地域民生への配慮は切り落とされているのである。

また南宋・金時代に南流河道が始まり、維持されたのも、国防・軍事的観点からの措置、政策によってであった。南流河道は地質学的な華北平原の沈降運動の性質から見て、もともと不自然な河道であった。そのために清代、咸豊(Xianfeng)5年(1855年)に山東山塊の北沿いを行く流路に振り替えるまで一貫してこの南流河道は不安定であり、堤防で固めて維持しようとしたにもかかわらず、決壊、溢出、分流が絶えず、王景の定めた河道の800年に及ぶ安定と著しい対比を示す。

元代に京杭運河が開通して以降は、現在の北京に置かれた首都を、この運河によって南より漕運される米穀によって維持しようとする国権的な意志により、この運河の保持こそが重視され、治河政策はその観点から進められた。経済の中心から遙かに離れる、華北平原の北縁部に首都を置いたのは、明代「万里の長城」にも窺える北方平原部と華北平原以南とを大きく分ける地政学的理解の中、その両者を睥睨し得る政治的権力拠点、軍事的出動拠点とこの地が考えられていたからであろう。このような首都・北京への主要糧道を守るために、また守る限りにおいて、治河事業は対症療法的に進められたのであった。

明代末期の潘季馴、清代前期の靳輔・陳潢の治河事業も大きくはこの枠からはずれることは出来なかった。いずれにせよ南流河道を無理にも維持するという中央政府の基本的意向の中で動いていたからである。しかし潘季馴、靳輔・陳潢たちの治河の意図を史料に即して考えるならば、地域民生への配慮、人知を尽くし努力を尽くして民政という職務に励み、難事業を成し遂げよという朱子学の情熱的な思想の影響を指摘することが出来る。

朱子学は、前漢・宣帝(Emperor Xuan)期より後漢・光武帝(Emperor Guangwu)にかけて鮮明になった民政の思想の、北宋時代におけるルネッサンス、范仲淹(Fan zhong-yan)などを典型とする人々が再興した「民政立国の思想」を継承して出現した一種の地域社会改革運動で

ある。その情熱と思想が、潘季馴、靳輔・陳潢たちに受容され、生きていたと言うことが出来るだろう。

黄河は新構造運動による華北平原部の沈降を大きな枠としながら流路を振り替えながらその大扇状地、華北平原を形成して来た。その自然な振り替えと人間はどこで折り合いをつけるべきなのか。地域民生への配慮を身上とする民政の思想に立つ王景の治河事業はその一つの答えであろう。一方、そもそもが国防的、国権的発想に始まり維持された、元来が人為的に維持された河道である南流河道は、自然との間合いを取って折り合うというのではなく、自然をねじ伏せようとする人為と操作の思想の上に存続した。華北平原に暮らす人々の経済と社会はこの無理な対黄河事業のために人力、物資、資金の浪費を強いられ、疲弊したのであった。

黄河流域の経済発展と水需要構造の関係解明

井村秀文

我々は、黄河流域の経済発展と水需要構造の関係を解明するため研究を行った。主な研究は、以下の3点である。

1点目の研究は、黄河流域の水資源管理の方策と制度の整理を行うものである。ここでは、水資源管理の変遷を整理するとともに、水資源管理の現状と問題点を検討した。特に、断流を引き起こした水資源管理上の問題点を示すことによって、その現象の背景について言及した。

2点目の研究は、黄河流域の水資源需給構造の把握を行うものである。ここでは、流域全体の水資源需給構造を把握するため、水資源需給モデルを構築し、各県市の水資源需給バランスを月単位で推計した。さらに、農業用水の効率性を詳細な地域に分け示すことによって、効率性向上のための諸課題を抽出した。

3点目の研究は、水権取引の現状と課題について検討するものである。中国では、市場経済に移行するに従い、水資源管理でも市場メカニズムを導入して、水資源の利用効率性を高める議論が活発化している。特に、工業用水の新規需要に配分する水資源が不足しているため、農業部門が持つ取水許可証を工業部門に転売する議論が進められている。ここでは、黄河流域で行われている水権取引の現状と課題を検討した。

これらの研究の成果をまとめることによって、水資源制約下に置かれた流域の持続可能な発展のあり方を展望した。

本ニュースレターでは、上記3点の研究の成果をまとめ概説している。