

新疆タリム河流域の地下水流動解析 —飽和二次元モデルによる地下水流動解析—

Batuer Abudoureyimu*・城戸由能・田中幸夫*・中北英一

* 京都大学大学院工学研究科

要 旨

新疆ウイグル自治区のほとんどは乾燥地域であり、耕地開発・工業開発および気候変動等の影響で河川表流水の減少、地下水位低下などにより生活用水の確保難や水質悪化、農地の荒廃等の深刻な問題が発生している。そのため、将来的な水資源の確保および水環境の保全に対する有効な対策を検討する必要があるが、タリム河流域における水・物質循環構造に関しては物理的な現象解明はほとんど進んでいない。そこで、本研究では飽和平面二次元地下水流動モデルを用いて、タリム河流域全体の地下水水位および流動特性の解析をおこない、流域全体における水資源利用に伴う地下水流動状況の変化について検討した。

キーワード:新疆タリム河流域, 地下水流動解析, 水資源管理

1. はじめに

新疆ウイグル自治区は、乾燥地域のため水資源賦存量は限られており、耕地開発が過剰で、工業開発も増加している。山岳地域の氷河融水および降水を主な水源とする河川表流水は、気候変動等の影響により流域全般で減少するとともに地下水位が低下し、生活用水の確保難や水質悪化、農地の荒廃等の深刻な問題が発生している。

タリム河は新疆ウイグル自治区のほぼ中央から南に広がるタクラマカン砂漠の北辺を東西に横断する中国でもっとも長い内陸河川である。タリム河流域は国家級の綿花生産基地であるとともに、新疆における重要な食料と優秀な果実生産基地である。また、石油・天然ガスのエネルギー資源が豊富であり、国家レベルの21世紀エネルギー戦略に従い、将来的には石油化学工業地帯として開発が進む予定である。それゆえタリム河流域は新疆ウイグル自治区の経済活動の将来戦略の上で非常に重要である。タリム河主流は典型的な乾燥・内陸河川であり、本川流域のほとんどが砂漠域で占められ、本川への直接流入量は極めて少なく、主に北西部の上流域の支流から水量が補給される。

タクラマカン砂漠のような典型的な旱魃区域では、植物成長状況は地下水位と深く関係し、地下水供給

に依存しているといわれているが、これまでに行われたタリム河における河川流量や地下水位に関する調査は少なく、著者らが参加して取りまとめた中国タリム河水資源及び生態問題研究(Yudong Song 他, 2000)が最新かつ総合的なものであるが、簡単な統計処理が行われているのにとどまり、物理的な現象解析はほとんど進んでいない。

新疆ウイグル自治区の持続的な発展を進めるためにタリム河の水資源・水環境の保全策を考える上で三つの重要な点がある。まず緑地帯を保全して砂漠の北侵を阻止し、大部分の天然ガス・石油生産が位置する天山山脈南部の経済開発地帯を保護すること。次に、緑地帯による砂漠化の進行を防ぎ、青海から来る218号国道を保護するとともに、将来改修する青海新疆鉄道を守ることで、重要な物流動脈を確保すること。そして最後に西水東輸送の主要な河道を保護することで経済活動を支える必要がある。このように砂漠の進行を阻止とともに、特に下流域の河川および地下水の水量と水質を保全することが将来的に持続利用可能な水資源環境を作るために最も重要な課題となっている。そのため本研究ではこれまでの観測結果等を整理した上で、飽和平面二次元地下水流動モデルを用いて、タリム河流域全体の地下水水位および流動特性の解析をおこない、水資源・水環境の評価を行うことを目的とする。

2. 研究対象流域の概要

2.1 タリム盆地の地形・地勢特性

研究対象領域をFig.1に示す。後述する地下水流動解析の対象領域はタクラマカン砂漠を含む南北約800km、東西約1,600kmの領域とした。タリム河は新疆ウイグル自治区のほぼ中央を東西方向に貫流する大河川であるが、近年源流域・中流域での水資源利用量の増加、中流域での氾濫原からの蒸発により下流域への流下流量が減少している。国土の多くは典型的な乾燥地域であり、平均降水量が116.7mm/年であるのに対して可能蒸発散量は1,600~2,200mm/年と非常に大きい。このため水資源賦存量が乏しく、生態環境も脆弱である。さらに、経済発展と人口増加に伴い水資源環境はますます悪化している。

タリム盆地は中国の内陸盆地であり、天山山脈・パミル高原・崑崙山脈に囲まれ、東西約1,500km、南北は最大約600kmである。地形変化は緩やかで、地勢は西南から東北に緩やかに傾き、海拔は80~940mに分布し、地表勾配はおおよそ1/4,000程度である。タクラマカン砂漠はタリム盆地中央に位置し、面積は約33.8万km²、中国全土の砂漠総面積の約47%を占める。この砂漠の特徴のひとつが移動砂丘であり、その大きさは平均100~150m、最大200~300mで、流砂が砂漠面積の85%を占める。タリム河は、このタクラマカン砂漠の北に位置する天山山脈南麓部の緩傾斜地の沖積平野を流れており、この地域において古代から最も重要な川である。その水は砂漠の進退と緑地の存亡を決定し、古代の町の興亡はタリム河と関わりが深かった。

2.2 タリム盆地の気候特性

タリム盆地東南部では、年間を通してチベット高原から西南風の下降があり、しかも、北極の寒湿気団と東南季節風はこの地域には侵入しにくい。そのため、タリム河中流域における年平均降水量は17.4~42.8mmと中国国内で最も降水量の少ない地方となっている。また、年平均気温は10.7℃で、最高気温が43.6℃、最低気温は-30.9℃と年格差が非常に大きい。蒸発量はきわめて大きく、可能蒸発散量は約3,000mm/年にも達し、降水量は時としてこの1%にも及ばない。ここは中国の最乾燥の中心であり、砂塵をふくんだ黒い暴風が太陽を青黄色に変え、日光は遮られて、一日中暗く、見通しがきかなくなる状態が頻発する。最大風速は約40.0m/s、砂塵暴風の年平均発生日数は80日以上と多いものの、同時に砂漠の熱資源は豊かで、積算温度は4,100~4,300℃/年、無霜期間は185~214日、年間日照時間は約2,800~3,100時間にもなる。

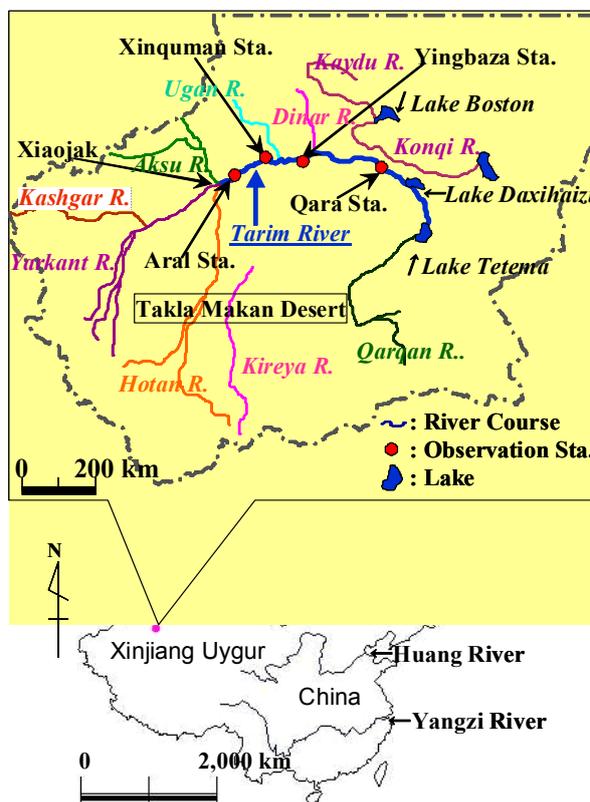


Fig.1 Map of study area

2.3 タリム河の特性

タリム河は新疆ウイグル自治区内のカシュガル・ホタン・キズリスウ・アクス・バインゴロンの5つの地区を流下し、流域面積は山岳部と砂漠を含めると約 $10.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、盆地部は約 $53.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、盆地の中心を占めるタクラマカン砂漠が約 $33.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、山麓平原地とオアシスが存在する可耕地の面積は約 $19.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ である。国内最長の内陸河川であるタリム河は3つの源流部支流であるアクス川・ホタン川・ヤルカン川が合流してできたものである。仮にヤルカン川を源流と考えるとタリム河は全長約2,200 kmであるが、タリム河と称される河道部は、通常三つの支流の合流点以下の1,287 kmを指す。中下流部分（インバザからカラまで）の沖積平野の幅は80.0~130.0km、長さは約315.0kmである。タリム河の河道は湾曲が多く、氾濫原や河岸段丘、くぼ地、砂丘等の微地形が発達しており、河畔林としてのコウエウ林の成長に適している。

タリム河流域の自然資源は豊富で、新疆の農業・畜産業・林業の中心地であり、タリム河は地域間の水量バランスを調整し生態システムを維持する重要な柱である。また、タリム盆地北端部での砂漠拡大を防ぐ天然障壁ともなり、砂漠の進退と緑地の存亡に重要な役割を果たしている。このようにタリム河下流域の生態システムを保全することは、新疆にお

ける環境保護と経済発展に対して大きな意味を持っているが、タリム河流域の土地資源の開発利用においては総合的・長期的計画が不十分であり、特にタリム河流域の持続的な生態環境を保全する面での認識が不足している、したがって、上流と下流、地域と地域、生産と生態、農業と林業・畜産業の間で様々な問題が発生している。そのため、タリム河流域では自然資源が衰退し、生態環境の悪化が進んでいる。

3. 流域水資源・水環境の問題点

タリム河流域における水資源・水環境に関する最も大きな問題点は、気候変動や開発進行により引き起こされる砂漠化の進行と地下水位の低下であり、灌漑用水・工業用水等への利用増加を目的としたさらなる地下水の汲み上げがもたらす、地表付近の塩分濃度の蓄積による水質悪化である。

3.1 砂漠化と塩害の進行

降水量の減少あるいは気温の上昇など自然環境自体の変化による地下水位の低下が乾燥化の主たる原因であるが、灌漑用水等への河川水の多量取水や樹木の過剰伐採による飛砂の進入・被覆の増大など、人為的な要因が砂漠化を促進している。つまり、砂漠化の進行と人為的影響の相乗的効果で環境影響が累進している。過去50年で流域内の人口と灌漑面積は増加し、灌漑用水量は3倍に増大した (Table 1)。流域中流の沖積平野部に建設された利水用の平原ダムからの浸透損失と蒸発損失が大きく、中流域では土砂が多量に堆積して河床が上がり、氾濫域が拡大して氾濫水の浸透・蒸発による損失が増加し、ますます下流への流下流量が減少している。そのためタリム河下流部ではで長期間にわたり河川水が枯れ、約360kmに及ぶ河道兩岸のコヨウの林が枯死した。

河川水位の低下に伴い地下水位が下降するとともに塩分濃度とともに水質汚濁の指標である鉄化度が上昇している。高濃度の塩分を含む地下水の農地灌漑や表層土壌の流出により、土壌表層部の塩分濃度はますます高まり、砂漠化と塩害が流域土地利用に対して重大な問題を発生させている。

1999年の流域実地調査 (Yudong Song他, 2000) によると、タリム河中・下流部でのロブノル県からロブ村までの218国道沿いで286カ所の砂害が報告されており、1982年の調査時点での115カ所から171カ所も増加している。特に、下流域での砂漠化が深刻なため一部のオアシスでは“沙進人退” (砂漠化の進行による人間生存域の後退) の局面をもたらした。調査の結果、タリム河下流域には半固定砂丘と低い移動砂丘が多く存在し、砂丘は毎年18.0~23.0m東進

Table 1 Increasing of population and irrigation

	1950	1998	[1998/1950]
Population [Million Capita]	156.0	825.0	5.3
Irrigation Area [km ²]	3,480.0	12,553.0	3.6
Irrigation Volume [× 10 ⁸ m ³ /year]	50.0	153.0	3.1

するとともに、タリム盆地東部のクムタゲ砂漠がこれまでに西へ1.0~1.5km拡大しており、毎年3.0~5.0mの速度でタクラマカン砂漠と接近していることが明らかとなった。このため、強い砂嵐の影響範囲とそれによる被害が広がってきており、人間および生物の生存環境が悪化し、農業と人民生活の継続が困難となりつつある。特に、218号国道と5つの兵団団場の安全が脅かされており、砂漠化の影響は深刻な状況にある。

3.2 農業生産活動への影響

タリム河沖積平野はタクラマカン砂漠の北縁に分布し、堆積物の主な構成は細砂である。沖積平野では風の吹く日が多く、風速5m/s以上の日が4月~7月に集中し、風食を促進する。耕地開発により天然植生が除去され、丘陵部を平にならして耕地が造成されるが、土壌の水分条件が変化すると、風食によって土壌の細かい粒子と栄養物質が失われる。その結果土地生産力が低下し、環境劣化と土地の砂漠化を引き起こすことになる。土地の砂漠化は農業に大きな危害を与える。最初の段階では、地表面における軽度の風食、砂の堆積および流動が始まり、周辺の耕地にも影響が出る。同時に作物が砂で傷められ、局部的に砂で埋められる。次の段階では、強い風食と中程度の堆積および埋没がおこり、砂丘頂部と低い窪地にやや大きい風食穴が発生し、また流動砂丘も発生するようになる。固定砂丘は半固定砂丘に変化し、砂丘と砂丘の間の低地では風食が激化し、飛砂は強度を増して頻発し、定常的に耕地を襲い、農作物を枯死させたり、埋没させたりして大被害をもたらす。最終段階での特色は流動砂丘の形成で、その風下への前進移動に伴って砂の堆積と埋没が発生する。またこの砂丘が飛砂の発生源となって広範囲の農地・集落・道路・建物等を襲い、砂に埋没させ、開発地区は壊滅的な打撃を受ける。

タリム河中流域では土壌塩分濃度の上昇や湛水被害によって放棄された農地は2万haに達している。特に、含塩量の高い地下水による灌漑のため、農地の土壌塩分濃度を引き起こし、作物は被害をうけ、放棄された農地面積は7千haにのぼった。タリム河中

下流域では灌漑区域以外でも地下水位が低下して土壌水分条件が変化し、風食によって砂漠化を引き起こした土地面積が4.5万haに達する。タリム河下流域のカラとテカンリクの五つの農場では灌漑用水不足と風食が原因で放棄された農地面積は1万haに達した。放棄された農地は風食によってさらに砂漠化を進展させることになる。

4. 流域の流況および水質状況

4.1 流下過程での河川流量変化

タリム河流域において大規模開発がおこなわれる以前の水文観測資料が少ないため河川流量の概算は困難であるが、歴史的記述によると流量はかなり大きかったと推定されている。大規模開発の影響でタリム各支流の農業用水利用が増加し、特に上流部でダムが作られた後、カシュガル川とウゲン川の水がタリム河に流入しなくなるなど、タリム河に流入する支流の流量は明らかに減少した。

タリム河上流域にも上遊貯水池・勝利貯水池・多浪貯水池が建設され、その総貯水容量は3.3億 m^3 である。中流域では反帝貯水池・反修貯水池・巴滿貯水池が建設されており、その総貯水容量は2.4億 m^3 である。下流域にはカラと大西海子貯水池が建設されており、2つの総貯水容量は3.0億 m^3 である。

アクス川流域で1952年以後に拡大された耕地面積は12万haに及び、アクス川から取水された灌漑用水量は27億 m^3 に達した。ヤルカン川とホタン川の両流域で開発された農地面積は18万haで、灌漑用水量は35億 m^3 に達した。源流域三枝川流域の灌漑面積が拡大して、灌漑用水量が増加したため、タリム河本川へ流入する水量が激減した。

アラル水文調査所の観測によると多年平均水量は半減している。大規模開発以前にはアラル水文調査所の年平均水量は約100.0~120.0億 m^3 であったと推定されており、アクス川はタリム河の最大の水源であり、タリム河の形成と発展に決定的な役割をもたらす。アクス川の年平均水量が75億 m^3 で灌漑面積は約23万ha、年間の取水量は53億 m^3 に達しており、これは河川水量の71%を占めている。ヤルカン川の年平均水量は78億 m^3 、灌漑面積は36万haであり、河川水はほとんど灌漑に利用され、単位面積当たり灌漑水量は27,000 m^3/ha に達する。ホタン川の年平均水量は49億 m^3 、灌漑面積は11万haであり、灌漑水量原単位は20,000 m^3/ha に達しており、夏には年間の約半分の水量が下流に流れて6.5万ha森林帯を涵養するほか、11億 m^3 の水量がタリム河に流入する。以上のように、3つの源流の灌漑面積が拡大し、灌漑用水量が増加したため上流から来る水量が激減した。

タリム河中流の河床勾配は緩く、1/5,000-1/10,000である。流砂・沈積作用のため固定河床がないのが常で、河道は遷移しやすい。南北両岸では極めて小さな支流が多いので大小の分流が縦横に分布し、交叉して多くの湖が形成される。灌漑のために両岸で多くの取水口がつけられている、沙雅県内では28個の無頭首工用水口がつけられており、タリム河沿岸では320カ所で堤防を取り壊して灌漑用水を確保する場所がある。また、掘削されただけの用水路は浸透防止の機能が低く、貯水池もうまく機能していない。このほか、タリム河は幅員が大きく、水深が浅く、河床の構成物質が大粒で粗いため、浸透が大きい。このため、タリム河中流は浸透と蒸発などが原因でアラルからカラ地点に至る528kmの間で流量の82%近くが失われてしまい、タリム河の下流では水不足が深刻である。カラ水文調査所の多年平均水量は6億 m^3 であり、50年代に比べて2/3に減少した。カラと大西海子貯水池が建設され、大西海子貯水池はタリム河の終端となった。このような人為的な要因で、下流のカラにいたるタリム河は多年にわたって断流状態となり、300kmの河道はほとんど涸れている。また、大西海子貯水池の下流に位置するロブノール湖流入への水がなくなり、70年代初期にロブノール湖は完全に消失してしまった。

4.2 河川流量の経年変化と年内変化

過去の水文資料を整理した結果、1950年代中期から60年代にかけてのタリム河三源流から主流に流れこむ年平均流量は51.8億 m^3 であったが、1990年代には42.0億 m^3 に低下し、約9.8億 m^3 も減少してきた。一方、タリム河主流上流域における利水量は1950年代の12.6億 m^3 から1990年代の19.3億 m^3 に増加し、タリム河中流域を流れる河川流量は1950年代の37.1億 m^3 から1990年代の23.3億 m^3 にまで減少している（Fig.2）。1957年から1998年までのタリム河中流域の平均年流量は25.3億 m^3 であるが、最大年流量と最小年流量の比は5.84であり、この期間の変動幅は大きい。このような不安定な流量状況は、上流域源流部から流れ込む流量の不安定性の影響が大きい。経年的な流量変動の要因としては、以下の点が考えられる。

(1) タリム河の主な水源は上流源流部の降水と高山域の氷河雪融水であり、天山山脈の南側斜面とコンロン山脈北側斜面から発する大きな源流から補給されており、水源流量は高山氷河貯蔵量、積雪量、山岳部気温状況と密接な関係にある。降水量や氷河・積雪からの融水量は気候影響、特に気温により大きな影響を受けるため、毎年の積雪量・氷河量の増減と春季以降の融氷・融雪のバランスがタリム河への

年間流入量を不安定にしている。

(2)タリム河の上流部三源流であるアコス川・ホタン川・ヤルカンド川で、1950年以降下流への平均流下流量が低下している。その原因は三源流の流域内の灌漑地増加が挙げられる。統計によると三源流での灌漑面積は1949年の35.1万haから1993年には77.6万haに増加している。タリム河本川河道に直接流入する流域面積は小さく、乾燥地域に位置し降水量も少ないため、本川河道部での供給水量は少ない。

(3)タリム河本川上流域でも耕地開発が進められており、農業用水量が増加してきた。また、タリム河中流域の河床で土砂が堆積して、洪水期で氾濫が多く、蒸発と浸透による主河道からの無効損失が大きい。

(4)タリム河流域全体における水資源管理が不十分であるが、特に上流域の農村では総合的な水資源管理の体制が整っておらず、合理的な河川水利用・地下水利用の計画が機能せず、行政の指導力も弱い。このため、現地農民がそれぞれの判断で自由に取水しており水資源の浪費が多い。

流域河川流量の年内の変動特性は、一般に10～4月が渇水期、3～4月に春洪水が発生し、7～8月の期間に流量のピークを迎える。Fig.3にタリム河の上流から下流の3つの観測点の1957年から1998年までの月平均流量を示す。7月から9月の豊水期間中に、中流域では最大月平均流量が約600m³/sにも及ぶが、下流域(Qara)では月流量の変動は小さく、年間を通して約50 m³/s程度に収まっている。タリム河中流シンチマン観測点の月平均流量変化を見ると、7月～9月の洪水期総流量は18.6億m³に達し、年総流量の79.3%を占める。3月頃から氷河雪融水が流入し始め、小規模な春洪水期を迎えるが、4～6月には農業用水利用が増加して河川流量は低下し、水不足が発生する。11月～2月にかけての渇水期間の総流量は年間総流量の約5.4%を占めるにとどまる。このように毎年春季耕作期の4月～6月にかけて流域全体で灌漑用水の導引水が行われ、自然植生への水供給が不足して植物成長に大きな影響を及ぼしている。

4.2 水質環境の状況

対象流域内の山岳氷雪の融水を源とする枝川は、谷口を出て、ただちに伏流水となるか山麓部で表流しながら大量に浸透していく。このため、地下水位はかなり深く、地下水深度は約4.0m以下となり、土壌中の塩類集積の危険を免れている。洪積平野の先端では、地下水がしばしば湧水の形でふたたび地表に滲み出して地下水湧出帯となり、塩分を含む湿草地を形成する。こうして、しばしば盆地中央は広い範囲にわたって塩分を含む低地あるいは水流が潜行する低湿地となり、水がたまれば塩湖として地表に

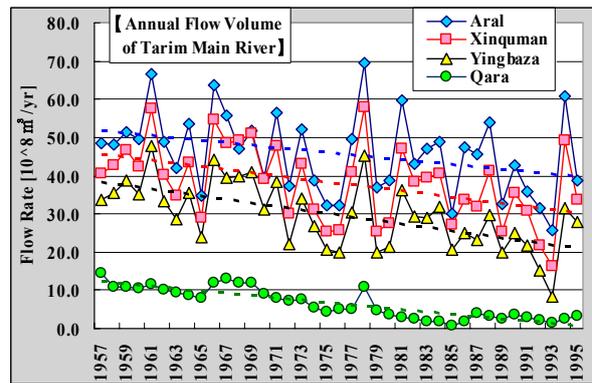


Fig.2 Annual river water flow in Tarim main river

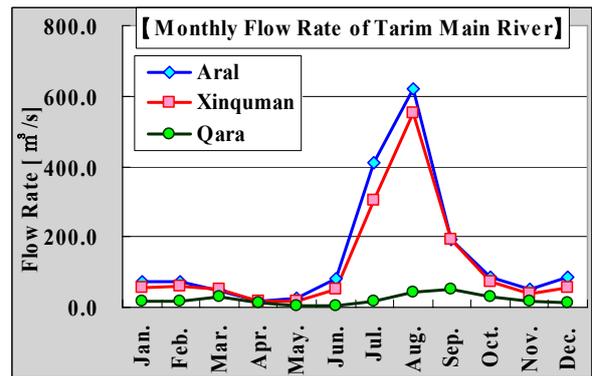


Fig.3 Average of monthly discharge in Tarim River

現れる。この現象に従い、地下水の化学的性質も山麓から盆地の中心に向かって地域的に変化している。一般に山地は表流水形成区なので、地下水の塩分濃度はかなり低いが、谷口から山麓洪積平野に出たからは重炭酸塩型の淡水となる。洪積平野の先端部では地形の傾斜は緩慢となり表層土壌の土粒構成も細かく、地下水の流動が妨げられ、地層から供給される塩分が滞留して水質は含塩化程度を増し、硫酸塩型の地下水に変わる。さらに凹地に向かって排水の悪い塩類湿草地と塩類沼沢が形成され、地下水位は浅いときに地表に接近する。このような湿原や沼沢では含塩化の程度はいよいよ強まり、硫酸塩あるいは塩素化合物の多い水となる。あらゆる表流水と地下水はみな山地から低地に流れ、最終的にその一部がタリム河に流入し、他は蒸発する。タリム河・河川水の塩分濃度は水量の時間変化につれて変化し、洪水期は含有量が低下して渇水期は上昇する。なおアラル水文調査所のデータによると、塩類濃度の変動範囲は0.5～5.5g/Lである。

タリム盆地の極端に乾燥する大陸性気候は、河水の化学的性質を複雑なものとする重要な原因のひとつである。土壌中の塩類の多くは硫酸ナトリウムと塩化ナトリウムである。極端な乾燥のために土壌中に塩素化合物の塩類盤層が出現するが、これは世界中の砂漠土壌のなかでもめずらしいものである。砂

漠域では雨量が極めて少ないため土壌中の塩類は全く溶脱しないか、溶脱しても非常に微量なので、可溶性塩類が大量に蓄積する。そのため、少量の水が大量の塩類を溶解することによって、河川は短い流下過程で比較的高い含塩状態を呈するようになる。またタリム河の水量が減少するとともに河川水の含塩量が徐々に上昇する。水質の変化は、さまざまな自然条件と人為的要素による影響を総合的に反映しており、タリム河中上流域の塩類化分布は非常に広汎にわたる。農地開発を進める上で土地改良のために農地に集積した塩類を洗脱するために使われ、大量の高濃度塩類を洗い流した水は、たとえば新和県と沙雅県の農地排水を集めている新沙排水路を介してタリム河に流入している。このようないくつもの排水路がタリム河に流入し、本川河川水の含塩量は上昇してきた。しかも水質の年内変化は川の水量と密接な関係があり、夏秋洪水期は含塩量が最低となり、春冬渇水期は急激に上昇する。

4.3 地下水位の変動状況

タリム河本川沿いの地下水観測点 (Fig.1) の地下水深度をFig.4に示す。本川上流部のアラル付近では1970年までは地下水深は上昇していたがその後、やや減少傾向を示している。本川下流部のカラ付近では地下水深が低下する傾向がみられる。また、本川中流部のインバザ (Fig.5) の一年間の観測結果では月変動が見られるが、必ずしも降水量の年内変動と対応せず、農業用水等の揚水による地下水流動への影響が大きいと考えられる。

カラ観測点から約50km離れているアラガン区における帯水層厚は20m~40mの間にあり、主要な帯水層の土質は細砂・粉細砂であり、空隙は小さく、浸透係数は1.0~5.0m/dayである。帯水層の富水性は良好とはいえず、井戸1カ所あたりの湧出水量は150.0m³/day/m以下である。

Table 2にタリム河全域における地下水の補給源の割合を示す。過去の資料では、1980年代の地下水天然補給量は296.8億m³、可能揚水量は149.8億m³、1990年代の地下水天然補給量は333.4億m³で、このうち山岳部での地下水天然補給量は195.5億m³、平原部では227.3億m³と見積もられ、総可能揚水量は144.4億m³と推定されている。1999年の調査結果 (Yudong Song他, 2000) から地下水揚水量は70年代には8.2億m³、80年代では11.4億m³、90年代では27.0億m³という結果を得たが、先の総可能揚水量の数値からみると、十分供給可能な水量であり、地下水位の低下や水量不足が起こるとは考えにくい。しかし、流域内の観測井戸では経年的な地下水位低下が観測されており、上述のような砂漠化や塩害を引き起こしてい

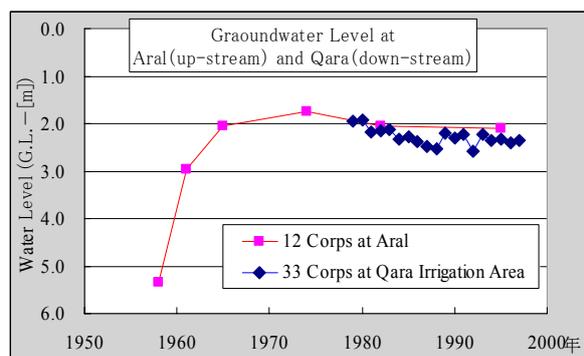


Fig.4 Groundwater level at Aral and Qara

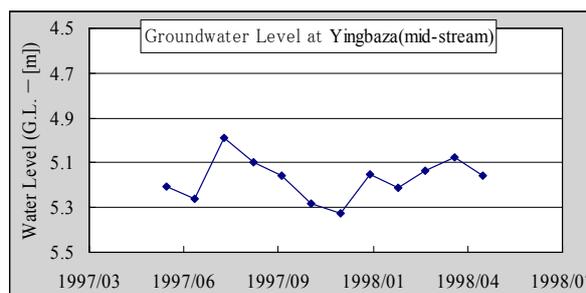


Fig.5 Monthly groundwater level at Yingbaza

Table 2 Recharge source of groundwater

Source	Ratio[%]
Precipitation	2.4%
Irrigation Water Way	35.3%
Subterranean	17.3%
River Water Flow	32.9%
Irrigation Area	3.8%
Flood Plane	8.3%
Summation	100.0%

る。これは、過去の資料では、客観的な観測データや物理的な解析に基づいた地下水資源量の推定・評価が行われていないためであり、河川水・地下水の流動現象を総合的に表現できるモデルを用いて流動解析を行い、地下水位の経年的な低下状況を再現して、これまでのタリム河流域における水量収支を評価することが、まず必要である。

5. 地下水流動解析

以上のような過去の資料・観測データの整理を踏まえて、タリム河流域における地下水流動解析を行った。

5.1 解析対象領域

解析対象領域は上流域源流部の主要な三つの支流河川とタリム河本川を含む、東西約1,600km、南北約800kmの範囲とした。計算領域は5kmグリッドに分割し、南北160個、東西320個の格子空間を計算領域として設定した。

5.2 解析に用いたデータ

解析に使用した地表標高 (USGS, 2006) および土地利用 (USGS, 2007) のデータは1kmグリッドで提供されており, 地表標高については計算領域の5kmグリッドに単純平均して与えた。土地利用については, 後述の涵養量の設定で説明する。地表標高および土地利用データの概観をFig.6およびFig.7に示す。

解析対象流域には, 14地点の雨量観測所において

経年的に降水量観測が行われている。Fig.8に14地点の過去数十年間の年平均降水量を示す。昆侖・天山山脈沿いの3地点の年間降水量は250mmを超えているが, 他の地点の多くは年間降水量50mm以下である。このように対象領域内の雨量の空間分布は大きい。Fig.9は8カ所の観測所月平均降水量を示しており, 5月~8月の四ヶ月間に降雨が集中しており, 年間降水量の3分の2を占めている。計算領域の降水分

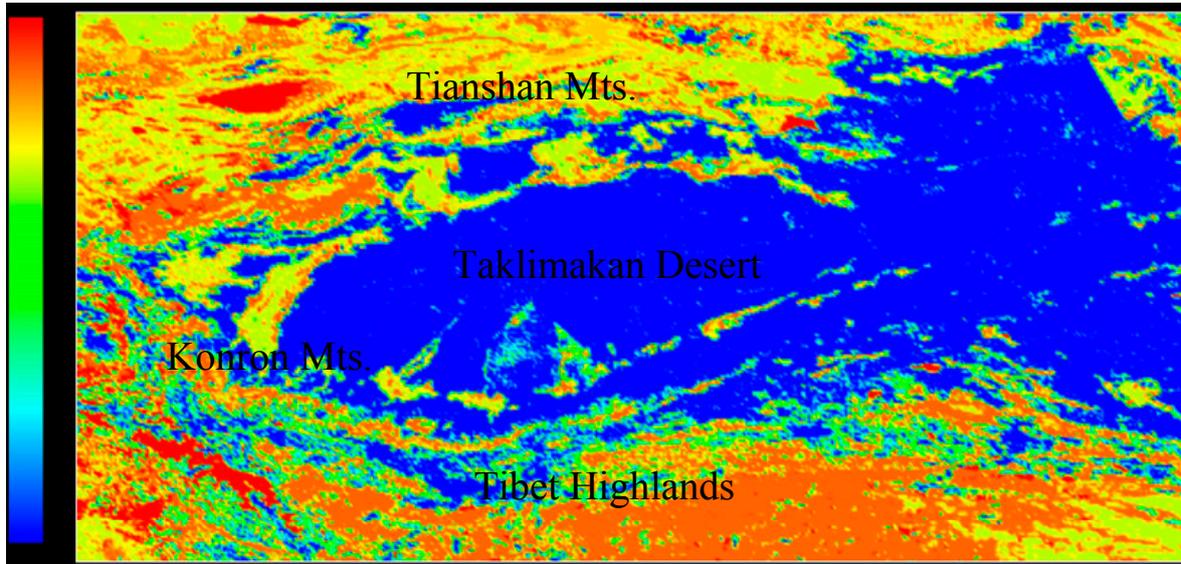


Fig.6 Elevation of land surface in Trim River basin

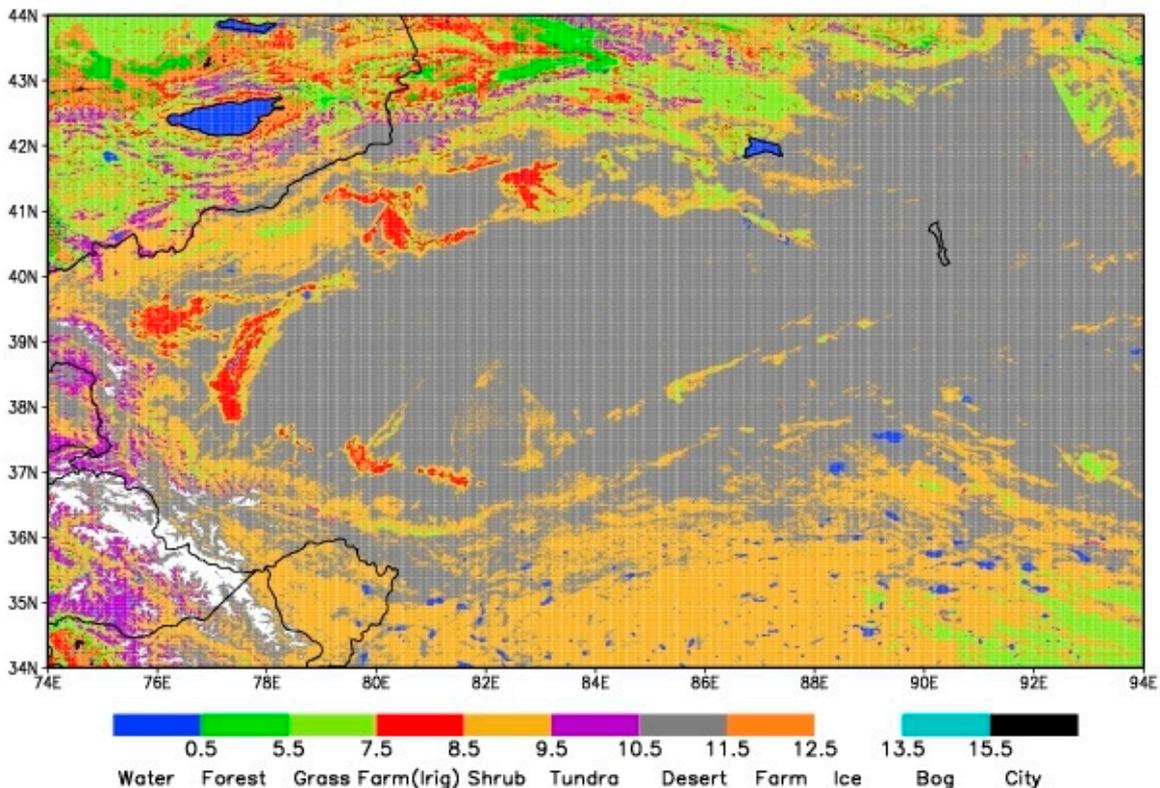


Fig.7 Land use in Trim River basin

布については、14地点の年平均降水量および8地点の月平均降水量から各地点の毎月降水量をもとめ、テイセン法を用いて領域内の空間分布をあたえた。

降水量から地下水への涵養量の設定は、1km土地利用データが11種類の土地利用に分類されており、それぞれの土地利用に対して、降水量から地下水涵養量となる割合を設定し、計算格子の5kmグリッド内の土地利用面積割合で加重平均した値（地下水涵養率）として与えた。Fig.10に地下水涵養率の分布を示す。なお、今回の計算では蒸発散量については地下水涵養率に含めて計算している。

飽和平面二次元地下水流モデルを使ってタリム河地下水流動解析を行なった。モデル基礎式を以下に示す。

$$\lambda \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K(h-s) \frac{\partial h}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K(h-s) \frac{\partial h}{\partial y} \right\} + \varepsilon$$

ここで、 λ は間隙率、 K は透水係数、 h は水位、 s は基盤標高、 ε は（涵養量－揚水量）である。この式を差分展開し、数値計算をおこなった。

上述の通り下流域のカラ観測地点付近の透水層は地表から20～50mの間にあり、主要な地質は細砂・粉細砂で空隙は小さく、浸透係数は1.0～5.0m/dといわれている。これらの情報を基にして、地下水流動に関わるパラメータとして、透水層厚=50.0[m]、有効間隙率 $\lambda=0.2$ とし、透水係数については、 $K=1.0 \times 10^{-2} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ [m/sec]の間で変化させて、計算領域全域に一樣に与えた。透水層厚を一定としたので、帯水層基盤標高は地表標高から一律に50m低い位置

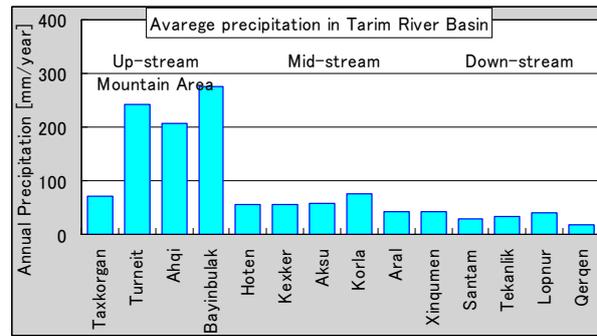


Fig.8 Precipitation at 14 observation stations

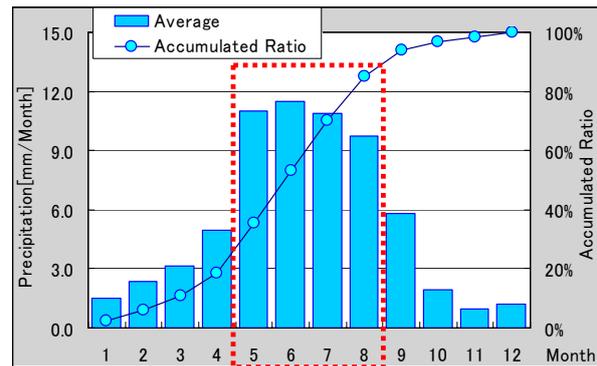


Fig.9 Average monthly precipitation at 8 observation stations

にあり、高度分布は同じとなる。このため、地下水流動場の空間境界は地表山岳部の分水嶺と一致し、流量収支に基づいて境界から領域内への流量を求めている。地下水盆の下流端は自由境界とし、タクラマカン砂漠からクムタゲ砂漠に向かって流下する。

計算結果の比較・検証のために、先に示した3地点の地下水位データを用いた。

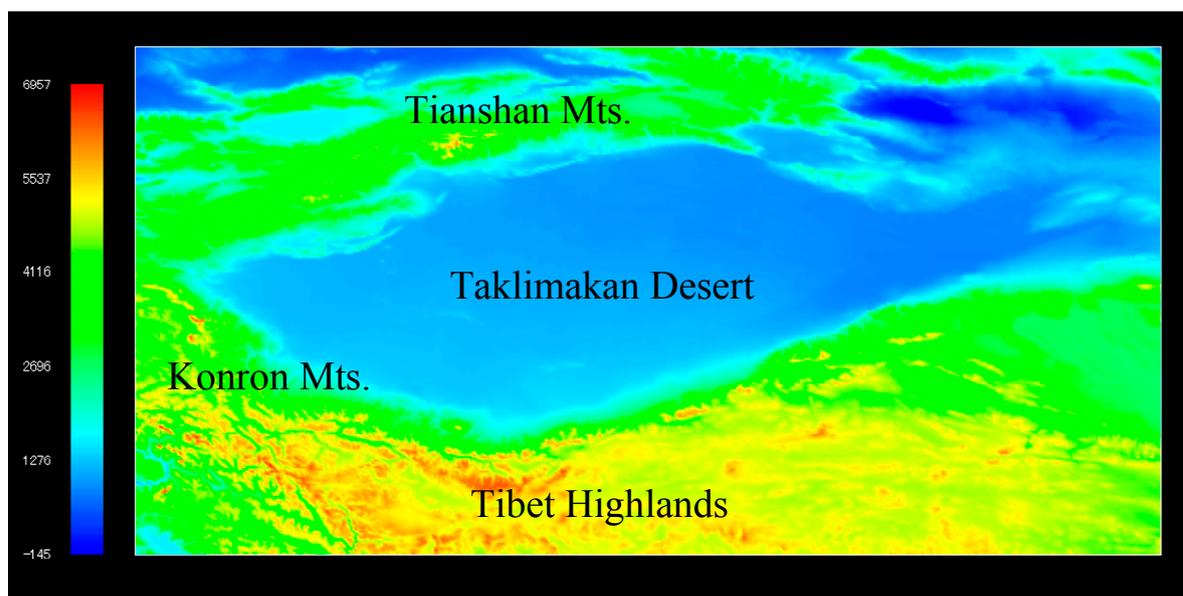


Fig.10 Recharge ratio estimated based on land use in Trim River Basin

5.3 地下水流動解析結果

地下水揚水量については、文献で得られた流域全体の年間揚水量と全耕地面積で除した原単位を基準として与えるが、年内変動に関するデータが得られていないので今回の計算値では年間を通して一定量とせざるを得なかった。そこで、灌漑農地が広がる上流部アラルにおいて、年間変動が収束 (Fig.11) するように揚水量を修正した上で領域全体の灌漑農地に与えた。全般的に、地下水流動は標高の高い山岳部から盆地中央に向かって流れ、タリム河本川に入ると地下水流出は河川水流の方向と一致して、ほぼ東向きに流れる傾向が再現できた。また、Fig.10に示すように月平均降水量の変化に対応した月変動は再現できたが、揚水量を年間を通して一定量で与えているので、Fig.5に示す中流部インバザの地下水位変動とはやや異なる結果となった。これは流域内の作付け作物種を特定して灌漑期・非灌漑期に分けた揚水量設定を行うことで修正可能と考えている。下流域では地下水補給に対して降水の影響は小さく、地下水は主に潜水蒸発と植物蒸散によって消失するため、経年的に地下水位が下降する傾向 (Fig.4) が見られた。計算結果でも下流部カラ地点における経年的な水位低下は再現できたが (Fig.12)、20年間の水位低下速度は観測値の-2.0cm/年よりかなり小さくなった。

6. 結論

新疆タリム河流域における水資源環境の現状を整理し、現在までの調査結果だけでは流域の水収支を十分解明できないことが明らかとなった。そのため飽和二次元地下水流動モデルを用いて現況再現計算を行った。灌漑農地が広がる上流部のアラルにおいて年間の変動が収束するように揚水量を設定するなど、いくつかの工夫をおこない、月平均降水量の変化に対応した地下水位の月変動の再現はできたが、揚水量を年間を通して一定量で与えているので、十分な再現結果を得られていない。また、下流部のカラにおける経年的な地下水位低下は再現できたが、低下速度は観測値よりかなり小さくなった。

今後は、まず基本となる地下水流動モデルの修正・改善を進めるとともに、物質循環モデルを加え、今後検討すべき対策や将来変動影響を評価するために、これらのモデルの改良を進めていく。

謝 辞

本研究で用いた、タリム盆地の標高・土地利用

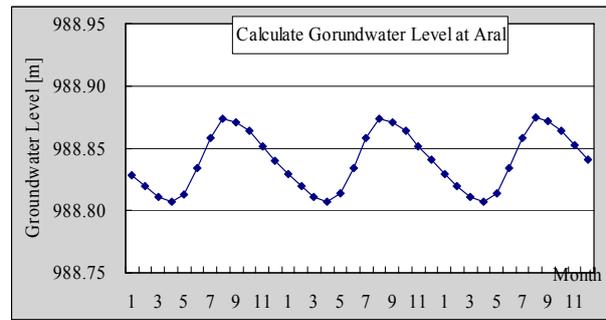


Fig.11 Calculated groundwater level at Aral

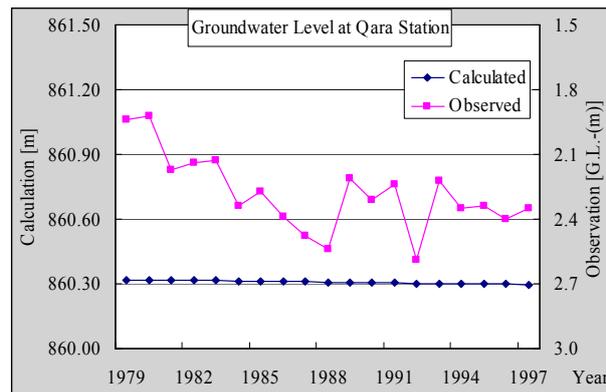


Fig.12 Calculated and observation of groundwater Level at Kara

データの加工には、アジア研究所・研究員甲山 治氏の協力を得たことを記して謝意を表する。

参考文献

- 新疆タリム河流域管理局 (2006) : 欢迎来到塔河网, www.tahe.gov.cn, (参照:2008/02/25) .
- 中国水利局 (2006) : 看天下快报, www.water.com.cn, (参照:2008/02/25) .
- Batuer.Abudoureyimu (2004) : 農業活動の水環境に対する汚染とその予防対策, 旱魃区研究, Vol.3 (ウイグル語) .
- Juhua Luo 他(2005): ヤルカンド河流域水文特性分析, 水文, pp.56.
- Liu Ying et al. (2006) : Modeling groundwater table dynamics at the lower reaches of the Tarim river, Resources science, Vol.28, No.5.
- Mayingjie, Jifang, Fanzili, et al. (1999) : タリム河水質汚染分析及び制御対策～タリム河を例にする～, 干ばつ地区地理, 1999年12月第4期.
- USGS (2006) : Global 30 Arc Second Elevation Data, http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/dem_img.html, (参照:2008/02/25) .
- USGS (2007) : Land Cover Data, <http://tahoe.usgs.gov/landcover.html>, (参照:2008/02/25) .

- Xu hailiang et al. (2007) : Relationship between climate changes and annual runoff of headstreams of Tarim River, 地理科学, pp.219.
- Xi Xiumei et al. (2006) : Runoff analysis of the middle reaches of the Tarim river, Research of soil and water concervation, Vol.13, No.2.
- Yudong Song et al. (2000) : 中国タリム河水資源及び生態問題研究, 新疆人民出版社, pp.50-160.
- Zhonglei Feng (2004): Study on the Relation of Channel Sedimentation and Water Conservancy Projection Running in Tarim River, 新疆農業大学修士論文, p.8.
- Zhang Zongjie et al. (2005) : Database sestem for groundwater resources of China.The Map publishing house of China.

**Groundwater Analysis of Tarim River Basin in Xinjiang
- 2-dimensional Saturate Groundwater Flow Model Analysis -**

Batuer ABUDOUREYIMU*, Yoshinobu KIDO, Yukio TANAKA* and Eiichi NAKAKITA

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Tarim River, which is one of the longest inland rivers in China, mainly supplies water resources for the human society and the agricultural activity in Teklimakan Desert. Water resources and water environment in Tarim river basin are fundamentally poor because of arid area condition. Furthermore increasing of irrigation water and pollutant load inflow derived from national development projects in this area brings much damage on the Tarim basin environment. Especially, river surface flow in downstream area was intermittently dried up and groundwater level has been gradually dropped. Groundwater flow analysis in Tarim river basin was carried out by the numerical model and water resources conservation measures were discussed.

Keywords: Tarim River basin in Xinjiang, groundwater flow analysis, water resources management