アラル海の縮小や集水域の灌漑地拡大の影響を考慮した

水・熱収支の経年変化の再現

峠嘉哉・田中賢治・小尻利治・浜口俊雄

要旨

アラル海流域では、ソ連期から始まる大規模な灌漑計画の結果として深刻な水不 足が発生した。下流地域を中心に水不足に苦しむ人々は数百万人に上ると報告され ており、アラル海の面積も1960年の10%にまで縮小した。この問題を解決するには 持続可能な灌漑計画が必要であり、その計画のためには流域で使用可能な水資源量 と灌漑地での水需要量が科学的基礎情報として有用である。

本研究は灌漑による水使用の影響を陽に取り扱うことのできる陸面過程モデル SiBUCを用いて、1961年から2000年までの40年間で流域の水・熱収支を解析するこ とにより、流域の水資源量・灌漑水需要量が灌漑計画の影響を受けてどのように変 化してきたのかを物理的に解析した。

キーワード:陸面過程モデル,灌漑,アラル海,SiBUC

1. 本研究の背景と目的

アラル海流域では1940年頃よりソ連が進めた自 然改造計画の一環として大規模な灌漑地が開発さ れた。その計画によって流域の人口が1960年から 2~3倍にまで増加する等の成果が残された一方, アラル海に流入する河川の流量がアムダリア・シ ルダリア両河川を中心に激減したため、1960年時 点では世界で4番目の面積を誇ったアラル海はそ の10%の面積にまで縮小した (Jean-Francois Cretaux et al. 2005)。1991年にソ連が崩壊すると 流域は6カ国に分断され国際河川となったが、各 国はGDPの多くを灌漑地における農業に依存して いるため現在でも大規模な灌漑が続けられており, 関係国間の水利用条約が失敗に終わっている中で 国際問題に発展している (Elhance, A.P. 1997, JICA報告書 2009)。現在流域では水不足で苦し む人が下流域を中心に数百万人いると報告されて おり (Micklin, P. 2007), 水質の悪化等の問題も 伴って複合的な被害が報告されている。このよう なアラル海縮小に象徴される水不足問題は20世紀

最大の環境問題とも言われている。

以上のような水問題を解決するためには,長期 的・国際的な水利用計画を基に持続可能な開発を することが望まれる。そのためには流域で利用可 能な水資源量や,それによって賄うことのできる 灌漑地がどのくらいであるのか,現在から将来に 至るまで推定する必要があり,その結果は今後の 計画における科学的基礎情報として有用である。

しかし既存の研究では水資源量の把握に必要な 蒸発散量や土壌浸透といった要素の推定に時間ス ケール・空間スケールで十分な精度での解析が行 われておらず,更に流域の水利用の中で非常に大 きな影響をもっている灌漑の影響を農事暦や作付 作物による違いといった様々な要素を含めて物理 的で詳細に解析している研究がないため,流域の 水需要の9割を占める灌漑必要水量が十分に解析 されていなかった。

更に温暖化の影響についても検討が必要である。 21世紀気候変動予測革新プログラムのGCM出力 結果によると、今世紀末までに温暖化の影響に よってアラル海流域では降水量が増加すると同時 に気温も増加すると予測されている(Kitoh et al. 2009)。この変動は降水量の多い山岳地域で顕著であるので流域の水資源への影響は大きく,融雪時期のずれ等に関しても影響評価が必要である。このような気候変動の影響を評価するという目的において物理的手法は大いに有効である。

本研究は、陸面過程モデルSiBUCを用いてアラ ル海流域全体で水・熱収支の再現を行う。この解 析は過去から現在に至るまでの再現というだけで も意味があるが、将来予測を念頭に置いた前段階 という側面もある。具体的には、アラル海の縮小 が大規模に始まったとされる1960年代からの再現 によって、流域の水資源量の把握と、それに対す る灌漑計画の影響評価をした。

解析に用いた陸面過程モデルSiBUCは, 農地に おける灌漑の影響を陽に取り扱うことができる点 に最大の特徴を持ち, 作物ごとに定められたルー ルに従って土壌水分の人為的管理を表現できる数 少ないモデルの一つである(Tanaka, K. 2004)。 特にアラル海流域では大規模な灌漑計画に伴う急 速な土地利用の変化が大規模に行われてきたため, 水・熱の挙動は経年的に変化している。これを再 現することで, 灌漑面積の拡大・アラル海の縮小 が流域の水資源量・水利用量に与える影響を明ら かにする。

2. 解析手法

2.1 解析の概要

解析は1961~2000年までの40年間で0.125°解 像度で行った。解析の流れはFig. 1のようになる。 解析に陸面過程モデルを用いたことで、乾燥地に おいて支配的な蒸発散量を正確に求めることがで き, SiBUCを用いることで灌漑の影響を物理的に 評価することができる。地表面パラメータと気象 データが必要である。地表面パラメータは土地利 用や植生情報など地表面情報を示したパラメータ であり基本的には各年で同じものを用いるが、ア ラル海流域では大規模な灌漑計画が行われている ので, 灌漑面積拡大とアラル海の縮小を考慮させ た土地利用データを各年で用意し、それを地表面 パラメータとして用いた。気象データには解析期 間の40年間で一時間ごとのデータを用意した。本 流域ではサイエンスコミュニティーに公開されて いるデータが極めて少なかったため、これらの データは全球で用意されているデータセットを用 いている。



2.2 水収支式

陸面過程モデルは鉛直一次元のモデルであり, 蒸発散や浸透,遮断といった過程をそれぞれ解析 することができるものの,発生した表面流出・基 底流出がグリッド間で二次元的に流れていく過程 を考慮することができない。そこで本解析では水 資源量を各グリッドからの流出量の流域全体の総 和と定義する。このような理由により解析は二段 階で行う。一つ目はグリッド内の鉛直一次元解析 であり,これには陸面過程モデルSiBUCを用いる。 二つ目はグリッドから発生した流出量を足し合わ せる過程である。

グリッド内の鉛直方向の水収支は以下のように 表される。

$Runoff = prec - evap - \Delta swe - \Delta soilm \quad (1)$

ここに, Runoffは水資源量, precは降水量, evap は蒸発散量, △sweは積雪水当量の変化量, △ soilmは土壌水分の変化量である。なお, Runoffは 表面流出量と基底流出量の和である。式(1)は水 資源賦存量から土壌水分や積雪としてグリッド内 に貯留される水量を引いた分の水がグリッドから の流出量となることを表現している。SiBUCは式 (1)の全ての項を別々に物理的手法で解析するが, それと同時にこの式が常に成り立つようになって いる。

グリッド内に灌漑地がある場合は、グリッド外 の水(主に河川水)が人為的に取水、もしくは排 水されることを考慮しなければならない。その場 合には式(1)の各項の解析に加えて灌漑取水量Win と灌漑排水量Woutが決定されている。これらは グリッド間の水移動が前提となっているため、物 理モデルでの評価が難しい灌漑効率γも含めて次 式で考慮される。

流域全体の水の流れは次の式(2)によって表現 される。

$$Qin = \sum Runoff - \sum \frac{Win}{\gamma} + \sum Wout + \alpha \quad (2)$$

*Qin*はアラル海への流入量, γ は灌漑効率, α は 外部項である。

アラル海流域では、水路からの漏水や塩性化し た灌漑地での塩分の洗い流し等が行われるために 水の損失量が多く、他の流域と比較しても灌漑効 率γが悪いことが知られている。これを物理的に 評価することは現状では不可能で、詳細なデータ も得られなかったため今回はγを流域で一律に 0.4と仮定している。αは外部項であり、SiBUC による鉛直一次元解析では考慮できない流域外の 灌漑地への取水量を反映させるための値である。 第5節で詳述する。

以上より,式(2)は各グリッドからの流出量の 総和である水資源量から灌漑必要水量と流域外等 に流出する水量を差し引いたものがアラル海に流 入する量であるということを表現している。

2.3 気象データ

使用した気象データは以下の通りである。

・平林プロダクト(H08):H08は0.5°解像度で 全球の降雨量・降雪量・気温・比湿・下向き短波 放射・下向き長波放射の気象データを揃えている

(Hirabayashi et al. 2008)。風速データを用いて 雨量計データの補足率を補正している点が特徴で, 一般的に水源の多くが冬季に山間部で降る降雪で ある当流域では有効性の高いデータであると言え る。

・JRA25:JRA25は全球1°解像度で全球の再解析 データを用意している。JRA25からはH08には無 かった気圧と風速のデータを用いている。

本解析は1960年から行っているのに対し, JRA25には1979年からの解析データしかないため, 1979年以前のデータを用意する必要があった。降 水量と風速の間には相関係数0.32で若干の相関が あることが分かったので,データ欠損年の各月で H08の降水量が最も近い年を1979~2003の間から 選択し,その年の風速データ,気圧データを用い るという方法を取った。

2.4 地表面パラメータ

土 地利用以外の地表面パラメータは ECOCLIMAPデータセットから入手した。 ECOCLIMAPはLAI等の植生の情報から土壌タイ プ等のように、一般的な陸面過程モデルに必要な 地表面パラメータのほとんどを揃えている。これ らの条件は40年間でほとんど変化しないと考えら れ,過去のデータも得られていないため解析期間 で同じものを用いている。

土地利用データにはGLCCデータを用いた。 GLCCはUSGSが公開している全球1km解像度デー タで、土地利用を灌漑地を含む24種類に分類して いる。解析にはこの24種類をSiBUCでの解析に必 要な20種類に再分類して用いている。

しかし土地利用は他の土地利用パラメータと異 なり、本解析期間の40年間で急激に変化してきた。 灌漑地は約2倍に増加し、その影響でアラル海の 面積は10%にまで縮小している。これらが水・熱 収支に与える影響を解析に反映させるため、土地 利用データを各年で変化させる必要があった。

(1) アラル海縮小の再現

土地利用推定の第一段階として,アラル海面 積の経年変化の推定を行った。

Fig. 2に示されるように、アラル海面の標高は 各年で報告されている。それに対し、幾つかの データセットが現在陸地になっている過去の水面 域の標高を公開しているため、アラル海面の標高 よりも低い地域を各年で抽出し、その領域が海 だったとすることで次ページのFig. 3のように推 定した。なお、Fig. 2で1998年よりアラル海の標 高が非連続的に変化しているのは、コカラル堤防 の建設と崩壊の影響によるものと思われる。この 堤防は小アラル海を保全するため、アラル海を南 北に分断する形でまず1996年に建設されたが、 1999年の4月に崩壊した。その後2005年に再建設 されている(World Bank 2008)。

次ページのFig. 4はアラル海面積の経年変化を 表している。推定された各年のアラル海面積は, 報告されている値と比較して僅かに大きな値と なっているものの,十分な精度を持っていると思 われる。



Fig. 2 Change of the Aral Sea level





(2) 灌漑面積の変化の再現

次に灌漑面積の拡大を土地利用データに反映さ せる。まず前回までの手法によって求められた各 年の1km解像度土地利用データを解析に用いる 0.125°のグリッドで足し合わせて土地利用面積 率を求めた。モザイクモデルであるSiBUCはこの ように土地利用を面積率として評価することで, 解像度の小さな土地利用の混在をより解像度の大 きな解析の中でも考慮することができる。

アラル海流域の灌漑面積の変化は下のTable 1 のように発展してきたことが分かっている

(Nachtnebel, H.P. 2006)。そこで灌漑面積の流 域全体の総和がTable 1の条件を満たすように GLCCの土地利用データを流域全体で一律に変化 させた。但し、Table 1のデータからは10年ごと のデータしか得られなかったため, FAOSTAT(http://faostat.fao.org)が公開しているFig. 5に示すソ連全体の灌漑面積の推移から、各年で 面積拡大の割合を求め、Table 1の値に適用する ことでFig. 6に示される一年ごとのデータを得た。 この灌漑面積の値が満たされるように土地利用面 積率を各年で修正した(Fig. 7)。なお2003年の 時点でGLCCから得られる灌漑面積の総和が Table 1のデータと比較して過小評価されていた ため、GLCCの灌漑面積率を流域で一律に1.68倍 する補正を行っている。アラル海縮小の再現では 平面分布の変化も明らかにできたものの、灌漑地 拡大に関しては灌漑面積の変化が分かるのみで あったため, 各年で灌漑面積が合うように土地利 用を流域全体で一律に変化させることしかできな かった。今後はこの流域内の分布についても考察 が必要である。







Fig. 6 Irrigated area in the basin

|--|

ruble i mistorieur enunge or miguted ureu									
year	1960	1970	1980	1990	2000	2003			
Irrigated area [km2]	45100	51500	69200	76000	78900	79000			





2.5 外部項αの評価

式(2)のαは流域内の水資源量Runoffの中で, 流域外の灌漑地へ向けて取水される量を考慮し ている外部項である。SiBUCによる解析は流域内 の水需要しか考慮できないので,こういった値 を外部項としてしか反映させることができな かった。

今回αにはカラクム運河によって取水される 水量のみが考慮されている。カラクム運河はア ムダリア川からトルクメニスタンに向けて取水 される水路延長1370kmで世界最大の運河であり, 同国の灌漑農業の約半分を賄っている。1950年 代からTable 2のように建設され,現在では12.9Gt の水が取水されている(田島 2009)。この取水 量は,Table 2で示された5つの各開発段階におい て開発灌漑面積が線形的に増加したと仮定する と各年の灌漑面積が分かるため,現在の灌漑面 積と取水量12.9Gtとの比率が過去でも変わらない と仮定することでFig. 8のように推定した。

Fig. 8を見ると分かるように,カラクム運河に よる取水は莫大でトルクメニスタンの農業に とって生命線となっているため,今後将来予測 をする際にもこれを無視することはできない。 統計データを用いたより信頼度の高い推定や灌 漑計画等を用いて推定していく必要があるだろう。



Fig. 8 Withdrawn water from the Kara-Kum canal

他にαを用いて評価すべき水量としては,カ ラクム運河以外の運河による取水量や,アイ ダール湖に流入する水量が挙げられる。ここで アイダール湖とはシルダリア川下流で拡大して いる塩湖である。キルギスタンのトクトガルダ ムが冬季に発電を目的として大量の放流を行う ために下流側で洪水が発生し,毎年約3Gtの水が 流入していると報告されている(Kitamura et al. 2007)。この水は塩水と混合し,水資源として の価値はなくなる。

Stage	period (year)	Length of the canal (km)	Water quantity (m3/sec)	Irrigated area (ha)
1	1954 - 162	397	130	88000
2	1960 - 1966	537	198	170000
3	1966 - 1971	837	317	220000
4	1971 - 1982	1100	500	562000
5	1982 - 2003	1370	650	972000

Table 2 Development of the Kara-Kum canal

3.1 解析結果

SAGEの河川流量データベース(http://www.sage.wisc.edu/riverdata/)より得られたアムダリ ア川下流端付近の流量の観測値と,その観測点 より上流に当たるグリッドで式(2)から得られた 水資源量を比較したものがFig.9である。



Fig. 9 Discharge at Amu Darya

Fig. 9の解析値は*Runoff*の総和を基に計算され ているので正確には河川流量を表すものではな く、地下水への流出も含んでいる。そのため理 論上解析値が過大となってしまう点には注意が 必要である。Fig. 9の解析値過大は解析期間で平 均すると約3Gtであった。この3Gtは地下へ基底 流量として浸透する水量のうち湧水して河川水 とならず、地下水のままの形でアラル海に流入 する量と考えられるが, アラル海に地下水とし て流入もしくは流出する量の総量は毎年±5Gtの 範囲内にあると報告されており (Jarsjo et al. 2004), Fig. 9はアムダリア河流域のみからの流 出量であるので±5Gtより流出・流入が少ないも のと思われる。しかし今回見られた過大評価は 過去においてより顕著であり,同時に河川流量 の観測値は1985年までのものしか得られなかっ たので、1985年以降においても観測値との比較 を用いた検討が必要である。

3.2 アラル海流域の水資源・水使用量

Fig. 10はアラル海流域全体の解析結果である。 ここに, Qinはアラル海に流入する流量, Irrigは 灌漑必要水量, Runoffは水資源量である。解析期 間を通してRunoffに大きな変動がほとんど見られ ない一方, Irrig はソ連が崩壊する1990年前後ま で増加傾向で1990年までに約2倍にまで増えてい ることが分かる。それに従ってQinは1970年以降



Fig. 10 Annual water balance in the basin

より急激に減少している。水資源量*Runoff*の長期 平均値は133Gtであると言われているが(Micklin et al. 2000),解析された*Runoff*の長期平均値は 135.5Gtであり正確に再現されている。また水需 要量の年変動は小さいものの,水資源量の変動 は大きく,標準偏差は25.3Gtであった。灌漑需要 量に関しては,1990年代の平均値が111~126Gtで あったと言われているが(Micklin et al. 2000), 解析では109.4Gtであった。

少雨であった2000年前後にはRunoffの総量に Irrigが達し、水量の制約から灌漑水量Irrigが抑 えられていることも分かる。実際2000年前後に は深刻な渇水によって主に下流域の灌漑地で深 刻な被害があったことが報告されている(Glantz, M.H. 2005)。



Fig. 11はアラル海上のみでの解析結果である。

Fig. 11 Annual water balance in the Aral Sea

P-Eは降水量から蒸発散量を引いたものであり, △Sはアラル海の水量の変化量であり,下付きの analは解析結果であること,repは報告されてい る値であることを意味している(Nachtnebel, H.P. 2006)。なお、1965年からの5年間と1975年から の5年間は元データが欠損していたため空白にし てある。Fig. 11よりアラル海は1960年代に増加 傾向であったが,1970年前後を境に減少に転じ ていることが分かる。1990年代の後半から△Sが P-Eと等しくなる年が現れており,これは河川流 量が0になっていることを意味している。

Fig. 11では、アラル海が1970年前後を境に減 少に転じたことを示しているが、実際には1960 年代から始まったと報告されているので(JICA 報告書 2009)、今後はより再現性の高い解析が 必要であることが分かる。特に、式(2)の外部項 α や灌漑効率 γ の推定を正確に行う必要がある と思われる。

月別の変化は次のFig. 12のようになる。これは1990年代の平均値である。



Fig. 12 Seasonal water balance

ここに⊿store は土壤水分の変化量である。この 図より,降水が主に冬季に発生し,夏季には降 水量を大幅に超える量の蒸発散が発生し,それ に伴って土壌水分量や積雪水当量に変化が生じ ていることが分かる。灌漑必要水量⊿win-wout の割合も大きく,夏季には降水量を大幅に上回 る水量が灌漑に使用されている。これより冬季 の降水を貯水し適切に水管理する必要があるこ とが推察されるが,実際は上流国の水運用法が 原因で上手く運用されていない(Sunada 2007)。 また本解析では⊿swe に氷河の影響は入っていな いが,流域の水資源において氷河の影響は非常 に大きく,温暖化の影響を含めて今後考慮して いく必要がある。

4. 結論

4.1 結論

本研究では、アラル海流域における過去の水 資源・水使用量を陸面過程モデルSiBUCを用いて 解析し、これらが灌漑面積の大規模な増加を受 けてどのように変化してきたのかを物理的に再 現した。その際には全球データセットのみを用 い、様々な仮定を用いていたにも関わらず、水 資源量Runoffの長期平均値や流域の灌漑地拡大に 対する水需要量増加を表現できた点には大きな 意味がある。

しかし、流域で行われている多様な水使用の

全てを物理的な手法を用いて考慮することがで きず、流域外への取水量や灌漑効率などの推定 において信頼度の低い推定を行わざるを得な かった。これらは流域の水利用を表現する上で 大きな影響を持っているので、今後はより信頼 度の高い推定方法を模索する必要がある。

4.2 今後の課題

本研究の最終目標は深刻な問題を抱えるアラ ル海流域の水問題を解決することであり,持続 可能な開発の実現に向けて,解析の精度を更に 向上させる必要がある。

本流域では使用可能なデータが限られており, 数々の仮定が必要であった。解析結果の評価の ため河川流量データ等も必要であり,実際にど のように水を使用しているかといった情報も必 要である。そこで現在サイエンスコミュニ ティーに共有されていないデータを集めている 所である。

現段階では解かれていない要素の解析も必要 である。例えば氷河の融解の影響は解かれてい ないし、地下水の挙動の解析も不十分である。 地下水の流れは現在SiBUCによって鉛直一次元解 析で解かれているが、実際には平面的な流れが 存在し、時には地下水面の上昇を受けて地表面 近辺で土壌が飽和していることもある。以上の 事から、地下水の平面二次元的な流れと陸面過 程との相互関係を評価していく必要があり、こ れには灌漑地における水利用の影響も考慮する 必要があるだろう。

今後過去の水・熱収支の再現計算をした後は, GCMの出力値を用いて将来気候下での水資源量 を解析していく予定である。その際にはシナリ オベースで灌漑地の拡大を予測し、各シナリオ に応じた水資源量と水利用量の関係を明らかに することで予測していく予定である。そして、 最終的には温暖化される将来に向けて理想的な 水管理について考察していきたいと思っている。

参考文献

- 田島正廣, (2009), バーチャルウォーターからリ アルウォーターへ(その 2) トルクメニスタ ンの水資源問題, 多自然研究 No.167
- JICA (2009), 中央アジア地域「中央アジアの電 力・水資源に関する地域連携に関する委託調 査」報告書

Cretaux, J.F. et al. (2005), Evolution of Sea Level

of the Big Aral Sea from Satellite Altimetry and Its Implications for Water Balance, *Journal of Great Lakes Res.*, LEGOS

- Elhance, A.P. (1997), Conflict and Cooperation Over Water in the Aral Sea Basin, Studies in Conflict and Terrorism, 20:207-218, Social Science Research Council
- Glantz, M.H. (2005), Water, climate, and development issues in the Amu Darya Basin, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 10: 23-50
- Hirabayashi Y. et al. (2008), A 59-year (1948-2006) global near-surface meteorological data set for land surface models
- Jarsjo, J. (2004), Groundwater discharge into the Aral Sea after 1960. Journal of Marine Systems 47, 109-120
- Kitamura, Y. et al. (2007), Water Problems in Central Asia, *Journal of Disaster Research* Vol.2 No.3
- Kitoh, A. et al. (2009), Projection of changes in future weather extremes using super-highresolution global and regional atmospheric

models in the KAKUSHIN Program: Results of preliminary experiments, *Hydrological Research Letters* 3, 49-53

- Micklin, P. (2000), *Managing Water in Central Asia*. London: The Royal Institute of International Affairs, Central Asian and Caucasian Prospects
- Micklin, P. (2007), The Aral Sea Disaster, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 35:47-72, Western Michigan University
- Nachtnebel, H.P. (2006), Final Report of CR2 and CR3, INTAS Project 0511 REBASOWS
- Sunada, K. (2007), Water related issues in the Asian river basins, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.51, University of Yamanashi
- Tanaka, K. (2004), Development of the new land surface scheme SiBUC commonly applicable to basin water management and numerical weather prediction model doctoral dissertation, Kyoto University
- World Bank, (2008), Project information document (PID) concept stage

Analyzing Annual Changes in Water and Heat Balances Considering the Impacts of Expanding Irrigated Area and Shrinking of the Aral Sea

Yoshiya TOUGE, Kenji TANAKA, Toshiharu KOJIRI and Toshio HAMAGUCHI

Synopsis

As the result of huge-scale irrigation under the Soviet project, serious water scarcity has occurred in the Aral Sea Basin. Millions people are suffering especially in the downward area and the Aral Sea has shrunk to 10% of 1960's level. To solve the problem, sustainable irrigation project is required and this project has to be based on several information about quantity of water resources and the impact of global warming. These information are necessary as basic and scientific information for the basin.

In this study, annual water and heat balance in the Aral Sea Basin is analyzed from 1961 to 2003 by land surface model SiBUC, which can analyze water for irrigation in physical way. From this analysis, water balance in the past and some impacts of expanding irrigated area are analyzed.

Keywords: land surface model, irrigation, the Aral Sea, SiBUC