

陸面過程による農業水使用量とアラル海の消長に関する応答分析

Scenario Analysis of Irrigation Water Usage and the Aral Sea Shrinkage with Land Surface Analysis

峠 嘉哉⁽¹⁾・田中 賢治・中北 英一

Yoshiya TOUGE⁽¹⁾, Kenji TANAKA and Eiichi NAKAKITA

(1) 京都大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

As a result of huge-scale irrigation project in the Soviet age, serious water scarcity has occurred in the Aral Sea Basin. Sustainable irrigation project is required and it has to be based on scientific information about water resource and water demand. To clear them in the Aral Sea basin, water circulation model has been made. In this study, the model was assessed by statistical model and the Aral Sea area was analyzed under several scenarios about irrigation water usage.

First of all, H08 precipitation data, which is used in the model, was assessed by NCDC rain gauged observation data and H08 data was cleared to be accurate. Also, water discharge was analyzed and compared with observed discharge. In the analyzed data, peak period of discharge was from April to May while that was from June to July in observed data. In the scenario analysis, the Aral Sea area was analyzed under each scenario. As the result, large impacts to water inflow into the Aral Sea were analyzed.

キーワード: 陸面過程モデル, SiBUC, アラル海, 灌漑

Keywords: Land surface model, SiBUC, Aral Sea, Irrigation

1. 本研究の背景と目的

中央アジアに位置する流域面積180万km²のアラル海流域では、アムダリア川、シルダリア川両河川を中心に乾燥地である中下流域での灌漑が行われてきた。最下流のアラル海は内陸湖で、かつては世界第4位の面積を有していたが、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結果、河川からの流入量が激減し、その面積をかつての10%にまで縮小させた (Cretaux, 2005)。1991年にソ連が崩壊すると流域は6カ国に分断され、関係国間の水利用条約が失敗に終わる中で国際問題にも発展している (Elhance, 1997; JICA, 2009)。現在数百万人が水不足の被害に遭っていると報告され

ており (Micklin, 2007)、アラル海縮小に象徴される水環境問題は20世紀最大の環境問題とも言われている (Glantz, 2005)。これを解決し、持続可能な社会を実現するために、長期的・国際的な水利用計画の作成が必要である。

この水利用計画に必要な科学的根拠を提供するため、筆者らは陸面過程モデルSiBUC (Tanaka, 2004)を用いた流域全体の水収支解析を行ってきた。モデルにはアラル海消長モデルを結合させており、過去の水資源量と灌漑水需要量に加え、アラル海面積の再現を試みている (峠ら, 2012)。その結果、水資源量や水需要量、アラル海面積といった値を高い精度で再現することができたが、その一方で流域内の降水量を一律に30%削減させる等の大きな仮定が必

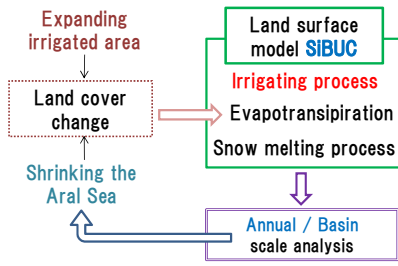


Fig.1 flow of the analysis

要となっているため、モデルの過大評価の原因を解明し、解析精度を向上させることが必要である。

本稿は大きく二部構成とし、前半はモデルの解析結果や入力条件を現地観測データと照合させることで現状の問題点について考察する。後半では水利用に関するシナリオ分析を行い、1960年以降の中央アジアの水利用を仮想的に改善させた場合のアラル海面積を推定することで様々な灌漑緩和策が流域の持続可能性に与える効果について検証した。

2. 解析手法

2.1 解析の流れ

本研究で使用了陸域水循環モデルは、陸面過程モデルを中心として流域全体の水収支解析を行った後、その結果に応じてアラル海面積を変化させるというアラル海消長モデルを結合させている (Fig.1)。解析は1960年～2000年で行っており、空間解像度は約20kmである。解析の入力条件として必要な土地被覆条件には同期間内の灌漑面積発展を反映させることで、過去の灌漑計画の影響を反映させる。

陸面過程モデルでは鉛直次元解析を行っており、下の式(1)で流出量 $Runoff$ を計算している。

$$Runoff = Prec - Evap - \Delta Swe - \Delta Soilm + Win - Wout \quad (1)$$

ここに、 $Runoff$ は水資源量、 $Prec$ は降水量、 $Evap$ は蒸発散量、 ΔSwe は積雪水当量の変化量、 $\Delta Soilm$ は土壌水分の変化量である。メッシュ内に灌漑地がある場合には灌漑必要水量 Win と、灌漑排水量 $Wout$ が考慮される。なお、 $Runoff$ は表面流出量と基底流出量の和である。SiBUCでは式(1)の全項を別々に物理的手法によって解析するが、それと同時にこの式(1)が常に成り立つようになっている。

流域内の全メッシュで $Runoff$ を計算した後、式(2)で流域全体の水収支を計算する。

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

Qin はアラル海への流入量、 γ_c は運搬効率、 α はカラクム運河からの取水量であり、水資源量と水損失の差がアラル海へ流入することを表している。運搬効率 γ_c は報告値より0.4と設定されており (IFAS, 2002)、2.2で後述する。

灌漑面積や外部項 α の具体的な推定方法など、解析時の諸条件は (峠ら, 2012) に詳述する。

2.2 灌漑効率の表現方法

従来のSiBUCの灌漑スキームでは、作物に必要な最低限の水量が直接根層に与えられると設定されているため、水路で水を運搬する際の水損失や、灌漑時に地表面から蒸発する水量等を十分に考慮することができなかった。しかし、アラル海流域では灌漑効率が低く、河川からの取水後に作物による吸収以外で損失される水量が多いことが知られている。この推定は水管理上重要であり、改善効果も含めて定量的に明らかにする必要がある。本研究では、灌漑効率を適用効率、運搬効率の二種類に分類し、それぞれ現状の値、改善させた場合の効果を定量的に推定した。

$$\gamma_a = \frac{W_s}{W_f} \quad (3)$$

$$\gamma_c = \frac{W_f}{W_t} \quad (4)$$

式(3)、(4)はそれぞれ適用効率 γ_a 、運搬効率 γ_c の

定義式である。ここに、 W_s は作物に吸収される水量、

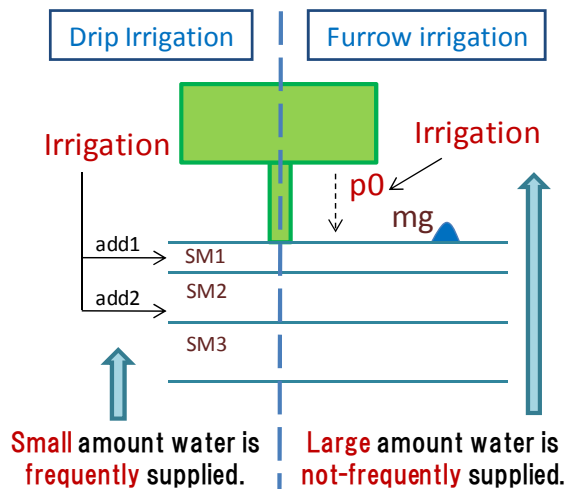


Fig.2 Irrigation scheme in SiBUC

W_f は農地に投入される灌漑水量, W_t は河川取水口における取水量である。これより, 適用効率 γ_a は灌漑水を農地に投入した後の蒸発や浸透による灌漑効率を考慮する一方, 運搬効率 γ_c は河川から灌漑地まで水路で水を運搬する際の効率を表していることが分かる。

運搬効率は運河の長さや種類に大きく依存する値なので定数を仮定する必要があるが, 適用効率はモデル内で表現することが可能である。Fig.2は本モデルにおける二種類の灌漑スキームを示しており, 左側は少量の水を根層に直接供給する点滴灌漑, 右側は比較的大量の水を地表面から与える畝間灌漑を表している。前者は水の損失が少なく適用効率はほぼ

100%であると言え, 後者は水の損失が多く適用効率が考慮された形であると言える。ここに, Fig.2における SM_i は i 層の土壌水分量, $p0$ は降水量から遮断水量を引いたもの, mg は地表面上の水分量である。両スキームのモデル出力値の違いについては (峠ら, 2012) を参照されたい。

3. 入力条件・モデル出力値の評価

本節では, モデルの入力条件として重要な降水量データや解析結果を現地観測値等と比較することで現状のモデルの精度について考察する。

3.1 降水量データの検証

解析に使用した降水量データはH08データであり (Hirabayashi, 2008), 風速データを用いて雨量計の補足率を補正している点に大きな特徴を持っている。しかし, 中央アジアでは使用可能な観測データが非常に限られており, 元々の降水量データの不確実性に加えて補正に用いた風速データにも不確実性があるため, 前述した水資源量過大評価の一因となっている可能性がある。

そこで, 本研究ではNCDC (National Climatic Data Center)の全球降水量観測値データを用いて, H08降水量データセットの検証を行った。NCDCは全球で気象データ等を公開しており, 中央アジアでは総計780個の降水量ステーションの観測データを公開している。

Fig.3は, アラル海流域に位置するNCDCの各ステーションの年間降水量と, H08の年間降水量を10年ごとに比較したもので, NCDCの各ステーションにおいて一年間に300日以上観測データがある場合のみをプロットしている。縦軸のNCDC, 横軸のFORCEはそれぞれNCDCの年降水量, H08データセットの年降水量を表している。なお, 1960年代はNCDCの降水量に明らかな誤差が見られたため検証には用いなかった。

Fig.3より, H08の年降水量に明白な過大・過小評価は見受けられなかった。特に1980年代において, H08降水量に風速による補正効果と見られる若干の過大傾向が見られるが, その傾向は降水量3割補正の原因となり得るほど大きくなかった。

以上より, 実際の降水量はH08データセットの降水量と比較して大きな違いが見られないことが分かった。しかし, アラル海流域は広大であり, 様々な標高や気候条件を持った地域が混在しているため限られたNCDCステーション上での評価には限界がある。特に降水量の多い山岳地にはNCDCのステーションも少ないために十分に検証できているとは言え

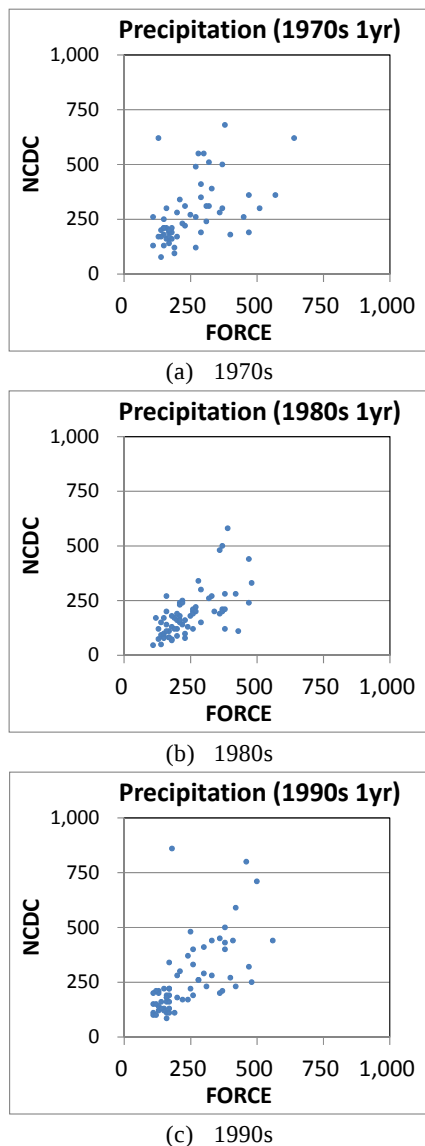


Fig.3 Difference in annual precipitation between H08 and NCDC

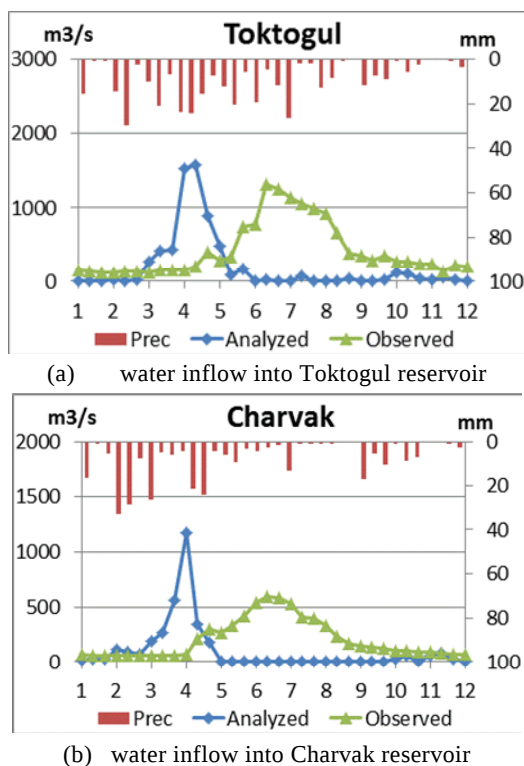


Fig.4 water inflow into reservoir

ないので、今後も現地観測データ等を用いて検証を続けていく必要がある。

3.2 河川流量を用いたモデル精度の検証

水資源量・水需要量の流域全体総和の年変化のみに着眼してきたが、実際には冬季に上流側のダムで発電目的の放流が大規模に行われるために下流側で夏季の渇水が深刻化する等の問題が起きており、水収支の季節変化も流域の大きな関心事である。

そこで現在は、流出モデルを用いた流出解析も進めている。具体的には、式(1)で計算したRunoffを河道流下モデルを用いて月流量を計算した。ここで、使用した河道網等のデータは小槻ら（2012）が全球で作成したデータを使用している。

その結果、Fig.4に示すような結果を得た。Fig.4の解析値は上記の河道流下モデルの出力値であり、降水量はダム地点より上流側メッシュにおける降水量の平均値を表しており、河川流量の観測値にはca water info (http://www.cawater-info.net/index_e.htm)が公開しているダム流入量データを使用している。これらの図より、河川流量のピーク時期が解析と観測の間で大幅にずれていることが分かる。両ダム地点において、解析結果では春先に雪解けの影響と見られる流出量の増加が見られる。一方で、観測値では6~7月に多くの流出が発生しており、春先の流量は多くない。

この原因は、まず河道流下モデルにダムモデルが

組み込まれていないことが考えられるが、Charvakダムより上流側にダムが存在しないため、流出時期のずれの原因の全てがダム操作にあるとは考えにくい。そのため、今後はダム操作規則を明らかにしモデルに反映させるだけでなく、積雪深を衛生解析等を通して推定しモデルの結果と比較することや、観測データの精度や信頼性に関する検証が必要である。

3.3 過大評価についての考察

3.1において、降水量は観測値と大きく変わらないことが分かったため、モデル内で水量が過大評価となっている原因を今後も探る必要がある。そこで本節では、現状で考えられる原因について考察する。

まず、他流域に流れ出ている可能性が考えられる。中央アジアでは総計30万kmを超える灌漑水路があり（Micklin, 2000）、流域外へ水を取水しているものも多い。しかしそれを反映するためには統計データを集める必要があるため全てを考慮する事が難しく、現状ではカラクム運河のみが反映されているが、今後は現地データを集めていく必要がある。

加えて、表流水だけでなく地下水の形として他流域に流れ出ている可能性もある。アラル海流域の最下流に当たるアラル海面の標高は約34m前後であるが、アラル海流域西部に位置するカスピ海流域において最下流に当たるカスピ海の標高は-28m程度である。かつてアムダリア川はカスピ海に注いでいたと考えられており、現在もアラル海流域からカスピ海流域へ地下水の移動がある可能性は十分に考えられる。そこで、今後はカスピ海流域においても同様の解析を行い、流域全体の水収支について検討を行う予定である。

現在のモデルが考慮していない小さな水体が流域に点在している可能性もある。現在使用しているGLCC土地被覆データセットは、1990年代の土地被覆条件を表す空間解像度1kmのデータセットであり、流域内に点在する水体も1kmメッシュ内で最大でない場合には全く考慮されていない。しかし、灌漑排水等が流れ込むことで生まれた小規模の水体が流域には点在しており、その一部は現在も拡大している。アイダール湖等、現在も大規模に面積を拡大させている水体もあり、今後はこれらを考慮する必要がある。ここでアイダール湖とは、シルダリア川上流におけるダム操作によってChardaraダムより溢れた水がアルナサイ低地へ流れ込むことでできた人造湖である。今後は、衛生解析や現地情報を用いてより正確な土地被覆条件を作成する必要がある。

Table 1 Scenario list

Water application efficiency	Drip irrigation		Furrow irrigation		
Water conveyance efficiency	40%	45%	50%	55%	60%
Irrigated area	0%	25%	50%	75%	100%

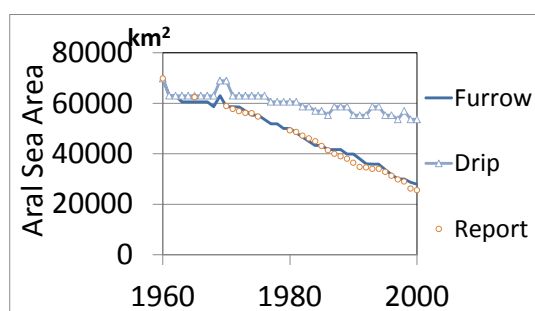
4. 灌漑水利用に関する応答分析

本節では、本モデルが水資源量や水需要量やアラル海面積を物理的に推定できることを利用し、1960年から2000年までの40年間に於ける開発が実際よりも改善されていた場合の仮想的な効果について定量的に推定した。

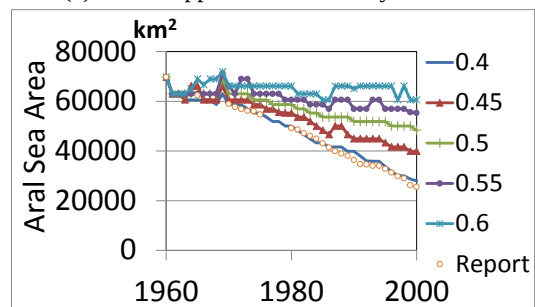
シナリオを用いて推定するのはアラル海の面積であり、これにより各開発シナリオ下での持続可能性評価を評価する。

4.1 応答分析に用いたシナリオ

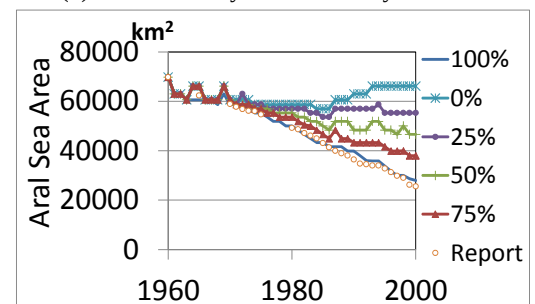
今回の応答分析では、表-1のように灌漑手法・運搬効率・灌漑面積の3種類のシナリオについて行う。ここに、灌漑手法とは2.2で示した適用効率を表して



(a) water application efficiency scenario



(b) water conveyance efficiency scenario



(c) irrigated area scenario

Fig.5 historical change of the Aral Sea area in each irrigation scenario

おり、現状の畝間灌漑を点滴灌漑に改善した場合の効果を検討する。灌漑面積シナリオでは1960年から2000年までの灌漑面積増加量を100%とし、この増加量にシナリオを設定することで灌漑地の開発が実際より少なかった場合の効果について考察する。0%とは1960年からの増加量が0であることを表しているため、1960年時の灌漑面積が維持された場合が想定されている。

4.2 応答分析結果

応答分析によって得られたアラル海面積の経年変化をFig.5に示す。

Fig.5(a)は、灌漑手法を改善した場合の結果であり、現状の畝間灌漑を点滴灌漑に転換することで多くの水量を節約出来ることが分かった。これは、灌漑地に水を入れる際に発生する地表面からの蒸発量や下層への浸透量が、流域の水環境にも大きく影響を与えるほどの水量に達することを表している。

今回は適用効率について点滴灌漑と畝間灌漑の比較のみを行っているが、実際の灌漑地では収量への影響を恐れて農家が必要水量を大幅に超える量の灌漑を行っていることや、排水施設が整っていないことを原因とした多くの水損失があると報告されており、今後はこれらの反映方法についても検討が必要である (Horst, 2005)。

Fig.5(b)を見ると、運搬効率を5%向上させるだけで非常に高い効果をあげられることが分かる。流域の灌漑必要水量は40年平均で約85Gt/yr程度であり、運搬効率5%の向上は毎年4~5Gt程度の水量が確保されることを意味している。その40年間の積算は2000年時点で150Gt程度であるアラル海貯水量に対して十分に大きな値であることが分かる。

筆者らが2012年6月に行った現地調査では、中央アジアの灌漑水路は都市近郊であっても土水路である場合が多く、水が多く損失していることが指摘されていた。水路の補強等による運搬効率の改善は都市近郊を中心として実際に試みられている。

Fig.5(c)より、1960年より灌漑面積を増やさなければ、アラル海の面積は維持されていたことが分かった。75%シナリオ等は高い効果を得られているものの、灌漑面積の削減は産業に直接的な影響を与えるため現実に対策を行う際には運搬効率の改善等を含めた灌漑システム全体から対策を練る必要がある。

5. 結論と今後の課題

本研究では、アラル海流域における水循環モデル

を用いて、まずモデルの精度について検証を行い、続いて灌漑地における水利用に関する応答分析を行った。

モデルの検証において、降水量の比較をNCDCのステーションデータを用いて行った際には、期間を通して大きな違いが見られなかった。今までは降水量を30%削減させる補正を行ってきたが、今後はアイダール湖のように流域内に点在する水体が解析条件に反映されるようにモデルを改良する等が必要である。

河川流量と比較を行った際には、流出のピーク時期がずれるという問題が発生した。今後は上流側ダムの影響をモデルにより反映させることや、積雪深等のデータとモデルを比較することや、比較に用いた観測データの信頼性についても評価が必要である。

灌漑水利用に関する応答分析では、灌漑面積を減らすだけでなく、灌漑の効率を上げることで高い効果を得られることを定量的に示すことができた。しかし、現状で反映させている水の損失は一部のみで、実際には塩害地における塩分の洗い流しや排水施設の不整備による水損失等が存在するため、これらを含めてより具体的に詳細な水利用の表現を進めていくことが必要である。

参考文献

- 峠嘉哉・田中賢治・小尻利治・浜口俊雄 (2012): 中央アジア域の灌漑地拡大の影響を考慮した陸面解析によるアラル海縮小の再現, 京都大学防災研究所年報, 第55号B, pp.571-577
- 小槻峻司・田中賢治・小尻利治・浜口俊雄: 衛星データから作成した農事暦を活用した全球陸域水循環解析, 水文・水資源学会誌, Vol:25, pp.373-388, 2012.
- 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

GEF agency of the IFAS (2002): Aral Sea Basin Program report

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

Horst et al (2005): Field assessment of the water saving potential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea basin, Agricultural Water Management, 77, 210-231

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

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

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

(論文受理日：2013年6月11日)