

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

峠 嘉哉⁽¹⁾・田中 賢治・小尻 利治・浜口 俊雄

(1) 京都大学大学院工学研究科

要 旨

深刻な水資源問題が発生しているアラル海流域では、持続可能な開発の実現へ向けた科学的根拠として、流域の水資源・需要量を過去から将来に渡って把握する必要がある。本研究では、陸面過程モデルSiBUCを用いて水・熱収支解析を流域全体で行い、過去40年間に行われた灌漑開発の影響を再現した。その際には、アラル海消長モデルを統合させることで、灌漑面積の拡大に伴って経年的に変化する流域の水収支がアラル海面積・貯水量をいかに変化させたかを再現した。

加えて、流域で実際に行われている点滴灌漑と畝間灌漑を陸面過程モデルの灌漑スキームに反映させることで、陸面過程モデルで様々な灌漑形態の特徴をどこまで反映できるのかについて考察を行い、灌漑地水操作に伴う水損失をモデル内で考慮した。その結果、蒸発散比や土壌水分量等で大きな違いが生まれ、両者の違いを反映させることができた。

キーワード： 陸面過程モデル, SiBUC, アラル海, 灌漑

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 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、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。

この計画作成には、科学的根拠として流域の水資源量と水需要量の推定が必要である。既往の研究で

は、Raskinら (1992) がWEAP (Water Evaluation and Planning System) モデルを用いて行ったような統計的手法が主流で、過去から現在にかけての情報が流域の水管理上では有用なものとなっている。しかしその一方で、灌漑手法や気候条件等が変化した場合の影響を推定できず、流域で気候変動の影響が顕在化してきていると報告される中で (Yao and Thompson, 1992)、現実的で長期的な計画を立案するために物理的な推定手法の構築・改良が必要となっている。

そこで筆者らは、これまで物理的手法を用いたアラル海流域の水収支解析を試みてきた (峠ら, 2011)。本研究では、更に流域の実情を忠実に再現するモデルの構築を目指し、アラル海の縮小や畝間灌漑といった流域の特徴をモデルに反映させ、流域の現状を忠実に反映させることを試みる。

2. 解析手法

2.1 解析の流れ

本研究では、陸面過程モデルを用いてアラル海流

域の過去の水収支を再現した。その際には、現地で行われている灌漑形態をモデルに反映させると共に、流域内の灌漑面積が統計データを満たすように各年で修正を加え、過去の開発の影響も考慮した。加えて、アラル海消長モデルを結合しており、陸面過程モデルによる水収支解析結果からアラル海の面積を推定し、その結果を土地被覆条件に反映させている。下のFig.1にモデルの構造を示す。

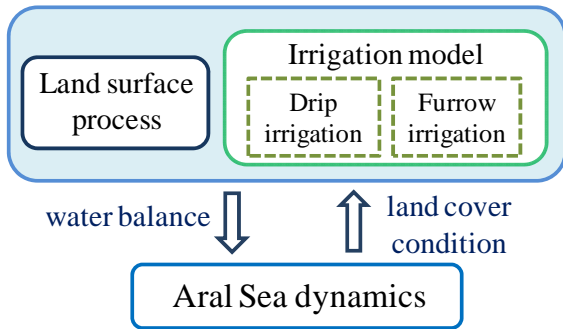


Fig.1 Land surface model

2.2 陸面過程モデル

本研究では、陸面過程モデルとしてSiBUC (Tanaka, 2004) を用いた。SiBUCはSiB (Sellers et al., 1986) をベースに作成され、灌漑地における人為的な水操作を陽に考慮できる数少ない陸面過程モデルの一つである。

アラル海流域では灌漑操作の効率が悪く、大量の水が消費されていることが報告されている。そこで、今回この灌漑スキームにFig.2に示す二種類の灌漑形態を反映させ、手法の違いを比較するとともに、陸面過程モデルによってこれらの灌漑形態の違いをどこまで考慮可能なのかを検証する。

考慮する灌漑形態の一種類目は、点滴灌漑と呼ばれる灌漑手法である (Fig.2左)。点滴灌漑は、農地に張り巡らせた管から作物に水を供給するため水損失が少なく、収量の増加も見込まれるため現地の高級作物を中心に適用されている。モデル内では、根層に直接、少量の水を頻繁に与えることで表現している。

他方は、流域の灌漑地の90%以上において採用されている畝間灌漑である (Fig.2右)。畝と畝の間に数時間水を湛水することで根層に水を供給させるため、地表面からの蒸発量や地下深層への浸透量が多く、水損失が多いことが知られている (Horst et al., 2005)。モデル内では、一度の灌漑で比較的多くの水を地表面から与えることで表現している。

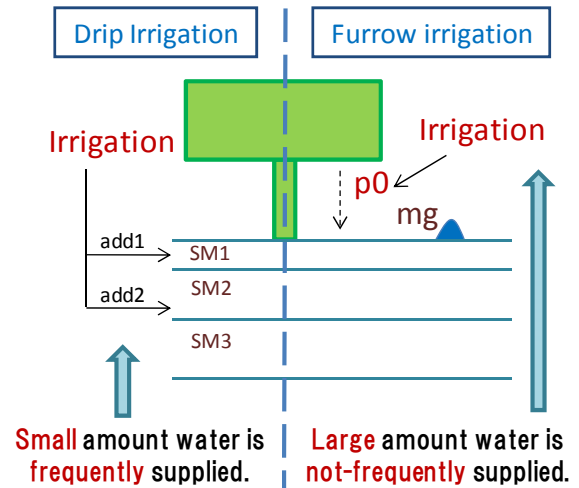


Fig.2 Irrigation scheme in SiBUC

3. 計算条件

本研究では、モデルの再現精度を高めることを目的とし、過去の水収支の再現を行った。再現期間は、アラル海が急激に縮小したと報告されている1961年から2000年までの40年間とした。

3.1 水収支式

陸面過程モデルでは、メッシュ内の鉛直一次元方向の水収支を解析しており、メッシュより発生した流出が平面的に流下する過程を考慮しない。そこで、本研究では水資源量を各メッシュで計算された流出の総和と定義し、二段階で解析を行う。一段階目は、陸面解析によるメッシュ内鉛直一次元解析であり、二段階目はそれらの流域全体の足し合わせである。

メッシュ内の鉛直一次元解析は、以下で表される。

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

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、 $\Delta soilm$ は土壤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。

流域全体の足しあわせは式(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 は運搬効率、 α は外部

項であり、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。

γ として与えた運搬効率とは、灌漑水を河川から灌漑地まで運搬する際の効率である。この値には報告値の0.4を用いた (INFAS, 2002)。

外部項 α は、SiBUCによる鉛直次元解析では考慮できない流域外の水需要を反映させるための値である。現段階では、Fig.3に示すカラクム運河からの水損失のみが推定され、 α の値として考慮されている。その推定手法は、峠ら(2011)のものと同一である。

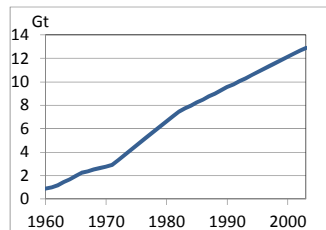


Fig.3 Annual withdrawn water from Kara-Kum canal

3.2 入力条件

(1) 気象強制力

気象強制力には、以下の全球データを使用した。
 ・平林プロダクト (H08) : H08 (Hirabayashi et al., 2008) より、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使用した。今回解析結果と照合した所、水量が明らかに多いとの結果を得たため、流域で一律に降水量を70%に削減する補正を行っている。

・JRA25 : 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。解析は1961年から行っているのに対し、本データセットは1979年以降のデータしかないため、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、その年のデータを用いるという方法を取った。降水量と風速の間には相関係数0.32という若干の相関が見られた。

(2) 地表面条件

土地被覆条件以外の地表面パラメータは、Meteo Franceによって公開されているECOCLIMAPデータセットを用いた。植生や土壌に関するデータを揃えており、40年間でほとんど変化しないと考えられるため、解析期間を通して共通に与えている。

土地被覆条件には、USGSが公開しているGLCCデータを用いた。土地被覆を灌漑地を含む24種類に分類しているが、今回はこれをSiBUCでの解析に必要な20種類に再分類し、20kmメッシュ内での面積率を計算している。

この土地被覆条件は過去の灌漑計画の下で大規模に変化してきており、これが流域の水環境を大規模

に変化させている。そのため、本研究では過去40年間の解析時に灌漑面積率を経年的に変化させることで過去に行われた大規模な灌漑地拡大の影響を反映させた。その際に必要な流域全体の灌漑面積データは、峠ら(2011)で統計データより推定したFig.4の値を用いている。推定に用いた統計データは流域単位・国単位といったデータであったため、メッシュ内の灌漑面積率は流域全体で一律に変化させている。今後は、この灌漑地拡大の空間的な特徴も考慮していく必要がある。

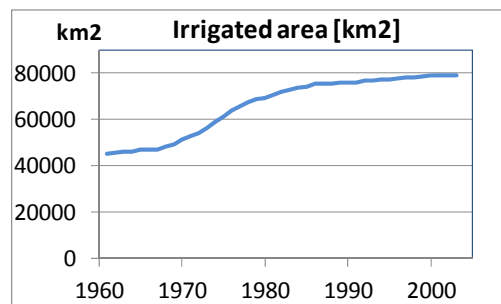


Fig.4 Historical change of irrigated area

3.3 アラル海消長の再現

アラル海消長モデルに必要な等深線データは標高データより作成した。使用したデータはNASAが公開しているSRTM (Shuttle Rader Topography Mission) 標高データである。SRTMは、スペースシャトルからレーダーを用いて計測された全球データであり、今回は1km解像度のものを使用した。

Fig.5は水面標高とアラル海面積、Fig.6は水面標高

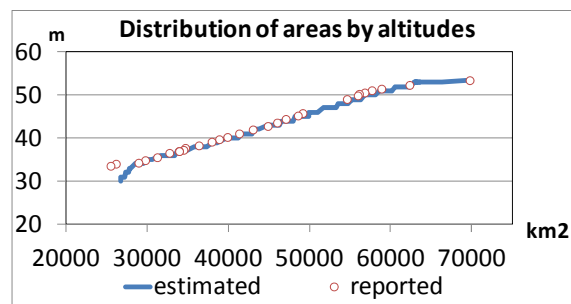


Fig.5 Distribution of areas by altitudes

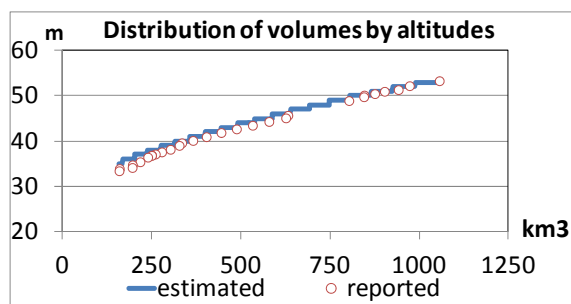


Fig.6 Distribution of volumes by altitudes

とアラル海貯水量との関係を表している。報告値と非常に良く整合していることが分かる。なお、この際に用いた報告値はCa water infoから取得している。推定側が僅かに階段状となっているのは、推定に用いたSRTM標高データの分解能が1mであるため、非常に平坦なアラル海周辺では同じ標高のメッシュが大量に存在するためである。今後はより分解能の高いデータや、衛星データ等を用いて、より詳細で現実的な等深線の作成を行う必要がある。

アラル海縮小の初期条件には、Ca water infoより得られた報告値を基に推定された1960年の海領域・貯水量を用いる。その後、アラル海の年間貯水量変化 ΔS を式(3)によって計算し、海領域を推定する。ここに、 Q_{in} は式(2)で示されるアラル海への流入量、 $(P-E)_{aral}$ はアラル海上で降水量から蒸発量を引いた水量である。SiBUCは水体上の陸面過程も解析できるため、 $(P-E)_{aral}$ も物理的に計算することができる。

$$\Delta S = Q_{in} + (P - E)_{aral} \quad (3)$$

Table1 Water balance in irrigated farm in Guliston

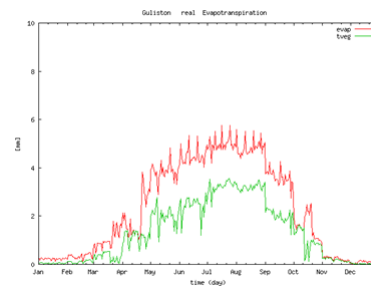
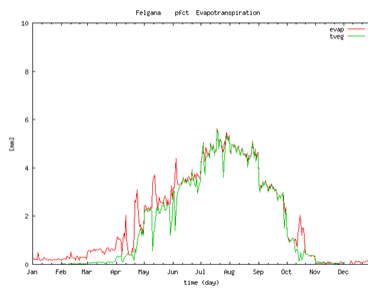
	Drip	Furrow
Precipitation	128 mm	128 mm
Water demand for irrigation	682 mm	754 mm
Evapotranspiration	773 mm	830 mm
Transpiration	652 mm	480 mm
Infiltration to deeper layer	23 mm	35 mm

4. 解析結果と考察

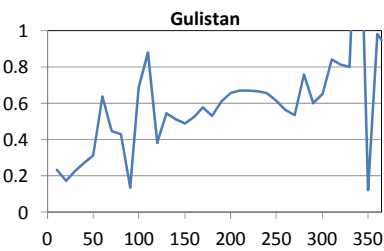
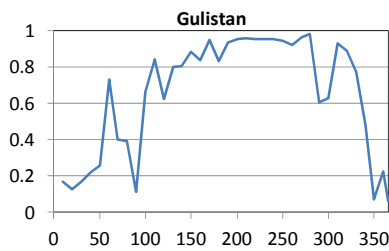
4.1 一地点解析結果

流域内の灌漑地において一地点のみの解析を行い、二種類の灌漑スキーム間で比較を行う。Fig.7は、ソ連時代から大規模に綿花の灌漑を行っているGulistonにおける解析結果であり、蒸発散量、蒸発散比(蒸散量/蒸発散量)、土壌水分量の結果を示す。

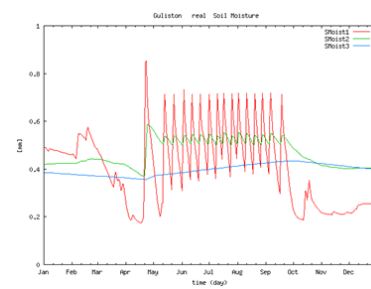
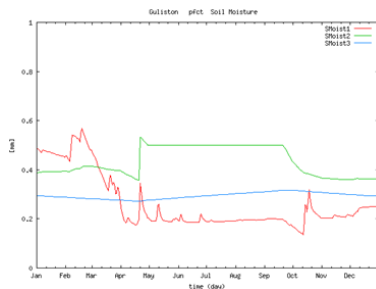
点滴灌漑では、夏季の蒸発散量のほとんどが蒸散となっており、蒸発散比も0.9を超える高い値で維持されている。土壌水分量も増減が少なく、最小限の



Evapotranspiration



The ratio of transpiration to evapotranspiration



Soil moisture

(a) Drip irrigation

(b) Furrow irrigation

Fig.7 Seasonal water balance in the farm

水量で灌漑が行われていることが分かる。

その一方で、畝間灌漑では灌漑期の蒸発散比が低くなっており、蒸発量として損失する水量が多いことが分かる。土壌水分量も灌漑の度に激しい増減を繰り返しており、それに応じて蒸発量や浸透量が増加するため、水の損失量が多くなっている。

Table1は、二種類の灌漑形態それぞれの解析結果である。畝間灌漑の場合には、灌漑必要水量や蒸発散量が多いことが分かる。Table1を見ると、点滴灌漑の場合に蒸散量が増えていることが分かる。これは、土壌に水が効果的に供給されているため、実際に点滴灌漑では畝間灌漑と比べて収量が増加することが報告されている。

以上より、陸面過程モデルに現地で行われている二種類の灌漑手法を反映し、その違いを表現できることが分かった。

なお、当地域の畝間灌漑による綿花の灌漑必要水量は、Raskin et al (1992)では870mmと報告され、Bespalov (1992)では地下水面が低い場合として550mmとされており報告値によった違いがある。そこで現在、この農場で土壌水分量計と地下水位計を設置しており、灌漑必要水量の値も入手できる見込みである。夏季の灌漑による土壌水分量操作を観測し、解析結果と照合する予定である。

4.2 アラル海縮小の再現

Fig.8は、流域全体の年間水収支解析結果である。

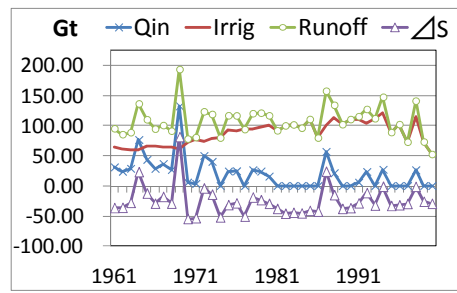


Fig.8 Historical change of water balance in the Aral

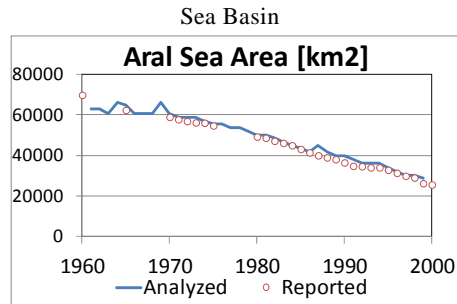


Fig.9 Historical change of the Aral Sea area

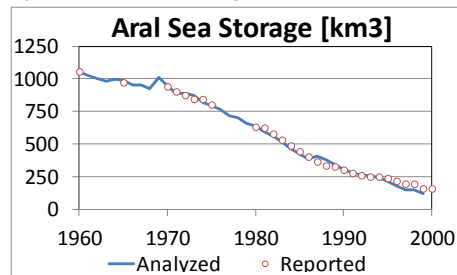


Fig.10 Historical change of the Aral Sea volume

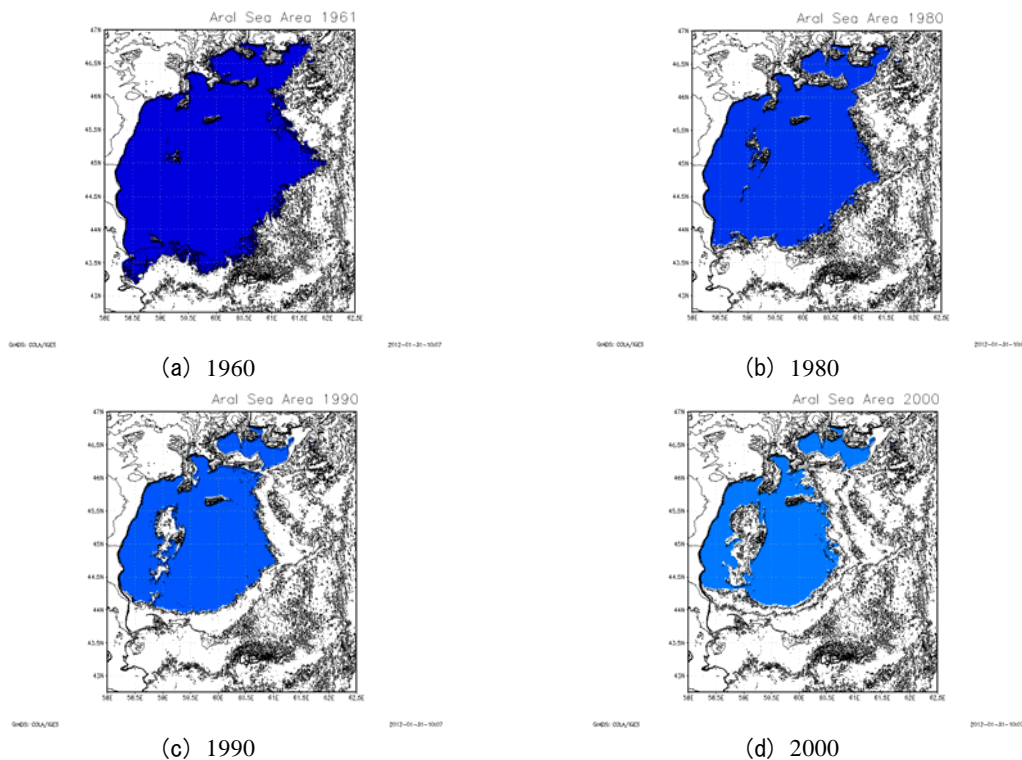


Fig.11 Analyzed shrinkage of Aral Sea area

図より、解析期間を通して水資源量*Runoff*に長期的なトレンドが見られない一方、灌漑必要水量*Irrig*は1980年までの20年間を中心に約2倍に増え、アラル海への流入量*Qin*を急激に減少させていることが分かる。水資源量の長期平均値は133Gtであると報告されているが、解析された*Runoff*の長期平均値は120Gtであった。加えて水需要量に関しても、1990年代の平均値が111~126Gtであったと報告されている中で、解析では124Gtであり、正確に再現できていることが分かる (Micklin 2000)。

Fig.9,10は、それぞれ推定されたアラル海面積、貯水量の経年変化である。Ca water infoにより報告されている値と非常に良く整合していることが分かる。加えて、Fig.11は推定されたアラル海領域の変化であるが、かつて海岸線が南東部を中心に大きく後退し、現実と同様に3つの領域に分割されてしまっていることが再現されている。

以上より、過去の水収支やアラル海の縮小を正確に再現できていることが分かった。

5. 結論と今後の課題

本研究では、まず陸面過程モデルの灌漑スキームを変更し、現地で行われている二種類の灌漑形態を忠実に表現することを目指した。その結果、蒸発散比や土壌水分量等の点で両者の違いを明確に反映させることができた。そこで、今後は現地で実際に行われている灌漑形態の忠実な表現や、灌漑形態を変化させる仮想的対策の効果を推定することが期待される。そこで、今後はモデル解析だけでなく、現地の灌漑に関する詳細な情報の収集も行う予定である。現地で情報の洗い出しに加え、ウズベキスタン国内の灌漑地で始めた定点集中観測結果を基に、モデルの検証や灌漑規則の解明等を行う予定である。

流域全体の解析では、アラル海流域における過去の水資源・水需要量を陸面過程モデルSiBUCを用いて解析した。その際にはアラル海消長モデルを結合させることで、灌漑計画の影響を受けて経年的に変化する流域の水収支が、いかにアラル海を縮小させたかを精度よく再現させることができた。アラル海の縮小は、流域全体の水収支解析の40年積算であるので、一定の精度で水収支を再現できたと言える。

一方で、この流域全体の水収支解析では、現状で流域内の多様な水循環を全て考慮できているわけではない。地下水の流れや氷河の融解等が考慮されておらず、外部項 α や灌漑効率 γ 等の仮定をおいている。これらを全て考慮し、流域の水循環を忠実に再現することが本研究の最終的な目的である。

謝 辞

本研究の遂行に当たり、ICARDA (International Center for Agricultural Research in the Dry Areas) のクリスティーナ・トデリッチ博士、ウズベキスタン水文気象研究所のニシヨノフ・バハラディーン博士、京都大学東南アジア研究所の甲山治准教授を始めとして多くの方々の協力を得た。ここに謝意を表する。

参考文献

- 峠嘉哉・田中賢治・小尻利治・浜口俊雄 (2011): 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, 京都大学防災研究所年報, 第54号B, pp.691-698.
- Bespalov (1992): Amelioration and irrigation of crops of cotton rotation (hydromodel zoning and irrigation regimes of crops at provinces of Uzbekistan Republic), Uzbek Academy of science, Tashkent.
- Ca water info, http://www.cawater-info.net/index_e.htm, accessed 2011-12-5
- Cretaux, J.F., Kouraev, A.V., Papa, F., Bergé-Nguyen I., M., Cazenave, A., Aladin, N. and Plotnikov I.S. (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, vol.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, vol.10: 23-50.
- Hirabayashi Y., Kanae, S., Motoya, K., Masuda, K. and Doll, P. (2008): A 59-year (1948-2006) global near-surface meteorological data set for land surface models.
- Horst, M.G., Shamutalov, S.S., Pereira, L.S. and Goncalves, J.M. (2005): Field assessment of the water saving potential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea basin, Agricultural Water Management, vol.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, vol.35:47-72, Western Michigan University.

Raskin, P., Hansen, E., Zhu, Z. and IWRA, M. (1992): Simulation of water supply and demand in the Aral Sea Region, Water International, vol.17, 55-67.

Sellers, P. J., Mintz Y., Sud Y.C. and Dalcher, A. (1986): A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. J. Atmos. Sci., vol.43, 505-531.

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.

Yao T. and Thompson L.G. (1992): Trends and features of climatic changes in the past 5000 years recorded by the Dunde ice core, Ann Glaciol., vol.16, 21-24.

(論文受理日 : 2012年6月7日)

Reproducing Shrinking of the Aral Sea by Land Surface Analysis Considering the Impacts of Expanding Irrigated Area in Central Asia

Yoshiya TOUGE⁽¹⁾, Kenji TANAKA, Toshiharu KOJIRI and Toshio HAMAGUCHI

(1) 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 this has to be based on feasible water resource and water demand in irrigated farm.

In this study, irrigation scheme in SiBUC was modified to consider irrigation types in the basin. These are drip irrigation and furrow irrigation and irrigation efficiency was quite different between them. As a result, the difference was clearly considered especially in soil moisture and evapotranspiration, and flexibility of land surface model was cleared.

In addition, historical change of water and heat balance was analyzed by land surface model SiBUC, and it was integrated with the Aral Sea shrinking model and impacts of irrigation projects on the Aral Sea area and volume was physically reproduced.

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