

陸面解析による灌漑取水とアラル海の消長に関する応答解析 ～アラル海流域の持続可能性向上へ向けて～

峠 嘉哉^{1*}・田中 賢治²・中北 英一³・小尻 利治²

¹京都大学工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8530 京都府京都市西京区京都大学桂)

²京都大学防災研究所水資源環境研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³京都大学防災研究所気象・水象災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

* E-mail: touge@hmd.dpri.kyoto-u.ac.jp

深刻な水資源問題が発生している中央アジアでは、今後の持続可能な開発へ向けた科学的根拠として、流域の水資源・需要量や、各種の対策の効果を推定する手法が必要である。本研究では、陸面過程モデル SiBUC を中心としてアラル海縮小を組み込んだ水循環モデルを用い、灌漑効率や灌漑手法、灌漑面積等を改善する仮想的な対策を設定し、これらの改善がアラル海水量に与える効果について定量的に推定した。その結果、過去の灌漑手法が実際より改善されていた場合に、現在より多くの水がアラル海へ流入し、持続可能な社会に向けた対策として効果があることが分かった。

Key Words : 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(図-1)では、ソ連時代より行われた大規模な灌漑計画の影響によりアラル海の縮小に象徴される深刻な水資源問題が発生した。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、20世紀最大の環境問題とも言われている^{2,3)}。持続可能な水管理へ向けた対策が必要であり、そのためには具体的な対策・開発が流域レベルの水環境に与える効果・影響を明らかにすることが科学的基礎情報として必要である。しかし、既往の研究で主流となっている統計的な手法では現状の把握のみしか行うことができず、仮想的な対策・開発の効果・影響を推定することができなかった⁴⁾。

そこで本研究では、物理モデルを用いてこれらを明らかにする。筆者らは、これまで陸面過程モデルを用いたアラル海流域の水収支解析を試みてきた⁵⁾。その際には、特に灌漑地水操作において流域の実情を忠実に再現することを重視し、現地で行われている畝間灌漑・点滴灌漑の違いや灌漑面積の拡大等を解析に反映させた。加えて、アラル海消長モデルを結合させることで、流域の水収支



図-1 アラル海流域¹⁾

解析に対応して土地被覆条件内のアラル海面積が変化するように設定した。

本研究では、運河の漏水対策、灌漑手法の改善、灌漑面積の縮小という3つの仮想的な対策が行われ場合について、それぞれがアラル海の水量・面積に与える効果をモデルを用いて応答解析した。これより、今後流域が持続可能な発展へ向けた対策を講じていくための科学的基礎情報を提供することを目指す。

2. 解析手法

(1) 陸面過程モデル

陸面過程モデルとしてSiBUCを用いた。SiBUCはSiB⁹をベースに開発され、灌漑地における人為的な水操作を陽に取り扱うことができる点に大きな特徴を持っている⁷。土地利用は、緑地・都市域・水体の3種類に大きく分けられ、緑地は更に灌漑地を含む20種類に分類されている。灌漑地ではLAIの変動を基に作られた農事暦の各段階において作物ごとに土壌水分量の最小値が設定されており、それが人為的に保たれていると想定されている。

(2) 灌漑効率

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⁹。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。今回は、灌漑効率を適用効率、運搬効率の二種類に分類し、それぞれに対して推定を行った後、それらを改善させた場合の効果を応答解析で定量的に推定した。

a) 適用効率

適用効率は、農地に投入された灌漑水のうち作物によって吸収される割合を示しており、式(1)で表現される⁹。

$$\gamma_a = \frac{W_s}{W_f} \quad (1)$$

ここに、 γ_a は適用効率、 W_s は作物に吸収される水量、 W_f は農地に投入される灌漑水量を表している。この適用効率によって、地表面からの蒸発や地下深層への浸透によって損失される水量を考慮することができる。

この適用効率は、水の損失が農地内の蒸発や浸透であるため、SiBUC内の灌漑スキームを変更することで表現する。灌漑手法に大きく依存するため、現地で主流の畝間灌漑・点滴灌漑の二種類に対して推定手法を設定する。

畝間灌漑は、本流域の灌漑地の90%以上において採用

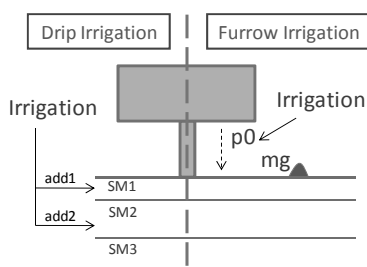


図2 適用損失算定用灌漑スキーム

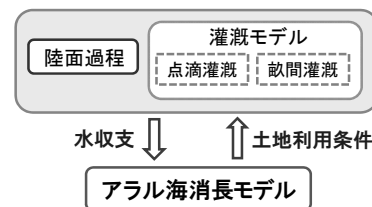


図3 解析の流れ

されている。畝と畝の間に数時間水を湛水させることで根層に水を供給するため蒸発量や浸透量が多く、適用効率が低いことが知られている¹⁰。モデルでは、一度に大量の水を地表面から与えることで表現している。

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手法である。高い適用効率や収量の増加が見込めるため、高級作物を中心に採用されている。モデルでは根層に直接、少量の水を頻繁に与えることで表現する。

図-2は、二つの灌漑手法のモデル内での違いを示している。 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。

b) 運搬効率

運搬効率は、河川から灌漑地まで水路で水を運搬する際の効率であり、式(2)で表現される⁹。

$$\gamma_c = \frac{W_f}{W_t} \quad (2)$$

ここに、 γ_c は運搬効率、 W_t は河川取水口における取水量である。 γ_c の正確な推定には水路の種類や距離の情報が必要であるが、収集が不可能であるため、流域平均で40%との報告値を流域で一律に採用している¹¹。

3. 計算条件と応答解析条件の設定

(1) 解析の概要

本研究では、アラル海の急激な縮小が報告されている1961年から2000年までの解析を空間解像度20kmで行った。

図-3は解析の流れである。陸面過程モデルによって年間の流域全体の水収支を計算した後に、アラル海消長モデルによってアラル海領域を推定し、水体から砂漠という土地利用の変化を次年の陸面解析に反映させている。土壌水分量等の初期値は、一般的な値を与えた後に2年間のスピンアップ計算を行うことで与えている。

(2) 水収支式

陸面解析の対象はメッシュ内の鉛直一次元方向の水収支のみであり、発生した流出の平面的な流出過程を考慮しない。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。

$$\text{Runoff} = \text{prec} - \text{evap} - \Delta \text{swe} - \Delta \text{soilm} + \text{win} - \text{wout} \quad (3)$$

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、 Δsoilm 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(3)の全項を別々に物理的手法によって解析するが、同時にこの式(3)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(4)によって表現される。

$$Q_{in} = \sum \text{Runoff} - \sum \frac{W_{in}}{\gamma_c} + \sum W_{out} + \alpha \quad (4)$$

*Q_{in}*はアラル海への流入量、 γ_c は2.2節で述べた運搬効率である。 α はSiBUCによる鉛直一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外部項であり、3.5節で詳述する。

(3) 気象データ

解析に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¹²⁾。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、当流域では降水の大部分が冬季に山間部で降る降雪であるため有効である。今回解析結果と照合した結果、水量が明らかに多いとの結果となり、加えて報告されている値と比較しても降水量が多いため¹³⁾、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は全球1° 解像度の再解析データであり、H08には無かった気圧と風速のデータを用いている。本研究は、将来的にMRI-AGCMを用いた気候変動予測を見越しているため、再解析プロダクトの中でもモデル構造が最も近いJRA25のプロダクトを利用した。

本解析は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

表-1 アラル海流域の灌漑面積

年	1960	1970	1980	1990	2000	2003
灌漑面積[km ²]	45100	51500	69200	76000	78900	79000

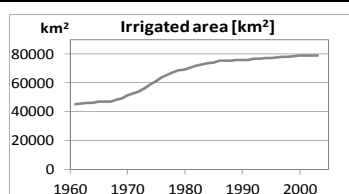


図-4 アラル海流域の灌漑総面積の変化

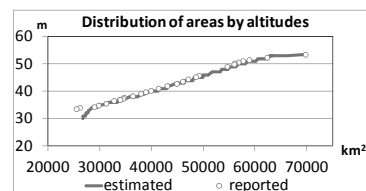


図-5 水面標高とアラル海面積の関係¹⁴⁾

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。なお、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ている。

(4) 地表面条件

植生や土壌のデータには、Meteo Franceによって公開されているECOCLIMAPデータセットを用いた。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るため、解析期間を通して同じものを用いる。

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、灌漑地拡大やアラル海の縮小に伴って大きく変化してきているので、下記の方法を用いて各年で修正した。

a) 灌漑面積の経年変化

アラル海流域の灌漑面積は、表-1のように10年ごとのデータしか得られなかったため¹⁵⁾、FAOSTATが公開しているソ連全体の各年の灌漑面積データから灌漑面積の前年度比を求め、表-1の値に適用することで図-4に示される各年の灌漑面積を得た。次に、灌漑面積の流域全体の総和が図-4の条件を満たすように土地被覆面積率を流域で一律に変化させた。その際には、都市域と水体以外の土地利用種を減少させ、灌漑面積を増やしている。

b) アラル海縮小の再現

アラル海消長モデルに用いる海底の等深線は標高データより作成した。アラル海は縮小したため過去の海底が露わになっており、標高データより等深線を得ることができる。使用したデータはNASAが公開しているSRTM標高データである。SRTMはスペースシャトルから計測された全球標高データで、今回は1km解像度のものを使用した。図-5は水面標高とアラル海面積を表している。報告値と非常に良く整合していることが分かる¹⁴⁾。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であり、極めて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標高データや衛星デ

表-2 カラクム運河の発展

工事期間	完成運河長	水路容量	灌漑面積
1954~1962	397 km	130 m ³ /sec	880 km ²
1960~1966	537 km	198 m ³ /sec	1700 km ²
1966~1971	837 km	317 m ³ /sec	2200 km ²
1971~1982	1100 km	500 m ³ /sec	5620 km ²
1982~2003	1370 km	650 m ³ /sec	9720 km ²

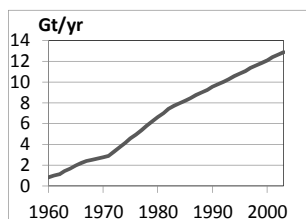


図-6 カラクム運河による取水量

ータ等を用い、より詳細な等深線の作成が必要である。

初期条件である1960年のアラル海領域は、水面の標高や海面積の報告値を基に推定¹⁴⁾した。その後、アラル海の年間貯水量変化 ΔS を式(5)によって計算し、海領域を推定する。ここに、 $(P - E)_{Aral}$ はアラル海上の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、式(5)の右辺は全てSiBUC内で物理的に計算できる。こうして推定された水体から砂漠への土地被覆変化は、次年の陸面解析で反映されている。

$$\Delta S = Q_{in} + (P - E)_{Aral} \quad (5)$$

(5) 外部項 α の評価

前述したように、SiBUCでは流域外の水需要量を考慮できないので、外部項 α を設定している。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導水される延長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年代から表-2のように建設され、現在は9720km²の灌漑地に供給され、年間12.9Gt/yrの水が取水されている¹⁰⁾。この灌漑面積と取水量との現在の比率が過去においても変わらないと仮定することで、 α を図-6のように推定した。

(6) 応答解析条件の設定

以上から過去の水収支を再現した後、応答解析を行う。解析は1961年～2000年の40年間でを行い、各条件下でのアラル海面積の経年変化を推定する。

応答解析の条件を表-3に示す。灌漑手法、運搬効率、灌漑面積増加量の3点を設定した。灌漑手法は2.2節で述べた点滴灌漑・畝間灌漑の比較である。運搬効率 γ_c は、

表-3 応答解析条件

灌漑手法	点滴灌漑	畝間灌漑			
運搬効率	40%	45%	50%	55%	60%
灌漑面積増加量	0%	25%	50%	75%	100%

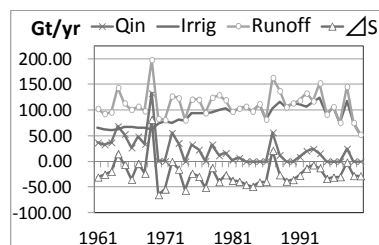


図-7 アラル海流域の年水収支の経年変化

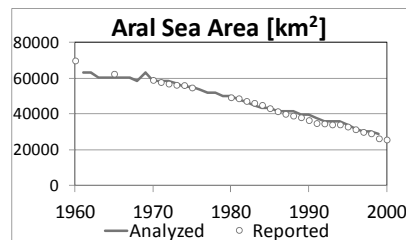
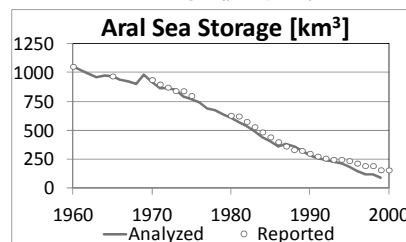
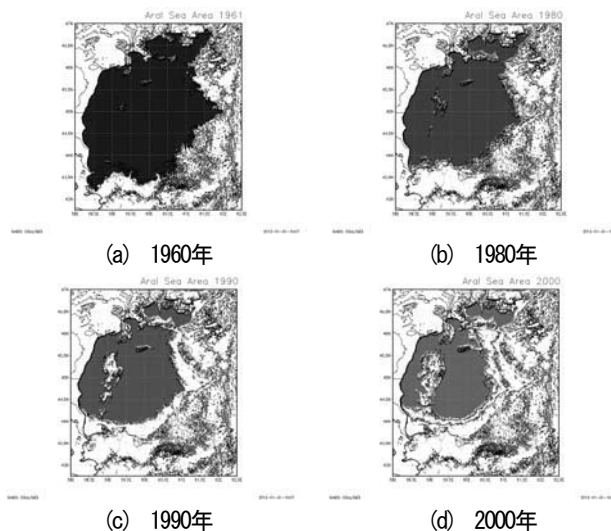
図-8 アラル海面積の経年変化¹⁴⁾図-9 アラル海貯水量の経年変化¹⁴⁾

図-10 アラル海縮小の再現結果

現状の40%が改善された場合を想定する。灌漑面積に関しては、1961年から2000年までの40年間の灌漑面積増加量に補正を加え、開発を抑制する効果について検討した。増加量に補正を加えているので、0%は1961年レベルの維持、100%は現状を意味している。

4. 解析結果と考察

(1) アラル海縮小の再現

図-7は流域全体の年間水収支解析結果である。図より、灌漑必要水量Irrigが1980年までの20年間を中心に約2倍に

増え、水資源量 $Runoff$ の多くを消費するようになったため、アラル海への流入量 Q_{in} が急激に減少していることが分かる。水資源量と1990年代の水需要量の長期平均値は、それぞれ133Gt/yr、111~126Gt/yrであると報告されているが⁹⁾、解析値ではそれぞれ111Gt/yr、103Gt/yrであり、報告値と比較して正確に再現できていることが分かる。

図-8,9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。アラル海領域を等高線と共に表示したものが図-10である。これらより、過去の水収支やアラル海面積を正確に再現できていることが分かる。

(2) 応答解析結果

各応答解析によって得られたアラル海面積の経年変化を図-11～図-13に示す。

図-11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。4.1節で再現した過去の解析結果によると、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。

図-12は灌漑手法を変えた場合の結果である。点滴灌漑に転換する効果が非常に大きいことが分かった。

図-13より、40年間に灌漑面積を拡大しなければ、アラル海の面積は現在より大きかったことが分かった。1960年レベルの維持という0%対策は現実味に欠けるものの、75%対策に他の対策を組み合わせた場合には、産業への打撃を抑えつつ高い効果を期待できる。

5. 結論と今後の課題

本研究では、まず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、灌漑地の大規模な拡大が流域の水収支に与える影響を再現した。その際には、アラル海流域では利用可能なデータが限られているために幾つかの仮定を置く必要があったが、物理モデルを中心として、流域の水収支や、それに対応したアラル海の縮小を精度よく再現することができた点は特筆すべき成果である。

今後の課題として、SiBUC内の畝間灌漑・点滴灌漑スキームでは、概念的にそれらの違いを反映させているのみで、十分な検証を行う事が出来ていない点が挙げられる。アラル海流域では利用可能な観測データが非常に限られているが、アラル海の縮小や水収支の長期平均値だけでなく、農場レベルの土壌水分量や灌漑必要水量等にも観測データとの検証が必要である。加えて、1970年代

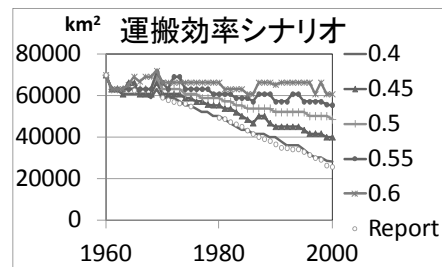


図-11 アラル海面積経年変化（運搬効率の改善）

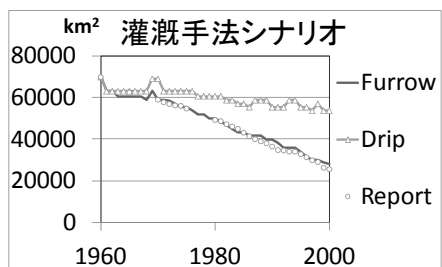


図-12 アラル海面積経年変化（灌漑手法の変更）

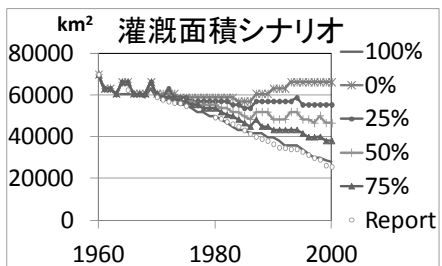


図-13 アラル海面積経年変化（灌漑面積の縮小）

より後退に転じたと報告されている氷河の融解の影響や、ダム操作、地下水の二次元的流れ等を考慮する必要がある。流域の水循環を物理モデルを用いて忠実に再現することが本研究の最終的な目的の一つである。

応答解析では、複数の条件下でアラル海面積の変化を定量的に推定することができた。このような分析は物理的手法であるからこそ実現するものであり、持続可能な社会に向けて必要な科学的知見として有効性の高い情報となり得る。今回は、それぞれの対策に必要な資金や経済への打撃等を考慮していないが、灌漑面積の減少は経済への打撃が避けられないため実際に行う事は難しいと考えられる。その一方で、インフラへの資金投資から実現が可能な運搬効率の改善や点滴灌漑への移行は経済への影響が少ないために実現の可能性が高いと言える。

今後の課題としては、持続可能性の評価手法の改善が挙げられる。現在はアラル海の面積のみから行っているが、現実には持続可能性を考察する上では、農作物の安定的な収入や生態系への影響等も考慮する必要がある。加えて、応答解析の条件に関しても、今回考慮しなかった耐乾性作物への転換や、灌漑を行う時間を気温の高い昼間から夕方時に変更することで蒸発による損失を減らすといった対策は、大きな効果を期待できないものの、資金がかからないため取り組みやすい対策であると言える。今後は、これらの対策手法の効果についても検討し、持

続可能で実現可能な対策について考察していきたい。

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，並びに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

- 1) P. Micklin, The Aral Sea Disaster, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Vol.35, 47-72, 2007.
- 2) J.F. Crétaux¹, A.V. Kouraev, F. Papa¹, M. Bergé-Nguyen¹, A. Cazenave¹, N. Aladin and I.S. Plotnikov, Evolution of Sea Level of the Big Aral Sea from Satellite Altimetry and Its Implications for Water Balance, Journal of Great Lakes Res., Vol.31, 520-534, 2005.
- 3) Michael Glantz, Water, climate, and development issues in the Amu Darya Basin, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, Vol.10, 23-50, 2005.
- 4) P. Raskin, E. Hansen, Z. Zhu and M.IWRA, Simulation of water supply and demand in the Aral Sea Region, Water International, Vol.17, 55-67, 1992.
- 5) 峠嘉哉・田中賢治・小尻利治・浜口俊雄, 灌漑地の拡大の影響を考慮したアラル海流域における水・熱収支の経年変化の再現, 土木学会水工学論文集, 第 55 巻, pp.391-396, 2011.
- 6) P.J. Sellers, Y. Mintz, Y.C. Sud and A. Dalcher, A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol.43, 505-531, 1986.
- 7) Kenji Tanaka, Development of the new land surface scheme SiBUC commonly applicable to basin water management and numerical weather prediction model doctoral dissertation, Kyoto University, 2004.
- 8) P. Micklin, Managing Water in Central Asia. London, The Royal Institute of International Affairs, 2000.
- 9) T.A. Howell, Irrigation Efficiency, Lal, R. Editor. Marcel Dekker, Inc., New York, NY. Encyclopedia of Soil Science. P. 736-741, 2002.
- 10) M.G. Horst, S.S. Shamutalov, L.S. Pereira, J.M. Gonçalves, Field assessment of the water saving potential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea basin, Agricultural Water Management, Vol.77, 210-231, 2005.
- 11) GEF agency of the IFAS, Aral Sea Basin Program report, 2002.
- 12) Hirabayashi Y, Kanae S, Motoya K, Masuda K, Doll P, A 59-year (1948-2006) global near-surface meteorological data set for land surface models, Hydrological Research Letters 2: pp36-40, pp65-69, 2008.
- 13) UNFCCC, Second National Communication of the Republic of Uzbekistan under the United Nations Framework Convention on Climate Change, 2003.
- 14) Ca water info, http://www.cawater-info.net/index_e.htm, (accessed 5th Dec. 2011)
- 15) H.P.Nachtnebel, Final Report of CR2 and CR3, INTAS Project 0511 REBASOWS, 2006.
- 16) 田島正廣, 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, 2009.

(2012. 4. 20 受付)

(2012. 8. 2 受理)

Analyzing Relation Between Irrigation Water Withdrawal and the Aral Sea Shrinkage by Land Surface Analysis ~Toward the Sustainable Development in the Aral Sea Basin~

Yoshiya Touge¹, Kenji Tanaka², Eiichi Nakakita³ and Toshiharu Kojiri²

¹Faculty of Engineering, Kyoto University

²Water Resources Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

³Research Division of Atmospheric and Hydrospheric Disasters, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

As a result of huge-scale irrigation project in the Soviet age, 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% from 1960's level. Sustainable irrigation project is required and this has to be based on scientific information about feasible water resource and water demand in irrigated farm. These information are necessary as basic and scientific information for sustainable development.

In this study, water circulation model has been developed by land surface model with Aral Sea shrinking scheme and historical water balance in the Aral Sea Basin was reproduced.

And with the model, scenario analysis of changing irrigation method was examined. The scenario was about improving irrigation efficiency and decreasing irrigated area. As a result, positive effects were cleared in all scenarios and the speed of the Aral Sea shrinking was more moderate than real situation.