

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る、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。

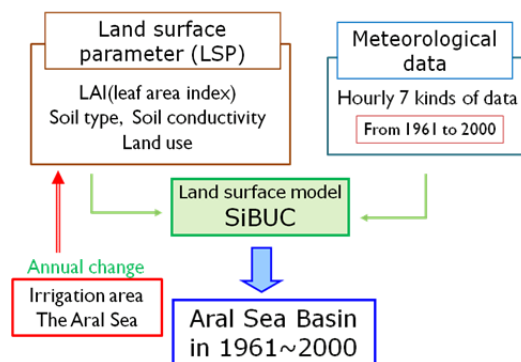


Fig. 1 Study flow

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、 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。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。

$$Q_{in} = \sum Runoff - \sum \frac{Win}{\gamma} + \sum W_{out} + \alpha \quad (2)$$

Q_{in} 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積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。

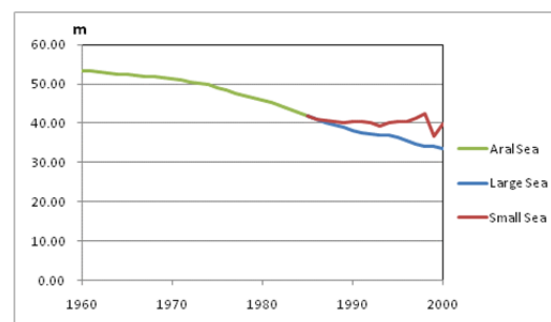
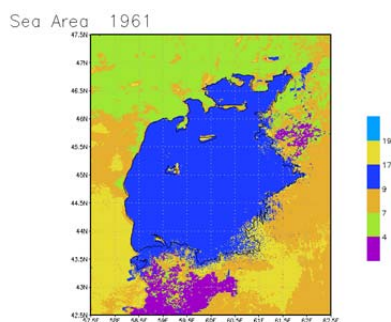
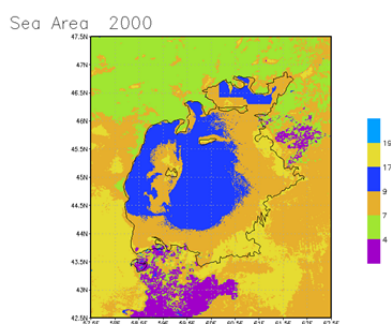


Fig. 2 Change of the Aral Sea level



(a) 1960



(b) 2000

Fig. 3 Shrinking of the Aral Sea

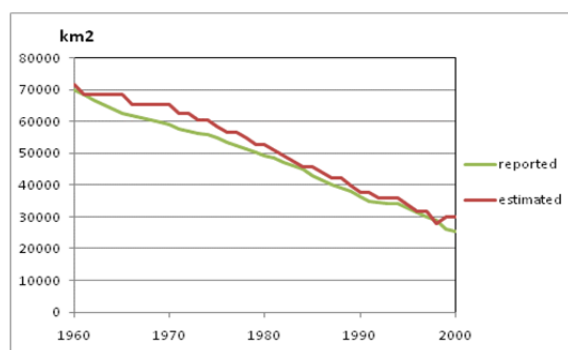


Fig. 4 Change of the Aral Sea surface

(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はこのような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

Table 1 Historical change of irrigated area

year	1960	1970	1980	1990	2000	2003
Irrigated area [km ²]	45100	51500	69200	76000	78900	79000

(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。

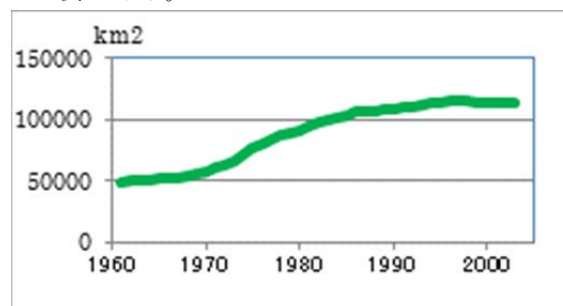


Fig. 5 Irrigated area in Soviet Union
(From FAOSTAT)

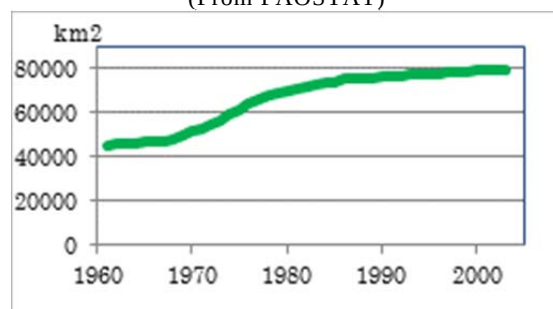


Fig. 6 Irrigated area in the basin

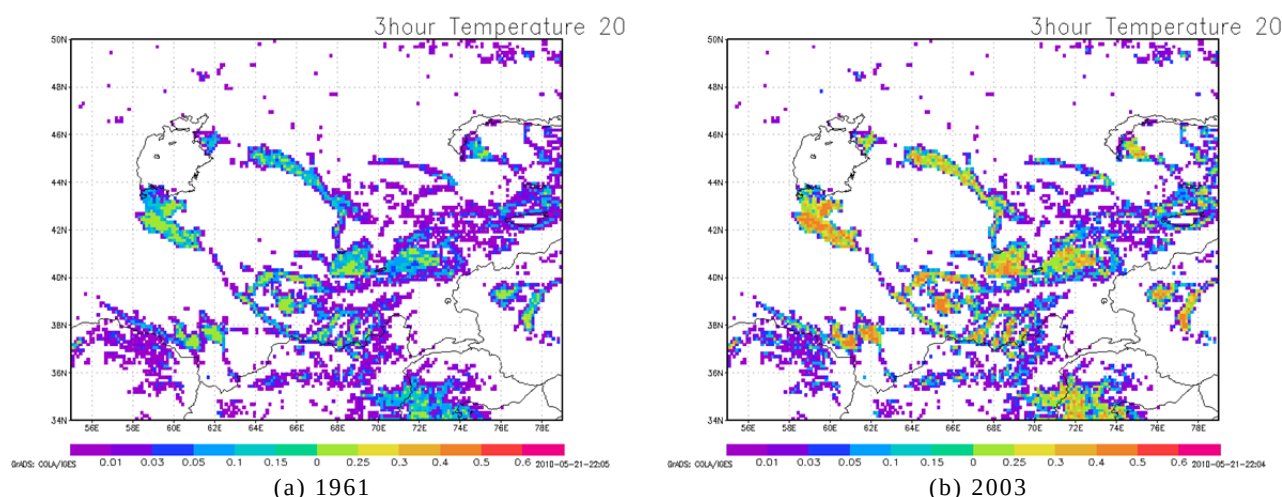


Fig. 7 Rate of irrigated area

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。

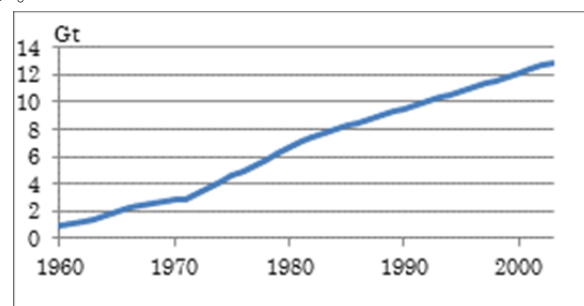


Fig. 8 Withdrawn water from the Kara-Kum canal

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。

Table 2 Development of the Kara-Kum canal

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

3. 流域の水資源・水使用量の再現

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。

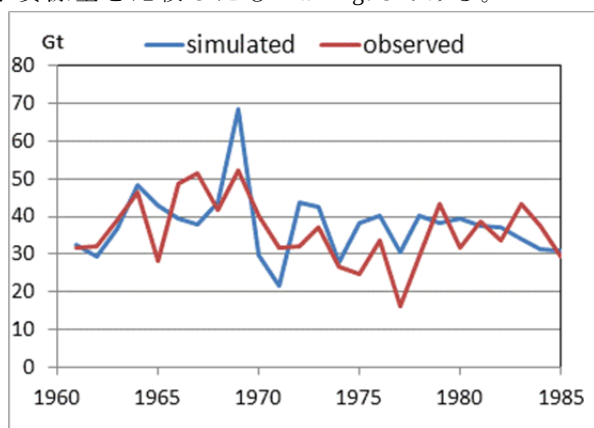


Fig. 9 Discharge at Amu Darya

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に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ため、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。それによって*Qin*は1970年以降

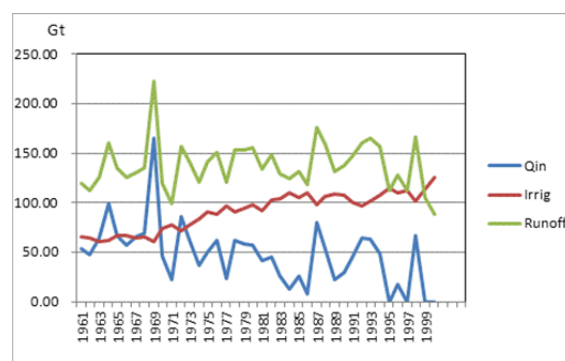


Fig. 10 Annual water balance in the basin

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。

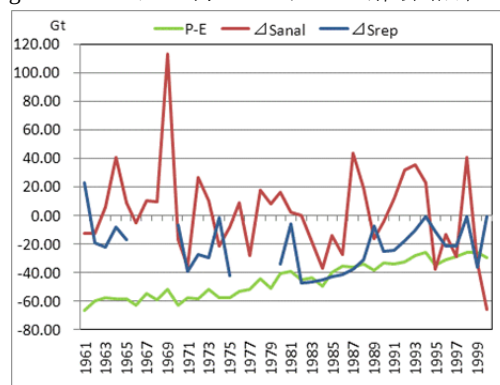


Fig. 11 Annual water balance in the Aral Sea

*P-E*は降水量から蒸発散量を引いたものであり、 ΔS はアラル海の水量的変化量であり、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 ΔS 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。

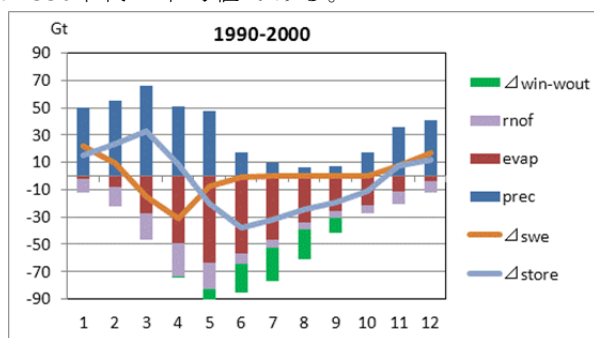


Fig. 12 Seasonal water balance

ここに $\Delta store$ は土壌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 $\Delta win-wout$ 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 Δswe 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。以上のことから、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-high-resolution 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