

## 山岳域の陸面解析における雪氷融解プロセスに関する検討

### Study on Snow Melting Process in Land Surface Model in Mountainous Area

峠 嘉哉<sup>(1)</sup>・田中 賢治・中北 英一

Yoshiya TOUGE<sup>(1)</sup>, Kenji TANAKA and Eiichi NAKAKITA

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

#### Synopsis

In Central Asia, since most of water resource is supplied in mountainous area in winter as snowfall, snow melting process is key factor to determine seasonal water resource. However, in the previous works with land surface model, there were early trends in the analysis and it was triggered by strong heat supply in mountainous region.

In this research, several studies are conducted and they were assessed by satellite-based snow cover area and monthly river discharge data. First of all, analyses at deferent spatial resolutions were compared. Secondly, elevation mosaic scheme was developed to consider a mixture of altitude within each mesh. And finally, altitude dependency of meteorological forcing for land surface analysis was studied. As a result of them, model was improved especially in spring, but there are still early trends on it.

**キーワード:** 融雪過程, 陸面過程, SiBUC, ザラフシャン川

**Keywords:** Snow melting process, Land surface model, SiBUC, Zaravshan river

#### 1. 本研究の背景と目的

山岳域は一般に降水量が多く, 特に乾燥域にとっては貴重な水資源の供給源となっている. 本研究の対象である中央アジアにおいても同様に, 東部の山岳域で冬季を中心に降った降雪が夏にかけて融解することで灌漑による下流側の水需要が賄われている (Micklin, 2000). 河川流量は融雪期に当たる春先から夏にかけて最大となり, それをダムに貯留して夏期の灌漑や冬期の発電のために放流するという管理が行われている. しかし, 中央アジアでは近年気候変動の影響が顕在化してきていると報告されており, その結果融雪期が早期化して夏季の河川流量が減少する可能性がある (Unger-Shayesteh, 2013, Kitamura, 2007). 夏季の灌漑需要を今後も維持するためには, このような変化を予め推定することが必要である.

筆者らは, 今まで中央アジアの流域を対象に陸面過程モデルをベースとした流域水循環モデルの構築を進めてきた (峠ら, 2013). その目的は, 過去から将来に渡って水資源量・水需要量の再現・予測を行うことで現地の適正な水管理計画へ向けた科学的根拠を提供するためである. その結果を河川流量等の観測値と比較したところ, 年々変動については一定の精度が得られたものの, 融雪が観測結果と比較して早いため季節変化の精度が低いという問題が生じていた.

そこで本研究では, 衛星解析等を用いて陸面過程上の融雪過程について現状を明らかにすると共に, その原因を探る. 具体的には, 気象強制力の標高依存性について考察すると共に, 解像度の異なる解析結果を比較し, サブグリッドスケールに存在する高標高域を考慮する標高モザイクスキームの検討を行



Fig.1 Zaravshan River Basin (Dupli Station is indicated by star.)

った。これにより山岳域の特殊な水熱環境を表現し、季節ごとに河川流量に対する各標高帯からの融雪寄与度をモデルでも再現することを目指す。

## 2. 解析手法

### 2.1 対象領域

対象流域は中央アジアに位置するザラフシャン川流域である (Fig.1)。ザラフシャン川上流の東部はタジキスタンで標高約5000m程度のパミール高原に位置し、高標高域に氷河を有する。下流はウズベキスタンのキジルクム砂漠に流れており、ソ連期に開発された大規模灌漑地による取水が行われている。かつてはウズベキスタンのブハラ周辺でアマダリア川に合流していたが、現在では灌漑取水の影響で断流している。

ザラフシャン川における水資源量の9割はタジキスタンの山岳域で発生すると言われており、降水は主に冬季における雪である。春から夏にかけての融雪の結果として、上流側に大きなダムが無いにも関わらず河川水量のピークは7月前後となる。8月を超えても河川流量は維持されており、その原因は高標高域に位置する氷河からの涵養があるためである。

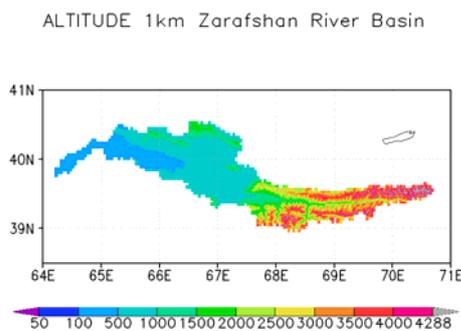


Fig.2 Altitude of Zaravshan River Basin

### 2.2 解析手法と現状の解析結果

解析には陸面過程モデルSiBUC (Tanaka, 2004)を用い、下式(1)を用いて河川流量を計算する。

$$Q_{in} = \sum Runoff - \sum \frac{Win}{\gamma_c} + \sum Wout \quad (1)$$

なお、 $Q_{in}$ は河川流量、 $Runoff$ は流出量、 $Win$ は灌漑必要水量、 $\gamma_c$ は灌漑水路の運搬効率、 $Wout$ は灌漑排水量である。

解析は、空間解像度5kmで1961～2000年の40年間で行った。ザラフシャン川流域では高標高域に氷河があり、その氷河によって夏季の河川流量が維持されていることが報告されている。報告されている氷河面積は610km<sup>2</sup>であり、標高4288m以上のメッシュを氷河メッシュとして仮定することで氷河面積が報告値を満たすよう設定した。Fig.2にザラフシャン川流域の上流域を含む山岳域の標高図と氷河域として設定した領域 (東部の灰色領域) を示す。本研究では、氷河メッシュは積雪深の初期値を大量に与えることで表現しており、氷河と単年性の雪との間で物理的条件に違いを設定していない。

入力の気象条件にはH08とJRA25の全球データを用いており、土地被覆条件にはGLCC version2 (<http://edc2.usgs.gov/glcc/>)の全球1km土地被覆データ

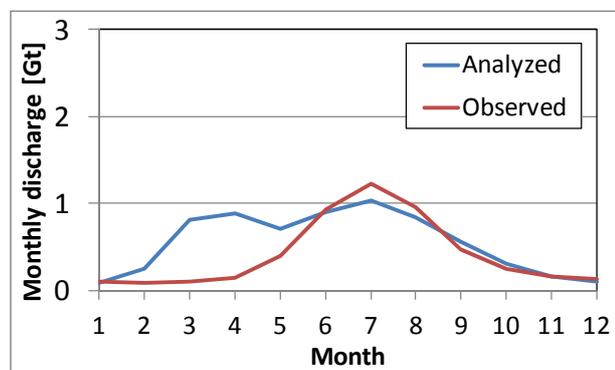
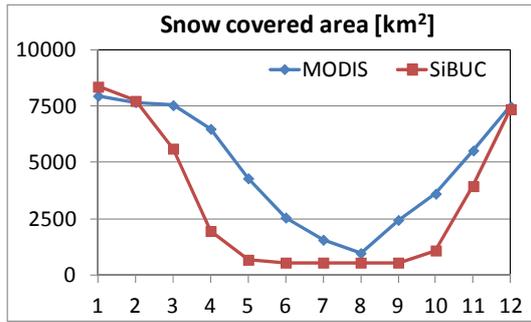
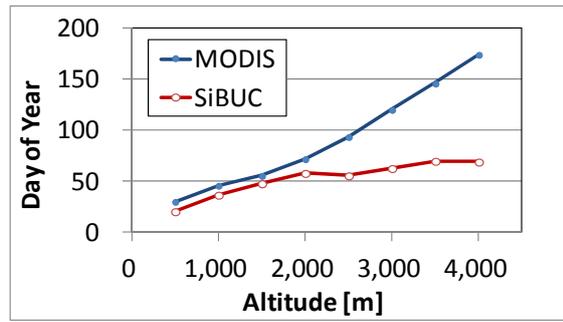


Fig.3 Monthly averaged discharge at Dupli station



(a) Seasonal change of snow covered area



(b) Averaged snow melt day

Fig.4 Comparison of snow area between analyzed result and satellite data

セットを用いている。

Fig.3はこの条件でFig.1中星印のDupli地点における月平均流量を解析した際の結果であり、本章で検討する種々の変更を行う前の結果である。解析結果は式(1)の $Q_{in}$ であるため、ダム操作や流出過程が考慮されていないことになるが、ザラフシャン川にはDupli地点より上流側に流況を変化させる程の大規模ダムが無く、加えて流出過程によって約2ヶ月もピークがずれる程大きな流域ではない。

次に、衛星解析と解析結果を比較した結果を示す。Fig.4はMODISのMOD10プロダクトによる積雪域の衛星解析結果と陸面解析結果との間で積雪面積や融雪完了日を比較した結果である。MOD10プロダクトはMODISセンサーによる観測結果から計算された主にNDSI (Normalized Difference Snow Index)を用いて推定された積雪域プロダクトであり、本研究で用いたデータセットはMOD10A2, MYD10A2で、500m解像度で8日間の最大積雪域を示している。Fig.4で融雪完了日を比較しているのは衛星解析では積雪深ではなく雪による被覆域しか分からないためである。融雪完了日はやはり解析結果の方が早く、その傾向は標高が高くなるに連れて顕著になっている。

以上より、従来の陸面過程解析では河川流量のピークを観測値より早く解析しており、実際に衛星解析で融雪のタイミングを比較しても融雪完了日を早期評価していることが分かる。

### 3. 気象強制力の標高依存性について

#### 3.1 標高依存性について

以上で述べた融雪の早期評価の原因の一つとして、高標高域で地表面への熱の供給量が過大となっていることが考えられる。そこで本章では気象強制力の与え方について検討する。陸面過程モデルSiBUCの入力データとして必要な気象データは降水量・気温・気圧・比湿・風速・長波放射・短波放射の7要素であり、従来の解析ではその中で解析格子への内挿

時に標高に依存して補正していたのは気温と気圧のみであった(峠ら, 2013)。しかし、下向き長波放射は主に気温に依存するため、気温と同様に標高依存をさせるべきである。加えて比湿に関しても、前節の解析結果では凝結が多く高標高域で湿度が高い事が示唆されたため、従来の標高の変化に従って比湿が保存される従来の方法ではなく相対湿度が保存されるように設定した場合の変化を感度実験により調べた。

#### 3.2 下向き長波放射の標高補正

長波放射の標高依存性については以下の方法で設定した。まず、シュテファンボルツマンの式

$$L = \sigma T^4 \quad (2)$$

より、

$$\frac{\partial L}{\partial T} = 4\sigma T^3 = \frac{4L}{T} \quad (3)$$

一方、気温の標高依存性は

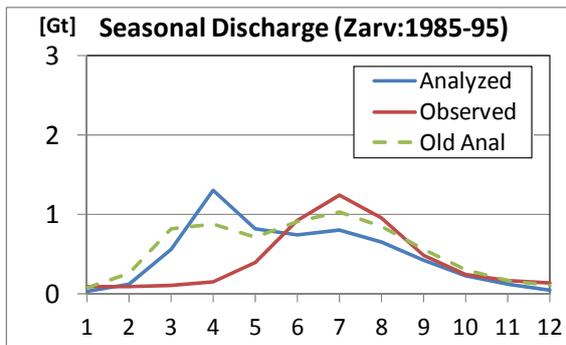
$$\frac{dT}{dz} = -0.006 \quad (4)$$

となるため、式(3)と式(4)より、

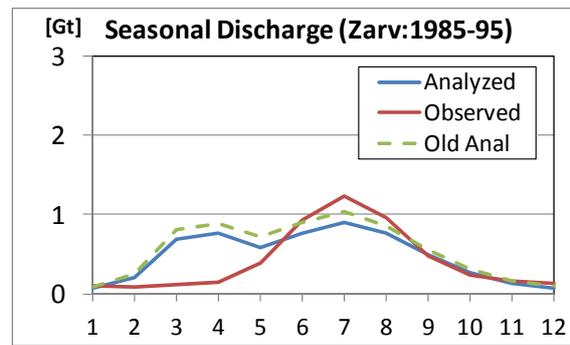
$$\frac{\partial L}{\partial z} = \frac{\partial L}{\partial T} \frac{dT}{dz} = -0.006 \times 4\sigma T^3 \quad (5)$$

この式(5)に基づいて標高補正を行った。ここに、 $L$ は長波放射[W/m<sup>2</sup>],  $T$ は気温[K],  $z$ は標高[m],  $\sigma$ はシュテファン=ボルツマン定数である。

従来手法と本手法とで、長波放射の分布や月平均河川流量を比較した結果がFig.5(a)である。図から分かるように、4月に強いピークがあった従来手法と比較して一ヶ月ほど融雪が遅れる事を考慮することができた。加えて8月の流量が少なくなっており、これは長波放射が高標高域で減少したために氷河域からの融解量が減ったためと考えられる。



(a) Long radiation



(b) Specific humidity

Fig.5 Monthly averaged discharge at Dupli station (Altitude dependency)

今回行った下向き長波放射の標高依存補正は、気温の補正を行っているのであれば理論的に当然行うべき補正であるため今後の解析でも用いることとする。しかし、検証が不十分であるため今後はゾンデ観測等を通して検証を行う必要がある。加えて、着眼している流量のピークには未だに解析値と観測値との間で2ヶ月程度のずれがあるため、次節以降において更なる考察が必要である。

### 3.3 比湿の標高補正

本節では比湿ではなく相対湿度を保存した場合についての影響について検討を行う。相対湿度を計算する際には内挿の前後で飽和水蒸気圧 $E_s$ の値が必要であり、式(6)のTetensの式により計算を行う。

$$E_s = 6.11 \times 10^{aT / (b+T)} \quad (6)$$

ここに、 $T$ は気温[ $^{\circ}\text{C}$ ]、 $a, b$ は定数で水面の場合 $a=7.5$ 、 $b=237.3$ 、氷面の場合 $a=9.5$ 、 $b=265.5$ であり、気温が $0^{\circ}\text{C}$ より高い場合には水面、 $0^{\circ}\text{C}$ より低い場合には氷面とした。

比湿を保存した場合と相対湿度を保存した場合とで年平均比湿と月平均河川流量を比較した結果をFig.5(b)に示す。相対湿度を標高に沿って保存した場合には高標高域で乾燥するように補正されていることが分かる。しかし、河川流量を比較した場合には季節変化に大きな違いは見られず、しかし年間を通して流量が低くなっている。その理由は、高標高域における凝結量の減少と蒸発量の増加によるものと考えられる。

今回の結果を見ると大きな変化が見られなかったが、今後の解析では相対湿度が保存される形で内挿を行う。その理由は冬季の凝結量が少なかったためであるが、今回過大と考えた凝結について、特に地表面温が低い場合には起こり得る現象ではあるが、今後はその原因について検討していく必要がある。

## 4. 空間解像度に関する検討

### 4.1 サブグリッドスケールの効果

従来までの山岳域での解析では、標高をメッシュ平均値で解析してきたため、解像度が低い場合にサブグリッドスケールに存在する高標高域において融雪が融け残るといった現象が考慮されていない可能性がある。実際には、氷河域などのように夏季においても雪が融け残っている領域は解析格子規模に広がった領域ではなく、山頂付近や谷部といった周辺と比較して特に熱供給の少ない環境にある一部領域のみである。これらの一部領域において融け残った雪は、夏季の水資源を涵養しているため面積的には少なくても水資源上は非常に重要な存在である。

そこで本節では、これらのサブグリッドスケールに存在する雪域を考慮することによる陸面過程解析上の違いについて定量的に検討するため、4つの空間解像度の異なる解析を行いそれぞれを比較する。

### 4.2 解析条件

元々のザラフシャン川流域における解析は空間解像度5kmで行ってきたが、本節では1km, 5km, 10km, 20kmの4種類の空間解像度による解析結果を比較した。Fig.6は、SRTM標高データにより得られる各解像度の標高データとASTER-GDEMから、2000mから1mごとにその標高値より高いメッシュの面積を計

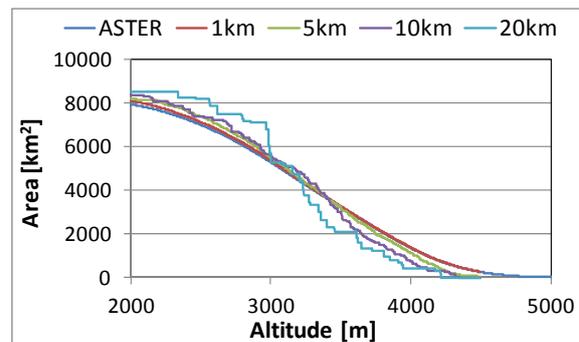


Fig.6 Area more than each altitude

算したものである。ここで、図中のASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)とはASTER-GDEM標高データ(Global Digital Elevation Model)から得られる空間解像度30mの標高データを基に、同様の標高バンド毎総面積をとったものである。ASTER-GDEMはMETIとNASAによる衛星プロダクトである。

Fig.6より、1km解像度の場合ではほぼASTER-GDEMと整合しており、粗くなるに連れてずれが見られることが分かる。そのずれは特に標高4300m以上の高標高域で顕著であり、本研究で氷河域と設定した地域と重なる。これより、1km解像度ではASTER-GDEMとほぼ同じ条件で解析を行えることを示すと共に、5km以上の解像度では山岳域において標高帯の混在を考慮できていない事に起因した解析上のずれが発生する可能性が示唆された。特に、メッシュ平均値は高標高域の標高帯面積を過小評価する傾向があるため、氷河や積雪の融け残りを解析の中で十分に考慮できないことが考えられる。次節では陸面過程解析の結果に基づいてこれらの影響を定量的に評価する。

#### 4.3 異なる空間解像度による解析間の比較

Fig.7に各解像度で解析した結果を示す。ここで、異なる解析間で氷河面積が変わってしまうと年間融解量が大きく変わってしまうため、全ての空間解像度において共通して610km<sup>2</sup>の氷河面積が実現するように氷河域最低標高の値を調整している。

結果を見ると、空間解像度が異なる場合には大きく結果が異なる事が分かった。第一の理由としては、氷河を与えた際に氷河面積が各空間解像度間で保持されるように設定すると、低解像度メッシュではFig.6に示されるように高標高域の面積を過小評価するため、氷河の最低標高を低く設定しなければならなくなり、氷河の融解強度が上がってしまうためである。各解像度における氷河域の最低標高値は、20km解像度で3743m、10km解像度で3989m、5km解像度で4160m、1km解像度で4288mである。このように、氷河からの融解は標高値の影響を大きく受け、空間解像度が粗い解析では報告された面積と合わせても大幅にずれた解析をしてしまうことが分かった。

一方で、単年性の雪の融解過程に関しては大きな変化は無く、今回高解像度と設定した1km解像度であっても4月をピークに一気に融解してしまうことが分かった。よって、融解時期のずれの原因はサブグリッドスケールの標高帯の混在によるものだけでなく、更に斜面方位の混在等も考慮する必要があるように思われる。

このように、空間解像度が異なることでメッシュ

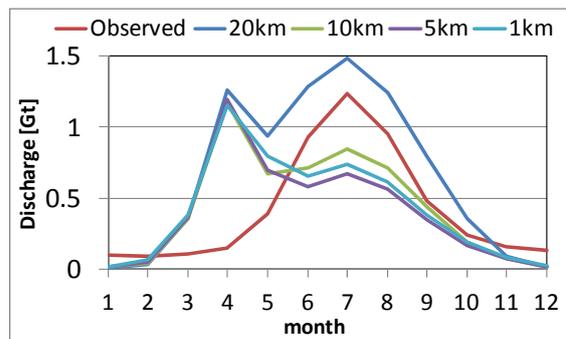


Fig.7 Monthly averaged discharge (spatial resolution)

内の標高帯の混在が考慮できず、山岳域での解析では結果が大きく異なることが分かった。今回は氷河域が標高値に従って設定されていたため影響も大きかった一方で、単年性の雪がどの標高帯からも春先に同時に融解したため、単年性の雪の融解に関して違いは少なかったものと見られる。流出に対する融解の各標高帯からの寄与度を明らかにし、それらをモデルで再現できるようになれば、より顕著な違いが見られることと思われる。

#### 5. 標高モザイクスキームの検討

##### 5.1 標高モザイクスキームについて

前節では、山岳域での陸面過程解析において空間解像度によって解析結果が異なり、その原因はメッシュ内の標高帯の混在を考慮できていない事が問題であることが分かった。

そこで本節では標高モザイクスキームについて検討を行う。一般的な陸面過程モデルでは、サブグリッドスケールの土地利用の混在を考慮するために土地利用モザイクスキームを使用している。これは解析メッシュ内の全土地利用種に対し独立に解析を行った後、それらの面積率に応じて足し合わせるという手法であり、下の式(7)で表される。

$$F_{total} = \sum_i F_i V_i \quad (\text{但し, } \sum_i V_i = 1) \quad (7)$$

ここに、 $F$ はフラックス、 $V$ は面積率、添え字の $i$ はサブグリッドスケールの各要素を示し、ここでは土地利用種となる。しかし、山岳域において土地被覆はほぼ一様であり標高の方が水熱収支に与える影響が大きいため、メッシュ内に存在する標高値を各標高帯に分類し、その標高帯ごとにモザイクモデルを適用することを試みた。なお、本節では土地被覆の混在より標高帯の混在の影響が大きくなる境界を標高1500mと設定し、各メッシュに対して1500m以下の各土地被覆に加える形で1500m以上の各標高帯をモザイクに加えた。なお、水体と都市域と灌漑地に関しては、標高が1500m以上であっても土地被覆モ

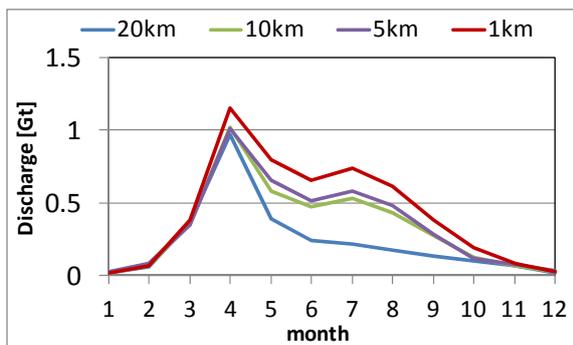


Fig.8 Monthly averaged discharge (elevation mosaic)

ザイクに加えている。

## 5.2 解析結果

本節では、1km解像度での解析を疑似真値として、低解像度の標高モザイクスキームで表現できるかについて検証する。各解像度で解析を行い、1km以外の解像度での解析では1km標高データを基にした標高モザイクスキームを用いている。Fig.8に解析結果を示す。

これより、Fig.7と比較して非常に改善された結果を得る事ができた。疑似真値と設定した1km解像度での解析に近い解析結果を10km解像度での解析でも実現できている。特に解像度20km時において夏季の氷河からの融解量が減少する傾向にあるため、今後はその原因についても考察していきたい。

## 6. 結論

本研究では、山岳域の水熱収支解析を改善させるための検討を行った。陸面過程モデルを用いて河川流量を再現したところ、観測データは7月をピークとしていた一方で、解析結果では3~5月頃に集中的に融解が発生していた。衛星解析結果と比較しても同様に融解を早期評価していることが分かり、単純に陸面過程解析において流出過程やダム操作を考慮していないことが原因ではないと思われた。そこで本章では、気象強制力の標高依存性と、山岳域での解析に使用するメッシュの解像度について検討を行った。

まず、気象強制力の標高依存性についての検討では、下向き長波放射に標高依存性を考慮した補正を行うと、融雪の早期評価が若干緩和されることが分かった。一方で、比湿に関しては標高依存性を考慮しても大きな変化は見られなかった。次に、解析格子の空間解像度を変えた解析を行い、起伏の激しい地域において解像度を変えた場合の解析結果の違いについて検討した。その結果、氷河域の扱い方や気象強制力の与え方が変わるため大きな違いが見られた。そこで、メッシュ内での標高帯の混在を考慮す

るための標高モザイクスキームを構築し、その効果を検討したところ、低解像度における解析においても高解像度で解析した際の月別河川流量を再現することができた。しかし、解像度の違う解析間で夏季の融解強度に違いが見られたため、今後はその原因についても考察が必要である。加えて、最も空間解像度が高かった1kmでの解析でも観測された月別河川流量を再現することができず、季節を追う毎に低い標高帯から順に融解することが衛星解析と比較すると再現できていなかった。

よって、今後は気象強制力に対して短波放射に関して斜面勾配の影響を考慮したり、陸面過程モデル内の雪層を多層化するなど融解プロセスを再検討することでモデルの再現性向上を図る。

## 参考文献

- 峠嘉哉・田中賢治・浜口俊雄・小尻利治 (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.
- Hirabayashi, Y., Kanae, S., Motoya, K., Masuda, K. and Döll, P. (2008): A 59-year(1948-2006) global near-surface meteorological data set for land surface models. Part I: Development of daily forcing and assessment of precipitation intensity, Hydrological Research Letters, Vol. 2, pp. 36-40.
- Kitamura, Y., Kozan, O., Sunada, K. and Oishi, S. (2007): Water Problems in Central Asia, Journal of Disaster Research, Vol.2(3), pp.134-142.
- Micklin, P. (2007): The Aral Sea Disaster, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 35, pp.47-72, Western Michigan University.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira (2007): The JRA-25 Reanalysis. J. Meteor. Soc. Japan, 85, pp.369-432.
- 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.
- Unger-Shayesteh, K., et al. (2013): What do we know about past changes in the water cycle of Central Asian headwaters? A review, global and planetary change, Vol.110, 4-25.

(論文受理日: 2015年6月11日)