

中央アジア乾燥地自然植生の生理パラメータに関する検討

Study on Physiological Parameters of Native Plants in Arid Region in Central Asia

峠嘉哉・田中賢治・Timur KHUJANAZAROV・中北英一

Yoshiya TOUGE, Kenji TANAKA, Timur KHUJANAZAROV and Eiichi NAKAKITA

Synopsis

In Central Asia, desert is one of main land cover where nomadic life is historically common especially in northern area and in mountainous region. However, due to climate change, temperature will rise in whole region. Since native plants are fully liable to climate variation, the impact has to be projected in advance.

In this study, to consider expected impacts on these climatic variation, physiological parameters in land surface model was studied in spite of seasonal change and annual change. Seasonal NDVI and surface temperature and snow cover were compared with climatic data and model result was verified. As the result, seasonal change of stomata water stress was calculated, but it couldn't fully explain NDVI changes because there are many key components to decide native plants activity.

キーワード: 陸面解析, 衛星解析, アラル海流域

Keywords: Land surface analysis, Satellite analysis, Aral Sea Basin

1. はじめに

カラクム砂漠やキジルクム砂漠といった広大な乾燥地帯を有する中央アジアでは、北部や山岳域を中心として自然植生に依拠した遊牧産業が歴史的に盛んである。しかし、乾燥地植生は乾燥や多雪、寒波等の様々な気象条件に対して鋭敏に反応するため、年々の気象変動の影響を大きく受けやすい。過去にも大規模な家畜への被害も報告されており、今後の気候変動の影響評価も必要である。

中央アジアでは、気候変動の影響として流域全体の昇温と山岳域を中心とした降水量増加が見込まれている (Kusunoki et al., 2011)。峠ら(2015)は、中央アジアのアラル海流域において、気象庁気象研究所大気モデルMRI-AGCM3.2Sを入力条件に統合水循環モデルによる水収支解析を行った。その結果、気温の増加は流域全体で蒸発散量を増加させ、特に灌漑地と水体上の蒸発散量増加が顕著である一方で、水資源量には大きな変化が見られない事を示した。しかし、流域全体の水収支解析を目的としていたため、

流域内の様々な気候帯や土地被覆条件を考慮できるにも関わらず、河川流量にほとんど寄与しない乾燥地の自然植生域等への影響については再現精度の検証自体がされていなかった。乾燥域では一般に使用可能なデータが限られている上、前述の通り様々な要因が複合的に作用するために植物活性を物理モデルのみで説明することは容易ではない。

そこで本研究では、乾燥域自然植生に対する気候変動影響を最終目標とし、それに向けた第一段階として、過去の植生変動が物理モデルや衛星解析による地表面温度や土壌水分量推定結果からどのように説明され、どこまで再現できるのかを検証する。

2. 解析手法

本研究では、まずNDVIの衛星解析値から過去の植物活性を推定し、その年変化の原因を気象データや衛星解析に基づいた地表面温度や積雪域、陸面モデルによる解析結果と比較する。

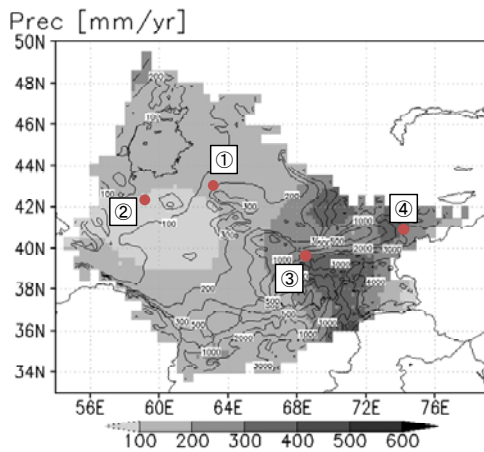


Fig.1 Stations on annual precipitation map

解析の対象は、アラル海流域内で気候条件や土質条件の異なる4点である。過去のNDVI分布や土地被覆データを比較し、流域内の様々な気候条件を代表するものを選定した。Fig.1にその代表点の分布を平均年間降水量（H08より）と標高図（SRTMより）と共に示す。

地点1は、キジルクム砂漠の中心部に位置するキジルケシクである。年間降水量100mm前後の典型的な砂漠気候であり、一部で自噴地下水を用いた小規模な灌漑が行われているものの、広範に砂漠が広がる地帯である。地点2はアムダリア川下流のデルタ地帯のヌクスである。歴史的にアムダリア川からの取水によるオアシス農業が行われてきた地域で、気候が非常に乾燥しているために単位面積当たりの灌漑必要水量が大きい。加えて、峠ら（2015）による解析では気候変動による昇温により灌漑必要水量が大幅に増加すると推定された地帯である。地点3は半乾燥地帯で大規模に灌漑が行われているバイヤブートである。ソ連期から大規模に灌漑事業が行われてきた地域で、ウズベキスタンにおける典型的な農業地帯である。地点4は山岳域のキルギスに位置しており、半乾燥地域に位置する。自然植生に依拠した遊牧地帯となっている。地点1と2は乾燥地、地点3,4は半乾燥地に位置し、地点2,3はメッシュ内に灌漑地を広く有する。

衛星データには、MODISとSPOT-VEGETATIONを使用した。SPOT-VEGETATION (<http://www.spot-vegetation.com/>) は、空間解像度1km、時間解像度約10日のNDVIデータを公開している。MODISのNDVIデータは空間解像度250mで時間解像度は16日である。加えて、MODISは積雪域と地表面温度の推定にも用いた。積雪域データはMOD10プロダクトで、空間解像度は500m、時間解像度は8日である。主にNDSI (Normalized Difference Snow Index)を基に作成され、NDVIデータを基に木々の影響を補正したプロダク

トで、8日間の最大積雪域を示している。地表面温度は、MOD11プロダクトを用い、空間解像度は1km、時間解像度は8日であるが、8日間に昼夜別々に平均しているため、地表面温度の日格差も求めることができる。本研究で使用した各衛星データは、雲の影響や局所的な変動を除去するため、明らかな異常値を除去した後に20kmメッシュ・月平均化処理を行ってアップスケールした。

陸面過程モデルにはSiBUC (Tanaka, 2004)を用いた。SiBUCは灌漑地における人為的水操作や水体からの蒸発量を陽に考慮できる陸面過程モデルであり、峠ら(2015)による流域水収支解析時にも使用している。気象データには再解析データであるJRA55と(Kobayashi et al., 2015)、観測データに基づいたH08全球気象データ(Hirabayashi et al., 2013)を用いた。これらを使用した理由は、MODIS衛星解析値と比較するには2001年以降のデータが必要であるためである。解析の空間解像度は20kmであり、衛星解析時と同様のメッシュを用いる。

3. 解析結果と考察

3.1 植生の季節変化

本節では、陸面モデル内で表現される気孔の水ストレス推定式がどれ程季節変化を捉えられるか検討した。

陸面過程モデルでは、気孔の水ストレスは土壌水分量からマトリックポテンシャルを計算した後、下式により計算する。

$$F_{pot} = 1 \quad (MP > MP1) \quad (1)$$

$$F_{pot} = \frac{MP - MP2}{MP1 - MP2} \quad (MP2 < MP < MP1) \quad (2)$$

$$F_{pot} = 0 \quad (MP < MP2) \quad (3)$$

ここに、 F_{pot} は気孔抵抗値で1の時はストレスが無い状態、0の時はストレスにより蒸散が止まる状態を表している。 MP は土壌水分量から計算されたマトリックポテンシャルであり、 $MP1$ と $MP2$ は基準値である。 $MP1$ と $MP2$ は植生の種類ごとに設定されている。

この MP の季節変化を図示すると、Fig.2のようになる。Fig.2は地点1のキジルケシクと地点4のキルギス山岳域であり、 MP 値は正午前後の値を抜き出している。(a)には降水量と、陸面過程モデルで計算した蒸発散量が示されており、土地被覆条件は共に草原である。草原における土壌のマトリックポテンシャルと蒸散抵抗の値を図示したのが(b)である。(i)のキジルケシクでは、冬季は比較的土壌水分量が高い

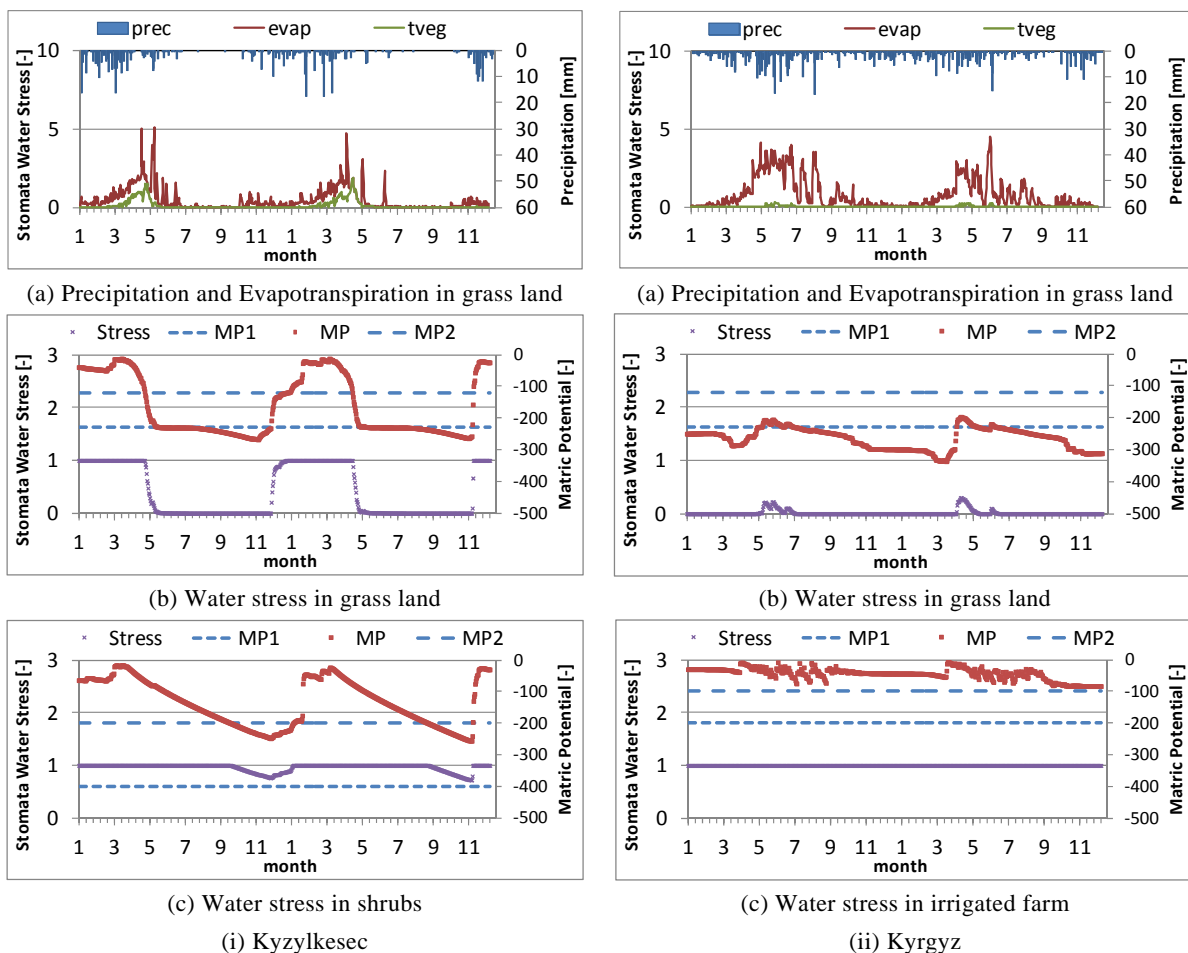


Fig.2 Water stress in two sites

ために蒸散抵抗値は1になっているものの、春を迎えると土層から蒸散によって水分が急激に奪われるため乾燥し、蒸散抵抗値は0となった。そのため蒸散量は春の極一部期間のみに集中し、その他の期間では蒸散量はほぼ発生していない。一方で、キルギスの草原地帯では、蒸散抵抗は一年を通してほぼ0になっており、これはMP1とMP2を変化しても大きく変わらなかった。根層圧等のその他の土質パラメータに原因があるものと考えられる。

(c)には、キルギシにおける裸地・低木地帯とキルギスにおける灌漑地帯を示した。低木地帯は裸地も含むため、植生はより強い乾燥条件下でも蒸散ができるようにMP1とMP2の値は低い値に設定されている。そのため、土壌は乾燥しているにもかかわらず植物の蒸散抵抗は一年を通して高い状態が維持されている。しかし、LAI等の植生パラメータが低いため、実際の蒸散量は少なく抑えられ、草原地帯と比較して土壌水分量の減少が緩やかである。キルギスの灌漑地帯ではマトリックポテンシャル値が高く

維持され、蒸散抵抗は常に1になっていた。

以上より、陸面過程モデル内の水ストレス項は土地被覆や土質条件、灌漑の有無等によって変化していた。キルギシの(b)では、春先から夏にかけて乾燥度が高くなることが示されているが、実際に現地の自然植生は春先に活性のピークを迎え、夏季にかけて活動を抑えるため、現実とも整合していると言える。しかし、キルギスにおいては、(b)に示したように蒸散抵抗が0となり蒸散量が低く抑えられている場合が多く見られた。今後は現地調査結果や衛生解析NDVIの値も用いてより現実的な形にパラメータの値等を設定が必要である。

3.2 植生の年変化

前節では季節変化や土地被覆ごとの違いについて検討したが、本節では衛生解析されたNDVI値等と比較してより長期の年ごとの変化に対して陸面過程モデルがどの程度表現できるかを検討した。

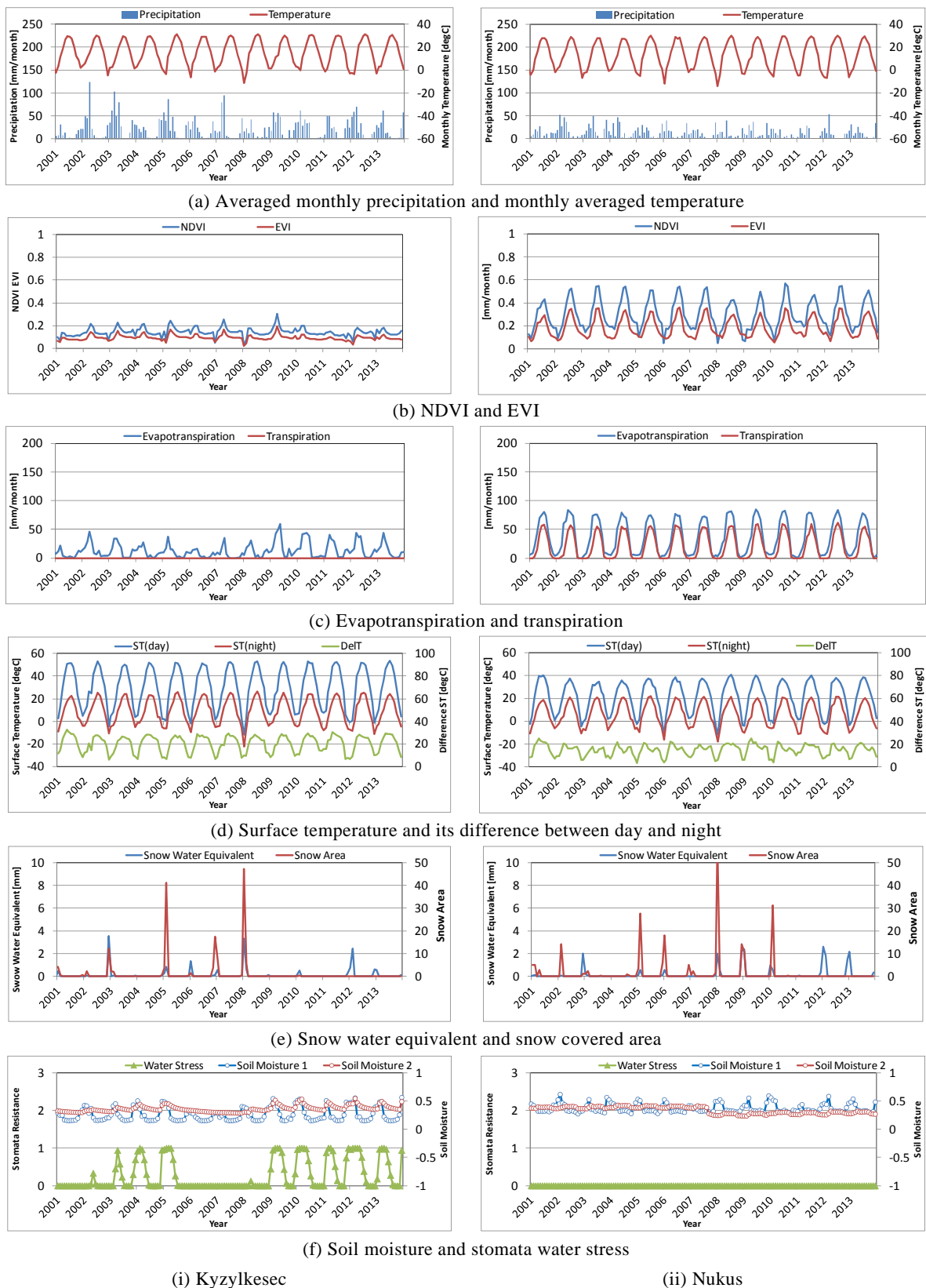
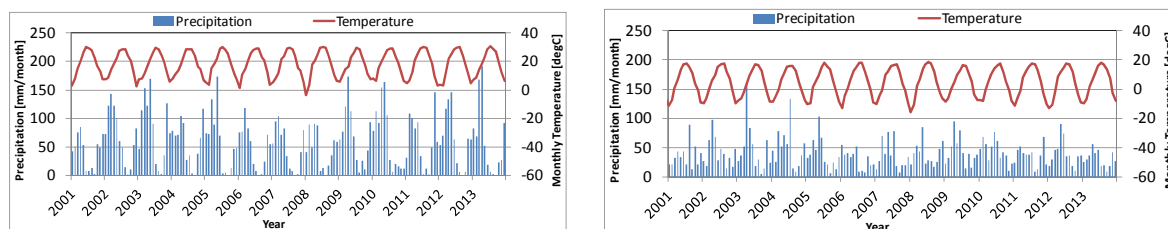


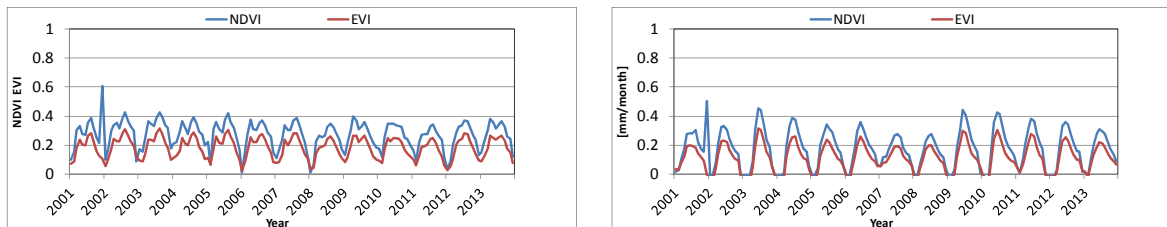
Fig.3 Seasonal hydrological components at Kyzylkesec and Nukus mesh

Fig.3,4に、キジルクム砂漠東における過去のNDVI季節変動の結果を示す。Fig.3は年降水量100mm前後の乾燥地における二点の比較であり、Fig.4は半乾燥地における比較である。(a)は平均月降水量と月平均

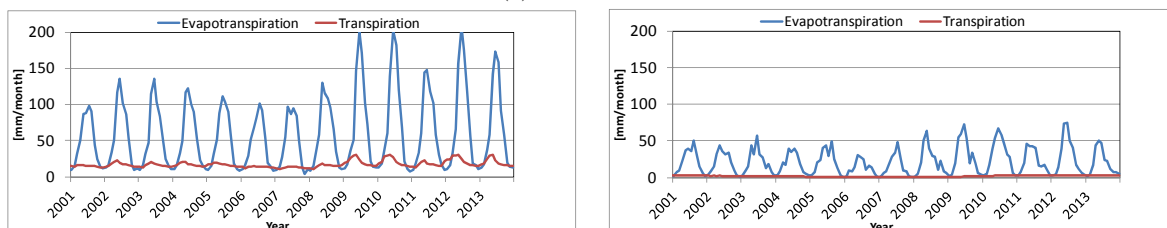
気温、(b)はMODISから得られるNDVIとEVI、(c)は陸面過程モデルで解析された月蒸発散量と月蒸散量、(d)はMODISによる地表面温度の推定値で、昼間の平均値 ST_{day} と夜間の平均値 ST_{night} を別々に示している。



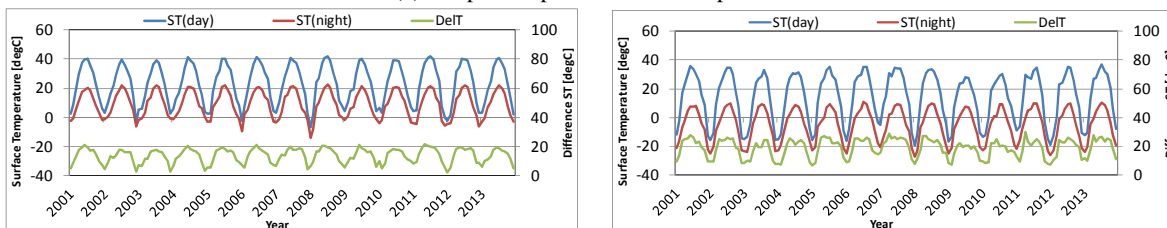
(a) Averaged monthly precipitation and monthly averaged temperature



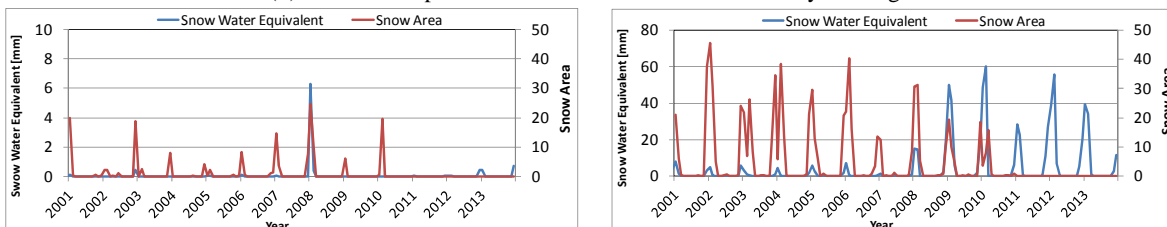
(b) NDVI and EVI



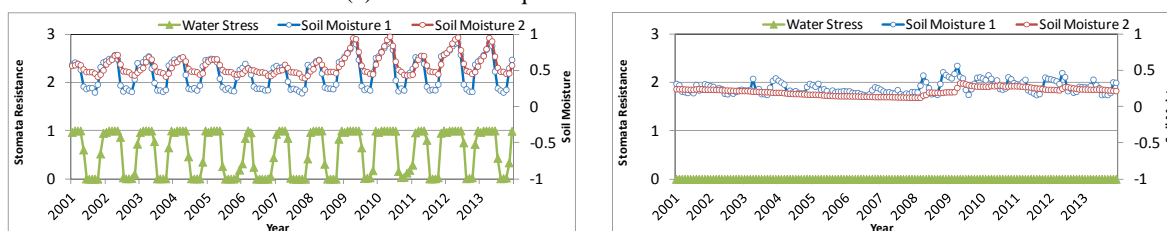
(c) Evapotranspiration and transpiration



(d) Surface temperature and its difference between day and night



(e) Snow water equivalent and snow covered area



(f) Soil moisture and stomata water stress

(i) Bayavut

(ii) Kyrgyz

Fig.4 Seasonal hydrological components at Kyzylkesec and Nukus mesh

加えて、両者から計算される地表面温度の平均日格差も図中に示した。(e)はモデルで計算された積雪当水量とMODISから推定される積雪領域を比較したものであり、(f)に植生の生理パラメータと土壌間隙率

の変化を示す。ここで、モデルからの推定値は積雪量を示すが、MODISからの推定値は面積であるため比較の際には注意が必要である。

まず全地点で共通しているのは、乾燥年であった

1999から2001年では夏場の植物活性が著しく低いことが挙げられる。春先の活性度も低く、夏にかけての昇温でNDVIが低下するのも早い傾向にある。加えて、大きな寒波が到来したことで報告されている2008年でも同様に夏季のNDVIの低下が見られる。冬季に地表面温度が著しく低くなっていることや、積雪領域が増加していることが衛星解析やモデル解析の結果から示されている。

地点1で乾燥地帯のキジルケシクでは、NDVIやEVIのピークは春であり、その後気温の増加に伴って徐々に減少する。降水量が多い場合には、春先のピーク値が高く、初夏まで高い状態が維持されていた。この季節変動は蒸発散量の季節変化に近く、自然植生が蒸発によって土壌水分が下がった時に生育活性を下げるような植物が多いことが分かる。

気象条件では地点2のヌクスの方が乾燥しているが、昼間の地表面温度や日格差は最も高く、これは地点2がデルタ地帯であるために地下水位や灌漑の影響である。

気温条件やNDVIの年変動が小さい一方で、モデルでの解析結果は年変動が大きかった。特に蒸発散量は変動が大きかった。積雪融雪に関しては、雪解けのタイミングが衛星解析とモデル解析ではほぼ等しいことが分かった。山岳域で行った峠ら(2014)による解析では、雪解け時期がモデルでは早いために月流量が合わないという問題があったが、乾燥域の低地でそのような問題は見られなかった。

地点2のヌクスでは、乾燥年の2001年と寒冷年の2008年でNDVIの減少が見られた。1999年から2001年にかけての渇水の影響を最も受けたのがアムダリア川下流域と言う報告もあり、衛星解析でも影響が捉えられていることが分かる。降水量が少ない年に地表面温度の日格差が大きくなる傾向がある。

地点3のバイヤブートは灌漑地であるので蒸発散量が高くなっている。しかしNDVIやEVIの値は高くなく、蒸散量だけでは評価ができないことを示唆している。冬季はNDVIにばらつきがあるが、夏季の年変動は小さく、人為的に管理されていることが捉えられている。地点4のキルギス山岳域では、気温が比較的低いために蒸発散量が低くなっている。冬季は気温が低い上に熱量が雪解けで消費されるために蒸発散量は低い。しかし、地温の日格差は冬季でも10度近くあり、これは地表面温度の空間解像度1kmではメッシュ内の混在の影響が大きいことを示唆している。

最後に、生理パラメータについて考察する。乾燥地を示したFig.3では、降水が見られる冬季には土壌水分量が増加し、一時的に植物の水ストレスが1になるものの、夏季を中心に乾燥による蒸散障害が解析

されている。通年で0となっている年も存在し、第二層の土壌水分量が冬季に増加していないことが分かる。年降水量に大きな差が見られないことから、地表面の雪によって土壌への浸透が阻害された可能性や、降雨強度が高くて流出したと考えられ、より詳細な結果の整理が必要である。また、ヌクスでは、灌漑が行われるので蒸発散量に対する蒸散の割合は大きい。その一方で、水ストレス値は常に0となっており、灌漑地以外の地域では乾燥度が著しく高いことを示している。半乾燥地のFig.4でも同様に、灌漑地では蒸散量が大きく、自然植生域でも冬季の降水後に水ストレス値が低下することが示された。特にBayavutは典型的な灌漑地の傾向を示しており、灌漑期には人為的な水操作によって蒸散に水ストレスがかからない一方、非灌漑期では土壌水分量が低下し、水ストレスが働いたことがモデルで表現されていた。

4. 結論と今後の課題

本研究では、過去の気象条件と衛星解析とを比較することで乾燥域・半乾燥域で植生条件・気象条件の年変動が物理モデルや衛星解析でどのように見えるかを検討した。その結果、NDVIの変動はある程度気象条件から説明できた。特に2000年前後の渇水の影響や2008年の寒冷年の影響は複数の解析から影響が捉えられていた。しかし、NDVIの年変動を細かく説明するためには、実際の被害状況など現地情報が不可欠であることが分かった。

衛星解析では1km解像度であっても各年の植物活性の特徴を捉えることができ、特に季節変動の特徴を捉えた。今後は、これらの結果を精査してモデルの詳細な検討を行うと共に、自然植生域において気候変動の影響評価を行う。特に、気候変動評価時には乾燥地帯が更に乾燥する危険性があるが、既に水ストレス値が0になっていると乾燥化の進行を表現できないため、厳しい乾燥も表現できるモデルへの改良を検討する必要がある。

参考文献

- 峠 嘉哉, 田中賢治, 中北英一: アラル海流域における陸域水循環モデルを用いた気候変動の水需給バランスへの影響評価, 土木学会論文集G(環境), Vol.71, No.5, I183-I188, 2015.
- Hirabayashi Y., Kanae, S., Motoya, K., Masuda, K., 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.
Kobayashi, S., Ota Y., Harada Y., Ebita A., Moriya M.,
Onoda H., Onogi K., Kamahori H., Kobayashi C., Endo
H., Miyaoka H. and Takahashi K., (2015): The JRA-55
Reanalysis: General Specifications and Basic
Characteristics. J. Meteor. Soc. Japan, 93.
Kusunoki S., Mizuta R. and Matsueda M. (2011): Future
changes in the East Asian rain band projected by global

atmospheric models with 20-km and 60-km grid size.
Climate Dynamics, Vol:37, pp.2481-2493.
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 : 2016年6月13日)