

中央アジア・キジルクム砂漠における地表面フラックス観測

甲山 治・大石 哲*・砂田 憲吾*・寶 馨

* 山梨大学大学院医学工学総合研究部

要 旨

キジルクム砂漠は典型的な乾燥地であり、特異的な気象条件と生態系を有している。また砂漠にはオアシスが点在し、周辺住民はそれを用いて農地灌漑を行っている。このような地域で持続可能な農業を行うには現地の水文循環を把握することが重要だが、科学的な解析に必要なデータは十分ではない。2006年以降、中央アジアの現地プロジェクトと共同で地表面フラックス観測を行っている成果を紹介するほか、流域水循環の把握とモデリングに向けて行っている長期水文・気象データを用いた気候変動解析、および衛星データを用いた土地被覆変化に関する研究を紹介する。

キーワード：キジルクム砂漠, ICBA, 塩害, NDVI, 気温の上昇トレンド

1. 序論

1.1 本研究の背景

大規模灌漑によってアラル海が干上がった中央アジアのアムダリア・シルダリア流域は、20世紀最大の環境破壊の一つに挙げられる。その他にも年平均気温の上昇、過剰灌漑がもたらした塩類集積、さらには過放牧による牧草地の衰退など多くの問題が存在する。アラル海流域の多くは年降水量250mm以下の乾燥地帯であり、農業をはじめとした人々の生活は上流域からの河川水に多くを依存している。急激な気温上昇は主要産業である牧畜と綿花栽培にも影響を与えるほか、流域を流れるアムダリア・シルダリアの大河川は主として山岳域からの融雪水を水源としており、融雪早期化への影響も深刻である。その結果冬季洪水が頻発する一方で、下流では夏季の用水量が不足する事態が起きている (kitamura et al. 2007 参照)。

アラル海流域において水・熱循環研究を行う意義としては、1) 対象流域と周辺域の地表面状態が大陸スケールの気候システムに与える影響が大きいと考えられること、2) 上下流国家間の水紛争、非持続的な農業計画、洪水の頻発、下流域の水環境・生態

系の劣化等、多くの問題に直面していることから、水文学が果たすべき役割が極めて大きいと考えられること、3) パミール・テンシャンの氷河から砂漠まで様々な自然を含むことから、現在アラル海流域で起こっている現象を把握することで他の地域にも有益な情報を提供しうること、の3点が挙げられる。

2. 研究の協力体制とキジルケシク

2.1 ICBA プロジェクト

ICBA (International Center for Biosaline Agriculture) プロジェクトは乾燥域における持続的な農業システムの構築を目指して、世界各地の乾燥域で活動を行っている。中央アジアでは限られた水資源を効率的にマネジメントすることが求められており、現在農業が行われている地域では、節水農法や乾燥に強い品種を地域住民に提供している。さらには、農業が限定的にしか行われていない地域での農業システムの構築も行っている (Kristina et al. 2007, 2008 参照)。

ウズベキスタンとカザフスタンに広がるキジルクム砂漠 (総面積約30万km²) には、被圧地下水が



Fig. 1 Kyzyl ke sek Experimental Farm

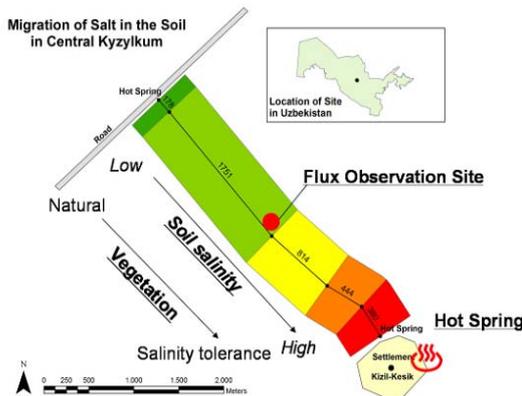


Fig. 2 Research Target Areas

湧出しているオアシスが点在する。ICBA は規模の大きなオアシスであるキジルケシクに試験農場を設置し、従来生育作物である小麦やトウモロコシに加えてアフリカ原産の Sorghum など、耐乾燥かつ耐塩性の作物を試験的に栽培している (Fig. 1 参照)。キジルケシク周辺は標高が低く東側には山岳域があるために、乾燥地の中にオアシスが点在する地域である。中央アジアの塩害研究では、カザフスタンのゲジルオルダなど人為的な大規模灌漑によって土壌が塩性化した地域が有名であるが、河川の下流域およびオアシスの周辺など自然状態でも地下水位が上昇しがちな地域でも塩害が深刻である。持続的な農業を行うためには、余剰水をコントロールしながら農作物を栽培することで周辺の地下水位の上昇を食い止めることが不可欠である。

2.2 砂漠の植生解析

キジルクム砂漠の優占種はアルテミアであるのに対して、農場と集落の周りに植林されているハロキシロン、過放牧の影響であるアルハギ、土壌水分と塩性が高い地域に存在するタマリクスなど、水文

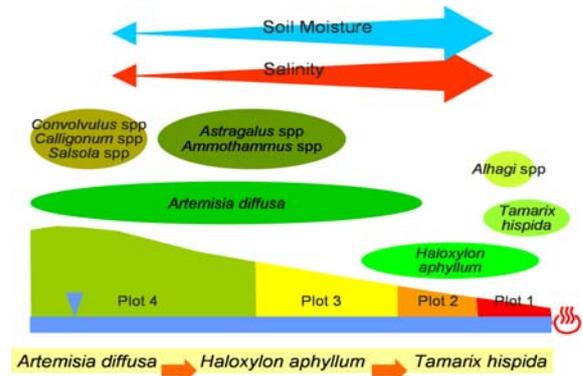


Fig. 3 Kyzyl ke sek Vegetation Model

条件および人為的な影響によって多くの植生が存在する。Fig. 2 は ICBA の Kristina Toderich 博士らと共同で植生調査を行っている対象地域の模式図で、全体を 5 つの Plot に分割している。Plot4 がもっとも自然状態に近く、現在はそこでフラックス観測を行っている。これに農場周辺、灌漑排水路、最終的に水が流れ込む低地の塩害が顕著である 3 地域を加えた 8 地点において、2006 年から ICBA が植生調査および土壌水分の直接観測を行っている。

Fig. 3 は、植生分布と土壌水分および土壌の塩分濃度の関係をモデル化した図である。図中に代表的な 6 つの植生を挙げたが、実際はさらに多くの植生が存在しそれらが相互に影響している。集落には 3 家族・総勢 20 名あまりが暮らしており、通年行う羊の放牧とともに冬季以外は塩水が自噴する井戸の水を用いた農業を行っている。集落には自噴井戸が存在するため地下水位が高く、村から半径 2km 以内は放牧された家畜が牧草を食べるためその影響が大きい。

2007 年 3 月からは中間赤外域まで測定可能なスペクトロメータを持ち込んで、季節ごとの地表面反射率のデータを蓄積している。現在は得られた知見と衛星解析から植生分布を推定し、さらに推定した植生の分布状況から塩分濃度および土壌水分の分布を推定している。その他にも三重大学との共同研究で、葉の炭素・酸素安定同位体を用いた水利用効率および気孔抵抗の解析を行っている。これらのデータを用いて、キジルクム砂漠の植生蒸発散モデルの構築を目指している。

3. 地表面観測データ

ICBA 試験農場では現地農業技術者が 1 日に 2 回ほど気温と湿度データを記録しているが、オアシスおよび乾燥地の水文過程を理解するには不十分であ



Fig. 4 Kyzyl ke sek Flux Observation Site

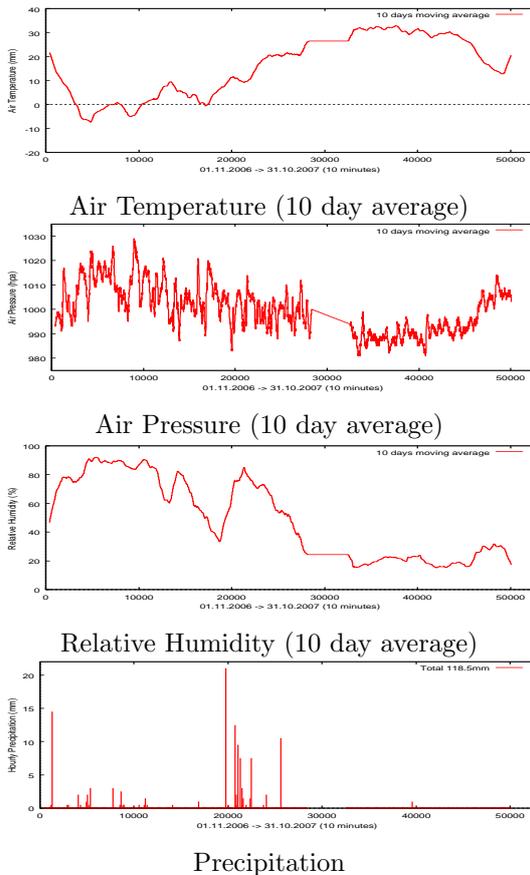


Fig. 5 Observation Data (03.11.2007 - 15.10.2008)

ることから、気象・水文観測およびボーエン比法を用いた水・熱フラックス推定を行っている。まずは一般的な乾燥地の地表面状態を把握するために、キジルクム砂漠における優先種であるアルテミシアが広く自生している Plot4 で観測開始した。

3.1 観測データ解析 (季節変化)

観測サイトでは 2006 年 11 月以降、温湿度 3 高度、風速・風向、長波・短波放射および光量子計（上下）、熱流板、雨量計、気圧計、土壌水分 5 深度、地温 4 深度のデータを取得している（Table 1 参

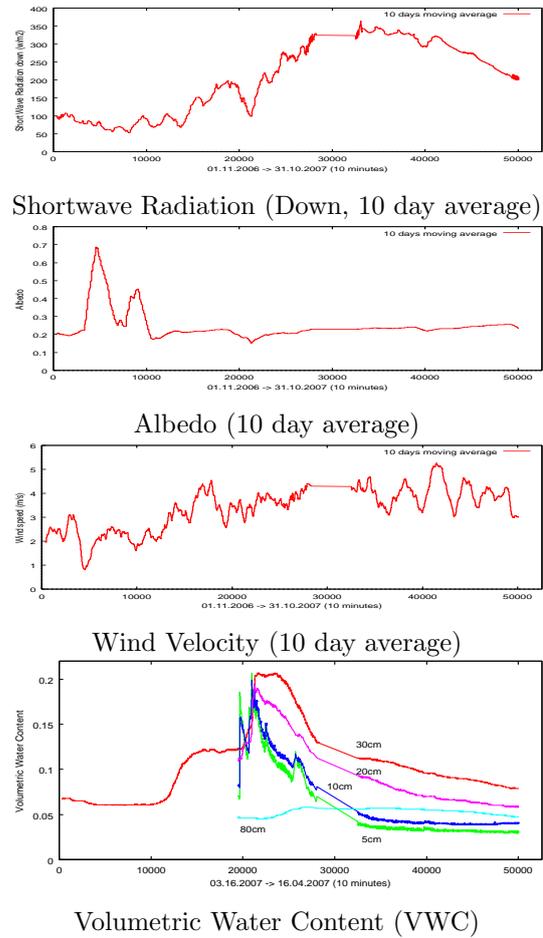


Fig. 6 Observation Data 2 (03.11.2007 - 15.10.2008)

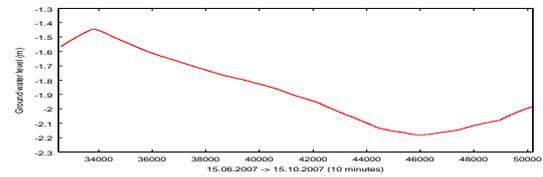


Fig. 7 Ground Water Level at Experimental Farm (15.6.2008 - 15.10.2008)

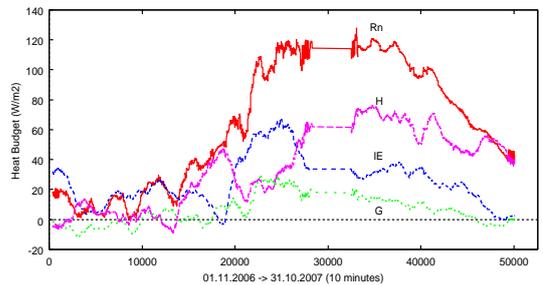


Fig. 8 Heat budget at Plot4 (Rn, H, IE, G)

照)。**Fig. 6** は主な観測データを示しており、期間は 2006 年 11 月 3 日から 2007 年 10 月 15 日までの 347 日間である。ただし 5 月 16 日 8 時から 6 月 14 日 18 時までのデータが、バッテリートラブルのため欠測している。降水量と土壌水分以外のデータは 10 分値を、その他は 10 日間移動平均値を示してい

Table 1 Kyzyl ke sek Surface Observation Elements

Start time	Element	Information
03.11.2006	Air Temperature (3) Humidity (3) Air Pressure (1)	100, 400cm , validation
	Shortwave Radiation(2)	Up and Down
	Longwave Radiation(2)	Up and Down
	Ground heat flux (1)	Heat Flux Plate
	Precipitation (1)	resolution 0.5 mm
	Soil Moisture (1)	30cm, TDR
	Wind Velocity (1)	
16.03.2007	Quantum Sensor (2)	Up and Down
	Soil Moisture(4)	5, 10, 20, 40, 80cm
	Soil Temperature(4)	5, 10, 20, 40, 80cm
	Wind Direction(1)	
15.06.2007	Ground Water Level	Experimental Farm
14.10.2007	Battery Change	Sealed Battery

る。TDRを用いた土壌水分(体積含水率)では、深度30cmのデータが最も高い値を示した。

Fig. 7には試験農場で測定している地下水位データを示しており、期間は2007年6月15日から123日間である。試験農場では夏季は穀物栽培を行っており、周辺の農地では西瓜とメロンの栽培を行っている。生育期間は6月から9月にかけてで、穀物に較べて多くの水を必要とする。このデータからは、6月後半から9月前半にかけて70cmほどの水位低下が見られたことから、今後は蒸発散量および灌漑の影響の定量的評価を行う。

Fig. 8はボーエン比法を用いた地表面熱収支4成分(純放射Rn, 顕熱H, 潜熱IE, 地中伝導熱G)の推定結果である。なおボーエン比法では2高度間の水蒸気圧の差が0に近くなると意味をなさなくなるため、Ohmura(1982)の手法を適用して異常値を外した。熱収支各要素の季節変化からは、冬雨型の乾燥域であるキジルクム砂漠の特徴を良く表しているといえる。しかし推定した期間中の全潜熱を蒸発散量に変換すると約300mmになり、観測期間の降水量118.5mmを大きく上回ることから、今後は降雪期における降水データの検証を行うほか、土壌水分のデータも用いて水収支を解析する必要がある。

3.2 観測データ解析(日内変動)

これまでの観測において約1年間のデータを取得することで出来たことから、キジルクム砂漠の水文地表面状態に関する季節変化を解析した。一方、砂漠の水・熱収支は日内変動においても、昼夜で全く異なる挙動を示すこと示唆されている(近藤, 1994)。Fig. 9は7月31日から8月4日まで5日間の気温、降水量、相対湿度の10分間平均値を示している。8月2日には1mmの降水があり、その前後で気温と相対湿度が大きく変化している。

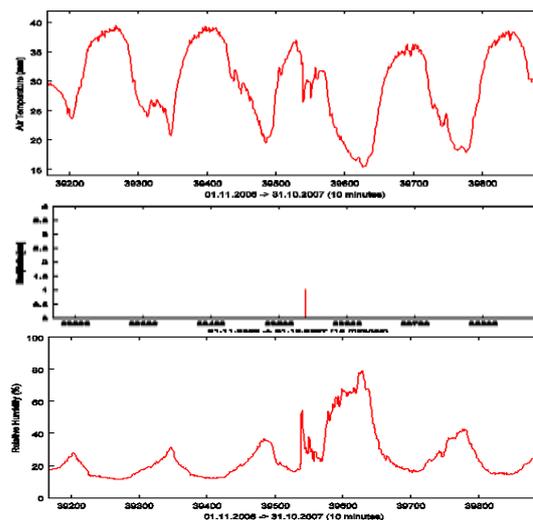


Fig. 9 Air Temperature, Precipitation and Relative Humidity for 5 days (from Jul 31st to Aug 4th)

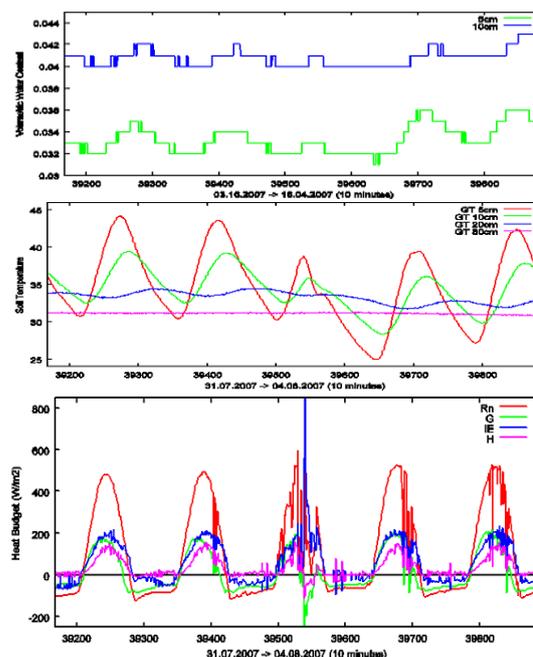


Fig. 10 Soil Moisture (5cm and 10cm), Soil Temp (4 depth) and Heat budget at Plot4 (Rn, H, IE, G) for 5 days (from Jul 31st to Aug 4th)

Fig. 10は同じ期間の土壌水分(5cm, 10cm), 地温(5cm, 10cm, 20cm, 80cm), 地表面熱収支4成分(Rn, H, IE, G)を示しており、降水時の熱収支および地温の変化や、土壌水分の増減が確認できる。またTable 2はボーエン比から算出した上向き方向の蒸発散量(負は凝結)を示しており、気温の日内変化が大きいため昼間に蒸発散し夜間に結露

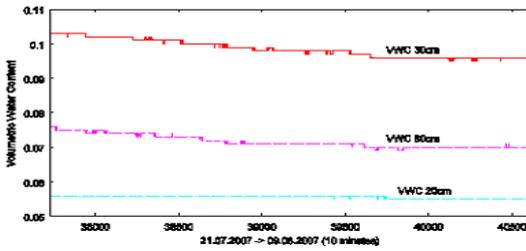


Fig. 11 Soil Moisture at 20cm, 30cm and 80cm depth for 20 days (from Jul 21st to Aug 9th)

Table 2 Evapotranspiration in the Kyzyl ke sek site

Period	Evapotranspiration(mm)
2007/7/31 daytime	2.327mm
2007/7/31 nighttime	-0.489
2007/8/1 daytime	2.402mm
2007/8/1 nighttime	-0.518mm
2007/8/2 daytime	2.711mm
2007/8/2 nighttime	-0.090mm
2007/8/3 daytime	2.372mm
2007/8/3 nighttime	-0.401mm
2007/8/4 daytime	2.347mm
2007/8/4 nighttime	-0.568mm

していることを示している。算出した蒸発散量は昼間で 2.3-2.4mm、夜間で -0.5mm 程度で、日積算では 1.8-1.9mm であった。なお降水が観測された 8 月 2 日は昼間が 2.711mm、夜間が -0.090mm、日積算で 2.621mm と蒸発散量が多かった。

一方 Fig. 11 は、7 月 21 日から 8 月 9 日までの 21 日間の土壌水分 (20cm, 30cm, 80cm) を示している。昼を午前 6 時から午後 7 時まで、夜を午後 7 時から午前 6 時までと定義している。7 月 21 日から降水が観測された 14 日目の 8 月 2 日時点までで、体積含水率 (VWC) が 0.006(20cm), 0.007(30cm), 0.001(80cm) 減少しており、推定される 10-110cm の土壌水分変動は 3-5mm (0.21-0.36mm/day), 200cm までとしても 4-6mm 程度である。これらはボーエン比から算出した蒸発散量の 20% 以下であり、観測地点周辺に存在するオアシスの影響を受けていると推測される。

4. 水文・気象データおよび衛星データ解析

現在キジルケシクにおいて蒸発散モデルの構築に向けたフラックス観測を行っているが、モデルをアラル海流域に適用するためには周辺の気象データを用いる必要がある。1991 年のソビエト連邦崩壊以前は全領域の気象・水文データは国家によってデータベース化されて多くはオープンにされていたが、それ以降は各共和国が管理しているため全域での取得が困難である。ウズベキスタンに関しては水文気象研究所から一部を購入しているが、長期のデータ

を購入することは困難である。

そこで現在入手している、長期気象データおよび衛星データを用いて解析を行った。気象データとしては CDIAC 提供の旧ソ連時代に観測された 223 地点のデータが使用でき、アラル海周辺域には 25 地点存在する。観測頻度は 1936-65 年が 6 時間毎、1966-90 年が 3 時間毎であり、降水量と気温のトレンドを解析した。衛星解析には NASA 提供の PAL (Pathfinder AVHRR Land data sets) の 10 days composite data を用いて、NDVI と地表面温度を作成し解析に用いた。

4.1 気温および降水量データ解析

アムダリア流域と周辺の 25 地点で得られた気温と降水量に関して、55 年間の長期解析 (1936-90) を行った。Fig. 12 に (a) 観測地点の標高と Digital Elevation Map, (b) 55 年平均の年降水量および一次近似でもとめた年降水量の増加トレンド, (c) 55 年平均の年平均気温および一次近似でもとめた平均気温の増加・減少トレンド, Fig. 13 に示す。現地研究者の間でも中央アジアの気温上昇が顕著であることが知られており、ここ 20 世紀の 100 年における気温上昇は 0.9-1.0 度、25 年で 0.4-0.5 度と認識されている。

降水量は全ての地点で増加しており、元々降水量の多い山岳域で高い増加傾向を示した。一方、年平均気温は Ashabad をのぞく 24 地点で増加を示し、特に標高が 2000m を超える Naryna とアムダリアデルタに位置する Cimbaji で増加率が最も高かった。同じく標高の高い Horog やシルダリア下流域に位置する Aralisk でも顕著な気温上昇が見られたことから、山岳域では積雪の減少が、アラル海に近い地域ではデルタ域の乾陸化がそれぞれ寄与していると考えられる。一方 Ashabad のみ気温の減少トレンドがみられ、特に 1960 年代、70 年代にその傾向が顕著である。乾燥地の気温は降水にも大きく左右され、また気象観測所のデータは周囲の地表面状態の影響を強く受けるために慎重な議論が必要だが、1960 年代から本格的に運用され Ashabad 周辺に多量の水を供給するカラクム運河との関連性が高いと思われる。

4.2 植生活性時期の早期化

本研究では NASA/DACC 提供の PAL (Pathfinder AVHRR Land data sets) の 10 days composite data を用いて、NDVI および地表面温度を作成し解析に用いた。解析期間は 1981-2001 年で、空間解像度は

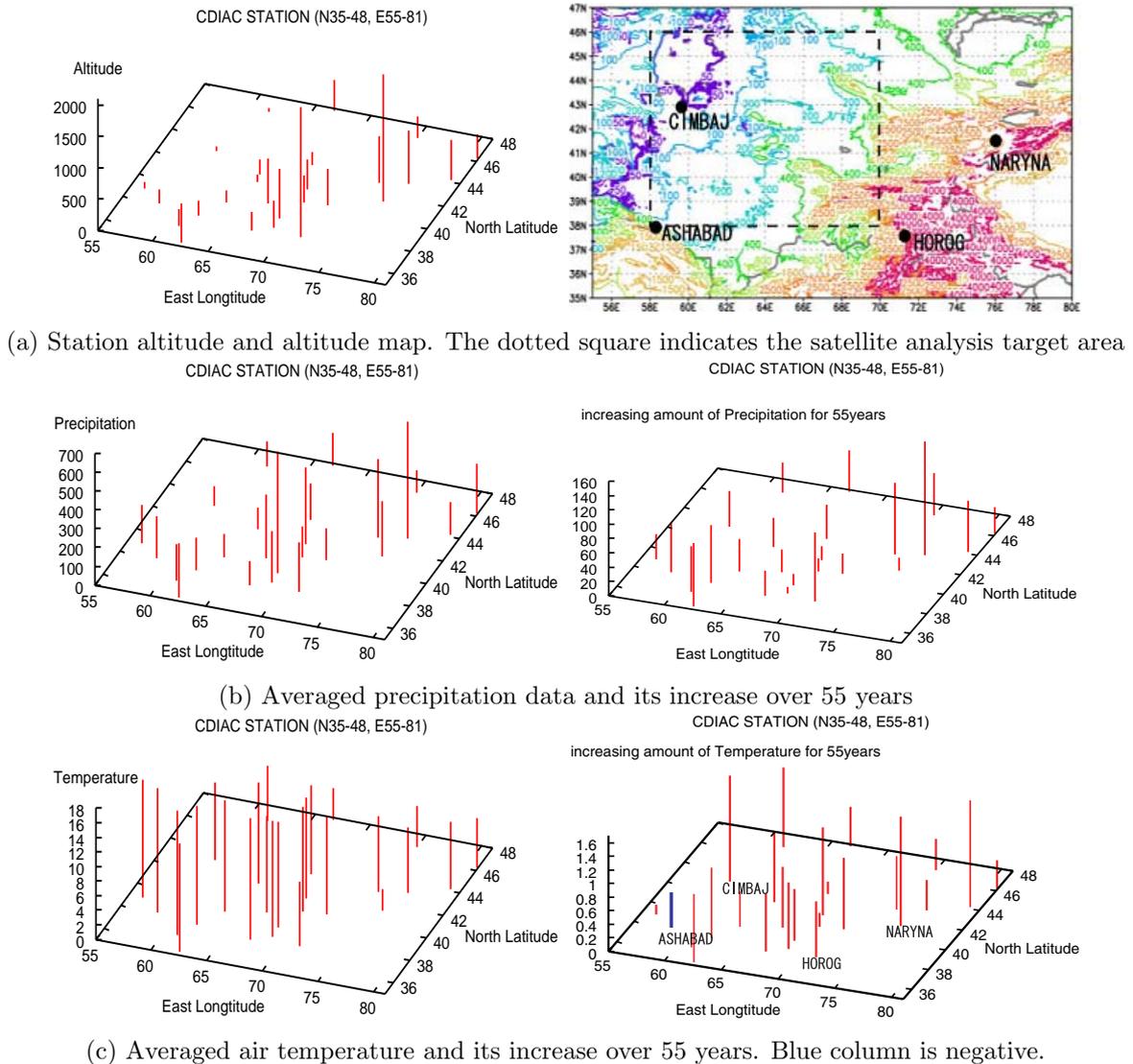


Fig. 12 Altitude map, averages, and increases at 25 stations over 55 years.

約 8km である。PAL を用いた土地被覆解析には多くの先行研究があるが、何れにおいてもセンサー劣化および orbit drift が定量的な解析にとって課題であることを指摘している (Myneni et al. 1997 参照)。本研究においても各年およびセンサーごとに領域内で NDVI 値が最も低い裸地と、最も高い森林を基準に簡易的な補正を行ったうえで地表面状態の変化を解析したが、空間解像度も粗いことから NDVI 値が顕著に変動している地域は検出できなかった。そこで経年変化に強い指標として PAL/NDVI の 30 日間移動平均値を用いて、1 年間で NDVI が最大になる時期を検出した。一部の山岳域を除き、対象流域の植生にとっては水が主な制限要因であり、降水量と蒸発散量の水収支バランスで決定され、利用出来る水が多い順に、森林、草原、灌木、裸地 (春期

のみ植生あり)、砂漠と分布する。したがって降水量の多い丘陵地帯には森林が、降水量は少ないが気温も低い高緯度の平地では草原が存在する。

Fig. 14 は 1982-1987, 1988-1993, 1995-2000 の 3 期間における各 6 年間の NDVI が最も大きな時期の分布を示している。解析対象領域は、Fig. 12 の上右図の点線部に相当する低平地である。図中の北西部に位置するアラル海は白で表しており植生のピークが無く、また 3 月以前のピークを示す薄い灰色はごく一部にしか存在しない。一方東部の山岳域から南に蛇行しながら北上しアラル海北部に流れ込むシルダリアと、南部のアフガニスタン国境から西北に進みアラルの南部に流れ込むアムダリア周辺では、河川水によって地下水が涵養されるために植生のピークが 7 月以降である (Fig. 14 では濃い黒

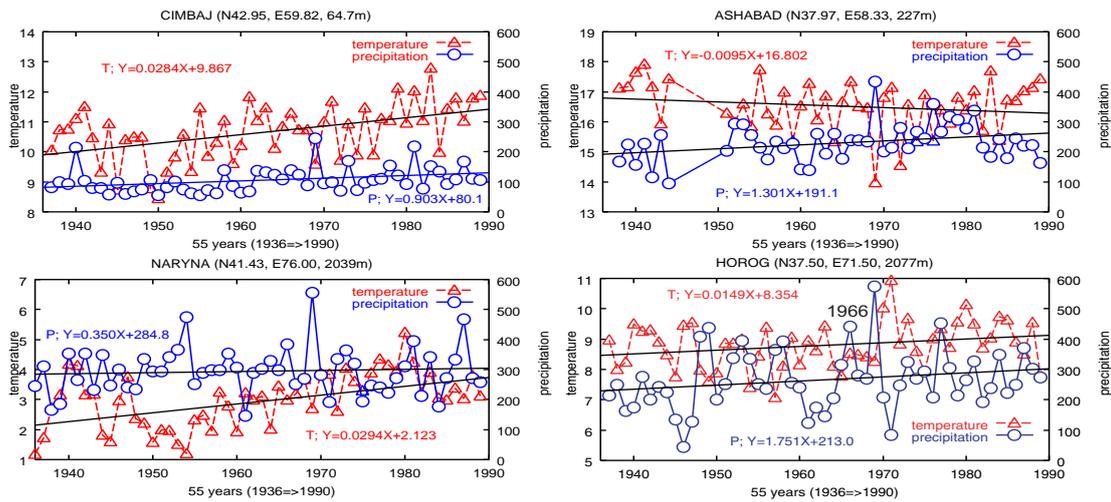


Fig. 13 Annual air temperature and precipitation data and trend over 55 years. Lowland region: Cimbaj and Ashabad; Mountainous region: Naryna and Horog.

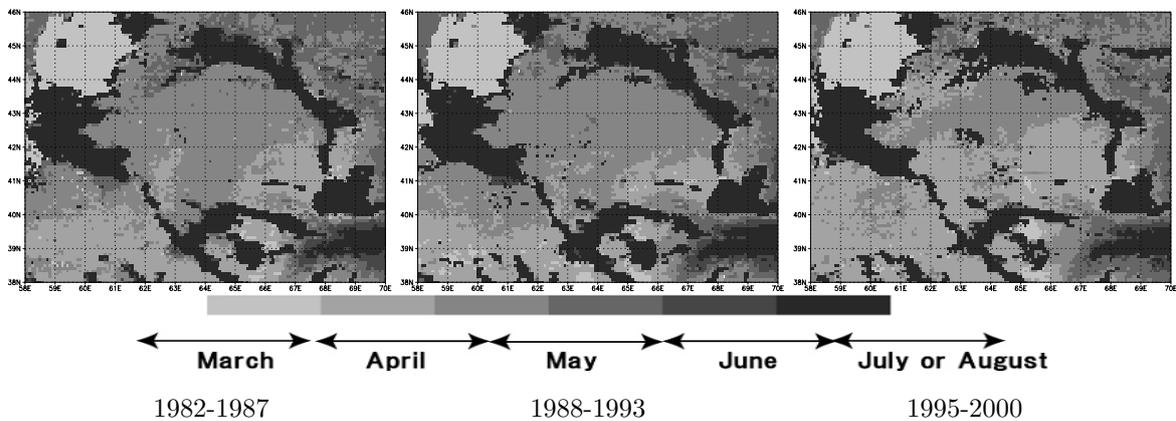


Fig. 14 Year-averaged maximum NDVI date using 30-days moving average. Each color indicates 20 or 21 days.

色で示す)。

自然植生では4月から5月にかけて植生の活性時期が見られ、6月を過ぎると1年草は種子を残して枯れ、多年草・木は気温が下がる秋まで気孔を閉じる。1982-1987 および 1988-1993 では北部が5月中下旬、中部(キジルクム砂漠)が4月下旬から5月上旬、南部が4月上中旬であるのに対して、1995-2000 ではアムダリア以南と両河川に挟まれたキジルクム砂漠の多くが以前より早い4月上中旬にピークを迎えている。砂漠でも気温の上昇傾向が見られることから、砂漠植生の活動時期が早期化していることが推測できる。例えば Spektorman (2002) によってもキジルクム砂漠の植生が劣化していることが指摘されていることから、今後は構築中の植生モデルを用いて気候変動下での植生の解析を行いたい。一方、農耕地に関しては顕著な変動を見ることが出来なかったことから、今後は高解像度の衛星データを

用いて解析を行う。

5. 結語

これまでの研究ではキルケシクにおいて地表面フラックス観測データの取得、植生調査を行い、さらにアラル海流域全域で長期の気象データ解析と衛星解析を行った。

観測データに関しては1年を超えるデータが蓄積されつつあることから、今後は同位体分析で得られた植生の蒸発散パラメータを用いながら、乾燥地植生の蒸発散モデルの構築を行う。2000年以降の植生変化に関してはMODISを用いた解析を行うほか、ALOS(だいち)の3センサーPALSAR, AVNIR-2, PRISMのデータも利用可能なことから、解析対象地域の植生・水文状態に関して詳細な解析を行いたい。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、貴重な助言を頂いたウズベキスタンサイエンスアカデミーの Kristina Toderich 博士に衷心より感謝いたしますとともに、ここに厚く御礼申し上げます。また乾燥地植生に関して様々なご助言を頂いた三重大学の松尾奈緒子講師および、気象観測にご助言を頂いた水資源環境研究センターの田中賢治准教授に紙面を借りまして深く感謝いたします。なおこの研究は JST/CREST 人口急増地域の持続的な流域水政策シナリオ (砂田憲吾代表) の支援を受けて行っており、その成果の一部である。

参考文献

- Kitamura, Y. et al.(2007). Water Problems in Central Asia, Journal of Disaster Research Vol.2 No.3, 134-142
- Kristina, T. et al. (2007). C3/C4 plants in the vegetation of Central Asia, geographical distribution and environmental adaptation in relation to climate, Climate Change and Terrestrial Carbon Sequestration in Central Asia, Taylor and Francis Ltd., pp. 33-64
- Kristina, T. et al. (2008). New approaches for biosaline agriculture development, management and conservation of sandy desert ecosystems, Biosaline Agriculture and High Salinity Tolerance. Birkhauser, 247-265.
- Ohmura, A. (1982): Objective criteria for rejecting data for bowen ratio flux calculations. Journal of Applied Meteorology, 21, 595-598.
- 近藤純正 (1994) : 水環境の気象学－地表面の水収支・熱収支－
- Myneni, R. B. et al. (1997). Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991. Nature, 386, 698-702.
- Spektorman, T.Yu. (2002). Methodology of climate change scenarios for Uzbekistan using ideal forecast concept. Bulletin 5. Tashkent, SANIGMI

Land Surface Observation in the Kyzyl Kum Desert of Central Asia

Osamu KOZAN, Satoru OISHI*, Kengo SUNADA* and Kaoru TAKARA

Interdisciplinary Graduate School of Medicine and Engineering, University of Yamanashi

Synopsis

The Kyzylkum desert is a typical desert area and has unique climate condition and ecosystems. There are small oases in this area and local people use them for crop irrigation. To understand the hydrological cycle is important for local people and sustainable farming, however there are not enough data for scientific analysis. In this paper, the land surface observation cooperated with local organization since November 2006 in Kyzylkum Desert is analyzed. Moreover, landcover and vegetation mapping using satellite remote sensing data analysis are introduced for large scale modeling.

Keywords : Kyzylkum Desert, ICBA, Salt Damage, NDVI, Warm Temperature Trend