

筑波大学

陸域環境研究センター報告

第7号 別冊No.2

2006

---

---

北東アジア植生変遷域における大気・水・生態プロセスと

その相互作用に関するワークショップ

(略称：モンゴル植生変遷域ワークショップ)

プロシーディング

2007年1月25日～26日

---

---

筑波大学陸域環境研究センター

2007年2月

北東アジア植生変遷域における大気・水・生態プロセスと  
その相互作用に関するワークショップ  
(略称：モンゴル植生変遷域ワークショップ)  
プロシーディング

2007年1月25日～26日

組織委員会：田中 正 山中 勤 浅沼 順  
(筑波大学陸域環境研究センター)  
岩崎博之 (群馬大学教育学部)  
佐藤友徳 (東大CCSR)  
辻村真貴 (筑波大学生命環境科学研究科)

Copyright © 2007 筑波大学陸域環境研究センター

All rights reserved

## はじめに

「北東アジア植生変遷域における大気・水・生態プロセスとその相互作用に関するワークショップ」（略称：モンゴル植生変遷域ワークショップ）が平成19年1月25、26日の2日間にわたり、当陸域環境研究センターの主催で開催された。このワークショップは、モンゴルを中心として活動する大気科学、水文学、生態学、リモートセンシングなどの分野の研究者間の議論の場として企画され、当日は、計30件の研究発表に加えて、全国から約80名あまりの参加者があった。本陸域環境研究センターを含む筑波大学を中心とするグループは、2001年より科学技術振興機構の予算によって、RAISE (Rangeland Atmosphere-Hydrosphere-Biosphere Interaction Study Experiment in Northeastern Asia) プロジェクトを推進して来た。今回、このRAISEの5年間にわたる研究成果と参加者それぞれの長年の研究成果をもとに、今後の研究の方向性などについて熱心な議論を交わすことができた。特に自然科学の研究者にとどまらず、社会科学の研究者やNGO、NPOなどで活動する方々からも、幅広い参加者があり、ワークショップは盛況のうちに終わった。

近年、モンゴルを中心とする地域では、多くの研究者やNGO、NPOなどが環境研究や社会活動に従事しており、多岐にわたるグループ間の情報・知識や問題意識の相互交換、そして日本からの研究成果の海外への発信が必要であることが、ワークショップの参加者の共通の認識であったと言えよう。ほぼ1年前には、今回の参加者の一人である吉良龍夫 琵琶湖・環境科学研究センター顧問を会長として、モンゴル・エコフォーラムが設立され、そのような交流の場の一つを提供しており、本ワークショップも有意義な交流の機会を提供できたと考えられる。

折しも、このワークショップの翌週には、日本とモンゴルの環境政策担当者が東京で第1回日本・モンゴル環境政策対話を開催し、今後の両国間の環境協力を継続していくことで合意した。我が国によるモンゴルの環境問題への貢献の今後のさらなる発展を期待したい。

筑波大学陸域環境研究センター  
センター長 田中正

「北東アジア植生変遷域における大気・水・生態プロセスとその相互作用に関するワークショップ」組織委員会

筑波大学陸域環境研究センター	田中正
同	浅沼順
同	山中勤
群馬大学教育学部	岩崎博之
筑波大学生命環境科学研究科	辻村真貴
東京大学気候システム研究センター・学術振興会	佐藤友徳

## 目次

はじめに	.....	i
<u>セッション1 水・熱・物質輸送 I</u>		
北東アジアの地表面条件と風送ダストの発生について	..... 三上 正男	1
Quantitative Hydrogeological Study of an Unconfined Aquifer by GPR along Tuul River in Ulaanbaatar	..... Lu Qi	3
モンゴル半乾燥草原における土壌水収支とその植生による制御	..... 山中 勤	7
モンゴル半乾燥ステップにおける物質生産に及ぼす C3・C4 植物の寄与	..... 浦野 忠朗	9
<u>セッション2 生態系と遊牧活動</u>		
北東アジア乾燥地における持続的農牧システムの開発	..... 鳥山 和伸	11
モンゴル国における集約的畜産の動向	..... 小宮山 博	13
<u>セッション3 植生・土壌の衛星リモートセンシング</u>		
モンゴルにおける植生活動度の1ヶ月前予測の可能性	..... 岩崎 博之	15
モンゴル国の広域植生変動 - 市場経済化の前後で	..... 平野 聡	17
衛星リモートセンシングによる東アジアの植生変動推定	..... 小柳 智和	19
衛星データを用いた中国内モンゴル及びその周辺地域の土地被覆変動解析	..... 額尔 德尼	21
リモートセンシングと熱収支法の併用による広域表層土壌水分推定法の検証	..... 松島 大	25
衛星地上統合観測によるモンゴル高原-中国北部における 土壌水分・地表面状況の時空間変動解析の研究 -AMSR-E (AQUA) /ALOS/MIRAS(SMOS)/GCOM-W の地上検証実験プロジェクトへ向けて-	..... 開発 一郎	27
ALOS/PALSAR を用いたモンゴル環境計測	..... 草野 駿一	30
<u>セッション4 社会活動</u>		
昨今のモンゴル事情について	..... 原田 幸希	34
<u>セッション5 北東アジアの気候システム</u>		
世界の乾燥地から見たモンゴルの気候 - 生態システム: その研究の潮流と展望	..... 篠田 雅人	37
モンゴルの土地被覆変化による気候応答の研究	..... 佐藤 友徳	39
北東アジア-シベリア間の夏季降水量振動モードとロスビー波	..... 岩尾 航希	43

モンゴルの降水気候学 --- 降水の季節進行と日変化--- ..... 岩崎 博之 ... 47

セッション6 水・熱・物質輸送2

モンゴル草原における大口径シンチロメータによる広域顕熱フラックスの観測・浅沼 順 ... 49

モンゴル半乾燥草原における草本-大気間の CO<sub>2</sub> 交換 ..... 中野 智子 ... 51

モンゴル草原における地表面熱輸送の特徴 ..... 小谷 亜由美 ... 54

モンゴル・トール川上流域の南北森林-草原斜面での蒸発散量変化 ..... 飯島 慈裕 ... 56

# 北東アジアの地表面条件と風送ダストの発生について

気象庁気象研究所環境・応用気象研究部 三上正男

## 1. はじめに

近年気候因子のひとつとして注目されている大気中に浮遊する鉱物質ダストは、ある風速を超えたとき（臨界風速）に発生し、その発生量は地表面土壌粒径分布、土壌水分量などによって大きく左右される。モンゴルは、広大な砂漠を抱えると共に地表面条件の年々・季節変動が大きい半乾燥域を抱えている東アジアの主要なダスト発生域のひとつである。本論では、マクロに見た地表面条件とダスト発生について、地上気象データおよび衛星データを元に、ダスト発生の季節変化の地域特性、およびそれをコントロールする地表面条件（植生、積雪被覆率）について議論を行う。

## 2. モンゴルのダストクライマトロジー

モンゴルのダストストームの気候学的特徴は、モンゴル気象水文研究所のNatsagdorjらによって体系的にまとめられている（図1）。

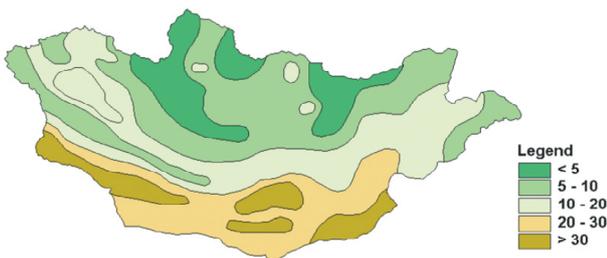


図1 モンゴルにおける年平均ダストストーム発生頻度 (Natsagdorj et al., 2003 を引用)

これによれば、ダストストームはモンゴル南部に集中し、北部に行くに従い頻度は減少している。季節変化は4月が最も頻度が多く次いで5月、3月の順となっていて、11月にも弱いピークがある。季節変化は、東アジア地区の変化とよく似ている (Kurosaki and Mikami, 2003)。また年間

発生数は、1960年代から1990年にかけて増加傾向を示しているが、その後減少に転じている。

## 3. 黄砂発生と地表面条件

一般に、ダストは強風に伴い発生することが知られている。ダストは、粒径100 $\mu$ m前後の砂粒がまず強風により飛散し、それが地表面に衝突した際に、地表面の粒径およそ10 $\mu$ m以下のダスト粒子を舞い上がらせるメカニズムが知られている。この際、砂粒が舞い上がる摩擦速度を臨界摩擦速度と呼び、飛砂飛散の最も重要なパラメーターである。飛散フラックスの量や粒径分布は地表面土壌粒径分布に大きく依存する (Mikami et al., 2005)。また、この臨界値は、土壌水分や植生などの地表面条件に大きく依存すると共に、それらは粒径依存性を持っている (Ishizuka et al., 2006)。

## 4. モンゴルの黄砂と地表面条件

図2は、東アジア各地気象台の地上気象データを元に描いた1988～2004年平均の月別ダスト発生頻度と強風 (>6.5m/s) 発生頻度である (Kurosaki and Mikami, 2005)。

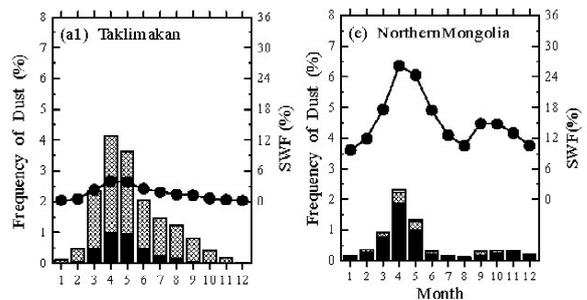


図2 タクラマカン砂漠とモンゴルの月別平均ダスト発生頻度と強風発生頻度。

これによれば、タクラマカン砂漠では強風とダストの発生共に春季にピークを持つ分布を示すが、モンゴルでは秋季にも弱いピークがある。全観測回数の内 5%でダストが発生しはじめる速度を臨界風速として、その季節変化を見ると（図3の一番下-●-のグラフ）、タクラマカン砂漠では季節変化が少なく一年を通じて低い値（舞い上がりやすい）を示すのに対し、モンゴルでは、4月から8月にかけて増加し、また秋に減少した後、再び冬季に高い値を示している（Kurosaki and Mikami, 2005）。

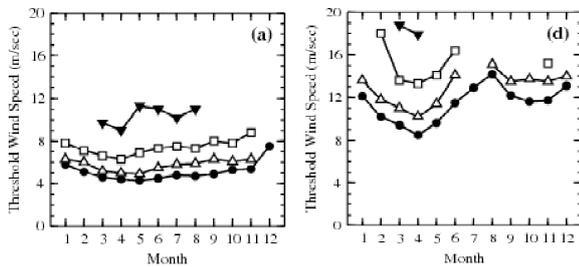


図3 タクラマカン砂漠とモンゴル北部の月別平均ダスト発生臨界速度。

この理由を調べるため、季節毎のダスト発生頻度分布を NDVI 分布図及び SSM/I の積雪被覆分布図と対比させてみた（図略）。その結果春季にはモンゴルでもタクラマカン砂漠と同様ダストの発生は広範囲に見られるが、夏季 NDVI が大きくなるとともにダストの発生は見られなくなり、また冬季にモンゴルの草地域が積雪に覆われている時期はダストの発生が無いことがわかった（黒崎、三上, 2003, Kurosaki and Mikami, 2004）。上記の臨界風速値の変化は、こうしたモンゴルの地表条件の変化を反映したものだと考えられる。

## 5. まとめと今後の展望

モンゴルは、半乾燥域を広く抱え、気候の年々変動に敏感な場所であると共に、過放牧などによる土地の疲弊に伴う人為起源ダストの発生域でもある。モンゴルを発生域とするダストは、東アジアの大気環境のひとつの重要因子であり、自然起源と人為起源双方の原因によるダスト発生過程の解明は、東アジアの黄砂予防対策や大気環境

解明さらには東アジア気候システムの理解を進める上で重要な課題のひとつである。今後、モンゴルを対象とする研究推進が必要である。

## 謝辞

本研究は、科学技術振興調整費「風送ダストの大気中への供給量評価と気候への影響」による ADEC プロジェクト(代表:三上)、および科学研究費補助金(基盤 C、代表:三上)の研究成果である。

**キーワード** : 黄砂、風送ダスト、風成土壌浸食、ダストストーム

## 参考文献

- Ishizuka, M., Mikami, M., Yamada, Y., Zeng, F., and Gao, W., 2005. An observational study of soil moisture effects on wind erosion at a gobi site in the Taklimakan Desert. *J. Geophys. Res.*, 110, D18S03, doi:10.1029/2004JD004709.
- 黒崎泰典, 三上正男, 2003: 東アジアにおける近年のダスト多発現象とその原因, *地球環境*, 7, 233-242.
- Kurosaki, Y. and M. Mikami, 2003: Resent frequent dust event and their relation to surface wind in East Asia, *Geophysical Res. Letters*, 30(14), 1736. doi:10.1029/2002GL015656l.
- Kurosaki, Y. and M. Mikami, 2004: Effect of snow cover on threshold wind velocity of dust outbreak, *Geophysical Res. Letters*, 31, L03106, doi:10.1029/2003GL018632.
- Kurosaki, Y. and M. Mikami, 2005: Regional Difference in the Characteristic of Dust Event in East Asia: Relationship among Dust Outbreak, Surface Wind, and Land Surface Condition, *J. Met. Soc. Japan*, 83A, 1-18.
- Mikami, M., Yamada, Y., Ishizuka, M., Ishimaru, T., Gao, W., and Zeng, F., 2005a. Measurement of saltation process over gobi and sand dunes in the Taklimakan desert, China, with newly developed sand particle counter. *J. Geophys. Res.* 110, D18S02, doi:10.1029/2004JD004688.
- Natsagdorj, L., D.Jugder, and Y.S. Chung, 2003: Analysis of dust storms observed in Mongolia during 1937-1999, *Atmo. Envi.*, 37, 1401-1411.

# Quantitative Hydrogeological Study of an Unconfined Aquifer by GPR along Tuul River in Ulaanbaatar

Qi Lu and Motoyuki Sato

Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University

lu@cneas.tohoku.ac.jp; sato@cneas.tohoku.ac.jp

## Introduction

To assess the potential of ground penetrating radar (GPR) for detecting and monitoring groundwater movement and for estimating the hydraulic properties of an aquifer, we conducted GPR surveys at a water source area of Ulaanbaatar city.

Ulaanbaatar, the capital of Mongolia, is the country's center of industry and commerce, and has experienced significant population growth in the last decade. Ulaanbaatar city is characterized by a semi-arid climate, with a hot, dry summer and a cold winter. The average annual rainfall of Ulaanbaatar station is calculated to be 243.1 mm, with nearly 74 percent of the annual precipitation falling between June and August (JICA, 1995). Water supply of Ulaanbaatar city depends solely on groundwater withdrawn from an alluvial aquifer, distributed in the Tuul River basin, which is mainly located in the southern part of the city. The water is supplied from water production wells. With the increase of population and economic development, Ulaanbaatar city is facing water shortage. Therefore, assessing the groundwater production from a well and its production capacity has become very important. However, if the groundwater level change around the production well can be observed by GPR, it will provide much more information about the aquifers. The groundwater level in the Ulaanbaatar city area is between 2 – 10 m, and the GPR technique is suitable for detecting this relatively shallow aquifer.

Field GPR surveys in Ulaanbaatar have been carried out regularly since 1997. In the investigation described in this paper, we conducted field experiments in Ulaanbaatar in October 2001 and April 2002. By controlling the water production we used GPR for detecting the change of groundwater conditions around the well. This paper focuses on the practical use of GPR for groundwater monitoring, and tries to quantify the groundwater level change and to estimate the hydraulic properties by assuming a model of the aquifer system.

## GPR Survey

The field GPR surveys were carried out around production well No.10 in the western site in the Central Water Source area shown in Figure 1. The

Central Water Source area is around Ulaanbaatar city between the upstream and downstream basin areas. There are 70 production wells managed by USAG (Water Facilities Exploitation Department of Ulaanbaatar Municipality) in the Central Water Source. Well No.10 was drilled in 1961 with an inner radius of 0.2 m and a depth of 30.7 m. The pump and the well are located in a brick pump house and the survey lines were taken around the pump house beginning from the wall of the pump house in the directions indicated in Figure 2.

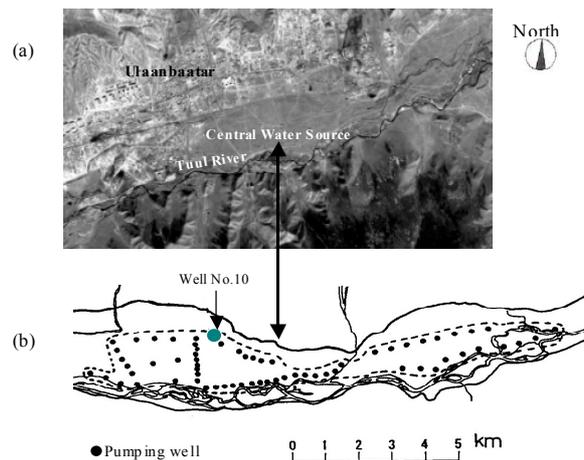


Figure 1. Central Water Source and pumping well No.10. (a) 1990 SPOT PAN image of Ulaanbaatar area. (b) Pumping well distribution at the Central Water Source area (JICA, 1995).

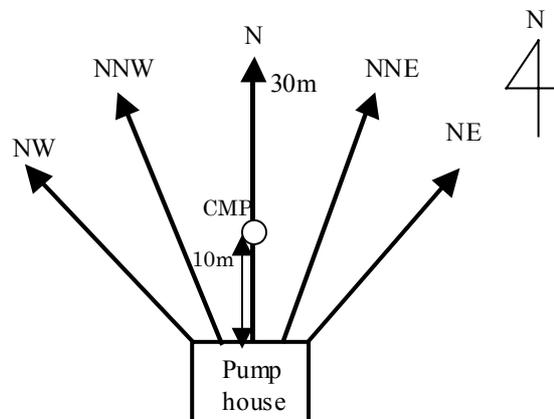


Figure 2. GPR survey lines around the pump house of well No.10.

The first experiment was carried out during 4 and 5 October 2001. The pump was stopped on 4 October

when the groundwater level reached 6.45 m as measured in the well. After about 1000 minutes, on 5 October, the groundwater level was restored to 5.8 m. The groundwater level was continuously measured in the well for 3.5 hours, and it stayed at 5.8 m. From that fact, we suppose the groundwater level recovered to its quasi-steady condition. Before the pump was stopped and when the groundwater was in its static condition, GPR measurements were conducted repeatedly. CMP data were also acquired during the pumping test, which began from the midpoint at the position of 10 m with a first offset of 20 cm, and increased in a 0.1 m step to a maximum of 10 m. We show GPR data (CMP) acquired along line N here.

CMP gathers showed in Figure 3a were acquired during pumping, i.e., the groundwater level in the well was 6.45 m. Figure 4a shows the CMP gathers collected after recovery, that is, when the water level in the well was 5.8 m. Figure 3b and Figure 4b show the velocity spectrum (Yilmaz, 1987) which were derived from the data in Figure 3a and Figure 4a. The velocity differences produced by different water level depths can be seen around 65 ns in the two figures. The difference between the relative dielectric constant of liquid water ( $\epsilon_{r,w} \approx 81$ ) and those of most rock matrix materials ( $\epsilon_{r,g} = 3-5$ ) is large. Accordingly, it is known that the dielectric constant of most geological materials is governed by their water content. When the relative dielectric constant of the soil is  $\epsilon_r$ , EM wave velocity (Davis and Annan, 1989) in the soil is given by

$$v = c / \sqrt{\epsilon_r} \quad (1)$$

where  $c$  is the velocity of light in air. Therefore, the travel time from a boundary at the depth  $d$  is given by

$$\tau = \frac{2d}{v} = \frac{2d\sqrt{\epsilon_r}}{c} \quad (2)$$

The velocity obtained from the velocity spectrum is the normal moveout (NMO) velocity, approximately the same as the rms velocity assuming the medium is homogeneous from the surface to the boundary, when the subsurface consists of multiple horizontal layers. Therefore, in order to estimate the relative dielectric constant of each layer, the rms velocities have to be corrected to interval velocities. The average interval velocity of the  $n$ -th layer can be calculated using the Dix formula (Dix, 1955)

$$V_n^2 = \frac{V_{RMS,n}^2 t(0)_n - V_{RMS,n-1}^2 t(0)_{n-1}}{t(0)_n - t(0)_{n-1}} \quad (3)$$

where  $V_{RMS,n}$  and  $t(0)_n$  denote the rms velocity and vertical reflection travel time to the  $n$ -th layer. The relative dielectric constant can be obtained by equation (1) using the interval velocities, and the depth of each layer can be obtained by equation (2).

Generally, the water content  $\theta$ , porosity  $\psi$  and

water saturation  $S_w$  are related as  $\theta = \psi S_w$ . Several cases showing the relationship between the dielectric constant and properties of  $\theta$ ,  $\psi$  and  $S_w$  have been reviewed by Sen et al. (1981) and Shen et al. (1985). However, it is impossible in practice to derive both porosity  $\psi$  and water content  $\theta$  independently from the dielectric constant. An empirical equation derived by Topp et al. (1980) using various soil samples with different degrees of saturation showing the relation between the dielectric constant and water content is given as

$$\theta = -0.0503 + 0.0292\epsilon_r - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_r^3 \quad (4)$$

By using the interval velocities, we can obtain the water content of the soil at each depth through equations (1), (2) and (4). The water content was calculated by using CMP data shown in Figure 4a. The rms velocities were extracted from the velocity spectrum. The water table was defined as 5.53 m (after topographic correction). The water content (Figure 4c) varied from 6.8% to 8.9% in the vadose zone. It is 31.87% if we use one layer velocity model (suppose only one layer below water level) and 32.8% and 31.5% if two-layer model was applied (suppose two layers below water level) in the saturated zone.

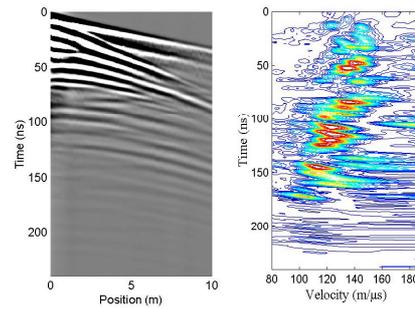


Figure 3 CMP gathers acquired along line N (midpoint = 10 m) during pumping (water level in the well was 6.45 m) in October 2001. (a) CMP gathers. (b) Velocity spectrum obtained from (a).

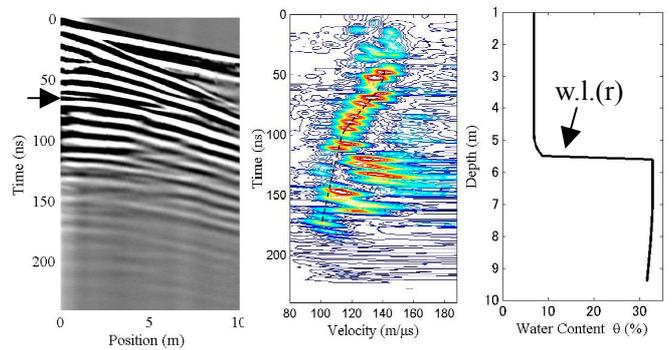


Figure 4 CMP gathers acquired along line N (midpoint = 10 m) when groundwater level after recovery (water level in the well was 5.8 m) in October 2001. (a) CMP gathers. (b) Velocity Spectrum obtained from (a). (c) Water Content.

The second experiment was carried out in April 2002. This experiment differed from the earlier one (Lu and Sato, 2002) in that it used a longer survey line

(30 m instead of 15 m). In this experiment, we controlled the well production for three steps. In the first step, the water level in the well was 8.25 m when the well production was in full-working condition. The well production was then reduced by half; after about 1000 minutes, the water level in the well was restored to 8 m. At last, the water level was restored to 7.73 m after the well production was stopped for about 1000 minutes, and it stayed at 7.73 m for several hours. The flow is considered to approach a quasi-steady state in which no significant additional water level change was observed in the well. During the three periods, GPR surveys were conducted repeatedly.

Figure 5 shows the common offset profiles which were acquired along the survey line N when the well production was in the different condition. Figures 5a and 5b look very similar. The horizontal reflections can be observed at around 100-110ns in the two profiles but the reflection strength is different. The residual profile, Figure 5c shows the difference between Figure 5a and 5b. In Figure 5c, the horizontal reflection appears at around 110 ns. This difference is caused by the water level change. It shows a good correspondence with the water level observed in the pumping well. In Figure 5c, the horizontal reflections appear from position  $x=0\text{m}$  (+3m offset, the distance from the pumping well to the starting point of the survey line) to about  $x=23\text{m}$  (+3m offset). After  $x=23\text{m}$  (+3m offset), the horizontal reflections are very weak and we estimate the water level almost did not change.

In the Central area the alluvial aquifer was developed and used for the water supply system of Ulaanbaatar. The previous study by PIINS (1977) estimated hydraulic conductivity of the aquifer. Hydraulic conductivity of the upper layer (range 10 m to 20 m) varied from 0.122 cm/s to 0.285 cm/s and averaged 0.179 cm/s. A model of the aquifer system should be assumed if we want to estimate the hydraulic properties of the aquifer.

Steady-state conditions of hydraulics of wells in unconfined aquifers are described by Fetter (2001). If a well is pumped for a long period, the water level may reach a state of equilibrium; that is, there is no further drawdown with time. The region around the pumping well where the head has been lowered is known as the cone of depression. When equilibrium has been achieved, the cone of depression stops growing because it has reached a source where the recharge rate equals pumpage. These are also known as steady-state conditions.

Figure 6 shows a well that is penetrating an unconfined aquifer [11]. In the case of steady radial flow in an unconfined aquifer, the assumptions are needed that the well is pumped at a constant rate and equilibrium has been reached. For such a system, Theim (1906) derived an equation for steady radial flow in an unconfined aquifer,

$$K = \frac{Q}{\pi(b_2^2 - b_1^2)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (4)$$

Where  $K$  is the hydraulic conductivity,  $Q$  is the pumping rate, and  $b_1$  and  $b_2$  are the saturated thicknesses at distance  $r_1$  and  $r_2$  from the pumping well.

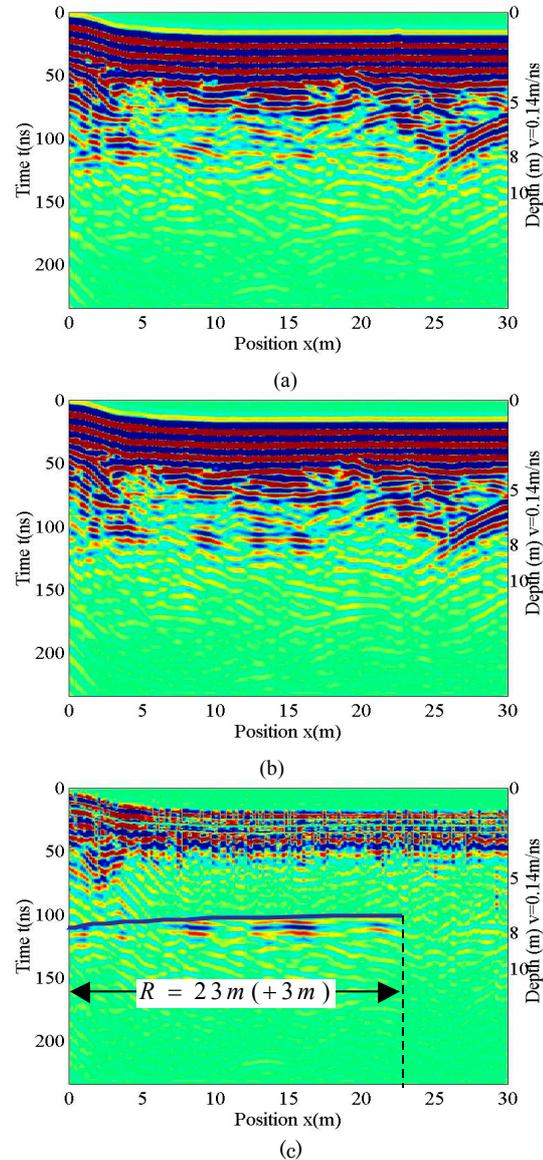


Figure 5. Common offset profiles along the survey line N in April 2002. (a) The well was in full-working condition (water level in the well was 8.25m). (b) The well production was stopped for 1000 minutes (water level in the well was 7.73m). (c) Residual profile of (a) and (b);  $R=26\text{m}$ , is the radius of influence of the well.

In our case, before the pumping operation of No.10 well was stopped, it had been pumped continuously for a long time for the Ulaanbaatar city water supply. The well was pumped at a constant rate of  $75.5\text{ m}^3/h$ . The water table in the well was 8.25m. In this instance, we assumed the pump had a steady radial flow in an unconfined aquifer with the assumptions described in the previous section.

Figure 5c, the residual profile shows that the horizontal reflection at around 110ns represents the water level change. The horizontal reflection appears from  $x = 0$  m (+3 m offset) to  $x = 23$  m (+3 m offset). We estimate this distance represents the radius of influence of the well, that is, the drawdown can not be observed and the water table is 7.73m at this position. CMP analysis defined the water table at 8m at  $x=15$ m (+3m offset) when the well production was in the full-working condition. The electrical survey reveals the aquifer thickness to be 54m. The radius of the well No.10 (used as  $r_1$ ) is 0.2m. Combining the parameters obtained from GPR data with the hydrogeologic data, the hydraulic conductivity can be estimated by equation (4). The estimated hydraulic conductivities are 0.01cm/s, 0.0623cm/s and 0.131cm/s, the average is 0.068cm/s.

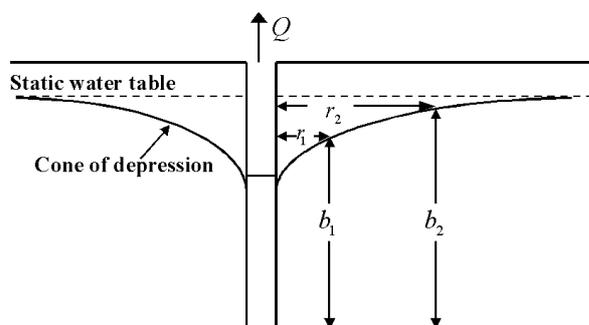


Figure 6. A well in an unconfined aquifer.

## Discussion

The model of the aquifer system used in this study to estimate the hydraulic properties combined the GPR data is an ideal model, not a realistic depiction. The major advantages of using this ideal model are that (a) the required inputs are simple, since the model does not require detailed information with hydrogeological structure; and (b) the formulation is easy to compute.

However, this model has some problems. First, because the model of the aquifer system is an ideal model, it is defined using the radially symmetric, horizontal, steady flow. But the correlation is weak between the ideal model and an actual aquifer system. This may account for some of the uncertainties in the results. Additionally, the radius of influence of the well was defined as 26 m, which means the water table depth at this position should be the same as in the well (7.73 m) in the steady-state condition. There are some possible explanations for why the water level change extended that far in Figure 5c: (1) the water level change was very small beyond that distance; (2) it might be visible beyond that distance but the length of the survey line limited it.

## Conclusions

To further examine the potential applicability of GPR to hydrogeological applications, we performed GPR surveys by controlling the pumping operation. The GPR technique successfully yielded quantitative

information about water level change, and the hydraulic properties could be estimated by combining GPR data and hydrogeologic data.

The results of this study indicate that in this case useful information can be derived from the combination of the common-offset data and the CMP data. The groundwater level change could be quantitatively estimated by comparing the two sets of GPR data acquired under different conditions. The CMP data and velocity analysis provide information on locating the water table. A hydraulic model of the aquifer has been proposed in this study to relate the GPR data to hydraulic properties. Combining GPR data with hydraulic data, the estimation of hydraulic properties showed encouraging results. Quantitative information extracted from the GPR data made GPR a good tool for estimating the hydraulic properties of the aquifer.

## Acknowledgment

This work was partly supported by JSPS, Grant-in-Aid for Scientific Research (A) (2) 14252014. We acknowledge Water Supply and Sewerage System Co. of Ulaanbaatar City, for the permission of the use of the well for the experiments, in particular thanks to Mr. G. Ganbaatar and Ms. Z. Yanjindulam.

## References

- [1] Davis, J.L. and Annan, A.P. (1989): Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy: *Geophys. Prosp.*, 37, 531-552.
- [2] Dix, C.H. (1955): Seismic velocities from surface measurements: *Geophysics*, 20, 68-86.
- [3] JICA (Japan International Cooperation Agency) (1995): The study on water supply system in Ulaanbaatar and surroundings, final report.
- [4] Lu, Q. and Sato, M. (1995): Groundwater monitoring by GPR in Mongolia, 9<sup>th</sup> International Conf. on Ground Penetrating Radar, Santa Barbara, U.S.A., pp.545-550, April 2002.
- [5] PIINS (Production & Reserch Institute for Engineering Construction Survey) (1977): Investigation of water supply near the Ulaanbaatar area.
- [6] Fetter, C.W. (2001): *Applied hydrogeology*, 4<sup>th</sup> ed., Prentice-Hall, Inc, pp.166-169.
- [7] Sen, P.N., Scala, C., and Cohen, M.H., 1981, A self-similar model for sedimentary rocks with application to the dielectric constant of fused glass beads: *Geophysics*, 46, 781-795.
- [8] Shen, L.C., Savre, W.C., Price, J.M., and Athavale, K., 1985, Dielectric properties of reservoir rocks at ultra-high frequencies: *Geophysics*, 50, 692-704.
- [9] Thiern, G. (1906): *Hydrologic Methods*, Gebhardt.

# モンゴル半乾燥草原における土壤水収支と その植生による制御

筑波大学陸域環境研究センター 山中 勤

広島大学総合科学研究科 開発一郎

モンゴル国気象水文研究所 (IMH) D. Oyunbaatar and T. Ganbold

## 1. はじめに

バイオームの境界領域、すなわちエコトーン（植生移行帯）は、温暖化等の気候変動に対して脆弱であるとされており、北方のシベリアタイガ林と南方のゴビ砂漠に挟まれたモンゴル半乾燥草原はまさにその典型例の一つである。また、この地域では過放牧等の人為的影響による砂漠化の危険性もはらんでいる。モンゴルの国土は概ね3つの大流域に区分されるが、中でも半乾燥草原地域の過半を占める中央アジア内陸流域（図1）では、気候変動や人為的影響による水収支の変化が水資源の変動・枯渇に直結する可能性があり、こうした地域での水収支、特に土壤水収支を正確に把握することは重要である。そこで本研究では、土壤水を中心とした水循環の現状を把握することを目的として現地でモニタリング調査を実施した。なお、研究成果の一部はYamanaka et al. (2007) が既に公表している。

## 2. 研究方法

ADEOS II Mongolian Plateau Experiment for ground truth (AMPEX)プロジェクトの一環として、図1に示す4地点に置いて気象・土壤水文観測を実施した。本研究では、良質なデータが得られた2001年7月～9月の夏季3ヶ月間を対象として水・熱収支の算定を行った。この期間の降水量は年降水量の70-90%を占め、これ以外の月降水量は平均でたかだか3mmに過ぎない。したがって、夏季3ヶ月以外の期間では（特殊なケースを除い

て）水循環はほぼ停止していると考えて差し支えない。

土壤水収支の評価にあたっては、まず地表面熱収支の残差から蒸発量（潜熱フラックス）を求め、つぎに地表面水収支の残差として浸透フラックスを算出した。また、独立した手法（TDR 土壤水分計）で土壤水分貯留量を求め、その変化と積算浸透フラックスとを比較した。

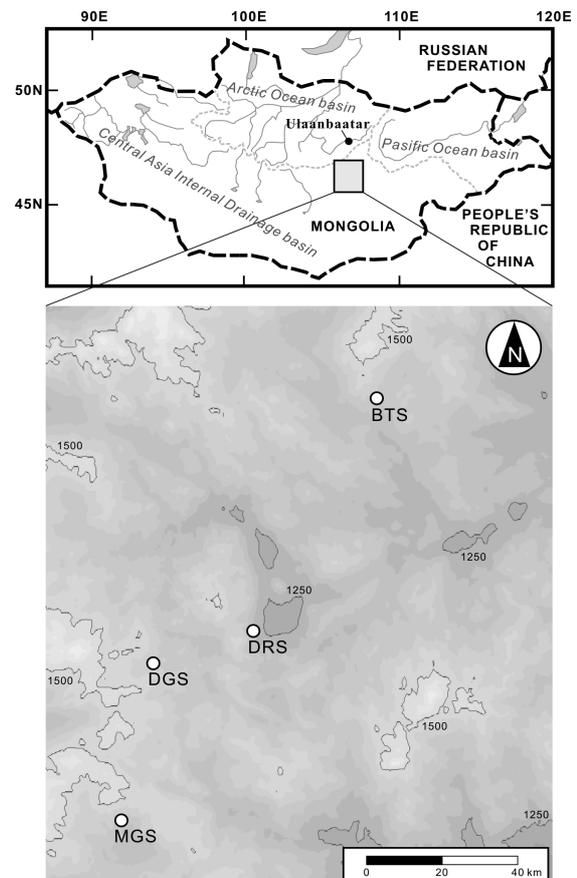


図1 試験地概要

### 3. 結果

4つの試験地全てにおいて、積算蒸発散量は積算降水量にほぼ等しかった。また、積算浸透量の時間変化は表層20cmの土壤水分貯留量変化とほぼ一致した。すなわち、本地域に降水として持たされた水は20cm以深の土壤層には降下浸透せず、蒸発散により速やかに大気へと戻ってゆくことが分かる。また、深層土壤水は水循環（大気-地表面間の水交換）にはほとんど関与しないと言える。ここで、表層20cmの土壤水の平均滞留時間を試算してみると、およそ20~26日という結果が得られ、大気-地表面間の水交換が1ヶ月に満たない時間スケールで進行していることが分かる。一方で、深層土壤水の滞留時間は無限大に近いと考えられ、非循環的で枯渇する危険性の高い水資源であると言える。

熱収支の算定結果を見てみると、顕熱フラックスがもっとも卓越し、正味放射量  $R_n$  の73%を占める。一方、地中熱流量は  $R_n$  の6%に過ぎない。また、潜熱フラックスは  $R_n$  の21%を占めるが、ある程度の規模の降雨イベント直後のみ顕熱を上回る。潜熱フラックスと表層土壤水分量（深度3cm）の経時変化は極めて相似的であり、蒸発量が土壤水分条件に強く依存していることを物語っている。注目すべきは、日単位の潜熱フラックスと正味放射量の間に関連関係がほとんど認められない点である。つまり、モンゴル南部ステップ草原における蒸発散量の日々変化は表層土壤水分条件によってのみコントロールされており、大気条件（特に放射条件）は日周期や年周期の変動にしか関与しないと言える。

ここで、各地点における土壤水分量の変化に対する蒸発散量変化の割合（両者間の回帰直線の傾き）と植被率の関係を調べたところ、正の相関（相関係数=0.96）があることがわかった。すなわち、植生が多いほど、土壤水分変化に対する蒸発散量の応答がより鋭敏になる。還元すれば、降雨に伴う植物の蒸散活動の活発化が、大気-地表面間の水交換を加速すると言える。

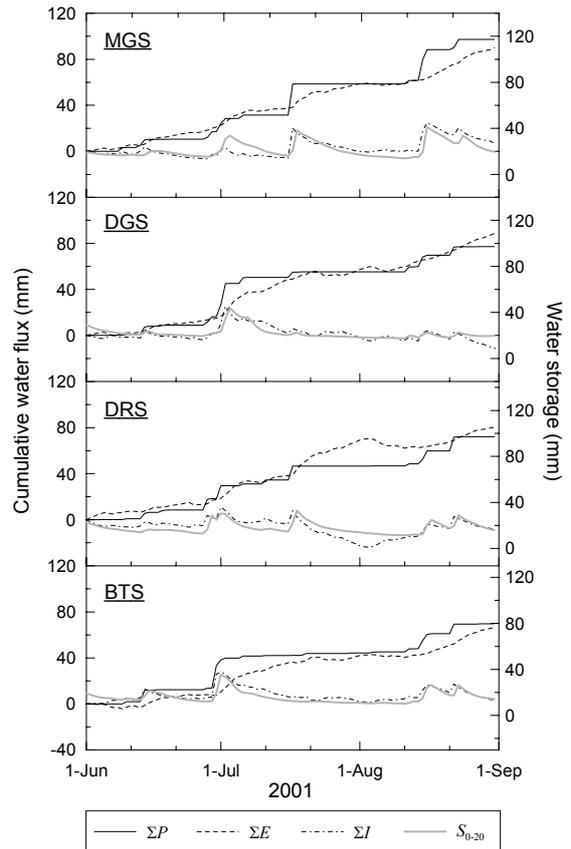


図2 4試験地における積算水フラックスの経時変化

### 4. まとめ

以上の知見に基づいて推論するならば、降水量が増加しても水文学的に活発な土壤層の厚さが増すだけで地下水涵養量は増加しないと予想される。また、樹木や灌木が草原に侵入した場合には非循環性の深層土壤水・地下水資源が消耗・枯渇する恐れが有る。なお、地下水資源の動向を考える上では、ワジ・プラヤや岩盤露出域などでの集中的涵養プロセスを調べる必要がある。

キーワード： 土壤水分, 蒸発散, 地表面熱収支, 植生, 内陸流域

### 参考文献

Yamanaka, T., I. Kaihotsu, D. Oyunbaatar, and T. Ganbold (2007): Summertime soil hydrological cycle and surface energy balance on the Mongolian steppe. *Journal of Arid Environments*, **69**, 65-79.

# モンゴル半乾燥ステップにおける 物質生産に及ぼすC3・C4植物の寄与

筑波大学生命環境科学研究科 浦野 忠朗

## 1. はじめに

モンゴルを含む東アジアの草原における炭素循環研究がここ数年間に進んできている。モンゴル半乾燥ステップにおいても、微気象学的手法によるタワー観測が行われ、生態系のCO<sub>2</sub>フラックスが報告されている (Li *et al.* 2005)。しかし、タワー観測では生態系全体の光合成と呼吸のフラックスからCO<sub>2</sub>収支が明らかになるものの、これらのフラックスの時空間変動やそれを規定する植生構造や環境因子の影響について詳細な解析を行うことは困難である。半乾燥ステップは光合成特性の異なるC3・C4植物を含む混成草原であり、植生構造が生態系フラックスに与える影響は生態学的な物質循環研究において興味ある問題である。

モンゴルはほぼ全土にC4植物が生育しており、乾燥の強い地域では植物種の半数以上がC4植物である (Pyankov *et al.*, 2000)。このためC4植物が行う物質生産(とくに光合成生産)が生態系のCO<sub>2</sub>フラックスに及ぼす効果は無視できないものと考えられる。モンゴル半乾燥ステップ草原における物質生産の変動とそれに及ぼすC3・C4植物の寄与率の解析を行うことを目的として調査を行った。C3・C4植物の物質生産フラックスを明らかにするには、植物の種ごとのフラックスをチャンバー法によって測定することが必要である。しかし、半乾燥草原においては、チャンバー法によるフラックス測定はほとんど行われてこなかった。調査対象とした草原は、モンゴル国Kherlen川流域のKherlen-Bayaan-Ulan(KBU)のステップである。

## 2. フラックス測定手法: Dynamic closed chamber method (DC法)

DC法は、PV製のカラーを草原群落の土壤に埋め込み、透明アクリルのチャンバーをセットし、

チャンバー内のCO<sub>2</sub>濃度の変化を測定することでフラックスを測定する手法である。最初に、アクリルチャンバーのみをセットし、明条件でNEP(生態系純生産)の観測を行った。次にチャンバー内を一度換気し、再びセットした後に遮光箱で覆って内部を完全な暗条件にした後Re(生態系呼吸)を観測する。この測定値から以下の式を用いてGPP(総一次生産)を算出する。

$$GPP = NEP + Re$$

また、チャンバー内に組み込まれた光量子センサーと温度計により、PPFD(光合成有効放射)と気温、地温の測定が行われた。

## 3. 測定1: 植生調査

植生調査は、2003年6、7、8、9月にKBUの植生保護区域内で行われた。50cm×50cmのコドラート12カ所を設置し、出現した植物種を記録し、地上部を刈り取ってバイオマスを測定した。

## 3. 測定2: GPP

C3植物とC4植物のGPPの測定は、カラー内のターゲット以外の植物を刈り取り、C3植物だけの測定区(N=4)、C4植物だけの測定区(N=3)を設置し、DC法により測定した。また、混成群落におけるC3・C4植物の寄与を明らかにするために、混成群落のGPP(N=10)も同様の方法で測定した。GPPの測定は、2003年7月、8月、10月に植生調査と同じ区域で、合計10日間の測定が行われた。測定では、光-光合成の関係を測定するため、一日の間でも異なる光条件及び気温条件の下で3~6回の測定が行われた。

## 4. 結果1: 植生

KBU地域の植生は、出現種数27、そのうちイネ科1種(*Cleistogenes squarrosa*)、アカザ科2種(*Kochia scoparia*, *Salsola collina*)がC4植物だった。

地上部バイオマスは6月から7月にかけて急速に増加し、8月以降減少した。また、C4植物のバイオマスは7月に最大となった(図1)。

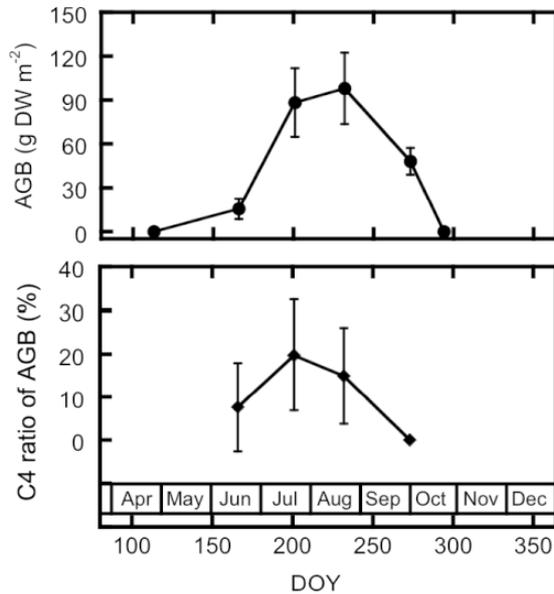


図1 KBU地域の地上部バイオマス(AGB)とC4植物の比率の季節変化。

#### 4. 結果2: GPPの変動とC3・C4植物の寄与

バイオマスベースのGPPはPPFD>1000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で光飽和していることから、飽和GPP (GPPsat)の値をC3植物、C4植物、混成群落の間で比較した(図2)。GPPは、7月では、C4植物でC3植物より有意に大きく、混成群落ではC4植物より低く、C3植物よりやや高い値となった(図2a)。7月11日から16日にかけてはC3植物と混成群落のGPPは低下したが、C4植物には変化がなかった。この間には降雨がなく、土壌含水率は6%から5%に減少した。したがって、乾燥の進行は乾燥に弱いC3植物のGPPを減少させたが、乾燥に強いC4植物には影響を与えなかったものと考えられた。一方、16日から17日にかけて降雨があり、降雨後のGPPは全て増加した。増加の割合はC3植物と混成群落で有意に大きかった。同様に降雨イベントのあった8月には、7月のようなGPPの増加は見られなかった。これは土壌含水率が9%もあったため、降雨前の乾燥化が十分に進んでいなかったためと考えられた。

地上部バイオマスおよびC4植物のバイオマス比率(図1)とC3・C4植物の単位バイオマス当たりのGPPから面積ベースのGPPを推定した。その

結果、C3植物とC4植物のGPP合計値は混成群落のGPPとほぼ同じ値となった。この結果から、C4植物のGPPは7月の乾燥時に最大で群落GPPの34%の寄与を示したが、ほぼ同じ気温条件でも降雨後には27%まで低下すること、さらに、8月にはC4植物のGPPはC3植物以下まで低下し、寄与率は15%以下となることが明らかとなった。

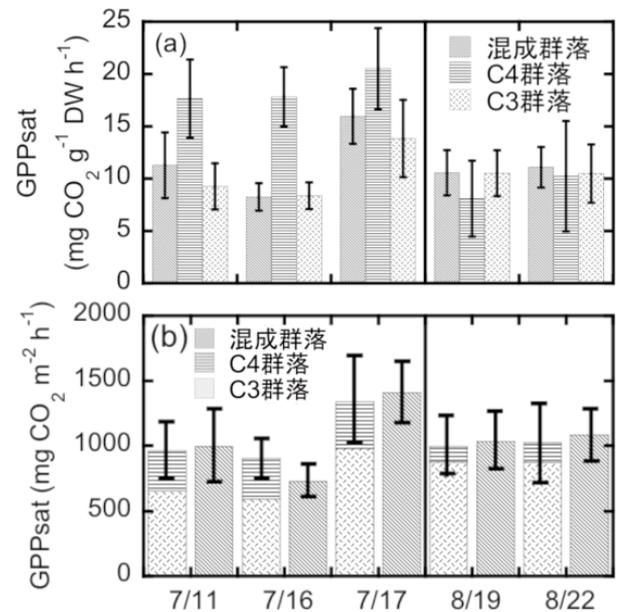


図2 単位バイオマス当たりの各GPP(a)、測定された地上部バイオマスから推定されたGPPと実測されたGPPの比較(b)

#### 謝辞

本研究は、科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業「水の循環系モデリングと利用システム」によるRAISEプロジェクト(代表:杉田倫明)の研究成果である。

キーワード: CO<sub>2</sub>フラックス, 植生, C3植物, C4植物, GPP

#### 参考文献

Li, S.-G., Asanuma, J., Eugster, W., Kotani, A., Liu, J.-J., Urano, T., Oikawa, T., Davaa, G., Oyunbaatar, D., Sugita, M. (2005): *Global Change Biol.* 11, pp. 1-15  
 Pyankov, V. I., Gunin, P. D., Tsoog, S., Black, C. C. (2000): *Oecologia.* 123, pp. 15-31

# 北東アジア乾燥地における持続的農牧システムの開発

国際農林水産業研究センター 鳥山和伸<sup>○</sup>・小宮山博・下田勝久・山崎正史・鬼木俊次・平野聡

## 1. はじめに

作物生産に適さない乾燥地では、家畜を介して乳や肉を生産し利用する遊牧・牧畜生活が伝統的に営まれてきた。しかし、近年、植生のもつ牧養力（面積当たりの持続的に放牧可能な家畜頭数）を超えて家畜が放牧されること（過放牧）が多くなり、過放牧に起因する草原の劣化が進行していると言われていた。草原の劣化が顕著になると、砂漠化防止の観点から禁牧政策が取られる場合もあるが、そうなるからでは対策が後手に回る事が多く、草原の劣化が顕在化する前に予防的手段を講じておくことが重要である。

私どもは、以上のような背景をもとに、モンゴル国と中国を対象に研究プロジェクト「北東アジア乾燥地における持続的農牧システムの開発」（2006-2010）を開始した。本稿では、その研究計画と進捗状況を紹介する。

## 2. 研究の背景—乾燥草原の問題

乾燥地の草原植生は、降雨等の気象変動の影響を受けやすい。したがって、気象変動に対するリスクを軽減するため、広域の草地を利用する遊牧が伝統的に行われてきた。しかし、「共有地の悲劇」といわれるように、草地を共同利用すると早い者勝ち的な利用で放牧圧が高まり易く、草地の劣化を招く危険性がある。一方、中国等では定住化して草地を個別に利用するケースが多いが、そのような場所でも草地の劣化が起こっている。牧養力を超えた放牧による草地の劣化が両者に共通する問題であり、どのような方法によれば草地の持続的利用が可能になるかが課題である。

## 3. 研究方針

そこで、この研究プロジェクトでは、まず家畜の飼養方法を変えた場合に家畜と植生に及ぼす影響を放牧試験によって4年間にわたり明らか

にする。一方、草地利用制度の異なる中国とモンゴルにおける牧畜世帯の経営と植生等の調査により、草地利用制度の違いが牧畜経営と草地保全に及ぼす影響を推定する。そして、これらのデータセットを用いて、植生・牧畜経営モデルを構築し、シミュレーションにより草地を持続的に利用した牧畜経営が可能な条件を明らかにする。

## 4. 個別の研究テーマと内容

個別の研究テーマとして、以下の5課題を実施する予定である。

- 1) **北東アジア半乾燥地における農牧業の実態把握と類型化**：開発技術の方向づけに必要な対象地域の農牧業政策や砂漠化対策の動向調査、食肉や乳製品、家畜飼料等の市場流通の実態把握を行う。
- 2) **リモートセンシングによる牧草現存量推定手法の開発**：衛星リモセンによって広域的な植生変動の過去履歴を明らかにするとともに、試験期間中の放牧試験地での植生変化も把握する。
- 3) **個別利用草地における持続的放牧条件の解明**：中国内蒙古自治区の半乾燥地草原における牧畜経営を調査・分析するとともに、個々の牧畜農家の牧地の利用状況と植生との関係を検討する。
- 4) **共同利用草地における持続的放牧条件の解明**：モンゴル国で過放牧が懸念されている都市周辺地域を中心に遊牧を中心とした牧畜と酪農等の集約的畜産について経営調査を行う。また、ボルノール郡の草原において家畜の種類（牛、羊、山羊）、放牧圧、補助飼料の有無が、家畜の増体や植生の種類・現存量に及ぼす影響について検討するため、放牧試験を実施する。
- 5) **個別利用草地、共同利用草地における植生・畜産経営モデルを利用した持続的放牧システムの提示**：シミュレーションモデルを利用して放牧圧を低減させるための技術的条件と制度的条件

の複合的な関係を解明し持続的農牧システムを提示する。

### 5. 研究の進捗状況—2006年度の結果

本年度は、初年目であったため、両国における政策の概要調査、牧畜世帯の予備調査、リモートセンシングによる植生変動の長期傾向の解析が中心で、家畜放牧試験については2007年に開始すべく、場所の選定等を行ったところである。本年度の概要を示すと以下の通りである。

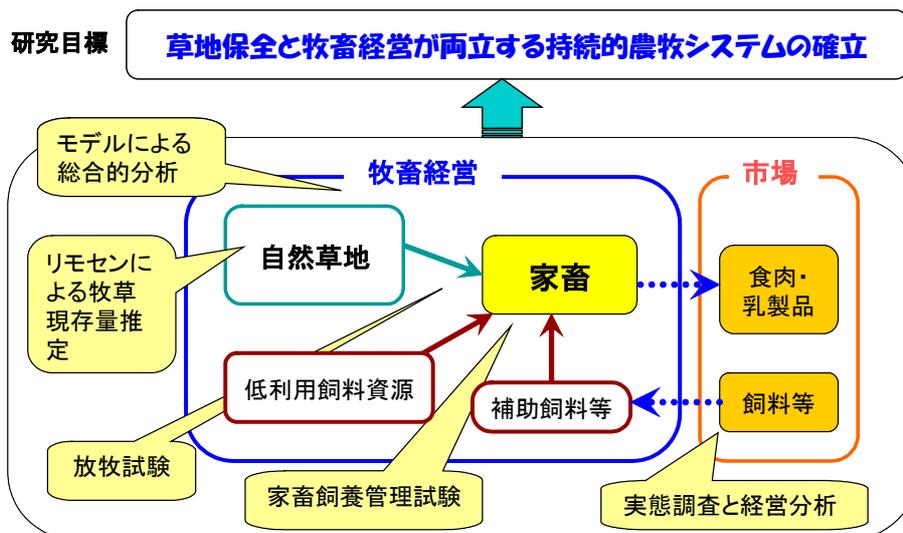
- 1) モンゴル国ウランバートル北方130kmのボルノール郡でモンゴル国立農業大学と共同で2007年から放牧試験を行うこととし放牧予定地を確定した。家畜の種類の違い、放牧圧の違い、補助飼料の有無等が植生に及ぼす影響を検討することとし、試験区を設計した。
- 2) モンゴル国の政策動向調査から、遊牧と集約的畜産を共に発展させ、高品質で安全な畜産品の国内供給とともに、輸出拡大を図ることを基調としていることを明らかにした。(本ワークショップ報告：小宮山博氏)
- 3) 衛星データを用いて植生変動傾向の解析を行い、モンゴル国および中国内蒙古自治区における過去20年余りの長期植生トレンドの時空間分布と、モンゴル国における市場経済化前後の

植生変動傾向の特徴を明らかにした。(本ワークショップ報告：平野聡氏)

- 4) 中国では、個別利用草地の利用と牧畜経営との関係を調べるため、内蒙古自治区シリング盟正藍旗の砂漠化地帯を中心にした牧畜農家等に対する聞き取り調査を行い、1980年代に家畜頭数が増加するに伴って植生が悪化し、1990年代に入ると家畜頭数が減少に転じたことを把握した。草地保全のために牛を増加させる政策の実現については、飼料の供給が制約要因となっていることを推定した。
- 5) モンゴル国において共同利用草地の利用と牧畜経営との関係を調べるため、放牧試験予定地を含む3つの郡で予備調査を実施し、交通の便の良い地域では、牧民数や牛の密度が高く、乳製品の販売が見られ、濃厚飼料の購入金額が高い等の予備的結果を得た。

以上のように、未だ現地状況把握している段階であり、草地保全と牧畜経営の両立する条件をシミュレーションで求めるための本格的なデータ収集は、2007年からである。

**キーワード：** 草地、土地利用制度、放牧圧、リモートセンシング、牧畜経営、シミュレーション



図「北東アジア乾燥地における持続的農牧システムの開発」プロの概要

# モンゴル国における集約的畜産の動向

国際農林水産業研究センター 小宮山博

## 1. はじめに

モンゴル国では、現在でも遊牧を中心とする畜産業が経済の柱となっているが、1999/2000年から2001/2002年の3年連続の冬春季に半世紀ぶりの記録的な雪寒害(ゾド)に見舞われたことなどを背景に、牧民の間に、気象変動に対して脆弱な遊牧をやめ、定住・半定住型の集約的畜産に移行する動きがみられる。政府も急増する都市住民に対して安定的に食肉、牛乳・乳製品を供給する必要性から、近年、集約的畜産を推進する政策・計画を次々と打ち出している。本報告では、モンゴル国の集約的畜産の変遷や政府の畜産政策の動向を紹介する。

## 2. 集約的畜産の変遷

### 1) 計画経済時代

1924年に社会主義を宣言したモンゴル国は、1950年代後半に家畜のネグデル(農牧業協同組合)への集団化を進めた。一方、1960年代以降、急増する都市住民への畜産物の安定供給を目的として、国営農場方式による大規模な集約的畜産農場が旧ソ連等の協力で設立された。①酪農場：1964年以降、200頭～800頭規模の国営の大型機械化酪農場が続々と建設された。1989年時点では、45の酪農場に約1万6千頭の成雌牛が飼養されていた。

②養豚場：1987年から1989年にかけて30頭の中規模タイプの養豚場が全国に26か所設置された。また100-500頭の大規模タイプの養豚場も2か所設置された。

③養鶏場：1963年の中国の援助、1975年の旧ソ連の協力で、ウランバートルに成鶏10万羽規模の採卵養鶏場が設立された。

### 2) 市場経済化以降

1990年における市場経済への移行後、国営農場、ネグデルの民営化が開始され、集約的畜産農場は徐々に民営化されていったが、運転資金不足や海外技術者の引き上げ等により稼働できなくなり、ほとんどが崩壊していった。一方、遊牧への回帰から、牧民世帯数が急増した。それに伴い家畜頭数も急増し、1999年末には史上最高を記録したが、その後、ゾドに見舞われ、2002年末の総家畜頭数は1999年末の71%の水準にまで急減した。その後、家畜頭数は徐々に増加はしているものの、近年、食肉市場価格が急激な上昇を見せるなど、依然としてゾドの影響が伺える。また、牛乳も大型機械化酪農場の崩壊を背景に、都市住民に対して十分な供給が出来ず、牛乳・乳製品の輸入が増加している。このような状況を背景に、近年、都市近郊において集約的畜産が急増している(表1)。

表1 集約的畜産経営体数と飼養規模

	2004年	2005年	
	経営体数	経営体数	平均規模 (頭,羽,箱)
乳牛	130	244	25
肉用牛	10	12	120
肉・毛用羊	…	12	542
豚	16	45	143
鶏	27	61	1840
ミツバチ	…	25	42

出所：モンゴル食料農牧省データ

### 3. 集約的牧畜に関する政策の動向

政府は、頻発したゾドや都市部の食肉、乳製品の不足といった課題を解決するため、2003年以降いくつかの畜産政策・計画を打ち出した。その柱となるのは、「モンゴル国政府の食料・農業政策」(2003年6月国会承認)である。2003年～2015年を実施期間としたもので、定住型(集約的)畜産に関する政策目標は以下のとおり。

- ①遊牧及び集約的畜産を発展させることにより、高品質で安全な食料・原材料を国内市場に供給するとともに、輸出を拡大。
- ②地域の拠点及び作物生産地域において集約的畜産の開発。
- ③飼料作物生産の支援及び飼料生産中小企業の設立による濃厚飼料利用率の拡大。
- ④(2003～2008年)集約型畜産の復興が始まり、定住地の周辺にモデル農場を設置。
- ⑤(2008～2015年)少なくとも20%の牧民が定住・半定住生活様式に移行。牛、豚、家禽の集約的畜産農場が都市・居住地周辺に増加。

また、集約的畜産に限定した「集約的畜産生産開発支援プログラム」も2003年6月に政府決定された。このプログラムは、畜産と作物生産が適切に結合した持続的な農業開発により、①国際基準と市場の要求を満たす良質な食料生産、②国民への食料供給の改善、③食料輸入の削減、を図ることを目的とし、そのために①集約的畜産生産の発展に向けた経済的・法的環境の改善、②集約的畜産生産の地域的発展とモデル農場設立への支援、等を行うとしている。

更に、昨年3月には、「集約的方法で牛肉・羊肉生産を増加させるサブプログラム」が食料農牧省で承認された。2006年～2015年

を実施期間とし、その目標は次のとおり。

- ①中部・北部・東部地域の草地、飼料資源に基づいた肉用の牛・羊の飼養、②肉用の牛・羊を飼養する牧民・経営体に対し、良質の飼料、十分な草地・飼料、水を供給するために必要な法的環境、経済条件の整備、③人工授精により生産性の高い肉用の牛・羊群の育成、④肉用の牛・羊への配合飼料の集中的給餌による肥育及びその生産物の販売網の確立。この達成のために、中部・北部・東部地域の9県において家畜繁殖センターや人工授精部門を設立するとともに、配合飼料製造事業所の設立等を行うとしている。

### 4. 今後の課題

モンゴル国の集約的畜産は、草地での放牧と畜舎での飼料給餌を組み合わせた形態が中心となる。そのため、経営体は草地を占有して持続的に使用する必要があるが、「土地法」には草地の利用についての十分な規定はなく、2002年に成立した「土地私有化法」でも草地は国有地のままとされ、その使用権、占有権も規定されなかった。このため、集約的畜産の急増による都市近郊の草地の無秩序な利用による草地の退化が懸念される。また、飼料供給は、国内生産(主に乾草とフスマ)は2003年以降横ばいに推移し、配合飼料はほとんど輸入に依存という不十分・不安定な状況にあり、国内生産を速やかに拡大していく必要がある。

#### 参考文献

- 国際農林業協力協会(社)(1996)『平成7年度海外畜産事情調査研究報告書-モンゴル-』  
小宮山博(2006)『モンゴル国における定住・半定住型畜産の経済分析・酪農経営の可能性-』東京国際大学博士論文

# モンゴルにおける植生活動度の1ヶ月前予測の可能性

群馬大学教育学部 岩崎 博之

## 1. はじめに

この研究において, 気象要素の年々変動がモンゴルの植生活動度に及ぼす影響について明らかにするとともに, 植生活動度(NDVI)の1ヶ月前予測の可能性についても議論をする. この変動の解析には, 1993-2000年までの97地点の10日間平均した降水量・気温・積雪深のデータとNOAA AVRHH データから作製されたNDVI データを用いた.

更に, 広域にわたる2次元的な植生活動度の予測を行うための準備として, 地上観測から得られた降水とNDVIの関係が, レーダ降水量を利用して認められるか検討する. この解析には, ウランバートル(UB)空港レーダデータを用いた.

## 2. 気温と降水量の影響

地点によって植生活動度の季節進行に差があるため, 地点毎に発達期(主に, 6-7月)と成熟期(主に, 7-8月)を定義し, 2つの植生発達期について解析を行った. 発達期と成熟期における降水量と植生活動度には, それぞれ29%と42%の地点に有意な正の相関(有意水準99%)が認められ, 二つの成長期とも, 6-7月の降水量が植生活動度に重要であった(図略).

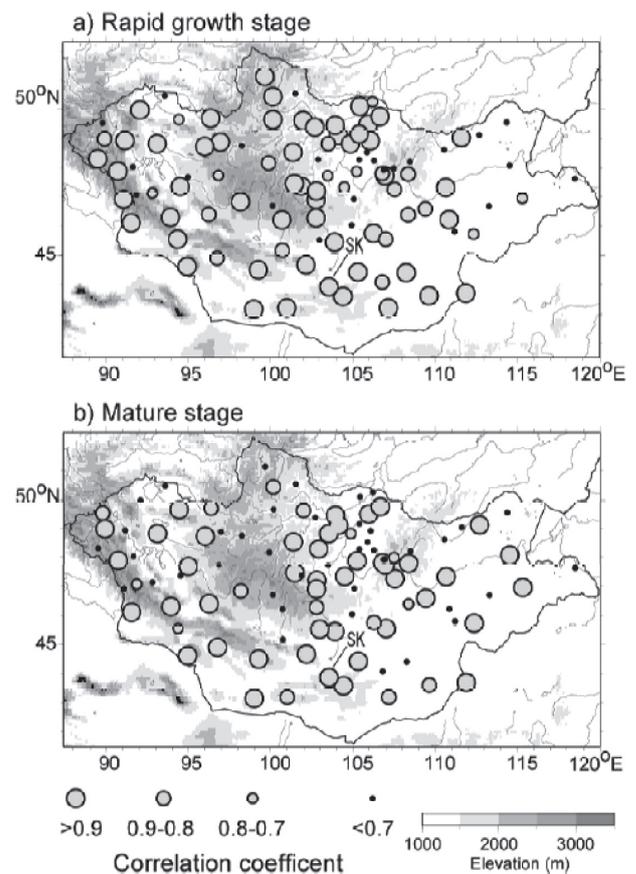
成熟期の植生活動度に対する気温の影響は, 季節によって大きく異なっていた. 成熟期の植生活動度と夏の気温には多くの領域で負の相関が見られる. しかし, 西モンゴルにおいては, 初冬の気温と負の相関があり, 一方, モンゴル北西部においては真冬の気温と正の相関が認められた(図略).

また, Khenty 山脈の西~南側の盆地に位置する地点では, 成長期の植生活動と積雪深に強い正の相関( $r \sim 0.9$ )を示す地点が数箇所存在した(図略).

## 3. 植生活動度の予報可能性

多くの地点では, 1ヶ月前以上の気温・降水と植生活動度との間に有意な相関が見られ, このことは気象データのみから植生活動度の予測が可能であることを示唆している. そこで, 重回帰分析の手法(ステップワイズ法)を用いて, 1ヶ月前までの気温・降水データから発達期・成熟期の植生活動の予測式を各地点毎に求めた.

第1図は, 予測式で求めた植生活動度と観測された植生活動度との相関係数の分布図である. 発達期と成熟期について, 73%と58%の地点の相関係数が0.7を越え, 65%と53%の地点の相関係数が0.8を越えている. これらの地点について, 植生活動の予測式が有効であると考えられる. 更に, 沙漠ステップや沙漠における相関係数が高いことから, 乾燥域においてより有効であろうと期待される.

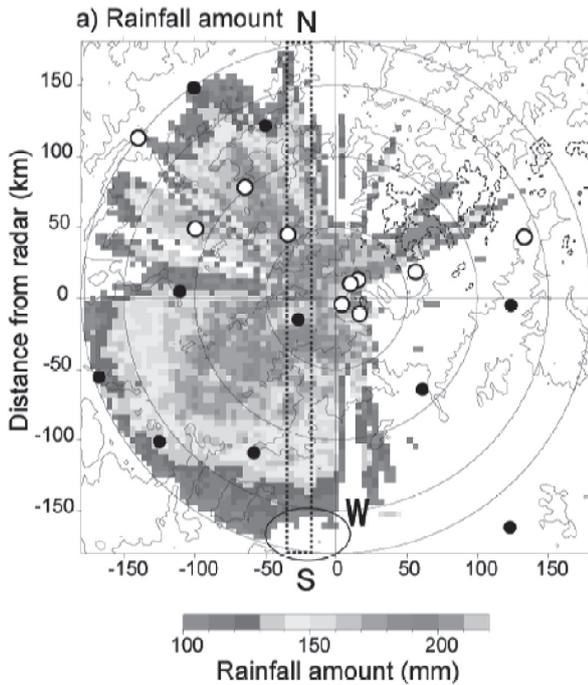


第1図: 成長期(a)と成熟期(b)についての予測式で求めた植生活動度と観測された植生活動度との相関係数の分布図.

## 4. レーダー降水量の有効性の確認

この手法を利用して, 広域にわたる植生活動度の予測を目指す場合に, 現業レーダによる降水量, もしくは, TRMM やGPM などの衛星降水量を利用することが1つの方法である. その応用に先立ち, レーダ降水量分布の変動が植生活動度分布の変動と対応しているのかを確認する必要がある. ここでは, UB 空港レーダで求められた降水量分布とNDVI 偏差分布との関係につい

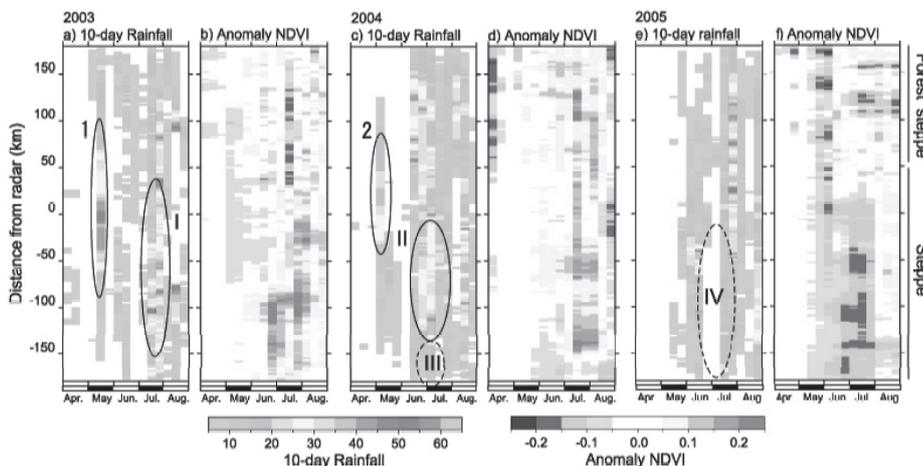
て調査を行った. 第2図は, 高度1kmにおける2003-2005年までの平均暖候期(6-8月)のレーダー降水量の分布である. レーダー探査範囲には影域が多く, 全域の解析は不可能である. 比較的データの質が高く, 森林ステップと乾燥ステップの二つの植生域を含むラインN-S(幅20km)について, 降水量分布とNDVI偏差分布との比較を行う. NDVIデータは, SOPT Vegetationを用いた.



第2図: 2003-2005年までの平均暖候期降水量分布. 降水量の推定には高度1kmのCAPPIデータを用いた. 影域が多いが, 探査範囲南端のWと期されている領域は, 実際には, 降水量が少ない領域である.

降水量分布のNDVI偏差分布への影響

第3図は, 2003-2005年についてのラインN-Sに沿った旬降水量とNDVI偏差の時間-経



第3図: 2003年から2005年についてのラインN-Sに沿った旬降水量とNDVI偏差の時間-緯度断面図. 楕円で, 降水量が多かった領域(I, II, 1 and 2)と少なかった領域(III and IV)を示してある.

度断面図である. 乾燥ステップ植生域( $y < +40$  km)については, 7-8月に正のNDVI偏差域が2003年と2004年に見られ(第3b図と第3d図), それに対して, 2005年7月には負の偏差域(第3f図)が見られる.

2003年と2004年の正のNDVI偏差に先行して, 多量の降水が6-7月にもたらされている(第3図のIとII). それに対して, 負のNDVI偏差が見られた2005年7月には, 先行する無降水期間が見られる(第3図のIV). 乾燥ステップにおいては, 夏のNDVIの年々変動とレーダー降水量との対応が良く対応しており, その時間差は10-30日であった. この時間差相関の特徴は, Iwasaki (2006a)の結果とも整合的である. このように, 気象レーダーにより, 夏の正(負)のNDVI偏差に対して, 正(負)の降水偏差が先行する様子を明らかにすることができた.

加えて, 2004年7月には,  $y = -140$  kmを境に, その南では降水が急激に少なくなっている(第3図のIII). 降水の減少に対応して, NDVI偏差も負に転じている. このように, 気象レーダーによって, 正のNDVI偏差の広がりについての情報も得ることができる.

参考文献

Iwasaki, H., 2006a: Impact of interannual variability of meteorological parameters on vegetation activity over Mongolia, *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**,745-762.  
 Iwasaki, H., 2006b: Study on Influence of Rainfall Distribution on NDVI Anomaly over the Arid Regions in Mongolia Using an Operational Weather Radar, *SOLA*, **2**, 168-171.

# モンゴル国の広域植生変動 - 市場経済化の前後で

独立行政法人国際農林水産業研究センター (JIRCAS) 平野 聡

## 1. はじめに

遊牧を中心とする畜産業は依然としてモンゴル国経済の中核を占める。こうした背景から、モンゴル国の植生が現在どのような方向に向かっているのかを把握することは、将来の観測体制やさまざまな対策にも重要である。アジア中央の植生変遷域に位置するモンゴル国一帯では全球規模の気候変動の影響を多分に受けるが、1990年の市場経済導入後、特に人的要因による植生劣化の報告例もある。しかし、モンゴル全域の植生変動傾向（トレンド）把握に関しては、劣化傾向の過大・過小評価があり、統一した見解は得られていない。一方、人工衛星から得られる分光反射データを使って広域植生状態を把握する手法は、客観的で実効性が高いことがわかっている。

本報告は JIRCAS で展開中の「北東アジア乾燥地における持続的農牧業システムの開発」の一環で広域植生トレンドを基礎データとして整備し、市場経済化前後での植生トレンドの空間分布を解析した結果を紹介する。

## 2. 利用データと解析手法

解析には Global Land Cover Facility (GLCF) によって提供されている Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) の正規化植生指数 (NDVI) データセットを利用した。このデータは地球規模で地表の植生動態を把握することを目的に整備・提供されているもので、衛星データのキャリブレーション、視野角に関する幾何情報、空気中に存在する火山のエアロゾルの影響などの補正が行われており (Tucker et al., 2005)、20 年以上にわたる長期植生変動を把握するには最適なデータセットであると判断した。解像度は約 8km で、時間分解能は 15 日 (最大値合成画像: Maximum Value Composite) である。

各画素 (ピクセル) において、年間最大 NDVI 値をその年の植生最大量の代表値とした。これにより NDVI の年内季節変動のタイミングによる影響を軽減することができる。モンゴル国の降水パターンは年 1 山形であり、もともと少ない降水 (北部の森林地帯でも年間 380mm 程度で、南部の砂漠地帯では 125mm 以下) が夏季ので 6~8 月に集中して起きるため、NDVI の年内季節変動もおおむねこの降水パターンに支配される。しかし、年間最大値をとるタイミングは年により、また場所によって多少前後する。

各ピクセルで植生トレンドを計算し、傾きが正ならば回復傾向、負になれば劣化傾向と判断した。時間軸に対してプロットした年最大 NDVI 値で相関係数の検定を行い (10% の有意水準で検定)、統計的に有意な変動を示したピクセルのみを抽出し、その時空間分布を解析した。手法の詳細は Hirano (2006) を参照されたい。

## 3. 解析結果

データセットから計算できる最長の 23 年間 (1981-2003) にわたる長期植生トレンドでは、全国土で有意な変動を示した面積が約 12% (回復 8.4%, 劣化 3.1%) となり、主な劣化傾向は北部の森林部と耕作地や都市の周辺、南の中国国境付近に点在した。全体としても回復傾向が劣化傾向を上回り、特に草原帯 (北緯 43~45 度付近) には際立った回復傾向が観察された (平野, 2006)。

市場経済移行前の 10 年間 (1981-1990) での植生トレンドを調べると、回復傾向 (12.2%) が大幅に劣化傾向 (1.6%) を上回っていた (図 1a 参照)。特に顕著な回復傾向が東部に見られたが、これは小麦の単収統計との照合で 80 年代後半に同地域で他地域と比較して多量の降雨があったことと矛盾しなかった。

市場経済化の後で雪寒害(ゾド)の相次いだ1999年以降を除いた1990-1999年の10年間では、一転して劣化傾向が卓越した(劣化が4.6%、回復が1.7%)。ただし、有意な植生変動を示した面積は全体の約6.4%にとどまった(図1b参照)。

顕著な劣化傾向は耕作地・耕作放棄地が広く見られる中北部に分布し、ウランバートルとダルハンの2大都市周辺、ハンガイ山脈(標高3500m)周辺にも見られることが判明した。このように空間分布は局地的ながら、市場経済化以降は劣化傾向が集中する地域が広く観察された。

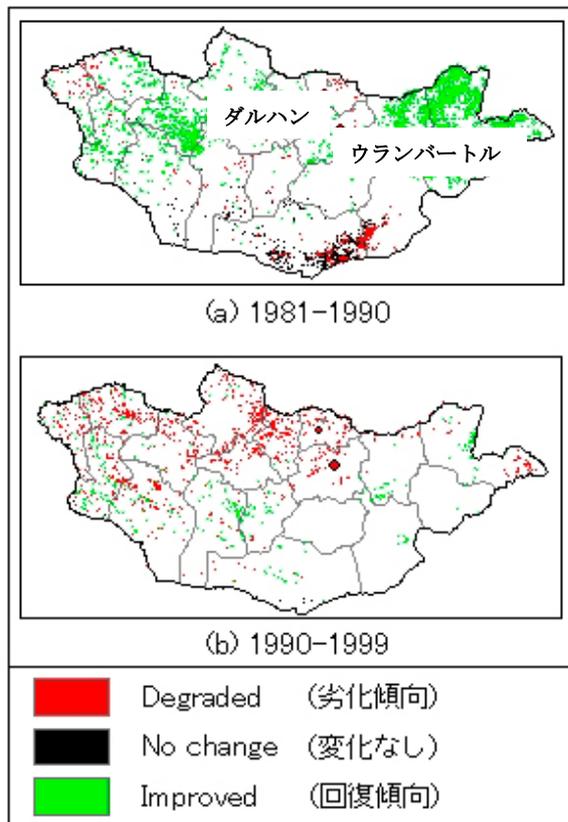


図1 市場経済化前後の植生トレンド。統計的に有意な変動を示した面積は社会主義経済下(1981-1990)で11.8%、市場経済化後(1990-1999)で6.4%と共に大きくないが、全体としては1990年を境に回復から劣化へと卓越する傾向が変化したことが判明した。

## 謝辞

本報告は、独立行政法人国際農林水産業研究センター(JIRCAS)の「北東アジア乾燥地における持続的農牧業システムの開発」の研究成果である。

**キーワード:** 広域植生変動, 植生トレンド, NDVI, 市場経済化

## 参考文献

- Hirano, A., Toriyama, K. and Komiyama, H. (2006): *Proc. 27th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS)*, CD-ROM.
- 平野 聡 (2006): 日本写真測量学会平成18年度秋季学術講演会発表論文集, pp. 105-108.
- Tucker, C.J., Pinzon, J.E., Brown, M.E., Slayback, D.A., Pak, E.W, Mahoney, R., Vermote, E.F., and El Saleous, N. (2005): An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data, *Int. J. of Remote Sensing*, 26 (20), pp. 4485-4498.

# 衛星リモートセンシングによる 東アジアの植生変動推定

筑波大学第二学群生物資源学類 小柳智和

## 1. はじめに

植生は温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>の吸収源としてその重要性が再評価されつつあり (IPCC, 2004), いくつかの国では大規模な植林が行われている。例えば, FAOは2000年から2005年の5年間に東アジアの森林面積が増加したと報告している (FRA2005)。それによれば, アジア・太平洋地域では森林面積は年平均60万ヘクタール以上のペースで増加しており, 特に中国では大規模植林が功を奏し年平均400万ヘクタール以上増加している。それに従えば, 中国では5年間で森林面積が2000万ヘクタール以上増加したことになる。温室効果気体の管理などの観点からは, これらが事実なのかどうか, また, 事実だとすれば, 具体的にどの地域でどのように森林や植生が増加したのかを, 確認することが重要である。しかしながら, 例えば中国で増加したとされる2000万ヘクタールの森林面積は, 日本の国土面積の半分以上に相当するほど膨大なものであり, これを地上調査だけで確認するのは, 困難である。多数の人員を用いて全ての地域に対して地上調査を行うことは可能であるが, 多数の人間が調査に関わることに よって, 個人の主観による影響が大きくなるにつれて, 調査の客観性は失われてしまうだろう。調査結果が温室効果気体の排出権取引などに利用される可能性があることを考慮すると, 調査は客観的かつ公平である必要がある。この条件を満たすことができる調査方法として, 衛星リモートセンシングが挙げられる<sup>1)</sup>。

そこで本研究では, 高頻度で観測を行っている衛星であるSPOT-VGTとMODISのデータを用いて, 2000年から2005年までの各年の植生指標 (植生の量や活性などと関係づけられる指標) の代表値の変動を調べることにより, 東アジアにおける5年間の植生の変動を推定を行った。

## 2. 使用データ

研究対象地域は東経95°-150°, 北緯5°-55°の陸域を対象とした。使用したデータは以下の通りである。

- SPOT-VGT S10 NDVIプロダクト; 期間 1998-2005年10日間コンポジット
  - Terra-MODIS MOD09A; Earth Observing System Data Gateway よりダウンロード; 期間 2000-2005年8日間コンポジット
- Terra-MODISのデータは28枚のMODIS-sinタイトルをMODISToolを用いてモザイク処理と投影変換を行った。

## 3. 解析手法

代表的な植生指標であるNDVI (Normalized Difference Vegetation Index; 正規化差分植生指標) を用いて植生変動の推定を行った。SPOT-VGTはNDVIプロダクトを利用し, MODISはバンド1とバンド2の値よりNDVIデータを作成した。以下の作業をSPOT-VGTのデータ及びMODISのデータについて独立に解析を行った。

### 3-1. 年間最大NDVIコンポジット

本研究では, NDVIが最大値である時が植生が最も活性が高い時であると仮定し, 各年の最も活性が高い時同士を比較することによって植生の種類や地理的特性に依存せずに植生変動の推定を行うことが可能になると考え, NDVIの代表値として年間最大値を用いた。また, 雲のNDVIは低い値を示すことから, 最大値を抽出することによって, 雲の影響を小さくすることができるという利点もある<sup>2)</sup>。本研究では, 空間分解能 (1つのピクセルの辺の長さ) を1kmの条件で, ピクセル毎の1年間のNDVI最大値をその年の代表値として抽出し, 各年のNDVIコンポジットデータを作成した。

### 3-2. NDVIの推定回帰線の増減トレンド

各年のNDVIコンポジットデータから各ピクセルのNDVI代表値の6年間の平年値を求め, 横軸を年, 縦軸を各年のNDVI代表値とした単回帰分析をピクセル毎に行い, NDVIの推定回帰線の傾きを求め, この傾きをNDVIの増減トレンドと定義し, NDVIの変動の推定を行った。NDVIの増

減トレンドは1年間のNDVIの増加量を表している。得られたNDVIの増減トレンドに対して、棄却域両側5%の条件で検定を行った。帰無仮説はNDVIの増減トレンドが0とし、対立仮説はNDVIの増減トレンドは0でないとした。帰無仮説が棄却されたピクセルはNDVIが有意に変動しているピクセルであり、有意な変動をしているピクセルのみ抽出を行った。

### 3-4. 結果の検証

各センサーから得られたNDVIの増減トレンドが整合的であるかどうかの確認を行った。また、衛星データから得られたNDVI変動と実際の地上での植生変動が整合的であることを確認するために、衛星データから得られたNDVIの増減トレンドと現地情報を用いて調べた植生の変動を対照した。

### 3-5. モンゴルにおける2000年から2005年の偏差

モンゴルにおける各年のNDVIの偏差(2000年から2005年の6年間の平年値との差)をNDVIコンポジットデータから、東経95°-120°、北緯40°-55°-の範囲でピクセル毎に求めた。求めた偏差を用いて、モンゴルにおける植生変動の傾向を調べた。

## 4. 結果と考察

SPOT-VGTから得られたNDVIの増加トレンドを図1に、NDVIの減少トレンドを図2に示す。得られた結果を以下に示す。

- SPOT-VGTとMODISから得られたNDVIの増減トレンド分布図の対照結果は共にNDVIの増減トレンドは整合的であった。
- 中国東北から華北で顕著なNDVIの増加が見られた。
- モンゴル東部で顕著なNDVIの減少が見られた。

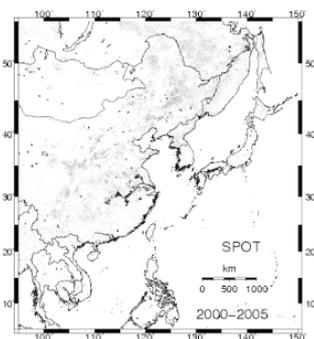


図1 SPOT-VGTによる増加トレンド

- NDVIの変動と植生の変動は、今回確認した2地点についてはNDVI変動と植生変動が整合的であることがわかった。
- モンゴル東部の減少は2004年以降に強い負の偏差が見られたことから、2003年以降に減少が始まったと考えられる。

## 5. まとめと今後の課題

本研究で用いた異なるセンサーによる結果の対照によって、衛星センサーから得られたNDVIの増減トレンドの対照結果は整合的であったため、NDVIの増減トレンドのある程度確実性のあるものであった。今後の課題としては、植生変動の原因を調べることやNDVIの変動と地上の植生の変動が対応していることを調べるために、増加及び減少が顕著な地点の植生の状態を更に多くの地点について調べる必要がある。具体的には以下の方法を用いる予定である。

- DCP (Degree Confluence Project)による地上情報の利用<sup>3)</sup>
- NDVI変化地点について詳しい人物に対し聞き取り調査
- 自然災害(山火事など)に関する文献の活用

### 【参考文献】

- 1) 山形与志樹ら(2001): *日本リモートセンシング学会誌*, 21(1), pp. 43-57.
- 2) Holben, B. N. (1986): *Int. J. Remote Sensing*, 7(11), pp. 1417-1434.
- 3) 岩男弘毅ら(2006): *写真測量とリモートセンシング*, 45(4), pp. 35-46.

【謝辞】 本研究は、環境省地球環境研究総合推進費「21世紀の炭素管理に向けたアジア陸域生態系の統合的炭素収支研究」(代表: 及川武久)の支援を受けた。

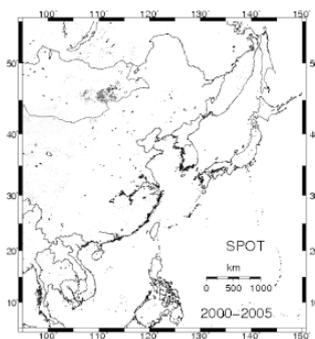


図2 SPOT-VGTによる減少トレンド

# 衛星データを用いた中国内モン古及びその周辺地域の 土地被覆変動解析

額尔德尼\* 鈴木雅一\*

Eerdeni\* Masakazu Suzuki\*

\*東京大学大学院農学生命科学研究科

## 1. はじめに

1970年代末以来中国では「改革・開放」策が実施され、90年代に入ってからさらに「社会主義市場経済」が始まった。また、2000年から「西部大開発」により北部では経済、重工業などのエネルギー開発も実施され、生態系には大きな影響を与えている<sup>[1]</sup>。

近年、中国内陸の砂漠化は国内及び近隣諸国の環境問題として取り上げられている。しかしながら砂漠化は止まらず、多くの地域の人々に影響を与えている。また、砂漠化は、物理的、社会的、経済的な要因が複雑に絡み合って起こる環境問題であり、地域の持続可能な発展に重大な影響を与える。そのため、砂漠化の拡大及び変動のメカニズムを時系列的に、空間的に把握する必要がある。

これまでの、植生変化の実態把握が困難であったが、リモートセンシングデータに基づく解析が時系列的、空間的な植生・土地利用変化の把握することを可能にした。中国を対象としたリモートセンシングの研究が近年大幅に増加する一方、内モン古の地域的な特徴を比較し、各地域の長期変動を把握した研究はこれまでにない<sup>[2-6]</sup>。本研究では、気象衛星 NOAA の AVHRR センサーで取得された NDVI (正規化植生指数) データを利用して内モン古自治区の砂漠化及び緑化の成果を把握することを目的とした。

## 2. 研究内容

### 2.1 対象地及び気候状態などの概要

対象地は中国内モン古自治区とその周辺(図 2-1)である(東経 E95° ~E135°、北緯 N33° ~N53°)。内蒙

古自治区は中国全土の草原の 73.3%、森林の 15.8%を有する。気候は東部の大興安嶺地区が温帯湿潤気候、温帯半湿潤気候に属するほかは、大陸性半乾燥気候、大陸性乾燥気候に属している。年降水量の全体的な分布は、東北から西南にかけて、徐々に減少する傾向になる。降水は6~9月に集中し、年間降水量の60~80%を占める。

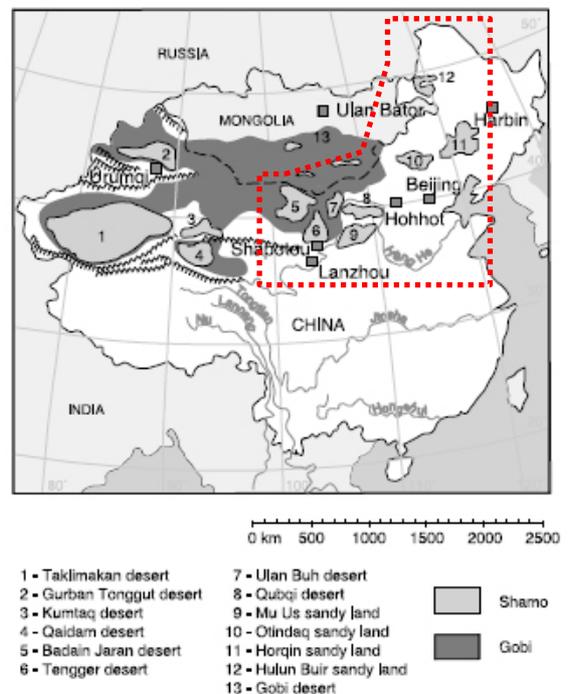


図-1 東アジア砂漠地図<sup>[7]</sup>

対象地となる内モン古自治区には図-1 に示している通りバダンジリン砂漠 (5)、テンゲル砂漠 (6)、ウランブへ砂漠 (7) 及びクブチ砂漠 (8)、毛烏素砂地 (9)、ホンシャンダク砂漠 (10)、ホルチン砂地 (11) とフル

ンベル砂地 (12) などが存在し、砂漠化の拡大及び中国内陸の土地被覆変動の重要な位置にある。

2.2 使用データ

- NOAA/AVHRR データ PAL datasets 解像度 8km/pixel 期間 1982~1999 年
- 米国衛星 CORONA の画像 (1962 年, 1963 年, 1974 年)

2.3 解析手順

NOAA/AVHRR データの NDVI 範囲は 1~255 であり、分析では以下の計算式を利用して NDVI を -1~1 に変換する。

• 計算式  $NDVI^{[8]} = (scaled\ NDVI - 128) * 0.008$

本データから得られた NDVI は図-2 に示しているように各地域の土地利用を示すことができると考えられ、以下のような土地利用タイプに分けた。

- 0.1 < NDVI < 0.1 水、雪、砂漠
- 0.1 < NDVI < 0.2 砂地
- 0.2 < NDVI < 0.6 草地、灌木林、耕地など
- 0.6 < NDVI < 0.9 森林地と見なした<sup>[9]</sup>。

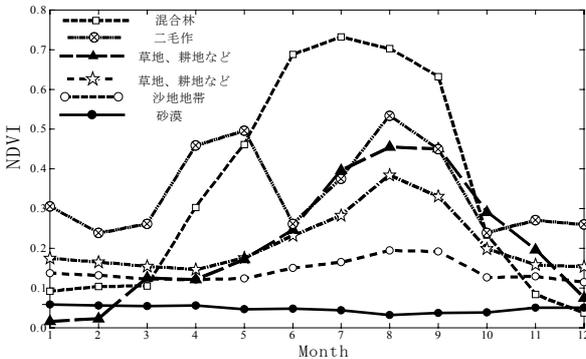


図-2 植生被覆の相違による NDVI の相違

① 植生毎の NDVI 変化

冬期には植物の枯死や積雪の影響で NDVI が低下する季節変化がある。植生の存在する土地では7~9月のいずれかで最大の NDVI が現れ、その7~9月の最大値を NDVI<sub>max</sub> とし比較する<sup>[10]</sup>。

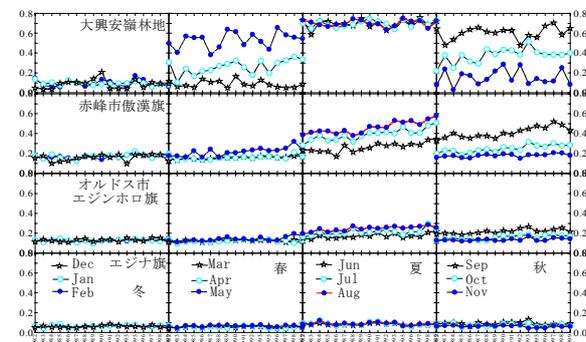


図-3 内モンゴルの4地区の季節変化と経年変化

図-3 に示したのは内蒙古自治区の東北から西南における代表的土地被覆を選び、それらの NDVI を平均化して年間 (四季) 変化である。各地の四季変化が明瞭であり、年間を通して NDVI の最大値が8月に現れるこ

とが多いと分かる。ここで、植生被覆の変動を捉えるには夏の NDVI<sub>max</sub> 値の重要性が示され、この特徴を活かして次の手法に進めた。

② 各ピクセルの NDVI 長期変化

$\Sigma NDVI_{max}$  の各年間での変動傾向は植物活動及びピクセル当たりの植生密度の増加、或いは減少を示す。本研究では1981~1999年の19年間の NDVI データを前期 (1982~1986年)、中期 (1987~1991年)、後期 (1995~1999年) の3期間に分け、各期間の  $\Sigma NDVI_{max}$  の平均値を求め、その増減を調べる。そして、NDVI が増加した地域と減少した地域を図示する。各期間の増減変動を求める方程式を以下のように決定した。

$\Delta NDVI = JUL, AUG, SEP \{ \Sigma (95 \sim 99) - \Sigma (82 \sim 86) \}$   
NDVI/期間

③ NDVI が増減した地域について、砂漠などの植生が少ない地域の植生変化か、草地などで植生変化が生じたのか等の実態を検討するため、1980年代前半の NDVI とその後の増減を対比する。また、盟市毎に砂漠化、緑化の進行状況を集計する。

④ 衛星画像を用いた検証

NDVI データにより解析した結果から植生劣化及び植生増加のエリアをいくつか取り出し、実際の衛星画像から土地被覆の変動を検討する。

3. 結果及び考察

① NOAA/AVHRR データの1ピクセルは約8km四方と広いが、大規模農地が造成されたピクセルでは明瞭に NDVI 変化が見られることを確認した。内蒙古自治区の範囲では、特に黄河上、中流域沿いの河套灌漑区での灌漑農地が1980年代後半に拡大していることが確認できた。その他に、内蒙古自治区周辺となる黄河下流域の平坦地で、二毛作地域の面積が1990年代後半に大幅に拡大している。

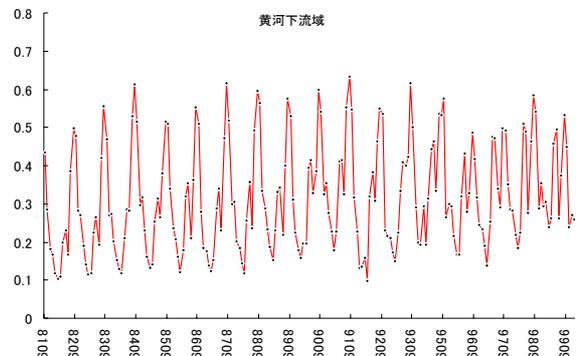


図-4 黄河下流域における二毛作地域の NDVI 経年変化

図-4 に示しているように二毛作地域の NDVI は季節変化が草地や森林地などと異なり、二山型シグナルが現れ、二毛作地を特定するには重要なヒントとなる。

その特徴利用して得たのが図-5である。

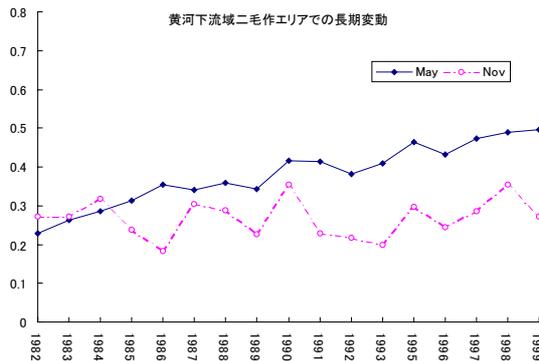


図-5 5月のNDVI 経年変化

図-5 に示しているのは黄河下流域の一部グリッドの平均化したNDVI グラフである。5月のNDVI が11月と比較して明瞭に上昇した傾向があり、この地域では二毛作が増加したと推測できた。

② NDVI が長期的に増加したグリッド、減少したグリッドは地域的にまとまって分布していた。その例としてエジナ旗黒河流域では1990年代後半にNDVI の減少が顕著である。特に、エジナ旗バダンジリン砂漠の黒河沿いに存在していた植生地のNDVI が減少しているなど、砂漠周辺のもともと植生の乏しい地域が多い。一方、NDVI の増加が継続してみられ、特に1990年代の増加が著しい地域に傲漢旗などがある(図-6)。これらの地域と比較して大興安嶺の森林地帯では著しいNDVI の変化は見られなかった。

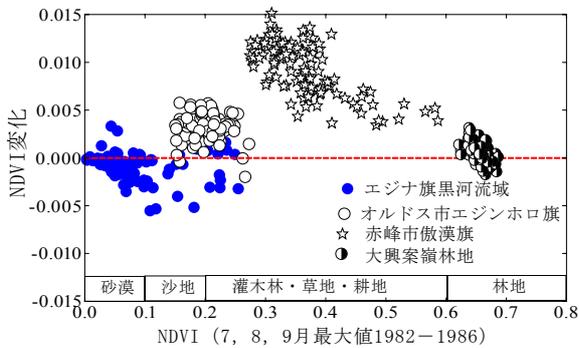


図-6 後期と前期の $\Delta$ NDVI/year による植生変動

内蒙古自治区内での砂漠緑化の成果が出ている地域として、もともと立地条件の割りと良い草地地帯(0.27<NDVI<0.4)範囲内での緑化成果が明瞭に出ていることが確認できた。降水量や立地条件が悪い地域ではまだ砂漠化防止技術が遅れており、砂漠化の防止策とその効果がまだ明瞭な成果を上げられていないと考えられる。

③ NDVI を植生量の指標とし、その増減で約8 km四方のグリッドを単位として植生の増減を評価し、行政区毎に集計した。内蒙古自治区においては植生が減少している地域はエジナ旗、興安盟、フルンベル盟であ

る。一方、フフホト市、通遼市、赤峰市では植生の増加が見られるグリッドが継続的に増加している。これらのNDVI 増加の地域はもともとある程度植生が存在していた場所が多い。

④ NOAA/AVHRR データによって特定できた植生増加と植生劣化のエリアを抽出し、米国偵察衛星 CORONA の画像及び最近の衛星画像を用いて検討した。その結果、CORONA 衛星画像に見られる植生群落は現在は砂丘となり、植生の減少が見られた。一方で、CORONA 衛星画像では植生群落が見られない砂地では最近の画像からは農耕地や植林地が見られた。画像検証によってNOAA/AVHRR データから得られた結果は植生変動の実態を示すことができたと判断した。

#### 4. まとめ

本研究ではリモートセンシングの手法を用いて中国内蒙古自治区の広域半乾燥・乾燥地での砂漠化及び長期緑化プロジェクトの成化を把握する重要な知見を得た。リモートセンシング手法は乾燥地における植生の季節変化や年々変動を把握する際にも有効な手段であり、特に本研究の主要データとなる NOAA/AVHRR NDVI データの有効性と実用性を示すことができた。

内蒙古自治区において19年間に渡って、砂漠化が進んでいる場所、植生が増加している場所を同一の基準で抽出することができ、植生変化の実態が示された。内蒙古自治区では1990年代後半になって、緑化事業などにより砂漠化の進行が大幅に抑えられている。一方で、もともと植生が乏しい西側の砂漠地帯周辺の一部では砂漠の拡大が継続してみられる。内蒙古自治区の緑化事業において、もともと植生被覆率がある程度あった地域では緑化の成果が上がっているという実態が示された。

#### 文献

1. 劉 建新: 中国内蒙古における生態系環境の改善. 立命館産業社会論集, 1999
2. Wang Hong Li XiaoBing: Monitoring growing season of typical steppe in northern CHINA based on NOAA/AVHRR NDVI data. Journal of Plant Ecology, 2006, 30 (3) 365~374
3. MA Mingguo DongLi-xin: Study on the Dynamically Monitoring and Simulating the Vegetation Cover in Northwest China in the Past 21 Years. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, Apr, Vol25, No. 2
4. Quan Wang, John D. Tenhunen: Vegetation

- mapping with multitemporal NDVI in North Eastern China Transect. International Journal of APPLIED EARTH OBSERVATION AND GEOINFORMATION, 2004
5. B. LI, S. TAO: Relations between AVHRR NDVI and ecoclimatic parameters in China. INT. J. REMOTE SENSING, 2002, VOL. 23, NO. 5
  6. K. ICHII, A. KAWABATA: Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982-1990. INT. J. REMOTE SENSING, 2002, VOL. 23, NO. 18
  7. R. TATEISHI, M. EBATA: Analysis of phenological change patterns using 1982-2000 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) data. INT. J. REMOTE SENSING, 2004, VOL. 25, NO. 12
  8. Muhamad Husni Idris: Studies on the effect of inter-annual variability in rainfall on vegetation cover in Borneo, using satellite remote sensing data analysis. 2005
  9. Mingguo Ma, Frank Veroustraete: Reconstructing pathfinder AVHRR land NDVI time-series data for the Northwest of China. ADVANCES IN SPACE RESEARCH, 2006
  10. 近藤昭彦: グローバルリモートセンシングによる植生・土地被覆変動の抽出とその要因解析

注:本稿は2007年1月の筑波モンゴル植生変遷域ワークショップにおける発表の要約である。

# リモートセンシングと熱収支法の併用による 広域表層土壌水分推定法の検証

千葉工業大学工学部建築都市環境学科 松島 大

## 1. はじめに

近年モンゴルでは夏季の無降水日と降水量の減少、土壌水分量の減少が見られるようになってきている (Azzaya et al. 2006)。表層土壌水分は地上植生の成長に直接効果を及ぼすほかに、地下水涵養と密接に関連していると考えられる。衛星データを用いた広域の表層土壌水分量を推定する方法としては、地表面から放射されるマイクロ波放射の輝度温度をとらえる方法が実用化されつつあり、モンゴル国内でも衛星搭載マイクロ波放射計 AMSR-E による表層土壌水分推定値の地上検証実験が行われている (Yamanaka et al. 2005)。本研究は各種波長帯の衛星データを熱収支法とともに用いて詳細な表層土壌水分分布を推定しようとする試みである。AMSR-E などのマイクロ波放射計による表層土壌水分量の空間分解能は現状で 10km 程度であるが、本研究の方法では衛星搭載の熱赤外センサーの分解能 (MODIS や AVHRR で 1-2km 程度) による推定が可能になる。本研究では、草原における土壌熱慣性推定値を表層土壌水分量の地上観測値や AMSR-E による土壌水分量推定値と比較検証する。

## 2. パラメータ推定

本研究で用いる熱収支モデルはバルク式と force-restore モデルを組み合わせたもので植生キャノピーと土壌の二層からなっている。このモデルに日射量や地上気象データの時系列を入力するとキャノピー層と土壌層の表面温度が出力される。モデルのパラメータのうち表層土壌水分に関係しているのは土壌層の熱慣性である。これは土壌の熱容量と熱伝導率の積の平方根であり、土壌水分量が大きいくほど土壌熱慣性の値は大きくなる。この性質を利用して、熱収支モデルのパラメータの最適化により表層土壌水分量の推定が可能と考えられる。本研究ではこのパラメータの最適化を、大気補正を行った衛星による地表面の放射温度を基準にしてシンプレックス法というアルゴリズムを用いて行った。モデルやアルゴリズムの詳細は Matsushima (2007) を参照できる。

## 3. データ

パラメータ最適化の基準とする地表面放射温

度データには、極軌道衛星に搭載されたセンサーである MODIS の Level 1B の熱赤外データ (Ch. 31) を用いた。このデータは米国航空宇宙局のウェブページから無料で取得できる (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>)。日射量の空間分布を得るために静止気象衛星 GOES-9 のデータを用いた。これは無料で取得できる高知大学で編集されているデータベースを用いた (<http://weather.is.kochi-u.ac.jp/>)。地上気象データと土壌熱慣性検証のための表層土壌水分量測定値には RAISE プロジェクトで取得したもの (Sugita et al. 2007) やモンゴル国の水文気象研究所で編集されたモンゴル各地の観測所のデータを用いた。本研究で対象とする領域は北緯 46.5-49 度、東経 107.5-112.5 度で囲まれる部分であり、主にトブ県東部とヘンティ県が含まれている。

## 4. 土壌熱慣性と表層土壌水分量との関係

図 1 は典型草原に位置するヘンティ県ウンドルハーン市における土壌熱慣性推定値 (赤) と表層土壌水分量測定値 (青・深さ 3cm) の時系列を比較したものである。降水量 (薄紫) が多いほど土壌水分量がスパイク状に急に大きくなるが、土壌熱慣性値の変化はこれによく追従している。このように本モデルによる土壌熱慣性推定値は表層土壌水分量の測定値と定性的に正の相関を示すことが分かった。

図 2 は 2003 年 8 月に対象領域において熱収支モデルで推定された土壌熱慣性と AMSR-E 土壌水分推定量を比較したものである。マークは平均値で誤差棒は両者の差の標準偏差を示し、これらは概ねサンプル数 20-60 に対応するものである。平均値では両者はほぼ比例関係にあることが認められる。図では 8 月の前半と後半に分けて示したが、両者で大きな差は認められない。この結果より、各推定値は月平均値程度で一致することが分かった。

図 3 は熱収支モデルの空間分解能が異なる場合について、図 2 と同様の比較を示したものである。空間分解能が 6km の場合は 12km の場合に比べて土壌水分量測定値に対してあまり敏感ではなくなっている。この原因は不明で今後の検討課題である。

## 5. まとめと今後の課題

衛星データを用いた熱収支モデルの最適化によって表層土壌の熱慣性を推定し、これを表層土壌水分量の直接測定値及び衛星推定値と比較した。その結果、土壌熱慣性推定値は土壌水分量の直接測定値と正の相関を示し、衛星推定値とは月平均値程度で比例関係が見られた。今後は週平均値程度でも両者の比例関係が成立するように推定精度を向上させることが求められる。また、熱収支モデルの空間分解能の違いによる比例関係の相違を解消する必要がある。

## 謝辞

本研究は科学技術振興機構による戦略的創造研究推進事業の水循環領域課題「北東アジア植生変遷域の水循環と生物・大気圏の相互作用の解明(略称 RAISE)」において行われたものである。本研究の遂行に際してはモンゴル国水文気象研究所の支援を受けた。

## 引用文献

- Azzaya, D., B. Gantsetseg and D. Munkhzul, The agroclimatic resource change in Mongolia, *Proceedings of 2006 International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia*, 4, 3, 2006.
- Matsushima, D., Estimating Regional Distribution of Surface Heat Fluxes by Combining Satellite Data and a Heat Budget Model over the Kherlen River Basin, Mongolia, *J. Hydrol.*, **333**, 86-99, 2007.
- Sugita, M., J. Asanuma, M. Tsujimura, S. Mariko, M. Lu, F. Kimura, D. Azzaya and Ts. Adyasuren, An overview of the rangelands atmosphere-hydrosphere-biosphere interaction study experiment in northeastern Asia (RAISE), *J. Hydrol.*, **333**, 3-20, 2007.
- Yamanaka, T., I. Kaihotsu, D. Oyunbaatar and Ts. Ganbold, Regional-scale variability of the surface soil moisture revealed by the AMPEX monitoring network, *Ground Truth for Evaluation of Soil Moisture and Geophysical/Vegetation Parameters Related to Ground Surface Conditions with AMSR and GLI in the Mongolian Plateau*, 33-42, 2005.

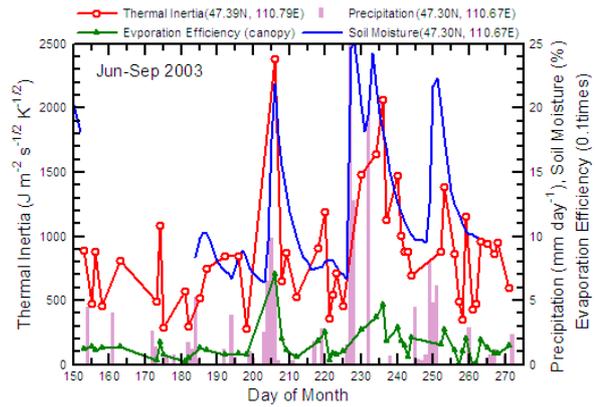


図1 ヘンティ県ウンドルハン市における土壌熱慣性推定値(赤)と表層土壌水分量測定値(青)の比較。薄紫は日降水量で緑はキャノピー層の蒸発効率を示す。

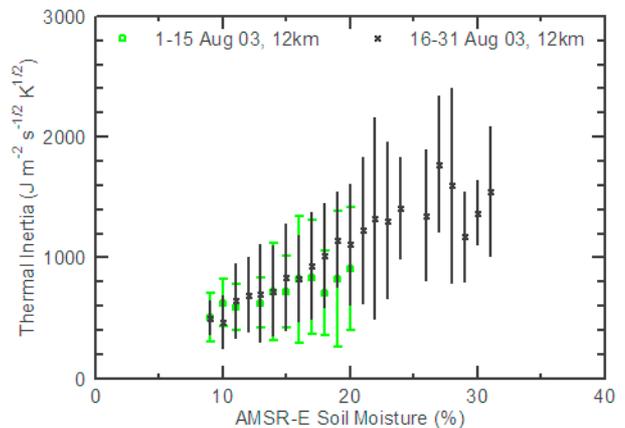


図2 AMSR-E 土壌水分推定量と熱収支モデルによる土壌熱慣性推定値の比較。2003年8月の前半(緑)と後半(黒)に分けて示した。マークは両者の差の平均値で誤差棒は差の標準偏差を示す。

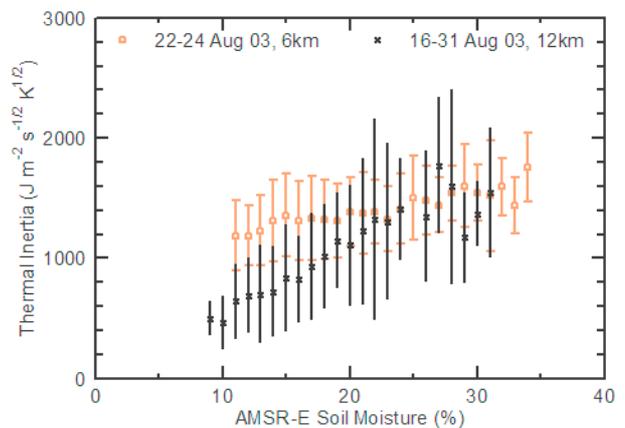


図3 図2と同様。ただし、空間分解能 6km(橙)と 12km(黒)の場合の比較。

# 衛星地上統合観測によるモンゴル高原-中国北部における 土壌水分・地表面状況の時空間変動解析の研究

- AMSR-E (AQUA) /ALOS/MIRAS (SMOS) /GCOM-W の地上検証実験プロジェクトへ向けて -

広島大学大学院総合科学研究科 開発一郎

## 1. はじめに

近年、水・エネルギー循環、自然災害、植生や水資源の管理の立場から広域でより正確な土壌水分および地表面変化の実態の把握が求められている。そのためには、現在のAQUA/ALOSや今後の地球観測衛星と地上観測による総合的な観測が重要かつ不可欠である。

2002年5月に衛星リモートセンシングの広域地表面土壌水分測定のために、マイクロ波放射計AMSR-EおよびMODISを搭載したAQUA(EOS-PM1)が打ち上げられ、現在順調に土壌水分や植生他の観測を続けている。このAMSR-Eによる衛星土壌水分測定のアプローチ開発は小池ら<sup>1)</sup>やNjoke<sup>2)</sup>他によってなされ、AMSR-Eの広域場の比較的高精度な土壌水分推定が行なわれている。

モンゴル高原および中国北部(華北平原から東北にかけて)の半乾燥地帯は、水資源的には問題の多い地域であり、東アジア気候変動形成解明にも重要な地域である。この地域の水・エネルギー循環機構の解明、特に土壌水分・植生動態の研究が半乾燥地域の食料生産および水資源の管理のためには不可欠である。

すでにAQUAやALOSが地球観測に威力を発揮しているが、今後さらにSMOSが2007年、GCOM-Wが2011年初めに打ち上げられる予定であり、これらの衛星と地上観測を統合した水循環観測を長期に実施できれば、東アジア半乾燥地域の水循環機構の解明および植生変遷研究につながると思われる。本研究ではこの様な観点から、モンゴル高原における水循環研究の現在までの成果の一部について考察し、今後の研究のあり方について見当を試みたものである。

## 2. モンゴル高原での衛星地上統合観測

### 1) 観測方法

筆者らは2000年8月からモンゴル国の首都のウランバートル市の南側300kmにAMPEX/MAVEXプロジェクトのための水循環地上観測試験地(モンゴル高原試験地)を設定し、統合観測を実施している<sup>3)</sup>。このプロジェクトはADEOS IIとALOSの衛星観測検証のためにJAXAおよびモンゴル国自然環境省気象・水文研究所と

の共同研究として実施されている。

試験地には地上検証用長期モニタリングとして、基本気象要素を中心としたAWS(自動気象観測ステーション)と土壌水文自動観測ステーションASSHが設置され、2006年6月現在、JAXA(宇宙航空研究開発機構)の4つのAWSと11台のASSHが稼働している。

### 2) 観測成果

#### AWS モニタリング

2000年夏から2005年夏のAWSモニタリングの結果はKaihotsu(2005)<sup>4)</sup>に詳しいが、以下にその成果の一部について述べる。

この間の気候的な特徴としては、いずれのAWSサイトにおいても日平均気温が極めてわずかながら上昇傾向にあり、それに伴って地表面温度も上昇傾向にあることが分かった。

降水量については、例えば本試験地のMGSのAWS降水観測結果によると、年降水量は、2001年から2005年まで順に、123.4mm、102.4mm、189mm、99.6mm、67.2mmであった。2003年は相対的に多いが、全体としてはやはり減少傾向にあった。

#### 地上観測の面積土壌水分量

AMPEX/MAVEXプロジェクトの地上観測で得られた顕著な成果の一部として、試験地の面積土壌水分量が挙げられる。

2001年6月から2005年9月までの全ステーションの深度3cm土壌水分の日の面積土壌水分量( $VWC_{area}$ )を算出した結果、毎年夏季に多くのスパイクの出現と冬季の長い低土壌水分状態が見られ、その原因はそれぞれ、夏季の降雨と冬季の土壌凍結によると推測される。この結果、この5年間わずかであるが、土壌水分は減少のトレンドにあることが分かった。

#### AMSR-Eによる土壌水分推定

2002年から2005年の7月下旬のAMSR-Eデータを小池アルゴリズム<sup>1)</sup>を用いてモンゴル国およびその周辺の土壌水分を推定(10日平均の土壌水分量)した。推定の条件は、水体はAQUAのLand Ocean Flagで検出し、 $2\text{ Kg/m}^2$ 以上の植物繁茂地域(NOAA-AVHRRのNDVIで0.6以上の地域)は除き、体積水分量60%を超える場

合は60%とするものであった。

その結果、全体的に土壌水分分布パターンが降水量分布に対応している<sup>5)</sup>ことが分り、AMSR-Eの土壌水分評価が水循環的にそう間違いがないことが分った。

年毎に土壌水分分布をみてみると、2002年は全体的に乾燥し、モンゴル高原全域の土壌水分は体積水分量10%未満であるが、2003年はゴビ砂漠の北側においても10%を超える水分状態となっていた。2004年になると乾燥化が進み、再度モンゴル高原全域が体積水分量10%未満の分布となり、2005年もほぼ同じ傾向を示した。モンゴル全域での降水分布解析結果はまだ得られていないが、前述のようにモンゴル高原の本試験地での降水は2001年から減少傾向にあり、土壌水分の減少に対応していた。

### 植生変遷

植生の地上観測を、MGSのAWSに隣接した植生観測サイト(10m x 10m)でコドラート法(0.5mを2反復)を用いて2002年から7-10日間隔でマニュアルで実施している。本調査では特に、植物水分量の推定に力を注いでおり、あらかじめ得ておいた植物体積(バイオマス)と植物水分量のキャリブレーション式から植物水分量を得ている。

結果として、2002年4月初旬から植物水分測定が実施できるようになり、8月中旬にピーク値60 g/cmm<sup>3</sup>となり、9月末にはゼロであった。2003年では4月下旬に植物水分測定が可能となり、7月中旬にピーク値138 g/cmm<sup>3</sup>に達し、9月下旬には測定不可であった。いずれの年も10月から翌年の3月一杯までは地表面に生存している植物はほとんどみられなかった。

また、ADEOS IIのGLIデータを用いてMGSの試験域の60km x 60kmの面積植物水分量の推定を試みた<sup>4)</sup>。その結果2003年8月13日のそれは47 g/cmm<sup>3</sup>であった。MGSでの地上植物水分量測定結果では8月9日が129.8 g/cmm<sup>3</sup>、8月16日が115.4 g/cmm<sup>3</sup>であったので、点データとの比較は問題があるが、経験上、本対象域のMGS以外の地域は概してMGSと同じかそれ以上の植生が繁茂しており、結果としてGLIのほうが過小評価している可能性が高いと云える。

### 3. 今後の統合観測

#### 1) 水循環に関係した地球観測衛星観測

前述のようにAQUAとALOSについては、すでに土壌水分・積雪観測と植生観測を地上検証実験を行ないながら実施し、今後も統合観測を継続する。特にALOSのPALSARによるモンゴル国および周辺の土壌水分推定を積極的に行なうと共に、AMSR-Eによる植物水分量

の算定の確立を図る必要がある。

2007年9月には、ESAのMIRASのみを搭載したSMOSが打ち上げられることになっており、MIRASによる広域の土壌水分観測が可能となる。MIRASは1.4GHzの合成開口放射計であり、分解能は40-50km、回帰日数は3日以内、観測範囲は1,000 kmである。1.4GHzは土壌水分観測に最適であり、その成果は期待される。GCOM-Wが2011年初めに打ち上げられる予定であり、これにはAMSR/AMSR-Eの後継センサーとしてAMSR2が搭載される。センサー仕様・能力は従来のAMSR/AMSR-Eとほぼ同じであるが、6GHz帯の電波干渉を避けるために7.3GHz観測バンドの追加が検討されている。

この様に、今後の土壌水分や雪氷に関する衛星観測は充実したものとなり、2007年から2011年までの間に、複数のセンサーによるシナジー観測が可能である。従って、土壌水分や積雪の時空間分布の詳細な解析や異方性の解明および相互キャリブレーションに威力を発揮すると思われる。

#### 2) 地上観測と関連国際共同研究

モンゴル高原ではすでにAMPEX/MAVEXの地上観測が行なわれ、今後も変わりなく継続される。現在のところ本地上観測はGCOM-Wの打ち上げ後の地上検証まで(2012年?)は実施される予定である。観測内容としては大気フラックスの直接観測他の新規観測が追加される可能性もある。このモンゴル高原試験地はCEOPおよび2007年1月から始まったCEOP2のMongol Reference Siteでもあり、東アジアの重要な水循環観測拠点でもある。また、中国の黄河下流域の華北平原の禹城周辺または北東部に、CERNとIHPの共同研究の一環として、新たにモンゴル高原試験地より降水量の多い水循環観測試験地を設定することも検討中である。

### 4. おわりに

モンゴル高原での水循環の地上と衛星による観測成果として、水循環と植生の長期モニタリング結果の一部、面積土壌水分の経年変化、AMSR-Eの土壌水分分布の時空間変動について考察した。

寒冷半乾燥地域での長期の複数ステーションの同時水循環地上モニタリングはほとんど実施されておらず、今後、さらに安定したモニタリングの実施が重要である。また、すでにAMSR-EやALOSによるシナジー観測が可能なので、今後はこれらの土壌水分解析をAVNIR2やPRISM他による植生・地形の解析も含めて早期に試みる事が望まれる。

略語

ADEOS II : Advanced Earth Observing Satellite II  
ALOS : Advanced Land Observing Satellite  
AMPEX : ADEOS II Mongolian Plateau Experiment for Ground Truth  
AMSR-E : Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS  
ASSH : Automatic Station for Soil Hydrology  
AVNIR2 : Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2  
AWS : Automatic Weather Station  
CEOP : Coordinated Enhanced Observing Period  
CERN : China Ecological Research Network  
ESA : European Space Agency  
GCOM-W : Global Climate Observation Mission-Water  
GLI : Global Imager  
IHP : International Hydrological Program  
JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency  
MAVEX : Mongol AMSR/AMSR-E/ALOS Validation Experiment  
MIRAS : Microwave Interferometric Radiometer with Aperture Synthesis  
MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer  
PALSAR : Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar  
PRISM : Panchromatic Remote-Sensing Instrument for Stereo Mapping

SMOS : Soil Moisture and Ocean Salinity

**謝辞** : 本研究を実施するにあたり、JAXA の研究支援を受けた。また、関係資料をいただいた小池俊雄教授 (東京大学)、今岡啓治氏 (JAXA) に謝意を表す。

**参考文献**

- 1) 小池俊雄・下茂 力・大田 哲・藤井秀幸・柴田 彰 : 陸面水文量分布のグローバル推定のためのマイクロ放射計アルゴリズムの開発と検証、水工学論文集、**44**、247-252, 2000.
- 2) Njoke, E. G. : *Land surface algorithm*, Algorithm theoretical basis document for EOS-P M1/AMSR-E, NASA, 38p., 1998.
- 3) 開発一郎・山中 勤・ダンバラブジャ ウコンバータル・平田昌弘・大石風人・村松加奈子・宮崎真・近藤昭彦・小池俊雄 : ADEOS II- AMSR/AMSR-E の予備的地上検証実験、第3回水文過程のリモートセンシングとその応用に関するワークショップ論文集、1-6、2002.
- 4) Kaihotsu, I. (Ed.) : *Grand Truth for Evaluation of Soil Moisture and Geophysical/Vegetation Parameters Related to Ground Surface Conditions with AMSR and GLI in the Mongolian Plateau*, JAXA, 113p, 2005.
- 5) Batima, P and Dagvadorj, D. : " *Climate changes and its impacts in Mongolia.* " JEMR Pub. , 227p. , 2000.

# ALOS/PALSARを用いたモンゴル環境計測

東北大学 東北アジア研究センター 草野 駿一

## 1. はじめに

2006年1月、日本の陸域観測衛星であるALOS (Advanced Land Observation Satellite) が打ち上げられた。ALOSは偏波情報を利用するポラリメトリックSARであるPALSAR (Phased Array L-band SAR) を搭載している。PALSARは現在フルポラリメトリ計測が可能な世界で唯一の衛星搭載型ポラリメトリックSARであり、今後の働きに大きな期待が寄せられている(1)。

本稿ではモンゴルにおけるPALSAR観測データを紹介し、ポラリメトリックSARで得られる地表面に関する情報を紹介する。

## 2. 偏波とPALSAR

ポラリメトリックSARは、リモートセンシングに用いられるセンサの一つであり、電磁波の偏波を利用した観測を行う。偏波とは、光で言う偏光のことであり、PALSARは垂直偏波、水平偏波の送受信により4偏波(フルポラリメトリ)を観測する。それぞれ英語の頭文字をとりV偏波、H偏波と呼ばれ、H偏波送信、V偏波受信の場合はVHと呼ばれる。フルポラリメトリ計測により、単一偏波よりも多くの情報を得ることができ、それらを解析することで地表面パラメータの定量的な推定が可能となる。

ALOSに搭載されているPALSARは、世界初のフルポラリメトリック計測が可能な衛星搭載型LバンドSARである。運用周波数は1.27GHzであり、波長は約23cmである。一方でPALSARには偏波校正が不可欠であり、そのためにJAXAにより偏波校正検証チーム(CVST)が組織された。私たちはCVSTとしてモンゴルで校正実験を行った。これに際し、モンゴル科学アカデミーとも共同研究あり、校正実験を共同で行った。

## 3. モンゴルにおけるPALSAR観測データ

モンゴルの観測は2006年5月25日、8月25日に行われた。図1に観測データ範囲を示す。5月、8月ともに14シーンの観測が行われ、その範囲はほとんど重なっている。南はゴビ砂漠の北、北はロシアのバイカル湖東までの観測がなされ、砂漠、都市域、山地などバリエーションに富む地

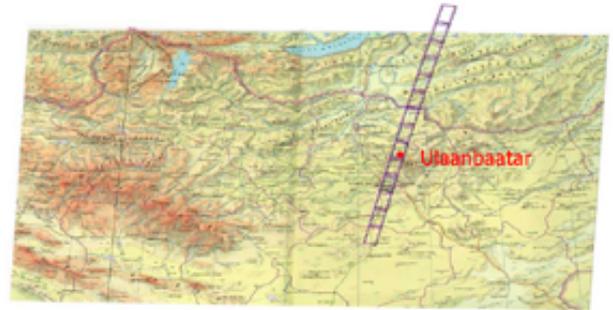


図1: PALSAR観測データ範囲

表面の観測がなされた。

### 1) 偏波情報

図2にウランバートル市街地の航空写真とPALSARカラー合成画像を示す。この画像は $(HH+VV)/2$ 、 $(HV+VH)/2$ 、 $(HH+VV)/2$ の三成分の強度を、それぞれ赤、緑、青の三色に対応させ、重ね合わせたものである。それぞれの成分は、二面構造体からの散乱を示す二回反射、木の枝などのランダムな向きをもつワイヤの集合からの散乱を示す体積散乱、滑らかな面からの散乱を示す表面散乱を表している。図2から、実際の地表面の様子と、合成画像を比較すると、図の右上のあたりでは建物が密集しており、このような場所では、壁面と地面からの二回反射、壁面や屋根からの表面散乱が支配的であり、合成画像で同場所は紫(赤と青)で示されている。また図の中央右には裸地が広がっており、合成画像の同場所では、表面散乱を示す青が見られる。そして下部には他の地域よりも木が多く生えており、ランダムな方向に伸びる枝による体積散乱が合成画像では緑色で示されている。このように、地表面の様子をレーダ合成画像で良く捉えていることがわかり、PALSARにより地表面の空間的な把握が容易にできる。

### 2) 時間変化の検出

次に、モンゴルから北に40kmほどの地域の光学写真と、5月、8月に取得された同地域のPALSARカラー合成画像を図3に示す。光学写真からわかるようにこの地域は畑である。5月では画

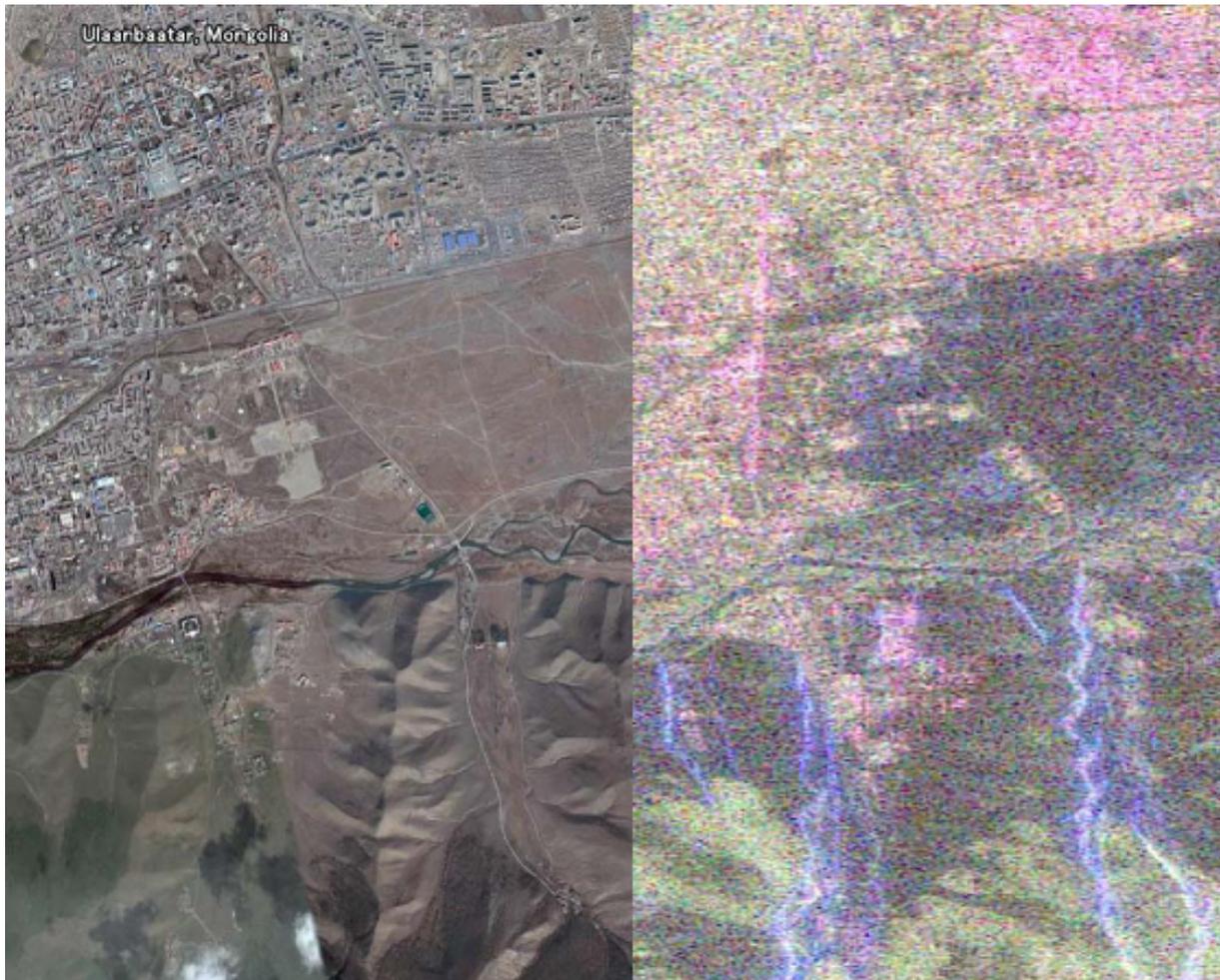


図 2: ウランバートル市街 左:光学写真 右:Pauli 分解による PALSAR カラー合成画像

像の中心部は暗いが、8月では同じ場所で緑色、すなわち植生からの反射が強く見られる。航空写真で見られる畑の形と、8月の合成画像で反射が強い場所の形が良く一致することから、この反射は畑の作物からのものであると推定される。このことから PALSAR によって5月に取得されたデータと、8月に取得されたデータを比べることで、地表面状態の時間変化を容易に把握できる。

これまで、PALSAR による地表面の時空間変化を観察した。PALSAR で観測する偏波情報は、地表面の形状や、誘電率、植生などに影響を受けるから、受信データはそれらの情報を含んでいる。従って受信データに適切な解析を行うことでそれらの情報を定量的に抽出できる可能性がある。以下では例として、偏波 SAR による地表傾斜推定と土壤水分率推定を紹介する。

### 3) 傾斜推定

偏波 SAR データを解析することで得られるパラメータの一つにオリエンテーションアングルシフト  $\theta$  と呼ばれるものがあり、それは以下の式で表される (2)。

$$\tan \theta = \frac{-\tan \omega}{-\tan \gamma \cos \phi + \sin \phi}$$

ここで  $\omega$  はアジマス方向の斜度、 $\gamma$  はレンジ方向の斜度、 $\phi$  はマイクロ波入射角である。このことから、オリエンテーションアングルシフトは地形に大きく影響されることがわかる。解析によって得られたオリエンテーションアングルシフト  $\theta$  を図4に示す。図の地域は、ウランバートルから北に 20km ほどの山間部であり、複雑な地形をしている。光学写真とオリエンテーションアングルシフトを比べると、地形に応じてオリエンテーションアングルシフトも規則的に変化している様子がわかる。このことから、偏波情報を用いて地形の

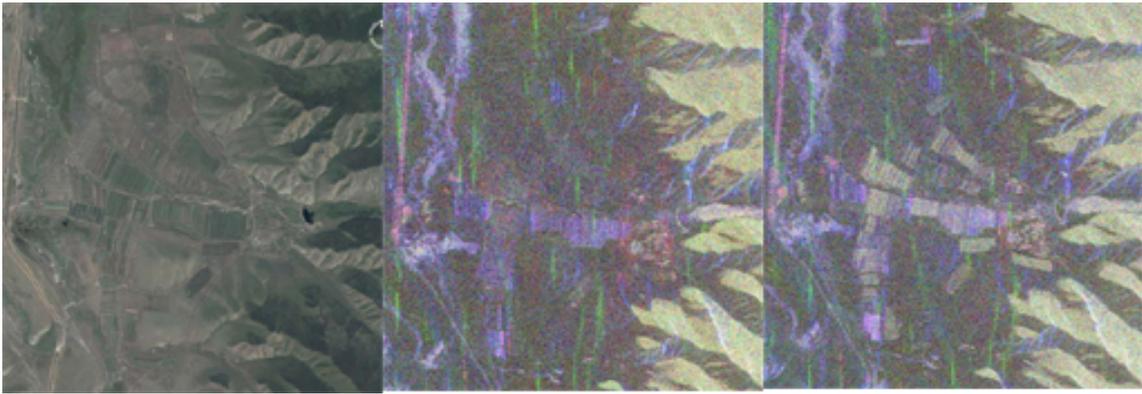


図 3: ウランバートル北の畑 上:光学写真 左下:5月に取得された PALSAR カラー合成画像 右下:8月に取得された PALSAR カラー合成画像

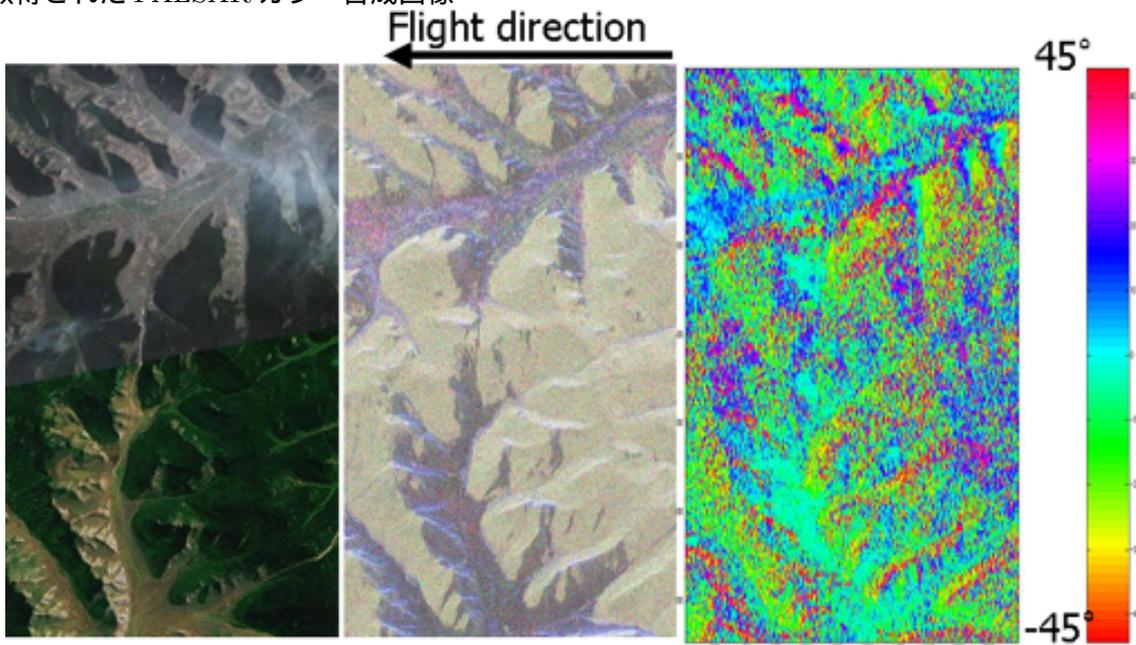


図 4: ウランバートル北の山間部 左:光学写真 中:PALSAR カラー合成画像 右:オリエンテーションアングルシフト

変化を定量的に推定できる可能性があることがわかる。

#### 4) 土壌水分率推定

また、偏波を解析することで土壌水分率の推定を行う研究も盛んに行われており、様々な手法が提案されている。そのうちの一手法(3)により推定された土壌水分率を図5に示す。図は仙台市東部の海岸に近い蒲生地区の水田地域である。図で黒く塗りつぶされている箇所は、この手法を適用できない散乱状態となっているため、黒でマスクをしている。図5を見てわかるように、マスクされている部分は多い。現在提案されている手法では、良い精度で水分率の推定を行えるものもある

が、誘電率、植生、表面粗さなどの面で適用範囲に制限がある。我々はPALSAR観測と同期して、地中レーダ(GPR)による深度20mまでの地下水計測、TDRによる土壌誘電率の計測を行っている。GPRでは地中に電磁波を送信し、誘電率の違う層からの反射を見る。これにより地下水の深さ、分布を調べることが出来る。これらのデータをPALSARによって推定された土壌水分率と比較し、その手法の評価を行う予定である。

謝辞

本研究で利用しているPALSARデータは独立行政法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)より、Pi-SARデータはJAXAと独立行政法人情報通信研

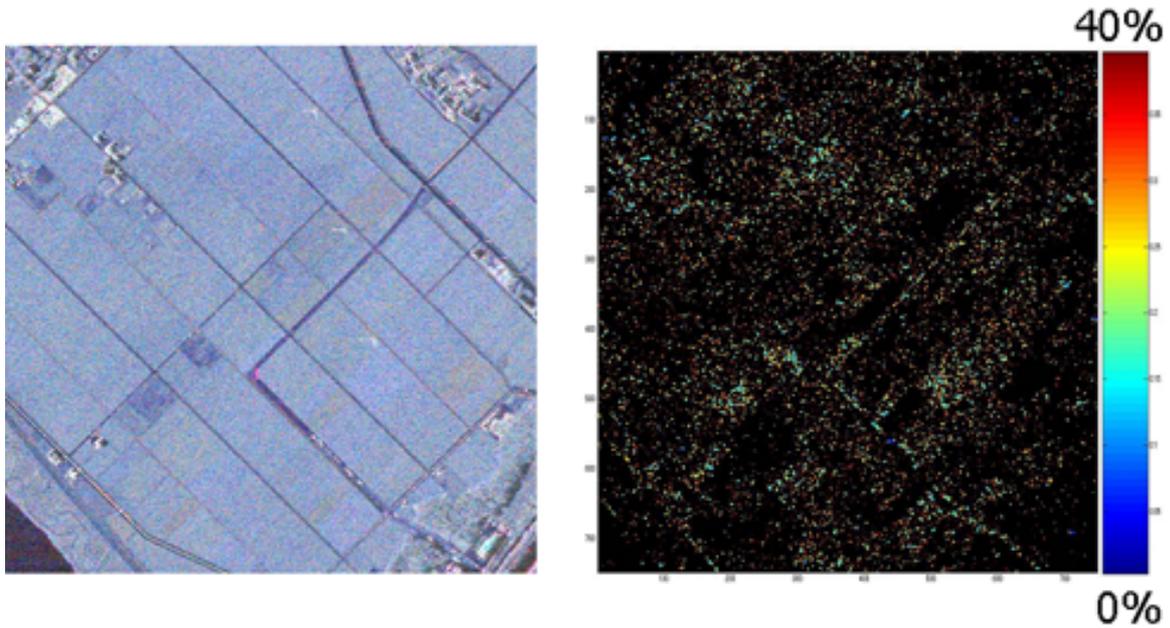


図 5: 仙台東部蒲生地区の水田 左:Pauli 分解によるカラー合成画像 右:土壌水分率推定値

究機構 (NiCT) より提供していただいている。

キーワード : 偏波、PALSAR、土壌水分率

参考文献

- [1] JAXA ホームページ, <http://alos.jaxa.jp/>
- [2] Jong-Sen Lee, "Polarimetric SAR Data Compensation for Terrain Azimuth Slope Variation", IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, Vol.38, No.5, September 2000, pp2153-2163
- [3] Irena Hajnsek, "Inversion of Surface Parameters From Polarimetric SAR", IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, Vol.41, No.4, April 2003, pp727-744

# 昨今のモンゴル事情について

特定非営利活動法人 リ・アース 原 田 幸 希

## 1. はじめに

モンゴルの昨今の状況は、まさにビル建設ラッシュの様相を呈しています。町中でビル建設が昼夜行われ、真新しいビルやホテルあるいはマンションが建設されています。中央広場にもモンゴルのシンボルである、大きなチンギス・ハーンの像が完成しました。日本大使館付近には、大きな外国資本のホテルも順次建設中であり、また、日本資本の JAPAN TOWN と外国資本のマーシャルタウンも建設中です。昨年、初期分譲した JAPAN TOWN の分譲マンションは売り出しと同時に完売したということです。

それに伴い、市内の地価も上昇し、ウランバートル市内は土地不足になっています。

昨年の8月にもウランバートルを訪れ、たくさんのモンゴルサイドの協力者と日本とモンゴルのこれからのパートナーシップに関して、意見交換を致しました。とにかく、旧体制から現在の形に移行してまだ、10数年であるモンゴルは、あらゆる分野において、物資が自国にて生産できる状況には、まだまだほど遠く、生活必需品や食料をはじめ、ほとんどの物資を輸入に頼っている状況です。また、前段で紹介したビル等の建設技術者もモンゴル国内にはほとんどおらず、中国からの現場技術者の流入によって対応している現状があります。

昨年10月には大阪にて、モンゴルと日本の首脳間において第二次段階の日本とモンゴルのさらなる交流が約束されたところです。その中で主要なテーマは、やはりモンゴル自国におけるあらゆる物資の生産体制の確立、技術者の育成、社会資本の整備、また、それらのハードとソフトの両方に関する日本側の協力です。また、モンゴルサイドはモンゴル国内における日本による地下

資源の利活用について言及しました。第一次産業的技術の移入に関しては、幾人かのモンゴル政府関係者や業界関係者等とも協議しましたが、気候風土が類似している北海道との交流を望むとの意見が多数あげられました。日本側においても、北海道において、モンゴルに関する研究や交流をされている方はかなりいらっしゃるようです。そういう前提の中での交流をする形が確立していけば、日本とモンゴルの関係を深めるという意義において、日本とモンゴル国両方にとってメリットがあると考えています。

ただ、皆様もお気づきだとは思いますが、モンゴルに日本から飛行機に乗り、空港に降りたって、まず、どう感じられましたでしょうか。空港から町までの道路は、舗装には数多く穴が開いており、車も避けながら通行しなければなりません。石炭を使用した火力発電所の煤煙が低くたなびき、町には整備不良の車が排気ガスをまき散らし、渋滞しています。町周辺の丘には家畜を失い、仕事を求めて地方から集まってきた遊牧民が端材や石炭など燃やし、生活しています。夏であれば多少の風が抜け、汚染された大気も吹き飛ばされますが、風の吹かない冬には、ちょうど盆地のようになったウランバートルには低く、煤煙が立ちこめスモッグを発生させています。

町中を走る道路地下部には旧ソビエト時代に建設された火力発電所から配管された暖房のための熱湯を流す管が埋設されており、その管も老朽化しており、いつ陥没するかわからない状況にあります。

急に都市化したために下水道の問題があります。飲料水を含め、水の汚染がかなり進行しています。ゴミの問題もあります。日本のように分別などせず、ゴミの山にそのまま投棄しています。

## 2. モンゴルとの出会い

私が、所属する特定非営利活動法人リ・アースは、まさに、前段で紹介した火力発電所から配管された暖房のための熱湯を流す管の管理のために設けられたマンホールの中で生活する子供達との出会いから始まりました。マンホール・チルドレン達です。その当時、モンゴル・ウランバートルに飛び、ビデオ『蒼い空』『黒いサンタ』を製作しました。あらゆる不当な格差や差別をなくし、未来に生きる子供達に平和な世界を手渡すために2001年8月23日に設立されました。活動の方法は、音楽、映像などあらゆるメディアを使って最貧困の子供達のあらゆる差別の実情を訴え、支援を呼びかける活動を行っています。ボランティア・スタッフの一人一人がプロデューサーになって、講演やイベントの企画を進めています。

2003年10月には、マンホール・チルドレンの職業訓練センター『ミルクの雨』を設立しました。現在8歳から16歳までの25人の最貧困の子供達がここに通っています。最貧困とは・・・毎日食事を摂ることができなかつたり、親のいない環境にある子供達のことを指します。

子供達は、ここでフェルト・皮工芸やモンゴルの民族音楽・ホーミーを学んでいます。職を身につけることで、将来自立への手助けをするためと、収入を得るためには、つらい仕事しかしてこなかった子供達がここにおいて働くことの喜び、楽しさを理解して欲しかったからです。ミルクの雨命名の理由は、ミルクは子供の成長には欠かせないもの、また、雨は誰にも平等に降り注ぐ天から恵みという意味で名付けました。現在、モンゴル現地で設立したNGO NCCRと連携しながら施設を運営管理しています。

リ・アースでは、この子供達の学費・給食費・交通費などを支援する里親と、毎年行われる新年パーティー・サマーキャンプなどの資金カンパを募っております。また、ミルクの雨では、里親募集の小冊子を配布しております。関心のある方は、

メールに、ご住所・お名前・電話番号を明記の上、ご送信ください。折り返しご連絡、小冊子をお届けします。詳細活動に関しましては、URL <http://www.re-earth.com/>をぜひご覧ください。モンゴルに携わる方々のご協力の形をあわせてお願い致します。

## 3. モンゴルが日本にもとめること

モンゴルといえば、青い空、広大な平原・羊・馬・らくだ・・・星空・心やさしい素朴な人たち、どこか日本の故郷のような感があります。モンゴルにはモンゴルの生活するスピードがあります。のんびりとしたスピードがあります。

モンゴルの生活は、今でも基本的には遊牧民です。自給自足の生活をしています。しかし、ここ数年、特に、都市部では加率的に生活が利便性が要求されてきています。そこに遊牧をやめ、都市に地方から人がかなり流入してきています。貧富の差も拡大しています。まずは、子供達の教育です。国を支える礎は子供達です。きちんとした教育を受けさせなければなりません。次には、仕事です。しかし、実際は仕事がありません。仕組みがありません。基本ができていないのです。私たち日本はモンゴルに対し、日本のいままで作り上げてきた優秀な仕組みを建設していく手助けをしなくてはなりません。

モンゴルサイドは、まず一人でも多くの日本の方にモンゴルを知っていただきたいと言っています。そして、来ていただきたいと。そして、わかっていた上で、協力していただきたいと言っています。モンゴル国内において、様々な形で高尚な研究をなさっている先生方の研究は、これからのモンゴル国の発展のため、また、地球レベルで問題になっている地球温暖化の解決までのプロローグ、持続可能な社会の構築の礎になると考えています。また、そこには人々の生活があり、人が暮らしています。どのような受け入れ方をさせていくのかも考えなくてはなりません。私はそこを、これからプロデュースさせていただけたらと考えています。どうしたら皆様の研究が実

際の仕組みとして、モンゴル国内において形になるのかを、プロデュースさせていただきたいと考えています。すべての形の基本は人の心と心のつながりだと考えます。そうして得られるものが信頼だと考えます。私の役目としましては、その信頼を作る手助けをさせて頂けたらと考えています。トータル的サポートしていきたいと思います。

## 謝 辞

最後に今回、このようなすばらしい場において発言させていただく機会を頂きましたことに関しまして、関係者の皆様に心から謝辞を申し上げます。これからは、逆にお願いばかりではなく、気軽にどのような案件であっても相談して頂ければ誠心誠意対応させていただきます。ありがとうございました。最後に何点かモンゴルの写真を紹介させていただきます。ご静聴ありがとうございました。

## 写 真



# 世界の乾燥地から見たモンゴルの気候-生態システム: その研究の潮流と展望

鳥取大学・乾燥地研究センター 篠田雅人

## 1. 生態気候学の事始

大気-陸域相互作用が気候変動に及ぼす影響に関する仮説を、初めてモデル研究により示したのは Charney (1975)である。これは、サハラ砂漠南縁のサヘルにおけるアルベドを変えたときのモデル大気の感度実験である。彼以降のモデル研究から、干ばつや砂漠化に起因する地表面状態の変化がその相互作用によって強められる(正のフィードバック)可能性が示されてきた(図1中)。さらに、モデル研究は陸面過程のより現実的な再現を目指し、フィードバックを明示的に扱う気候-生態系結合モデルの時代に入ってきた。このような流れのなかで、ガイア仮説で有名なラブロックらは、単純な0次元エネルギー平衡モデルを用い

近年では、地球表層の物理過程を生態系との関連に重きを置いて捉えようとする潮流も見える。たとえば、Ecological Climatology (Bonan, 2002) や Eco-hydrology というキーワードがついた専門書が出版されている。Bonan (2002)は、気候にとって生態系を大気下部境界条件として静的に捉えるのではなく、両者を同程度に動的に扱う立場をとっている。「ガイア理論についてのチャップマン会議」を開催したことがあるアメリカ地球物理学連合では、2006年から *J. Geophys. Res.-Biogeosciences* というタイトルの学会誌が発刊されたが、この分野への強い関心を窺わせる。

## 2. モンゴルの気候-生態システム

広大なユーラシア大陸は多様な気候と生態系をもつが、モンゴルには生態系にとって極限的な環境である乾燥・寒冷気候を内包している。この極限的な気候・土壌(非生物的)環境にはそれに適応した生態系が存在しているが、それは極限環境の閾値近傍で生じるわずかな気候変動から大きな影響を受けやすい。

モンゴルについて、安成(2003)は遊牧も含めた生態系と気候の相互作用研究(生態気候システム学)の重要性を述べた。モンゴル草原による気候調節機能(負のフィードバック)の一例に示すと(図1下)、

「干ばつ→土壌水分の減少→植被の減少/枯死植被の増加→蒸散の減少/蒸発の減少」であるが、このあと偶発的な降水があれば、「土壌水分の増加→植被の増加→蒸発散の増加→降水の増加」(干ばつの抑制)というプロセスが進む可能性を指摘できる。講演者らはこの仮説のようなプロセスも含めて、干ばつが植生・蒸発散・土壌水分に及ぼす影響を野外実

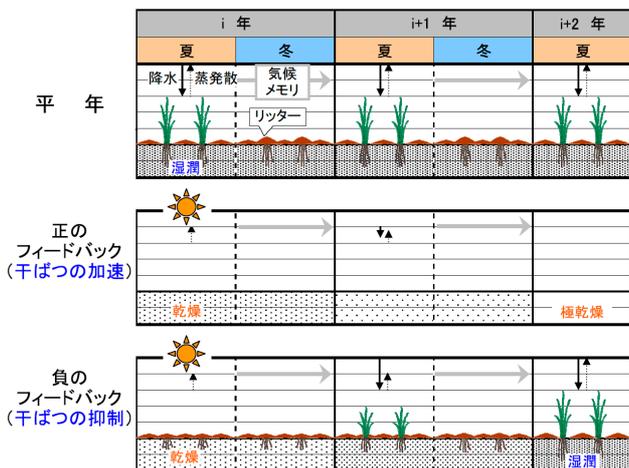


図1 干ばつ状態の加速・抑制(正・負のフィードバック)

上段: 平年の季節変化では、冬季には土壌水分が凍り、リッターが残ることでその状態が翌年まで繰り越される(気候メモリ)。  
中段: 土壌水分・蒸発が減り干ばつが加速される。  
下段: 植生が回復し干ばつが抑制される。

て、生物圏による自動温度調節機能(負のフィードバック)を示した(Watson and Lovelock, 1983)。

験により調べている。

### 3. 気候メモリ

気候メモリを「大気の物理量(気温・水蒸気量・降水量など)における季節変化成分あるいは経年変化成分の偏差を、その発生以降、引き継ぎ、保持する地球表層における大気以外のサブシステム(土壌水分、植生、雪氷、海面など)の働き」と定義する(篠田, 2005)。たとえば、平年より降水が多い、あるいは、少ないという状態が土壌水分として維持されていく現象が降水の経年変化成分のメモリである(図2)。

これまで、乾燥地における土壌水分メモリの地理的な違いを調べてきた(篠田, 2005)。サヘルのような低緯度乾燥地域では、蒸発散が大きいいため、雨季にできた土壌水分の経年偏差が比較的早く消滅するのに対して、中緯度の乾燥地における冬の降水偏差は、積雪メモリ→土壌水分メモリとして、比較的長く維持される。モンゴルでは積雪が小さいため、その春の土壌水分に対する影響は小さい。一方、少雪と冬の低温のため土壌凍結が深く、秋の積雪以前の土壌水分が翌春まで維持される。このような冬の土壌凍結による土壌水分メモリが、最近の数年間続いた夏の干ばつの影響を蓄積する効果を持っている可能性が高い。

### 4. 気象災害の早期警戒システム

モンゴルにおいて、ゾド(寒害)で家畜が餓死するまでの過程のおおもとは天候の平年からの大きな偏差が存在し、「大気大循環→地域的な天候→土壌水分→植生→家畜」というように、影響が図2の上から下へと時差をもって及んでいく。この連鎖現象のメカニズムを解明すれば、上流の現象をモニタリングすることで家畜に影響が及ぶ前に早期警戒が可能となる。このような気象災害の早期警戒システムの構築は、JICAの技術協力プロジェクト「モンゴル国気象予測及びデータ解析のための人材育成プロジェクト」(2005～2008年)のなかで取り組んでいる。

### 5. まとめと提言

現在、気候-生態系間のフィードバックが気候形成にどう影響を及ぼすかといった長期的な視点の研究が注目されているが、この研究のためには、長期観測データと現実味のあるモデル研究を組み合わせるとともに、野外実験などの新手法の開発も必要であろう。モンゴル研究においては、今後、「草原力」と「遊牧知」(白石私信)がキーワードとなるだろう。干ばつなどの外的なインパクトに対する草原生態系の負のフィードバック(草原力)の解明と、草原力を支え・生かす遊牧知の現代科学による検証が肝要である。

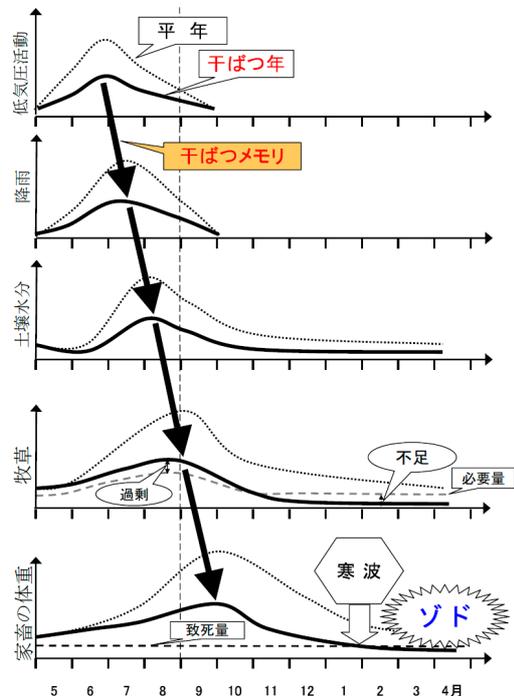


図2 干ばつメモリの波及効果(篠田・森永 2005)

キーワード: 大気-陸面相互作用、干ばつ、ゾド、気候メモリ、早期警戒システム

#### 参考文献

篠田雅人 (2005): 沙漠研究, 14(4) 185-197.  
 篠田雅人・森永由紀 (2005): 地理学評論, 78(13), 928-950.  
 安成哲三 (2003): 科学, 73(5), 555-558.  
 Bonan, G. (2002): Ecological Climatology. Cambridge University Press, Cambridge.  
 Charney, J. G. (1975): Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 101, 193-202.  
 Watson and Lovelock (1983): Tellus, 35B, 284-289.

# モンゴルの土地被覆改変による気候応答の研究

佐藤 友徳

東京大学気候システム研究センター・日本学術振興会特別研究員

## 1. はじめに

モンゴルや中国北部に代表される北東アジアの乾燥・半乾燥地域は、近年年平均気温の上昇が顕著であり(Yatagai and Yasunari, 1994), 地球温暖化の影響を強く受けていると考えられる。しかし、冬季の気温は顕著な上昇傾向にあるにも関わらず、夏季の気温は 1990 年以前には有意な上昇は見られない。また、降水量の長期変動に関しても、年平均および夏季平均ともに顕著なトレンドは見られない。

図 1 にモンゴル南東部の Tooroi における月平均した 7 月の日平均気温, 日最低気温, 日最高気温の経年変化を示す。ただし, 1992 年以前は日最高最低気温計による観測であるのに対し, 1993 年以降は, 1 日 8 回の観測データの中から日最高・最低気温を求めている。日最高気温には長期的な変化は見られないが, 日最低気温は 1990 年付近から急激に上昇しており, その結果として, 日平均気温も上昇していることが分かる。同様の特徴はモンゴルの各地で見られ(Sato and Kimura, 2007), 1990 年から 1991 年にかけてのモンゴルにおける社会体制の変化と密接に関連している可能性がある。モンゴルや内モンゴルでは古くから放牧が営まれてきたが, 市場経済の導入や家畜の私有化により, 家畜頭数は都市部を中心として短期間で急激に増加している(Sugita et al., 2007). Eastman et al. (2001)で示されているように, 放牧活動は地域気候に影響を及ぼしうることから, 北東アジア地域における気候の変化は地球温暖化に代表される地球規模の気候変動のみならず, 放牧圧の増加

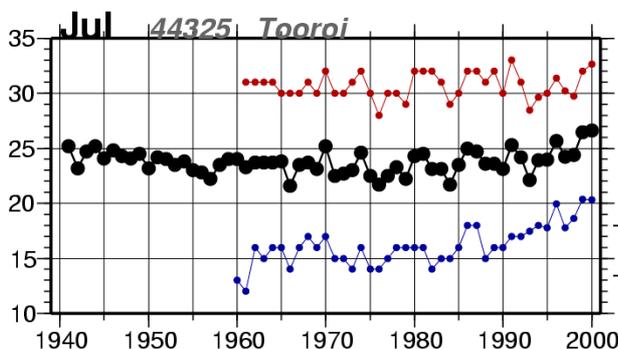


図 1: Tooroi (44.93°N, 96.77°E)における月平均した日平均・日最高・日最低気温の経年変化(7月)。

による地表面状態の変化という側面からも評価する必要がある。一般には, これらの影響が混在した状態が観測されるため, これらを分離することは困難である。本研究では, モンゴルを対象とした領域気候モデルの実験から, 特に土地利用変化の影響に着目し, 土地被覆の変化が地域気候にどのような影響を与えるのか調べることを主たる目的とする。

## 2. 方法

領域気候モデル TERC-RAMS(Sato and Kimura, 2005)を用いて 1994 年から 2003 年の 6, 7, 8 月を対象とした実験を行った。各年の 5 月 29 日 00Z から 9 月 1 日 00Z までを計算対象とし, 10 年分, 計 10 回の積分を行う。計算領域は 105°E, 40°N を中心とした 150km メッシュで格子数 80×60 の第一領域に, 104°E, 47°N を中心とし 30km メッシュで格子数 102×57 の第二領域を埋め込んだ。第一領域の側面境界および初期値には 6 時間毎の NCEP/NCAR 再解析データ(Kalnay et al., 1996)を用いる。今回の解析はモンゴルを中心とした 30km メッシュの第二領域について行った。積雲対流パラメタリゼーションには Arakawa-Schubert type を用いる(Arakawa and Schubert, 1974). TERC-RAMS によるモンゴルの降水量の再現性, 及び温暖化条件下における降水特性については, Sato et al. (2007)に詳しく述べられている。

ここでは, 土地被覆改変の影響を調べるために, 後に示す「標準実験」と「砂漠化実験」の 2 種類の感度実験を行う。標準実験では植生分布のデータとして, USGS による Global land cover characterization (Loveland et al., 2000)を使用した(図 2)。さらに土地被覆改変による影響を調べるための実験として, モンゴルにおける草原を半砂漠に, 半砂漠を砂漠に変更した計算を行う(以後, 砂

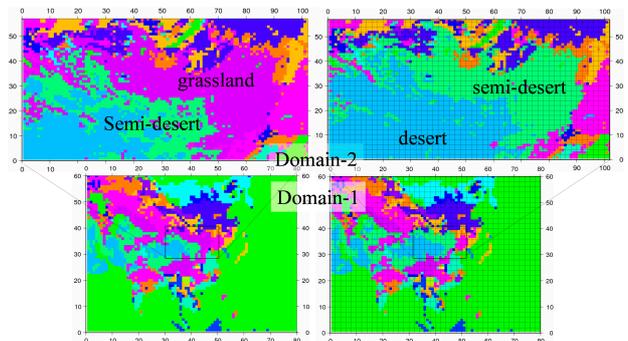


図 2: 標準実験(左)と砂漠化実験(右)における植生分布。

漠化実験). それぞれの実験における土壌水分の初期値は, USGS の植生を用いて, 水平一様な土壌水分分布から一ヶ月間の慣らし計算を行った後のものを用いることとした. 標準実験と砂漠化実験を比較することで, 地表面状態が変化したことによる気候への応答を調べる事が可能である. 現実的には, 草原や沙漠の分布は長い年月をかけて徐々に変化すると考えられるが, 植生を動的に扱った実験では現在の気候における草原の役割を評価することは困難である. Xue(1996)では, GCM の植生分布を変更した感度実験を行い, 降水分布の違いを評価しているが, 積分期間は一年であるため, 複雑な大気-陸面相互作用の一部を評価したにすぎない. それに対し, 本研究の実験では, 過去 10 年分の気象場をモデルの境界値として用いることにより, より多くの気象条件下において陸面と大気との相互作用を検討することが可能である.

### 3. 結果

図3に6-8月の気温及び降水量の差(砂漠化実験-標準実験)を示す. 平均気温はモンゴルの全域で上昇することが分かる. 温度上昇の程度は  $0.4^{\circ}\text{C}$  未満であり, Eastman et al. (2001)や Xue(1996)の結果とおおよそ整合的である. ただし, 温度上昇は空間一様ではなく, 西部の山岳で  $0.4^{\circ}\text{C}$  と大きいのに対し, 北東部では温度上昇は非常に小さい.

降水量の変化はさらに複雑でモンゴルの中央

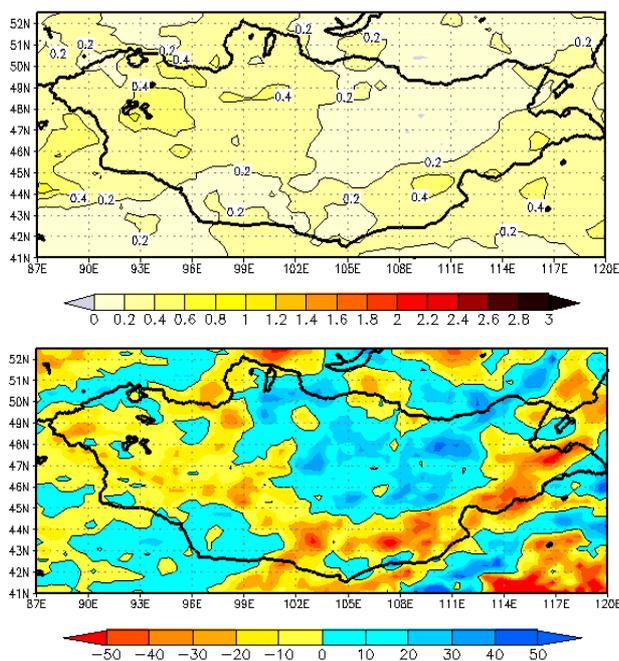


図3: 土地被覆変化による6, 7, 8月の気温(上)および降水量(下)の変化. 1994年から2003年の10年分の平均. 砂漠化実験-標準実験として表す.

から北部にかけては6-8月で30mm程度の降水増加が見られた. 西部や南東部ではこれとは逆に降水量の減少が見られる. 降水の変動パターンは Xue(1996)では沙漠に置き換えた領域全体で10-20mm/月程度の減少を示しており, 今回の実験によるものとはかなり異なっている. 対象とした年の違いや, モデルの構成(パラメタリゼーションや力学フレーム)の違いによるところが大きいと考えられる.

次に年ごとの気温・降水量の差を図4に示す. ここではモンゴルの大部分を覆う  $95-115^{\circ}\text{E}$ ,  $45-50^{\circ}\text{N}$  の範囲で領域平均した値で評価を行った. 気温はほとんどの年の気象条件下において,  $0.7^{\circ}\text{C}$  未満の上昇があることが分かった. しかし2001年~2003年の気象条件下では気温の差は小さく, 2002年では砂漠化実験の方がわずかに低い平均気温を示した.

領域平均した降水量の差は非常に複雑である. 1994, 1995, 1998, 2003年では土地被覆変化によって6, 7, 8月の降水量が10-20mm減少するが, それ以外の年では, 草原を半砂漠に置き換えたにも関わらず, 降水量は5-30mm程度増加することが示された. 図は示さないが, 気温の差, 降水の差ともに, それぞれの年において図3とは異なる空間パターンを示しており, 土地被覆変化が降水に与える影響は非常に複雑であることが示唆される.

### 4. 考察

前述のように地球温暖化による北東アジア地域の気温上昇はIPCC報告(Houghton et al., 2001)に使用されているすべてのモデルで予測されているのに対して, 降水量の変化は依然としてモデル

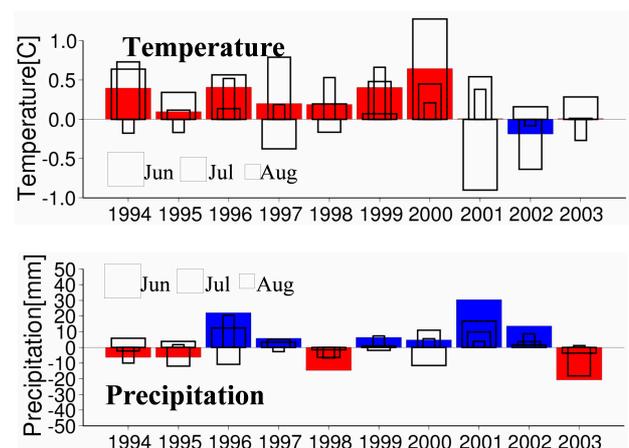


図4:  $95-115^{\circ}\text{E}$ ,  $45-50^{\circ}\text{N}$  の領域で平均した月平均気温(上)および降水量(下)の土地被覆変化前後の差(砂漠化実験-標準実験). 影部は6, 7, 8月平均を表す.

間のばらつきが非常に大きいため、統一的な見解が得られていない。さらに Endo et al. (2006) による 1960 年から 1998 年の降水量データの解析からも、夏季降水量が増加している地点と減少している地点が混在することが示されている。Sato and Kimura (2006) では地球温暖化による気温や降水量の変化を気象研究所の GCM (Yukimoto et al., 2001) を境界値として領域気候モデルを用いた力学的ダウンスケーリング手法により調べた。それによると、2070 年代の 6-8 月の気温上昇は 1990 年代に対してモンゴル全域で 2.5°C 以上であることから、地球温暖化は土地被覆改変による気温上昇に比べてはるかに大きなインパクトがあると考えられる。このことから、近年の夏のモンゴルに見られる気温上昇の要因として地球温暖化による影響が支配的であると考えられる。しかしながら、図 1 に示したような急激な気温上昇に関しては、地球温暖化によるものだけでは説明が困難であり、都市化による影響等も含め、引き続き検討が必要である。

一方、Sato and Kimura (2006) や Sato et al. (2007) で示された地球温暖化に起因する降水量の変化量は、今回の実験による変化量とおよそ同程度であった。モンゴルにおける夏季の降水系は、総観規模擾乱や上空のトラフなどと関連していることが多い。土地被覆改変によって降水量が減少した年は、もともと降水量の多い年であることが多く、総観規模擾乱が活発であった可能性が高い。Perlin and Alpert (2001) は数値実験によって地表面が湿潤である場合のほうが、日中の CAPE (対流有効位置エネルギー) が増加することにより、擾乱の通過時に強い降水をもたらすことを示した。逆に乾燥した地表面条件では、擾乱に伴う対流性の降水が減少することが分かっている。今回の計算でも擾乱の通過時に、降水量が大きく減少することが確認でき(図 5)、砂漠化が陸面と総観規模擾乱の相互作用を弱めていることが示唆される。一方

で、標準実験で弱い降水が起こっている事例において、砂漠化実験では降水が強化されるという例もあることから、弱いトラフを伴った日変化する降水システム(Kawase et al., 2007)が砂漠化によって強化されるという可能性もある。これらについては引き続き調査する必要がある。

砂漠化後に気温がほとんど変化しないあるいは低下する年月(例えば、2001 年 6 月)では、対流活動が活発になることで、雲が太陽放射を遮断し地上気温が上昇するのを妨げている、あるいは、土壌が一時的に湿潤となり顕熱の増加を妨げていた可能性がある。土地被覆改変による大気への応答にはこのような正と負のフィードバックを考慮することができ、有意なシグナルの検出を困難にしている要因の一つであると考えられる。

Kalnay and Cai (2003) は全球再解析データと地上観測データの両方を解析することにより、温暖化による気温変化と都市化に代表される局地的な土地利用変化による気温変化の分離が可能であることを指摘した。この手法の適用限界については様々な議論があるが(Vose et al., 2004; Trenberth, 2004), モンゴルについても同様の解析を行うことにより、観測・解析データからも、モンゴルの気温変化についての検討を行う必要があることは言うまでもない。

### 5. まとめ

モンゴルの草原を対象として、土地被覆の違いに起因する夏の気温・降水の違いを数値実験によって評価した。気温は砂漠化を想定した地域全体で 0.4°C 未満の上昇が見られた。これは地球温暖化による気温の上昇に比べてかなり小さく、この地域における近年の気温上昇として広域の土地被覆変化による影響は小さいと考えられる。降水の増減は、10 年分の平均でみると、モンゴル中央や北部で微増、西部や南東部で減少することが分

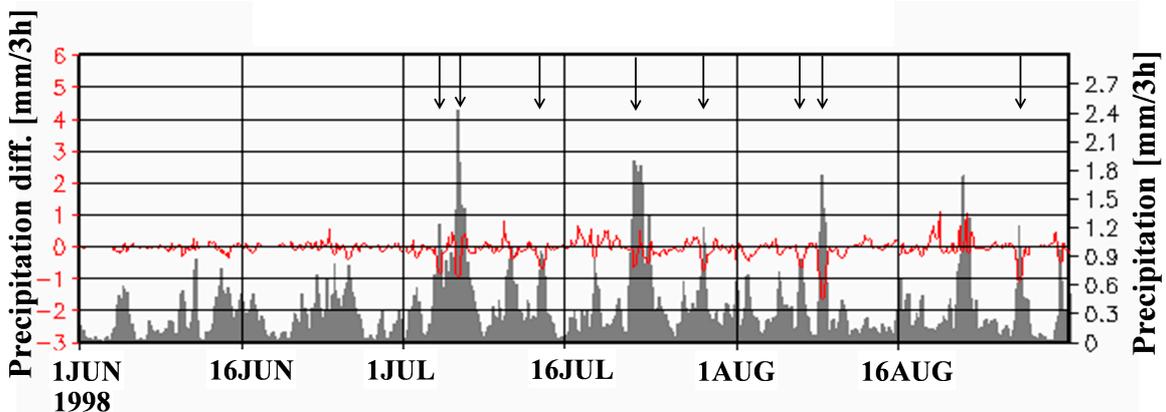


図 5: 95-115°E, 45-50°N の領域で平均した降水量の時系列(影棒, 右軸)と土地被覆改変前後の降水量の差(実線, 左軸). 降水量の差は砂漠化実験-標準実験として表す. 1998 年 6 月 1 日~8 月 31 日. 矢印は土地被覆改変後に降水量が 0.5mm/3h 以上減少した事例を表す.

かった。土地被覆変化が降水に与える影響は、対象とする年の気象条件と関連していることが示唆された。具体的には、擾乱通過時の降水量が大きく減少することにより、もともと擾乱通過が多い年には、夏の降水量が減少する傾向にあると思われる。このように、モンゴルにおける大気-陸面相互作用は複雑であり、より多くの事例を扱う必要があると考えられる。

#### 参考文献

- Arakawa, A. and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674-701.
- Eastman, J. L., M. B. Coughenour, and R. A. Pielke Sr., 2001: Does grazing affect regional climate? *J. Hydrometeor.*, **2**, 243-253.
- Endo, N., T. Kadota, J. Matsumoto, B. Ailikun, and T. Yasunari, 2006: Climatology and trends in summer precipitation characteristics in Mongolia for the period 1960-1988. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 543-551.
- Houghton, J. T. Ding, Y., Griggs D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A., 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, B. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne, and D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- Kalnay, E. and M. Cai, 2003: Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, **423**, 528-531.
- Kawase, H., F. Kimura, and T. Sato, 2007: Diurnal cycle of summertime precipitation in Mongolia. *Mon. Wea. Rev.*, in revision.
- Loveland, T. R., B. C. Reed, J. F. Brown, D. O. Ohlen, J. Zhu, L. Yang, and J. W. Merchant, 2000: Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1-km AVHRR data. *Int. J. Remote Sensing* **21**, 1303-1330.
- Perlin, N. and P. Alpert, 2001: Effects of land-use modification on potential increase of convection: A numerical mesoscale study over south Israel. *J. Geophys. Res.*, **106**, 22621-22634.
- Sato, T. and F. Kimura, 2005: Diurnal cycle of convective instability around the central mountains in Japan during the warm season. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 1626-1636.
- Sato, T. and F. Kimura, 2006: Regional climate simulations to diagnose environmental changes in Mongolia. *Bulletin of the Terrestrial Environment Research Center, Univ. of Tsukuba*, **7**, 59-69.
- Sato T., F. Kimura, and A. Kitoh, 2007: Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. *J. Hydrol.*, **333**, 144-154, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.023.
- Sato, T. and F. Kimura, 2007: Comparative study on the land-cover change and global warming impacts on regional climate in Northeast Asia. *Proceedings of the 19th Conference on Climate Variability and Change*, San Antonio, TX.
- Sugita M., J. Asanuma, M. Tsujimura, S. Mariko, M. Lu, F. Kimura, D. Azzaya and Ts. Adyasuren, 2006: An overview of the Rangelands Atmosphere-Hydrosphere-Biosphere Interaction Study Experiment in northeastern Asia (RAISE). *J. Hydrol.*, **333**, 3-20.
- Trenberth, K., 2004: Rural land-use change and climate. *Nature*, **427**, 213.
- Vose, R. S., T. R. Karl, D. R. Easterling, C. N. Williams, and M. J. Menne, 2004: Impact of land-use change on climate. *Nature*, **427**, 213-214.
- Yatagai A. and T. Yasunari, 1994: Trends and decadal-scale fluctuations of surface air temperature and precipitation over China and Mongolia during the recent 40 year period (1951-1990). *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 937-957.
- Yukimoto, S., A. Noda, A. Kitoh, M. Sugi, Y. Kitamura, M. Hosaka, K. Shibata, S. Maeda, T. Uchiyama, 2001: The new Meteorological Research Institute coupled GCM (MRI-CGCM2) – model climate and variability. *Pap. Meteorol. Geophys.*, **51**, 47-88.
- Xue, Y., 1996: The impact of desertification in the Mongolian and the Inner Mongolian grassland on the regional climate. *J. Climate*, **9**, 2173-2189.

# 北東アジア-シベリア間の夏季降水量 振動モードとロスビー波

東京大学気候システム研究センター 岩尾 航希 ・ 高橋 正明

## 1. はじめに

モンゴル・内モンゴルを含む北東アジア域では1990年代に夏季降水量が多く、その後1999年から4年連続で降水量の少ない夏が続いた。この地域では、年間の降水が夏季に集中しているため[Yatagai and Yasunari, 1995]、夏季降水量が地表面の気候・環境に与える影響は大きく、この時の干魃がその後の季節に生じたゾド[森永・篠田, 2003]や黄砂現象の増加[Kurosaki and Mikami, 2003]など自然災害と、密接に関係していることが考えられている[篠田・森永, 2005]。

Iwao and Takahashi [2006]では、夏季降水量の経年変化に北東アジア・シベリア間の振動モードがあり、このモードには亜熱帯ジェット上とユーラシア大陸北部を西から伝播してくるロスビー波が関係していることを示した。またIwasaki and Nii [2006]は、モンゴルの雨期には7月中旬にしばしば中休みが観測され、亜熱帯ジェット上を伝播するロスビー波が関与していることを示した。特徴の一致から、これらの現象は関連していることが考えられる。

亜熱帯ジェット上やユーラシア大陸北部を伝播するロスビー波は夏季ユーラシア大陸上を伝播する主要な波動としてよく知られており[Enomoto et al., 2003; Nakamura and Fukamachi, 2004; Sato and Takahashi, 2006]、これまで別々に議論されることが多かった。しかしながら、北東アジア・シベリア間に降水量の振動モードが存在することは、これらの領域を伝播するロスビー波同士が関係性を持っていることを示唆する。

本研究では、Iwao and Takahashi [2006]の延長として、北東アジア・シベリア間の夏季降水量振動モードのメカニズムを明らかにすることを目的とする。まず、

亜熱帯ジェット上とユーラシア大陸北部上空を伝播するロスビー波同士の関係性を調べ、そしてその関係において、夏季降水量の振動モードがどのように発現するのか、合成解析を用いて明らかにする。

## 2. データと解析方法

降水量に関しては、National Climatic Data Center (NCDC) 提供の日降水量データを用いた。北ユーラシアにおいて比較的欠損値の少ない観測点を均一に39地点選び、1961-2004年にわたり整備した。

気象場についてはECMWF・ERA40の6時間間隔データを用い、それから長周期の偏差場データを作成した。具体的には、まず季節変化する日々の気候値を、入手可能な全ての年(1958-2002年)の各日について平均し、それに31日の移動平均をかけることにより定義した。そして日々データの気候値からの偏差に対して10日のlow-pass filterをかけ、長周期偏差場データを算出した。解析期間は両データがカバーする1961-2002年の夏季とする。

## 3. 結果

### 3.1 夏季降水量の振動モード

Iwao and Takahashi [2006]では格子データを用いて7月降水量の経年変化(1979-2004年)に北東アジア・シベリア間の振動モードがあることを示した。この振動モードを長期間(1961-2004年)の定点観測データでも確認するため、39観測点の夏季(JJA)平均降水量の経年変化にEOF解析を行った。図1は得られた第1モードの空間パターンとその経年変化を示している。正の値を持つ観測点がモンゴルから主にその南東に広がっており、負の値を持つ観測点はシベリアに分布している。つまり北東アジア・シ

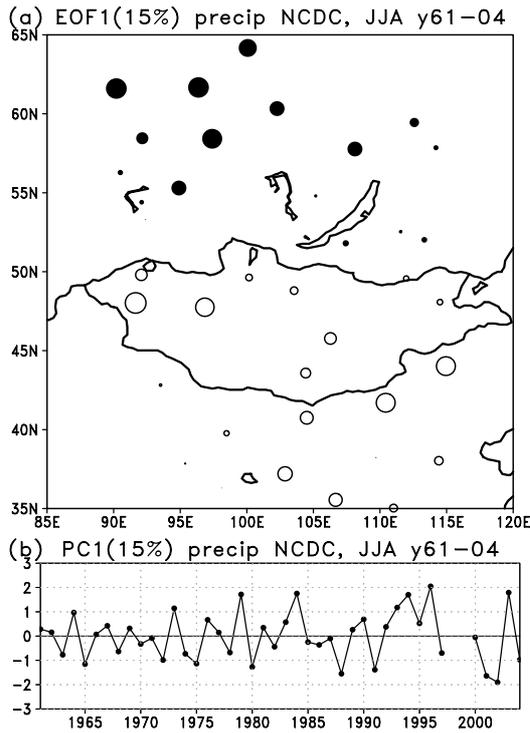


図 1: 北ユーラシア 39 観測点において、夏季(JJA)降水量の経年変化(1961-2004)に EOF 解析を行った結果得られた、第 1 モードの(a)空間パターンと(b)時間係数。(a)において○と●がそれぞれ正、負の値を示している。

ベリア間の振動パターンは長期間の定点観測データにも明瞭に見られることが確認できた。またこのモードの時系列は 1990 年代中盤に大きく、2001, 2002 年には非常に小さい値を示している。これらの結果は Iwao and Takahashi [2006] と整合的な結果となっている。

### 3. 2 夏季ユーラシア大陸上の長周期変動

夏季亜熱帯ジェット上とユーラシア大陸北部上層にはロスビー波の導波管構造が確認できる(図省略)。この領域を伝播する準定常的なロスビー波同士の関係を明らかにするため、ユーラシア大陸上層における 40N と 60N の南北風の長周期変動  $v'$ (30-150E, 40 60N, 200hPa, JJA 1961-2002) に対して EOF 解析を行った。

図 2 は得られた EOF 第 1 モードと第 2 モード(VEOF1 と VEOF2) の空間パターンを表している。もしこれら緯度帯を伝播するロスビー波が完全に独立

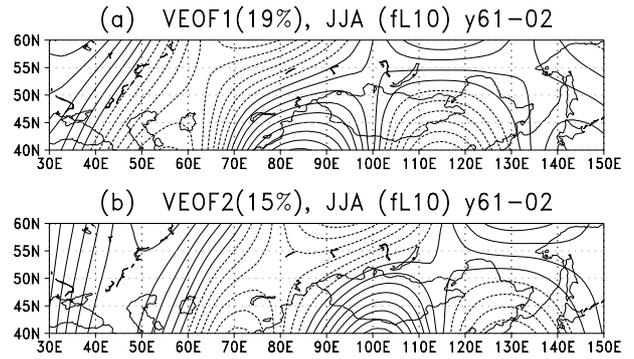


図 2: ユーラシア大陸上層の二つの緯度帯における南北風  $v'$ (30-150E, 40 60N, 200hPa)の、1961-2002 年夏季(JJA)における長周期変動に対して EOF 解析を行った結果得られた、(a)第 1 モードと(b)第 2 モードの空間パターン。

ならば、それらロスビー波は別々のモードとして抽出されることが考えられる。しかし、ここで抽出された VEOF1 と VEOF2 はどちらも両緯度帯に波列パターンを有しており、これら緯度帯を伝播するロスビー波同士が関係を持っていることを意味している。VEOF1 と VEOF2 のどちらのパターンにおいても、40N と 60N に沿った東西波長は経度にしてそれぞれ  $60^\circ$  と  $80^\circ$  となっている。この値は、ロスビー波の理論から導いた波数と矛盾しない。また、両緯度帯の偏差はユーラシア大陸東部で南北逆位相になっており、南北で波長が違うので西に行くほど位相が近くなっているのが分かる。さらに、VEOF2 は VEOF1 よりも 1/4 波長東にずれたパターンをしている。つまり、これら二つのモードで東西の位相のずれを説明する。

VEOF1 と VEOF2 から再構成された南北風の偏差場に対して時空間スペクトル解析を行った結果(図省略)、46 日周期の定在波と 18 日周期の東進波に強いピークが見られた。波長構造を含め、これらの特徴は Terao [1998]と整合的な結果を示している。

VEOF の時系列(VPC1 と VPC2)を用いて、降水量の振動モードと関係する VEOFs の位相を特定する。図 3 は北東アジアで降水量が多くシベリアで少なかった年(図 3a)と、逆に北東アジアで少なくシベリアで多かった年(図 3b)において、VPC1 と VPC2 を位相平面上にプロットしたものを、ガウス分布からの確率密度の偏差として示したものである。プロットした年は、

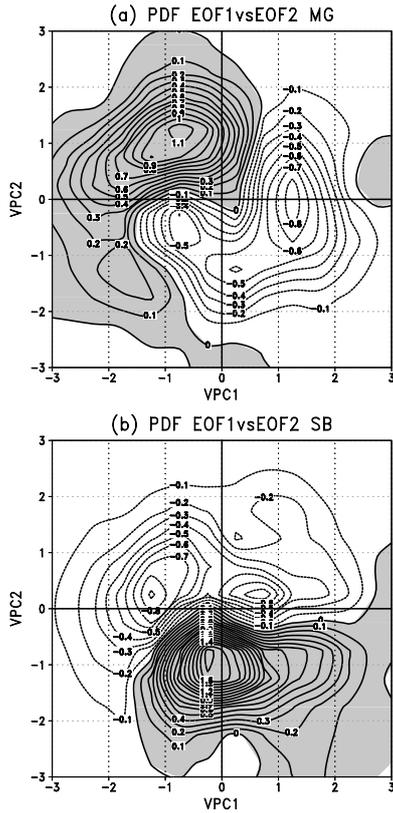


図 3: 降水量が(a)北東アジアで多くシベリアで少なかった 7 年と、(b)北東アジアで少なくシベリアが多かった 7 年において位相平面上にプロットした、VPC1 と VPC2 の確率密度分布の、ガウス分布から偏差(%)。座標は VPC1 の標準偏差で基準化している。

夏季平均降水量に対して EOF 解析を行い得られた時系列(図 1b)を基に、上位と下位の 7 年間で定義した。北東アジアで多雨であった年においては第 4 象限で、シベリアで多雨であった年には第 2 象限と第 3 象限の間で確率密度が高くなっているのが分かる。このことは、特定の位相を持つ定常的なロスビー波が降水量の南北振動に関与していることを示唆している。

### 3. 3 降水量振動パターンを伴う気象場の偏差

降水量の振動パターンを形成する大気の偏差場を調べるため、図 3 で確率密度が高かった位相を持つイベントを合成し解析を行う。合成するイベントは、VPC1 と VPC2 が第 4 象限、もしくは第 2 と 3 象限間の位相を持ち、その振幅(図 3 の中心からの距離)が 1 以上、更にこの二つの条件が 5 日以上満たされているイベントとした。その結果これらの位相でそれぞれ

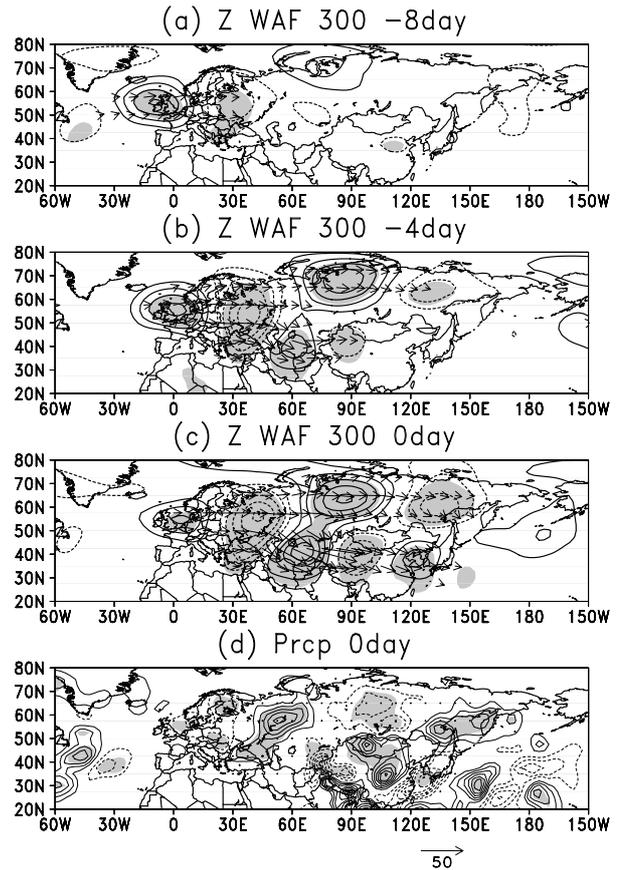


図 4: VMG における、300hPa ジオポテンシャルハイトの偏差(20m 間隔等値線) と wave activity flux (ベクトル) の(a) -8、(b) -4、(c) 0 日における分布と(d) 0 日における降水量の偏差(0.25mm/day 間隔等値線)。陰影は 95%以上で有意な領域。

36 と 33 のイベントが選択された。ここで合成された偏差場を以後それぞれ VMG と VSB と呼ぶことにする。

図 4 には、VMG における 300hPa のジオポテンシャルハイトと wave activity flux [Takaya and Nakamura, 2001] の分布を VPC の振幅が最大となる 8 日前から 0 日まで 4 日おきに示している(図 4a-c)。-8 日にはイギリス周辺と東欧にあったジオポテンシャルハイトの偏差が、-4 日には東に伝播すると共に南北の導波管上に分岐している。そして、南北でロスビー波の東西波長が違うので、そのまま更に東に伝播することにより南北で位相がずれ、0 日にはユーラシア大陸東部で逆位相の偏差が現れているのが分かる。この時、降水量にも逆符号の偏差が北東アジア・シベリア間に確認できる(図 4d)。同様な偏差の発展は VSB にも見られ(図省略)、この場合もやはり偏差の発端はイギリス周辺に見られた。夏季イギリス周辺ではブロッケン

グが頻繁に発生することが知られており[e.g., Pelly and Hoskins, 2003]、実際この領域では長周期変動の大きい分散が確認できた(図省略)。従って、ここで発生するブロッキングがロスビー波の励起源として寄与している可能性が考えられる。しかし、図 3 において VMG と VSB の位相が 180 度逆になっていない点には疑問が残る。他にも励起源となる現象が存在する可能性がある。

VMG において降水量の振動パターンが最も顕著であった-2 日について収支解析を行った結果(図省略)、上層においては渦度偏差の東西移流と収束・発散によるストレッチングがバランスしており、その結果生じた中層における鉛直移流の偏差が、非断熱加熱・冷却とバランスしていることが分かった。この非断熱加熱・冷却はほぼ水蒸気の凝結・蒸発によりもたらされており、それが降水量の偏差となって現れていることが分かった。

## 謝辞

この研究は環境省の地球環境研究総合推進費(A-1, G-2, B-4)のご支援によるものです。また首都大学東京の松本淳先生には、データの一部を提供していただきました。感謝いたします。

## 参考文献

- Iwao, K., and M. Takahashi (2006), *Geophys. Res. Lett.*, 33, L16703, doi:10.1029/2006GL 027119.
- Iwasaki, H., T. Nii (2006), *J. Clim.*, 19, 3394-3405.
- Enomoto, T., B.J. Hoskins, and M. Matsuda (2003), *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 129, 157-178.
- Kurosaki, Y., and M. Mikami (2003), *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1736, doi:10.1029/2003 GL017261.
- 森永, 篠田 (2003), *科学*, 73, 573-577.
- Nakamura, H., and T. Fukamachi (2004), *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 130, 1213-1233.
- Pelly, J.L., and B.J. Hoskins (2003), *J. Atmos. Sci.*, 6, 743-755.
- Sato, N., and M. Takahashi (2006), *J. Clim.*, 19, 1531-1544.
- 篠田, 森永 (2005), *地理学評論*, 78, 928-950.
- Takaya K., and H. Nakamura (2001), *J. Atmos. Sci.*, 58, 608-627.

- Terao (1998), *J. Meteorol. Soc. Japan*, 76, 419-436.
- Yatagai, A., and T. Yasunari (1995), *J. Meteorol. Soc. Japan*, 73, 909-923.

# モンゴルの降水気候学 --- 降水の季節進行と日変化 ---

群馬大学教育学部 岩崎 博之

## 1. はじめに

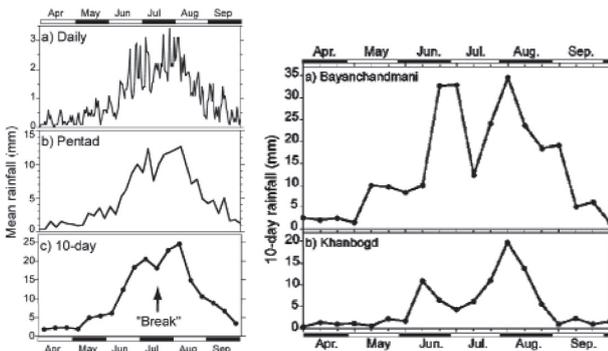
モンゴル草原の植生活動度の変動に対して、降水量変動が本質的に重要であるにもかかわらず、モンゴルの降水気候学についての文献は殆どないのが現状である。そこで、ここではRAISEによって明らかになった、モンゴルの降水の季節進行の大きな特徴である「雨期中休み」と、積乱雲活動の日変化の特徴について概観する。

## 2. モンゴルの雨期中休み

### 2-1) 「雨期中休み」の実態

1993-2001年までの92地点のモンゴル気象データとNCEP/NCAR再解析データを用いて、モンゴルの旬降水量の季節とその年々変動の特徴について調査を行った。

第1図は、異なる3つの時間スケールについて、9年間で平均した面積雨量の季節変化を示している。平均降水量は、6月上旬に急激に増加し始め、8月中旬に急激に減少する。この期間に、年降水量の70-80%がもたらされ、この期間を「モンゴルの雨期」と呼ぶことにする。そして、どの時間スケールで見ても、7月中旬に降水量が減少する期間があり、これを「雨期中休み」と呼ぶ。



第1図(左): モンゴル全域92地点の降水データから求めた日面積雨量(a), 半旬面積雨量(b)と旬面積雨量(c)の季節変化。矢印は、モンゴルの雨期中休みの時期を示している。

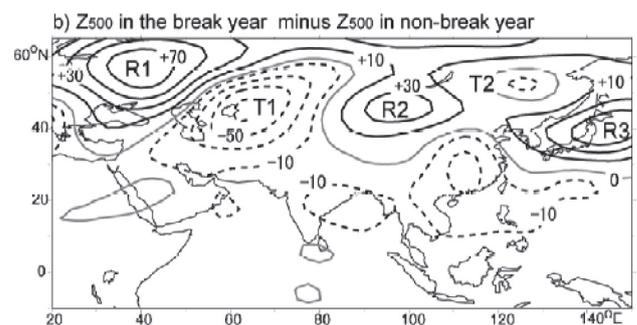
第2図 (右): Bayanchandanim (a:BD) と Khanbogd (b: KB) についての10日降水量の季節変化。BDとKBの平均期間は、それぞれ、8年と9年間である。

第2図は、降水量の多い森林ステップに位置するBayanchandanim(BD)と降水量の少ない沙漠に位置するKhanbogd (KB)の旬

降水量の季節変化である。BDの旬降水量は、7月上旬に最大になり、7月中旬(雨期中休み)には1/3に減少し、8月上旬に回復する。同じようにKBでも、2つの極大に挟まれた雨期中休みが明瞭に見られることから、年降水量や気候区の違いにかかわらず、モンゴルの雨期中休みが広範囲に起きていることが分かる。

### 2-2) 雨期中休みが発生するメカニズム

この雨期中休みが起きるメカニズムを考える。第3図は、中休みが起きやすい7月中旬について、中休み年と非中休み年の500hPa高度差(中休み年-非中休み年)の分布図である。東経20度から140度に掛けて、北緯45度に沿って波状パターンが卓越して、中休み年にはモンゴル周辺は弱い気圧の谷(R2)が存在していることが分かる。この波状パターンは、アジアジェットに補足された定在ロスビー波に対応している。



第3図: 7月中旬について、中休み年と非中休み年の500hPa高度差(中休み年-非中休み年)の分布図。等値線は、±10mから20m間隔に引かれている。

9年の解析期間のうち5年間に、明瞭な雨期中休みが認められた。中休みの期間では、700-200hPa高度で定在ロスビー波が卓越し、第3図のR2に対応した順圧的な気圧の峰がモンゴルを覆っていた。更に、中休みの年々変動は、定在ロスビー波の年々変動とも一致していた。これらのことから、モンゴルの雨期中休みは、アジアジェットに補足された定在ロスビー波が原因となり起きていると考えられる。そして、定在ロスビー波は、気候学的に季節と経度方向に対して位相固定しているため、結果として、雨期中休みは7月中旬に起きやすく、領域もモンゴル周辺に固

定されることになる。

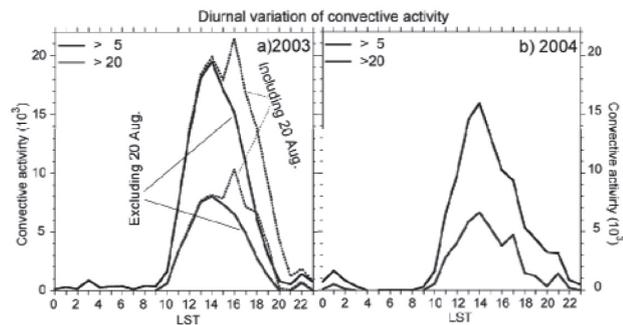
### 3. ウランバートル周辺の対流活動度と可降水量の日変化

#### 3-1) 日変化の特徴

乾燥域としての特徴を持つウランバートル(UB)周辺について,UB 空港レーダーから推定された対流活動度とGPS 可降水量の日変化について特徴を調べた。

第4図に示すように,UB 周辺の対流活動は11時頃から急激に活発になり,14時に最大に達して,19-20時には殆ど消滅するという明瞭な日変化を示す.一方,GPS 可降水量の日変化成分は極めて小さく(図略),それは可降水量の変動に対して蒸発散の寄与が小さいこと,および,可降水量の時間変化と積乱雲活動の日変化とが無関係であることを意味している。

そして,ここで特筆すべきことは,UB 周辺の対流活動は,夕方までに殆ど消滅してしまうことであり,これは湿潤域の対流活動の日変化の特徴と大きく異なっている。



第4図:2003年と2004年についての,レーダー探査範囲で積算した降水量の日変化.対流活動は,5 mm/h以上と20 mm/h以上の降水強度について積算してある。

#### 3-2) 土壌水分量が対流活動度の日変化に与える影響

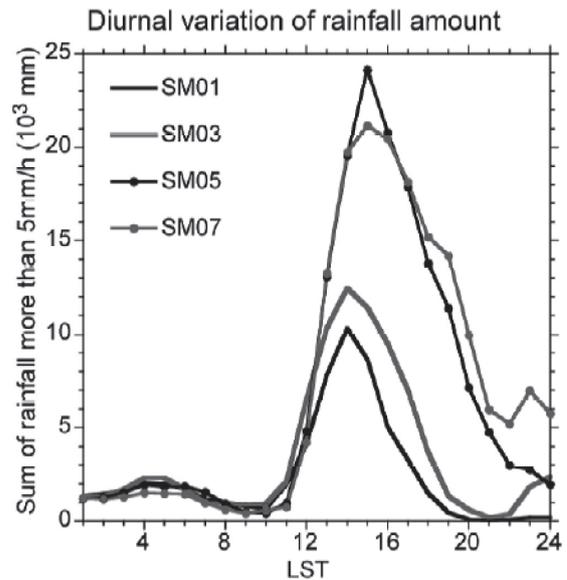
数値モデル(TERC-RAMS)を利用して,なぜ,乾燥域であるUB 周辺では夕方から夜間に積乱雲が活発にならないのかを考察する.表1に示すように土壌水分量を変化させて,UB 周辺の積乱雲活動の再現実験を行った.第5図は,各ケースについて,計算領域で積算した降水量の日変化を示している.湿潤土壌実験(SM05とSM07)では,蒸発散により境界層の水蒸気が増加して,潜在的な不安定が作られて,それが夜間まで維持される.夜間においても,一般風の地形収束に伴い,積乱雲が山脈の南で形成される.それに

対して,乾燥土壌実験(SM01とSM03)においては,境界層の水蒸気が少ないため潜在的な不安定は夜間まで維持されることはなく,山脈の南側で地形収束が起きていても,積乱雲は発生しない.この特徴は,第4図に示した実際の対流活動の日変化の特徴と一致している。

つまり,実際のUB 周辺の土壌は乾燥しているため,蒸発散量が少なく,夜間まで潜在的な不安定は維持することができない.そのため,新しい積乱雲が発生することはなく,夜までに積乱雲は消滅せざるを得ないと考えることができる。

表1: Run types

Run type	SM01	SM03	SM05	SM07
土壌水分量	0.1	0.3	0.5	0.7



第5図: SM01 からSM07 までの領域で積算した降水量の日変化。

#### 参考文献

Iwasaki, H., and T. Nii, 2006: The break in Mongolian rainy season and the relation with the stationary Rossby wave along the Asian jet. *J. Climate*, **19**, 3394–3405.

Iwasaki, H., T. Sato, T. Nii, F. Kimura, K. Nakagawa, I. Kaihotsu and T. Koike, 2007: Diurnal variation of convective activity and precipitable water around Ulaanbaator, Mongolia, and impact of soil moisture on convective activity in the nighttime. *Submitted for Mon. Wea. Rev.*

# モンゴル草原における大口径シンチロメータによる広域顕熱フラックスの観測

筑波大学陸域環境研究センター 浅沼 順

## 1. はじめに

広域の熱収支の計測・算定は、広域蒸発散量の推定に、ひいては水文学の究極の目標の一つである流域蒸発散量の推定につながる。近年、一般的に用いられる地上設置の渦相関システムによる観測は地点観測であり、数百メートルのスケールでの観測である。よって、そのスケールアップが必要となる。

地点観測よりも大きな領域の地表面フラックスの計測方法として、これまで乱流計測器を搭載した航空機による観測 (浅沼ほか, 2003) やラジオゾンデによる観測などが用いられてきた。これらは、数キロから数十キロメートルの領域での平均的な地表面フラックスを計測するが、その計測原理上、定常的な観測は不可能であり、モニタリングには向かない。これに対して大口径シンチロメータ (LAS) は、地上のタワーに設置し、数キロメートル程度の領域での地表面フラックスを、定常的に計測することに利点がある。

本報告では、RAISE プロジェクト (Rangelands Atmosphere-Hydrosphere Interaction Study Experiment in Northeastern Asia) の集中観測の一環として、2003年夏、モンゴル草原上において行われた大口径シンチロメータ観測とその初期解析結果を紹介する。

## 2. 大口径シンチロメータ

シンチロメータは光学機器であり、送信機と受信機の対からなる。送信機から発せられた電磁波を受信機で受信し、その受光強度の変動、すなわち”ゆらぎ”から、屈折率  $n$  の構造パラメータ  $C_n^2$  を計算し記録する。 $C_n^2$  は、パス間における屈折率の空間変動の大きさを示す指標であり、 $C_n^2 = \overline{\{n(x+r) - n(x)\}^2} / r^{2/3}$  で定義される。使用する電磁波に近赤外を用いた場合は、屈折率の変動は温度の変動によって主に支配されるため、 $C_n^2$  は温度の構造パラメータ  $C_T^2$  に変換することができる。そして、温度変動は顕熱フラックスと関係があるので、 $C_T^2$  からモニン=オブコフ相似則を用いて顕熱フラックス  $H$  が計算でき

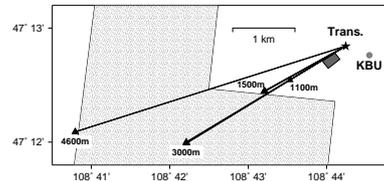


図 1: KBU 村付近の地図。シンチロメータの設置位置と渦相関法ステーションをそれぞれ三角、星印で記している。

る。ここで、元の  $C_n^2$  は送信機と受信機のパス間の平均であるので、得られる顕熱フラックスもパス間の平均である。シンチロメータの原理、および  $C_n^2$  から  $H$  の計算方法については、Asanuma and Iemoto (2007)、およびその参考文献を参照されたい。

従来のシンチロメータはレーザーを用いることから、そのパス間距離は数百メートルであったが、近年実用化された大口径シンチロメータ (LAS) は、LED ディスクを光源とし、最長 5km 程度のパス間距離をとることが可能であり、より広域の顕熱フラックスを計測することができる。

## 3. 観測

RAISE 集中観測は、2003年夏期、6月から7月にわたってモンゴル国ヘルレン川上中流域を対象に行われた (Sugita et al., 2007)。期間中、モンゴル国の Kherlen 川流域の Kherlen-Bayaan-Ulan (KBU) 村付近の草原において、大口径シンチロメータを用いた観測が行われた。使用したシンチロメータは、独 Scintec 社の BLS900 である。880nm の近赤外光を用い、500m~5000m のパス長さをとることができる。KBU 村郊外に設置された微気象ステーションの横に送信機を設置し固定した。一方、受信機は、様々なパス配置をとることができるよう移動式とし、毎日異なったパス間距離で計測を行った (図 1 参照)。センサー高さは 2.6m である。結果として、パス長さは 1100, 1500, 3000, 4500m の 4 通りで、計 15 日間の観測が得られた。検証用として、微気象ス

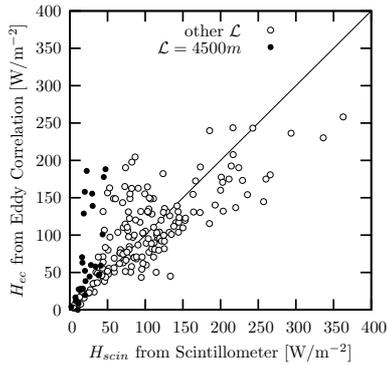


図 2: シンチロメータと渦相関法の比較.

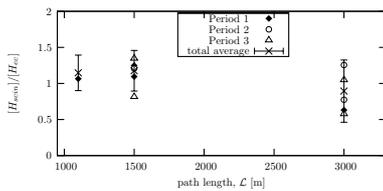


図 3:  $H_{scin}$  の日平均と  $H_{ec}$  の比をパス長さ  $L$  に対してプロットしたもの. 異なる印は異なる期間, エラーバーは全期間の平均周りの標準偏差を表す.

テーションで観測された渦相関法での観測値を用いるとともに、航空機観測による地表面放射温度観測値を用いる。

#### 4. 解析結果

図 2 は、シンチロメータによる顕熱フラックス  $H_{scin}$  と渦相関法による顕熱フラックス  $H_{ec}$  の比較である。パス長さ  $L = 4500$  m においては、明らかにシンチロメータが過小評価となっているが、これは蜃気楼によるものと考えられる。それ以外のパス長さにおいては、渦相関法と同程度の顕熱フラックスが計測されており、おおむね妥当であるといえる。

図 2 のばらつきが何に起因するかを調べるため、 $H_{scin}$ ,  $H_{ec}$  ともに日平均をとり、その比をパス長さに対してプロットしたものが図 3 である。季節によってばらつきはあるものの、大まかな傾向としては  $L = 3000$  m の時に、 $L = 1100, 1500$  に比べて  $H_{scin}/H_{ec}$  が小さくなっていることがわかる。

これは、図 4 にハッチで示す、KBU 村付近の農地跡と関連があると考えられる。この農地跡は 90 年代に放棄されたものであるが、現在も周辺の自生草原とは異なった植生となっており、比較的植生高、植生量ともに多い。図 4 では、地表面温

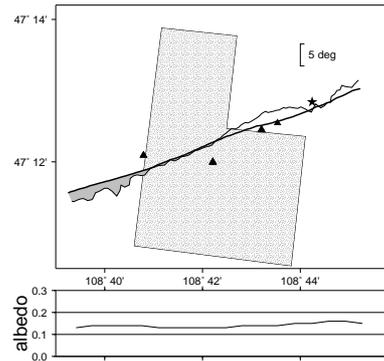


図 4: 上:航空機の飛行経路と観測された地表面放射温度(細線)。2003 年 8 月 23 日 12:50(MDT)。下: 航空機より観測されたアルベド。ハッチ部分は農地跡。

度が農地跡内で低めになっている。これは、アルベドは周囲とそれほど変わらないことから(図 4 下図)、蒸発散が多く顕熱が小さく、そのため地表面温度が低いと考えられる。よって、図 3 で  $L = 3000$  m での  $H_{scin}$  が小さい傾向にあるのは、 $L = 3000$  m に対する顕熱のソースエリアに農地跡が含まれていることが原因であると推測される。

このように、シンチロメータによって計測された顕熱フラックスは、数キロメートルスケールのソースエリアに含まれる様々な土地被覆での大気-地表面相互作用の結果を反映している可能性が示された。シンチロメータの有効性を示すものである。

#### 謝辞

本研究は、科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業「水の循環系モデリングと利用システム」による RAISE プロジェクト(代表: 杉田倫明)、および科学研究費補助金(基盤 C、代表: 浅沼)の研究成果である。

キーワード: 蒸発散, 地表面熱収支, 地表面フラックス

#### 参考文献

- Asanuma, J. and Iemoto, K. (2007): *J. Hydrol.*, **333**, pp. 58–67
- Sugita, M., Asanuma, J., Tsujimura, M., Mariko, S., Lu, M., Kimura, F., Azzaya, D., and Adyasuren, T. (2007): *J. Hydrol.*, **333**, pp. 3–20
- 浅沼順・玉川一郎・檜山哲哉・松島大 (2003): 水文・水資源学会誌, **16**(2), pp. 183–192

# モンゴル半乾燥草原における草本—大気間の CO<sub>2</sub> 交換

中野 智子 (首都大・都市環境) ・根本 学 (都立大院・理) ・篠田雅人 (鳥取大・乾地研)

## 1. はじめに

陸域生態系は光合成によって大気中二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) を固定し、一方、呼吸 (植物の呼吸+土壌呼吸) によって CO<sub>2</sub> を大気へと放出している。渦相関法などの微気象法で CO<sub>2</sub> フラックスを測定した場合、日中においては光合成速度と呼吸速度の収支である純光合成速度 (Net Ecosystem Exchange: NEE) が測定され、この NEE が温度や水分といった環境要素の変化にどの様に応答するのかを探る研究が数多くなされている (例えば、Fu, 2006)。しかしながら、光合成と呼吸は別個のプロセスであり、環境要素に対する応答も異なっているため、より正確な CO<sub>2</sub> 収支の推定を行うためには、それらを分けて考えていく必要がある。そこで本研究では、モンゴル中央部の半乾燥草原において、透光性ならびに遮光性の密閉式チャンバーを用いた CO<sub>2</sub> フラックスの測定を行い、光合成速度・生態系呼吸速度を別々に求めた上で、その各々の環境応答性について検討した。

## 2. 観測方法

モンゴル国ウランバートルの南西 130 km に位置するバヤンウンジュル村近郊の草原 (lat 47° 02.6' N, long 105° 57.1' E, 1200 m asl) において、遊牧家畜による採食を防ぐための柵 (300 m×300 m) を設置し、その中で CO<sub>2</sub> フラックスの測定を行った。観測地は半乾燥地域に位置し、年平均気温は 0.0°C、年降水量は 166.1 mm (いずれも 1995~2005 年の平均値) である。土壌は粗粒質であり、カスタノゼムに分類される。草原を構成する植生はイネ科草本 (*Agropyron cristatum*, *Cleistogenes squarrosa*, *Stipa krylovii*)、低灌木 (*Caragana spp.*) などである。この草原において、2004 年 7 月下旬・2005 年 5

月中旬・7 月下旬・9 月中旬および 2006 年 6 月下旬の 5 回にわたり観測を実施した。各観測期間は約 1 週間である。

CO<sub>2</sub> フラックスの測定に用いたチャンバーは透明なアクリル製の一辺 40cm の立方体であり、内部には温湿度センサー、光量子センサー、空気を攪拌するためのファンが取り付けられている。このため、チャンバー内では風速 0.2~0.6 m s<sup>-1</sup> 相当の空気の動きが生じている。同じ地点で繰り返し測定を行うこと、また観測点の攪乱を最小限にすることを目的として、各観測期間の初日に、イネ科草本を含む 8 地点および裸地 4 地点の計 12 地点にステンレス製の台座を設置した。台座にはゴムパッキングを敷いた溝があり、測定時にはそこにチャンバーを置くことで密閉した。チャンバー内の空気は、ポリエチレンチューブを通して約 1 dm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> の流量で赤外線 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 濃度分析器 (LI-7000, LI-COR Inc.) へ吸引され、連続的に濃度測定を行い、再びチャンバーへと戻されている。測定時間 (チャンバー密閉時間) は 3 分間であり、その間のチャンバー内の CO<sub>2</sub> 濃度変化からフラックスを算出した。透明なチャンバーで正味の CO<sub>2</sub> フラックス (NEE) を測定した後に、アルミ製の遮光カバーをかぶせた状態で生態系呼吸速度 (Ecosystem Respiration: R<sub>eco</sub>) の測定を行い、NEE と R<sub>eco</sub> の差として総光合成速度 (Gross Primary Production: GPP) を算出した。フラックスの測定は現地時間の 2:00~4:00、8:00~10:00、14:00~16:00、20:00~22:00 に行い、このサイクルを各期間中に 2~3 回実施した。

CO<sub>2</sub> フラックスの測定と併せて、チャンバー内外の気温・相対湿度・光合成有効放射量 (PAR)、並びに降水量、地温、土壌の体積含水率 (VWC) の測定を行った。また各観測期間の終了時に、台

座の中に生育していた植物を刈り取り、地上部バイオマス（乾燥重量）の測定も行った。なお、以降の議論で用いる気温・飽差・PARのデータはチャンバーの中で測定された値である。

### 3. 結果と考察

図1は、各観測期間に測定された単位地表面積あたりのGPPとPARとの関係である。概ね光—光合成曲線にのるものの、2004年7月のGPPは他の期間より有意に大きく、観測時期によってPARに対する応答が異なっていることが分かる。過去の研究で、GPPは地上部の植物量と関係があることが報告されているため（Suyker and Verma, 2001など）、地上部バイオマス（Aboveground Biomass: AGB）とGPPとの関係を見たところ（図2）、高い線形相関があることが示された。そこでGPPをAGBで割って規格化すると、GPPとPARとの関係には

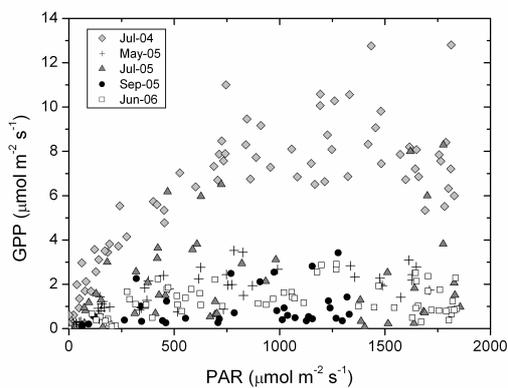


図1 単位地表面積あたりのGPPとPARとの関係。

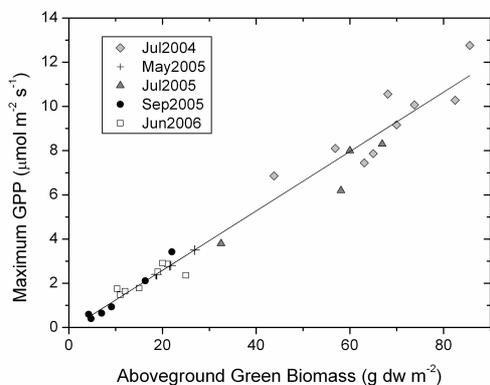


図2 各観測期間・各測定点におけるGPPの最大値と地上部バイオマス（AGB）との関係。

観測時期による有意な違いは見られなくなり、PARに対するGPPの応答は植物の成長段階の違いには依存しないことが示された（図3）。

次に、気温などの環境要素がGPPに及ぼす影響について検討した。図3では土壤水分が高い場合（黒）と低い場合（グレー）について、図4では気温および飽差が極端に高い場合（グレー）について、GPPとPARとの関係を図示した。3cm深の土壤水分が6.0%以上となるのは降雨の後に相当するが、この時にはGPPに顕著な変化は見られない。一方、しばらく無降水の期間が続くと、WVCは3.0%未満まで低下したが、この時にはGPPも低下していたことが図からわかる。図4からは大気が高湿で乾燥している場合にも、GPPが低下し

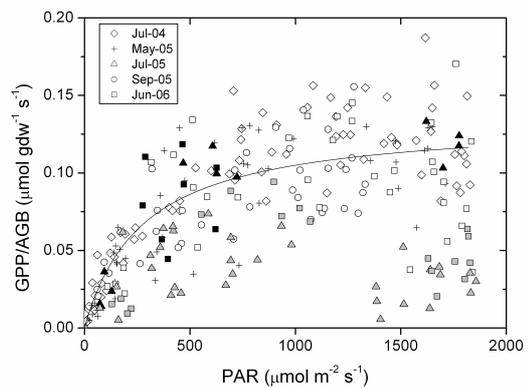


図3 AGBで規格化したGPPとPARとの関係。曲線は直角双曲線関数による近似曲線である。黒点は3cm深のWVCが6.0%以上、灰色の点は同3.0%未満の場合に測定されたデータ。

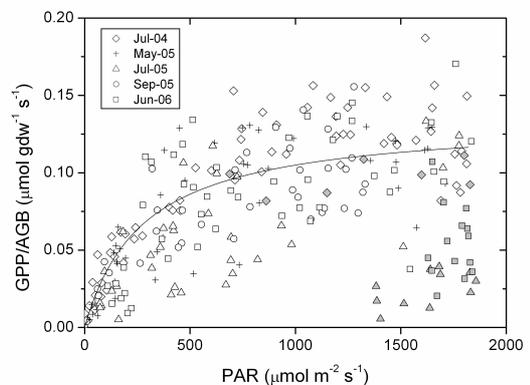


図4 図3に同じ。ただし、灰色の点は気温が30℃以上かつ飽差が3.5 kPa以上の場合に測定されたデータ。

ている様子が読み取れるが、特に土壌・大気の間が乾燥している場合に低下量が大きくなる傾向がうかがえる。

$R_{eco}$  については草本植物が生育している地点と裸地地点の両方で測定を行った (図 5)。植生地点で測定された  $R_{eco}$  は裸地地点の値よりも 2~4 倍程度大きくなっていた。これは、土壌呼吸に加えて、植物の呼吸があるためと考えられ、妥当な結果といえる。一般に、 $R_{eco}$  は地温の指数関数で近似できることが知られているが、本研究においても地温の上昇とともに  $R_{eco}$  が増大する傾向が観測できた。また植生地点、裸地地点ともに、 $R_{eco}$  の大きさ及び温度感度は、土壌水分の違いに応答して異なっているという結果が得られた。降雨の後に土壌が湿潤になると、土壌呼吸は著しく増大し、温度感度も大きくなっていた。土壌が湿潤になった場合、GPP には顕著な変化が見られなかつ

たことをあわせて考えると、降雨後の土壌の湿潤化は大気への  $CO_2$  の付加を促進する因子であると考えることができる。

キーワード：光合成速度、呼吸速度、 $CO_2$  フラックス、密閉式チャンバー法

参考文献

Fu, Y., Yu, G., Sun, X., Li, Y., Wen, X., Zhang, L., Li, Z., Zhao, L., and Hao, Y. (2006): *Agric. For. Meteorol.*, 137, pp. 234-244.  
 Suyker, A. E. and Verma, S. B. (2001): *Global Change Biology*, 9, pp. 255-265.

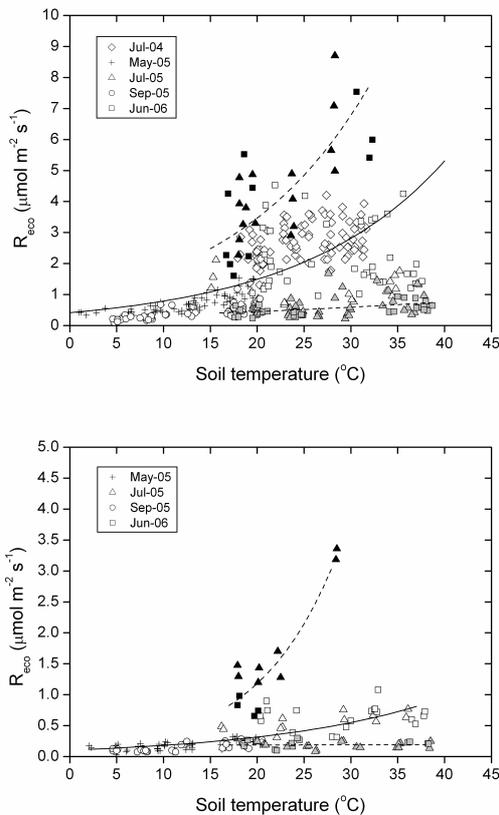


図 5  $R_{eco}$  と 5cm 深さの地温との関係。(上) 植生を含む地点、(下) 裸地地点。黒点は 3cm 深の VWC が 6.0%以上、灰色の点は同 3.0%未満の場合に測定されたデータである。

# モンゴル草原における地表面熱輸送の特徴

科学技術振興機構 小谷亜由美

## 1. 熱輸送パラメータと地表面状態

大気・陸面間での熱・水・物質交換を表す熱輸送パラメータ(本研究では地表面粗度長)は, 大気モデルでの陸面過程や, 衛星リモートセンシングデータを用いた地表面フラックスの推定に用いられる. これまでに, 様々な地表面について輸送係数(コンダクタンス, 抵抗, 粗度長など)が評価されている. 本研究では, モンゴルの粗密度草原での熱輸送パラメータを植生指標を用いて表現することを目的とする.

## 2. データ処理

モンゴル北東地域のヘルレン川流域の草原地域にて実施された RAISE プロジェクト(Sugita et al, 2007)の観測データを使用する. Kherlen bayaan-Ulan(KBU) 村付近の草原において測定された気象・水文データのうち, 地表面フラックス(運動量, 熱), 風速, 放射, 温湿度などの30分平均値を解析に用いた. また, RAISE 対象地域内の4つの草原観測サイトでの同様のデータ(フラックスは短期観測)もあわせて使用した. これらを接地境界層相似則(Brutsaert, 1982など)に適用して, 地表面粗度を逆算した. また, これらの観測サイト近傍での植生調査により LAI, 草丈などが測定された(Kojima, 2004; Urano, 2004).

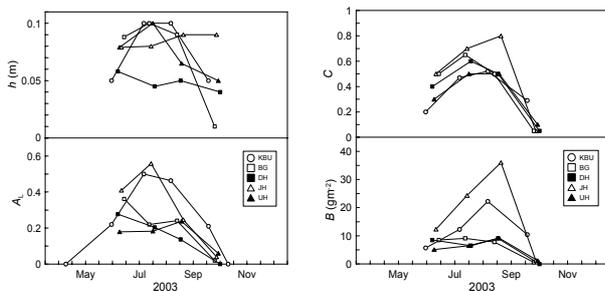


図1 植物高(h), LAI (AL), 被度(C), 地上バイオマス(B)の季節変化. BG, DH, JH, UHは草原観測サイトの名称.

## 3. 地表面粗度の季節/日変化

はじめに, 地表面粗度と地表面状態すなわち植生の成長状態との関係を図2, 3に示す. 運動量粗度  $z_{0m}$  および熱粗度  $z_{0h}$  は, 気象観測値を用いて計算した30分代表値である. LAIゼロ付近では, 植物生育期に比べて  $z_{0m}$  は小さく,  $z_{0h}$  は大きくなる.  $z_{0m}$  は LAI 増加に対してほぼ一定であり, 植物成長による地表面形態の変化の効果は小さい.

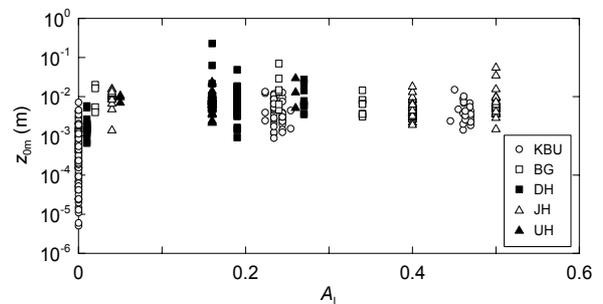


図2 運動量粗度( $z_{0m}$ )と LAI ( $A_L$ ) の関係

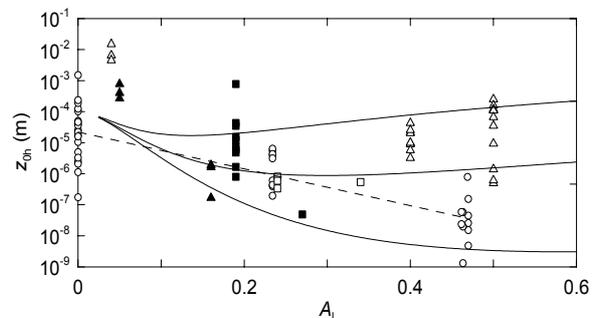


図3 熱輸送粗度( $z_{0h}$ )と LAI ( $A_L$ ) の関係. 実線は Watanabe(1994)に基づくモデル, 破線は KBU 測定値の近似. 凡例は図2と同じ.

一方で,  $z_{0h}$  は LAI 0.3-0.4 までは減少するが, LAI が大きくなるとその傾向が不明瞭になる. KBU では LAI に伴って減少をつづけるが, 草原観測サイトのひとつ (JH) では, 増加に転じる. LAI が小さい領域での  $z_{0h}$  減少は, 熱源として土壌面と植物を考慮したモデル(Lhomme et al, 2000; Massman, 1999; Watanabe, 1994 など)により表される. す

なわち LAI が小さい場合には, 土壌面の寄与が大きく植物キャノピーは輸送の妨げになるが, ある程度のキャノピー規模になると乱流輸送が促進されて粗度が大きくなる. Watanabe (1994) では, モデルのパラメータとして葉面運動量輸送係数と葉面熱輸送係数の比を用いている. これは葉などの植物要素のキャノピー内配置や方向に依存するもので, 直接的な評価は困難であるが, 実測した植生パラメータから質的な違いを類推できる. すなわち, KBU サイトと JH サイトでは LAI は同程度であるが, JH のバイオマスは KBU の約 2 倍であることから, JH では葉以外の要素(茎など)を多く含む複雑なキャノピー構造が形成されているといえる. この違いにより, 熱輸送粗度の傾向が異なっていると考えられる.

#### 4. 地表面粗度のパラメタリゼーションとフラックスの推定

フラックス推定に用いられる熱輸送粗度を観測値などから推定するためのパラメタリゼーションを検討する. 上記モデルには実測では得られないパラメータが含まれるために使用が困難であることが多く, 代替として様々な地表面を対象とした粗度長推定式が提案されている. 熱輸送粗度については, LAI, 風速, 地表面温度, 運動量粗度, 太陽高度, 太陽放射などをパラメータとしている. ここでは, LAI の関数として, KBU データを用いた推定式を検討した. これにより推定した粗度長と気象観測値を用いて顕熱フラックスを算出したところ, 実測したフラックスとの二乗平均誤差が  $18\text{Wm}^{-2}$  であった. 同じ推定式を他の草原サイトのデータに適用すると, 植生特徴が異なる JH (前述) 以外の 3 サイトでは  $23\text{Wm}^{-2}$  で, JH も含めた 4 サイトでは  $48\text{Wm}^{-2}$  となった(図 4).

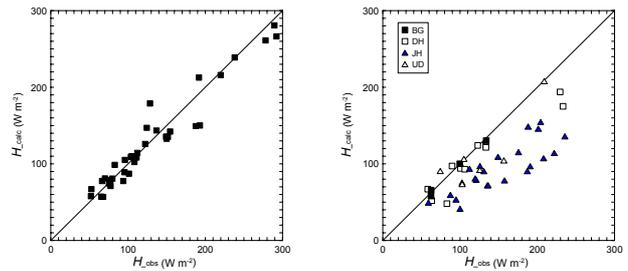


図 4 顕熱フラックス実測値  $H_{obs}$  と推定値  $H_{calc}$  との比較 (左: KBU サイト, 右: 他の草原サイト)

#### 5. まとめ

植物生育ピーク時においても, 葉面積指数 (LAI) 0.5, 植物高 20cm という植物量の少ないモンゴルステップ草原での観測値を用いて, 地表面輸送パラメータと植生指標との関係を検討した. 植物生育期間中に運動量輸送粗度はほぼ一定であったのに対して, 熱輸送粗度は植物成長に伴い減少した. この関係を用いて顕熱フラックスを推定したところ, KBU と類似したステップ草原では適用可能であった.

本研究は, 科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業「水の循環系モデリングと利用システム」による RAISE プロジェクト(代表: 杉田倫明)の一部として実施した

キーワード: 地表面フラックス, 疎密度植生

#### 参考文献

- Brutsaert, W. (1982): *Evaporation into the Atmosphere*, Reidel, 299p.
- Kojima, T. (2004): MS thesis, University of Tsukuba, 85p.
- Lhomme, J. P., Chehbouoni, A., and Monteny, B. (2000): *Bound.-Layer Meteorol.*, 97, 31-457.
- Massman, W. J. (1999): *J. Hydrol.*, 223, 27-43.
- Sugita, M., Asanuma, J., Tsujimura, M., Mariko, S., Lu, M., Kimura, F., Azzaya, D., and Adyasuren, T. (2006): *J. Hydrol.* 333,
- Urano, T. (2005): MS thesis, University of Tsukuba, 45p.
- Watanabe, T. (1994): *Bound.-Layer Meteorol.*, 70, 13-35.

# モンゴル・トール川上流域の南北森林－草原斜面での 蒸発散量変化

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究センター 飯島 慈裕

## 1. はじめに

モンゴル北部は、北から南にかけて植生が森林から草原へと漸移しており、北方林の南限地域にあたっている。また、その山岳地域では、南向き斜面に草原、北向き斜面に森林が差別的に分布している。この特徴的な植物分布に対応して、森林斜面には地下に永久凍土が分布する一方、草原斜面には永久凍土が認められず、その結果、南北斜面で蒸発散・流出特性が異なる可能性が指摘されており、水文気候環境の違いが示唆されている。

本研究では、この特徴的な植生景観を示す地域での水循環過程を解明する一環として、北向き森林斜面と南向き草原斜面を対象に、森林の樹液流測定と、草原・林床での総合気象観測から蒸発散量の推定を行なった。また、それぞれの斜面について、蒸発散量の季節変化と水文気象条件、ならびに植物生長・フェノロジーとの対応関係を検討した。

## 2. 研究対象地域と観測方法

本研究の観測地点は、モンゴル国の首都ウランバートルの東北東約 50km に位置する、Tuul 川上流の Shijir 川流域内の南北斜面である。観測サイトは、南向き草原斜面（標高 1,670m）と、北向き森林斜面（カラマツ (*Larix sibirica* Ledeb) が優占；標高 1,640m) である。

草原斜面では、総合気象観測データから熱収支計算 (bulk 法; Ortega-Farias et al. 1996) によって蒸発散量を推定した。また、20cm 深までの土壌水分量・降水量を観測した。草の生長は、入力・反射光合成有効放射量の比を緑被の指標とし

て用い、超音波積雪深計の出力を夏季の草丈に変換した。

森林斜面では、林床での総合気象観測データから同様に蒸発散量を推定した。また、Granier 法 (Granier 1987) による樹液流測定 (カラマツ 12 個体) を行い、50x50m の樹木調査結果から辺材面積の合計を推定し、平均樹液流速と総辺材面積の積によって樹木からの蒸散量を推定した。これらの和を森林からの蒸発散量とした。同時に、カラマツ 4 個体に対し、デンドロメータで直径方向の幹生長量測定を行なった。林床での長波放射量の比を樹木の展葉・落葉の指標とした。

## 3. 結果と考察

図 1 に 2006 年の草原・森林斜面での蒸発散量と水文気象条件、植物生長の季節変化を示す。草原斜面で測定された 4~9 月の降水量は 227mm であり、特に 5~8 月は断続的に降水があった。その結果、土壌水分量はどちらの斜面も 4 月下旬の消雪から 6 月中旬まで高い状態が続き、8 月中旬から 9 月下旬にかけて降水量の減少に対応して乾燥が進行した。

植物生長の季節変化は草原・森林斜面で違いがみられた。草原では 5 月上旬から展葉が始まり、7 月初めに緑被が最大となった。草丈の生長は 6 月中旬から 7 月上旬までの短期間で急速に進んだ。草の枯れ(草丈の減少)は 8 月上旬から始まった。一方、森林では、5 月中旬からカラマツの展葉が開始し、6 月下旬には展葉が終了した。展葉の終了時期から幹生長が進行し、一貫した生長が 8 月上旬まで継続した。カラマツの落葉は 8 月下旬から現われ始めた。

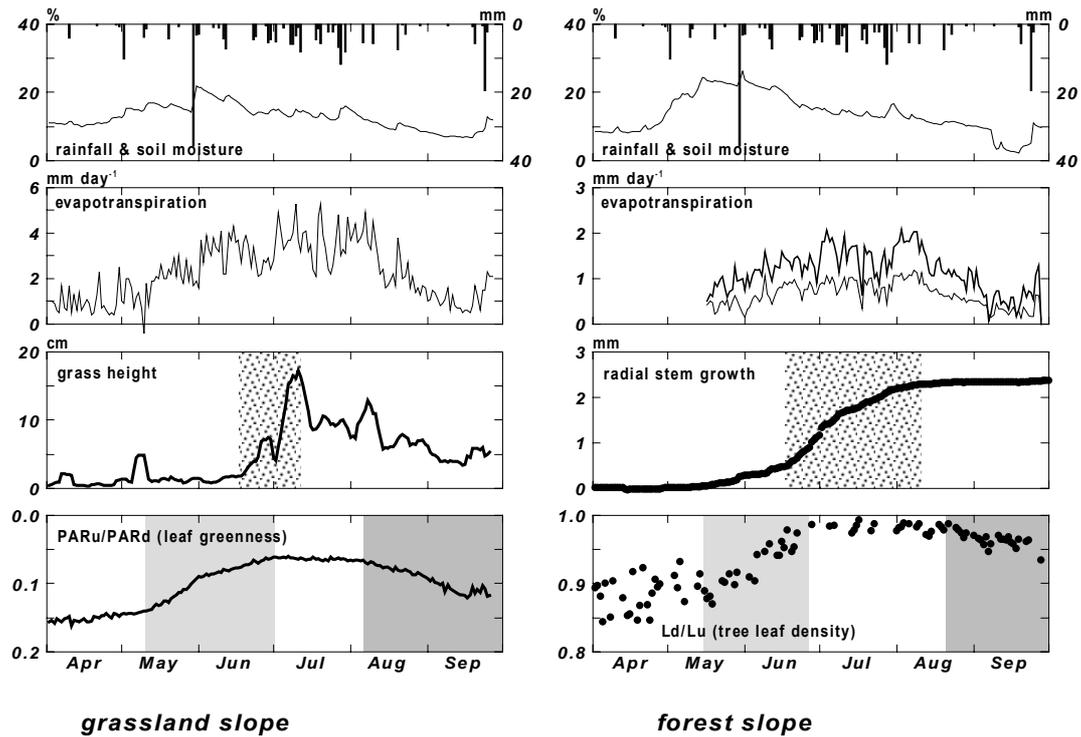


図1 草原斜面(左)と森林斜面(右)の水文気候条件、植物生長の季節変化(2006年4月~9月) 降水量は草原斜面上の日合計値、土壌水分量(体積含水率)は20cm深までの平均値を示す。森林の蒸発散量(太線)は林床からの蒸発散量と樹木からの蒸散量(樹液流量:細線)の合計を示す。草原の草丈は超音波積雪深計からの推定値、幹生長量はデンドロメータによる測定値を示す(ドット:生長時期)。PAR比は草原面の緑被の指標、林内の長波比は樹冠の密閉度(展葉の指標)を示す(薄いハッチ:開葉時期、濃いハッチ:紅葉・落葉時期)。

草原での蒸発散量は展葉と共に増加し、生育最盛期(7月)に $4\text{mm day}^{-1}$ を越す期間が継続した。蒸発散量の可能蒸発量に対する割合は、7月に約80%であった。森林からの蒸発散量は草原に比べて春の増加時期がやや遅れ、量も約半分(最大 $2\text{mm day}^{-1}$ )であった。カラマツの生育最盛期(7月~8月中旬)には、林床からの蒸発散は57%、樹木からの蒸散は43%であった。枯れや紅葉・落葉に伴う蒸発散量の減少は草原で8月中旬以降急速に進むのに対して、森林では緩やかに減少する違いがみられた。

以上から、森林-草原斜面の蒸発散量変動は、植物活動の季節変化と降水量、土壌水分量変動とよく対応していた。森林からの蒸発散量は草原に比べて半分程度であり、森林草原の南北斜面は蒸発散量の差を通じて水収支も大きく異なっていると考えられる。

## 謝辞

本研究は、科学研究費補助金(若手研究 B、課題番号:18700689、代表:飯島慈裕)を利用した。

キーワード: 蒸発散、フェノロジー、土壌水分

## 参考文献

- Granier, A. (1987): *Tree Physiol.*, 3, pp. 309-320,  
 Ortega-Farias, S.O., Cuenca, R.H., and Ek, M. (1996): *Agric. For. Meteorol.*, 81, pp. 131-143.