

モンゴル高原中央部における植物の生育に影響を及ぼす 自然環境の諸要因の分析

平田昌弘^{*1)}・岸川沙織¹⁾・近藤昭彦²⁾・山中 勤³⁾・開発一郎⁴⁾・

ダムディン バトムフ⁵⁾・本江昭夫¹⁾

1. はじめに

モンゴル国のゴビ地域は、北緯約45°、標高1,000 m以上とアジア大陸北方域の高原地帯に位置している (Fig. 1). ゴビ地域のモンゴル草地生態系は、乾燥地帯にあることもあり、種多様性が低く、飼料資源量も少なく、気温や降水量などの気象の影響を受けやすい。モンゴル高原のような乾燥地域の草地生態系を持続的に食料生産に利用する手法は、一ヶ所で家畜を通年飼養するのではなく、季節に応じて放牧場所を転々と変えて家畜を粗放的に飼養する形態、いわゆる遊牧である。これまでのモンゴル国の食料生産構造は、遊牧による家畜生産と草地生態系の状態に強く依存してきたといっても過言ではない。

著者らはこれまでに、モンゴル高原における植生と気象との関係を調査研究してきた (近藤・開発, 2003 ; 近藤ほか, 2005)。出芽時期は春期の降水量によって決まる傾向にあり、その後の生育は適度の土壤水分量あるいは降水量が維持されることが重要であることなどを指摘してきた。しかし、降水量が少ないからといって必ずしも出芽時期が遅れるとは限らず、植物の出芽時期や地上部現存量の多少は気温、土壤水分量、降水量および降水のタイミングにより影響を受けやすく、これらの関係については今後の検討課題として残された。モンゴル国の経済が遊牧と草地生態系に大きく依存しているからこそ、気象を含めた自然環境と植生について継続的に観測し、それらの関係を明らかにすることが是非とも望まれるところである。そこで本研究では、モンゴル高原中央部に

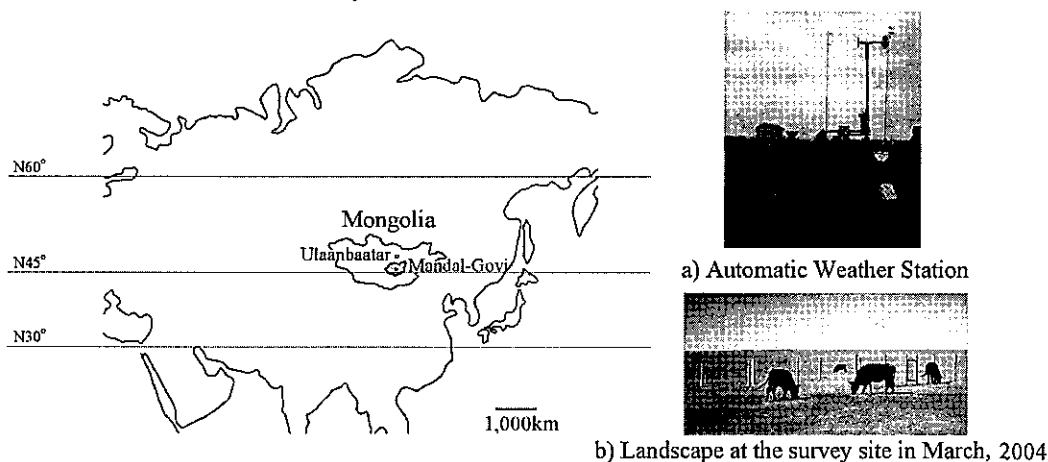


Fig. 1. The northern Asian continent, the automatic weather station (a) and the landscape at the study site (b). Black dot and gray part in the map show the study site in Mandal-Govi city and Dond-govi Province of Mongolia, respectively.

* Corresponding Author: masa@obihiro.ac.jp

(2008年4月15日受付; 2008年12月9日受理)

〒080-8555 北海道帯広市稲田町西2線-11 Tel: 0155-49-5485 Fax: 0155-49-5593

1) 帯広畜産大学 畜産科学科地域環境学研究部門 3) 筑波大学 陸域環境研究センター 5) ウランバートル大学 自然農法学部
2) 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター 4) 広島大学 総合科学研究科

において、植物の生育に影響を及ぼす自然環境の諸要因を分析するために、1) 自然環境の諸要因が植物の季節的な生育にどのように影響を及ぼしているかを生育ステージ毎に分析し、2) 全生育期間を通して植物の生育に影響を与える自然環境の諸要因を同定することを目的とした。自然環境の諸要因としては、気温、降水量、土壌温度、土壌水分量を取り上げた。

2. 材料と方法

2.1. 調査地の概要

調査地は、モンゴル国の首都ウランバートルから南に約250 km、標高約1,400 mに位置するドンドゴビ県サインツァガーン郡にあるマンダルゴビ市である (Fig. 1)。年間降水量が約 153 mm^A の半乾燥地であり、Yunatov (1976) による分類区分では純草原型から沙漠性草原型の植生帯に位置している。

2.2. 自然環境の諸要因の測定

2000年8月にマンダルゴビ市の郊外 (N45° 44' 34.2", E106° 15' 51.6") に自動気象観測ステーション (AWS: Automatic Weather Station) を設置した (Fig. 1-a)。AWSには、2 m 高に白金抵抗温度計、地表面に転倒式雨量計、土壌深度3 cm, 10 cm, 40 cm, 100 cm に白金測温抵抗体およびTDR (Time Domain Reflectometry) を搭載した。気象測定は2004年1月~12月まで30分毎に行い、測定項目は気温 (°C)、降水量 (mm)、土壌深度3 cm, 10 cm, 40 cm, 100 cm における土壌温度 (°C) と土壌水分量 (%) である。土壌水分量については、TDR 測定値が温度により変動する傾向にあるため、山中モデルによって補正した (山中ほか, 2003)。

気温は日毎の最高気温、最低気温、平均気温を、降水量は日毎の合計値を、土壌温度と土壌水分量は日毎の平均値を算出した。更に、7日毎に調査した植生データ (被覆率および地上部現存量) との関連性を分析するため、気象データを植生調査実施日の前7日間分の合計値 (降水量) もしくは平均値 (気温、土壌温度、土壌水分量) を算出した。気象データは、多くの植物が生理活性を始める平均気温0°C以上 (スタイルズ・コッキング, 1973) となる期間を分析用の供試データとした。

2.3. 植生調査

2001年5月にAWSに隣接して、15 m×15 mの牧柵を設置した (Fig. 1-b)。植生調査は2004年1月~12月まで行った。調査項目は、植物種構成、草種毎の自然草丈 (cm)、

Table 1. Plant list appeared at the study site.

Family	Species	Life style
Chenopodiaceae	<i>Eurotia ceratoides</i>	perennial, shrub
Leguminosae	<i>Caragana pygmaea</i>	perennial, shrub
Liliaceae	<i>Allium polyrrhizum</i>	perennial, herb
Cyperaceae	<i>Carex duriuscula</i>	perennial, herb
Graminae	<i>Cleistogenes squarrosa</i>	perennial, herb
Convolvulaceae	<i>Convolvulus ammannii</i>	perennial, herb
Rosaceae	<i>Potentilla</i> spp.	perennial, herb
Rosaceae	<i>Sibbaldianthe sericea</i>	perennial, herb

被覆率 (%), 地上部現存量 (g/0.25 m²) である。植生調査は牧柵内で7日毎に早朝に、0.5 m×0.5 m コドラートをを用い、毎回2反復行った。自然草丈は草種毎に10個体を測定し、平均値を計算して求めた。植物が立ち枯れした場合は、リターとして扱い、測定対象から除外した。

地上部現存量は、130 °C、2時間通風乾燥させて乾物重 (DM) を測定し、単位を g/m² に変換して乾物重を算出した。2004年に調査地に出現した植物種は、多年生灌木2種類、多年生草本植物6種類、合計8種類である^{B)}

(Table 1)。植物の同定はÖlziyqtag (1985) の植物図鑑に従った。

2.4. 植物の季節的な生育に影響を与える自然環境の諸要因

植物の出芽、生育初期、生育中期、生育後期、生育最終期、立ち枯れを起すそれぞれの時期において、植物の季節的な生育に影響を与える自然環境の諸要因を分析した。植物の生育には自然草丈、被覆率そして地上部現存量を、自然環境には最高気温、最低気温、日平均気温、降水量、土壌深度3 cm, 10 cm, 40 cm, 100 cm における土壌温度と土壌水分量を分析材料に用いた。

2.5. 植物の生育と自然環境の諸要因との重回帰分析

全生育期間を通じた植物の生育と自然環境の諸要因との関係性を分析するために、平均気温が0°C以上となる期間において、植物の生育と自然環境の諸要因との間で重回帰分析を行った。植物の生育には被覆率と地上部現存量 (目的変数) を、自然環境には最高気温、最低気温、日平均気温、降水量、土壌深度3 cm, 10 cm, 40 cm, 100 cm における土壌温度と土壌水分量 (説明変数) を分析材料に用いた。

先ず、多重共線性、説明変数間の単相関係数を考慮して、説明変数として用いる自然環境の諸要因を選出した。その後、目的変数に被覆率もしくは地上部現存量を割り当てて重回帰分析を行い、2004年の全生育期間を通して植物の生育に影響を与えた自然環境の諸要因を分析した。

Table 2. Weekly data of natural environments at the study site in 2004.

Growth stage	Period (Month/day)	Air temperature (°C)			Precipitation (mm)	Soil temperature (°C)				Soil moisture (%)			
		Max	Min	Mean		3cm*	10cm	40cm	100cm	3cm	10cm	40cm	100cm
	3 28 ~ 4 3	2.8	-11.5	-4.9	0.4	-2.0	-2.0	-2.1	-2.3	9.3	14.0	10.0	14.4
	4 4 ~ 4 10	16.0	-0.7	7.5	0.2	4.9	4.2	0.7	-1.8	19.2	26.7	10.0	14.8
	4 11 ~ 4 17	17.5	0.7	9.1	0.0	8.3	7.8	4.5	-0.3	16.2	25.4	10.2	16.0
	4 18 ~ 4 24	17.0	1.3	9.3	0.0	10.1	9.7	6.9	1.5	13.4	22.7	10.2	16.7
Early growth stage	4 25 ~ 5 1	19.2	1.8	10.8	0.0	10.9	10.6	7.7	2.9	10.4	19.7	10.3	17.2
	5 2 ~ 5 8	18.6	1.6	10.3	0.0	10.4	10.0	7.6	3.7	8.4	17.0	10.4	17.7
	5 9 ~ 5 15	15.8	1.3	8.8	2.0	11.7	11.4	9.4	4.9	7.0	15.6	10.4	18.3
	5 16 ~ 5 22	22.3	7.4	15.3	0.8	14.1	13.4	9.9	5.8	7.0	15.1	10.5	18.7
5 23 ~ 5 29	21.0	7.2	14.2	0.4	16.2	15.7	12.6	7.2	5.9	14.2	10.5	19.3	
Middle growth stage	5 30 ~ 6 5	22.9	7.4	15.7	0.0	16.6	16.0	13.0	8.3	5.3	13.0	10.5	19.6
	6 6 ~ 6 12	29.4	14.3	22.7	0.0	21.5	20.5	15.7	9.4	4.8	12.5	10.5	20.0
	6 13 ~ 6 19	24.0	12.4	18.2	13.6	20.3	19.8	16.5	11.0	11.5	13.4	10.5	20.7
	6 20 ~ 6 26	26.0	13.4	19.6	1.8	21.4	20.8	17.2	11.8	8.2	13.3	10.5	21.0
6 27 ~ 7 3	24.2	13.1	18.1	22.4	19.8	19.6	17.6	12.7	13.8	20.2	14.6	21.5	
Later growth stage	7 4 ~ 7 10	25.7	14.0	20.2	7.8	22.0	21.7	18.8	13.2	15.9	24.1	18.3	21.6
	7 11 ~ 7 17	29.8	16.5	23.3	7.8	23.6	23.1	19.8	14.2	11.5	17.1	17.1	22.0
	7 18 ~ 7 24	30.5	16.6	24.0	2.2	26.0	25.4	21.9	15.4	7.0	13.4	14.7	22.3
	7 25 ~ 7 31	25.6	11.7	18.8	1.4	22.7	22.3	20.4	16.0	5.8	11.7	12.3	22.4
8 1 ~ 8 7	27.2	14.2	20.1	9.4	22.4	22.0	19.9	15.8	6.6	11.2	13.1	22.4	
Final growth stage	8 8 ~ 8 14	25.7	12.8	19.2	5.4	22.0	21.6	19.4	15.8	9.0	11.8	10.9	22.4
	8 15 ~ 8 21	25.3	14.0	19.4	2.6	21.9	21.6	19.6	15.9	6.6	11.2	10.6	22.3
	8 22 ~ 8 28	21.8	9.6	15.6	4.6	20.5	20.4	19.5	16.0	5.7	10.8	10.2	22.3
	8 29 ~ 9 4	23.4	9.0	16.2	0.0	18.4	18.2	17.3	15.4	6.0	10.5	10.0	22.2
9 5 ~ 9 11	21.7	8.5	14.8	0.2	18.3	18.2	17.4	15.1	5.1	10.3	9.8	21.8	
9 12 ~ 9 18	17.6	4.4	10.9	3.2	14.6	14.8	15.6	14.7	5.0	9.5	9.7	21.5	
9 19 ~ 9 25	18.9	4.4	11.8	0.0	13.6	13.6	13.8	13.7	5.2	9.5	9.7	21.0	
9 26 ~ 10 2	9.3	-3.9	3.0	0.0	8.7	9.1	11.7	12.9	4.7	9.1	9.7	20.6	
10 3 ~ 10 9	19.2	2.6	10.5	0.0	10.1	10.0	10.6	11.5	4.7	9.3	9.7	20.3	
10 10 ~ 10 16	12.9	-2.3	4.9	0.0	7.0	7.3	9.3	10.9	4.5	8.9	9.7	20.1	
10 17 ~ 10 23	9.0	-3.8	1.7	0.0	4.8	5.3	7.9	10.0	4.5	8.7	9.7	19.9	
10 24 ~ 10 30	5.9	-8.9	-2.0	0.0	0.6	1.3	4.8	8.6	4.3	8.5	9.6	19.4	

3 cm*, 3 cm depth under the ground

3. 結果と考察

3.1. 気象データと植生データ

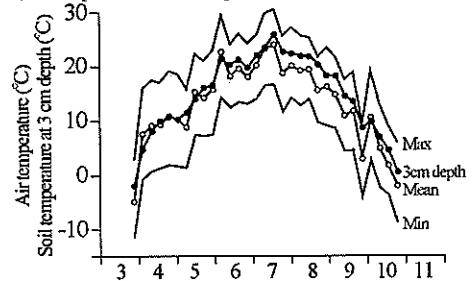
2004年において、平均気温が0°C以上となったのは4月3日から10月29日であった (Table 2, Fig. 2-a)。平均気温が10°Cを越えたのは4月下旬からであり、5月下旬~9月上旬では平均気温が15°Cを越える高温期となり、9月下旬には最低気温が5°C、平均気温が10°Cを下回るようになった。

土壌温度は4月上旬から10月下旬まで連続して深度3cmで0°Cを越えた。4月の気温上昇期から夏の高温期では、土壌深度が下がるにつれて土壌温度は下がったが、逆に9月の気温降下期から冬の冷涼期では、最下層の土壌深度100cmの土壌温度が相対的に最も高かった。深度3cmと深度10cmの土壌温度は、期間を通して最高気温と最低気温の範囲内に位置していた。

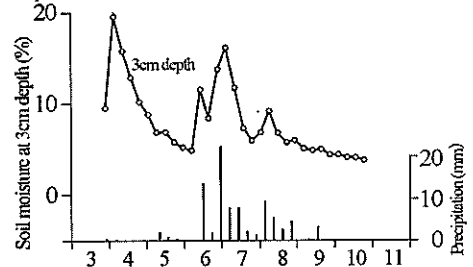
2004年の降水量は合計87.4mmと、年平均値153mmを大きく下回った (Table 2, Fig. 2-b)。降水は6月から8月にかけての高温期に主にある。特に、6月13日~6月19日および6月27日~7月3日間に、それぞれ13.6mm、22.4mmのまとまった降水があった。このまとまった降水に応じて、深度3cmの土壌水分量は10%を越えた。

土壌水分量は、深度3cm、深度10cm、深度40cmでは夏期の降水浸透による上昇などで年間4.3%~24.1%と変動が激しかったのに比べて、深度100cmは年間14.4%~22.4%と冬の凍結期や夏の降水期を通して土壌水分量はより安定していた。深度40cmでは降水に応じて土壌

a) Air temperature and soil temperature



b) Precipitation and soil moisture



c) Plant coverage and aboveground biomass

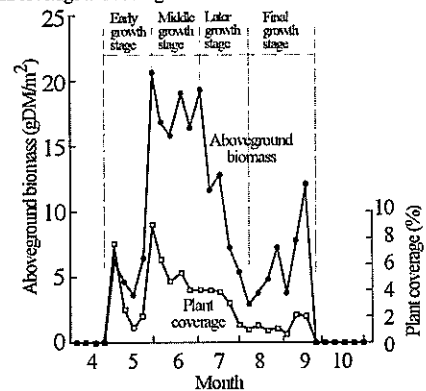


Fig. 2. Temperature of air and soil (°C) at 3 cm depth (a), precipitation (mm) and soil moisture (%) at 3 cm depth (b), and plant coverage and aboveground biomass (gDM/m²) (c) at the study site in 2004.

中の水分量が上昇していたため、降水は深度40cmまでは到達するが、深度100cmにはほぼ達していないことが推察された。なお、平均気温が0°Cを上回った4月4日~4月10日において、深度3cmおよび10cmの土壌水分量がそれぞれ9.3%、14.0%から19.2%、26.7%と急上昇した。この土壌水分量は、TDRプローブ周辺に結露するなど一時的・局所的に水分量が増加したことなどによるエラー値であると考えられる。4月4日~4月10日までの降水量は0.2mmであり、降水が土壌中の水分量上昇に大きく寄与したわけでないことは理解される。3月28日~4月3日までの平均気温が-4.9°Cと氷点下であり、4月4日~4月10日までの平均気温が7.5°Cに上昇し、この気温の上昇が土壌中に凍結していた氷を

Table 3. Seasonal changes of height, total coverage and total aboveground biomass of plants at the study site in 2004.

Plant height (cm)	Growth period																						
	Early growth stage					Middle growth stage					Later growth stage					Final growth stage							
	4.25	5.2	5.9	5.16	5.23	5.30	6.6	6.13	6.20	6.27	7.4	7.11	7.18	7.25	8.1	8.8	8.15	8.22	8.29	9.5	9.12	9.19	9.26
<i>Eurotia ceratoides</i>	0.0	0.8	1.0	0.5	1.0	3.0	2.8	4.5	4.0	3.5	1.5	2.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	9.0	0.0
<i>Caragana pygmaea</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Allium polyrrhizum</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	6.0	9.5	8.5	8.5	10.5	7.5	6.5	6.0	5.5	7.0	9.0	7.5	8.0	6.0	7.5	7.5	0.0
<i>Carex duriuscula</i>	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	5.0	4.0	10.5	7.0	8.0	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Cleistogenes squarrosa</i>	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Convolvulus ammannii</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	1.5	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Potentilla</i> spp.	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Sibbaldianthe sericea</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total coverage (%)	0.0	7.5	2.5	1.0	2.0	9.0	6.3	4.6	5.3	4.0	4.0	4.0	3.9	3.0	1.3	1.0	1.3	0.9	1.1	0.6	2.1	2.0	0.0
Total aboveground biomass (gDM/m ²)	0.0	6.2	4.6	3.6	6.4	20.6	16.8	15.8	19.0	16.4	19.2	11.6	12.8	7.2	5.4	2.8	3.8	4.8	7.2	3.8	7.8	12.0	0.0

融解し、この融解水が土壌水分量を増加させたとは考えられるが、土壌水分量が約20%~27%までに異常に上昇してしまった機構については引き続き今後の検討課題である。従って、本研究においては、平均気温が0°Cを上回る4月4日~4月10日日期から深度3cmで再び約9%に落ち着く5月上旬までの土壌水分量は、少なくとも約9%はあるものとし、絶対値は植物の生育分析には用いないことにする。

Fig. 2-c に植物の被覆率(%)と地上部現存量(gDM/m²)、Table 3 に種構成と出現した植物種毎の自然草丈(cm)、被覆率、地上部現存量の季節変化の結果を示した。植物は、4月26日~5月2日日期に *Eurotia ceratoides* (アカザ科)、*Carex duriuscula* (スゲ科)、*Cleistogenes squarrosa* (イネ科) が出芽し、5月2日には被覆率7.5%、地上部現存量6.2 gDM/m²を記録した。5月24日~5月30日日期には *Caragana pygmaea* (マメ科)、*Allium polyrrhizum* (ユリ科)、*Convolvulus ammannii* (ヒルガオ科)、*Potentilla* spp. (バラ科) の4種の植物が新たに出現し、5月30日には被覆率9.0%、地上部現存量20.6 gDM/m²にまで増加した(生育初期)。その後、7月4日までは地上部現存量が15 gDM/m²以上の高い値で維持された(生育中期)。7月4日以降は *C. duriuscula* が立ち枯れし、*A. polyrrhizum* も自然草丈が低下するなど、被覆率と地上部現存量は減少し、8月8日には2.8 gDM/m²まで低下した(生育後期)。8月9日から9月19日までは *A. polyrrhizum* の生育が大きくは回復せず、地上部現存量は3.8 gDM/m²~12.0 gDM/m²と低い値で停滞した。全ての植物が立ち枯れを起し、植物の生育が停止したのは9月20日~9月26日日期であった(生育最終期)。

3.2. 植物の季節的な生育に影響を与える自然環境の諸要因

3.2.1. 生育初期(4月26日~5月30日)

4月26日~5月2日日期に、*E. ceratoides*、*C. duriuscula*、

C. squarrosa の3種類の植物が出芽した(Table 3, Fig. 2-c)。植物が出芽したタイミングは、平均気温が0°Cを上回り、土壌温度も深度3cmで0°Cを上回った4月4日~4月10日日期から3週間~4週間後のことであった。出芽した時点での平均気温は10.8°Cであった。本期間には降水は0.2mm(4月5日に0.2mm)しかなく、土壌水分量の正確な値は不明ではあるが、土壌深度3cmで約9%であったものと考えられる。アジア大陸北方高原域にある調査地においては、凍結した氷が溶け始め、融解水が発生する土壌温度0°Cを上回って *E. ceratoides* (アカザ科)、*C. duriuscula* (スゲ科)、*C. squarrosa* (イネ科) の3種類の植物が生育を始め、3週間~4週間かけて植物の新芽が地表面に出現(出芽)したものと考えられる。更に、生育初期において、出芽には必ずしも降水が不可欠ではないことも示された。土壌中に水分が深度3cmで約9%あれば出芽は促され、土壌水分量約9%を確保するには降水に必ずしも依存する必要はなく、土壌中に前年から蓄積された水分が存在していれば可能であると考えられる。

5月24日~5月30日日期には、*E. ceratoides* の自然草丈が1.0cmから3.0cmに伸長し、*E. ceratoides* の生育が進展した。5月16日~5月29日日期の気温は、最高気温が21.0°C~22.3°C、平均気温も14.2°C~15.3°Cと気温が上昇している。本期間の降水量は合計1.2mm(5月17日に0.8mm、5月24日に0.2mm、5月27日に0.2mm)、土壌水分量は3cm深で7.0%から5.9%と逆に落ち込んでいる。14日間で1.2mmという雨量は、本調査地においては土壌水分量を上昇させるには十分な降水ではなく、気温の上昇に伴って蒸発量が増加し、逆に土壌が乾燥する結果となった。従って、5月24日~5月30日日期の植物生育初期においては、*E. ceratoides* の生育を促進させた主要因は気温の上昇によることが明らかである。また、5月24日~5月30日日期には、*C. pygmaea*、*A. polyrrhizum*、*C. ammannii*、*Potentilla* spp. の植物が出芽した。土壌温度が深度3cmで0°Cを上回った4月4日~4月10日日期から

7 週間～8 週間後、気温および土壌温度が深度 3cm で 10 °C を上回った 4 月 25 日～5 月 1 日 4 週間～5 週間後であった。この間の 7 日間あたりの降水量は 0.0 mm～2.0 mm (5 月 11 日に 0.6 mm, 5 月 12 日に 0.2 mm, 5 月 14 日に 1.2 mm, 5 月 17 日に 0.8 mm, 5 月 24 日に 0.2 mm, 5 月 27 日に 0.2 mm) であり、土壌深度 3 cm での土壌水分量は 5.9% に減少した。このように、*C. pygmaea* (マメ科), *A. polyrrhizum* (ユリ科), *C. ammanii* (ヒルガオ科), *Potentilla* spp. (バラ科) の植物の出芽においても、気温が重要な要因であると考えられ、その時期の土壌水分量は約 6% であった。

Nakamura *et al.* (2000), Li *et al.* (2005), 近藤ほか (2005), 川田ほか (2007), Shinoda *et al.* (2007) は、降水量の少ないモンゴル草地生態系においては、植物の生育初期における降水が重要な要素であるとしている。本研究において、生育初期に降水による土壌水分量の増加があったとしたら、更なる植物の生育が期待されたかもしれない。しかし、本研究においては、降水がなくとも、土壌水分量が 3 cm 深で少なくとも約 6%～約 9% 確保され、気温・土壌温度が上昇すれば、出芽や生育が促進されることを示していた。本研究の結果、植物の生育初期においては、気温・土壌温度の上昇が植物の生育に重要な要因となっていることが示唆された。

3.2.2. 生育中期 (5 月 31 日～7 月 4 日)

5 月 31 日～7 月 4 日 期間では、被覆率は 4.0%～6.3%、地上部現存量が 15.8 gDM/m²～19.2 gDM/m² と、相対的に高い値で維持された。5 月 30 日～6 月 12 日 期間では、最高気温約 29.4 °C、平均気温は 22.7 °C にも達し、降水はなかったため土壌水分量は 3 cm 深で 4.8% にまで落ち込んだが、*E. ceratoides*, *A. polyrrhizum*, *C. duriuscula* の自然草丈が 6 月 13 日には 4.5 cm (1 週間前は 2.8 cm), 9.5 cm (1 週間前は 6.0 cm), 10.5 cm (1 週間前は 4.0 cm) に伸長したこともあり、全体としては被覆率が 4.6%、地上部現存量が 15.8 gDM/m² の減少に留まった。一方、6 月 13 日～7 月 3 日 期間には、最高気温約 24.0 °C～26.0 °C、平均気温 18.1 °C～19.6 °C と高温が続く中、降水が 6 月 13 日～6 月 19 日 間に 13.6 mm (6 月 13 日に 8.4 mm, 6 月 14 日に 0.2 mm, 6 月 15 日に 0.6 mm, 6 月 16 日に 1.2 mm, 6 月 17 日に 0.2 mm, 6 月 19 日に 3.0 mm), 6 月 27 日～7 月 3 日 間に 22.4 mm (6 月 27 日に 0.6 mm, 6 月 29 日に 5.6 mm, 6 月 30 日に 10.8 mm, 7 月 2 日に 2.6 mm, 7 月 3 日に 2.8 mm) があったことにより、土壌水分量が 3 cm～10 cm 深で 10% を越え、7 月 4 日には *A. polyrrhizum* や *C. duriuscula* の自然草丈が 10.5 cm (1 週間前は 8.5 cm), 10.5 cm (1 週間前は 8.0 cm) に伸長し、6 月 27 日に比べて地上部現

存量は 2.8 gDM/m² 増加した。植物の生育中期においては、高温期の状況下となり、気温が制限要因から外れ、土壌水分量が 3 cm 深で約 5% になると被覆率と地上部現存量は維持もしくは減少する傾向にあり、降水によって土壌水分量が 3 cm 深で約 10% となると植物の生育は促進されることが示唆された。

3.2.3. 生育後期 (7 月 5 日～8 月 8 日)

7 月 5 日以降に *C. duriuscula* が立ち枯れを起し、*A. polyrrhizum* の自然草丈も低下したことなどにより、8 月 8 日には被覆率が 1.0%、地上部現存量が 2.8 gDM/m² にまで減少した。本期間では、最高気温 25.7 °C～30.5 °C、平均気温 18.8 °C～24.0 °C と高温が続く、降水量は 7 日間あたり 1.4 mm～9.4 mm (7 月 5 日に 0.8 mm, 7 月 8 日に 1.0 mm, 7 月 9 日に 5.8 mm, 7 月 10 日に 0.2 mm, 7 月 12 日に 0.2 mm, 7 月 13 日に 0.4 mm, 7 月 14 日に 7.0 mm, 7 月 15 日に 0.2 mm, 7 月 22 日に 2.2 mm, 7 月 18 日に 1.4 mm, 8 月 2 日に 1.4 mm, 8 月 5 日に 2.0 mm, 8 月 6 日に 5.8 mm, 8 月 7 日に 0.2 mm) あったが土壌水分量は 3 cm 深で 5.8%～6.6% に低下した。高温期には降水があったとしても、7 日間あたり 1.4 mm～9.4 mm では土壌中の水分は減少し、*C. duriuscula* が立ち枯れを起すなどして被覆率や地上部現存量が低下したのと考えられる。このように植物の生育後期においては、高温期の状況が続く中、土壌水分量が 3 cm 深で約 6% にまで落ち込むと被覆率や地上部現存量が抑制され、降水量の多少により植物の生育が影響されることが示唆された。

3.2.4. 生育最終期 (8 月 9 日から 9 月 26 日)

8 月 1 日～8 月 14 日 期間のまとまった降水量により、土壌水分量が深度 3 cm で 9.0% に増加したことによって、*A. polyrrhizum* の自然草丈が再び伸長するなど地上部現存量が回復する傾向を示した。しかし、8 月 15 日～9 月 11 日 期間にかけて降水量は 7 日間あたり 0.0 mm～4.6 mm (8 月 16 日に 2.4 mm, 8 月 17 日に 0.2 mm, 8 月 26 日に 4.4 mm, 8 月 28 日に 0.2 mm, 9 月 5 日に 0.2 mm) で、土壌水分量は 3 cm 深で 9.0% から 5.1% へと減少し、地上部現存量は 3.8 gDM/m²～7.8 gDM/m² と相対的に低い値で停滞した。本期間中の最高気温は 25.3 °C から 21.7 °C に、平均気温は 19.4 °C から 14.8 °C に低下したが、植物が十分に生育可能な平均気温約 15 °C は保たれた (佐藤, 1984)。従って、生育最終期において植物の生育が微増するに留まったのは、降水量が少なく、土壌中の水分量が減少したことが一要因として関連しているのと考えられた。

9 月 19 日に地上部現存量が 12.0 gDM/m² と一時的に増加したのは、*E. ceratoides* の株が偶然に偏ってコドラート

内に出現したためである。

9月26日には、被覆率0%と地上部現存量0 gDM/m²となり、全ての植物は立ち枯れを起し植物の生育が停止した。9月19日～9月25日の平均気温は11.8℃にまで低下し、翌週には3℃に落ち込んでいる。-本期間に降水はなく、土壌水分量も3 cm深で5.2%となっている。2004年においては、乾燥状況下で、気温が約10℃に低下した際に植物は生育を停止した。

3.3. 植物の生育と自然環境の諸要因との重回帰分析

全生育期間を通した植物の生育と自然環境の諸要因の関係性を分析するために、植物の生育と自然環境の諸要因との間で重回帰分析を行った。

まず、重回帰分析に用いる説明変数を選出するために、目的変数に被覆率を割り当て、自然環境要因の最高気温、最低気温、平均気温、降水量、土壌深度3 cm、10 cm、40 cm、100 cmにおける土壌温度と土壌水分量の全説明変数間で単相関係数を求めた。気温間（最高気温、最低気温、平均気温）では0.98以上という高い相関、土壌温度間（3 cm深、10 cm深、40 cm深、100 cm深）においても0.7以上の相関、土壌水分量間（3 cm深、10 cm深、40 cm深）では0.93～0.39、平均気温と土壌温度間（3 cm深、10 cm深、40 cm深、100 cm深）では0.33～0.46、降水量と土壌水分量間（3 cm深、10 cm深、40 cm深、100 cm深）では0.19～0.54の相関がそれぞれにあった。単相関と偏回帰係数の符号が一致しない現象をチェックしながら説明変数を検討したところ、気温と降水量の2要因が重回帰分析に用いる自然環境の諸要因として選出された。気温では、最高気温・最低気温・平均気温間では相関が高く、最高気温、最低気温の要因を反映した平均気温を代表して説明変数に用いることにした。

次に、選出された説明変数の平均気温と降水量を用いて、目的変数を被覆率もしくは地上部現存量として重回帰分析を行った（Table 4）。その結果、2004年においては被覆率に影響を与える要因としては平均気温が5%水準で有意であり、降水量には有意性がなかった。また、地上部現存量に影響を与える要因としても、平均気温が1%水準で有意であり、降水量には有意性がなかった。標準偏回帰係数においても、被覆率については降水量が0.06であるのに対して平均気温が0.44、地上部現存量については降水量が0.30であるのに対して平均気温が0.47と、被覆率および地上部現存量に対して降水量よりも平均気温の影響の優位性が示された。モンゴル高原中央部は北緯45°以上の北方に位置している。冷涼地域に位置するモンゴル高原においては、植物の生育の根本は気温

Table 4. Multiple regression analysis between plant coverage or aboveground biomass as objective variable and mean air temperature or precipitation as explaining variable at the study site in 2004.

Objective variable	Explaining variable	Partial regression coefficient	Standard partial regression coefficient	F value
Plant coverage	Mean air temperature	0.15	0.44	5.68*
	Precipitation	0.03	0.06	
	Constant	0.17		
Aboveground biomass	Mean air temperature	0.44	0.47	9.17**
	Precipitation	0.41	0.30	
	Constant	-0.19		

* p < 0.05, ** p < 0.01

が主に支配していることが示唆された。

これまでの多くの論文では、モンゴル国では降水量が草原の生産力を支配する主要因であると報告されてきた（Nachinshonhor, 2002; 近藤・開発, 2003; Yu *et al.*, 2003; Bai *et al.*, 2004; 近藤ほか, 2005; 川田ほか, 2007）。本稿では、降水量が草原の生産力を支配するのは植物の生育中期・後期・最終期であり、植物の生育初期および生育期間を通しては、植物の生育の根本は気温が影響を及ぼしていることを指摘した。また、モンゴル国北部からシベリア地域の北方域においては、衛星データ等を活用して温暖化による植物の生育の活発化が指摘されているが（Myneni *et al.*, 1997; Zhou *et al.*, 2001; 近藤ほか, 2002）、詳細な現地調査に基づいて、モンゴル国中部から南部にかけての草地生態系における気温の重要性についてはこれまでにほとんど指摘されてこなかった。今回の報告は、モンゴル高原中央部の草地生態系において、植物の生育初期における気温の重要性、および、植物に及ぼす気象要因の影響を季節毎に分析できた点で、新たな知見を与えたものと著者らは考えている。

4. おわりに

近年、地球温暖化の危機が叫ばれている。本研究での2004年の単年データに基づいて解析できたことは、モンゴル高原のような北方・冷涼地域では植物生育の根幹は気温が大きく影響しており、平均気温0℃を上回って3週間～4週間後（平均気温約10℃）に出芽が始まり、気温の上昇と共に植物の生育が進展し、再び平均気温が約10℃に低下して全ての生育が停止したことであった。平均気温が約10℃となり、出芽から立ち枯れを起す期間は4月下旬から9月下旬の約5ヶ月間であった。地球温暖化が進行すれば、この植物の生育可能期間が伸長し、モンゴル高原中央部における植物生育は促されることと

なろう。従って、地球温暖化の進行によって地上部現存量は増加し、それに伴って家畜の牧養力は増加するものと考えられる。ただし、気温の上昇により蒸発散量が増加するので、降水が今まで通り以上にあることが前提となる。モンゴル高原中央部のドンドゴビ県マンダゴビ市では2000年から早魃が続いている。つまり、近年の気温上昇に伴ってモンゴル高原中央部では降水量が減少しているのである。降水量が減少し、植物の生育に必要な水分が得られないならば、いくら気温が高くなり、生育可能な期間が伸長しても、植物の生育にとっては意味がない。温暖化と植物生育に十分な降水量があつてこそ、地球温暖化の下にモンゴル高原中央部の植物生産、更には家畜生産の増加が見込める。1999年～2000年と2000年～2001年には、夏の早魃に冬の積雪が重なり、モンゴル国では合計約500万頭もの家畜が死亡してしまった(横濱, 2001)。モンゴル国は、国土が156.4万km²(二宮, 2008)というその広大さとヒツジ換算頭数で5,494万頭⁹⁾という膨大な飼養家畜頭数を所有するがゆえに、アジアにおける草地生態系の保全と家畜生産においては極めて重要な位置を占めている。今後も引き続き、アジア大陸北方域のモンゴル高原における気温の上昇と降水量とに注目していく必要がある。

謝辞

本研究は、JAXA ADEOS II 利用研究プロジェクトに関連した ADEOS II モンゴル高原地上検証実験プロジェクト (AMPEX) (代表: 開発一郎氏) (Kaihotsu *et al.*, 2001)、文部省科学研究費補助金 (特別研究員奨励費 No. 82101)、千葉大学環境リモートセンシング研究センター共同利用研究 (A2002-23)、クリタ水・環境科学振興財団 (一般研究 18086) の支援のもとに行われた。現地での調査を行うにあたって、ドンドゴビ県マンダゴビ市の気象庁職員には植物生育期間を通して植生調査を担当して頂いた。また、査読者の方々からのコメントで議論も深まった。これらの方々には深く感謝する。

注

- A) 降水量は1982年から2004年の平均値である。1982年～2001年までは世界気象資料 (気象庁, 1999; 2003)、2003年～2005年はAWS測定値を利用した。なお、1996年～1999年の降水量値にエラーを認めるので、平均値計算からは除外した。
- B) 植物種構成は年によって異なる。2001年から2007年までの観測では、調査地には *Artemisia* spp., *Scorzonera pseudodiventricata*, *Chenopodium album*, *Stipa* spp.,

Lagochilus ilicifolius, *Allium mongolicum*, *Peganum harmala* を加えて、合計15種類の植物が出現している。

- C) 2006年末におけるモンゴルの家畜飼養頭数は、ウシ196万頭、ウマ203万頭、ラクダ25万頭、ヒツジ1,288万頭、ヤギ1,327万頭である (二宮, 2008)。羊頭数への換算は、ヒツジ・ヤギ1, ウシ5, ウマ8, ラクダ11の換算率を用いた (FAO Compendium of Agricultural - Environmental Indicators (1989-91 to 2000): http://www.fao.org/es/ess/os/envi_indi/annex2.asp)。)

引用文献

- 川田清和・浦野忠朗・李吉宰・鞠子茂・中村徹 (2007): モンゴル国 Kherlen Bayan-Ulaan における過放牧環境下の植物群落の種組成と地上部現存量の変動. 「砂漠研究」17(1): 1-10.
- 気象庁 (1999): 『世界気象資料 1982年～1998年』気象業務支援センター.
- 気象庁 (2003): 『世界気象資料 1999年～2002年』気象業務支援センター.
- 近藤昭彦・建石隆太郎・ルンツヌウ エレオノラ・朴鐘杰 (2002): 植生活動と気候変動, 大気 CO₂ 濃度との関係. 「水文・水資源学会誌」15(2): 128-138.
- 近藤昭彦・開発一郎 (2003): モンゴルにおける植生変動と気候変動の関係に関する予察的研究. 「砂漠研究」13(2): 147-141.
- 近藤昭彦, 開発一郎, 平田昌弘, アザヤ・ドルゴスレン (2005): モンゴル草本植物のフェノロジーとバイオマスの年々変動. 「砂漠研究」14(4): 209-218.
- 佐藤庚 (1984): 環境と生長. 西村修一編著『飼料作物学』文永堂出版, 152-169.
- Nachinshonhor GU. (2002): 「気候と遊牧が乾燥草原の生産力に及ぼす影響. 「モンゴル研究」20: 69-73.
- 二宮健二編 (2008): 『データブック オブ・ザ・ワールド 2008年版』二宮書店.
- スタイルズ E. E. M.・コッキング E. C. (倉石晋・西成典子訳) (1973): 『植物生理学入門』東京大学出版会.
- 山中勤・開発一郎・ウインバータル ダムバラヴィア (2003): TDRによる土壌水分測定値の温度依存性とその原位測定データに基づく補正. 「水文・水資源学会誌」16(3): 246-254.
- 横濱道成 (2001): モンゴル国における家畜飼養の現状とその課題. 「畜産の研究」55(10): 1125-1130.
- Bai Y., Han X., Wu J., Chen Z., Li L. (2004): Ecosystem

- stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, **431**: 181-184.
- Yunatov A.A. (1976): *Bugd Nairamdaq Mongol Ard ulsin Urgamlan nomrogiin Undsen sinjuud*, Ulsin Qewleliyn Gazar, Ulaanbaatar, pp.66-103 (In Mongolia).
- Kaihotsu I., Yamanaka T., Oyunbaatar D., Hirata M., Ohishi K., Muramatsu K., Miyazaki S., Kondoh K., Koike T. (2001): Preliminary Ground-Based Observation for the Soil Moisture Measurement Validation of ADEOS II - AMSER/AMSER-E. *Proceedings of Third Workshop on Remote Sensing of Hydrological Processes and Applications*, January 11, 2001, CEReS, Chiba University.
- Li S.G., Asanuma J., Eugster W., Kotani A., Liu J.J., Urano T., Okikawa T., Davaa G., Oyunbaatar, D., Sugita M. (2005): Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. *Global Change Biology* **11**: 1941-1955.
- Myneni R.B., Keeling C.D., Tucker C.J., Asrar G., Nemani R.R. (1997): Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991. *Nature*, **386**: 698-702.
- Nakamura T., Go T., Wuyunna, Hayashi I. (1998): Effects of Grazing on the Floristic Composition of Grasslands in Baiyinxile, Xilingole, Inner Mongolia. *Grassland Science*, **45**(4): 342-350.
- Shinoda M., Ito S., Nachinshonhor GU., Erdenetsetseg D. (2007): Phenology of Mongolian grasslands and moisture conditions. *J. Meteorological Society of Japan*, **85**(3): 359-367.
- Ölziyqutag N. (1985): *Bugd Nyrandaq Mongol Ard Ulsin Belcheer, Qadlan Daq Tezeeliyn Urgamal Taniq Bichig*, Ulsin Qewleliyn Gazar, Ulaanbaatar (In Mongolia).
- Yu F., Price K.P., Ellis J., Shi P. (2003): Response of seasonal vegetation development to climatic variation in eastern central Asia. *Remote Sensing of Environment*, **87**: 42-54.
- Zho L., Tucker, C.J., Kaufmann R.K., Slayback, D., Shabanov N.V., Myneni R.B. (2001): Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *J. Geophysical Research*, **106**(D17): 20069-20083.

Effects of some Environmental Factors on the Plant Growth in the Central Mongolian Plateau

Masahiro HIRATA^{*1)}, Saori KISHIKAWA¹⁾, Akihiko KONDOH²⁾, Tsutomu YAMANAKA³⁾,
Ichiro KAIHOTSU⁴⁾, Batmunkh DAMDIN⁵⁾ and Akio HONGO¹⁾

Abstract: This study was carried out to clarify the effects of some environmental factors on the seasonal growth of herbaceous plants and shrubs in the central Mongolian plateau in 2004. The relationship was analyzed between air temperature, precipitation, soil temperature, moisture as the environmental factor and plant coverage, aboveground biomass as the vegetation factor. At the early plant growth stage (26 April to 30 May), new shoots of Chenopodiaceae, Cyperaceae and Graminae emerged 3 weeks - 4 weeks after above 0 °C of mean air temperature and soil temperature. It was suggested that the plant emergence and growth are promoted according to the rise of air and soil temperature even in precipitation deficiency at the early growth stage, if water resource is enough accumulated in soil during the last rainy season (at least more than 6% - 9% of soil moisture). During the plant growth stage of middle (31 May to 4 July) and later (5 July to 8 August), it was considered that the amount of precipitation strongly affects the plant coverage and aboveground biomass when it was under high air temperature. All plants stopped those growths when air temperature dropped to around 10 °C under the dry condition. According to the results of multiple regression analyses between the environmental factors and the vegetation factors in 2004, the air temperature primarily affected the plant growth during the whole growth season. This paper pointed out that the air temperature basically controls the plant growth in such northern cooler places as the central Mongolian plateau (more than 45 degree north latitude and 1,000 m above sea level).

Key words: Mongolian plateau, Native plant, Plant growth, Soil temperature and moisture, Weather condition

*Corresponding Author: masa@obihiro.ac.jp

(Received, April 15th, 2008; Accepted, December 9th, 2008)

2-11, Inada-cho Nishi, Obihiro, Hokkaido, 080-8555, Japan Tel: 0155-49-5485 Fax: 0155-49-5593

1) Department of agro-environmental science, Obihiro University of Veterinary Medicine and Agriculture

2) Center for environmental remote sensing, Chiba University

3) Terrestrial environment research center, University of Tsukuba

4) Graduate school of integrated arts and sciences, Hiroshima University

5) Department of natural farming, Ulaanbaatar University