

## Palmer Drought Severity Index (PDSI) を用いた モンゴルの旱魃の解析

An Analysis of Drought in Mongolia Using Palmer Drought Severity Index (PDSI)

鈴木 和美<sup>\*</sup>・山中 勤<sup>\*\*</sup>

Kazumi SUZUKI<sup>\*</sup> and Tsutomu YAMANAKA<sup>\*\*</sup>

### I はじめに

ユーラシア大陸の高緯度内陸部に位置するモンゴルでは、比較的狭い領域で森林－草原－砂漠という明確な植生移行帯（エコトーン）が形成されている。このような場合は、地球温暖化等の外部条件の変化に対する影響が顕在化しやすいと考えられている（杉田，2002）。また事実，1951年から1990年にかけての，明瞭な気温上昇と降水量減少のトレンドも見出されている（Yatagai and Yasunari, 1994）。さらに，1990年代の後半には雪害（ゾド）が頻発したが，その被害を増大させた要因として，夏季の旱魃による水不足（家畜の基礎体力の低下と牧草備蓄量の減少を招く）を挙げる声もある（鈴木，2003；森永・篠田，2003）。

灌漑農業設備がほとんどなく，簡素な放牧を基幹産業とするモンゴルは，旱魃による被害が他の国々と比較して顕著になりやすい性格を有すると言え，また旱魃時に脆弱な草やその根が家畜によって食べ尽くされてしまうことにより，砂漠化が加速するという危険性もはらんでいる。特に1990年以降，中央計画経済から市場経済への移

行により，土地や家畜の私有化が始まった結果，牧民及び牧民の所有する家畜頭数の急増や，広域的な移動式牧畜から定住型牧畜への移行，そしてそれらに伴う放牧圧の増大と土地の劣化が進行しつつある（世界資源研究所ほか，2001）。こうした自然条件・社会条件の変化により，モンゴルにおける旱魃に対する脆弱性（vulnerability）は，益々増加（悪化）するものと予想される。しかしながら，旱魃の発生状況を定量的に把握し，それによる社会的損害（例えば，家畜頭数の減少など）との関係性について客観的に調査した例はほとんど見受けられない。

これまでに世界各国においてなされてきた旱魃に関する研究を大別すると，①旱魃の原因とそれに関係する大気循環の研究，②旱魃の発生傾向（頻度や強度など）に関する研究，③旱魃のインパクト評価（コストや経済的・社会的・環境的損害など）に関する研究，ならびに④旱魃の被害軽減のための対策・回復・準備戦略に関する研究の4つのカテゴリーに分類することができる（Byun and Wilhite, 1999）。これらの中で，②③④に関しては，旱魃の深刻さを定量的に把握する作業が不可欠であるが，旱魃の定義は時代や地域によっ

<sup>\*</sup> 筑波大学第一学群自然科学類

<sup>\*\*</sup> 筑波大学陸域環境研究センター

て異なり、一律の基準でその深刻さを表現することは難しい（林，1989；Heim，2000）。例えば，最も簡単な定義として「水不足が連続して発生している状態」を考えることができる。この場合降水量の少ない砂漠では常に早魃が発生していることになるが，早魃の被害が大きいかというところではない。なぜなら，もともと降水量の少ない地域では，それに適応した生態系や社会システムが既に形成されているためである。したがって，早魃の深刻さは，個々の地域の気候条件を考慮して，そこからの偏差やその累積状況として考えなければならない。そうした考えから生まれてきたのが早魃指数（Drought Index）であり，WMO（1992）によって「長期的でかつ異常な水不足の積算結果に関する指数」と定義されている。こうした早魃指数を用いて初めて，早魃の察知・現状把握・分析および早期警戒が可能となる。

早魃の定義の多様性を反映して，早魃指数もまた様々なものが提案されてきており（Steila，1998；Heim，2000），それらの比較研究も行われているが（たとえば，Byun and Wilhite，1999），現在最も広く使用されているのが Palmer Drought Severity Index（PDSI；Palmer，1965）である。このインデックスは，早魃による農作物の被害を比較的よく説明できることから，先物取引の参考情報としても用いられている。早魃の解析に PDSI を用いることの最大の利点は，世界各国で用いられているため，地域間の比較を同一の尺度上で行えるという点にある。しかしながら，これまでモンゴルの早魃について PDSI を用いて解析した例はない。

以上のような背景から，本研究では，まずモンゴルにおける早魃の発生状況とその特徴を PDSI によって把握し，さらに家畜頭数や植生指標と PDSI との対応関係について検討を加える。

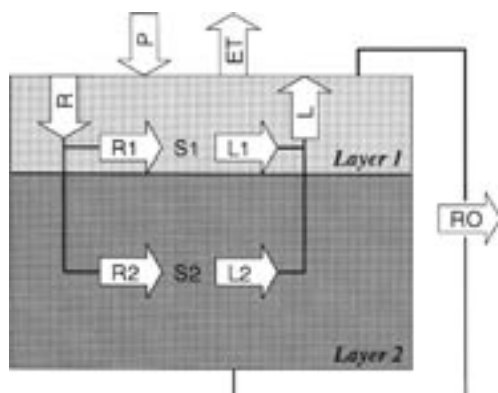
## II 方法

### 1. PDSI の算出

PDSI は，2 層からなる土壌の水収支（第 1 図）を基礎とし，各月の状態量の平年からの偏差を連続きの乾燥（あるいは湿潤）期間内で積算することによって求められる。しかし，その過程はかなり煩雑で，しかも邦文の解説書が少ないことから，以下に詳細を記述する。なお，計算に使用される各パラメータの表記法は第 1 表にまとめて記す。

第 2 図に示すように，PDSI の算出過程は 10 のステップから構成される。最初のステップとして入力すべきデータは，月降水量と月平均気温の時系列データのほか，対象地点ごとに固有の値として，月平均気温の平年値，緯度，および AWC（Available Water Capacity）である。AWC は深さ 1 m の土壌層に保持することのできる水量で，そのうち 1 インチ（＝ 25.4 mm）が第一層に保持されると仮定される。

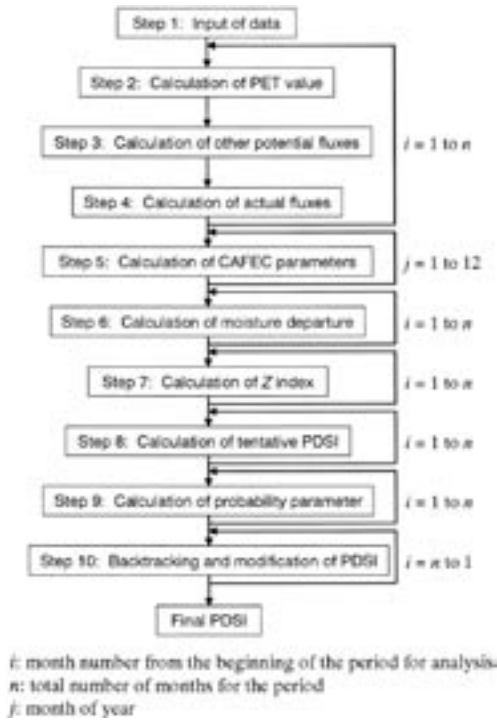
Step 2 では，Thornthwaite 法（Thornthwaite，1948；樫根，1980）により可能蒸発散量を算出し，Step 3 と Step 4 ではそれぞれ Potential フラックスと Actual フラックスの算出を行う。ここで，Potential フラックスとは，当該月の初期水分量と気温のみを考慮して求められるフラックスのこと



第 1 図 PDSI 算出の基礎となる 2 層土壌水収支モデル

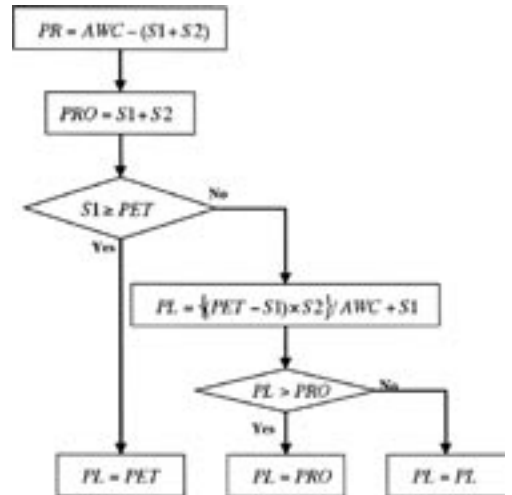
第 1 表 PDSI の算出に用いられるパラメータ一覧

Symbol	Definition	Unit	Symbol	Definition	Unit
$AWC$	available water capacity	mm	$R1$	recharge to layer 1	mm
$d$	moisture departure	mm	$R2$	recharge to layer 2	mm
$ET$	evapotranspiration	mm	$RO$	runoff	mm
$K, K'$	weighting factors	—	$S1$	soil moisture of layer 1	mm
$L$	loss	mm	$S2$	soil moisture of layer 2	mm
$L1$	loss from layer 1	mm	$Uw$	parameter for calculating $Pe$	mm
$L2$	loss from layer 2	mm	$Ud$	parameter for calculating $Pe$	mm
$P$	precipitation	mm	$V$	parameter for calculating $Pe$	mm
$\bar{P}$	CAFEC value of $P$	mm	$X1$	tentative PDSI in dry spell	mm
$Pe$	probability parameter	—	$X2$	tentative PDSI in dry spell	mm
$PET$	potential evapotranspiration	mm	$X3$	tentative PDSI	mm
$PL$	potential loss	mm	$Z$	moisture anomaly (Z-index)	mm
$PR$	potential recharge	mm	$ZE$	parameter for calculating $Pe$	mm
$PRO$	potential runoff	mm	$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	CAFEC parameters	—
$R$	recharge	mm			



第 2 図 PDSI 算出のフローチャート

で、その月の降水量の値には依存しない (第 3 図)。これに対し、Actual フラックスは、当該月の降水量と可能蒸発散量の兼ね合いによって決まる新たな水分状態を想定して算出される (第 4 図)。

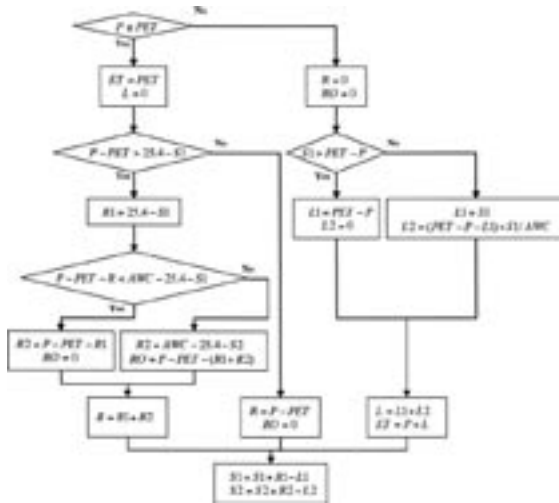


第 3 図 Step 3 における Potential フラックスの算出

Step 5 では、全解析期間について求められた Potential フラックスと Actual フラックスの時系列データを用いて、各月 (1 月～12 月) ごとに下記の 4 種類のパラメータを計算する。

$$\alpha = \overline{ET} / \overline{PET} \quad (1)$$

$$\beta = \overline{R} / \overline{Pk} \quad (2)$$



第4図 Step 4における Actual フラックスの算出

$$\gamma = \overline{RO} / \overline{PRO} \quad (3)$$

$$\delta = \overline{L} / \overline{PL} \quad (4)$$

ここで、オーバーバーは各月の平年値を意味する。これらは、次に説明する CAFEC 量を算出するためのパラメータであり、従来特別な呼称は与えられていないが、本稿では便宜上 CAFEC パラメータと呼ぶことにする。

Step 6 では、次式によって moisture departure ( $d$ ) を算出する。

$$d = P - \bar{P} \quad (5)$$

式中の  $\bar{P}$  は次式で与えられる。

$$\bar{P} = \alpha \overline{PET} + \beta \overline{PR} + \gamma \overline{PRO} - \delta \overline{PL} \quad (6)$$

$\bar{P}$  および (6) 式右辺各項は、所与の条件（当該月の初期水分状態と気温）に対して、気候学的に予測されるフラックスを意味し、CAFEC (Climatologically Appropriate For Existing Conditions) 量と呼ばれる。すなわち、(1) ~ (4)

式の CAFEC パラメータは、Actual フラックスと Potential フラックスの（季節性を考慮した）気候学的関係を表しており、これらから得られる  $P$  と実際の降水量との差である  $d$  は、各地域の気候学的特性を考慮した乾燥／湿潤の偏差を表現している。

Step 7 では、地域間の比較可能性を高めるために、水分偏差を無次元化した  $Z$  インデックスを次式により求める。

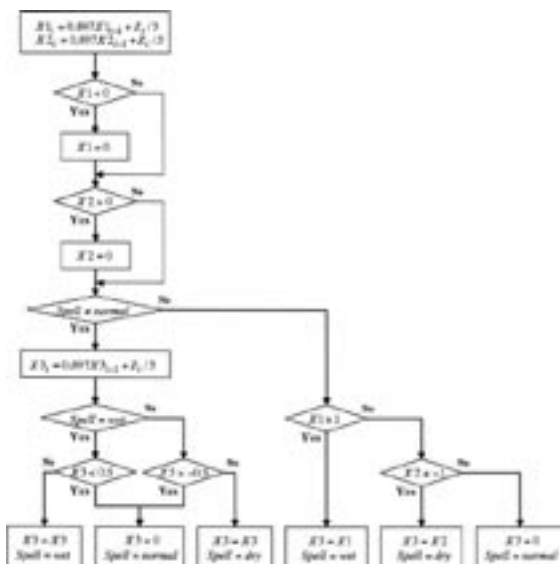
$$Z = d \times K \quad (7)$$

ここで、 $K$  は CAFEC パラメータ同様に各月（1月～12月）ごとに求められる重み付け係数であり、Palmer (1965) によって次の経験式が提出されている。

$$K = \left( \frac{17.67}{\sum_{i=1}^{12} |d_i| K_i} \right) \times K' \quad (8)$$

$$K' = 1.5 \log \left( \frac{\overline{PET} + \overline{R} + \overline{RO}}{P + L} \right) + \frac{2.8}{|d|} + 0.5 \quad (9)$$

$Z$  インデックスは短期的な旱魃（あるいは湿潤）状態の指標として用いることもできるが、旱魃の深刻さはその持続性とも大きく関係するため、そうした効果も考慮するためには  $Z$  インデックスを積算した別のパラメータが必要となる。しかし、単純に  $Z$  インデックスを積算しただけでは、正負どちらかに一方的にドリフトしてしまう可能性がある。このため、旱魃（あるいは湿潤）期間の終了時に積算パラメータをリセットするという方法が考えられるが、旱魃／湿潤期間の終了判定には不確定性を伴うので（終了の判定が正しかったかどうかは翌月になってみないと分からない）、これがその後の積算値に影響を及ぼす。



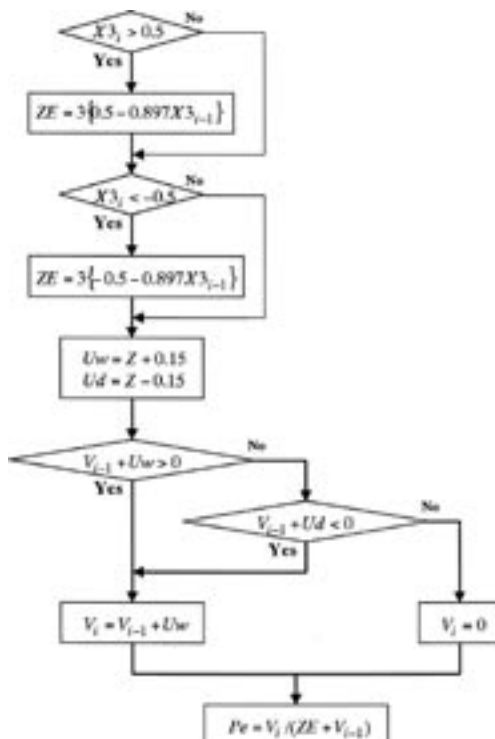
第5図 Step 8におけるPDSI暫定値(X1, X2 および X3)の算出

第2表 PDSIによる早魃の評価

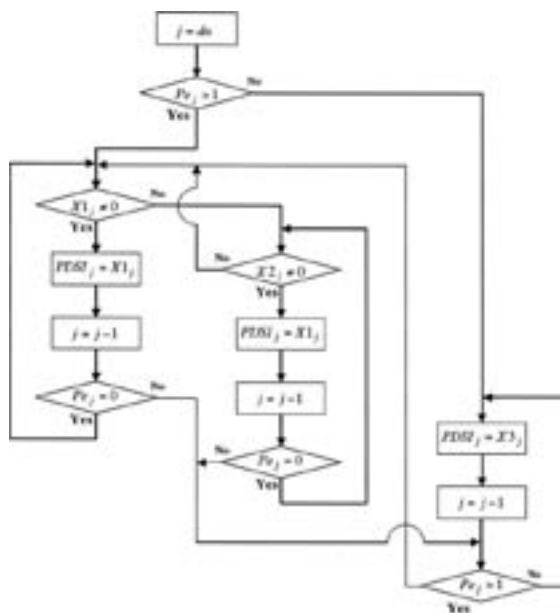
PDSI	Class
$\geq 4$	Extremely wet
$3 \sim 4$	Very wet
$2 \sim 3$	Moderately wet
$1 \sim 2$	Slightly wet
$0.5 \sim 1$	Incipient wet spell
$-0.5 \sim 0.5$	Near normal
$-0.5 \sim -1$	Incipient drought
$-1 \sim -2$	Mild drought
$-2 \sim -3$	Moderate drought
$-3 \sim -4$	Severe drought
$\leq -4$	Extreme drought

そこで、PDSIの算出にあたっては、まずPDSIの暫定値を全期間について求めた上で（Step 8；第5図）、早魃／湿潤期間の終了確率パラメータを計算し（Step 9；第6図）、これを用いて時間を遡りながら早魃／湿潤期間の終了時期を再判定し、PDSIの修正を行う（Step 10；第7図）。最終的に求められたPDSIの値は、第2表にしたがって解釈される。

なお、PDSIの算出方法については、Alley (1984)、Karl (1986)、Guttman (1991)、および



第6図 Step 9におけるProbabilityパラメータの計算



University of Nebraska-Lincoln の Web サイト (Wells, 2002) を参照した。

## 2. 使用データ

### 1) NCEP/NCAR 再解析データ

PDSI の算出には、欠測期間のない長期連続データが必要である。このような要求を満たすものとして、本研究では NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 再解析データを用いた。主たる解析対象領域は、砂漠化の影響が出やすいと予想されるゴビ砂漠北縁の乾燥草原 (第 8 図) とし、北緯 45 度 67 分 58 秒、東経 106 度 88 分 00 秒における、1948 ~ 2002 年の月降水量と月平均気温を使用した。

### 2) 家畜統計

家畜頭数データとして、モンゴル全土に関する 1961 ~ 2000 年の馬・牛・羊の家畜統計を用いる。1961 ~ 1990 年に関してはアジア・太平洋統計年鑑 (国際連合編)、1991 ~ 2000 年に関しては国際連合世界統計年鑑 (国際連合統計局編) から得た。

当該年における家畜頭数は、年末に頭数調査が行われており (ただし 1961 年以降)、前年末の総家畜頭数に仔家畜を足し、損失家畜数と消費家畜数を引いた値に等しい (青木, 1993)。損失家畜は病気・自然災害・狼害などにより失われる家畜のことであり、消費家畜は国内消費家畜と輸出消費家畜の両方を含んでいる。



第 8 図 解析対象地域 (破線内; UB = ウランバートル)

本来ならば、PDSI との対応関係を調べるには県 (アイマク) 単位の統計データを用いるのが望ましいが、長期のデータが得にくいことから、上記の統計を用いた。

### 3) NDVI データ

前述した PDSI と家畜頭数の関係を調べる上で、それらの中間項として植生状況を把握することは有益であると考えられる。NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) は、衛星観測から得られる植生バイオマスの多寡を示す指標であり、砂漠化の進行状況の把握などに用いられる。本研究では、NOAA/AVHRR によって得られた 1981 ~ 2002 年の 10 日間コンポジットデータ (北緯 45 度 76 分 67 秒・東経 106 度 23 分 33 秒) を用い、欠測期間については SPOT による観測データで補間し、月平均データセットを作成した。

## III 結果と考察

### 1. PDSI の長期変化

前述したように、PDSI の算出にあたっては、対象とする地域固有のパラメータとして  $AWC$  を設定する必要がある。しかしながら、 $AWC$  の値の具体的な設定方法に関しては厳密な指針が与えられていない。そこでまず、 $AWC$  に対する PDSI の感度を明らかにするため、3 種類の値 (100, 200 および 300 mm) を用いて PDSI の計算を行った。その結果、 $Z$  インデックスは  $AWC$  の値に対してやや敏感に応答するものの、PDSI はほとんど変化しないことが分かった。以下では  $AWC = 200$  mm として算出した値を用いることにする。

第 9 図に PDSI の経年的な変動を示す。1960 年代前半までは湿潤 ( $PDSI > 0$ ) な期間が多く、特に 1954 ~ 57 年と 1962 ~ 64 年の 2 つの期間で Extremely wet ( $PDSI > 4$ ) となっていた。一方、1968 年以降は一転して乾燥した期間のほうが多くなり、1967 ~ 1972 年の 6 年間と 1995 ~

2003 年の 9 年間は、連続して（夏季に）Extreme drought ( $PDSI \leq -4$ ) となっている。また、1973 ~ 88 年の期間は数年おきにやや湿潤な時期があるが、それ以外はほぼ  $PDSI < -0.5$  となっている。つまり、1965 年以降この地域は早魃モードにシフトしたと言え、特に最近 10 年近くは極度の早魃が毎年発生していることになる。

## 2. PDSI と NDVI の対応関係

PDSI は、少雨と高温（蒸発散による水損失大）による水不足、すなわち気象学的早魃の程度を表現しているが、これが植物の成長とどの程度関係しているかを明らかにするため、PDSI と NDVI の相関関係を検討する。

植物の成長には明らかな季節性があるため、月単位の時系列データを直接用いて相関を調べるのは適切ではない。そこで、年平均値を用いて経年的な変動に関する両者の間の相関係数を求めたところ、 $r = 0.004$  とほとんど相関はなかった。次に、PDSI の年最小値と NDVI の年最大値を用いて同様に相関を調べたところ、弱い相関が見出された ( $r = 0.361$ )。すなわち、早魃が深刻な年は、植生の成長の上限が低く抑えられるという傾向がうかがえる。

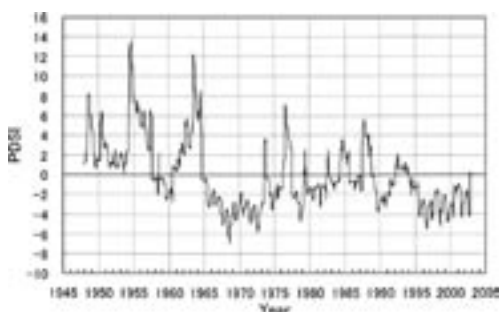
月ごとに PDSI と NDVI の相関を調べてみると、植生長成期間中、7 月の相関が最も高いという結果が得られた（第 10 図）。このことは、太陽

エネルギーの入力が大きく、かつある程度の葉面積が確保されている 7 月（まで）の水分状況が、植生の成長に及ぼす影響が最も大きいことを示している。また、PDSI が積算パラメータでありながら早魃（湿潤）期間終了時にニュートラルな状態に戻るという特性と、7 月から 8 月にかけて相関が急激に低くなるという事実は、次のことを暗示している。すなわち、7 月までの早魃（湿潤状態）が 8 月に終息する年とそうでない年があるが、たとえ終息したとしても、植生の成長にはそれまでの水分状況が影響を及ぼし続けていると考えられる。

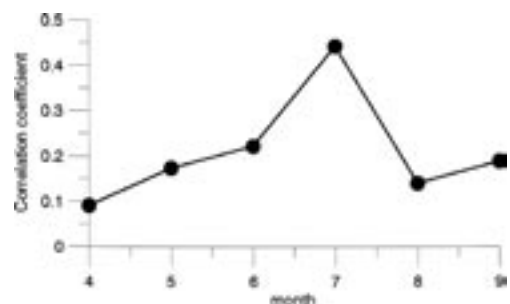
## 3. 早魃と家畜の関係

早魃が人間社会、特にモンゴルの基幹産業である牧畜業に及ぼす影響を明らかにするために、前年比家畜頭数変化率と PDSI の相関を調査した。その結果、有意な対応関係が部分的に見出せたが、期間によってそれらは異なる関係性を示した。そこで、家畜頭数変化率と当該年およびその前年の各月の PDSI との相関を、4 つの年代について第 11 図 a ~ d に示し、その特徴について以下に記す。

まず、1961-1970 年の 10 年間（第 11 図 a）について見てみると、全体的に家畜頭数変化率は PDSI と相関が高く、特に前年の夏季における PDSI との相関が強い。1960 年代は、前半（1962



第 9 図 PDSI の経年変動



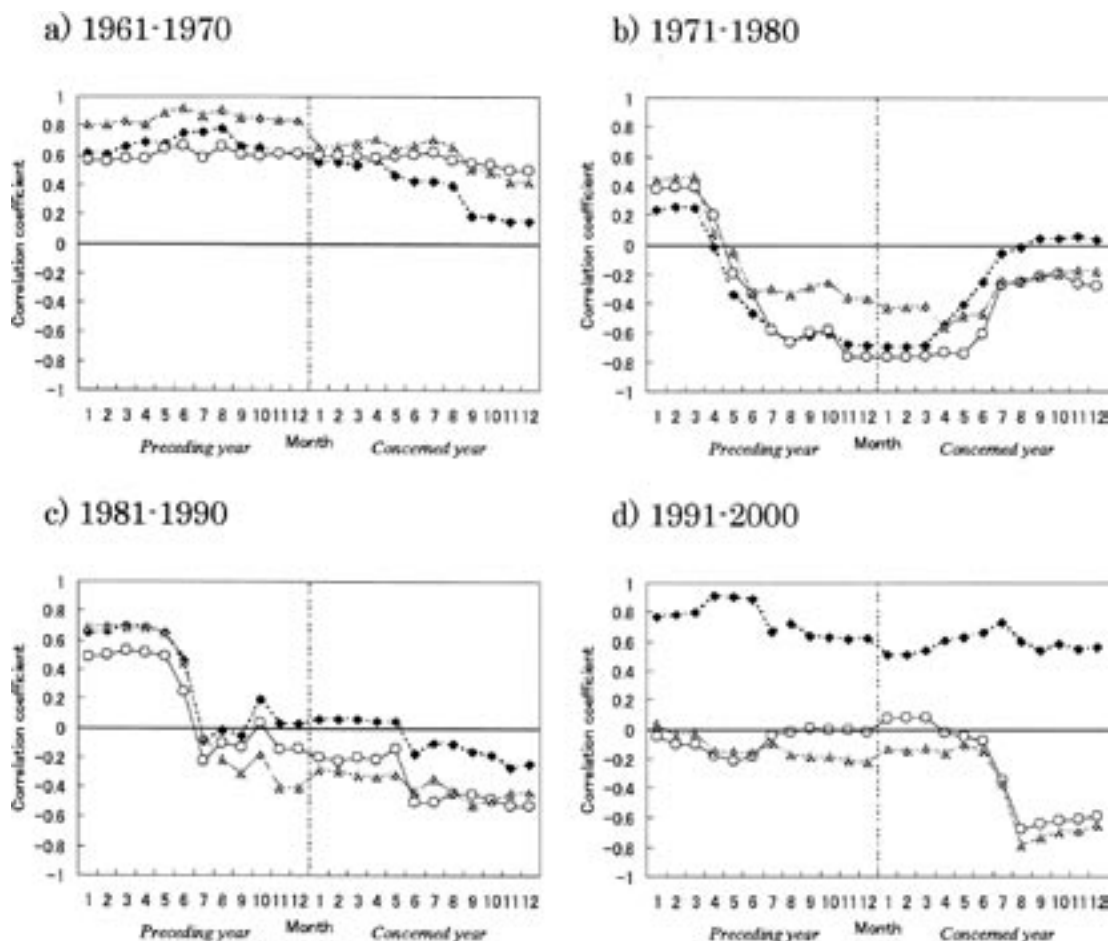
第 10 図 各月ごとの PDSI と NDVI の相関

～1964)が極度の湿潤期、後半(1967年以降)が極度の早魃であり、変動の振幅が大きく周期も長い。このため、家畜におよぼす早魃の影響が明瞭に表れたものと考えられる。

次に、数年周期の小規模な早魃が卓越した1971-1980年(第11図b)を見てみると、1960年代とは明らかに異なった傾向が示されており、前年の夏から当年の夏にかけての強い逆相関が認められる。この逆相関関係は、1976～77年に発生したモンゴル全域におよぼゾド(森永・篠田, 2003)とそれに伴う大幅な家畜頭数の減少を反映したものであり、この年のデータを除外すると、

PDSIと家畜頭数変化率の相関もほぼ解消されてしまう。

1970年代同様、大規模な早魃の発生がない1981-1990年の期間(第11図c)においても、PDSIと家畜頭数変化率の間の強い相関は見出せないが、当該年の秋以降で逆相関、前年の春以前で正の相関が認められる。前者(負の相関)は、家畜頭数の変化に及ぼす乾湿状況の影響が1年半以上のタイムラグを有することを示唆している。一方、後者(正の相関)は、単に位相のズレを反映しているだけの可能性もあるが、湿潤年に家畜を大量消費し、早魃年に消費を抑えるという人為



第11図 家畜頭数の前年比変化率と当該年およびその前年の各月のPDSIとの相関(◆:馬, ○:羊, ▲:牛)



的なコントロールが働いた可能性も考えられる。

極度の早魃が連続して生じるようになった1991-2000年の期間（第11図d）では、羊や牛と比較して馬は明らかに異なる傾向を示している。馬の頭数変化率は1960年代同様にPDSIと高い正の相関を示し、特に夏季の相関が高い。馬の頭数自体はほぼ年々減少する傾向を示しているため、（夏季の）早魃が激しいほど頭数の減少率が大きいということを意味している。なお現地では、馬は五畜（馬・羊・牛・ヤギ・ラクダ）のうち最も早魃に弱い生き物と認識されており、その認識がデータによって裏付けられたと言える。一方、羊と牛の頭数変化率はPDSIとの相関が低いが、当該年の8月以降の負の相関が強くなっている。このことは、本格的な消費が始まる8月以降の早魃状況に応じて、頭数をコントロールしている可能性があることを示唆している。これらの点は、総頭数のみでなく、消費家畜数や損失家畜数などに関する詳細な統計が入手できれば、より正確な議論が行えるはずである。

#### IV まとめ

NCEP/NCAR 再解析データを用いて、モンゴル南部の乾燥草原域におけるPDSIを算出し、その長期変動傾向を解析した。解析結果から、1965年以降この地域では早魃が多発するようになり、特に1967～1972年の6年間と1995～2003年の9年間は、連続して（夏季に）特に厳しい早魃が生じていたことが判明した。また、早魃の影響はNDVIの変動にも見出せたが、牧畜業に対する影響は単純ではなかった。大規模な早魃の発生が見られない1970～80年代には、早魃による家畜の激減といった影響は認められないが、厳しい早魃が連続して発生した1960年代と90年代では、早魃の深刻さに応じた家畜頭数の変動が認められた。しかし、1990年代の早魃の影響は馬のみに見られ、羊と牛に関してはむしろ人為的コント

ロールの影響が強いことが示された。しかし、より正確な結論を導くには、県単位の家畜統計やその内訳（消費家畜数・損失家畜数・母畜数・仔畜数など）を調べる必要があらうし、またモンゴル国内におけるPDSIの時空間的変動構造の解明も今後の課題である。

#### 謝辞

科学技術振興機構の佐藤友徳氏にはNDVIコンポジットデータを提供していただいた。また、平田昌弘博士（地球環境学総合研究所）と大石風人氏（京都大学大学院）にはモンゴルの家畜に関して様々な知見を御教示いただいた。本研究はAMPEXプロジェクト（宇宙航空研究開発機構）およびRAISEプロジェクト（科学技術振興機構）の一環として行われた。

#### 文献

- 青木信治編（1993）：「変革下のモンゴル国経済」アジア経済研究所，245p.
- 榎根 勇（1980）：「水文学」大明堂，272p.
- 杉田倫明（2002）：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：RAISE Projectの概要。筑波大学陸域環境研究センター報告，**3**，147-156.
- 鈴木由紀夫（2003）：モンゴル国における農牧業の現状。科学，**73**，549-553.
- 世界資源研究所・国連環境計画・国連開発計画・世界銀行共編（2001）：世界の資源と環境2000-2001：地球生態系と人類の未来。日経BP社，219-231.
- 林 静夫（1989）：干ばつの現象，定義と災害に関する経緯。農業土木学会論文集，**144**，101-108.
- 森永由紀・篠田雅人（2003）：モンゴルの自然災害ゾド。科学，**73**，573-577.

- Alley, W. M. (1984): The palmer drought severity index: Limitations and assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **23**, 1100-1109.
- Byun, H. R. and Wilhite, D. A. (1999): Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, **12**, 2746-2765.
- Guttman, N. B. (1991): A sensitivity analysis of the Palmer hydrologic drought index. *Water Resources Bulletin*, **27**, 797-807.
- Heim, R. R. Jr. (2000): Drought indices. Wilhite, D. A. ed. : *Drought : A global assessment, Vol. 1*. Routledge, London, 159-167.
- Karl, T. R. (1986): The sensitivity of Palmer drought severity index and Palmer's Z-index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **25**, 77-86.
- Palmer, W. C. (1965): *Meteorological Drought. Research Paper*, No. 45, Weather Bureau, Washington, D. C., 58p.
- Steila, D. (1998): Drought. Fairbridge, R. W. ed. : *Encyclopedia of Hydrology and Water Resources*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 204-211.
- Thornthwaite, C. W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, **65**, 391-402.
- Wells, N. (2002): What is the Palmer drought severity index? [http://nadss.unl.edu/info/pdsi\\_doc/](http://nadss.unl.edu/info/pdsi_doc/)
- WMO (World Meteorological Organization) (1992): *International Meteorological Vocabulary, Second Edition*, WMO Publication, No. 182, Geneva, Switzerland.
- Yatagai, A. and Yasunari, T. (1994): Trends and decadal-scale fluctuations of surface air temperature and precipitation over China and Mongolia during the recent 40 year period (1951-1990). *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **72**, 937-957.

(2004 年 5 月 31 日受付, 2004 年 10 月 29 日受理)