

VI-Ts 法によるユーラシア大陸の 地表面状態の季節変化特性に対する一考察

A observation to the property of seasonal changes in land surface status
in the Eurasian Continent using VI-Ts method

福田祐一郎¹・樋口篤志²・檜山哲哉²・福嶋義宏³
Yuichiro Fukuta, Atsushi Higuchi, Tetuya Hiyama, Yoshihiro Fukushima

- 1 学(理) 名古屋大学大学院 理学研究科地球惑星理学専攻 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)
2 博(理) 名古屋大学助手 地球水循環研究センター (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)
3 農博 京都大学教授 総合地球環境学研究所 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

地表面湿潤状態のリモートセンシング手法として VI-Ts 法が有効とされている。ユーラシア大陸の地表面状態を Ts/NDVI 関係のスロープを使用し季節変化を得た。また、気象・気候環境の違う 5 サイトからその降水量、地表面湿潤度、NDVI 変動を比較し、その違いを検討した。データとして USGS から Global Land 1-km AVHRR Data Set を、NCDC から気象ステーションのデータを使用した。その結果、スロープ分布は年間を通じて、チベットで 20 から 150、モンゴルでは 0 から 50 までの正值で占める広い領域が認められた。雨季・乾季が明瞭な地域とチベット、モンゴル地域では降雨に対応するスロープ変動が逆相関である傾向がみられた。さらにチベット・モンゴル地域の Ts/NDVI 散布図は年間を通じて NDVI 方向の散布が小さく、Ts 方向の散布が大きかった。同地域の年間 NDVI 変動幅は小さく、その値は 0.1 から 0.3 であった。また、雨季開始期の 5 月と湿潤移行期の 7 月での Ts 最大値をとる NDVI 値も 0.1 から 0.3 であった。チベット、モンゴル地域のような半乾燥域・高山帯と熱帯・温帯とのスロープ変動の違いは地表被覆の違いにより湿潤移行過程での異なる現象を捉えていたことによると考えられた。

キーワード： VI-Ts 法, 地表面湿潤度, NOAA/AVHRR, 乾燥・半乾燥帯・高山帯

I. はじめに

土壌水分や群落コンダクタンスの同定に有効とされる VI-Ts (Vegetation Index - Surface Temperature) 法は、植生指標 (VIs) と輝度温度 (Ts) の組み合わせで地表面状態やフラックスを推定するいくつかの手法の総称である。NDVI も Ts も既存の衛星センサーにより観測されるため、適用性が高い。VIs と Ts との関係を調べた先駆的な研究は Goward et al., (1985)¹⁾ であり、VIs と Ts を平面プロットした VI-Ts 散布図に負の相関があることを見出した。その理由としてウインドウ・ピクセル領域内の植生が増加することにより蒸発散量の増加が地表面温度を低下させるとしている。この理由は、植物成長期において NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) と潜熱フラックスとの間には強い正の相関がある(樋口・近藤, 2000)²⁾ といわれていることから正確性が高い。また、NDVI と Ts 散布図の分布形の上側に引いた包絡線の傾き(以下スロープ [slope] とする)がモデルにより計算された群落抵抗の季節変動と逆相関をもつこと(Nemani and Running, 1989)³⁾、Ts 変動は植被率により大陸スケールでの地表面湿潤度に相関があること(Nemani et al., 1993)⁴⁾、スロープと先行降雨指数の時系列変化及び空間分布がよく一致して

いたこと(Kondoh et al., 1998)⁵⁾等が報告されている。松田ほか(2000)⁶⁾は VI-Ts 関係のスロープが熱帯地域で明瞭な雨季乾季の地表面状態の季節変化に対応することを示し、地表面の熱収支モデルから土壌水分が反映されることを示唆している。これらはいずれもスロープが地表面湿潤度や地表面フラックスとの間に相関があることを示唆している。また、フェノロジー(植物季節)を考慮した研究も行われており(橋本ほか, 2001)⁷⁾、雨季・乾季が明瞭に存在する熱帯で、季節変化に対するフェノロジー(NDVI の季節変動)と VI-Ts 法を用いた地表面湿潤度の応答特性を調べ、その結果地表面が湿潤になるタイミングは土地被覆による違いには関連性は薄く、植物成長や活性が高まる時期は土地被覆の違い(森林、草地・水田)では差が出るとしている。

前述した研究例はいずれも熱帯から温帯までの地域に限られており、VI-Ts 関係のスロープと地表面フラックスとの強い相関が示唆されている中で、幅広い気候帯を有すユーラシア大陸の地表面状態を解析対象とすることは、その異なる地表面及び植生状態が地表面エネルギーフラックスの大きな季節的・空間的变化を特徴付けているため水文学的に重要である。特に、乾燥・半乾燥地帯・冷帯における VI-Ts 関係のスロープの季節的・空間的動向はこれまであ

まり研究対象とされていないだけに検討を行う価値があるといえる。また、広域の地表面湿潤度を調べることは、土壌水分変化による水ストレスがフェノロジーに与える影響を考える点でも重要である。

本研究ではユーラシア大陸の地表面状態を Ts/NDVI 関係のスロープを使用し推定し、気象・気候環境の違う 5 サイトからその時間的・空間的変動を調べ、その違いを明らかにすることを目的とする。Ts/NDVI 散布図や降水量に対応したスロープの時系列等から地域特性を調べるにあたり、対象地域として特に GAME (GEWEX Asian Monsoon Experiment) 領域の地域研究のサイト (Fig. 1)⁹⁾ であるシベリア、チベット、淮河流域、さらに、乾燥・半乾燥域である内モンゴル、熱帯モンスーン活動の影響を強く受けるインドをピックアップして (Table 1) 検討を行った。

II. 使用データ及び解析対象地域

1. Global Land 1-km AVHRR Data Set

本研究では衛星リモートセンシングデータとして NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) /AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) を用いた。NOAA/AVHRR は時間分解能が約 1 日であり、地上空間分解能が 1 km で観測幅が広く今回のユーラシア大陸を対象と

するモニタリングに適している。NOAA/AVHRR はチャンネル 1 に可視光、チャンネル 2 に近赤外、チャンネル 3 から 5 に熱赤外の観測波長帯をもつ。NOAA/AVHRR データは USGS (U.S. Geological Survey) が提供する Global Land 1-km AVHRR Data Set (USGS, 2000)⁹⁾ を 1995 年の 2 月から 12 月、1996 年の 1 月分を取得した。それらは各観測グリッドで 10 日間のうち NDVI が最大である日のデータを採用する 10 日間コンポジットデータであるため、各月 3 シーンの計 36 シーンを取得した。データセットは各ピクセルに対し 10 個のバンドを含んでいる (バンド 1 からバンド 5 [チャンネル 1 からチャンネル 5]、バンド 6 [NDVI]、バンド 7 [衛星天頂角]、バンド 8 [太陽天頂角]、バンド 9 [相対天底角]、バンド 10 [日付指標])。このうち、本研究ではバンド 1 から 5、バンド 7、バンド 8、バンド 10 を用いた。なお、これらのデータセットは全て打ち上げ前の校正係数を用いて物理量換算 (チャンネル 1, 2 は AVHRR アルベド、チャンネル 3, 4, 5 は各チャンネル波長帯での輝度温度) されている (Eidenshink and Faundeen, 1994)¹⁰⁾。

各シーンにおける対象地域として東アジア全域を覆うようにユーラシア大陸を北緯 20 度から北緯 80 度、東経 60 度から東経 150 度の領域を選択した。

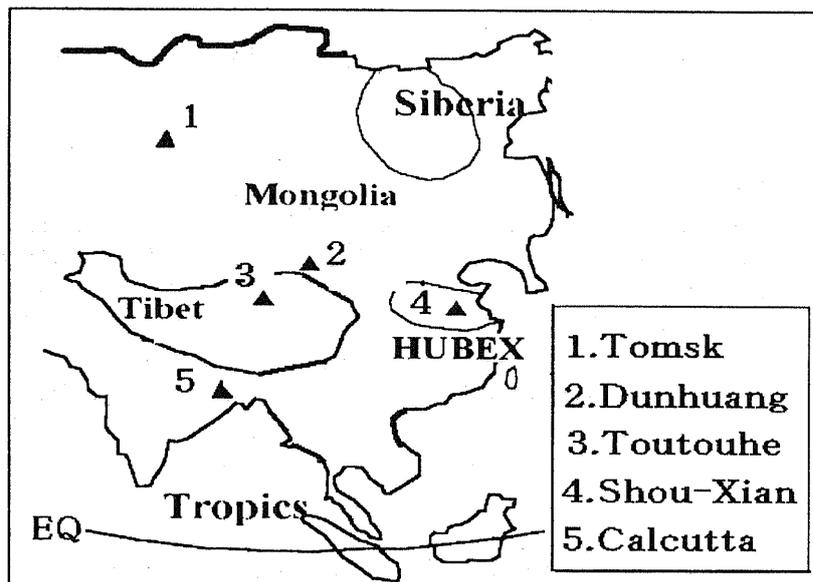


Fig. 1 Five sites of study objection area (modified from GAME-AAN Website)

Table 1 Locations of reference sites.

	Latitude	Longitude	Altitude [m]
1. Tomsk	56.50	83.50	174
2. Dunhuang	40.90	94.41	1140
3. Toutouhe	34.13	92.26	5000
4. Shou-Xian	32.58	116.77	23
5. Calcutta	22.70	88.60	5

2. Global Daily Summary (GDS)

気候データとして NCDC (National Climate Data Center) から取得した GDS データ (NCDC, 2001)¹¹⁾ を使用した。各解析対象地域 (Tomsk, Dunhusng, Toutouhe, Shou-Xian, Calcutta) において衛星データ解析のピクセル・ウインドウ領域に含まれる GDS ステーションで、コンポジットデータのバンド 10 による日付が総ピクセル数の 50% を越える日付の日平均気温をその解析対象地域の日平均気温として用いた。また、降水量はコンポジットデータに合わせて日降水量を 10 日間平均として算出した。50×50 ピクセル (50km×50km) ・ウインドウ領域内では、全解析対象地域に対して含まれる同一日付のピクセルはおおよそ 80% 以上であった。

III. 解析手法

1. 衛星データ補正

本解析の一環として時系列変化を追う場合、センサー劣化補正、太陽天頂角補正は必要不可欠になる。可視、近赤外に関するセンサー劣化の研究はいくつかあるため (Kaufman, 1993; Rao and Chen, 1996)^{12), 13)}、本研究では USGS データセットで提供される NDVI (バンド 6) は用いず、チャンネル 1, 2 に対してセンサー劣化補正、太陽天頂角補正を行い、NDVI を再算出した。さらに、BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) の影響 (本谷・山崎, 1999)¹⁴⁾ を考慮するため、衛星天頂角が 40 度以上であるピクセルは解析対象から除外した。また、チャンネル 1 で 50%、チャンネル 2 で AVHRR アルベド 80% を越えたピクセルは雲の影響を強く受けていると仮定して解析の対象外とした。

NDVI は次式で算出した。

$$\text{NDVI} = \frac{ch.2 - ch.1}{ch.2 + ch.1} \quad (1)$$

(ch.1: チャンネル 1 の AVHRR アルベド [%],
ch.2: チャンネル 2 の AVHRR アルベド [%])

地表面温度はチャンネル 3, 4, 5 から split window 法 (McMillin and Crosby, 1984)¹⁵⁾ を用いて次式で算出した。

$$T_s = a_0 + a_1 T_3 + a_2 T_4 + a_3 T_5 \quad (2)$$

($a_0 = 3.175$, $a_1 = 0.429$, $a_2 = 2.698$, $a_3 = -2.139$, T_3 : チャンネル 3 の輝度温度 [K], T_4 : チャンネル 4 の輝度温度 [K], T_5 : チャンネル 5 の輝度温度 [K])

また、雪氷面及び雲及び計測エラーの影響を考慮して T_s が -30°C 以下または 80°C 以上のピクセルは解析対象から外した。

2. VI-Ts 散布図

NDVI-Ts 散布図は 50 ピクセル×50 ピクセル (i.e., 50×50km) の領域で、各月毎に作成した。スロープの日付は、各ウインドウに対して含まれているコンポジットデータのバンド 10 に対応するピクセルの日

付を、採用ピクセル数で平均することにより同定した。

3. VI-Ts 法によるスロープ分布図

本研究では Ts/NDVI のスロープを定義するため自動算出アルゴリズムを用いた。Nemani et al., (1993) と同様の方法が散布図における上部包絡線として Ts/NDVI のスロープを定義するのに使用されている。最初に、各 NDVI 間隔 (本研究では 0.01) に対して、最大の Ts (T_{SMAX}) を採る。次に、スプリット・ウインドウ法の Ts 精度は $\pm 1 \text{ K}$ 程度であることから、 T_{SMAX} から 2°C の許容範囲を設け、その範囲内のピクセルも採用する。NDVI-Ts 散布図からみられるように、特に湿潤移行過程において散布形状は下方に尾が伸びたような形状をとることが多く、この時、実際のスロープ定義より傾きが大きくとられてしまうが、これにより例外的に大きなスロープ値を削除している。最後に、散布図プロットの選択により、その回帰分析が Ts/NDVI 関係のスロープと切片、相関係数を得るのに適用されている。各ピクセル・ウインドウにおける雲の影響によるノイズは上記の手順により削除されるが、それは回帰分析に有効なピクセル数を減少させることになる。仮にピクセル数が 10% 未満の場合は、スロープの決定は放棄する。Ts/NDVI のスロープのピクセル・ウインドウサイズは 50 ピクセル×50 ピクセルでセットされており、50×50km 領域にほぼ一致する。

IV. 結果と考察

1. NDVI-Ts スロープ分布図と降水量に対応したスロープ時系列

Fig. 2 に各月 3 枚の 10 日間コンポジットデータから算出したスロープをさらに月別に平均したスロープ分布図 (3, 7, 11 月) を示す。タイ、インドの地域に関して乾季に相当する 3 月 (Fig. 2(a)) では -30 より小さい値でスロープが負の領域に分布していたのが 7 月の雨季 (Fig. 2(b)) に入るとスロープが 10 より大きい領域に移行していることがわかる。そして 11 月 (Fig. 2(c)) ではタイではまだ雨季後半でありスロープは正の領域に属しているが、インド西部は乾季に入っており再びスロープが負の領域に含まれるという空間変動をみせている。このようにスロープの季節変動が降水量のそれに応答している点は、松田ほか (2000)、橋本ほか (2001) のタイでのスロープ解析結果とも一致する。一方、中国・黄河中流域には一年を通して -40 から -150 までの小さい値をとる地域が認められる。中国西部・チベットはヒマラヤ山脈を境におおよそ 20 から 150 までの正の値をとり、チベットの特殊性 (高い標高・まばらな植生分布、等) が際立つようなスロープの季節変動特性がみられた。シベリアは積雪・氷面の影響により、夏季に入らなければスロープ分布を表すことができなかったが、シベリア西部低地が -50 付近の負の値をとるのに対し、中央高地ではおおよ

そ 20 から 100 までの正の値をとるという分布傾向の違い (Fig. 2(b)) がみられた。モンゴルではスロープ分布はおおよそ 0 から 50 までの領域に多く占

められているが負の領域もパッチ状に現れ、基本的には中緯度帯、特に乾燥・半乾燥域では年間を通じてスロープ変動があまり明瞭ではなかった。

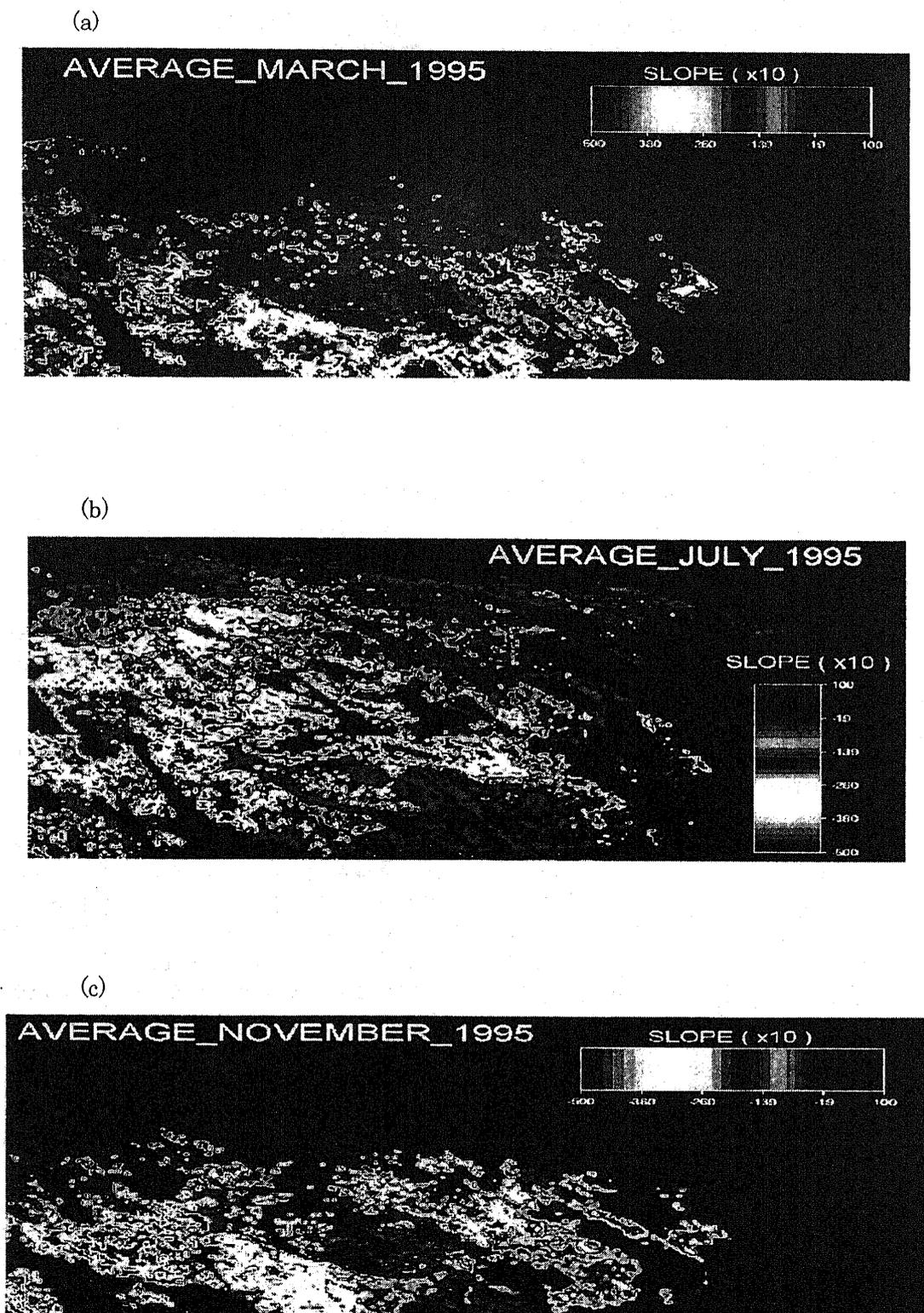


Fig. 2 Seasonal change in the Ts/NDVI slope distribution in the Eurasian Continent in March(a), July(b), and November(c), 1995.

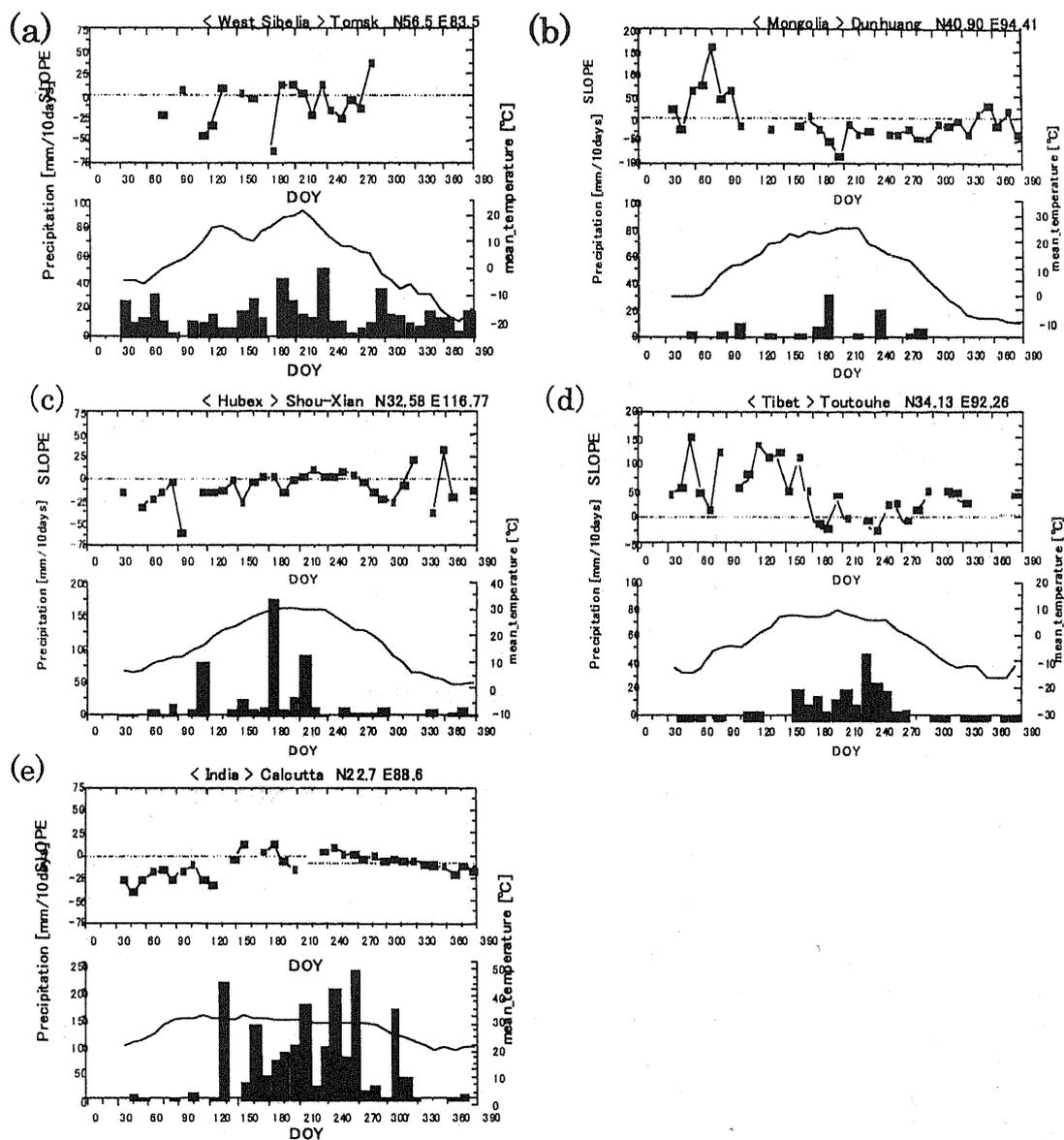


Fig.3 Time series of the slope and amount of the precipitation at five sites ((a)Tomsk (b) Dunhuang (c) Toutouhe (d) Shou-Xian (e) Calcutta) .

Fig. 3 ((a)Tomsk , (b)Dunhuang , (c)Toutouhe , (d)Shou-Xian , (e)Calcutta) に対象地域別における降水量及び気温とスロープの時系列を示す。どの地域に関しても、降水量と応答するようにスロープが変化しているのが認められた。但し、雨季乾季が明瞭に現れる地域 (Fig. 3 (d)Shou-Xian, (e)Calucatta) と残りの3地域 (Fig. 3(a)Tomsk, (b)Dunhuang, (c)Toutouhe) とでは、変動傾向が異なっており、前者が降水量増加に伴いスロープが大きくなるのに対し、後者は降水量増加に伴いスロープが小さくなっている。Calucattaでは125DOY(Day of Year; 通年積算日数)から330DOY付近まで降雨が続くのに対し、ス

ロープは47DOYの最小-37.7から増加していき146DOYから159DOYに最大の15.9をとり、286DOYまで正の値をとり、以降減少していった。Shou-Xianでは110DOYから230DOY付近まで降雨が続くのに対し、スロープはDOY95の最小-62.4から増加していき178DOYから261DOYまで正の値をとり、その後減少するが300DOY付近から再び増加し360DOYに最大の33.1をとった。一方、Dunhuangでは200DOY、245DOY付近で降雨があり、スロープは58DOY付近から減少していき103DOYから210DOYに最小の-82.4をとり、330DOY付近まで-25あたりで落ち着く。以後増加に転じた。Toutouheでは175DOYから280DOY

付近まで降雨が続くのに対し、スロープは125DOY付近から減少に向かい125DOY付近から243DOYの最小-22.3まで減少、その後は増加に転じた。

2. Ts/NDVI 散布図

各月中旬の10日間のコンポジットデータを使用し、対象地域におけるTs/NDVI散布図を作成した。Fig. 4 (1. Tomsk, 2. Dunhuang, 3. Toutouhe, 4. Shou-Xian, 5. Calcutta)に対象地域別の6月((a)で表現)及び7月((b)で表現)のTs/NDVI散布図を示す。雨季・乾季が明瞭に現れる地域では、松田ほか(2000)で報告されているように、雨季に移行するにつれ、地表面が湿潤になるに従い散布がばらつき始める。湿潤移行過程である6, 7月には(Fig. 4-4(a), 4-4(b), Fig. 4-5(a), 4-5(b)), 三角形に散布が形成され、分布形状の包絡線としてスロープをとる際NDVI値で0.2から0.3を境に正負が逆になる。この時のスロープは時系列でみた時劇的に変化する状態であり、このNDVI値が何を示すものであるか検討する必要がある。地表面がある程度湿潤になってくると、分布はつぶれ平らになっていく。また、乾季には小さくまとまる、あるいはスロープの大きい直線状になるといった傾向がみられた。西田ほか(2000)によればこれら一連の散布形状に関して、雨季の始めから途中にかけてのTs方向のばらつきについては、乾季で続いた無降雨により全体的に乾燥した地表面に局所的に降雨が起こることによってもたらされる土壌水分分布の不均一性が植比率や植生状態とは無関係にTsを不均一にさせ、ばらつきが生じると述べている。雨季の終わりにTsがNDVIに関わらず一様になるのは、連続した降雨により地表面全体が湿潤になり、その結果、植比率や植生状態とは無関係にTsがピクセル・ウィンドウ領域内で均一になる。また、乾季での直線に近い散布形状は、湿潤地表面の乾燥過程でTsが植比率や植生状態に最も支配されることが現れていると考察している。Tomskは一年を通して降雨・積雪があり、分布形状(Fig. 4-1(a), 4-1(b))からの判断が難しい結果となった。スロープ時系列と降雨との対応があまり明確でなかったこともこの地域は季節による降雨特性(春と秋の持続的で弱い降雨、夏の対流雲による一時的な激しい降雨)の違いが反映されていると考えられる。散布図は6月にはNDVIが0.2から0.8付近まで平らに広がり、7月では右下がりの直線状の分布を示した。他の月では散布のかたまりがTsの高いところと低いところと二分して現れているものもあった。一方、雨季・乾季があまり明瞭ではない地域であるDunhuang、またはある程度の雨季は見られるが冷帯・高山帯に属する地域Toutouheでは一年を通してNDVI値が0.2から0.3より小さく、右上がりの直線状(Fig. 4-2(b), Fig. 4-3(a), 4-3(b)), あるいは小さくまとまる形状(Fig. 4-2(a))をとった。

前述したように、一般に湿潤状態に移行する過程でのTs/NDVI散布図は三角形形状をとるが、この時頂点のTsをとるNDVI値を軸(以下、NDVIしきい値と定義する)として、右側と左側では植生を含めた地表面での環境は異なっていると考えられる。すなわち降雨イベントにより土壌水分が不均一になっていく過程で、植生量や状態に関係無くTs方向にばらつきが出ている状態においてNDVIしきい値より右側に散布する領域ではピクセル内に植生が多く含まれることにより、蒸散活動でTsが減少されると考えられる。その結果スロープは右下がりの値になる。一方、NDVIしきい値より左側に散布する領域では湿潤地表面と植生体との比熱の大きさの違い、つまり比熱の大きい湿潤土壌より比熱の小さい植生の方が同じ有効エネルギーを吸収した際、表面温度が高くなってしまおうと考えられる。その結果、NDVIしきい値から左側の領域では植生増加に伴いTsも上昇するスロープの右上がりなスロープ傾向が現れている。したがってスロープが右上がりの値になる散布図はチベットや内モンゴルのような半乾燥域・高山帯のようなNDVI変動が小さい地域で顕著に現れると考えられる。

3. Ts 最大値をとる NDVI 値及び年間 NDVI 変動幅の分布図

雨季の開始期である5月と湿潤移行過程であり、異なる地表面状態が反映されていると考えられる三角形の散布状態が顕著に現れる7月に対して、NDVI値(Fig. 5(a), (b))と前述したNDVIしきい値(Fig. 6(a), (b))の空間分布を示した。NDVI値は5月では西シベリア、朝鮮半島、西日本で高くおよそ0.5から0.75をとる。チベット、モンゴルは低くおよそ0.1から0.25である。7月に移るとロシア及び中国全土で植生の活性化(成長)が進み、特に中央シベリア、東ロシアでNDVI値が高く0.5から0.8を示した。チベット、モンゴルの分布は5月とあまり変化しておらず0.1から0.3である。また、NDVIしきい値は5月では西シベリア、西日本で高く0.5から0.85をとる。ラオス、中国東部はおよそ0.3から0.7であり、チベット、モンゴルは0.1から0.25の低い値をとる。一方、7月ではシベリア、アムール河流域でのNDVIしきい値が高く0.6から0.9をとる。タイ、中国のNDVIしきい値は0.3から0.7をとるが、Hubexは少し低くおよそ0.25から0.4である。インド西部、チベット、モンゴルは依然として低く0.2から0.3であった。以上の結果からこの時期におけるTs/NDVI散布図の散布形状の見当が付き、チベット、モンゴルではNDVIしきい値より左側で右上がりに散布する形状であることが示される。さらに、一年を通して各ピクセルのNDVI最大値からNDVI最小値を引いたNDVI変動幅を出し、年間のNDVI変動が大きい地域との空間的関係を調べた(Fig. 7)。

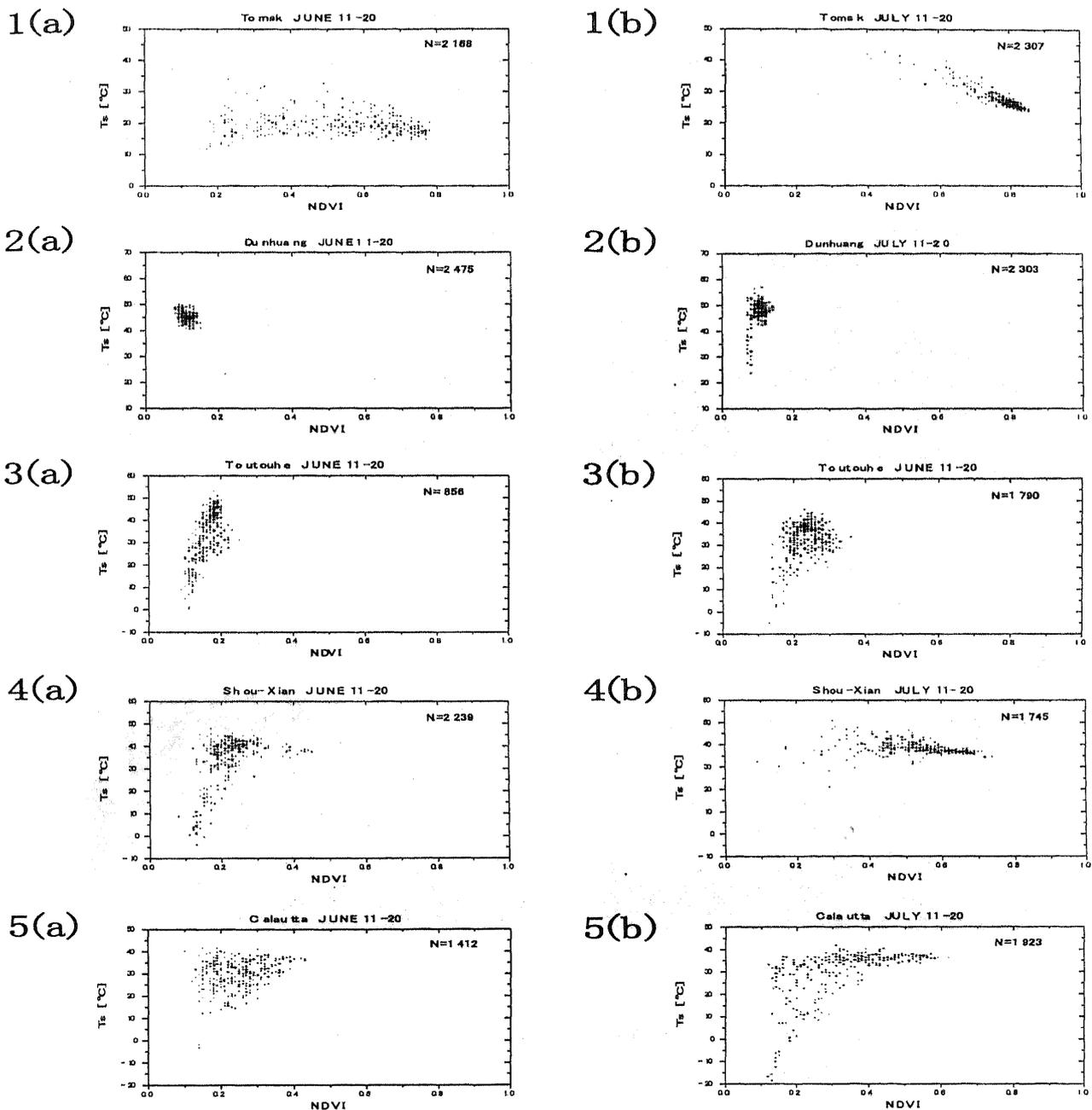


Fig.4 Scatter plots of VI-Ts at five reference areas (1.Tomsk, 2.Dunhuang 3.Toutouhe 4.Shou-Xian 5.Calcutta). 'N' shows the number of plots in the pixel window.

NDVIの変動幅はラオス、シベリア地域で大きく、特に東シベリアを除いておよそ0.5から0.8をとる。チベットからモンゴル、中央アジア、アラビア半島は0から0.3と小さい。インド、中国、東シベリアは0.3から0.5を示している。

NDVI変動幅とNDVIしきい値がほぼ一致したことはスロープ分布図の結果も含め考察すると、モンゴルやチベットのような半乾燥域・高山帯では

Ts/NDVI散布図はNDVI方向より強くTs方向に散布される右上がりの形状をとる傾向にあるといえる。したがって、湿潤移行期でのスロープ変動は、熱帯・温帯地域では植生増加に伴う蒸散量の増加によるTsの減少に加えて、地表面全体が湿潤に移行していくため、植生の有無に関わらずピクセル・ウインドウ領域内での蒸発散量の変動が小さくなり、結果としてスロープを(負から正へ)緩やかにしている。

一方、半乾燥域・高山帯では植生増加に伴う T_s の増加，すなわち湿潤地表面と植生体との比熱の大きさの違いによる有効エネルギー吸収量の差によるものであると考えられる。同時期によるスロープ変動

でも地表被覆の違いから，捉える現象の違いが変動の振る舞いに反映されたと考えられる。以上の考察が実際に定点観測で検証されることを今後の課題としてあげておく。

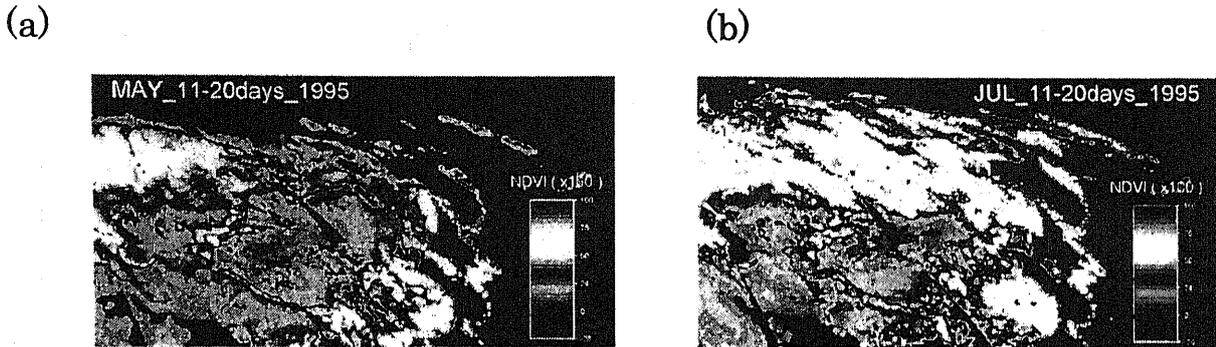


Fig.5 NDVI distribution in the Eurasian Continent on May 11-20 (a) and July 11-20 (b),1995.

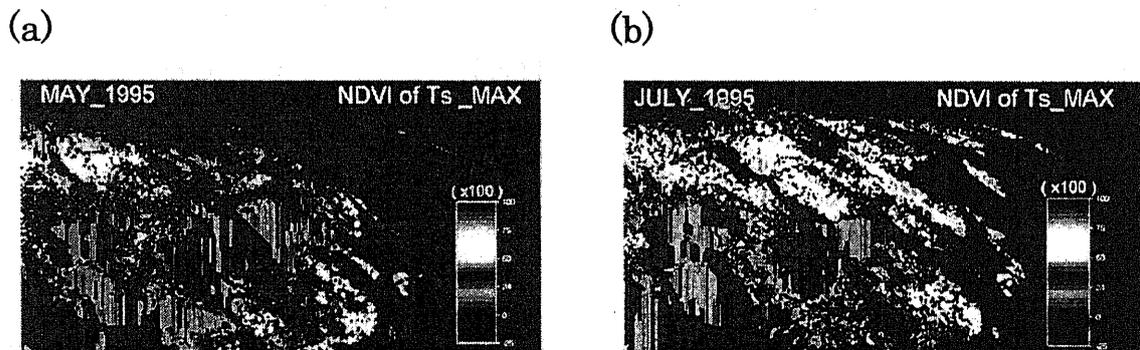


Fig.6 NDVI distribution when T_s became maximum in the Eurasian Continent on May (a) and July (b),1995.

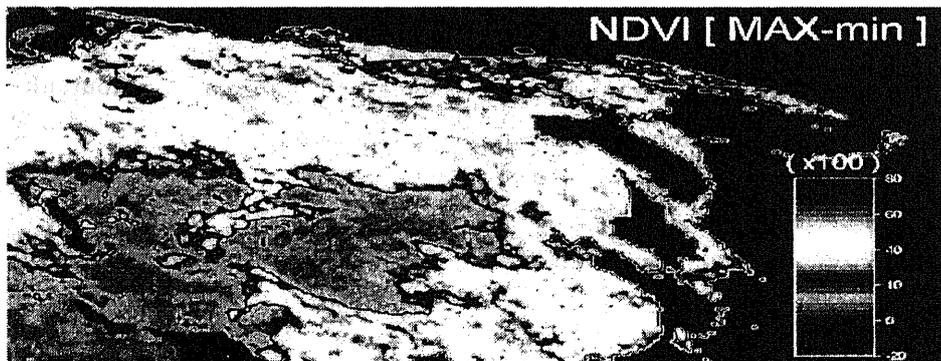


Fig. 7 Distribution of difference in NDVI between maximum and minimum in study area.

V. まとめ

(1) ユーラシア大陸におけるスロープ分布図の季節変化はモンスーンの影響を強く受け、雨季と乾季が明瞭なタイ、インドのスロープ変動の様子から地表面の湿潤状態を妥当に表現しているといえる。そのスロープ分布は年間を通じてチベット地域が 20 から 150 まで、モンゴル地域が 0 から 50 までの正の値を占める(Ts/NDVI 散布図のスロープは右上がり)領域が大きい。また、雨季・乾季が明瞭な地域である Calcutta (インド), Shou-Xian (淮河流域) と Toutouhe (チベット), Dunhuang (内モンゴル) では降雨に対応するスロープ変動が逆相関である傾向がみられた。

(2) Ts/NDVI 散布図から雨季の季節はばらつきが大きく三角形に分布される傾向がみられた。Toutouhe, Dunhuang での Ts/NDVI 散布図は年間を通じて NDVI 方向の散布が小さく、Ts 方向の散布が大きかった。

(3) 年間の NDVI 変動幅分布図からチベット、モンゴルは NDVI 変動幅が小さく、その値は 0.1 から 0.3 である。

(4) 雨季開始期の 5 月と湿潤移行期の 7 月での Ts 最大値をとる NDVI 値分布図からチベット、モンゴルの NDVI 値は 0.1 から 0.3 である。

(5) 上記分布図のチベット、モンゴル地域の空間的一致によりチベット、モンゴル地域のような半乾燥域・高山帯と熱帯・温帯とのスロープ変動の違いは地表被覆の違いにより湿潤移行過程での異なる現象を捉えていたことによるといえる。

参考文献

- 1) Goward, S.N., Cruickshanks, G.D., and Hope, A.S. : Observed relation between thermal emission and reflected spectral radiance of a complex vegetated landscape, *Remote Sens. Environ.*, 18, pp. 137-146, 1985.
- 2) 樋口篤志・近藤昭彦：草地・水田・雑木林での地表面フラックスと衛星より得られる可視・近赤外波長域の分光反射特性および植生指標との関係, II. 衛星から得られる可視・近赤外波長域の分光反射特性と地表面フラックスの関係, *水文・水資源学会誌*, 13, pp. 137-147, 2000.
- 3) Nemani, R. R., and Running, S. W. : Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR data from NOAA/AVHRR, *J. Appl. Meteor.*, 28, pp. 276-284, 1989.
- 4) Nemani, R. R., Pierce, L., and Running, S. W. : Developing satellite-derived estimates of surface moisture status, *J. Appl. Meteor.*, 32, pp. 548-557, 1993.
- 5) Kondoh, A., Higuchi, A., Kishi, S., Fukuzono, T., and Li, J. : The use of multi-temporal NOAA/AVHRR data to monitor surface moisture status in the Huaihe River Basin, China, *Adv. Space Res.*, 22, pp. 645-654, 1998.
- 6) 松田咲子・西田顕郎・大手信人・小杉緑子・谷誠・青木正敏・永吉信二郎・サマキー=ブーニャワット・戸田求：熱帯モンスーン地域における広域潜熱フラックス推定に向けた NDVI-輝度温度関係の特性解析, *水文・水資源学会誌*, 13, pp. 44-56, 2000.
- 7) 橋本博文・鈴木雅一・樋口篤志：NOAA/AVHRR を用いたタイにおける地表面湿潤度とフェノロジーの解析, *水文・水資源学会誌*, 14, pp. 277-288, 2001.
- 8) GAME Asian Automatic Weather Station Network Project Website, URL : <http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/Project/aan/aan.html>
- 9) USGS : Global Land 1-KM AVHRR Project, URL : <http://edcdaac.usgs.gov/1KM/1kmhomepage.html>
- 10) Eidenshink, J. C., and Faundeen, J. L. : The 1-km AVHRR global land data set : first stage in implementation, *Int. J. Remote Sens.*, 15, pp. 3443-3462, 1994.
- 11) NCDC : Federal climate complex global surface summary of day data version 6 (over 8000 worldwide stations), URL : <http://www.ncdc.noaa.gov/pub/data/globalso/d/>, 2001.
- 12) Kaufman, Y. J., and Holben, B. N. : Calibration of the AVHRR visible and near-IR bands by atmospheric scattering, ocean glint and desert reflection, *Int. J. Remote Sens.*, 14, pp. 21-52, 1993.
- 13) Rao, C. R. N., and Chen, J. : Post-launch calibration of the visible and near-infrared channels of the Advanced Very High Resolution Radiometer on the NOAA-14 spacecraft, *Int. J. Remote Sens.*, 17, pp. 2743-2747, 1996.
- 14) 本谷 研・山崎 剛：NOAA 近赤外チャンネルの Bidirectional (角度依存) 特性とその応用による積雪判別, *水文・水資源学会 1999 年研究発表要旨集*, pp. 122-123, 1999.
- 15) McMillin, L. M., and Crosby, D. S. : Theory and validation of the multiple window technique, *J. Geophys. Res.*, 89, pp. 3655-3681, 1984.

(2001年12月24日 受理)