

モンゴル乾燥・半乾燥地域における植生指数の空間パターンを利用した砂漠化モニタリング手法の検討

Discussion about the desertification monitoring method using spatial patterns of vegetation index in Mongolian arid and semi-arid region

森 暁雄*・岡安智生**・佐々木雄大**・ジャムサランウンダルマ***・武内和彦**

Akio MORI, Tomoo OKAYASU, Takehiro SASAKI, Undarmaa JAMSRAN and Kazuhiko TAKEUCHI

要旨：衛星データによる在来の砂漠化モニタリングの多くは植生量の減少を砂漠化の進行と捉えているが、砂漠化が必ずしも植生量の減少を伴わないことが既往のフィールド研究により明らかとなっている。そこで本研究では、モンゴル乾燥・半乾燥地域を対象に、放牧傾度に沿った植生指数の空間パターン(NDVI空間パターン)を用いて砂漠化モニタリングを試みた。この手法により、草本域での突出型、灌木域での漸増型といった植生の成立する環境によって異なる砂漠化の傾向を捉えることができた。また、1991年と2004年のNDVIの空間パターンを比較することで2時期間における砂漠化の進行を捉えることができた。

キーワード：砂漠化、過放牧、衛星リモートセンシング、放牧傾度、NDVI空間パターン

Abstract: In existing desertification monitoring, a decrease in biomass is considered an indicator of desertification, although biomass does not necessarily decrease in the progress of desertification. In this study, we conducted desertification monitoring using the patterns of vegetation index along grazing gradients (NDVI spatial patterns hereafter) in a Mongolian arid and semi-arid region. Our results indicated that NDVI spatial patterns could distinguish different responses among different physiognomic vegetations, such as a gradual increase pattern in shrubland and a prominent pattern in grassland. We could also identify the progress of desertification by comparing NDVI spatial patterns in 1991 and in 2004.

Key Words : desertification, overgrazing, satellite remote sensing, grazing gradient, NDVI spatial pattern

はじめに

現在、世界各地の乾燥・半乾燥地域の草地において、過放牧による砂漠化の進行が大きな問題となっている(Dregne, 1986; Camacho-de Coca *et al.*, 2004)。衛星リモートセンシング技術は、広域の情報を捉えることができ、過去のデータとの時系列的な比較も可能であるため、砂漠化の現状を把握する手法として広く用いられてきた(Geerken and Ilaiwi, 2004)。その多くは、植生量(植被率、植物重量、植物体積等)の減少を砂漠化と解釈し、対象地域に対して単一の評価基準を用いて砂漠化のモニタリングを行ってきた(Geerken and Ilaiwi, 2004; Camacho-de Coca *et al.*, 2004; Wessels *et al.*, 2004)。しかし、放牧圧の上昇に対して灌木が増加するなど(Tobler *et al.*, 2003; Laliberte *et al.*, 2004)、植生量の減少が必ずしも砂漠化を指標しない例もあり、その場合、植生機能タイプの変化といった植生の質的变化を併用することが指摘されている(Naveh and Whittaker, 1979; Fernandez-Gimenez and Allen-Diaz, 2001; Hays

and Holl, 2003; Sasaki *et al.*, 2005)。

このような植生量の反応を衛星リモートセンシングにより把握する方法として、Pickup *et al.* (1994, 1998)は放牧強度の空間的な傾度(放牧傾度)に沿った植生量変化の空間パターンの違いから植生機能タイプの変化を間接的に評価している。そこで本研究では、この手法を砂漠化のモニタリング手法として応用し、近年家畜頭数の急増が見られ、過放牧による砂漠化の進行が懸念されているモンゴルの乾燥・半乾燥地域(Gunin *et al.*, 1999)を対象に、放牧傾度に沿った植生量変化の空間パターンを捉えることで、過放牧に起因する砂漠化の進行状況の把握を試みた。

1. 研究の方法

1.1 対象地

対象地はモンゴル国 Dundgobi 県 Mandalgobi (105°49'E, 46°06'N-106°55'E, 45°24'N)である(図1)。Mandalgobiは、年降水量170mm、年平均気温2.5°C

*シフィックコンサルタンツ(株), **東京大学大学院 農学生命科学研究科 生圏システム学専攻, ***モンゴル農業大学 生態系再生拠点

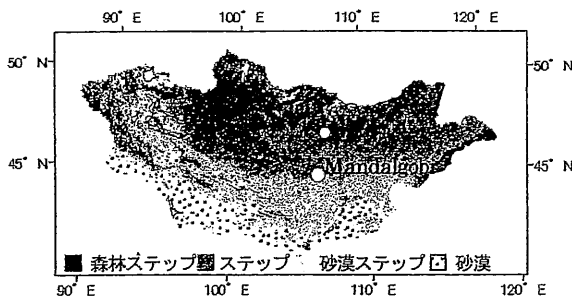


図1 対象地

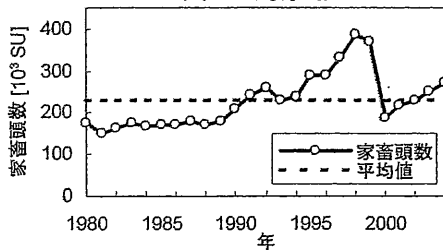


図2 Mandalgobiの家畜頭数変化(1980-2004)

注釈: SUはラクダ、ウマ、ウシ、ヒツジ、ヤギをヒツジに換算した頭数の合計である。

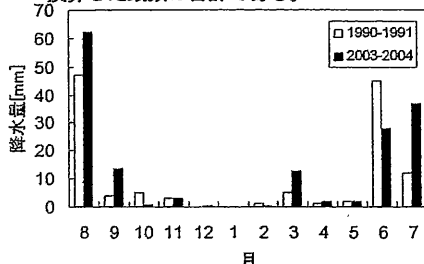


図3 月降水量(1990-1991、2003-2004)

(夏季 19°C, 冬季 -14°C) で、降水の大部分は6月から8月に集中している。モンゴルでは1991年の市場経済化以降の家畜頭数急増や一部の草地の集中利用に伴う砂漠化の進行が懸念されているが(Mearns, 2004), Mandalgobiでも市場経済化前後から家畜頭数の明瞭な増加が生じており、1999年から2002年にかけての大規模な干ばつにより一時的に家畜頭数が減少したものの、その後も継続的な増加傾向にある(図2)。

1.2 衛星データ

本研究では、衛星データに2時期のLandsat-5/TM画像(Path/Row=131/28)を用いた。過放牧の影響が小さい時期として、家畜頭数増加の初期にあたる1991年6月25日のデータを用いた。過放牧の影響を大きく受けた時期としては、家畜頭数が大きく増加している時期は自然の収容力の範囲内であると考えられ、また、過放牧の影響は過去の放牧履歴の蓄積により生じるものであることから、自然の収容力を超え家畜頭数が一時的に大きく減少した後の時期にあたる2004年7月14日のデータを用いた。両時期とも衛星データの時期の数ヶ月前までの降水量は同程度で大きな差はない(図3)。

1.3 解析方法

2005年夏季に、キャンプ地などの重放牧地からの距離を放牧強度の推定値として放牧傾度を取り、7地点における放牧傾度に沿った植生量の変化を調査した結果、典型的な2つのパターンが得られた。1つは重放牧地近隣において最も植生量が小さく、重放牧地から離れるに従って植生量が大きくなる傾向を示すもの(以降「漸増型」; 図4(a))であり、もう1つは重放牧地近隣で非嗜好性草本(*Peganum nigellastrum*, *Chenopodium album*等)の出現により大きい植生量を示すもの(以降「突出型」; 図4(b))であった(Sasaki et al., 2005, 未公表資料)。前者のような植生量変化は相観植生が草本の地点で見られ、後者は相観植生が灌木の地点で見られた(Sasaki et al., 2005, 未公表資料)。

対象地において、植物体積とバイオマスは相関関係にあり(Sasaki et al., 2005, 未公表資料)、またバイオマスとNDVI(Normalized Difference Vegetation Index)に強い関係性がある(山本ら, 2001)ことから、植生量の指標として植生指数NDVIを用いた。現地調査を行った7地点のうち、放牧傾度を取る方向によって環境が大きく異なり、面的な比較が難しいと考えられる2地点を除いた5地点について、現地調査結果と2004年の衛星データより算出した放牧傾度に沿ったNDVIの変化との比較を予備的に行った。現地調査で対象とした重放牧地点から半径1kmの範囲で100m間隔の同心円バッファを発生させ、各バッファのNDVI平均値により放牧傾度に沿った植生量の変化を求めた。その際、水路沿いなどは同一の放牧傾度として扱うことが難しいため(Harris and Asner, 2003)、解析対象から除外した。その結果、現地調査結果と放牧傾度に沿ったNDVIの変化は、それぞれ地点で同様の傾向を示した(図5)。

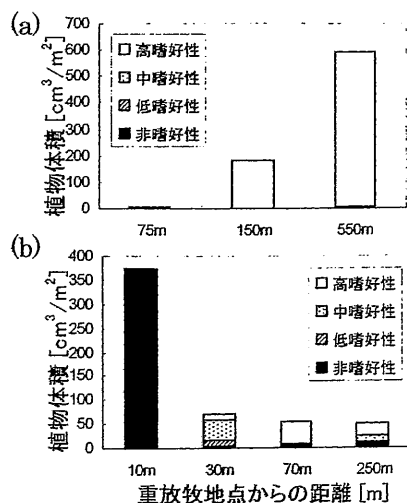


図4 現地調査における放牧傾度に沿った植生量変化 (a) 漸増型, (b) 突出型

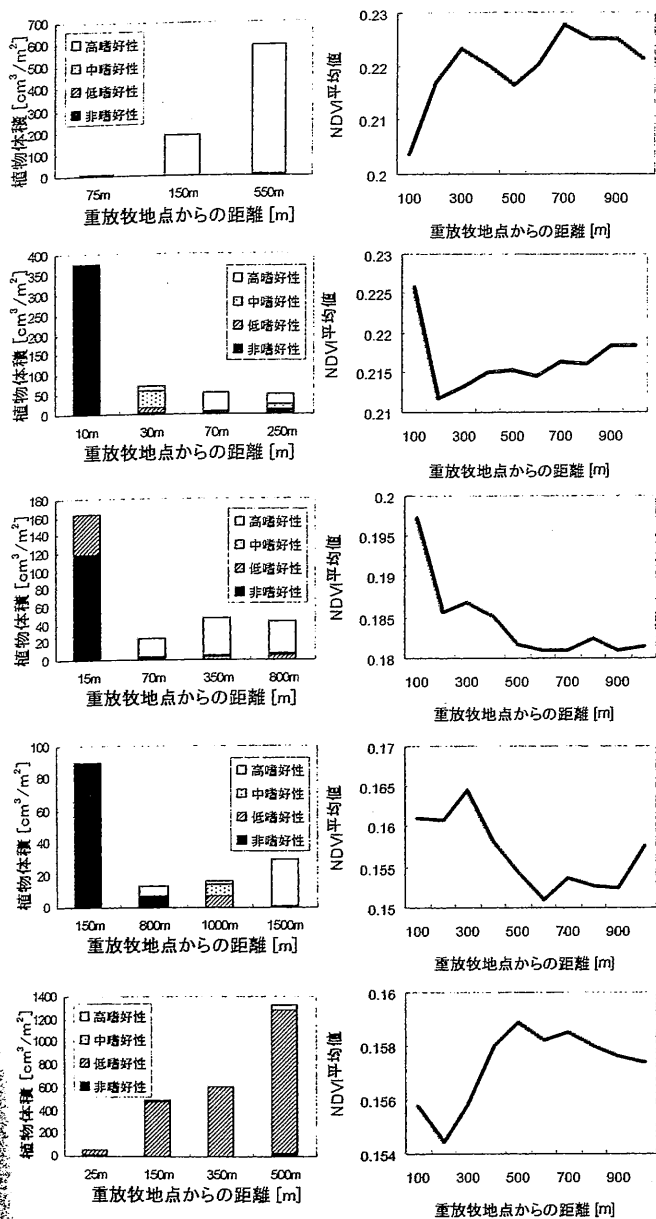


図5 現地調査結果と放牧傾度に沿ったNDVIの変化との比較 (左: 現地調査結果, 右: NDVIの変化)

これより、対象地の複数の地点において放牧傾度に沿ったNDVIの変化を捉えた。対象とする重放牧地点は、移動がなく継続的に利用されている必要があるため、冬季の風除け柵を持つ固定式の冬季キャンプ地を対象とし、HLSPO (Household Livelihoods Support Program Office) 発行の2003年の10万分の1牧草地利用図より81地点を読み取った。次に、10万分の1地形図および衛星写真判読により、近隣に水辺のあるキャンプ地を対象から除外した。選択された冬季キャンプ地48地点を重放牧地点と位置づけ、上記と同様の方法で放牧傾度に沿ったNDVIの変化を求めた。

次に、各キャンプ地点における放牧傾度に沿ったNDVIの変化の類型化を行った。まず、各バッファの

NDVI 平均値から隣接するすぐ外側のバッファのNDVI 平均値を引いた値 (傾き) を算出し、重放牧地点最近隣での傾きが最も大きく、かつSmirnov-Grubbs 検定により5%有意水準で外れ値と判断される場合を突出型とした。次に、突出型以外の点において、NDVIが重放牧地から離れるに従って増加し、かつNDVIと重放牧地からの距離との線形あるいは対数回帰分析により5%で有意であるものを漸増型とした。突出型、漸増型に分類されなかったものは傾向なしとした。以降これらの分類をNDVI空間パターンと呼ぶ。

続いて、現地植生調査で見られた放牧傾度に沿った植生量変化と相観植生との対応関係が、広域でも見られるかを調べた。1981年作成の100万分の1植生図(MONMAP)を用い、Mandalgobiにおける代表的な灌木(*Caragana* 属)を含む分類を統合し灌木域とし、それ以外の分類を草本域と再分類した。そしてFisherの正確確率検定により、NDVI空間パターンと灌木域/草本域との対応を比較した。

また、家畜頭数急増の前後でのNDVI空間パターンの変化を調べた。対象とした重放牧地点48地点において、上記と同様の方法で1991年についてもNDVI空間パターンを判定し、1991年と2004年のNDVI空間パターンを比較した(McNemar検定, $p < 0.05$)。

2. 結果

2.1 NDVI空間パターンと相観植生

2004年におけるNDVI空間パターンの構成は、対象とした48地点のうち、突出型が最も多く26地点(54.2%)で見られた。漸増型は8地点(16.7%)、傾向なしは14地点(29.1%)であった(図6, 表1)。

NDVI空間パターンの分布と相観植生図を比較すると、灌木域では21地点のうち傾向なしが9地点(42.9%)と最も多く、漸増型8地点(38.1%)、突出型4地点(19.0%)であった(表1)。対象地全域で観測された漸増型は、すべてが灌木域に含まれていた。一方、草本域では27地点のうち突出型22地点(81.5%)、傾向なし5地点(18.5%)であり、漸増型は見られなかった(表1)。NDVI空間パターンと相観植生との間には有意な関連性があり(Fisherの正確確率検定: 有意水準5%)、灌木域で漸増型が多く、草本域で突出型が多かった。

2.2 2時期間のNDVI空間パターンの変化

1991年におけるNDVI空間パターンの構成は、突出型15地点(31.3%)、漸増型2地点(4.2%)、傾向なし31地点(64.5%)であり、傾向なしが最も多く見られた(図7, 表2)。そのうち、灌木域では突出型6地点(28.5%)、

漸増型 1 地点 (4.8%), 傾向なし 14 地点 (66.7%) であり, 草本域では突出型 9 地点 (33.3%), 漸増型 1 地点 (3.7%), 傾向なし 17 地点 (63.0%) であった (表 2)。灌木域, 草本域ともに傾向なしが最も多く見られ, NDVI 空間パターンと相観植生との間に有意な関連性は見られなかった (Fisher の正確確率検定: 5% 有意水準)。

1991 年と 2004 年の間で NDVI 空間パターンに変化が見られたのは 29 地点であった (表 3)。そのうち, 最も多かったのは傾向なしから突出型への変化であり 17 地点 (58.6%) で見られ, 続いて傾向なしから漸増型への変化が 5 地点 (17.2%) と多く見られた。また, 突出型から漸増型, 突出型から傾向なし, 漸増型から傾向なしへの変化がそれぞれ 2 地点 (6.9%), 4 地点 (13.8%), 1 地点 (3.4%) で見られた。

灌木域, 草本域それぞれで見ると, 灌木域では変化の見られた 13 地点のうち, 傾向なしから漸増型への変化が 5 地点 (38.5%) で最も多く (表 4), 草本域では変化の見られた 16 地点のうち, 最も多かったのは傾向なしから突出型への変化の 14 地点 (87.5%) であった (表 5)。灌木域では漸増型への変化に, 草本域では突出型への変化に注目すると, 双方ともに 2×2 McNemar 検定により 5% 有意水準で有意な変化を示した。

3. 考察

3.1 NDVI 空間パターンと相観植生

家畜頭数増加後の時期に当たる 2004 年において, 突出型が全体の 54.2% と最も多く見られた。このように, 重放牧地近隣で周囲より高い植生量を示すことは珍しくなく, NDVI 空間パターンを用いることによって, このような傾向を捉えることができることが示された。

NDVI 空間パターンと相観植生との対応から, 草本域では突出型が, 灌木域では漸増型が砂漠化の指標となる NDVI 空間パターンだと考えられる。これは, 現地調査 (Sasaki *et al.*, 2005, 未公表資料) と一致しており, 現地調査における結果が対象地域全域においても確認されたといえる。このような対応関係が得られた要因には, 草本域と灌木域における植生の生育環境の違いが指摘されている。一般に, 草本は比較的土性の細かい土壌で生育しやすく, 灌木は土性の粗い土壌で生育しやすいといわれており (Sala *et al.*, 1997), 現地観察でも確認された。そのため, 灌木域では土性が粗いことで, 植被の減少に伴い風食による表層土壌のかく乱が起こりやすくなり, 種子の定着が阻害されることや, 土壌水分が表層で低くなりやすいことから (Pachepsky *et al.*, 2001), 灌木, 草本ともに重放牧地近隣への侵入が抑制され, 漸増

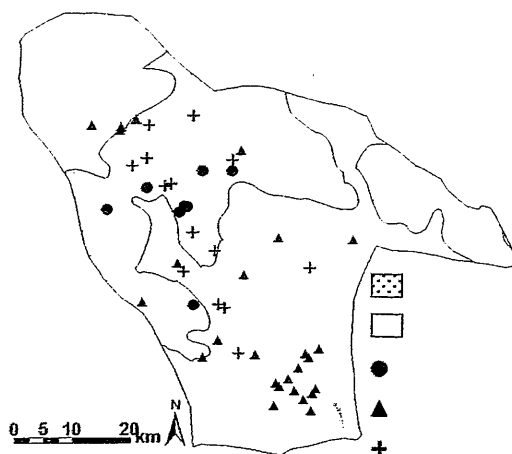


図 6 NDVI 空間パターンの分布 (2004)

表 1 NDVI 空間パターンの構成 (2004)

NDVI 空間パターン	灌木域	草本域	合計
突出型	4	22	26
漸増型	8	0	8
傾向なし	9	5	14
合計	21	27	48

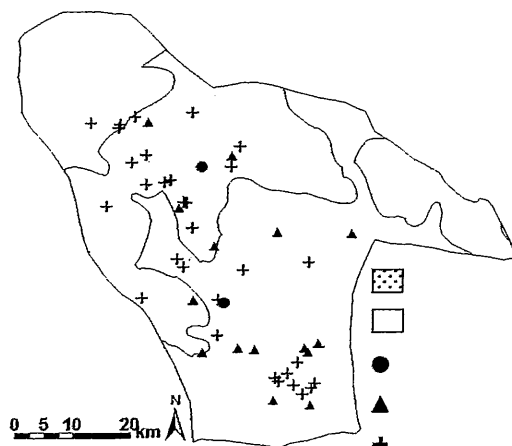


図 7 NDVI 空間パターンの分布 (1991)

表 2 NDVI 空間パターンの構成 (1991)

NDVI 空間パターン	灌木域	草本域	合計
突出型	6	9	18
漸増型	1	1	2
傾向なし	14	17	31
合計	21	27	48

型の NDVI 空間パターンが排他的に見られたと推測される。一方, 草本域では灌木域のような制約がかかりにくく, 植被の減少に対して非嗜好性草本が容易に侵入し, 突出型の NDVI 空間パターンが多く見られたと考えられる。既往研究における重放牧地近隣で灌木が増加

表3 Mandalgobi 全域の 1991 年と 2004 年の NDVI 空間パターン構成の変化

1991	2004			合計
	突出型	漸増型	傾向なし	
突出型	9	2	4	15
漸増型	0	1	1	2
傾向なし	17	5	9	31
合計	26	8	14	48

表4 灌木域の 1991 年と 2004 年の NDVI 空間パターン構成の変化

1991	2004			合計
	突出型	漸増型	傾向なし	
突出型	1	2	3	6
漸増型	0	1	0	1
傾向なし	3	5	6	14
合計	4	8	9	21

表5 草本域の 1991 年と 2004 年の NDVI 空間パターン構成の変化

1991	2004			合計
	突出型	漸増型	傾向なし	
突出型	8	0	1	9
漸増型	0	0	1	1
傾向なし	14	0	3	17
合計	22	0	5	27

といった報告 (Tobler *et al.*, 2003, Asner *et al.*, 2003) と一致しなかった点は、対象地における灌木 (*Caragana* 属) が嗜好性を持つことから、採食の影響を受けたことによるものか (Barker and Lange, 1969), あるいは踏圧の影響による影響 (Friedel *et al.*, 2003) だと考えられる。

ただし、灌木域においては、突出型もある程度の割合で存在していた。これは、灌木と非嗜好性草本が同時に入りうるような中間的な環境の存在や、もしくは植生図の時期が解析期間と異なることや灌木域内でも灌木の密度が様々であることが影響している可能性がある。ただし、現段階でこの点について要因を特定することは困難であり、今後追加調査を行うことで明らかにしていく必要がある。

このように、NDVI 空間パターンの構成と相観植生に有意な関連性が見られたことから、植生の成立する環境に応じて複数の評価基準を適用する必要性が示された。

3.2 2 時期間の NDVI 空間パターンの変化

1991 年において、NDVI 空間パターンの構成は傾向なしの地点が多く、また相観植生との間に有意な関連性が見られなかったことから、1991 年の時点では草本域、灌木域に関わらず砂漠化の進行が限定的であったと考えられる。

また、1991 年から 2004 年への NDVI 空間パターンの変化を、灌木域と草本域で個別に比較することで、灌木域における漸増型への変化、および草本域における突出型への変化が顕著であった。放牧傾度に沿った植生量変化の空間パターンを捉えていること、また、家畜の影響以外にこれらの変化を引き起こすと考えられる要因がないことから、本研究で得られた NDVI 空間パターンの変化は、家畜頭数の増加による過放牧が要因として考えられる。

このように、Pickup *et al.* (1994, 1998) の手法を応用した NDVI 空間パターンにより、植生の成立する環境に応じて放牧圧に対する植生量の変化が異なるという従来のフィールド研究と整合性の高い結果が得られた。また、Pickup *et al.* (1994, 1998) は放牧傾度に沿った植生量変化の空間パターンを単年で捉えているが、この手法を 10 年スケールの砂漠化進行モニタリングへ応用することが可能であると示唆された。

しかしながら、現地のデータが乏しいために、解析に用いた衛星データと植生データの間で時期の相違があることから、本研究における結果の妥当性については灌木域が大きく変化していない、という仮定に制限される。また、この手法を広域に適用するにはいくつかの問題点も挙げられる。1 つに評価基準が放牧傾度に対して傾向なしから漸増型あるいは突出型への変化という 2 段階のみでしか判断できないため、多段階で砂漠化の進行状況を把握するモニタリング手法への発展が必要である。また、対象地域に対してホットスポットを基準とした評価であるため、対象地域における砂漠化進行の有無は評価できるが、対象地域内のどこで特に砂漠化が進行しているかといった評価が難しいという問題点もあり、今後の改善が必要である。

おわりに

本研究では、衛星データより放牧傾度に沿った植生量変化を NDVI 空間パターンとして捉えることで、過放牧に起因する砂漠化の進行状況の把握を試みた。NDVI 空間パターンを用いることで、重放牧地近隣で植生量が増加するという特徴を示す砂漠化を捉えることができた。また、相観植生に注目することで、灌木域における漸増

型、草本域における突出型といった異なる評価基準を適用し、より実際の植生退行過程に基づいた砂漠化モニタリングを行うことができた。

今後は、現段階での不明な点、改善点を補完するとともに、相観植生に限らずその他の空間情報を統合することで、より精緻な砂漠化モニタリングを試みたい。また、植生量の増減による砂漠化モニタリング手法との組み合わせや経時的なデータによる評価についても、今後検討していく。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、東京大学大学院農学生命科学研究科生態システム学専攻の大久保悟助手、農業環境技術研究所の白戸康人氏、藤原英司氏をはじめ多くの方々よりご助力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

引用文献

- Asner G. P., C. E. Borghi and R. A. Ojeda (2003) Desertification in central Argentina: Changes in ecosystem carbon and nitrogen from imaging spectroscopy. *Ecological Applications*, Vol.13, 629~648.
- Barker S. and R. T. Lange (1969) Effects of moderate sheep stocking on plant populations of a black oak-bluebush association. *Australian Journal of Botany*, Vol.17, 527~537.
- Camacho-de Coca, F., F. J. Gracia-haro, M. A. Gilabert and J. Meliá (2004) Vegetation cover seasonal changes assessment from TM imagery in a semi-arid landscape. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.10, 3451~3476.
- Dregne, H. E. (1986) Desertification of arid lands. In: El-Baz, F. and M. H. A. Hassan, ed., "Physics of Desertification", pp.4~34, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Fernandez-Gimenez, M. and B. Allen-Diaz (2001) Vegetation change along gradients from water sources in three grazed Mongolian ecosystems. *Plant Ecology*, Vol.157, 101~118.
- Friedel, M. H., A. D. Sparrow, J. E. Kinloch and D. J. Tongway (2003) Degradation and recovery processes in arid grazing lands of central Australia. Part 2: vegetation. *Journal of Arid Environments*, Vol.55, 327~348.
- Geerken R. and M. Ilaiwi (2004) Assessment of rangeland degradation and development of strategy for rehabilitation. *Remote Sensing of Environment*, Vol.90, 490~504.
- Gunin P. D., F. A. Vostokova, N. I. Dorefyuk, P. E. Tarasov and C. C. Black (1999) Vegetation Dynamics of Mongolia. Kluwer Academic Publishers, Boston, 238pp.
- Harris A. T. and G. P. Asner (2003) Grazing gradient detection with airborne imaging spectroscopy on a semi-arid rangeland. *Journal of Arid Environments*, Vol.55, 391~404.
- Hays, G. E. and K. D. Holl (2003) Cattle grazing impacts on annual forbs and vegetation composition of mesic grasslands in California. *Conservation Biology*, Vol.17, 1694~1702.
- Laliberte A. S., A. Rango, K. M. Havstad, J. F. Paris, R. F. Beck, R. McNeely and A. L. Gonzales (2004) Object-oriented image analysis for mapping shrub encroachment from 1937 to 2003 in south New Mexico. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 93, 198~210.
- Mearns R. (2004) Sustaining livelihoods on Mongolia's pastoral commons: Insights from participatory poverty assessment. *Development and Change*, Vol. 35, 107~139.
- Naveh, Z. and R. H. Whitaker (1979) Structural and floristic diversity of shrublands and woodlands in Northern Israel and other Mediterranean areas. *Vegetatio*, Vol.41, 171~190.
- Pachepsky Y. A., D. J. Timlin and W. J. Rawls (2001) Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Science Society of America Journal*, Vol.65, 1787~1795.
- Pickup, G., G. N. Bastin and V. H. Chewings (1994) Remote-sensing-based condition assessment for nonequilibrium rangelands under large-scale commercial grazing. *Ecological Applications*, Vol.4, 615~625.
- Pickup G., G. N. Bastin and V. H. Chewings (1998) Identifying trends in land degradation in non-equilibrium rangelands. *Journal of Applied Ecology*, Vol.35, 365~377.
- Sala, O. E., W. K. Lauenroth and R. A. Gollusio (1997) Plant functional types in temperate semi-arid regions. In: Smith, T. M., H. H. Shugart and F. I. Woodward, ed., "Plant Functional Types", pp. 217~233, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Sasaki, T., T. Okayasu, K. Takeuchi, U. Jamsran and S. Jadambaa (2005) Patterns of floristic composition under different grazing intensities in Bulgan, South Gobi, Mongolia. *Grassland Science*, Vol.51, 235~242.
- Tobler M. W., R. Cochard and P. J. Edwards (2003) The impact of cattle ranching on large-scale vegetation patterns in a coastal savanna in Tanzania. *Journal of Applied Ecology*, Vol.40, 430~444.
- Wessels K. J., S. D. Prince, P. E. Frost and D. van Zyl (2004) Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1km AVHRR NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, Vol.91, 47~67.
- 山本浩万・近田朝子・橋本俊昭・梶原康司・本多嘉明 (2001) モンゴル草原における NOAA AVHRR LAC データと現地観測データを併用した広域バイオマス推定に関する研究. *写真測量とリモートセンシング*, Vol. 40(6), 25~37.