

モンゴル草地における MODIS データを用いた バイオマス推定および降雨応答性

関山絢子*† · 島田沢彦* · 横濱道成** · 豊田裕道*

(平成 26 年 11 月 20 日受付/平成 27 年 1 月 23 日受理)

要約：モンゴルで頻発しているゾド（冬季の異常寒波）は、先行して起きる夏季の草地劣化が助長要因の一つである。計画的な放牧のために、夏季の草地状況を広域的かつ連続的に把握することが必要である。また、モンゴルの植生は降雨量の多寡に影響されることが知られており、降雨量によりバイオマスの分布をある程度予測できる。しかし、近年都市周辺の過放牧が深刻化しているため、降雨量とバイオマスの関係が変化していると考えられる。本研究では、MODIS データを用いたバイオマス推定手法を考案した。次に、降雨量に対するバイオマスの応答性を評価し、現地測定したバイオマスと MODIS-LAI（葉面積指数）データの関係からバイオマス推定式を考案した。これまで広く利用されてきた MODIS-NDVI（正規化植生指数）データよりも MODIS-LAI データを用いた方が、良好な精度で推定できることを示した。次に、降雨量とバイオマスの関係を解析した結果、森林域に近い北部のモンゴル草地と半沙漠域に位置する南部の草地において相関が認められた。したがって北部および南部は、降雨量の多寡にバイオマスが応答していることが示唆された。しかし、首都ウランバートルが位置する中部の草地では、降雨量とバイオマスとの間に相関が認められず、バイオマスは降雨量以外の要因に影響されていることを示した。

キーワード：過放牧, 草地劣化, 遊牧, MODIS-LAI

1. 緒 言

近年、モンゴルではゾド（冬季の異常寒波）が頻発している（1999 年, 2000 年, 2009 年）。2009 年には家畜全頭数の 20% にあたる 850 万頭が失われ、過去最大の被害であった¹⁾。モンゴルの基幹産業は、遊牧による畜産業であるため家畜大量死は死活問題である。家畜大量死の被害は、豪雪、強風や寒さが直接的原因であるが、夏季の草地劣化が被害拡大の助長要因であると指摘されている²⁾。これは、越冬前に家畜が十分な牧草を得られないことと、牧草の貯蔵が不足するためである。草地劣化の主な原因は過放牧であるが、これは 1990 年に民主主義・市場経済へ移行した社会的背景によるところが大きい。民主化以降、換金率の高いカシミヤを生産するヤギが急激に増加した。遊牧民が有する家畜群のうち、ヒツジとヤギは概ね 3 対 1 が適切な構成比であるとされているが、近年では 1 対 1.03 とほぼ同じ割合になったことが報告されている³⁾。更に、都市へのアクセス性の問題から、首都ウランバートル近郊の過放牧が加速している。古来行われてきたモンゴルの遊牧は、移動により草地に対する負荷を分散させることで存続されており、自然依存度が高い。したがって、自然条件を無視した生産システムを取り入れることによる草地劣化の拡大は容易に予測できる。

ゾドは自然災害であるため回避することはできないが、ゾドによる家畜大量死の被害は、夏季の干ばつが先行現象として生じている場合が多いため、早期警戒が可能であるとされている⁴⁾。対策の一つとして、遊牧民が夏季の土壌水分や植生状況をいち早く把握し、これに基づいた計画的な放牧や牧草の貯蔵を行うことが有効である。モンゴルにおける年降雨量の約 8 割は、夏季の降雨によるものである。この時期は牧草の生長期であり、家畜の採食が活発になることから、この時期の草地観測が特に重要である。

地表面情報の広域把握には衛星データの利用が合理的である。そのため、衛星リモートセンシングによるバイオマス（植物の乾燥重量）推定の研究が行われてきた。しかし、最近では二酸化炭素の吸収源である森林を対象にした研究に集中しており^{5,6)}、草地のバイオマスを推定した例は少ない。SAATCHI *et al.*⁷⁾ や BACCINI *et al.*⁸⁾ のバイオマスデータセットは、森林や草地を含むグローバルな地上バイオマスデータとして広く利用されているが、それぞれ 2002 年または 2007 年のもので、その後の新しいデータセットは更新されていない。

植生の観測に有用な可視・近赤外域波長にセンサを持つ光学衛星として、Landsat や ASTER などがある。これらの衛星の回帰日数は 16 日である。光学衛星の場合、雲に隠れてしまった地表面のデータは収集できないため、

* 東京農業大学地域環境科学部生産環境工学科

** 東京農業大学生物産学学部生物生産学科

† Corresponding author (E-mail: a3sekiya@nodai.ac.jp)

LandsatやASTERの撮影時が曇りであった場合、次のデータを得るために1か月程度の時間を要することになる。この点 MODIS からは、毎日観測されたデータを基に、雲が除去された合成画像（8日間もしくは16日間の合成）が取得できる。したがって、モンゴル草地の夏季のバイオマス分布を連続的に把握するためには、観測周期の短い MODIS データの利用が適切である。

モンゴルの植生について、国土の北部や山岳地域では森林が分布しているが、首都ウランバートルを含む中部から南部はステップである。南部の植生は、最南部に広がるゴビ砂漠に近いほど被覆率が低くなる。これまでの研究では、降雨量が草地のバイオマスの多寡に影響を及ぼすことが報告されており^{9,10}、降雨量によりバイオマス分布をある程度予測できた。しかし、過放牧状況にある地域は降雨に対するバイオマスの応答が認められないと考えられる。

そこで本研究では、現地調査によるバイオマス測定値と MODIS データを用いたバイオマス推定手法を考案する。次に、過放牧状況にあると考えられるウランバートル近郊、ウランバートルより北に位置する森林に近い草地とゴビ砂漠に近い南部の草地を対象に、バイオマスの多寡と降雨量の関係を調査し、降雨に対するバイオマスの応答性を評価する。

2. 方法

(1) 現地調査

バイオマスの現地測定を行うため、2003年、2004年、2006年、2007年、2011年、2012年の夏季において、坪刈り調査を行った(全28地点)。調査地点は、全てウランバートルから数百キロメートル圏内に位置しており(図1)、放牧地として利用されている平坦な草地である。

各調査地には1辺が50m四方の方形区を作成し、さらに、この方形区内において1m四方の小方形区をランダムに3つ設置した。小方形区内の植生は、それぞれ地上部のみ刈り取った。刈り取った植生は乾燥炉に入れ、絶乾状態にした後に重量を測定した。3つの小方形区の平均を各調査地のバイオマスとした。

各調査地は、年降雨量に応じて3つのグループに分類し、それぞれ森林域に近い草地を北部、ウランバートルを含む中部、ゴビ砂漠に近い半沙漠の草地を南部とした(表1)。

平均標高は、北部と比較して中部は200m程度、南部では300m程度高いが、気候区分としてはいずれの地域もステップに属する。解析は、これら3つの地域別に行った。

モンゴル国には約4,000もの河川が存在する。対象地において、降水量の多い北部には河川が多く、南部にはほとんど存在してない。しかし、いずれの調査地点も河川から離れていることや、モンゴル草地の牧草は、表層の土壌水分が生育に寄与していることから¹¹、降雨量以外の水分条件に大きな差異はないと考えられる。

どの地域も草本植物が優占して生息しているが、北部は森林域が近く肥沃な土壌であるため、顕花植物が多く植生率も高い。植物の多様性が高く、草丈も他の地域より高い。中部は、植生率にばらつきがあるが、どの調査地も概ねイ

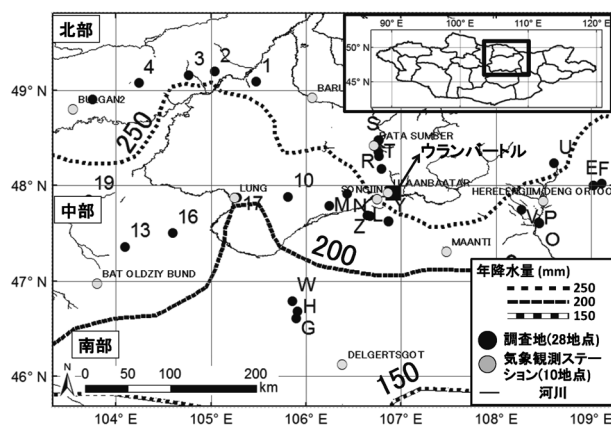


図1 バイオマス測定のための現地調査地(全28地点)および気象観測所(全10地点)の位置。破線は年降雨量の分布境界

表1 年降雨量による現地調査地の分類および各調査地の環境

地域/ 年降雨量 (mm)	現地調査地	平均標高 (m±SD)	植生状況
北部 /250-300	10地点 Q, R, S, T, U, 1, 2, 3, 4, 6	1127 ±176	草本の顕花植物および イネ科植物優占
中部 /200-250	15地点 E, F, L, M, N, O, P, V, Y, Z, 10, 13, 16, 17, 19	1311 ±147	イネ科植物優占
南部 /150-200	3地点 G, H, W	1416 ±135	イネ科、キク科ヨモギ属植 物散在

ネ科植物が優占している。南部は植生率がかなり低く、イネ科がまばらに生息している地点がほとんどである。また劣化した草地に繁茂するヨモギ属植物が散在している。

(2) 衛星データ

バイオマス推定に有用と考えられる MODIS の植生指数プロダクトである Normalized Difference Vegetation Index (MOD13, 16-day composite, 以下 MODIS-NDVI) および Leaf Area Index (MOD15, 8-day composite, 以下 MODIS-LAI) をアメリカ地質調査所の web サイト (<http://glovis.usgs.gov/>) から入手した。いずれのプロダクトもピクセル解像度は500mである。

現地調査を行った6ヵ年において、調査日と最も近い日の MODIS-NDVI および MODIS-LAI データを入手し、これらをバイオマス推定式の導出に利用した。また、過去10年間のバイオマス変動も算出するため2003年1月から2012年8月の月別のデータも入手した(全140シーン)。これらのデータについて、同じ月に1シーン以上のアーカイブがある場合は、クオリティフラグと呼ばれるデータ品質を確認し、雲被覆度が低くエラーピクセルが少ないデータを選んだ。

(3) 降雨量データ

降雨量は、NOAA's National Climatic Data Center (NC

DC) が配布しているデータを使用した。衛星データと同様に、2003年1月から2012年8月の月別データを入手した。降雨量は、図1に記された気象観測ステーションで測定されたものであり、北部に4地点、中部に5地点、南部に1地点存在している。現地調査地の分類と同様に、3つの地域それぞれにおいて、同じ地域内の気象観測ステーションの降雨量平均を、各地域の代表値として利用した。

(4) バイオマス推定

バイオマス推定にはNDVIを用いた研究が多い。NDVIは植生の面的な評価が可能であるが、植生の立体構造は考慮されていないと考えられる。一方、地表の単位面積に対する葉の総面積比率を表すLAIは、面的評価だけでなく、植生の草丈も考慮され、より良好な精度でバイオマスの評価ができると仮定した。本研究ではNDVIとLAIのどちらがバイオマス推定に有効な植生指数であるかを解析した。

3. 結果と考察

(1) バイオマス推定式

現地測定したバイオマスと、現地調査地と同時期かつ同位置のMODIS-NDVIおよびMODIS-LAIを用いて、それぞれ回帰分析を行った(図2)。その結果、RMSEはほぼ同じ値であり、相関係数はLAIの方が高かった。したがって、本研究ではLAIを利用した回帰式をバイオマス推定式($\text{Biomass} = 86.6 \text{LAI} + 24.9$ $R = 0.56$ $p < 0.01$ $\text{RMSE} = 43.0 \text{g/m}^2$)として用いることとした。

バイオマス推定の精度向上のために、推定に有効なパラメータを追加して多変量解析を行うことが、手法の一つと考えられる。NDVIとLAIの間には強い相関がありNDVI以外の植生指数との間も同様であると推察できる。その場合、多重共線性の問題が生じてしまうため、土壌情報や気温など、植生情報以外のパラメータを追加することで、推定精度の向上が期待できる。他に、衛星データの気象補正手法の改良や、衛星データそのものの不確実性の考慮が考えられる。しかし、これらの問題については多くの研究で議論されている最中であることから、今後の課題とする。

(2) 降雨量に対するバイオマスの応答性

年降雨量により分類した各地域(北部, 中部, 南部)において、2003年1月から2012年8月の降雨量とバイオマスの月別変化を図3に示す。なお、バイオマス量は、MODIS-LAIデータを用いてバイオマス推定式から算出した値を使用した。バイオマスも降雨量と同様に、同じ地域に該当する調査地の平均値を利用した。例えば、南部に該当する3か所の現地調査地(G, H, W)のバイオマス推定値を平均して各月の値とした。

北部では降雨量の多寡に連動し、バイオマスは5月もしくは6月あたりから急激に増加し、7月頃にピークを迎え、9月には一気に減少する傾向が明確に認められた。中部と南部も降雨量と連動したバイオマスの変化が認められるが、北部ほど顕著ではない。12月から2月の冬季は、ど

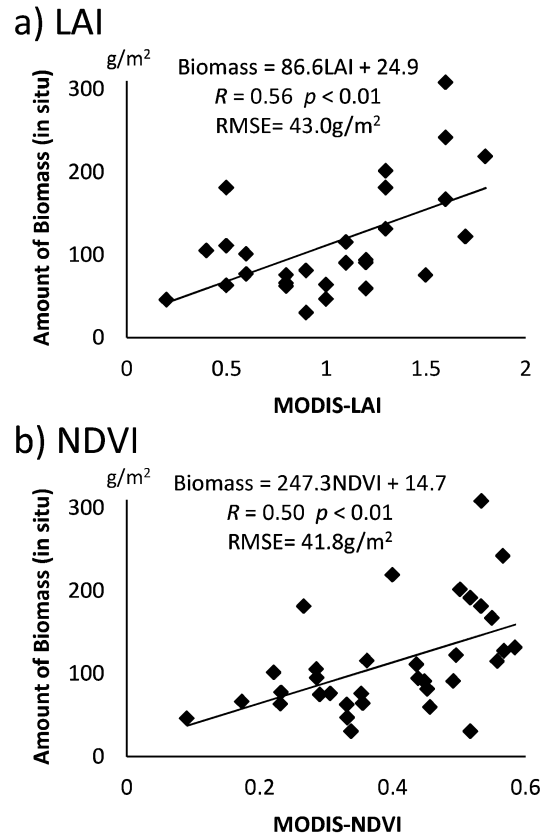


図2 現地測定バイオマスとMODIS植生指数との関係
a) LAI b) NDVI

の地域もほとんど降雨が観測されていない。この時期は降雪があるものの、寒さが厳しいため雪は融解しない。したがって土壌中の水分は低く、乾燥状態であると考えられることから、地上の牧草については、枯れ草がわずかに存在するだけであると推察できる。そのため、この時期のバイオマスは変動がなく、各年の最低値を示したままほぼ横ばいであったと考えられる。

図4は、モンゴルにおいて降雨量とバイオマスのピークとなる夏季(6月から8月)の平均値を示している。2003年から2012年の10年間において、北部と中部では降雨量は増加傾向にあることが分かる。比較してバイオマスの増加はほんのわずかである。したがって、これらの地域においては牧草の生長は十分である、すなわちバイオマスが飽和状態にあるか、放牧圧が高いためにバイオマスの増加が抑制されていることが考えられる。南部については降雨量もバイオマスも10年間の増減は小さく、ほぼ横ばいであることが示された。

図4における降雨量とバイオマスの関係を把握するため、図5に各地域の相関を示す。北部と南部において、降雨量とバイオマスに強い相関が認められた。北部と南部においては、既往の研究のとおり¹¹⁾、バイオマスは降雨量の多寡に影響され、その増減の傾向は降雨量と同様であると言える。これらの地域は、放牧地であるため放牧圧はかかっているものの、再び牧草が生長できる範囲に抑えられており、降雨に対してバイオマスが応答していると考え

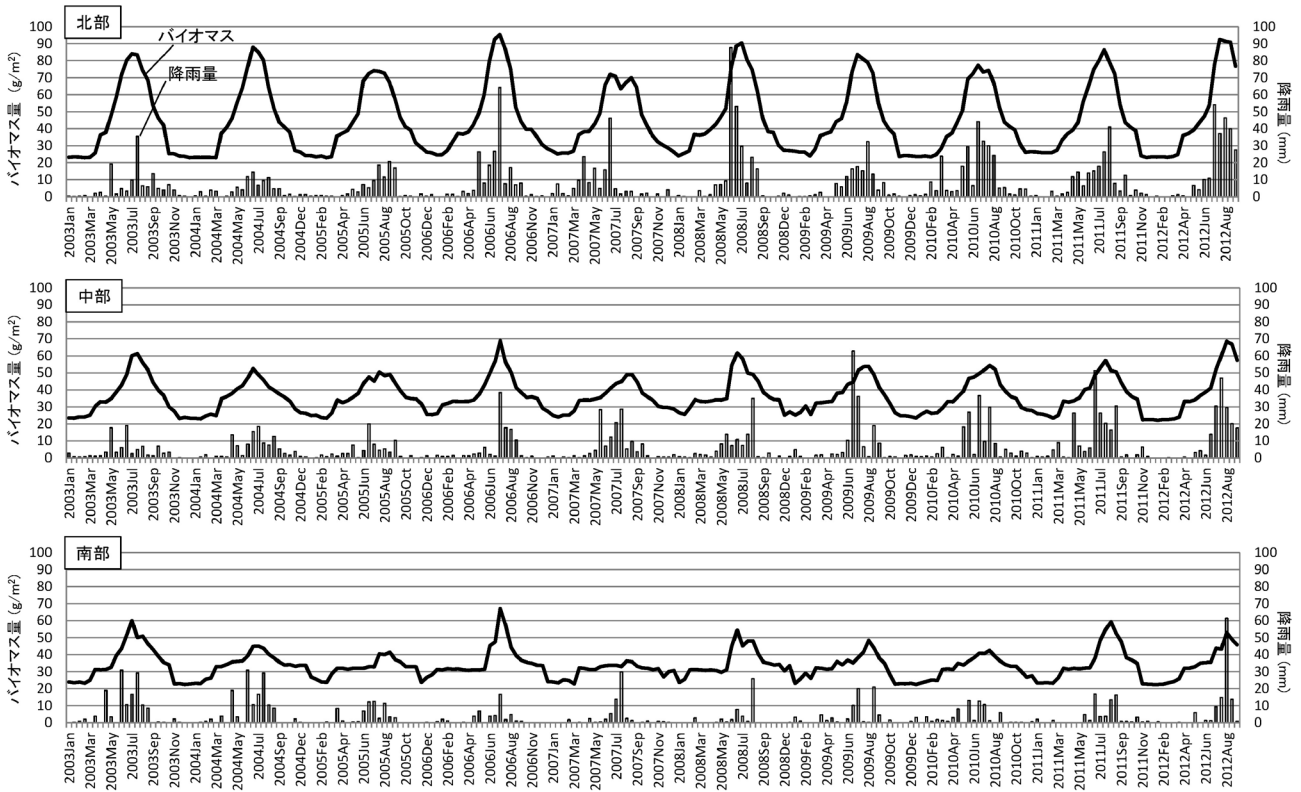


図 3 2003 年から 2012 年における降雨量とバイオマスの月別変化

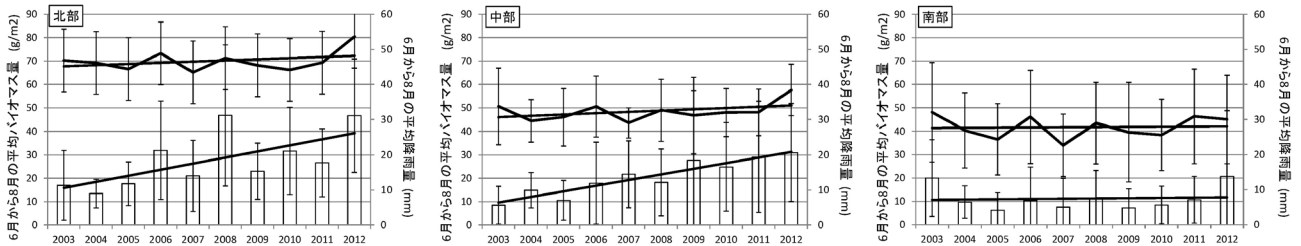


図 4 2003 年から 2012 年の夏季（6 月から 8 月）における降雨量とバイオマスの平均値（エラーバーは標準偏差）

られる。相関が認められなかった中部において、降雨量は年々増加していたため（図 4）、土壌水分量は十分であると考えられる。しかし、図 5 に示すとおりバイオマスは南部よりやや多い程度である。したがって、降雨量以外の要因がバイオマスに影響していると考えられる。以上のことから、中部地域は草地劣化状態にあるため、降雨量とバイオマスとの相関が認められなかったと推察される。ウランバートルはこの地域に存在し、ウランバートルまでのアクセス性が高い地域とも言えることから、過放牧の可能性が高いと考えられる。

以上の結果から、中部のような過放牧による草地劣化の可能性のある地域は、降雨量によりバイオマス分布を予測することは困難であった。今後はモンゴル全土のバイオマス分布図を作成し、降雨量とバイオマスの間に相関が認められない地域を過放牧危険域として抽出し、さらに詳細に検討したい。中部のような過放牧危険域は、降雨とバイオマスに相関が認められないことから、放牧されている家畜

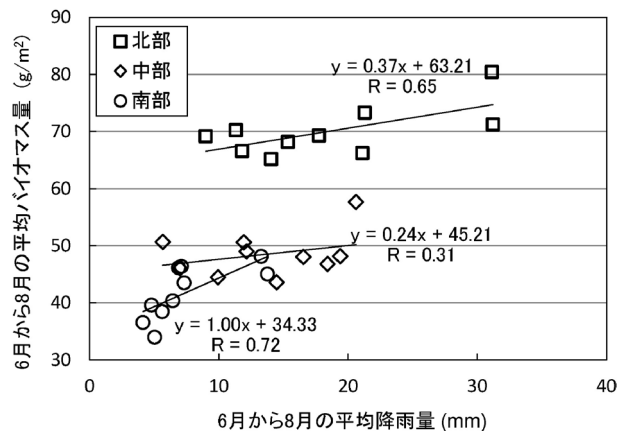


図 5 2003 年から 2012 年の夏季（6 月から 8 月）における降雨量とバイオマスの関係

頭数の考慮など、人為的な要因も利用してバイオマス推定を行う必要があると考えられる。

4. 結 語

本研究では、モンゴル草地のバイオマス分布を連続的に把握するため、観測周期の短いMODISデータを用いたバイオマス推定手法の考案を試みた。次に、降雨量の多寡とバイオマスの変動を調査した。解析は、年降雨量に応じて北部、中部、南部の3つの地域に分類して行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・現地測定したバイオマスとMODIS-LAIデータの関係から、バイオマス推定式を考案した ($Biomass = 86.6LAI + 24.9$ $R = 0.56$ $p < 0.01$ $RMSE = 43.0 \text{ g/m}^2$)。MODIS-NDVIを利用した場合よりも、良好な精度が得られた。
- ・降雨量とバイオマスは毎年6月頃から増加しはじめ、7月にピークが示され、その後急激に減少する傾向が認められた。2003年から2012年の10年間、どの地域も同じ傾向であったが、この傾向は、北部において最も顕著に示されていた。
- ・北部の降雨量は10年間で増加傾向にあったが、バイオマスはほとんど変化していなかった。したがって、降雨もバイオマスも十分満たされた状態であることが示された。中部も北部と同様の傾向であったが、降雨量とバイオマスとの間に相関が認められなかった。したがって、バイオマスが降雨量以外の要因に影響されていることが考えられ、過放牧による草地劣化が示唆された。南部も降雨量とバイオマスとの間に相関が認められ、北部と南部は降雨量に対してバイオマスが応答していることが示された。

謝辞：本研究は、文部科学省グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス (GRENE-ei) および、日本学術振興会科学技術研究費 (若手研究 (B)・課題番号 24780249) の助成を受けた。

引用文献

- 1) International Federation of Red Cross and Red Crescent

- Societies, Mongolia: Severe winter. <http://www.ifrc.org/docs/appeals/10/MDRMN00402.pdf> (最終アクセス 20150213)
- 2) 篠田雅人 (2005) 乾燥地域における土壌水分メモリーその機能と研究の意義. 砂漠研究. 14 (4) : 185-197
 - 3) 横濱道成, 渋谷廣居 (2006) モンゴル国における家畜飼養の動向—モンゴル草原の植生保全の視点から—. 畜産の研究. 60 (11) : 1179-1186
 - 4) 篠田雅人, 森永由紀 (2005) モンゴル国における気象災害の早期警戒システムの構築に向けて. 地理学評論. 78 (13) : 928-950
 - 5) Gong ZHANG, Sangram GANGULY, Ramakrishna R NEMANI, Michael A WHITE, Cristina MILESI, Hirofumi HASHIMOTO, Weile WANG, Sassan SAATCHI, YIFAN Yu, RANGA B. MYNENI (2014) Estimation of forest aboveground biomass in California using canopy height and leaf area index from satellite data. *J. Remote Sensing of Environment*. 151 : 44-56
 - 6) FERNÁNDEZ-MANSO, A. FERNÁNDEZ-MANSO, C. QUINTANO (2014) Estimation of aboveground biomass in Mediterranean forests by statistical modelling of ASTER fraction images. *J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 31 : 45-56
 - 7) Sassan S SAATCHI, Nancy L HARRIS, Sandra BROWN, Michael EDWARD T A, William SALAS, Brian R ZUTTA, Wolfgang BUERMANN, Simon L LEWIS, Stephen HAGEN, Silvia PETROVA, Lee WHITE, Miles SILMANI and Alexandra MOREL (2011) Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 108 (24) : 9899-9904
 - 8) A BACCINI, N LAPORTE, S J GOETZ, M SUN and H DONG (2008) A first map of tropical Africa's above-ground biomass derived from satellite imagery. *Environ. Res. Lett.* 3 : 1-9
 - 9) 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
 - 10) 近藤昭彦, 開発一郎, 平田昌弘, ドルゴスレンアザヤ (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
 - 11) 開発一郎, 山中 勤, 池淵周一, 小尻利治 (2004) 半乾燥地域平地での広域地下水涵養—モンゴル高原での観測結果解析—. 京都大学防災研究所年報 47 : 863-870

Biomass Estimation Using MODIS Imagery and its Response to Precipitation in Mongolian Grasslands

By

Ayako SEKIYAMA^{*†}, Sawahiko SHIMADA^{*}, Michinari YOKOHAMA^{**}
and Hiromichi TOYODA^{*}

(Received November 20, 2014/Accepted January 23, 2015)

Summary : In recent decades, global climate change and overgrazing has caused grassland degradation in Mongolia. Key industry is livestock husbandry by nomads in this country. However, the damage *called dzud* which death of livestock by pasture shortage due to grassland degradation has occurred. Thus, development of biomass estimation method and understanding of biomass response to precipitation and the characteristics for planned grazing are needed. Firstly, in order to calculate the biomass estimating equation from MODIS imagery, a regression analysis was performed using the amount of biomass from field survey and vegetation index from MODIS-NDVI and MODIS-LAI in 2003 to 2012. Secondly the relationship and response to estimated biomass from MODIS imagery and precipitation was investigated. Then analysis was conducted in three areas: north area near forest region, central area including Ulan Bator and south area near Gobi desert. As a result, it was found that the accuracy of biomass estimating equation using MODIS-LAI was higher than that using MODIS-NDVI. It was found that biomass reached a peak in the summer season (July or Aug.), and after that, rapidly decreased in each area every year. Precipitation had slightly increased for 10 years in north and central areas, however biomass was remained static. Moreover a significant correlation was found between biomass and precipitation in the north and south area but not the central area. Thus the biomass response to precipitation is shown in north and south areas. It is suggested that condition of grassland degradation by overgrazing exist in the central area, since no relationship exists between precipitation and biomass.

Key words : Overgrazing, grassland degradation, nomadic herding, MODIS-LAI

* Department of Bioproduction and Engineering, Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture

** Department of Bioproduction, Faculty of Bioindustry, Tokyo University of Agriculture

†Corresponding author (E-mail : a3sekiya@nodai.ac.jp)