

衛星センサの分光仕様が草原の植生指数観測に与える影響

Changes of Vegetation Indices due to Spectral Specifications of Satellite Sensors in a Grassland

村上 和隆^{*}・奈佐原 顕郎^{*}・秋津 朋子^{*}・本岡 毅^{**}・永井 信^{***}

Kazutaka MURAKAMI^{*}, Kenlo Nishida NASAHARA^{*},
Tomoko AKITSU^{*}, Takeshi MOTOHKA^{**} and Shin NAGAI^{***}

1 はじめに

地球規模での水・炭素収支を高精度に評価するためには、地球上で約 20 % を占め (Lieth, 1978), 気象や人間活動の影響を受けやすい草原生態系の季節・経年変化を長期連続的かつ広域的に観測することが重要な課題のひとつである (安成, 2003). この課題を解決するためには、衛星リモートセンシング観測で得られた NDVI (Normalized Difference Vegetation Index; Tucker, 1979)・EVI (Enhanced Vegetation Index; Huete *et al.*, 2002)・GRVI (Green and Red ratio Vegetation Index; Falkowski *et al.*, 2005; Motohka *et al.*, 2010) 等の植生指数を用いた解析が有益である (西田・樋口, 2001; 近藤・開発, 2003; Iwasaki 2006; Higuchi *et al.*, 2007). これらの植生指数は、2011 年の現在まで約 10 年間に渡り、米国の Terra 衛星と Aqua 衛星に搭載された MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) センサ等によって地球上で毎日データが取得されている。これらの衛星センサによる観測が終了した後も、日本の GCOM-C 衛星に搭載される SGLI (Second

Generation Global Imager) センサ等によって継続的にデータが取得される見込みである。しかし、Kobayashi *et al.* (2007) は、シベリアのカラマツ林において、波長応答仕様 (センサ仕様) が異なる複数の衛星センサ間での分光反射率や植生指数の絶対値や、それらの季節変化パターンに違いがみられることを報告している。数十年にわたる長期連続的に草原の展葉や落葉等の植物季節 (フェノロジー) を調査する場合、センサ仕様が異なる複数の衛星で得られた植生指数を時系列化する必要がある。しかし、センサ仕様が異なってしまうと植生指数の絶対値が同一であったとしても、異なった植生状態を捉えてしまう可能性がある。このように同一の基準で植生状態を捉えられないことが原因で、フェノロジーを誤って評価してしまう可能性がある。そこで我々は、筑波大学陸域環境センター (TERC) にある草原圃場において、MODIS と SGLI センサの仕様の違いが植生指数を用いた草原のフェノロジー観測に及ぼす影響を調査した。草原の分光放射観測を毎日行い、雲被覆・大気・衛星の観測条件等に起因したノイズが無く、センサ仕様の違いが大きく影響する条件下で比較を行った。

^{*} 筑波大学大学院・生命環境科学研究科

^{**} 宇宙航空研究開発機構・地球観測研究センター

^{***} 海洋研究開発機構・地球環境変動領域

II 方法

1. 対象地と解析期間

本研究では、TERC 内（北緯 36 度 05 分，東経 140 度 06 分，海拔 27 m）にある円形圃場の中心にある実験観測塔から南へ 24 m 離れた場所にある草原を解析対象地とした（秋津ほか，投稿中）。1982 年から 2001 年の気象条件は，年平均気温が 14.1 °C，年平均降水量が 1207 mm であった（莫ほか，2003）。草原の主要構成種は， C_3 植物であるセイタカアワダチソウ（*Solidago altissima*），ヨモギ（*Artemisia princeps*），メドハギ（*Lespedeza cuneata*）と， C_4 植物であるチガヤ（*Imperata cylindrica*），メリケンカルカヤ（*Audropogon virginicus*），ススキ（*Miscanthus sinensis*）である（井桁ほか，2002）。これらの植生は，最繁茂期に高さ 1.5 m 程まで成長する。

解析期間は，2009 年 1 月 1 日から同年 12 月 31 日までの一年間とした。また，7 月 14 日（DOY = 195）と 11 月 4 日（DOY = 308）に圃場全体で草刈が行われた。

2. 観測データ

草原の植生指数を観測するために，鉄骨構造物（ヤグラ）の上部，高さ 2.9 m の位置に，以下の部品から構成される分光放射観測システム

（Hemi-Spherical Spectro-Radiometer：HSSR；土田ほか，2005；Motohka *et al.*, 2010）を設置した。

－分光放射計（英弘精機製 MS700）

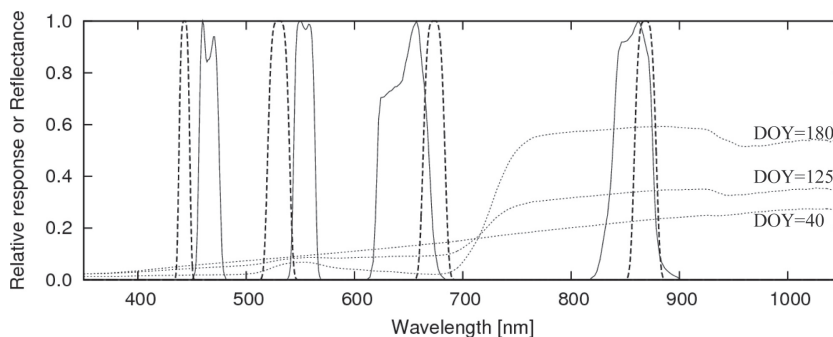
－回転装置（早坂理工製 CHS-AR）

分光放射計は，ヤグラ基部に設置した物置内のパーソナルコンピュータで制御し，毎日，日中に 10 分間隔で草本群落の分光反射率を計測した。

詳しくは，Motohka *et al.*（2010）を参照されたい。本研究では，太陽の入射角による影響をできる限り避けるために，10：00 から 14：00 までのデータを平均して解析に使用した。また，データの欠測が DOY = 308 から 316，337，342 から 365 の間で見られた。

3. 解析方法

はじめに，第 1 図で示される MODIS と SGLI の波長応答仕様（<http://modis.gsfc.nasa.gov/>；http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/）に基づいて，日別の青（ R_{Blue} ），緑（ R_{Green} ），赤（ R_{red} ），近赤外（ R_{NIR} ）の分光反射率を求めた。次に，求められた分光反射率を用いて，式（1）から（3）で定義される植生指数 NDVI 及び，EVI，GRVI（Tucker，1979；Huete *et al.*, 2002；Falkowski *et al.*, 2005；Motohka *et al.*, 2010）をそれぞれ求めた。



第 1 図 MODIS（実線）及び SGLI（破線）の波長応答仕様と，DOY = 40, 125, 180 に得られた草原群落表面における分光反射スペクトル（点線）を示す。

$$\text{NDVI} = (R_{\text{NIR}} - R_{\text{Red}}) / (R_{\text{NIR}} + R_{\text{Red}}) \quad (1)$$

$$\text{EVI} = G \times (R_{\text{NIR}} - R_{\text{Red}}) / (R_{\text{NIR}} + C_1 \times R_{\text{Red}} - C_2 \times R_{\text{NIR}} + L) \quad (2)$$

$$\text{GRVI} = (R_{\text{Green}} - R_{\text{Red}}) / (R_{\text{Green}} + R_{\text{Red}}) \quad (3)$$

ただし, $G = 2.5$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7.5$, $L = 1$ である.

III 結果

第2図にMODISとSGLIのセンサ仕様で得られた分光反射率の季節変化パターンを示した. また, R_{Blue} , R_{Green} , R_{Red} , R_{NIR} のDOY = 100, 180, 197, 230, 310における前後2日間の平均値を第1表に示した. DOY = 140から197と220から310(植生繁茂期間)にかけて, SGLIセンサ仕様の R_{Green} がMODISセンサ仕様より0.01程度低かった. これに対して, DOY = 0から100及び, 198から202, 310から365(無植生期間)にかけて, SGLIセンサ仕様の R_{Blue} と R_{Green} がMODISセンサ仕様より0.007程度低く, R_{Red} では, 0.009程度高かった. R_{NIR} は, 二つのセンサ間で違いがほとんど見られなかった. DOY = 195及び, DOY = 310において, 各分光反射率に急激な変化が見られた.

第3図にMODISとSGLIのセンサ仕様で得られた植生指数の季節変化パターンを示した. また, NDVI, EVI, GRVIのDOY = 100, 180, 197,

230, 310における前後2日間の平均値を第2表に示した. 夏の刈り取り(DOY = 195)の前後を見ると, 各植生指数はDOY = 184から徐々に変化し, DOY = 195を過ぎると急激に変化している. また, DOY = 310において各植生指標が無植生期間と同程度になるまで急激に減少した. SGLIとMODISのセンサ仕様の違いは, 無植生期間でのNDVI, EVI, GRVIで, それぞれ0.03, 0.02, 0.08程度SGLIセンサ仕様の方が低く現れた. これに対して, 植生繁茂期間では, NDVIとEVIにおいて, 0.02程度, SGLIセンサ仕様の方が高くなった. どの植生指数においても, 値を取る幅がMODISセンサ仕様よりもSGLIセンサ仕様の方が10%前後大きくなることが示された.

IV 考察

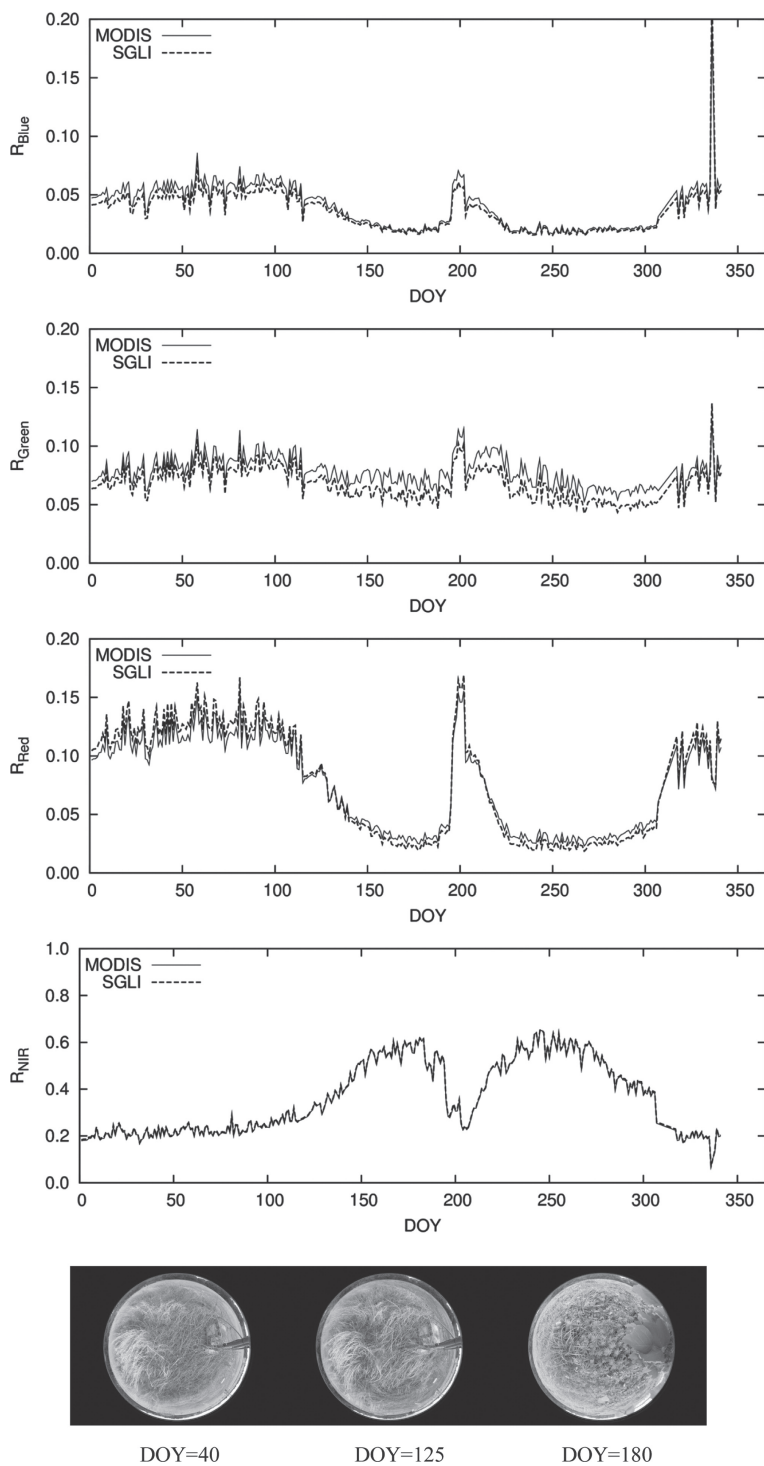
本研究の結果, MODISとSGLIのセンサ間では, R_{Green} の定義に起因した分光反射率の違いが見られるにもかかわらず, 無植生期間と植生指数が飽和した期間を除いて, 植生指数の絶対値には大きな差が見られないことが明らかになった. 無植生期間と植生指数が飽和した期間を含めると, NDVI, EVI, GRVIのいずれにおいても, MODISよりSGLIの方が, 値のとりうる範囲(レンジ)が大きいが, 年間を通じた植生指数の変化のパターンはよく似ていた. この結果は, MODISセ

第1表 DOY = 100, 180, 197, 230, 310におけるMODIS(上段)とSGLI(下段)の分光放射率(青, 緑, 赤, 近赤外)の値

	DOY				
	100	180	197	230	310
R_{Blue}	0.06	0.02	0.06	0.02	0.05
	0.05	0.02	0.05	0.02	0.04
R_{Green}	0.09	0.07	0.10	0.07	0.07
	0.08	0.06	0.09	0.06	0.06
R_{Red}	0.12	0.03	0.12	0.03	0.09
	0.12	0.02	0.13	0.02	0.10
R_{NIR}	0.25	0.57	0.28	0.50	0.20
	0.25	0.58	0.30	0.49	0.20

第2表 DOY = 100, 180, 197, 230, 310におけるMODIS(上段)とSGLI(下段)の植生指数(NDVI, EVI, GRVI)の前後2日間の平均値

	DOY				
	100	180	197	230	310
NDVI	0.36	0.90	0.40	0.88	0.36
	0.33	0.92	0.40	0.90	0.34
EVI	0.22	0.85	0.26	0.75	0.18
	0.20	0.88	0.25	0.77	0.17
GRVI	-0.11	0.41	-0.12	0.40	-0.14
	-0.20	0.42	-0.19	0.39	-0.22



第 2 図 MODIS (実線) 及び SGLI (破線) の波長応答仕様をもとに地上分光放射観測で得られた草原群落表面における分光反射率 (R_{Blue} , R_{Green} , R_{Red} , R_{NIR}) の季節変化パターン. 図下部に典型的な草原群落の画像を示す.

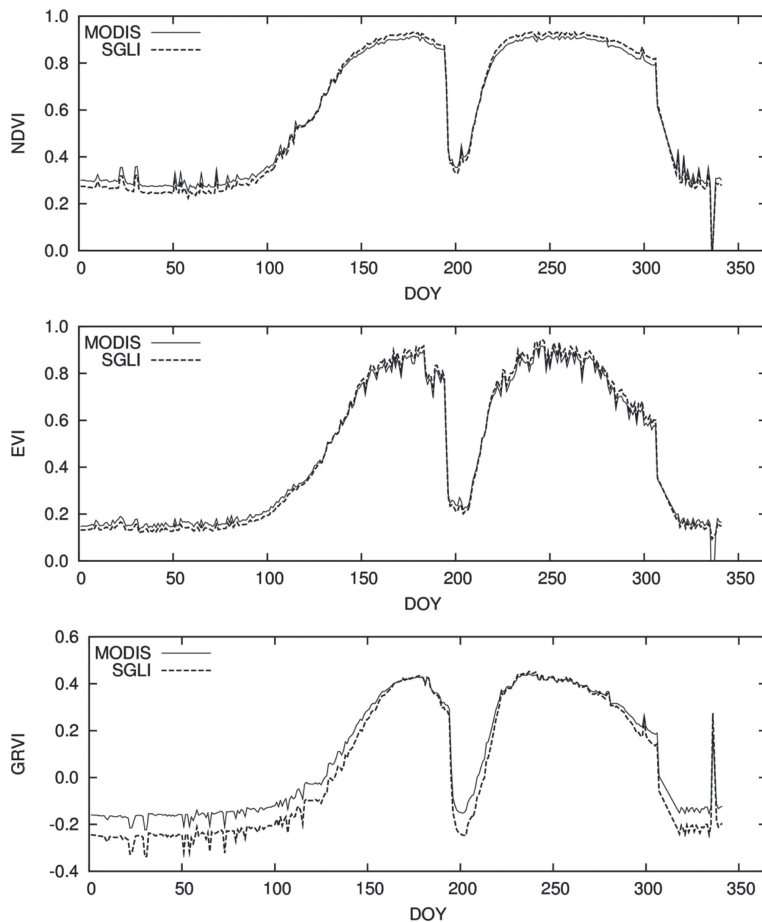
ンサで得られた植生指数を対象とした草原の展葉や落葉のタイミングの基準 (e.g., Motoshka *et al.*, 2010) を多少調整すれば, SGLI センサで得られた植生指数に対しても適用可能であることを示唆する.

夏の刈り取り (DOY = 195) の前後を見ると, 植生指数はヤグラ直近の刈り取り (DOY = 184) から徐々に変化し, 圃場全体の刈り取り (DOY = 195) で急激に変化している (第3図). この結果より, 植生指数により短期間の間に行われた大小二つの刈り取りを捉える事が可能であると示唆された. その後, DOY = 230 あたりで各植生

指数が刈り取り以前と同程度まで回復している.

しかし, 夏の刈り取りが中止されていた 2004 年以前の研究結果では, バイオマス, LAI (Leaf Area Index) の最大値がともに 8 月以降に現れていたが (莫ほか, 2003), 本研究で解析した 2009 年では夏の刈り取りが行われたため各植生指数がピークを迎えていない可能性がある. また, 刈り取りによって草原の植生種が変化している可能性がある. 以上より, 植生指数が同程度であってもバイオマスが回復したとは言えず, これらを推定する場合には複数年に渡る解析が必要である.

GCOM-C/SGLI センサによる地球観測は,



第3図 MODIS (実線) 及び SGLI (破線) の波長応答仕様をもとに地上分光放射観測で得られた植生指数 (NDVI, EVI, GRVI) の季節変化パターンを示す.

2014 年より 13 年間に渡る長期連続観測ミッションが計画されているため (http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/), 我々は過去約 10 年に渡る MODIS センサの観測と併せて約 25 年に渡り, 植生指数による草原のフェノロジーの経年変化を広域的に評価することが可能となるであろう. しかしながら, 衛星観測で得られた植生指数は, 大気補正や幾何補正等の手法によって, それらの絶対値に変化が生じる可能性がある. したがって, 地上データと衛星データとを併せて検証を行うことが必要である. また, 本研究は 1 サイトのみににおける検証であるため, 本研究の結果に関する普遍性が得られるかどうかを多地点の草原サイトで調査する必要がある.

謝辞

筑波大学大学院生命環境科学研究科の田中健太郎氏, 川戸渉氏, 陸域環境研究センターの各氏には, 長期連続観測に関するご協力を頂きました. Phenological Eyes Network (PEN) の皆様には, データ取得管理に関するご協力を頂きました. 本研究は, 環境省地球環境研究総合推進費「21 世紀の炭素管理に向けたアジア陸域生態系の統合的炭素収支研究」(環境省), 日中韓フォーサイト事業「東アジア陸上生態系炭素動態 - 気候変動の相互作用解明を目指した研究教育拠点の構築」(日本学術振興会), GCOM-C RA「総合的な陸域生態系情報の開発」(宇宙航空研究開発機構) によるご支援を頂きました. 記して御礼申し上げます.

参考文献

秋津朋子・奈佐原顕郎・野田 響・本岡 毅・村上和隆・土田 聡・永井 信: 草原の季節変動と年々変動に関するデジタルカメラを用いた長期連続自動観測. 筑波大学陸域環境研究センター報告, 投稿中.

井桝史彦・莫 文紅・加藤美恵子・及川武久 (2002): 陸域環境研究センター圃場における 2001 年の C3/C4 混生草原の LAI と地上部バイオマスの季節変化. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **3**, 17-25.

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), 147-151.

土田 聡・西田顕郎・岩男弘毅・川戸 渉・小熊宏之・岩崎 晃 (2005): Phenological Eyes Network - 衛星による地球環境観測のための地上検証ネットワーク. 日本リモートセンシング学会誌, **25** (3), 282-288.

西田顕郎・樋口篤志 (2001): リモートセンシング実験でみられた水理実験センターの圃場の草地植生の季節変化. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **1**, 1-10.

莫 文紅・井桝史彦・横山智子・及川武久 (2003): 陸域環境研究センター圃場における 2002 年の C3/C4 混生草原の LAI と地上部バイオマスの季節変化. 筑波大陸域環境研究センター報告, **4**, 109-117.

安成哲三 (2003): モンゴル草原はどう維持されてきたか?: 生態気候システム学的序説. 科学, **73** (5), 555-558.

Falkowski, M. J., Gessler, P. E., Morgan, P., Hudak, A. T. and Smith, A. M. S. (2005): Characterizing and mapping forest fire fuels using ASTER imagery and gradient modeling. *Forest Ecology and Management*, **217**, 129-146.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X. and Ferreira, L. G. (2002): Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, **83**, 195-213.

Higuchi, A., Hiyama, T., Fukuta, Y., Suzuki, R.

- and Fukushima, Y. (2007): The behaviour of a surface temperature/vegetation index (TVX) matrix derived from 10-day composite AVHRR images over monsoon Asia. *Hydrological Processes*, **21(9)**, 1157-1166.
- Iwasaki, H. (2006): Impact of interannual variability of meteorological parameters on vegetation activity over Mongolia. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **84(4)**, 745-762.
- Kobayashi, H., Suzuki, R. and Kobayashi, S. (2007): Reflectance seasonality and its relation to the canopy leaf area index in an eastern Siberian larch forest: Multi-satellite data and radiative transfer analyses. *Remote Sensing of Environment*, **106**, 238-252.
- Lieth, H.F.H. (1978): *Patterns of Primary Productivity in the Biosphere*. Hutchinson Ross, Stroudsburg, 342p.
- Motohka, T., Nasahara, K. N., Oguma, H. and Tsuchida, S. (2010): Applicability of green-red vegetation index for remote sensing of vegetation phenology. *Remote Sensing*, **2**, 2369-2387.
- Tucker, C. J. (1979): Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, **8**, 127-150.
- (2011 年 2 月 9 日受付, 2011 年 10 月 26 日受理)

