

異なる分解能をもつ人工衛星を利用した草原植生の定量的把握

誌名	日本草地学会誌
ISSN	04475933
著者	秋山, 侃 川村, 健介
巻/号	49巻3号
掲載ページ	p. 293-298
発行年月	2003年8月

異なる分解能をもつ人工衛星を利用した草原植生の定量的把握

秋山 侃・川村健介

岐阜大学流域圏科学研究センター (501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

受付日: 2003年4月16日/受理日: 2003年4月23日

キーワード: 時間・空間・波長分解能, 人工衛星センサ, 草原モニタリング, 地上部現存量, 中国内蒙古.

Quantitative Understanding of Grassland Characteristics Using Several Space-borne Sensors

Tsuyoshi AKIYAMA and Kensuke KAWAMURA

River Basin Research Center, Gifu University, Gifu 501-1193, Japan

Key words: Aboveground biomass, Grassland monitoring, Inner Mongolia, Space-borne sensors, Spatiotemporal and spectral resolution.

世界の草地・草原は陸域面積の約1/4を占める。その多くは大規模粗放的に管理されてきたが、近年の人口増加に伴う過放牧や農地の乱開発が重大な問題を引き起こし、社会的関心を集めている。すなわち草原は単に畜産物の持続的生産という側面だけではなく、地球環境問題として、例えば砂漠化は黄砂の飛来、温暖化ガスの放出、生物多様性の消失などに関連している。世界の草地・草原が占有する面積は広く、とくに放牧地では草原の管理には多くの困難を伴う。リモートセンシング技術はこれらの問題を定量的に把握するうえで有効なツールの一つである。衛星搭載センサの分解能は近年急速に向上しているが、これが草原植生や放牧管理の状態を捉える上でどのような影響をもたらすかについて考えたい。

I. リモートセンシングにおける3つの分解能

リモートセンシングの世界では、空間分解能 (spatial resolution), 時間分解能 (temporal resolution) に加えて、3番目の分解能として波長分解能 (spectral resolution) が特に重要な意味を持つことが他とは異なる点である。

空間分解能は、2次元形態的に何メートルの大きさの対象物まで識別できるかということである。最近では高空間分解能の時代となり、パンクロマティックモードでは1m以下の超高空間分解能センサを備えた人工衛星、QuickBirdやIKONOSも運航している。人工衛星から見る陸域地表面は、基本的には土壌、水面、植生およびその陰などが入り交じった混合画素 (mixed pixel) によって構成されていると考えられ、空間分解能が低いということは混合画素が多く生じることを意味している。表1に現在運航中の地球観測衛星に搭載されている光学センサの仕様を示した。以前は高分解能衛星とされていたLandsatやSPOT (分解能20-30m) はいまや中分解能に格下げされ、代わってIKONOSやQuickBird (マルチスペクトルモードで同2-4m) が登場している。しかし空間分解能は高ければ高いほど良いというものではない。

データ量が膨大になるので、対象や目的にあった分解能が求められる。

時間分解能は同一地点に対する観測頻度であり、人工衛星の回帰日数に関係している。Landsatは16日周期、SPOTは26日周期であるが、これらの衛星が搭載するセンサは光学センサであるため、雲があると地表を観測できない。この結果、植物が生育する半年間にLandsatが飛来する機会は10回以上あるが、日本では雲量が20%以下 (画像解析可能範囲) となるのは1回程度で、悪くすると数年間にわたり1回も良いデータが取れないこともある¹⁾。雲のないデータをもっと多く取れるようにするためには、①衛星回帰日数を短くする、②同じ衛星の周期をずらして多数基打ち上げる、③マイクロ波のような全天候型センサを使う、などの方法が考えられるが、経済的・技術的制約が大きい。例えば気象衛星NOAAは低空間分解能・低波長分解能と引き替えに1日1回という高頻度観測を行っている。また、マイクロ波を用いた合成開口レーダ (SAR) による観測も行われているが、光学センサに比べて情報量が少ないという欠点がある。現在最も多く使われているのは、④衛星にpointing機能 (表1のPoint) を与える方法である。これは別軌道上にあっても地上からの操作で脇見をさせて、緊急な災害や特別のリクエストに応えるようにする機能である。

リモートセンシングの世界では、3番目の分解能として波長分解能 (spectral resolution) が大きな意味を持つ。波長分解能は対象物もつ分光反射特性をどれだけ捉えられるかに関わっている。具体的には衛星に搭載されているセンサがどこの波長帯を測り、どのような半値幅 (nm) で感知できるかが問題となる。例えば植物に何らかのストレスが加わったときに生じるred shiftと呼ばれる現象は、650nmから700nmの間の反射が急上昇する位置のわずかなズレによって観測されるが、この現象を検出するためには少なくとも5nm-10nmの波長分解能が要求される。これまでの地球観測人工

表 1. 現在運航中の地球観測衛星 (光学センサ搭載, 2002 年 6 月現在).

人工衛星/センサ	打上げ年月・国	観測波長帯・数*	空間分解能	観測周期 (日)
Landsat-1-7 /MSS	1972. 7- USA	Vis ; 2, NIR ; 2	80 m	18 d (16 d)
Landsat-7 /ETM+	1999. 4 USA	Vis ; 3, NIR ; 1, MIR ; 2 TIR ; 1	30 m 60 m	16 d
SPOT-5 /HRG	2002. 5 France	Vis ; 2, NIR ; 1, MIR ; 1 Panchrom ; 1	10 m 5 m	26 d (Point)
IRS 1D /LISS-III	1997. 9 India	Vis ; 2, NIR ; 1, MIR ; 1	23.5 m 70.5 m	25 d (Point)
TERRA /ASTER/VNIR /MODIS (LCB) /MODIS (LCP)	1999. 12 USA	Vis ; 2, NIR ; 1 Vis ; 1, NIR ; 1 Vis ; 2, MIR ; 3	15 m 250 m 500 m	16 d (Point)
NOAA-15, 16 /AVHRR	15 ; 1998. 5 16 ; 2000. 9 USA	Vis ; 1, NIR ; 1, MIR ; 1, TIR ; 2	1.1 km 1.1 km	1 d 1 d
IKONOS 2 /Imaging sensor	1999. 9 USA	Vis ; 3, NIR ; 1 Panchromatic ; 1	3.3-4.0 m 0.82 m	11 d (Point)
QuickBird2 /Imaging sensor	2001. 10 USA	Vis ; 3, NIR ; 1 Panchromatic ; 1	2.44 m 0.61 m	(Point)
EO-1 /Hyperion	2000. 11 USA	VNIR (0.357-1.0) : 60 SWIR (0.9-2.577) : 160	30 m 30 m	16 d

* Vis ; Visible, NIR ; Near Infra-red, MIR ; Mid IR, TIR ; Thermal IR.
Panchromatic ; Panchromatic mode, Point ; Pointing function.

表 2. 乾燥草原の管理に關与する時空間スケールの特徴 (GRAETZ³⁾ から抜粋).

空間的スケール			時間的スケール		
m	生態系現象	草原管理関連事象	日	生態系現象	草原管理関連事象
10 ⁻²	種子散布距離	草生長に必要な降雨量			
10 ⁻¹	草本個体サイズ	年平均降雨量			
10 ⁰	灌木サイズ	羊の体長	10 ⁰	降雨時間	
10 ¹	樹木サイズ	リルやガリの大きさ			
10 ²	単一植生型単位	草原の火災や萎凋面積	10 ²	1年生草本寿命	家畜管理日数/年間
10 ³	水利に影響する地形	羊の採食草原面積	10 ³	多年生草本寿命	生産家畜期間
10 ⁴	land unit 単位	牧区基本単位	10 ⁴	火災回復期間	兎退治薬散布後日数
10 ⁵	land system 単位	主植生区分単位	10 ⁵	草原群落寿命	最大植生回復日数
10 ⁶		羊牛市場までの距離	10 ⁶	草食動物・草原共進化	
10 ⁷		輸出先国までの距離			

衛星では, 3 (NOAA/AVHRR) ないし 7 (Landsat/TM) 程度の波長数しか観測できず, 間隔も数十から数百 nm の幅があるため, 平準化された情報しか得られなかったが, ここにも hyperspectral と呼ばれるセンサが登場した。米国の地球観測衛星 EO-1 に搭載されているハイペリオンもこの一つで, 0.357 μ から 2.577 μ までを約 10 nm 間隔の 220 バンドでカバーしているので, 従来の衛星では見られない情報が得られるものと期待している。そのほか OrbView-4 号衛星は

0.4-2.5 μ 間を 200 波長, Levis 衛星では 384 波長を観測することになっていたが, どちらも打ち上げ後にセンサが機能せず, 観測は失敗した。

II. 衛星分解能と草原情報

草原現象と衛星分解能の関係を総括的に捉えたのが GRAETZ³⁾ である。GRAETZ はオーストラリアの乾燥草原を対象に Landsat/MSS (空間分解能 80 m) と NOAA/AVHRR

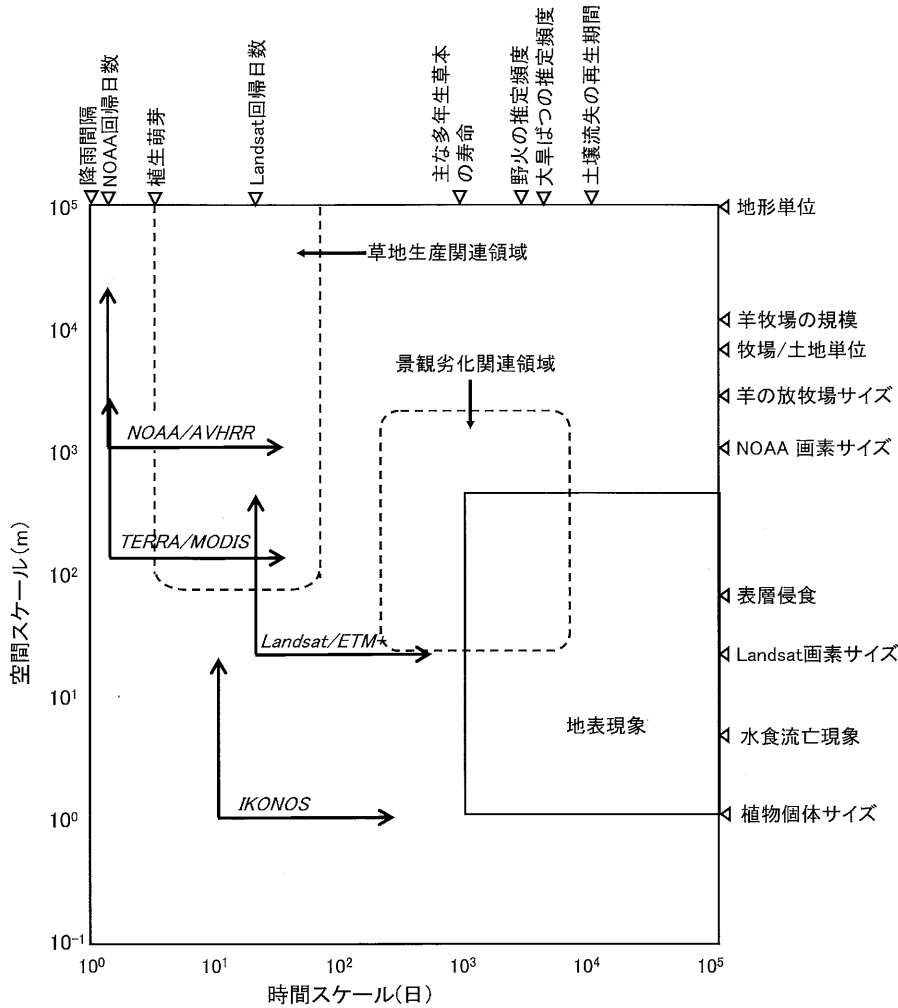


図 1. 牧草生産と草原荒廃の観点からみたオーストラリア乾燥草原の時空間現象と Landsat/MSS, TERRA/MODIS, NOAA/AVHRR および IKONOS の時空間スケールの特徴 (GRAETZ³⁾を著者らが改変).

(同 1,100 m) による分解能と、これらによって取得可能な草原情報の関係を論じている。表 2 は草原生態系で生じる現象と草原管理に関わる主な要因を、空間軸 (m) と時間軸 (日) で整理した。空間軸は 1 cm から 1 万 km、時間軸は 1 日から百万日 (約 2740 年) までの範囲が対数日盛で記載されている。オーストラリア全土の草原域をカバーするためには 180 km 四方の Landsat 画像で 205 シーンを要するというだけあって、日本の草地とはオーダーが違う点は念頭に置く必要がある。超多波長衛星画像における波長分解能の効果についてはまだ実績が少ないので、論究はしていない。表 2 の内容と Landsat と NOAA 衛星の時間・空間分解能 (表 1) を勘案して作成されたのが図 1 である。図中には「草原生産」および「草原景観劣化」に関わる時空スケールが示されている。両者間では時間スケールの違いが大きく、草原生産は数日から 100 日の範囲であるのに対して、景観劣化は 1 年から 30 年の範囲で発生している。空間スケールでは草原退化が数十 m から数 km 単位で生じるのに対して、草原生産は 100 m から 100 km とやや大きな単位で関与している。この結果、

Landsat であれば草原退化過程の大半を把握できるが、草原生産に関しては困難と判断された。その場合、障害となるのは主に時間分解能であり、観測頻度の向上が不可欠である。間隔的には可能であっても実際には雲があると地表を観測できない。GRAETZ³⁾ は過去に蓄積された衛星データの雲量を調べ、オーストラリアの南北 2 地点で雲量 20% 以下の晴天取得率を月別に集計したところ、北部で 20~80% (真夏の 2 月のみ 0%)、南部では 35~70% となった。これはオーストラリアでは 2 月を除き、最悪でも 5 回に 1 回、平均的には 2 回に 1 回程度は雲のほとんど無いデータが得られることを示している。これに対して日本の晴天確率はずっと低く、10 回に 1 回程度と報告されている¹⁾。そうすると図 1 の衛星観測の時間スケールはさらに一桁右側に移行すると思えなければならない。GRAETZ の報告以来 15 年を経て人工衛星の時空間分解能は大幅に向上しているので、図 1 には最近の IKONOS や MODIS 衛星の分解能に相当する部分を著者らが加筆した。その結果、オーストラリアの乾燥草原であれば、草原生産の監視に十分適用できることが明らかになった。

表 3. 使用した 3 種地球観測衛星の各分解能の比較と対象域画素数 (面積).

衛星/センサ	再観測日数	バンド数	空間分解能	ライン×コラム (面積: km ²)
NOAA/AVHRR LAC	1 d	4	1,100 m	119× 98 (14,111)
TERRA/MODIS	16 d (P1d)	2	250 m	521× 428 (13,937)
Landsat/ETM+	16 d	7+1	30 m	4,336×3,560 (13,893)

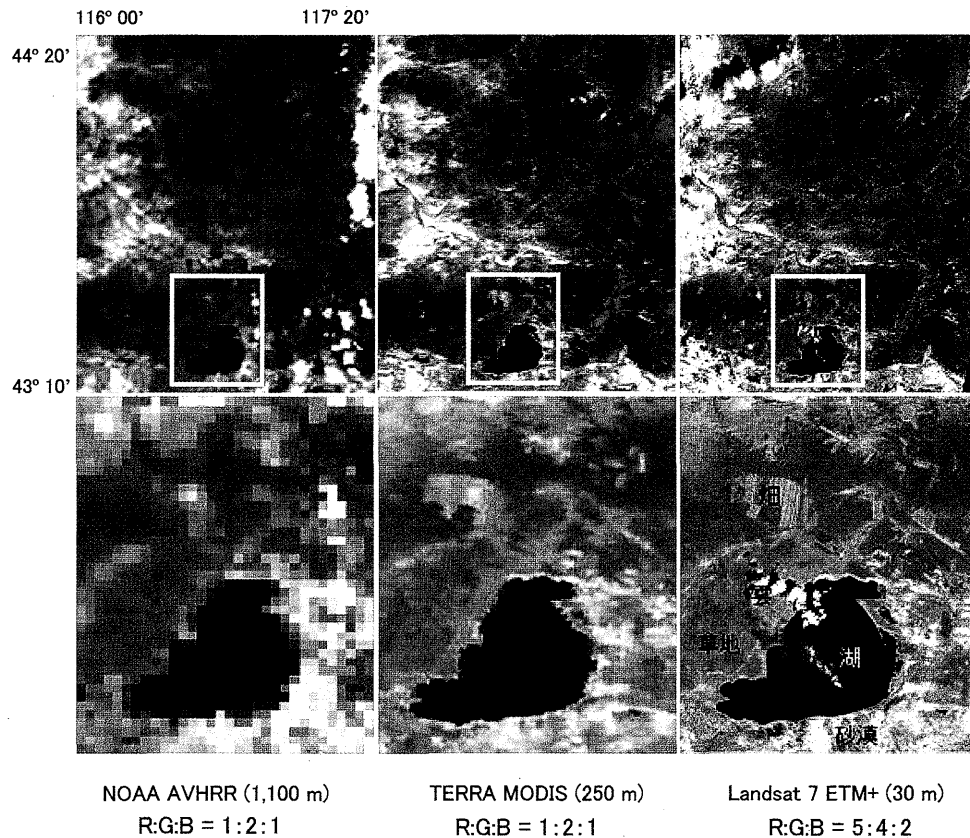


図 2. 3 種衛星による対象域の画素比較。
 上段: 全域 (107×130 km²), 下段: 部分拡大 (31×37 km²).

III. 内蒙古草原の草量モニタリングの時空間スケール

中国内蒙古自治区の面積は日本国土の 3 倍に近く、このうち 68% がステップと呼ばれる短草型草原に覆われている。著者らは 1997 年から、土地荒廃の進む内蒙古の Xilingol 草原で衛星画像を利用した研究を行っている。この研究の目的は草原の利用と保全の両立のためのモニタリング技術の確立にある。このため、500 km 四方 (25 万平方キロ) の広域的な植生状態の十数年にわたる変動モニタリングから、3,740 km² の面積をもつ牧場の毎月の放牧管理情報、そしてある観測地点における準リアルタイムの草量変化まで、対象は広い時空間スケールにまたがっている。したがって用いる衛星画像データも Landsat / ETM +, TERRA / MODIS, NOAA / AVHRR の 3 種類を使っている。表 3 は解析対象域である Xilin 河流域 (130 km×107 km) に対する 3 衛星の分解能

(時間・空間・波長) ならびに同対象域をカバーするのに必要な画素数を示している。空間分解能が 30 m の Landsat と 250 m の TERRA, 1,100 m の NOAA では画素数は 1,324 : 19 : 1 となる。これを画像にすると図 2 のようになった。上段は対象全域を、下段は枠を付けた範囲 (31 km×37 km) を拡大している。NOAA 画像の場合、上段段階で画面上にすでに画素が露呈している。TERRA では拡大画像の湖の縁などに画素が見えるが Landsat では滑らかである。

1. 地上部現存量の推定

植生情報をリモートセンシングによって得ようとする場合、単独波長の反射輝度データではなく、複数の波長情報を組み合わせた植生指数 (Vegetation Index) を使って推定するが多い。なかでも、植生が赤色域の波長を吸収し、近赤外域を強く反射するという特徴をもつことを利用して、赤と近赤外波長を組み合わせた指数が一般的である (例えば

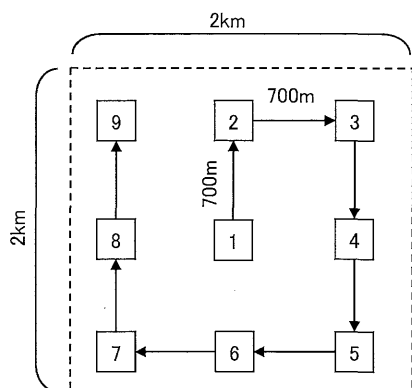


図 3. NOAA/AVHRR の空間分解能にあわせた地上サンプリングの方法 (KAWAMURA *et al.*⁵⁾).

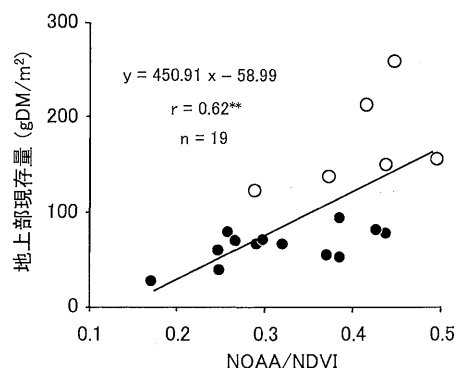


図 4. 19 箇所における NOAA/NDVI と地上部現存量の関係 (KAWAMURA *et al.*⁵⁾).
○ : Meadow steppe (採草地), ● : Typical steppe (放牧地).

BANNARI *et al.*²⁾). 例えば比植生指数 (Ratio Vegetation Index, RVI) や正規化植生指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) がこれに当たる。式としては次のようになる。

$$RVI = NIR/R$$

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

ここで、NIR は近赤外域の反射輝度値、R は赤色域の反射輝度値である。ほとんどの地球観測衛星は両波長帯を計測しているため、このような植生指数を使うことができる。たとえば現存量の異なる草地があり、携帯型分光放射計で反射強度を測定した後にその場所を刈り取って植生指数と現存量の相関を取ると、極めて高い相関係数が得られる (例えば ITANO *et al.*⁴⁾)。しかし、ある日の草原の現存量を推定したいと思っても、Landsat は 16 日周期なので思うようにデータが取得できない。高頻度衛星ならば快晴日に当たる可能性が高く、準リアルタイムのモニタリングも可能である。しかし NOAA のように高頻度でも低空間分解能の人工衛星を使って草量推定を行う場合、衛星画像に対応する地上データはどこでどれだけ取ればよいのかが問題となる。

これに対して KAWAMURA *et al.*⁵⁾ は次のような方法を考えた。NOAA/NDVI は分解能が 1,100 m である。① まずあらかじめ前年の Landsat/ETM データで、ほぼ均質と思われる草原 (19 カ所) を選び出した。調査カ所間ではなるべく草量 (地上部現存量, gDM/m²) に差がある方がよい。画像解析に際して NOAA データは 3×3=9 画素の平均を用いるので、均質な草原の広がりとして 3km 四方程度はほしい。② 次に現地に行って、図 3 の方法で渦巻き状に 700 m 間隔で 9 地点の刈り取り (1m×1m) を行い、9 点の平均値を NOAA データに対応するカ所の草量とした。位置決めには携帯型 GPS (e-Trex, Garmin 社) を使った。用いた GPS の誤差は 10 m 程度とされている。③ 9 画素の NOAA データと 9m² の刈り取りデータを 1 カ所とし、草量の異なる 19 の草原でこれを繰り返し、相関を取った結果が図 4 である。R=0.62** が得られたが、明らかに 2 群に分けた方がよい。図中の白丸は Meadow steppe と呼ばれ、主に冬季飼料のための採草用の

草原で、黒丸は Typical steppe という放牧草原である。前者は草種・草量とも豊富で草丈も高く、調査した 6 カ所の草量は 122-259 gDM/m² の範囲にあった。これに対して Typical steppe (13 カ所) は過放牧の場所ではとくに草丈・植被率とも低い。現存量は 27-94 gDM/m² であった。人工衛星センサは植被率などには感度が高い反面、草丈が高い群落に対しては感度がやや低いため、このように分離したと考えられる。Meadow steppe と Typical steppe が急に入れ替わることはなく、その区別は Landsat/TM では可能なので、やはり近い年次に得られた Landsat/TM で土地被覆分類を行っておけば推定の精度は高まる。ここで得られた式を使って対象域全体 (130 km×107 km) の平均草量を求めたところ、1,189 kg/ha となり、1987 年当時⁶⁾ から 4 割程度も草量が減っていると推定された。

なお今回は 9 地点の刈り取りを行ったが、刈り取り地点を図 3 中の 1, 2, 4, 6, 8 あるいは 1, 3, 5, 7, 9 の 5 地点まで減らしても精度上問題がないことが判った。その場合でも、①・②で行った均質な草原の選び出しが事前に行われることが前提条件である。

2. 空間分解能の異なる衛星情報間の比較

空間分解能・波長分解能からすれば、草原草量の季節変化解析には Landsat/TM データを使うことが望ましいが、観測頻度と天候の関係から季節変化を追うことは難しいことを先に述べた。それでは実際に衛星センサの空間分解能の違いで、解析結果にどの程度の違いが生じるかを Landsat/TM, TERRA/MODIS, NOAA/AVHRR で比較してみよう。表 4 の左半分は 3 種類の衛星画像について 9 画素 (3×3) から NDVI を求める際の対象空間スケールを示している。いずれの衛星データも 2001 年 8 月中旬の 3 日間に取得された。図 5 a には 3 衛星の NDVI と前述の 19 カ所の草量 (地上部現存量, gDM/m²) に関する散布図および式を示した。NDVI の値は MODIS が全体的に高く、他の 2 つはほぼ接近している。寄与率 (R²) は Landsat, MODIS, NOAA の順、すなわち空間分解能の順番と一致し、Landsat では R²=0.814 であった。また式の傾きに関する違いは小さいが MODIS,

表 4. 画素数一定または面積一定にした場合の各衛星データの範囲.

衛星/センサ	取得日 2001年	空間分解能 (m)	画素数一定			面積一定		
			画素数	一辺 (m)	面積 (ha)	画素数	一辺 (m)	面積 (ha)
Landsat/ETM+	8月14日	30	3×3	90	0.81	110×110	3,300	1,089
TERRA/MODIS	8月13日	250	3×3	750	56.25	13×13	3,250	1,056
NOAA/AVHRR	8月12日	1,100	3×3	3,300	1,089	3×3	3,300	1,089

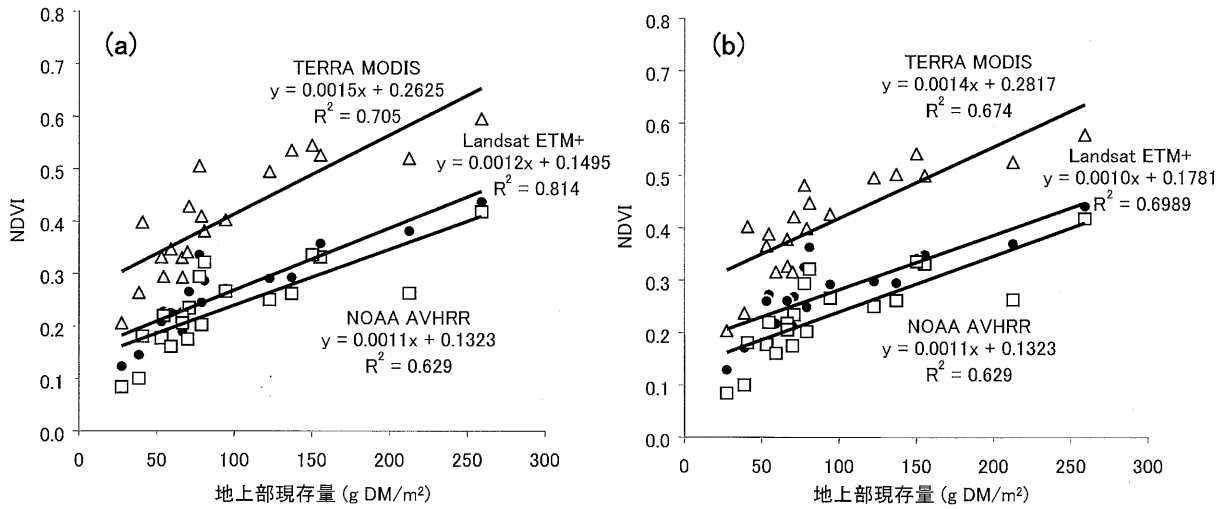


図 5. 地上部現存量と3種衛星におけるNDVIの関係.

a: 画素数を一定(9画素)にした場合, b: 面積を一定(約1,100 ha)にした場合.

●: Landsat ETM+, △: TERRA MODIS, □: NOAA AVHRR.

Landsat, NOAA の順に傾きが大きかった。

上の解析が画素数を9に合わせた3衛星を比較したのに対し, 表4右側では解析域の面積を一定にするため, NOAAの9画素に相当する面積(1,089 ha, 一辺3,300 m)を他の2衛星にも適用した。すると図5 bに示すようにLandsat, MODIS, NOAAの R^2 はそれぞれ, 0.699, 0.674, 0.629となり, やはり空間分解能の順には並んだものの僅差であった。この結果は, 高分解能衛星の場合, 広大な領域を代表させると優位性が薄れることを意味している。

今回, 空間分解能が異なる3つの衛星データを使って, 中国内蒙古草原の草量推定の精度について検討した。このような量的な評価に比べて, 草種構成など質的な評価には空間分解能よりも波長分解能の方が問題になると考えられる。しかしこの種の検討は草原に関してほとんどなされていない。

引用文献

- 1) 秋山 侃(1994) 衛星リモートセンシング技術の農業利用研究。一広域作物資源の分布, 生育状態の量的把握—生物環境調研32, 145-154.
- 2) BANNARI, A., D. MORIN and F. BONN (1995) A review of Vegetation Indices. *Remote Sensing Reviews* 13, 95-120.
- 3) GRAETZ, R.D. (1987) Satellite remote sensing of Australia rangelands. *Remote Sensing of Environment* 23, 313-331.
- 4) ITANO, S., T. AKIYAMA, H. ISHIDA, T. OKUBO and N. WATANABE (2000) Spectral characteristics of aboveground, plant coverage, and plant height in Italian Ryegrass (*Lolium multiflorum* L.) meadows. *Grassland Science* 46, 1-9.
- 5) KAWAMURA, K., T. AKIYAMA, O. WATANABE, H. HASEGAWA, F. ZHANG, H. YOKOTA and S. WANG (2003) Estimation of above-ground biomass in Xilingol Steppe, Inner Mongolia using NOAA/NDVI. *Grassland Science* 49, 1-9.
- 6) XIAO, X., D.S. OJIMA, C.A. ENNIS, D.S. SCHIMEL and Z.Z. CHEN (1997) Estimation of aboveground biomass of the Xilin River Basin, Inner Mongolia, using Landsat TM imagery. In *Research on Grassland Ecosystem 5* (Ed. Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, Academy of Science of China). Science Press, Beijing. pp. 130-138.