

「地球変動のメカニズム」
平成9年度採択研究代表者

本多 嘉明

(千葉大学環境リモートセンシング研究センター 助教授)

「衛星観測による植物生産量推定手法の開発」

1. 研究実施の概要

本研究の目的は、衛星による植物生産量推定モデルの開発とモデルの高精度化を可能にすることにある。これにより地球温暖化防止のための植物による二酸化炭素固定量を正確に見積もることや食糧生産を把握することができる。研究の初段階では平坦・均質・広大な草原サイトでの植物生産量の実測手法を開発し、衛星観測データと直接比較することができた。これにより衛星データによる植物生産量推定結果を実証的に検証することが可能になり平成10年度以来、12年度も実証的な検証を行った。平成12年度は、モンゴル草原における実証的な研究を実施するとともに、北米大陸において無人ヘリコプターを利用した観測を実施した。さらに、植物の3次元構造を考慮した新しい植生指数の開発を手がけた。

まず、モンゴル草原における実証的な観測結果を簡単に以下にまとめる。

平成11年度は、表1に示すように平年であった平成10年度と異なり干ばつ年であった。さらに、表に示すように平成12年度は干ばつ年の平成11年度の示す値よりさらに悪化した値となった。平成10年度と平成11年度を比較すると、最大バイオマス量で30.93[g/m²]、草丈で1.67[cm]、植被率で15.33%、植生指標で0.126、平成11年度の方が低い値を示しており植生の成長が阻害していることが分かる。しかし、平成12年度は、平成11年度の値よりも最大バイオマス量で32.02[g/m²]、植被率で5.65%、植生指標で0.01低い値を示しておりさらに厳しい植生状況であった。

表1 平成10・11・12年度のモンゴル草原比較

項目	平成10年度	平成11年度	平成12年度
バイオマス(g/m ²)	90.57	59.64	27.62
草丈(cm)	7.4	5.73	6.32
植生被覆率(%)	27.81	12.48	6.38
植生指数	0.350	0.179	0.169

平成12年度のモンゴル観測は、植物生産量のモデル構築および衛星データ解析に必要な基礎的な情報を入手するとともに、現地観測手法の確定を目的とした。モンゴル草原観測サイト運用計画に基づき、1)車両観測、2)刈り取り調査、3)3D

レーザースキャナー観測、4) BRDF観測、5) 大気観測、6) 気象観測、7) 土壌水分観測、8) 土性観測を約1ヶ月間実施した。平成12年度は非常に厳しい干ばつ年であったために、平成10年度などの平年値、平成11年度の干ばつ年などと観測値の違いがあり今後の植物生産量推定モデル作成に役立つと考える。

一方で、昨年度までに草丈を考慮したバイオマス推定がより高精度な結果をもたらすことが明らかになった。そこで衛星データから草丈を推定する手法や植生の3次元構造を表す新しい植生指数の開発に着手し、モンゴル草原において開発提案中の手法や指数の有効性を確かめた。

2. 研究実施内容

目的

平成12年度の本研究の目標は大きく3つに分けることができる。

- 1) モンゴル観測による提案手法の実証的な検証活動およびさらなる手法開発。
- 2) 北米大陸における無人ヘリコプター観測に基づく二方向性反射特性と植生の形状の関係情報の収集。
- 3) 衛星観測による植生3次元構造の把握に関する手法開発。

3-1 モンゴル観測

本年度も、昨年に引き続いての干ばつ年であった。昨年冬にわが国のマスコミでも大きく取り上げられた雪害の影響で、観測サイト周辺の遊牧民の生活も大きく影響されていた。遊牧民といっても、毎年夏に家畜を放牧するのは家族ごとに決まった場所にゲルを建てるものであるが、今年度は昨年まで居た家族のうちいくつかが他の地域へ移動していた。原因は干ばつによって草の生育状態が悪く、家畜を養えないと判断したためである。観測サイト周辺に留まった家族も非常に苦しい生活を強いられていた。本来ならば、彼らの食生活のなかで重要な位置を占める乳製品がほとんどない状態であった。観測サイトのあるドントゴビ県では家畜の1/3以上が雪害で死んでしまったためである。

本年度の観測サイトの草の量は、明らかに昨年よりも減っていた。とくに、観測サイトにキャンプを設営した頃は、草がほとんどない状態だったが、最初の一週間に連続して雨が降ったため、その後は急速に成長した。それでも、昨年と比べると乾燥重量にして半分から2/3程度の量に留まった。一般的に、雪害の後には土壌に水分が蓄積され、そのあとの夏は草の状態がよくなると言われているが、本年度は昨年度よりもさらに状態が悪化していた。昨年はガソリンの欠乏が問題となったが、今年度は供給が問題となるほどのことはなかった。

本年度の観測は以下のものを行った。

1) 車両観測

キャンプサイト近くの2km×2kmの非破壊観測エリアで昨年同様観測と、

ステレオカメラを用いた立体構造データの取得を行った。さらに、本年度はNASAの協力で入手したランドサット衛星の画像から見つけ出した新たな観測エリア2箇所においても車両観測を行った。また、昨年同様20kmのトランセクト観測も行った。



2) 刈り取り観測

非破壊観測エリア周辺3箇所では1m×1mのコドラートをそれぞれ30箇所設置し、天候の許す限り、全観測期間にわたって刈り取り調査を行った。本年度は後に説明する3Dスキャナによる観測のための刈り取り調査も同時に行った。また、本年度はコドラート内の種別の乾燥重量調査とLAIの計測も行った。同時にコドラート内の分光反射特性を放射計を用いて刈り取り前後で計測した。

3) BRDF観測

トラック搭載簡易タワーを用いた方向性反射特性の観測を、非破壊観測エリアと本年度より観測を開始した灌木の分布するエリア（ランドサット衛星の画像から場所を特定した箇所）において行った。

4) 草本群落の3次元構造観測

刈り取り調査用のコドラートを用いて3Dスキャナを用いたものとステレオ画像を用いたものの2種類の計測方法で3次元計測を実施した。3Dスキャナは異なる6方向もしくは15方向から計測し、各計測データを3次元で再構成するためのデータを取得した。ステレオ画像は、コドラート内のスペクトル計測と同時に高画質のデジタルイメージとしてデータを取得した。両者は、非破壊計測による乾燥重量推定アルゴリズム開発に用いる予定である。



5) 大気観測

雨天等を除いて、観測期間中の大気補正用データの計測を行った。具体的にはサンフォトメータによる大気光学的厚さの計測である。

6) 気象観測

毎年計測している、観測期間中のサイト周辺の温湿度の計測を本年度も継続して行った。

7) 土壌水分観測

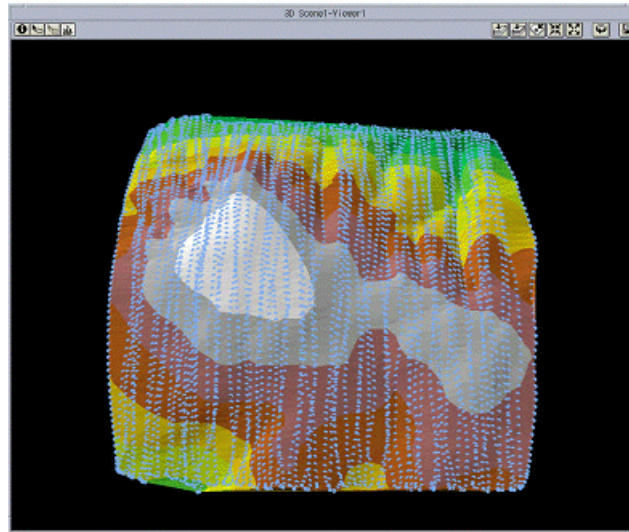
昨年引き続き、異なる地点での土壌水分観測を行った。

8) 土性観測

観測サイト全域の土性は、植生被覆率の低いサイト周辺の衛星データ解析において、バックグラウンドの情報として必要なものである。昨年に引き続き異なる地点におけるデータを取得した。

9) 地形観測

昨年度は、トータルステーションを用いて、5平方キロメートルの地形を測量したが、今年度はGPSを用いた測量を行った。GPSを用いたため、非常に密な観測ポイントを抑えることができ、高精度のデジタル標高データを取得することができた。



10) 半自動観測装置による同一地点の時系列スペクトル観測

植物の生長過程を観測するために、地表面のスペクトルデータとデジタルイメージを連続的に同一地点で収集するシステムを稼動させた。本観測装置は、計測されたスペクトルデータを無線でキャンプサイトの基地局へ転送する機能を持つため、キャンプサイトで稼動状態のモニタリングをすることができる。また、本装置による観測では観測インターバルを自由に設定することができるため、本年度は5分間隔でデータを取得した。スペクトル観測では、太陽が雲に隠れていない状態で観測しなければならないため、できるだけ観測インターバルを小さくすることで、解析可能なデータ数を増やす必要がある。昨年の観測結果から、5分インターバルが最適であるという結果が得られたため、本年度はこの間隔で計測を行った。

本年度の観測結果は、チェック、検証されており、すでに非破壊計測による3次元構造データを用いた乾燥重量推定では良好な推定結果を得ることが判明している。

3-2 北米観測

北米大陸に点在する地上観測サイトにおいて、無人ヘリコプター観測システムを利用した現地観測を実施した。目的は、代表的な地表面状態の分光反射情報ならびに二方向性反射特性情報を収集し、中低度解像度の衛星データから地表面状態をより高精度に求める手法開発のための基礎情報を収集することであった。

代表的な地表面状態として砂漠、草原、草原と灌木、森林の4種類を揚げ、アリゾナ州、ニューメキシコ州、カンザス州、モンタナ州、カナダのブリティッシュコロンビア州、オレゴン州のサイトにおいてそれぞれ平均3日間の観測を行った。

カンザス州においてのみ竜巻警報が出されるほど大気状態が不安定で当初計画した観測項目が満たされなかったが、他の観測サイトにおいては十分に満足できる観測結果を得ることができた。

観測結果から判明したことは、枯れた植物体が広く分布している砂漠と草原、草原と灌木、森林の3つのタイプは解像度を変えた分光反射情報によって簡単に識別できるが、草原、草原と灌木、森林の3つのタイプは解像度を変えた分光反射情報のみでは識別が困難であることが明らかになった。

しかしながら、二方向性反射特性情報を用いると草原と灌木混じりの草原では近赤外域において明かに違う特徴を示している。具体的には近赤外域の角度依存性が灌木が混じる方が著しく大きくなっている。また、森林域ではその傾向が一層強く出ていることが分かった。これらの情報を利用することにより、これまで不可能とされた中低解像度衛星センサーを用いて地表面状態の違いを認識できることが判明した。したがって、衛星データのみからそれぞれの植生に応じた生産量推定モデルを適応できる可能性が確認できた。

各観測地

以下の実験場はすべてNASAに登録されている現地観測サイトであり、NASAの衛星実験プランに協力しているサイトである。

1) アリゾナ州

アリゾナ州立大学が主な協力機関で、環境保護地域の砂漠植生の観測を実施した。ここで、枯れた草体で広く覆われた地表面状態の代表面積観測、二方向性反射特性観測、モザイク観測を行った。また、広葉樹が1本だけ含まれた状態での代表面積観測、二方向性反射特性観測、モザイク観測も実施し、単木が分光情報に及ぼす影響の度合いを知るための基礎情報を得ることができた。

2) ニューメキシコ州

アメリカ農務省が主な協力機関で、農務省のホルナダ実験場内に於いて観測を実施した。ここは150年前までは一帯が草原地帯であったが、家畜の放牧圧力等によって砂漠化が進展しているところである。家畜の圧力によって草原に灌木が入り込み、最終的にはサンドゥーンにメスキートマメだけが生息する状態になり砂漠化が進展する。草原、灌木が入り込んだ草原（遷移途上）において代表面積観測、二方向性反射特性観測、モザイク観測を行った。それぞれ特徴がある二方向性反射情報が得られた。

3) カンサス州

アメリカ地質調査研究所が主な協力機関で、カンサス州のコンザ実験場において観測を計画した。しかしながら、竜巻警報が出るなど実験場周辺の大

気状態が不安定で観測する機会が1回のみとなった。

草原の二方向性反射特性を1度限り観測することとなった。

4) モンタナ州

モンタナ州立大学が主な協力機関で、州立大学の演習林において観測を実施した。対象は、草原、広葉樹林、針葉樹林の3種類であり、代表面積観測、二方向性反射特性観測、モザイク観測を行った。それぞれ特徴がある二方向性反射情報が得られた。

特に広葉樹林と針葉樹林の二方向性反射特性にも大きな違いがあることが判明した。

5) カナダ・ブリティッシュコロンビア州

カナダ太平洋森林センターが主な協力機関で、ビクトリア市の水源地帯において観測を実施した。対象は100年生の針葉樹林と20年生の針葉樹林の2種類であり、代表面積観測、二方向性反射特性観測、モザイク観測を行った。それぞれ特徴がある二方向性反射情報が得られた。100年生の針葉樹は樹高が50mを超えるもので、20年生のものは樹高が13-15mのものであった。それぞれの二方向性反射特性はそれぞれの樹冠の構造を良くあらわすもので、林齢の区分を行うのにも有効であることが判明した。

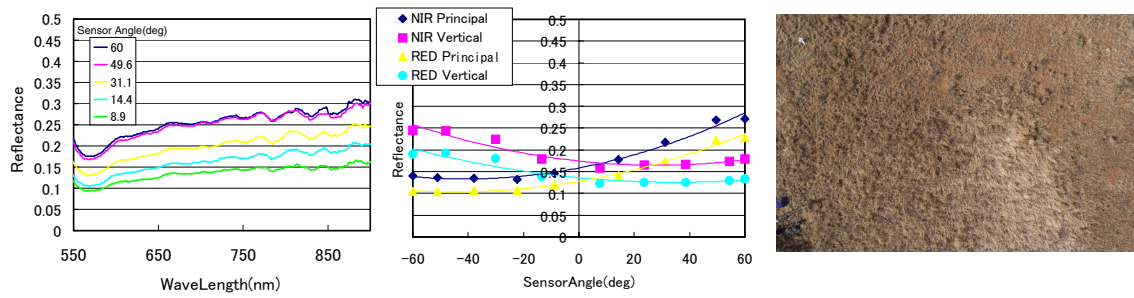
6) オレゴン州

オレゴン州立大学が主な協力機関であり、演習林において観測を実施した。対象は150年生の針葉樹林と15年生の針葉樹林であった。代表面積観測、二方向性反射特性観測、モザイク観測を行った。それぞれ特徴がある二方向性反射情報が得られた。150年生の針葉樹は樹高が57mを超えるもので、15年生のものは樹高が13-14mのものであった。それぞれの二方向性反射特性はそれぞれの樹冠の構造を良くあらわすもので、林齢の識別を行うのにも有効であることが判明した。

7) 主な成果

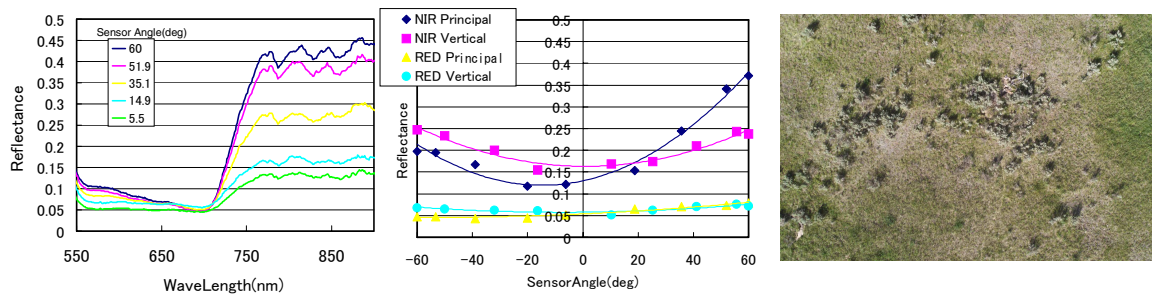
今回の観測によって、草原はもちろん森林部においてもGPS受信のためのスペースが十分に確保できれば、本観測システムによる観測が有効であることが確認できた。これまで航空機などを用いないと観測が行えなかった森林部において、観測データの取得を行うことができたのは大きな成果である。

今回の観測では、同じ観測対象地域で日照条件などを変化させてデータ取得を行ったり、同じ条件の下で異なる地域を観測したりすることが充分には行えなかった。今後本システムで取得したデータを衛星データの解析やBRDFモデルの作成などに応用する場合には、これらの事を考慮した観測計画を立てる必要がある。



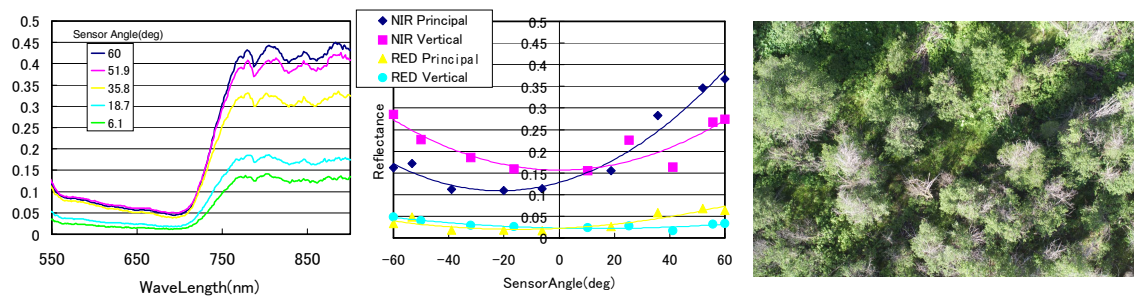
(a)分光スペクトル (b)角度別の反射率 (c)画像データ

図1. 枯れた草原(6/3 8:42 アリゾナ)



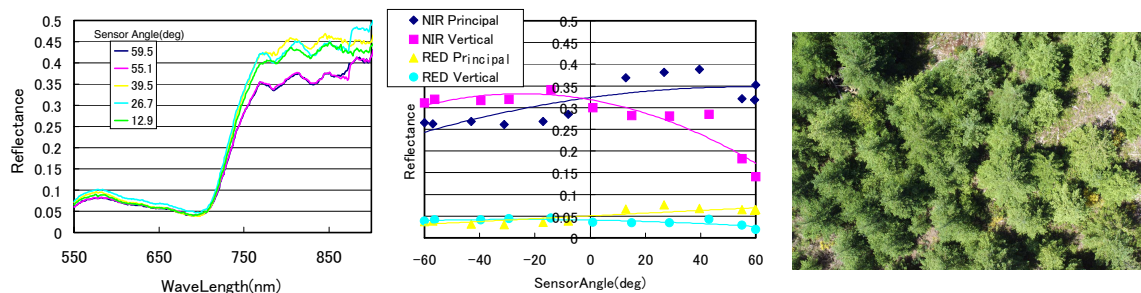
(a)分光スペクトル (b)角度別の反射率 (c)画像データ

図2. 草原(6/22 9:43 モンタナ)



(a)分光スペクトル (b)角度別の反射率 (c)画像データ

図3. 広葉樹の自然林(6/22 9:11 モンタナ)



(a)分光スペクトル (b)角度別の反射率 (c)画像データ

図4. 針葉樹の人工林（6/28 11:57 ヴィクトリア）

3-3 衛星観測に基づく植生3次元構造の把握

1) 衛星データによる草丈の算出

円柱モデルのパラメータの中で、衛星観測が可能なものと可能でないものがあり、表1に示すように植生被覆率、草本の株数、草丈は求めることができない。観測可能なパラメータのうち土壌の反射率は、植物の覆っていない冬期のデータを用いて、対象物Nadir方向の反射率は、衛星観測においてスキャン角が0度付近のデータを用いる。衛星観測で得られる反射率は、植物が覆っているときのデータで、衛星観測スキャン角が大きいときの反射率も取得できる。植生被覆率は、NDVIから算出することが可能であるが、ここでは観測が行えないものとして扱う。

衛星観測可能なパラメータを円柱モデルに代入すると、以下の式はVCR、N、Hを変数とする多項式として得られる。 R_s 、 R_g 、 R_{BRDF} の値を衛星の各チャンネルデータを代入することにより、VCR、N、Hに対する連立多項式を得ることができる。式(1)は、OCTSのチャンネルBand 5、6、7を代入して算出する場合の連立多項式である。

$$\begin{aligned} R_{Bch5}(\theta_s, S) &= f(VCR, N, HR_{sch5}, \theta_s, R_{gch5}, \tau, S) \\ R_{Bch6}(\theta_s, S) &= f(VCR, N, HR_{sch6}, \theta_s, R_{gch6}, \tau, S) \\ R_{Bch7}(\theta_s, S) &= f(VCR, N, HR_{sch7}, \theta_s, R_{gch7}, \tau, S) \end{aligned} \quad (1)$$

R_{Bchn} : Band n衛星観測反射率

R_{schn} : Band nにおける土壌の反射率

R_{gchn} : Band nにおける対象物のNadir方向の反射率

表1 衛星観測可能なパラメータの分類

R^B	: 衛星観測で得られる反射率	可
VCR	: 植生被覆率	不可
N	: 草本の数	不可
H	: 草丈	不可
R_s	: 土壌の反射率	可
θ_s	: 太陽天頂角	可
R_g	: 対象物Nadir方向の実測値	可
τ	: 透過率	不可
Scan	: センサ位置情報	可

円柱モデルを利用した連立多項式の解は複数持つため、VCR、N、Hの3つの変数にそれぞれ値を代入し、連立多項式を満たす解を求めた。

この手法でチャンネルを2つ使用して解を求めるが確認できれば、NOAA AVHRR等チャンネル数が少ないセンサにも適応できる。

実際にモンゴル草原においてADEOS OCTS(6、7、8チャンネル)のデータから草丈を求めた結果を図5に示すように3つの草丈の解を得ることができた。ただし、10%程度の同じ植被率で株数が低い値であるのに草丈が高い値をとるのは光を競争的に受けるために草丈をのばす草本の性質に反する。したがって、ここで得られた草丈は10-15cm程度と考えると良く、低解像度(750m)のセンサーから草丈を導出する可能性を示した。

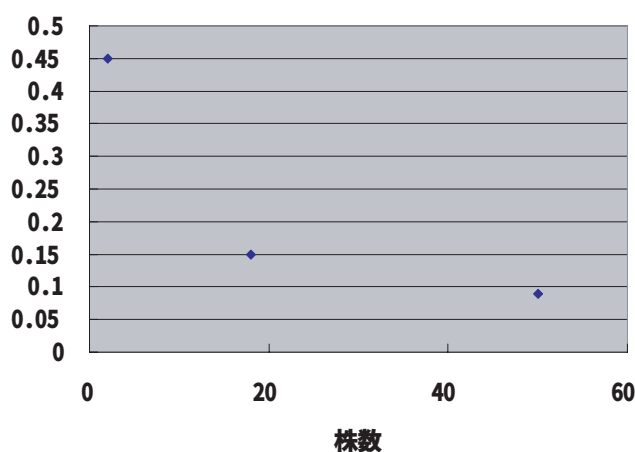


図5 草丈の解

2) 衛星による植生の3次元構造の把握

本研究では、2000年度の北米によるRCヘリコプター観測から得られた二方向性反射特性データから植生の二方向反射特性が太陽光に直交した方向で線形で変化することから、植物の3次元構造の特徴を示す指数として二方向性反射構造特性指数(BSI: Bi-directional Distribution Factor Structure Index)を提案した。提案した指数は衛星データから得られるもので次の式によって表すことができる。

$$BSI = (IRB - RB) / (IRN - RN)$$

IRB: 後方散乱による近赤外域反射

RB : 後方散乱による赤域反射

IRN: 鉛直方向の近赤外域反射

RN : 鉛直方向の赤域反射

このBSIは、一般的に植生モニタリングに利用される正規化植生指数(NDVI)が二次元的な植生の違いを表現するのに対し、3次元的な植生の違いを表現することができる。図6に示すようにNDVIではほとんど違いが分からない植生帯の違いをBSIが示すことができることが分かる。

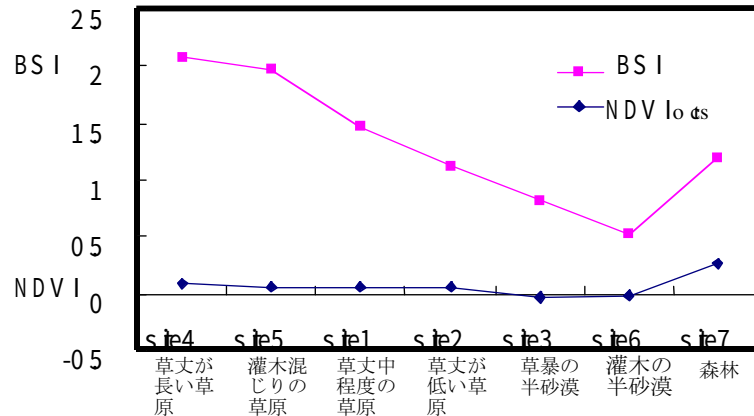


図6 BSIとNDVIの比較

3. 主な研究成果の発表(論文発表)

平成12年度は該当はありません。