

# 衛星リモートセンシングデータを用いた正規化植生，土壌，水指数の開発

## Development of normalized vegetation, soil and water indices derived from satellite remote sensing data

**Abstract:** Newly launched sensors such as Terra ASTER or Terra/Aqua MODIS have channels to cover short wave infrared (SWIR) which is sensitive or effective to detect water condition on the land surface. In this study, firstly, a set of normalized indices including normalized difference vegetation index (NDVI), normalized difference soil index (NDSI) and normalized difference water index (NDWI), collectively called NDXI, were newly introduced by extending the idea of NDVI using SWIR channels. Secondly, their behavior were investigated for a variety of eleven spectral signatures observed at the ground level. It was found that NDXI were highly correlated with the existence of vegetation, soil and water. Thirdly, the compatibility of typical optical sensors were evaluated using the spectral response of ASTER, AVHRR, ETM and MODIS. Finally the atmospheric effects were evaluated using radiative transfer simulation under a variety of aerosol, visibility, topography and sun-target-sensor geometry.

## 1 はじめに

### 1.1 研究の背景

正規化植生指数 (Normalized Difference Vegetation Index, 以下 NDVI) は植生の活性度を表す指標で，リモートセンシングにおいて最も広く用いられている指標である。NDVI の原理は単純で，植生の反射率は可視領域で低く，近赤外領域で大きいという性質を利用している (Tucker, 1979)。NDVI の特徴としては，1) 多数の衛星搭載光学センサにおいて利用できる，2) 指数の計算が容易である，3) NDVI は雲を常に低い値で見積もるため合成画像作成に使用できる，4) 比演算値を用いているために大気補正効果を期待できるなどが挙げられ，特に AVHRR や MODIS といった高時間分解能データを用いた時系列処理によく用いられている (Justice, 1998)。一方，近年打ち上げられた環境監視衛星に搭載されているセンサは，表 1 に示したように，Terra ASTER や Landsat ETM などの中空間分解能センサをはじめとして，NOAA AVHRR (NOAA15 号以降の昼間データ)，Terra/Aqua MODIS のような低空間分解能センサでも，従来の可視ならびに近赤外に加えて， $1.6\mu\text{m}$  を中心とする短波長赤外にも観測チャンネルを有している。

表 1 可視から短波長赤外における AVHRR, MODIS, ASTER, ETM のセンサ特性の比較.

チャンネル	AVHRR 波長幅 <sup>1</sup>	チャンネル	MODIS 波長幅	バンド	ASTER 波長幅	バンド	ETM 波長幅
1	580-680	1	620-670	2	630-690	3	630-690
2	725-1000	2	841-876	3	760-860	4	780-900
3A <sup>1</sup>	1580-1640	6	1628-1652	4	1600-1700	5	1550-1750

<sup>1</sup> 単位はナノメートル (nm).

<sup>2</sup> NOAA15 号以降に搭載されている AVHRR の昼間観測は 3A モードと呼ばれ，短波長赤外波長域を観測している。NOAA14 号以前および NOAA15 号以降の夜間観測は 3B モードと呼ばれ， $3.5\text{-}3.9\mu\text{m}$  波長域を観測している。

### 1.2 短波長赤外データの活用

短波長赤外は，地表面の水分条件を定量的に把握するために有効であることが次のように報告されている。Tucker (1980) は，TM のチャンネル 5 を用いることにより森林のキャノピーの水分状態を定量的に分析できることを示した。Cibula (1992) らは，植物の葉の水分条件を実験室レベルで検証し，短波長赤外が水分条件を把握するために有効であることを示した。Gao (1996) は，MODIS のチャンネル 2 ( $0.86\mu\text{m}$ ) とチャンネル 5 ( $1.24\mu\text{m}$ ) とを用いて NDWI を定義し，植生における水分状態を把握することができたと報告している。牧 (2003) らは，TM のチャンネル 4 と 7 を用いることにより，火災焼失域および程度を特定することができた

と報告している。このように、環境監視における短波長赤外の有効性が報告されているものの、まだまだ事例は少なく、センサの感度特性やデータ取得時期の違いについては、比較検討が行われていない。

一方で、湿原や水田に代表されるように、植生、土壌、水が重層的な構造を持つ領域を観測するためには、植生の活性度、水分条件といった複数の環境状態変数を同時に把握することが有効である(村上, 2001)。複数の環境状態を同時に把握する手法として、代表的なものにカテゴリ分解がある。これは、ある画素が複数の要素から構成されるときに、観測されるスペクトルからそれらの構成比を求める手法である。これを達成するためには、エンドメンバーと呼ばれる構成要素のピュアスペクトルが必要となる。しかし、エンドメンバーは地上での観測や目視による選択によってなされることが多く、その決定法が難しいことや(Bateson, 2000)、カテゴリ数の増大に対して計算が不安定になるなどの問題がある(Hall, 1995)。エンドメンバーの恣意性を排除するため、植生、土壌、水の基本要素を設定し、衛星データからそれらの構成比を算出する手法として VSW 指数があるが、可視近赤外のチャンネルしか用いることができない(山形, 1998)。これをより多波長のデータにも拡張できるように開発されたパターン展開法は、各バンドの値を全バンドに対する和が 1 となるように規格化し基本パターンとして使用するため、短波長赤外のデータを有効に活用できるが、画素内面積比率に相当するパターン展開係数を算出するためには、比較的煩雑な処理が必要である(Muramatsu, 2000)。従って、短波長赤外データを有効に活用するための汎用的な手法の開発が待ち望まれている。

### 1.3 研究の目的

本研究では、地表面を構成する最も基本的な要素である植生、土壌、水に着目し、可視短波長赤外でのスペクトルから植生、土壌、水の特性をパラメータ化することにより、正規化植生、土壌、水指数(Normalized vegetation, soil and water indices, まとめて NDXI と呼ぶ)を提案する。ここで、NDXI は、NDVI の考え方を可視赤外から短波長赤外へと拡張することにより定義した指数であり、NDVI が植生量の指数として有効であるように、NDSI と NDWI は、それぞれ土壌と水分に関する指数として提案するものである。次に、代表的な土地被覆カテゴリにおける NDXI の特性解析を行い、植生、土壌、水のグループに分類された土地被覆カテゴリと NDXI との関係性を調べる。次に、現在使用されている代表的な衛星搭載光学センサを対象に、センサの感度特性および空間分解能の違いに起因する NDXI の誤差評価を行う。最後に、放射伝達シミュレーションを用いて大気効果を検討し、NDXI の利用可能性に対して検討を行う。

## 2 正規化植生、土壌、水指数の導出

### 2.1 正規化植生、土壌、水指数の定義

正規化植生、土壌、水指数を定義するにあたり、陸域の代表的な土地被覆として、針葉樹、広葉樹、草地、コンクリート、砂、シルト、クレイ、ドライクレイ、アスファルト、水、雪の 11 種を選定した。これら 11 種のカテゴリを用いて、森林、農耕地、都市域、砂漠、雪氷、湖沼といった陸域の典型的な土地被覆をおおよそ表現できるものと考えた。11 種の土地被覆の分光反射率のうち、可視から短波長赤外(500nm-1800nm)の領域を図 1 に示した。横軸は波長を、縦軸は分光反射率をそれぞれ表している。分光反射率は、ASTER のスペクトルライブラリとしてオンラインで公開されているデータを使用した(JPL, 1998)。

図 1 に示された可視、近赤外、短波長赤外の 3 チャンネルの分光反射率は、スペクトルのおおよその形状に着目すると、表 2 に示したように、植生、土壌、水の 3 つのグループに大別することができる。それらは次のような特徴を持つ。1) 針葉樹、広葉樹、草地における分光反射率は、可視で最も小さく、近赤外で最大になり、短波長赤外でそれらの中間の値を持つ。波長を横軸、反射率を縦軸に取ったときに、スペクトルの形状が凸型となるこれらのカテゴリを植生のグループと呼ぶ。2) コンクリート、砂、シルト、クレイ、ドライクレイ、アスファルトにおける分光反射率は、可視で最も小さく、近赤外でそれよりも大きくなり、短波長赤外で最大値を持つ。スペクトルの形状が単調増加型となるこれらのカテゴリを土壌のグループと呼ぶ。3) 水および雪における分光反射率は、可視で最大値を持ち、近赤外でそれよりも小さく、短波長赤外で最小となる。スペクトルの形状が単調減少型となるこれらのカテゴリを水のグループと呼ぶ。

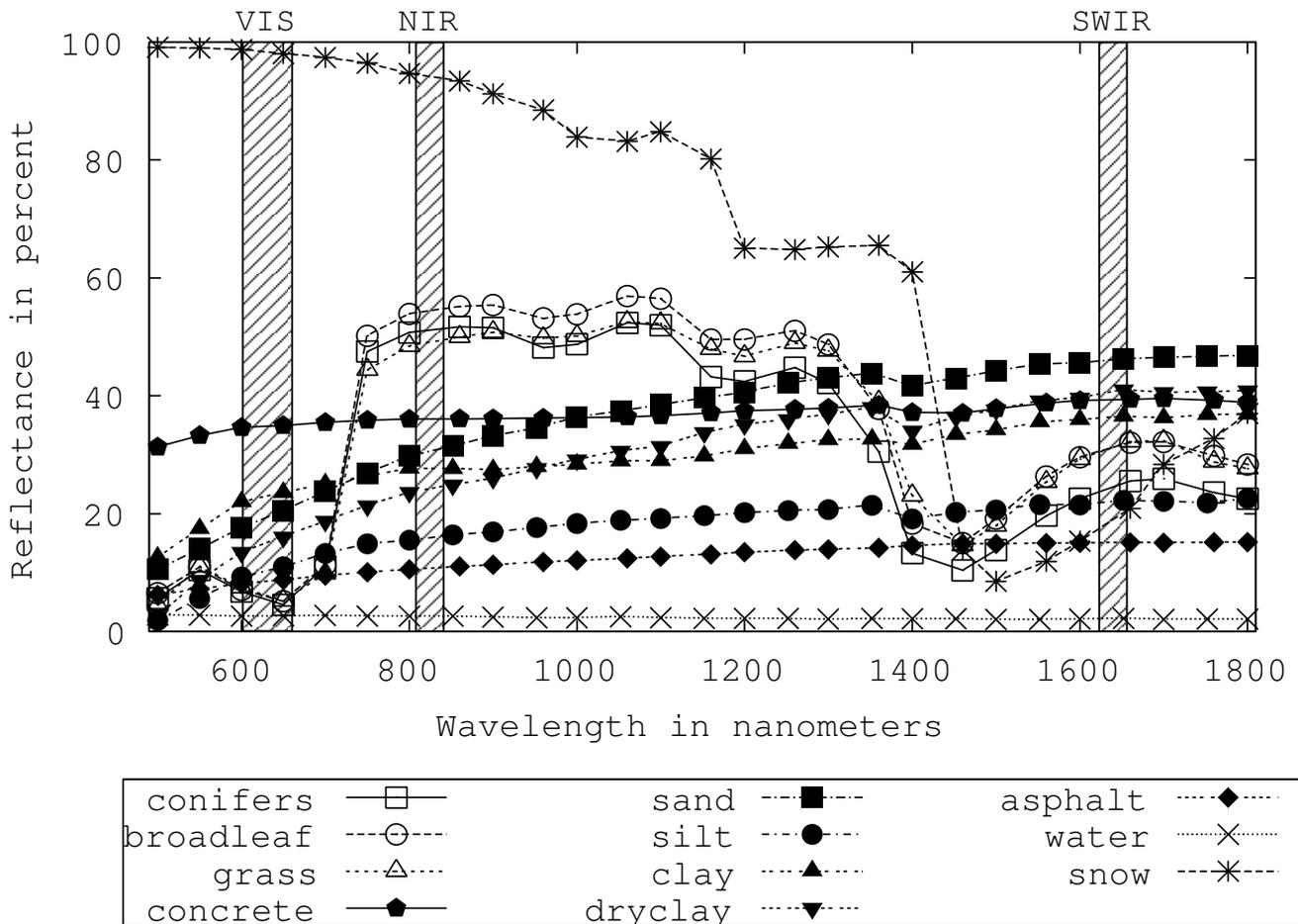


図 1 可視から短波長赤外における典型的な土地被覆の分光反射率. 横軸は波長を, 縦軸は分光反射率をそれぞれ表している. 図中の VIS, NIR, SWIR に示された領域は, MODIS のチャンネル 1, 2, 6 の観測幅をそれぞれ表している.

表 2 可視, 近赤外, 短波長赤外のスペクトル形状に着目した土地被覆カテゴリの植生, 土壌, 水グループへの分類表<sup>1</sup>.

グループ	スペクトル形状	可視	近赤外	短波長赤外	属するカテゴリ <sup>2</sup>
植生	凸型	小	大	中	CF, BL, GR
土壌	単調増加型	小	中	大	CC, SD, SL, CL, DC, AP
水	単調減少型	大	中	小	WT, SN

<sup>1</sup> 可視, 近赤外, 短波長赤外チャンネル観測値の相対的な大きさを大中小の3段階で表示している.

<sup>2</sup> 表中の土地被覆名は次の略称に従う. CF: 針葉樹, BL: 広葉樹, GR: 草地, CC: コンクリート, SD: 砂, SL: シルト, CL: クレイ, DC: ドライクレイ, AP: アスファルト, WT: 水, SN: 雪.

ここで, 植生, 土壌, 水の3グループそれぞれの分光反射率において, 最大値を持つチャンネルに着目する. 各チャンネルの反射率の差をそれらの和で正規化することで, 正規化植生指数 (NDVI), 正規化土壌指数 (NSI), 正規化水指数 (NDWI)(以下まとめて NDXI と呼ぶ) を式 1, 2, 3 のように定義する.

表 3 土地被覆<sup>1</sup>の分光反射率から算出した ASTER における NDXI の値.

	CF	BL	GR	CC	SD	SL	CL	DC	AP	WT	SN
NDVI	0.83	0.83	0.81	0.08	0.23	0.22	0.14	0.24	0.15	0.06	0.05
NDSI	-0.47	-0.40	-0.35	-0.11	0.06	0.01	-0.02	0.11	0.02	-0.26	-0.72
NDWI	-0.60	-0.64	-0.65	0.03	-0.29	-0.23	-0.12	-0.34	-0.17	0.20	0.69

<sup>1</sup> 表中の土地被覆名は次の略称に従う。CF: 針葉樹, BL: 広葉樹, GR: 草地, CC: コンクリート, SD: 砂, SL: シルト, CL: クレイ, DC: ドライクレイ, AP: アスファルト, WT: 水, SN: 雪

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR}-\text{VIS}}{\text{NIR}+\text{VIS}} \quad (1)$$

$$\text{NDSI} = \frac{\text{SWIR}-\text{NIR}}{\text{SWIR}+\text{NIR}} \quad (2)$$

$$\text{NDWI} = \frac{\text{VIS}-\text{SWIR}}{\text{VIS}+\text{SWIR}} \quad (3)$$

ここで、VIS は可視の反射率、NIR は近赤外の反射率、SWIR は短波長赤外の反射率である。NDXI は、NDVI の考え方を可視、近赤外から短波長赤外へと拡張することにより定義した指数であり、各指数は、VIS、NIR、SWIR の 3 変数の対称式となっている。NDVI が植生量の指数として有効であるように、NDSI と NDWI はそれぞれ土壌と水分に関する指数として提案するものである。VIS、NIR、SWIR の値  $\bar{\sigma}$  は、式 4 に示すように、各センサの応答関数  $\Phi(\lambda)$  と対象物の反射率  $\sigma(\lambda)$  とを掛け合わせ、波長  $\lambda$  の関数として積分することにより求めることができる。なお、 $\lambda_1, \lambda_2$  は、それぞれセンサ応答関数の上下端の波長を表している。

$$\bar{\sigma} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda)\sigma(\lambda)d\lambda \quad (4)$$

## 2.2 正規化植生、土壌、水指数の特性解析

次に、土地被覆ごとに NDXI の値を算出し、各指数が植生、土壌、水に関する指標として妥当であるかを検討した。まず、AVHRR(NOAA, 1999)、MODIS(MCST, 2000)、ASTER(JPL, 2001)、ETM(GSFC, 1999) の応答関数をそれぞれ入手し、線形内挿補間により 11 の土地被覆の分光反射率のサンプリング間隔と同じになるように合わせた。次に、式 (4) に従って VIS、NIR、SWIR の反射率をセンサごとに算出した。最後に、式 (1)、(2)、(3) に従い NDXI の値を算出した。センサの感度特性については後述するが、どのセンサについて算出した値も類似した結果が得られたので、ここでは代表して ASTER による算出結果を表 3 に示した。これらの特徴は、次のようにまとめることができる。

### 2.2.1 NDVI

植生のグループにおいては 0.81 から 0.83、土壌のグループにおいては 0.08 から 0.24、水のグループにおいては 0.05 から 0.06 の値を持つ。NDVI は、植生のグループにおいて卓越して高い正の値を与えたことから、地表面における植生の存在と深い関連があると考えられる。

### 2.2.2 NDSI

植生のグループにおいては -0.47 から -0.35、土壌のグループにおいては -0.11 から 0.11、水のグループにおいては -0.26 から -0.72 の値を持つ。NDSI は、土壌のグループにおいてほかのグループよりも高い値を値を与えたことから、地表面における土壌の存在と深い関連があると考えられる。

### 2.2.3 NDWI

植生のグループにおいては-0.65から-0.60、土壌のグループにおいては-0.34から0.03、水のグループにおいては0.20から0.69の値を持つ。NDWIは、水のグループにおいてのみ正の値を与えたことから、地表面における水の存在と深い関連があると考えられる。

以上から、NDVIが植生量の指数として有効であるように、NDSIとNDWIはそれぞれ土壌と水分に関する指数として有効であると考えられる。

## 3 正規化植生，土壌，水指数の利用に関する検討

### 3.1 センサ感度の違いがNDXIに及ぼす影響の評価

表1に示したように、AVHRR, MODIS, ASTER, ETMの各センサは、対応するチャンネルを有するものの、センサの応答関数は互いに異なる。従って、対応するチャンネルにおいて観測された分光反射率であっても、センサが異なればそれに起因するばらつきが生じると考えられる。そこで、センサの応答関数と土地被覆の分光反射率とを用いて、各センサで計測される分光反射率およびNDXIの理論値を算出し、センサ感度の違いに起因する差分の算出および評価を行った。

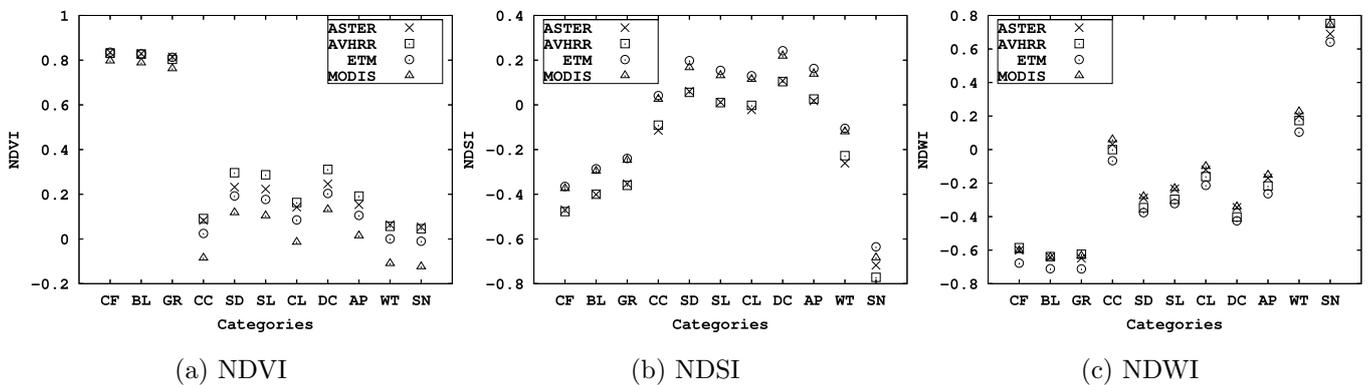


図 2 土地被覆ごとのNDXI値のセンサの違いによる比較。横軸は土地被覆カテゴリを、縦軸はNDXIの値をそれぞれ表している。

土地被覆の分光反射率から算出したNDXIの値をセンサごとに比較して図2に示した。センサ感度の違いに起因するNDXIばらつきは、植生，土壌，水のグループごとに次のように評価することができる。

#### 3.1.1 NDVI

センサ感度の違いに起因する差異は、植生のグループにおいてはおよそ0.04、それ以外のグループにおいてはおよそ0.2であり、植生のグループにおけるセンサ感度の影響は相対的に小さかった。植生のグループ(CF, BL, GR)においては、ETMにおけるNDVIの値が最も大きく、AVHRR, ASTER, MODISの順に小さかった。土壌のグループ(CC, SD, SL, CL, DC, AP)においては、AVHRRにおけるNDVIの値が最も大きく、ASTER, ETM, MODISの順に小さかった。水のグループ(WT, SN)においては、ASTERにおけるNDVIの値が最も大きく、AVHRR, ETM, MODISの順に小さかった。CC, WT, SNのカテゴリにおいては、センサによってNDVI値の正負が逆転するカテゴリが存在した。

### 3.1.2 NDSI

センサ感度の違いに起因する差異は、どのグループにおいてもおよそ0.2であった。SN以外のカテゴリにおいては、ETMとMODISにおけるNDSIの値がほぼ同じ値であり、全センサの中では最大であった。AVHRRとASTERにおけるNDSIの値は、ほぼ同じ値でETMとMODISのそれよりも低かった。SNにおいては、ETMにおけるNDSIの値が最も大きく、MODIS、ASTER、AVHRRの順に小さかった。

### 3.1.3 NDWI

センサ感度の違いに起因する差異は、どのグループにおいてもおよそ0.1であった。植生のグループにおいては、AVHRR、ASTER、MODISにおけるNDWIの値はほぼ同じで、ETMはそれらよりも小さかった。土壌のグループおよびWTにおいては、MODISにおけるNDWIの値が最も大きく、ASTER、AVHRR、ETMの順に小さかった。SNにおいては、AVHRRにおけるNDWIの値が最も大きく、MODIS、ASTER、ETMの順に小さかった。

## 3.2 衛星の実測値によるNDXIの評価

### 3.2.1 衛星データの前処理

次に、衛星の実測値を用いてNDXIの特性評価を行った。使用したデータは2001年6月4日11時49分(日本時間)に撮影されたMODISとASTERデータである。MODISデータはシステム情報を用いて放射量補正を行い放射輝度( $W/m^2/\mu m/str$ )に変換し、等緯度経度座標系に幾何補正を行った。ASTERデータも同様にしてシステム情報を用いて放射量補正および幾何補正を行った。次に、正規化植生指数(NDVI)画像を用いて、ASTER画像とMODIS画像との間でパターンマッチングを行い、両者の相関が最も高くなる位置を決定した。その結果、位置合わせ誤差は、ASTERの画素数で東西方向に14画素、南北方向に17画素、北西方向に見られたので、オフセット補正を行い、MODISデータと重ね合わせた。ASTERから求めたNDXI画像を図3に示した。植生、土壌、水の各グループに属する土地被覆の種類が豊富になるように、東京湾を中心とするおよそ40x40km四方を切り出して解析範囲とした。なお、特に大気補正を行っていないが、取得された画像は目視によって快晴と判断でき、同時に取得されているため大気条件は同じであるものと考えられる。

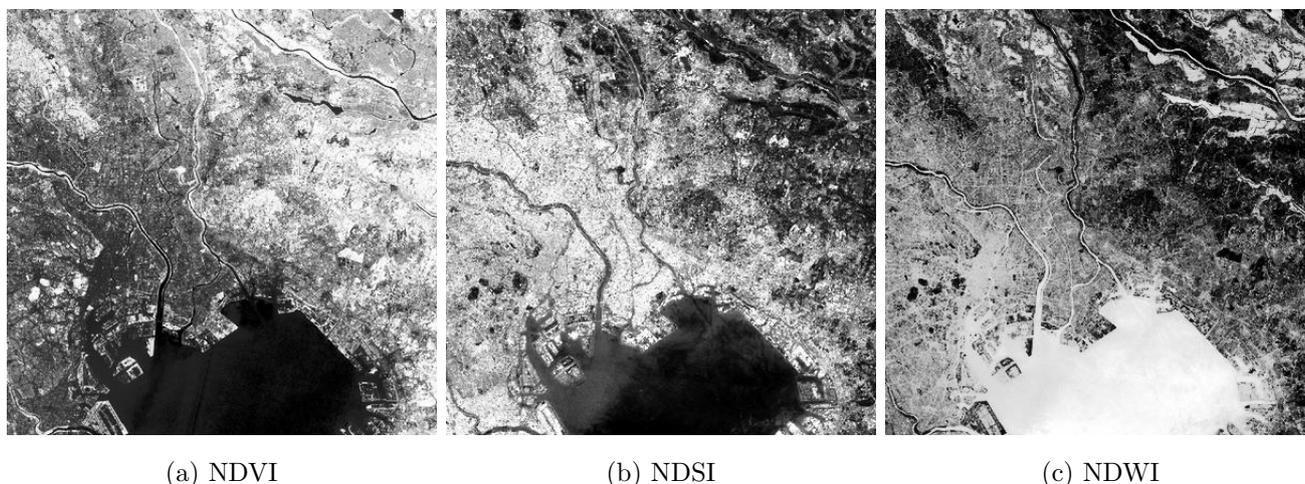


図3 2001年6月4日10時49分(日本時間)に撮影されたASTERデータから求めたNDXI画像。表示された解析範囲は東京湾を中心とするおよそ40x40km四方である。

### 3.2.2 MODIS と ASTER による比較

ASTER と MODIS の空間分解能はそれぞれ 30m と 500m であるから、ASTER の 16x16 画素が MODIS の 1 画素に対応する。そこで、ASTER の NDXI 画像において、16x16 画素領域における相加平均を画像全体にわたって算出し、これを空間的に平均化された代表値とみなし、MODIS の解像度に相当する NDXI 画像とした。これと MODIS の NDXI 画像とを比較することにより、NDXI における MODIS と ASTER との対応関係を調べた。図 4 は、MODIS データと ASTER データから求めた NDXI 値を解析範囲全体にわたって表示したグラフであり、(a) は NDVI、(b) は NDSI、(c) は NDWI の結果をそれぞれ表している。各図とも横軸は MODIS から求めた値を、縦軸は ASTER から求めた値をそれぞれ表している。

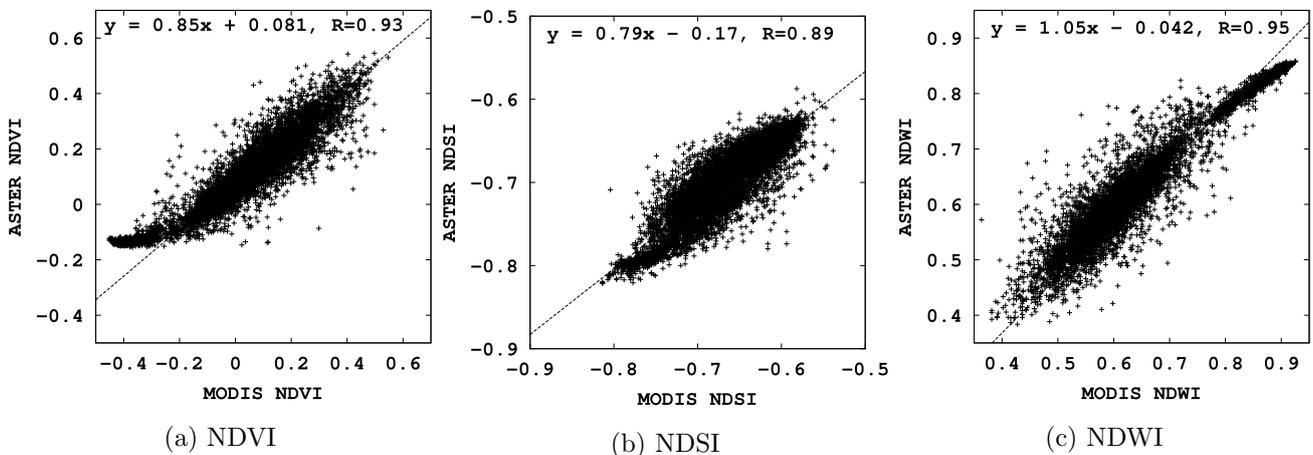


図 4 2001 年 6 月 4 日 10 時 49 分 (日本時間) に撮影された MODIS データと ASTER データから求めた NDXI 値の比較。各図とも横軸は MODIS から求めた値を、縦軸は ASTER から求めた値をそれぞれ表している。

図 4 によると、MODIS と ASTER から算出した NDXI の各指数は、ほぼ正の相関を有することがわかる。ただし、図 4(a) において、横軸の値が -0.4 から -0.2 の付近において線形性が保たれていない領域が見られる。これは、主に濁りのない水域に属している部分であった。このように、NDVI が負の値を有する領域では、異なるセンサ間で NDVI を比較する際には注意を要する。次に、各指数におけるセンサ間の関係を一次式を用いて回帰した結果、式 (5)、(6)、(7) に示す近似直線と相関係数 R が得られた。各指数における相関係数は、NDVI が 0.93、NDSI が 0.89、NDWI が 0.95 であった。従って、MODIS と ASTER から求めた NDXI の値は、各指数ともに高い相関を有し正の線形関係にあることが示された。

$$\text{NDVI}_{\text{ASTER}} = 0.85 \text{NDVI}_{\text{MODIS}} + 0.081, \quad R = 0.93 \quad (5)$$

$$\text{NDSI}_{\text{ASTER}} = 0.79 \text{NDSI}_{\text{MODIS}} - 0.170, \quad R = 0.89 \quad (6)$$

$$\text{NDWI}_{\text{ASTER}} = 1.05 \text{NDWI}_{\text{MODIS}} - 0.042, \quad R = 0.95 \quad (7)$$

MODIS と ASTER との間には、NDXI の値には高い線形性が認められるものの、ばらつきも見られた。そこで、全画素について各指数のセンサ間における差分を求め、画像全体にわたってそれらの平均値を算出した。その結果、NDVI においては MODIS と比べて ASTER がおよそ 0.08 大きめに、NDSI においては MODIS と比べて ASTER がおよそ 0.03 小さめに、NDWI においては MODIS と比べて ASTER がおよそ 0.01 小さめに算出された。ところで、図 2 に示したスペクトルライブラリを用いたシミュレーションの結果によると、MODIS と ASTER から求めた NDXI 値にはセンサ感度の違いに起因するばらつきが生じ、次に示すような傾向が見られた。NDVI においては MODIS と比べて ASTER がおよそ 0.13 大きめに、NDSI においては MODIS と比べて ASTER がおよそ 0.12 小さめに、NDWI においては MODIS と比べて ASTER がおよそ 0.01 小さめに算出

された。以上の結果から、センサの感度特性の違いから生じる NDXI 値の偏りの傾向とばらつきの大きさは、シミュレーションによる結果と実際の衛星観測による結果との間で整合性を持つと考えることができる。

### 3.3 放射伝達シミュレーションによる大気効果の評価

#### 3.3.1 入力条件

次に、種々の観測条件を想定して大気効果を算出し、これが NDXI に及ぼす影響を評価した。光学センサで観測された衛星データは、大気効果を避けることができないため、詳細な解析を行うためには適切な処理が必要である。大気効果は、大気モデル、エアロゾルモデル、太陽-観測点-センサの相対的な位置関係、標高などで大きく変動する。特に、広域観測センサである AVHRR や MODIS は視野角が広いので、直下点から離れた大きな観測角で観測されたデータの場合には、地上に到達するまでの光路が長く、相対的に大気の影響を大きく受けることが知られている。ここでは、衛星の可視、赤外の放射伝達過程を解析するプログラムとして開発された 6S コードを用い (Vermote, 1997)、放射伝達シミュレーションによって MODIS の NDXI における大気効果の評価を行った。

6S コードに必要な入力変数は、1) 観測日時、2) 太陽天頂角、方位角、3) 衛星天頂角、方位角、4) センサの種類、5) 大気の光学的厚さ (視程)、6) 大気モデル、7) エアロゾルモデル、8) 対象物の標高、9) 衛星上での見かけの反射率、の 9 点である。各変数への入力値を表 4 にまとめて示した。なお、6S コードは二方向性反射関数を与えることにより、複数のモデルをシミュレートすることができるが、本研究ではそれを考慮せず、地表面は均一なランベルト面であるという条件の下で計算を行った。

表 4 6S コードを用いた放射伝達シミュレーションに必要な入力変数の一覧。

項目	変数
日時	6月4日午前11時(日本標準時) <sup>1</sup>
太陽天頂角, 方位角	14.85度, 144.91度 <sup>2</sup>
衛星天頂角, 方位角	0度から50度まで5度間隔, 180度に固定
センサーの種類	MODISのチャンネル1, 2, 6
視程	0から50kmまで5km間隔
大気モデル	中緯度夏型
エアロゾルモデル	大陸型, 海洋型, 都市型
標高	0から10kmまで1km間隔
見かけの反射率	0

<sup>1</sup> Terra 衛星が飛来する時間であり太陽天頂角が最大に近い時期

<sup>2</sup> 東大生研における緯度経度 (北緯 35.65 度, 東経 139.67 度) から算出した値

#### 3.3.2 エアロゾルを変化させた場合

まず、視程を 25km、標高を 0m としてエアロゾルモデルを大陸型、海洋型、都市型に変化させ、それぞれについて NDXI の値を衛星天頂角の関数として算出した。図 5, 6, 7 は、各エアロゾルモデルのもとでの NDVI, NDSI, NDWI の衛星天頂角に対する依存性を示しており、横軸は衛星天頂角を、縦軸は衛星上での見かけの反射率と地表面での反射率との差をそれぞれ表している。なお、衛星進行方向に対して右側 (太陽の位置する側) が衛星天頂角の正の方向であるとした。

どの土地被覆カテゴリにおいても、グラフの形状はほぼ相似形をなしており、衛星天頂角が 20 度付近において衛星上での NDXI 値と地表面での NDXI 値との差が小さかった。これは、相対的に大気の影響が小さかったことを意味している。また、波長が長くなるにつれ、衛星上でのみかけの反射率と地表面での値との差異が小さく、相対的に大気の影響が小さくなる傾向が見られた。その結果、NDXI において次に述べるような大気

効果が確認された。植生のグループでは、衛星上での見かけのNDVIの値は、地表面での値と比べて0.07から0.2小さかった。これは、VISの衛星上での見かけの反射率と地表面の値との差異がNIRのそれよりも相対的に大きかったためであると考えられる。土壌のグループでは、都市型エアロゾルモデルにおいてNDSIの衛星上での見かけの値がおよそ0.02大きかった以外は、地表面での値と比べて0.01から0.07程度小さかった。これは、NIRの衛星上での見かけの反射率と地表面の値との差異がMIRのそれよりも相対的に大きかったためであると考えられる。水のグループにおいては、どのエアロゾルモデルにおいてもNDWIの衛星上での見かけの値は、地表面での値に比べて0.02程度大きかった。これは、MIRの衛星上での見かけの反射率と地表面の値との差異がVISのそれよりも相対的に小さかったためであると考えられる。

### 3.3.3 標高を変化させた場合

次に、視程を25km、エアロゾルモデルを大陸型、衛星天頂角を0度に固定し、標高を0から10kmまで変化させたときのNDXIの値を標高の関数として算出した。図8は、NDXIの標高に対する依存性を示しており、横軸は対象物の標高を、縦軸は衛星上での見かけのNDXIの値と地表面でのNDXIの値との差をそれぞれ表している。

すべての指数において、標高が上昇するにつれてNDXIの見かけの値と地表面の値との差は小さくなった。これは、標高が高くなるにつれて対象物からセンサに到達するまでの光路長が短くなり、相対的に大気効果が小さくなったためであると考えられる。NDVIとNDSIにおいては、大気効果は衛星上での見かけの値を減少させる効果を持ち、NDWIにおいては増大させる効果を持つことが確認された。その影響はNDVI値の高い植生において最も顕著であった。

### 3.3.4 視程を変化させた場合

次に、標高を0m、エアロゾルモデルを大陸型、衛星天頂角を0度、標高を0mに固定して、視程を1kmから50kmまで変化させたときに、NDXIの値を視程の関数として算出した。図9は、NDXIの視程に対する依存性を示しており、横軸は天空方向の視程を、縦軸は衛星上での見かけのNDXIの値と地表面でのNDXIの値との差をそれぞれ表している。

すべての指数において、視程が大きくなるにつれてNDXIの衛星上での見かけの値と地表面の値との差は小さくなった。大気効果は衛星上での見かけの値を減少させる効果を持ち、NDWIにおいては増大させる効果を持つ。どのカテゴリにおいても視程が0kmから25kmまでは、大気効果は衛星上でのみかけの値に大きく影響を与えたが、視程が25km以上になると大気効果の大きさはほとんど変化しなかった。

## 4 まとめ

本研究では、地表面を構成する最も基本的な要素である植生、土壌、水に着目し、可視から短波長赤外でのスペクトルから植生、土壌、水の特徴をパラメータ化することにより、正規化植生、土壌、水指数(Normalized vegetation, soil and water indices, まとめてNDXIと呼ぶ)を提案した。次に、衛星搭載の光学センサを対象に、センサの感度特性、空間分解能、大気効果について検討を加え、NDXIの利用可能性を検討した。本研究で得られた成果は、次のようにまとめることができる。

- 代表的な土地被覆カテゴリの分光反射率は、可視、近赤外、短波長赤外の反射率に着目すると、その形状により植生、土壌、水の3種類に大別することができる。
- 可視、近赤外、短波長赤外のスペクトルを用いて定義したNDVI、NDSI、NDWIは、それぞれ植生、土壌、水の存在に関する指標として有効である。
- NDVIにおいてセンサの違いに起因する誤差は、土壌および水のグループにおいて植生よりも大きく、最大でおよそ0.2である。
- NDSIにおいてセンサの違いに起因する誤差は、土壌のグループにおいて大きく、最大でおよそ0.2である。

- NDWIにおいてセンサの違いに起因する誤差は、どのグループにおいても大差なく、最大でおよそ0.1である。
- 衛星による実測値を用いてNDXIを評価した結果、異なるセンサから求めた各指数の間には強い一次線形関係が見られる。
- NDVIおよびNDSIの衛星上での見かけの値は、大気効果によって地表面での値よりも小さくなる。
- NDWIの衛星上での見かけの値は、大気効果によって地表面での値よりも大きくなる。

NDXIは、植生、土壌、水の特徴を表す指標として有効であり、地表面における植生、土壌、水の特徴を同時に把握することができる。使用にあたっては、センサの違い、大気効果、観測の幾何学的条件によって誤差が生じることに注意する必要がある。今後は、NDXIを使用した森林、都市、農耕地、湿地をはじめとする様々な土地被覆における観測手法の開発に取り組む予定である。

## 謝辞

本研究は、計算科学技術活用型特定研究開発推進事業「環境・災害監視のためのアジア衛星観測ネットワークの構築」プロジェクトの一環として実施したものである。関係各位に感謝の意を表す。また、本研究で使用したASTERデータは、(財)資源・環境観測解析センター(ERSDAC)より提供していただいた。ここに深謝する。

## 参考文献

- Bateson, C. A., et al., 2000. Endmember bundles: a new approach to incorporating endmember variability into spectral mixture analysis. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 38(2), 1083-1094.
- Cibula, W. G., et al., 1992. Response of thematic bands to plant water stress. *Int. J. Remote Sens.*, 31, 1869-1880.
- Gao, B. C., 1996. NDWI - A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote Sens. Environ.*, 58, 257-266.
- GSFC/NASA, 1999. Landsat 7 Science Data Users Handbook, <http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/> (accessed 30 June 2004).
- Hall, F. G., et al., 1995. Remote sensing of forest biophysical structure using mixture decomposition and geometric reflectance models. *Ecological Applications*, 5(4), 993-1013.
- JPL/NASA, 1998. ASTER Spectral Library, <http://speclib.jpl.nasa.gov/> (accessed 30 June 2004).
- JPL/NASA, 2001. ASTER web, <http://asterweb.jpl.nasa.gov/> (accessed 30 June 2004).
- Justice, C. O., et al., 1998. The Moderate Resolution Imaging spectroradiometer MODIS: Land Remote Sensing for Global Change Research. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, 1228-1249, 364.
- 牧 雅康, 田村正行, 2003. Landsat/TM データを用いた焼失域の特定及び被災程度の分類に有効な波長帯の検討と適用. 日本リモートセンシング学会誌, 23(1), 21-30.
- MCST, 2000. MODIS Characterization Support Team, <http://www.mcst.ssai.biz/mcstweb/> (accessed 30 June 2004).
- 村上拓彦, 斎藤元也, 小川進, 石塚直樹, 2001. VSW 指数を応用した水稲作付面積推定. 日本リモートセンシング学会誌, 21, 330-341.

Muramatsu, et al., 2000. Pattern decomposition method in the albedo space for Landsat TM and MSS data analysis. *Int. J. Remote Sens.*, 21, 99-119.

NOAA, 1999. NOAA KML Users Guide, <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/k1m/> (accessed 30 June 2004).

Tucker, C. J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, 8,127-150.

Tucker, C. J., 1980. Remote sensing of leaf water content in the near-infrared. *Remote Sens. Environ.*, 10, 23-32.

山形与志樹, 杉田幹夫, 安岡善文, 1997. 植生・土壌・水・VSW 指数アルゴリズムの開発とその応用. リモートセンシング学会誌, 171, 54-63.

Vermote, E. F., et al., 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum: an overview. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 35, 675-686.

# 目次

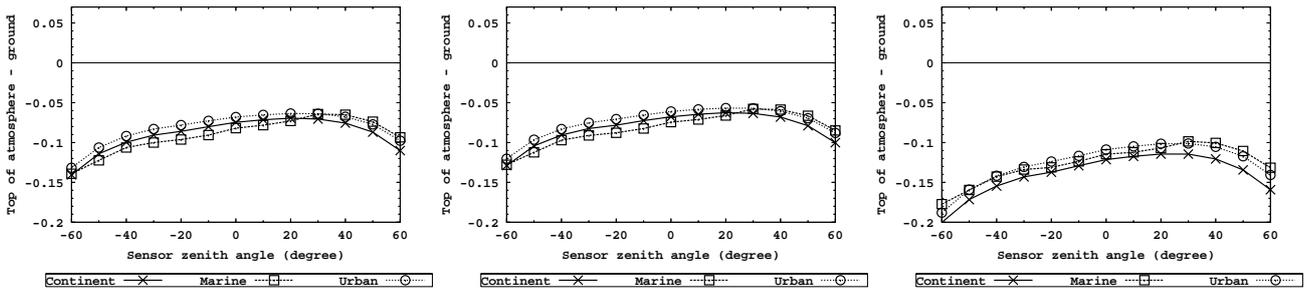
<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	研究の背景	1
1.2	短波長赤外データの活用	1
1.3	研究の目的	2
<b>2</b>	<b>正規化植生，土壌，水指数の導出</b>	<b>2</b>
2.1	正規化植生，土壌，水指数の定義	2
2.2	正規化植生，土壌，水指数の特性解析	4
2.2.1	NDVI	4
2.2.2	NDSI	4
2.2.3	NDWI	5
<b>3</b>	<b>正規化植生，土壌，水指数の利用に関する検討</b>	<b>5</b>
3.1	センサ感度の違いがNDXIに及ぼす影響の評価	5
3.1.1	NDVI	5
3.1.2	NDSI	6
3.1.3	NDWI	6
3.2	衛星の実測値によるNDXIの評価	6
3.2.1	衛星データの前処理	6
3.2.2	MODISとASTERによる比較	7
3.3	放射伝達シミュレーションによる大気効果の評価	8
3.3.1	入力条件	8
3.3.2	エアロゾルを変化させた場合	8
3.3.3	標高を変化させた場合	9
3.3.4	視程を変化させた場合	9
<b>4</b>	<b>まとめ</b>	<b>9</b>

## 目 次

1	可視から短波長赤外における典型的な土地被覆の分光反射率. 横軸は波長を, 縦軸は分光反射率をそれぞれ表している. 図中の VIS, NIR, SWIR に示された領域は, MODIS のチャンネル 1, 2, 6 の観測幅をそれぞれ表している. . . . .	3
2	土地被覆ごとの NDXI 値のセンサの違いによる比較. 横軸は土地被覆カテゴリを, 縦軸は NDXI の値をそれぞれ表している. . . . .	5
3	2001 年 6 月 4 日 10 時 49 分 (日本時間) に撮影された ASTER データから求めた NDXI 画像. 表示された解析範囲は東京湾を中心とするおよそ 40x40km 四方である. . . . .	6
4	2001 年 6 月 4 日 10 時 49 分 (日本時間) に撮影された MODIS データと ASTER データから求めた NDXI 値の比較. 各図とも横軸は MODIS から求めた値を, 縦軸は ASTER から求めた値をそれぞれ表している. . . . .	7
5	各エアロゾルモデルのもとでの NDVI の衛星天頂角に対する依存性. 横軸は衛星天頂角を, 縦軸は衛星上での見かけの NDVI の値と地表面での NDVI の値との差をそれぞれ表している. . .	15
6	各エアロゾルモデルのもとでの NDSI の衛星天頂角に対する依存性. 横軸は衛星天頂角を, 縦軸は衛星上での見かけの NDSI の値と地表面での NDSI の値との差をそれぞれ表している. . .	16
7	各エアロゾルモデルのもとでの NDWI の衛星天頂角に対する依存性. 横軸は衛星天頂角を, 縦軸は衛星上での見かけの NDWI の値と地表面での NDWI の値との差をそれぞれ表している. . .	17
8	大陸型エアロゾルモデルのもとでの NDXI の標高に対する依存性. 横軸は対象物の標高を, 縦軸は衛星上での見かけの NDXI の値と地表面での NDXI の値との差をそれぞれ表している. . .	18
9	大陸型エアロゾルモデルのもとでの NDXI の視程に対する依存性. 横軸は天空方向の視程を, 縦軸は衛星上での見かけの NDXI の値と地表面での NDXI の値との差をそれぞれ表している. . .	19

# 表目次

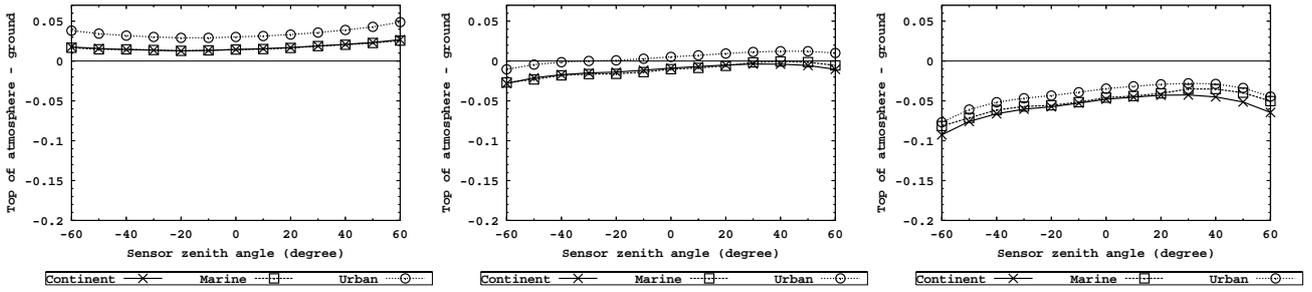
1	可視から短波長赤外における AVHRR, MODIS, ASTER, ETM のセンサ特性の比較. . . . .	1
2	可視, 近赤外, 短波長赤外のスペクトル形状に着目した土地被覆カテゴリの植生, 土壌, 水グループへの分類表. . . . .	3
3	土地被覆の分光反射率から算出した ASTER における NDXI の値. . . . .	4
4	6S コードを用いた放射伝達シミュレーションに必要な入力変数の一覧. . . . .	8



(a) Conifers

(b) Broadleaf

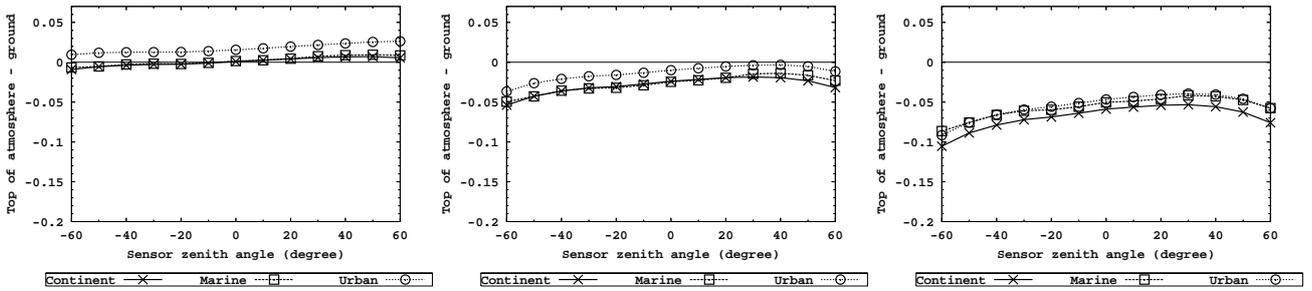
(c) Grass



(d) Concrete

(e) Sand

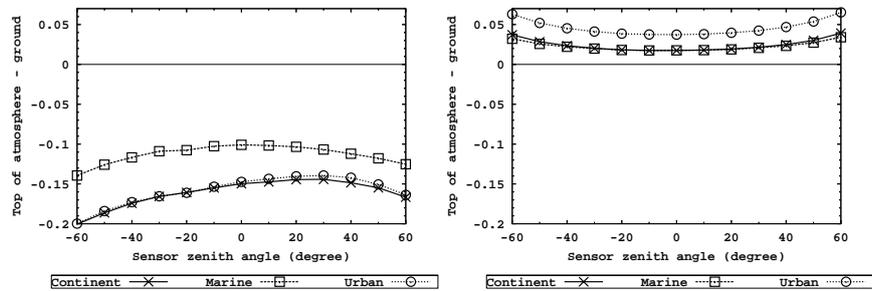
(f) Silt



(g) Clay

(h) Dryclay

(i) Asphalt



(j) Water

(k) Snow

図 5 各エアロゾルモデルのもとでの NDVI の衛星天頂角に対する依存性。横軸は衛星天頂角を、縦軸は衛星上での見かけの NDVI の値と地表面での NDVI の値との差をそれぞれ表している。

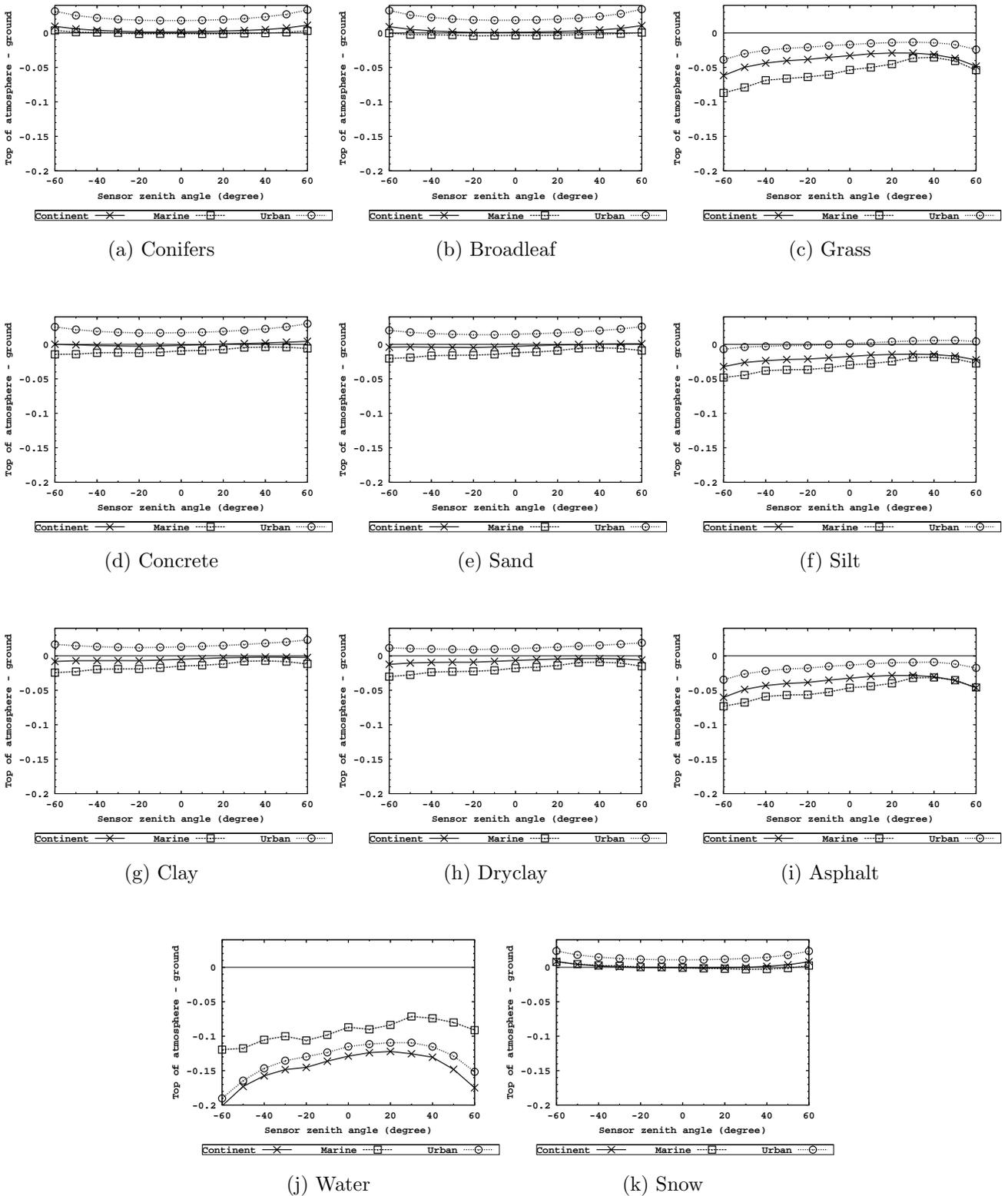
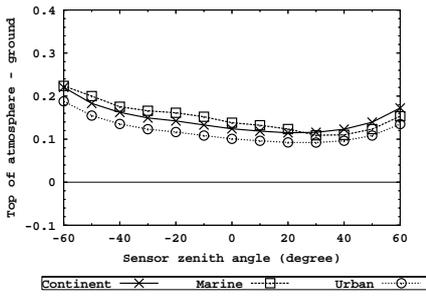
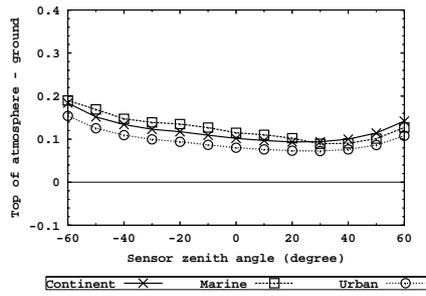


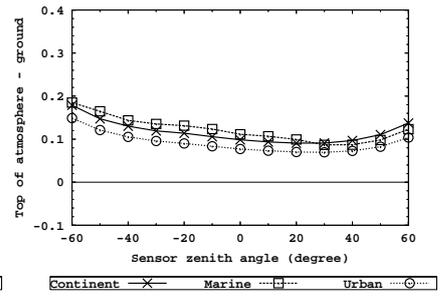
図 6 各エアロゾルモデルのもとでの NDSI の衛星天頂角に対する依存性。横軸は衛星天頂角を、縦軸は衛星上での見かけの NDSI の値と地表面での NDSI の値との差をそれぞれ表している。



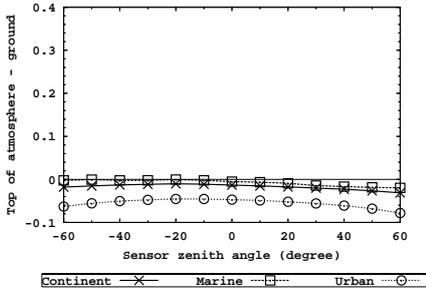
(a) Conifers



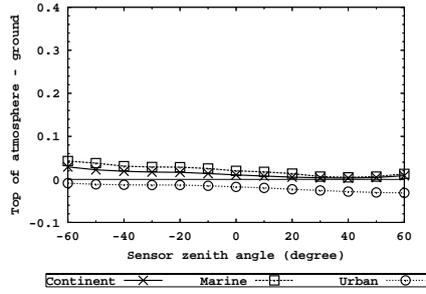
(b) Broadleaf



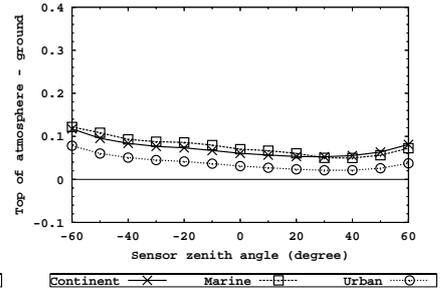
(c) Grass



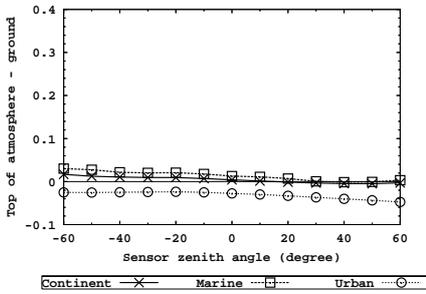
(d) Concrete



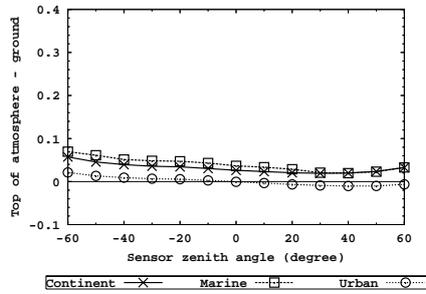
(e) Sand



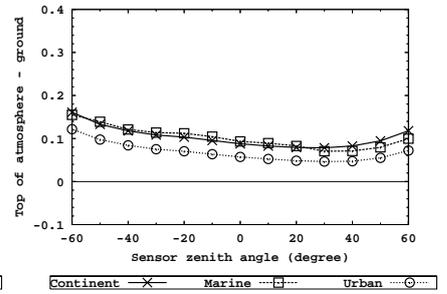
(f) Silt



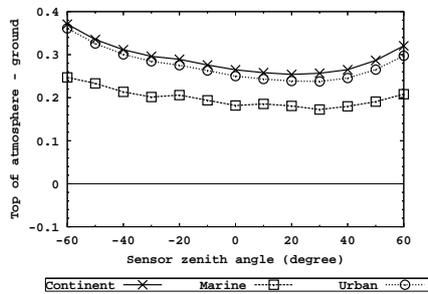
(g) Clay



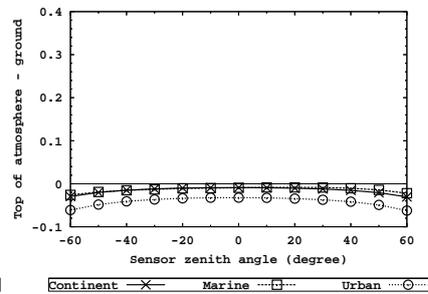
(h) Dryclay



(i) Asphalt

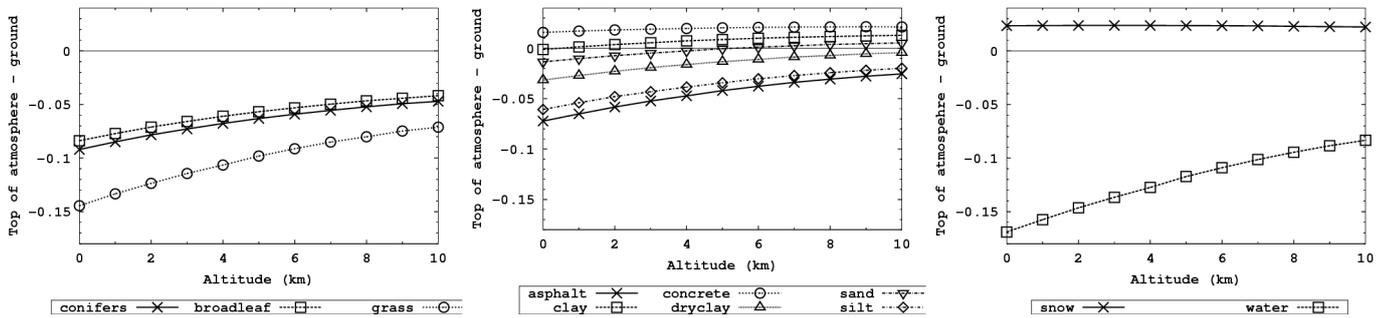


(j) Water

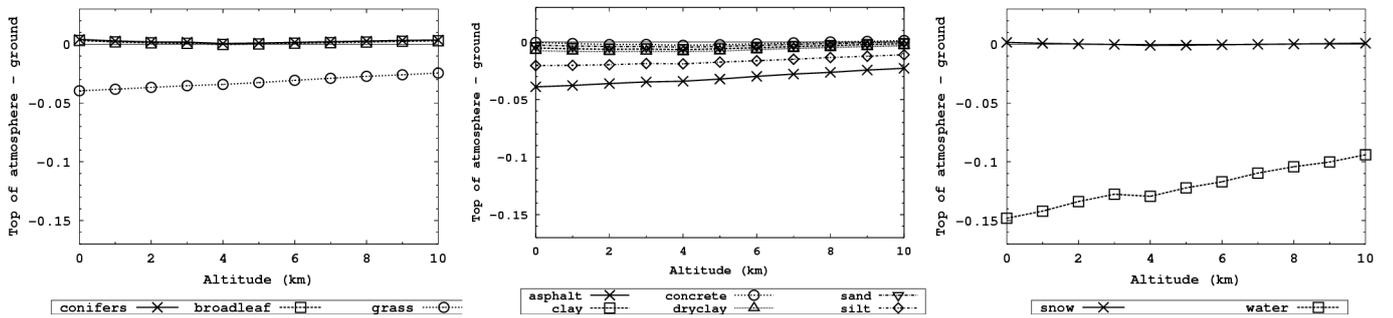


(k) Snow

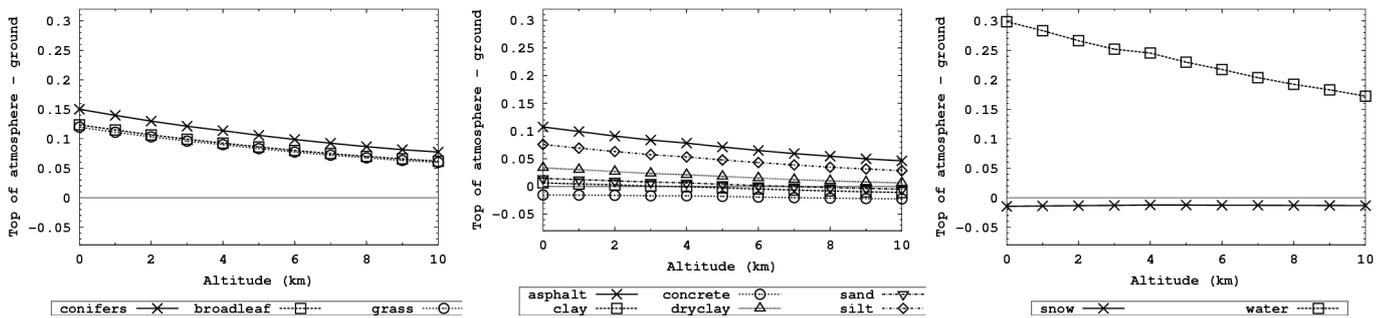
図 7 各エアロゾルモデルのもとでのNDWIの衛星天頂角に対する依存性。横軸は衛星天頂角を、縦軸は衛星上での見かけのNDWIの値と地表面でのNDWIの値との差をそれぞれ表している。



(a) NDVI

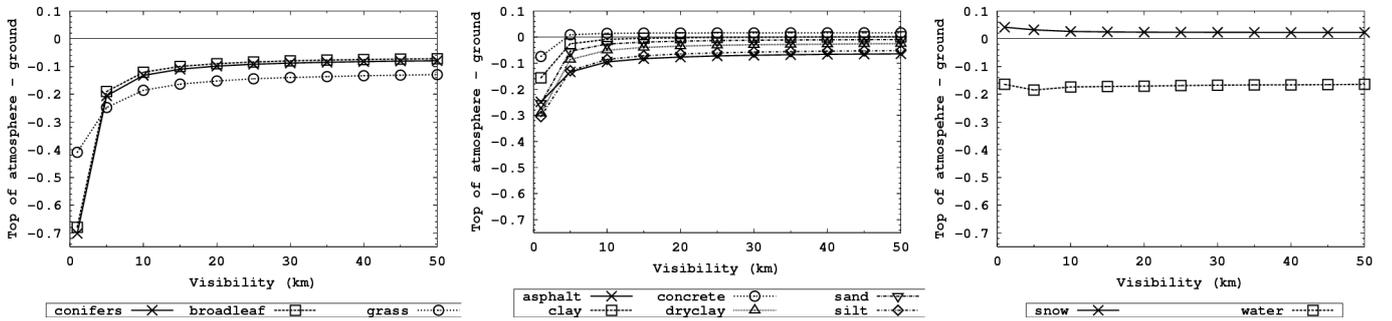


(b) NDSI

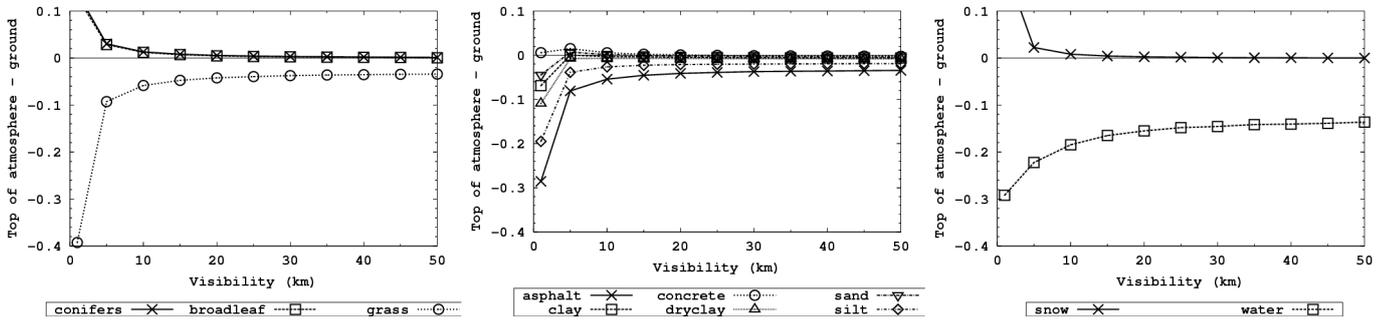


(c) NDWI

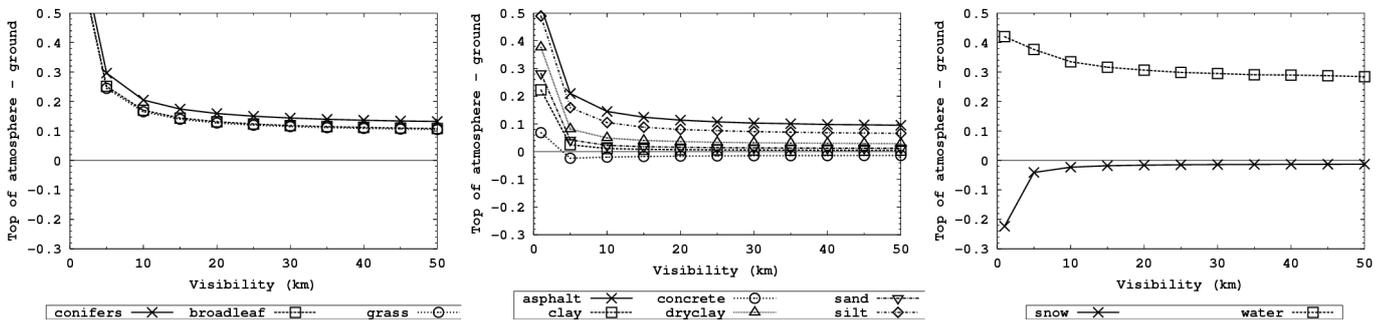
図 8 大陸型エアロゾルモデルのもとでのNDXIの標高に対する依存性。横軸は対象物の標高を、縦軸は衛星上での見かけのNDXIの値と地表面でのNDXIの値との差をそれぞれ表している。



(a) NDVI



(b) NDSI



(c) NDWI

図 9 大陸型エアロゾルモデルのもとでの NDXI の視程に対する依存性。横軸は天空方向の視程を、縦軸は衛星上での見かけの NDXI の値と地表面での NDXI の値との差をそれぞれ表している。