

# 多時期SPOT/HRV データから検討した異なる森林タイプ間の Minnaert 定数の比較とその同一性

## Comparison and identity of the Minnaert constant among different forest types considered from multitemporal SPOT/HRV data

村上 拓彦  
Murakami, T.

キーワード： 地形効果、Minnaert 定数、Minnaert 補正法、多時期リモートセンシングデータ、SPOT/HRV

要約： 地形効果補正のひとつである Minnaert 補正法について、地表被覆物に応じて Minnaert 定数が決まるとされているが観測シーンに応じてどの程度変動するのか比較した例はほとんどない。本研究の目的は、複数時期のリモートセンシングデータを用いて、各時点において森林タイプ間で Minnaert 定数を比較することである。同一地形条件からサンプリングされた森林タイプごとのデータから Minnaert 定数をそれぞれ算出し、有意差検定を行った。さらに、森林タイプを特定しないで、地形条件（傾斜角、斜面方位角）のみで層化無作為抽出したサンプルデータから Minnaert 定数を求め、その同一性について議論を行った。福岡市近郊にある三郡山地周辺の森林地帯を対象地とした。使用した衛星データは 1997 年中に観測された 7 シーンの SPOT/HRV データである。同一地形条件のサンプルによって森林タイプ間の Minnaert 定数を比較した結果、いくつかのシーンで有意差は認められなかった。森林タイプを特定せずに、地形条件のみで層化無作為抽出したサンプルから得られた Minnaert 定数は、いずれの観測時期、バンドにおいても有意差が全く認められなかった。つまり、サンプルが変わっても、地形条件で層化すれば安定的な Minnaert 定数が求められることが示された。

**Abstract:** Although the Minnaert constant of the Minnaert topographic correction method would be decided depending on each landcover, there is almost no example which compared how much it would change according to an observation scene. The purpose of this study is comparing the Minnaert constants among three forest types at each scene using multitemporal remote sensing image. The Minnaert constant for each forest type was computed by the sampling data from the same topographical feature conditions (slope angle and slope azimuth), and significant difference test was performed. Furthermore, the Minnaert constants from the stratified random sampling data only on topographical feature conditions were obtained without specifying a forest type and I discussed their identity. The study area is forested area of the Sangun mountainous region, the environs of Fukuoka city, Japan. The satellite images were SPOT/HRV data of seven scenes observed during 1997. As a result of the comparing the Minnaert constant among three forest types from the sample of the same topographic conditions, significant differences were not recognized on some scenes. The Minnaert constants from the random sampling data only stratified on topographic conditions indicated no significant differences in all scenes and bands. Consequently, even if the sample changed, when stratifying on topographical feature conditions, stable Minnaert constant may be acquired.

**Keywords:** topographic effect, Minnaert constant, Minnaert correction method, Multitemporal remote sensing, SPOT/HRV

## はじめに

日本の森林の多くは地形の起伏に富んだ傾斜地に存在するが、森林リモートセンシングではこの地形の起伏に起因した陰影の発生がデータ解析において大きな障壁となっている (Civco 1989, Leprieur *et al.* 1988)。この問題は地形効果 (topographic effect) と称され、これに対処した取り組みは1980年代初頭から始まっている (Holben and Justice 1980, Smith *et al.* 1980)。地形効果の補正方法は、バンド間演算による非幾何学的手法と、太陽-地表面-センサ間の幾何学的変異を考慮した手法に大別される。本論で扱うのは後者の幾何学的手法である。

幾何学的手法の提示はSmith *et al.*(1980)に始まる。彼らが提示したランベルトモデルと非ランベルトモデルの補正法は現在でも多くの報告で引用さ

れ、様々なケースで検証が行われている。ランベルトモデルとは地表面をランベルト則が成り立つ完全拡散反射面と仮定したもので、観測輝度値を太陽入射角の余弦で割るという極めて単純なモデルである。太陽入射角は太陽光線と地表面の法線の成す角であり、地形の傾斜角、斜面方位角、太陽天頂角、太陽方位角の4因子で規定される。ただし実際の地表面が完全拡散反射面を示すことは希であり、その後の研究でもランベルトモデルの限界が数多く指摘されている (Chiou *et al.* 1992, Meyer *et al.* 1993, 村上ら 1998, Teillet *et al.* 1982)。

一方、非ランベルトモデルの補正法として Minnaert 定数を用いたものがある (Smith *et al.* 1980)。Minnaert 定数は地表被覆物に固有の値をとり、鏡面反射と拡散反射の中間の性質を示すパラメータとされる (Minnaert 1941)。この他にも太陽入射角を組み込んだ非ランベルトモデルがいくつか提唱されているが (Gu and Gillespie 1998, Kawata *et al.* 1988, Richter 1997, Teillet *et al.* 1982)、いずれも広く普及するまでには至っていない。そのひとつの理由に、モデル式が複雑でパラメータを準備するのが困難であることが挙げられる。Minnaert 補正法はモデル式が他と比較して簡単なだけでなく、ランベルトモデルと連続している点に大きな特徴がある。そうした点で Minnaert 補正法は妥当な地形効果補正モデルとして評価できる。

ところで、Minnaert 補正法については地表被覆物に応じて Minnaert 定数が決まるとされているが観測シーンに応じてどの程度変動するのか比較した例はほとんどない。村上 (2002) は、複数時期の SPOT/HRV データを用いて森林タイプ別 (竹林、広葉樹林、針葉樹林) に Minnaert 定数の季節変動性を示し、バンド別に変動の類似点、相違点を議論している。しかし、ここでは森林タイプ間の Minnaert 定数の比較は十分に行われておらず、森林タイプ間で Minnaert 定数に差異がみられるのかどうか明らかにされていない。実際、Minnaert 補正法を適用する際、画像全体でひとつの Minnaert 定数を用いるため、森林タイプそれぞれで Minnaert 定数に有意差がないことが実用上望ましい。そのため、森林タイプ間で Minnaert 定数を比較することが重要となる。

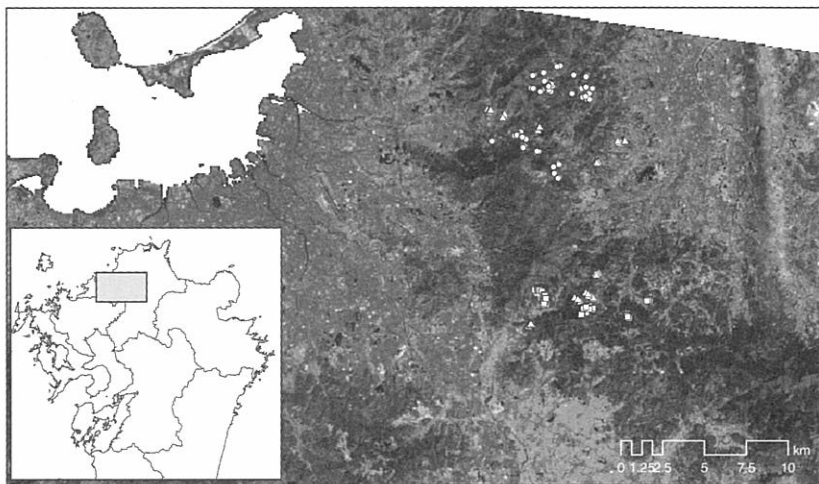
本研究の目的は、複数時期のリモートセンシングデータを用いて、各時点において森林タイプ間で Minnaert 定数を比較することである。同一地形条件

からサンプリングされた森林タイプごとのデータから Minnaert 定数をそれぞれ算出し、有意差検定を行った。さらに、森林タイプを特定しないで、地形条件（傾斜角、斜面方位角）のみで層化無作為抽出したサンプルデータから Minnaert 定数を求め、その同一性について議論を行った。

## 方 法

### 対象地

福岡市近郊にある三郡山地周辺の森林地帯を対象地とした（図 1）。対象地に含まれる標高の分布範囲は 30～930 m であった。対象地周辺の植生帯はヤブツバキクラス域に分類されているが、スギ、ヒノキを中心とした人工林



(c) CNES 1997

図 1. 対象地. 図中の記号は各森林タイプのサンプル抽出点.

○：竹林、△：広葉樹林、□：針葉樹林.

が数多く存在する。また、規模の大きな竹林も存在する。

### 使用データ

解析に用いた衛星データは 1997 年中に観測された複数時期の SPOT/HRV データである。表 1 に使用した 7 時期のデータの観測日と観測角を示す。今

表 1. 使用データのリスト.

Observation Date	Day of the Year	Pointing Angle (deg.)
17 January 1997	17	R 7.3
5 March 1997	64	R 13.8
26 April 1997	116	R 14.1
17 June 1997	168	R 14.1
23 July 1997	204	R 0.8
25 October 1997	298	R 15.2
5 December 1997	339	L 5.9

回用いた SPOT/HRV データは SPOT グリッド・リファレンス・システムで 313-283 (K-J) に位置する。SPOT/HRV の観測波長帯はバンド 1 が 500～590 nm (可視緑色域)、バンド 2 が 610～680 nm (可視赤色域)、バンド 3 が 790～890 nm (近赤外域) である。なお、観測日を表現する方法として 1 月 1 日からの通算日を用いることとし、DOY (Day Of the Year) で表現する。例えば、DOY100 は 1 月 1 日から 100 日経過した日を意味する。

その他に、国土地理院発行の数値地図 50 m メッシュを DEM (Digital Elevation Model) として使用した。この DEM を用い衛星データの幾何補正 (正射投影変換を伴う) を行うとともに、ピクセル毎の太陽入射角、センサ反射角の算出も実施している。また、幾何補正の際には国土地理院発行の数値地図 25000 (地図画像) も同時に使用した。各森林タイプのサンプルデータを抽出するために環境庁発行の現存植生図を使用した。

### 森林タイプ

本論では広葉樹林、針葉樹林 (スギ・ヒノキ人工林)、竹林の 3 つの森林タイプに注目した。これらは林冠構成樹種が全く異なる森林タイプとして解析結果を比較できると考えた。針葉樹林、竹林はほとんど単一樹種で占められる純林であるといえるが、広葉樹林は場所に応じて樹種構成が変化する落葉性・常緑性樹種の混交した二次林である。

### 衛星データ前処理

衛星データにも空中写真でみられるような地形歪みが生じている (飯倉・横山 1998)。特に、今回用いた SPOT/HRV データは斜方視観測の結果、各シーンでの地形歪みが均質でない。そのため、観測角と各地点の標高を考慮して正射投影画像を作成する必要がある。今回解析に用いた画像解析ソフトウ

エアであるERDAS Imagine Ver. 8.6 (ERDAS社、米国) ではSPOTデータを正射投影するためのモジュールがあらかじめ用意されているので、これを利用した。このモジュールでは観測角とDEMをあらかじめ指定し、幾何補正を行う。地形図等から与えられた地図座標を基に、同地点の標高データをDEMから参照し、地形歪みの程度を推定し、最終的に正射投影画像を作成する。幾何補正に伴う画像の誤差を0.5画素未満に抑え、ピクセルサイズ20×20mで最近隣内挿法にて画像再配列を実施した。座標系はユニバーサル横メルカトル図法 (Universal Transverse Mercator: UTM) の52帯、楕円体はBessel、測地系はTokyoとした。

今回大気補正は特に行ってない。本研究で注目しているのは地形条件に応じた相対的なデジタルナンバーの変動であるため、誤差要因を抑制する目的で大気補正は施さなかった。

#### Minnaert定数

地形効果の補正法の中で代表的な非ランベルトモデルとしてMinnaert法がある (Smith *et al.* 1980)。これはMinnaert (1941) が提唱した経験モデルに基づくもので、Smith *et al.* (1980) が地形効果補正に採用して以後、その有効性が確かめられている (Chiou *et al.* 1992, Meyer *et al.* 1993, Teillet *et al.* 1982)。Minnaert法は次のモデル式で表現される。

$$[1] \quad D_c = \frac{D_o \cdot \cos \varepsilon}{(\cos i \cdot \cos \varepsilon)^k}$$

ただし、 $D_c$ : 補正後のデータ値、 $D_o$ : 補正前のデータ値、 $i$ : 太陽入射角、 $\varepsilon$ : センサ反射角、 $k$ : Minnaert定数である。

太陽入射角は斜面法線と太陽光線の成す角として定義される (詳しくは、加藤 (2004)、村上 (2002) など)。理科年表の数値 (視赤経、視赤緯、グリニッジ視恒星時) を用い、各シーンの観測時刻における太陽天頂角、太陽方位角を算出した (表2)。太陽入射角は以下の [2] 式から求める。

$$[2] \quad \cos i = \cos \theta \cdot \cos e + \sin \theta \cdot \sin e \cdot \cos (\Phi - A)$$

ただし、 $e$ : 斜面傾斜角、 $\Phi$ : 斜面方位、 $\theta$ : 太陽天頂角、 $A$ : 太陽方位角である。

表 2. 衛星観測時における太陽位置とセンサ位置.

北緯 33° 35' 東経 130° 36'E を基準点にして算出.

Observation date	Solar zenith angle (deg.)	Solar azimuth (deg.)	Sensor zenith angle (deg.)	Sensor azimuth (deg.)
17 January 1997	57.72	157.29	8.26	101.12
5 March 1997	44.68	148.48	15.64	101.75
26 April 1997	26.04	136.18	15.98	101.78
17 June 1997	19.46	116.72	15.98	101.78
23 July 1997	21.17	124.94	0.90	100.52
25 October 1997	47.76	160.35	17.23	101.89
5 December 1997	55.63	164.66	6.67	280.99

同じく、センサ反射角はセンサと斜面法線の成す角として定義され、前述の太陽入射角において太陽とセンサが入れ替わったものと理解して良い。各観測日のセンサ天頂角、センサ方位角についても表-2 に示している。

$$[3] \quad \cos \varepsilon = \cos \gamma \cdot \cos e + \sin \gamma \cdot \sin e \cdot \cos (\Phi - \psi)$$

ただし、 $\gamma$ : センサ天頂角、 $\psi$ : センサ方位角である。

Minnaert 定数  $k$  は反射面の粗度と関連する (Minnaert 1941)。式 [1] はランベルトモデルと連続しており、 $k=1$  の場合、 $\cos i$  のみに依存する完全拡散反射面を扱うモデル式となる。しかし、そのような反射面はほとんど存在しないので、実際  $k$  はそれ以外の値を示し、拡散反射と鏡面反射の混合した性質を示すパラメータとなる。例えば、不均質な拡散反射を示す面の場合、 $k$  の値が低くなる (Smith *et al.* 1980)。Minnaert 定数は以下のように式 [1] を両辺対数変換することにより、直線回帰式の傾きとして求められる。

$$[4] \quad \ln (D_o \cdot \cos \varepsilon) = k \cdot \ln (\cos i \cdot \cos \varepsilon) + \ln (D_c)$$

地形効果の補正は、回帰分析で求められた Minnaert 定数を式 [1] に代入して実施する。なお、本研究では  $D_o$  として、デジタルナンバーを絶対放射輝度に変換した値を適用した。絶対放射輝度への変換係数は、宇宙開発事業団より提供された SPOT/HRV データそれぞれのヘッダファイルが示す数値を用いた。

#### サンプルの抽出方法

Minnaert 定数は土地被覆タイプに固有と指摘されているが (Smith *et al.*

1980)、もし仮に土地被覆タイプ(本論では森林タイプの違い)で異なったとしても、Minnaert定数を土地被覆タイプ毎に適用するのは事実上困難である。つまり、これを実現するためには事前に土地被覆タイプが空間的に明示されている必要があり、具体的にはGISデータやリモートセンシングデータの分類結果などが事前に存在する必要がある。しかし、そもそもそうしたデータが存在する状況下では、地形効果補正の必要性のみならずリモートセンシングデータの必要性さえも大幅に減少するため、実用上意味のない状況となる。実際には、都合のいい事前情報はほとんどないため、各森林タイプそれぞれで求められたMinnaert定数の差異の程度について検討し、その後、森林タイプを特定せずに求めたMinnaert定数が、サンプルに大きく依存することなく安定して求められることが確認されるのが望ましい。そこで、本研究では以下のような手順でサンプルを抽出し、Minnaert定数の比較を行った。

- ①各森林タイプのサンプル抽出点は現存植生図を参考に実施した。現存植生図の作成年(1988年)と衛星データ観測年(1997年)の違い等を考慮すると現存植生図だけでサンプルデータの抽出地点を十分に設定することは困難と判断し、現存植生図と衛星データを比較しながら各森林タイプの抽出地点を設定した。単一時期のSPOT/HRVデータだけでは各森林タイプを判別するのは難しいので、複数時期の観測データを組み合わせ、森林タイプの識別性の向上を図った。今回選定した3つの森林タイプの識別に有効な時期の組合せについて検討した結果、4月(DOY116)、6月(DOY168)のバンド3を組み合わせた際、広葉樹林、針葉樹林、竹林がよく識別できた。各観測時期でサンプルデータの抽出地点に雲及び雲の影が存在しないことを確認し、最終的な予備サンプル抽出地点を設定した。
- ②先述したとおりMinnaert定数は回帰分析から求めるのでサンプルの偏りに影響を受ける可能性が高い。村上(2002)では、サンプルの地形的な偏りを避けるため、任意の傾斜角、斜面方位の組合せからはただひとつのサンプルを抽出するよう層化無作為抽出を行っている。本論でもそれと同様に、各森林タイプについて、傾斜角、斜面方位の組合せから唯一のサンプルを抽出するよう調整した。
- ③本論では各森林タイプのMinnaert定数を比較することが目的のため、3つ



の森林タイプのサンプルの抽出条件が同一になるように調整した。すなわち、三者において同一の傾斜角、斜面方位の組み合わせを予備サンプルからそれぞれ抽出した。ここで得られたサンプルをサンプル I と称する。

- ④ 上述の①の予備サンプルとは別に、森林タイプを特定せずにサンプルデータを抽出した。画像上で森林被覆の確認される任意の傾斜地から地形データ（傾斜角、斜面方位角）、衛星データ（バンド毎のデータ値）をセットで抽出し、その後地形条件に応じた層化無作為抽出を行った。傾斜角が  $5^\circ$  間隔（最高は  $40^\circ$ ）、斜面方位角  $15^\circ$  間隔でそれぞれクラスを設け、この両者の組み合わせを同一地形の単位とした。つまり、任意の傾斜角クラス、斜面方位クラスの組み合わせひとつにつき、ひとつのサンプル（地形データ、衛星データのセット）を無作為に抽出する作業を行った。これで得られたサンプルはサンプル II と称する。

#### 統計解析

Minnaert 定数は回帰直線の傾きとして求められる。そのため、Minnaert 定数を比較するという事は、回帰直線の傾きを比較するという事になる。この回帰直線の傾きの比較方法として共分散分析（ANCOVA）の平行性の検定がある。本論では、この平行性の検定で森林タイプ間の Minnaert 定数の有意差検定、並びに森林タイプを特定しない場合の Minnaert 定数の有意差検定を行った。なお、検定にはフリーの統計解析ソフトである R 1.9.1 を使用した。

#### 結 果

第一サンプルの散布状況を示したのが図 2 である。傾斜角で見ると  $10^\circ \sim 30^\circ$  に集中していた。一方、斜面方位角で見ると相対的に  $150^\circ \sim 270^\circ$  あたりでサンプル数が少ないようであった。全体的に、全ての地形条件に対し均等に散布しているとはいえなかったが、ここでの目的は異なる森林タイプの地形条件を揃えることにあるので、ここではこの地形条件で各森林タイプの Minnaert 定数を比較した。

サンプル I から得られた結果を図 3 に示す。図 3 (a) はバンド 1 のものであるが、全体的に凸型の変動パターンを示した。年間を通して広葉樹の値が

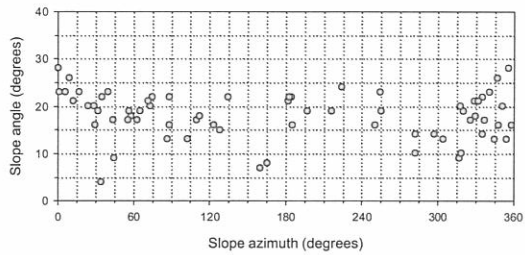


図2. サンプル I の斜面方位角、傾斜角の分布状況.

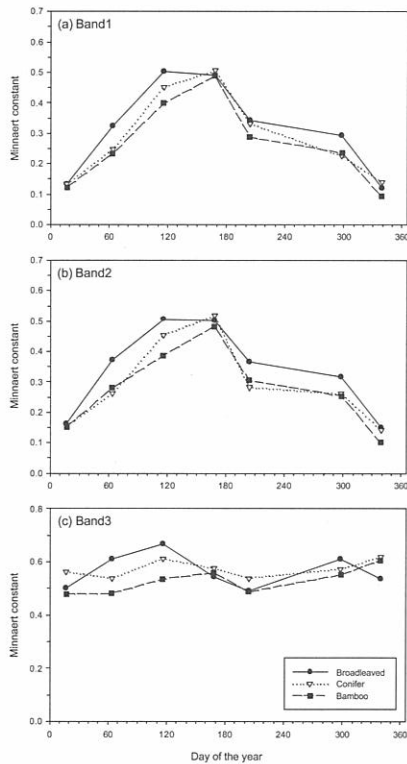


図3. 同一地形条件(サンプル I)で比較した各森林タイプのMinnaert定数.

(a) バンド1、(b) バンド2、(c) バンド3.

最も大きかった。各時点で森林タイプ間のMinnaert定数を比較してみると、0.1を超えるような差はDOY116のみでその差は0.103であった。それ以外の時期は0.090～0.011の差であった。最小差はDOY17でみられた。バンド2（図3(b)）も、バンド1とほぼ類似の季節変動パターンを示した。最も差がみられたのはDOY116で0.120、次いでDOY64の0.110であった。それ以外の時期は0.1以下の差であった。バンド3（図3(c)）の季節変動パターンは、バンド1、2の示したものと多少異なり、明確なピークを持つというよりは、ある一定範囲で変動しているようであった。また、バンド1、2では全体的に広葉樹が最も高い値を示していたのとは異なり、バンド3では森林タイプ間の序列に一定の傾向はないように思われた。森林タイプ間の差は最高で0.132（DOY116）、次いで0.129（DOY64）であった。一方、最小差は0.032（DOY168）であり、全体的にバンド1、2と比較するとMinnaert定数の差は大きかった。

それぞれの観測時期に対し、森林タイプ間のMinnaert定数の有意差検定を行った結果が表3である。表中の数値は有意確率である。バンド1ではDOY168、204、298において三者のMinnaert定数に有意差が認められなかった。バンド2では、有意差がみられなかったのはDOY298のみであった。最も有意差の認められなかった時点の数が多かったのはバンド3であった。7時点中5時点で3つの森林タイプのMinnaert定数に有意差が認められなかった。

表3. サンプルIから算出された3つの森林タイプのMinnaert定数の有意差検定.

平行性の検定の有意確率.

	Day of the Year						
	17	64	116	168	204	298	339
Band1	0.000**	0.000**	0.000**	0.120	0.532	0.062	0.000**
Band2	0.000**	0.000**	0.004**	0.029*	0.000**	0.056	0.000**
Band3	0.121	0.190	0.000**	0.010**	0.331	0.429	0.112

\*\*significant at the 0.01 level, \*significant at the 0.05 level

図4はサンプルIIの散布状況を示したものである。ほぼ全ての地形条件に

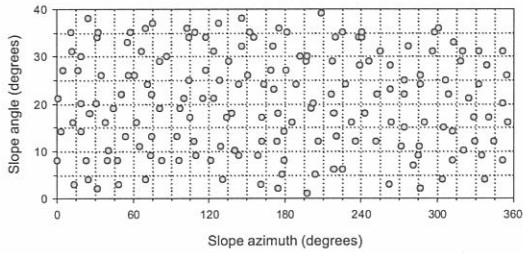


図4. サンプルⅡの斜面方位角、傾斜角の分布状況.

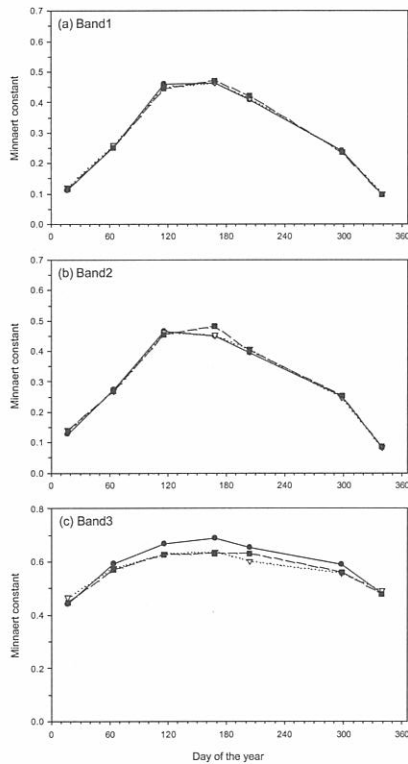


図5. 森林タイプを特定せずに地形条件（斜面方位角 $15^\circ$ 、傾斜角 $5^\circ$ をひとつの区切りとした）のみで層化したサンプル（サンプルⅡ）から算出したMinnaert定数. 試行回数は3回.

(a) バンド1、(b) バンド2、(c) バンド3.

対しまんべんなく選択されていることが確認できる。このように地形条件で層化して、無作為にデータを抽出し、それぞれ Minnaert 定数を求めた。試行回数は 3 回である。

地形条件に対し層化無作為抽出されたデータの組み合わせで求められた Minnaert 定数を示したのが図 5 である。バンド 1 (図 5 (a)) では、上に凸な季節変動パターンを示し、その形状は図 3 (a) と比較して滑らかであった。各時点において、今回比較した三者の差は小さく、0.014~0.005 であった。バンド 2 (図 5 (b)) もバンド 1 に非常に類似した結果を示しており、三者の差は 0.031~0.003 であった。バンド 3 の変動パターンも上に凸な形状をとっていた。しかし、年間の変動幅はバンド 1、2 と比較して小さかった。3 つの森林タイプ間の差は最大で 0.058 (DOY168)、最小で 0.014 (DOY339) であった。表 4 に、観測時期別バンド別に、今回得られた 3 つの Minnaert 定数について有意差検定の結果について示している。いずれの観測時期、バンドにおいて有意差が全く認められない結果であった。つまり、サンプルが変わっても、地形条件で層化すれば安定的な Minnaert 定数が求められることが示された。

表 4. サンプル II から算出された 3 回の Minnaert 定数の有意差検定。

平行性の検定の有意確率。

	Day of the Year						
	17	64	116	168	204	298	339
Band1	0.644	0.939	0.809	0.778	0.893	0.955	0.935
Band2	0.435	0.988	0.916	0.131	0.942	0.928	0.976
Band3	0.767	0.835	0.686	0.646	0.829	0.731	0.940

## 考察

本研究では、単一のシーンだけでなく、複数のシーンを用い Minnaert 定数の季節変動性と森林タイプ間の相違の程度について検討した。同一地形条件で森林タイプ間の Minnaert 定数を比較したが、全てのバンド、時期というわけではなかったが、3 つの森林タイプで Minnaert 定数に有意差がみられないことが確認された (図 3、表 3)。さらに、それに続く解析で、地形条件のみに着目し森林タイプを特定せずに求めた Minnaert 定数は、使用した全ての

時期、バンドにおいて全く有意差が認められなかった(図5、表4)。この後者の結果は、各森林タイプのMinnaert定数に差異がないことを直接示すものではないが、前者の結果と合わせて考えると、少なくとも本論の対象地周辺では森林タイプ間のMinnaert定数はほぼ同一とみなせると考えられる。森林タイプ別にMinnaert定数を求めるのは困難であるし、実際にそれを適用するのも事実上不可能である。そのため本研究において、サンプルⅡの結果(図5、表4)が示した、シーンそれぞれに対するMinnaert定数が、森林タイプの違いに関わらず一定であるという結果の意義は大きい。

森林タイプを特定せずに地形条件に偏りなくサンプリングしたサンプルⅡ(図5)と比べて、限られた地形条件で森林タイプを比較したサンプルⅠ(図3)の方がMinnaert定数の差(例えば、最大値と最小値の差)は大きかった。これはおそらく地形条件の偏りが影響したものと考えられる。また、サンプルⅠ(図3)では年間の季節変動が幾分不規則なパターンを示しているのに対し、サンプルⅡ(図5)の方は、いずれのバンドにおいても年間の変化パターンが滑らかな曲線を描いている。これも地形条件の偏りの有無に起因したものであろう。サンプルⅡ(図5)の方でMinnaert定数を求めるデータセットの組み合わせを変えても、有意差がみられなかったことは、地形条件で層化することの重要性を示唆するものである。

そもそも、従来の研究で示されたMinnaert定数は単一シーンに対するものが大半で(Colby 1991, Gu and Gillespie 1998, Meyer *et al.* 1993, Smith *et al.* 1980, Teillet *et al.* 1982)、それ以外でもいくつかのシーンが離散的に検討されているのみであった(Civco 1989, Holben and Justice 1980,1981)。また、本研究の結論として挙げられる、地形条件の偏りに対する配慮も、どの程度実行されているのか不明である。本論で示したように、Minnaert定数の算出のために、全ての地形条件を反映させる必要がある。つまり、図4のような状態である。Minnaert定数の算出が回帰分析に依存している以上、地形条件(具体的には、斜面方位角、傾斜角)をまんべんなく考慮するのは最も合理的であり、かつ重要な点である。サンプルⅡの結果(図5、表4)が示すように、ほぼ全ての地形条件を考慮すると、そこから得られる解は非常に安定するといえそうである。

今回いずれのバンドにおいても Minnaert 定数の季節変動パターンは上に凸な形状を示していた。このことは通算日 (DOY) もしくは太陽天頂角との関連性が予想される。今後は、他年次のデータを追加的に解析し、通算日や太陽天頂角でモデル化できるか検討してみる必要があるであろう。このモデル化はセンサで異なるかもしれないが、画像取得時期で Minnaert 定数がある程度推測できることは利便性の向上に大きく貢献する。例えば、それほど厳密な地形補正が必要でない場面などでは、そうした予測値が貢献できるかもしれない。

ところで、ここでの結果の適用範囲は、現時点では限定せざるをえない。特に、森林タイプについて、今回対象とした九州北部地域は常緑樹主体の暖温帯林である。現時点で不明なのは、落葉樹主体の、より北方域、もしくは高標高域において、本論で得られたような Minnaert 定数の安定性が得られるかどうかである。ここで落葉樹に着目するのは、紅葉とそれに続く落葉に伴う分光反射特性の劇的な変化が常緑樹主体の森林と大きく異なるためである。今後は他の地域でも同様のアプローチを試みて、得られる Minnaert 定数の安定性について検討していく必要がある。

最後に、使用した衛星データについてだが、今回検討したのは SPOT/HRV のみである。今後は LANDSAT/TM や Terra/ASTER など他の中分解能衛星データに対しても検討していく必要がある。高分解能衛星データについては Minnaert 法の適用が可能かどうかの検討から始める必要があり、現時点では不明な点が多い。今後のアプローチとして、サンプル II で実施したような、森林タイプを特定せずに行うサンプリングが有効であろう。その理由は、第一に、このアプローチが画像データと DEM さえあればよく、事前情報や追加情報を必要としないということにある。つまり、解析に取りかかりやすいということである。第二には、得られた Minnaert 定数の有意差検定から、Minnaert 定数の安定度が把握でき、ばらつきの大きさから間接的に Minnaert 定数が森林タイプに応じて変動するのかが明らかとなる。もし、どのようなセンサ、対象地においても Minnaert 定数が安定して求められるとすれば、地形効果補正の手順の確立は大きく進展するであろう。

本研究で使用したSPOT/HRVデータは、宇宙開発事業団（現在、宇宙航空研究開発機構）より提供を受けた。ここに記して、感謝の意を表する。

## 引用文献

- Chiou, C.R., Thomas, V.L., and Hoffer, R.M. 1992. Comparison of four techniques for topographic normalization of Landsat TM data. ASPRS/ACSM/RT 92-Technical Papers 4: 184-196.
- Civco, D.L. 1989. Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **55**: 1303-1309.
- Colby, J.D. 1991. Topographic normalization in rugged terrain. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **57**: 531-537.
- Gu, D. and Gillespie, A. 1998. Topographic normalization of Landsat TM images of forest based on subpixel sun-canopy-sensor geometry. *Remote Sens. Environ.* **64**: 166-175.
- Holben, B. and Justice, C. 1980. The topographic effect on spectral response from nadir-pointing sensors. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **46**: 1191-1200.
- Holben, B. and Justice, C. 1981. An examination of spectral band ratioing to reduce the topographic effect on remotely sensed data. *Int. J. Remote Sens.* **2**: 115-133.
- 飯倉善和・横山隆三 1998. ランドサットTM画像の正射投影とその評価. 写測とリモセン 37(4): 12-22.
- 加藤正人編著 2004. 森林リモートセンシング. 273pp, 日本林業調査会, 東京.
- Kawata, Y., Ueno, S., and Kusaka, T. 1988. Radiometric correction for atmospheric and topographic effects on Landsat MSS images. *Int. J. Remote Sens.* **9**: 729-748.
- Leprieur, C.E., Durand, J.M., and Peyron, J.L. 1988. Influence of topography on forest reflectance using Landsat Thematic Mapper and digital terrain data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **54**: 491-496.
- Meyer, P., Itten, K.I., Kellenberger, T., Sandmeier, S., and Sandmeier, R. 1993. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM



- data in an alpine environment. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **48**: 17-28.
- Minnaert, M. 1941. The reciprocity principle in lunar photometry. *The Astrophys. J.* **93**: 403-410.
- 村上拓彦 2002. SPOT/HRV データから森林タイプ別に求めた Minnaert 定数, 写測とリモセン 41(1): 47-55.
- 村上拓彦・藤井秀亮・今田盛生 1998. ランドサット TM データに与えられた地形の影響の補正方法の比較 - 九州大学宮崎演習林内のスギ林分を対象として -, 九大演報 78: 13-28.
- Richter, R. 1997. Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery. *Int. J. Remote Sens.* **18**: 1099-1111.
- Smith, J.A., Lin, T.L., and Ranson, K.J. 1980. The Lambertian assumption and Landsat data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **46**: 1183-1189.
- Teillet, P.M., Guindon, B., and Goodenough, D.G. 1982. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Can. J. Remote Sens.* **8**: 84-106.

