リモートセンシングデータを用いた森林樹冠率の推定 (京都議定書対応のためのリモートセンシング技術の確立)

Estimation crown cover ratio with remote sensing data (The establishment of the remote sensing technique to contribute to the Kyoto protocol)

小熊 宏之*・山形与志樹*

Hiroyuki OGUMA, Yoshiki YAMAGATA

Abstract: The Kyoto protocol was adopted in 1997. According to some definitional options, forest and non-forest area are distinguished using crown cover ratio. In order to delineate such forest regions, the development of the way to measure the crown cover ratio of forest is urgently necessary. In this study, various methods were tested for estimating crown cover ratio by using airborne spectral sensor data. Negative correlation coefficients were found among spectral bands of CASI in visible region and crown cover ratio. The best correlation coefficient was attained by the ratio of between 465nm and 700nm bands. Standard error was around 5% of the correlation. Whereas, the correlation coefficient was low by the NDVI which used often to estimate vegetation biomass. This research shows that the possibility to estimate the crown cover ratio accurately with optical remote sensing data.

1. はじめに

1997年に採択された京都議定書では、先進国における温室効果ガスの排出削減に対する具体的な数値目標が提示された。この京都議定書の3条3項において、吸収源として規定された森林を京都フォレストと呼び、1990年を基準年として、以降の直接的かつ人為的に新規植林(Afforestation)、再植林(Reforestation)、森林減少(Deforestation)が行われた森林(地域)を指す。すなわち1990年の基準年における土地被覆のうち、以前「森林」だった土地に「再植林」した場合のCO₂吸収、「伐採」によるCO₂放出、そして「森林」以外の土地に「新規植林」することによるCO₂の吸収量を、2008年から2012年の第一約束期間に見積もる必要がある。従って1990年の「森林」・「非森林」の判別が全ての基準となる。「森林」として認められる土地被覆は、将来的に樹高が5 m以上となる樹木が被覆し、特

定の範囲内(0.5ha程度とされているが現状では未定)において、樹冠を地表面投影した場合の面積比率を「樹冠率」として、これがある閾値以上を満たしている部分とされる(IPCCの特別報告書が準備されている)。このような背景からリモートセンシングを用いて、従前から行われてきた樹種分類や森林伐採の抽出に加えて、樹冠率を正確に推定するための手法、開発が喫緊の課題となっている。更に、国外における新規植林でのCO₂吸収量を算定することで、同量のCO₂排出権としてクレジットが与えられる。ここでもCO₂吸収量算定に際しては、樹冠率は重要な項目であることから、本研究ではリモートセンシングを用いた樹冠率推定の可能性を検証することを目的として様々なケーススタディを行った。まず、航空写真を用いた図化作業により、個々の樹冠をポリゴン化することで樹冠面積を求め、樹冠率を算出した。このように写真や地上調査による樹冠率のトゥルースは、ごく限定された領域で得られるいわばポイントデータである。これにリモートセンシングデータとの関係式が確立できれば、ポイントデータを広域化することが可能となる。そこで、航空機搭載型の光学センサを用いて樹冠率と分光スペクトル情報との関係性を求め、樹冠率推定式を作成した。更に衛星による観測のシミュレーションを行い、過去

*国立環境研究所 地球環境研究センター
National Institute for Environmental Studies Center
for Global Environmental Research
「写真測量とリモートセンシング」VOL. 39, NO. 2, 2000

の衛星データによる樹冠率推定の可能性について検討した。

2. 解析対象

対象は釧路湿原内のハンノキ林を選んだ。同域におけるハンノキ林は、樹冠面積や密度が伏流水など生育環境の微妙な違いで大きく変化するため、樹冠が疎な状態と密な状態を狭い範囲で得やすいこと、加えて傾斜効果を考慮する必要が省略されること等からリモートセンシングによる研究・検証サイトとして好適な対象である。今回は樹高10m以上のハンノキが密集した高木林をサイト1、樹高3m以下の疎林部をサイト2とし、この2箇所について200m×200mの領域を解析対象とした。1992年6月に1/5000スケールでオーバーラップ60%の条件で撮影された航空写真を用い、解析

図化機を用いた目視による計量と現地計測による校正を行い、全てのハンノキについて樹高を求めると同時に、樹冠部分をポリゴン化することで樹冠面積を求めた。図1はサイトの概要である。サイト1は4426本、1本あたりの平均樹冠面積が 3.3m^2 、平均樹高が5.9mに対して、サイト2が2601本、平均樹冠面積 2.4m^2 、平均樹高は1.7mであった。

3. 解 析

CASIのデータ取得は1994年9月2日に実施された。ここでCASIとはカナダのItres社製の航空機搭載型イメージングスペクトロメータである。取得時の諸元を表1に示す。観測は空間分解能を優先したspatialモードと、連続分光観測を行うspectralモードの2通り行われた。Spatialモードでは空間分解能が約

図1 テストサイトの概要 左側はLANDSAT/TM画像(1993年7月1日撮影)、右側は各サイトのCASI(Spatialモード)画像

表 1 CASI による観測諸元

データ取得 1994年9月2日
飛行高度 1600m
使用機体 Cessna206
量子化数 12bit

spatial mode

バンド	中心波長 (nm)	波長幅 (nm)
1	465.4	11.0
2	554.6	9.3
3	599.9	11.1
4	640.0	9.4
5	659.7	9.3
6	680.3	11.1
7	700.0	11.2
8	720.6	9.4
9	749.5	9.5
10	830.0	11.3

地上分解能 1.9m(swath)×2.2m(track)
データ取得時間 9:47—9:53

spectral mode

バンド	中心波長 (nm)	波長幅 (nm)
1	403.2	
	約5.4nm 間隔連続分光	
96	913.0	

地上分解能 1.9m(swath)×7.2m(track)
データ取得時間 11:56—12:02

2 m と、ハンノキの樹冠を特定することが可能な分解能である。ただし取得できるバンド数は、波長分解能が約10nmの10バンドに限定される。一方 Spectral モードは波長分解能 5 nm の96バンドの連続分光データが取得できるが、空間分解能が 2 m×7 m (進行方向) と変則的となる。なお、樹冠面積を算出した航空写真の撮影と CASI のデータ取得は 2 年間異なるが、湿地植生では 2 年間の成長量は大きくなく、解析には差し支えないものと判断した。次に両サイトにおけるハンノキをポリゴン化した画像に対し CASI 画像の重ね合わせを行った。Spatial モードの幾何補正には GCP として樹冠が CASI の 1 画素程度で、群集していない個所のハンノキを用い、2 次のアフィン変換式により誤差 1 画素以内の合わせこみを行った。Spectral モードの幾何補正も基本的にはハンノキの樹冠を用いたが、ハンノキの特定が困難であることから誤差は CASI 画素にして1.5画素程度となった。

次に京都議定書における樹冠率とは、ある面積(0.5 ha 程度とされているが現状では未定)の領域の中に樹

図 2 メッシュ化作業の一例 白線は30m メッシュ、樹冠部分を特定し黒線のポリゴンで示している

冠を地表面へ投影した場合の面積比率とされている。LANDSAT/TM など衛星センサの利用を想定すると、1 画素内で樹冠率が推定できることが必要である。そこで解析の最小単位として10m, 20m, 30m の3条件のメッシュを設定し、メッシュ内に入るハンノキの全ての樹冠面積を求め、メッシュ単位の面積で除することで樹冠率とした。これに対し、1 メッシュ内の全 CASI 画素の平均 DN (Digital Number, 以下 DN) 値を求め、1 メッシュ内の代表 DN 値とし、樹冠率との比較を行った。メッシュ化作業の一例を図 2 に示す。サイト 1, 2 合わせて10m メッシュで727点、20m メッシュで177点、30m メッシュで67点の樹冠率-DN のサンプルを得た。なお、spectral モードのデータは空間分解能が変則的であることから、解析には30m メッシュの値だけを用いることとした。解析内容について以下に列挙する。

1) CASI の単バンドを用いた場合と、全ての組み合わせ方によるバンド間比演算を行った場合の回帰分析を行い、樹冠率推定に有効となる観測バンド・組み合わせ方を選定し樹冠率推定式を求めた。また比演算の回帰分析に加えて、植生現存量推定の方法として用い

られる NDVI(正規化差分植生指数)の有効性を検証した。

2) 現実的には樹冠率の実測値が整備できる範囲は極めて狭い範囲に限定され、そこで確立された推定式を用いて、広範囲かつ大きいメッシュにおける樹冠率を推定することが必用となる。その場合、変換式を求めるために十分なサンプル点数を得るためには小さいメッシュ単位で集計し、得た推定式を広範囲に外挿することが求められる。このような状況を想定し、10mと30mのメッシュサイズによる樹冠率推定式に対して同一のセンサ観測値を代入し、得られた樹冠率の比較を行った。

3) これまでは、サイト1、2全てのデータを用いて推定式を求めたが、仮に対象としている樹木の生育状態や、粗密の程度などが偏った場所でのみ推定式を作成し、他の場所に適用させた場合に生じる問題を明らかにするため、ここではハンノキが密な状態のサイト1だけを用いて樹冠率推定式を作成し、これをハンノキが疎であるサイト2に適用した場合の標準誤差を求めた。

4) 京都議定書では森林変動の抽出を1990年を基準年としてカウントする、既に10年経過している1990年当時の森林の樹冠率を広域に推定するためには、当時のLANDSATやSPOTなどの衛星データや1990年に撮影された航空写真を用いる以外に手段は無い。HRVは高分解能のパンクロモードを持つが、10mの空間分解能では樹冠を直接捕らえるのは不可能であり、スペクトル情報による樹冠率の推定方法を検討する必要がある。TMやHRVはCASIの10nm以下の分光幅に対して60-80nm程度の波長分解能である。そこでCASIのスペクトラルモードによるデータを用いてLANDAT/TMとSPOT/HRVの観測バンドのシミュレーションデータを作成し、樹冠率の推定を行った。なお、HRVは空間分解能が20mであるがspectralモードの変則的な空間分解能を考慮し、30mメッシュだけを用いた。衛星センサの各バンドの半値幅に合わせてCASIの5nm連続分光データを平均化し観測シミュレーションデータを作成した。なお、センサ個別の分光感度曲線は考慮していない。更にTMについては、CASIが観測出来ない波長領域であるバンド5、6、7は対象外とした。ここでの解析は、CASIによる解析と同様、単バンドを用いた場合、NDVI値と更に全てのバンドの組合せによる比演算を行い、樹冠率と

の相関係数を求めた。

なお、樹冠率推定にはCASIの高分解能画像を用いたカテゴリー分類により樹冠を直接特定し、メッシュ毎に集計するといったアプローチも考えられるが、衛星データ利用の可能性を検証する目的には相応しくなく、本解析ではメッシュ毎の樹冠率と平均スペクトル値との解析に限定した。

4. 結果と考察

4.1 樹冠率とスペクトルの相関

図3はCASIのspatialモードのDNと30mメッシュ内の樹冠率との相関関係である。青バンドを除く可視域のDNと樹冠率との間には強い負の相関が認められる一方、近赤外バンドとの相関は概ね低い値となっている。最も高い相関関係は700nmの-0.89であり、次いで600nmバンドの-0.86、640nmのバンド-0.85となった。またクロロフィルの吸収の極大である赤(680nm)付近では相関係数が-0.68と若干低下する。図4には10mメッシュにおける樹冠率5%以下と55%以上の場合について、680nm前後のCASIのDNを比較したものである。他のバンドに比較して、680nmバンドの変化はわずかである。クロロフィルの吸収帯は、ハンノキと林床植生は共に同一波長付近であると考えられることから、メッシュ内におけるハンノキの樹冠率の大小に関わらず吸収が飽和しており、相関係

図3 30mメッシュ内の樹冠率とCASIによる分光放射輝度値との相関関係

図4 樹冠率が5%と55%の条件でのCASI観測値の違い
実線が樹冠率5%, 破線が樹冠率55%を示す

図5 バンドの比演算による値と樹冠率の相関関係

数が低下する原因として考えられる。次に10バンド全てを総当りした比演算処理による結果(図5)では、単バンドの場合には最も相関係数が低かった465nmバンドと他の可視バンドとの比が相関係数0.8を超え、700nmと465nmバンドの比が相関係数0.93と最も高く、次いで640nmと465nm、700nmと680nmの順に高い相関係数が得られた。465nmバンドと他の可視バンドとの比演算で高い相関係数を得ることが出来る理由として、赤領域と同じくクロロフィルの吸収のピーク波長であること、単バンドの結果では465nmバンドのみが弱い正の相関を示したことなどが考えられるが、詳細な解析は今後の課題としたい。

一方、多くの植生指数は可視域の赤領域バンドと近

図6 CASIの画素から求めたハンノキとヨシのNDVI値の比較

赤外バンドの比演算を基本としているが、近赤外バンドの750nmまたは865nmバンドと、全ての可視バンドの比演算では高い相関係数を得ることが出来なかった。植生指数としてはNDVIが一般的に用いられているが、865nmバンドと680nmバンドから求めたNDVI値と樹冠率の相関は低い。ハンノキの樹冠率が低いメッシュでは、草本植生としては釧路湿原最大のバイオマス量であるヨシが繁茂している。図6は、樹冠面積がCASI画素より大きい5m²以上のハンノキだけを選別し、CASI画素から求めたNDVI値と、その近傍画素におけるヨシ群落上のNDVI値を比較したものである。比較を容易とするため、ハンノキのNDVI値のみをソートした。概ねハンノキのNDVIはヨシに比較して高めではあるが明確には分離せず、ヨシのNDVI値がハンノキより上回る場合がある。このため、NDVI値の閾値を設定するのみではハンノキと林床植生を分離することは不可能であり、これが樹冠率との相関が低い原因と考えられる。すなわち植生直後など樹冠率が低く、林床植生の露出が十分ある地域で、かつ両者の成育がピーク時にはNDVIだけで樹冠率を評価することは誤差を生じる可能性があり、樹冠率を正確に推定するためには対象植生の他に林床植生など観測メッシュ内に混入する他の植生の影響を考慮したスペクトルモデルを用いる必要があると言える。

4.2 メッシュサイズと推定式の関係

10, 20, 30m の3条件のメッシュサイズにおいて、最も高い相関係数は465nm バンドと700nm バンドの比演算による値であった。メッシュサイズが大きくなるに伴い樹冠率推定式の係数には僅かな変動が見られる(図7)。この係数の違いを樹冠率の推定値と比較すると、10m メッシュで求めた推定式において樹冠

率を10%とする DN を30m メッシュでの推定式に代入した場合には8.5%となり、以下10m メッシュ式で20.4%の場合に30m メッシュで19.9%、10m メッシュで40.1%の場合に30m メッシュでは41.6%となり、樹冠率に変換した場合の差は僅かである。これは10m メッシュで推定式を作成し、最終的に集計する単位への適用が可能であることを示す。すなわち樹種や林床の植生あるいは傾斜等の条件が変わらない範囲においては、限定された場所で求められた樹冠率推定式を、低空間分解能画像による広域推定に適用可能であるということが出来る。

4.3 トレーニングエリア選定の問題

20m メッシュのデータを用い、サイト1において、465nm と700nm のバンド比演算による樹冠率推定式を求め、これをサイト2における CASI データに適用した。すなわちハンノキが密な状態でのみ推定式を求め、これを用いて疎な状態の推定を行うことになる。図8は縦軸に樹冠率の推定値、横軸に測定値を示している。この例からは、樹冠率が低いプロットでは10%以上の過大推定をしてしまう。逆に推定式を求めた状況に近い、樹冠率の高いプロットでは推定誤差が小さくなる傾向がある。すなわち推定式を求めたトレーニングサイトの樹冠率分布範囲を超える領域での推定には注意が必要であることが分かる。

4.4 衛星シミュレーションデータによる推定精度

ここでは単バンド、NDVI、全てのバンドによる比演算を行い樹冠率との相関係数を求めた。図9に示すように単バンドによる比較では、TM・HRV シミュレーションともに緑から赤にかけての可視域のバンドと樹冠率は高い負の相関を示している。逆に近赤外域のバ

図9 CASI の Spectral mode データを用いた TM と HRV シミュレーションによる樹冠率との相関関係

図7 メッシュサイズ別の樹冠率と CASI バンド1と7の比演算による値との関係

図8 サイト1のみで得られた樹冠率推定式をサイト2の CASI 観測値に用いた場合の推定値

図10 樹冠率推定時における標準誤差の比較

ンドとの相関は低い。更に比演算の結果では、TM の band1 (485nm)/band2 (560nm), 次いで, band1/band3 (660nm) が高い正の相関を得られている。青バンドを持たない HRV の結果では相関係数は TM より低めとなり、単バンドよりも比演算を行った場合の相関係数が低い値となった。一方で NDVI 値と樹冠率の間には高い相関を認めることは出来ず、複数の植生が混在している場合、特定対象の樹冠率を NDVI だけで評価することにはやはり限界があることが判明した。また、CASI の spatial モードによる結果と比較した場合、前者は波長分解能が10nm であり、衛星センサシミュレーションでは60nm 以上の波長分解能となっているが、相関係数が大きく低下することはない。

5. まとめ

航空写真の図化作業により算出した樹冠率をトゥールースとし、航空機センサ CASI を用いてスペクトル情報から樹冠率を推定する可能性について検証した。樹冠率は概ね可視域のバンド出力と負の相関関係にあ

り、近赤外域との相関は低いものとなった。最も樹冠率の推定精度が高かったのは、465nm と700nm の比演算であった。図10は、1) CASI 単バンド、2) 樹冠率推定式によるメッシュサイズ別、3) 衛星センサシミュレーション、の各データを用いて樹冠率を推定した際の標準誤差を比較したものである。CASI の spatial モードで取得した30m メッシュにおける465nm と700nm (ともに10nm の分光幅) の比演算による推定が最小の標準誤差5.2%であった。次いで CASI の spectral モードの連続分光データを用いてシミュレートした LANDSAT/TM の観測バンドの band1 (485 nm)/band2 (560nm) による5.7%, band1/band3 (660 nm) の5.9%の標準誤差であった。CASI の spatial モードのオリジナル波長分解能である10nm データを用いた比演算のバンド組み合わせと TM のバンドをシミュレート (60nm~80nm) したデータによる比演算バンドの組み合わせは、共に青領域と、緑又は赤領域のバンド組み合わせによる樹冠率推定式からよい結果を得ることが出来た。更に、波長分解能 (半値幅) が10倍以上低下しても標準誤差には大きな差として現れ

ず、むしろ中心波長が重要な要因であった。一方で、植生現存量と相関があるとされている植生指数NDVIと樹冠率の間には高い相関は見られなかった。着目すべき対象（森林）と林床植生が生育のピーク状態である場合にはNDVIのみで評価を行うことは困難である。更に、樹冠率推定に有効とされた波長や推定式は、対象森林の樹種、林床植生種、データ取得時期、更に林床の土壌色や湿潤性などがスペクトル情報に大きな影響を与える事が予想され、状況に応じた有効な推定手法・係数等を求めていく必要があると考えられる。

謝 辞

本解析に用いた航空写真及びCASIデータは宇宙開発事業団との共同研究「気候遷移地域における環境変化解析手法の研究」において取得された。また本解析に際しては株式会社パスコの島崎彦人氏に多大なるご協力を頂いた。関係者各位に感謝致します。

(受付日1999.11.12, 受理日2000.3.21)

参考文献

- 1) KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (京都議定書), 1997
- 2) DRAFT CHAPTER 4-IPCC SPECIAL REPORT DEFINITIONAL SCENARIOS ARTICLE 3.3, 1999
- 3) 六川ほか, 温室効果ガス削減問題における今後のリモートセンシングの役割, 日本リモートセンシング学会第25回学術講演会, pp77-80, 1998
山形ほか, 京都フォーレストの計測におけるリモートセンシングデータの高度利用, 日本リモートセンシング学会第26回学術講演会
- 4) 土屋ほか, 空中写真を用いた樹高と林分密度の測定手法と適用例, 日林誌, 81(3), 1999