画素内環境資源情報の抽出

— NOAA/AVHRR データによる積雪領域抽出の事例研究 —

Extraction of Environment and Resources Information inside a Pixel — A Case Study for Snow Covered Area Extraction from NOAA/AVHRR Data —

力 丸 厚*

Atsushi RIKIMARU

1. はじめに

画素内推定は、古くて新しい命題として多く研究されているが、ここでは画素内の占有率が比較的容易に抽出できて、しかも実用的価値の高い分野として NOAA-AVHRR データによる積雪領域の画素内抽出についての研究事例を紹介する。

2. 積雪領域における画素内解析

リモートセンシングデータを用いて積雪領域の最新状態の情報抽出は、領域における融雪量や、流出量を推定し、水資源量の推定に、有意義なデータを提出することが、期待されている。しかしながら、これらの情報を実際に地球観測衛星から収集される際には天候障害が問題となる。特に融雪期には不順な天候が続くことが多い。

LANDSAT, MOS-1などの地球観測衛星の観測周期は、16日に1回である。このため、融雪期の衛星観測日が好天に恵まれる確率は低い。しかしデータが好天で入手できれば、地上分解能が30~50m程度であるため、尾根と谷が分離して確認でき、積雪領域を解析するには十分な精度を有している。

いっぽう気象衛星 NOAA の AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) データは、毎日2回の観測をおこなっているため、晴れ間をぬっての

データ収集の可能性が高い。ところが、NOAA データの地上空間分解能は、最も条件が良い軌道直下点 (Nadir) でも 1 km 程度である。このため日本の地形規模では、尾根と谷の空間的な分離が困難な場所が多く、好天のデータは入手できても解析は容易ではない。

そこで、両者の長所を生かして、工学的な可能性を求める手法を検討した。つまり、気象衛星の特徴である即時性があり空間的に粗いデータと、過去の好天時に観測された高い地上分解能の地球観測衛星のデータを組み合わせて、気象衛星の「画素内情報」を推定できないだろうかということである。

具体的には、モニタリングを目的とする NOAA データ 1 画素 (約 1 km 四方程度) の内部の状態を、マクロピクセルモデルという画素内推定手法と、過去の融雪期の好天日の LANDSAT データを用いて推定しようとするものである。

手順としては、大きく分けて以下の2段階となる。

① NOAA-AVHRR データを用い、画素内の積雪領域の占有率をマクロピクセルモデルというモデルを用いて推定する。この段階では、画素内の積雪占有率は推定できるが、画素内の積雪位置は不明である。

② 算出された画素内のどの位置に雪が存在するかを、過去の MSS データを、融雪段階の異なる複数個組み合わせることで、1 画素内で「より融けやすい領域」と、「より融け難い領域」を序列化することにより、「融雪の履歴」をモデル化し、NOAA-AVHRR データの画素内積雪領域の位置を推定する。

3 画素内の積雪占有率の推定方法

(1) 積雪・非積雪教師領域の抽出

データの前準備として NOAA・AVHRR データか

* (株) エア・グラフ

** 本解説は、1990年9月に土木学会に投稿済の論文原稿の一部を抜粋し、修正を加えたものである。

「写真測量とリモートセンシング」Vol. 30, No. 4, 1991

ら対象地区を切り出し、緯経度に対応するように画像データの幾何補正を実施する。また、MSS データに関しても同様に幾何補正を実行し、NOAA データと MSS データが対応できる画素配列にする。NOAA データ 1 画素内が MSS データ 20×20画素に分割対応するように調整する。

積雪領域を解析するには、まず積雪・非積雪領域として典型的である地区を教師データとして、的確に抽出することが必要である。マルチスペクトル画像データ中から、積雪領域を判別して、安定した精度で積雪・非積雪領域の教師を抽出する方法として、相乗平均による積雪判別指標； I_{snow} を設定し、積雪領域の教師抽出として用いる。積雪領域は、肉眼では白色に見える。これは、分光特性に置き換えて考えると、各波長帯域とも分光反射率が高く、波長に関して平坦な特性を有している。この特性は、ラジオスペクトルメータによる測定で、可視・近赤外光において確認されている。雪面のこのような特性を強調するバンド間演算として、バンド間の相乗平均を採用し、積雪領域らしさの指標としたものである。

積雪判別指標は、NOAA の場合 I_{nsnow} 、LANDSAT の場合 I_{lsnow} とを、それぞれ以下の式(1)、式(2)によって求めた。

NOAA AVHRR 積雪判別指標

$$I_{nsnow} = (B1 \times B2)^{1/2} \tag{1}$$

LANDSAT MSS 積雪判別指標

$$I_{lsnow} = (B4 \times B5 \times B7)^{1/3} \tag{2}$$

用いた波長帯域は NOAA AVHRR の場合 B1：BAND-1可視光および B2：BAND-2近赤外線の 2つ

表一 1 NOAAAVHRR センサの仕様

Band	分解能	検知器	波長域 μm
1	1.1km	Silicon	0.58 —0.68
2	1.1km	Silicon	0.725—1.10
3	1.1km	InSb	3.55 —3.93
4	1.1km	HgCdTe	10.3 —11.3
5	1.1km	HgCdTe	11.5 —12.5

表一 2 LANDSAT MSS センサの仕様

Band	分解能	検知器	波長域 μm
4	57m	Silicon	0.50—0.60
5	57m	Silicon	0.60—0.70
6	57m	Silicon	0.70—0.80
7	57m	Silicon	0.80—1.10

の領域である。また、LANDSAT MSS の場合 B4：BAND-4可視緑色光、B5：BAND-5可視赤色光、B7：BAND-7近赤外線 の 3 領域である。また、両センサの波長帯域等は、表一 1、2 に示している。

いっぽう、非積雪領域の場合においても、積雪判別指標の低域部分を用いることで、抽出が可能である。しかし、低域部分は、地上の土地被覆状態に依存して、多岐にわたった分光特性集合となり、ヒストグラムを調べても、非積雪領域としての、しきい値を決定するのが、なかなか難しい。そこで、実際の画像を人間がモニタして典型的非積雪領域を、会話的に指定して抽出した。

(2) 積雪・非積雪領域の判別基準

画像データ中の任意の地点が、教師領域に比較して積雪領域か非積雪領域かを判別するために、図 1 に示

図一 1 積雪・無積雪の判別基準

す判別図を設定した。積雪領域の教師データ（積雪判別指標）の平均値からの距離を標準偏差 σ_s を単位にして横軸にとり、同様にして非積雪領域の教師データの平均値からの距離を標準偏差単位 σ_n で縦軸にとった。

各軸は各々 1 次元の類似度を示していると考えられることができる。教師データが正規分布をしていたとするならば、平均値 $\pm 2 \sigma$ の区間には測定値の 95.4% が分布すると考えられる。そこで、積雪領域の $|\sigma_s| \leq 2.0$ の区間を積雪 100% の区間とみなすこととした。一方、非積雪領域 $|\sigma_n| \leq 2.0$ の区間は積雪 0 % の領域とみなすことができる。ところで、

$|\sigma_s| \leq 2.0$ AND $|\sigma_n| \leq 2.0$ の区間は、積雪であり非積雪であるということとなり、内容的に矛盾を生じる。そこで、本研究では、解析から除外することとし

た。なお、実際の適用例では、この条件に当てはまるデータは、存在しなかった。
 $2.0 < |\sigma_s| \leq 5.0$ AND $2.0 < |\sigma_n| \leq 5.0$ の区間は、積雪・非積雪の両状態から、遠からず近からずの距離にあると考えられる。そこで、灰色状態の領域として半積雪領域として設定し、50%の積雪領域とした。上

記以外の区間で
 $|\sigma_s| \leq 5.0$ AND $|\sigma_n| \leq 5.0$ の地点を、非積雪領域と判別した。

(3) マクロピクセルモデルの積雪領域への適用法
 積雪領域における画素内推定は、市街地における土

図-3 MPMによる画素内積雪占有率の抽出

地被覆推定に比べて、よりモデルを単純にし、積雪領域と非積雪領域という2区分でモデルの構成が考えられる。この場合積雪領域の占有率が解れば、その補集合である非積雪領域は必然的に求められる。つまり、積雪領域のみに着目した場合、単項目のマクロピクセルモデル (MPM)¹⁸⁾を設定することになる。単項目の場合は、複数項目モデルに比べ、より簡潔なモデルを組むことができ、推定が容易となる。

その内容は、図3に示すように、暫定分類による積雪領域を画素内積雪占有率100%、非積雪領域を0%、半積雪領域50%と初期設定した。画素のマクロ化は、3×3画素をマクロ画素サイズとした。マクロ画素内積雪占有率とマクロ画素内の放射輝度の平均値との間で単回帰モデル式(7)を設定し、回帰係数 k_1 , k_2 をMPM法により求める。

$$Sa = k_1 \times I_{nsnow} + k_2 + \epsilon \quad (7)$$

これにより画素内積雪領域占有率(%) Sa が推定される。 ϵ は回帰誤差を示している。

4. 各画素内の積雪境界位置の推定方法

対象とする流域内において、積雪領域が融雪していく時間的な過程に関して、以下の仮定を設定した。

「ある流域内において、積雪領域が融雪により非積雪領域に変化する空間的および時間的な特性は、原則的には、毎年同様のパターンを繰り返すものとする。」

これにより調査対象時点での積雪の境界位置つまり画素内積雪位置は、過去の当該流域での融雪の履歴状態をモデル化すれば、推定することが可能となる。

(1) 過去のMSSデータの集積

図4aは、過去のLANDSAT MSSデータのT1時期からT2, ..., Tn時期までの積雪領域と非積雪領域の横断面を示した模式図ものである。これらの画像データ中の積雪領域=1, 非積雪領域=0と考えて、各地点ごとに時間軸方向に累積すると図4bのような、積雪頻度データが生成される。ここで、MSS積雪頻度と融雪時期との関係を以下のように仮定した。

「画像中で頻度の高い所は、より雪の融けにくい領域である確率が高く、頻度の低い地域は、より早い時期に融けやすい領域である。」

そこで、積雪頻度を累積することにより、NOAAの画素内に平面的な頻度差のパターンが細密に分布すれ

図-4 a T1~Tn 時期の MSS 積雪領域断面 (LANDSAT MSS)

図-4 b T1~Tn 時期の MSS 積雪頻度断面 (LANDSAT MSS)

図-4 c T1~T 時期の MSS 積雪頻度断面
中間位置内挿処理図 (LANDSAT MSS)

ば、NOAA データの画素内を融雪の発生しやすい地点を、序列化することが可能となる。しかし、累積に用いるデータの件数が少ない場合には、画素内の頻度パターンが粗くなり、詳細な推定がおこなにくくなる。何シーン収集すれば十分な推定精度が期待されるかは、集めるデータが融雪時期のどの段階に位置しているかが、大きく影響する。このため MSS データシーン数が少ない場合は、時期の偏りが少ないことが望ましい。本事例では、比較的バランスよく時間間隔のあった4件のデータを用いている。

データ件数4というのは、モデル化には少ない件数である。そこで、少ないデータ件数で空間的な融雪パターンを抽出しやすくするために、頻度画像データの空間的な内挿をおこなうことで、不足分を補うようにした。図4cは段階状の頻度データを内挿と先鋭化処理した模様を図式化したものである。先鋭化は、尾根状の領域の中央部により頻度が盛り上がるように線形の処理を施す方式とした。

10	12	13	16	21
12	12	15	18	22
13	16	20	25	28
15	18	22	27	32

図5 a 内挿後の積雪頻度データ例

1	2	5	9	14
2	2	7	11	15
5	9	13	17	19
7	11	15	18	20

図5 b 画素内融雪序列データ例

5	20	30	50	70
20	20	40	60	80
30	50	65	85	95
40	60	80	90	100

単位 %

図5 c 画素内融雪率別無雪位置例 (該当融雪率値以下が無雪位置)

95	80	70	50	30
80	80	60	40	20
70	50	35	15	5
60	40	20	10	0

単位 %

図5 d 画素内積雪率別無雪位置例 (該当積雪率値以下が無雪位置)

95	80	70	50	雪
80	80	60	40	雪
70	50	雪	雪	雪
60	40	雪	雪	雪

図5 e 画素内積雪率35%時の場合の積雪位置例

10	12	13	16	雪
12	12	15	雪	雪
13	16	雪	雪	雪
15	雪	雪	雪	雪

図5 f 流域内の平均積雪段階が積雪頻度値にして18以上の場合の積雪位置例

図5 MSS 融雪履歴情報の説明

(2) MSS データの画素内積雪位置のモデル化

積雪頻度は、「対象流域において積雪から無雪状態に移行する際の、相対的な時間順位」を示している。(図5 a 参照) 図5 は仮にマクロピクセルが縦横 4 × 5 の寸法の時のモードを示している。積雪頻度の順位を NOAA データの各 1 画素内ごとに、序列化した知識情報 (図5 b 参照) を作成すれば、MPM による画素内占有率との組み合わせで、各 NOAA 1 画素内ごとの積雪分布位置が推定できることとなる。

画素内融雪位置の序列が判明すれば、画素内の各地点の要素は単位面積を有しているので、画素内積雪占有率と直接換算することが可能となる。図5 c は、画素内の融雪率を与えて無雪地帯となる要素位置を示している。また図5 d は、画素内の積雪占有率を与えて積雪要素位置を得る知識データである。例えば画素内積雪占有率が35%の時35以下の地点は積雪領域であり、それ以外の地点は無雪領域と判定される。(図5 e 参照) 以上のようなアルゴリズムを用いて画素内の積雪位置を推定するモデルが設定される。この段階での推定は画素内のみを考慮しており、第1次推定とする。

5. 流域全体としての積雪境界位置の推定方法

各画素内ごとの積雪分布状態を第4章の手法で推定できれば、流域内における全雪線上の平均積雪頻度値を算出できる。この値は、流域全体の平均的な積雪境界位置を積雪頻度知識情報から求める「しきい値」となる。この値からの推定を、第2次推定とする。第2次推定では、各画素地点は領域全体の融雪の段階の値を基にして推定するため、雲域が流域内の一部に存在しても、周囲の融雪段階値を利用して、雲下領域も推定可能となる。

具体的に流域全体の平均積雪頻度値を求めるには、まず流域内の第1次の積雪境界位置を集計する必要がある。そこで、積雪境界位置のみを抽出する画像データを作成した。これには、第1次の積雪領域推定画像の積雪・非積雪の境目の位置を、画像処理により抽出する。処理内容は、エッジ抽出処理の一般的手法であるラプラシアン処理をもちいることとした。ラプラシアン処理は、具体的には、2次微分係数をもとめる空間フィルタ操作の実行により実現でき、ラプラシアンフィルタは、(8)に示す

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

空間フィルタ処理によって実行できる。積雪境界位置が抽出できれば、各境界位置に対応する MSS 積雪頻度データを、参照・集計し、流域全体の平均値つまり流域全体の平均的な積雪境界位置を算出する。

図5 a には MSS 積雪頻度データの例を示している。図5 f は、流域全体の融雪状態が、MSS 積雪頻度データに換算して18であった場合のモード図を示している。

この段階における推定を第2次推定とする。

6. 画素内積雪境界推定手法の適用

(1) 解析諸元

画素内積雪境界推定手法の適用を、以下のデータ諸元により事例研究を試みた。

a) 積雪領域解析に用いたデータ

画素内推定用データ

データ観測

NOAA AVHRR データ；

1984年4月26日

画像一 1 対象地区 NOAA・AVHRR
フォールスカラー画像 (1984.4.26)

画像一 2 LANDSAT 積雪頻度重ね合わせ画像
(4 シーン)

画像一 3 LANDSAT MSS 積雪頻度内挿画像

画像一 4 MSS/NOAA 画素内融雪序列による
NOAA 画素内積雪境界推定画像
(1 次雪線推定画像)

画像一 5 1 次雪線画像の境界位置抽出画像

画像一 6 2 次雪線推定画像
1 次雪線位置の平均積雪頻度値による

画像一 7 対象地区 LANDSAT TM
フォールスカラー画像 (1984.4.26)

画像一 8 同日 TM データによる積雪領域の検証画
像 (TM データには雪が入っている)

積雪履歴知識モデル作成用データ

LANDSAT MSS データ；	1982年 4月27日
	1979年 5月 4日
	1982年 5月15日
	1979年 5月22日

推定結果の検証用

LANDSAT TM データ；	1984年 4月26日
-----------------	-------------

b) テスト領域 岩手県岩手山麓

北緯 39°45'00"～ 39°55'00"

東緯 140°52'30"～141°07'30"

c) 手法適用の結果

NOAA AVHRR 原画像を画像-1に示す。グリッド間隔は LANDSAT MSS の画素サイズに対応しており、画像の空間分解能が MSS に比較して粗いことがよくわかる。

LANDSAT MSS の積雪頻度を 4 シーン分から求めた結果を画像-2に示す。白い領域ほど、積雪領域である頻度が高いことを示している。画像-2を空間的に内挿した画像が画像-3である。合成したデータ件数が 4 シーンしかないため、積雪頻度の低い領域では、線形内挿の影響で線条のノイズがみられる。

NOAA データの画素内積雪占有率の推定の状態は、同日の TM データにより検証した。その結果 TM データによる集計値と NOAA データによる推定値の相関係数は、 $r=0.907$ と良好な精度であることが、確かめられた。

MSS の融雪の履歴情報による結果を、1次推定結果を画像-4に示した。2次推定のための境界位置抽出結果を画像-5に示し、2次推定結果を画像-6に示した。

また推定精度検証用の同日観測の TM 画像を画像-7に示し、検証用 TM 積雪領域抽出を画像-12に示す。当日の TM 画像との比較検証の結果、不一致点の比率は16.6%であった。(雲域は除いて集計した。)

7. 画素内推定事例の考案と課題

推定誤差が MSS の融雪履歴モデルを用いても17%程度発生しており、比較的精度が低いように思われるが、 3×3 画素のウィンドウで MPM を組む場合、サンプルに用いられる積雪占有率は、0%, 11%, 22%, 33%, 44%, 56%, 67%, 78%, 89%, 100%の9種類に限られる。このため、推定精度もこれらの影響を受けており、 3×3 画素方式では、妥当な精度が得られ

ていると考えられる。また、準備できた MSS データの数が4シーンに限られたため、積雪頻度の低い領域では、序列を決定するためのデータが不足しており、内挿の影響をうけて、ほぼ線形に序列が配置されている。

今後、雲域の少ない融雪期の MSS データを補充することができれば、システムの精度より向上させることが、期待される。また、2次推定手法の可能性が確認されたことにより、流域を代表させる積雪頻度のしきい値を設定すれば、流域に一部に雲域があっても、雲下の積雪境界位置の推定が可能であることが確認された。

本事例では画素を 3×3 のマクロピクセル化して扱うために、地上寸法で $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 区画内の土地被覆状態が積雪占有率100%の場所や0%の場所が、サンプル数としてどうしても少なくなる。反面マクロピクセルの効用で通常では計測しにくい50%前後の領域は数多く採取することが可能である。回帰分析はサンプルデータの直線性を利用しているので、データのレンジが狭くなってしまうことは、好ましいことではない。

今後の改良点として、より精度の向上または安定のためにマクロピクセルモデルの改良形として、マクロピクセルのサイズを可変方式にし、 1×1 , 1×2 , 2×2 画素等のマクロサイズも併用した手法の検討が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 武田, 竹内: ランドサット経年データと積算暖度法による積雪分布の推定, 日本写真測量学会秋季学術講演会, 1983, 10
- 2) 武田, 竹内, 関: NOAA データを用いた北海道全域の積雪水量の推定, 日本写真測量学会年次学術講演会, 1984
- 3) 小池, 高橋, 吉野: 積雪面積情報による流域積雪水量の推定, 土木学会論文集 第375号/II-3, 1985.5
- 4) 力丸, 大嶋, 石田, 川口: NOAA データの画素内推定処理による最新積雪領域抽出手法の研究, 日本写真測量学会, 年次学術講演会論文集 (1987)
- 5) 力丸, 大嶋, 山内, 斉藤: CCD カメラを用いた積雪領域のリアルタイム図化システムの開発, 日本写真測量学会年次学術講演会論文集 (1988.5)
- 6) 力丸, 大嶋: MSS 積雪領域知識ベースによる NOAA データ画素内積雪境界の推定 日本写真測量学会 年次学術講演会論文集 (1989.5)
- 7) 力丸, 向井: NOAA 赤外熱映像からの雲域抽出の研究. 第3回リモートセンシングシンポジウム計測自動制御学会 (1977)
- 8) A. Rikimaru, T. Oshima, T. Oshima, T. Kuwabara, H. Mukai: Detail Estimation of Snow Covered Area

- from NOAA AVHRR data with New Extrac Method of Pixel Inside Information, 27th ISPRS COMMISSION VII, p416-421, Kyoto, Japan (1988)
- 9) B. J. Choudhury: Monitering Regional and Global Vegetation Using Low-Resolution Satellite Data with Special Reference to the Sahel Drought, Space and Drought Management, 39th IAF Congress, Bangalore, India, 1988
- 10) 竹内, 富田: TM データのマルチスペクトル分類における空間的情報の併用の効果, 日本リモートセンシング学会, 第 6 回学術講演会論文集 (1986年12月)
- 11) 新井康平: TM 画像分類におけるトレーニングサンプルの抽出方法, 写真測量とリモートセンシング特集号 II, 日本写真測量学会, 1987
- 12) 竹内, 富田: 衛星画像のスペクトル情報と空間情報を併用した市街地の分類, Vol. 7, No. 4日本写真測量学会, 1988
- 13) H. M. Horwitz, R. F. Nalepka, D. Hyde, P. Morgestern: Estimating the Proportions of Objects within a Single Resolution Element of a Multispectral Scanner, 7th ISRSE pp. 1307-1320, ERIM, 1971
- 14) 力丸, 大嶋, 上條: スペクトル特性によるトレーニングエリアの自動抽出手法の開発, 日本写真測量学会 年次学術講演論文集 (1988.5)
- 16) 力丸, 上條, 大嶋: 画素内分光合成を考慮した土地被覆分類手法の開発, 日本写真測量学会 年次学術講演会論文集 (1987)
- 17) 力丸, 上條, 大嶋: 画素内における分光合成モデルの検証実験, 日本写真測量学会 秋季学術講演会論文集 (1986.10)
- 18) 力丸, 上條, 大嶋: 画素内分光情報の簡易推定手法の開発 (原著論文), 写真測量とリモートセンシング, Vol 27, No. 6, 日本写真測量学会 (1988)
- 19) Calla. o, Raju. G, Rana. S, India's first remotely-sensed satellite data from BHASKARA using "SAMIR", J Inst Electron Telecommun Eng. Vol. 25 No. 8 pp. 321-324, 1979
- 20) Mcginnis. F, Scofield. A, Schneider. R, Berg. P, Satellites as aid to water resource managers, Proc. Am Soc Civil Eng J Water Resour Plann Manage Div, Vol. 106, No. 1, pp. 1-19, 1980
- 21) Hannford. F, Hall. L, Application of satellite imagery to thdrologic modeling snowmelt runoff in the southern Sierra Nevada, NASA Conf Publ No. NASA-CP- 2116 pp. 201- 222, 1980
- 22) Tarpley J D, Schneider S R, Danaher E J, Myers G I An all- digital approach to snow mapping using geostationary Satellite data, NASA conf. Publ No. NASA-CP- 2116 pp. 267-279, 1980
- 23) Gird R S, Snow extent measurements from geostationary satellites using an interactive computer system, NASA Conf. Publ No. NASA-CP- 2116 pp. 255- 265, 1980