

JERS-1/OPS画像とRADARSAT/SAR 画像による讃岐山脈の標高抽出

村井 礼

Height Detection Method Using JERS-1/OPS and RADARSAT/SAR
on the Sanuki Mountains

Hiroshi MURAI

ABSTRACT

This paper will discuss a terrain analysis method using two kinds of remotely sensed data, namely JERS-1/OPS and RADARSAT/SAR which is designed to improve accuracy. There have been many developments in terrain analysis using remotely sensed data. Most of them have employed obtained by two optical sensors. But the data has been influenced by weather conditions because the earth's surface could not be observed through cloud cover. Recently, CCRS launched RADARSAT which had a synthetic aperture radar (SAR) adapted with many incidence angles and spatial resolutions. Using SAR, we can observe the earth surface independently of weather conditions because the sensor can produce radiating electromagnetic waves automatically. However, the accuracy of the results using SAR data was not sufficient because some information was lost due to layover, which is a special phenomenon of SAR. Therefore, I propose a terrain analysis method using OPS and SAR for making use of the advantages of the two sensors and applying the method to real data.

1. はじめに

1994年12月にカナダのCCRS (Canada Centre for Remote Sensing) が打ち上げたRADARSATは、従来の人工衛星と異なり、入射角の異なる合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar : SAR) を搭載している¹⁾。SARによる観測では、これまでの光学センサに比べ、全天候性、昼夜観測性、高分解能などの3つの利点がある。RADARSATにより観測された入射角の異なる2種類のSARデータを用いて、ステレオグラムによる地表面の標高抽出が試みられている²⁾。しかし、SARデータを用いた実験では、画像中にフォアショートニングなどに起因する歪みが生じているため、精度の高い処理を行うのは困難であった。これに対し、光学センサは直下視による観測を行うため、SARに比べると歪みが生じにくいという特徴を有している。それ故、光学センサによるステレオペアを用いるのが理想で

あるが、雲に対する透過性がないため、天候に大きく左右されるという欠点がある。さらに、衛生に搭載できる重量制限のため、角度の異なる2つ以上のセンサを同時に搭載することが困難である。以上の理由から本論文では、光学センサとSARを併用することにより、両センサの特徴をいかして処理精度の向上を図る標高抽出法を提案する。さらに、実際のリモートセンシングに応用することにより、提案手法の有効性の検証を行う。なお、光学センサとしては、日本が打ち上げた地球資源観測衛星JERS-1に搭載されているOPS (Optical Sensor) を用いることとする。

2. SARについて

2.1 SARの概要

SARはレーダ観測の空間分解能を高めるために考案されたシステムである。原理は1950年代にアメ

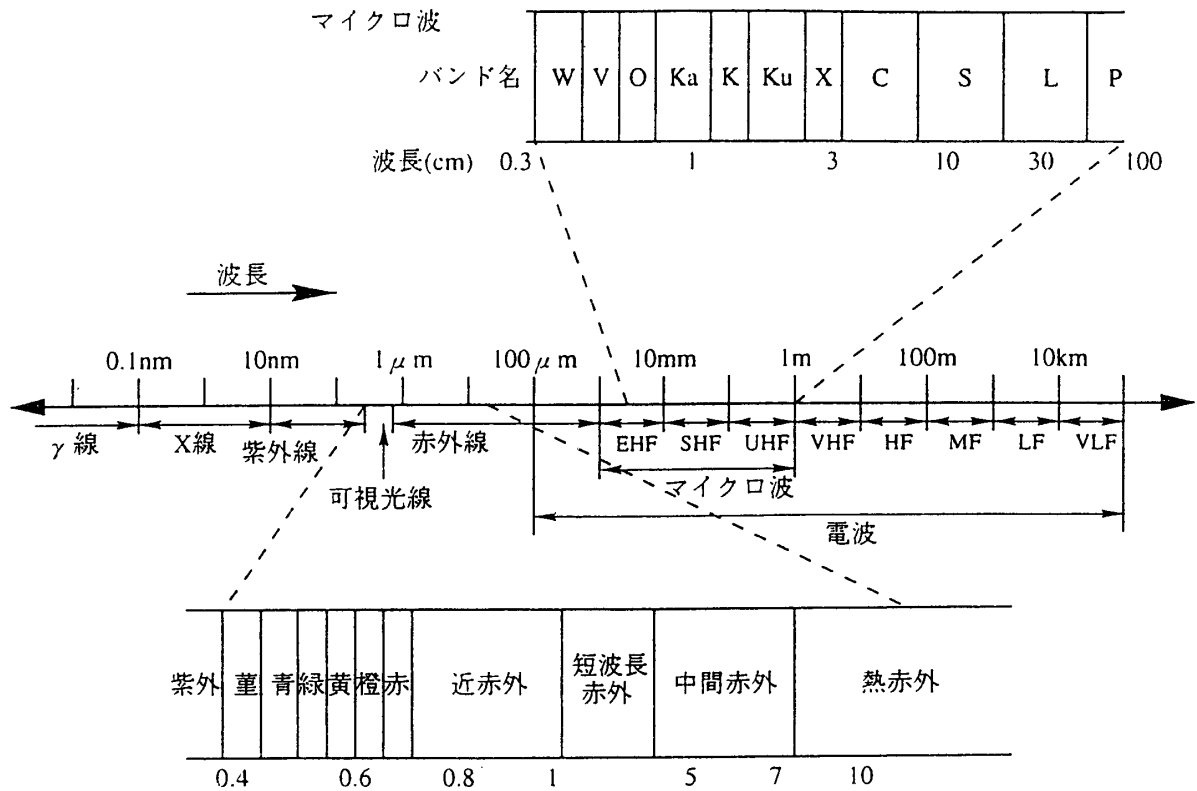


図1. リモートセンシングの利用電磁波波長帯域

リカで考案され、しばらくの間は機密下にあったが、1960年代に入って一般に公開されるようになった。さらに1970年代に入り、リモートセンシング技術が広く関心を集められるようになると共に、SARもリモートセンシングの重要なセンサの一つとして位置づけられるようになった³⁾。1978年に初めて、NASAの海洋観測衛星SEASATに搭載されたSARは、周波数がLバンド、空間分解能が25mであった。リモートセンシングで利用されている電磁波の波長帯域を図1に示す。波長の短い順に、γ線、X線、紫外線、可視光線、赤外線、マイクロ波のように分類される。マイクロ波の内、波長が15cm~30cmのものをLバンドと呼んでいる。SEASATによる観測実験により、衛星軌道上からもSARを用いて観測できることが実証された。その応用分野は地表面や海面の波浪、解氷などの観測が報告されている。

2.2 フォアショートニングとレイオーバ

LANDSATやJERS-1に搭載された光学センサは、いずれも太陽をはじめとして、システムの外

部からもたらされる電磁波のエネルギー強度を測定するいわゆる「受動型」である。OPS画像における陰影は、物体によって太陽光が遮られた部分に形成され、その面積は太陽高度が低いほど大きい。それに対し、SARをはじめとするレーダ・システムは特定波長の電磁波を発信して、地表からの反射成分を受信・記録する「能動型」である。レーダ画像の特性の多くは、起伏偏位と陰影効果に関連して生じている。レーダ画像ではセンサ自体が電磁波のソースとなり太陽と同様の役割を果たしていることから、マイクロ波の到達しない部分はルック方向かつアンテナから見た物体の裏側に限って形成され、陰影部の情報は全く得られない。陰影の規模はマイクロ波が地表に向かって照射されるときに伏角によって変化する。図2に示すように、伏角(α)は軌道高度が小さいほど、ないしは軌道から離れるにつれて減少する。

リモートセンシングの撮像機構に基づき、映像上に物体が特有の幾何学的歪みをもって表現される現象を起伏偏位という。レーダ・システムでは、アン

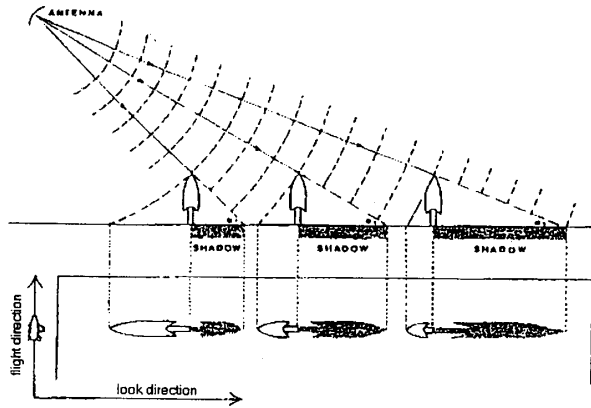


図2 陰影とレイオーバ

テナと地表物体との間の距離に基づいて記録が取られる。したがって、図2に示すように、物体の頂部の方が時間的に先にパルスを受け、それを反射する。その時間が距離の違いとして表示されるため、レーダ画像ではあらゆる物体がルック方向に平行に、かつ軌道に向かって倒れ込むように表現される。この現象は「レイオーバ」と呼ばれる。レイオーバによる起伏偏位は、伏角および地形起伏が大きい場合ほど大きい。伏角は軌道に近づくほど大きくなるので、それともなってレイオーバも増大する。

また、レイオーバの効果によって、レーダ画像では軌道に向かって傾斜する斜面の長さは逆方向に傾斜する斜面よりも短く表現される。この現象は「フォーショートニング」と呼ばれている。図3は、地表物体を二等辺三角形によって単純化し、レイオーバおよびフォーショートニングの効果について模式的に示した物である。左図の三角形 ABC (AB=AC) では、点Aと点B間のパルス到達時間差はAとCの間よりも常に短い。したがって、映像において点Bは点CよりもAに近くプロットされるために、

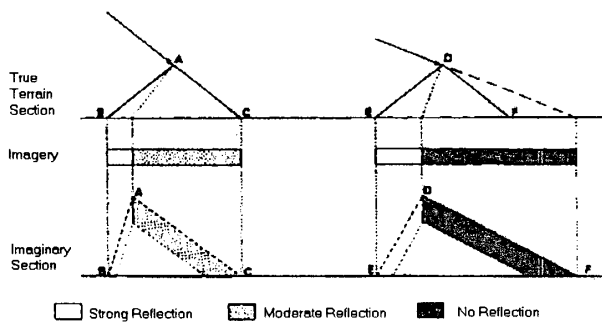


図3 フォーショートニング

辺 AB は辺 AC よりも短く表示される。さらにレイオーバの効果によって、A はしばしば B よりも軌道に近づいてプロットされる。このようにレーダ画像では陰影効果によって山稜を境に相対する斜面のコントラストが著しく明瞭化するために、結果として地形起伏が強調されて表示される。

2.3 入力画像

実験に用いる画像データを図4(a),(b)に示す。処理対象地域は徳島県と香川県の県境にある讃岐山脈である。対象地域の観測に際して、JERS-1とRADARSATの軌道が異なっているので、前処理として軌道差の補正を行う。さらに、各センサについて表1に概要を記す。OPSとSARではセンサの分解能が異なっているので、軌道補正と併せて分解能の補正も行う。

表1. 入力データの概要

	JERS-1/OPS	RADARSAT/SAR
対象地域	讃岐山脈	讃岐山脈
観測日	1993年12月2日	1997年6月4日
画像サイズ	2120画素×1745行	4800画素×4000行
センサ	バンド1, 2, 3	SAR 52
分解能	18m	8m

3. 処理の流れの概略

本報告で提案する標高抽出処理手法を以下に示す。

- Step1. SAR画像のサイズ変換
- Step2. OPS画像の幾何学的変換
- Step3. 標高抽出

3.1 SAR画像のサイズ変換

まず、分解能の高いSAR画像の解像度をOPS画像の解像度にあわせる。初めに、隣接4画素の平均値を用いて1画素に変換し、4分の1サイズの画像に変換する。次いで、式(1)および図5で示す線形補間法を用いて画素数をあわせる。



(a) RADARSAT/SAR 画像



(b) JERS-1/OPS 画像

図4 実験に用いるデータ

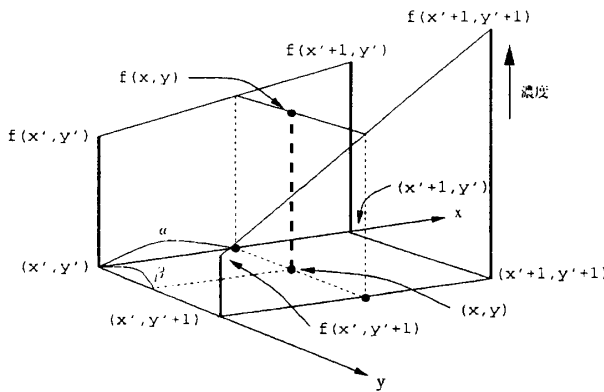


図5 線形補間の概念図

$$\begin{aligned}
 f(x, y) &= (1 - \beta) \{ (1 - \alpha) f(x', y') + \alpha f(x'+1, y') \} \\
 &+ \beta \{ (1 - \alpha) f(x', y'+1) + \alpha f(x'+1, y'+1) \}
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $x' = [x], y' = [y], \alpha = x - [x], \beta = y - [y]$ であり、 $[W]$ は W を超えない最大の整数とする。

3.2 OPS 画像の幾何学的変換

OPS 画像に対し幾何学的変換を行い、SAR 画像との重ね合わせをする。まず、両画像上で対応する点を手動で探す。このとき、SAR 画像上ではフォアショートニングやレイオーバのため、山地の稜線がレーダ側に歪んで観測されるので、高低差の少ない海岸線から対応点を探索することとする。本報告では、全画像中から100点の対応点を求め、これらの対応点をもとに、式(2)、(3)で表される変換式 $g(x, y), h(x, y)$ を決定する。OPS 画像上の点を (u, v) SAR 画像上の点を (x, y) とすれば、2つの座標系間の関係は

$$u = g(x, y) = \sum \sum a_{ij} x^i y^j \quad (2)$$

$$v = h(x, y) = \sum \sum b_{ij} x^i y^j \quad (3)$$

のように多項式で表現できる。本報告では、2次の項まで使うこととし、式(2)、(3)は、それぞれ式(4)、(5)のように表される。

$$\begin{aligned}
 u &= \sum \sum a_{ij} x^i y^j \\
 &= a_{20} x^2 + a_{02} y^2 + a_{11} xy + a_{10} x + a_{01} y + a_{00}
 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 v &= \sum \sum b_{ij} x^i y^j \\
 &= b_{20} x^2 + b_{02} y^2 + b_{11} xy + b_{10} x + b_{01} y + b_{00}
 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 a_{ij}, b_{ij} は共に未知の係数である。式(6)、(7)に示すように、2乗平均誤差法によりこれらの未知係数を求め、変換式 $g(x, y), h(x, y)$ を決定する。

$$\begin{aligned}
 e_u &= \sum_{n=1}^{100} \{ u_n - a_{20} x^2 - a_{02} y^2 - a_{11} xy - a_{10} x - a_{01} y - a_{00} \}^2
 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 e_v &= \sum_{n=1}^{100} \{ v_n - b_{20} x^2 - b_{02} y^2 - b_{11} xy - b_{10} x - b_{01} y - b_{00} \}^2
 \end{aligned} \quad (7)$$

3.3 標高抽出

図6に示すように、OPSの入射角を 0° 、SARの入射角を θ° とする。高さ H にある稜線上の点はOPS画像の点Pはであり、SAR画像上では点Qに現れるとする。このとき、RADARSATから点P

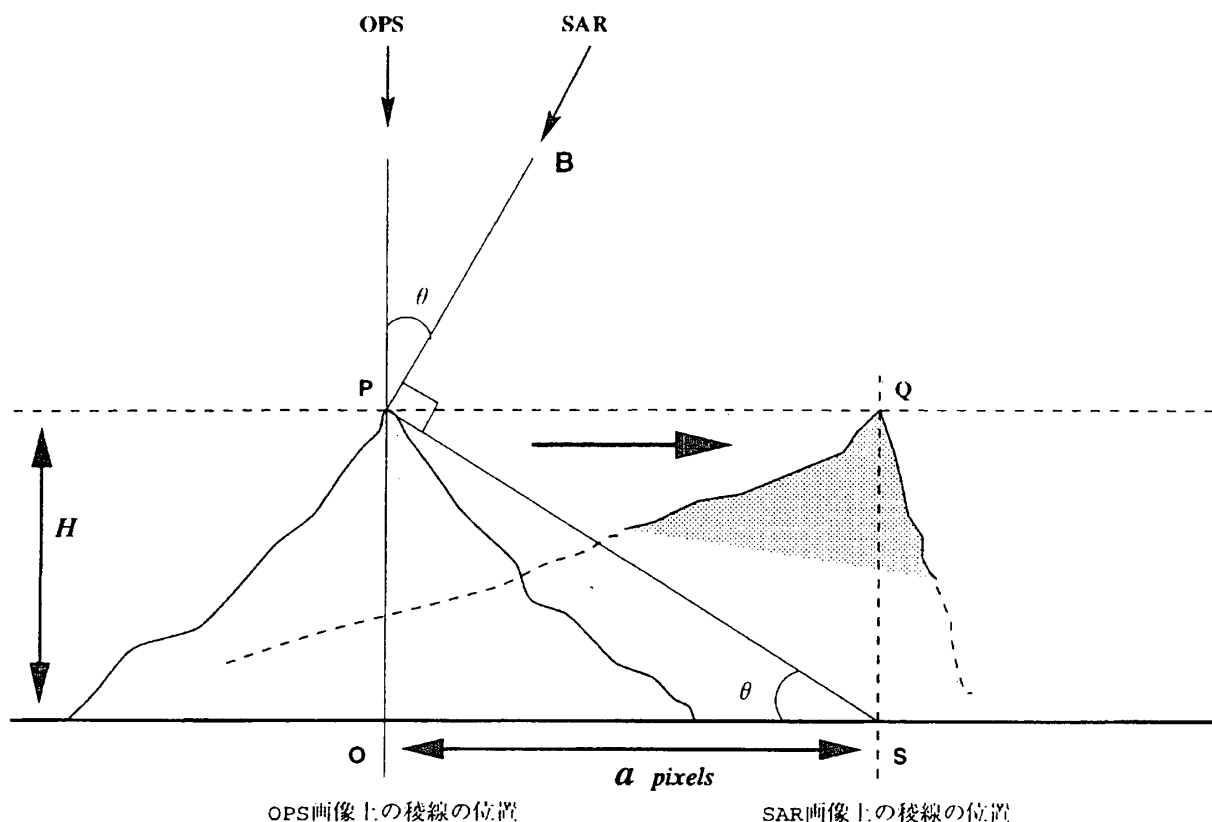


図6 OPS画像とSAR画像における稜線観測位置の違い

までの距離は斜辺PSに比べると十分長いので、 $\angle BPS=90^\circ$ 、 $\angle PSO=\theta$ 、とみなすことができる。さらに、画像間での対応点のずれOSをa画素とすれば、対応点での高さHは式(8)で求められる。

$$H = \tan \theta \times a \times \text{解像度} \quad [m] \quad (8)$$

しかし、厳密には1画素毎に入射角が異なるため、1画素毎に入射角を求め、各画素の高さの和を全体の高さHとする。

$$H = \sum_{i=n}^{n+(a-1)} \{\tan \theta_i \times \text{解像度}\} \quad [m] \quad (9)$$

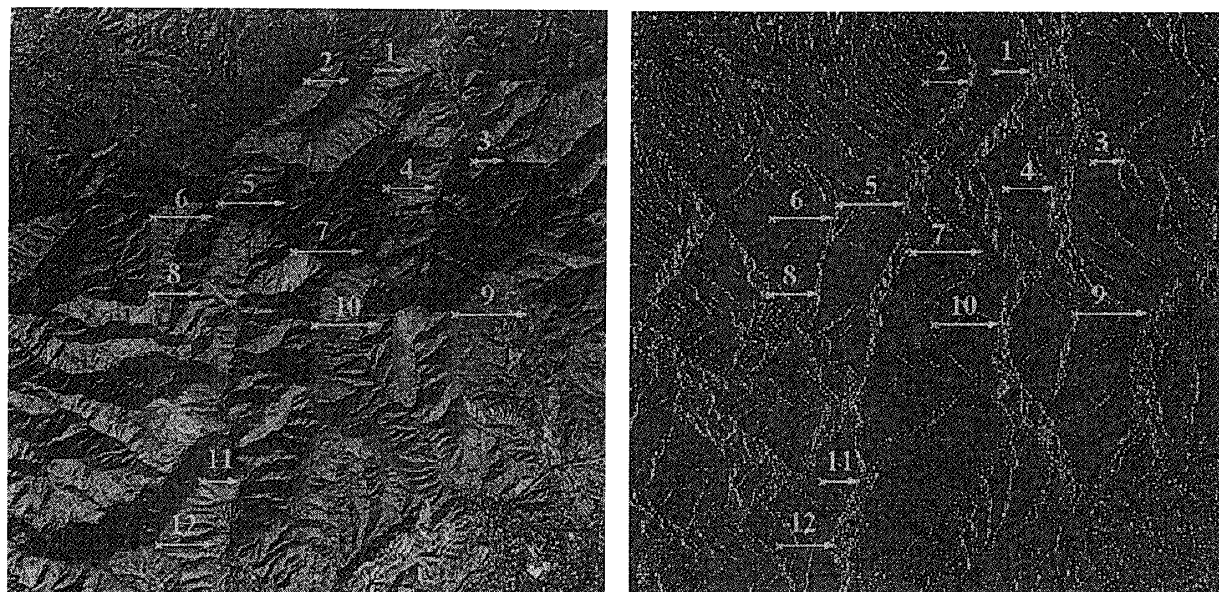
ここで、nはOPS画像上での点Pのx座標、 θ_j は $x=i$ での入射角を表す。

4. 実験結果および考察

表2は稜線上の12個のサンプル点において、それぞれ、等高線図から読み取った実測値、提案手法により標高を算出した値、および、それらの誤差を示したものである。また、各画像におけるサンプル点

の位置ずれを図7上に示す。OPS画像上で×で示されている点が、フォアショートニングなどによりSAR画像上でどれだけ位置ずれを生じているかを矢印で示す。稜線の探索において、SAR画像では、稜線部分は比較的高い濃度値で曲線状に現れる性質がある。一方、OPS画像では山地領域の明部と暗部が明確に判読できるため、それらの境界部分より稜線を明確にたどることが可能である。これらの特徴を用いて稜線上の対応点を探索し標高を算出した結果、測定誤差は小さく、画像間の稜線の位置ずれから標高を求めることが可能であると言える。今回の実験では、OPS画像の分解能が1画素あたり約18mであり、かつ、図7に示される範囲のSARの入射角が $[24.3^\circ \sim 26.7^\circ]$ であることから、1画素毎に約8~9mの高さの誤差が生じている。このことから、 $\pm 10 \sim 20m$ 程度の誤差は、稜線の判読ミスによる誤差であると考えられる。

また、OPS画像上での稜線探索において、本報告では山地領域の明部と暗部の境界を稜線として判読した。しかしながら、頂上付近がなだらかな場合



(a) OPS 画像上のサンプル点

(b) SAR 画像上でのサンプル点

図7 処理結果

表2. 標高抽出結果 (単位はm).

サンプル点(No.)	実測値	算出値	誤差
1	340	334	-6
2	420	413	-7
3	280	277	-3
4	458	461	+3
5	610	618	+8
6	560	560	-1
7	660	655	-5
8	440	445	+5
9	690	694	+4
10	600	609	+9
11	350	343	-7
12	510	525	+15

は稜線が大きくずれるため、稜線判読において誤差が生じることになる。この場合、正の方向に誤差が

増えることになる。それゆえ、各画像において、稜線を正確に抽出することにより、さらに処理精度の向上を図ることが可能となる。

参考文献

- [1] 資源観測解析センター, “資源探査のためのリモートセンシング実用シリーズ5 合成開口レーダ (SAR)”, 千曲秀版社, 1992.
- [2] 杉村俊郎, 田中總太郎, 亀田和昭, “RADARSAT/Fモードのステレオ SAR データによる標高測定実験”, 第23回日本リモートセンシング学会学術講演会論文集, pp. 19-20, 1997.
- [3] 資源観測解析センター, “資源探査のためのリモートセンシング実用シリーズ別冊用語辞典”, 千曲秀版社, 1989.