

**衛星搭載合成開口レーダと光学センサーによる
長岡市周辺地域の稲の作付面積推定**

向井幸男・力丸 厚・高橋 一義・菅原航平

衛星搭載合成開口レーダと光学センサーによる長岡市周辺地域の稲の作付面積推定

向井幸男*・力丸 厚*・高橋 一義*・菅原航平**

Estimation of rice acreage by satellite borne Synthetic Aperture Radar and optical sensor data

Yukio MUKAI*, Atsushi RIKIMARU*, Kazuyoshi TAKAHASHI*, Kouhei SUGAWARA**

Rice is the most important crop in Japan and widely planted in the whole world. The rice acreage is surveyed every year by the Statistical Information Office under the Ministry of Agriculture, Forestry and Fishery, requiring a great deal of labor. In this paper, the rice acreage around Nagaoka city area is estimated using ERS-2 SAR data acquired on May and June and Landsat TM data acquired on August. SAR data are obtained at the time of rice planting season and about one month after it, and TM data are just before harvesting during the rice growing season. As SAR can observe through clouds, SAR data can be obtained at the rice planting season, which falls at the rainy season. The rice acreage estimated by satellite data was compared with that surveyed by Niigata Statistical Information Office. The error was small for the flat-terrained area (3.6%), but large for the hilly area (9.1%). The reason for this is considered to be that SAR data were affected by the incidence angle to the ground and the incidence angle may be different in the hilly area. It is found that SAR data acquired at rice planting season and optical sensor data acquired during rice growing season are effective to estimate the rice acreage for the flat area. Hereafter it is necessary to study for improving the accuracy for the hilly area such as correction processes of the incidence angle.

Key words : Satellite data, SAR and Optical sensor, Rice acreage estimation

1. はじめに

稲は日本で最も重要な農作物であり、日本全国で広く作付けされ、その作付面積、収穫量などが毎年、農林水産省の農林水産情報センターで調査されているが、その作業には多大の時間と労力が消費されている。衛星データを稲の作付面積調査に利用することが出来れば、大幅な調査労力の軽減が期待できる。

衛星データを稲の作付面積調査に利用する研究はすでに多く行われている^{1)~3)}。竹内¹⁾らは稲の各生育時期のRADARSAT、ERS-1およびJERS-1搭載の合成開口レーダ(SAR: Synthetic Aperture Radar)データの後方散乱係数(σ^0)を調べ、田植え期前後で σ^0 が大きく変化して、また波長ではCバンドデータが有効であるとし、田植え期前後の2~3時期のRADARSATおよびERS-1 SARデータを使って、稲の作付面積を推定して統計値と比較し良い結果を得た。また村上²⁾らは田植え期直後と1ヵ月後のSPOT HRVデータから算出されたVSW指数を使って、水稻作付面積を推定し、誤差率は-2%であったとしている。石橋³⁾はRADARSAT SARデータを使い、圃場の大きいところではよい結果

を得たとしている。これらの研究はSARや光学センサーデータを単独で使用したものであるが、本研究は稲の作付面積推定にSARと光学センサーデータを併用して利用しようとするものである。

稲の作付面積推定に衛星データを利用する場合SARでも光学センサーでも田植え期の観測データが有効であるが^{1),2)}、日本では田植え期は梅雨期で、良好な光学センサーデータは得られにくい、雲を透過して観測可能なSARデータは得られやすい。しかし田植え期のデータだけでは水田と砂地などの小さい地域との判別が困難である。田植え期から収穫期までの間に水田を観測した光学センサーデータを併用すれば水田の判別精度が向上すると考えられる。本研究は長岡市周辺を対象領域として5月および7月観測のERS-1 SARデータと8月観測のTMデータを使って、対象領域の稲の作付面積を推定し、領域内の14市町村を対象とした統計情報データを使ってその精度を評価した。

田植え期から収穫期までの間には光学センサーによる観測データが得られる確率が高いと考えられる。天候の悪い田植え期に観測されたSARデータと、その後の収穫期までの間に得られた光学センサーデータを併用することにより、精度の高い稲の作付面積推定が出来れば、この方法は衛星データを利用した稲の作付面積推定システムとして実用性が高いと考えられる。

原稿受付：平成14年5月24日

*長岡技術科学大学環境・建設系

**富士通新潟システムズ

表2 使用した衛星データ

データ	センサー	観測日	パス-ロウ	処理レベル
Cバンド SAR	ERS-2 AMI	1998年5月7日	67-238	レベル 2.1
Cバンド SAR	ERS-2 AMI	1998年7月16日	67-238	レベル 2.1
光学センサー	ランドサット TM	1999年8月1日	108-34	バルク補正

2. 対象領域と使用データ

長岡市を中心とした中越地区の一部および北魚沼郡の一部を含む北緯36°55' と37°35' および東経138°15' と139°15' の緯経度線で囲まれた約74km×89kmの範囲を対象領域とした。対象領域には表1に示す14の市町村が含まれている。農業地域は宅地率、耕地率、林野率によって、都市的農業地域、平地農業地域、中間農業地域および山間農業地域に区分され、表1において、グループ1は都市的および平地農業地域であり、グループ2は中間および山間農業地域であり、傾斜の多い地域も含まれている。

研究に使用した衛星データを表2に示す。ERS-2 AMIは欧州宇宙機関が打ち上げた衛星ERS-2に搭載されているCバンドSARである。5月7日は田植え直後であり、7月16日は稲がある程度成長した時期であり、竹内ら²⁾によれば、 σ はかなり大きくなっている。光学センサーデータとしては1999年8月1日にランドサット5号により観測されTMデータを使用した。98年の7、8月に観測したデータがあれば良かったが、良好な観測データが得られなかったため、転作の問題があるが、99年のデータを使用した。

3. 研究の手順

研究の手順を図1に示す。まずSARデータの標高による歪を補正し、対象領域の幾何補正画像を作成した。TMデータについても幾何補正処理を行い、SARとTMデータの重なった幾何補正画像を作成し、その画像を使って教師有り最尤法分類により、水田の領域を抽出した。国土数値情報から作成した市町村別の行政区界を重ね合わせ、対象領域内の表1に示す14の市町村別の

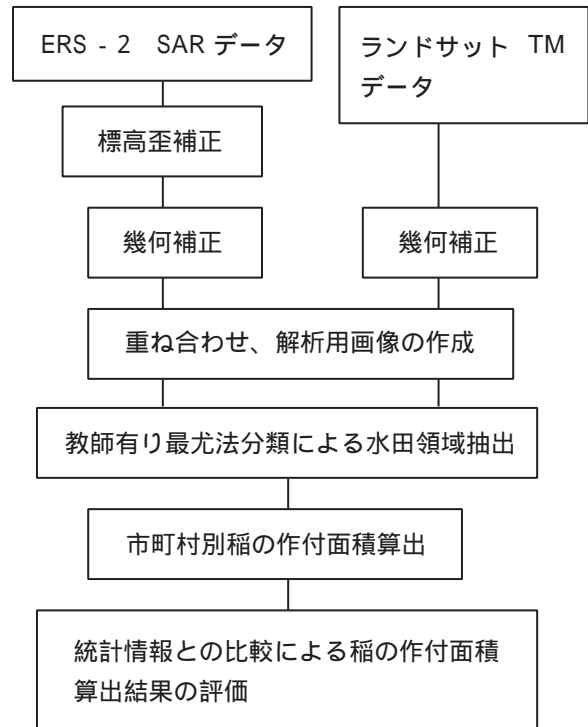


図1 研究の手順

表1 対象領域内の市町村の農地の傾斜による区分

グループ	宅地率、耕地率、林野率等による区分	市町村
1	都市的地域、平地農業地域	長岡市、柏崎市、小千谷市、越路町、三島町、与板町、刈羽村
2	中間農業地域、山間農業地域	栃尾市、川口町、出雲崎町、西山町、山古志村、広神村、守門村

稲の作付面積を算出し、新潟統計情報事務所の調査データと比較し、その精度を評価した。

4. SARデータの標高歪補正

SARは衛星の進行方向と直角な方向に電波を送出し、その反射信号を受信することにより、衛星の軌道に沿った領域の2次元の情報を得る。電波の送出方向が距離方向であり、衛星の進行方向が方位方向であるが、SARで得られる距離情報は衛星と目標との直線距離

(スラントレンジ)であるため、地表面に起伏がある場合、標高による歪(フォアショートニングあるいはレイオーバーという⁴⁾)が生じる。

本研究では文献⁵⁾に示す方法により標高歪を補正した。その方法を図2に示す。図2において標高hの点 P_h は歪補正された画像上では P_{ho} に表示されるのが正しいのであるが、フォアショートニング歪によりレベル2.1の画像ではPに表示されている。地球の半径R, 衛星高度H, 画像中心への入射角 θ_i (またはオフナディア角 θ_{on})、)が与えられ、そして P_h の標高hが分かれば、歪補正量 PP_{ho} を計算することが出来る。 PP_{ho} が分かればその距離に相当する画素数が分かり、Pの位置にある画素のデータを P_{ho} の位置にある画素のデータとして持つてくることにより歪補正がなされる。ここでは $R = 6378\text{km}$ 、 $H = 785\text{km}$ 、入射角 $\theta_i = 23^\circ$ 、標高データとして50m間隔の国土数値情報のDEMを用いて、標高歪の補正を行った。

5. 解析用画像の作成

標高歪の補正を行ったSARデータとTMデータをそれぞれ地上基準点(GCP: Ground Control Point)を使って地形図に重ね合わせる処理を行い、アフィン変換式を用いて対象領域の幾何補正画像を作成した。幾何補正画像の1画素の大きさは30m、画像サイズは2,900ピクセル×2,300ラインとした。幾何補正した2時期のSARデータとTMデータから水田抽出の分類には表3に示す7チャンネルのデータを使用した。CH 1, 2はERS-1 SARの5月と7月のデータ、CH 3, 4, 5はTMのバンド2, 3, 4、CH 6, 7はTMデータから作成したNDVI(植生指標)とBI(裸地指標)である。NDVIとBIは植生と裸地に関する指標で以下の式により計算される。

$$NDVI = (B_{NIR} - B_{RED}) / (B_{NIR} + B_{RED}) \quad (5.1)$$

B_{NIR} 、 B_{RED} はそれぞれ近赤外と赤色帯のバンドでTMのバンド4と3を使用した。実際の画像処理では負の値を避けるため次式を使用した。

$$NDVI = (B_{NIR} - B_{RED}) \times 100 / (B_{NIR} + B_{RED}) + 100 \quad (5.2)$$

$$BI = B/A$$

$$B = (B_{RED} + B_{MIR}) - (B_{BLU} + B_{NIR}) \quad (5.3)$$

$$A = (B_{RED} + B_{MIR}) + (B_{BLU} + B_{NIR})$$

B_{MIR} 、 B_{BLU} は中間赤外及び青色帯のバンドでTMのバンド5と1を使用した。同様に実際の画像処理では次式を使用した。

$$BI = B \times 100 / A + 100 \quad (5.4)$$

NDVIやBIは森林や都市域の識別に有効であり、これらを使用する事により分類精度が向上すると考えた。

表3 分類に用いたデータ

チャンネル	使用データ
CH 1	ERS-1SAR 5/7
CH 2	ERS-1SAR 7/16
CH 3	TM バンド2
CH 4	TM バンド3
CH 5	TM バンド4
CH 6	NDVI (植生指標)
CH 7	BI (裸地指標)

6. 水田領域の抽出

上で述べた解析用画像を使って、教師有り最尤法分類により土地被覆分類を行い水田の領域を抽出した。設定した分類項目は、水稻1、水稻2、畑、草地、高密度市街地、低密度市街地、後方散乱が大きな山間部、後方散乱が小さな山間部、水域である。水稻1と2を設けたのは、7月のSARデータで、水田の後方散乱が比較的大きい処と小さい処があったためである。

多チャンネルのデータによる土地被覆分類は、各分類項目の各チャンネルの反射特性の違いを利用して分類する。代表的な分類項目の水稻1と高密度市街地のトレーニングデータの分類に使用した衛星データの各チャンネルの平均値を図3に示す。CH 1と2はSARデータで、市街地ではSARの後方散乱は高くなるので、水稻1の値は低く、高密度市街地の値は高くなっている。水稻1においてCH 2がCH 1より高くなっているのは、7月になると稲が成長し、それだけ後方散乱が大きくなっているからであると考えられる。CH 3, 4は可視で高密度市街地が高く、CH 5は近赤外で水稻1が高くなっている。CH 6と7はそれぞれ植生と裸地の度合いを示す指標で、CH 6では水稻1が高密度市街地より高くなっているが、CH 7では逆になっている。

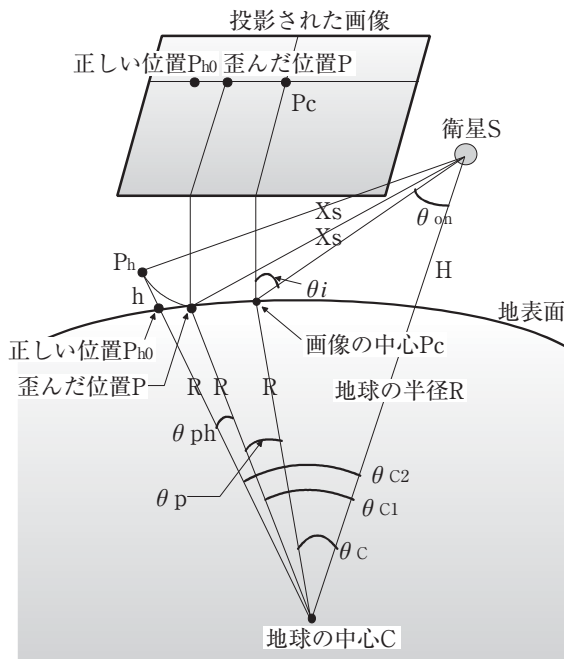


図2 SARデータの標高歪補正

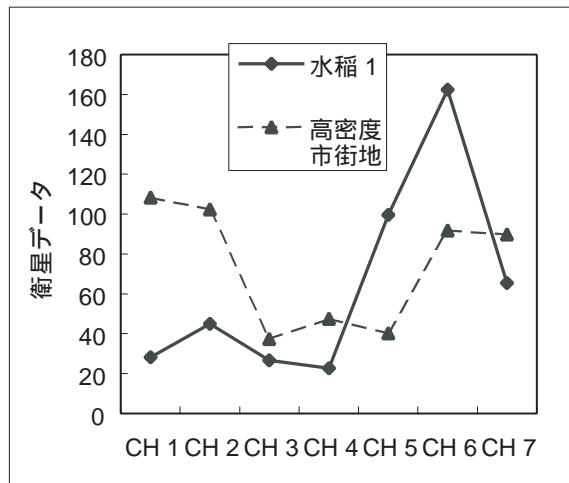


図3 水稲1と高密度市街地のトレーニングデータの分類に使用した衛星データの各チャンネルの平均値

7. 稲の作付面積算出結果と考察

7.1 稲の作付面積の算出結果

国土地理院の数値地図25000（行政界・海岸線）のデータを使って、対象領域内の市町村の行政区画の画像を作成し、上で作成した分類画像と重ね合わせ、水稲1と2の市町村ごとの面積を算出した結果を表4に示す。表4には北陸農政局新潟統計情報事務所で調査さ

れた平成10年度のそれらの市町村の稲の作付面積と、その値に対する衛星による推定値の誤差を示す。図4に表4のグループ1（上）と2（下）の市町村別の衛星データによる推定値と統計情報事務所で調査された値との関係を示す。

7.2 考察

(1) グループ1の都市的・平地農業地域の市町村単位の誤差は柏崎市の他はかなり小さいが、グループ2の中・山間農業地域の市町村単位の誤差がかなり大きい。しかしグループ2の誤差が大きいのは、市町村単位の水田の面積が比較的小さいためでもあり、グループ1と2の市町村をそれぞれ合計した場合の誤差はグループ1で3.6%、グループ2で9.1%である。図4を見ると、グループ1（上）の場合回帰直線の係数は1に近く、また相関係数も0.995で殆ど1に近い。

(2) 上の結果から誤差は観測地域の傾斜に関係があると思われる。国土数値情報の標高データを使って、衛星データで水田と判別された領域の傾斜角の平均値を市町村単位で計算し、誤差の絶対値との関係を調べてみた結果を図5に示す。相関係数は0.72で両者は高い相関があることが分かる。これはSARデータを使用しているため、傾斜の多い山間部で誤判別が多く発生していると考えられる。SARデータ使用による山間部での誤り発生要因としては以下のことが考えられる。(a) SARの反射信号は地表面への入射角によって異なり、山の斜面では平地と入射角が異なる。(b) 標高歪の補正時、電波の照射面の斜面のデータが一部近傍データの内挿により補正されている。(b)の対策は難しいが、(a)に対しては、標高データを使った入射角の補正処理が有効と考えられる。

(3) 誤差が大きい地域（柏崎市と山古志村）について、水田の判別画像を見ながら、誤差の要因を調べてみると、山の尾根の部分や、標高が高い（450m）山の斜面など、水田がないと思われる地点に水田が判別されているケースがあった。これは、標高の高いところでSARとTMデータの重ね合わせがずれてきている（この場合尾根のところですれやすい）ことも考えられる。今回はTMデータと標高歪補正を行ったSARデータについてそれぞれ幾何補正を行い、重ね合わせ画像を作成したが、その重ね合わせ画像について、さらに標高を考慮した重ね合わせ処理が必要かもしれない。

表4 市町村別の衛星データによる推定値および統計情報事務所で調査された稲の作付面積と誤差

グループ	市町村	衛星データによる推定値 (ha)	統計情報事務所での調査値 (ha)	誤差 (%)
1	長岡市	4751.1	4730	0.4
	越路町	931.3	990	-5.9
	三島町	567.7	560	1.4
	与板町	432.3	443	-2.4
	小千谷町	2200.9	2180	1
	柏崎市	3550.2	3070	15.6
	刈羽村	471	462	1.9
	グループ1 合計	12904.5	12435	3.6
2	栃尾市	1791.1	1490	20.2
	川口町	398.7	419	-4.8
	出雲崎町	524.8	378	38.8
	山古志村	246.2	166	48.3
	広神村	556.8	750	-25.8
	守門村	538.5	514	4.8
	西山町	553.4	476	16.3
	グループ2 合計	4056	3717	9.12

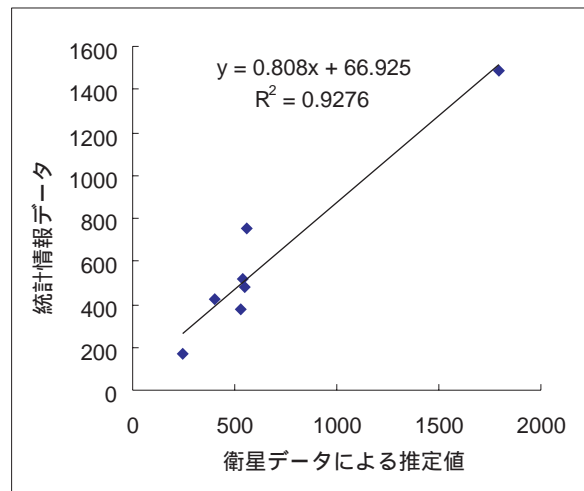
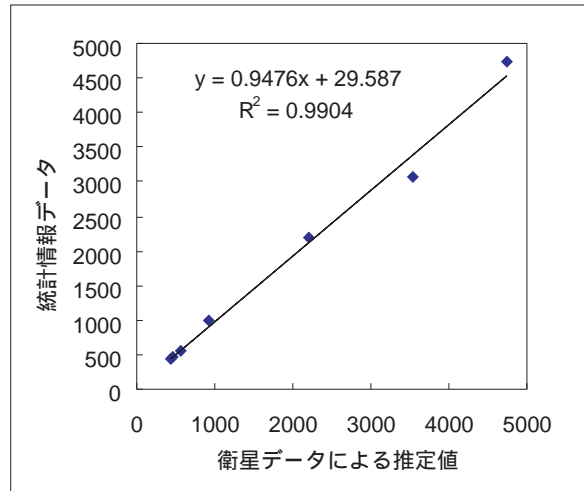


図4 市町村別の衛星データによる推定値と統計情報事務所で調査された値との関係 上(グループ1) 下(グループ2)

8. まとめと今後の課題

8.1 まとめ

本研究ので得られた知見をまとめると以下のようになる。

- (1) 田植え期とその約1ヶ月半後に観測された時期のERS-2 SARデータと田植え期から約2ヶ月後に観測されたランドサットTMデータを使って、教師有り最尤法分類により水田の領域を抽出した。分類には2時期のSARデータ、TMのバンド2,3,4およびTMデータから作成したNDVI(植生指標)とBI(裸地指標)の7バンドのデータを使用した。長岡市周辺の14の市町村について、衛星データから推定した稲の作付面積と新潟統計情報事務所で調査されたデータを比較してみると、都市的・平地農業地域では精度がよかったが(誤差3.6%)

中・山間部の農業地域では精度がよくなかった(誤差9.1%)

- (2) 水田と判別された地域の傾斜角の市町村ごとの平均値と誤算との間には高い相関($R=0.72$)があり、SARデータを使用した場合、傾斜の大きい山間地域で誤差が大きくなる事がわかった。これはSARの反射信号が地表面への入射角によって異なり、山の斜面では平地と入射角が異なることおよび、標高歪補正処理による斜面データの変動などが原因と考えられる。
- (3) その他の誤差の要因について調べてみると、山の尾根の部分や標高の高い山の斜面などで、水田が誤って判別されていた。山間部で誤差が大きい原因として、SARデータの入射角の問題以外に、標

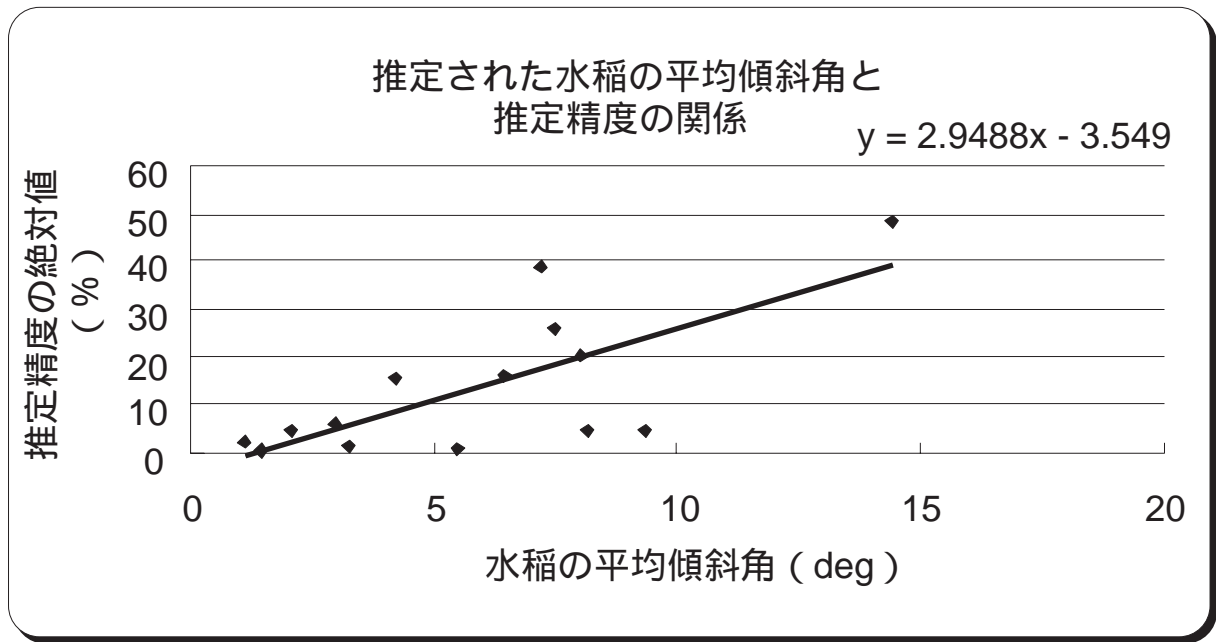


図5 市町村別の衛星データで水田と判別された領域の傾斜角の平均値と衛星データによる推定誤差（絶対位置）との関係

高の高い部分でSARとTMデータの重ねあわせがずれてきていることも考えられる。

8.2 今後の課題

- (1) 本研究では田植え期とその後の2時期のSARデータを使用した。田植え期の1時期のSARデータとその後の稲の成長期に観測された光学センサーデータを使用して、稲の作付面積算出の精度を調べて見る必要がある。また本研究はCバンドSARデータを使用した。LバンドSARデータを使って同様の調査を行って見る必要がある。もし本研究と同様の精度が得られれば、衛星データによる稲の作付面積把握システムの実用化の進展が大いに期待される。
- (2) 中・山間部地域の精度がよくなかったが、標高データを使ったSARデータの山間部の斜面の入射角補正方法を検討し、その有効性について研究してみる必要がある。
- (3) 山間部で誤差が大きい原因として、SARデータの入射角の問題以外に、標高の高いところでSARとTMデータの重ねあわせがずれてきていることも考えられる。SARデータとTMデータの重ねあわせ画像について、さらに標高を考慮した重ねあわせの補正処理の有効性について調査してみる必要がある。

- (4) その他山間部の精度向上策として、(a) 既存の農地の傾斜区分データを使用した地形補正、(b) 標高データを使ってある程度以上の標高の水田を除く処理等が考えられ、それらについて調査してみる必要がある。

参考文献

- 1) 竹内省司、小西智久、菅雄三、小黒剛成、写真測量と衛星搭載SARデータによる水稲作付面積の早期推定、写真測量とリモートセンシング、VOL.39, No. 4, pp.25-30, 2000
- 2) 村上拓彦、斎藤元也、小川進、石塚直樹、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, Vol.21, No.4, pp.330-341, 2001
- 3) 石塚直樹、斎藤元也、村上拓彦、SARによる水稲作付面積の推定、日本リモートセンシング学会 第28回学術講演会論文集, pp.53-54, 2000
- 4) 飯坂譲二監修、合成開口レーダ画像ハンドブック、日本写真測量学会編、朝倉書店、pp.94-95、1998
- 5) T. Sugimura, S. Tanaka and T. Seno, AN IMPROVEMENT OF FEATURE EXTRACTION WITH SUPERIMPOSED IMAGE OF TM AND RADARSAT GEO-CODED DATA, Proceedings of Twelfth International Conference and Workshop on Applied Geologic Remote Sensing, Volume II, pp.237-244, 1997