



高分解能 X バンド衛星 SAR 画像による水稻の生育量の解析手法

木村 篤史 (株式会社パスコ)

1. はじめに

米は私たちの食生活を支える主要な食糧である。主食の米の安定した供給には、米を生産する水稻の生育量を把握し供給対策を検討することが重要である。水稻の生育量を把握するために実施されている調査は、サンプリングした圃場を人の手により実測しており、作業時間、および、作業効率の改善が望まれる。このような中で、近年、光学衛星リモートセンシング技術を用いた広域にわたる水稻の生育量を効率的に把握する研究が行われており¹⁾、水稻の生育量情報の緑の葉面積指数 (GLAI) およびバイオマスの反射率を利用した方法が試みられている。しかし、熱帯や温帯原産の水稻は、雨が多い時期を中心に栽培されているため、光学衛星リモートセンシングでは雲の影響により撮影が行えない場合が多い。よって、天候に左右されないリモートセンシング技術である衛星搭載型の SAR (Synthetic Aperture Radar) による観測が期待されている²⁾。

水稻の生育量の把握に SAR を利用する場合、光学衛星リモートセンシングのように反射率測定から植生指数 (NDVI) のような生育量に関する情報を得ることはできない。水稻は生育が進むにつれて、茎数、草丈、植被率など、稲体の形状が変化する。この形状の変化は、SAR の後方散乱係数の変化として捉えることができると考えられる。SAR の後方散乱係数と生育量の関係に関しては、後方散乱係数から草高およびバイオマス量を推定する研究³⁾、水稻の草高や重量を指数に変換した値を

推定する手法⁴⁾、および、葉面積指数 (LAI) を推定する手法⁵⁾が C バンドデータを用いて研究されている。マイクロ波は波長が短い方が葉や茎の透過が小さく、また、葉の重なりによる後方散乱係数の変化が大きく、草冠の群落構造の変化が測定できる。C バンドより波長の短い X バンドデータを用いた研究では、水稻圃場の後方散乱係数の時系列変化が報告されている^{6) 7) 8)}。しかし、これらの研究では、生育量と後方散乱係数の分析は行われているが、異なる偏波、異なる入射角の後方散乱係数と水稻の生育の進行による稲体の形状の変化との定量的な把握検討が行われていない。

そこで、本研究では、異なる入射角、異なる偏波の X バンド SAR を用いて、生育段階ごとの生育量と後方散乱係数の関係を定量的に把握することを試みた。まず、水稻の生育量、SAR の入射角、SAR の偏波をそれぞれ変化させ、生育量と後方散乱係数との傾向を比較検討した。次に、茎数が最大になる時期 (以後、最高分げつ期)、出穂する時期 (以後、出穂期) を指標とした生育段階ごとに、生育量と後方散乱係数との関係を検討した。そして、異なる偏波、異なる入射角の後方散乱係数と水稻の生育の進行による稲体の形状の変化および SAR による生育量の把握可能性について考察した。

2. 研究対象圃場と使用データ

2.1 使用データの概要

本研究で使用した現地計測データ、SAR データの取得日、および、データ取得日に対応

した DOY (Day of Year) の一覧を図 1 に示す。
図の縦軸は時系列の流れを示しており、横軸
は SAR の入射角および現地調査項目を示す。

2.2 研究対象圃場

対象とする圃場は、日本有数の米の生産地
である宮城県の古川農業試験場内の 12 圃場
である。調査圃場は、東西に長い形状をして
おり、面積は 240m² (40m×6 m) または 280m²
(40m×7 m) である。移植時の苗は、移植間隔
が、東西の間隔 18cm、南北の間隔 30cm、苗本
数が 1 圃場を除いて 4 本である。除いた 1 圃
場の苗数は 5 本である。また、研究対象圃場
は、移植日、品種、施肥量を変化させて、同
一観測日の生育量に違いを生じさせた。移植
日は、5 月 1 日 (DOY121)、5 月 11 日
(DOY131)、5 月 20 日 (DOY140) である。品
種は、ひとめぼれ、ササニシキ、まなむすめ、
コシヒカリの 4 品種がある。特にひとめぼれの
品種が最も多く 12 圃場中の 7 圃場ある。施
肥量は慣行のもの、慣行よりも減らしたもの、
および肥料を与えないもの 3 種類である。

2.3 現地計測データ

現地では、草丈、茎数、植被率および湛水
深を計測する。調査日程は、図 1 に示すよう
に、5 月 1 日 (DOY121) から 10 月 13 日
(DOY286) の期間に行い、茎数の調査は 6 月
1 日 (DOY152) から開始し、10 日ごとの 6
回の調査を 7 月 20 日 (DOY201) に終了する。
移植期、最高分けつ期および出穂時期等の生
育段階の情報は随時調査する。植被率は、近
赤外線カメラを用いて、水稻から 1.5m 上の位
置から真下方向に撮影して映りこんだ水稻の
面積とする。

2.4 撮影 SAR データ

使用する SAR データは、衛星搭載型の X バ

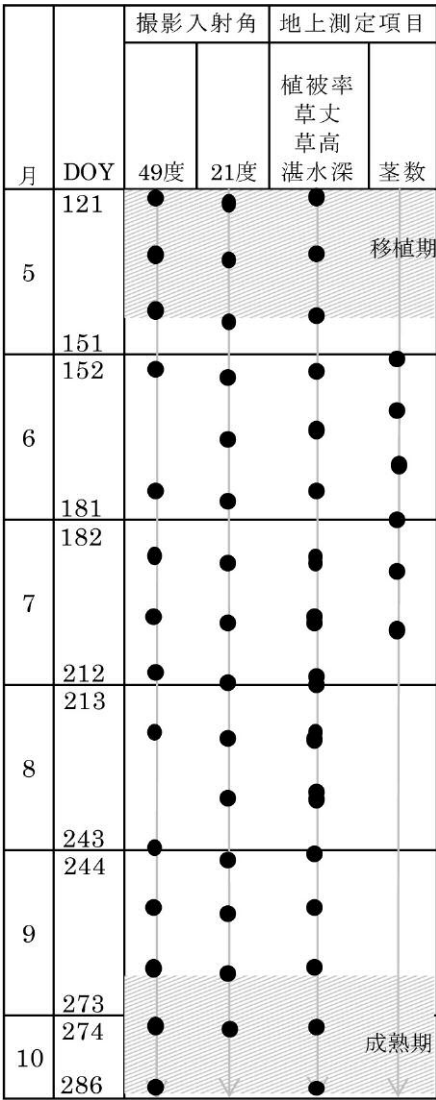


図 1 TerraSAR-X 観測日と現地調査日

ンド合成開口レーダ TerraSAR-X (以後、
TSX) のデータである。本研究では、空間分
解能が高い Spotlight 撮影モードを用いて、
HH、VV の 2 偏波により 10×5 km の領域を 11
日の撮影回帰周期により撮影する。入射角は
49.21 度から 49.89 度 (以後、49 度)、および、
21.11 度から 22.45 度 (以後、21 度) を使用し、
各入射角の空間分解能は、それぞれ 1 m、1.25
m である。なお、入射角 49 度の撮影は、アセ
ンディング軌道における北を 0 度として東回
りに約 81.5 度に傾けた方向、入射角 21 度が
ディセンディング軌道における約 280.5 度
に傾けた方向でそれぞれ行う。TSX の撮影回数

は、5月上旬から10月下旬までである。ただし、図1に示すように、入射角49度のTSXの撮影は、6月中旬および8月中旬がTSX機器の調整により撮影できなかった。

3. 研究手法

3.1 解析の全体フロー

本研究におけるSARによる水稻の生育量の解析手法フローを図2に示す。まず、異なる入射角および偏波の時系列TSXデータを用いて、圃場単位の後方散乱係数を算出し、生育量と後方散乱係数の傾向を比較検討する。そして、生育段階ごとの生育量と後方散乱係数の相関関係を解析し、生育段階ごとの生育量と後方散乱係数の関係の定量的な把握を行う。

3.2 圃場単位の後方散乱係数の算出

水稻圃場の後方散乱係数を算出するために、TSXデータのDN(Digital Number)を式1により後方散乱係数へ変換する⁹⁾。

$$\begin{aligned}\sigma_0 \text{ dB} &= \beta_0 \text{ dB} + 10 \times \log_{10}(\sin \theta_{\text{loc}}) \\ \beta_0 \text{ dB} &= 10 \times \log_{10}(\beta_0) \\ \beta_0 &= ks \times |\text{DN}|^2\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 $\sigma_0 \text{ dB}$ は、本研究で用いる後方散乱係数であり、グラウンドレンジにおける単位面積あたりのレーダ反射強度をデシベル変換した値、 $\beta_0 \text{ dB}$ は、スラントレンジにおける単位面積あたりのレーダ反射強度をデシベルに変換した値、 θ_{loc} は、局所入射角、 β_0 は、スラントレンジにおける単位面積あたりのレーダ反射強度、 ks は、校正係数である。この式により、TSXデータを後方散乱係数に変換した8月上旬(DOY220またはDOY224)の対象圃場周辺の後方散乱係数画像を図3に示す。図3(a)、(b)がDOY224に撮影した入射角21度のHH偏波、VV偏波の後方散乱係数画像、図3(c)、(d)がDOY220に撮影した入射角

49度のHH偏波、VV偏波の後方散乱係数画像である。

宮城県古川農業試験場から提供された2009年度の圃場図を用いて、既存の空中写真を用いて畦畔を確認しながら、圃場区画のベクトルデータを作成する。各圃場の後方散乱係数は、圃場の境界部の畔や人口構造物の影響、TSXデータのスペckルノイズの影響を取り除くために、圃場区画よりも約2m以上内側にある画素の平均値を利用する。

3.3 生育量と後方散乱係数との傾向の検討

生育量と後方散乱係数との傾向は、49度と21度の2つの入射角、および、HH偏波の後方散乱係数(以後、HH偏波)とVV偏波の後方散乱係数(以後、VV偏波)を用いて検討する。それぞれのデータを用いて、水稻の生育量の変化と後方散乱係数との傾向を分析する。

3.4 生育段階ごとの生育量と後方散乱係数の相関解析

時系列の生育量とHH偏波、VV偏波を用いて、水稻の生育量の茎数、草丈、植被率と後方散乱係数の相関解析を行う。生育段階による関係把握では、生育量の特徴が分かれる移植から最高分けつ期前、最高分けつ期から出穂期、および出穂期以降の3段階の時期のデータを用いて、各圃場での生育量とHH偏

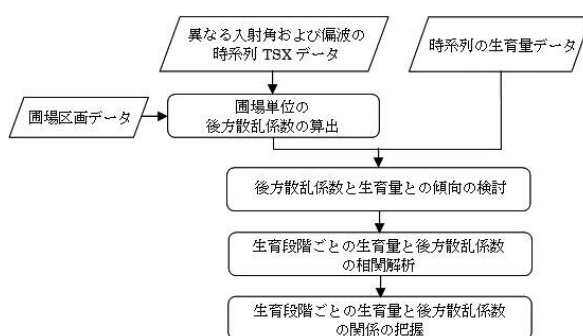


図2 SARによる水稻の生育量の解析フロー

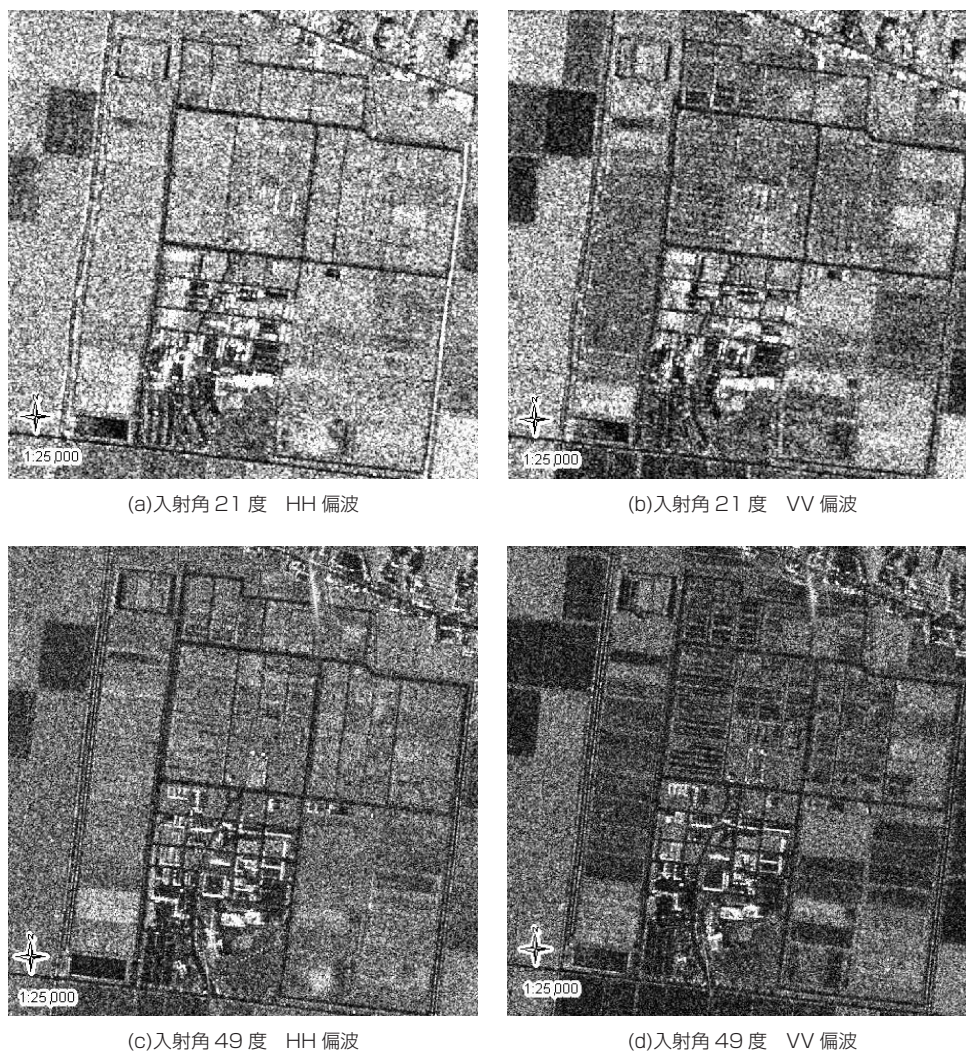


図 3 8月上旬の対象圃場周辺の後方散乱係数画像

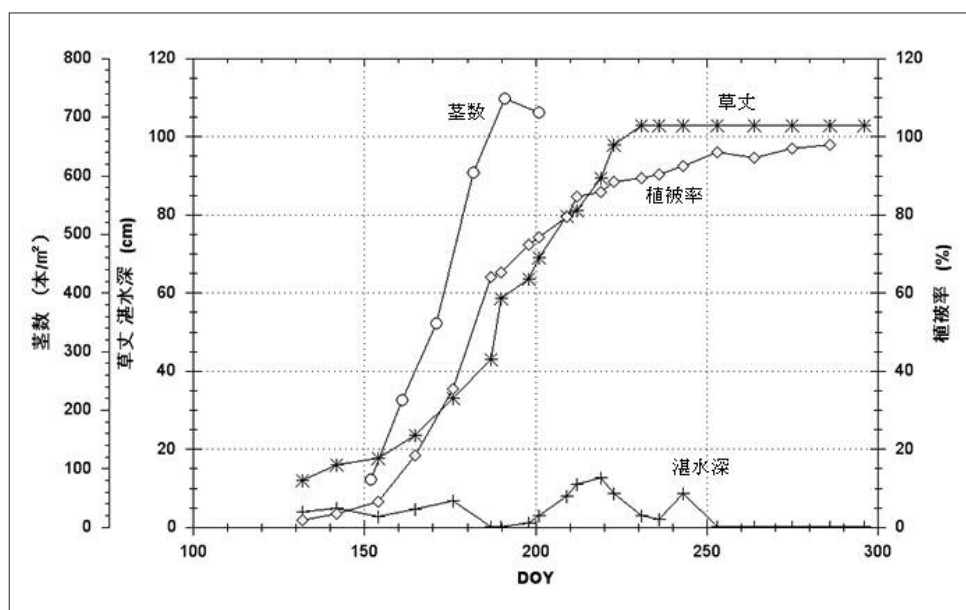


図 4 ひとめぼれ圃場の生育量の時系列変化

波、VV 偏波を変数として相関解析を行う。

3.5 生育段階ごとの生育量と後方散乱係数の関係の把握

生育量と入射角 21 度、入射角 49 度それぞれの HH 偏波、VV 偏波との傾向の検討、および、各生育段階での生育量と後方散乱係数の相関関係の解析により得られた知見から生育量と後方散乱係数の関係や特徴を検討する。

4. 結果

4.1 生育量の時系列変化

対象地域で主要な品種であるひとめぼれ圃場の生育量の時系列変化を図 4 に示す。移植日は 5 月 11 日 (DOY131)、施肥量は慣行である。図の横軸は DOY、縦軸は茎数、草丈、湛水深および植被率、曲線はそれぞれの時系列変化である。

茎数は、移植から増加が続き DOY190 で最大値の約 731 本/m² となり、その後、減少する。茎は、茎数が増加すると株内や株間の養分や光の競争が強くなるため、穂をつけることなく枯死するものがある。茎の枯死がおさまると穂をつける茎が一定量残る¹⁰⁾。よって、茎数が最大となり、その後減少する DOY190 の時期を最高分げつ期と判断した。草丈は、移植から生育の増加が続き最高分げつ期 (DOY190) で約 55cm、現地調査により判断した出穂期 (DOY220) で約 90cm となった。その後、約 100cm で飽和状態となった。植被率は、移植から増加が続き最高分げつ期で約 70%、出穂期で約 90% となった。その後も徐々に増加を続けた。

移植日、品種、施肥量の違いによる生育量は、前述したひとめぼれ圃場の最高分げつ期 (DOY190) で茎数 (本/m²) が平均値 689、標準偏差 106、草丈 (cm) が平均値 55cm、標準偏差 4、植被率 (%) が平均値 64.2、標準偏差

9 であった。ひとめぼれ圃場を指標とした出穂期では、草丈 (cm) が平均値 88、標準偏差 4、植被率 (%) が平均値 88、標準偏差 5 であった。

湛水深は、最大分げつ期で 0 cm となっており、水稻圃場の中干しが認められた。また、稲体の倒伏は DOY257 以降に表れた。

4.2 後方散乱係数の時系列変化

図 4 で示したひとめぼれ圃場の後方散乱係数の時系列変化を図 5 に示す。入射角 21 度を図 5 (a)、入射角 49 度を図 5 (b) に示す。図 5 (a) から知られるように、入射角 21 度の各偏波の後方散乱係数は、DOY180 まで増加した。その後、HH 偏波は、DOY235 にかけて減少し、DOY235 から DOY279 にかけて増加した。VV 偏波は、DOY180 から DOY224 まで減少し、DOY224 から DOY246 にかけて増加した。その後、DOY279 まで増減を繰り返した。

入射角 49 度の HH 偏波、VV 偏波は、DOY176 まで増加した (図 5 (b) 参照)。その後、HH 偏波は DOY198 まで増加した。そして、HH 偏波は DOY198 から DOY253 にかけて減少した後に、DOY275 まで増加した。VV 偏波は、DOY176 から DOY209 まで減少した。その後、VV 偏波は DOY253 まで増加した後に、DOY275 まで減少した。

4.3 生育量と後方散乱係数の傾向

以上の 4.1 節、4.2 節で示した水稻の生育量および後方散乱係数のそれぞれの増減の比較結果は下記のようにまとめられる。

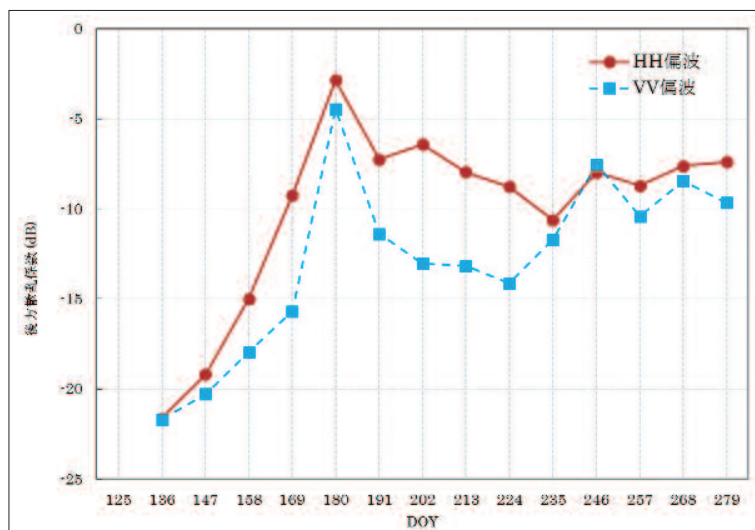
① 図 4 に示す DOY176 までの植被率、草丈および茎数の増加と同期して図 5 に示す入射角 21 度、49 度のそれぞれの HH 偏波、VV 偏波が増加した。

② 図 4 に示す茎数が約 620 本/m²、植被率が約 50%、草丈が約 45cm の時、図 5 (a) に示す

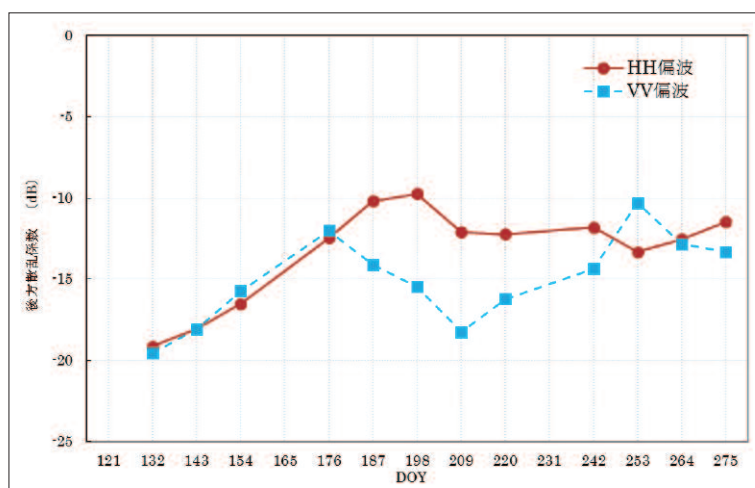
DOY180 で入射角 21 度の HH 偏波はピークとなった。一方で、図 5 (b)に示す入射角 49 度の HH 偏波は DOY198 でピークとなり、茎数が約 720 本/m²、植被率が約 80%、草丈が約 60cmであった。

- ③最高分けつ期 (DOY190) から出穂期 (DOY220) にかけて、図 5 に示す入射角 21 度と入射角 49 度の VV 偏波は減少した。
- ④出穂期 (DOY220) 以降の約 20 日の間では、図 5 に示す入射角 21 度と入射角 49 度の VV 偏波が増加した。
- ⑤倒伏が認められる DOY257 以降、図 5 (a)の VV 偏波のように後方散乱係数の増減がみられた。

4.4 生育段階ごとの生育量と後方散乱係数の相関解析 移植期から最高分けつ期前



(a)入射角 21 度



(b)入射角 49 度

図 5 後方散乱係数の時系列変化

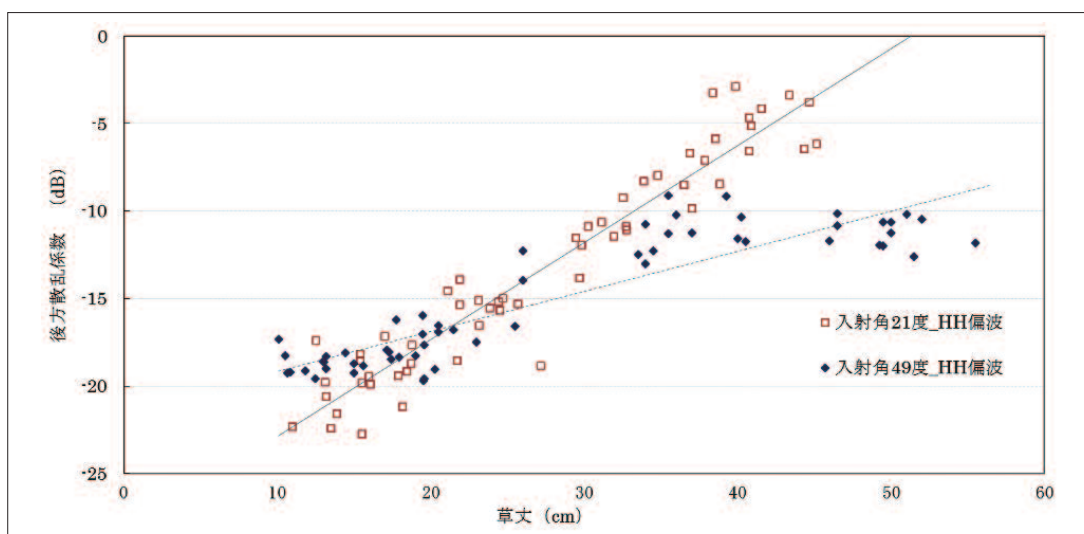


図 6 移植期から最高分けつ期前 (DOY121 から DOY189) の草丈と後方散乱係数の散布図

表 1 移植期から最高分げつ期前での生育量と後方散乱係数との相関係数

	偏波	入射角	
		49 度	21 度
茎数	HH	0.76	0.82
	VV	0.41	0.88
草丈	HH	0.90	0.96
	VV	0.79	0.91
植被率	HH	0.86	0.92
	VV	0.70	0.93

表 2 生育量ごとの回帰式および RMSE の一覧

	回帰式	RMSE
茎数 (本/㎡)	$Y=(VV+20.927)/0.0262$	118.5
草丈 (cm)	$Y=(HH+28.454)/0.5556$	3.7
植被率 (%)	$Y=(VV+21.338)/29.078$	9.3

(DOY121 から DOY189)での生育量と後方散乱係数との相関係数を表 1 に示す。入射角 21 度は、入射角 49 度よりも高い相関を示していることがわかる。例えば、草丈は入射角 21 度の HH 偏波では 0.96 であるが、入射角 49 度では 0.90 である。最高分げつ期から出穂期 (DOY190 から DOY220) および出穂期以降 (DOY220 以降) は、生育量と後方散乱係数に ± 0.75 以上の相関が認められなかった。表 1 に示す最も生育量と相関が高かった入射角 21 の HH 偏波または VV 偏波を用いた生育量を求める回帰式と、この回帰式により最大分げつ期に最も近い後方散乱係数で求めた生育量と現地計測による生育量との平均二乗誤差 (RMSE : Root Mean Square Error) を求めた。生育量ごとの回帰式および RMSE の一覧を表 2 に示す。また、各生育段階で生育量と後方散乱係との相関が高かった移植期から最高分げつ期前の草丈と入射角 21 度および 49 度の HH 偏波との散布図を図 6 に示す。さらに、移植期から最高分げつ期前までの現地地上写真を図 7 に示す。図 7 は圃場概況と SAR 撮影角度 (入射角 49 度の場合) の写真である。

5. 考察

5.1 生育段階ごとの生育量と後方散乱係数の関係

(1) 移植期から最高分げつ期前の関係

移植期から最高分げつ期前は、各偏波の後方散乱係数が増加する。これは、図 7 の現地撮影写真に示すように、株間に茎や葉の重なりが少ないため、稲体および稲体と湛水面との反射が増加し、後方散乱係数が増加していると考えられる。また、図 5 に示すように、移植期からの HH 偏波の増加は、入射角 21 度と比べて入射角 49 度が長く続いている。これは、入射角 21 度よりも入射角 49 度が稲体を横方向から観測するため、稲体の水平方向の生育を観測できているためと考えられる。

(2) 最高分げつ期から出穂期の関係

マイクロ波は含水量が多い対象物だと減衰が増大する¹¹⁾。入射角 21 度よりも入射角 49 度は、最高分げつ期から出穂期の含水量の多い稲体を横方向から観測するため、水稻の生育が進むにつれて稲体によるマイクロ波の減衰が増大する。よって、図 5 に示すように、入射角 49 度の後方散乱係数は入射角 21 度よりも低くなると考えられる。また、図 5 に示す最高分げつ期から出穂期の後方散乱係数の時系列変化は、各偏波が減少していくが、特に VV 偏波が減少する。これは、湛水面から垂直方向の茎や葉の生育が進むにつれて、垂直方向のマイクロ波の減衰が増大し、VV 偏波が減少すると考えられる。

(3) 出穂期以降における関係

出穂期以降は、図 5 に示すように各入射角の VV 偏波が増加する。これは、水稻の上部に穂の形状が追加され、マイクロ波が茎まで届かなくなるため、垂直方向の茎によるマイクロ波の減衰が減少していると考えられる。また、倒伏が確認できた DOY257 以降では入射角により VV 偏波の増減の推移に違いがみら

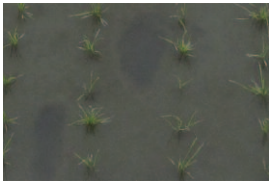
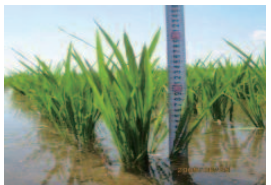
現地地上写真		
撮影日	SAR 撮影角度	圃場概況
DOY143 (5月23日)		
DOY154 (6月3日)		
DOY166 (6月15日)		
DOY176 (6月25日)		

図7 移植期から最高分げつ期前までの現地地上写真

れる。これは、稲体がランダムに倒伏しているため、観測する入射角によってVV偏波の増減の違いが生じていると考えられる。

5.2 TSXによる水稻の生育量の把握

4.4節の相関係数およびRMSEの結果から、移植期から最高分げつ期前（DOY121からDOY189）でのTSXの偏波観測により、茎数、草丈および植被率の生育状況を推定できる可能性があると考えられる。特に入射角21度は、表1に示すようにHH偏波、VV偏波の相関係数の差がそれほど大きくないため、生育量を推定する場合の目的変数は、HH偏波、VV偏波のそれぞれが利用できると考えられる。ただし、4.2節の結果から示されたように、入射角49度と比べて入射角21度の方が、移植期から最高分げつ期前まで水稻の生育に対

する後方散乱係数の増加が大きくなる。したがって、わずかな後方散乱係数の違いが茎数や草丈の推定に影響を及ぼすことに注意すべきである。

6. まとめ

本研究では、生育量の把握を行うために、異なる入射角、異なる偏波のXバンドSARを用いて、生育段階ごとの生育量と後方散乱係数の関係を定量的に把握した。

本研究の結果から、生育量と後方散乱係数の関係は、移植期から最大分げつ期前まで、HH、VV偏波の増加が認められた。最大分げつ期から出穂期までの後方散乱係数は、徐々に減少する傾向を示した。出穂期後は、VV偏波が増加する傾向を示した。生育段階ごとの生育量と後方散乱係数との相関は、移植期から最高

分げつ期前までに高い相関が認められた。

以上の結果をもとに、後方散乱係数と水稻の生育の進行による稲体の形状の変化との関係を考察した。移植期から最高分げつ期前までは、株間に茎や葉の重なりがないため、稲体および稲体と湛水面との反射が増加し、後方散乱係数が増加していると考えられた。移植期から最高分げつ期前でのTSXの偏波観測では、茎数、草丈および植被率との相関が高く生育状況を推定できる可能性があると考えられた。

今後は、現地で水稻の形状や含水量を定量的に調査し、それらと後方散乱係数との関係の解析、および、Xバンド二偏波SAR衛星による多年度の時系列撮影を行い水稻の生育推移を解析して、水稻の生育量調査に利用できるようなモデルの研究を行う予定である。

■謝辞

本研究の圃場での計測では、宮城県古川農業試験場のご協力を頂いた。ここに記して、関係者各位に感謝の意を表す。

■参考文献

- 1) 秋山 侃、石塚直樹、小川茂男、岡本勝男、斎藤元也、内田 諭、農業リモートセンシングハンドブック、システム農学会、pp.322-332.、2006
- 2) 石塚直樹、斎藤元也、大内和夫、Glen Davidson、毛利健太郎、浦塚清峰、水稻生育状況のマイクロ波特性による把握－Pi-SAR による児島湾干拓地水田の多波長・多偏波解析－、日本リモートセンシング学会誌、Vol.23、No.5、pp.473-490.、2003
- 3) Le Toan T, Ribbes F, Wang L F, et al., Rice crop mapping and monitoring using ERS-1 data based on experiment and modeling results. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 35(1): 41-56.、1997
- 4) T.Kurosu, M. Fujita and K. Chiba, Monitoring of rice crop growth from space using the ERS-1 Cband SAR. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 33(4):1092-1096.、1995
- 5) S. ShuangHe, Y. ShenBin, Li BingBai, Tan BingXiang, Li ZengYuan and Le Toan Thuy, A scheme for regional rice yield estimation using ENVISAT ASAR data, Sci China Ser D-Earth Sci, 52(8), pp.1183-1194.、2009
- 6) J. M. Lopez-Sanchez, J. David Ballester-Berman and Irena Hajnsek, First Results of Rice Monitoring Practices in Spain by Means of Time Series of TerraSAR-X Dual-Pol Images, IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, pp.1-11.、2010
- 7) J. M. Lopez-Sanchez, J. David Ballester-Berman and Irena Hajnsek, Rice monitoring in Spain by means of time series of TerraSAR-X dual-pimages, Proc. of '4th Int. Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry-PolInSAR 2009', pp.26-30.、2009
- 8) 木村篤史、島村秀樹、TerraSAR-X を用いた水稻収量の推定、日本写真測量学会平成 22 年度年次学術講演会発表論文集、日本写真測量学会、pp.115-116.、2010
- 9) Infoterra GmbH, TSXX-ITD-TN-0049-radiometric_calculations_1.00、pp.2-15.、2008
- 10) 堀江武、作物栽培の基礎、農山漁村文化協会、pp.58-130.、2004
- 11) 飯坂譲二、合成開口レーダ画像ハンドブック、朝倉書店、pp.12-158.、1998

■執筆者

木村 篤史 (きむら あつし)

所属：株式会社パスコ

E-mail : aatrsu1501@pasco.co.jp

