

平成 27 年 論文博士学位請求論文

高分解能 SAR データによる
水田の利用形態の分類および
水稻の生育量・収量の推定

木 村 篤 史

目次

第1章 序論

- 1.1 研究の背景
- 1.2 研究の目的
- 1.3 本論文の構成

第2章 合成開口レーダ（SAR）による稲作調査の現状と課題

- 2.1 SARデータへの期待
- 2.2 SARデータによる水稻の観測
 - 2.2.1 稲作水田抽出から水田利用形態の分類
 - 2.2.2 水稻の生育量・収量の推定について
- 2.3 稲作調査の現状と課題

第3章 水田利用形態の分類

- 3.1 水田利用形態の分類の必要性
- 3.2 理論
- 3.3 実験方法
 - 3.3.1 実験対象圃場
 - 3.3.2 使用SARデータ
 - 3.3.3 解析のフロー
 - 3.3.4 閾値の設定
- 3.4 結果と考察
 - 3.4.1 提案手法の2009年の解析
 - 3.4.2 提案手法の2010年の解析
 - 3.4.3 2009年既往の閾値法

- 3.4.4 提案手法の評価
- 3.4.5 今後の課題
- 3.5 水田利用形態の分類

第4章 生育段階ごとの水稻生育量とSARの後方散乱係数との関係

- 4.1 SARの入射角，偏波と水稻生育量
- 4.2 理論
- 4.3 実験方法
 - 4.3.1 実験対象圃場
 - 4.3.2 使用SARデータ
 - 4.3.3 解析のフロー
- 4.4 結果と考察
 - 4.4.1 生育量および後方散乱係数の時系列変化
 - 4.4.2 生育量と後方散乱係数との関係
 - 4.4.3 TSXによる水稻生育量の推定に対する考察
- 4.5 生育段階ごとの水稻生育量とSARの後方散乱係数との関係

第5章 生育量および収量の推定

- 5.1 生育量および収量の推定に最適なSARの撮影時期
- 5.2 理論
 - 5.2.1 高い時間分解能のSARデータの応用
- 5.3 実験方法
 - 5.3.1 実験対象圃場
 - 5.3.2 使用SARデータ
 - 5.3.3 生育量と後方散乱係数の時系列変化
 - 5.3.4 生育量と後方散乱係数の関係の定量解析
 - 5.3.5 収量と後方散乱係数の関係の定量解析
- 5.4 結果と考察
 - 5.4.1 TSXデータの撮影と現地地上調査
 - 5.4.2 生育量の時系列変化
 - 5.4.3 水稻の生育と後方散乱係数の時系列変化の関係
 - 5.4.4 品種の違いと後方散乱係数の時系列変化
 - 5.4.5 生育量・収量と後方散乱係数との関係
- 5.5 生育量および収量の推定

第6章 各章の要旨ならびに有用性

- 6.1 各章の要旨
- 6.2 本研究の新しい試みとその効果
- 6.3 本研究の理学的有用性

謝辞

参考文献

本研究に関連した発表論文

第1章

序論

1.1 研究の背景

米の需給調整，生産対策，経営安定対策および技術指導のために，農林水産省では，水稻の作況調査を毎年おこない公表している。現状の水稻の作況調査方法は，全国の農地を単位区とよばれる区域に分割し，その母集団から標本単位区を抽出し，作付面積，作柄や収量を計測し，標本理論に基づいた推計をおこなうことで作付面積，作況指数および収穫量を調査している。この調査方法は膨大な労力がかかるために，最近では，衛星データやGISデータを活用した効率的な調査方法の検討が進められている(農林水産省，2011)。また，第2次世界大戦直後は，日本は食料不足に落ち込み米増産を進めたが，1970年代になると米余剰に転じ，以後，減反政策が推し進められ，多くの水田に米以外の大豆や麦が栽培されるようになってきている。しかし，政府は2013年11月に，この減反政策の2018年での終了を打ち出しており，水田での稲の作付けの動向が注視されている状況にある。また，近年，稲の登熟期の異常高温による乳白色米等での品質低下が日本各地で認められるようになった。このため，田植え時期を慣行栽培より，早めたり，遅くしたりして，登熟期における高温を避ける努力が始まった。さらに，省力化を目指して，田植えをせずに，湛水してない状態の水田に，籾米を直撒きして発芽させて，ある程度，生育させてから水を湛えて湛水状態にする乾田直播栽培が実施されはじめた。いままでの衛星データの利用については，稲作圃場の抽出が中心であったが，今後は，転作作物，播種移植方法，田植え時期等の水田利用形態の把握に進んでいくものと考えられる。

衛星搭載型の光学センサや合成開口レーダ (SAR) から取得したデータを活用した稲作水田の分類手法の研究は，各衛星が打ち上げられるとすぐに試みら

れてきた。例えば、光学センサではLandsatTMで観測したデータを用いて、稲作水田の分類をおこなっている (Okamoto *et al.*, 1996, 山形ら, 1988)。しかし、光学センサは、撮影時に雲が存在すると地表面の観測がおこなえないため稲作水田の分類ができない可能性がある。特に、Landsat衛星シリーズの観測は16日に1回のため、雲の影響により観測ができなくなると稲作水田の分類が困難になる。そこで、雲の影響を受けないSARデータを用いた研究が進んでいる。Kurosu (1997, 1995), LeToan *et al.* (1997) およびRibbes *et al.* (1999) は、田植え期を含んだ3時期以上の複数のSARデータから得られる稲作水田の特徴を利用して稲作水田を分類している。特に田植え期の稲作水田に水を湛える湛水状況は、稲作水田の主要な特徴であり、SARデータから稲作水田を分類する際に重要であるとしている。しかし、多数のSARデータの利用は、SARデータの取得経費がかさむ上に、データの処理に時間を要するため、なるべく少ないSARデータの利用が望まれる。竹内ら (2000) は、田植え期前と田植え期の2時期のSARデータを用いて、稲作水田の分類がおこなえる可能性を示しており、石塚 (2006) は、水田に湛水されたすぐ後の田植え期および稲の葉や茎が生育する生育期の2時期のSARデータや1時期の多重波長・多重偏波のSARデータを用いて、閾値法による稲作水田の分類の可能性を示している。これらの既往の研究では、空間分解能が6.25 mのRADARSAT/Fineや12.5 mのRADARSAT/Standard, ERS-1を用いている。空間分解能と分類精度とは、複雑な関係がある。光学衛星データの場合、LandsatTMの30 m分解能では、圃場内の作物と土壌表面が平均化され作物判定ができていたが、衛星の分解能が向上するにつれて、作物自身と土壌表面が別々に観測され、平均化をしないと作物同定ができないということが起こった。このため、高分解能データの場合、まず区画分け (Segmentation) を実施し、この区画 (Segment) の統計値で分類する手法 (山本ら, 2011) が用いられるようになった。ソフトウェアとしてeCognitionおよびENVI Feature Extraction 等があり、広く利用されているが、この区画を1単位として区画内の各バンドの平均値または区画内のテクスチャーを用いて解析するため、高分解能の特性は、区画の算出に利用するだけのことが多い。2007年に打ち上げられたTerraSAR-X (以後, TSX) は、High Resolution SpotLight (HS) モードの観測により、入射角が約50度の場合、グラウンドレンジ方向が約2 m、アジマス方向が約2.5 mの高い空間分解能で撮影が可能である。

水稻の生育量・収量の予測については、既往の稲作水田の分類の研究と同様に光学衛星リモートセンシング技術を用いた多くの研究がおこなわれてきている (脇山ら, 2003, 秋山ら, 2006)。ここで、生態学で生育量は、ある時点において空間に存在する生物体の量をあらわしたものであるが、本論文では、植物体の生育の状況あらわす草丈、茎数、草高などを生育量という。光学衛星リモートセンシング技術を用いた研究では、水稻の分光反射特性から植生指数や葉面積指数を求め、広域のバイオマスや水稻の生育量を推定する。しかし、

稲作水田の分類と同様に、雨が多い時期に生育する水稻では、雲の影響でタイミングよく光学衛星リモートセンシング観測がおこなえないという問題に直面する。そこで、天候に左右されずに水稻を観測できるマイクロ波を用いたSARによる生育量・収量の予測技術の実用化が期待されている。

水稻は株を形成するが、生育が進むにしたがって茎数や草丈などの物理量の変化、さらに、穂の生育や倒伏などにより、その形状に変化が生じる。また、複数の株同士の交錯により群落構造が変化する。形状や群落構造の変化は、SARデータによるマイクロ波の後方散乱の変化として捉えることができる。実際に、水稻の生育によって、航空機PiSARのLバンドとXバンドの偏波特性、および、後方散乱の特性に変化が現れることが報告されている(石塚ら, 2003)。また、ERS, EnvisatおよびRADARSATのCバンド衛星SARデータを用いた水稻生育状況のモニタリングの可能性が報告されている(Kurosu, 1995, LeToan *et al.*, 1997, Koay *et al.*, 2007, Bouvet *et al.*, 2009)。これらの衛星SARでは24日または35日の回帰日数の撮影、すなわち、水稻の生育期間に対して2回から4回程度の撮影データしか得ることができない。したがって、水稻の生育、または、生育変化に伴うHH偏波やVV偏波のマイクロ波の変動を、低い時間分解能により撮影することになる。一方、Xバンドの利用に関しては、航空機搭載型のSARセンサによる測定(LeToan *et al.*, 1989)、また、地上ベースのマイクロ波散乱計による測定(Inoue *et al.*, 2002)があるが、Xバンド衛星SARデータが利用できるようになったのはTSX以降である。TSXの農業利用の利点として、(1) LバンドやCバンドより波長が短いXバンドのマイクロ波を使用することにより、観測データが植生の下層よりも上層からの信号を多く含んでいること、(2) 高分解能SpotLight(HS)モードの観測により、HH偏波とVV偏波の2偏波で、グラントレンジ方向が約2 m、アジマス方向が約2.5 mの高空間分解能の撮影ができ、小さなサイズの圃場の情報が得られること、(3) 従来の衛星SARに比較して回帰日数が11日と短く、形状や群落構造の変化が速い対象物の撮影ができることがあげられる。そのため、Lopez *et al.* (2010) は時系列のTSXを用いてスペインの水稻の生育と偏波の時系列変化との関係を詳しく調べている。しかし、Xバンド高分解能衛星SARによる日本の水稻の生育や収量の調査の可能性、また、Xバンド高分解能衛星SARの撮影条件の検討はまだされていない。

1.2 研究の目的

本研究では、Xバンド高分解能衛星SARを用いた水田利用形態の分類手法の開発、および、水稻の生育量・収量の推定の可能性やSARの撮影条件を明らかにすることを目的とする。さらに、物理学に基づくマイクロ波の散乱メカニズムにより、植物の生育にともなう生物学における事象を説明することで、今後

の研究促進に努める。

まず、水田利用形態の分類手法の開発では、田植え期および生育期の2時期のXバンド高分解能衛星SARのTSXデータを用いて、早植え稲作水田、慣行植え稲作水田、遅植え稲作水田、乾田直播稲作水田、大豆栽培水田等の水田利用形態分類の可能性を検討する。また、分類手法では、高分解能のTSXデータによる圃場ごとの判別および圃場ごとの平均値だけではなく、圃場内の各画素の情報を利用することを検討する。次に、水稻の栽培期間を通じて、TSXデータによる異なる偏波および異なる入射角での時系列撮影をおこない、水稻の生育推移や収量変化に伴うマイクロ波の後方散乱の変化について定量的に把握し、水稻の生育量や収量推定の可能性を検討する。

1.3 本論文の構成

本論は、6章により構成されている。

第1章では、本研究の背景および目的について述べる。また、本論文の構成について記述する。

第2章では、現在実施されているSARデータを用いた稲作水田抽出および水稻の生育量・収量の推定方法について概説し、それらの長所や問題点を提起する。

第3章では、田植え期および生育期の2時期の高分解能SARのTSXを用いて、水田利用形態（早植え稲作水田、慣行植え稲作水田、遅植え稲作水田、乾田直播稲作水田、大豆栽培水田等）の分類手法を提案した。

第4章では、異なる入射角、異なる偏波のSARデータを用いて、生育段階ごとの水稻の生育量とマイクロ波の後方散乱との関係を定量的に把握することを試みた。

第5章では、生育量の推定を高度化するために、水稻の栽培期間を通じた生育量の変化とマイクロ波の後方散乱の変化との関係、および、出穂期後の収量要素とマイクロ波の後方散乱との関係について調べ、生育量・収量を推定するためのSARデータの撮影条件（偏波、入射角等）を検討した。また、生育量や収量の推定精度の向上ために、水稻の品種の分類を検討した。

第6章は、各章の要旨、本研究の新しい試みとその効果、および、本研究の理学的有用性を述べて締めくくる。

最後に、謝辞、参考文献、および、本研究に関連した発表論文を記す。

第2章

合成開口レーダ（SAR）による稲作調査の現状と課題

2.1 SARデータへの期待

雨が多い時期に生育する水稻では、雲の影響でタイミングよく光学衛星リモートセンシング観測がおこなえないという問題に直面する。そこで、天候に左右されずに水稻を観測できるSARデータによるマイクロ波を用いた稲作水田抽出および生育量・収量予測技術の実用化が期待されている。SARデータによるこれらの技術は、広範囲の水稻圃場の面的な観測および迅速で客観的かつ正確な生産管理が可能な情報となる。

この章では、現在おこなわれているSARデータを用いた稲作水田抽出および水稻の生育量・収量の推定方法について概説し、従来の研究について述べ、問題点を提起する。

2.2 SARデータによる水稻の観測

2.2.1 稲作水田抽出から水田利用形態の分類

稲作水田の抽出に関する研究は、稲作水田が湛水される特徴を活用して進められている（Kurosu, 1997, 1995, LeToan *et al.*, 1997, Ribbes *et al.*, 1999, 竹内ら, 2000および石塚, 2006）。これらは主に湛水面からのマイクロ波の散乱特性を利用したものである。湛水面からの散乱特性は、主に表面散乱に起因する。湛水面は平らであるため、マイクロ波が鏡面反射する。

表面散乱は、「表面の粗さ」に対して、入射するマイクロ波の波長と角度に依存する。大内の著書「リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎」より抜粋して以下引用する。

ある入射角を持って鏡面に入射するマイクロ波は、図2-1 (a) のようにすべての入射波が鏡面反射される。したがって、鏡面方向に受信アンテナを置けば強い信号が受信され、送信と受信が同一アンテナである場合、信号は受信されない。散乱面が少し粗いと図2-1 (b) のように鏡面成分が減少し、入射波の一部が鏡面反射方向以外の方向に散乱される。後者の現象は拡散散乱と呼ばれる。さらに表面が荒くなると、図2-1 (c) にあるように鏡面成分がなくなり、拡散成分のみになる。

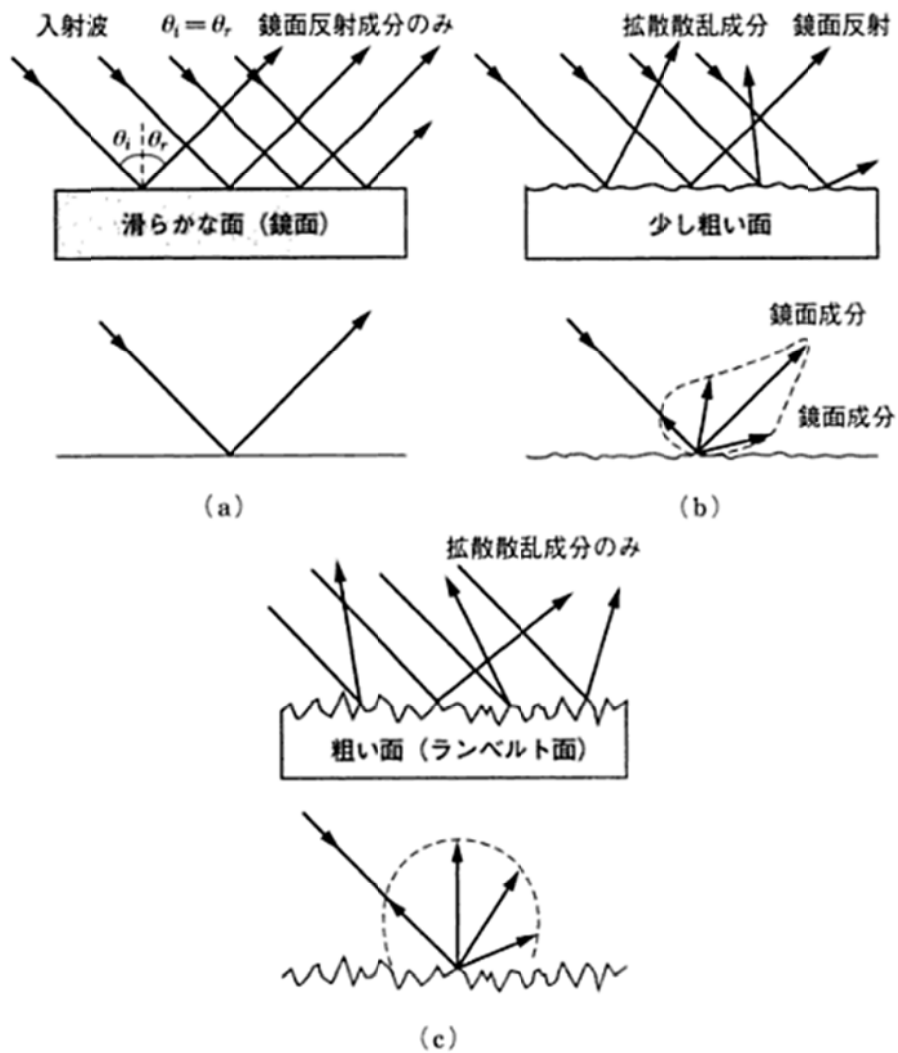
表面の粗さを、マイクロ波の波長 (λ) と入射角 (θ_i) で示すことができる。高さ平均を0とした参照面からの凹凸の標準偏差を σ_H とすると下記の関係式2.1から2.3が成り立つ。

$$\sigma_H \ll \lambda / (8 \cos \theta_i) : \text{smooth surface} \quad (2.1)$$

$$\sigma_H \sim \lambda / (8 \cos \theta_i) : \text{moderately rough surface} \quad (2.2)$$

$$\sigma_H \gg \lambda / (8 \cos \theta_i) : \text{rough surface} \quad (2.3)$$

マイクロ波の波長が短いほど、より細かいレベルで表面の粗さを捉えることが可能である。



(出典：大内著，リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎)

図2-1 表面の粗さによる表面散乱の鏡面成分と拡散成分

しかしながら、平らな地表面は、稲作水田の湛水面だけではなく、道路や貯水池等が存在する。したがって、それらと稲作水田を分類するために、稲作水田の特徴である湛水前の耕起の状況や稲の葉や茎が生育した状況を合わせて解析する必要がある。耕起の状況や生育した状況を加えることで、マイクロ波の散乱特性は、鏡面反射成分以外の体積散乱成分や2回散乱成分等が加わることになる。体積散乱と2回散乱の概念を図2-2に示す。体積散乱は、複雑な内部構造をもつ対象物にマイクロ波が入射した場合に生じる（図2-2（a））。マイクロ波が対象物内に進入しなければならないので、特に波長の長いマイクロ波に影響する。図2-2（b）に示す2回散乱は、地表面に対して垂直な地物と地表面との間で生じやすい。

上記の散乱特性の活用により、湛水をおこなう田植え期を含んだ3時期以上の複数のSARデータを用いて、稲作水田を分類している（Kurosu, 1997, 1995, LeToan, 1997, Ribbes, 1999, Nguyen, 2012およびKirsi, 2014）。

しかし、多時期のSARデータの利用は、次のような問題が残る。

- 1) SARデータの取得経費の増大
- 2) SARデータの処理時間の増大

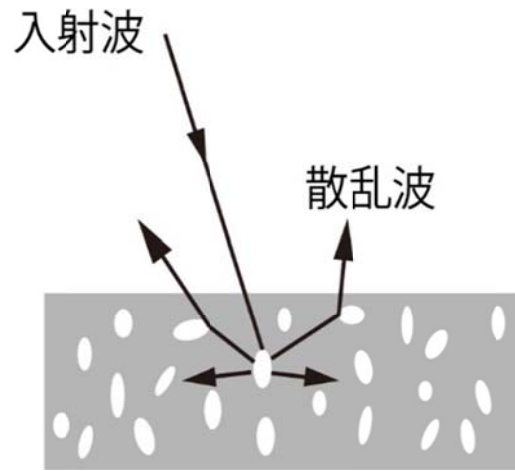
これらの問題を解決するために田植え期前と田植え期の2時期のSARデータや田植え期と生育期の2時期のSARデータおよび1時期の多重波長・多重偏波のSARデータを用いた研究がおこなわれている（竹内ら, 2000, 石塚, 2006）。これらの研究では、空間分解能が6.25 mのRADARSAT/Fineや12.5 mのRADARSAT/Standard, ERS-1を用いている。

SARデータの任意の点における空間分解能は、プラットフォームの進行（アジマス）方向の分解能とアジマス方向に直交するレンジ方向の分解能の2次元である。レンジ方向の分解能は、マイクロ波のパルス長に比例する。したがって、パルス長が短いと、レンジ方向の分解能が向上する。グラウンドレンジの分解能（ G_r ）はパルス長の距離（ $c \tau$ ）と入射角（ θ_i ）に依存し、下記の関係式（2.4）が成り立つ。

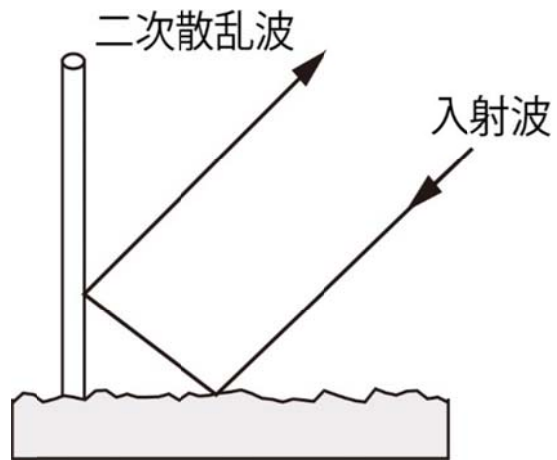
$$G_r = c \tau / 2 \sin \theta_i \quad (2.4)$$

また、アジマス方向の分解能（ A_r ）は、実開口レーダの場合、アジマス方向のアンテナのビーム幅とスラントレンジ距離（ R_s ）によって式（2.5）の関係となる。

$$A_r = \beta_a R_s \quad (2.5)$$



(a) 体積散乱



(b) 2回散乱

(出典：大内著，リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎)

図2-2 体積散乱と2回散乱の概念

空間分解能と分類精度とは、複雑な関係がある。空間分解能が向上するほど、今まで分類できなかった早植え稲作水田、慣行植え稲作水田、遅植え稲作水田、乾田直播稲作水田、大豆栽培水田等といった詳細な水田利用形態の分類の可能性がある。高分解能の光学衛星データによる農作物の分類の例として、山本ら（2011）は、まず区画分け（Segmentation）を実施し、この区画（Segment）の統計値で分類する手法を研究している。区分けの理由は、高分解能の光学衛星データでは、作物自身と土壌表面が別々に観測されるためである。

以上に述べた分類方法は、非常に工夫されたものであるけれども、次のような問題を解決するには至っていない。

- 1) 空間分解能が高いと圃場内のSARのマイクロ波は、稲体自体からの散乱、湛水面や土壌面からの散乱等が混在するようになる。これらの異なるマイクロ波の散乱特性を考慮した水稻圃場の分類手法が開発途上である。
- 2) 現場での水稻の栽培管理では、気象条件に合わせて田植えの時期を早めたり、遅くしたりして、水稻の高温障害等による品質、収量の低下を回避している。また、コスト削減のために、粳米を水田に直播する栽培方法が実施されはじめている。さらに、水田を大豆圃場に転換する場合もある。適切な栽培管理のためには、早植え稲作水田、慣行植え稲作水田、遅植え稲作水田、乾田直播稲作水田、大豆栽培水田等を分類する必要がある。

2.2.2 水稻の生育量・収量の推定について

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データの偏波の後方散乱係数の変化として捉えることができる。

偏波は、マイクロ波の振動の方向を示し、多くのSARは、図2-3 (a) に示す水平偏波 (H) , 図2-3 (b) に示す垂直偏波 (V) を送信, 受信できるように設計されている。マイクロ波の送信, 受信の特性は、一般的に「送信時の偏波の振動方向, 受信時の偏波の振動方向」と記載される。水平偏波を送信し, 水平偏波のみを受信する場合, 「HH」と記載する。この偏波の特性は、観測対象の物理的性質を計測することができる。一例として、垂直方向に張られたワイヤー格子による偏波状態の変化を図2-4に示す。格子間隔は、マイクロの波長よりも短いものとする。図2-4に示すように、垂直のワイヤー格子に対して垂直偏波のマイクロ波の電場 E が入射すると、ワイヤー格子中の自由電子が振動し垂直偏波のマイクロ波の電場 E' が再放射され、反射方向に再放射された電場が反射波となる。角振動数 ω の電場 $E(t)$ と荷電 q は式 (2.6) のようにあらわせる。

$$qE(t) = qE_0 \cos(\omega t) \quad (2.6)$$

ニュートンの第2法則により荷電粒子に働く合力は、粒子の質量(m)と加速度により式 (2.7) のようにあらわせる。

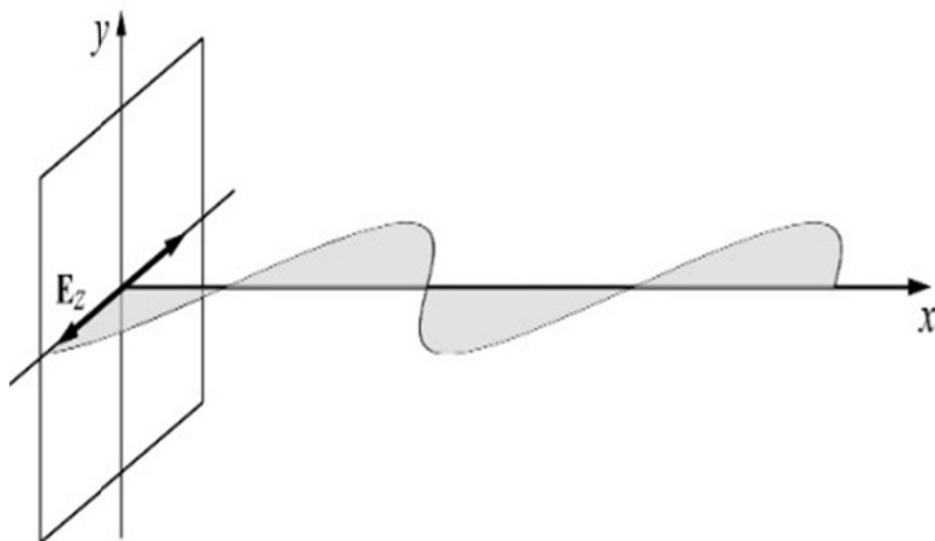
$$qE_0 \cos(\omega t) = m(d^2y/dt^2) \quad (2.7)$$

電子は入射電場と同じ周波数で振動する。よって、電子の変位 $y(t)$ と入射電場による力 $qE(t)$ は式 (2.9) のようにあらわせる。

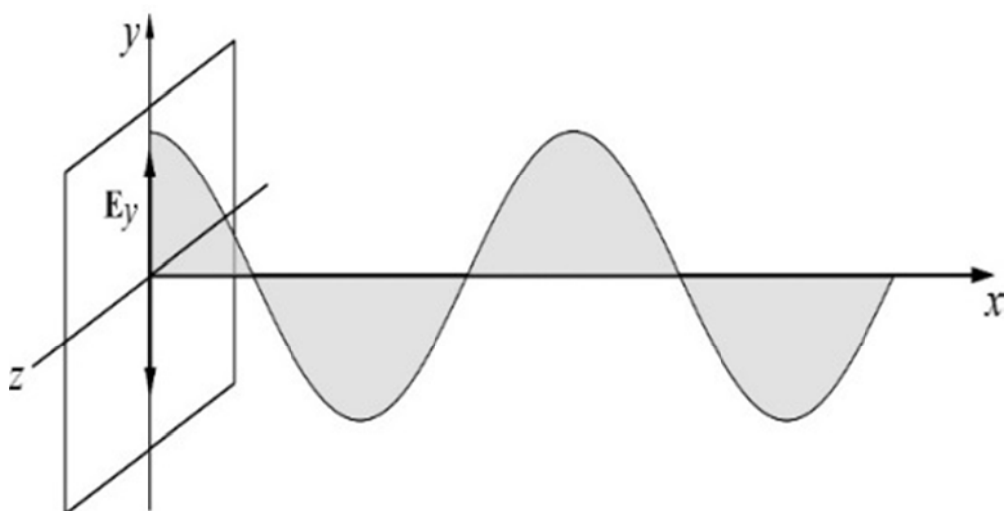
$$y(t) = y_0 \cos(\omega t) \quad (2.8)$$

$$y(t) = -qE_0 \cos(\omega t)/m\omega^2 \quad (2.9)$$

一方、水平偏波のマイクロ波は、垂直方向の格子ワイヤーに入射しても入射エネルギーを失うことはない。逆に水平偏波は、水平方向の格子ワイヤーによって強く反射されることになる。つまり、垂直および水平のマイクロ波の稲体への入射による反射波の違いにより、稲体の形状の物理的特性を計測することが可能である。また、地物に対する入射の方向は、入射角に依存する。入射角は対象物に入射するレーザと地表と直角の法線とのなす角である。一般的に入射角の違いは、対象物を観測する方向に変化が伴うため、マイクロ波の偏波特性の変化につながる。



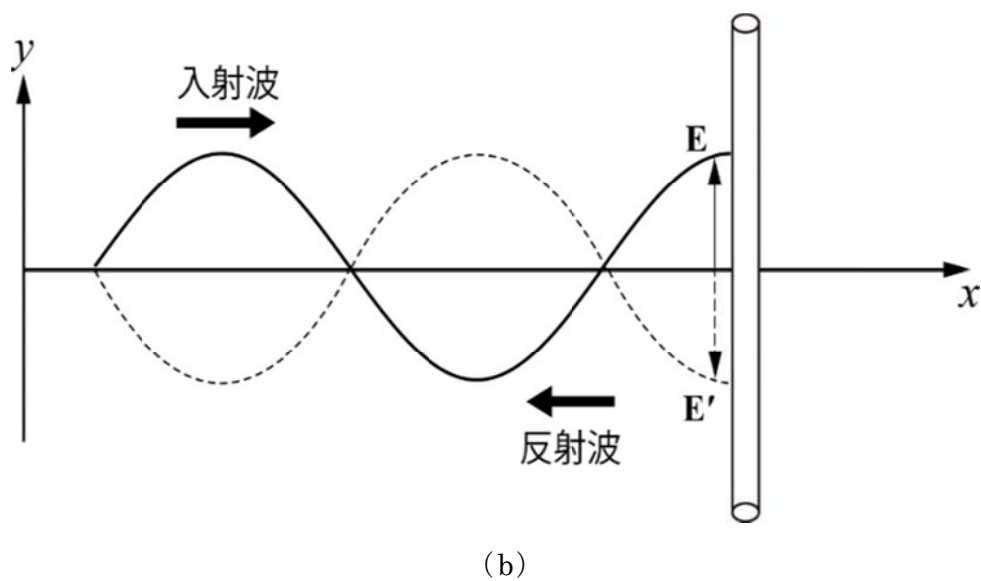
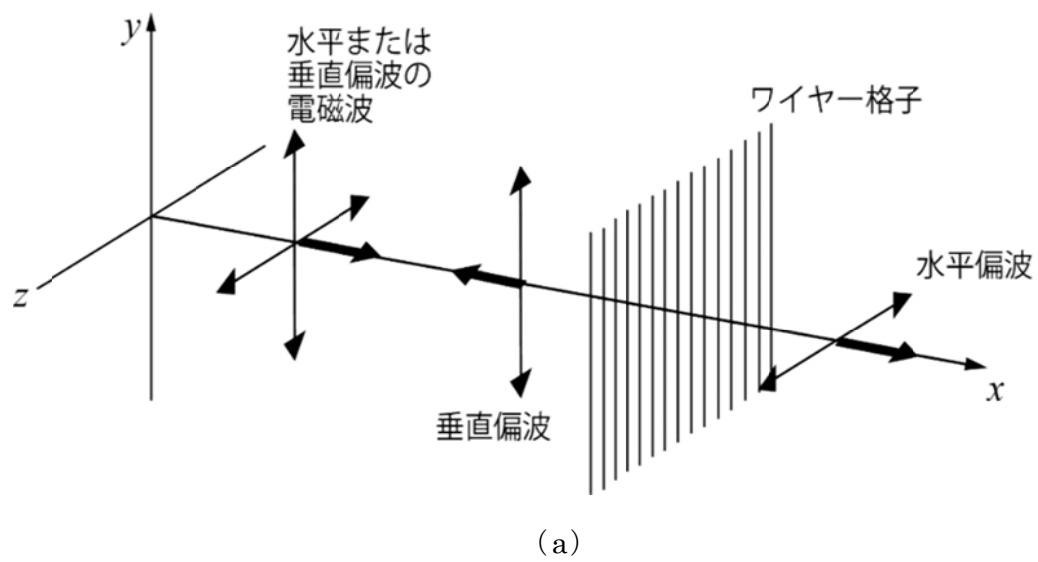
(a) 水平偏波



(b) 垂直偏波

(出典：大内著，リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎)

図 2-3 水平偏波および垂直偏波の電場



(出典：大内著，リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎)

図 2-4 ワイヤー格子による偏波状態の変化

マイクロ波の散乱特性を用いた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 (LeToan *et al.*, 1997), 水稻の草高や重量を指数に変換した値を推定する手法(Kurosu *et al.*, 1995), および、葉面積指数(LAI)を推定する手法(ShuangHe *et al.*, 2009)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、スペインやベトナム等の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(Lopez *et al.*, 2010, 2009, Nguyen, 2012およびInoue, 2014)。

これらのSARデータによる水稻の生育量の推定方法は非常にすぐれたものであるけれども、次のような問題を解決するには至っていない。

- 1) 水稻は生育が進むにつれて茎数や草丈などのバイオマスの変化、さらに、出穂や倒伏などにより、その形状に変化が生じる。また、複数の株同士の間隙により群落構造が変化する。これらの変化は、偏波や入射角による後方散乱係数の変化に影響する。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関係を明らかにする必要がある。
- 2) LバンドやCバンドより波長が短いXバンドのマイクロ波を使用することにより、水稻の群落構造の下層よりも上層からの信号を多く含むことになる。常に水稻群落の上層を捉える時系列のXバンド高分解能衛星SARによる日本の水稻の生育・収量の推定の可能性が検討されていない。
- 3) 実利用のためには、なるべく撮影回数を少なくして、撮影コストや処理量を減らすことが望まれる。この問題を解決するために、日本の水稻の生育・収量の推定に必要なXバンド衛星SARの最低限の撮影回数や撮影時期、入射角、偏波などの撮影条件を明らかにする必要がある。

2.3 稲作調査の現状と課題

本章では, 現在おこなわれているSARデータを用いた稲作水田の抽出方法および水稻の生育・収量の推定方法について概説し, その問題点を提起した。

従来のSARデータを用いた稲作水田の抽出の研究では,

- 1) 早植え稲作水田, 慣行植え稲作水田, 遅植え稲作水田, 乾田直播稲作水田, 大豆栽培水田等の水田利用形態の分類
- 2) 高い空間分解能による水田利用形態の分類

などの問題が解決に至っていない。

また, 従来のSARデータを用いた水稻の生育量, 収量の推定方法の研究は,

- 1) 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関係
- 2) 時系列のXバンド高分解能衛星SARによる日本の水稻の生育や収量の調査の可能性
- 3) 水稻の生育・収量の推定に適したXバンド高分解能衛星SARの撮影条件などが明らかになっていないことを提起した。

第3章

水田利用形態の分類

3.1 水田利用形態の分類の必要性

第2章で指摘したように、空間分解能が高いと圃場内の SAR のマイクロ波の後方散乱は、稲体からの散乱、湛水面や土壌面からの散乱等が混在するようになる。これらの異なるマイクロ波の散乱特性を考慮した水田圃場の分類手法が開発途上である。

現場での水田の栽培管理では、気象条件に合わせて田植えの時期を早めたり、遅くしたりして、水田の高温障害等による品質、収量の低下を回避している。また、コスト削減のために、籾米を水田に直播する栽培方法が実施されはじめている。さらに、水田を大豆圃場に転換する場合もある。これらの違いは水田の生育の違いや水田に作付けされる作物の変化を伴う。適切な栽培管理のためには、早植え稲作水田、慣行植え稲作水田、遅植え稲作水田、乾田直播稲作水田、大豆栽培水田等を分類する必要がある。

本章では、田植え期および生育期の2時期の高分解能 SAR データを用いた水田利用形態の分類手法の開発を目的とし、早植え稲作水田、慣行植え稲作水田、遅植え稲作水田、乾田直播稲作水田、大豆栽培水田等の水田利用形態分類の可能性を検討した。また、分類手法では、高分解能 SAR データによる圃場ごとの判別および圃場ごとの平均値だけではなく、圃場内の各画素の情報を利用することを検討した。

3.2 理論

本章では、田植え期および生育期の 2 時期の高分解能 SAR データを用いて、クラスター分類を実施し、圃場内の各クラスターの占有率により、水田作付け作物を分類する手法を提案する。使用する高分解能 SAR データは、TSX の High Resolution SpotLight (HS) モードの観測による約 2.3 m の空間分解能画像で 1 m×1 m にリサンプリングしたものである。1 画素は、分解能が低いといくつかの構成要素の平均であるのに対して、高分解能であるとそれぞれの構成要素の値をあらわすことになる。高分解能 SAR を用いることにより、各画素は 1 要素に近いものからなると考えられる。稲作水田の場合は、条間 30 cm、株間 20 cm、栽植密度 19 株/m² で植えてあるので、約 2.3 m の空間分解能で、平均 100 株ほど稲が植えられている状態を 1 画素として観測することとなる。この田植え期の稲作水田は、SAR では通常暗く観測され、「ほぼ滑らかな面」と言えるので、この田植え期の「湛水面に田植えした稲が認められる」状況を 1 要素と考える。

この田植え期と生育期の 2 時期の SAR データを 2 バンドとして、対象範囲に対してクラスター分析をおこなう。1 圃場ごとにポリゴンを作成しておき、そのポリゴン内における各クラスターに属する画素の比率により水田利用形態ごとの早植え稲作水田、慣行植え稲作水田、遅植え稲作水田、乾田直播稲作水田、大豆栽培水田等を明らかにする試みである。

田植え期の稲作水田は、SAR データにおいて水面による鏡面散乱やスペックルノイズが混在し、生育期では水面による鏡面散乱、稲体からの散乱、水面と直立する稲体の間の二回散乱およびスペックルノイズが混在している。田植え期の乾田直播稲作水田および大豆栽培水田は、土壌面からの散乱とスペックルノイズが混在し、生育期の乾田直播稲作水田では、水面による鏡面散乱、稲体からの散乱、水面と直立する稲体の間の二回散乱およびスペックルノイズが混在する。生育期の観測における大豆栽培水田は、大豆が播種直後であるため、土壌からの散乱であると考えられる。これらの 2 時期の SAR データを 2 バンドとしてクラスター分析をすると、①両時期とも主に水面からの低い後方散乱、②両時期とも土壌面の中程度の後方散乱、③田植え期は水面で低く、生育期は稲体からの中程度または水面と直立する稲体の間の二回散乱による強い後方散乱、④田植え期は土壌で中程度の散乱、生育期は水面の低い後方散乱、⑤両時期とも畝と側面等で衛星方向と対峙する高い後方散乱等のクラスターができると想定される。圃場ポリゴン内のこれらのクラスターの存在割合により、水田利用形態を分類する手法である。

3.3 実験方法

3.3.1 実験対象圃場

作付け状況の現地調査は、稲の栽培が盛んな宮城県大崎市の古川農業試験場内の稲や大豆を作付けた 98 の水田圃場である。この 98 圃場に対して、2009 年と 2010 年の 2 カ年連続して圃場の作付け状況の調査をおこなった。2010 年の調査は、年次間差の有無の確認のためにおこなった。研究対象の圃場数を表 3-1 に示す。稲作水田は、田植えの時期や田植えの方法がそれぞれ異なる。2009 年の作付けは、例年の栽培通りに湛水した圃場に対して稲を 5 月 10 日前後に移植した慣行植え稲作水田（以後、慣行植え_稲）、慣行圃場より早い時期（5 月 1 日前後）に稲を移植した早植え稲作水田（以後、早植え_稲）、慣行圃場より遅い時期（5 月 20 日前後）に稲を移植した遅植え稲作水田（以後、遅植え_稲）、圃場への湛水や苗の移植をおこなわずに稲の籾米を圃場に直接播種した乾田直播稲作水田（以後、乾田直播_稲）、大豆を栽培した水田（以後、大豆）に分かれる。

2010 年は、2009 年に対象とした圃場と同じ圃場を現地調査対象とした。2009 年と 2010 年の圃場利用形態は異なり、2010 年の作付け状況の 2009 年との差異は、早植え_稲が 2 圃場減少し 2 圃場、遅植え_稲が 1 圃場減少して 4 圃場、乾田直播_稲が 4 圃場減少して 3 圃場、大豆が 1 圃場増加して 18 圃場であった。一方で、慣行植え_稲は同数で 65 圃場であった。また、作付けが変更されて小麦が作付けされた圃場が 5 圃場、何も作付けしない圃場が 1 圃場であった。この何も作付けしない圃場は、反復が無いので、解析から除外した。

3.3.2 使用 SAR データ

使用した SAR の 2009 年の田植え期（5 月 23 日）に撮影された HH 偏波の画像を図 3-1 に示す。図の白点線内が現地調査をおこなった範囲である。SAR 画像は、11 日に 1 回の撮影が可能な X バンド SAR 衛星の TSX を用いて、作付け状況の現地調査の年度と同期して 2009 年と 2010 年の 2 カ年連続して田植え期と生育期の撮影をおこなった。各年の TSX データの緒元は同様に、下記の通りである。

- ・ 偏波：HH, VV
- ・ 空間分解能：観測時 約 2.3 m, 解析時 1 m にリサンプリング
- ・ 入射角：49.21 度から 49.89 度
- ・ 衛星軌道：アセンディング
- ・ 撮影モード：高分解能 SpotLight モード
- ・ プロダクトタイプ：マルチルック処理、地図投影処理および地形補正

した Enhanced Ellipsoid Corrected (EEC) プロダクト

田植え期と生育期の TSX の撮影時期は、2009 年の場合、田植え期が 5 月 23 日、生育期が 6 月 25 日であり、2010 年の場合、田植え期が 5 月 21 日、生育期が 6 月 23 日である。

表3-1 研究対象の圃場数

水田の利用形態	圃場数	
	2009年	2010年
早植え_稲	4	2
慣行植え_稲	65	65
遅植え_稲	5	4
乾田直播_稲	7	3
大豆	17	18
小麦	0	5
作付なし	0	1
合計	98	98



図 3-1 湛水期（5 月 23 日）に撮影された HH 偏波の画像

3.3.3 解析のフロー

本研究で提案する TSX データを用いた稲作水田を分類する手法の解析フローを図 3-2 に示す。

(1) 圃場ポリゴンの作成

圃場ごとの後方散乱係数を算出するために、圃場ポリゴンを作成する。古川農業試験場の 2009 年の試験圃場図を参考に、2001 年に撮影した空中写真を用いて、圃場の畦畔を確認しながら作成する。圃場ポリゴンには、属性として圃場番号を付与する。

(2) 2 時期の後方散乱係数の算出

2009 年の田植え期、生育期の 2 時期の TSX データは、次の式 3.1 を用いて後方散乱係数を算出する (Infoterra, 2008)。

$$\begin{aligned}\sigma_0 \text{ dB} &= \beta_0 \text{ dB} + 10 \times \log_{10}(\sin \theta_{loc}) \\ \beta_0 \text{ dB} &= 10 \times \log_{10}(\beta_0) \\ \beta_0 &= k_s \times |DN|^2\end{aligned}\tag{3.1}$$

β_0 : スラントレンジの単位面積あたりのレーダ反射強度

k_s : TSX の撮影条件によるマイクロ波の校正係数

DN : TSX データのデジタルナンバー

$\beta_0 \text{ dB}$: スラントレンジの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

$\sigma_0 \text{ dB}$: グラウンドレンジの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} : EEC プロダクトの Geocoded Incidence Angle Mask による局所入射角

(3) 水田の状況と後方散乱係数の関係把握

早植え_稲, 慣行植え_稲, 遅植え_稲, 乾田直播_稲, 大豆について、水田の状況と後方散乱係数の関係を把握する。この関係の把握では、各圃場の湛水、土壌の耕起および作物の生育状況等の水田の状況における後方散乱係数を把握し、早植え_稲, 慣行植え_稲, 遅植え_稲, 乾田直播_稲, 大豆の後方散乱係数の大小の違いを検討する。

(4) クラスタ分析の実施

Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique (ISODATA) 法 (Memarsadeghi *et al.*, 2007) を用いてクラスタ分析をおこなう。クラスタ分析は、2009 年と 2010 年それぞれの田植え期および生育期の TSX データに対しておこなう。

(5) 圃場ごとの特徴量を構成する各クラスターの割合の算出

圃場ごとの各クラスターの割合は、圃場ポリゴンを用いて、各クラスターの画素数と圃場の画素数の割合から計算する。以下の式 3.2 から算出する。

$$CP_n = C_n/N \times 100 \quad (3.2)$$

CP_n : 1 圃場に占めるクラスター_n の割合

C_n : クラスター_n に分類された画素数

N : 1 圃場の画素数

(6) 各クラスターの意味把握

田植え期と生育期の水田利用形態の特徴をあらわす後方散乱係数の値を用いて、類型化された各クラスターの特徴の把握をおこなう。

(7) 各クラスターの割合の大小関係による分類式の作成と分類実施

分類式は、圃場内のクラスター分析による各クラスターの割合により閾値を決定して作成する。閾値設定の方法については次節 3.3.4 で述べる。導き出した分類式をもとに、早植え_稲、慣行植え_稲、遅植え_稲、乾田直播_稲、大豆の分類を実施する。

(8) 分類式を用いた水田利用形態の分類マップ

分類結果は、圃場ポリゴンの属性として記録し、マップを作成する。

(9) 提案手法の検証

① 現地調査結果との比較

上記の (1) から (7) の処理で作成した分類式を用いて、早植え_稲、慣行植え_稲、遅植え_稲、乾田直播_稲および大豆を分類する。分類した結果と現地調査から得られた 2009 年の圃場の作付け状況と比較して提案手法の精度を調べる。

② 他年次データへの適用

本手法の有効性を調査するために、他年次の 2010 年の TSX データを用いて、本手法と同様の方法で分類式を作成し、2010 年の現地調査結果と比較する。

③ 既往の閾値法との比較

分類手法の分類精度の確認のために、本研究で提案する手法と従来用いられている閾値法による早植え_稲、慣行植え_稲、遅植え_稲、乾田直播_稲を含む稲作と大豆との分類結果で比較する。閾値法に使用するデータは、スペckルノイズの低減をおこなった 2009 年の田植え期と生育期の TSX データおよび圃場ポリゴンである。スペckルノイズを低減するためのフィルタは、Lee フィルタ (Lee, 1980) を 3×3 のウィンドウサイズで適用する。また、閾値の決定手法は、客観性を保つために P-tile 法 (石塚, 2006) を用いる。

3.3.4 閾値の設定

前節 3.3.3 (7) の閾値設定では, Tukey (1977) が提唱した探索的データ解析法 (Exploratory data analysis : EDA) による箱ひげ図を用いる。箱ひげ図は細長い箱と, その両端からひげを出すことにより, 最小値, 最小値から最大値までを並べて最小値から $1/4(25\%)$ の第 1 四分位点, 中央値, $3/4(75\%)$ の第 3 四分位点, 最大値を示すことができる。箱は第 1 四分位点と第 3 四分位点を短辺した長方形であり, この箱にひげとして最小値と最大値が付いており, 箱内にある横棒が中央値である。箱ひげ図では, 水田利用形態ごとの各クラスターの外れ値, 中央値および四分位数を視覚的に確認することができる。よって, 各水田利用形態を分類するための閾値は, 箱ひげ図を確認しながら各水田利用形態が重複しないように設定する。

3.4 結果と考察

3.4.1 提案手法の2009年の解析

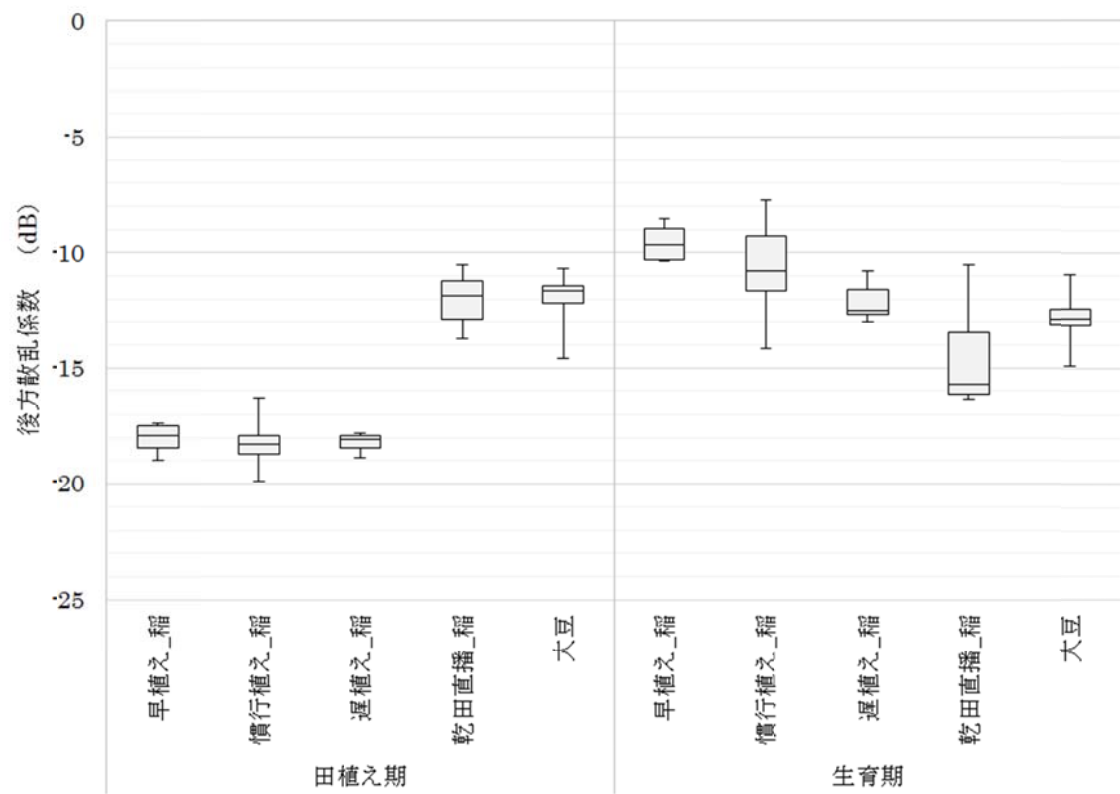
(1) 水田の状況と後方散乱係数の関係

水田の利用形態ごとの田植え期（5月23日）、生育期（6月25日）それぞれのHH偏波およびVV偏波の後方散乱係数をそれぞれ図3-3の(a)と(b)に示す。

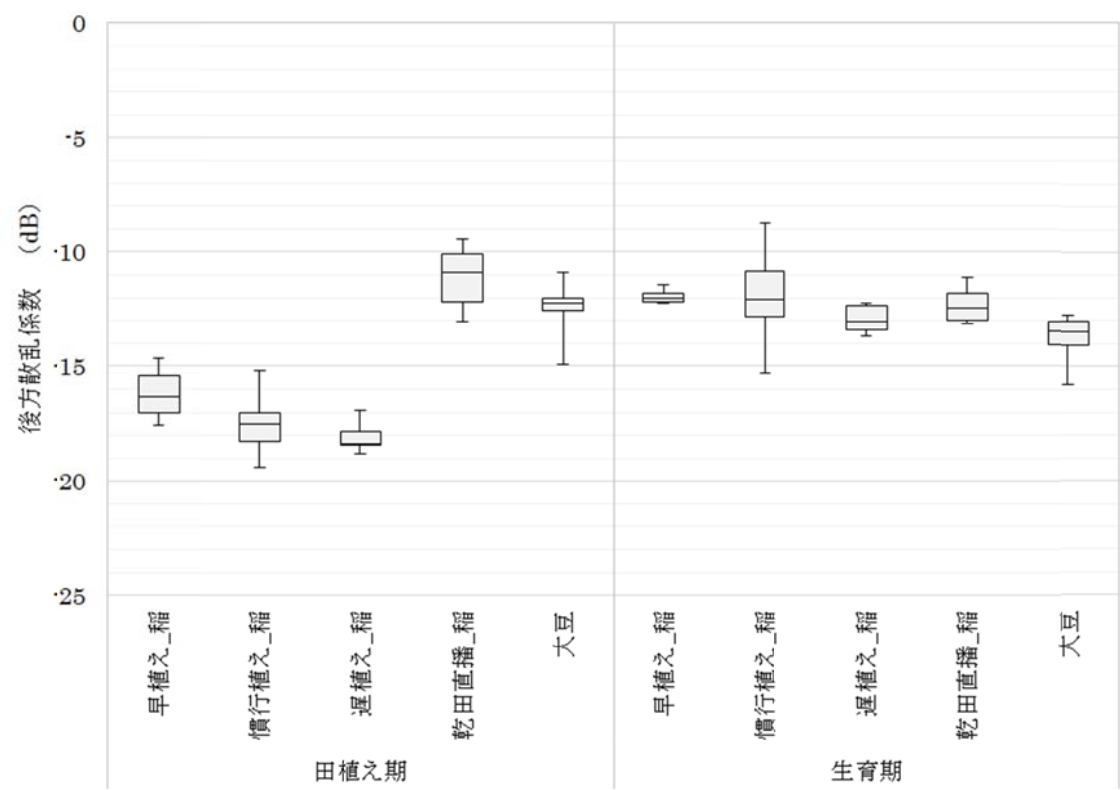
まず、田植え期での後方散乱係数の中央値をみると、HH、VV偏波とも、田植えで湛水している早植え_稲、慣行植え_稲および遅植え_稲は、乾田直播_稲、大豆と比べてみると非常に低い値である。乾田直播_稲と大豆のVV偏波を比較してみると、乾田直播_稲が大豆より後方散乱係数が大きい。この理由は、大豆は播種前で耕起等の作業にも入っていない状況であるのに対し、乾田直播_稲は筋状に播種され畝たてがおこなわれており、土壌表面の凹凸があるためと考えられる。早植え_稲、慣行植え_稲および遅植え_稲を比べると、HH偏波では、早植え_稲>遅植え_稲>慣行植え_稲であり、VV偏波だと早植え_稲>慣行植え_稲>遅植え_稲となっている。XバンドSARでの後方散乱係数は、作物が大きくなると後方散乱係数が大きくなることが知られている。しかし、早く田植えをおこなった順に後方散乱係数が大きくなっていない。この理由は、植えた苗の大きさが統一されていないことと、田植え後に、まず、根が生育し、その後に地上部が生育するため、田植え後1~2週間は地上部が生育せずに重量が減少することがあり、この結果は妥当であると考えられる。生育期でのHH偏波をみると、早植え_稲>慣行植え_稲>遅植え_稲>大豆>乾田直播_稲となる。大豆は田植え期より生育期の後方散乱係数が低いが、播種直後であり、大豆の発芽率を上げるため、ローラを用いた土壌を鎮圧する作業により土壌面が平らになっていることによる。乾田直播_稲の稲は、まだ小さく、湛水状態にあるため、田植え期より後方散乱係数が低いのは当然である。生育期でのVV偏波をみると、早植え_稲>慣行植え_稲>乾田直播_稲>遅植え_稲>大豆となっているが、その差は少ない。遅植え_稲より乾田直播_稲の後方散乱係数が小さいのは、このとき、遅植え_稲の生育期の水田で縦構造の形状が少なかったことによると考えられ、稲の葉が展開して縦構造から横構造に変化したためと考えられる。このように、水田利用形態による後方散乱係数の違いは、HH偏波およびVV偏波ともにわずかな場合が多く、これらの形態を閾値法で分類することは困難である。

田植え期から生育期への後方散乱係数の中央値の変化は、早植え_稲、慣行植え_稲、遅植え_稲が増加した。早植え_稲はHH偏波が約-8 dBの増加、VV偏波が約-4 dBの増加、慣行植え_稲は、HH偏波が約-7 dBの増加、VV偏波が約-5 dBの増加、遅植え_稲は、HH偏波が約-6 dBの増加、VV偏波が約-5 dBの増加であった。一方で、乾田直播_稲と大豆は、後方散乱係数が

田植え期から生育期にかけて減少した。乾田直播_稲は、HH 偏波が約 -4 dB の減少、VV 偏波が約 -2 dB の減少、大豆は、HH 偏波、VV 偏波ともに約 -1 dB の減少であった。HH 偏波は VV 偏波よりも大きな増加の変化があった。



(a) HH 偏波



(b) VV 偏波

図 3-3 田植え期と生育期の後方散乱係数 (2009 年)

(2) クラスタ分析の実施

クラスタ分析は、いくつかの分類にするかというクラスタ数を指定する。このため、本分析に先立ち、事前のクラスタ分析を実施した結果では、クラスタ数が 4 以下であると稲作水田と大豆の特徴量の傾向が類似していた。クラスタ数が 5 以上であれば、稲作水田と大豆の特徴量の傾向が異なることが確認できた。したがって、本研究でのクラスタ数は、稲作水田と大豆の特徴量の傾向が異なる最小のクラスタ数の 5 とした。HH 偏波の田植え期(5 月 23 日)と生育期(6 月 25 日)の後方散乱係数を 2 バンドとしてクラスタ分析を実施し、図 3-4 に各クラスタの 2 時期の後方散乱係数を示し、図 3-5 に各水田利用形態圃場における各クラスタ値の分布画像を示した。

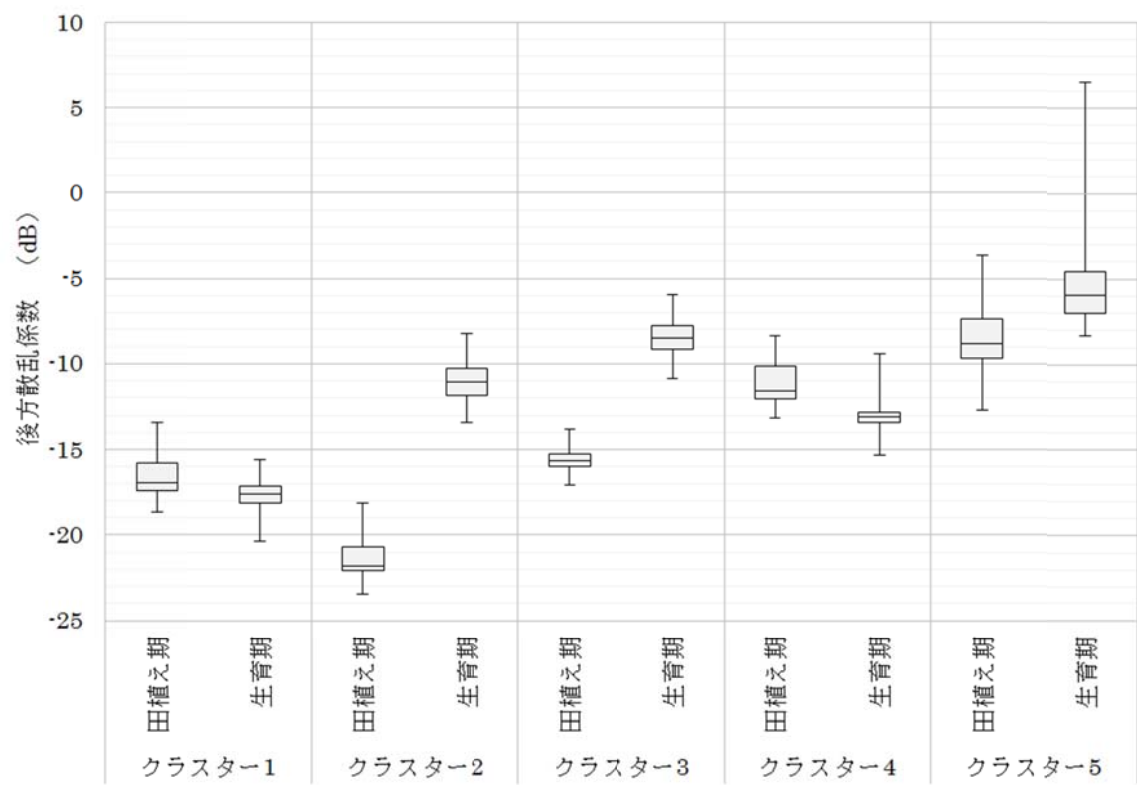


図 3-4 各クラスターの田植え期と生育期の後方散乱係数(2009 年:HH 偏波)

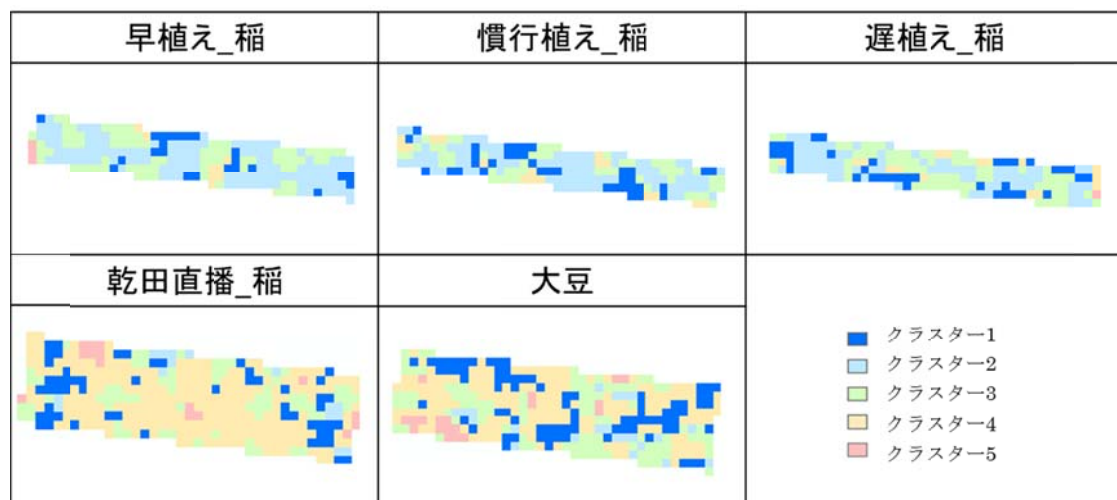


図 3-5 各水田利用形態圃場における各クラスター値の分布画像（2009年：HH 偏波）

(3) 各クラスターの意味

5 つのクラスターを構成する田植え期と生育期の後方散乱係数の特徴について、図 3-3、図 3-4 および図 3-5 から把握した。

・クラスター1

クラスター1 の後方散乱係数の中央値は、両時期ともに小さい値であるが、田植え期より生育期の方がより小さかった（図 3-4）。図 3-5 をみると、いずれの水田利用形態もクラスター1 が少しずつ存在していることが認められる。図 3-3 に示す田植え期の湛水した稲作水田（早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲）の後方散乱係数と図 3-4 に示す田植え期と生育期の後方散乱係数がほぼ同様であるため、田植え期と生育期の水面等の滑らかな面による鏡面散乱をあらわしていると考えられる。理解のために「田植え期の主な散乱体・生育期の主な散乱体」と記述すると「ほぼ滑らか面・滑らか面」のクラスターと記述できる。

・クラスター2

クラスター2 は田植え期から生育期にかけて後方散乱係数が増加しており（図 3-4），早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲で卓越していた（図 3-5）。図 3-3 と図 3-4 を比べると田植え期では、湛水した稲作水田（慣行植え_稲，早植え_稲，遅植え_稲）より後方散乱係数が小さく、水面からのみの散乱となり、生育期においては、生育している植物体による散乱をあらわしている。「滑らか面・植物体」と記述する。

・クラスター3

クラスター3 もクラスター2 と同様に、田植え期から生育期にかけて増加しているが、田植え期・生育期とも、クラスター2 より後方散乱係数大きい（図 3-4）。また、いずれの水田利用形態でも存在している（図 3-5）。このクラスターは、図 3-3 に示す田植え期においては、水面が主な慣行植え_稲，早植え_稲，遅植え_稲より後方散乱係数大きく、土壌を主に観測している乾田直播_稲，大豆より小さい値である。生育期においては、植物体により後方散乱係数が大きくなっており、早植え_稲，遅植え_稲，慣行植え_稲よりも大きな値となっている。このため、「中間の面・植物体」と記述する。

・クラスター4

クラスター4 は田植え期から生育期にかけて後方散乱係数が減少した（図 3-4）。このクラスター4 は、主に乾田直播_稲，大豆に存在している（図 3-5）。田植え期の値は、図 3-3 のどの値よりもほぼ高く、乾田直播_稲の値に最も近い。生育期は、大豆と同等な値である。「粗い面・中間の面」と記述する。

・クラスター5

クラスター5 は各時期とも -10 dB 以上の後方散乱係数を示した（図 3-4）。図 3-3 に示すいずれの値より大きく、畝などの土壌面等の入射方向に強い散乱が 2 回とも観測されており、乾田直播_稲や大豆に存在している（図 3-5）。クラスター5 は「粗い面・粗い面」と記述する。

(4) 分類式の作成

水田利用形態ごとの各クラスターの割合を図 3-6 に示す。図 3-6 に示すとおり、「早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲」と「乾田直播_稲，大豆」とはクラスター2 やクラスター4 で明確に分離できる。この事象を利用し，まず，「早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲」と「乾田直播_稲，大豆」を式 3.3 で分ける。

$$CP_2 > 20\% \quad (3.3)$$

CP_n : 1 圃場に占めるクラスター_n の割合

式 3.3 を満たすものを「早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲」，満たさないものを「乾田直播_稲，大豆」とする。次に，式 3.3 で「早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲」に分けたものを，早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲に分類する方法を検討する。早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲は，移植日の違いであり，移植後の日数で比べると，早植え_稲 > 慣行植え_稲 > 遅植え_稲の順序となる。図 3-6 で，この順序で並ぶクラスターは，クラスター3「中間の面・植物体」であり，並ぶ順序が逆なものは，クラスター1「ほぼ滑らかな面・滑らかな面」とクラスター2「滑らかな面・植物体」である。クラスター3 は，「中間の面・植物体」であり，田植えした日数の増加と同期して，田植え期は水面の「中間の面」での散乱，生育期は「植物体」での散乱というカテゴリーが増加するのは妥当といえる。クラスター1「ほぼ滑らかな面・滑らかな面」という田植え期から生育期への変化で，後方散乱係数が減少するということは田植え後の日数とともに起きにくくなることも納得できる。しかしながら，クラスター2 は，「滑らかな面・植物体」であり，田植えからの日数が増加するとともに，田植え期は水面の「滑らかな面」での散乱，生育期は「植物体」での散乱のカテゴリーが増加すると考えられるが逆になっている。この理由は，早植え_稲の稲は田植え期で既に生育が進んでおり，滑らかな面からほぼ滑らかな面に変化している部分が多かったためと考えられる。このため，田植え後の日数と正の相関があると考えられるクラスター1，3 の割合で分類することとした。早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲の分類は，箱ひげ図で表示して，できるだけ他の水田利用形態と重ならない割合を閾値とした。まず，遅植え_稲は，式 3.4 で分類し，式 3.4 を満たさないものは「早植え_稲，慣行植え_稲」とした。早植え_稲は，式 3.4 で「早植え_稲，慣行植え_稲」に分類されたものを対象に式 3.5 で分類した。式 3.5 を満たさないものは，慣行植え_稲とした。

$$CP_1 > 18\% \quad (3.4)$$

$$CP_3 > 42\% \quad (3.5)$$

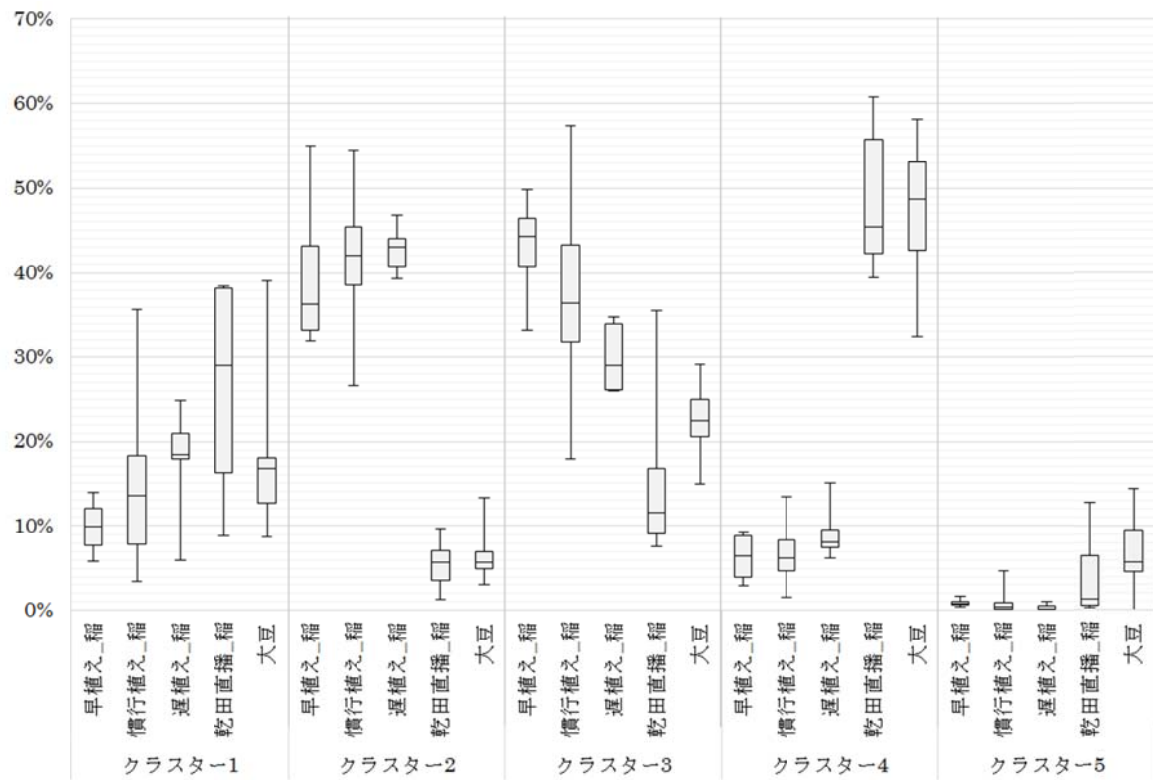


図 3-6 水田利用形態ごとの各クラスターの割合（2009 年：HH 偏波）

次に、式 3.3 で「乾田直播_稲，大豆」に分けたものを，さらに，乾田直播_稲と大豆に分けることを検討する。クラスター2，4，5 は，乾田直播_稲と大豆との間にほとんど違いはない。クラスター1「ほぼ滑らか面・滑らか面」は，乾田直播_稲>大豆であり，クラスター3「中間の面・植物体」は逆に乾田直播_稲<大豆である。田植期の大豆は耕起前であり乾田直播_稲は播種済みで整地されており，生育期の乾田直播_稲は湛水されることを考えるとクラスター1と3それぞれの大豆と乾田直播_稲の大小関係は理解できる。このため，田植え後の日数と相関していると考えられるクラスター3の事象を利用して式 3.6 で分類することとした。式 3.6 を満たすものを乾田直播_稲，満たさないものを大豆とする。

$$CP_3 < 17\% \quad (3.6)$$

式 3.3～式 3.6 の分類式を用いて，対象の圃場を早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲，乾田直播_稲，大豆の 5 つの水田利用形態に分類し，TSX 画像上に表示した分類マップを作成した（図 3-7）。

（5）現地調査結果との比較結果

2009 年データを用いた分類結果を表 3-2 に示す。分類の評価は，Producer's Accuracy と User's Accuracy によりおこなう。水田利用形態ごとの Producer's Accuracy は，大豆が 88%と最も高く，早植え_稲，乾田直播_稲，遅植え_稲，慣行植え_稲の順に高い値となっている。一方で，User's Accuracy は，慣行植え_稲，乾田直播_稲，大豆が高い値を示している。本手法では，慣行植え_稲と「早植え_稲，遅植え_稲」の間で誤分類されることがあるものの，早植え_稲と遅植え_稲が，それぞれに誤分類されることはない。また，早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲が稲作水田以外の大豆に分類されることはなかった。



図 3-7 分類式を用いた水田利用形態の分類マップ（2009 年：HH 偏波）

表 3-2 2009 年データを用いた分類結果（HH 偏波）

本提案手法による分類 (HH偏波)		検証データ					総計	User's Accuracy(%)
		早植え_稲	慣行植え_稲	遅植え_稲	乾田直播_稲	大豆		
分類データ	早植え_稲	3	18	0	0	0	21	14%
	慣行植え_稲	1	28	2	0	0	31	90%
	遅植え_稲	0	19	3	0	0	22	14%
	乾田直播_稲	0	0	0	5	2	7	71%
	大豆	0	0	0	2	15	17	88%
総計		4	65	5	7	17	98	
Producer's Accuracy (%)		75%	43%	60%	71%	88%		

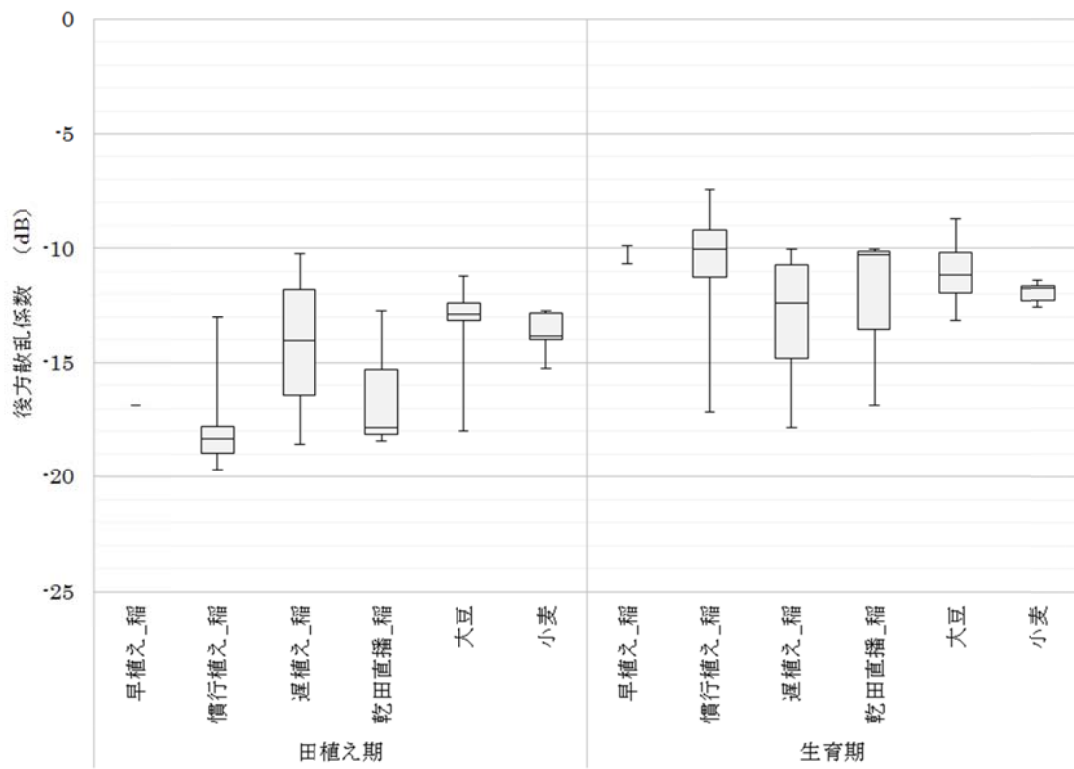
Over All Accuracy 55%

3.4.2 提案手法の2010年の解析

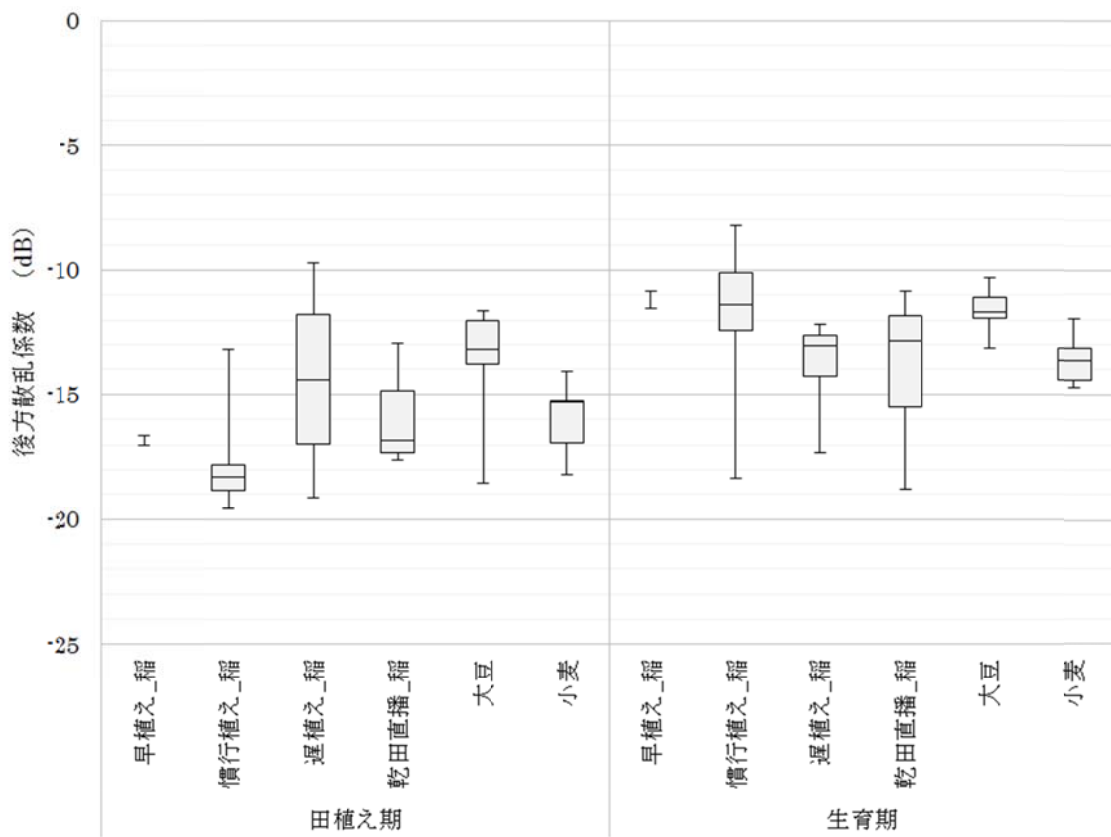
(1) 水田の状況と後方散乱係数の関係

水田の利用形態ごとの田植え期（5月21日）、生育期（6月23日）それぞれのHH偏波およびVV偏波の後方散乱係数を図3-8の（a）と（b）に示す。早植え_稲は2圃場であるため、ひげのみを使って2圃場の値を示す。

まず、田植え期でのHH偏波をみると、早植え_稲、慣行植え_稲、乾田直播_稲は、遅植え_稲、大豆、小麦と比べて後方散乱係数が小さい。この乾田直播_稲が図3-3に示す2009年の乾田直播_稲と比べて後方散乱係数が小さいのは、乾田直播_稲の播種の時期が早く、既に湛水状態にあるためと考えられる。小麦のHH偏波は、VV偏波と比べると後方散乱係数が大きい。これは、2009年秋に播種した小麦は降雪まで生育し、降雪により一旦生育がおさまるが雪解け後すぐに生育を再開しているため、葉が展開して横構造が強くあらわれていると考えられる。生育期でのHH偏波をみると、おおむね早植え_稲>慣行植え_稲>乾田直播_稲>大豆>遅植え_稲>小麦となっている。小麦は刈取りが完了し、圃場が整地された状態であるため、後方散乱係数が低いのは当然である。遅植え_稲より乾田直播_稲の後方散乱係数が大きいのは、乾田直播_稲の播種の時期が遅植え_稲よりも早く、稲の生育が進んでいるためと考えられる。生育期でのVV偏波をみると、早植え_稲>慣行植え_稲>大豆>乾田直播_稲>遅植え_稲>小麦となっている。乾田直播_稲よりも大豆の後方散乱係数が大きいのは、畝たてがおこなわれており、土壌表面の凹凸があるためと考えられる。田植え期から生育期への後方散乱係数の変化は、すべての圃場が増加した。早植え_稲はHH偏波が約-7 dBの増加、VV偏波が約-6 dBの増加、慣行植え_稲は、HH偏波が約-8 dBの増加、VV偏波が約-7 dBの増加、遅植え_稲は、HH偏波が約-2 dBの増加、VV偏波が約-1 dBの増加、乾田直播_稲は、HH偏波が-8 dB、VV偏波が約-4 dBの増加、大豆と小麦は、HH偏波、VV偏波ともに、-2 dBの増加であった。2009年の結果と同様に、HH偏波はVV偏波よりも大きな増加の変化があった。



(a) HH 偏波



(b) VV 偏波

図 3-8 田植え期と生育期の後方散乱係数 (2010 年)

(2) クラスター分析の実施と各クラスターの意味

HH 偏波の田植え期（5 月 21 日）と生育期（6 月 23 日）の後方散乱係数を 2 バンドとして、2009 年と同様に 5 つのクラスターに分けるクラスター分析を実施した。各クラスターの 2 時期の後方散乱係数を図 3-9 に示す。2010 年の図 3-8、図 3-9 に示す傾向は、以下のように 2009 年の結果である図 3-3、図 3-4 と同じ傾向をしており、各クラスターの意味もおおむね同じことが言える。

クラスター1 の後方散乱係数は両時期ともに低く、田植え期から生育期にかけて減少した。2010 年の各水田利用形態圃場における各クラスター値の分布画像を図 3-10 に示す。図 3-10 をみると、各水田利用形態でクラスター1 が少しずつ存在していることが認められる。「ほぼ滑らか面・滑らか面」のクラスターと記述する。

クラスター2 は田植え期の後方散乱係数が非常に小さく、生育期にかけて後方散乱係数が増加した。早植え_稲、慣行植え_稲、遅植え_稲および乾田直播_稲で卓越していた（図 3-10）。「滑らか面・植物体」と記述する。

クラスター3 もクラスター2 と同様に田植え期から生育期にかけて後方散乱係数が増加しているが、田植え期・生育期ともにクラスター2 より値が大きい（図 3-9）。また、いずれの水田利用形態でも存在している（図 3-10）。「中間の面・植物体」と記述する。

クラスター4 は各時期ともほぼ変わらずに約 -12 dB を示した（図 3-9）。このクラスター4 は、主に大豆および小麦に存在している（図 3-10）。「中間の面・中間の面」と記述する。

クラスター5 は両時期とも大きな値であり、田植え期から生育期にかけてさらに増加した。このクラスター5 は、クラスター4 同様に大豆および小麦に主に存在している（図 3-10）。「粗い面・粗い面」と記述する。

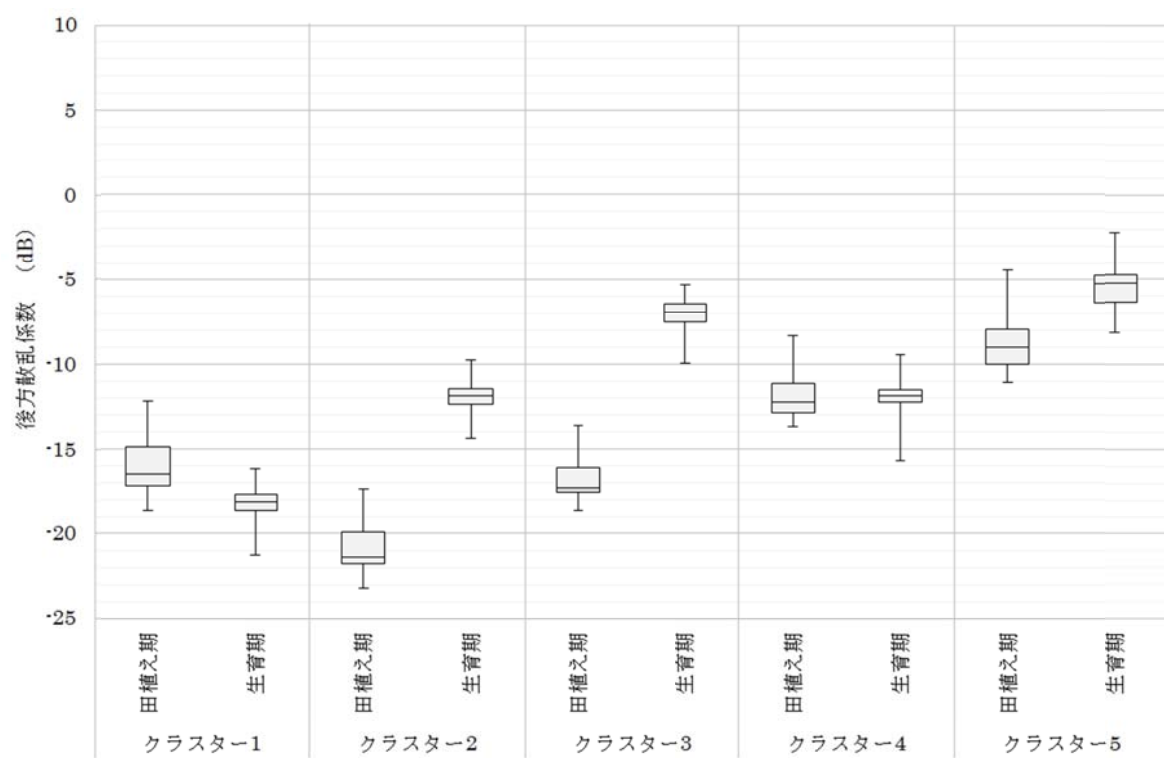


図 3-9 各クラスターの田植え期と生育期の後方散乱係数(2010 年:HH 偏波)

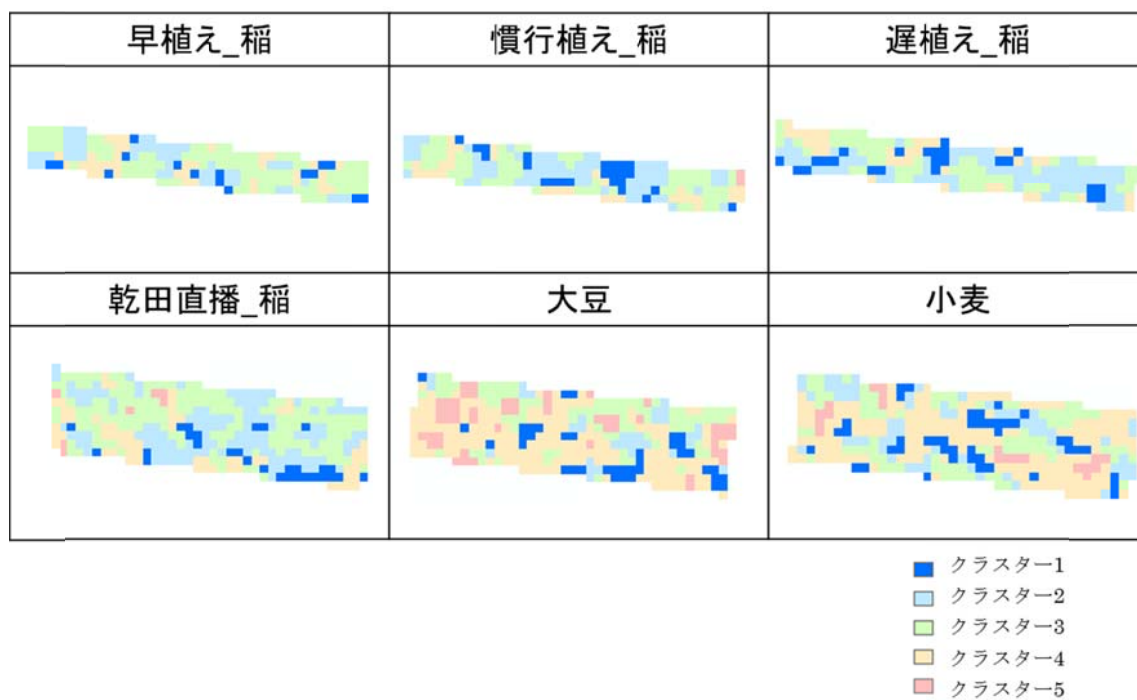


図 3-10 各水田利用形態圃場における各クラスター値の分布画像（2010 年：HH 偏波）

(3) 分類式の作成

2010 年の水田利用形態ごとの各クラスターの割合を図 3-11 に示す。図 3-11 をみると、「早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲，乾田直播_稲」は「大豆，小麦」と比べてクラスター5 が少ない。この事象を利用し，まず，「早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲，乾田直播_稲」と「大豆，小麦」を式 3.7 で分ける。

$$CP_5 < 3\% \quad (3.7)$$

CP_n : 1 圃場に占めるクラスター_n の割合

式 3.7 を満たすものを「早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲，乾田直播_稲」，満たさないものを「大豆，小麦」とする。次に，式 3.7 で「早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲，乾田直播_稲」に分けたものを，さらに，早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲，乾田直播_稲に分類する方法を検討する。

図 3-11 のクラスター1～5 までの箱ヒゲ図において早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲，乾田直播_稲で，お互いに重なり合っていて明確に分ける式を導くのは困難であった。このため，乾田直播_稲の分類を犠牲にして，クラスター4 により，慣行植え_稲を抽出した。

$$CP_4 < 16\% \quad (3.8)$$

式 3.8 を満たすものを慣行植え_稲，満たさないものを「早植え_稲，遅植え_稲，乾田直播_稲」とした。次に，クラスター1 とクラスター4 を用いて，早植え_稲を抽出した。

$$CP_1 < 11\% \quad (3.9)$$

$$CP_4 < 20\% \quad (3.10)$$

式 3.9 と式 3.10 の両方を満たすものを早植え_稲，1 つでも満たさないものを「遅植え_稲，乾田直播_稲」とした。次に，クラスター5 を用いて，「遅植え_稲」を抽出した。

$$CP_5 > 0.6\% \quad (3.11)$$

式 3.11 を満たすものを遅植え_稲，満たさないものを乾田直播_稲とした。次に，式 3.7 で「大豆，小麦」に分けたものを，大豆と小麦に分けることを検討する。クラスター1「ほぼ滑らか面・滑らか面」は，大豆<小麦である。田植期の大豆は耕起前であり，小麦は刈取り間近である。生育期の小麦は刈取られて整地されることを考えるとクラスター1 の大豆と小麦の大小関係は理解

できる。このため、クラスター1の事象を利用して式 3.12 で分類することとした。式 3.12 を満たすものを大豆，満たさないものを小麦とする。

$$CP_1 < 12 \% \quad (3.12)$$

上記の方法で，分類した結果を表 3-3 に示す。2010 年についても提案した手法で分類できることが明らかになった。

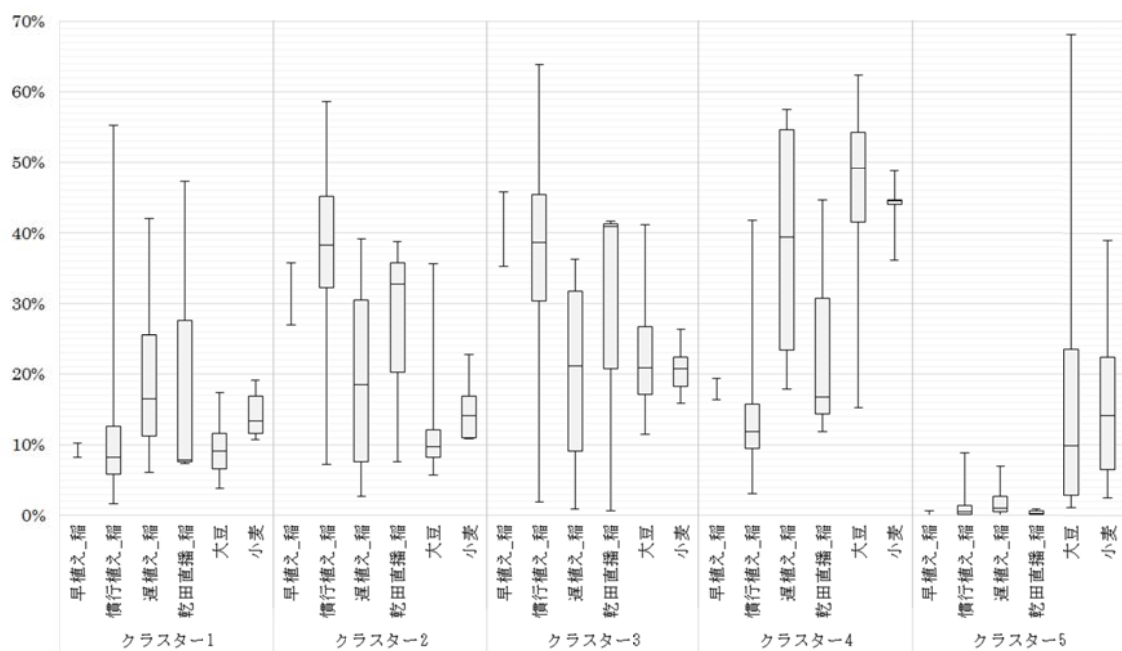


図 3-11 水田利用形態ごとの各クラスターの割合（2010 年：HH 偏波）

表 3-3 2010 年データを用いた分類結果（HH 偏波）

本提案手法による分類 (HH偏波)		検証データ						総計	User's Accuracy(%)
		早植え_稲	慣行植え_稲	遅植え_稲	乾田直播_稲	大豆	小麦		
分類データ	早植え_稲	2	4	0	1	2	0	9	22%
	慣行植え_稲	0	45	0	1	1	0	47	96%
	遅植え_稲	0	4	2	0	2	1	9	22%
	乾田直播_稲	0	8	1	1	0	0	10	10%
	大豆	0	3	0	0	10	1	14	71%
	小麦	0	1	1	0	3	3	8	38%
総計		2	65	4	3	18	5	97	
Producer's Accuracy (%)		100%	69%	50%	33%	56%	60%		

Over All Accuracy 65%

3.4.3 2009年既往の閾値法

(1) 既往の閾値法での分類結果

2009 年データを用いた既往の閾値法による分類結果を表 3-4 に示す。検証データ，分類データの稲作水田は，早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲，乾田直播_稲のすべてを含む。Producer' s Accuracy は，稲作水田が 91%，大豆が 100%，User' s Accuracy は，稲作水田が 100%，大豆が 71%であった。Over All Accuracy は，93%であった。

(2) 閾値法の分類項目による本手法の分類結果

①本手法の分類式の作成

閾値法と比較するために，まず，式 3.3 を用いて「早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲」と「乾田直播_稲，大豆」に分ける。さらに，式 3.3 で「乾田直播_稲，大豆」に分けたものを，式 3.6 を用いて乾田直播_稲と大豆に分ける。検証データ，分類データの稲作水田は，式 3.6 で乾田直播_稲に分けたものと式 3.3 で「早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲」に分けたものを合わせたものとする。

②本手法の分類結果

2009 年データを用いた本手法による分類結果を表 3-5 に示す。Producer' s Accuracy は，稲作水田が 98%，大豆が 88%，User' s Accuracy は，稲作水田が 98%，大豆が 88%であった。Over All Accuracy は，96%であった。

表 3-4 2009 年データを用いた閾値法による分類結果

閾値法による分類 (HH偏波)		検証データ		総計	User's Accuracy(%)
		稲作水田	大豆		
分類データ	稲作水田	74	0	74	100%
	大豆	7	17	24	71%
総計		81	17	98	
Producer's Accuracy (%)		91%	100%		

Over All Accuracy 93%

表 3-5 2009 年データを用いた本提案手法による分類結果

本提案手法による分類 (HH偏波)		検証データ		総計	User's Accuracy(%)
		稲作水田	大豆		
分類データ	稲作水田	79	2	81	98%
	大豆	2	15	17	88%
総計		81	17	98	
Producer's Accuracy (%)		98%	88%		

Over All Accuracy 96%

3.4.4 提案手法の評価

(1) 精度および年次間差

表 3-2, 表 3-3 に示すように, 早植え_稲と慣行植え_稲, および, 慣行植え_稲と遅植え_稲のそれぞれが誤分類されることがある。この理由は, 植えた苗の大きさが統一されてないこと, 田植え後にまず根が生育し, その後に地上部が生育するため, 田植え後 1~2 週間は地上部が生育せずに重量が減少することがあることが要因であると考えられる。したがって, 今回用いた田植え期と生育期の TSX データに加えて, 「早植え_稲, 慣行植え_稲」および「慣行植え_稲, 遅植え_稲」のそれぞれに組み合わせにおいて, 稲の生育や管理の特徴の差が明らかになる時期の TSX データを特定していくことが, 今後, 精度を向上させる上で重要である。

2009 年データおよび 2010 年データの利用時で分類式や評価結果に違いがあった。これは, 年次によって同じ水田利用形態でも播種時期や湛水時期が異なるためである。例えば, 乾田直播_稲の場合, 圃場内における耕起時期, 播種時期, 土壌水分量の多少が異なることや対象地域の乾田直播_稲の標本数が少ないことが要因であると考えられる。したがって, 複数年次のデータに本手法を適用して乾田直播_稲の標本数を増やしていくことが重要である。乾田直播_稲の水田を正確に把握するためには, 撮影時期を選ぶ必要があり, 2009 年の方が乾田直播_稲の正答率が高いので, 2 回観測の場合の田植え期の観測は, 乾田直播_稲の水田が湛水される前が良いと考えられる。

2009 年, 2010 年の評価結果では, 早植え_稲, 遅植え_稲のように約 20 日の移植の差異があれば, それぞれを誤分類することはない。さらに, 早植え_稲, 慣行植え_稲, 遅植え_稲が稲作水田以外の大豆や小麦に分類される圃場はほぼないことがわかった。

(2) 既往の閾値法との比較結果

表 3-4, 表 3-5 に示すように, 稲作水田の **Producer's Accuracy** は本提案手法が高く, 大豆は, 既往の閾値法が高かった。また, 稲作水田の **User's Accuracy** では, 閾値法が高く, 大豆は, 本手法が高かった。**Over All Accuracy** では本提案手法の方が高かった。

既往の閾値法は確立された方法であり, 通常の水田の抽出には, 高い精度を有しており, 本提案手法との優劣はつけにくい。しかしながら, 本提案手法は, 乾田直播_稲, 大豆, 小麦を抽出できており, この面での利用価値は高い。さらに, 飼料米およびバイオエネルギー原料米の栽培が増えることが予想されており, 本提案手法はこれらの他用途米と食料米を区別できる可能性を有している。

3.4.5 今後の課題

今後、飼料米およびバイオエネルギー原料米の栽培が増えることが予想されており、本提案手法はこれらの他用途米と食料米を区別できる可能性を有しているため、他用途米と食料米の分類を試みたい。また、今回用いた田植え期と生育期の TSX データに加えて、「早植え_稲、慣行植え_稲」および「慣行植え_稲、遅植え_稲」のそれぞれに組み合わせにおいて、稲の生育や管理の特徴の差が明らかになる時期の TSX データを特定していくことで、精度を向上させていきたい。

3.5 水田利用形態の分類

本章では、田植え期および生育期の 2 時期の高分解能 SAR 画像の TSX を用いて、水田利用形態の分類手法の開発を目的とし、早植え稲作水田、慣行植え稲作水田、遅植え稲作水田、乾田直播稲作水田、大豆栽培水田等の水田利用形態の分類が可能かを検討した。また、TSX は X バンドの SAR であり、光学センサーのように多バンドではないので、圃場ごとの平均値だけではなく、圃場内を観測し各画素の情報を利用することを検討した。

提案手法では、田植え期と生育期の 2 時期の TSX データを 2 バンドとして、対象範囲に対してクラスター分析をおこなった。1 圃場ごとにポリゴンを作成しておき、そのポリゴン内のクラスター間の比率により水田利用形態ごとの早植え_稲、慣行植え_稲、遅植え_稲、乾田直播_稲、大豆等の分類をおこなった。

提案手法を用いた分類結果では、乾田直播_稲、大豆、小麦を抽出できており、この面での利用価値は高い。移植栽培の水稻（早植え_稲、慣行植え_稲、遅植え_稲）は、大豆や小麦とよく分類された。また、早植え_稲、遅植え_稲のように約 20 日の移植の差異があれば、それぞれが誤分類されないことがわかった。

第4章

生育段階ごとの水稻生育量とSARの後方散乱係数との関係

4.1 SARの入射角，偏波と水稻生育量

第2章で指摘したように，異なる偏波，異なる入射角の後方散乱係数と水稻の生育進行による稲体形状の変化との関係，TSXによる日本の水稻の生育や収量の調査の可能性および水稻の生育，収量の推定に適したTSXの撮影条件が明らかになっていない現状がある。

本章では，異なる入射角，異なる偏波を用いて，生育段階ごとの生育量と後方散乱係数と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の入射角や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，最高分蘗期），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との関係から SAR データによる生育量の把握可能性について考察した。

4.2 理論

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。水稻の形状の変化はいくつかの生育段階に分かれる（図4-1）。茎数が最高本数となる最高分蘗期や出穂期は、生育段階の境界となる。最高分蘗期は、移植から茎の分蘗を繰り返す時期と緩やかに茎数が減少していく境の時期である。出穂期は、稲体に穂の形状が加わる時期である。これらの時期を境界とした水稻の形状の変化は、SARのマイクロ波の後方散乱の変化として捉えることができると考えられる。

マイクロ波の後方散乱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（LeToan *et al.*, 1997）、水稻の草高や重量を指数に変換した値を推定する手法（Kurose, 1995）および葉面積指数（LAI）を推定する手法（ShuangHe *et al.*, 2009）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、スペインの水稻圃場の水稻の形状変化に応じた後方散乱係数の時系列変化が報告されている（Lopez *et al.*, 2010, 2009）。

ここで、波長の長さによる地物の認識について考える。森林を例としたマイクロ波の波長依存性を図4-2に示す。図の矢印は、各波長のマイクロ波をあらわす。波長が30cmから100cmのPバンドや15cmから30cmのLバンドは、マイクロ波が樹冠を透過して森林内部に入射する。入射したマイクロ波は、幹や地表面で散乱する。一方で、短い波長のXバンド（2.4cmから3.75cm）やKバンド（1.1cmから1.67cm）では、マイクロ波が森林内部に入射せずに樹冠で散乱する。Lバンドより短く、Xバンドより波長の長いCバンドは、Lバンドと同様に樹冠を透過して森林内部に入射するが、枝や森林内部からの散乱となる。これらの波長の散乱特性は、水稻でも同じことがいえる。波長の短いXバンドによるマイクロ波の観測は、水稻の下層よりも上層の散乱を多く含んでいる。例えば、上層からの散乱は、茎数が増えて水稻群落の混み合った形状や出穂の状況が要素となる。

水稻の形状に対してXバンドのマイクロ波の散乱特性を移植期から最高分蘗期、最高分蘗期から出穂期、出穂以降で分析すると下記の散乱特性が想定される。

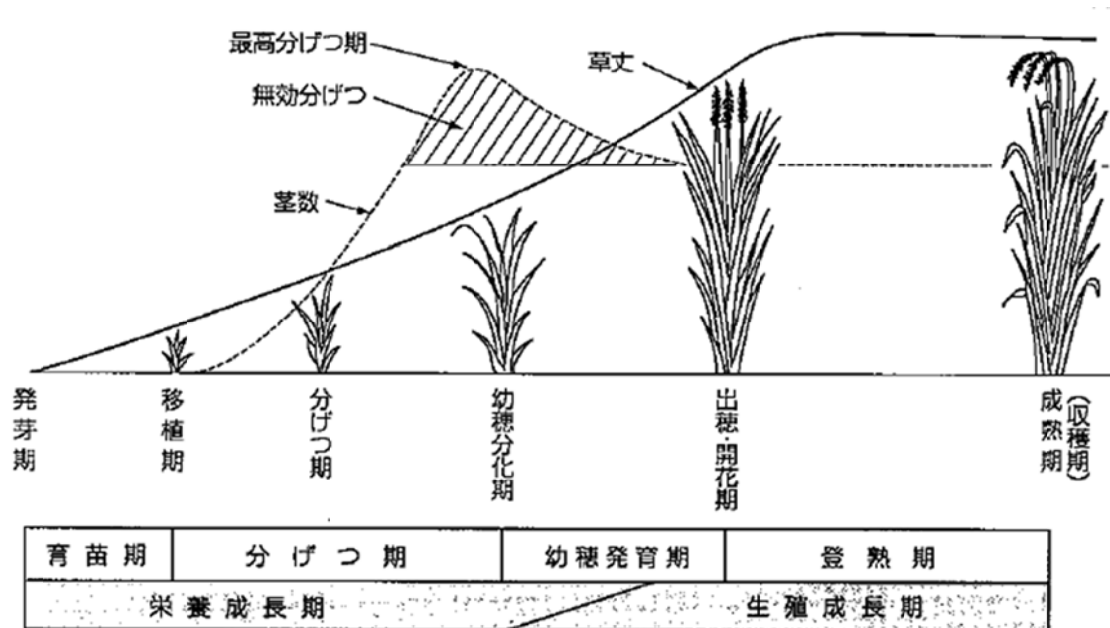
1) 移植期から最高分蘗期

- ・ 移植期は主に湛水面からの散乱
- ・ 移植期から水稻が生育するにつれて、湛水面からの散乱および湛水面と直立する稲体との2回散乱

- ・ 最高分蘗期まで水稻の生育が進むと、隣り合う稲体の間が茎や葉で埋まった群落構造となる。この群落構造の上層からの散乱
- 2) 最高分蘗期から出穂期
- ・ 最高分蘗期後の草丈の生育，茎数の減少により構成された稲体群落の上層からの散乱
- 3) 出穂期以降
- ・ 穂の形状を加えた水稻の上層からの散乱
 - ・ 成熟期近くの垂れ下がった穂および倒伏した水稻からの散乱

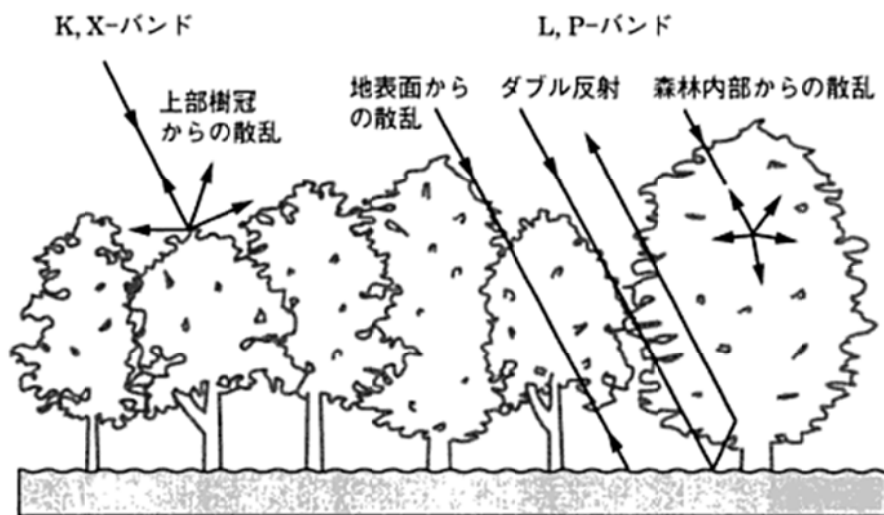
また，異なる入射角は，水稻からの散乱特性を変化させる。マイクロ波の入射角依存性を図4-3に示す。図の矢印は各入射角のマイクロ波，一点鎖線は湛水面をあらわす。また，背景の格子は，入射角の違いを理解しやすくするためのものである。図4-3（a）は入射角が21度，図4-3（b）が49度である。入射角21度と49度と比べると，入射角21度は水稻の形状を鉛直方向から観測する。一方で，入射角49度は，水稻の形状を入射角21度よりも斜め方向から観測することになる。このような入射角の違いは，水稻に入射する偏波の散乱にも変化をもたらす。なぜなら，水稻の茎や葉の垂直方向や水平方向の広がり，鉛直方向と斜め方向から観測した場合で異なるからである。

以上の異なる入射角および異なる偏波の散乱特性と生育段階ごとの水稻の形状の変化との関係を定量的に解析することを試みる。



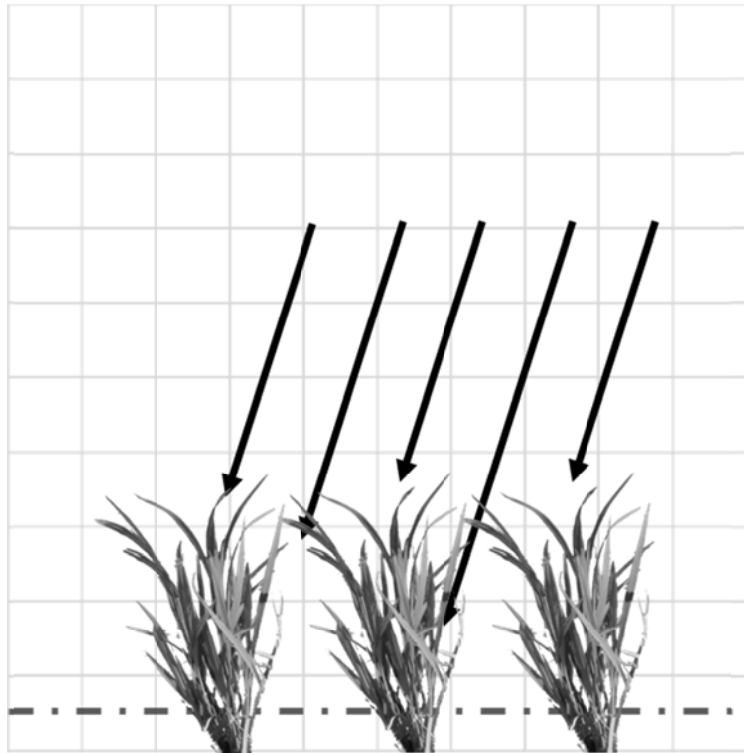
(出典：堀江著，作物栽培の基礎)

図 4-1 稲の生育ステージ

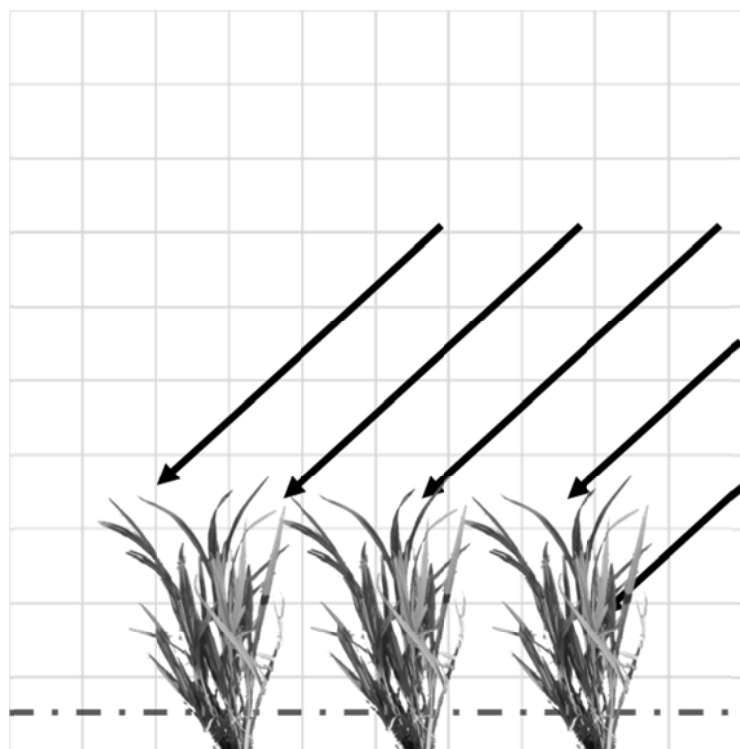


(出典：大内著，リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎)

図 4-2 森林によるマイクロの波長依存性



(a) 入射角21度



(b) 入射角49度

図4-3 マイクロ波の入射角依存性

4.3 実験方法

4.3.1 実験対象圃場

対象とする圃場は、稲作地帯である宮城県の古川農業試験場内の 12 圃場である。12 の対象圃場は、東西方向に長い長方形の形状であり、面積は 8 圃場が 240 m^2 (東西 40m × 南北 6 m), 4 圃場が 280 m^2 (東西 40 m × 南北 7 m) である。栽植間隔は東西に 18 cm, 南北方向に 30 cm である。移植は、移植間隔が、東西の間隔 18 cm, 南北の間隔 30 cm, 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、5 月 11 日、5 月 20 日である。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。

実験対象圃場において水稻の茎数、草丈、草高、植被率といった生育量と湛水深の地上測定を 2009 年 5 月の移植期より 10 月の成熟期までおこなう。1 圃場あたりの茎数、草丈、草高は、圃場の中で生育が一樣であると目視判断した東西方向の両端付近、および、中央付近で計測する。生育量の代表値は、計測数値の平均値とした。湛水深は生育量を計測した場所で複数回計測する。また、植被率は圃場の中央付近の 2 地点で、近赤外カメラを用いて、1.5 m 真上から撮影し、映り込んだ稲体の面積をもとに算出する。

4.3.2 使用 SAR データ

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 4-4 に示す。DOY は、1 月 1 日からの連続日をあらわす。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。

使用する SAR データは、衛星搭載型の X バンド合成開口レーダ TSX のデータである。本研究では、空間分解能が高い High Resolution Spotlight 撮影モードを用いて、HH 偏波と VV 偏波により $10 \times 5 \text{ km}$ 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 度 (49.21 度から 49.89 度) および 21 度 (21.11 度から 22.45 度) を使用し、各入射角の TSX データのピクセルサイズは、入射角 49 度が 1 m, 入射角 21 度が 1.25 m である。なお、TSX の撮影は、入射角 49 度がアセンディング軌道で圃場の西側からの方向、入射角 21 度がディセンディング軌道で東側からの方向でそれぞれおこなう。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 4-4 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。

月	DOY	撮影入射角		地上測定項目	
		49度	21度	植被率 草丈 草高 湛水深	茎数
5	121	●	●	●	移植期
		●	●	●	
		●	●	●	
6	151	●	●	●	
	152	●	●	●	
		●	●	●	
7	181	●	●	●	
	182	●	●	●	
		●	●	●	
8	212	●	●	●	
	213	●	●	●	
		●	●	●	
9	243	●	●	●	
	244	●	●	●	
		●	●	●	
10	273	●	●	●	成熟期
	274	●	●	●	
	286	●	●	●	

図 4-4 TSX データの撮影日と現地調査日

4.3.3 解析のフロー

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4-5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おこなう。

(1) 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 3.1 により後方散乱係数へ変換する。

TSX データを後方散乱係数に変換した 8 月上旬の対象圃場周辺の後方散乱係数画像を図 4-6 から図 4-9 に示す。図 4-6, 図 4-7 がそれぞれ 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 4-8, 図 4-9 がそれぞれ 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 データのスペックルノイズの影響を取り除くために、圃場区画よりも約 2 m 以上内側にある画素の平均値を利用する。

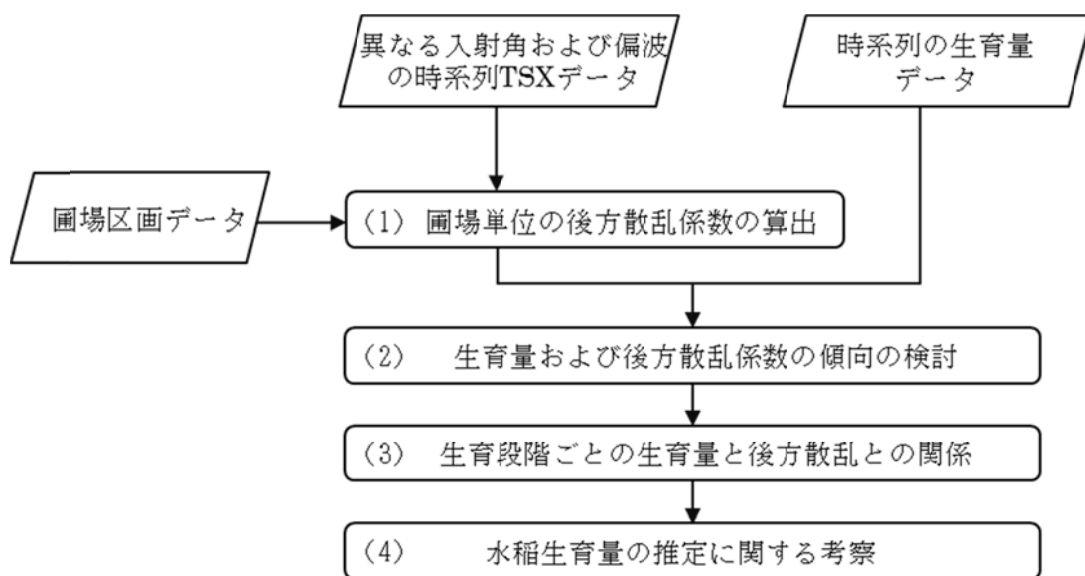


図 4-5 TSX による水稻の生育量の解析手法フロー



図 4-6 入射角 21 度の HH 偏波の後方散乱係数画像 (8 月上旬 : DOY224)



図 4-7 入射角 21 度の VV 偏波の後方散乱係数画像（8 月上旬：DOY224）



図 4-8 入射角 49 度の HH 偏波の後方散乱係数画像（8 月上旬：DOY220）



図 4-9 入射角 49 度の VV 偏波の後方散乱係数画像（8 月上旬：DOY220）

(2) 生育量および後方散乱係数の傾向の検討

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と VV 偏波の後方散乱係数を用いて検討する。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) 生育段階ごとの生育量と後方散乱との関係

時系列の生育量と HH 偏波、VV 偏波の後方散乱係数を用いて、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おこなう。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蘗期前、最高分蘗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 偏波、VV 偏波の後方散乱係数を変数として相関解析をおこなう。

(4) 水稻生育量の推定に関する考察

生育量と入射角 21 度、入射角 49 度それぞれの HH 偏波、VV 偏波の後方散乱係数との傾向の検討、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考察する。

4.4 結果と考察

4.4.1 生育量および後方散乱係数の時系列変化

(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4-10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(堀江, 2004)。よって、茎数が最大のDOY190を最高分蘗期と判断した。草丈は、移植から生育の増加が続き最高分蘗期(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蘗期で約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蘗期(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88cm、標準偏差4cm、植被率(%)が平均値88cm、標準偏差5cmであった。

湛水深は、最高分蘗期で0cm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以後にあらわれた。

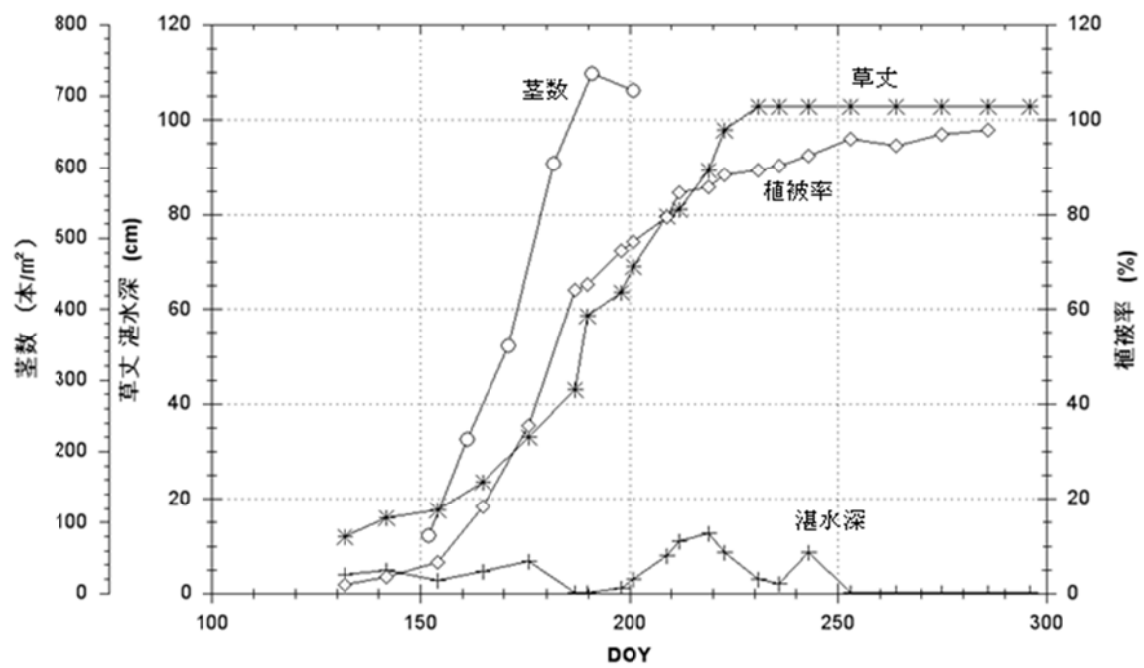


図4-10 ひとめぼれ圃場の生育量の時系列変化

(2) 後方散乱係数の時系列変化

図 4-10 で示したひとめぼれ圃場の後方散乱係数の入射角 21 度の時系列変化を図 4-11, 入射角 49 度を図 4-12 に示す。

図 4-11 に示されるように, 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 4-12)。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。

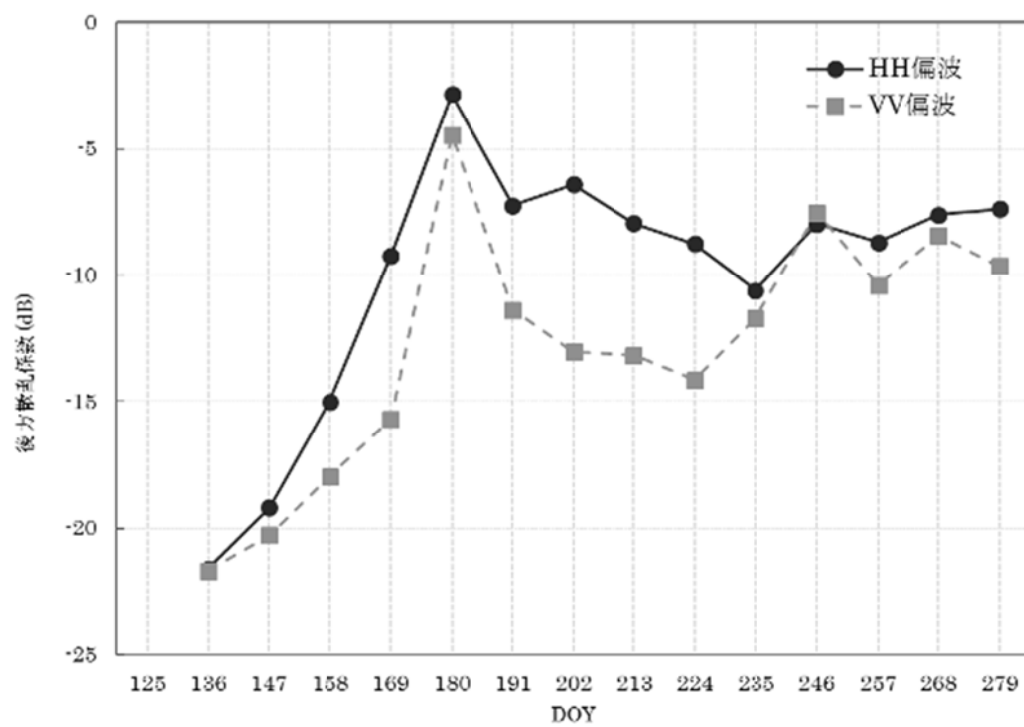


図 4-11 入射角 21 度の後方散乱係数の時系列変化

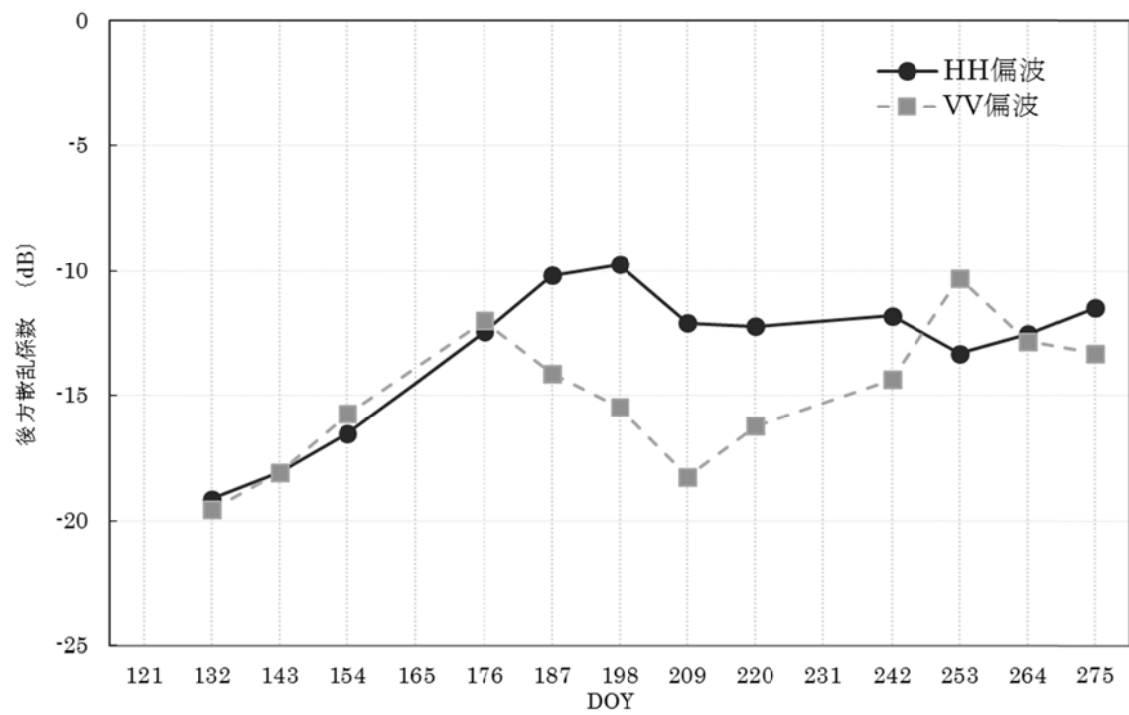


図 4-12 入射角 49 度の後方散乱係数の時系列変化

(3) 生育量と後方散乱係数の傾向

以上の 4.4.1 項 (1), (2) 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 4-10 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 4-11, 図 4-12 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 4-10 に示す茎数が約 620 本/m², 植被率が約 50%, 草丈が約 45cm の時, 図 4-11 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 4-12 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) 最高分蘗期 (DOY190) から出穂期 (DOY220) にかけて, 図 4-11 と図 4-12 に示す入射角 21 度と入射角 49 度の VV 偏波は大きく減少した。
- 4) 出穂期 (DOY220) 以降の約 20 日の間では, 図 4-11 と図 4-12 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 4-11 の VV 偏波のように後方散乱係数の増減がみられた。

(4) 生育段階ごとの生育量と後方散乱係数の相関解析

移植期から最高分蘗期前 (DOY121 から DOY189) での生育量と後方散乱係数との相関係数を表 4-1 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。最高分蘗期から出穂期 (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。各生育段階で生育量と後方散乱係数との相関が高かった移植期から最高分蘗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 4-13 に示す。さらに, 移植期から最高分蘗期前までの現地地上写真を図 4-14 に示す。図 4-14 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。図 4-14 に示すように, 水稻は日数を重ねるたびに稲が縦横方向に拡大している様子がわかった。HH 偏波の後方散乱係数は, 各入射角ともに水稻の草丈の生育に応じて増加していた (図 4-13)。特に入射角 21 度は, 草丈の生育に応じた後方散乱係数の増加が顕著であった。

表 4-1 移植期から最高分蘗期前（DOY121 から DOY189）での
生育量と後方散乱係数との相関係数

生育量	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

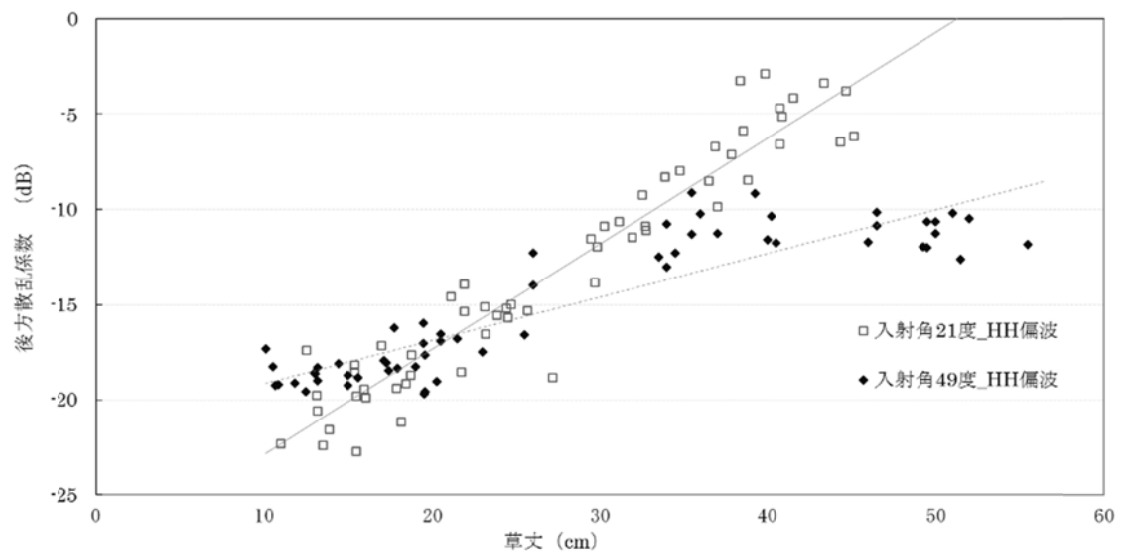


図 4-13 移植期から最高分蘗期前 (DOY121 から DOY189) の
草丈と後方散乱係数の散布図









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 4-14 移植期から最高分蘗期前までの現地地上写真

4.4.2 生育量と後方散乱係数との関係

(1) 移植期から最高分蘗期前の関係

移植期から最高分蘗期前は、各偏波の後方散乱係数が増加する。これは、図 4-14 の現地撮影写真に示すように、水稻の茎や葉の縦横方向の生育による水稻からの散乱の増加、稲体と湛水面との散乱の増加で、後方散乱係数が増加していると考えられる。また、図 4-11 と図 4-12 に示すように、移植期からの HH 偏波の増加は、入射角 21 度に比べて入射角 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) 最高分蘗期から出穂期での関係

図 4-11 と図 4-12 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。この理由は、入射角 21 度よりも入射角 49 度は、植被率の高い水稻の上層を斜め方向から観測することになり、鏡面散乱が多くなっているためだと考えられる。また、マイクロ波は含水量が多い対象物だと減衰が増大する（飯坂，1998）。図 4-11 と図 4-12 に示す最高分蘗期から出穂期の後方散乱係数の時系列変化は、各偏波が減少しており、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) 出穂期以降の関係

出穂期以降は、図 4-11 と図 4-12 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 偏波の増減に違いが生じていると考えられる。

4.4.3 TSX による水稻生育量の推定に対する考察

4.4.1 項の相関係数の結果から、移植期から最高分蘗期前（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 4-1 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、4.4.1 項の結果に示されたように、入射角 49 度と比べて入射角 21 度の方が、移植期から最高分蘗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。

4.5 生育段階ごとの水稻生育量とSARの後方散乱係数との関係

本章では、生育量の推定をおこなうために、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解析した。

本研究の結果から、生育量と後方散乱係数の関係は、移植期から最高分蘗期前まで、HH 偏波、VV 偏波の増加が認められた。最高分蘗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は、移植期から最高分蘗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。移植期から最高分蘗期前までは、水稻の茎や葉の縦横方向の生育による散乱、稲体および稲体と湛水面との散乱で、後方散乱係数が増加していると考えられた。移植期から最高分蘗期前での 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。

第5章

生育量および収量の推定

5.1 生育量および収量の推定に最適なSARの撮影時期

第4章では、異なる入射角、異なる偏波のXバンドSARデータを用いて、各生育段階それぞれの生育量と後方散乱係数の関係を明らかにし、生育量の推定の可能性があることがわかった。

一方で、SARの撮影は、撮影軌道上の同じ地点で異なる2つの地域の撮影をおこないたい場合、どちらかの地域の撮影の競合でおこなえなくなる。生育段階ごとの水稻生育量の推定手法では、生育段階期間の撮影を連続しておこなわなければならない。SARの撮影は、撮影の競合によりおこなえない可能性があり、その場合、SARデータによる生育量の推定がおこなえなくなる。撮影の競合に対処するためには、生育段階ごとの推定に加えて、生育量や収量の推定に最適な撮影時期の特定を、水稻の栽培期間中の任意の短い期間でおこなうことが望ましい。また、水稻の生育量・収量は、品種ごとに異なる。品種の生育量の違いは、SARのマイクロ波の散乱の違いとしてあらわれる。品種を特定することで、生育量および収量の推定の精度が向上する。

本章では、水稻の栽培期間を通じて、SARデータによる偏波および異なる入射角での時系列撮影をおこない、水稻の生育推移や収量変化に伴う後方散乱係数の変化について定量的に把握し、水稻の生育の観測や収量推定を検討した。また、水稻の生育・収量の推定に適したSARデータの撮影条件を検討した。さらに、生育量や収量の推定精度の向上のための、水稻の品種の分類を検討した。

5.2 理論

5.2.1 高い時間分解能のSARデータの応用

水稻は、生育が進むにつれて茎数などの物理量の変化および穂の生育や倒伏により、その形状が変化する。また、物理量および形状の変化は、水稻の群落構造を変化させる。これらの変化は、短い日数のうちに生じるため、高い時間分解能による観測が望まれる。

今までの衛星搭載型SARの撮影周期は低い時間分解能であったが、2007年から運用が開始されたTSXは11日の撮影周期の高い時間分解能で観測がおこなえる。したがって、水稻の生育、または生育変化に伴うHH偏波、VV偏波のマイクロ波の反射変動を、高い時間分解能により取得できることになる。高い分解能で水稻を観測することにより、各偏波では、水稻の栽培期間を通じて次のような散乱特性の観測が想定される。

1) 田植え直後の水面もしくは稲株と水面との散乱

田植え直後のマイクロ波の散乱イメージを図5-1に示す。図の矢印は各入射角のマイクロ波、一点鎖線は湛水面、背景は10cm四方の格子線である。田植え直後の圃場は、稲体よりも水面の被覆面積が多い。よって、マイクロ波は、水面との鏡面散乱が多くなる。また、稲株と水面との2回散乱もわずかであるが生じる。

2) 生育した水稻の茎や葉の上層部および下層部からの散乱

生育した水稻の茎や葉からの散乱イメージを図5-2に示す。図に示す茎や葉の生育は途中段階であり、隣り合う水稻の茎や葉の重なりは少ない。よって、単体の稲株の上層部からの散乱、および水面と直立する稲株との2回散乱があらわれる。生育の初期は、茎や葉の含水量が多く、形状が垂直方向に向くものが多い。この形状は、HH偏波よりもVV偏波のマイクロ波の減衰を増大させることになる（Lopez *et al.*, 2010）。

3) 生育した水稻の茎や葉の上層部からの散乱

水稻が生育するにつれて、茎や葉が隣り合う株と重なり合い密集した水稻の群落構造を形成すると、波長の短いXバンドでは、水稻の下層部にマイクロ波が入射しないため、上層部のみからの散乱となる（図5-3）。上層部に茎葉が密集した状態のため、水稻内部への入射は生育の初期段階と比べて少なくなるが、この上層部の茎葉の構造がセンサの観測方向からみて水平方向の場合、HH偏波の減衰が増大し、垂直方向の場合、VV偏波の減衰が増大することになる。

4) 出穂した水稻の上層部からの散乱

出穂後の水稻の上層部は、茎や葉のほかに図5-4で示す穂の形状が加えられ

る。この上層部の形状が、マイクロ波の散乱要因となる。また、この穂中の米粒は登熟が進むとともに水分が減少する（堀江，2004）。米粒の乾燥につれて、VV偏波の減衰が減少することになる。

5) 成熟した水稻からの散乱

成熟した水稻からの散乱イメージを図5-5に示す。成熟した水稻は、米粒や葉が乾燥している。そのため、HH偏波やVV偏波の減衰が減少すると考えられる。また、収穫直前の水稻は、穂の重量が重く、風雨などの外的な力が加わると茎が曲がったり折れたりして、倒れてしまうことがある。これを倒伏という。倒伏した圃場からのマイクロ波は、倒伏の個所や程度によって散乱特性が多様になると考えられる。

これらの水稻の生育によるバイオマス、形状および群落構造の変化と異なる偏波、異なる入射角のマイクロ波の散乱特性との関係により、生育量および収量の推定がおこなえると想定される。

また、水稻は、同じ土壌、気象である地域でも品種ごとに同時期の茎葉の形状や出穂のタイミングが異なる。これらの異なる形状やタイミングは、マイクロ波の散乱特性としてあらわれるので、マイクロ波の散乱特性により、品種によって異なる水稻の生育の形状の変化を捉えることができると考えられる。

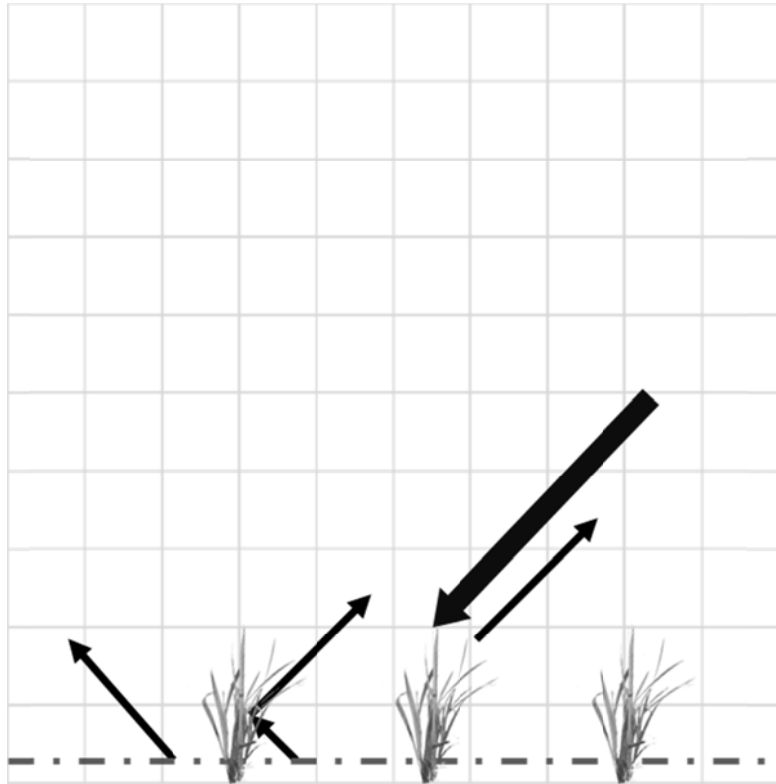


図5-1 田植え直後のマイクロ波の散乱イメージ

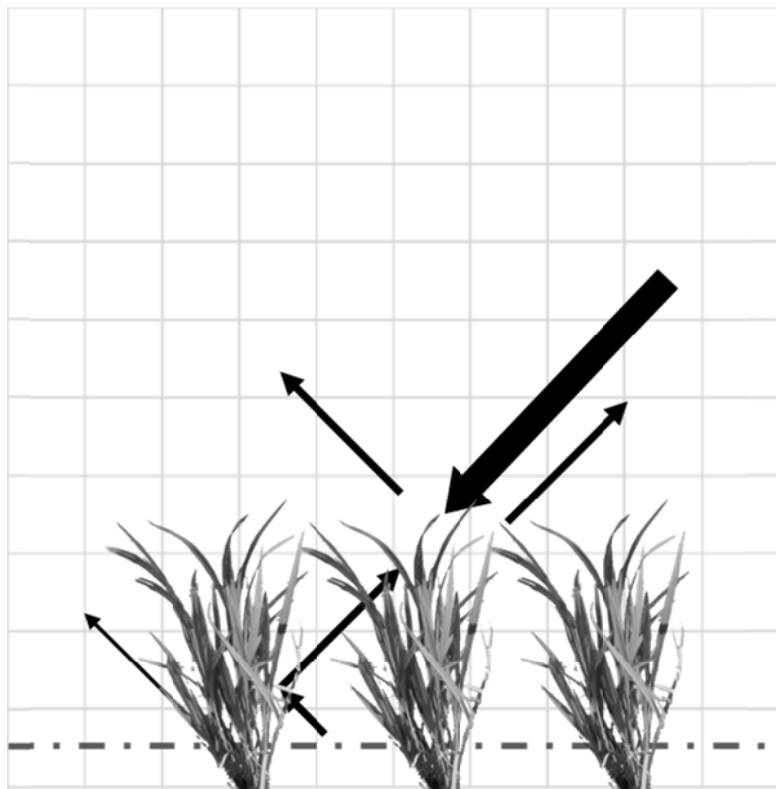


図5-2 生育した水稻の茎や葉からの散乱イメージ



図5-3 生育した水稻の茎や葉の上層部からの散乱イメージ

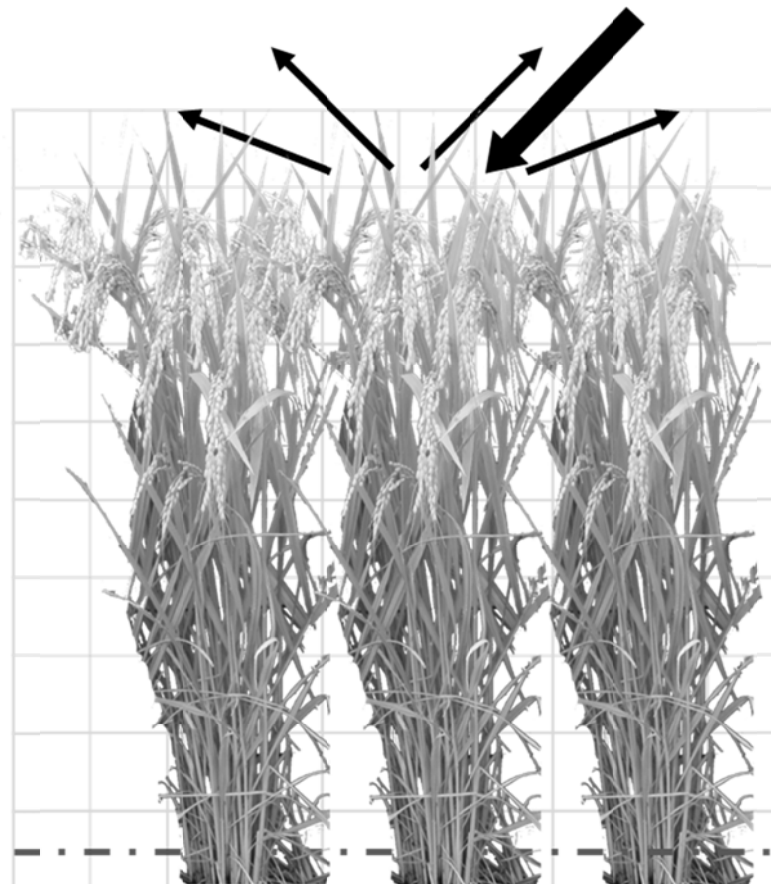


図5-4 出穂後の水稻からの散乱イメージ

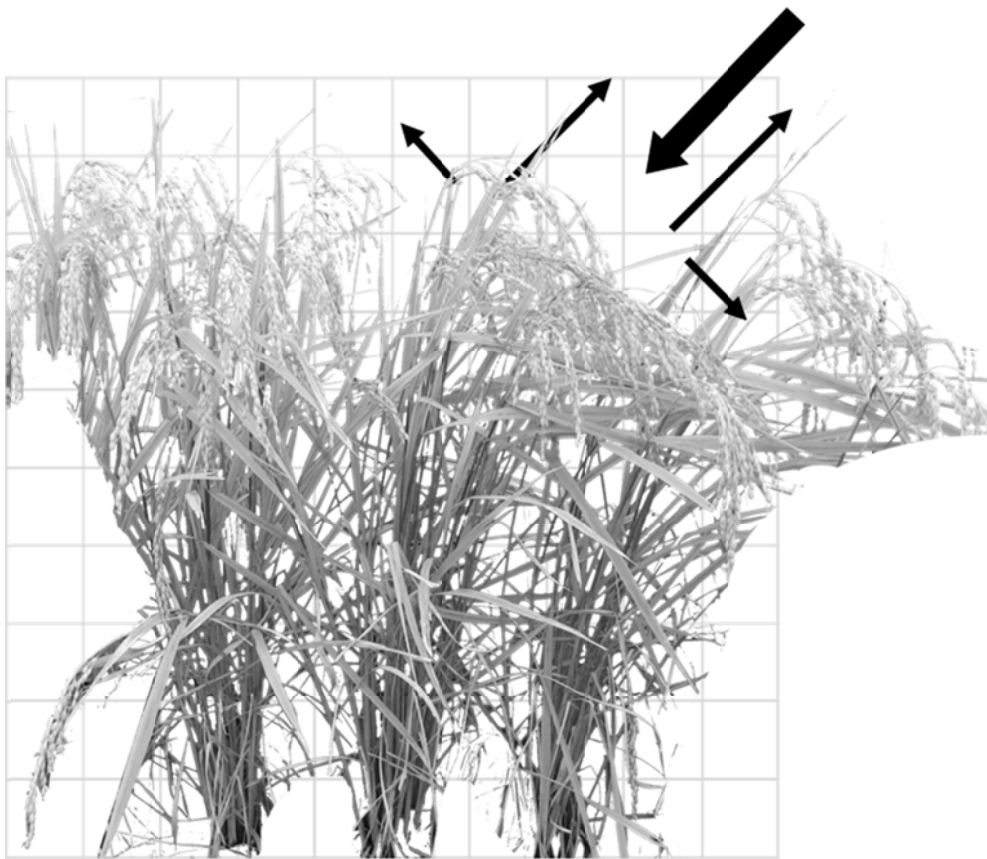


図5-5 成熟した水稻からの散乱イメージ

5.3 実験方法

5.3.1 実験対象圃場

宮城県古川農業試験場内に第4章と同じ12の試験圃場を選び、本研究の実験対象圃場とする。実験対象圃場においては、第4章4.3.2節と同じ方法で水稻の茎数、草丈、草高、植被率といった生育量と湛水深の地上測定を2009年5月の移植期より10月の成熟期までおこなう。また、収量の構成要素として、1) 1 m²あたりの穂数、2) 1穂粒数、3) 登熟歩合、4) 玄米千粒重を、成熟期に測定する。単位面積あたりの粒数は、穂数、1穂粒数から算出する。

複数の品種が作付けされている実験圃場の一覧を表5-1に示す。品種の相違による後方散乱係数の時系列変化パターンの相違を比較するため、ササニシキ（始期、盛期、終期の3段階の移植時期）、および、まなむすめ（移植盛期）、コシヒカリ（移植盛期）の移植をおこなう。また、ひとめぼれは、生育差をつけるため、移植時期、施肥量、株あたりの茎数を変化させる。すなわち、県平均の移植（田植）始期に近い5月1日、また移植盛期に近い5月11日、移植終期に近い5月20日の3段階に移植をおこなう。また、移植盛期の施肥量を慣行、節減、窒素なしの3段階、移植終期の施肥量を慣行、節減の2段階の変化を与える。以上のひとめぼれの移植苗数は株当たり4本の慣行であるが、さらに、苗本数が5本（苗5本/株）の圃場を加える。なお、この論文内の略名として、先頭に品種名を記載し、施肥が慣行のものはMstd、肥料節減はMreduce、施肥無しはMzero、慣行で苗本数が5本/株は苗5Mstdを加え、最後に移植日を括弧内に植の字を付して記す。

SARの後方散乱係数は気象条件によって変化することがある。TSXの撮影前後の平均風速、最大瞬間風速、降水量を参考データとして取得する。

表 5-1 実験圃場の一覧

移植日	品種	施肥量	苗数／株	略名
5月1日 (DOY121)	ササニシキ	慣行	4本	ササニシキM _{std} (DOY121植)
	ひとめぼれ	慣行	4本	ひとめぼれM _{std} (DOY121植)
5月11日 (DOY131)	ササニシキ	慣行	4本	ササニシキM _{std} (DOY131植)
	ひとめぼれ	慣行	5本	ひとめぼれ 苗5M _{std} (DOY131植)
	ひとめぼれ	節減	4本	ひとめぼれM _{reduce} (DOY131植)
	ひとめぼれ	慣行	4本	ひとめぼれM _{std} (DOY131植)
	ひとめぼれ	窒素なし	4本	ひとめぼれM _{zero} (DOY131植)
	まなむすめ	慣行	4本	まなむすめM _{std} (DOY131植)
	コシヒカリ	慣行	4本	コシヒカリM _{std} (DOY131植)
5月20日 (DOY140)	ひとめぼれ	節減	4本	ひとめぼれM _{reduce} (DOY140植)
	ひとめぼれ	慣行	4本	ひとめぼれM _{std} (DOY140植)
	ササニシキ	慣行	4本	ササニシキM _{std} (DOY140植)

5.3.2 使用SARデータ

(1) TSXデータの撮影

TSX データは、4 章で使用したデータを用いた。この TSX データは、HH 偏波と VV 偏波の 2 偏波による高分解能 SpotLight モード(HS)でおこない、マルチルック処理、地図投影処理、および、地形補正した Enhanced Ellipsoid Corrected (EEC) プロダクトである。入射角 49 度の撮影はアセンディングモードで、また、入射角 21 度はディセンディングモードである。SpotLight モードの画像のピクセルサイズは、入射角 49 度で 1m、入射角 21 度で 1.25m である。入射角 49 度の撮影は、東西方向にほぼ平行な圃場に対して西側からほぼ平行におこなわれ、入射角 21 度の撮影は、東側から圃場に対して東西方向にほぼ平行におこなわれる。また、HH 偏波の後方散乱係数と VV 偏波の後方散乱係数の 2 偏波データを取得する。撮影期間は、2009 年の水稻の移植日である 5 月上旬から成熟期の 10 月下旬までである。

(2) TSX データの処理

① 後方散乱係数の算出

撮影した TSX データから、式 3.1 を用いて後方散乱係数を算出する。C バンド SAR データによる水稻の作付け図の作成に有用な特徴量として HH 偏波と VV 偏波の比 HH/VV があげられている (Bouvet *et al.*, 2009)。また、X バンド SAR による水稻のフェノロジー解析にも HH/VV が有効とされている (Lopez *et al.*, 2010)。そこで、本研究でも 2 偏波の比 HH/VV を検討する。式 5.1 によって求められる HH 偏波と VV 偏波の差が 2 偏波の比となり、以後、HH/VV dB と表記する。さらに、本研究では、2 偏波の積算値についても検討する。式 5.2 によって求められる HH 偏波と VV 偏波の和が、2 偏波の積算値となり、以後、HH×VV dB と表記する。

$$\text{HH/VV dB} = \sigma_0 (\text{HH}) \text{ dB} - \sigma_0 (\text{VV}) \text{ dB} \quad (5.1)$$

$$\text{HH} \times \text{VV dB} = \sigma_0 (\text{HH}) \text{ dB} + \sigma_0 (\text{VV}) \text{ dB} \quad (5.2)$$

ここで、 $\sigma_0 (\text{HH}) \text{ dB}$: HH 偏波の dB 値

$\sigma_0 (\text{VV}) \text{ dB}$: VV 偏波の dB 値

② 対象圃場の後方散乱係数の算出

実験対象圃場の後方散乱係数を算出方法は、4.3.3 節の圃場単位の後方散乱係数の算出と同様である。後方散乱係数を算出するために、古川農業試験場の 2009 年の試験圃場図をもとに、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。圃場境界部に存在する設備の影響、および、TSX のスペックルノイズの影響を軽減するために、圃場区画よりも約

2m 以上内側にある画素の平均値を求め、圃場単位の後方散乱係数とする。

5.3.3 生育量と後方散乱係数の時系列変化

はじめに、ひとめぼれ Mstd (DOY131 植) の後方散乱係数の時系列変化を、TSX の入射角を 49 度の場合と 21 度の場合について比較する。また、品種を変えたときの後方散乱係数の時系列変化の比較をおこなう。すなわち、水稻の茎数、草丈、草高、植被率、穂数の変化に伴う TSX の HH 偏波、VV 偏波、および、HH/VV dB の時系列変化について調べる。さらに、入射角および偏波の違いにより捉えられる水稻の生育状況についても検討する。

5.3.4 生育量と後方散乱係数の関係の定量解析

相関解析により各圃場の茎数、草丈、植被率と後方散乱係数との関係を定量的に解析する。すなわち、TSX の撮影日ごとに生育量と後方散乱係数との相関分析をおこなう。水稻の生育を評価するために参考となる構造的パラメータは、1) 茎数、2) 草丈、3) 草高、4) 植被率、5) 穂数があげられている。これらのうち、出穂期以前の生育の評価で最も重視される項目として、過去の水稲栽培の経験から茎数および草丈があげられている（吉田，2000，山口県農業試験場，2005）。そのため、TSX の撮影日ごとに、地上で測定した全 12 圃場の茎数および草丈と TSX の HH 偏波、VV 偏波、HH/VV dB、および、HH×VV dB との相関係数を求める。さらに、植被率と TSX の後方散乱係数との相関係数も求める。また、解析期間を短縮し、TSX の撮影回数を抑えるために、生育量と後方散乱係数との間に高い相関が続いた第 4 章で解析した生育段階の期間より短い期間についても調べる。

5.3.5 収量と後方散乱係数の関係の定量解析

籾数、登熟歩合、玄米千粒重の収量構成要素の測定時期は、成熟期である。これら収量構成要素の値は成熟期の値であるが、TSX の撮影日別の後方散乱係数と相関解析をおこなうことで、撮影日 (DOY) との関連を知ることができるようになる。よって、収量構成要素および収量と TSX の HH 偏波、VV 偏波、HH/VV dB、および、HH×VV dB との相関を調べ、収量構成要素および収量と相関が大きい TSX データが得られる撮影条件を調べる。

収量は次の式 5.3 による。単位面積あたりの籾数、登熟歩合、玄米千粒重のすべての積算値である。

$$\text{収量} = \text{単位面積あたりの籾数} \times \text{登熟歩合} \times \text{玄米千粒重} / 1000 \quad (5.3)$$

5.4 結果と考察

5.4.1 TSXデータの撮影と現地地上調査

TSX 撮影と現地地上調査の実施状況を図 5-6 に示す。図の縦軸は DOY である。横軸は TSX の撮影入射角、および、地上測定的项目を示す。なお、TSX の機器調整により、入射角 49 度の 6 月中旬と 8 月中旬の 2 時期では撮影ができなかった。例として、5 月 23 日 (DOY143) に撮影された入射角 49 度の HH 偏波の画像を図 5-7 に示す。図の中心の白点枠は実験対象圃場の位置である。宮城県古川農業試験場敷地内に設置されたアメダス古川によると、入射角 49 度の撮影日は、ほとんどの撮影日において平均風速が約 3m/s 以下、最大瞬間風速が約 5m/s 以下、撮影当日と前日の合計降水量は約 3mm 以下であった。ただし、5 月 23 日 (DOY143) は、平均が約 10m/s、最大瞬間風速が約 16m/s と風が強く、合計降水量は 7 月 28 日 (DOY209) が約 20mm、10 月 2 日 (DOY275) が約 15mm と多かった。入射角 21 度の撮影日は、ほとんどの撮影日において平均風速、最大瞬間風速が約 2m/s 以下、合計降水量が約 1mm であった。ただし、合計降水量は、6 月 7 日 (DOY158) が 50mm、7 月 21 日 (DOY202) が約 15mm と多かった。

月	DOY	撮影入射角		地上測定項目			
		49度	21度	植被率 草丈 草高 湛水深	茎数	穗数	穂数 登熟歩合 玄米千粒重
5	121	●	●	●			
		●	●	●			
		●	●	●			
6	151						
	152	●	●	●	●		
			●	●	●		
7	181	●	●	●	●		
	182	●	●	●	●		
		●	●	●	●		
8	212	●	●	●			
	213	●	●	●			
		●	●	●			
9	243	●	●	●		●	
	244	●	●	●			
		●	●	●			
10	273	●	●	●			
	274	●	●	●			●
	286	●	↓	●	↓	↓	↓

↑ 移植期
↓

↑ 分蘗期
↓

↑ 成熟期
↓

図 5-6 TSX 撮影と現地地上調査



図 5-7 5 月 23 日 (DOY143) に撮影された入射角 49 度の HH 偏波の画像

5.4.2 生育量の時系列変化

宮城県の主要品種である、ひとめぼれ Mstd (DOY131) の生育量の時系列変化の測定結果を図 5-8 に示す。図の横軸は DOY, 縦軸は茎数, 草丈, 草高, 植被率, 穂数の生育量, および, 湛水深である。この図は図 4-10 に草高と収量要素の穂数を追記したものである。なお, 移植時の草丈は平均 13.1cm であり, 茎が増減する分蘗期間は 6 月 1 日 (DOY152) から 7 月 20 日 (DOY201) であった。図 5-8 において, 茎数は 7 月 9 日 (DOY190) まで増加し, その後, 減少した。茎数は, 最高分蘗期を境に, 茎数が増加から減少に転ずる (堀江, 2004)。よって, 最高分蘗期の日付を DOY190 と判断した。草丈は, 8 月 18 日 (DOY230) まで増加し, その後は一定の高さとなった。草高は, 8 月 18 日 (DOY230) まで草丈とほぼ同じ傾向で増加し, その後は減少した。植被率は 7 月 9 日 (DOY190) に約 70% となった。以後, 植被率の増加は緩やかとなり, 8 月 8 日 (DOY220) の出穂期に約 90% に達した。湛水深は中干し時期の 7 月 6 日 (DOY187) から 7 月 9 日 (DOY190), および, 成熟期前の 9 月 10 日 (DOY253) 以降で 0 cm であった。

籾数は成熟期の 10 月 4 日 (DOY277) に調査をおこなった。その結果, ひとめぼれ Mstd (DOY131 植) の単位面積あたりの籾数は 34992 粒/m² であった。

入射角 49 度 (アセンディング) で観測した時の, マイクロ波の照射方向 (レンジ方向) からみた, ひとめぼれ Mstd (DOY131 植) の生育推移を示す地上写真を図 5-9 に示す。図 5-9 の写真 (1) から (4) では, 分蘗期間の生育推移を示した。具体的には, 写真 (1), (2), (3) では, 移植後の圃場が水で覆われている様子, また, 水稻の生育とともに茎数, 草丈, 植被率が増加していく様子を示した。写真 (4) は最高分蘗期の 7 月 9 日 (DOY190) の写真で, 現地での調査によると, 中干しを始めた直後のため, 土壌が完全に乾いた状態ではなく, 濡れた状態であった。また, 写真 (5) から (6) には中干しから出穂期に至る水稻の様子を示した。写真 (7) から (12) は出穂後の登熟期の現地写真である。写真 (8) 以降では, 葉や茎以外の穂が徐々に増えていく状況が示された。写真 (9) で確認できる穂は, ランダムの方角を向いていた。写真 (10) から (12) では, 籾が黄白色から黄色になり黄熟している状況が示された。一方で, 写真 (11), (12) では, 水稻の倒伏が確認できた。水稻の倒伏は, 現地調査でも確認できた。

施肥量が異なる, ひとめぼれ Mzero (DOY131 植) の茎数と植被率は, Mstd (DOY131 植) と比較して移植直後から生育遅れによる差があらわれ, 最高分蘗期の 7 月 9 日 (DOY190) で, ひとめぼれ Mzero (DOY131 植) の茎数と植被率は, 図 5-8 に示した, ひとめぼれ Mstd (DOY131 植) と比較して茎数が約 330 本/m² 少なく, 植被率が約 30% 少なかった。一方, ひとめぼれ Mreduce (DOY131 植) は, ひとめぼれ Mstd (DOY131 植) と比較して最高

分蘖期の 7 月 9 日 (DOY190) の茎数が約 80 本/m²少なく、植被率が 2%少なかった。

5 月 1 日 (DOY121), 5 月 11 日 (DOY131), 5 月 20 日 (DOY140) の移植日の違いによる、ひとめぼれの生育差は、生育が進むにしたがって日差が縮まった。移植日の違いによる単位面積あたりの籾数は、成熟期の調査では、ほとんど差はみられなかった。また、刈り取り最盛期である 10 月 3 日 (DOY276) の植被率の調査では、移植盛期の 5 月 11 日 (DOY131) に移植した圃場が最も多く、5 月 1 日 (DOY121) 移植の圃場は 92%, 5 月 20 日 (DOY140) 移植の圃場は 96%であった。しかし、玄米千粒重は移植日に関係なく約 22.4g であった。

品種の違いによる生育推移には大きな違いはみられなかった。コシヒカリ Mstd (DOY131植), ササニシキ Mstd (DOY131植), および、まなむすめ Mstd (DOY131植) の草丈, 植被率, 茎数は、ひとめぼれ Mstd (DOY131植) とほぼ同じ値であった。移植期から成熟期までの品種の違いは、草丈のばらつきが ±3cm 以内, 植被率がばらつきは ±2% 以内, 茎数のばらつきが ±60 本/m² 以内であった。ただし、コシヒカリ Mstd (DOY131植) の出穂期は、ひとめぼれ Mstd (DOY131植) より約 10 日遅れ、8 月 18 日 (DOY230) 付近であった。

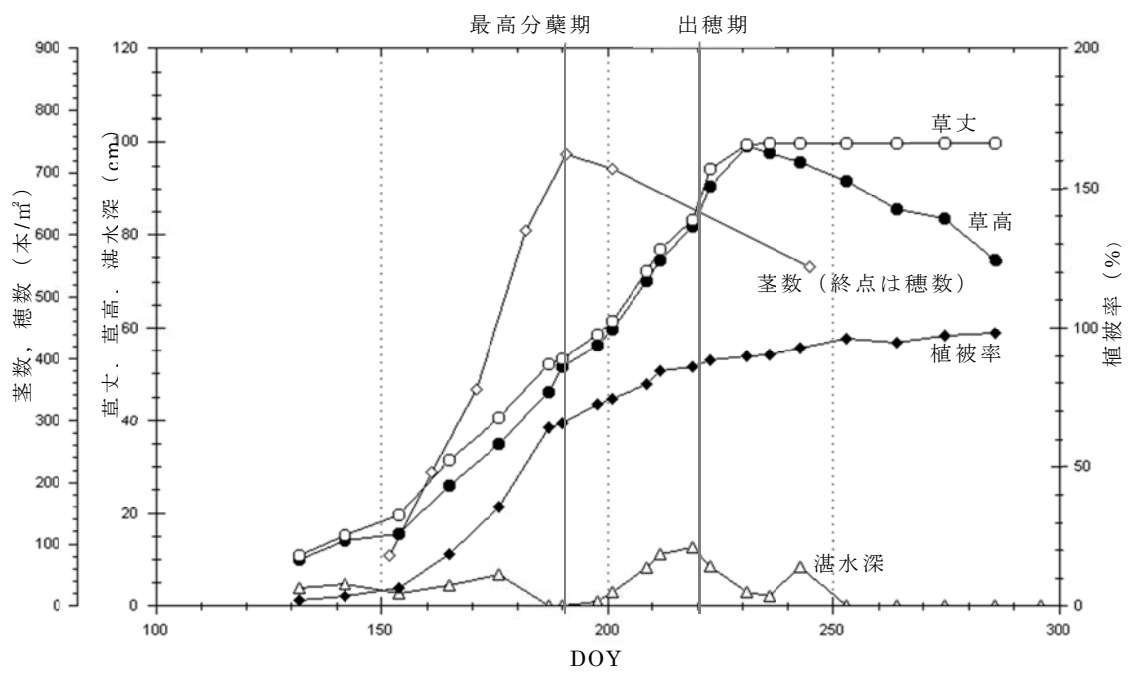


図 5-8 ひとめぼれ Mstd (DOY131 植) の生育量の時系列変化













	現地地上写真		現地地上写真
(1) 6月3日 (DOY154)		(7) 8月7日 (DOY219) 出穂期	
(2) 6月15日 (DOY166)		(8) 8月19日 (DOY231)	
(3) 6月25日 (DOY176)		(9) 8月30日 (DOY242)	
(4) 7月9日 (DOY190) 最高 分蘗期		(10) 9月10日 (DOY253) 落水直後	
(5) 7月17日 (DOY198) 中干し		(11) 9月21日 (DOY264)	
(6) 7月28日 (DOY209)		(12) 10月2日 (DOY275)	

図 5-9 ひとめぼれ Mstd (DOY131 植) の生育推移を示す現地地上写真
(TSX の観測方向は、写真の下から上への方向である)

5.4.3 水稻の生育と後方散乱係数の時系列変化の関係

ひとめぼれMstd (DOY131植) の生育と後方散乱係数の時系列変化を図5-10および図5-11に示す。図5-10はTSXの入射角が49度の場合、図5-11は入射角21度の場合である。また、それぞれの図の (a) はHH偏波とVV偏波の時系列変化、(b) はHH偏波とVV偏波の比HH/VV dBの時系列変化である。図中の縦実線は最高分蘗期と出穂期を示す。

① 入射角 49 度の場合

図 5-10 (a) に示すように移植後の 5 月 23 日 (DOY143) では、両偏波ともに約 -18dB と非常に低い値となっていた。6 月 25 日 (DOY176) までは、VV 偏波が HH 偏波よりわずかながら高く、その後は HH 偏波が VV 偏波よりも高くなった。HH 偏波は最高分蘗期前の 7 月 6 日 (DOY187) を過ぎても増加し、7 月 17 日 (DOY198) に約 -10dB の最大値となった。7 月 17 日 (DOY198) 以後では、HH 偏波は、7 月 28 日 (DOY209) に減少し、その後 DOY242 まではほぼ一定の値を示した後、DOY253 から 2dB 程度の増減を示した。

一方、VV 偏波は、図 5-10 (a) に示すように、移植後 45 日が経過した 6 月 25 日 (DOY176) までは HH 偏波と同じ増加傾向を示したが、最高分蘗期より前、ちょうど中干しの開始時期 (植被率が 70% を越える時期) に、VV 偏波は減少に転じた。また、図 5-10 (a) の最高分蘗期から出穂期までに示されるように、VV 偏波は HH 偏波と比べて急に減少し、出穂前の 7 月 28 日 (DOY209) に、移植日に近い -18dB となった。以後、再び V 字型の増加に転じ、9 月 10 日 (DOY253) に移植後で最大値である約 -10dB となった。

偏波の比 HH/VV dB の時系列変化を図 5-10 (b) に示した。HH/VV dB は移植期から分蘗期間後半の移植後 45 日が経過した 6 月 25 日 (DOY176) までは、ほぼ 0dB となった。分蘗期間後半の 6 月 25 日 (DOY176) を過ぎると、HH/VV dB は 0dB 付近から急に増加し、最高分蘗期と出穂期のちょうど中間で最大値の 7dB となった。HH/VV dB は 9 月 10 日 (DOY253) まで減少し -3dB となり、その後、増加した。

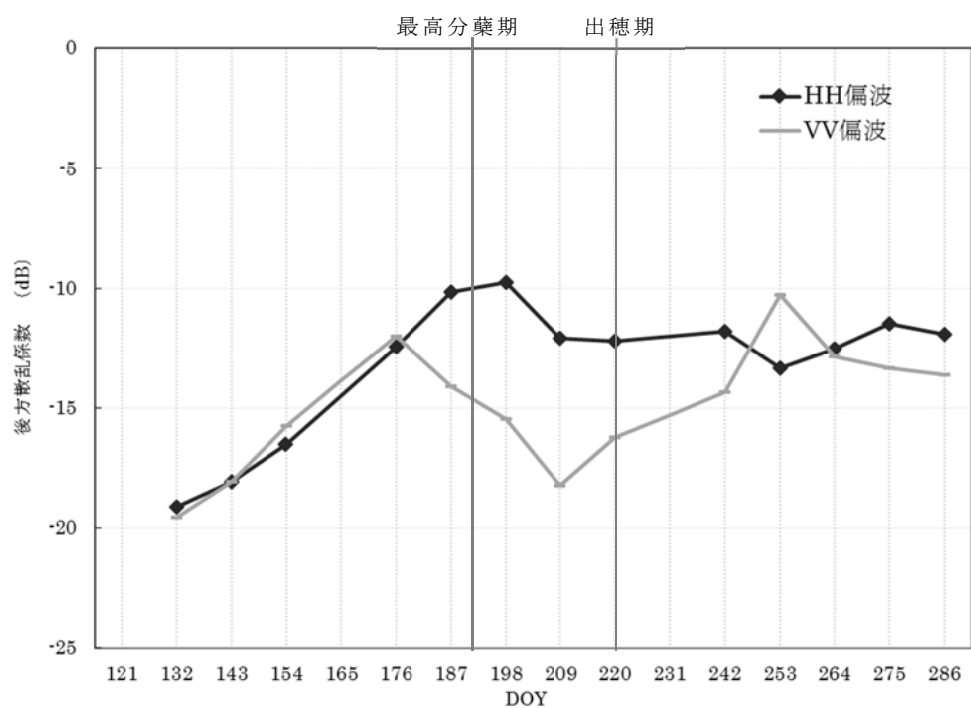
② 入射角 21 度の場合

入射角 21 度で撮影した時の後方散乱係数の時系列変化を図 5-11 に示す。図 5-11(a) と図 5-10(a) を比較すると、移植から 16 日後の 5 月 27 日 (DOY147) の移植直後では、後方散乱係数は入射角 49 度の方が大きかった。その後、後方散乱係数は増加していくが、その増加は、図 5-11 (a) にみられるように、21 度の方が 49 度と比較して、より急となった。移植後 49 日が経過した 6 月 29 日 (DOY180) に後方散乱係数は、生育中の最大値を示し、HH 偏波で -3dB 、VV 偏波で -5dB となった。49 度の場合の後方散乱係数は両偏波ともに -12dB であったのに対し、21 度の場合かなり大きな値となっている。さらに、

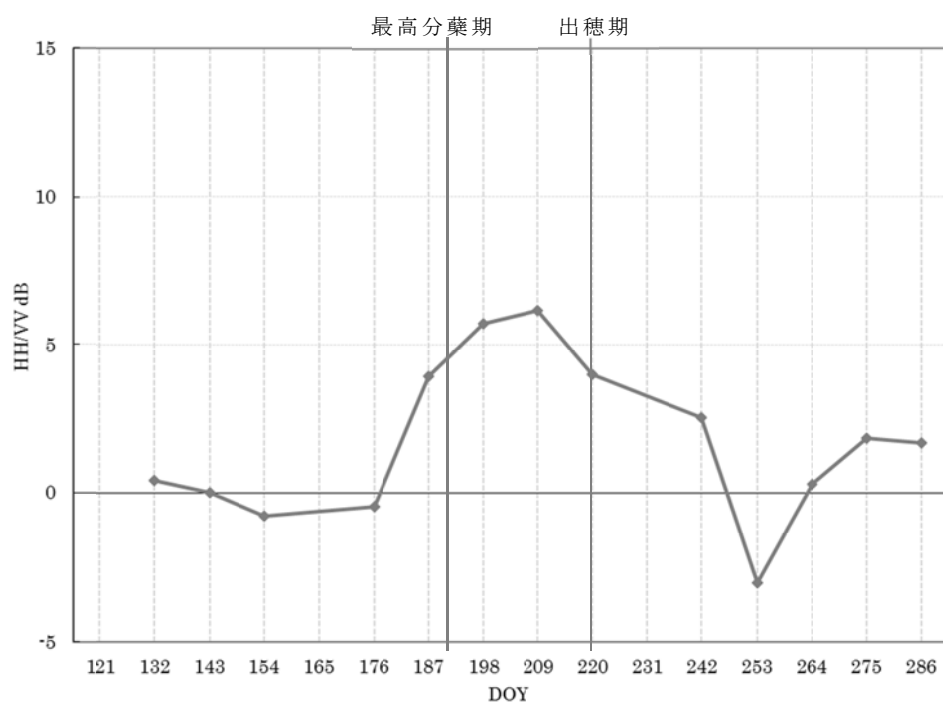
入射角 21 度では HH 偏波が VV 偏波よりも常に大きかった。その後、HH 偏波、VV 偏波ともに減少に転じた。また、入射角 49 度の場合、出穂期前に VV 偏波は最小値となったが、入射角 21 度の VV 偏波では出穂期直後の 8 月 12 日 (DOY224) に最小となった。また、HH 偏波は、VV 偏波よりも 11 日遅れて、8 月 23 日 (DOY235) の出穂期以降で最小となり、以後、両偏波ともに増加に転じた。VV 偏波は、9 月 3 日 (DOY246) 以降は、3dB 程度の増減を繰り返した。

図 5-11 (b) に示した入射角が 21 度の場合の HH/VV dB の時系列変化をみると、図 5-10 (b) で示した入射角 49 度の場合は、分蘖期間では、ほぼ 0dB であったのに対し、6 月 18 日 (DOY169) にピークを生じていた。これは、図 5-11 (a) の 6 月 18 日 (DOY169) に示されるように、VV 偏波の増加が HH 偏波の増加より少ないためである。その後、HH 偏波、VV 偏波ともにピークとなった 6 月 29 日 (DOY180) に HH/VV dB は低下した後、再び上昇に転じる。最高分蘖期以降における HH/VV dB の時系列変化パターンは、図 5-10 (b) に示した入射角 49 度の場合と似た形となった。

以上に述べた、ひとめぼれ Mstd (DOY131 植) の時系列変化は、株当たりの苗本数が 4 本の場合である。なお、株当たりの苗本数が 5 本の場合も、後方散乱係数の時系列変化パターンは、ひとめぼれ Mstd (DOY131 植) とほとんど違いがみられなかった。

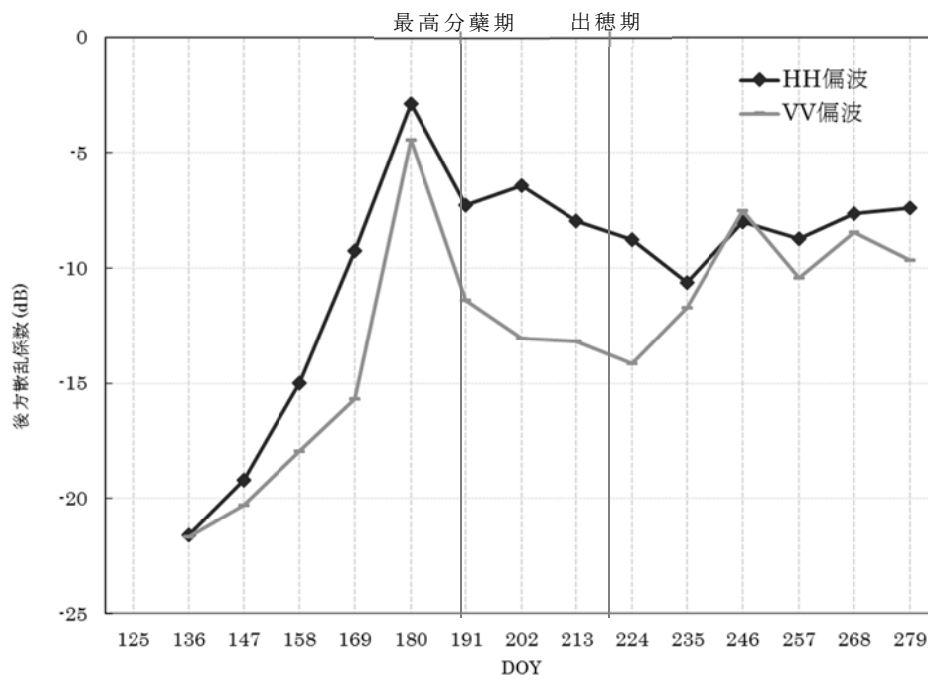


(a) HH 偏波と VV 偏波

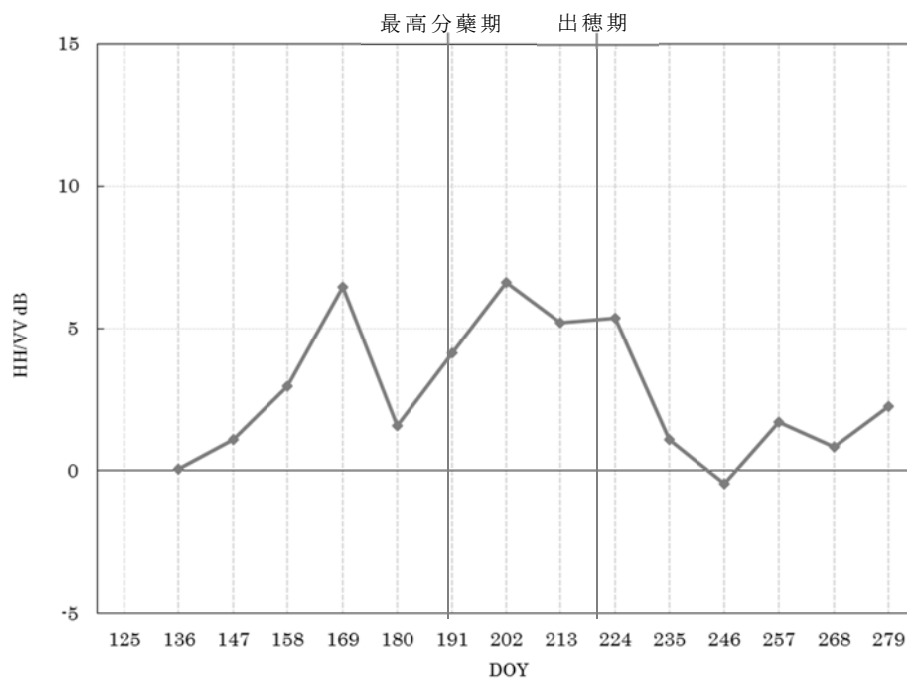


(b) HH/VV dB

図 5-10 入射角 49 度のひとめばれ Mstd (DOY131 植) の後方散乱係数の時系列変化



(a) HH 偏波と VV 偏波



(b) HH/VV dB

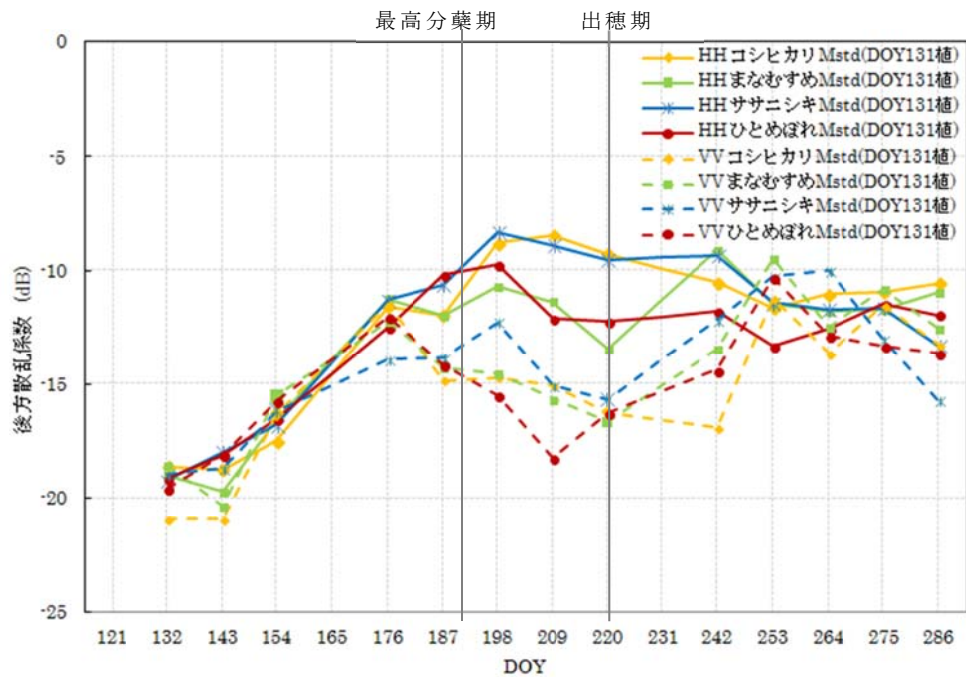
図 5-11 入射角 21 度のひとめぼれ Mstd (DOY131 植) の後方散乱係数の時系列変化

図5-10と図5-11に示されるように、水稻の生育に伴いHH偏波とVV偏波にはそれぞれ特有の変化があった。稲が移植された水田では、TSXのマイクロ波が直接水面に届く間は、水面と直立する稲株の間で二回散乱がおきる。生育初期の水稻の茎のように稲体の構成要素が地面から垂直に一定方向に向いていると、XバンドのVV偏波は、垂直な茎との相互作用のため、HH偏波よりも減衰が増大することが分かっている（Lopez *et al.*, 2010）。これは、図5-11（a）に示す入射角21度では確認できたが、図5-10（a）に示す入射角49度では確認できなかった。移植直後の水稻の観測には、入射角49度よりも入射角21度が適していると考えられる。図5-10（a）の分蘖期後半の6月25日（DOY176）から出穂期前の7月28日（DOY209）に示すように、この時期のVV偏波は、水稻の生育が進むにつれて稲体中にマイクロ波が深く浸透してマイクロ波の減衰が増大するため、減少していると考えられる。一方、HH偏波は、VV偏波で起こるようなマイクロ波減衰の影響が少ないと考えられ、図3に示した茎数と似た変化を示している。図5-10（a）および図5-11（a）に示すように、6月29日（DOY180）で入射角49度よりも入射角21度のHH偏波、VV偏波は大きくなっていた。図5-8に示すように6月29日（DOY180）は、植被率が70%を越える時期であり、入射角49度よりも21度の方が稲体頂部でのマイクロ波の浸透が浅くなるので、マイクロ波に対する減衰は小さくなっていると考えられる。

入射角21度、49度のいずれも出穂期前後で減少傾向にあったVV偏波が増加に転じる。植物の誘電率には、水分が最も寄与する。水分が多いものは誘電率が高く、減衰の割合が大きくなる（飯坂, 1998）。図5-10（a）および図5-11（a）に示される出穂期後からのVV偏波の増加は、この時期の穂についた米粒の乾燥（堀江, 2004）によるマイクロ波の減衰の減少が要因であると考えられる。また、入射角21度のVV偏波よりも入射角49度のVV偏波が早い時期に増加する。この理由は、入射角21度よりも斜め方向から観測する入射角49度のマイクロ波が出穂直後の垂直な穂に多く照射されるため、穂についた米粒の乾燥の影響を多く受けていると考えられる。生育が進むにつれて、穂は茎とは異なり、地面から垂直に伸びる管状構造でなくなるため、マイクロ波の垂直成分の減衰が減少し、VV偏波が増加すると考えられる。さらに、図5-8に示すように出穂期以降の植被率は非常に高くなると、マイクロ波の稲体への浸透が浅くなるため、VV偏波の増加の要因となると考えられる。その後、図5-10および図5-11に示すように9月10日（DOY253）以降にHH偏波やVV偏波がそれまでの傾向と異なり増減するのは、倒伏が影響しているためと考えられる。図5-10（b）に示すように、7月6日（DOY187）以降、VV偏波よりHH偏波の方が2dBから6dB大きい、9月10日（DOY253）でVV偏波がHH偏波より大きくなる。この現象は、図5-11（b）に示す入射角21度の観測でも9月3日（DOY246）にみることができる。これは、落水や水稻の倒伏の影響が考えられるが、原因の詳細については、今後検討する必要がある。

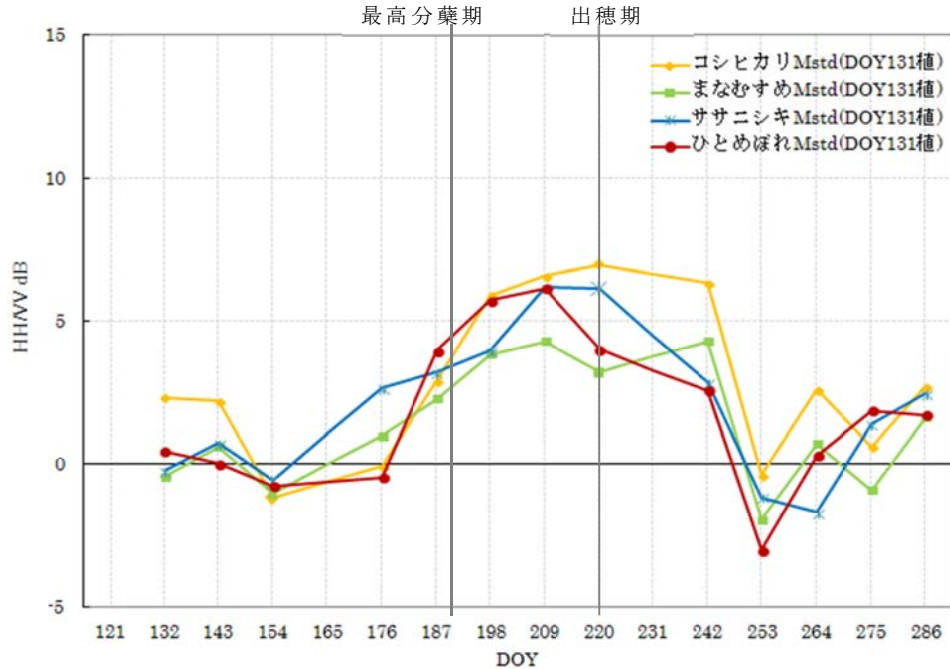
5.4.4 品種の違いと後方散乱係数の時系列変化

5月11日（DOY131）に移植をおこなった4品種の後方散乱係数の時系列変化を図5-12に示す。図5-12では、入射角21度よりも入射角49度の後方散乱係数の品種間差が大きかったので、入射角49度を例とする。図5-12（a）のHH偏波では、7月28日（DOY209）から8月19日（DOY231）の間で、ひとめぼれMstd（DOY131植）と、まなむすめMstd（DOY131植）に対して、コシヒカリMstd（DOY131植）とササニシキMstd（DOY131植）が異なる時系列変化パターンを示していた。また、VV偏波は、出穂期前後に全ての品種が増加するが、他品種と比較してコシヒカリMstd（DOY131植）のVV偏波の増加のみ出穂期を過ぎた8月30日（DOY242）からであった。図5-12（b）は品種の違いによるHH/VV dBの時系列変化の違いを示したもので、移植から34日後の6月14日（DOY165）から8月30日（DOY242）までの2.5ヶ月で、すべての品種で時系列変化パターンが異なっていた。8月30日（DOY242）以降は、ササニシキMstd（DOY131植）以外のHH/VV dBは9月10日（DOY253）まで減少し、その後、増加した。一方、ササニシキMstd（DOY131植）は9月21日（DOY264）まで減少し、その後、増加した。



注:最高分蘗期および出穂期は「ひとめぼれ Mstd (DOY131 植)」のもの

(a) HH 偏波と VV 偏波



注:最高分蘗期および出穂期は「ひとめぼれ Mstd (DOY131 植)」のもの

(b) HH/VV dB

図 5-12 品種の違いによる後方散乱係数の時系列変化 (入射角 49 度の場合)

図 5-12 (a) に示すように、コシヒカリ Mstd (DOY131 植) 以外では、出穂期前後に VV 偏波が減少から増加に転じている。5.4.2 項で述べたように、コシヒカリ Mstd は、ひとめぼれ Mstd と比較して出穂が約 10 日遅かった。この遅れと同期してコシヒカリ Mstd (DOY131 植) の VV 偏波は、ひとめぼれ Mstd (DOY131 植) よりも遅れて増加する。よって、VV 偏波は、出穂の状況を捉えていると考えられる。これは、水稻の頂部の形状の変化や穂についた米粒の乾燥が影響していると考えられる。図 5-12 (b) に示すように HH/VV dB の結果では、移植から 34 日後の 6 月 14 日 (DOY165) から 8 月 30 日 (DOY242) までの 2.5 ヶ月で、すべての品種で時系列変化パターンが異なっている。言いかえると、後方散乱係数の時系列変化パターンから、水稻の品種を分類する可能性が示唆されていると考えられる。ただし、今回の研究では、解析した各品種のサンプル数が少ないことから、異なる品種のサンプル数を多くし、これら変化パターンの特徴を詳しく解析することによって、水稻の品種の分類が可能となるか今後の検討課題としたい。

5.4.5 生育量・収量と後方散乱係数との関係

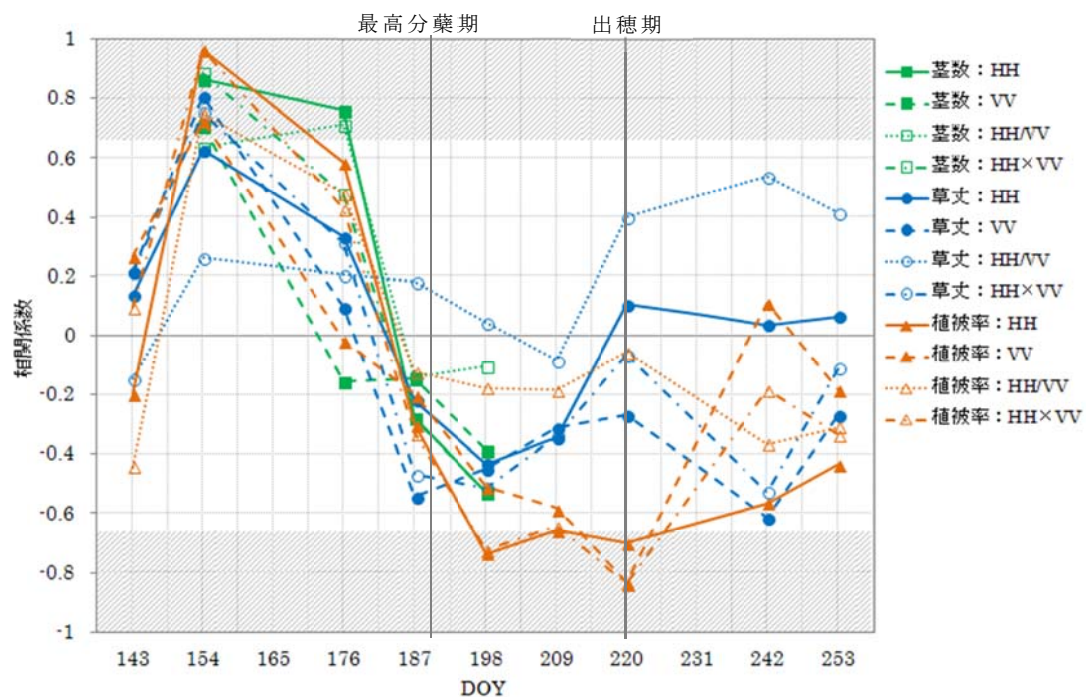
① 茎数、草丈および植被率と後方散乱係数との相関

TSX の撮影日の生育量と後方散乱係数との相関係数を図 5-13 に示す。全体の傾向として、茎数、草丈、植被率の生育量と後方散乱係数との関係は、移植後から最高分蘗期 7 月 9 日 (DOY190) 前までは概ね正の相関であり、最高分蘗期以降は負の相関となった。図 5-13 (a) に示すように、入射角 49 度の場合は、6 月 3 日 (DOY154) で茎数と HH 偏波、草丈と VV 偏波、植被率と HH 偏波に高い相関があった。入射角 21 度の場合は、図 5-13 (b) に示すように、6 月 7 日 (DOY158) で茎数と VV 偏波、植被率と VV 偏波が高い相関を示した。

さらに、図 5-13 から生育量と後方散乱係数との間で高い相関係数が続く期間を調べた。その結果、入射角 49 度の場合、茎数は 6 月 3 日 (DOY154) から 6 月 25 日 (DOY176) までの HH 偏波、植被率は 7 月 17 日 (DOY198) から 8 月 8 日 (DOY220) までの HH×VV dB が高い相関を示した。また、入射角 21 度の場合、茎数は 6 月 7 日 (DOY158) から 6 月 18 日 (DOY169) までの HH×VV dB、植被率は 5 月 27 日 (DOY147) から 6 月 18 日 (DOY169) までの HH×VV dB、6 月 7 日 (DOY158) から 6 月 18 日 (DOY169) までの VV 偏波、8 月 12 日 (DOY224) から 8 月 23 日 (DOY235) までの HH 偏波が高い相関を示した。

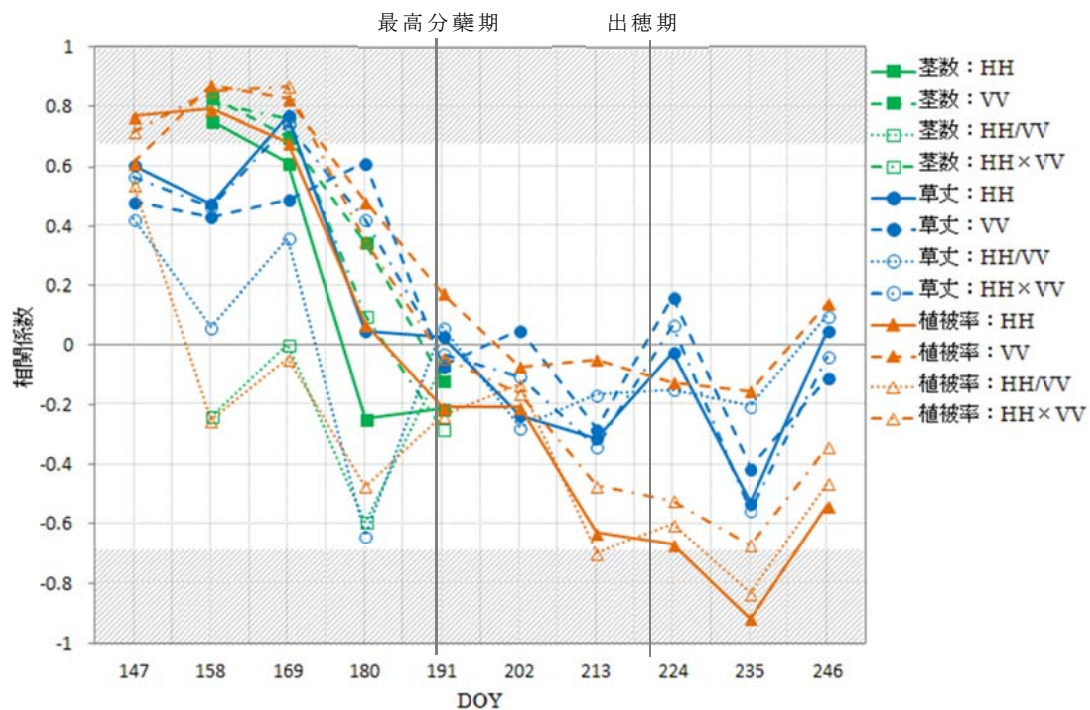
次に、5 月 25 日 (DOY145) から 6 月 29 日 (DOY180) までの期間内、すなわち、分蘗期間に得られた TSX の後方散乱係数と、それらに対応する茎数、草丈、および、植被率との相関をとった結果を表 5-2 に示す。HH 偏波と茎数の相関を除き、入射角 21 度が入射角 49 度と同等か高い相関を示した。例えば、草丈は入射角 49 度の HH 偏波では 0.91 であるが、入射角 21 度では 0.95 である。また、生育量と後方散乱係数との相関は、表 4-1 と比べてほとんどの値が向上しており、特に入射角 49 度の茎数と HH 偏波、VV 偏波の相関、植被率と VV 偏波の相関が向上した。

図 5-14 (a) に両入射角で撮影した時の HH 偏波と茎数との散布図を、図 5-14 (b) に、HH 偏波と草丈との散布図を示す。茎数と草丈を比較すると、入射角 49 度の相関は同程度で、入射角 21 度は草丈の相関が高かった。入射角 21 度の HH 偏波と草丈との相関係数は 0.95 で、回帰式は、 $Y = 0.5668X - 28.832$ である。このとき、草丈の回帰直線に対する後方散乱係数のばらつきは $\pm 2\text{dB}$ 以内、草丈のばらつきは $\pm 3\text{cm}$ 以内である。現地で計測した 5 月 25 日 (DOY145) から 6 月 29 日 (DOY180) までのすべての圃場の草丈のばらつきは $\pm 3\text{cm}$ 以内である。回帰式に対する草丈のばらつきと現地計測の草丈のばらつきは同程度であった。それに対し、入射角 49 度は、回帰式に対する草丈のばらつきが ± 1 から $\pm 2\text{cm}$ 程度、ばらつきが大きかった。



注:最高分蘗期および出穂期は「ひとめぼれ Mstd (DOY131 植)」のもの

(a) 入射角 49 度



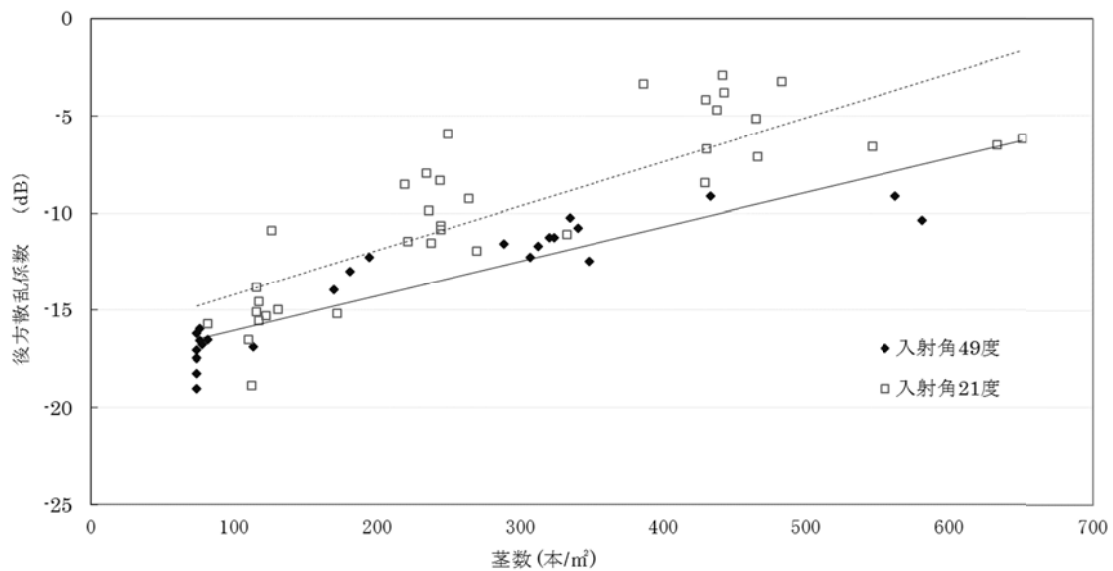
注:最高分蘗期および出穂期は「ひとめぼれ Mstd (DOY131 植)」のもの

(b) 入射角 21 度

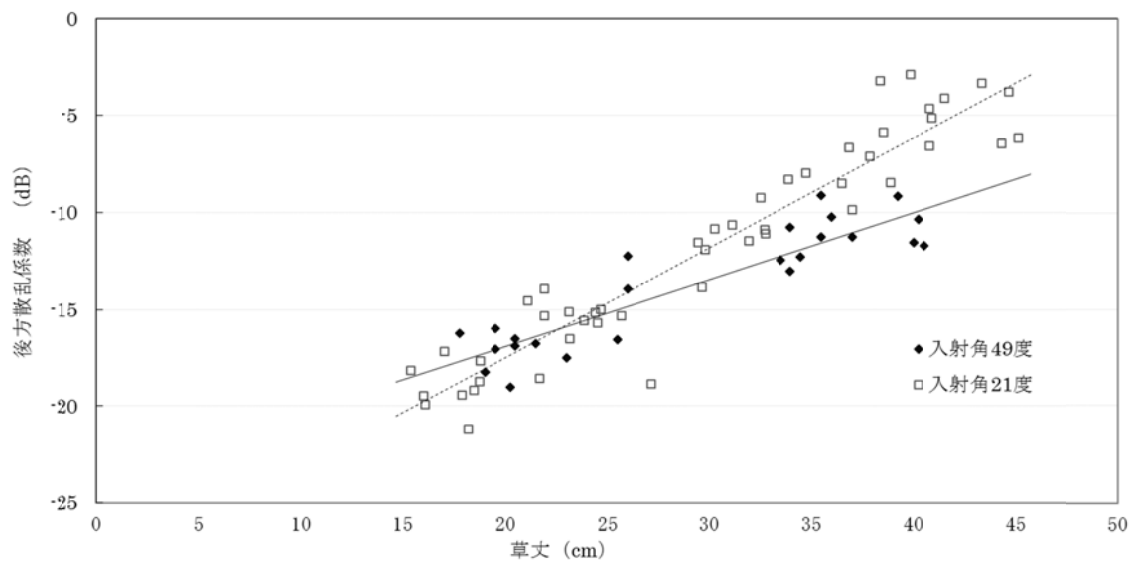
図 5-13 TSX の撮影日の生育量と後方散乱係数との相関係数

表 5-2 分蘖期（DOY145 から DOY180）における生育量と
後方散乱係数との相関係数

生育量	偏波	DOY145からDOY180	
		入射角49度	入射角21度
茎数	HH	0.91	0.82
	VV	0.76	0.88
草丈	HH	0.91	0.95
	VV	0.90	0.90
植被率	HH	0.91	0.91
	VV	0.82	0.93



(a) HH 偏波と茎数の散布図



(b) HH 偏波と草丈の散布図

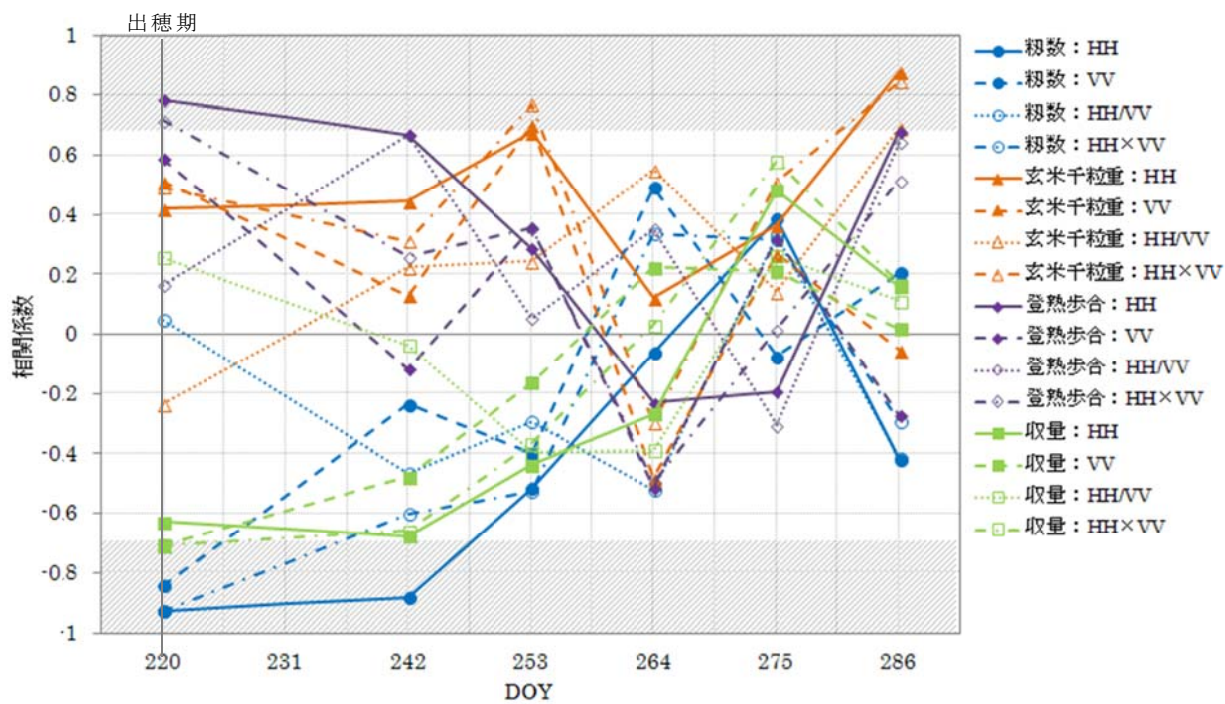
図 5-14 分蘖期 (DOY145 から DOY180) の生育量と HH 偏波の後方散乱係数の散布図

水稻生育量と後方散乱係数との関係の時系列変化を、TSX の撮影日ごとに相関分析で調べた。図 5-13 および表 5-2 に示した生育量と後方散乱係数との相関が高い時期や分蘖期間に TSX の撮影をすれば、生育量と相関の高いデータが得られることになる。図 5-13 (b) に示すように、植被率との相関が単偏波の観測と比較して、6 月 18 日 (DOY169) の HH×VV dB, 8 月 1 日 (DOY213) の HH/VV dB 方が高い相関を示している。よって、単偏波の観測ではなく 2 偏波の観測をおこなうことで、TSX による水稻の生育量の観測可能な時期が広がると考えられる。ただし、高い相関を示す時期が単発であるため、経年の観測により観測時期の特定を進める必要がある。また、分蘖期間は、図 5-14 に示されたように、茎数や草丈の生育につれて、後方散乱係数が増加しており、その関係は回帰直線であらわすことができる。よって、分蘖期間における TSX の撮影により、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示唆された。ただし、入射角 49 度より 21 度の方が、分蘖期間における水稻の生育に対する後方散乱係数の増加は急になるため、茎数や草丈と後方散乱係数との関係を示す直線の勾配が大きくなることに注意すべきである。

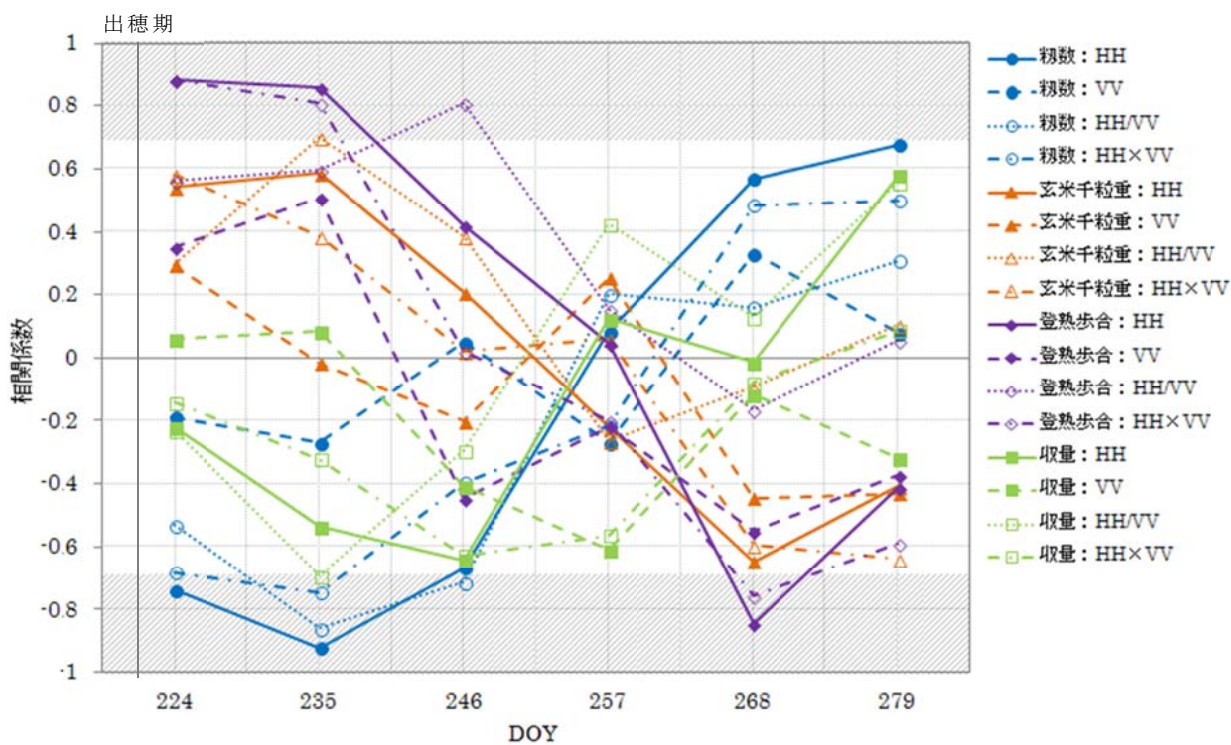
②収量と後方散乱係数との相関

TSX の撮影日ごとの籾数、登熟歩合、玄米千粒重および、収量との相関係数の変化を、ひとめぼれを例に調べた結果を入射角度別に図 5-15 に示す。図 5-15 (a) は入射角 49 度、(b) は入射角 21 度の場合である。

図 5-15 に示すように、籾数と登熟歩合は、入射角によらず出穂期の 8 月 8 日 (DOY220) から成熟期前の 8 月 30 日 (DOY242) までの HH 偏波との間に相関係数 ±0.7 以上の高い相関が得られた。また、登熟歩合は入射角 21 度における 9 月 3 日 (DOY246) の HH/VV dB および 9 月 25 日 (DOY268) の HH 偏波との間に高い相関が確認できた。玄米千粒重は、入射角 49 度の場合、9 月 10 日 (DOY253) と 10 月 13 日 (DOY286) の HH×VV dB, 10 月 13 日 (DOY286) の HH 偏波と高い相関が示された。一方で、入射角 21 度の場合は、玄米千粒重との間に高い相関が確認できなかった。収量は、入射角 49 度の場合、出穂期の 8 月 8 日 (DOY220) に VV 偏波, HH×VV dB と, 成熟期前の 8 月 30 日 (DOY242) に HH 偏波と高い相関が確認できた。入射角 21 度では 8 月 23 日 (DOY235) に HH/VV dB との間に高い相関が示された。



(a) 入射角49度



(b) 入射角21度

図5-15 収量調査項目と後方散乱係数との相関係数（ひとめぼれの場合）

図 5-15 において、籾数と登熟歩合は、出穂期から成熟期前の 8 月下旬までの間に、入射角 21 度および入射角 49 度の HH 偏波で撮影をすれば、相関が高いデータを得られることが示された。しかし、撮影後における気象条件の影響による生育量の変化が含まれないとも言える。また、9 月 10 日 (DOY253) に入射角 49 度で撮影した HH×VV dB から玄米千粒重と相関の高いデータが得られることが示された。9 月 14 日 (DOY257) に稲体の倒伏の影響があり、玄米千粒重との相関は一旦低くなるが、10 月 13 日 (DOY286) には再び相関の高いデータが得られるようになると考えられる。ただし、入射角が 21 度の場合、9 月 25 日 (DOY268) には 49 度の場合とは逆に高い負の相関係数となり、玄米千粒重と後方散乱係数との関係に安定性がないことが問題となる。また、出穂期に入射角 49 度で撮影した VV 偏波または HH×VV dB、もしくは成熟期前の 8 月 30 日 (DOY242) に入射角 49 度で撮影した HH 偏波から収量と相関の高いデータが得られると考えられた。

5.5 生育量および収量の推定

本章では水稻の栽培期間を通じて、XバンドSAR衛星のHH偏波とVV偏波の2偏波、異なる入射角で時系列撮影をおこない、水稻の生育推移に伴う後方散乱係数の変化について定量的に把握し、水稻の生育推移のモニタリングや収量推定の可能性を検討することを目的とした。水稻の品種、移植日、施肥量を変化させて生育推移・収量が異なる12の試験圃場を設定し、各圃場の生育状況の推移および収量を移植日から収穫日まで現地地上調査で調べた。また、TSXによって、21度と49度の異なる入射角を用いて、各圃場のHH偏波、VV偏波の時系列変化を11日周期で取得した。これらのデータをもとに、各試験圃場の後方散乱係数の時系列変化と生育状況との関係を調べた。さらに、相関分析により、TSXの撮影日ごとに生育量と後方散乱係数との関係を調べ、水稻の生育量や収量と相関の高い時期を求めた。最後に、収量調査に適したTSXの撮影時期、マイクロ波の入射角度と偏波についてまとめた。

宮城県における主要作付け品種である、ひとめぼれを例に、水稻の生育にともなう後方散乱係数の時系列変化パターンについて調べた結果から、その時系列変化にもとづき、水稻の生育変化を明確に追跡できることがわかった。

水稻生育量と後方散乱係数との関係の時系列変化を、TSXの撮影日ごとに相関分析で調べた結果では、分蘖期におけるTSXの撮影により、茎数、草丈、植被率の生育状況を推定できる可能性が示唆された。また、籾数と登熟歩合は、出穂期から成熟期前の間に、入射角21度および49度でTSXのHH偏波の撮影をすれば、相関が高いデータを得られることが示された。収量は、出穂期に入射角49度で観測したVV偏波またはHH×VV dB、もしくは成熟期前に入射角49度で観測したHH偏波で、相関の高いデータが得られることが示された。

以上、本研究を通じXバンド2偏波SAR衛星により時系列撮影をおこなうことによる、水稻の生育推移観測への有効性および収量推定の可能性を示すことができた。

第6章

各章の要旨ならびに結論

以上に記述したSARデータを用いた水田利用形態の分類および水稻の生育量・収量の推定に関する一連の研究各章の要旨をまとめ、著者の試みた新しい方法、および、これらの研究の理学的有用性について要約する。

6.1 各章の要旨

第1章 序論において、本研究の必要性および社会的な背景を示し、SARデータを用いた水田利用形態の分類および水稻の生育量・収量の推定に関する研究の目的および範囲を明確にした。

第2章 現在実施されているSARデータを用いた稲作水田抽出および水稻の生育量・収量の推定方法について概説し、従来研究の問題を提起した。

第3章 田植え期および生育期の2時期の高分解能SAR画像のTSXを用いた水田利用形態の分類手法の開発を目的とし、早植え稲作水田、慣行植え稲作水田、遅植え稲作水田、乾田直播稲作水田、大豆栽培水田等の水田利用形態の分類が可能かを検討した。また、分類手法では、TSXデータによる圃場ごとの判別および圃場ごとの平均値だけではなく、圃場内の各画素の情報を利用することを検討した。

提案手法では、田植え期と生育期の2時期のTSXデータを2バンドとして、対象範囲に対してクラスター分析をおこなった。1圃場ごとにポリゴンを作成しておき、そのポリゴン内のクラスター間の比率により水田利用形態ごとの早植え_稲、慣行植え_稲、遅植え_稲、乾田直播_稲、大豆等の分類をおこなった。

提案手法を用いた分類結果では、乾田直播_稲、大豆、小麦を抽出できており、この面での利用価値は高い。移植栽培の水稻（早植え_稲、慣行植え_稲、

遅植え_稲)は、大豆や小麦とよく分類された。また、早植え_稲、遅植え_稲のように約20日の移植の差異があれば、それぞれが誤分類されないことがわかった。

第4章 生育量の推定をおこなうために、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解析した。

本研究の結果から、生育量と後方散乱係数の関係は、移植期から最大分蘗期前まで、HH偏波、VV偏波の増加が認められた。最大分蘗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、移植期から最高分蘗期前までに高い相関が認められた。この相関は、移植期から最高分蘗期前までの水稻の茎や葉の縦横方向の生育からの散乱および稲体自体や稲体と湛水面との散乱が要因と考えられた。

第5章 水稻の栽培期間を通じて、XバンドSAR衛星のHH偏波とVV偏波の2偏波、異なる入射角で時系列撮影をおこない、水稻の生育推移に伴う後方散乱係数の変化について定量的に把握し、水稻の生育推移のモニタリングや収量推定の可能性を検討した。

まず、水稻の品種、移植日、施肥量を変化させて生育量・収量が異なる12の試験圃場を設定し、各圃場の生育状況の推移および収量を移植日から収穫日まで現地地上調査で調べた。また、TSXによって、21度と49度の異なる入射角を用いて、各圃場のHH偏波、VV偏波の時系列変化を11日周期で取得した。これらのデータをもとに、各試験圃場の後方散乱係数の時系列変化と生育状況との関係を調べた。さらに、相関分析により、TSXの撮影日ごとに生育量と後方散乱係数との関係を調べ、水稻の生育量や収量と相関の高い時期を求めた。最後に、収量調査に適したTSXの撮影時期、マイクロ波の入射角度と偏波についてまとめた。

水稻生育量と後方散乱係数との関係の時系列変化を、TSXの撮影日ごとに相関分析で調べた結果では、分蘗期におけるTSXの撮影により、茎数、草丈、植被率の生育状況を推定できる可能性が示唆された。また、籾数と登熟歩合は、出穂期から成熟期前の間に、入射角21度および49度でTSXのHH偏波の撮影をすれば、相関が高いデータを得られることが示された。収量は、出穂期に入射角49度で観測したVV偏波またはHH×VV dB、もしくは成熟期前に入射角49度で観測したHH偏波で、相関の高いデータが得られることが示された。Xバンド2偏波SAR衛星により時系列撮影による、水稻の生育量・収量の推定の可能性を示すことができた。

6.2 本研究の新しい試みとその効果

この研究では、「2時期の高分解能SARデータを用いた水田利用形態の分類」，「高分解能Xバンド2偏波SAR画像による日本国内の水稻の生育・収量の推定」を実施した。

従来のSARデータを用いた水田利用形態の分類の研究では，

- 1) 高い空間分解能による水田利用形態の分類
- 2) 早植え稲作水田，慣行植え稲作水田，遅植え稲作水田，乾田直播稲作水田，大豆栽培水田等の分類

などの問題が解決に至っていない。

また，従来のSARデータを用いた水稻の生育量・収量の推定方法の研究は，

- 1) 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関係
- 2) Xバンド衛星SARによる日本の水稻の生育量や収量の調査の可能性
- 3) 水稻の生育量・収量の推定に適したXバンド衛星SARの撮影条件

などが明らかになっていないことを提起した。

これに対して，この研究論文のSARデータを用いた水田の利用形態の分類および生育量・収量の推定は，次のような特徴をもっている。

- 1) 乾田直播_稲，大豆，小麦の高精度の分類が可能である
- 2) 移植栽培の水稻（早植え_稲，慣行植え_稲，遅植え_稲）と大豆や小麦を高精度で分類できる
- 3) 早植え_稲，遅植え_稲のように約20日の移植の差異があれば，それぞれが誤分類されない
- 4) 分蘖期におけるTSXの撮影により，茎数，草丈，植被率の生育状況を高精度で推定できる
- 5) 籾数と登熟歩合は，出穂期から成熟期前間に，入射角21度および49度のHH偏波の観測をおこなえば，高精度の推定が可能である
- 6) 収量は，入射角49度のVV偏波またはHH×VV dBによる出穂期の観測，もしくは入射角49度のHH偏波による成熟期前の観測で精度良く推定できる

一方，現段階では次の課題が残された。

- 1) 「早植え_稲，慣行植え_稲」および「慣行植え_稲，遅植え_稲」の分類で十分な精度が得られていない
- 2) 倒伏の状況とマイクロ波の散乱特性との関係の解明
- 3) 水稻の品種分類

これらの課題は，さらなるSARデータの時間分解能の向上および水稻圃場のサンプル数の増加によって改善されると考えられる。

このように、本論文のSARデータを用いた水田の利用形態の分類および生育量・収量の推定に関する研究は、従来の研究に比べて、多くの利点をもつ新しい試みであり、今後の水田の利用形態の分類および水稻の生育量・収量の推定への効率化に大きく寄与するものである。

6.3 本研究の理学的有用性

この研究においては、水田の利用形態の分類および生育量・収量の推定について、単に分類や推定方法を示すのみに止まらず、稲の生育に基づく植物群落の形状変化を SAR で送受信するマイクロ波送受信間の散乱メカニズムにより説明することを試みた。しかしながら、各章においては十分に記述されていないのでここに理学的な観点から記載する。

「第3章 水田利用形態の分類, 3.4節 結果と考察, 3.4.1項 提案手法の2009年の解析, (1) 水田の状況と後方散乱係数の関係」において、水田の利用形態ごとの田植え期と生育期について HH 偏波および VV 偏波の後方散乱係数を図 3-3 に示し、早植え_稲, 慣行植え_稲, 遅植え_稲, 乾田直播_稲, 大豆という水田利用形態ごとの TSX の後方散乱特性を把握した。

続いて、「第3章 水田利用形態の分類, 3.4節 結果と考察, 3.4.1項 提案手法の2009年の解析, (2) クラスタ分析の実施, (3) 各クラスターの意味」において、以下のことが判明した。田植え期の水田では、①水面等の滑らかな面による鏡面散乱, ②水面と土壌との中間の形状面による散乱, ③土壌の粗い面からの散乱, ④畝と側面等で衛星方向と対峙する高い後方散乱という4段階の散乱が観測され、生育期では①水面等の滑らかな面による鏡面散乱, ②生育している植物体による散乱, ③畝と側面等で衛星方向と対峙する高い後方散乱という3段階の散乱が観測された。田植え期と生育期の2時期の SAR データを組み合わせると①田植え期と生育期の水面等の滑らかな面による鏡面散乱, ②田植え期の水面からのみの散乱, 生育期の生育している植物体による散乱, ③田植え期の水面と土壌との中間の形状面による散乱, 生育期の植物体による散乱, ④田植え期の土壌の粗い面からの散乱, 生育期の土壌の中程度の散乱, ⑤両時期とも畝と側面等で衛星方向と対峙する高い後方散乱等のという5つのカテゴリーに分類できた。

「第4章 生育段階ごとの水稻生育量と SAR の後方散乱係数との関係, 4.4節 結果と考察, 4.4.1項 生育量および後方散乱係数の時系列変化, (2) 後方散乱係数の時系列変化」の「図 4-11 入射角 21 度の後方散乱係数の時系列変化」および「図 4-12 入射角 49 度の後方散乱係数の時系列変化」において、水稻の生育に伴う後方散乱係数の変化を HH 偏波と VV 偏波について検討した。水稻の田植えから収穫まで、真上に近い入射角 21 度と斜め方向の入射角 49

度の 2 つの角度での観測を実施した。入射角 21 度の観測では、1 時期を除き、HH 偏波の方が VV 偏波より後方散乱係数が高い値であった。入射角 49 度の観測では、移植後 45 日 (DOY176) までは、HH 偏波と VV 偏波の散乱係数は同じであったが、その後の移植後 56 日 (DOY187) から 78 日 (DOY209) まで HH 偏波の方が VV 偏波より後方散乱係数が高い値で、この間の日数が進むにつれて差が大きくなり続けた。その後、差が縮まり移植後 122 日では VV 偏波の後方散乱係数が HH 偏波を追い越した。その後はまた HH 偏波の後方散乱係数が大きくなった。これらの理由は、水稻群落と形に応じた SAR のマイクロ波観測メカニズムで説明できる。水稻の形として、垂直構造と水平構造の 2 つを考える。真上に近い入射角 21 度の観測で垂直構造に対して感度が小さく、斜め方向の入射角 49 度では入射角 21 度より垂直構造に対する感度は増加する。最初、水稻は垂直構造の茎が優勢であるが生育して葉が広がることにより水平構造が大きくなる。しかし、出穂により垂直構造が再び増加する。さらに日数が進むと登熟に伴って、穂が垂れ下がり水平構造が優勢となる。VV 偏波が垂直構造に反応し、HH 偏波が水平構造に強く反応すると考えると、この水稻群落の水平と垂直構造の変化を良く示している。

この研究において、稲の生育に基づく植物群落の形状変化を SAR で送受信するマイクロ波送受信間の散乱メカニズムにより説明することができた。水稻の生育段階ごとの構造変化は、SAR の偏波情報に強く反映することが判明した。このことは、水稻はもとより草本植物全般で、生育段階を SAR の偏波観測で明らかなる可能性ができ、植物学への物理的手法での計測技術利用に結びつくものであるといえる。

謝辞

本論文をまとめるにあたり，直接の御指導，御鞭撻を頂き，公私ともにお世話になりました立正大学地球環境科学部環境システム学科 後藤真太郎教授に謹んで感謝の意を表します。

また，本研究の遂行に際し，多大なご協力と有益な御意見および御討論を頂いた，千葉大学工学部 安田嘉純名誉教授，東京工業大学 齋藤元也特任教授，立正大学地球環境科学部環境システム学科 吉崎正憲教授，株式会社パスコ 島村秀樹氏および株式会社パスコ 研究開発本部 各位には，深甚なる謝意を表します。現地調査では，宮城県古川農業試験場および株式会社 GIS 東北の方々の御協力に深く感謝いたします。

最後に，研究生活にわたって，私を支援し，激励してくれた妻 亜希，娘 心南，心春，両親，妹，家族の者および友人達に心から感謝します。

本研究は，以上の方々を始め，多数の方々の御指導，御協力のもとに達成できたものであり，ここで関係者各位の皆様に感謝致します。

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, 2006, 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.
- 2) 飯坂譲二, 1998, 合成開口レーダ画像ハンドブック, 朝倉書店, pp.12-158.
- 3) 石塚直樹, 2006, 水稻作付面積計測への合成開口レーダ(SAR)の利用, 農業環境技術研究所報告, 24 号, pp.95-151
- 4) 石塚直樹, 斎藤元也, 大内和夫, Glen Davidson, 毛利健太郎, 浦塚清峰, 2003, 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.
- 5) 脇山恭行, 井上君夫, 中園江, 2003, 水稻の登熟期における衛星データおよびアメダスデータを用いた収量予測法, 農業気象, 59 (4), pp.277-286.
- 6) 竹内省司, 小西智久, 菅雄三, 小黒剛成, 2000, 衛星搭載 SAR データによる水稻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.
- 7) 農林水産省, 2011, 農林水産省における利用状況, 首相官邸 宇宙開発戦略本部 リモートセンシングワーキンググループ 第2回会合 資料 3-3, pp.1-5.
- 8) 堀江武, 2004, 作物栽培の基礎, 農山漁村文化協会, pp.54-138.
- 9) 山口県農業試験場, 2005, 水稻の籾数管理のための幼穂形成期の生育量診断, 新たに普及に移しうる試験研究等の成果, 山口県農業試験場, pp.1-2.
- 10) 山形与志樹, 石田憲治, 富士田裕子, 1988, ランドサット TM 画像を用いた水稻作付面積の推定, 日本写真測量学会講演論文集, pp.163-1686.
- 11) 山本 由紀代, 平野 聡, 内田 諭, 2011, オブジェクト指向分類を用いたインドネシア・プランテーション地帯における農地の特徴把握, システム農学, 27(4), pp.137-148.
- 12) 吉田一昭, 2000, 平坦地における水稻「ひとめぼれ」の特性, 研究成果, 岐阜県農業技術研究所, pp.1-3.
- 13) A.Bouvet, T.Le.Toan, N.Lam-dao, 2009, Monitoring of the Rice Cropping System in the Mekong Delta using ENVISAT/ASAR Dual Polarization Data. IEEE Trans Geosci Remote Sens , 47(2) , pp.517-526.
- 14) Infoterra Gmb, 2008, TSXX ITD TN 0049 radiometric_calculations_1.00, pp.2-15.

- 15) Y.Inoue, E.Sakaiya and Cuizhen Wang, 2014, Potential of X-Band Images from high-resolution satellite SAR sensors to assess growth and yield in paddy rice, *Remote Sensing*, vol.6, Issue7, pp.5995-6019.
- 16) Y.Inoue , T.Kurosu , H.Maeno , S.Uratuka , T.Kozu , K. Dabrowska-Zielinska and J.Qi, 2002, Season-long daily measurements of multifrequency (Ka, Ku, X, C, and L) and full-polarization backscatter signatures over paddy rice field and their relationship with biological variables, *Remote Sensing of Environment*, vol.81, pp. 194-204.
- 17) Kirsi Karila, Olli Nevalainen, Anssi Krooks, Mika Karjalainen and Sanna Kaasalainen, Monitoring changes in rice colutivated area from SAR and optical satellite images in Ben Tre and Tra Vinh Provinces in Mekong delta, vietnam, 2014, *Remote Sensing*, 6, pp.4090-4108.
- 18) J.Y.Koay, C.P.Tan, K.S.Lim, *et al.*, 2007, Paddy Fields as Electrically Dense Media : Theoretical Modeling and Measurement Comparisons. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 45(9), 2837-2849.
- 19) T.Kurosu, M. Fujita and K. Chiba, 1997, The identification of rice fields using multi-temporal ERS-1 C band SAR data, *Intl. J. Remote Sens.* , 18(14) , pp.2953-2965.
- 20) T.Kurosu, M. Fujita and K. Chiba, 1995, Monitorring of rice crop growth from space using the ERS-1 C-band SAR, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 33(4), pp.1092-1096.
- 21) J.S. Lee, 1980, Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics , *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.PAMI-2, pp.165-168.
- 22) Nguyen LAM-DAO, T. Le Toan, Armando APAN, Juliane HUTH and Phung HOANG-PHI, 2012, Rice monitoring in the Mekong delta, Vietnam, The 33rd Asian Conference on Remote Sensing
- 23) Nguyen LAM-DAO and Phung HOANG-PHI, 2012, Rice crop monitoring in the Mekong delta, vietnam using TerraSAR-X and ENVISAT-ASAR radar data, International Symposium on geoinfomatics for spatial infrastructure development in earth and allied sciences
- 24) T. Le Toan, F. Ribbes, Li-F. Wang, N. Floury, K-H. Ding, J. A. Kong, M. Fujita and T. Kurosu, 1997, Rice crop mapping and monitoring using ERS-1 data based on experiment and modeling results, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 35(1), pp.41-56.
- 25) T.Le.Toan, H. Laur, E.Mougin, A.Lopes, 1989, Multitemporal and Dual-Polarization Observations of Agricultural Vegetation Covers by

- X-Band SAR Images. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 27(6), pp.709-718.
- 26) J. M. Lopez-Sanchez, J. David Ballester-Berman and Irena Hajnsek, 2010, 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.
 - 27) J. M. Lopez-Sanchez, J. David Ballester-Berman and Irena Hajnsek, 2009, 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.
 - 28) N. Memarsadeghi, N.S. Netanyahu, J. LeMoigne, 2007, A Fast Implementation of the ISODATA Clustering Algorithm, International Journal of Computational Geometry and Applications, pp.71-103.
 - 29) K. Okamoto and M. Fukuhara, 1996, Estimation of paddy field area using the area ratio of categories in each mixel of Landsat TM, Intl. J. Remote Sens., 17(9), pp.1735-1749.
 - 30) F.Ribbes and T. Le Toan, 1999, Rice field mapping and monitoring with RADARSAT data, Intl. J. Remote Sens., 20(4), pp.745-765.
 - 31) J.W.Tukey, 1977, Exploratory Data Analysis, Addison wesley pub co. inc.
 - 32) S. ShuangHe, Y. ShenBin, Li BingBai, Tan BingXiang, Li ZengYuan and Le Toan Thuy, 2009, A scheme for regional rice yield estimation using ENVISAT ASAR data, Sci Caina Ser D-Earth Sci, 52(8), pp.1183-1194.

本研究に関連した発表論文

学術雑誌論文（国際学会含む）

- 1) 木村篤史，島村秀樹，2015，2 時期の高分解能 SAR データを用いた水田利用形態の分類，写真測量とリモートセンシング，Vol.54，No.3，pp.118-132.
- 2) 木村篤史，島村秀樹，安田嘉純，2013，高分解能 X バンド 2 偏波 SAR 画像による水稻の生育・収量の調査，写真測量とリモートセンシング，Vol.52，No.3，pp.127-140.
- 3) 木村篤史，2013，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，先端測量技術，105 号，pp.60-68
- 4) Atsushi KIMURA, Hideki Shimamura, 2010, Estimation of planting condition of paddy fields utilizing TerraSAR-X data, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Vol.XXXVIII, Part8, pp.568-571.

学術講演会論文（特許含む）

- 1) 木村篤史，島村秀樹，2011，合成開口レーダ(SAR)を用いた水稻収量の推定に関する基礎的研究，日本測量調査技術協会 第 33 回測量調査技術発表集，pp.25-26
- 2) Ng Kah Keong, 力丸厚，坂田健太，島村秀樹，木村篤史，2011，時系列のレーダ衛星観測データを用いた作物生育情報の検討，日本写真測量学会年次学術講演会論文集，pp.103-106.
- 3) 杉本陽一，島村秀樹，木村篤史，2011，水稻作付け状況把握システム，水稻作付け状況把握方法，及び水稻作付け状況把握プログラム，特許庁，WO2011080944 A1.
- 4) 木村篤史，島村秀樹，2010，TerraSAR-X を用いた水稻収量の推定，日本写真測量学会年次学術講演会論文集，pp.115-116.
- 5) 木村篤史，島村秀樹，2009，衛星 SAR 画像による水稻の作付状況の解析，農業環境工学関連学会，合同大会学術講演会発表会論文集，[CD-ROM].
- 6) 木村篤史，高岸且，島村秀樹，谷宏，王秀峰，小林伸行，姜師明，2009，TerraSAR-X を用いた農作物の作付状況の把握，日本リモートセンシング学会第 47 回学術講演会論文集，pp.29-30.