

高品質米生産のためのリモートセンシング  
および GIS の実践的利用技術の開発

2014 年 1 月

境 谷 栄 二

高品質米生産のためのリモートセンシング  
および GIS の実践的利用技術の開発

筑波大学大学院  
生命環境科学研究科  
国際地縁技術開発科学専攻  
博士（農学）学位論文

境 谷 栄 二



## 概要

リモートセンシングは、圃場単位の情報を広域で取得可能な特徴を持つ。これを作物の生産管理に応用できれば、産地レベルで農産物の品質向上を図る上で有効なツールとなり得る。本研究では、我が国の主要農作物である米を対象に、価格や販売動向への影響が大きい食味および外観品質の向上を目指して、リモートセンシング技術を産地レベルで実践的に活用するための手法開発に取り組んだ。

食味は、米のタンパク質含有率によって左右される。リモートセンシングによるタンパク質含有率の推定手法は、北海道で2000年に開発されたが、本州以南では十分な精度が得られないことが多かった。本研究では、この原因を解明するとともに精度向上を図る手法を明らかにした。精度低下の原因については、田植時期のバラツキに起因した稲の生育ステージの違いが大きな誤差要因となり、また観測時期が早いほど誤差が相対的に大きくなりやすかった。田植期間の長さは、全国的にみて気象条件が厳しい地域ほど短い傾向があり、北海道のような北国では精度の確保および観測時期の前進に関して有利な条件が得られやすい。一方、本州以南のように田植時期のバラツキが大きい地域では、赤の波長を含む従来のNDVI  $[(NIR-R)/(NIR+R)]$ による推定では精度が低下しやすい。これに替えて、 $[(NIR-G)/(NIR+G)]$ を用いることで、生育ステージの変動による影響が緩和され、精度の低下を軽減できる。

近年、夏季の高温の影響により、米の外観品質の低下が全国的な問題となっている。高温障害である胴割米の発生には、気温と収穫のタイミングが大きく影響し、防止には成熟期の早晩に対応した適時での収穫が必要であることを明らかにした。また、産地レベルで胴割米の発生を防止するため、リモートセンシングデータから収穫適期である成熟期を予測する手法を開発した。生育ステージに対して感度が鋭い赤の波長を用いて、GISにより反射率の空間分布を積算気温等から規定した正規分布に変換することで、広域で圃場ごとに成熟期の予測が可能である。また、これをマップ化した「収穫適期予測マップ」の精度は、現行法（地域平均の出穂日＋積算気温）よりも優れる。これは、稲では籾数の多少が成熟期の遅速に影響するが、現行法ではこのことが反映されないのに対し、リモートセンシングでは衛星画像の面積当たり葉緑素量の情報を成熟期の遅速の情報（稲が大型で葉緑素量が多い＝籾数が多い）として利用できるためである。

米の食味および外観品質の向上には、稲体の窒素含有率の制御が極めて重要となる。そこで、土壌からの窒素発現および稲の生育状況の把握に有用となる指標をリモートセンシングデータから推定することを検討した。土壌の腐植含有率の推定については、赤の波長を単バンドで用いる従来の手法に比べ、正規化分光反射指数 $[(B-R)/(B+R)]$ ではさらに精度が高まる。生育診断指標の推定についても、追肥前の時期における誤差要因とその特徴を明らかにした。今後、圃場ごとの土壌や生育状況に応じて最適な施肥量の判定が可能なシステムへの研究発展が期待できる。

開発技術を現場で実践的に活用するため、利用技術の検討を行った。タンパク質含有率の推定については、食味の良好な圃場の米を区分集荷することによる付加価値米生産や栽培指導を行うための観測計画や作業手順を明らかにした。現在、青森県内の農協では、リモートセンシング技術による付加価値米生産を社会実装するに至っている。また、収穫適期の予測についても、収穫指導を効果的に行うため、個人農家向けおよび生産組合向けの「収穫適期予測マップ」のバージョンを考案した。これらのマップを活用することで、産地全体で収穫時期の最適化が図られ、産地レベルで胴割米の発生防止が期待できる。開発技術は、青森県で普及技術に取り上げられ、今後の活用が予定されている（青森県産業技術推進会議 2013）。本研究は、リモートセンシング技術を産地スケールで高品質米生産に活用した先駆的事例であり、他の産地での活用の指針となる。本技術は、産地における米のブランド化や付加価値化、高温障害防止に役立つものと期待される。

# 目次

## 概要

<b>第1章 緒言</b>	<b>1</b>
1 研究の背景	1
2 研究の目的	2
<b>第2章 高品質米生産における問題, その原因と対策</b>	<b>5</b>
1 食味	5
2 外観品質	6
2.1 胴割米の発生要因とその対策	7
<b>第3章 リモートセンシングによる玄米タンパク質の広域評価法の高度化</b>	<b>22</b>
1 はじめに	22
2 試験方法	
2.1 航空機センサによる分光画像の取得	23
2.2 地上調査	24
2.3 解析方法	25
3 結果および考察	
3.1 観測時の稲の生育と収穫時の玄米タンパク質との関係	30
3.2 観測時の稲の生育と反射スペクトルとの関係	31
3.3 収穫時の玄米タンパク質と反射スペクトルとの関係	35
3.4 玄米タンパク質の推定に影響を与える要因の解明	38
3.5 玄米タンパク質の推定に対する生育ステージの影響	40
3.6 生育ステージに対する赤の波長での感受性について	48
3.7 玄米タンパク質の推定精度向上策	50
4 まとめ	54

<b>第4章 リモートセンシングによる収穫適期の広域マップ作成手法</b>	<b>55</b>
1 はじめに	55
2 試験方法	
2.1 航空機センサおよび高解像度光学衛星センサによる分光画像の取得	56
2.2 地上調査	63
2.3 解析方法	64
3 反射スペクトルからの成熟期の推定	
3.1 反射スペクトルと成熟期の関係	66
3.2 観測時の稲の生育特性と成熟期の関係	68
3.3 成熟期推定と玄米タンパク質推定の相違について	71
4 収穫適期マップの作成	73
5 収穫適期の予測方法	80
6 予測マップの精度検証	82
7 まとめ	87
<b>第5章 リモートセンシングによる土壌腐植含有率の推定</b>	<b>88</b>
1 はじめに	88
2 試験方法	
2.1 高解像度光学衛星センサによる分光画像の取得	89
2.2 地上調査	90
2.3 解析方法	96
3 反射スペクトルからの土壌腐植含有率の推定	
3.1 単バンドの反射率と土壌腐植含有率の関係	96
3.2 NDSI 値と土壌腐植含有率の関係	98
3.3 土壌別にみた 650nm 付近の反射率と土壌腐植含有率の関係	100
3.4 土壌別にみた NDSI 値と土壌腐植含有率の関係	102
4 土壌腐植含有率と可給態窒素量の関係	104
5 まとめ	106

<b>第6章</b>	<b>リモートセンシングによる生育診断指標の推定</b>	<b>107</b>
1	はじめに	107
2	試験方法	
2.1	航空機センサによる分光画像の取得	108
2.2	地上調査	109
2.3	解析方法	110
3	試験場内の水田における生育診断指標の推定	
3.1	湛水条件・土壌条件がともに一定の場合の特徴	115
4	現地の一般水田における生育診断指標の推定	
4.1	湛水条件・土壌条件がどちらも一定でない場合の特徴	119
4.2	湛水条件が一定・土壌条件が一定でない場合の特徴	121
5	まとめ	128
<b>第7章</b>	<b>タンパクマップおよび収穫適期マップの現場利用技術</b>	<b>129</b>
1	タンパクマップを活用した産米の食味向上	129
1.1	付加価値米生産への活用	133
1.2	栽培指導への活用	141
1.3	外観品質の向上を目的とした活用の可能性	142
2	収穫適期予測マップを活用した産米の外観品質の向上	
2.1	胴割米の発生要因解析への適期マップの活用	143
2.2	適期収穫への予測マップの活用	157
3	産地におけるリモートセンシング・GIS利用の課題	
3.1	リモートセンシングに係る費用	163
3.2	GISの整備費用	164
<b>第8章</b>	<b>総合考察</b>	<b>168</b>
1	米の食味推定技術の精度向上と活用	168
2	米の収穫適期推定と品質向上への活用	169
3	土壌からの窒素発現程度の推定	170

4	生育診断指標の推定	171
5	リモートセンシングを利用した産地での総合的な生産管理モデルの 実現に向けて	172
	謝 辞	177
	引用文献	178

# 第1章 緒言

## 1 研究の背景

全国の米産地では、販売を重視した新品種の開発や農家への栽培指導、産米の地域ブランド化など、米の有利販売に向けた取り組み（青柳 2005）が熱心に進められている。米の食味・外観品質は、販売価格や販売動向に大きく影響する要素である。食味・外観品質は、同一品種であっても、年次や産地、さらに圃場ごとの違いが大きい。実需者からは、食味・外観品質が優れ、ばらつきの少ない均質な米が求められるが、同一産地内でも、土壌条件（日本土壌協会 2007）や個々の圃場での栽培管理は様々であり、気象条件も年次で異なる。

米の食味については、一般財団法人日本穀物検定協会による食味ランキングが毎年実施されており、全国の産地の米を「特 A, A, A', B, B'」の5段階にランク分けしている。平成 24 年産米については、128 産地品種の食味比較を行い、特 A が 29 産地品種、A が 62 産地品種、A' が 37 産地品種、B と B' は該当なしであった。ランキングの結果は米の販売に大きく影響することから、特 A ランクの取得は米産地の目標となっている。

米の外観品質についても、農産物検査法による品位検査で、1 等米、2 等米、3 等米、規格外にランク分けが行われる。この検査は生産者から農協等の集荷業者へ米を引き渡す時点で行われ、検査結果によっては米販売による農家の手取り額が減ることになる。青森県内の場合では、1 等米と 2 等米との農家手取り額の差は、玄米 60kg 当たり 500 円前後である。10a 当たりでは約 5,000 円の価格差となり、青森県内での平成 23 年度の稲作農業所得が 10a 当たり 45,000 円であることから、2 等米への落等により、米による収入が 1 割以上減少することになる。近年、温暖化傾向から夏季が高温傾向となる場合が多く、米産地では胴割米や白未熟粒といった高温障害による外観品質の低下が大きな問題となっており、稲作農家から悲鳴が上がっている。

これら食味や外観品質の問題は、品種を別にすれば、年次や地域における気象条件の違い、土壌条件に起因した地域における地力の不均一な分布、個々の圃場における栽培管理の違いが相互に影響した結果として生じているものである。よって、産地では地域単位の対応から圃場単位の細かい対応まで極めて広範な対応が必要となる。そのため、広範囲で、かつ圃場ごとのデータの取得が可能なりモートセンシングは、有効な解決手段を提供でき

る技術として期待されている。

リモートセンシングのプラットフォームは、航空機や衛星が代表的である。航空機については、航空測量会社に依頼してセスナなどにセンサを搭載して観測を行う。衛星については、衛星運用会社または代理店を通じて対象範囲を観測するようリクエストを行うか、アーカイブ画像の中から目的の画像を入手する。一般利用可能な衛星の登場は、1972年のLANDSAT 1号が最初である。同衛星は地表解像度 80m、観測波長数 4 バンド、観測周期 18 日の光学衛星であった。衛星センサの進歩はめざましく、最近では地表解像度 2m 程度（高解像度マルチスペクトル；WorldView-2, GeoEye-1 など）、観測波長数 61～220 バンド（ハイパースペクトル；EO-1 など）、観測周期 毎日（高頻度；Tera など）が実現されている。また、光学衛星は観測が晴天時に限られるが、雲の影響を受けずに観測可能な合成開口レーダーを搭載した衛星も運用が始まっている。1972 年以來、リモートセンシングは新しい技術として世界中に広まり、天気予報、漁場予測、資源探査、収穫量予測、森林管理、災害状況把握など社会活動に関係する様々な分野で用いられてきた（山野ら 2011）。東日本大震災発生時にも、衛星画像の情報は状況把握に効果を発揮した（高分解能衛星リモートセンシング研究会 2011）。

農業分野では、広範囲の圃場を対象とすることから、リモートセンシングで得られる広域的な情報は作物栽培に有効な情報となり得る。農業分野でのリモートセンシングは、地表解像度や観測頻度に高いレベルが要求されるが、近年、衛星の観測環境が急速に整いつつあり、利用技術の開発や活用が進む余地は大きい。

## 2 研究の目的

我が国における農業分野での本格的なリモートセンシングの実利用は、2000 年より北海道で衛星データから作成したタンパクマップを施肥管理の指導に活用したのが初めてである（安積・志賀 2003a, 安積ら 2003b）。タンパクマップとは、推定されたタンパク質含有率の水準に応じて色分けした地図で、北海道では計 10 万 ha の水田でマップ作成が行われた。その後、全国の米産地でも、タンパクマップの活用が試みられるようになったが、本州以南では推定精度が不十分となりやすく、実用化が進んでいない場合が多い（農業技術協会



2010)。また、タンパクマップを活用して、食味の優れる米を区分集荷し、地域のブランド米づくりを試みる事例もあるものの、画像取得の不確実性などから継続した実施には至らない場合が多い（農業技術協会 2010）。本研究では、全国の多くの産地で技術の実用化を達成するための一助として、タンパク質含有率の推定に対する誤差要因を明らかにし、この影響を軽減することでより安定した精度を確保する手法の確立を目的とした。また、青森県津軽中央地域をモデル地区として、産地スケールで区分集荷を安定的に実施するための観測スケジュールの検討のほか、タンパクマップを活用した区分集荷と栽培指導への技術導入を図る過程での課題抽出を行うことを目的とした。

また、近年の気象の温暖化傾向から、胴割米や白未熟粒といった高温障害が顕在化し、米産地では外観品質の低下が大きな問題となっている（農林水産省 2007）。胴割米は登熟期の高温と収穫時期の遅れが大きな要因となる（境谷ら 2012）。収穫遅れは、胴割米だけではなく、従前から知られている茶米の増加による外観品質の低下を招くほか、食味低下の原因となる（松江ら 1991）。そのため、適期収穫は、全国の米産地に共通する栽培指導の柱となっている。しかし、現行の指導では、収穫適期（成熟期）の判断が、出穂後積算気温からの推定（児玉ら 1993）や達観での籾の黄化程度（本田ら 1976）をもとに行われており、前者は稲の生育量の違いによる誤差が大きく、後者は多数圃場の状況把握に対応できないといった問題がある。そこで、食味でのタンパクマップ利用の例のように、リモートセンシングで広域的に収穫適期を圃場単位で予測したマップ（収穫適期予測マップ）を作成できれば、適期収穫に向けた計画策定や栽培指導が容易になり、米産地での胴割米などの発生防止に効果が期待できる。本研究では、収穫適期予測マップの実用化を目指し、①成熟度を精度良く推定可能な波長を明らかにすること、②収穫前の段階で成熟度を暦日で予測可能な収穫適期予測マップの作成法を開発すること。さらに、③収穫適期予測マップを産地スケールで活用するための手法を提案することを目的とした。

白未熟粒については、近藤ら（2012）が 2010 年の高温年における全国的な白未熟粒の発生について解析し、同一品種で玄米タンパク質含有率が低いグループと高いグループを比較した場合、低いグループは基白粒の発生が多いことを報告している。近年、食味重視により産地ではタンパク質含有率の低い米の生産が進められているが、その一方で、過剰なタンパク質含有率の低減が米の外観品質を低下しやすくしているとの指摘が出始めている（金田・進藤 2000）。米のタンパク質含有率は、土壌および施肥による窒素供給の影響を

受ける（大淵ら 1991, 高城ら 1990, 中鉢ら 1993）。土壌から供給される無機態窒素量は、土壌の腐植含有率や土壌タイプによって異なることから、これを予め把握することは、米のタンパク質含有率の安定化に寄与する。そこで、腐植含有率を推定し、さらに土壌タイプごとの特徴と組み合わせた地力の推定を行うことを目指した基礎的検討を行った。また、施肥については、生育後半の窒素栄養条件でタンパク質含有率が左右される（古土井・大竹 1991, 宮田・伊藤 1991）ことから、追肥の量や時期の影響が大きい。タンパクマップでも生育後半に供給された窒素量の過多の判断はおよそ可能であり、これを翌年度の施肥設計に生かすことは必要であるが、前年度の状況だけで本年度の追肥量を判断するのは困難である。その年の稲の生育状況に応じた追肥の量や時期の判断が必要となる。現状でも、水稻の追肥量の決定に当たっては、食味や外観品質の確保の観点から、稲の窒素量や生育状況を指標とした生育診断が現場で指導されている。しかし、葉緑素計などを活用したこれらの診断は、労力的な問題から限定された圃場での実施にならざるを得ないのが実情である。そこで、リモートセンシングを活用した広域的な生育診断実施に向けた基礎的検討として、航空機ハイパースペクトルデータを用いて、生育診断指標の推定に係る誤差要因の特徴を明らかにすることを目的とした。

以上、衛星および航空機による観測データを利用して、①米のタンパク質含有率の推定精度の向上とその食味向上への現場活用、②広域での収穫適期予測法の開発とその外観品質の向上への現場活用、③土壌腐植含有率の推定、④生育診断指標の推定に向けた条件説明を目的とし、リモートセンシングを活用した総合的な農業生産管理を目指して検討を行った。

## 第2章 高品質米生産における問題，その原因と対策

### 1 食味

米の食味は，一般に粘りがあり，冷めても硬くならず，ほどよい味と甘みのあるものが好まれる。精米にはでんぷんが75～80%，タンパク質が5～8%，脂質が1%，灰分0.5%，水分が15%程度含まれる（文部科学省 2005）が，食味は米粒を構成する成分の多少により変動することが知られている（小田中ら 1994）。でんぷんはアミロースとアミロペクチンから構成され，アミロースはアミロペクチンに比べ熱に対して安定で糊化しにくい。そのため，アミロースを多く含むとご飯が硬くなり，粘りが少なくなる（稲津 1985）。また，タンパク質についても，タンパク質顆粒がでんぷんの吸水や膨張を阻害し，糊化を抑制する（Tamaki *et al.* 1989）ことなどから，多い場合には硬く粘りの少ない米となる（松江ら 1997）。そのため，アミロース含有率（以下，アミロースと呼ぶ）とタンパク質含有率（以下，タンパクと呼ぶ）は，米の食味に大きく影響し，含有率が高いと食味が劣る（小田中ら 1994，近藤・野副 1993）。

米の成分は，品種（井上ら 1992），産地（照井ら 1998），気象条件（近藤・安田 1994），栽培法（近藤・野副 1990）の影響を受け，品種以外の要因では，アミロースは登熟気温（近藤・安田 1994），タンパクは施肥管理（大淵ら 1991，高城ら 1990）や土壌条件（中鉢ら 1993）による影響が大きい。アミロースは登熟気温が高いほど低下する（照井ら 1998）ことから，米産地では地域の気象条件にあった熟期品種の作付けや田植時期の最適化などによりアミロースの抑制を図っており，同一産地・品種ではアミロースのバラツキは少ない（大淵ら 1990）。タンパクについては，全般に泥炭土や強グライ土などで高く，有機物含量の少ない灰色低地土や粘土含量の少ない礫層礫質土壌で低めとなる傾向がある（境谷 1998）ほか，施肥管理（小田中ら 1995）による影響も大きく，農家水田におけるタンパクの実態は水田ごとの変異幅がかなり大きい傾向がある（安積ら 2003b，境谷・井上 2013）。よって，産地における食味向上では，タンパクの高い水田についてタンパク低減を図り，産地全体の米を均質で食味の優れた米とする必要がある。そのため，食味に対する栽培管理の指導は，施肥管理の最適化によるタンパク低減が主体となる。一方，食味の観点から

は、タンパクは低いことが望ましいが、低タンパクの米が重視されるあまりに過度の窒素制限が行われ、高温年次に白未熟粒の発生による外観品質の低下につながる事例が報告されている（金田・進藤 2000）。これまでタンパクについては、食味の観点から上限だけを問題としてきたが、外観品質の確保の観点から下限についても過度のタンパク低下を防ぐ必要があり、水田ごとのタンパクの制御が課題となっている。

## 2 外観品質

米の農産物検査では、外観品質を基準とした格付けが行われる。格付け等級は、1等、2等、3等、規格外の4段階があり、検査標準品との比較による達観評価により判定される。等級は、整粒歩合（被害粒、死米、未熟粒、異種穀粒および異物を除いた粒の割合）の最低限度、整粒以外に分類される未熟粒、被害粒、着色粒、死米のそれぞれの最高限度、胴割粒や茶米などの被害粒の最高限度に応じて判定される（財団法人全国食糧検査協会 2002）。格付される等級によって買い入れ価格が異なり、青森県内における1等米と2等米の価格差は、玄米60キログラム当たり500円前後である。

近年、水稻では高温登熟障害の発生事例が多数報告されている（寺島ら 2001, 松村 2005, 農林水産省 2013）。その主な症状は、①玄米の白濁化（白未熟粒）、②玄米の充実不足（やせ米）、③胴割米、④玄米1粒重の低下である。①～③は検査等級の低下、④は収量の低下に結びつく。登熟期の高温で発生が多くなる白未熟粒の主なタイプは、乳白粒、背白粒、および基部未熟粒であり、このほかに玄米全体が白濁し表面に光沢がない死米も増加する（長戸・江幡 1965）。また、高温条件では粒張りが低下したやせ米が観察されるが、これはその他未熟粒に分類される。具体的には、粒が扁平、縦溝が深い、糠層の厚い玄米を指す。被害粒の一つである胴割米も、登熟初期の日最高気温の上昇で増加することが明らかにされている（高橋ら 2002, 長田ら 2004）。登熟期の平均気温が21～24℃を超えると玄米1粒重や登熟歩合が低下することが報告されている（松島・真中 1957, 相見ら 1959, 村田 1964, 棟方ら 1967）。高温登熟障害が近年頻発している要因の一つは気温自体の上昇であるが、これには地球規模の気候温暖化の関与が懸念されている。すなわち、気温上昇は、化石燃料の消費などによる温室効果ガスの上昇で起きるとされ、将来、2060年代に

は稲の生育期間である日本の5～9月の平均気温は1990年代に比べ全国的に約3℃上昇することが予測されている（林 2003）。

農林水産省が都道府県を対象に行った「地球温暖化影響調査レポート」によると、2007年は、白未熟粒が32都道府県、充実不足が11都道府県、胴割米が9都道府県で被害が問題となっている（農林水産省 2007）。2006年、2008年など、最近、青森県内でも高温登熟障害の一つである胴割米の発生が頻発するようになり（東北農政局 2007）、現場で深刻な問題となっている。そこで、県内における胴割米の発生要因および対策解明に向け、胴割米被害が特に多い津軽中央地域で実態調査を行った。

## 2.1 胴割米の発生要因とその対策

### 1) はじめに

胴割米は玄米の胚乳部に亀裂を生じる現象で（図 2-1）、米の外観品質や食味に影響を及ぼす。米の農産物検査では、胴割れした米粒は被害粒として扱われ、その他の被害粒（発芽粒、奇形粒など）や死米や異種穀粒および異物の合計値で15%以上になると2等以下に格付けされる（財団法人全国食糧検査協会 2002）。胴割れの判定基準については、①横1条の亀裂がすっきり通っている粒、②完全に通っていない亀裂が片面横に2条、他面からみて横2条の粒であって発生部位の異なる粒、③完全に通っていない亀裂が片面横に3条以上生じている粒、④縦に亀裂を生じている粒、⑤亀甲型の亀裂を生じている粒とされている（財団法人全国食糧検査協会 2002）。

胴割れした玄米は精米時に碎米となりやすく、精米歩留まりや精米品質、食味に影響する。水浸・炊飯時に精米外縁部に裂け口状の亀裂が生じる水浸裂傷粒は形の崩れた炊飯崩壊粒になりやすく、食味に悪影響を及ぼすことが知られているが（柳瀬 1985）、胴割米は精米過程で米粒表面に傷を生じたひび割れ米と同様に水浸裂傷を生じやすいとされている（村田ら 1992、小出ら 2001）。また、胴割れ率が20%（軽微な胴割れを含む）を超えると食味官能評価における外観や食感への影響が大きくなり、食味総合評価が低下する（上野・石井 2008）。

近年、胴割米の発生による外観品質の低下が全国的に問題となっている（木野田ら 2001、

日塔 2001, 有坂 2002, 滝田 2002, 中村ら 2003, 農林水産省 2007)。胴割米はこれまで西日本や関東・北陸地域で問題となるが多かったが、夏季の高温傾向から北日本でも顕在化してきた(農林水産省 2007)。青森県でも発生が増加しており、津軽中央地域では高温年である 2007 年に落等した米の 8 割以上は胴割米が原因であった(東北農政局 2007)。なお、西日本や関東・北陸地域では同じ高温登熟障害の一つである白未熟粒の発生を併発することが多いが、青森県では、白未熟粒を伴わず胴割米が単独で発生する特徴がある(東北農政局 2007)。

なお、胴割米の発生メカニズムについては、登熟が進み籾含水率の低下した米粒が、気象条件や乾燥調整による吸湿や放湿のために内部水分の不均衡を生じ、米粒内の部位別膨縮差が大きくなることによって発生することが報告されている(近藤・岡村 1932, 長戸ら 1964, 佐藤 1964)。すなわち、米粒は外界の湿度に敏感に反応して水分を吸収・放出するが、玄米での水分の出入りは胚と胚乳の境界付近にある「胚盤」と呼ばれる部分で最も早く行われるため、胚盤付近の胚乳の膨張や収縮は他の部分より早く進む。完熟した米粒は硬いため、そのような膨張・収縮が急激に生じると内部に圧力の不均衡が生じ、それに耐えきれなくなった米粒に内部亀裂が生じてしまうという過程である。このような発生メカニズムを背景に、胴割米は登熟期の高温条件等による籾含水率の低下(中村・原城 1966, 石倉・升尾 1967, 高松ら 1983)、籾含水率の低い条件下での降雨(長戸ら 1964, 石倉・升尾 1967)、収穫後の乾燥調整条件(伴 1971)など、登熟後期以降の籾含水率の低下や籾内の急激な水分含量の変化が生じる条件下で発生しやすいことが明らかにされてきた。そのため、栽培管理との関係では、圃場からの落水が早すぎたり、収穫時期が遅れたりすると籾含水率が過度に低下し、吸湿等による水分変動が生じやすくなることで、収穫前の立毛状態で胴割米が発生することが知られている(長戸ら 1964, 高城ら 1980, 日塔ら 2001)。

一方、圃場試験によって、出穂後 10 日間程度という登熟初期の限られた期間における高温条件が胴割米の発生に大きく影響することが近年明らかになってきた(高橋ら 2002, 長田ら 2004, 上野・石井 2008)。特に開花後 6~10 日頃の日最高気温は、胴割れに強く影響することを報告している(長田ら 2004)。出穂後 6~10 日頃は穎果の内部で細胞分裂が続いているのと同時に、米粒中心部でデンプン蓄積が始まっている時期にあたる(長戸・小林 1959, 星川 1967a,b, 星川 1968a,b)。胴割れを生じやすい品種「藤坂 5 号」では、胚

乳内に蓄積したデンプン粒表面の皺やアミロプラスト表面の凹みなど、デンプン粒の収縮が米粒中心部に高頻度で観察されることが明らかになっている（岩澤ら 2006）。これらのことから、長田（2013）は、登熟初期の高温条件がこの時期に形成される米粒内部の胚乳構造やデンプン蓄積に影響を及ぼし、米粒中心部にデンプン粒の収縮等が生じることによって、亀裂が生じやすい粒質になる可能性を指摘している。

また、独法研究機関や公立農試による全国連絡試験（ko-on-net 連絡試験）では、玄米タンパク質含有率が低い米ほど、胴割米の発生が多い傾向が報告されている（長田ら 2006b）。

以上、圃場試験を主体としたこれらの解析で、複数要因の関与が報告されてきているが、各々の要因が実際の生産現場でどの程度影響しているかを検討した事例はみあたらない。実際の生産現場では影響が大きい要因から小さい要因まで大小様々である可能性がある。これらがわかれば、現場でより効率的に対策を実施できると考えられる。そこで、胴割米が大きな問題となっている津軽中央地域の平川市の水田を対象に2009年～2010年に実態調査を行い、これまで報告のあった主な要因について胴割米発生への影響程度を検討した。



図 2-1 胴割米

米の中央部にひび割れが生じている

## 2) 試験方法

調査年次は 2009～2010 年、品種は「つがるロマン」である。青森県津軽中央地域に位置

する平川市の一般水田 2800ha を対象エリア（図 2-2）として、調査地点を 2009 年は 193 地点、2010 年は 184 地点設定した。複数時期に稲を 10 株ずつ刈取りし、室内で陰干しして乾燥させた後に脱穀し、玄米試料とした。2009 年は 220 点、2010 年は 420 点の試料を得た。胴割れの有無は、長田ら（2004）の調査に従いグレインスコープ（ケット社製 TX-200）を用い軽微な割れを含めて調査した。胴割米発生率は、「胴割米重/全粒重」による重量%で示した。籾水分は 105℃で 5 日間乾燥して求めた。玄米タンパク質含有率は、ケルダール法で測定した窒素含有率に 5.95 の係数を乗じて算出した。出穂期および成熟期は観察調査による。成熟期の判定は籾黄化率 90%を基準とした。

統計処理には JMP7（SAS）を使用し、胴割米発生率に対する要因の影響程度を一般化線形モデルによる重回帰で分析した。要因については、胴割米に関するこれまでの報告事例（長戸ら 1964, 高城ら 1980, 日塔ら 2001, 長田ら 2004, 長田ら 2006b）を参考に、立毛状態で胴割米への関与が想定される主な要因として、①出穂後 6～10 日の日最高気温平均值（以下、出穂後の高温）、②成熟期後積算気温（以下、収穫時期）、③収穫時の籾水分（以下、籾水分）、④玄米タンパク質含有率（以下、玄米タンパク）を選定したほか、図 2-3 に示すように地域内が二つの水系に分かれることから地理的要因として⑤水系を含めた。なお、②収穫時期と③籾水分については、相互の相関が高いことから( $r = -0.521^{***}$ ), それぞれ一方を説明変数として使用する重回帰モデル（A：収穫時期モデル、B：籾水分モデル）により解析を行った。気温は、平川市の最寄りのアメダス地点（黒石市）の値を用いた。





図 2-2 調査地域



図 2-3 平川市の水系図と用水の流水温

水系区分は、土地改良水系図を参考とした。水系の数値は、用水の流水温平均値（測定地区数：浅瀬石川水系 7，平川水系 9，測定日時：2010年8月6日12:00～15:00），出穂期の平均値は、8月1日（2010年，全184地点）。

### 3) 結果および考察

図 2-4 は、胴割米発生率と各要因との関係性を単相関で評価した結果である。①～⑤のいずれの要因も、胴割米発生率との間に密接な関係が認められた。①出穂後の高温については、検討項目の中で最も高い  $r=0.64^{***}$  の相関を示した。長田ら（2004）はポット栽培した水稲を用いた登熟各期の高温処理試験により、高温に対して感受性が高まる時期が開花後 6～10 日頃であることを明らかにしている。稲の開花は天候が良い条件であれば出穂直後に行われ、出穂期頃は盛んに開花している時期であることから、本研究で対象とした出穂後 6～10 日は長田（2004）の開花後 6～10 日頃とほぼ一致する時期であると考えられる。長田

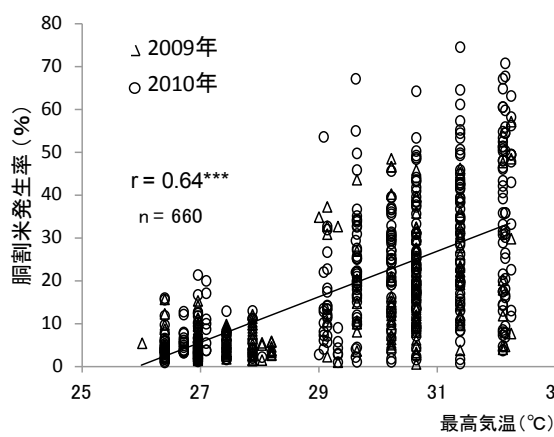
(2013) は、登熟初期の高温条件がこの時期に形成される米粒内部の胚乳構造やデンプン蓄積に影響を及ぼし、米粒中心部にデンプン粒の収縮等が生じることによって、亀裂が生じやすい粒質になる可能性を指摘している。つまり、胴割れが実際に発生する収穫時期以前に、前歴として胴割れの生じやすさが決定付けられるというメカニズムを提起した。生産現場において、胴割米は高温年で発生が問題となることが多いが、このメカニズムで発生率の年次変動を説明することができる。本研究の対象地域とした平川市では出穂後 6~10 日の平年における日最高気温平均値は 28.0℃程度であるが、調査を行った 2009 年は 27.1℃でやや低く、2010 年は 30.7℃で高い。胴割米発生率も低温傾向だった 2009 年は平均 5.7%、高温傾向の 2010 年では平均 25.6%と両年で大きな差がみられ、長田ら (2004) による傾向とよく一致している。

②収穫時期および③籾水分と胴割米発生率との関係については、それぞれ  $r=0.48^{***}$ 、 $r=-0.36^{***}$  の有意な相関が認められた。これについては、比較的古くから報告事例 (長戸ら 1964, 高城ら 1980, 日塔ら 2001) があり、メカニズムについても前述のように解明がある程度進んでいる (近藤・岡村 1932, 長戸ら 1964, 佐藤 1964, 中村・原城 1966, 石倉・升尾 1967, 高松ら 1983, 長戸ら 1964, 石倉・升尾 1967 伴 1971 長戸ら 1964, 高城ら 1980, 日塔ら 2001)。具体的には、立毛状態で成熟が進み水分含有率が低下して硬化の進んだ米粒が、気象条件による吸湿や放湿を繰り返し受けることで胚乳部にひび割れが生じるという直接的な胴割れの発生メカニズムである。なお、②収穫時期では正の相関が認められたが、これは収穫時期が遅いほど米粒の水分が低下し可塑性が失われてからの吸湿や放湿を繰り返す期間が長期化するためと考えられる。また、③籾水分については負の相関が認められた。これについては収穫後の通常の乾燥調製で玄米水分を 15%まで低下させても胴割れが発生しないことから、籾水分の低下が直接的に影響した結果ではないと考えられる。通常の栽培条件では、時間の経過とともに籾水分が徐々に低下することから、得られた負の相関は、籾水分が低い米ほど早い時期に米粒の硬化が始まっていたことを反映したものと考えられる。なお、絶対値で比較した相関係数の大きさは、②収穫時期が③籾水分よりもやや大きかったが、これは胴割れの発生メカニズムを②収穫時期の方がより強く反映するためと考えられる。

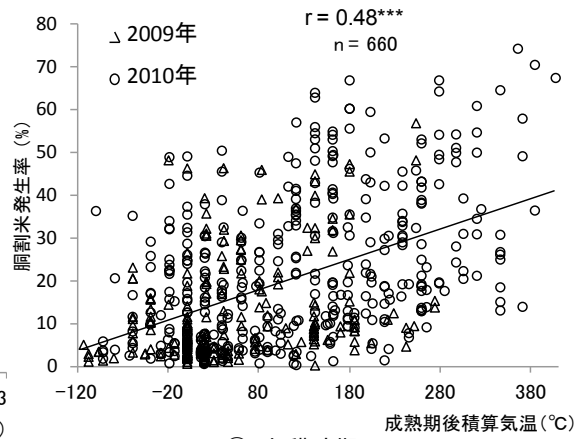
④玄米タンパクと胴割米発生率との関係については、 $r=0.11^{**}$  の有意な正の相関が認められたが、相関係数はかなり小さかった。長田ら (2006b) は ko-on-net 連絡試験においてタ

ンパクが低い米ほど胴割米の発生が多い傾向があったことを報告している。しかし、本研究での相関係数の符号はこれとは逆の傾向となった。この原因は、胴割米発生率が2009年では低温傾向のため低く、2010年は高温傾向のため高かったが、タンパクについては2009年では平均6.8%でやや低く、2010年では平均7.3%でやや高い傾向となっている。つまり、①出穂後の高温の影響が大きいことで、タンパクの影響が潜在化したことが考えられる。

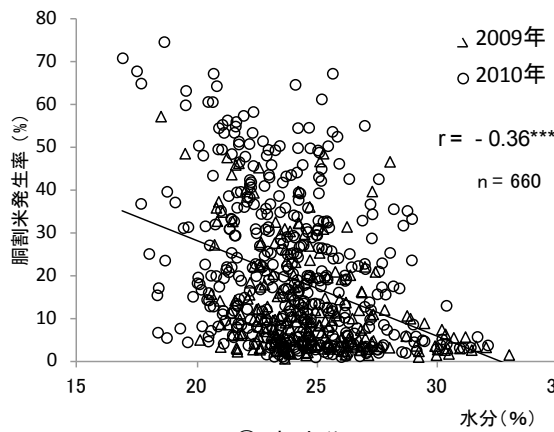
⑤水系については、低温年の2009年では水系による差が認められなかったが、高温年の2010年では浅瀬石川水系と平川水系に有意な差が認められた。図2-3に出穂後5日目に当たる2010年8月6日に測定した水温を示したが、両水系では約3°Cの差があった。これは浅瀬石川水系では取水しているダムが大型で距離的にも近いことが影響していると考えられ、農協の営農指導員からも浅瀬石川水系では普段から水温が低い傾向があるという情報を得ている。登熟期間中の圃場水温を下げるような水管理を行うことにより、胴割れ抑制効果が得られた事例が報告されていることから(中村ら2003, 長田ら2005, 長田2006a), 両水系での水温の違いが、より影響が出やすい高温年で胴割米発生率に影響したことが考えられる。以上、単相関およびt検定の結果では①～⑤のいずれでも有意な関係が認められたが、④玄米タンパクでは他の要因の影響を大きく受けていることが考えられた。また、④玄米タンパク以外の要因についても調査試料ごとのバラツキはかなり大きい傾向があった。



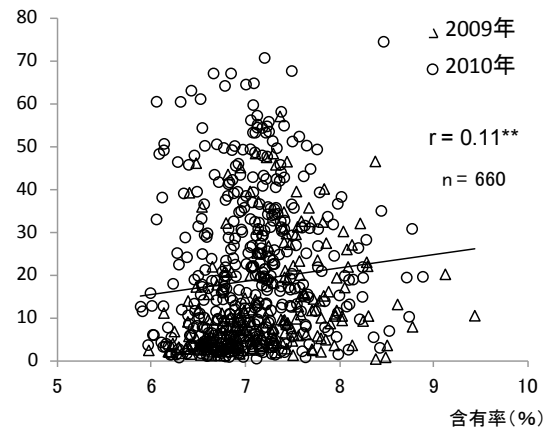
① 出穂後の高温



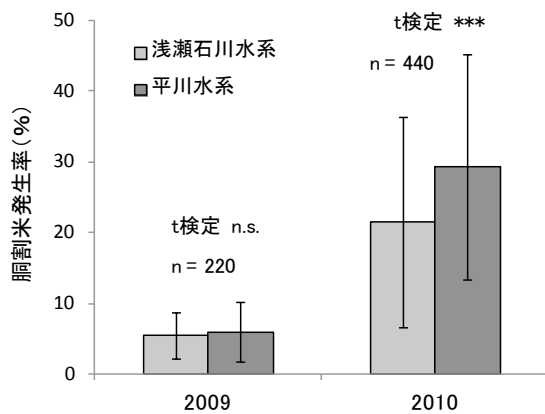
② 収穫時期



③ 籾水分



④ 玄米タンパク



⑤ 水系

図中の縦棒の長さは標準偏差を示す。

t検定は浅瀬石川水系と平川水系との検定。

図 2-4 胴割米発生率と各要因の関係

\*\*\* : 0.1%水準, \*\* : 1%水準, \* : 5%水準でそれぞれ有意, n. s. : 有意ではない。

- ① 出穂後の高温 (出穂後 6~10 日の日最高気温平均値)
- ② 収穫時期 (成熟期後積算気温)
- ③ 籾水分 (収穫時の籾水分)
- ④ 玄米タンパク (玄米タンパク質含有率)
- ⑤ 水系 (浅瀬石川水系, 平川水系)

胴割米発生率に対する各要因の影響程度を一般化線形モデルによる重回帰分析で解析した(表2-1)。重回帰モデルの自由度調整済み決定係数( $R^2$ )は、A:収穫時期モデルで $R^2=0.551^{***}$ 、B:籾水分モデルで $R^2=0.513^{***}$ であった。圃場ごとの水管理や土壌条件の違いなどが反映されていない条件ではあるが、①～⑤の要因によって胴割米発生率の変異の過半数を評価することができた。また、各要因の偏回帰係数には、A:収穫時期モデルでは全ての要因で有意差が認められることから、①～⑤の各要因はいずれも胴割米発生へ影響を及ぼしていると考えられる。B:籾水分モデルでも傾向はほぼ同様であったが、④玄米タンパクについては有意差が認められなかった。なお、両モデルとも④玄米タンパクの偏回帰係数の符号は負であり、長田ら(2006b)が報告したタンパクと胴割米発生の傾向と一致する。これは、偏回帰係数で評価することにより、他の要因の影響が除かれ、④玄米タンパクの影響が顕在化したためと推察される。また、交互作用が①×②、①×③で認められたが、このことは、胴割れが発生する収穫時期以前に、前歴として胴割れの生じやすさが決定付けられるという長田(2013)が提起したメカニズムを追認する結果と考えられる。つまり、①出穂後の高温が前歴となり、②収穫時期や③籾水分が関与する胴割れ発生を助長し、胴割米発生率に影響を与えると推察された。

次に、胴割米発生率に対する各要因の影響割合を評価した(図2-5)。「各要因または交互作用の平方和/全要因の平方和の合計」で影響割合を求めたもので、交互作用を含む全要因の合計は100%である。胴割米発生率に対する影響割合は、A:収穫時期モデルの場合、①出穂後の高温が70.3%と最も大きく、次いで②収穫時期が19.9%であった。さらに交互作用4.6%を含めると、この2つの要因に関係する割合だけで約95%と大部分を占めた。そのため、胴割米の発生軽減にはこの2つに対する対策が効果的と考えられた。また、⑤水系の影響割合は3.9%で、上位2つの要因に比べるとはるかに小さいが、重点的に指導を行うべき地域が明確になった。一方、④玄米タンパクは影響割合が1.4%とかなり小さかった。なお、④玄米タンパクの変異幅は、5.9%~9.4%でかなり大きく、現場の実態を十分に反映した試料となっている。表2-1の偏回帰係数からもタンパク1ポイント当たりの胴割米発生率の減少はわずか2ポイント程度にすぎないことが明らかになった。よって、増肥による対応は食味へのマイナス影響が大きく現実的な対策にはなりにくいと考えられた。なお、農家の意識には玄米タンパクの抑制を胴割米増加に結び付ける傾向がある。しかし、それは玄米タンパクの高い稲は成熟期が遅れることが多いため、地域で同時期に収穫作業が行

われる場合に、玄米タンパクの高い圃場ほど収穫遅れの程度が小さく、結果として胴割米の発生が少なくなることが影響していると推察される。背白や基白などの白未熟粒の発生については、過度の窒素制限による低タンパク化が発生に影響することが明らかになってきたが（金田・進藤 2000），胴割米の発生に対する低タンパク化の直接的な影響は思いのほか小さい可能性がある。胴割米発生率への影響は④玄米タンパクよりも②収穫時期が圧倒的に大きいことから、玄米タンパクと胴割米発生率との関係の単相関では、窒素制限によって籾数が減少し成熟期が早まる（中川ら 1989）ことで生じる収穫時期（成熟期後日数）の差が間接的に影響してしまう可能性がある。特に、施肥レベルの異なる稲を、同一日または出穂後日数で揃えて収穫することは、成熟期後日数でみた収穫時期の差を生じさせ、胴割米発生率に影響を与える。胴割米発生率に対する玄米タンパクの影響解析では、成熟期後日数や籾水分を揃えて収穫した上での比較、または収穫時期（成熟期後日数や成熟期後積算気温）との偏相関による解析が必要と考えられる。

表 2-1 胴割米発生率に対する重回帰分析結果（一般化線形モデル）

区分	要因	範囲	調査点数		A 収穫時期モデル (自由度調整済 R <sup>2</sup> =0.551 <sup>***</sup> )			B 籾水分モデル (自由度調整済 R <sup>2</sup> =0.513 <sup>***</sup> )			AB両モデル の偏回帰係 数の平均値	
			平均	2009	2010	偏回帰係数	t値	VIF	偏回帰係数	t値		VIF
共通 要因	① 出穂後の高温 (出穂後6~10日の 日最高気温の平均値℃)	26.0~32.2	29.5	220	420	4.9	19.5 <sup>***</sup>	1.3	4.9	19.2 <sup>***</sup>	1.2	4.9
	② 収穫時期 (成熟期後積算気温℃)	-114.2~405.8	92.1	220	420	0.045	10.4 <sup>***</sup>	1.2	-	-	-	0.045
	③ 籾水分 (収穫時の籾水分%)	16.9~33.0	24.2	220	420	-	-	-	-1.7	-9.9 <sup>***</sup>	1.1	-1.7
	④ 玄米タンパク (%)	5.9~9.4	7.1	220	420	-2.3	-2.7 <sup>**</sup>	1.3	-1.2	-1.4 <sup>n.s.</sup>	1.3	-1.8
地理 要因	⑤ 水系	浅瀬石川水系	-	113	199	-2.1	} 4.6 <sup>***</sup> }	} 1.1	-2.0	} 4.3 <sup>***</sup> }	} 1.1	-2.1
		平川水系	-	107	221	2.1			2.0			2.1
交互 作用	① × ②		220	420	0.012	5.0 <sup>***</sup>	1.1	-	-	-		
	① × ③		220	420	-	-	-	-0.53	-6.1 <sup>***</sup>	1.0		
胴割米発生率の推定式 (①~⑤、①②、①③はモデルの偏回帰係数)					Y=①x+②y+④z+⑤+(①②)(x-29.5)(y-92.1)-113.9			Y=①x+③y+④z+⑤+(①③)(x-29.5)(y-24.2)-76.1				

- (1) 「収穫時期」と「籾水分」の要因は、相互の相関が高いため (r=-0.521<sup>\*\*\*</sup>)、別モデルとして解析した。交互作用は有意な組合せに限定した。
- (2) t 値 (偏回帰係数の有意確率を検定) : 有意差無し n. s., 有意差有り (\* 5%水準, \*\* 1%水準, \*\*\* 0.1%水準)
- (3) VIF (多重共線性を検定) : VIF 1 独立関係, VIF 2 中程度の間接効果の受け渡し, VIF 2.7 やや強い間接効果の受け渡し, VIF 5 多重共線性の予感
- (4) 出穂後 6~10 日の日最高気温の平均値 (全地点の平均) : 2009 年 27.1℃, 2010 年 30.7℃, 参考: 平川市 平年値 28.0℃
- (5) 胴割米の判定は、成熟期頃以降、複数時期に稲を 10 株刈取りし、室内で自然乾燥した後、精玄米をグレインスコープによる目視で軽微な割れを含めて調査した。
- (6) 胴割米発生率は、胴割粒重/全粒重で求めた。本基準で調査した胴割米発生率は、30% 以上となると等級検査で落等が増加する関係にあった (データ省略)。
- (7) 籾水分は胴割米調査試料の刈取り時に 1 株別刈りし、籾を 105℃の乾燥器で 5 日間乾燥して乾燥前の重量との差から求めた。



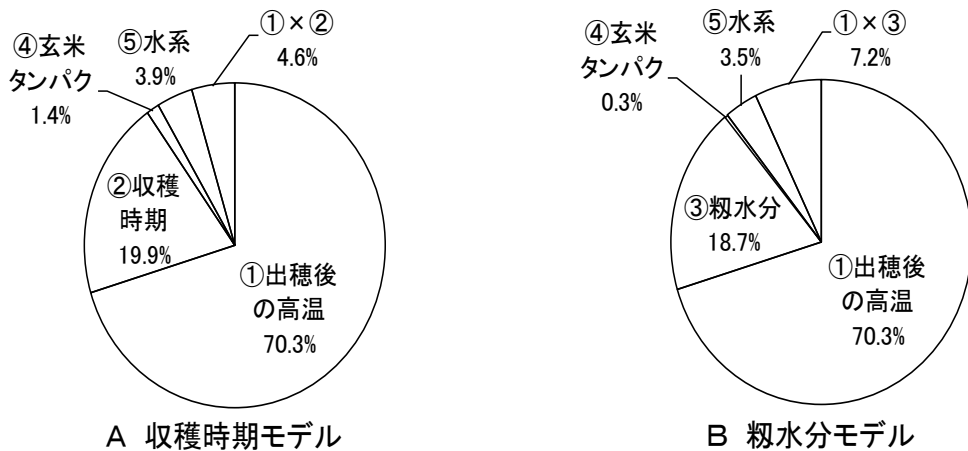


図 2-5 胴割米発生率に対する各要因の影響割合

- (1) 要因の影響割合は、胴割米発生率に対する効果の検定で得られる各要因（交互作用）の平方和から算出した（全要因の合計を 100 とした）。

$$\text{要因の影響割合 (\%)} = \frac{\text{各要因の平方和}}{\text{全要因の平方和の合計}} \times 100$$

- (2) 効果の検定で得られる各要因（交互作用）の平方和

「モデルの残差平方和－該当の要因だけを取り除いたモデルの残差平方和」から算出した要因に起因する平方和。

胴割米の発生は、出穂後の高温と収穫時期が大きく影響していることが明らかとなったことから、両者の関係をさらに詳しく検討した。図 2-6 は、平川水系の地域における胴割米の発生と収穫時期の関係である。胴割米の発生からみた収穫適期の晩限は、表 2-1 の胴割米発生率の収穫時期モデルでの推定式を用いた。出穂後 6～10 日の気温が高いほど、早い時期で胴割米が発生する。出穂後の日最高気温が平年並みの 28℃では成熟期後 39 日を過ぎるまで発生しないが、30℃では同 12 日、31℃では同 6 日、32℃では同 2 日まで適期の晩限が大幅に早まると推定される。茶米を対象とした収穫適期の晩限は成熟期後 11 日頃であり、従来はこの時期を収穫の晩限とした指導が行われていた。胴割米では、出穂後 6～10 日頃の日最高気温が 30℃を超えると、従来の晩限内に収まらなくなる。近年、胴割米が多発生した年次である 2006 年および 2007 年でも、出穂後 6～10 日頃の日最高気温が 30℃を超える

圃場が多く、これらの圃場では収穫適期幅が例年よりも大幅に短くなっていたと推測される。

胴割米の発生防止には、出穂後の高温の軽減とともに、適期収穫が重要となるが、現行の収穫指導は出穂後積算気温による地域一律での指導が一般的である。胴割米では数日単位の収穫時期の差が外観品質に影響を及ぼすことから、圃場ごとの成熟期を広域で推定可能な技術の開発が望まれる。

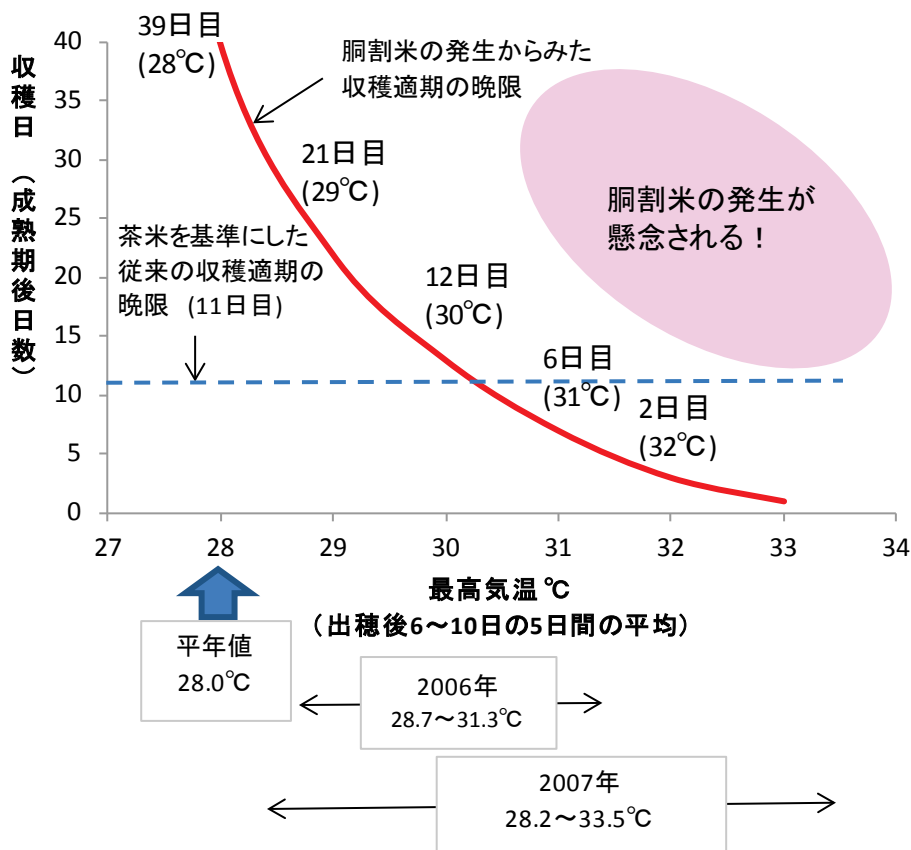


図 2-6 胴割米の発生からみた収穫適期の晩限

- (1) 2006年と2007年の幅は、出穂最盛期から15日間における連続した5日間の最高気温を平均した値の最高値～最低値を示す。
- (2) 収穫日(成熟期後日数)は18°C/日で算出した。
- (3) 胴割米の発生からみた収穫適期の晩限は、本調査方法での胴割米発生率 30%を基準に、表 2-1の解析による平川水系での胴割米の発生推定式から求めた。
- (4) 茶米を基準にした従来の収穫適期晩限は、出穂後の気温の高低に関わらず、出穂後積算気温で1150°Cを基準としている(青森県 2011)

#### 4) まとめ

胴割米発生率に対する各要因の影響程度を一般化線形モデルによる重回帰分析で解析した。重回帰モデルの自由度調整済み決定係数は、A：収穫時期モデルで  $R^2=0.551^{***}$ 、  
籾水分モデルで  $R^2=0.513^{***}$  で、①出穂後の高温、②収穫時期、③籾水分、④玄米タンパク、  
⑤水系の5つの要因によって胴割米発生率の変異の過半数を評価できた。また、胴  
割米発生率に対する影響割合は、A：収穫時期モデルでは、①出穂後の高温が70.3%と  
最も大きく、次いで②収穫時期が19.9%であった。さらに交互作用を含めると、この二  
つの要因に関係する割合は95%と大部分を占めた。なお、④玄米タンパクについては、  
偏回帰係数から判断して、玄米タンパク1ポイント当たりの胴割米発生率の減少はわず  
か2ポイント程度に過ぎなかった。よって、増肥による対応は食味へのマイナス影響が  
大きく現実的な対策にはなりにくいと判断された。胴割米の発生からみた収穫適期の晩  
限は、出穂後6～10日の日最高気温が30℃の場合は成熟期後12日、31℃の場合は同6  
日、32℃の場合は同2日と大幅に早まることが推定された。

胴割米では数日単位の収穫時期の差が外観品質に影響を及ぼすことから、圃場ごとの成  
熟期を広域で推定可能な技術の開発が望まれる。

### 第3章 リモートセンシングによる玄米タンパク質の 広域評価法の高度化

#### 1 はじめに

農作物の生産で一定水準の品質を確保するためには、適切な栽培管理が求められる。栽培管理の判断に当たっては、生育状況の把握が必要であり、これらは通常、植物体の大きさや乾物重、成分含有率の実測やこれを圃場レベルで簡便に測定する機器を用いて行われる。しかし、多数圃場での実施は労力や時間的な制約から困難である。衛星や航空機から観測を行うリモートセンシングは、広域を対象とした情報計測にきわめて有力であり、農業分野においても多様な応用の可能性が示されてきた (Moran *et al.* 1997, 井上 1997)。近年、多様な信号を取得できるセンサが運用され、かつ空間解像度が飛躍的に向上したことから、我が国においても農業利用の実用化を進める環境が整ってきた (井上 2011)。すなわち、リモートセンシングや GIS による空間情報技術を農業生産現場にも実践的に活用することが可能となってきた。地域全体の状況が圃場一筆ごとに把握できれば、適切な栽培管理に向けた判断や栽培指導が容易となり、産地スケールでの農産物の品質向上が期待できる。一方、衛星や航空機搭載の光学センサによる観測では、天候が大きな制限要因となる。雲の少ないデータが得られる可能性が低いことから (秋山・川村 2003)、良好なデータが得られるまでに 10 日以上の日数を要することは珍しくない。また、広域を一斉に観測する手法であるため、圃場レベルでの測定のように生育ステージと合致したデータ取得は困難であり、圃場ごとの生育ステージのずれを内在したデータとなる。そのため、現場でのリモートセンシングの活用では、ある程度の制限要因を前提としながら、これらの影響軽減を図り一定レベルの精度を確保することが必要となる。

米の食味は、産米の価格や販売動向に影響し、食味の安定した米の生産は、産地にとって重要な課題である。米の食味はアミロース含有率とタンパク質含有率 (以下、タンパクと呼ぶ) で大きく左右され (稲津 1985, Tamaki *et al.* 1989)、前者は品種や登熟気温 (近藤・安田 1994)、後者は施肥 (大淵ら 1991, 高城ら 1990, 境谷ら 1998) や土壌条件 (中鉢ら 1993) による窒素条件の影響を強く受ける。そのため、産地では、都道府県の試験場

における良食味品種の開発のほか、県や農協指導員による栽培指導が行われている。栽培指導では、栽培管理で改善の余地が大きい米のタンパク低減を目的に、葉緑素計を活用した追肥指導や、米の搬入時に食味計で測定したタンパクのデータに基づいた施肥指導が行われている。しかし、葉緑素計では、労力や時間的制約から指導員だけで産地がかかえる全ての圃場の測定は不可能であり、食味計による測定では、施肥指導に本来必要とされる圃場単位でのデータ取得が困難である。こうした中、安積・志賀（2003a）は、広域で圃場単位に米のタンパクを把握する手法として、衛星で観測した成熟期頃の水田画像から米のタンパク水準ごとに色分けした地図であるタンパクマップを作成し、北海道において施肥管理などの栽培指導へ活用した。この後、タンパクマップは、食味の良好な圃場の米を区分集荷し地域のプレミアム米として販売する取組みにも活用されている（境谷ら 2008a,b）。

しかし、全国の多くの産地で衛星や航空機によるタンパクの推定が試みられているが、特に本州以南では推定精度が不十分で、かつ画像取得の確実性の問題も相まって実用化に至らない事例が多い（農業技術協会 2010）。そのため、全国の多くの産地で技術の実用化を実現するためには、タンパク推定に対する誤差要因を明らかにし、この影響を軽減することで安定した精度を確保する必要がある。なお、この解明にあたっては、衛星搭載のマルチバンドセンサでは測定波長数が限られ半値幅も広いことから、反射スペクトルに及ぼす影響を詳細に把握するには限界がある。そこで本研究では、地域スケールでの実践的応用における精度向上の基礎として、青森県における航空機ハイパースペクトル観測での結果を基に、リモートセンシングで玄米タンパクを推定するに当たっての誤差要因の種類やその特徴を明らかにするための検討を行った。

## 2 試験方法

### 2.1 航空機センサによる分光画像の取得

分光画像は、2006年～2008年の3か年にわたって、航空機搭載センサ CASI-3 (Itres Research Ltd.) を中日本航空 C208 に搭載し、青森県津軽中央地域（平川市および黒石市）の 100～130km<sup>2</sup> を対象として取得した（図 3-1 a～c）。各年次とも出穂後 20 日前後から近隣空港に航空機を待機させて観測態勢に入り、雲の少ない良好な天候の日を待って観測を行った。

本研究で用いた図 3-1 a~c の分光画像が取得できた観測日は、2006 年が 9 月 9 日（稲の生育ステージは平川市の調査地点の平均で出穂後 31 日）、2007 年が 8 月 25 日（同出穂後 23 日）、2008 年が 9 月 10 日（同出穂後 37 日）である。なお、本地域では出穂期から成熟期までには、平年で 45 日程度を要する。2006 年の観測時の雲量は 2 で、コース間で重複した画像のうち雲の少ない部分を接合して全体の画像としたが、画像中心部に雲および雲影がやや残った。2007 年および 2008 年は、観測時に雲や薄雲は全くみられず、快晴条件での観測となった。観測は 9~10 コースに分けて、南北方向で実施した。本センサは観測バンド数最大 288、最小波長幅時平均バンド幅 2.2nm、平均 SNR 480 : 1、ダイナミックレンジ 14bit で、バンド数およびバンド幅は可変である。本観測におけるセンサの波長は、2006 年 ; 410 ~ 1070nm、2007 年 ; 410 ~ 1071nm、2008 年 ; 409 ~ 1055nm の範囲で、いずれの年次も波長間隔約 20nm、半値幅約 20nm の 34 バンドの設定でデータを取得し、年次により中心波長に若干の違いがみられたことから、20nm 間隔でリサンプリングを行った。観測高度は約 3000m、地上解像度約 1.5m であった。観測画角は 38°、コース間重複約 45%とし、ほぼ直下（±10°）の画像範囲から地上調査地点の分光反射率を抽出した。なお、センサでの観測データはあらかじめ測定しておいた輝度変換テーブルに基づいて分光放射輝度値に変換した。さらに、大気中での散乱・吸収の影響を取り除くため、分光放射輝度値を大気補正し、分光反射率に変換した。大気補正の方法は、2006 年は航空機データ用の大気補正ツール ATCOR4 (Guanter *et al.* 2006) を使用し、補正条件は地形モデル Flat、大気条件 Rural、飛行高度 3000m、ヘイズ補正なしであった。2007 年および 2008 年は、2007 年に分光測定器 (FieldSpec HandHeld, ASD) を用いてアスファルトや砂地など分光反射率の低い地物~高い地物について地上で分光反射率を測定し、これと各年次に航空機で観測された同一地物の分光放射輝度値との関係から、年次および波長別に回帰式を作成して分光画像全体を変換した。画像の位置を既存の地図と合致させるための幾何補正については、航空機位置姿勢情報と地形標高モデルを使用して行った。

## 2.2 地上調査

調査地域は、平川市の一般水田（以下、平川市と呼ぶ）と同市に隣接した黒石市の青森県産業技術センターの水田（以下、試験場と呼ぶ）を対象とした。図 3-1 a~c に、平川市を青の囲み（水田以外の地物を含め約 6000ha）、試験場を赤の囲み（同約 89ha）で示した。

用いた調査地点は、分光画像に雲や雲影がみられた地点、観測時の稲に倒伏や生育ムラがみられた地点を除き、2006年、2007年、2008年の順に、平川市ではそれぞれ32、48、32地点（図3-1 a～cに青丸で地点位置を示した）、試験場ではそれぞれ20、35、40地点である。調査位置の同定には、リアルタイムキネマテックGPS（NetSurv2000）と圃場枠からの実測距離を併用した。品種は「つがるロマン」である。なお、本地域の栽培品種は、「つがるロマン」が大部分である。

調査方法に関して、稲の生育調査は、株の最長稈を対象に、葉色値は止葉の葉色を葉緑素計（SPAD-502、コノカミノルタセンシング）で測定し、稈長と穂長は長さを計測した。なお、葉色値は個葉の葉面積当たり葉緑素含量の指標値である。穂数は株当たりの穂数を調査し、これに栽植密度をかけて $m^2$ 当たり穂数とした。また、これらから生育量（稈長 $\times m^2$ 当たり穂数）を算出した。地点当たりの調査数は20～30株とした。栽植密度は実測で求め、田面水の有無は目視で判定した。土壌の色は、黒色程度に応じて茶～黒の範囲を5段階に色分けした自作の土色帳を基に土壌表面の色を現場で分類した。玄米タンパクは、収穫時に調査位置の稲 $3.3 m^2$ を刈り取りし、得られた玄米をケルダール法で分析したのち、窒素含有率に5.95の係数を乗じて求めた。

調査時期は、玄米タンパクは収穫時、生育ステージは各ステージ該当期とし、これら以外の葉色値などの項目は分光画像の取得と同期して調査を行った。

## 2.3 解析方法

リモートセンシングによる玄米タンパクの推定は、観測時に取得された稲の状況を基にした間接的な推定である。すなわち、観測時の対象が玄米ではなく稲体であること、観測時期が玄米タンパクの決定前であることから明らかなように、玄米タンパクを直接的に測定しているのではない。そのため、分光画像からの玄米タンパクの推定に当たっては、①観測時の稲の生育と収穫時の玄米タンパクとの関係、②観測時の稲の生育と反射スペクトルとの関係、③収穫時の玄米タンパクと反射スペクトルとの関係をそれぞれ分析する必要がある。また、間接的な推定であるが故、誤差の入り込む余地も大きく、安定した精度を確保するためには、これらの各関係における誤差の種類や影響の程度を把握し、これを軽減する必要がある。そこで、上記①～③における関係性の成り立ちを、土壌条件や栽培管理の変動が大きい実際の生産現場である平川市のデータを用いて検証するとともに、その

特徴を検討した。また、これらに基づき、誤差要因とその軽減方法についての考察を行った。

解析に当たっては、単独でのそれぞれの波長（以下、単バンドと呼ぶ）における特徴および可視波長域（以下、可視と呼ぶ）と近赤外波長域（以下、近赤外と呼ぶ）の2波長の組み合わせによる傾向を検討した。2波長の組み合わせの手法については、井上ら（2008）による正規化分光反射指数（Normalized Difference Spectral Index；NDSI）を用いた。

$$\text{NDSI}[R_i, R_j] = (R_j - R_i) / (R_j + R_i) \quad (3-1)$$

ここで、 $R_i$  と  $R_j$  はそれぞれ波長  $i\text{nm}$ ,  $j\text{nm}$  の反射率である。したがって、 $i=650\text{nm}$ ,  $j=830\text{nm}$  の場合は Landsat TM の測定波長帯に対応した NDVI（Normalized Difference Vegetation Index；正規化植生指数，以下 NDVI と呼ぶ）に相当する。本研究では、ハイパースペクトルデータの可視の波長を  $i$ ，近赤外の波長を  $j$  とし、それぞれの波長の組み合わせによる推定力（決定係数  $r^2$ ）のマップ（以下、NDSI マップと呼ぶ）を作成し、NDVI と推定力の比較を行った。

なお、玄米タンパクに対する推定精度の評価については、one-leave-out のクロスバリデーション（cross-validation）による  $\text{RMSE}_{\text{val}}$  で比較を行った。この手法は、ある1地点を順番に未知データとし、残り地点のデータから得られた回帰式でこれに対する予測を繰り返すもので、各地点で得られた予測値と実際の実測値との比較から精度を評価するものである。なお、前述の推定力が全地点の実測値から得られた決定係数を対象としているのに対し、こちらは未知データを予測した予測値の決定係数を対象としていることから予測力とした。クロスバリデーションはデータセットが比較的限られている場合でも、予測式の頑健性を確保する上で有力な手法である。

$$\text{RMSE}_{\text{val}} = \sqrt{\frac{\sum (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (3-2)$$

$\hat{y}$ ； $i$  番目の地点を除いて計算した回帰式による予測値





図 3-1 (a) 取得された分光画像(2006 年)

観測日および観測条件

2006 年 9 月 9 日(出穂後 31 日) , 晴れ (雲量 2)

青の囲み ; 平川市, 赤の囲み ; 試験場





図 3-1 (b) 取得された分光画像 (2007 年)

観測日および観測条件

2007 年 8 月 25 日(出穂後 23 日), 快晴 (雲量 0)

青の囲み ; 平川市, 赤の囲み ; 試験場





図 3-1(c) 取得された分光画像 (2008 年)

観測日および観測条件

2008 年 9 月 10 日(出穂後 37 日), 快晴 (雲量 0)

青の囲み; 平川市, 赤の囲み; 試験場

### 3 結果および考察

#### 3.1 観測時の稲の生育と収穫時の玄米タンパク質との関係

分光画像観測時の稲の生育と収穫時の玄米タンパクとの関係を、表 3-1 に示した。観測時の葉色値は、各年次とも、玄米タンパクと安定して高い相関が認められた。葉色値は、葉面積当たり窒素含有量と密接な関係を持ち（稲田 1965）、葉身の乾物当たり窒素含有率とも関係性が高いことから（中鉢ら 1986）、稲の窒素栄養状態の診断に広く活用されている（真鍋ら 1983、斉藤ら 1991、葉上ら 2007）。

稈長、穂長、穂数、生育量についても、玄米タンパクと有意な正の相関が多くみられるが、年次によっては、相関が大幅に低下する場合がみられた。稈長、穂長、穂数、生育量並びに玄米タンパクは、いずれも稲体の窒素栄養条件で左右されるが、稈長、穂長、穂数、生育量の量的形質は生育中期までの条件の影響が大きいのに対し、玄米タンパクは出穂前 10 日以降の生育後半の条件が強く関係する（古土井・大竹 1991、宮田・伊藤 1991）。よって、生育中期の窒素栄養条件の傾向が生育後半も同様に継続した場合には両者に間接的な関係が生じるが、生育量の小さい稲に過分の追肥を行った場合や追肥時期が遅くなった場合など、稲の量的形質と生育後半の窒素含有率の傾向がアンバランスとなる場合には関係性が低下してしまうと考えられる。

以上、玄米タンパクに対して、観測時における稲の外観形質の中では、葉色値との相関が安定して高かった。よって、登熟期の葉色から、間接的に玄米タンパクが推定可能と考えられる。なお、登熟期の葉色値を指標とする玄米タンパクの推定に関しては、本データ以外でも、既に多くの報告がある（稲津ら 1991、横田ら 1995、森ら 2010）。

表 3-1 観測時の稲の生育と玄米タンパク質含有率の関係 (r)

項目	平川市		
	2006 (n=32)	2007 (n=48)	2008 (n=32)
葉色値	0.55 **	0.76 ***	0.64 ***
稈長	0.32 n.s.	0.16 n.s.	—
穂長	0.27 n.s.	0.49 ***	—
穂数(本/株)	-0.21 n.s.	0.28 n.s.	—
穂数(本/m <sup>2</sup> )	-0.19 n.s.	0.54 ***	—
生育量	-0.04 n.s.	0.47 ***	—
項目	試験場		
	2006 (n=20)	2007 (n=35)	2008 (n=40)
葉色値	0.80 ***	0.86 ***	0.68 ***
稈長	0.58 **	0.61 ***	0.58 ***
穂長	0.42 n.s.	0.75 ***	0.61 ***
穂数(本/株)	0.36 n.s.	0.14 n.s.	0.47 **
穂数(本/m <sup>2</sup> )	0.37 n.s.	0.40 *	0.60 ***
生育量	0.48 *	0.50 **	0.66 ***

\*\*\* : 0.1%水準, \*\* : 1%水準, \* : 5%水準でそれぞれ有意,  
n. s. : 有意ではない。 生育量 : 稈長×m<sup>2</sup> 当たり穂数。

### 3.2 観測時の稲の生育と反射スペクトルとの関係

図 3-2 に本研究で得られた反射スペクトルを示した。反射率は各年次とも可視で 3~10% であるのに対し、近赤外では 30~40% と極めて高かった。稲をはじめ植物の反射スペクトルは、近赤外で極めて高い反射を示すことが知られており、画像からの二値化処理による植被率の算出等、植物と植物以外の地物との判別に、近赤外での反射率の違いが利用されている（日本リモートセンシング学会 2011, 農業環境技術研究所 2011）。

なお、本解析では、3 年間のうちで観測時期が最も早い 2007 年の平川市データ（出穂後 23 日）を用いた。観測時期との関係では、安積・志賀（2003a）は観測日から成熟期までの

日数が長いほど NDVI と米粒タンパクとの相関が低下することを報告している。よって、2007 年は観測日から成熟期までの期間が長く、玄米タンパク推定にはより厳しい条件であり、誤差要因の特徴が現れやすいと考えられる。

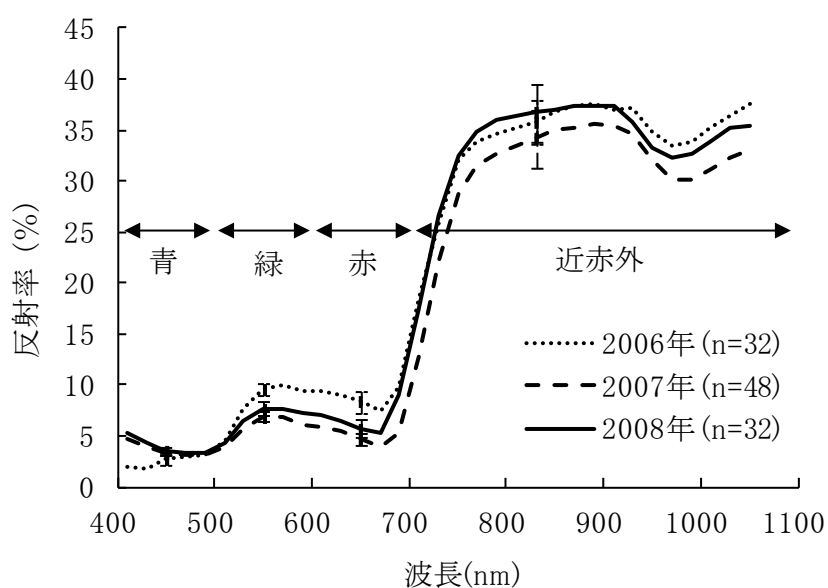


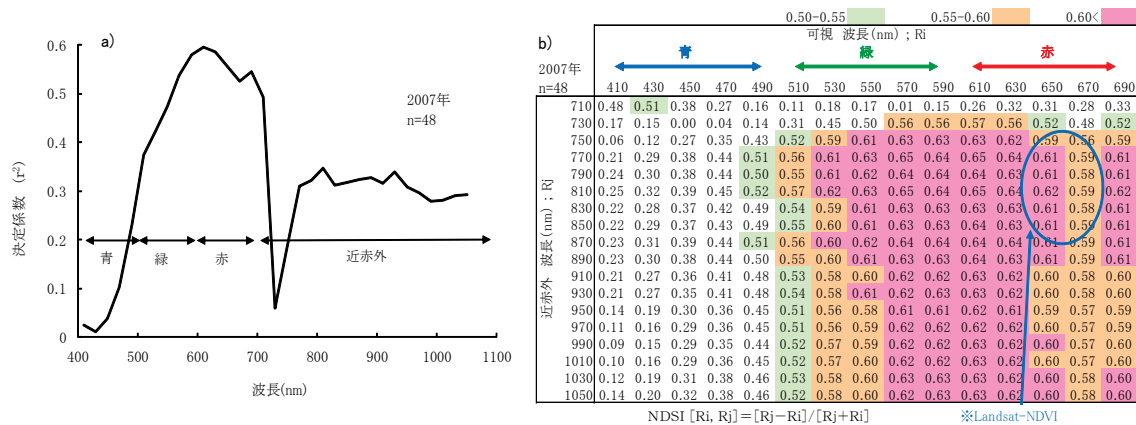
図 3-2 航空機観測で得られた反射スペクトル (平川市)

図中の縦棒は各年次における 450,550,650,830nm での地点間の標準偏差を示す。

### 1) 葉色値と反射スペクトルの関係

稲体の色の指標として、止葉の葉色値と反射スペクトルとの関係を調査した。図 3-3a) に、単バンドでの決定係数の推移を示した。決定係数は、可視の緑～赤にかけて高く、最大で 0.60 程度であった。近赤外については、これらに比べ決定係数が低く、最大でも 0.3 程度であった。図 3-3b) に、NDSI マップを示した。NDVI を含む、可視の緑～赤と近赤外との広範な波長の組合せで推定力が高く、最大で約 0.65 であった。

生葉での吸収スペクトル特性は、植物の種類に関わらずほぼ等しく、葉緑素による極大吸収波長が 670nm 付近であり、750nm 以上の長い波長域は葉内色素に影響されない安定した極小吸収域であることが知られている（稲田 1963）。本研究で用いた葉緑素計もこの原理を応用した機器であり、ピーク波長が 650nm 付近と 940nm 付近の両波長による透過光を測定し、これらの比から葉色値を算出する。また、地上で測定した稲の群落での反射スペクトルについては、芝山・秋山（1986）は 560nm または 680nm と近赤外の比が単位土地面積当たりの葉緑素含有量と、稲田（1985）は 530nm～630nm の範囲と近赤外の比が単位葉面積当たりの葉緑素含有量との間に高い相関を認めている。また、Inoue *et al.*（1998）は出穂後の稲では 550nm と 830nm の比が葉身の乾物当たり窒素含有率と高い相関をもつことを報告している。本研究は、航空機で上空から取得された反射スペクトルであるが、図 3-3b) の葉色値に対する NDSI マップの結果でも、緑～赤（およそ 530nm～650nm）の範囲と近赤外（830nm）との組合せで推定力が高く、地上で測定された反射スペクトルの報告と波長域が一致する。よって、分光画像の反射率データは、単位土地面積当たり葉緑素含有量や乾物当たり窒素含有率の情報も反映されていると考えられる。



a) 単バンドでの決定係数 ( $r^2$ ) の推移

b) 2 波長の組合せによる推定力 ( $r^2$ ) の分布 (NDSI マップ)

図 3-3 葉色値と反射スペクトルの関係 (平川市)

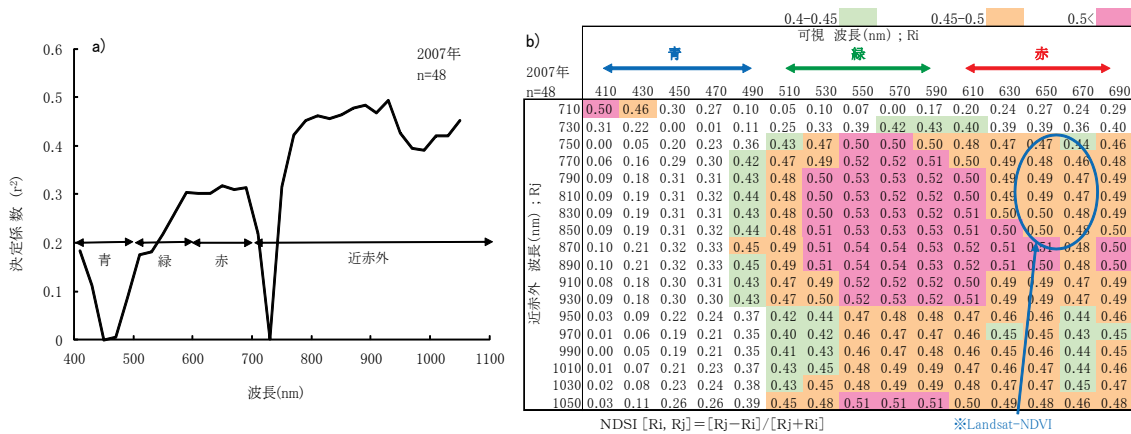


## 2) 生育量と反射スペクトルの関係

稲体の大きさの指標として、生育量と反射スペクトルとの関係を調査した。図 3-4a) は、単バンドでの決定係数であるが、葉色値の場合とは逆に、近赤外で高く、可視でやや低い傾向があった。近赤外が可視より生育量との決定係数が高いのは、 $m^2$  当たり穂数と稈長の積として算出した稲の生育量が単位土地面積当たりバイオマス量を反映しているためと考えられる。また、葉色値は登熟期間中の生育ステージの違いによる変動が大きいのに対し、生育量はこの間ほぼ一定であり、このことから葉緑素の影響の小さい近赤外では、可視よりも決定係数が高くなりやすいと考えられる。図 3-4b) に、NDSI マップを示した。葉色値の場合と同様に、NDVI を含む、可視の緑～赤と近赤外との波長の組合せで推定力が高かったが、近赤外の 970nm 前後にやや低下する部分があった。また、推定力の最大は約 0.54 と葉色値の場合よりやや低かった。なお、図 3-4a) および b) でみられる 970nm 前後での決定係数または推定力の低下は、この付近が水分の吸収帯に該当し、生育量が多い稲ほど水分含有率がまだ高く波長吸収の影響を受けやすいことから、稲の水分含有率の影響で生育量との関係が不明瞭となった可能性が考えられる。

反射スペクトルとの関係の強さを生育量 (図 3-4a,b) と前述の葉色値 (図 3-3a,b) で比較した場合、単バンドおよび NDSI マップの決定係数または推定力の最大値はいずれも葉色値が高かった。そのため、登熟期の分光画像の反射スペクトルには、稲体の大きさの情報よりも、稲体の窒素含有率と深く関係する葉緑素含量の情報が強く反映されていると考えられた。





a) 単バンドでの決定係数 ( $r^2$ ) の推移

b) 2 波長の組合せによる推定力 ( $r^2$ ) の分布 (NDSI マップ)

図 3-4 生育量(稈長×穂数)と反射スペクトルの関係 (平川市)

### 3.3 収穫時の玄米タンパク質と反射スペクトルとの関係

玄米タンパクと各波長の反射率との関係について、2006 年から 2008 年までの結果を図 3-5a) に実線で示した。決定係数は、いずれの年次も、可視では緑の波長が高く、最大で 0.4 から 0.5 程度であった。近赤外については、これに比べ決定係数が低く最大で 0.25 から 0.4 程度であった。図 3-5b) に、NDSI マップを示した。波長間での推定力の変動は、可視で大きく、近赤外では小さい傾向がある。また、推定力の高さは、いずれの年次も、緑と近赤外との波長の組合せで高く、NDVI を含む赤と近赤外との組合せでは低かった。NDVI と近赤外の波長を共通とした緑による NDSI [550,830] を比べた場合、NDVI の推定力は 0.15 ポイント前後低かった。これらの傾向は、前述した葉色値 (図 3-3b) や生育量 (図 3-4b) の NDSI マップのいずれとも様相が異なっている。

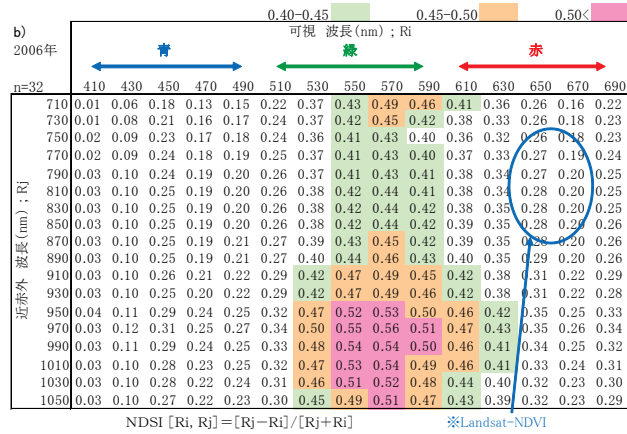
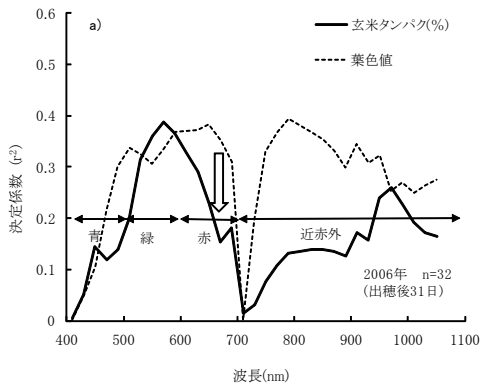
安積・志賀 (2003a) が北海道で行った SPOT 衛星による観測では、登熟期の稲の反射スペクトルと白米のタンパク質含有率との間に、バンド 1 (500nm~590nm ; 緑) , バンド 2 (610~680nm ; 赤) , バンド 3 (780nm~890nm ; 近赤外) で有意な相関が認められ、相関の高さは赤の波長が最も高く、次いで緑、近赤外の順に高い傾向であった。これに対し、本報告での相関の高さは図 3-5a) のとおり緑の波長が最も高く、次いで赤、近赤外の順で

あり、赤と緑の波長での傾向が逆転している。また、安積・志賀（2003a）は、赤と近赤外の波長による NDVI は、単バンドで得られる相関よりもさらに高い傾向となることを報告しており、本研究でも、図 3-5b) のとおり、NDSI による可視と近赤外の波長の組合せは、単バンドでの決定係数をいずれも上回る。しかし、推定力の高い波長域は、550nm を中心とした緑の波長と近赤外の組合せであり、赤と近赤外の組合せである NDVI については推定力が明らかに劣っている。

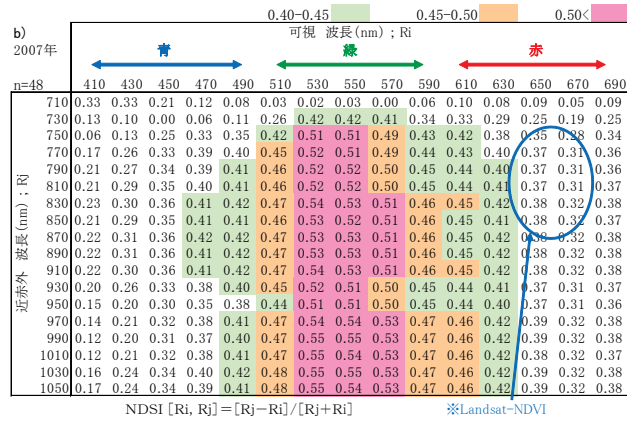
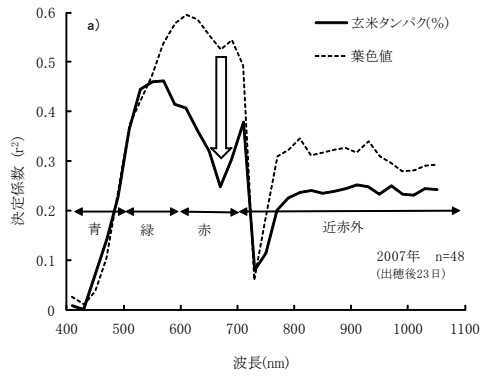
図 3-5a) に、観測時における葉色値の決定係数を破線で重ねて示した。玄米タンパクの決定係数は、葉色値に比べ、可視の赤と近赤外での低下が明らかである。赤の波長域では下向きの矢印で示した 670nm 付近を中心に決定係数の低下がみられ、観測時期の早かった 2007 年(出穂後 23 日)では特に顕著である。これが NDSI マップで比較した葉色値(図 3-3b)と玄米タンパク(図 3-5b)の傾向の違いにつながっていると考えられる。

以上、反射スペクトルには、葉色(葉緑素量)の状況を通じて、稲体の窒素含有率が反映されており、これにより間接的に玄米タンパク質含有率の推定が可能であると考えられる。ただし、反射スペクトルのうち、赤の波長やこれを利用した NDVI については、観測時の稲の状況である葉色値および生育量を推定した場合と収穫時の玄米タンパクを推定した場合には傾向が一致せず、安積・志賀(2003a)による米のタンパク推定に関する報告とも傾向が異なる部分が見られた。そのため、玄米タンパクの推定に有用な稲体の窒素含有率による影響以外にも、これを攪乱させる他の要因の影響が示唆された。そこで、次項ではこの要因解明について述べる。

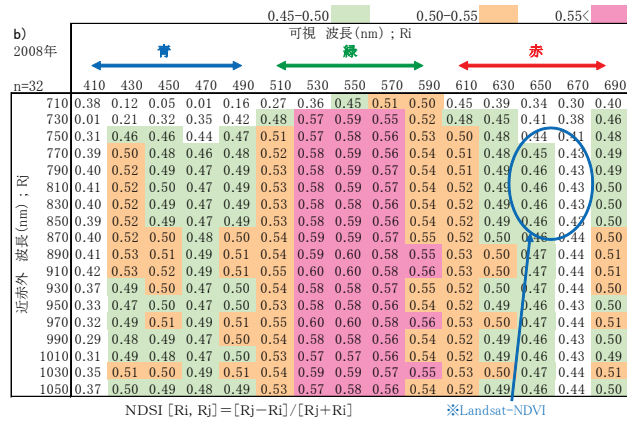
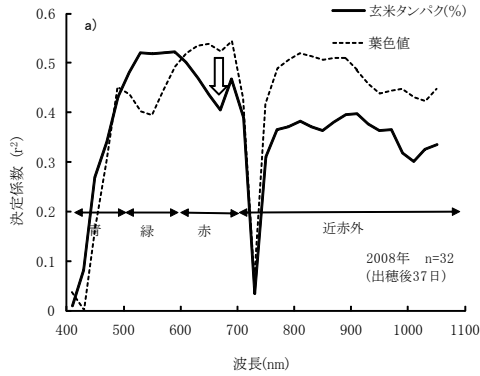
1) 2006年



2) 2007年



3) 2008年



a) 単バンドでの決定係数 ( $r^2$ ) の推移

b) 2 波長の組合せによる推定力 ( $r^2$ ) の分布 (NDSI マップ)

図 3-5 玄米タンパクと反射スペクトルの関係 (平川市)

### 3.4 玄米タンパク質の推定に影響を与える要因の解明

一般に、衛星や航空機によるリモートセンシングでは、広域を一斉観測するため、観測範囲には生育ステージの異なる圃場が含まれ、そのバラツキが推定誤差の原因となることが多い。そこで、出穂期および成熟期の変異に着目して、推定精度への影響を分析した。また、上空から水田を観測するため、稲の繁茂程度によっては群落下の地表面が同時に測定され反射スペクトルに影響する可能性がある。そこで、この影響を確認するため、田面水の有無や土壌の色、栽植密度の圃場条件も検討要因に加えた。また、玄米タンパクと密接な関係が認められる葉色値についても比較検討した。

図 3-6 は、生育ステージや圃場条件と反射スペクトルとの関係である。決定係数 ( $r^2$ ) の変動が近赤外の波長間では小さいことから、近赤外を NDVI と同様に 830nm で固定し、可視の波長をそれぞれ組み合わせて比較した。なお、同じデータセットについて、玄米タンパクとその他の地上調査項目との関係を右側に示した。この両者のデータを併せて検討し、玄米タンパク推定に対する誤差要因を判別した。

葉色値と NDSI [Ri,R830] との決定係数は、いずれの年次も、赤および緑の波長で高かった。葉色値については、玄米タンパクとの決定係数がいずれの年次でも高く、反射スペクトルからの玄米タンパクの推定には葉色の情報が大きく寄与していることが示唆される。なお、観測日が出穂後 37 日と遅かった 2008 年については、他の年次に比べ可視の波長間での決定係数の差は小さかった。

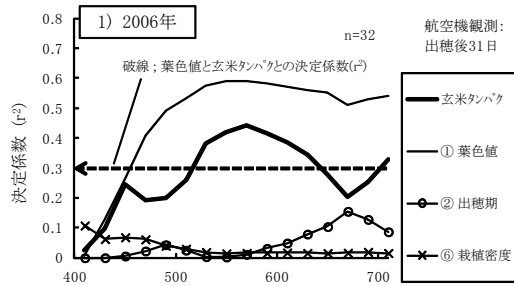
出穂期と NDSI [Ri,R830] との決定係数は、観測日が遅かった 2008 年を除き、赤の波長で特異的に高く、赤の波長は出穂期の影響を強く受けていることが示唆された。一方、出穂期と玄米タンパクとの関係については、各年次とも統計的に有意な関係は認められない。よって、出穂期の違いは、玄米タンパクにはほとんど影響しないが、赤の波長の反射率に大きな影響を与えることから、玄米タンパクの推定精度を低下させる要因と考えられた。

成熟期と NDSI [Ri,R830] との決定係数は、葉色値などの他の項目に比べても高い傾向があった。特に赤の波長で高く、450nm~500nm の青の波長でもやや高いピークがみられ、緑の波長ではこれらに比べ低い傾向がみられた。観測日が遅く成熟期に近い 2008 年で傾向がより顕著であるが、観測の早い 2007 年でも傾向は概ね一致する。なお、成熟期と玄米タンパクとの関係については、窒素追肥等で籾数が増加し登熟に要する期間が長期化する（中川・堀江 1989）ことから、有意な関係が認められる。以上、可視の波長間で比較した場合、

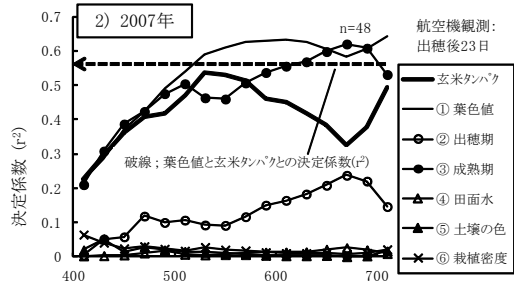
出穂期や成熟期など生育ステージの違いが反射スペクトルに及ぼす影響は、赤の波長で大きく、緑の波長で小さい特徴が認められた。

玄米タンパクの推定に影響する可能性のあるその他の因子としては、田面水の有無や土壌の色、栽植密度の変異が考えられる。観測時の田面水の有無については、落水・湛水の圃場が混在した2007年の観測データにおいても、NDSI [Ri,R830] との間に明瞭な関係は認められなかった。また、調査地域には腐植含有率の少ない灰色低地土から腐植を多く含む黒ボク土まで分布しており、土壌の色についてもかなりの変異幅がある。しかし、NDSI [Ri,R830] への影響は明確でなかった。栽植密度については、玄米タンパクと年次によっては有意な関係がみられるものの、NDSI [Ri,R830] との決定係数はかなり低い。これら稲以外の要因でいずれもNDSI [Ri,R830] との決定係数が低いのは、登熟期では稲の植被率が高く地表面の大部分が稲で覆われている（関口・佐々木 2004）ためと考えられる。以上のことから、反射スペクトルへの影響はごく小さく、これらはほとんど誤差要因となっていないものと判断された。

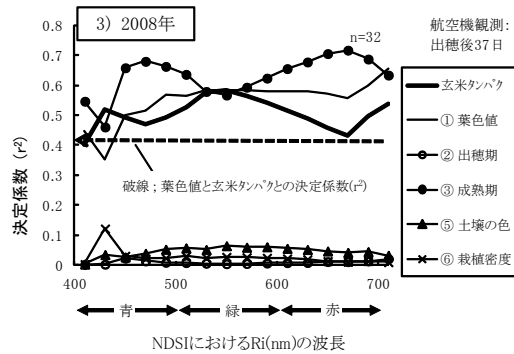
分光画像の観測と同期して地上で測定した葉色値と玄米タンパクとの決定係数を破線で示した。これと NDSI [Ri,R830] における玄米タンパクとの決定係数を比較した場合、NDSI [Ri,R830] では観測時期が遅い年ほど相対的に決定係数が高まる傾向がみられた。波長ごとにみた場合、赤の波長での決定係数は、観測が遅い 2008 年の場合はほぼ葉色値と同程度であったが、観測が早かった 2007 年ではこれを大幅に下回った。一方、緑の波長では、2006 年と 2008 年は決定係数が葉色値よりも高く、観測が早い 2007 年の場合でも葉色値とほぼ同程度であった。以上の比較は、年次間差を含んだデータに基づいたものではあるが、出穂後 23 日以降の観測であれば、緑の波長を利用することで、地上で測定された葉緑素計による玄米タンパクの推定と同程度以上の精度が期待できると推察された。葉色値が個葉で判定されるのに対し、リモートセンシングでは群落における葉緑素含量に基づいた判定となることから、群落の窒素含有率がより適切に評価され、玄米タンパクをさらに高い精度で推定できる可能性がある。



項目	データの取得時期	データの統計			玄米タンパクとの決定係数( $r^2$ )
		平均	最大-最小	標準偏差	
玄米タンパク(%)	収穫時	6.8	2.0	0.5	-
① 葉色値	観測時	23.9	12.7	3.0	0.30 ***
② 出穂期(暦日)	該当時期	8月9日	8	1.6	0.04 n.s.
③ 成熟期(暦日)	-	-	-	-	-
④ 田面水の有無	-	-	-	-	-
⑤ 土壌の色	-	-	-	-	-
⑥ 栽植密度(株/3.3㎡)	観測時	71.0	27.4	6.7	0.02 n.s.



項目	データの取得時期	データの統計			玄米タンパクとの決定係数( $r^2$ )
		平均	最大-最小	標準偏差	
玄米タンパク(%)	収穫時	7.2	2.9	0.6	-
① 葉色値	観測時	32.7	19.7	3.7	0.58 ***
② 出穂期(暦日)	該当時期	8月2日	6	1.4	0.00 n.s.
③ 成熟期(暦日)	該当時期	9月12日	18	4.5	0.13 *
④ 田面水の有無	観測時	0.3	1.0	0.4	0.00 n.s.
⑤ 土壌の色	観測時	2.6	4.0	0.7	0.04 n.s.
⑥ 栽植密度(株/3.3㎡)	観測時	69.4	30.7	7.4	0.11 *



項目	データの取得時期	データの統計			玄米タンパクとの決定係数( $r^2$ )
		平均	最大-最小	標準偏差	
玄米タンパク(%)	収穫時	7.1	1.7	0.4	-
① 葉色値	観測時	25.5	14.6	3.5	0.41 ***
② 出穂期(暦日)	該当時期	8月4日	6	1.5	0.00 n.s.
③ 成熟期(暦日)	該当時期	9月23日	16	3.4	0.20 *
④ 田面水の有無	観測時	0	0	0	-
⑤ 土壌の色	観測時	3.4	3.0	0.8	0.03 n.s.
⑥ 栽植密度(株/3.3㎡)	観測時	68.9	24.1	6.9	0.08 n.s.

図3-6 生育ステージおよび圃場条件と NDSI [Ri, R830] の関係 (平川市)

出穂期・成熟期；暦日を使用。 田面水の有無；落水：0，湛水：1として2段階に数値化。土壌の色；茶：1→こげ茶：3→黒：5として5段階に数値化。 ” - ” ；調査データなし。\*\*\*；0.1%水準，\*\*；1%水準，\*；5%水準でそれぞれ有意，n.s.；有意ではない。

### 3.5 玄米タンパク質の推定に対する生育ステージの影響

一般に登熟期の葉色が濃いほど稲の窒素含有率が高く，玄米タンパク質含有率も高まることが知られている（稲津ら 1991，横田ら 1995，森ら 2010）。しかし，登熟期間中は，

稈長や穂数といった稲体の大きさに関係する生育量は一定であるが、葉色は登熟とともに大きく退色が進む。止葉の葉色値は、出穂後 15 日前後を最高に、その後、日ごとに低下していく。図 3-7 に、葉色値の推移の一例を示した。図 3-7a) は生育ステージを揃え出穂後日数でみた場合、図 3-7b) は 暦日でみた場合である。①と②は、成熟期の玄米タンパク質含有率はほぼ同じであるが、出穂期が異なる稲の葉色推移である。出穂後日数で比較した場合の葉色値は①と②がほぼ同様に推移するが、暦日で比較した場合には、出穂期の違いが大きいほど、葉色に差が生じる。リモートセンシングでは、図 3-7b) のように、特定日の情報を基に、玄米タンパク質含有率を推定することから、生育ステージに起因した誤差が生じてしまうと考えられる。図 3-8 に 2008 年の試験場での事例を示した。NDVI と玄米タンパクとの回帰式は出穂期で明らかな違いがみられ、出穂期 5 日間の違いはおよそ玄米タンパクで 1%もの差に相当している。

表 3-2 は、平川市について、暦日の生育ステージと玄米タンパク、田植日、施肥量との関係を調査した結果である。まず、生育ステージと玄米タンパクとの関係は、いずれの年次も出穂期までは有意な相関は認められないが、成熟期では有意な相関が認められる。これに田植日と施肥量との関係を併せて考えると、出穂期までのステージの変動は田植日の影響を強く受けているが、玄米タンパクとの関係性は低い。一方、成熟期のステージの変動は、2007 年では田植日と追肥量の両者の影響を受け、玄米タンパクとも有意な相関が認められている。これは、田植日による変動部分は、出穂期までと同様に玄米タンパクの変動への影響は小さいが、追肥量による変動部分が、玄米タンパクの変動に大きく影響していることが考えられる。追肥量の多い稲は、少ない稲に比べ窒素含有率の上昇程度が大きく、これが籾数を増加させ成熟までの期間を長期化させる（中川・堀江 1989）と同時に玄米タンパクの上昇につながっている（境谷ら 1998）と推察される。

以上の結果について、詳細なデータが得られた 2007 年を例として、栽培管理に起因した生育ステージの違いが玄米タンパクの推定に及ぼす影響を図 3-9 に整理した。A 部分は施肥管理等が原因で出穂期以降に生じる生育ステージ差、B 部分は田植時期等が原因で生じる出穂期以前からの生育ステージ差である。A 部分は施肥管理等の違いにより窒素量の多い稲ほど、生育ステージが遅れ、玄米タンパクも高まる傾向があることから、玄米タンパクとは間接的な関係がある。B 部分は田植時期の違いを原因とした純粋な生育ステージのシフトであり、稲体の窒素含有率の変動を伴わないことから玄米タンパクとの関係性は低い。

このように出穂期以降の稲は、玄米タンパクと関係するステージ差（A）と関係しないステージ差（B）が混在し、これが玄米タンパク推定に当たっての誤差要因として状況を複雑にしている。また、出穂期に近く観測時期が早いほどB部分の影響を強く受け誤差が大きくなり、成熟期に近く観測時期が遅いほど（A）の影響が強くなることから、相対的に玄米タンパクの推定力は大きくなると考えられる。安積ら（2003b）も、精度低下の主な要因として、品種・苗の種類・地形の差による成熟期の遅れや観測時期が早すぎることを挙げている。筆者らは、成熟期の遅れを、玄米タンパクと関係するもの（A）と関係しないもの（B）に分類したが、安積ら（2003b）の述べている成熟期の遅れも（B）に該当するものであり、観測時期が早すぎることによる精度低下は（A）に対して（B）の影響が相対的に大きくなることから生じると考えられる。したがって、精度の点からは遅い観測時期が有利であるが、食味別に区分集荷することが目的の場合は、収穫前にタンパクマップの提供を行うため早い時期に観測する必要があるため、翌年の栽培指導を目的にタンパクマップを作成する場合でも、観測機会をある程度確保する関係から結果的に早めの観測となることは十分あり得る。

表 3-3 は都道府県別の田植期および出穂期の状況である。田植期間は気象条件による田植時期の制約等から北海道と東北が 10 日～15 日程度、北陸が 15 日前後と短い、関東以南では 30 日以上が多い。出穂期間についても、北海道と東北では 7 日～13 日程度、関東と北陸では 15 日～20 日程度、これより以南では 20 日以上となっている県が多い。この出穂期間は、品種や面積の違いによる差を含んだデータではあるが、一般的に暖地では寒冷地に比べて田植期間の違いから出穂期間が長期化している傾向がみてとれる。そのため、暖地では、玄米タンパクを推定するに当たり、生育ステージによる誤差が寒冷地に比べ拡大しやすいことが考えられる。



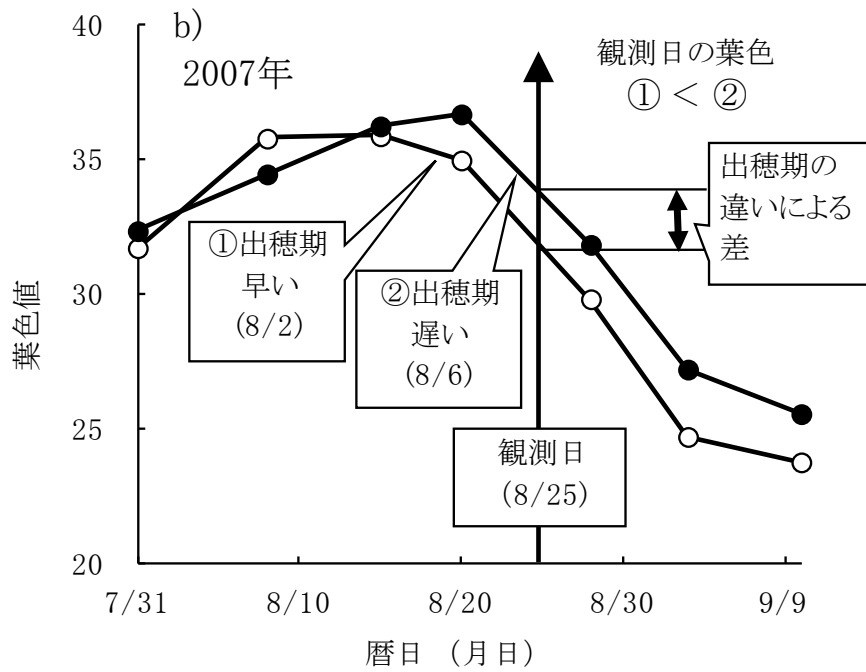
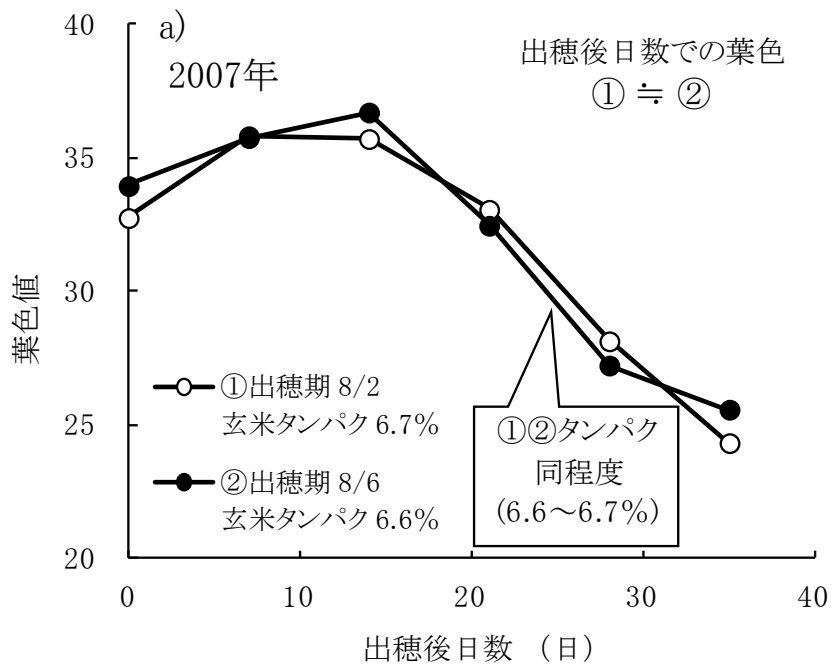


図 3-7 葉色値の推移 (試験場)

出穂期が異なる地点の一例。

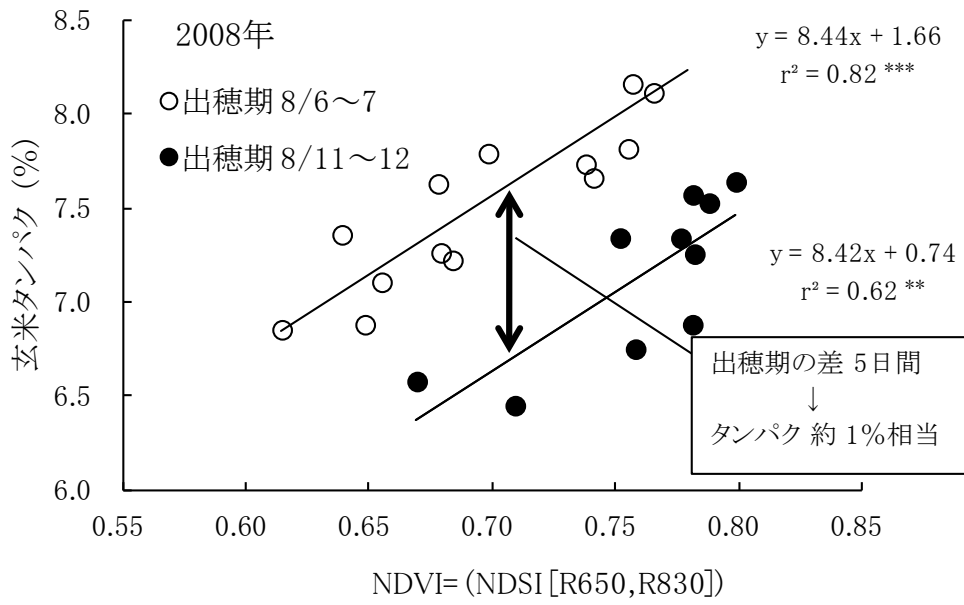


図 3-8 出穂期の差による回帰式の違い (試験場)

\*\*\* : 0.1%水準, \*\* : 1%水準, \* : 5%水準でそれぞれ有意,  
n. s. : 有意ではない。

表 3-2 生育ステージと玄米タンパクの相関(r) (平川市)

年次	生育ステージ (幅:遅-早)	玄米タンパク (%)	田植日 (暦日)	施肥量(Nkg/10a)	
				基肥	追肥
2006 (n=32)	田植日 (12日間)	0.06 n.s.	—	-0.21 n.s.	-0.16 n.s.
	幼穂形成期 (—)	—	—	—	—
	出穂期 (8日間)	0.20 n.s.	0.52 **	-0.09 n.s.	-0.24 n.s.
	成熟期 (—)	—	—	—	—
2007 (n=48)	田植日 (13日間)	0.03 n.s.	—	0.16 n.s.	0.19 n.s.
	幼穂形成期 (7日間)	0.12 n.s.	0.43 **	0.04 n.s.	0.16 n.s.
	出穂期 (6日間)	0.06 n.s.	0.41 **	0.09 n.s.	0.12 n.s.
	成熟期 (18日間)	0.36 *	0.34 *	0.10 n.s.	0.36 *
2008 (n=32)	田植日 (8日間)	0.01 n.s.	—	—	—
	幼穂形成期 (—)	—	—	—	—
	出穂期 (6日間)	0.04 n.s.	0.38 *	—	—
	成熟期 (16日間)	0.45 *	0.13 n.s.	—	—

“—”は調査データなし。2006年の施肥は、基肥+追肥(幼穂形成期～減数分裂期)：27地点、基肥のみ(肥効調節型肥料)：3地点、無窒素(大豆跡地)2地点。2007年の施肥は、基肥+追肥(幼穂形成期～減数分裂期)：41地点、基肥のみ(肥効調節型肥料)：7地点。\*\*\*；0.1%水準，\*\*；1%水準，\*；5%水準でそれぞれ有意，n. s.；有意ではない。

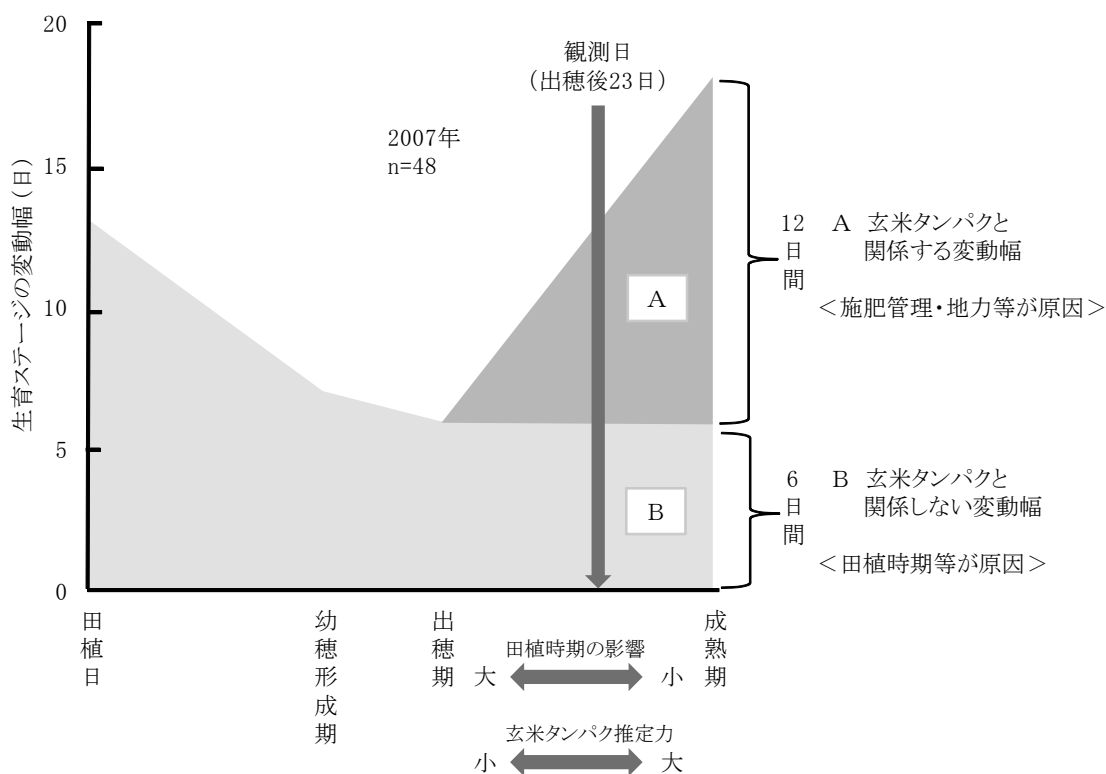


図 3-9 玄米タンパクの推定に対する生育ステージの影響の概念図 (平川市)

表 3-2 の 2007 年を事例に、玄米タンパクと生育ステージとの相関係数の有意性から、生育ステージでの変動幅を A (玄米タンパクと関係あり) または B (同関係なし) に分類した。具体的には、田植日 (13 日間)・幼穂形成期 (7 日間)・出穂期 (6 日間) ; それぞれ玄米タンパクとの相関が有意でないことから、変動幅を B に分類した。成熟期 (18 日間) ; A 部分 (12 日間) : 出穂期が同一日の地点間で成熟期の変動幅を求め、この最大値を A に分類した。B 部分 (6 日間) : 全地点での成熟期変動幅 (18 日間) から、A 部分 (12 日間) を差し引きして求めた。

表 3-3 2007 年産水稻の都道府県別田植えおよび出穂の状況

都道府県	田 植 期 ( 8/15 現 在 )						出 穂 期 ( 9/15 現 在 )					
	始 期	最 盛 期	終 期	田植期間		始 期	最 盛 期	終 期	出穂期間			
				県別	地域別				県別	地域別		
											日	日
月	日	月	日	月	日	月	日	月	日	日	日	
北海道	5. 19	5. 23	5. 29	10	10	7. 25	7. 30	8. 6	12	12		
青森	5. 14	5. 19	5. 26	12		8. 2	8. 5	8. 9	7			
岩手	5. 12	5. 17	5. 26	14		8. 4	8. 8	8. 14	10			
宮城	5. 4	5. 11	5. 19	15		8. 4	8. 8	8. 11	7		9	
秋田	5. 14	5. 18	5. 25	11	13	8. 1	8. 4	8. 8	7			
山形	5. 13	5. 17	5. 24	11		8. 5	8. 9	8. 15	10			
福島	5. 7	5. 14	5. 22	15		8. 7	8. 15	8. 20	13			
茨城	4. 28	5. 5	5. 18	21		7. 25	8. 3	8. 12	18			
栃木	4. 30	5. 7	6. 13	45		7. 31	8. 6	8. 18	18			
群馬	5. 23	6. 12	6. 25	33		8. 11	8. 21	8. 29	18			
埼玉	4. 28	5. 21	6. 24	58	32	7. 27	8. 14	8. 29	33		19	
千葉	4. 19	4. 27	5. 6	18		7. 18	7. 28	8. 5	18			
東京都	5. 28	6. 10	6. 24	27		8. 15	8. 19	8. 30	15			
神奈川県	5. 22	5. 31	6. 12	21		8. 6	8. 13	8. 21	15			
新潟	5. 4	5. 10	5. 19	15		8. 1	8. 11	8. 17	16			
富山	5. 5	5. 12	5. 17	12		7. 29	8. 11	8. 16	18			
石川	5. 1	5. 5	5. 19	18		7. 26	8. 7	8. 15	20			
福井	5. 1	5. 8	5. 18	17		7. 24	8. 4	8. 13	20			
山梨	5. 12	5. 28	6. 12	31	26	8. 7	8. 15	8. 23	16		24	
長野	5. 11	5. 20	5. 30	19		8. 5	8. 12	8. 18	13			
岐阜	5. 1	5. 26	6. 9	39		7. 25	8. 21	9. 2	39			
静岡県	4. 29	5. 23	6. 11	44		7. 26	8. 14	8. 30	35			
愛知県	4. 30	5. 20	6. 7	39		7. 27	8. 19	9. 2	37			
三重	4. 18	4. 28	5. 13	26		7. 18	7. 28	8. 7	20			
滋賀	5. 4	5. 9	5. 23	19		7. 30	8. 6	8. 20	21			
京都	5. 5	5. 21	6. 4	30		7. 31	8. 12	8. 23	23			
大阪	5. 13	6. 6	6. 20	38	32	8. 3	8. 22	8. 31	28		25	
兵庫県	5. 16	6. 1	6. 10	25		8. 3	8. 16	8. 27	24			
奈良	5. 6	6. 6	6. 13	38		8. 4	8. 25	8. 30	26			
和歌山	5. 2	6. 4	6. 17	46		7. 20	8. 8	8. 24	35			
鳥取	5. 8	5. 24	6. 6	29		7. 29	8. 11	8. 20	22			
島根	5. 2	5. 13	5. 31	29		7. 24	8. 7	8. 21	28			
岡山	5. 13	6. 4	6. 17	35	31	7. 30	8. 21	9. 2	34		28	
広島	5. 5	5. 17	5. 28	23		7. 28	8. 12	8. 23	26			
山口	5. 11	5. 30	6. 20	40		7. 30	8. 14	8. 29	30			
徳島	4. 5	4. 15	5. 4	30		7. 8	7. 17	7. 31	23			
香川	5. 1	5. 22	6. 13	43		7. 18	8. 5	8. 26	39			
愛媛	5. 3	6. 12	6. 25	53	39	7. 22	8. 22	9. 3	43		31	
高知	4. 24	6. 1	6. 16	54		7. 17	8. 14	8. 30	44			
福岡	4. 2	4. 10	4. 20	18		6. 28	7. 7	7. 18	21			
佐賀	5. 17	5. 27	6. 22	36		8. 16	8. 23	9. 3	18			
熊本	5. 13	6. 18	6. 26	44		8. 1	8. 23	9. 4	34			
大分	4. 30	6. 22	6. 30	62		7. 18	8. 24	9. 9	53			
宮崎	4. 20	6. 12	6. 26	68		7. 15	8. 23	9. 3	50			
鹿児島	4. 20	6. 13	7. 2	75		7. 10	8. 21	9. 4	56			
沖縄	5. 13	6. 11	6. 25	43	42	7. 30	8. 22	8. 30	31		31	
早期栽培	3. 21	3. 26	4. 6	16		6. 23	6. 27	7. 3	11			
普通栽培	5. 28	6. 15	6. 28	31		8. 18	8. 24	9. 2	15			
鹿兒島	3. 25	4. 2	4. 12	18		6. 24	6. 30	7. 8	15			
普通栽培	6. 12	6. 19	6. 29	17		8. 21	8. 26	9. 5	15			
沖縄	2. 15	3. 1	3. 20	36	36	5. 12	5. 22	6. 11	30	30		
第一期稲	7. 21	8. 8	...	-		...	...	...	-			
第二期稲												

田植期および出穂期の始期、最盛期、終期とは、田植えおよび出穂済みの面積割合がそれぞれ5%、50%、95%に達した期日である。田植期および出穂期の「始期」、「最盛期」および「終期」の欄の「…」は、8月15日現在または9月15日現在でそれぞれの期日に達していないためである。地域別については早期栽培および普通栽培を区別せずに項目数で平均した値。出典；田植期：農林水産省 2007a. 農林水産統計 平成 20 年産水稻の 8 月 15 日現在における作柄概況 (2007/8/31 公表)。出穂期：農林水産省 2007b. 農林水産統計 平成 20 年産水稻の 9 月 15 日現在における作柄概況 (2007/9/28 公表)。

### 3.6 生育ステージに対する赤の波長での感受性について

図 3-10 は、出穂後 19 日目～33 日目までについて葉位別に葉色値の変化を調査した結果である。上位葉から数えて、止葉（1 枚目）および 2 枚目についてはこの期間の葉色値の変化は小さいが、3 枚目および 4 枚目については変化が大きく、出穂後 33 日目では 4 枚目の葉色値がほぼ 0 で、4 枚目以降は枯葉となっている。これを真上から観察した場合、出穂後 25 日目には、籾の黄化はまだほとんど無いが緑色の上位葉の間や株間に枯れた下葉が覗き（図 3-11 a），出穂後 33 日目では籾の黄化と下葉の枯れおよび上位葉でも葉先枯れがみられるようになった（図 3-11 b）。井上ら（2008）による圃場および室内での携帯型分光センサによる報告では、籾の黄化や老化に伴う緑葉面積の低下が、登熟後半に赤の波長における反射率の顕著な上昇を招くとされており、このことから、登熟期間中の生育ステージの変化に対して、赤の波長の感度が特に高いことが裏付けられる。

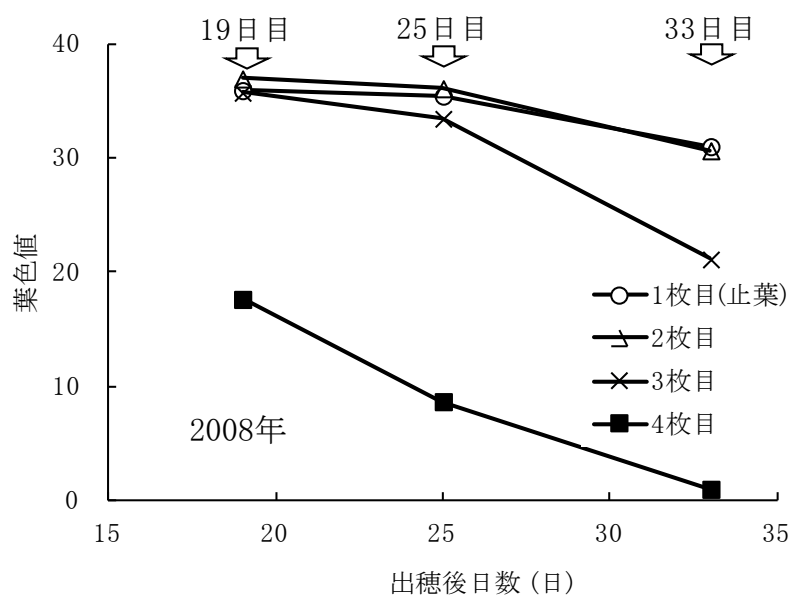


図 3-10 葉位別にみた葉色値の推移（試験場）

葉色値は、出穂期がほぼ同じ（8月6日～8月8日）15地点について、株の最長稈を20株測定した平均値。



a) 出穂後 25 日目 (2008 年 9 月 2 日撮影)



b) 出穂後 33 日目 (2008 年 9 月 10 日撮影)

図 3-11 稲を真上から観察した状況 (試験場)

### 3.7 玄米タンパク質の推定精度向上策

玄米タンパクを推定する場合の誤差要因として、生育ステージの違いが大きく影響することが明らかとなった。生育ステージのバラツキは、田植を一定時期に集中して行うことで小さくすることが可能であるが、実際の生産現場では労力や作業機械の競合等から実施は困難である。そこで、より多くの地域で安定して活用できる技術とするためには、推定式の精度向上が望まれる。手法としては、生育ステージの影響が小さい手法での評価、または生育ステージに関する情報を別途加味した上での評価手法などが考えられる。

前者については、従来の赤の波長に替え緑の波長を用いる手法がある。図 3-12 は、緑の波長による NDSI [R550,R830] と赤の波長による NDVI (=NDSI [R650,R830]) による精度を、クロスバリデーションによる予測の RMSE で評価したものである。いずれの年次でも、緑の波長は、赤の波長よりも RMSE が小さく、精度が高かった。また、観測時期との関係については、年次間差を含むデータであるため考察に留めるが、年次別の傾向を比較すると、出穂後日数での観測時期が早い年ほど RMSE は拡大する傾向があった。このことは、前述の図 3-9 のモデルや、安積ら (2003b) の報告とも状況が一致する。対象地域の調査地点の玄米タンパクの分布は、平均約 7%、標準偏差 0.4~0.6%であるが、出穂後 31 日の観測年では NDVI では RMSE が 0.4%をやや超えるが、NDSI [R550,R830] では 0.4%以内に収まっている。出穂後 23 日の観測年では、NDSI [R550,R830] でも 0.4%をやや上回ったが、出穂後 31 日の観測年の NDVI と同程度であった。そのため、これを単純に比較すると、NDSI [R550,R830] では、従来の NDVI と同程度の精度を確保したまま、観測日をさらに 8 日間前倒しできることを示している。リモートセンシングの活用では天候が制限要因となることから、観測可能適期の拡大は画像取得の確実性を高める上で重要である。なお、赤と緑の波長では、出穂期以降の生育ステージの変動に対する反応に違いがあることから、両波長の特性の違いから生育ステージの変化を抽出しこれを変数とできれば、今後、さらに誤差の少ない推定式を作出できる可能性がある。

図 3-13 に 2007 年に農家圃場を対象として作成したタンパクマップを示した。玄米タンパク含有率の推定式は、NDSI [R550,R830] または NDVI による 1 次式である。決定係数は緑の波長を使用した前者が  $r^2=0.53$  に対し、赤の波長を使用した後者は  $r^2=0.38$  と大きく劣っている。後者は前者よりも玄米タンパクが 7%以上と判断された圃場が多いが、生育ステージが遅い圃場における葉色の退色時期の遅れを、玄米タンパクが高い情報として誤って判



定し、過大に評価していると考えられる。これらの解析結果から、青森県津軽中央地域では、2008年から推定式を従来のNDVIから、緑の波長を用いたNDSI [R550,R830]に切替えて、区分集荷用の速報版タンパクマップ（収穫前に作成，地上データの反映なし）と次年度の栽培指導用のタンパクマップ（収穫後に作成，地上データの反映あり）を作成し、推定精度の向上を図ることとした。550nm前後の緑の波長と830nm前後の近赤外の波長は、ハイパースペクトルセンサだけではなく、多くの地球観測衛星に搭載されているマルチスペクトルセンサにも観測波長の一つとして含まれており、衛星および航空機の両リモートセンシングに適用可能な手法である。

なお、生育ステージを補助的な変数として用いる方法については、田植日を基にした生育予測データの利用が考えられる。ただし、圃場ごとの田植日の把握や田区データが整備されていることが前提となる。当地域でも田区データの整備を行い、農協がGISを用いてタンパクマップを活用した指導を行っているが、圃場ごとの田植日などのデータ収集や変数としてのその利用に関しては、今後の課題である。

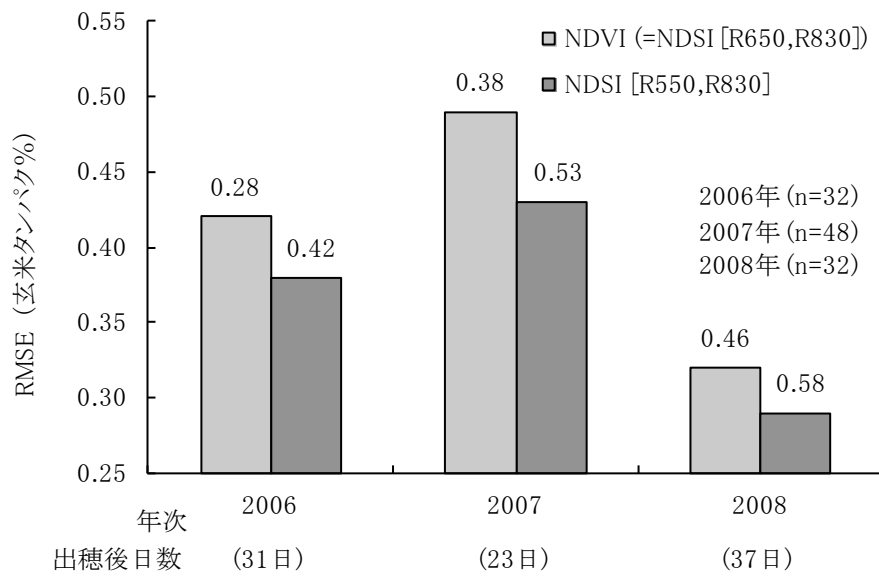


図 3-12 玄米タンパク質含有率の予測力比較 (平川市)

図中の数値は、決定係数 ( $r^2$ ) を示す。

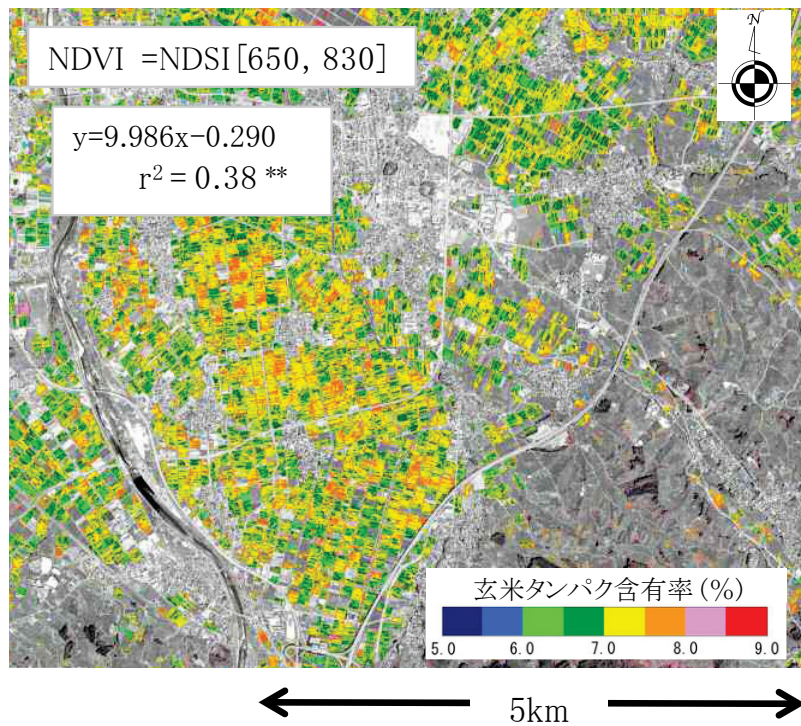
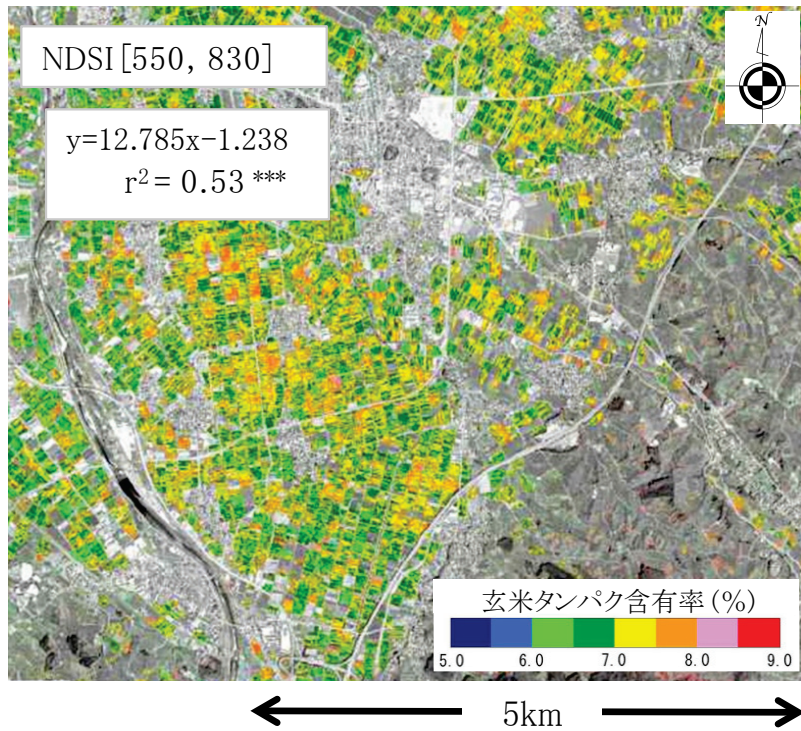


図 3-13 タンパクマップ (2007 年)

上段 : NDSI [R550, R830] で作成

下段 : NDVI = NDSI [R650, R830] で作成

## 4 まとめ

葉色値と玄米タンパクは、各年次とも安定して高い相関が認められた。また、反射スペクトルとの間には、葉色値と玄米タンパクの双方で高い相関が認められたが、その傾向には違いがみられた。単バンドでの決定係数は、葉色値では緑～赤にかけて広範な波長で高いが、玄米タンパクでは 670nm を中心に赤の波長で大きな低下がみられた。

赤の波長は、生育ステージの変動の影響を受けやすいことが明らかであった。地域における生育ステージの変動をモデル化して分析した結果、玄米タンパクの推定力の低下は、田植時期のバラツキ（玄米タンパクの変動と関係しない生育ステージの変動）が主な原因と考えられた。また、この影響は、観測時期が早いほど大きく、成熟期に近いほど小さくなると推察された。

田植時期のバラツキが大きい地域では、従来の NDVI (=NDSI[赤, 近赤外]) は推定精度が低下しやすい。これに替えて NDSI[緑, 近赤外] を用いることにより、生育ステージの変動による影響が緩和され、精度の低下を軽減できる。

## 第4章 リモートセンシングによる収穫適期の広域マップ作成手法

### 1 はじめに

近年、気象の温暖化傾向から、胴割米（米の中央部がひび割れた米）や白未熟粒（白濁した米）などによる外観品質の低下が全国的に深刻な問題となっている（農林水産省 2007）。これら高温障害の発生は、1等米比率を低下させ、農家の収益に影響を及ぼす。胴割米は西日本や北陸地域で問題になることが多かったが、北日本でも近年問題となってきた（農林水産省 2007）。青森県でも津軽中央地域で発生が多く、主要な落等原因の一つとなっている。特に、2007年と2012年は津軽中央地域での落等原因の8割以上を胴割米が占めた（東北農政局 2007, 東北農政局 2012）。胴割米は検査等級の落等以外にも、碎米の発生が多くなることで食味にも悪影響を及ぼす。胴割米の発生は、登熟初期の高温（長田ら 2004）と収穫の遅れが大きな要因であることが知られている（境谷ら 2012）。登熟初期が高温であるほど、収穫適期に達した後の早い段階で胴割米が発生しやすく、早急に収穫を行う必要がある（境谷 2012）。適期収穫は、これまでも主に茶米（褐色となった米）による外観品質の低下防止の観点から、栽培管理の主要な基本技術に位置づけられてきたが（青森県 2011）、近年は胴割米の発生防止を図るうえでも特に重要となっている。

主食用米の収穫適期は、稲の生育ステージでは成熟期に当たる。成熟期の予測は、出穂後積算気温による方法が広く知られている。これは出穂日以後、日々の平均気温の値を積算し、積算値が品種別に設定した一定の値（たとえば、青森県の主要品種「つがるロマン」の場合で  $960^{\circ}\text{C}$ （青森県 2011））に到達する日を成熟期とみなす方法である。出穂日が判明している水田に関しては、「圃場の出穂日+積算気温」から、圃場単位で成熟期を予測することができる（以下、参考法と呼ぶ）。しかし、産地の全ての圃場で出穂日を調査することは、時間的・労力的に非常に困難であり、この方法はごく少数の圃場にしか適用できない。そこで、生産現場では、生育調査地点または巡回調査によって地域平均の出穂日を求め、「地域の平均出穂日+積算気温」から、地域単位で成熟期を予測する方法が一般に行われている（青森県 2011）（以下、現行法と呼ぶ）。従って、現状における産地レベルでの成熟期の予測は、圃場ごとの詳細な状況ではなく、地域全体の平均的な状況の把握

にとどまっている。

成熟期は、田植日、施肥量、土壌条件などの違いにより、圃場ごとに大きく変異するため、現行法だけでは、圃場ごとの成熟期の違いを考慮した指導や収穫計画の立案への対応には限界がある。そこで、航空機および衛星リモートセンシングを活用し、成熟期を広域かつ圃場単位で予測する手法を検討した。

## 2 試験方法

### 2.1 航空機センサおよび高解像度光学衛星センサによる分光画像の取得

分光画像は、2007～2011年の5か年にわたり、青森県津軽中央地域（平川市およびその隣接地域）100～130km<sup>2</sup>を対象に取得した（図4-1 a～e）。2007～2008年は、航空機搭載センサ CASI-3（Itres Research Ltd.）を用いて観測を行った。航空機（セスナ C208）に本センサを搭載したシステムを中日本航空が運用し、出穂後20日前後から近隣空港に航空機を待機させ、雲の少ない良好な天候条件で観測を行った。本センサは最大バンド数288、最小波長幅時平均バンド幅2.2nm、平均SNR480:1、ダイナミックレンジ14bitであり、バンド数およびバンド幅は可変である。本観測におけるセンサの波長は、2007年：410～1071nm、2008年：409～1055nmの範囲で、いずれの年次も中心波長の間隔約20nm、半値幅約20nmの34バンドの設定でデータを取得した。観測高度は約3000m、地上解像度約1.5mであった。観測は9～10コースに分けて、南北方向で実施した。観測画角は38°、コース間重複約45%とし、ほぼ直下（±10°）の画像範囲から地上調査地点の分光反射率を抽出した。なお、センサでの観測データはあらかじめ測定しておいた輝度変換テーブルに基づいて分光放射輝度値に変換した。さらに、大気中での散乱・吸収の影響を取り除くため、分光放射輝度値を大気補正し、分光反射率に変換した。大気補正の方法は、2007年に分光測定器（FieldSpec HandHeld, ASD）を用いてアスファルトや砂地など分光反射率の低い地物～高い地物について地上で分光反射率を測定し、これと各年次に航空機で観測された同一地物の分光放射輝度値との関係から、年次および波長別に回帰式を作成して分光画像全体を変換した。画像の位置を既存の地図と合致させるための幾何補正については、航空機位置姿勢情報と地形標高モデルならびにENVI4.8を使用して行った。

2009～2011年は、高解像度光学衛星センサによる観測を行った。2009年はGeoEye-1により4バンド（青450-510nm、緑510-580nm、赤655-690nm、近赤外780-920nm）で、2010年はWorldView-2により8バンド（コースタル400-450nm、青450-510nm、緑510-580nm、黄585-625nm、赤630-690nm、レッドエッジ705-745nm、近赤外①770-895nm、近赤外②860-1040nm）で、2011年はWorldView-2により4バンド（青450-510nm、緑510-580nm、赤630-690nm、近赤外①770-895nm）で観測した。衛星画像の分光放射輝度値への変換および大気補正については、ENVI4.8およびENVI Atmospheric Correction モジュールのQuick Atmospheric Correctionにより実施した。

観測日は、2007年が8月25日（稲の生育ステージは平川市の調査地点の平均で出穂後23日）、2008年が9月10日（同出穂後37日）、2009年が9月2日（同出穂後25日）、2010年が8月29日（同出穂後29日）、2011年が8月28日（同出穂後24日）である。いずれの年次も、快晴条件で観測され、観測画像の調査地域内（図4-1 a～e 青の囲み）には雲や薄雲はみられなかった。





図 4-1(a) 取得された分光画像 (2007 年)

観測日および観測条件.  
 2007 年 8 月 25 日 (出穂後 23 日),  
 快晴, 航空機 CASI-3 34バンド

青の囲み : 平川市, 青丸 : 調査地点を示す





図 4-1 (b) 取得された分光画像 (2008 年)

観測日および観測条件.

2008 年 9 月 10 日 (出穂後 37 日), 快晴,  
航空機 CASI-3 34バンド

青の囲み : 平川市, 青丸 : 調査地点を示す





図 4-1(c) 取得された分光画像 (2009 年)

観測日および観測条件.  
 2009 年 9 月 2 日(出穂後 25 日), 快晴,  
 衛星 GeoEye-1 4バンド,

青の囲み: 平川市, 青丸: 調査地点を示す





図 4-1 (d) 取得された分光画像 (2010 年)

観測日および観測条件.  
 2010 年 8 月 29 日 (出穂後 29 日), 快晴,  
 衛星 WorldView-2 8バンド

青の囲み : 平川市, 青丸 : 調査地点を示す





図 4-1(e) 取得された分光画像 (2011 年)

観測日および観測条件.  
 2011 年 8 月 28 日 (出穂後 24 日), 快晴,  
 衛星 WorldView-2 4バンド

青の囲み : 平川市, 青丸 : 調査地点を示す

## 2.2 地上調査

調査地域は、平川市の農家水田を対象とした。図 4-1 a～e に青の囲みで示した地域である。反射スペクトルの解析には、観測時に稲の倒伏がみられた地点を除き、2007 年が 48 地点、2008 年が 32 地点、2009 年が 35 地点、2010 年が 25 地点、2011 年が 27 地点のデータを用いた。なお、倒伏による除外地点の割合は、例年 1 割以下であるが、2010 年は約 3 割とやや大きかった。そこで、2010 年については、解析に用いる地点数を確保する関係から、平川市と隣接した地域の地点を含めた（3 地点）。品種は「つがるロマン」である。本地域の栽培品種は、「つがるロマン」が大部分を占めている。

調査地点の成熟期は、圃場で穂を観察調査し（図 4-2），黄化率 90%（黄化数／全粒数×100）を基準（青森県 2011）として判定した。また、各株の最長稈（茎）を対象に、稈長と穂長を測定し、止葉（最上位葉）の葉色を葉緑素計（SPAD-502，コニカミノルタセンシング）で測定した。なお、葉色値は個葉の面積当たり葉緑素含量の指標値である。穂数は株当たりの穂数を調査し、これに栽植密度をかけて単位土地面積当たり穂数とした。また、生育量の指標として、稈長×m<sup>2</sup>当たり穂数を算出した。地点当たりの調査株数は 20 株である。栽植密度は実測で求めた。玄米タンパク質含有率（以下、玄米タンパクと呼ぶ）は、収穫時に調査位置の稲 3.3 m<sup>2</sup>を刈り取りし、得られた玄米をケルダール法で分析した。さらに、窒素含有率に 5.95 の係数を乗じて求め、乾物当たりの含有率で示した。

玄米タンパクは収穫時に、成熟期はステージ該当時期に調査し、葉色値などその他の項目については分光画像の取得と同期して調査を行った。





図 4-2 粳の黄化状況（黄化粳率 88%）

### 2.3 解析方法

分光画像データの解析に当たっては、それぞれの波長（以下、単バンドと呼ぶ）の反射率および可視波長域（以下、可視と呼ぶ）と近赤外波長域（以下、近赤外と呼ぶ）の任意の2波長の反射率の組み合わせによる正規化指数を用いた。組み合わせの手法については、2つの波長 ( $i, j$  nm) における反射率 ( $R_i, R_j$ ) の差を正規化する分光指数 NDSI (Normalized Difference Spectral Index) (井上ら 2008) と両者の比をとる指数 NRSI (Normalized Ratio Spectral Index) (井上・境谷 2013) を用いた。

$$\text{NDSI}[R_i, R_j] = (R_j - R_i) / (R_j + R_i) \quad (4-1)$$

ここで、 $R_i$  と  $R_j$  はそれぞれ波長  $i\text{nm}$ ,  $j\text{nm}$  の反射率である。したがって、 $i=650\text{nm}$ ,  $j=830\text{nm}$  の場合は Landsat TM の測定波長帯に対応した NDVI (Normalized Difference Vegetation Index : 正規化植生指数) に相当する。

$$\text{NRSI}[R_i, R_j] = R_i / R_j \quad (4-2)$$

ここで、 $R_i$  と  $R_j$  はそれぞれ波長  $i\text{nm}$ ,  $j\text{nm}$  の反射率である。

本研究では、上記 4-1 式および 4-2 式とも、ハイパースペクトルデータの可視の波長を  $i$ , 近赤外の波長を  $j$  として、それぞれの波長の組合せによる決定係数  $r^2$  を求めた。

成熟期に対する予測精度の検証については、RMSE を用いて評価を行った。なお、反射スペクトルと実測した成熟期との関係式から推定したマップの精度については、one-leave-out のクロスバリデーション (cross-validation) による  $\text{RMSE}_{\text{val}}$  で評価を行った。この手法は、ある 1 地点を順番に未知データとし、残り地点のデータから得られた回帰式でこれに対する予測を繰り返すもので、各地点で得られた予測値と実際の実測値との比較から精度を評価するものである。クロスバリデーションはデータセットが比較的限られている場合でも、予測式の頑健性を確保する上で有力な手法である。

$$\text{RMSE}_{\text{val}} = \sqrt{\frac{\sum (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (4-3)$$

$\hat{y}_i$  ;  $i$  番目の地点を除いて計算した回帰式による予測値

### 3 反射スペクトルからの成熟期の推定

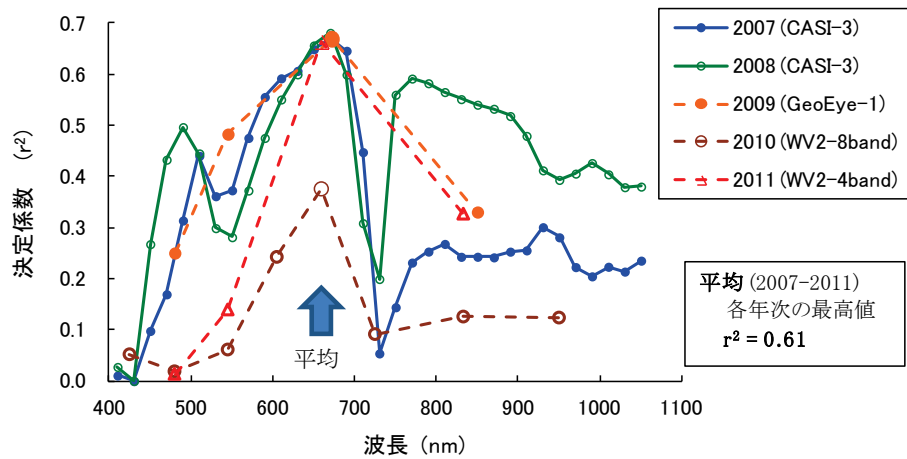
#### 3.1 反射スペクトルと成熟期の関係

単バンドの反射スペクトルと成熟期（暦日）の決定係数は、いずれの年次も 670nm 付近で最高値を示した。670nm 付近での決定係数の高さは、2010 年が  $r^2=0.38$  とやや低めとなった以外は、各年次とも  $r^2=0.66\sim 0.68$  と安定して高く、観測時期やセンサの違いによる影響は小さかった（図 4-3 a）。なお、2010 年における決定係数の低下は、倒伏による除外地点が多かった影響で、成熟期の変異幅が小さくなったことが原因と考えられる。

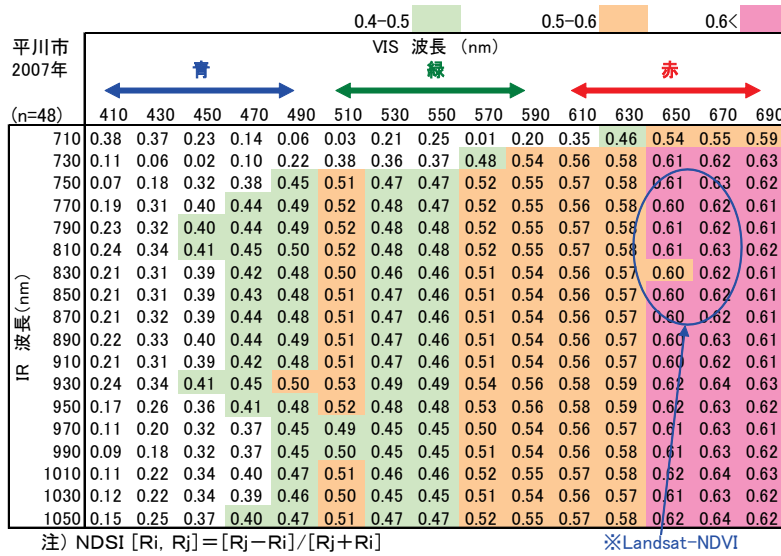
NDSI を用いて、2 波長による正規化指数と成熟期との決定係数を求めた。なお、可視の波長の違いによる変異は大きかったが、近赤外における波長の違いでは変異が小さかったことから（図 4-3 b）、近赤外を衛星の代表的な波長である 830nm に最も近い波長で一定とし、可視の波長の違いによる NDSI 値と成熟期との決定係数を比較した。決定係数は、単バンドの場合と同様に、670nm 付近で最高値を示した（図 4-3 c）。同様に、NRSI 値と成熟期との決定係数を比較した結果でも、670nm 付近で最高値を示した（図 4-3 d）。

一般に、生葉での吸収スペクトル特性は植物の種類に関わらずほぼ等しく、葉緑素による極大吸収波長は 670nm 付近である（稲田 1963）。稲においても、成熟の進行に伴う葉緑素の減少と黄化がこの波長帯に最もよく反映されるため、成熟期との間に高い相関関係が得られたものと考えられる。なお、圃場および室内での携帯型分光センサによる検討でも、籾の黄化や老化に伴う緑葉面積の低下が登熟後半に赤の波長における反射率の顕著な上昇を招くことが報告されている（井上ら 2008）。なお、2007～2011 年の 5 か年について、決定係数の最高値の平均は、単バンドが  $r^2=0.61$ 、NDSI および NRSI が  $r^2=0.59$  で、単バンドが若干高かった。観測条件が良好かつほぼ平坦な地形のため、近赤外を用いた正規化等の効果が顕在化しなかったものと推察される。

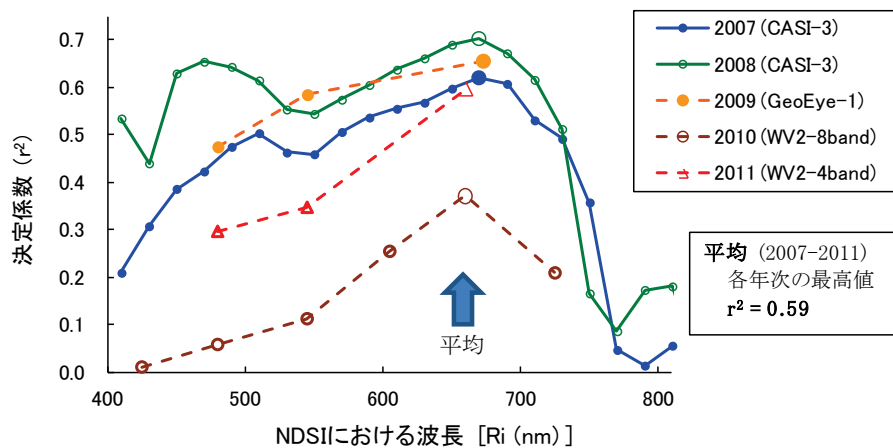




a 成熟期と単バンドの決定係数 ( $r^2$ ) の推移

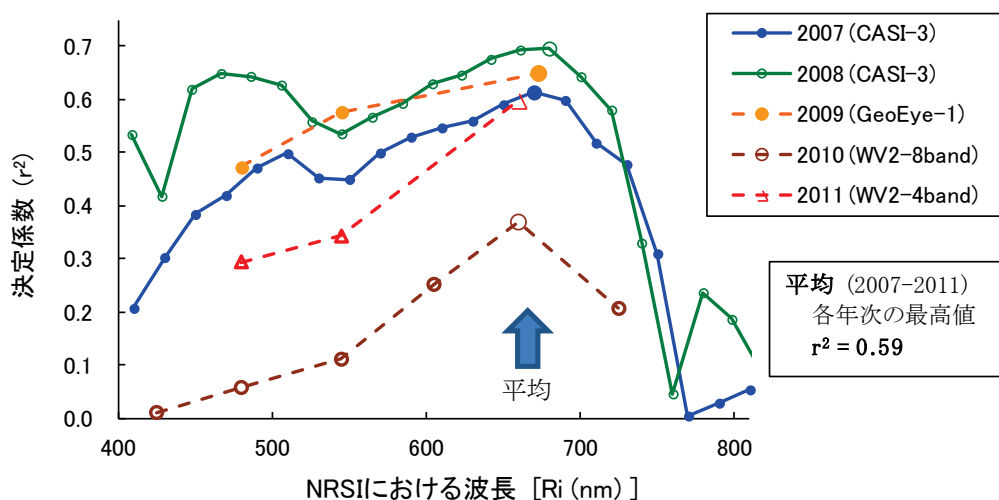


b 成熟期と NDSI [R<sub>i</sub>, R<sub>j</sub>] の決定係数 ( $r^2$ ) の分布



c 成熟期と NDSI [R<sub>i</sub>, R<sub>830</sub> (Geo: 850, WV-2: 833)] の決定係数 ( $r^2$ ) の推移

図 4-3 (a~c) 成熟期 (暦日) と反射スペクトルの関係



d 成熟期とNRSI [Ri, R830 (Geo:850, WV-2:833)] の決定係数 ( $r^2$ ) の推移

図 4-3(d) 成熟期（暦日）と反射スペクトルの関係

### 3.2 観測時の稲の生育特性と成熟期の関係

反射スペクトルと成熟期との間に密接な関係が認められたが、この関係をさらに裏付けるデータとして、反射スペクトル観測時の稲の生育特性と成熟期との関係を検討した。その結果、成熟期との間に、葉色値、穂長、 $m^2$  当たり穂数、生育量で密接な関係が認められた（表 4-1）。中でも、葉色値は、決定係数が  $r^2=0.58$  と極めて高かった。これは成熟期が籾の黄化程度により判定されること、かつ止葉と籾の葉緑素含量の低下が同調しているためである。また、穂長、 $m^2$  当たり穂数については、いずれも  $m^2$  当たり籾数に関係する形質であり、籾数が増加すると出穂期から成熟期までの期間が長期化するプロセス（中川・堀江 1989）を介して、成熟期との間に比較的強い相関関係が現れるものと考えられる。なお、生育量との関係については、 $m^2$  当たり穂数の影響と考えられる。

以上、葉色値は観測時の稲の形質の中でも、成熟期と特に密接な関係が認められた。そこで、葉色値の調査データがある 4 年間（2007, 2008, 2009, 2011）について、葉色値と葉色測定日から成熟期までの積算気温の関係を調べた。その結果、年次を通じて、葉色値が高いほど測定日から成熟期までの積算気温が大きく、両者の決定係数も  $r^2=0.45$  と高かつ

た（図 4-4）。これは、葉と籾の葉緑素含量の変化に密接な正の相関関係があること、および、籾の葉緑素含量が一定程度まで減少するのに要する期間が積算気温である程度よく表現されることによるものである。さらに、葉色値と分光画像データの両者について、成熟期との決定係数を比較した結果、地上で測定した葉色値に比べ、670nm の単バンド反射率および NDSI (R670,R830) の分光画像データは決定係数が明らかに高かった（表 4-2）。これは、葉色値は単葉で測定された葉緑素含量のデータであるのに対し、分光画像データは籾を含めた群落での葉緑素含量の情報となっており、面積当たり葉緑素含量の情報がより的確に反映されているためと考えられる。なお、分光画像の画素内には茎葉と籾が混在しているが、成熟期における茎葉と籾の存在比率は重量比でおよそ 1 : 1 の比率に近くほぼ一定となることが経験則で知られている。本研究でも、例えば 2011 年の調査地点における籾の存在比率は 47~56% の範囲で変異幅はごく小さい（表省略）。つまり、施肥量が多い地点であっても、稲全体の重量は増加するが、茎葉と籾の両方で重量が増加するために存在比率自体は大きく変化しない。以上のことから、各画素内には茎葉と籾が混在しているものの、各画素の分光データは籾自体の葉緑素含量の変化を的確に反映しているものと考えられる。

表 4-1 観測時の稲の生育と成熟期の関係 ( $r^2$ )

項目	2007 (n=48)
葉色値	0.58 ***
稈長	0.03 n.s.
穂長	0.24 ***
穂数(本/株)	0.08 n.s.
穂数(本/m <sup>2</sup> )	0.29 ***
生育量	0.22 ***

\*\*\* : 0.1%水準, \*\* : 1%水準,

\* : 5%水準でそれぞれ有意,

n. s. : 有意ではない。

生育量 ; 稈長 × m<sup>2</sup> 当たり穂数。

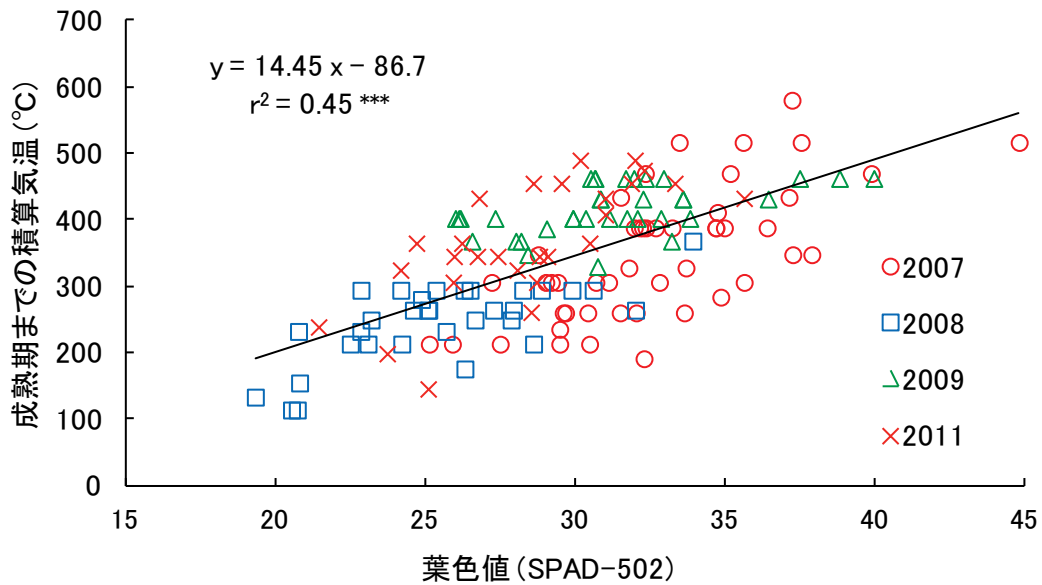


図 4-4 葉色値と成熟期までの積算気温の関係

\*\*\* : 0.1%水準, \*\* : 1%水準, \* : 5%水準でそれぞれ有意,

n. s. : 有意ではない。 生育量 : 稈長 × m<sup>2</sup> 当たり穂数。

積算気温 : 葉色測定の日から成熟期までの日平均気温を積算

表 4-2 葉色値および分光画像データと成熟期との関係 (r<sup>2</sup>)

年次	葉色値 (単葉)	分光画像データ(群落)	
		670nm	NDSI(R670,R830)
2007 (n=48)	0.58 ***	0.67 ***	0.62 ***
2008 (n=32)	0.50 ***	0.68 ***	0.70 ***
2009 (n=35)	0.32 ***	0.67 ***	0.66 ***
2010 (n=25)	—	0.38 ***	0.37 ***
2011 (n=27)	0.52 ***	0.66 ***	0.60 ***

\*\*\* : 0.1%水準, \*\* : 1%水準, \* : 5%水準でそれぞれ有意, n. s. : 有意ではない。

### 3.3 成熟期推定と玄米タンパク質推定の相違について

米を対象にしたリモートセンシングについては、青森県の生産現場でも玄米タンパクの推定に利用されている（境谷ら 2008）。本研究での分光画像の取得時期は玄米タンパクの推定と共通である。そこで、成熟期の推定に使用した同じ画像を用いて、玄米タンパクを推定し、両者の特徴の違いについても補足的な検討を加えた。

成熟期の場合と同様に、単バンドの反射率およびNDSI値について、玄米タンパクとの決定係数を求めた。その結果、決定係数の最高値の5か年平均は、単バンドでは $r^2=0.45$ （図省略）、NDSI値でも $r^2=0.51$ （図4-5）で、いずれも成熟期の場合を下回った。これは、成熟期は、籾の黄化、つまり籾の葉緑素含量の減少程度をもとに稲の外観から直接判定可能な形質であるのに対し、玄米タンパクは内部成分であり、葉緑素含量との関係は、稲体の窒素含有率を通じた間接的な関係であるためと考えられる。葉緑素含量は、稲体の窒素含有率と生育ステージの違いの両者で変動する。玄米タンパクの推定は、このうち窒素含有率の違いによる葉緑素含量の変動部分を利用したものであり、田植時期のバラツキに起因した生育ステージの違いから生じる葉緑素含量の変動は誤差要因となる（境谷・井上 2012）。一方、成熟期は、登熟期間の稲体の窒素含有率と生育ステージの違いの両者がともに関係しており、観測時の葉緑素含量が多いほど成熟期が遅延する関係にある。そのため、成熟期の推定では、葉緑素含量の変動を直接的に指標とすることができる。それ故、成熟期は玄米タンパク以上に、高い精度で推定が可能と考えられる。

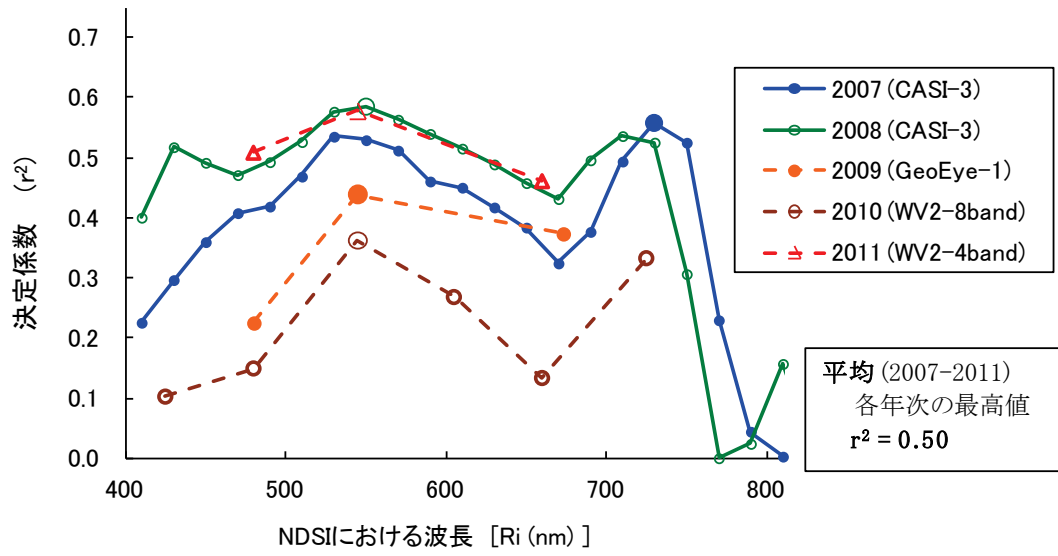


図 4-5 玄米タンパクと NDSI [R<sub>i</sub>, R830(Geo;850, WV-2;833)]  
の決定係数 (r<sup>2</sup>) の推移

## 4 収穫適期マップの作成

2007年～2011年における分光画像の670nm付近の分光反射率と実測で求めた成熟期との関係式から、成熟期を広域で推定したマップを作成した(図4-6 a～e)。このマップを収穫適期マップと呼ぶことにする(以下、適期マップと呼ぶ)。このマップでは、画素単位で推定した成熟期の暦日データを、GISを用いて圃場単位で平均化し、月日に応じて分類した。成熟期が早い圃場ほど濃い赤色、遅い圃場ほど濃い緑色とした。なお、マップ作成に当たっては、GISの圃場区画データを用いて、水田以外の圃場を除外した。

適期マップでみた成熟期の分布は、変異がかなり大きかった。当地域は、マップ南東部分を除き、標高差のほとんどない平坦な水田地帯で気象条件の変異は小さいと考えられるが、作成したマップから、圃場間および地域間の変異がいずれも大きいことが明らかとなった。年次別の成熟期の変異幅の大小の傾向は、2007年と2011年のマップでは赤と緑色のコントラストが明瞭で変異幅がやや大きく、2008年、2009年、2010年では比較的小さかった。この原因としては、年次ごとの田植時期のバラツキ程度の大小、気象条件や土壌からの窒素供給量の違いなどが考えられる。なお、分布の傾向は、マップ下部の地域が上部の地域より成熟期がやや早く、マップ左側のエリア周辺部にも成熟期の早い圃場が多い特徴は共通するものの、様相は年次で大きく異なる。用水の水系は、上部地域が浅瀬石川水系、下部地域が平川水系であり、浅瀬石川水系は取水しているダムが大型で距離的にも近いことから夏季の用水温がやや低い傾向がある。土壌タイプは、上部地域が黒ボク土主体、下部地域は灰色低地土が主体であり違いがみられる。また、マップの左側部分の河川周辺地域では土壌の砂質が強く、養分の保持力がやや低い土壌となっている。これらの違いが、年次の気象と相まって、地域による成熟期の変異を生じさせていると推察される。

なお、得られた成熟期推定値のヒストグラム分布は、各年次とも正規分布に近似していた(図4-7)。



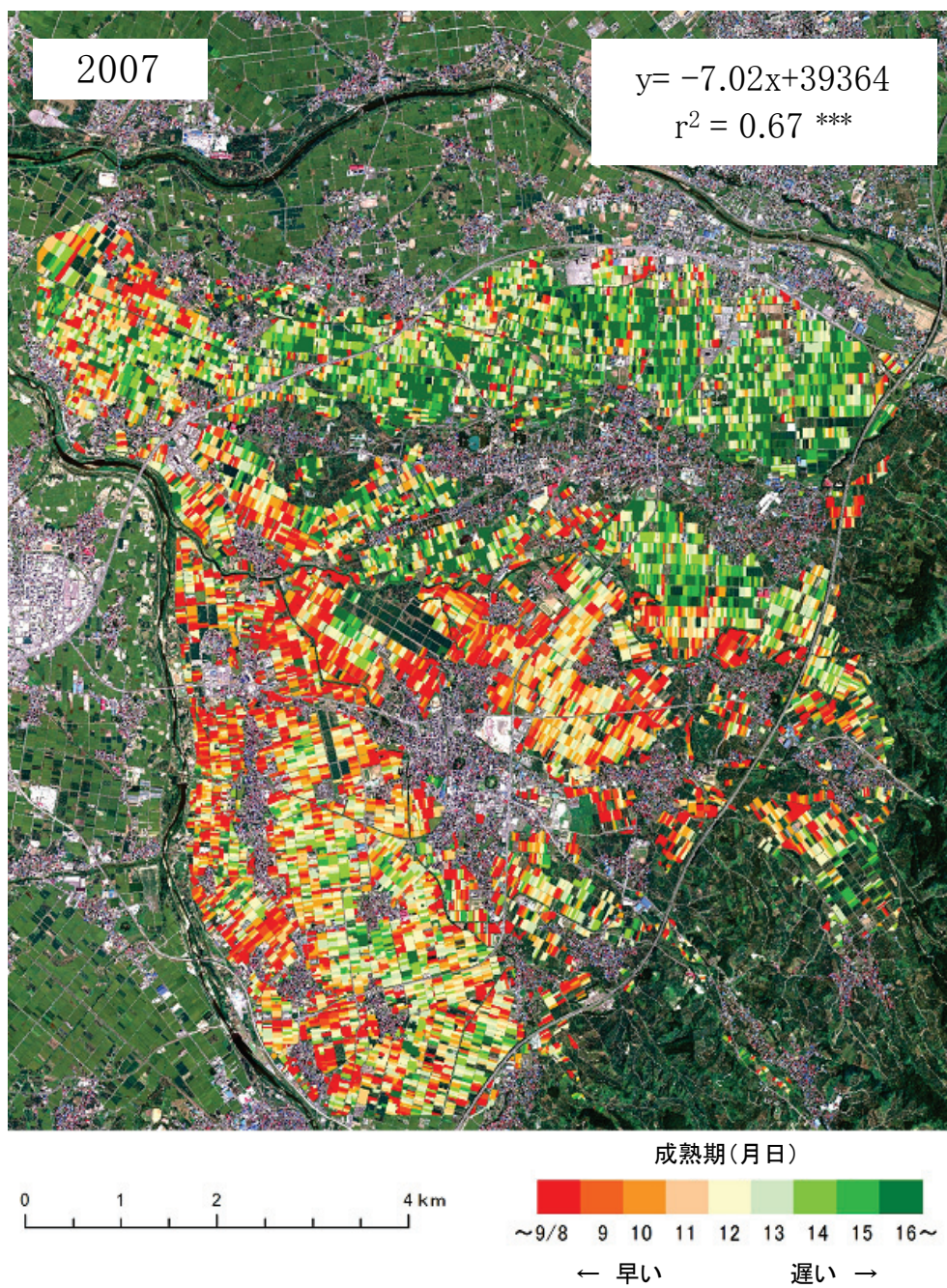


図 4-6(a) 収穫適期マップ (2007)

※ 実測データに基づく回帰式から作成



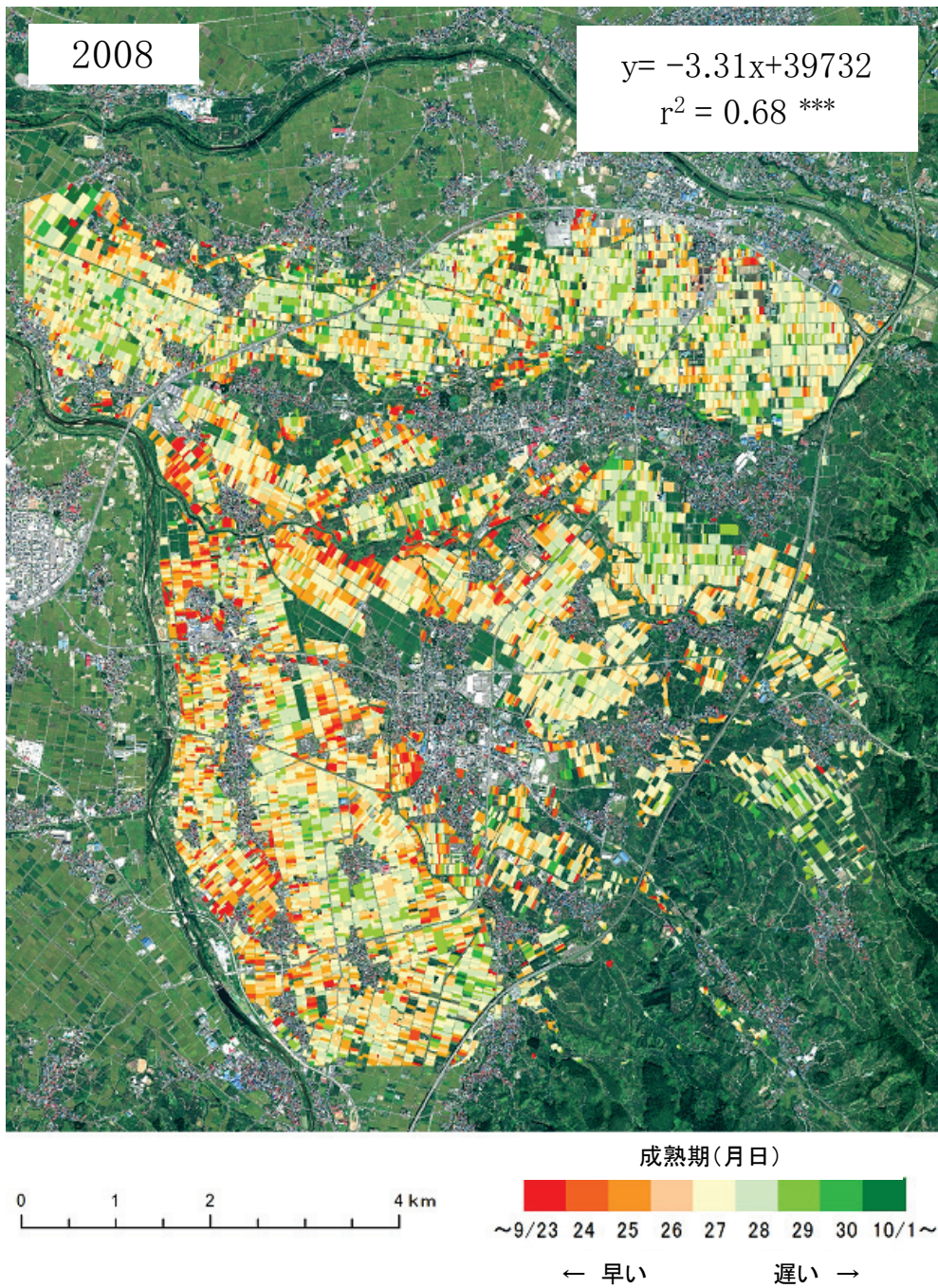


図 4-6 (b) 収穫適期マップ (2008)

※ 実測データに基づく回帰式から作成



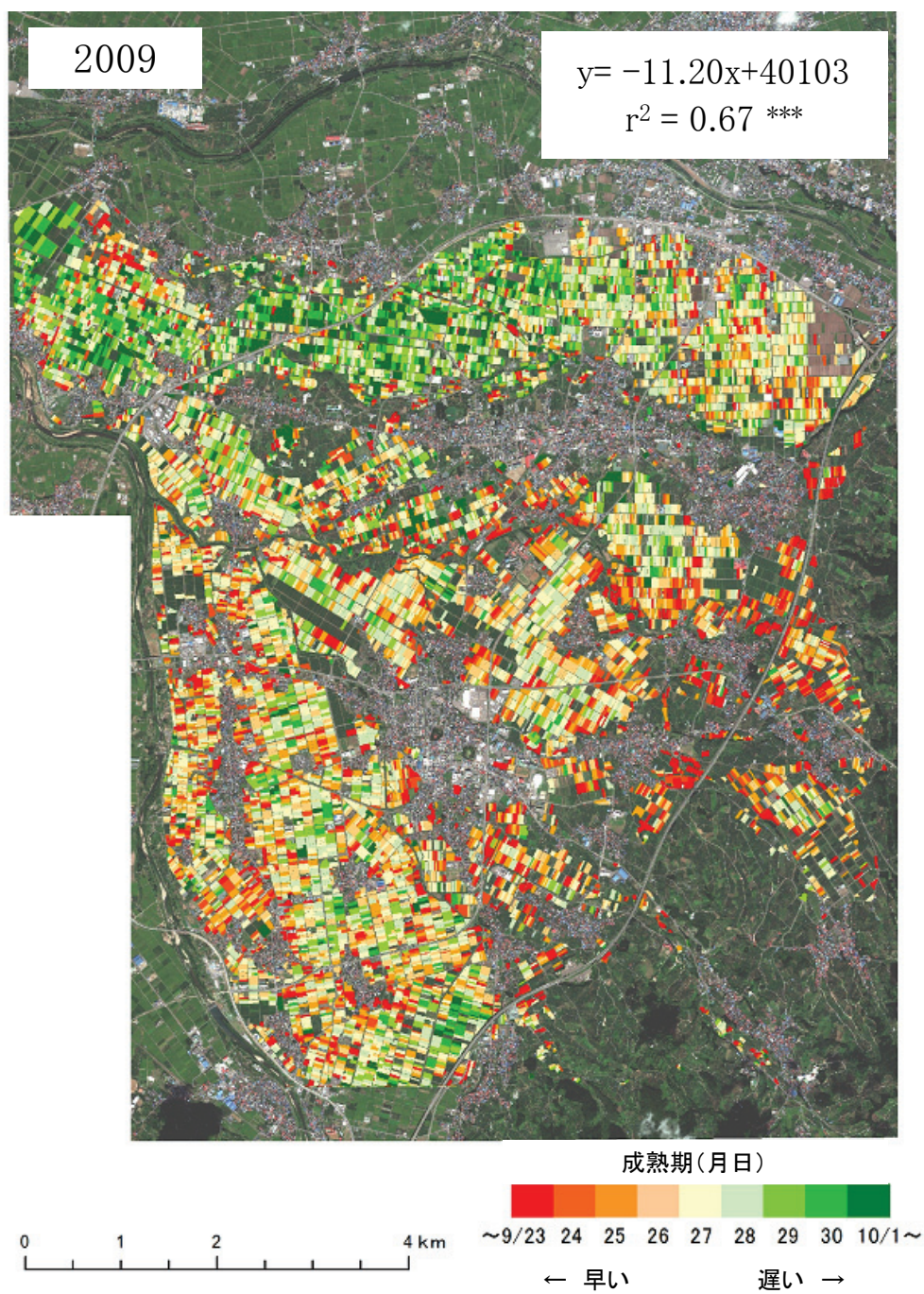


図 4-6(c) 収穫適期マップ (2009)

※ 実測データに基づく回帰式から作成



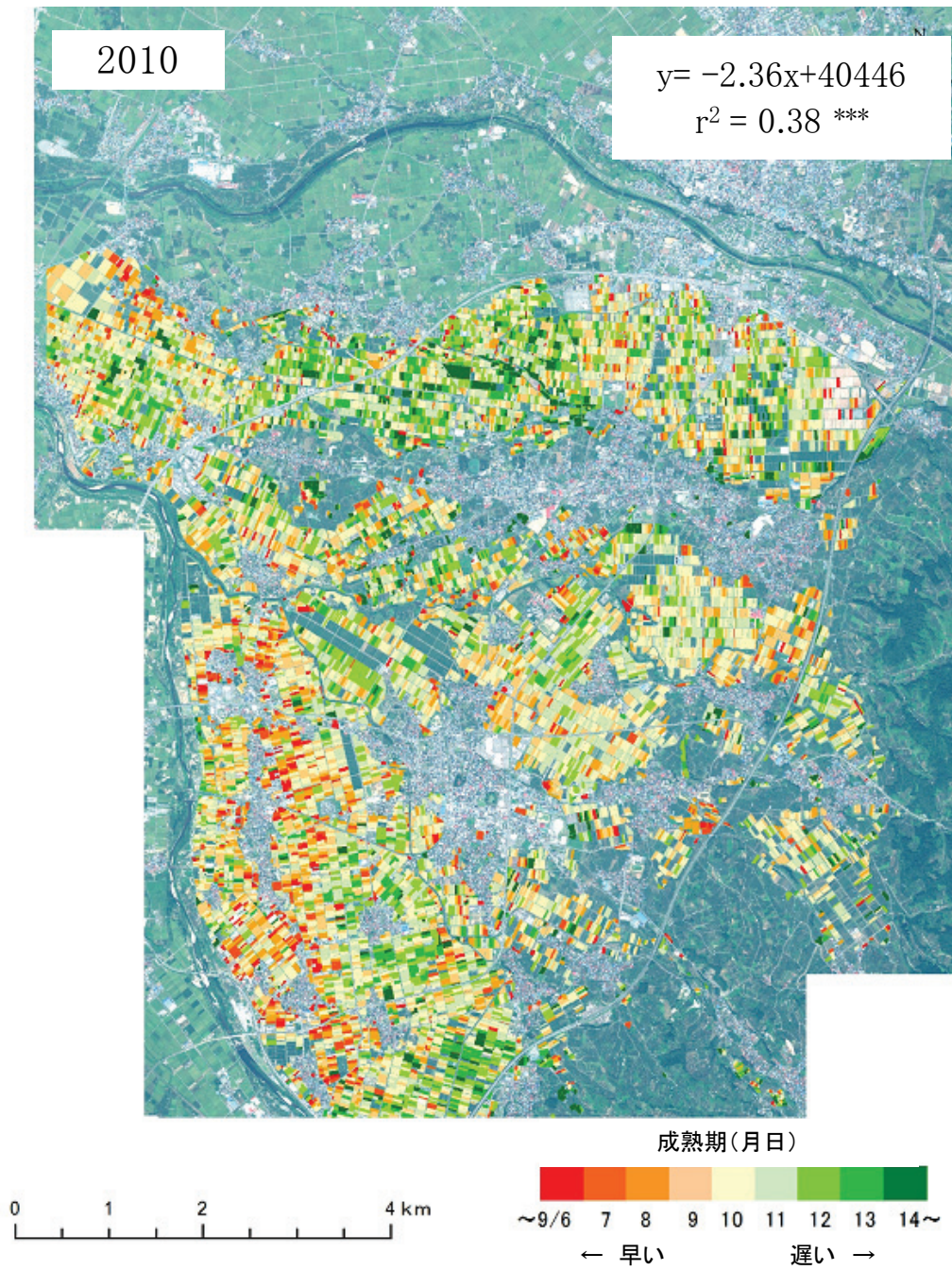


図 4-6(d) 収穫適期マップ (2010)

※ 実測データに基づく回帰式から作成



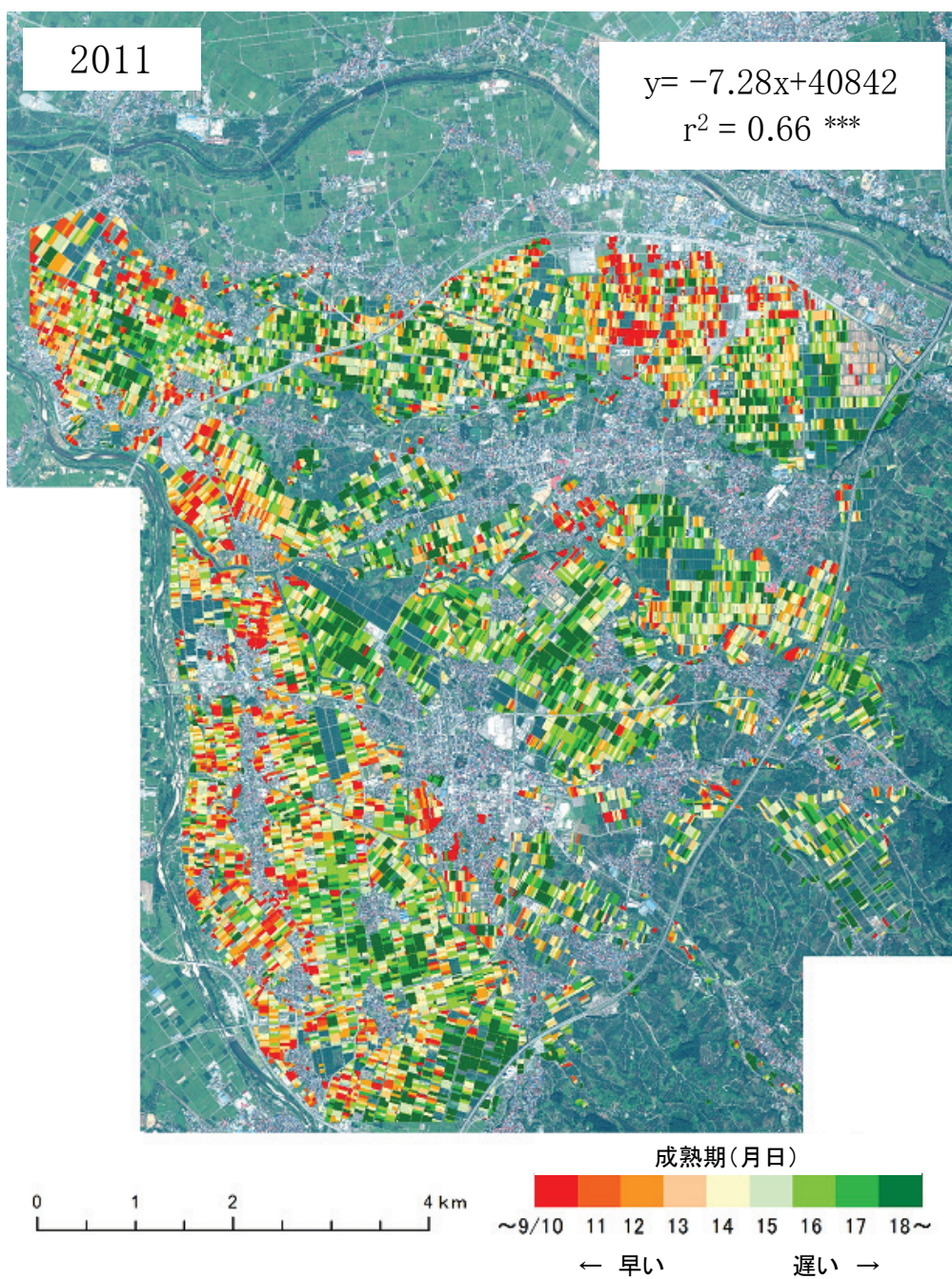


図 4-6(e) 収穫適期マップ (2011)

※ 実測データに基づく回帰式から作成

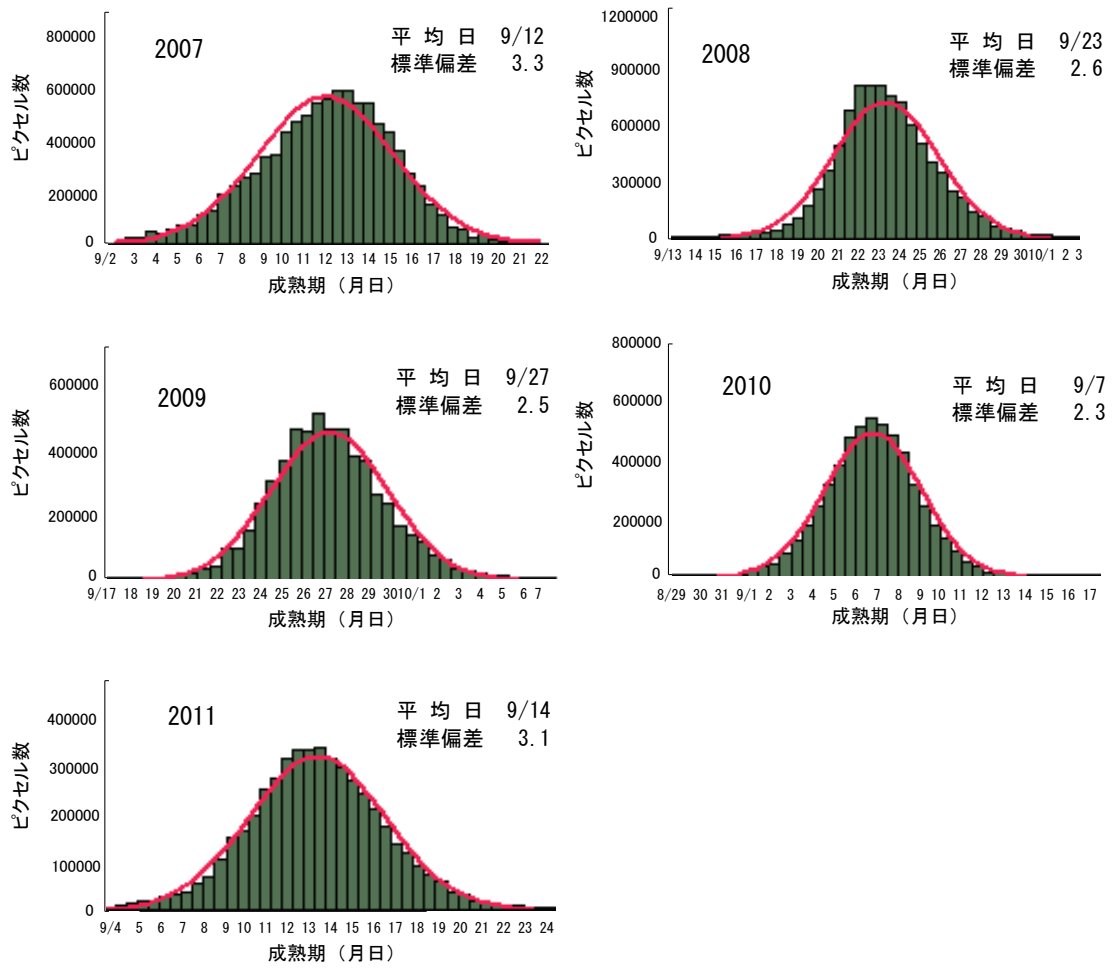


図 4-7 収穫適期マップにおける成熟期の分布

棒グラフは 0.5 日ごとに集計したピクセル数

赤線は正規分布曲線

## 5 収穫適期の予測方法

収穫前の時点において、水田ごとの成熟期を広域で予測することができれば、適期収穫に向けた収穫計画の立案が可能となる。小麦の事例では、収穫前の衛星による分光画像データから相対的な生育の早晚をマップ化し、これを適期収穫に活用している（奥野・岩田 2004）。しかし、当地域における稲作の場合、多数の農家や生産組合が各々に収穫作業を行うことから、相対的な指標だと一元的に活用することが困難である。そこで、登熟期間中に観測された分光画像データに基づいて、成熟期を相対的な順位性ではなく暦日ベースでマップ化する手法を検討した。

図 4-7 によって地域内の成熟期が正規分布に近似することが確認できたことから、正規分布特性を利用した方法を考案した。正規分布の形状は、平均値と標準偏差が規定されれば近似が可能である。そこで、分光画像データから求められる早晚性の相対的な頻度分布が実際の成熟期の早晚性の頻度分布と一致すると仮定し、これに平均値と標準偏差を与えて分布特性を規定してやることで、暦日の絶対値に変換する。具体的には、670nm の反射率の頻度分布に対して、①成熟期の平均値（出穂後積算気温から予測される地域単位の成熟期：現行法による予測日）と②成熟期の標準偏差（前年までの適期マップの作成結果から得られた標準偏差の平年値）を与えて、分光画像から得られる相対的な早晚性の空間分布を暦日の成熟期に変換する。なお、出穂後積算気温については、現行法と同様にマップの作成時期以降の気温には平年値を用いる。これにより、分光画像を入手した時点で予測マップの作成が可能となる。この手法で作成したマップを収穫適期予測マップと呼ぶことにする（以下、予測マップと呼ぶ）。前項で作成した適期マップは、実測値の成熟期データを用いて推定した成熟期をマッピングしたものであり、作成は収穫時期以降となる。一方、予測マップは、適期マップと同一の衛星画像を用いるが、正規分布を仮定することで分光画像データから間接的に成熟期を予測するものであり、収穫時期前に作成が可能である。

図 4-8 は、最寄りのアメダス地点（黒石市）にける観測値を用いた出穂後積算気温（①）と、成熟期の標準偏差の平年値（2007～2011）：2.8（②）を用いて、2011 年の分光画像データから作成した予測マップである。予測マップは、成熟期約 16 日前に取得された分光画像データから作成したものであるが、当年実測した成熟期データとの関係式を用いて推定した適期マップ（図 4-6 e 2011）とよく対応している。



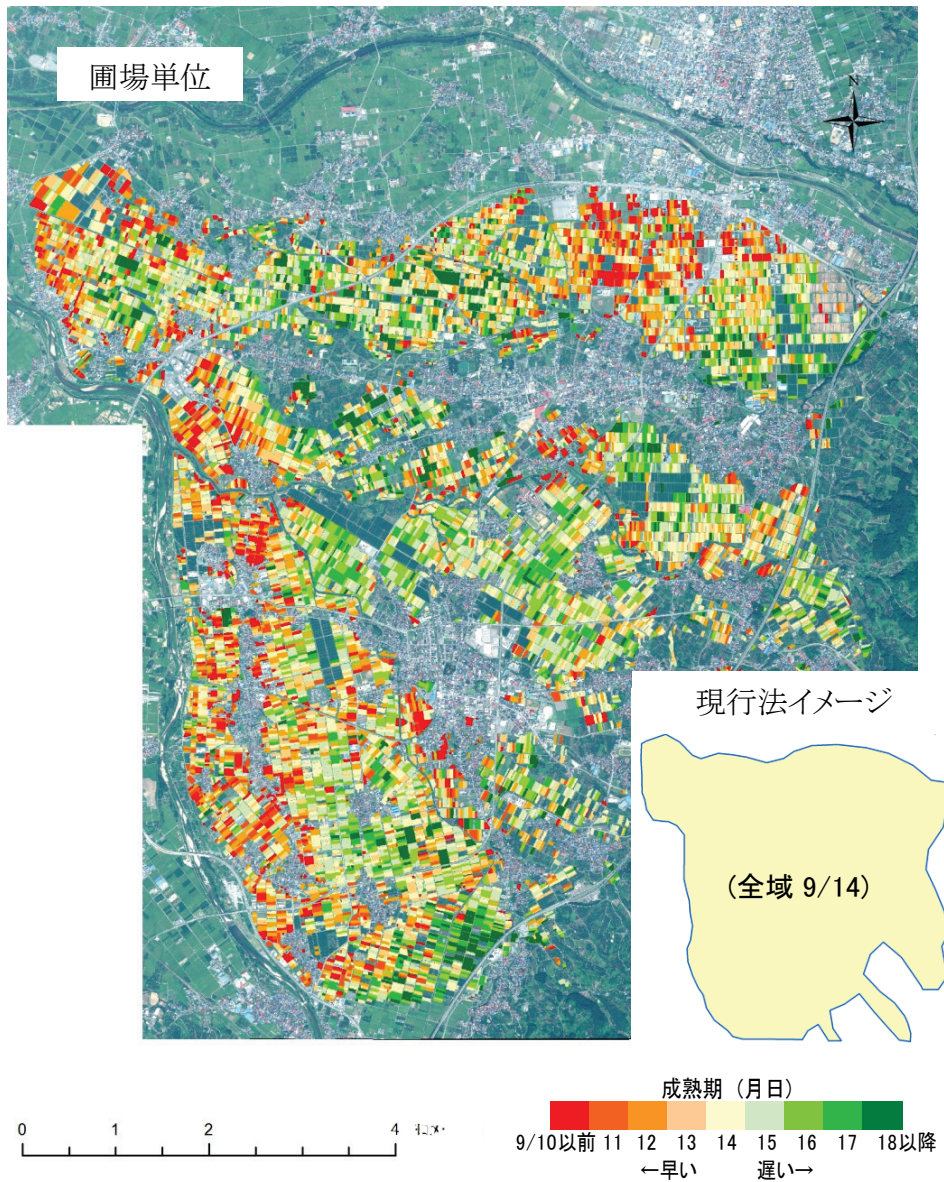


図 4-8 WV-2 (2011) 分光画像から作成した収穫適期予測マップ

【 予測マップの作成方法 】

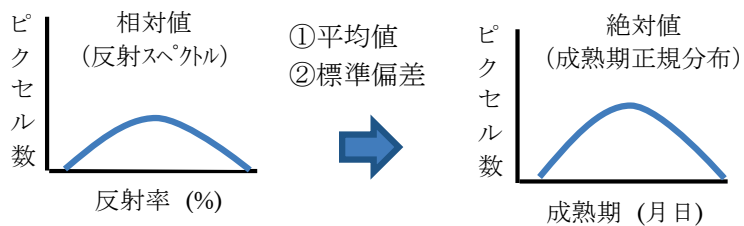
衛星データの分布を、以下①と②によって規定される成熟期の正規分布に変換する。

①平均値 9月14日

出穂後積算気温 960°Cでの収穫適期 (現行法)

②標準偏差 2.8

「収穫適期マップ」における成熟期分布の平年値 (2007~2011年)



## 6 予測マップの精度検証

2007年～2011年のデータを用いて、(A)適期マップ、(B)予測マップ、(C)参考法、(D)現行法の4種類の方法について、予測精度をRMSEで比較した(表4-3)。なお、(A)適期マップについては、クロスバリデーションで求めた予測値の精度 $RMSE_{val}$ で示した。(A)適期マップは収穫時期後に作成されるが、(B)～(D)の3種類は収穫時期前に予測が可能な方法である。(B)予測マップは、正規分布の変換に用いる標準偏差の値が精度に影響することから、標準偏差に平年値を用いた組合せのほか、最も精度が高くなると予想される当該年の収穫適期マップの標準偏差を用いた組合せ、最も精度が低くなると想定される5年間で最も小さかった年度の標準偏差を用いた組合せを併せて検討した。RMSEの5年間の平均値は、(A)適期マップが2.4日で最も小さく、次いで(B)予測マップが2.6日、(C)参考法が3.4日、(D)現行法は4.0日と大きかった。(A)適期マップおよび(B)予測マップは、現行法(D)だけではなく、圃場ごとの出穂日を基に予測した(C)参考法に比較しても、より高い精度で成熟期の予測が可能であった。また、(A)適期マップと(B)予測マップの精度の差は小さかった。(B)予測マップでの標準偏差の組合せの違いによる精度への影響は、最も差が大きかった年次でも0.4日程度と小さく、いずれの場合も(D)現行法よりも精度が高かった。なお、年次別にみた場合、2010年は(A)適期マップおよび(B)予測マップの精度がやや低く、精度は(D)現行法を上回るが、参考法(C)よりも劣った。これは、倒伏による除外地点が多かった影響で、調査地点における成熟期の変異幅が小さくなったことが原因と考えられる。

2011年を例に(A)適期マップ、(B)予測マップ、(C)参考法、(D)現行法で、予測値と実測値の傾向を比較した(図4-9)。(D)現行法で予測される成熟期は、平川市全域が一律9月14日で、地点ごとの早晚の違いは全く反映されない。(C)参考法では、回帰直線がやや右肩上がりとなり、地点ごとの早晚が多少反映されるものの反映程度は小さかった。(A)適期マップおよび(B)予測マップでは、(C)参考法に比べ、回帰直線がさらに右肩上がりとなり、実測値との差が大幅に短縮する傾向があった。なお、実際の収穫を想定した場合、成熟期の早い圃場ほど収穫の遅れる傾向が強くなることが懸念される。そこで、成熟期が最も早い調査地点における予測値と実測値との乖離日数を比較した。乖離日数は、(D)現行法では11日間とかなり大きく、(C)参考法であっても9日間で大きかった。一方、(A)適期マップおよび(B)予測マップでの乖離日数は、それぞれ3日間、4日間と小さく、(D)現行法の1/3程度



に収まっていた。(A)適期マップおよび(B)予測マップでは、地点ごとの早晩の傾向がよく反映されるため、成熟期が早い地点ほど、(D)現行法と比較した乖離日数の短縮程度がより大きくなる特徴があった。

表 4-4 に出穂期と成熟期について調査地点間の変異幅（最も遅い地点－最も早い地点）を示した。各年次における出穂期時点での早晩の差は 6～11 日(A)であったが、成熟期時点では 10～18 日(B) まで差が拡大している。現行法では出穂期を起点とした積算気温だけで予測することから、出穂期時点の生育の遅速については予測に反映されるものの、出穂期後に生じるステージの差 (B-A) については反映されない。出穂期以降に生じるステージ差については、籾数が増加すると出穂期から成熟期までの期間が長期化する（中川・堀江 1989）ことから、籾数の多少に起因するものと推察される。この出穂期以降に生じるステージ差 (B-A) は、むしろ出穂期幅 (A) より大きい年次が多く、成熟期を精度良く予測するには、出穂期以降に生じるステージ差について考慮が必要である。図 4-9 では、適期マップおよび予測マップとも回帰直線の傾きは、参考法よりも大きいことから、出穂期以降に生じるステージ差 (B-A) もある程度反映できていると考えられる。施肥量や地力の違いは、茎葉と籾の存在比率自体には大きな変化を及ぼさないことを前述したが（3.2 項）、稲の全体量には大きく影響する。例えば 2011 年の調査地点における稲全体の風乾重量は 1045～2130g/ m<sup>2</sup> と変異幅がかなり大きく、最低値と最高値では 2 倍以上の開きがあった（表省略）。現行法や参考法ではこのような生育量や籾数に関する情報が反映されないが、リモートセンシングによる予測では、茎葉と籾を含む群落全体の情報が画像データに反映されることから、面積当たり葉緑素量の情報を成熟期の遅速の情報（稲が大型で面積当たり葉緑素量が多い＝籾数が多い）として利用できる。これはリモートセンシングによる分光画像計測に特有な利点といえる。すなわち、リモートセンシングによる手法では、圃場ごとの群落全体の生育進捗の実態をよりの確にとらえられるため、現行法より精度よく、かつ安定的に成熟期を予測できるものと考えられる。

表 4-3 予測マップの精度（適期マップおよび従来の手法との比較）

	収穫後 (RMSE <sub>eval</sub> )	収穫前 (RMSE)		
	(A) 適期マップ	(B) 予測マップ 標準偏差: 平年値 (当年値～最小値)*	(C) 参考法 (圃場単位)	(D) 現行法 (地域単位)
2007 (n=48)	2.6	2.8 (2.5～2.9)	3.8	4.5
2008 (n=32)	2.1	2.5 (2.4～2.6)	3.9	4.6
2009 (n=35)	2.2	2.2 (2.2～2.3)	2.8	3.6
2010 (n=25)	2.5	3.0 (3.0～3.0)	2.4	3.2
2011 (n=27)	2.5	2.4 (2.4～2.7)	3.9	4.2
平均	2.4	2.6	3.4	4.0

\* (B) 予測マップに使用する標準偏差；平年値：2007年～2011年の実測値に基づく適期マップの標準偏差の平均（2.8），当年値：当該年の標準偏差（2.3～3.3），最小値：2007年～2011年における最小の標準偏差（2.3）。

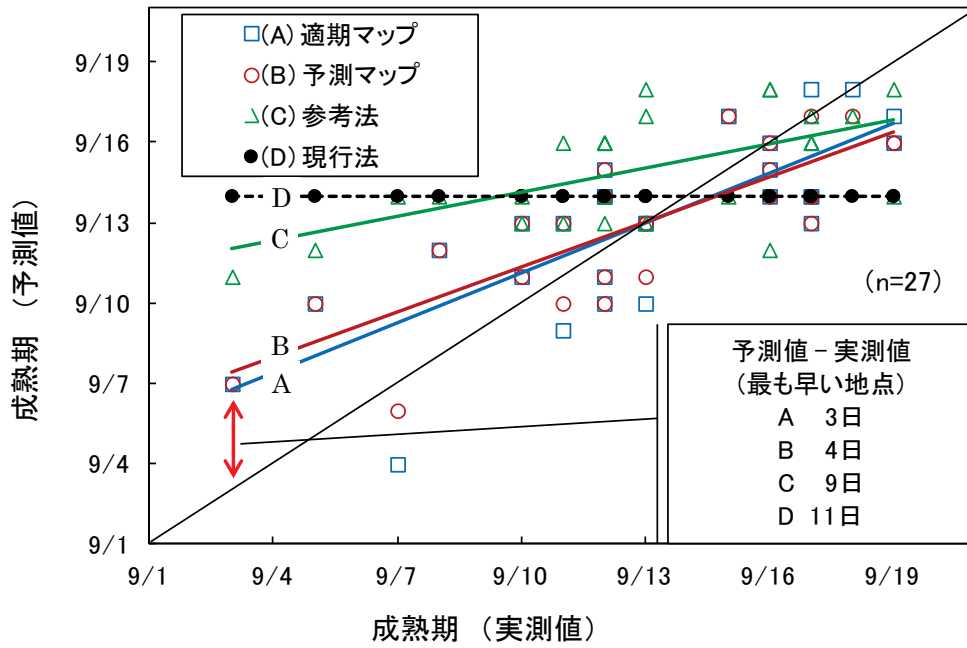


図 4-9 各手法における予測値と実測値の傾向の比較 (2011)

- A : 分光画像と調査地点の実測値から成熟期を推定。
- B : スペクトルデータ (平均 2007-2011)から成熟期を予測。 図 4-8 を参照。
- C : 出穂後積算気温法により圃場単位で成熟期を予測。
- D : 出穂後積算気温法により地域単位で成熟期を予測。

表 4-4 調査地点における生育ステージの変異幅

年次	出穂期			成熟期幅 - 出穂期幅 ( B - A )
	最早地点	最遅地点	幅(遅-早); A	
	(月日)	(月日)	(日)	
2007 (n=48)	7/31	8/6	6	
2008 (n=32)	8/2	8/8	6	
2009 (n=35)	8/5	8/16	11	
2010 (n=25)	7/27	8/3	7	
2011 (n=27)	8/1	8/7	6	
平均			7.2	
年次	成熟期			成熟期幅 - 出穂期幅 ( B - A )
	最早地点	最遅地点	幅(遅-早); B	
	(月日)	(月日)	(日)	
2007 (n=48)	9/5	9/23	18	12
2008 (n=32)	9/16	10/2	16	10
2009 (n=35)	9/22	10/10	18	7
2010 (n=25)	9/3	9/13	10	3
2011 (n=27)	9/3	9/19	16	10
平均			15.6	8.4

## 6 まとめ

主食用米の収穫適期である成熟期は、670nm 付近の波長の反射率と密接に関係していた。670nm 付近の波長と実測した成熟期との関係式から、収穫後に、水田ごとの成熟期を暦日で推定した適期マップの作成が可能であった。また、正規分布特性を利用し、収穫前に予測マップを作成する手法を提案した。具体的には、670nm 付近の反射率の頻度分布に対して、①成熟期の平均値（出穂後積算気温から予測される地域単位の成熟期：現行法による予測日）と②成熟期の標準偏差（前年までの適期マップの作成結果から得られた標準偏差の平年値）を与えて、分光画像から得られる相対的な早晚性の空間分布を暦日の成熟期に変換する。なお、出穂後積算気温については、現行法と同様にマップの作成時期以降の気温には平年値を用いる。これにより、分光画像を入手した時点で予測マップの作成が可能となる。

適期マップおよび予測マップの精度は、出穂後積算気温による現行法よりも優れていた。現行法では出穂期を起点とした積算気温だけで予測することから、出穂期後に生じる籾数の多少に起因した生育ステージの差については反映されない。リモートセンシングによる手法では、面積当たりの葉緑素量の情報を成熟期の遅速の情報（稲が大型で面積当たり葉緑素量が多い＝籾数が多い）として利用できる。そのため、リモートセンシングによる手法では、圃場ごとの群落全体の生育進捗の実態をよりの確にとらえることができ、現行法よりも精度良く、かつ安定的に成熟期を予測できるものと考えられる。

## 第5章 リモートセンシングによる土壌腐植含有率の推定

### 1 はじめに

水田における稲への窒素供給量は、およそ肥料からが3~4割、土壌からが6~7割程度で、土壌からの割合が高い（日本土壌協会 2012）。腐植は、土壌中に存在する有機物のうち、分解の進んでいない粗大有機物を除いた無定形の褐色ないし黒色の有機物である。腐植含有率は土壌中の有機物の蓄積量を表すものであり、その微生物分解を通じて養分を作物へ供給する。また、腐植物質の塩基置換容量（CEC）は粘土鉱物より多いことから、塩基置換容量の拡大によって保肥力の増大に寄与する。そのため、土壌の腐植含有率の多少は土壌から供給される無機態窒素量に影響する（農山漁村文化協会 2004）。また、土壌の性質は、土壌の母材や堆積様式等により異なる。我が国の農耕地土壌は、全国で昭和34年から20年間にわたって行った地力保全基本調査の結果に基づいて、それぞれの性質の異なる16種類の土壌群に区分されている（土壌保全調査事業全国協議会 1979）。水田についても土壌タイプごとの窒素供給の特徴についての研究がこれまで数多く行われてきた（佐藤ら 1988, 村上・小野 1986, 小野ら 1975, 高橋・布施 1967）。第3章におけるタンパクマップによる広域での玄米タンパク質含有率の推定結果は、圃場ごとまたは地域単位での変異が大きいことを示している（境谷ら 2012）。また、現場で生産される米の玄米タンパク質含有率について土壌タイプによる違いが報告されている（北海道農政部 2004）。以上のことから、リモートセンシングによって土壌の腐植含有率および土壌タイプが把握できれば、土壌から供給される地力窒素の程度が推定でき、施肥量の適正值も判断が付きやすくなることが期待できる。すなわち、腐植含有率のデータやこれと土壌タイプと組み合わせたデータにより、土壌の地力窒素の傾向が圃場ごとに把握が可能になれば適切な施肥管理がより容易になり、広域での食味や外観品質の改善に効果が期待できると考えられる。

広域での腐植含有率の推定については、志賀ら（1989）が Landsat 衛星のデータを用いて実施し、ある程度の精度で可能であったことを報告している。腐植含有率は測定された炭素含量に 1.72 の係数を乗じて算定されることから、炭素量の推定手法も参考にできる。炭素の推定については、若松ら（2011）は Landsat 衛星の赤色域（バンド3）を用いて北海

道十勝地方で土壤炭素量を求め、土壤炭素貯留の変化を算定した。また、Zhi・Inoue (2011) は室内実験で水分含量の異なる土壤の炭素量の推定を検討し、NDSI (R605,R953) などの推定力の高い波長の組合せを明らかにしている。また、熊谷ら (2000) は、Landsat 衛星データから作成した土壤腐植分布図を用いて、簡易土壤図の作成を試み、泥炭の区分が可能であったことを報告している。

なお、土壤タイプについては、昭和 30 年～50 年代に実施した農林水産省全国地力保全調査のデータをもとに全国の土壤図が作成されており、デジタルデータとしても市販され、データが容易に入手可能である (日本土壤協会 2007)。

そこで、本章では高解像度衛星データからの腐植含有率の推定手法を検討するとともに、腐植含有率および土壤タイプと土壤の可給態窒素量との関係を検討した。

## 2 試験方法

### 2.1 高解像度光学衛星センサによる分光画像の取得

分光画像は、高解像度光学衛星センサで 2012～2013 年の 2 か年にわたり、青森県津軽中央地域 (平川市) 110km<sup>2</sup> を対象に取得した (図 5-1 a,b)。2012 年は WorldView-2 (以下、WV-2 と呼ぶ) により 4 バンド (青 450-510nm, 緑 510-580nm, 赤 630-690nm, 近赤外① 770-895nm) で、2013 年は QuickBird (以下、QB と呼ぶ) により 4 バンド (青 430-545nm, 緑 466-620nm, 赤 590-710nm, 近赤外 715-918nm) で観測した。衛星画像の分光放射輝度値への変換および大気補正については、ENVI4.8 および ENVI Atmospheric Correction モジュールの Quick Atmospheric Correction により実施した。

観測日は、2012 年が 5 月 24 日 (平川市の平均田植日後 3 日)、2013 年が 5 月 31 日 (同 8 日) である。なお、平川市の平均田植日には、2012 年が 788 地点、2013 年が 1116 地点で調査した田植日の平均を用いた。観測時期については、対象が土壤であることから、水田が湛水状態にあり、かつ田植え直後の稲がまだ小さい時期を選定した。観測時の気象は、2012 年は観測面積の 2 割ほどに雲が、これに伴う雲影も同程度の割合でみられた。2013 年は快晴条件で観測され、雲や雲影はみられなかった。

## 2.2 地上調査

調査地域は、平川市の農家水田を対象とした。図 5-1 a,b に青の囲みで示した地域である。反射スペクトルの解析には、2012 年が 80 地点、2013 年が 108 地点のデータを用いた。なお、観測される水田の反射スペクトルは、土壌だけではなく、田面水の状況（湛水、落水）や田植後日数の違い（稲の繁茂量の違い）によって影響を受けることが想定される。そこで、2012 年は 788 地点で田植日を調査し、観測画像に雲や雲影の影響のない地点の中から、観測日が田植後 3～7 日目に該当する 80 地点を調査地点に選定した。田植後 3 日目以前としたのは、田植当日から翌日については、欠株となった株への補植を行うことが多く、この間、作業の便宜性から入水しない圃場がみられるためである。また、2013 年は、衛星観測の翌日に湛水条件であった 108 地点を調査地点とした。2013 年の調査地点での観測日は、田植後日数で 1～18 日目（平均 9 日目）である。

調査地点の品種は、いずれも「つがるロマン」、苗は葉齢 3.5 葉前後の中苗である。本地域の栽培品種・苗種は、「つがるロマン」・中苗が大部分を占めている。

土壌タイプの判定は、デジタル土壌図（地力保全基本調査による土壌情報データベース 土壌図データ CD-ROM [北海道・東北版] 2007 年）（日本土壌協会 2007）の土壌分類 2 次案の土壌統群を、ArcGIS ArcMap 10.0 で①泥炭・黒泥（土壌統群：泥炭土，黒泥土），②強グライ（土壌統群：グライ土・下層有機質，中粗粒強グライ土，礫質強グライ土，細粒強グライ土），③グライ（土壌統群：中粗粒グライ土，細粒グライ土，腐植質黒ボクグライ土），④灰褐色（土壌統群：中粗粒灰色低地土・灰褐色系，灰色低地土下層有機物，灰色低地土・斑紋なし，細粒灰色低地土・灰褐色系），⑤黒色・黄褐色（土壌統群：厚層多腐植質黒ボク土，厚層腐植質多湿黒ボク土，厚層腐植質黒ボク土，淡色黒ボク土，細粒黄色土・斑紋あり，表層多腐植質黒ボク土，表層腐植質多湿黒ボク土），⑥礫層・礫質（土壌統群：礫質灰色低地土・灰色系，礫質褐色低地土・斑紋あり）の 6 種類の水田土壌タイプに分類し、調査地点の位置を基に土壌タイプを判定した（図 5-2 a,b）。平川市では、①泥炭・黒泥はみられないが、②～⑥まで広範な土壌タイプが分布している。

土壌試料は、2012 年は 11 月 30 日に、秋耕していない圃場について、土壌表面の稲わらやコケ等を除去した後、表層の土壌を深さ 2cm で採取した。2013 年は 7 月 19 日～22 日の中干期間に、土壌表面の藻類や雑草等を除去した後、土壌を深さ 5cm で採取した。両年とも、採取した土壌は、風乾した後、稲わらや根などの粗大有機物を取り除き、乳鉢ですり



潰して 0.5mm の篩に通し試料とした。土壤の腐植含有率は、土壤試料を NC アナライザー (NC-95A, 住化分析センター) で測定し、得られた全炭素含有率に 1.72 の係数を乗じて求めた。土壤の可給態窒素量は、風乾土壤を 2mm の篩に通して得た試料を、保温静置培養法で 30°C, 4 週間湛水培養し、培養後の無機態窒素量から、培養前の無機態窒素量を差し引きして求めた。

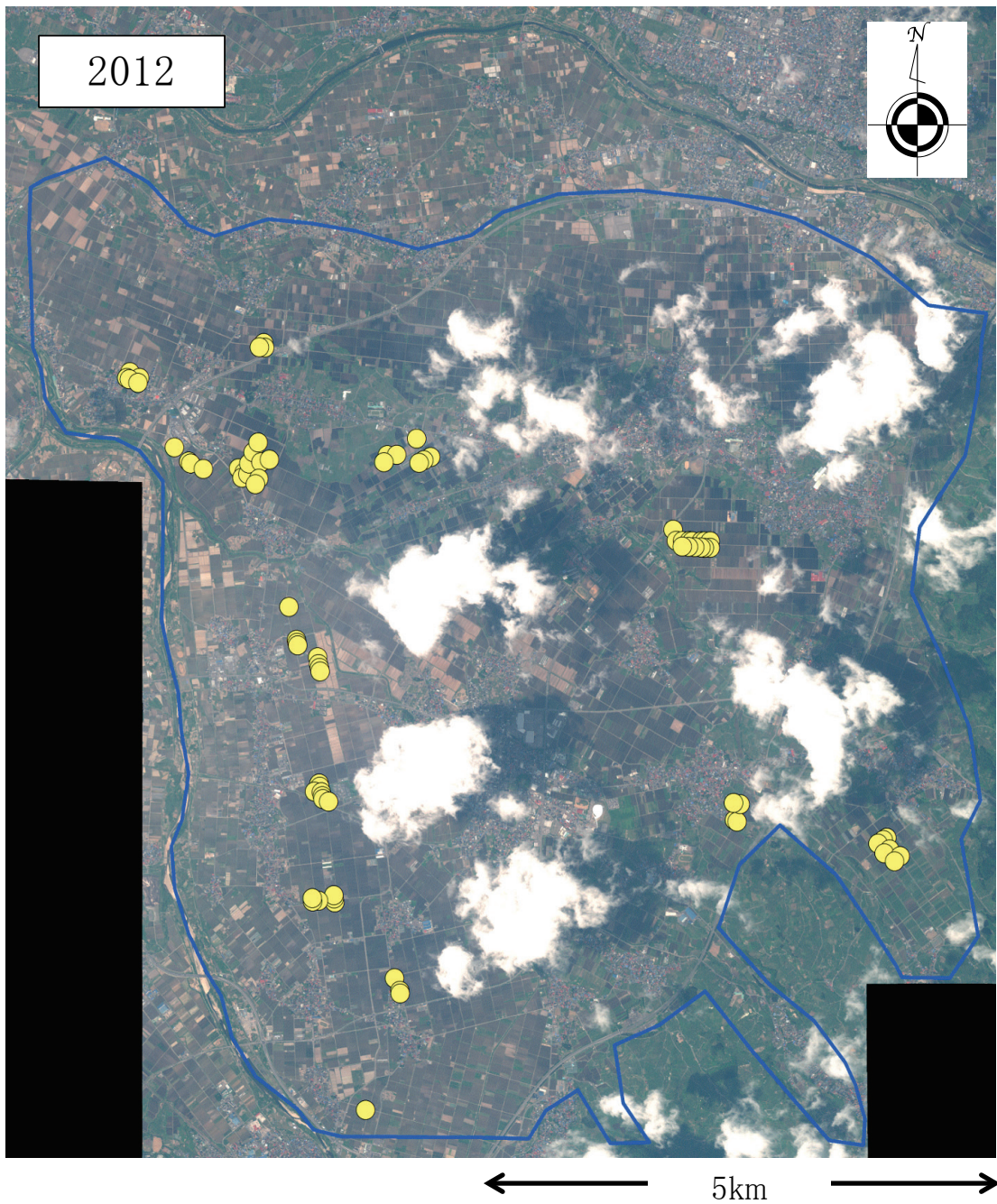


図 5-1 (a) 取得された分光画像 (2012 年)

観測日および観測条件.

2012 年 5 月 24 日 (田植後 3 日頃), 雲量 2,  
衛星 WorldView-2 4 バンド<sup>\*</sup>

青の囲み : 平川市,

黄丸 : 調査地点 (土壌データは 2012 年 11 月に調査)





図 5-1 (b) 取得された分光画像 (2013 年)

観測日および観測条件.

2013 年 5 月 31 日 (田植後 8 日頃), 快晴,  
衛星 QuickBird 4バンド

青の囲み : 平川市,

黄丸 : 調査地点 (土壌データは 2013 年 7 月に調査)



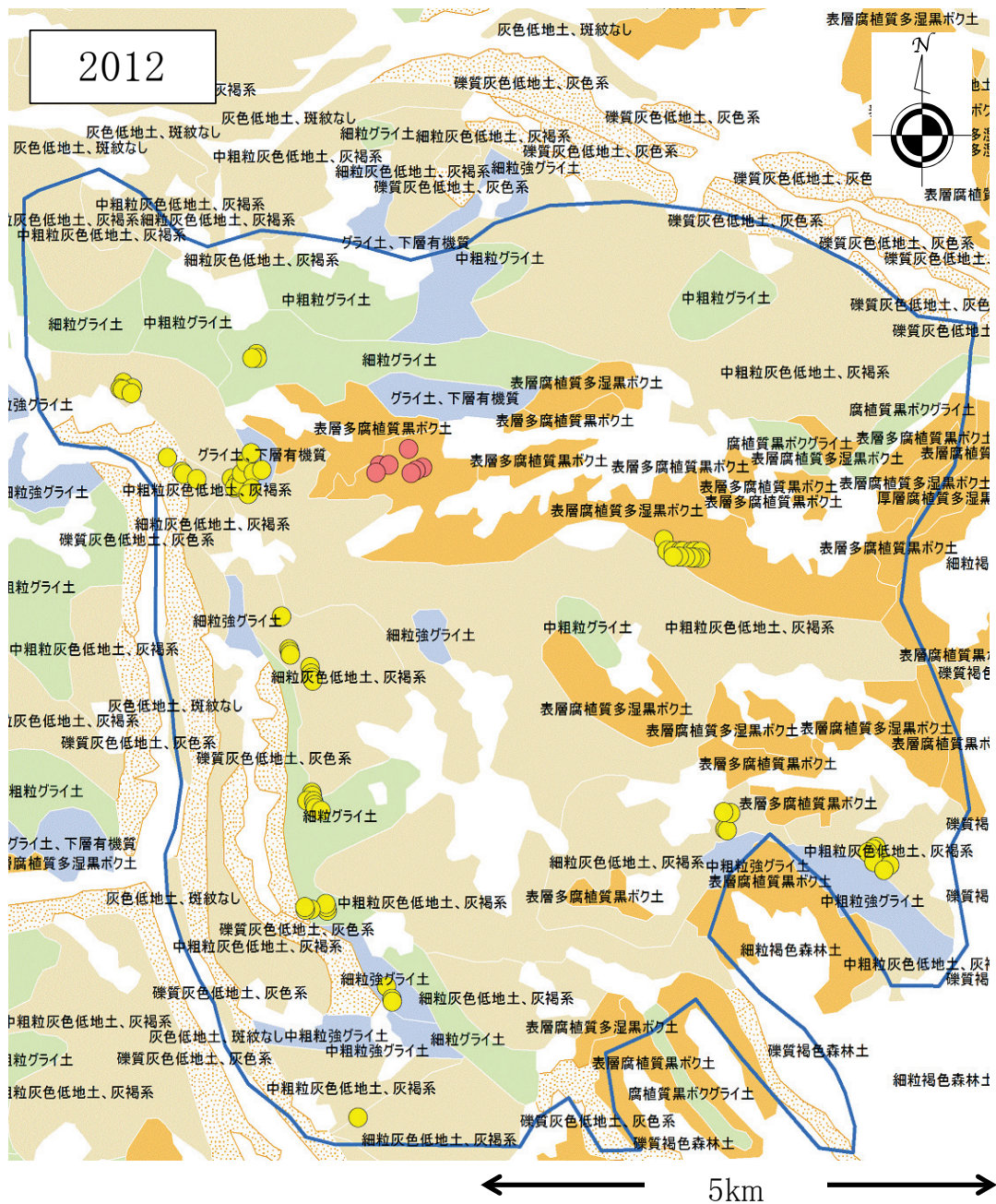


図 5-2 (a) 農耕地土壤図と 2012 年の調査地点

デジタル土壤図 北海道・東北版(2007 年)の  
農耕地土壤分類 2 次案データの土壤統群を基に  
水田土壤タイプの分類を行った

青の囲み：平川市,  
赤丸：図 5-1 (a) 調査地点のうち、腐植含有率 8%以上の地点  
黄丸：図 5-1 (a) 調査地点のうち、腐植含有率 8%未満の地点



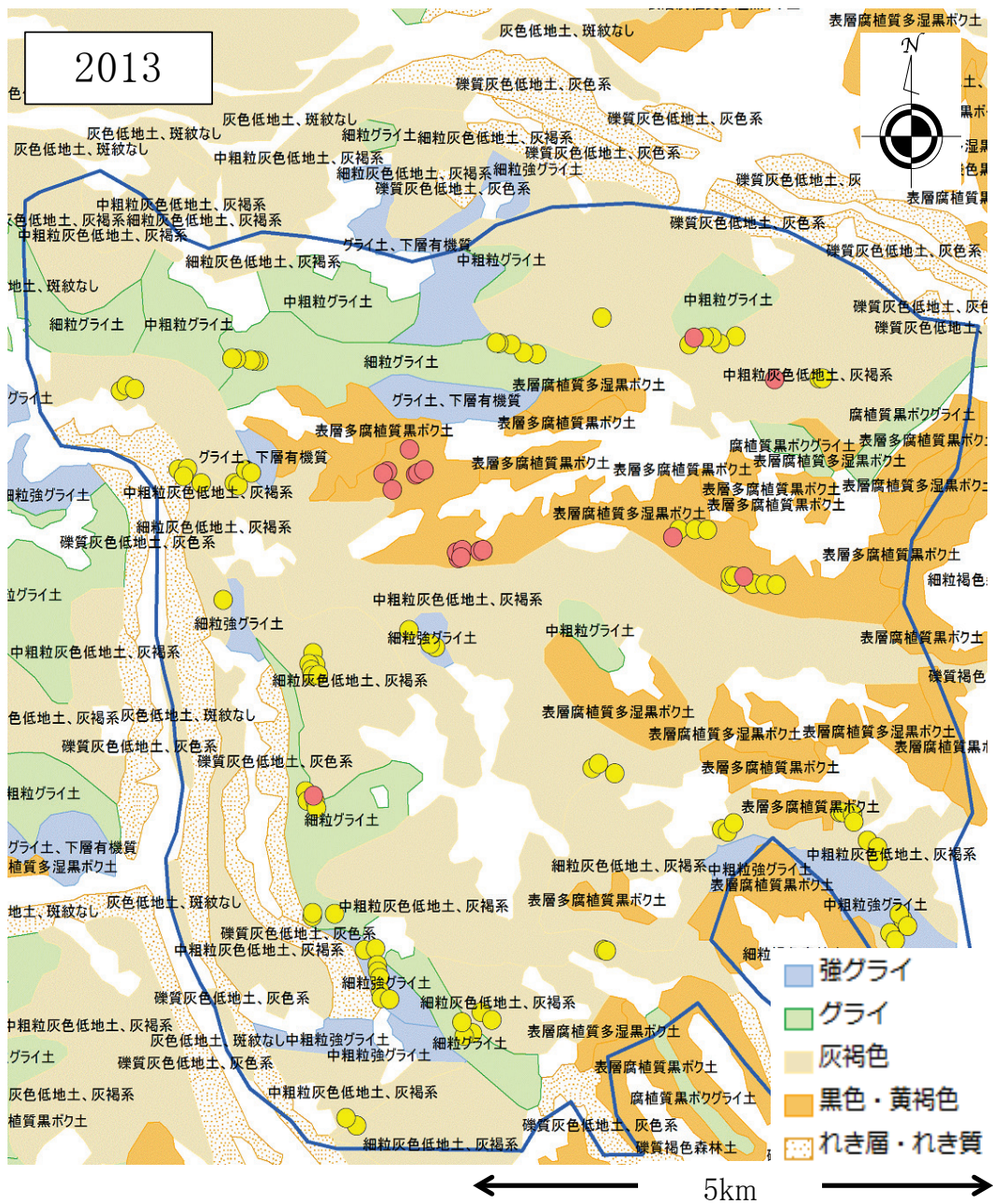


図 5-2 (b) 農耕地土壤図と 2013 年の調査地点

デジタル土壤図 北海道・東北版(2007 年)の  
農耕地土壤分類 2 次案データの土壤統群を基に  
水田土壤タイプの分類を行った

青の囲み：平川市，  
赤丸：図 5-1 (b) 調査地点のうち，腐植含有率 8%以上の地点  
黄丸：図 5-1 (b) 調査地点のうち，腐植含有率 8%未満の地点

## 2.3 解析方法

分光画像データの解析に当たっては、それぞれの波長（以下、単バンドと呼ぶ）の反射率および可視波長域（以下、可視と呼ぶ）と近赤外波長域（以下、近赤外と呼ぶ）の任意の2波長の反射率の組み合わせによる正規化指数を用いた。任意の2波長の組み合わせの手法については、井上ら（2008）による NDSI（Normalized Difference Spectral Index：正規化分光反射指数）を用いた。

$$\text{NDSI}[R_i, R_j] = (R_j - R_i) / (R_j + R_i) \quad (5-1)$$

ここで、 $R_i$  と  $R_j$  はそれぞれ波長  $i\text{nm}$ ,  $j\text{nm}$  の反射率である。したがって、 $i=650\text{nm}$ ,  $j=830\text{nm}$  の場合は Landsat TM の測定波長帯に対応した NDVI（Normalized Difference Vegetation Index：正規化植生指数）に相当する。本研究では、ハイパースペクトルデータの可視の波長を  $i$ 、近赤外の波長を  $j$  として、それぞれの波長の組合せによる決定係数  $r^2$  を求めた。

## 3 反射スペクトルからの土壌腐植含有率の推定

### 3.1 単バンドの反射率と土壌腐植含有率の関係

分光反射率と腐植含有率の間には、いずれの波長でも負の相関がみられた（図省略）。図 5-3 に分光反射率と腐植含有率の関係を示した。2012 年の決定係数 ( $r^2$ ) は、高かった波長順に、赤 0.41、近赤外 0.38、緑 0.20、青は 0.01 で、赤と近赤外で高かった。2013 年は、近赤外 0.55、赤 0.52、緑 0.46、青 0.35 で、順番は近赤外と赤が逆転した以外は同様であったが、波長全般にわたって波長間の差が小さかった。2013 年は青の波長でも比較的決定係数が高かったが、これには QB 衛星の測定波長の半値幅が WV-2 よりも広いことが影響している可能性が考えられる。志賀（1989）らは、田植直後の湛水状態の水田を観測した Landsat 衛星のデータについて、赤の波長と表土の腐植含有率の Log 値との間に密接な関係を報告している。本検討でも、腐植含有率の Log 値は、腐植含有率（%）に比べ、分光反射率との決定係数が 2012 年で最大 0.07 ポイント、2013 年でも最大 0.02 ポイント高まった。

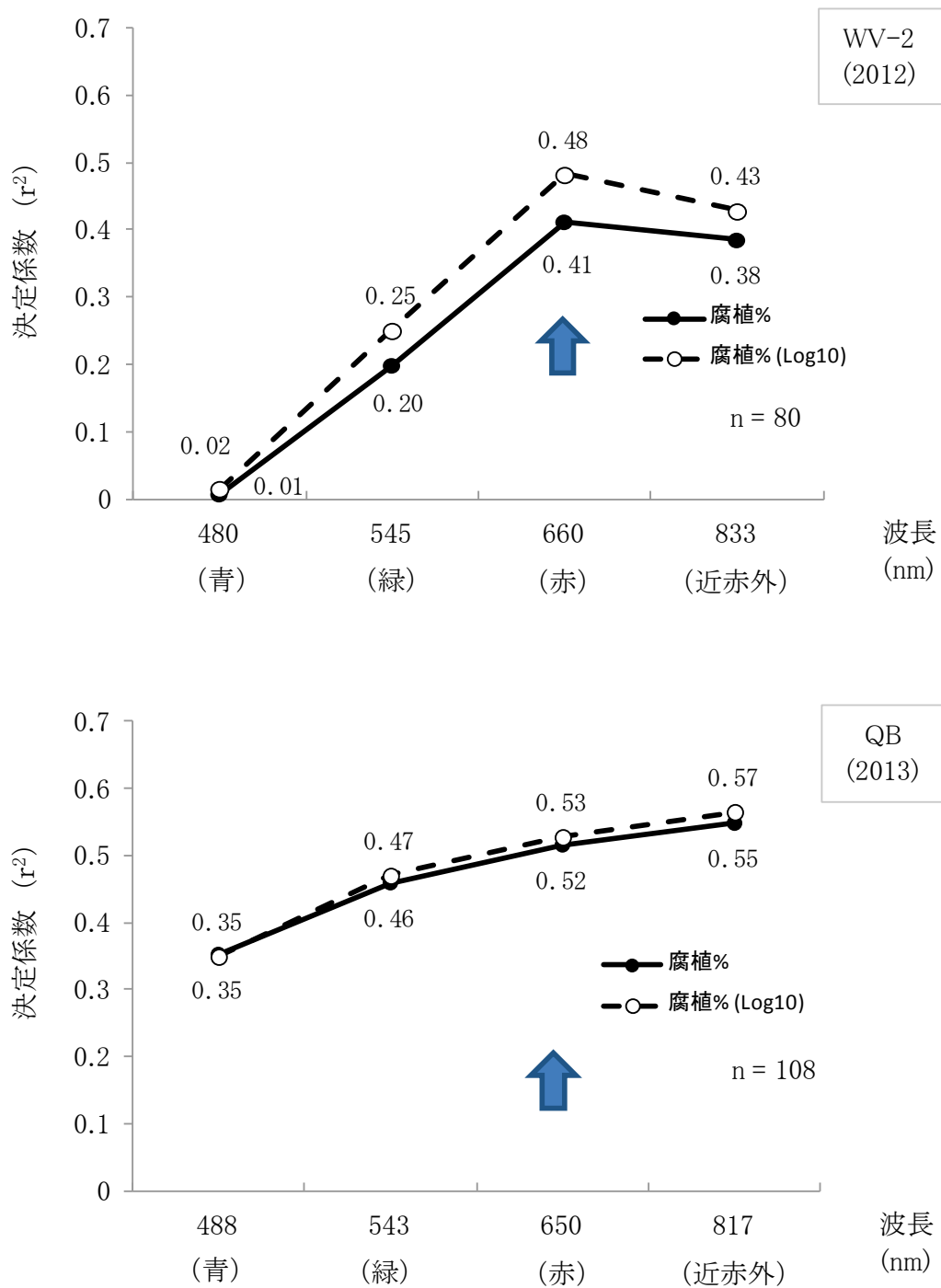


図 5-3 分光反射率と腐植含有率の関係

上段 : WorldView-2 (2012. 5. 24 観測)

下段 : QuickBird (2013. 5. 31 観測)

### 3.2 NDSI 値と土壤腐植含有率の関係

2012年と2013年の両年に共通の傾向として、NDSI値が、青と緑、青と赤、青と近赤外、緑と赤の組合せでは負の相関がみられ、緑と近赤外、赤と近赤外の組み合わせでは相関がほとんどみられないか若しくは正の相関がみられた(図省略)。図5-4に可視と近赤外の組合せによるNDSI値と腐植含有率との関係を示した。決定係数は、両年とも青と赤の組合せが最も高く、2012年は $r^2=0.66$ 、2013年では $r^2=0.68$ で、両年とも単バンドで最も高かった決定係数を上回った。これについては、大気補正プログラムで補正しきれていない大気の影響が、正規化することで軽減されている可能性が考えられる。なお、緑と近赤外、赤と近赤外の組合せでは、2012年よりも2013年の決定係数が明らかに高かった。これはQB衛星とWV-2衛星における測定波長の半値幅の違いや観測時点での田植後日数の違いが影響している可能性が考えられる。また、腐植含有率のLog値については、腐植含有率に比べ決定係数が高まる傾向はみられなかった。



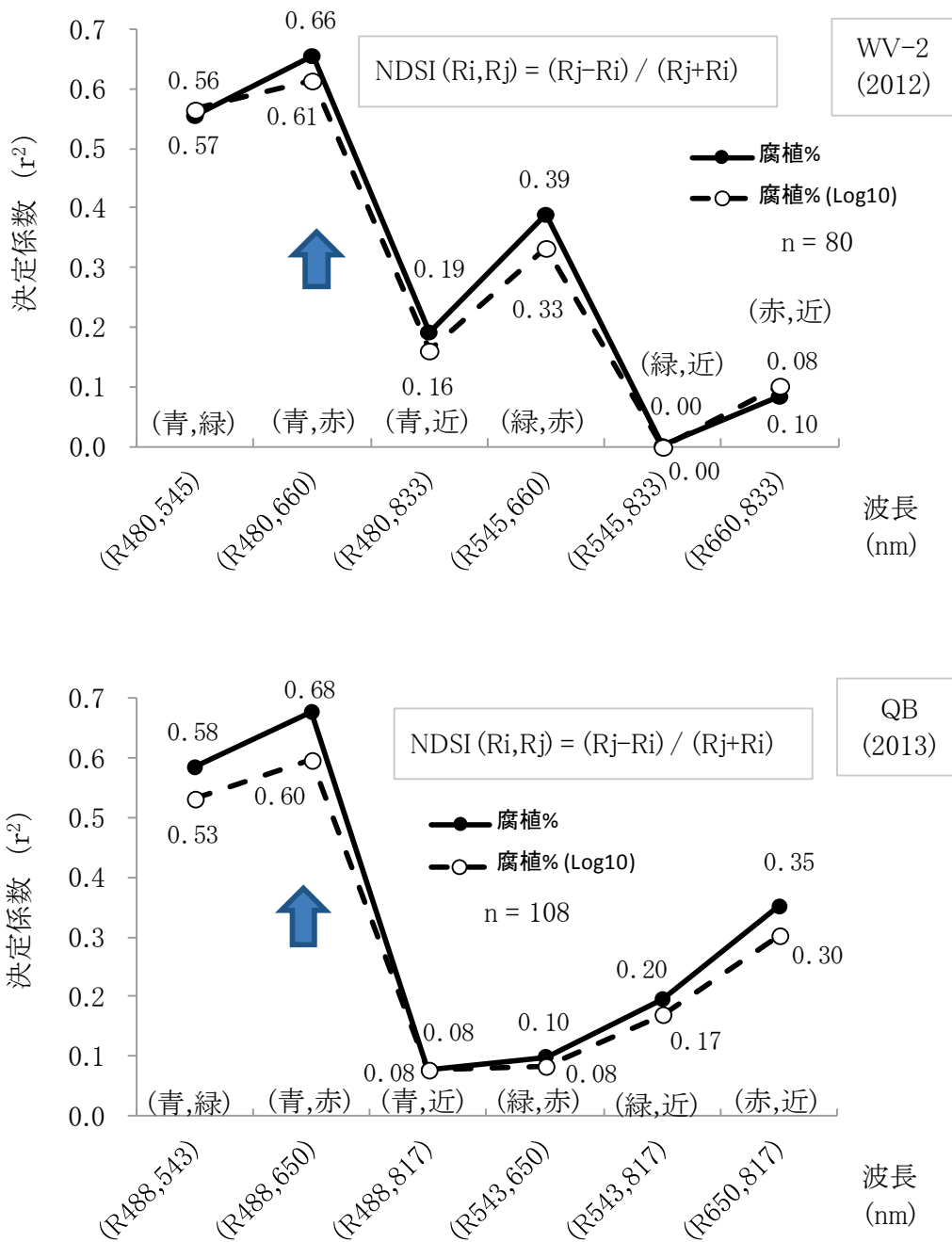


図 5-4 NDSI 値と腐植含有率の関係

上段 : WorldView-2 (2012. 5. 24 観測)

下段 : QuickBird (2013. 5. 31 観測)

### 3.3 土壌別にみた 650nm 付近の反射率と土壌腐植含有率の関係

土壌の腐植含有率は土壌の種類によって大きく異なることが知られている（織田ら 1987）。火山灰土壌である黒ボク土の腐植含有率は、他の土壌種類に比べて高い。これは黒ボク土に含まれる非晶質粘土鉱物のアロフェンやアルミニウム化合物が腐植と結合しやすいとされている（農山漁村文化協会 2004）。農耕地土壌図で分類した黒色・黄褐色の土壌タイプの調査地点では、腐植含有率が 4~18%まで広範に分布した。一般に黒ボク土は腐植含有率が 8%以上であることが多いことから（織田ら 1987），図 5-2 a,b に示した黒色・黄褐色の調査地点のうち、腐植含有率が 8%未満の地点は、実際に土壌調査を行って分類した場合には黒ボク土と分類されない可能性が考えられた。この可能性を踏まえつつ、腐植含有率と分光反射率との関係を検討した。図 5-5 に 650nm 付近の反射率と腐植含有率の関係を土壌別に示した。左側が腐植含有率、右側が腐植含有率の Log 値の場合である。黒色・黄褐色では、両年とも、腐植含有率が 4~18%まで広範に分布した。左側の図に示した腐植含有率と分光反射率の関係は、2012 年では、腐植含有率 13%以上の 7 地点（囲みで示した）が突出しており、腐植含有率が 8~12%の地点がみられなかった。一方、2013 年では調査地点における腐植含有率は、8%以上の地点数がやや少ないものの、ほぼ連続的な分布となった。そのため、本地域の土壌は、連続的な腐植含有率のバラツキをもつが、2012 年については、分光画像に雲や雲影がみられたため調査地域が限定され、採取した土壌に偏りが生じたと考えられる。そこで、2012 年についても、腐植含有率で 8~12%の土壌が得られていないが、2013 年と同様に一次回帰による傾向を検討した。両年とも、腐植含有率で 8%以上の地点は、土壌全体での回帰直線からやや外れ、回帰直線のやや上側に位置した。右側の図に示した腐植含有率を Log 値とした場合では、両年とも、腐植含有率が 8%以上の土壌と 8%未満の土壌との差が縮まり、土壌全体での回帰直線のライン上により近づく傾向があった。このことが、図 5-3 でみられた腐植含有率の Log 値が、腐植含有率よりも分光反射率との決定係数が高まる理由と考えられた。

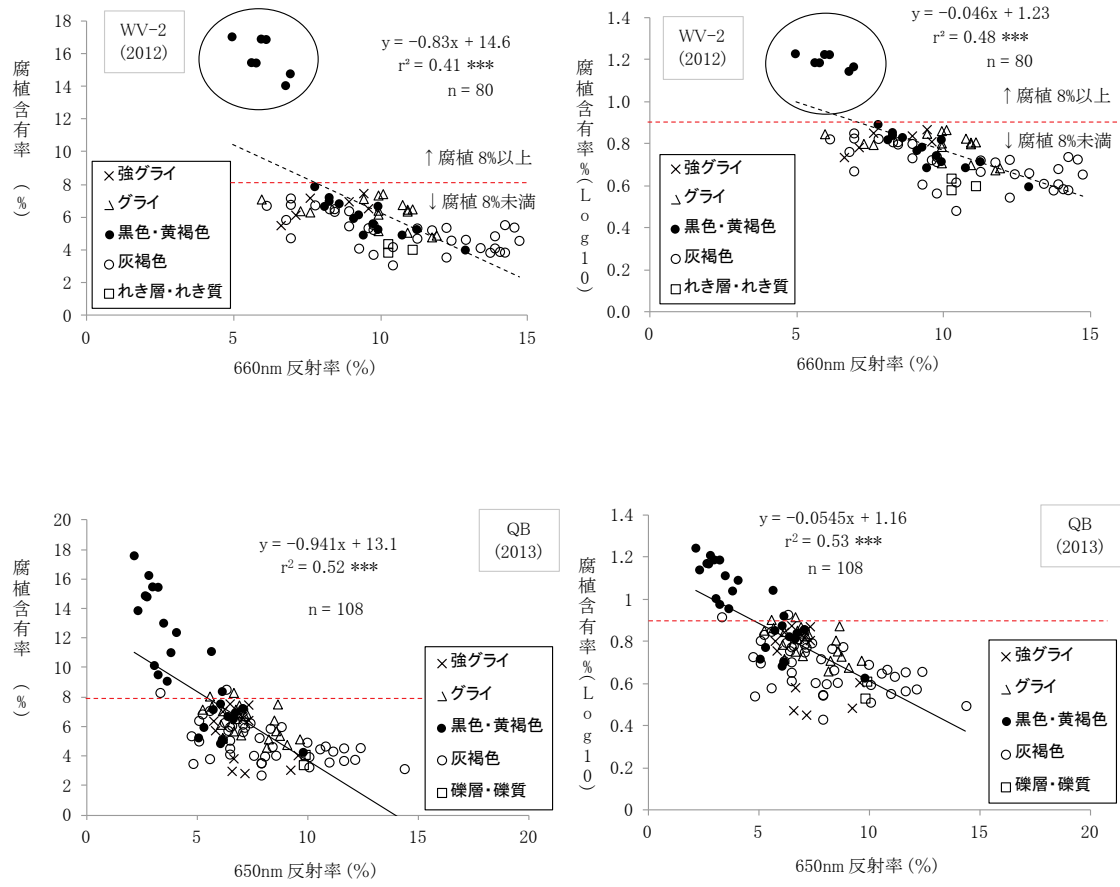


図 5-5 土壤別にみた 650nm 付近の反射率と腐植含有率との関係

上段 : WorldView-2 (2012. 5. 24 観測)

下段 : QuickBird (2013. 5. 31 観測)

\*\*\* : 0.1%水準, \*\* : 1%水準, \* : 5%水準でそれぞれ有意,

n. s. : 有意ではない.

### 3.4 土壌別にみた NDSI 値と土壌腐植含有率の関係

図 5-6 に可視と近赤外の組合せによる NDSI 値と腐植含有率の関係を土壌別に示した。左側が腐植含有率、右側が腐植含有率の Log 値での場合である。左側の図に示した NDSI 値と腐植含有率との関係は、図 5-5 の 650nm 付近の分光反射率の場合と比較して、腐植含有率が 8%以上の土壌と 8%未満の土壌との差がさらに拡大した。NDSI 値では、腐植含有率が 8%以上の土壌と 8%未満の土壌をより明確に区別することが可能と考えられるが、腐植含有率 8%未満の土壌では地点間での変異がむしろ小さくなる傾向があった。右側の図に示した腐植含有率を Log 値とした場合では、土壌間の差が縮まることで、腐植含有率よりも決定係数がむしろ低下した。これは図 5-5 の 650nm 付近の分光反射率の場合とは逆の傾向となっている。

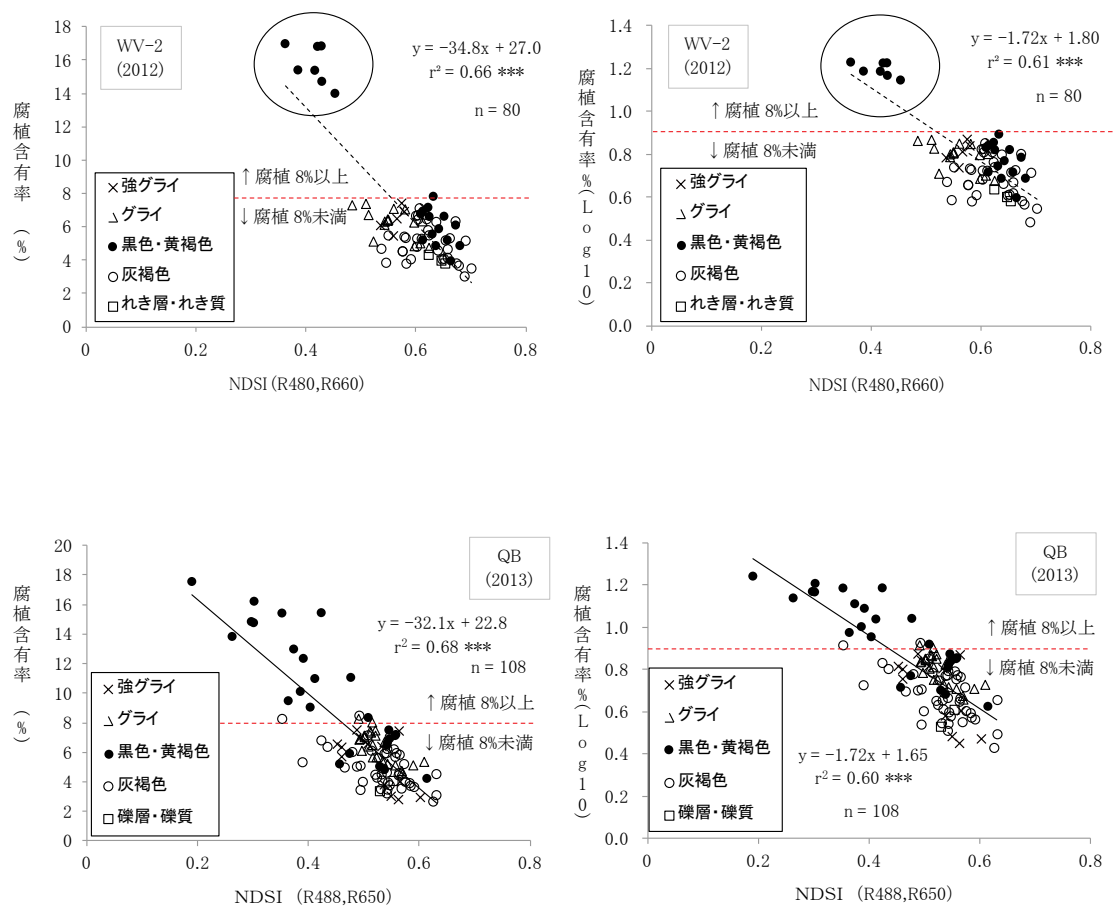


図 5-6 土壤別にみた NDSI 値と腐植含有率との関係

上段 : WorldView-2 (2012. 5. 24 観測)

下段 : QuickBird (2013. 5. 31 観測)

\*\*\* : 0.1%水準, \*\* : 1%水準, \* : 5%水準でそれぞれ有意,

n. s. : 有意ではない.

#### 4 土壤腐植含有率と可給態窒素量の関係

図 5-7 に腐植含有率と可給態窒素量の関係を示した。2012 年は、土壤採取地域に偏りが生じた影響で、腐植含有率が 13%以上と 8%未満の二つのグループに分かれたが、腐植含有率が高いグループでは可給態窒素量も多く、腐植含有率が低いグループでは可給態窒素量が少ない傾向があった。腐植含有率が連続的に分布している 2013 年でも、腐植含有率と可給態窒素量の関係は 2012 年と同様の傾向で、腐植含有率と可給態窒素量との回帰式は、指数回帰の当てはまりが良かった。これは、土壤の腐植は、微生物によって容易に分解・利用される栄養腐植と難分解性の耐久腐植に区分されるが、黒ボク土では他の土壤タイプよりも耐久腐植の割合が多い傾向が知られており（農産漁村文化協会 2004）、腐植含有率の高い土壤である黒ボク土では、腐植含有率当たりで比較すると可給態窒素量が少なくなるためと考えられる。このように、腐植含有率と可給態窒素量の関係については、土壤タイプや腐植含有率のレベルによって腐植含有率当たりの可給態窒素量が変動する。よって、可給態窒素量の推定に当たっては、土壤タイプごとの推定式の作成または腐植含有率のレベルに応じた窒素発現量の違いを反映できる指数回帰等による推定が有効と考えられた。

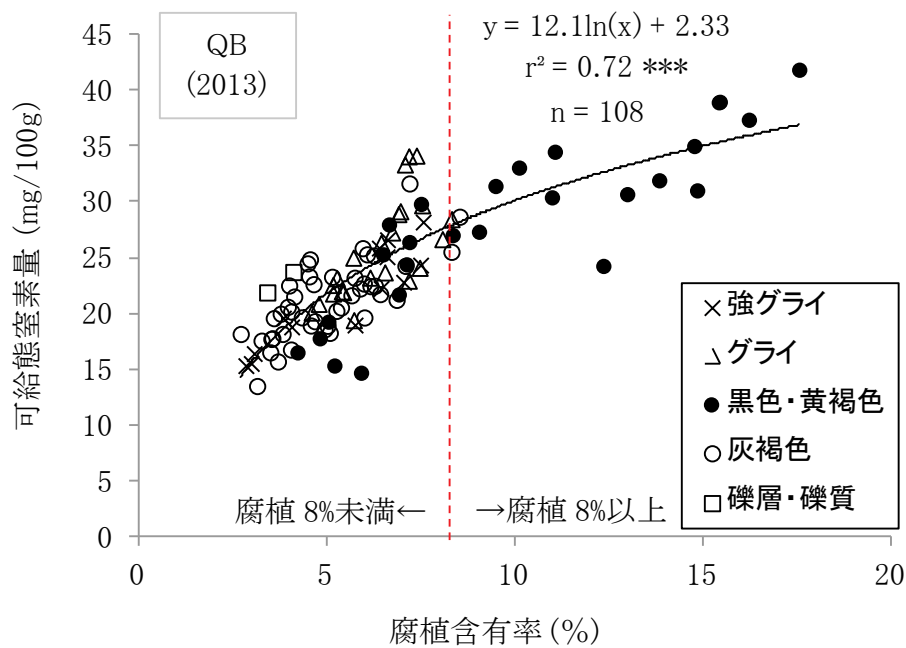
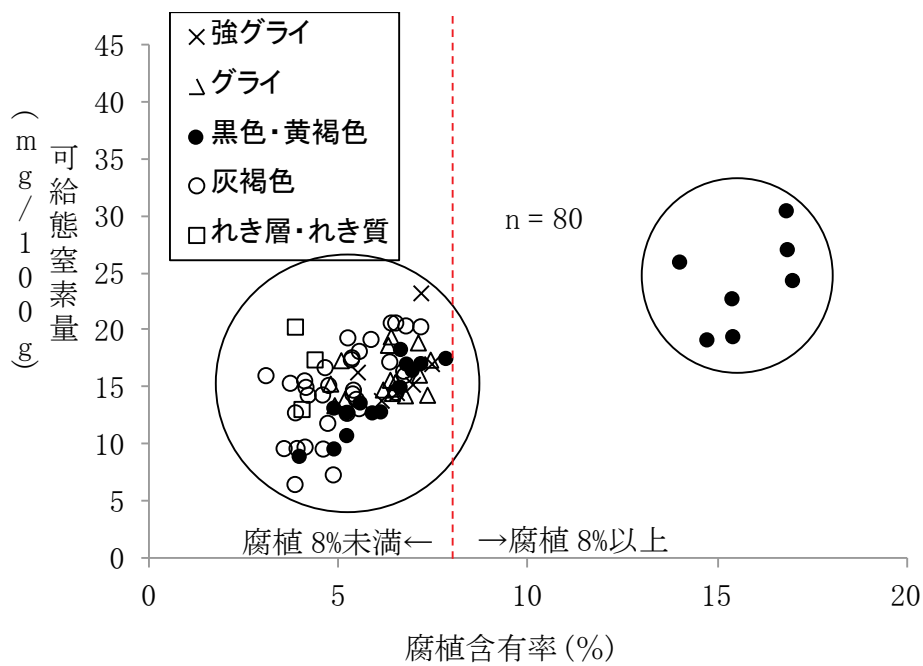


図 5-7 土壤別にみた腐植含有率と可給態窒素量との関係

上段 : WorldView-2 (2012. 5. 24 観測)

下段 : QuickBird (2013. 5. 31 観測)

\*\*\* : 0.1%水準, \*\* : 1%水準, \* : 5%水準でそれぞれ有意,

n. s. : 有意ではない.

## 5 まとめ

単バンドで比較した分光反射率と腐植含有率との決定係数は、赤と近赤外で高かった。また、腐植含有率を Log 値に変換することによって、分光反射率との決定係数が 2012 年で最大 0.07 ポイント、2013 年でも最大 0.02 ポイント高まった。650nm 付近の分光反射率と腐植含有率との関係を散布図とした場合、腐植含有率が 8%以上の地点では、全地点による回帰直線の傾向からやや外れた位置にあったが、腐植含有率を Log 値とすることで、全地点での回帰直線の傾向により近づいた。このことが、Log 値とした場合に分光反射率との決定係数が高まる理由と考えられた。

NDSI 値と腐植含有率の決定係数は、両年とも青と赤の組合せが最も高く、単バンドで最も高かった決定係数をさらに上回った。なお、NDSI 値と腐植含有率の Log 値との関係については、腐植含有率の場合以上に決定係数が高まる傾向はみられなかった。

腐植含有率と可給態窒素量の関係は、指数回帰の当てはまりが良く、決定係数で  $r^2=0.72$  の密接な関係が認められた。指数回帰となるのは、腐植物質の内容が黒ボク土では耐久腐植が多いためと考えられる。可給態窒素量は、腐植物質の量だけではなく、腐植物質の種類でも変動すると推察されることから、可給態窒素量の推定に当たっては、土壌タイプごとの推定式の作成または腐植含有率のレベルに応じた窒素発現量の違いを反映できる指数回帰等による推定が有効と考えられた。



## 第6章 リモートセンシングによる生育診断指標の推定

### 1 はじめに

玄米のタンパク質含有率（以下、タンパクと呼ぶ）は、出穂前10日以降の生育後半の窒素栄養条件が強く関係することが知られており（古土ら 1991, 宮田ら 1991）、追肥量や追肥時期の影響が大きい（境谷ら 1998）。外観品質についても、白未熟粒や充実不足の米の発生は窒素栄養との関連（金田・進藤 2000, 佐藤 2001）や玄米タンパクとの関連（近藤ら 2006）が報告されている。土壌窒素の発現量は土壌の乾燥程度や地温の影響から年次により異なる。稲が吸収する窒素の6~7割は土壌由来であり、土壌窒素に対応した施肥が必要となる。第3章で作成したタンパクマップからも生育後半に供給された窒素量が多かったか少なかったかの判断はおよそ可能で、翌年の稲作の参考にすることは必要であるが、前年の結果だけで本年度の追肥量を判断するのは困難である。追肥前の稲の生育や窒素栄養状況に応じた追肥量や追肥時期の判断が必要である。植物の生育には窒素条件が最も大きく影響することから、生育診断（栄養診断）では、稲の窒素栄養状態の把握が基本となる。しかし、窒素含有率や面積当たり窒素含有量を直接測定することは、迅速性・経済性の面で実用的ではない。そこで、窒素栄養条件の多少を間接的に判断するため、葉色のカラスケールによる判定や葉緑素濃度の測定、株周、稲の真上から測定した近赤外光の反射率など多くの手法が提案されてきた（松崎ら 1980, 金田ら 1986, 宮下ら 1988, 斉藤ら 1991, 石田ら 2003）。葉緑素濃度の指標である葉色値は、葉面積当たり窒素含有量と密接な関係を持ち（稲田 1965）、葉身の乾物当たり窒素含有率とも関係性が高いことから（中鉢ら 1986）、稲の窒素栄養状態の診断に広く活用されている（真鍋ら 1983, 宮下ら 1986, 多田ら 1993, 葉上ら 2007）。葉色値は葉緑素計を用いて非破壊で迅速な測定が可能であるものの、機器が高価であることから所有する農家はほとんどいない。農協や県の農業普及振興室では機器を所有しているものの、人員や時間的制約から、指導員だけで産地がかかえる多数圃場の測定は不可能である。

衛星や航空機から観測を行うリモートセンシングは、広域を対象とした情報計測にきわめて有力であり、農業分野においても多様な応用の可能性が示されてきた（Moran *et al.* 1997,

井上 1997, Inoue et al. 2012, Inoue and Sakaiya 2013)。近年, 多様な信号を取得できるセンサが運用され, かつ空間解像度が飛躍的に向上したことから, 我が国においても農業利用の実用化を進める環境が整ってきた(井上 2011)。すなわち, リモートセンシングや GIS による空間情報技術を農業生産現場にも実践的に活用することが可能となってきた。リモートセンシングによって生育診断指標の推定が可能となれば, 既存の生育診断基準を活用して, 地域全体の圃場を生育診断できる可能性がある。圃場一筆ごとの生育診断が可能になれば, 米のタンパクや外観品質, 収量性について, 産地レベルでより安定した米の生産が期待できる。

そこで, 本章では, 航空機ハイパースペクトルによる観測データを用いて, リモートセンシングで生育診断指標を推定するに当たっての誤差要因とその特徴を明らかにするための検討を行った。

## 2 試験方法

### 2.1 航空機センサによる分光画像の取得

分光画像は, 2006年~2007年の2か年にわたって, 航空機搭載センサ CASI-3 (Itres Research Ltd.) を中日本航空 C208 に搭載し, 青森県津軽中央地域(平川市および黒石市)の 100~130km<sup>2</sup>を対象として取得した(図 6-1 a,b)。2006年は7月14日から, 2007年は7月3日から近隣の青森空港に航空機を待機させ観測態勢に入り, 雲の少ない良好な天候の日を待って観測を行った。観測は南北方向とし, 最も西側を1コース目, 最も東側を10コース目とする計10コースに分けて行った。本研究で用いた図 6-1 a,b の分光画像が取得できた観測日は, 2006年が7月20日(稲の生育ステージは平川市の調査地点の平均で幼穂形成期後5日), 2007年が7月7日(幼穂形成期前日)である。2006年の観測時の雲量は2~3であったが, コース5~10観測後に下層雲が多くなり, コース1~4については観測を取りやめた。そこで, 観測できたコース5~10について, コース間で重複した画像のうち雲の少ない部分を接合して全体の画像とした。2007年は, 観測時に雲や薄雲は全くみられず, 快晴条件での観測となった。本センサは観測バンド数最大288, 平均バンド幅2.2nm, 平均SNR 480:1, ダイナミックレンジ14bitである。本観測におけるセンサの波長は, 2006年; 410

～1070nm, 2007年; 410～1071nmの範囲で, いずれの年次も波長間隔約20nm, 半値幅約20nmの34バンドの設定でデータを取得した。観測高度は約3000m, 地上解像度約1.5mであった。観測画角は38°, コース間重複約45%とし, ほぼ直下(±10°)の画像範囲から地上調査地点の分光反射率を抽出した。なお, センサでの観測データはあらかじめ測定しておいた輝度変換テーブルに基づいて分光放射輝度値に変換した。さらに, 大気中での散乱・吸収の影響を取り除くため, 分光放射輝度値を大気補正し, 分光反射率に変換した。大気補正の方法は, 2006年は航空機データ用の大気補正ツールATCOR4(Guanter *et al.* 2006)を使用し, 補正条件は地形モデルFlat, 大気条件Rural, 飛行高度3000m, ヘイズ補正なしであった。2007年は, 分光測定器(FieldSpec HandHeld, ASD)を用いてアスファルトや砂地など分光反射率の低い地物～高い地物について地上で分光反射率を測定し, これと航空機で観測された同一地物の分光放射輝度値との関係から, 波長別に回帰式を作成して分光画像全体を変換した。画像の位置を既存の地図と合致させるための幾何補正については, 航空機位置姿勢情報と地形標高モデルならびにENVI4.8を使用して行った。

## 2.2 地上調査

調査地域は, 平川市の一般水田(以下, 平川市と呼ぶ)と同市に隣接した黒石市の青森県産業技術センターの水田(以下, 試験場と呼ぶ)を対象とした。図6-1a,bに, 平川市を青の囲み(水田以外の地物を含め約6000ha), 試験場を赤の囲み(同約89ha)で示した。用いた調査地点は, 分光画像に雲や雲影がみられた地点を除き, 2006年, 2007年の順に, 平川市では22, 53地点(図6-1 a,bに青丸で地点位置を示した), 試験場では20, 20地点である。なお, 試験場の調査地点は, 区画がいずれも2a(10m×20m)の圃場で, 隣接した位置にある。調査位置の同定には, リアルタイムキネマテックGPS(NetSurv2000)と圃場枠からの実測距離を併用した。品種は「つがるロマン」である。本地域での栽培品種は, 「つがるロマン」が大部分を占めている。土壌タイプは, 試験場では全地点ともグライ土で, 土色も同一である。平川市では灰色低地土, グライ土, 強グライ土, 黒ボク土など広範な土壌が分布し, 土色も茶(灰褐色)～黒色まで幅広く変異が大きい。分光画像取得時の水田の湛水状況は, 試験場では両年とも落水条件下(中干し)であった。平川市では2006年は調査地点の約4割が落水条件下, 約6割が湛水条件下で条件が混在した。2007年は全地点とも落水条件下であった。

試験場での試験区の構成は、2006年では基肥施肥量が窒素成分で3~11kg/10a、追肥施肥量が2kg/10a、栽植密度は70~80株/3.3m<sup>2</sup>、田植日は5月18日、5月25日であった。2007年では基肥施肥量が窒素成分で3~8kg/10a、追肥施肥量が1.5kg/10a、栽植密度は50~90株/3.3m<sup>2</sup>、田植日は5月10日、5月17日、5月24日であった。栽植密度および田植日は現場の状況に近づけるため数段階の幅を設定し、基肥施肥量は現場であり得る極端な状況を想定して、少肥~かなり多肥の段階まで大幅な設定とした。

調査方法に関して、稲の生育調査は、株の最長茎を対象に、葉色値は完全展開最上位葉の葉色を葉緑素計（SPAD-502、コニカミノルタセンシング）で測定し、草丈は地際より最長葉の先端までの長さを計測した。なお、葉色値は個葉の葉面積当たりの葉緑素含量の指標値である。茎数は株当たりの茎数を調査し、これに栽植密度をかけてm<sup>2</sup>当たり茎数とした。また、これらから生育量（草丈×m<sup>2</sup>当たり茎数）を算出した。地点当たりの調査数は20~30株とした。栽植密度は実測で求め、田面水の湛水の有無は目視で判定した。土壌の色は、黒色程度に応じて茶~こげ茶~黒の範囲を5段階に色分けした自作の土色帳を基に土壌表面の色を現場で分類した。図6-2に本調査での土壌の色の分類事例を示した。稲の窒素含量はケルダール法で分析した。

調査時期は、試験場では分光画像の取得と同日に行った。ただし、2006年の窒素および乾物重の調査については画像取得の6日前となった。平川市では2006年は分光画像の取得の翌日、2007年は同日に行った。

## 2.3 解析方法

生育診断では、稲の窒素含有率や窒素含有量などの窒素栄養状態の把握が基本となる。しかし、稲の窒素量を直接測定することは、迅速性に欠け、経済性からも実用的ではない。そのため、窒素含有率や窒素含有量と関係の深い、葉色値や生育量、葉色値×生育量を生育診断指標として、追肥時期や追肥量を決定するための診断が行われている（真鍋ら 1983、宮下ら 1986、多田ら 1993、葉上ら 2007）。よって、稲の窒素栄養状態や生育診断指標を分光画像データから推定できれば、広域での生育診断が可能となる。そこで、稲の窒素含有率および窒素含有量、生育診断指標について、反射スペクトルとの関係を解析した。

分光画像の解析に当たっては、それぞれの波長（以下、単バンドと呼ぶ）の反射率およ

び可視波長域（以下，可視と呼ぶ）と近赤外波長域（以下，近赤外と呼ぶ）の任意の2波長の反射率の組み合わせによる正規化指数を用いた。任意の2波長の組み合わせの手法については，井上ら（2008）による NDSI（Normalized Difference Spectral Index；正規化分光反射指数）を用いた。

$$\text{NDSI}[R_i, R_j] = (R_j - R_i) / (R_j + R_i) \quad (6-1)$$

ここで， $R_i$  と  $R_j$  はそれぞれ波長  $i\text{nm}$ ,  $j\text{nm}$  の反射率である。したがって， $i=650\text{nm}$ ,  $j=830\text{nm}$  の場合は Landsat の測定波長帯に対応した NDVI（Normalized Difference Vegetation Index；正規化植生指数）に相当する。本研究では，ハイパースペクトルデータの可視の波長を  $i$ ，近赤外の波長を  $j$  とし，それぞれの波長の組合せによる決定係数  $r^2$  を求めた。

また，背景土壌の種類の違いの除去を目的に，Huete（1988）による SAVI（Soil Adjusted Vegetation Index）を用いた可視と近赤外の任意の2波長の反射率の組み合わせによる正規化指数を検討した。

$$\text{SAVI}[R_i, R_j] = (1+L) \times (R_j - R_i) / (R_j + R_i + L) \quad L: \text{補正係数} (L=0.5) \quad (6-2)$$

ここで， $R_i$  と  $R_j$  はそれぞれ波長  $i\text{nm}$ ,  $j\text{nm}$  の反射率である。L は補正係数で，0.5 を用いた。ハイパースペクトルデータの可視の波長を  $i$ ，近赤外の波長を  $j$  とし，それぞれの波長の組合せによる決定係数  $r^2$  を求めた。



図 6-1(a) 取得された分光画像 (2006 年)

観測日および観測条件

2006 年 7 月 20 日(幼穂形成期後 5 日), 晴れ (雲量 2~3)

青の囲み ; 平川市, 赤の囲み ; 試験場

緑の網かけは, 天候により観測を取りやめた地域





図 6-1 (b) 取得された分光画像 (2007 年)

観測日および観測条件

2007 年 7 月 7 日(幼穂形成期前日), 快晴 (雲量 0)

青の囲み ; 平川市, 赤の囲み ; 試験場



土壌の色：2（茶～こげ茶）  
【灰色低地土】



土壌の色：5（黒）  
【黒ボク土】

図 6-2 土壌の色の分類例



### 3 試験場内の水田における生育診断指標の推定

#### 3.1 湛水条件・土壌条件がともに一定の場合の特徴

##### 1) 稲体の窒素含量と反射スペクトルの関係

稲の窒素栄養状況と反射スペクトルとの関係について、土壌および湛水条件を一定とした条件下で、2か年にわたり検討した。図 6-3 に単バンドでの決定係数の推移を示した。稲体の窒素含有率における決定係数は、兩年を通じて、可視では最高  $r^2=0.2$  前後、近赤外でも  $r^2=0.3$  前後で低かった。葉色値は、葉面積当たり窒素含有量と密接な関係を持ち(稲田 1965)、葉身の乾物当たり窒素含有率とも関係性が高いことが知られている(中鉢ら 1986)。また、稲田(1985)は 530nm~630nm の範囲と近赤外の比が単位葉面積当たりの葉緑素含有量との間に高い相関を認めていることから、稲の窒素含有率と反射スペクトルとの間には本来は密接な関係がある。本研究で窒素含有率との決定係数が低いのは、この幼穂形成期頃の稲の植被率が 60%前後(40~75%程度)である(図省略)ことから、土壌に対する稲の被度がまだ小さく、同じ画素内に稲と土壌が混在するミクセルとなっている影響と考えられる。背景となる土壌の色が同じであっても、稲の繁茂程度が地点によって大きく異なるために、稲の重量当たりで評価される窒素含有率と上空から測定した単位土地面積当たりの反射スペクトルの情報との間に、傾向の違いが生じることが原因と考えられる。

稲の乾物重 ( $\text{g/m}^2$ ) における決定係数は、兩年を通じて、近赤外ではいずれの波長も一定して  $r^2=0.75\sim 0.85$  と非常に高かった。稲をはじめ植物の反射スペクトルは、近赤外で極めて高い反射を示すことに加え、乾物重は単位土地面積当たりで測定したものであり、反射スペクトルの情報も単位土地面積当たりで評価されることから傾向が一致するためと考えられる。

稲の窒素含有量における決定係数は、兩年を通じて、近赤外ではいずれの波長も一定して  $r^2=0.85\sim 0.90$  と非常に高く、乾物重の場合よりやや高い傾向があった。窒素含有量 ( $\text{g/m}^2$ ) は、窒素含有率 (%)  $\times$  乾物重 ( $\text{g/m}^2$ ) で算出されるが、決定係数の推移は乾物重と近似しており、ほぼ乾物重の傾向が反映されている。

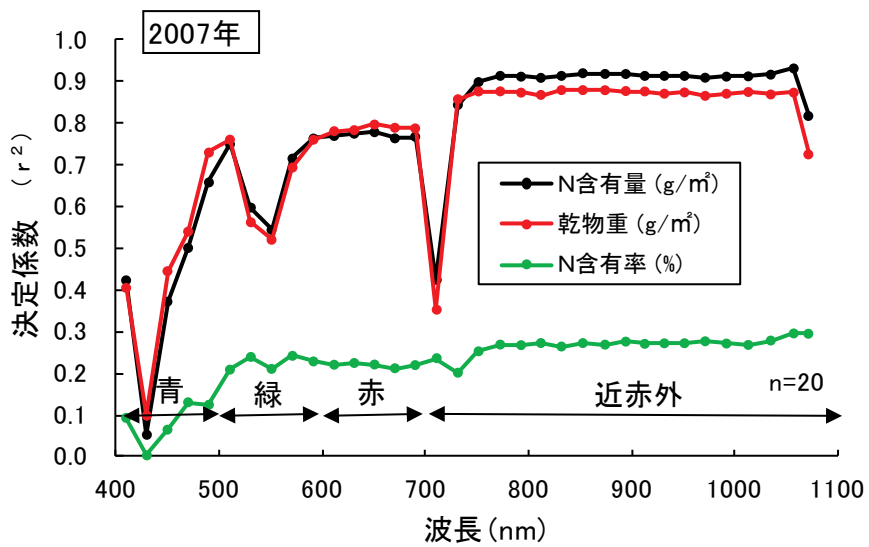
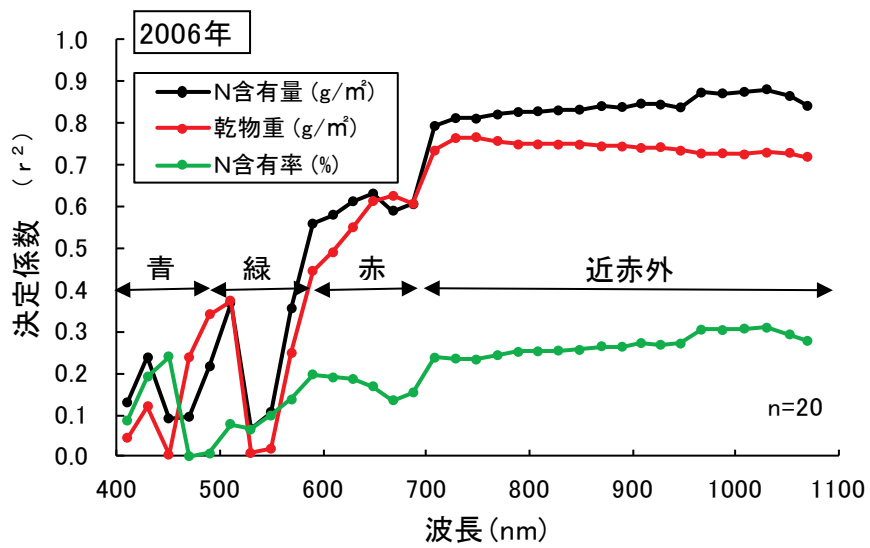


図 6-3 稲体の窒素含量と反射スペクトルの関係 ( $r^2$ ) (試験場)

【土壌条件；一定，湛水条件；一定（落水）】

上段 2006年 調査日 7/14 (観測日 7/20)

下段 2007年 調査日 7/ 7 (観測日 7/ 7)

## 2) 生育診断指標と反射スペクトルの関係

生育診断指標と反射スペクトルとの関係について、土壌および湛水条件を一定とする条件下で、2か年にわたり検討した。図 6-4 に単バンドでの決定係数の推移を示した。生育診断指標については、葉色値は稲体の窒素含有率、生育量は乾物重、生育量×葉色値は窒素含有量を代用する指標として用いられる。葉色値、乾物重、生育量×葉色値における推移の傾向は、図 6-3 の窒素含有率、乾物重、窒素含有量の傾向とそれぞれよく対応していた。また、決定係数の高さは、葉色値では可視で  $r^2=0.45$  前後、近赤外で  $r^2=0.40$  前後であり、窒素含有率の場合に比べそれぞれ 0.2 ポイント、0.1 ポイント程度高かった。これは葉緑素の情報が反射スペクトルに反映されやすいことによる。また、生育量では近赤外において  $r^2=0.93$  程度で乾物重の場合に比べ 0.05 ポイント程度高く、生育量×葉色値では近赤外において  $r^2=0.95$  程度で窒素含有量の場合に比べ 0.05 ポイント程度高かった。いずれの生育診断指標とも、窒素栄養状況を直接測定した項目（稲体の窒素含有率、乾物重、窒素含有量）に比べ、決定係数がやや高かった。

以上より、土壌および湛水条件が一定の条件下では、近赤外の波長で生育量および生育量×葉色値の状況を精度よく推定できる可能性があると考えられた。しかし、葉色値については、この時期の稲の被覆割合の変異が大きいことから、高い精度での推定は困難と考えられた。都道府県の農業試験場では、窒素栄養状況と生育診断指標の両方の基準を策定している場合（秋田県農林水産部 2013）と、生育診断指標の基準だけを策定している場合（青森県 2011）の2通りある。反射スペクトルとの関係は生育診断指標の方がより密接であり、生育診断指標による基準はいずれの都道府県においても策定済みであることから、多くの県で既存の生育診断基準を活用した診断が期待できると考えられた。

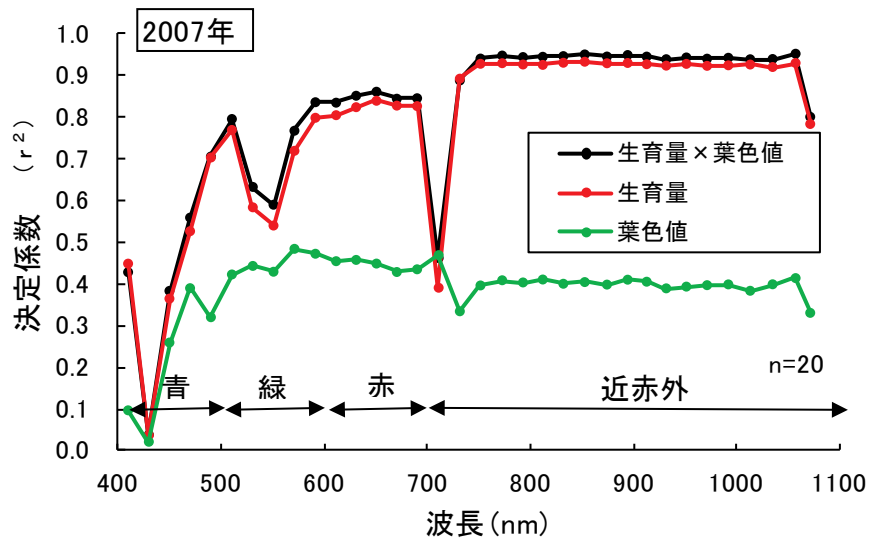
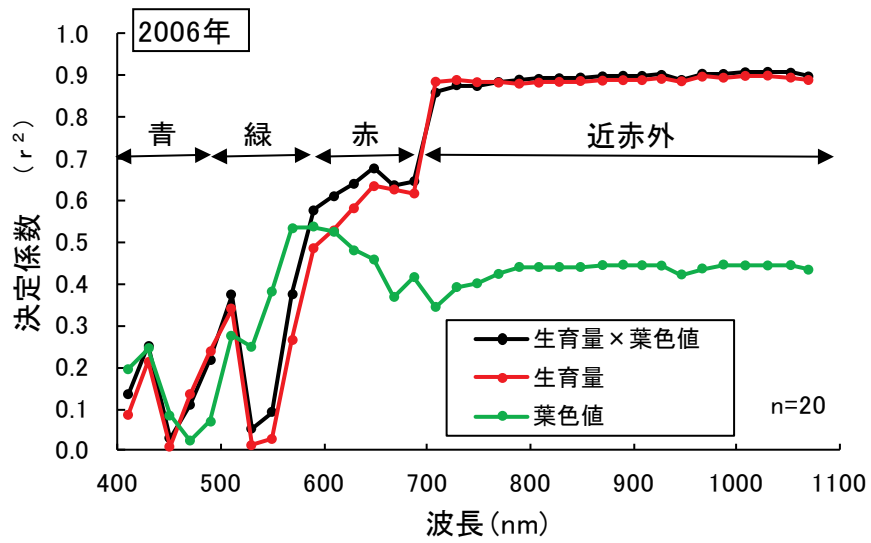


図 6-4 生育診断指標と反射スペクトルの関係 ( $r^2$ ) (試験場)

【土壌条件；一定，湛水条件；一定（落水）】

上段 2006年 調査日 7/20 (観測日 7/20)

下段 2007年 調査日 7/ 7 (観測日 7/ 7)



## 4 現地的一般水田における生育診断指標の推定

### 4.1 湛水条件・土壌条件がどちらも一定でない場合の特徴

湛水条件・土壌条件を一定とした条件下においては、生育量×葉色値は反射スペクトルとの決定係数が最も高かった。そこで、2006年に平川市で、生育量×葉色値および圃場の湛水・土壌条件と反射スペクトルの関係を検討した。2006年は7月20日に航空機で観測を行ったが、中干しを行っている落水圃場と行っていない湛水圃場が混在した条件下となった。つまり、湛水条件・土壌条件がどちらも一定でない条件下での検討である。図6-5に単バンドでの決定係数の推移を示した。生育量×葉色の決定係数は、近赤外でも $r^2=0.20$ 未満と低く、生育量の場合も同様であった（生育量はデータ省略）。また、湛水の有無と反射スペクトルとの決定係数は、近赤外で大幅に上昇した。この時期の稲の植被率はまだ60%前後で被度が小さく、水による吸収を受けやすい近赤外の波長では、湛水条件の有無による影響を強く受けるためと考えられる。稲作では、過剰分けつの抑制や収穫時の地耐力の向上を図るため、最高分けつ期～幼穂形成期の頃（青森県の場合、暦日では7月始め～7月20日頃）にかけて中干しが行われる。水管理は農家各自で行っているため、地域でみた中干しの開始または終了時期の前後では、圃場の湛水状況に違いが生じやすい。生育診断指標の推定に、近赤外を利用する場合の観測時期は、現場での水管理状況に差が生じない時期が適すると考えられる。そのため、幼穂形成期の追肥診断にリモートセンシングを利用するための条件として、湛水条件にバラツキが生じる中干し開始または終了時期の前後を避ける必要がある。

しかし、農家の管理によっては中干し期間でも稀に湛水している場合や、稲の生育または気象によっては結果として観測が適期から多少ずれる場合も考えられる。そこで、現地圃場の湛水の有無を反射スペクトルから判定する手法を検討した。図6-6にWI指数（Water Index）と湛水の有無の関係を示した。WI指数とは、細胞壁による965nm付近の水分吸収帯を利用し、大気での水蒸気による吸収の影響を回避しながら葉内水分量を推測する指数として提案されたもので、900nmと970nmの反射率の比を用いる指数である（Penuelas *et al.* 1997）。本研究では、これに最も近い波長としてR908/R966を用いた。WI指数では、閾値を1.1に設定することで、湛水圃場と落水圃場を86%の正答率で分類できた。なお、湛水状況の調査と観測日に1日のずれがあるため、落水と判定された圃場のうち翌日の調査で

湛水されていた圃場（2地点）については、調査当日に湛水された可能性があり、実際の正答率はこれより高い可能性がある。生育診断指標の推定に近赤外を用いる場合には、田面水の有無が大きな誤差要因となることから、WI 指数は、異なる湛水状況の圃場を特定することや、湛水状況別の推定などへの応用が期待できる。

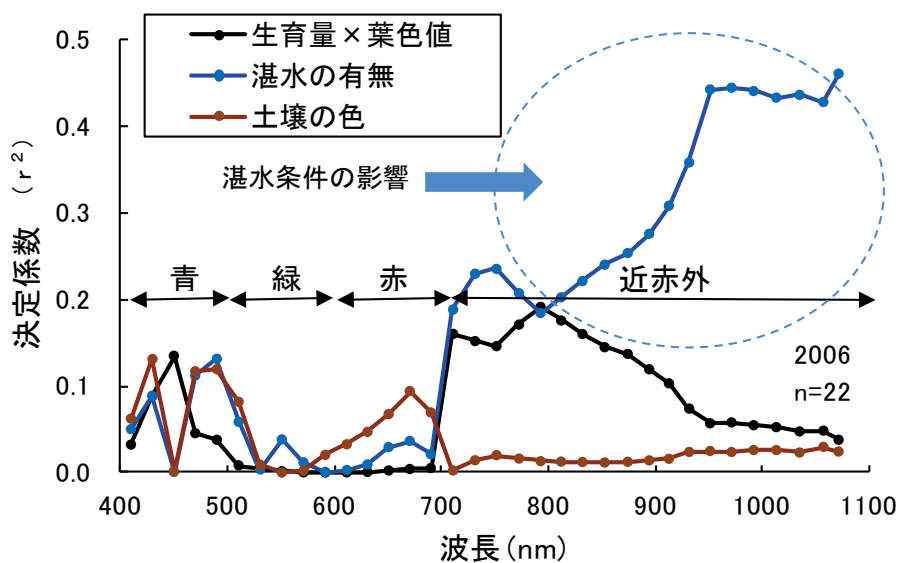


図 6-5 反射スペクトルと「生育量×葉色値」、圃場条件との関係 ( $r^2$ )

(2006 年, 平川市)

【土壌条件；一定していない，湛水条件；一定していない】

調査方法（調査日：7/21，観測日：7/20）

① 湛水の有無 落水状態：0，湛水状態：1 として 2 段階に数値化

② 土壌の色 茶：1→こげ茶：3→黒：5 として 5 段階に数値化

湛水圃場の割合 64 %

生育量×葉色値との決定係数 ( $r^2$ )

① 湛水の有無 0.05 n. s.

② 土壌の色 0.02 n. s.

n. s.：有意ではない

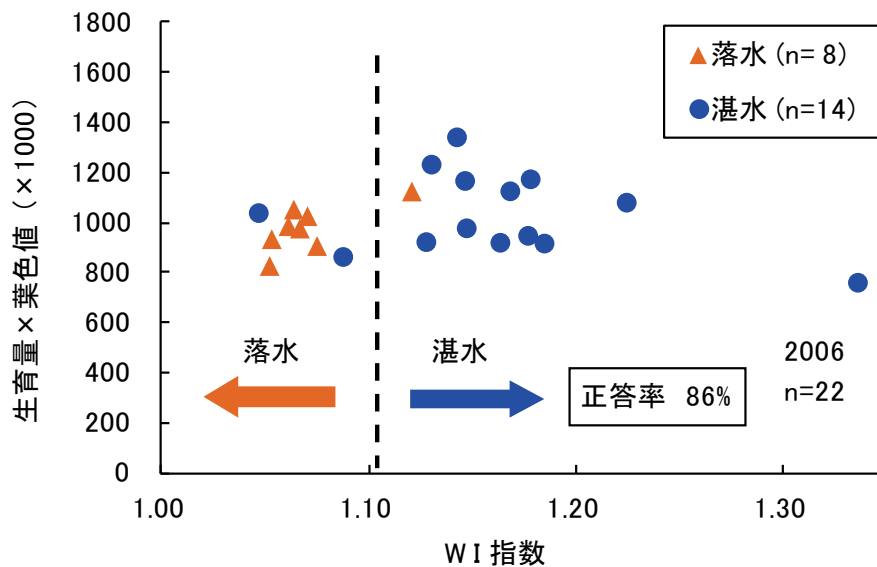


図 6-6 WI 指数と湛水の有無の関係 (2006 年, 平川市)

WI=R908/R966

湛水状況調査日 7/21, (観測日 7/20)

#### 4.2 湛水条件が一定・土壌条件が一定でない場合の特徴

2007 年に平川市で, 生育量×葉色値および圃場の湛水条件・土壌条件と反射スペクトルの関係を検討した。航空機による観測は, 中干し期間中の 7 月 7 日に行った。観測時の条件は, 湛水条件は落水で一定, 土壌条件は現地の一般水田であるため一定ではない。図 6-7 に単バンドでの決定係数の推移を示した。生育量×葉色値の決定係数は, 湛水条件が全地点とも落水で一定となったことで, 近赤外での決定係数が  $r^2=0.45$  前後まで高まった。一方, 可視の決定係数については  $r^2=0.10$  未満で依然として低く, 土壌の色との決定係数が赤を中心を高まっていることから, 土壌の色の違いが影響していると考えられた。栽植密度の決定係数については, 可視, 近赤外ともかなり低く, 影響は小さかった。湛水条件が一定であれば, 現地圃場であっても, 近赤外で生育量×葉色値をある程度推定可能と考えられた。

図 6-8 に、生育量や葉色値を含む生育診断指標について、反射率スペクトルとの決定係数の推移を示した。試験場内で土壤条件が一定の条件下で実施した図 6-4 と傾向を比較すると、葉色値では可視および近赤外とも決定係数がかなり低い傾向であった。土壤条件の変異が大きい現地圃場では、単一波長の反射率を用いて稲の葉色値の差を検出するのは難しいと考えられる。生育量については、近赤外での決定係数が  $r^2=0.50$  程度で高く、750nm~1050nm に関しては波長による差も小さく安定している。また、生育量×葉色値よりも決定係数が高かった。葉色値の推定精度が極めて低いために、生育量×葉色値では決定係数が低下したと考えられる。現地を対象とした観測では、土壤条件のバラツキの制御は困難であることから、推定に用いる生育診断指標は、生育量が中心になると考えられた。

図 6-9 は、NDSI を用いて、可視と近赤外での 2 波長の組み合わせについて、生育診断指標に対する推定力を検討したものである。玄米タンパクの推定では、可視と近赤外による 2 波長での正規化指数は、同じ波長の各単バンドの場合よりも推定力が高まることが知られている（境谷・井上 2012）。しかし、生育量×葉色値での決定係数は最高でも  $r^2=0.48$  であり、単バンドでの最高値  $r^2=0.48$  と同程度であった。また、生育量の決定係数については、NDSI での最高は  $r^2=0.47$  で、単バンドでの最高値  $r^2=0.52$  よりも若干低かった。NDSI では、可視の緑および赤の波長で決定係数が高い傾向があった。また、葉色値での決定係数については、NDSI の場合が単バンドでの最高値を若干上回るものの、最高値は  $r^2=0.14$  程度と単バンドと同様にかかなり低かった（データ省略）。これは図 6-10 に示すように背景土壤にバラツキがあることで、特に可視の波長で葉緑素量の情報を精度良く評価できていないことが原因と考えられる。そこで、背景土壤の種類の違いを軽減することを目的に、SAVI を用いた推定力を検討した（図 6-11）。生育量×葉色値での決定係数は最高で  $r^2=0.52$  であり、単バンドおよび NDSI での最高値  $r^2=0.48$  を若干上回った。また、生育量の決定係数についても、SAVI での最高は  $r^2=0.54$  で、単バンドでの最高値  $r^2=0.52$  とほぼ同程度で、NDSI での最高値  $r^2=0.47$  を若干上回った。なお、SAVI では NDSI の場合と異なり、可視光の違いによる差が小さい傾向があった。また、葉色値での決定係数については、SAVI では最高値が  $r^2=0.09$  で、単バンドと同様にかかなり低く、NDSI よりもやや低かった（図省略）。SAVI では、生育量については、NDSI に比べ背景土壤の影響を若干軽減できたと考えられるが、葉色値については軽減効果がみられなかった。SAVI の補正係数は植被率 50%程度と仮定し一律 0.5

を用いたが、実際の植被率は 40~75%程度で変異が大きいことから、植被率の違いが影響している可能性がある。以上、生育診断指標の推定では、生育量に対する決定係数が最も高かった。また、生育量では NDSI に比較して SAVI では背景土壌の軽減効果がみられた。

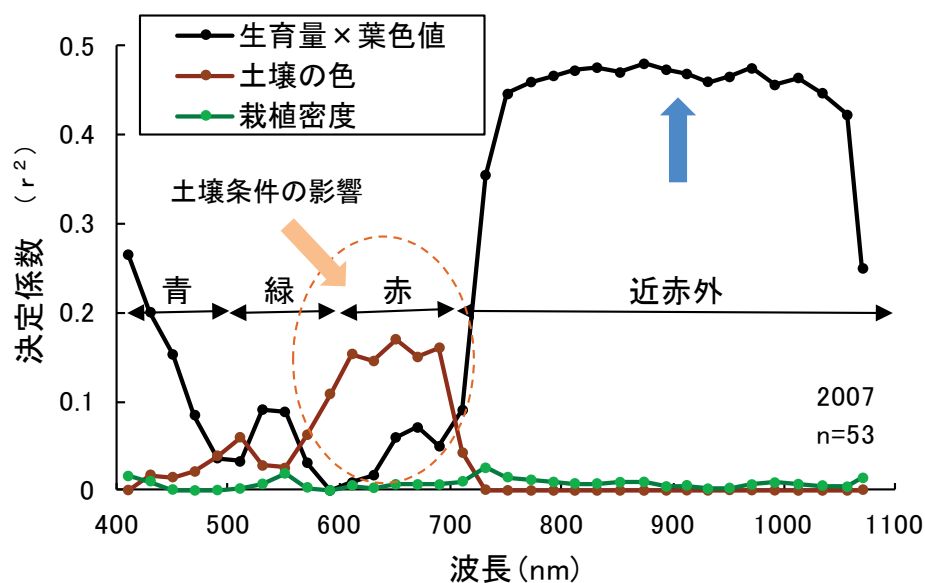


図 6-7 反射スペクトルと「生育量×葉色値」，圃場条件との関係 ( $r^2$ )  
(2007 年，平川市)

【土壌条件：一定していない，湛水条件：一定（落水）】

調査方法（調査日：7/7，観測日：7/7）

① 湛水の有無 落水状態：0，湛水状態：1 として 2 段階に数値化

② 土壌の色 茶：1→こげ茶：3→黒：5 として 5 段階に数値化

湛水圃場の割合 0 %

生育量×葉色値との決定係数 ( $r^2$ )

① 土壌の色 0.02 n. s.

② 栽植密度 0.00 n. s.

n. s.：有意ではない

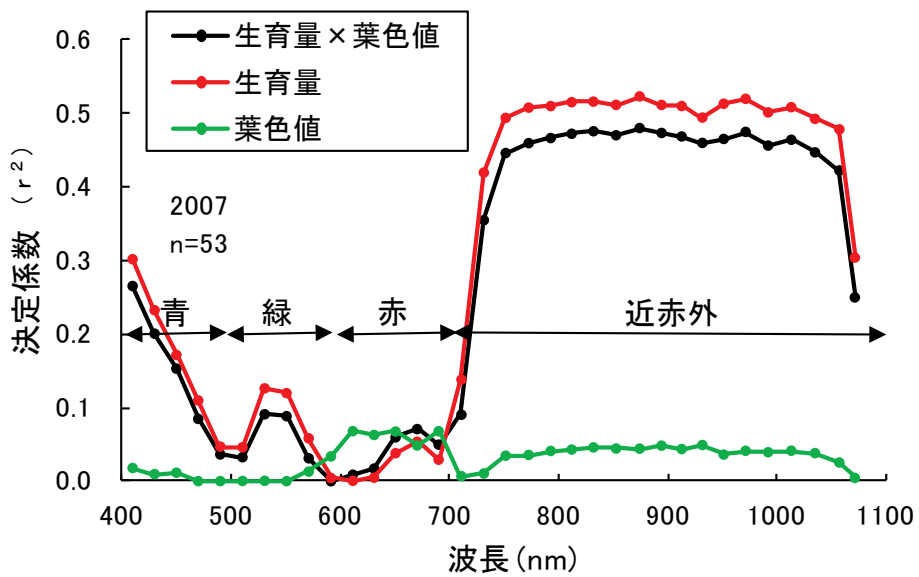


図 6-8 生育診断指標と反射スペクトルの関係 ( $r^2$ ) (2007 年, 平川市)

【土壌条件：一定していない, 湛水条件：一定 (落水)】

調査日 7/7 (観測日 7/7)

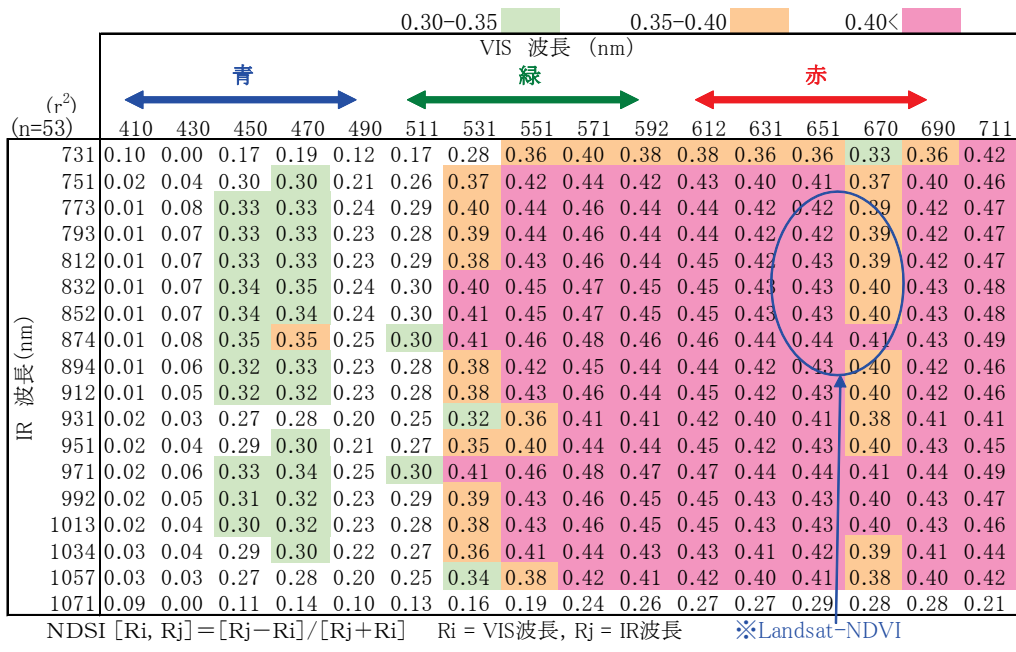
湛水圃場の割合 0 %

生育量×葉色値との決定係数( $r^2$ ) ① 生育量 0.93 \*\*\*  
 ② 葉色値 0.26 \*\*\*

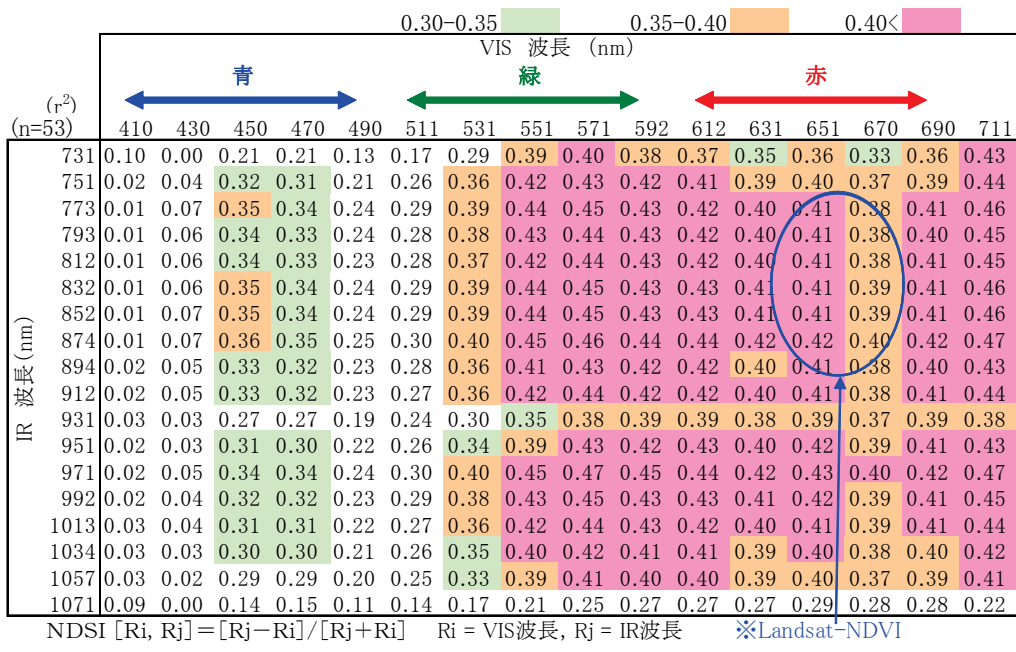
葉色値の変異幅 (標準偏差) 30.0~42.7 (2.0)

\*\*\* : 0.1%水準, \*\* : 1%水準, \* : 5%水準でそれぞれ有意,  
 n. s. : 有意ではない。





a 生育量 × 葉色値



b 生育量

図 6-9 生育診断指標における NDSI [ Ri, Rj ] の決定係数の分布 (r<sup>2</sup>)

(2007 年, 平川市)

【土壌条件: 一定していない, 湛水条件: 一定 (落水)】

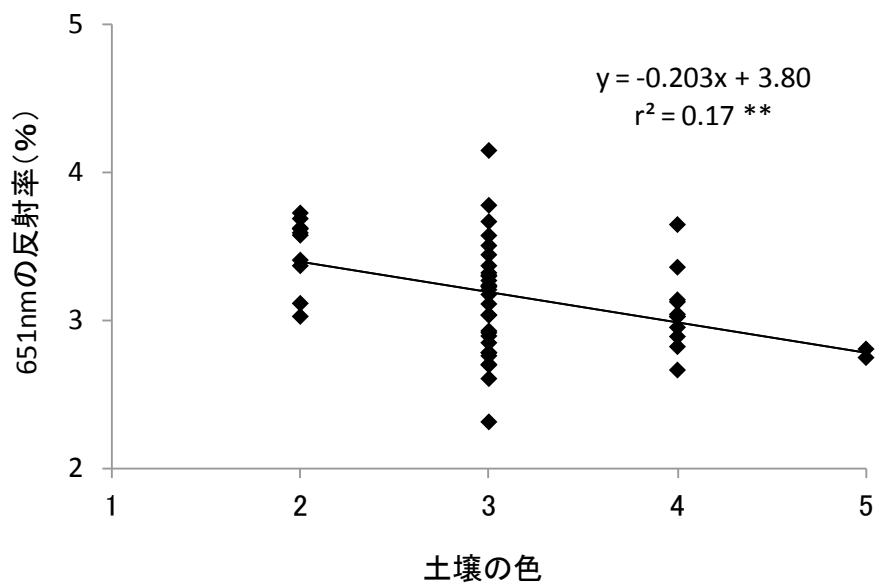


図 6-10 土壌の色と 651nm の反射率の関係 ( $r^2$ ) (2007 年, 平川市)

【土壌条件：一定していない，湛水条件：一定（落水）】

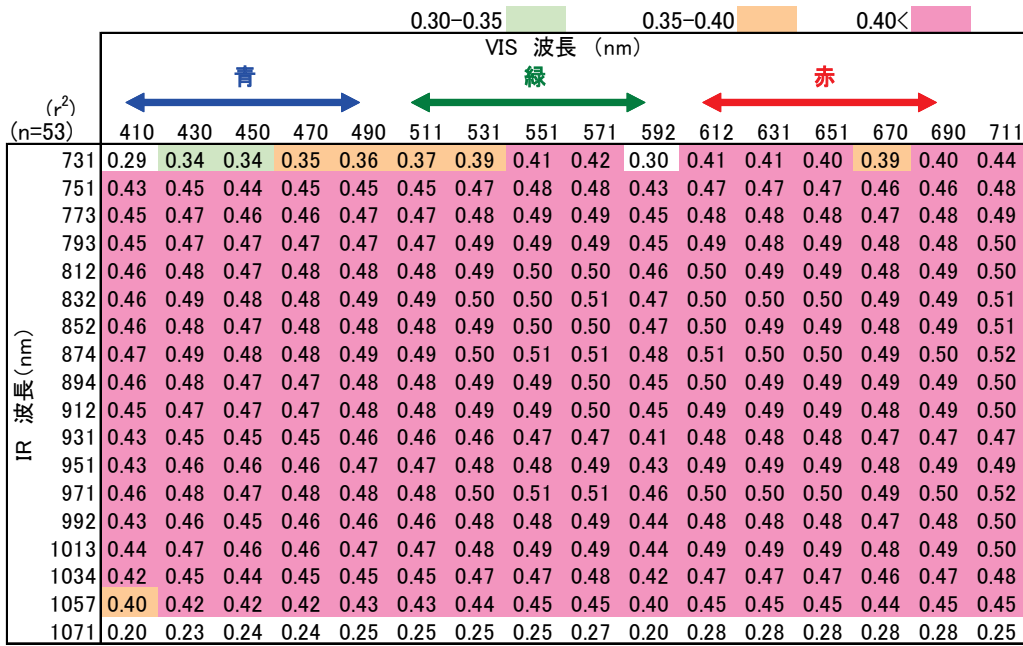
調査日 7/7 (観測日 7/7)

湛水圃場の割合 0 %

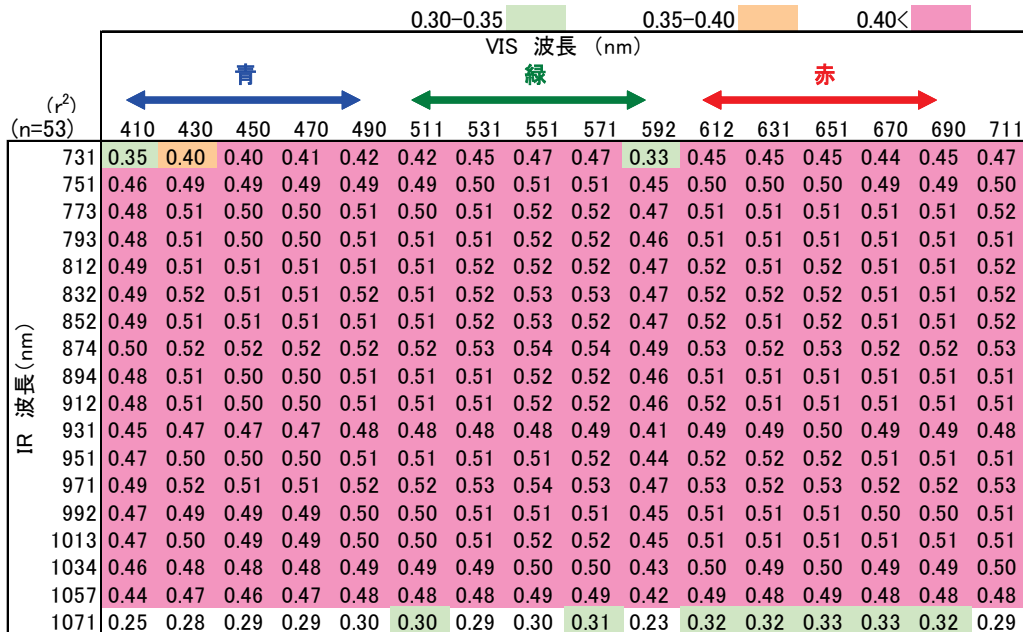
土壌の色 茶：1→こげ茶：3→黒：5 として 5 段階に数値化

\*\*\*：0.1%水準，\*\*：1%水準，\*：5%水準でそれぞれ有意，

n. s.：有意ではない。



a 生育量 × 葉色値



b 生育量

図 6-11 生育診断指標における SAVI [ Ri, Rj ] の決定係数の分布 ( $r^2$ )

(2007 年, 平川市)

【土壌条件：一定していない, 湛水条件：一定 (落水)】

## 5 まとめ

幼穂形成期頃の水田の反射スペクトルは、湛水条件および土壌条件で大きく影響を受けた。湛水条件・土壌条件が一定の場合、生育量と生育量×葉色値は、近赤外の反射率とかなり高い相関が認められた。しかし、葉色値については、稲の被覆程度の違いによる影響で、葉緑素量が強く関係する可視でも相関はそれほど高くはならなかった。

湛水条件が一定でない場合では、湛水の有無が近赤外の反射スペクトルに大きく影響し、近赤外において生育量×葉色値および生育量との決定係数が大幅に低下した。湛水条件が一定で、土壌条件が一定でない場合では、近赤外における生育診断指標の決定係数は、生育量および生育量×葉色値で高かった。葉色値では、土壌条件の違いが可視の赤色域を中心に大きく影響することで、可視でも決定係数はかなり低かった。葉色値は、反射スペクトルでの評価程度が低いことから、幼穂形成期頃にリモートセンシングを生育診断に適用する場合は、評価対象を生育量とすることで精度の高い推定が期待できると考えられた。

以上、湛水条件が揃う時期であれば、生育量をある程度推定可能と考えられた。推定に用いる波長については、単バンドでは近赤外、二つの波長を組み合わせた場合では NDSI よりも SAVI の推定力が高かった。なお、近赤外と SAVI の推定力はほぼ同程度であった。今後、追肥量決定のための生育診断技術として活用するためには、観測時期の設定や圃場ごとの生育ステージの違いの影響などについて、さらに検討を加える必要がある。

## 第7章 タンパクマップおよび収穫適期マップの現場利用技術

### 1 タンパクマップを活用した産米の食味向上

米の食味は、産米の価格や販売状況に影響し、食味の安定した米を生産することは、産地にとって重要な課題である。米の食味はアミロース含有率とタンパク質含有率（以下、タンパクと呼ぶ）で大きく左右され（小田中ら 1994, 近藤・野副 1993），前者は品種や登熟気温（近藤・安田 1994），後者は施肥（大淵ら 1991, 高城ら 1990, 境谷ら 1998）や土壌条件（中鉢ら 1993）による窒素条件の影響を強く受ける。そのため、産地では、都道府県の試験場における良食味品種の開発のほか、県や農協指導員による栽培指導が行われている。栽培指導では、栽培管理で改善の余地が大きい米のタンパク低減を目的に、葉緑素計を活用した追肥指導（真鍋ら 1983, 宮下ら 1986, 多田ら 1993, 葉上ら 2007）や、米の搬入時に食味計で測定したタンパクのデータに基づいた施肥指導が行われている。しかし、葉緑素計では、労力や時間的制約から指導員だけで産地がかかえる全ての圃場の測定は不可能であり、食味計による測定では、施肥指導に本来必要とされる圃場単位でのデータ取得が困難である。こうした中、安積・志賀（2003a）は、広域で圃場単位に米のタンパクを把握する手法として、衛星で観測した成熟期頃の水田画像から米のタンパク水準ごとに色分けした地図であるタンパクマップを作成し、北海道において施肥管理などの栽培指導へ活用した。北海道では 2000 年以降、本技術を用いて道内の水田面積の約 80%、10 万 ha の水田でタンパクマップを作成した。北海道における普及の背景としては、外食・中食産業用途に向けた均質安定供給の需要に対する品質管理の必要性があった。その後、全国の米産地で衛星や航空機によるタンパクの推定が試みられるようになってきた。青森県でも広域的な食味の向上と均質化を一層進め、県産米の競争力強化を図ることを目的に、リモートセンシングによるタンパクの推定およびその精度向上を検討した（境谷ら 2008a）ほか、産地でのタンパクマップ活用を試みた（境谷ら 2008b）。米のタンパクの推定およびその精度向上の検討については、第 3 章「リモートセンシングによる玄米タンパクの広域評価法の高度化」で述べた。ここではタンパクマップの実践的な活用方法について検討を行った。

衛星や航空機によるタンパクの推定が全国で試みられるようになってきたが、推定精度の問題のほかにも、観測頻度や空間解像度の制約から必ずしも実利用が広がっていない状況にある。空間解像度については、航空機では 1.5m、衛星でも最近ではマルチバンドで 2m 程度の高解像度衛星が利用可能となった（農業環境技術研究所 2011）。一方、観測頻度については、高解像度衛星で毎日の観測はまだ実現できていない状況である。そこで、本項では、航空機および衛星での実質観測周期とタンパクマップの実践的利用のための観測計画の検討を中心に述べる。

まず、タンパクマップの活用手順を、図 7-1 に示した。8 月に衛星または航空機で観測を行い、取得した画像データから速報版タンパクマップとタンパクマップの 2 種類のマップを作成する。速報版タンパクマップは、タンパクの高低を相対評価することができ、タンパクの実測値を用いずに画像の反射スペクトルデータからマップを作成するため、迅速なマップ作成が可能である。収穫時期前にこのマップを作成し、タンパクの低い圃場を一般米とは別に収穫することで、タンパクの低い米のロットを確保することができる。そこで、この食味の優れた米を付加価値米として販売するものである。一方、タンパクマップは、収穫時期に調査地点のタンパクを実測し、画像データとタンパク実測値との関係式からマップを作成する。タンパク実測値を使用することから、速報版タンパクマップよりも精度が高く、絶対値でタンパクを推定可能であるが、マップ作成は収穫後となる。このマップは、次年度、タンパクが低い米づくりを行えるよう、施肥量などについて栽培指導を行う際に役立つ。

青森県内におけるタンパクマップ活用の取り組み状況を表 7-1 に示した。県内でのタンパクマップ活用は 2006 年に県事業で行ったのが最初である（境谷ら 2008b）。また、リモートセンシングの農業利用も県内ではこれが初めてであった。事業の形態および経費負担については、2006 年から 2007 年の 2 年間は県単独事業（経費負担：県 10/10）、2008 年から 2009 年の 2 年間は県補助事業（経費負担：県 1/3、市 1/3、農協 1/3）、2010～2012 年（現在）は農協単独事業（経費負担：農協 10/10）で実施されており、リモートセンシングが現場利用技術として県内に定着した。現在、事業は津軽中央地域にある「津軽みらい農協」単独で行われている。普及地域については、同農協管内の平川市全域および黒石市と弘前市の一部地域である。当地域は、事業開始当初のモデル地区となっていた地域である。当地域では、タンパクマップを活用し、付加価値米の生産を 2007 年以降、毎年継続して行っ



ており、栽培指導も 2006 年から 2010 年まで 5 年間行われた。

このように、県内での技術導入は、活用技術の検討と普及が同時に並行する形で進んでいる。以下で、この中で実施した「付加価値米の創出」と「栽培指導」への現場での活用における問題点と対応策について考察する。

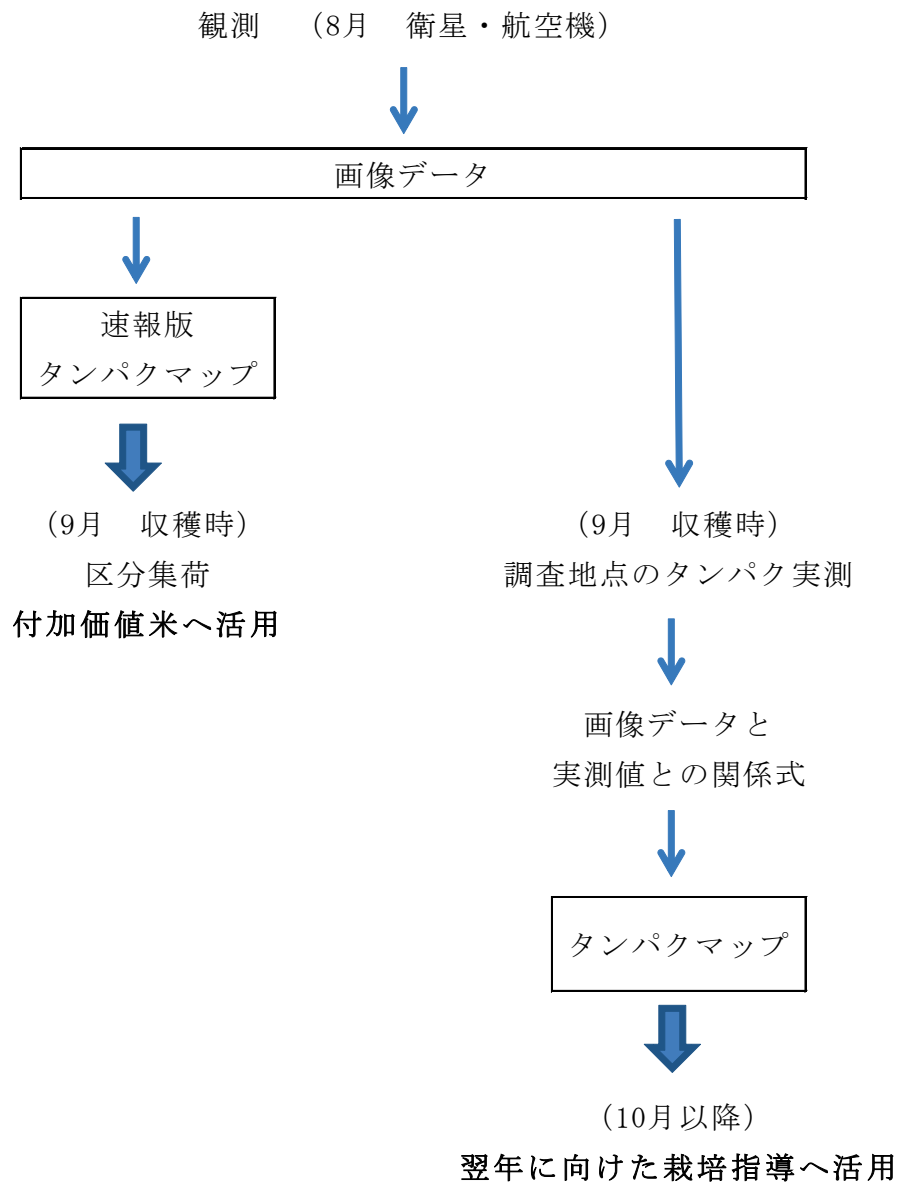


図 7-1 タンパクマップの活用フロー

表 7-1 青森県内でのタンパクマップの活用と実施面積

年次	観測手段	観測面積 (km <sup>2</sup> )	活用面積 (ha)	
			付加価値米 (区分集荷実施)	栽培指導 (お米の通信簿実施)
2006	航空機	149	—	一部で試行
2007	〃	180	37 (221t)	2,800
2008	〃	218	36 (215t)	2,800
2009	〃	212	85 (510t)	2,800
2010	衛星	279	37 (222t)	2,800
2011	〃	103	34 (205t)	—
2012	〃	140	33 (195t)	—

観測手段の詳細

航空機：2006～2009年 セスナ C208 CASI-3

衛星：2010～2012年 WorldView-2

観測面積

航空機：観測実施面積

衛星：観測リクエストによる画像購入面積

## 1.1 付加価値米生産への活用

### 1) 区分集荷のための観測日程の検討

農家水田における米のタンパクの実態は圃場ごとの変異幅がかなり大きい傾向がある。そこで、タンパクマップを活用して、タンパクの低い圃場を区分集荷することで、食味計による品位別集荷に対応した集荷施設を持っていない産地でも、複数サイロの一つを区分集荷米に割り当てることで、タンパクの低いロットの米の創出が可能となる。ただし、タンパクマップを区分集荷に活用するためには、マップ作成を収穫開始前に終える必要があり、タンパクマップを次年度の栽培指導に活用する場合と比べて観測可能期間が短くなる

ため、適時観測を実現するための緻密な観測計画が必要となる。そこで、区分集荷実施のための観測計画について検討した。

表 7-2 に航空機または衛星観測での観測待機開始から画像取得までの所要日数を示した。基本的に、観測が成功したかどうかは航測会社または衛星画像販売会社の判断により、雲量を基準に行われる。一般に、画像全体に占める雲の割合が 15～20%以下であれば観測が成功したとみなされる場合が多い。しかし、基準とされる雲量は、地上を視認できない厚い雲の割合をカウントとするものであり、薄雲や雲影、雲の位置は考慮されないことが多い。実際のタンパクマップの作成では薄雲や雲影も作成の障害になることから、これらの少ない良好な画像を得るまでの所要日数で比較した。2006 年～2012 年の 7 年間について、観測手段は前半 4 年が航空機、後半 3 年が衛星である。なお、2008 年と 2011 年は当初取得した画像 (①) が薄雲や雲影が多かったことから、再度、観測を行い良好な画像 (②) を取得した。

良好な画像が得られるまでの所要日数は、航空機では最短で 2 日、最長で 18 日、平均で 9.3 日を要した。衛星では最短で 1 日、最長で 8 日、平均で 3.7 日であった。航空機は毎日観測可能なのに対して、衛星は現状では 3 日に 1 回程度の割合でしか観測できないが、航空機の方が衛星よりも長い所要日数を要しており、観測頻度の有利性が反映されない結果となった。航空機が待機している青森空港は標高が高く霧や雲が発生しやすく、対象地域が快晴条件でも、空港周辺での気象条件が悪くセスナタイプの航空機が発着できなかったことや、対象地域の気象状況の把握が十分でないことで観測機会を逃すこともたびたびあったことから、観測頻度の有利性を十分生かせなかったと考えられる。また、航空機と衛星の両者通算の 7 年間での所要日数は、最短で 1 日、最長で 18 日、平均で 6.9 日であった。秋山・川村 (2003) が報告した Landsat5 号による 8 月と 9 月の雲量 20%以下の画像データ取得成功率 (雲量 20%以下となった観測回数/全観測回数) は、平川市の隣接地である青森県弘前市では 5%前後であり、これに比較すると今回の事例は航空機・衛星とも高率で良好な画像が得られた。これは本事例のように水田地帯を対象とした場合には、観測対象が標高の低い平地で山地よりも雲の発生が比較的少ないことのほか、観測面積や回帰日数 (Landsat 16 日) の違いが影響していることが考えられる。なお、区分集荷を毎年継続して行うためには、画像取得までの所要期間を、7 年間で所要期間が最長であった 18 日程度を目安にしておく必要があると考えられた。

表 7-2 画像取得までの所要日数（観測待機→画像取得）

観測手段	年次	観測待機開始	観測成功日	画像の状況	良好画像を得るまで
		(A)	(B)	(雲量) ※薄雲・雲影含む	の所要日数(日) (B - A)
航空機	2006	8月28日	9月9日(出穂後31日)	良好(5%)	12
	2007	8月23日	8月25日(出穂後23日)	良好(0%)	2
	2008-①	8月23日	9月5日(出穂後32日)	不良(40%)	-
	2008-②	〃	9月10日(出穂後37日)	良好(0%)	18
	2009	8月28日	9月2日(出穂後26日)	良好(0%)	5
平均(航空機)					9.3
衛星	2010	8月28日	8月29日(出穂後29日)	良好(0%)	1
	2011-①	8月20日	8月20日(出穂後16日)	不良(60%)	-
	2011-②	〃	8月28日(出穂後24日)	良好(0%)	8
	2012	8月19日	8月21日(出穂後17日)	良好(0%)	2
平均(衛星)					3.7
平均(全体)					6.9

観測手段の詳細

航空機：2006～2009年 セスナ C208 CASI-3

衛星：2010～2112年 WorldView-2

観測成功は、航測会社および衛星画像販売会社の判断による。

2008年および2011年は、当初取得した画像の状況が不良だったことから、再度観測を行った。なお、2008年①は範囲を限定して速報版タンパクマップで使用。2011年①はマップとして使用せず。

表 7-3 に航空機観測での画像取得（観測日）から区分集荷実施までの所要日数を示した。本検討は、作業担当業者にできるかぎり短い期間で作業を行うよう伝えたくて実施したものである。区分集荷初年目の2007年については、速報版タンパクマップ作成に6日間、GISデータ変換に2日間、データ移送日数を含めて10日間を要した。2008年および2009年は作業項目それぞれで作業短縮を図り、所要日数は4～5日間に大幅に短縮することができた。なお、本事例では、航測会社とGIS担当会社が別業者であったことから、業者間で

のデータ移送が必要となったが、両作業を同一会社で担当した場合にはさらに期間の短縮が可能になると考えられた。また、WorldView-2等の外国企業の衛星の場合には、画像データ入手までの期間がさらに3日前後必要となるが、幾何補正等のデータ処理がある程度済んでいることからタンパクマップ作成は航空機データの場合より作業工程が少なくて済む。そのため、衛星の場合でも、観測日から圃場選定を終えるまでの所要期間は、航空機より1～2日程度長い6日程度を見込むことができると考えられる。

表 7-3 区分集荷に係る所要日数（画像取得→圃場選定）

観測手段	年次	①	②	③	④	⑤	合計
		速報マップ作成 (A社) (日)	データ移送 (A社→B社) (日)	GISデータ変換 (B社) (日)	データ移送 (B社→農協) (日)	圃場選定 (農協) (日)	合計 (①～⑤) (日)
	2007	6	1.5 (宅配便)	2	0 (メール)	0.5	10
航空機	2008	2.5	0 (メール)	0.5	0.5 (手渡し)	0.5	4
	2009	3.5	0 (メール)	0.5	0.5 (手渡し)	0.5	5
						平均	6.3

速報版タンパクマップ作成は、画像取得日～マップデータ完成までの所要期間。

作業実施機関

- ①速報版タンパクマップ作成：航測会社A（作業人数：1人）
- ②データ移送：航測会社A→GISデータ処理会社B
- ③GISへのデータ変換：航測会社B（作業人数：1人）
- ④データ移送：GISデータ処理会社B→農協

以上の所要日数を参考に、本地域で区分集荷を行うに当たっての観測日の目安を図7-2に示した。毎年継続して区分集荷を行うのに必要とされる所要期間の目安は、①観測待機開始から画像取得までが18日（過去7年間での最長期間）、②画像取得から圃場選定まで6日間程度と見込まれる。さらに、③圃場の選定結果について収穫を実施する生産組合に周知する必要があり、これにも最低1日必要となる。本地域では、出穂期から成熟期までの



登熟期間は45日前後であることから、①～③に要する期間を差し引きすると、観測待機は少なくとも出穂後20日目には実施する必要があると考えられた。出穂後20日頃の観測日の画像については、2007年の出穂後23日目の画像があるが、NDSI[R550,R830]とタンパクとの決定係数は $r^2 = 0.53^{***}$  (n=48)と比較的高い結果が得られている(第3章 図3-5)。しかし、出穂後17日目に観測された2012年の画像については、NDSI[R545,R833]とタンパクとの決定係数は $r^2 = 0.41^{***}$  (n=27)とやや低かった(データ省略)。第3章で前述したが、タンパクの推定精度は観測が早いほど低下すると推測されるが、この程度は地域の田植日のバラツキ程度でも影響を受ける。青森県は全国でも田植日のバラツキ程度が比較的小さい県であるが、 $r=0.7$ (決定係数で $r^2 = 0.49$ )程度の精度を確保するとした場合、NDSI[R550前後,R830前後]を用いた推定では、出穂後20日目頃が早限になると推察される。

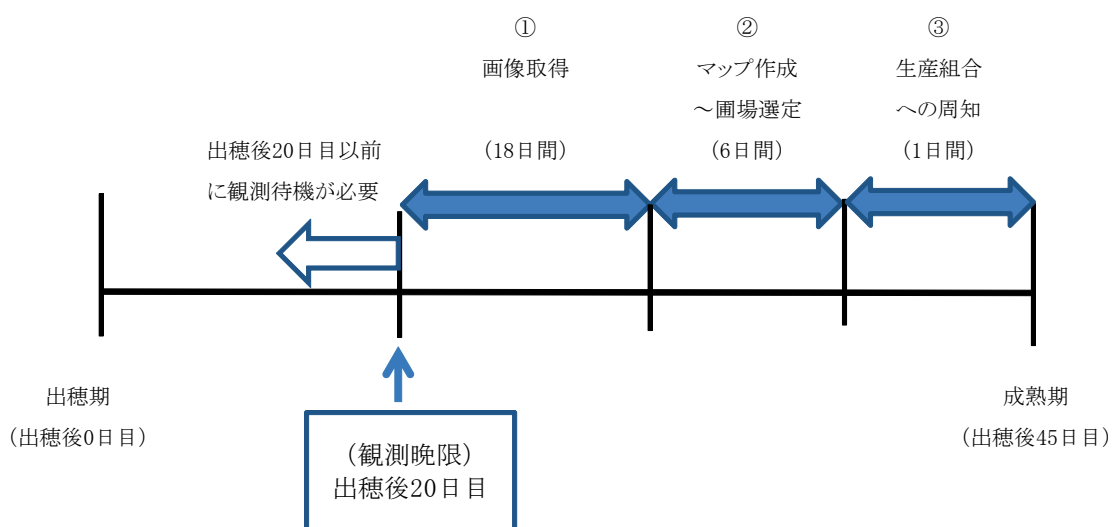


図 7-2 区分集荷のための観測待機の開始時期の目安

## 2) 速報版タンパクマップ活用による付加価値米生産の取組み

青森県津軽地域の津軽みらい農協では、速報版タンパクマップを用いてタンパク7%以下

と判断された圃場の米を区分集荷し、「おいしさキャッチ米」のネーミングで同農協の農産物直売所や県内の地域生協で販売している（図 7-3）。区分集荷米の実測タンパクは、いずれの年次も、一般米に比べタンパクが 0.3～0.1 ポイント低く、差は小さいものの食味での差別化が図られている（表 7-4）。なお、2010 年と 2012 年は、区分集荷米のタンパクが 7%を超えたが、これは地域のタンパクの年次変動の影響と考えられる。速報版タンパクマップの作成時には当該年のタンパク実測値は不明であることから、タンパク平年値を当該年のタンパク平均値と仮定してタンパクマップの作成を行っている。そのため、2010 年と 2012 年は、平年よりも実際のタンパクが高かったことから、7%を超えたものと考えられる。区分集荷米の販売価格は、同一産地の一般米と比較して、白米 10kg 当たり 100 円高い価格設定で販売されており、毎年 100 万円前後の付加価値収入が得られている（表 7-5）。



図 7-3 農協が生産・販売している「おいしさキャッチ米」(付加価値米)  
 上段：2007年～2009年(航空機で観測)  
 下段：2010年～2012年(衛星で観測)

表 7-4 区分集荷米の実測したタンパク

年次	タンパク (%)		
	区分集荷米 (A)	一般米 (B)	差 (B - A)
2007	6.9	7.2	-0.3
2008	6.9	7.1	-0.2
2009	6.9	7.0	-0.1
2010	7.5	7.6	-0.1
2011	7.0	7.1	-0.1
2012	7.3	7.4	-0.1

タンパクは、玄米乾物当たり%。

一般米の数値は、2007年～2012年は調査地点の平均値（ケルダール分析）。2012年は集荷施設に集荷された米の平均値（荷受時に自動自主検査装置：サタケ近赤外計で測定）

表 7-5 区分集荷米の販売数量と付加価値収入

年次	白米10kg当たり		
	付加価値 (一般米比較)	販売数量 (白米 t)	付加価値 合計額 (万円)
2007	+ 100円	172	172
2008	+ 100円	122	122
2009	+ 100円	95	95
2010	+ 100円	96	96
2011	+ 100円	99	99

販売店：津軽みらい農協 農産物直売所（2店舗），  
 地域生協（青森県弘南生活協同組合 8店舗）  
 販売数量は、農協からの聞き取りによる。

## 1.2 栽培指導への活用

農家水田における米のタンパクの実態は水田ごとの変異幅がかなり大きく、産地での食味向上のためには、タンパクが低く、かつ、ばらつきの少ない米の生産が必要とされる。そこで、地元農協と連携しタンパクマップを食味向上のための栽培指導に活用した。タンパクマップを活用した栽培指導の方法は、栽培研修会または「お米の通信簿」による方法で行った。図 7-4 は農協が作成している「お米の通信簿」である。「お米の通信簿」とはタンパクマップから該当農家の圃場だけを抜き出し、圃場のタンパク状況をもとに個別に栽培状況のアドバイスを掲載した資料である。施肥管理を主体に次年度の稲作に向けた改善点をアドバイスしている。事業開始初年目の 2006 年は一部地域で試行し、2007 年から 2010 年は地域全域 2800ha を対象として約 2000 戸の農家に対して実施した。「お米の通信簿」の作成は、GIS システム（水田情報管理システム：株式会社パスコ）にタンパクマップを取り込み、農家ごとの個票を印刷している。農家への配布についても、GIS の属性情報を利用して、個票を郵送で各農家へ発送している。2006 年のリモートセンシング事業の開始と同時に GIS を農協へ導入したことで、タンパクマップの情報を効率的に農家へ伝達することができた。「お米の通信簿」に対する農家の反応は、農協担当者によれば、自分の圃場の状況を確認できること、アドバイスも圃場の状況に応じた具体的な内容であることから、これまでの指導よりも農家の関心が高いとのことである。

なお、「お米の通信簿」については、2011 年以降、農家配布を休止している。これは、GIS の属性データの更新が滞り情報が不正確となってきたためで、農協単独で行っている更新費用の捻出が課題となっている。土地改良区や農業委員会などの農業関係機関で、GIS データの更新を共同で行うことができれば、費用負担を軽減できると考えられる。当農協は、2010 年に広域合併を行ったが、新たに加わった農協支所については、GIS システムが導入されていない。GIS システムの導入および GIS 属性データの更新について、安価なシステムの導入やデータ更新の仕組みづくりについて、現在、検討を行っているところである。

## 通知書の見方

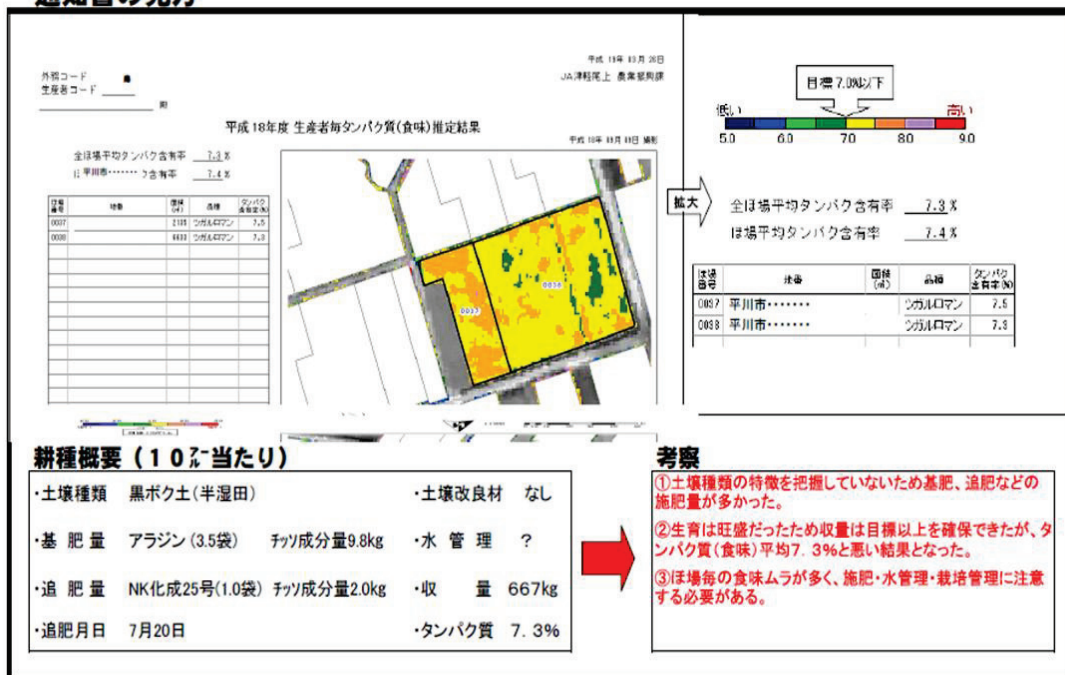


図 7-4 農協が作成している栽培指導資料「お米の通信簿」

実施面積：2800ha（約 2000 戸）

### 1.3 外観品質の向上を目的とした活用の可能性

米のタンパクの高低は、食味に大きく影響するが、最近、外観品質との関連性についても報告されている。近藤ら（2012）は、2010年の全国的な白未熟粒の発生について解析し、同一品種で玄米タンパクが低いグループと高いグループを比較した場合、低いグループは基白粒の発生が多いことを報告している。近年、食味重視により産地ではタンパクの低い米の生産が進められているが、一方で、過剰なタンパクの抑制が米の外観品質を低下させやすくしているとの指摘が出始めている。食味と外観品質は、産米の価格や販売状況に影響し、両者とも重要な特性である。タンパクが過剰に高くなった場合には食味が、過剰に低くなった場合に外観品質が劣るとすれば、米のタンパクを適正範囲に制御することで、



食味と外観品質の両者を良好に保つことが可能と考えられる。今後、食味と外観品質の両面で、品種ごとの最適なタンパク範囲が明らかになれば、タンパクマップをタンパク低減だけではなく制御に活用することができると考えられる。

## 2 収穫適期予測マップを活用した産米の外観品質の向上

### 2.1 胴割米の要因解析への適期マップの活用

#### 1) はじめに

近年、夏季の高温傾向から胴割米による外観品質の低下が全国的な問題となっている（木野田ら 2001, 日塔 2001, 有坂 2002, 滝田 2002, 中村ら 2003, 農林水産省 2007）。胴割米は収穫時期が遅れるほど発生が増加し、数日単位の収穫時期の差が外観品質に大きな影響を与える（境谷 2012b）。2012 年は、収穫時期の気温が平年よりも 5°C前後高く、青森県では津軽中央地域を中心に胴割米が多発し（東北農政局 2012）、被害の大きかった農協では集荷米の 9 割が落等する事態となった。また、早めに収穫した地域が遅かった地域よりも胴割米が多いといった逆転現象がみられ、複雑な様相を呈していた。そこで、2012 年の胴割米の発生について、集荷施設に集荷された米の外観品質の検査データと収穫適期マップを用いて、収穫適期（成熟期）から実際の収穫日までの期間を推定し、これと胴割米発生との関係を解析した。

#### 2) 2012 年における収穫適期マップの作成

第 4 章 4 節で前述した収穫適期マップの作成手法を、胴割米の多発年である 2012 年の衛星画像に適用し、2012 年の収穫適期マップを新たに作成した。

分光画像は、青森県津軽中央地域（平川市およびその隣接地域）130km<sup>2</sup>を対象に取得し、100km<sup>2</sup>を解析に用いた（図 7-5）。高解像度光学衛星 WorldView-2 により 4 バンド（青 450-510nm, 緑 510-580nm, 赤 630-690nm, 近赤外①770-895nm）で観測した。衛星画像の分光放射輝度値への変換および大気補正については、ENVI4.8 および ENVI Atmospheric Correction モジュールの Quick Atmospheric Correction により実施した。

観測日は、2012年8月21日（稲の生育ステージは平川市の調査地点の平均で出穂後17日）である。快晴条件で観測され、解析対象内（図7-5 青の囲み）には雲や薄雲はみられなかった。

地上調査地点は平川市の農家水田を対象として35地点設けた。図7-5に青丸で示した。品種は「つがるロマン」である。本地域の栽培品種は、「つがるロマン」が大部分を占めている。調査地点の成熟期は、圃場で穂を観察調査し、黄化粳率90%（黄化粳数／全粳数×100）を基準（青森県2011）として判定した。

以上から得られた調査地点における分光画像の660nmの反射スペクトルと成熟期との関係式から、成熟期を広域で推定した収穫適期マップを作成した。

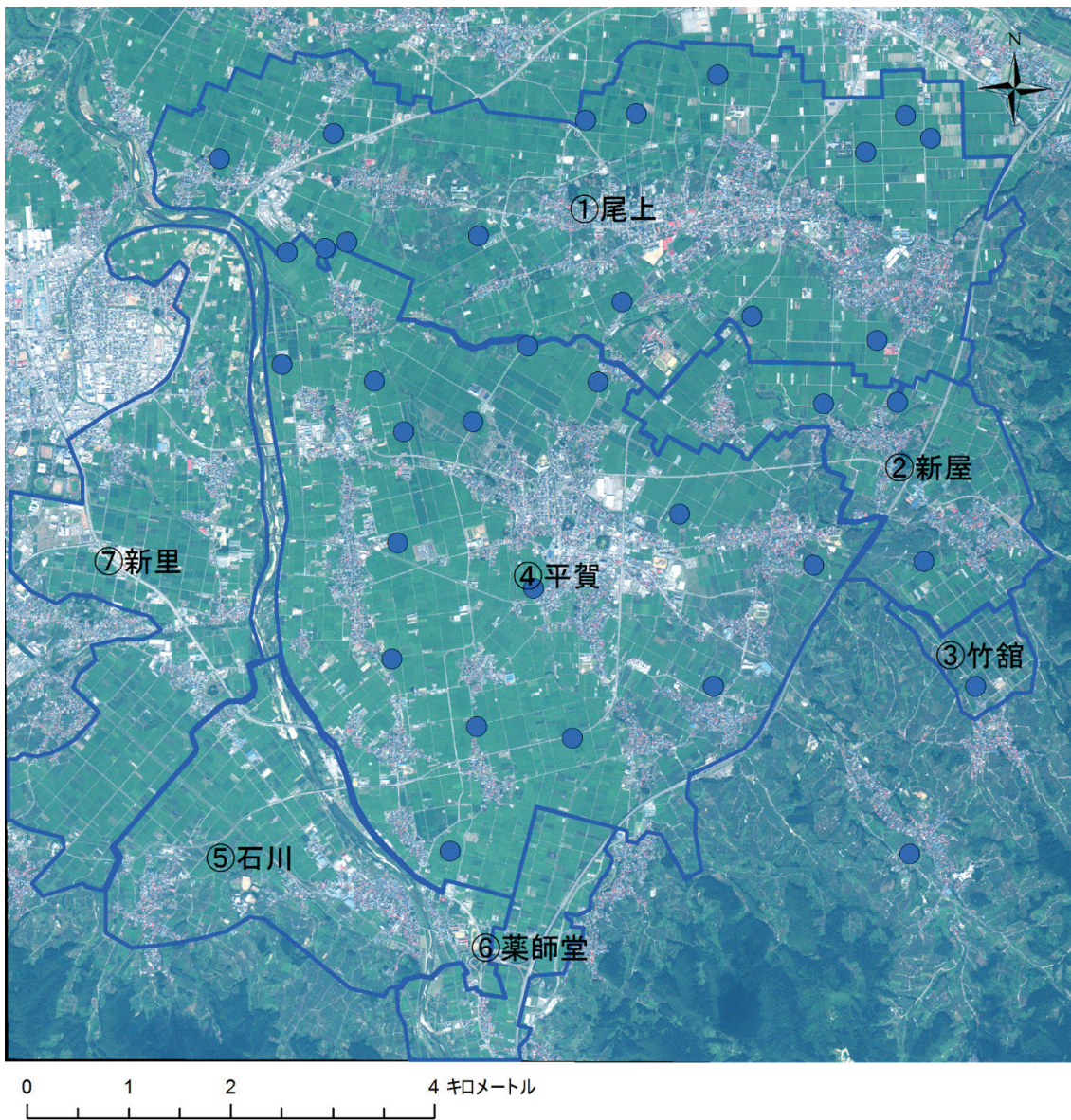


図 7-5 調査地域

観測日および観測条件  
 2012年 8月21日(出穂後17日), 快晴,  
 衛星 WorldView-2 4バンド

青の囲み：集荷施設における米の集荷地区の区分,  
 青丸：調査地点を示す

### 3) 集荷施設に集荷された米の調査データの取得

集荷施設における米の集荷範囲を図 7-5 に示した。本地域の集荷施設は平賀カンントリーエレベーター（以下、平賀 CE と呼ぶ）と東部ライスセンター（以下、東部 RC と呼ぶ）の 2 か所である。平賀 CE は①～⑤地区、東部 RC は⑥と⑦地区が集荷範囲である。

米の調査データの測定は、施設に設置されている自動自主検査機器による。本装置では、荷受時の重量や籾水分の測定のほか、荷受時に試料を採取し、外観品質データの測定を行っている。外観品質データは、整粒、未熟粒、被害粒、死米、着色粒、胴割粒の 6 分類で判定された重量%である。なお、被害粒には碎米の他に、茶米、奇形粒等が含まれるが、碎米が大部分であった。胴割粒は胴割れが進行すると碎米になることから、胴割れ発生程度を「胴割粒+被害粒」で判定した。なお、解析に用いたデータセットは、平賀 CE は津軽みらい農協、東部 RC はつがる弘前農協から元データの提供を受け、本解析に当たりデータを集約・整理したものである。

### 4) 調査地点からの玄米試料の収集

調査地点 35 地点から、玄米試料を収集した。成熟期の 11 日前～6 日後までの間に、調査圃場から稲を 10 株ずつ刈取りし、室内で陰干しして乾燥させた後に脱穀し、玄米試料とした。外観品質の調査は、品質判別器（RGQI20, サタケ）を用いて、胴割粒と碎米の割合を重量%で測定した。また、同じ試料を農産物検査法による等級検査に供試した。検査等級は、各等級をさらに細かく 3 つに区分し、1 上、1 中、1 下、2 上、2 中、2 下、3 上、3 中、3 下、規格外の 10 段階で検査した。

### 5) 結果および考察

表 7-6 に集荷米の胴割米発生状況を示した。農産物検査規格では、胴割粒も被害粒として分類され、1 等米になるための被害粒（胴割粒を含む）の限界基準は 15%以内（落等基準）である。即ち、自主検査装置で判定した「胴割粒+被害粒」が 15%を超える場合には、落等が想定される。そこで、落等割合として、「胴割粒+被害粒」が 15%を超えた割合を、地区ごとに算出した。落等割合は、④竹館地区が最も低く 42%、⑥薬師堂地区と⑦新里地区ではかなり高く、順に 89%、97%であった。荷受時の籾水分については、④竹館地区が最も高く 23.1%、⑥薬師堂地区と⑦新里地区では低く、順に 19.9%、20.7%であった。落等

割合が低い地区の米は籾水分が高く、落等割合の高い地区の米は籾水分が低い傾向があった。長戸ら（1964）は、玄米水分は玄米の乾物重がほぼ最大に達する出穂後 32 日頃に 28～29%まで低下し、以後 10 日間は増減が少なく、その後再び減少することを明らかにし、乾物重が最大になるまでの期間を生理的減少期、次を不変期、その後を物理的減少期に分類した。不変期までは米粒の含水率は外界の影響を受け難いが、物理的減少期になると日射、降雨、露などの影響を受けながら増減しながら減少する。収穫適期である成熟期の籾水分は 25%程度であることから（境谷ら 2012a, 高橋・長谷川 2003）、荷受時の籾水分からみて、各地区とも成熟期を過ぎ、籾水分が低い地区ほど日数が経過していることが推察された。

図 7-6 は施設に集荷された米の収穫日である。暦日ベースでみた収穫量の推移で示した。収穫盛期（荷受量の累計が全体の 50%に達した日）で比較すると、③竹館地区と⑥薬師堂地区が 9 月 17 日で最も早く、①尾上地区が 9 月 23 日で最も遅かった。胴割米は収穫が遅いほど発生が助長されることが知られているが、暦日ベースでみた収穫日と胴割れによる落等割合は傾向が一致していない。また、籾は収穫が遅くなるほど水分低下が進むことが予想されるが、暦日ベースでみた収穫日は、表 7-6 の籾水分の傾向とも一致しなかった。

図 7-7 は衛星データから成熟期を圃場単位で推定したマップである。観測範囲全体での成熟期平均日は 9 月 10 日であったが、①地区ではこれより遅い圃場が多く、④～⑦の地区では平均日より早い圃場が多い。当地域は、マップの南東部分を除き、標高差のほとんどない平坦な水田地帯で気象条件の変異は小さいと考えられるが、圃場間および地域間の変異がいずれも大きかった。図 7-8 は地区ごとに成熟期を平均化したマップである。地区平均でみた成熟期は、⑥地区が 9 月 7 日で最も早く、③地区が 9 月 13 日で最も遅かった。両者の差は 6 日間と大きかった。本地域でも、適期収穫に向けて、農協等が現行法の出穂後積算気温によって成熟期を予測し、農家に情報提供を行っている。しかし、現行法では、圃場ごとの出穂日ではなく、地域全体の平均出穂日を基に予測することから、同一地域内である①～⑦地区は全地区とも同一日となる。

図 7-9 に調査地点における胴割れ発生と成熟期後日数の関係を示した。「胴割粒+碎粒」の割合が 15%を超えると 2 等米への落等が想定されるが、いずれの地点も同割合は 15%以内に収まっていた。これは、いずれの地点も収穫日が成熟期後日数で 6 日以内と比較的早かったためと考えられる。収穫日が最も遅い地点は成熟期後 6 日目であったが、この地点

がぎりぎり 15%に収まっている状況であり、6 日目を過ぎると 15%を突破することが予想される。図 7-10 に検査等級と成熟期後日数の関係を示した。農産物検査員による等級検査データでも落等した地点はみられなかったが、収穫日が最も遅かった成熟期後 6 日目の地点では、等級が「1 下」に格付けされ、ぎりぎり 1 等米に収まっていた。等級検査データからみても、成熟期後 6 日目を過ぎると落等が予想された。出穂後 6～10 日間の気温および収穫時期の気温がともに平年並みの場合は、胴割れによる落等は成熟期後 39 日目を過ぎからの発生が推定されることを前述したが（第 2 章 2.1 項），2012 年の場合は収穫時期の高温で胴割れの発生時期がかなり早まり、収穫適期幅が大幅に短くなったと考えられる。

図 7-11 は集荷米の収穫日を成熟後日数で推定したものである。方法は、(A)衛星データから推定した地区ごとの成熟期平均日、(B)荷受日の地区ごとの平均日、(C)荷受米の籾水分の地区ごとの平均値、(D)成熟期における籾水分 25%と規定し、(A)～(D)を用いた次の式により、地区ごとの 1 日当たりの籾水分減少率を算出した。

$$\text{籾水分の減少率（地区ごと、1日あたり）} = (D - C) / (B - A) \quad (7.1)$$

さらに、次の式により、地区ごとの籾水分の減少率をもとに、荷受米それぞれについて、荷受時の籾水分から成熟期後日数を推定した。

$$\text{成熟期後日数} = (D - \text{荷受米の籾水分}) / \text{籾水分の減少率} \quad (7.2)$$

前述の現地調査結果（図 7-9、図 7-10）から、成熟期後 6 日目を過ぎると落等が予想されることから、成熟期後 6 日目を超過した割合で、地区ごとに収穫時期を比較したところ、胴割れによる落等割合と超過割合の傾向がよく対応していた。④竹館地区では胴割れによる落等が少なかったが、収穫時期の超過割合も少ない。⑥薬師堂地区では、図 7-6 の暦日でみた収穫日は早かったが、成熟期後日数でみた場合は収穫日が遅く、大部分の米が収穫適期を逃していることが判る。⑦新里地区でも大部分が収穫適期を逃しており、これが胴割れの大規模な発生につながったと考えられる。

以上のことから、2012 年の胴割れの発生は、収穫時期の高温の影響で収穫適期幅が例年よりも大幅に短くなり、実際の収穫時期をこれとうまく合致できなかったことが原因と考えられた。大部分の米が落等した⑥および⑦地区であっても、地区平均の成熟期に達した時点で生産組合が収穫を開始できていれば、被害を大幅に低減できた可能性が高い。また、収穫に要した所要期間も、成熟期日数でみると 40 日以上のかかなり長期にわたる地区が多く、暦日でみた場合より所要期間がさらに拡大している。事前に、圃場ごとの成熟期の早晩を



把握できれば、同一地区内でも成熟期の早い圃場が多いエリアから収穫するなど、収穫順番の工夫はある程度可能であり、所要期間の面でも短縮できる余地は大きいと考えられる。なお、収穫に係る所要期間の短縮は、収穫機械の増加によっても実現可能であるが、高温年に備えて毎年過剰な設備を維持するのは、コストおよび人間的にも負担が大きい。また、収穫機械を増加したとしても、成熟期の早晩の傾向を考慮せずに収穫を進めた場合には、暦日では収穫期間が短縮しても、成熟期後日数で見ると期待したほど各圃場の適期には収穫できていないといった事態も想定される。成熟期での的確な収穫開始と成熟期後日数でみた所要期間の短縮を図ることは、外観品質の確保および収穫機械の効率化の面で重要と考えられる。2012年のような想定を超える高温に遭遇した場合でも、成熟期での的確な収穫開始と所要期間の短縮を図ることによって、適期で収穫される米の割合を最大限増加させることができると考えられる。これらの実現のためには、収穫前に広域で地域または圃場単位での詳細な収穫適期の予測と予測データの地域での効率的な活用が必要である。収穫適期の予測は、第4章で述べた予測マップで可能である。また予測マップの活用方法については次項で述べる。

表 7-6 集荷施設および地区別にみた集荷米の胴割米発生状況

施設名	集荷地域	搬入量 粳重(口数)	粳水分 (荷受時%)	落等割合
				「胴割粒+被害粒」が 15%超の割合
平川CE	① 尾上	3,132t ( 935口)	21.7	66
	② 新屋	1,269t ( 652口)	21.5	71
	③ 竹館	103t ( 570口)	23.1	<u>42</u>
	④ 平賀	2,500t (1,603口)	21.1	70
	⑤ 石川	646t ( 479口)	21.5	75
東部RC	⑥ 薬師堂	301t ( 150口)	19.9	<u>89</u>
	⑦ 新里	211t ( 96口)	20.7	<u>97</u>

(1) 粳水分・品質は施設の自主検査装置による測定値。品質判定は整粒，胴割粒，被害粒，未熟粒，死米，着色粒の6分類。被害粒には碎米，茶米，奇形粒等が含まれるが，碎米が大部分を占める。胴割粒は胴割れが進行すると碎米になることから，胴割れ発生程度を「胴割粒+被害粒」で判定した。農産物検査規格による1等米の被害粒（胴割粒を含む）限界基準は，15%以内（落等基準）。

(2) 粳水分および品質は，搬入粳重で加重平均した値。

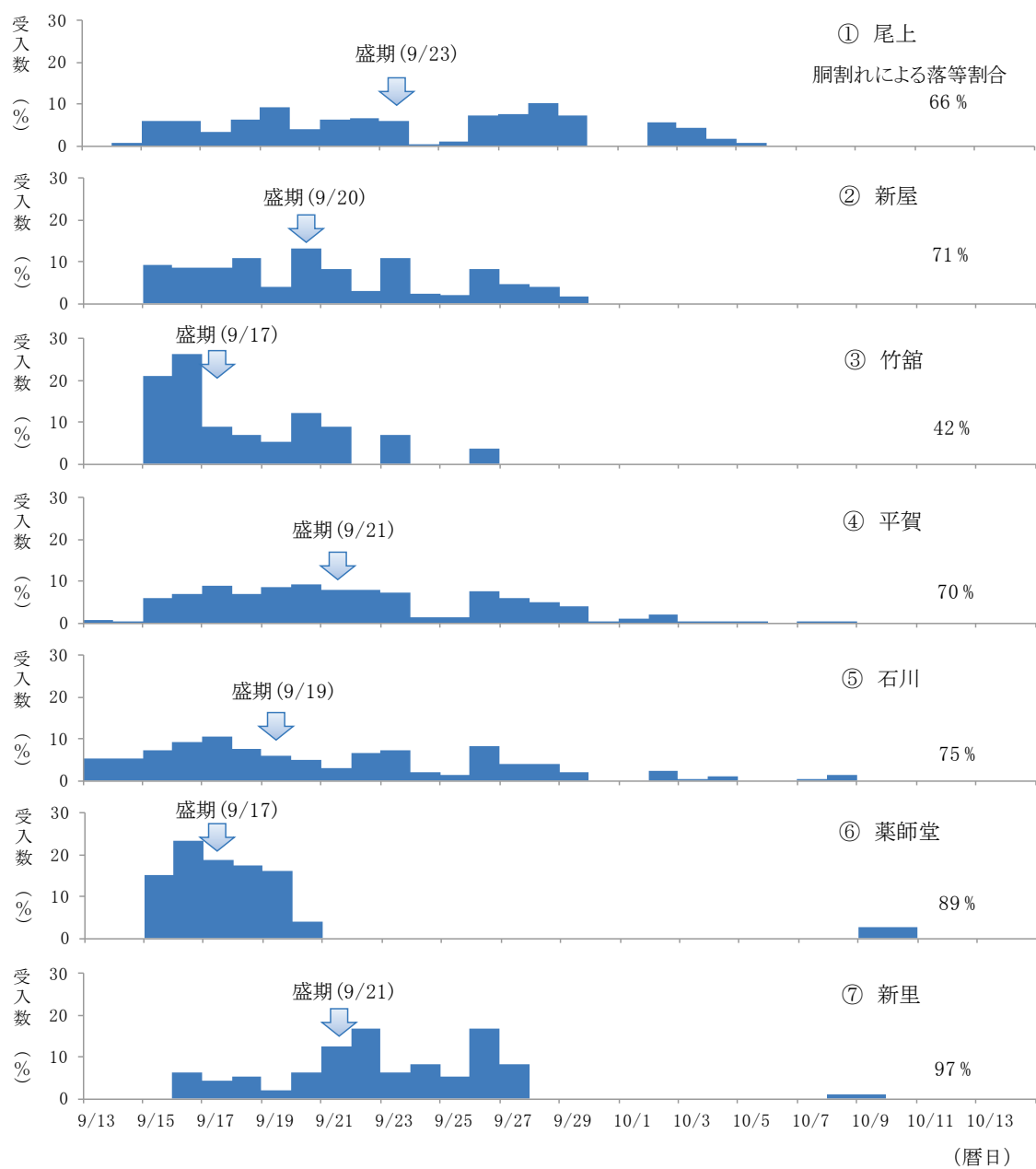


図 7-6 地区ごとの収穫日の推移

該当施設での総荷受重量を 100 として、日別の荷受重量を%で示した。  
集荷施設への米の搬入は収穫当日である (荷受日=収穫日)。

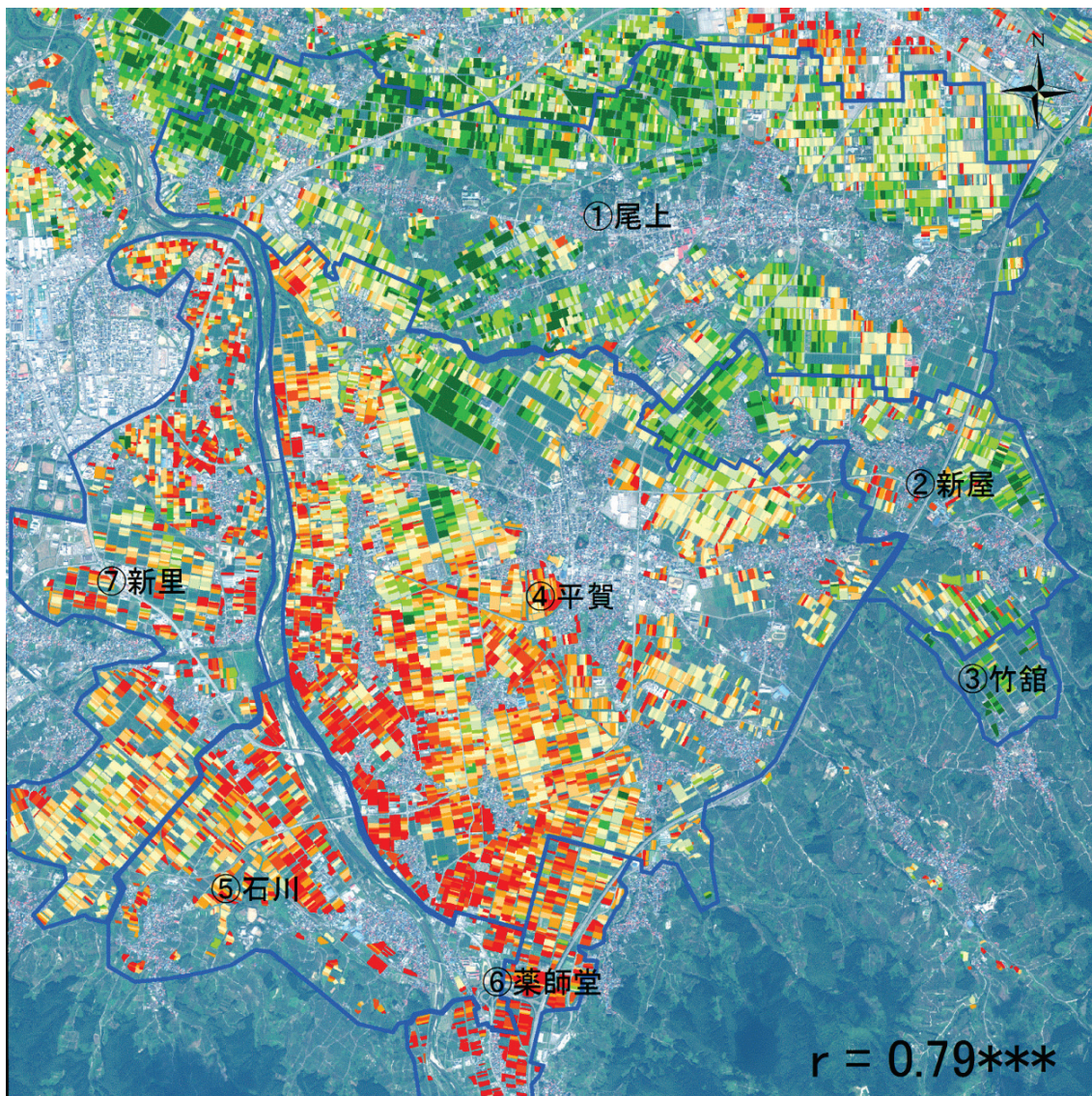


図 7-7 衛星画像から推定した成熟期の分布（圃場単位）

衛星データ（660nm）と圃場で調査した成熟期（35 地点）との関係式から、成熟期を広範囲で圃場ごとに推定した（収穫適期マップ）。



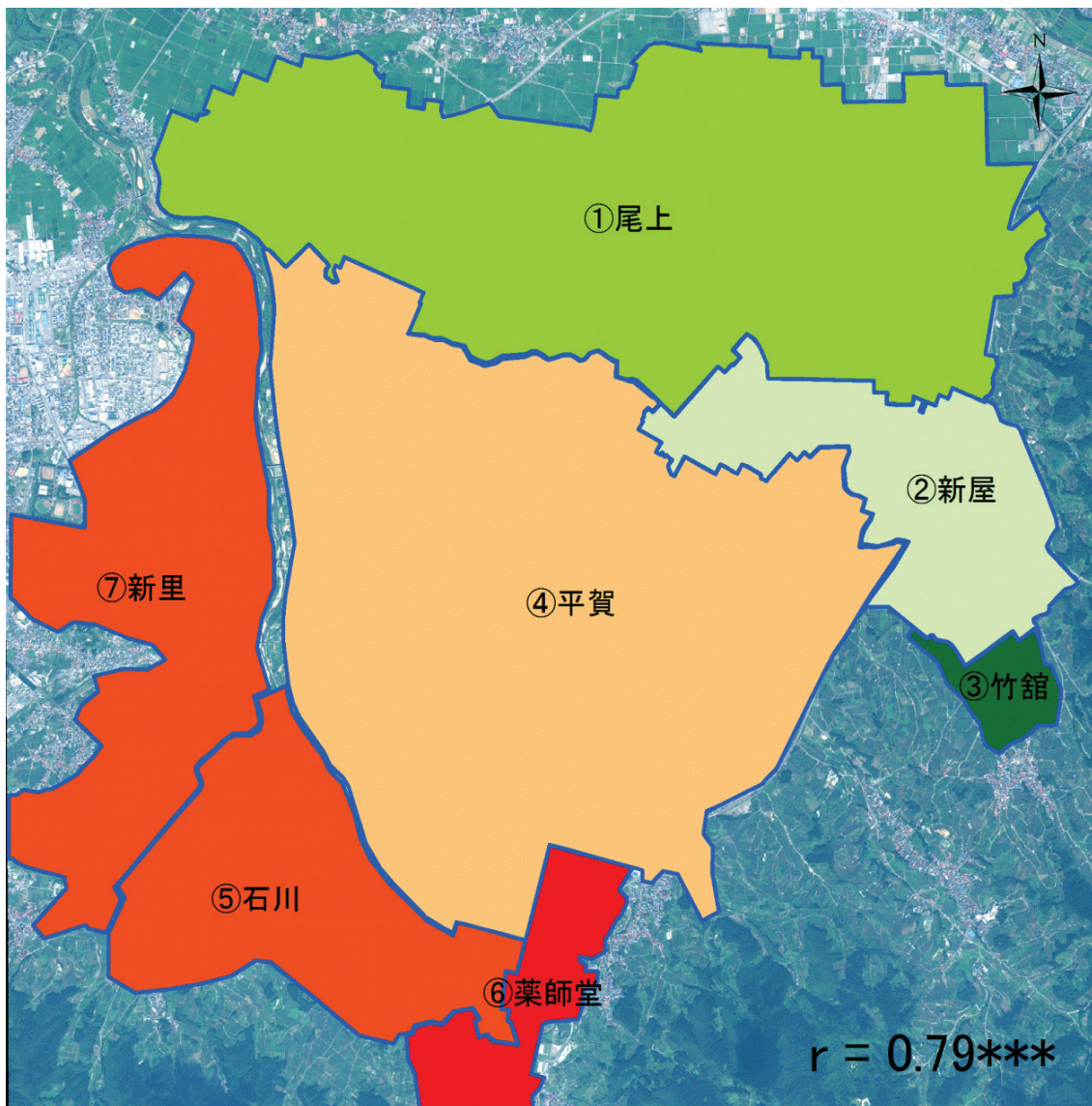


図 7-8 衛星画像から推定した成熟期の分布 (地域平均)

圃場ごとの成熟期を地区ごとに平均したマップ

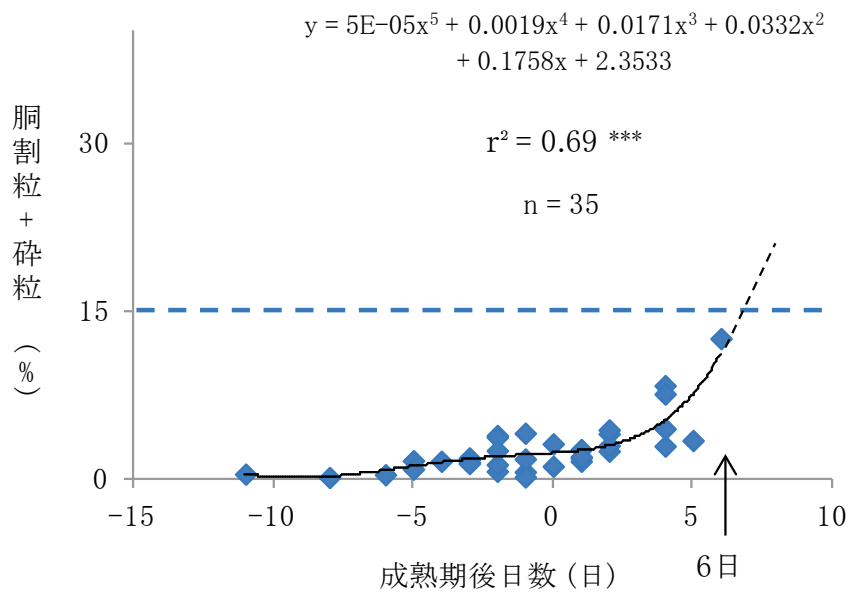


図 7-9 胴割れ発生と成熟期後日数の関係

①～④地区の調査地点。

品質判定器 (RGQI20) による判定 (重量%)。

\*\*\* : 0.1%水準, \*\* : 1%水準, \* : 5%水準でそれぞれ有意,

n. s. : 有意ではない。



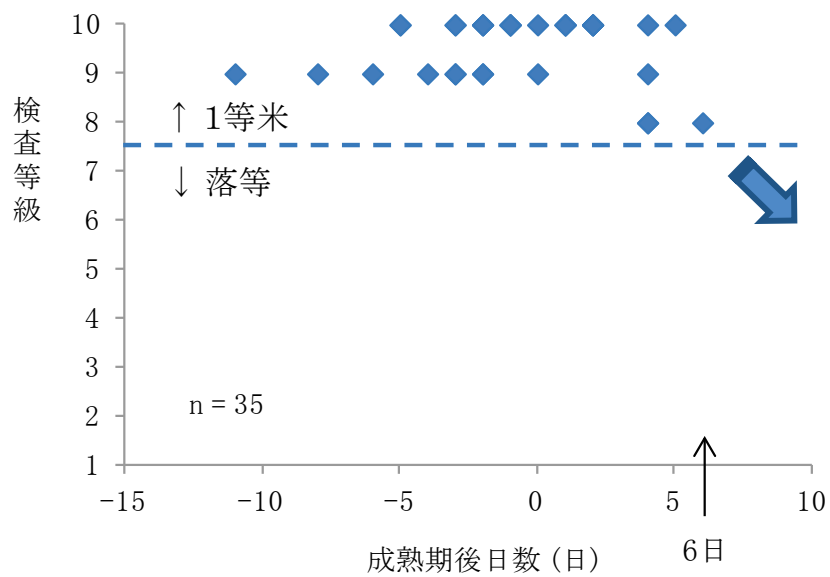


図 7-10 検査等級と成熟期後日数の関係

①～④地区の調査地点。

検査等級 10 : 1 上, 9 : 1 中, 8 : 1 下, 7 : 2 上, 6 : 2 中,  
5 : 2 下, 4 : 3 上, 3 : 3 中, 2 : 3 下, 1 : 規格外

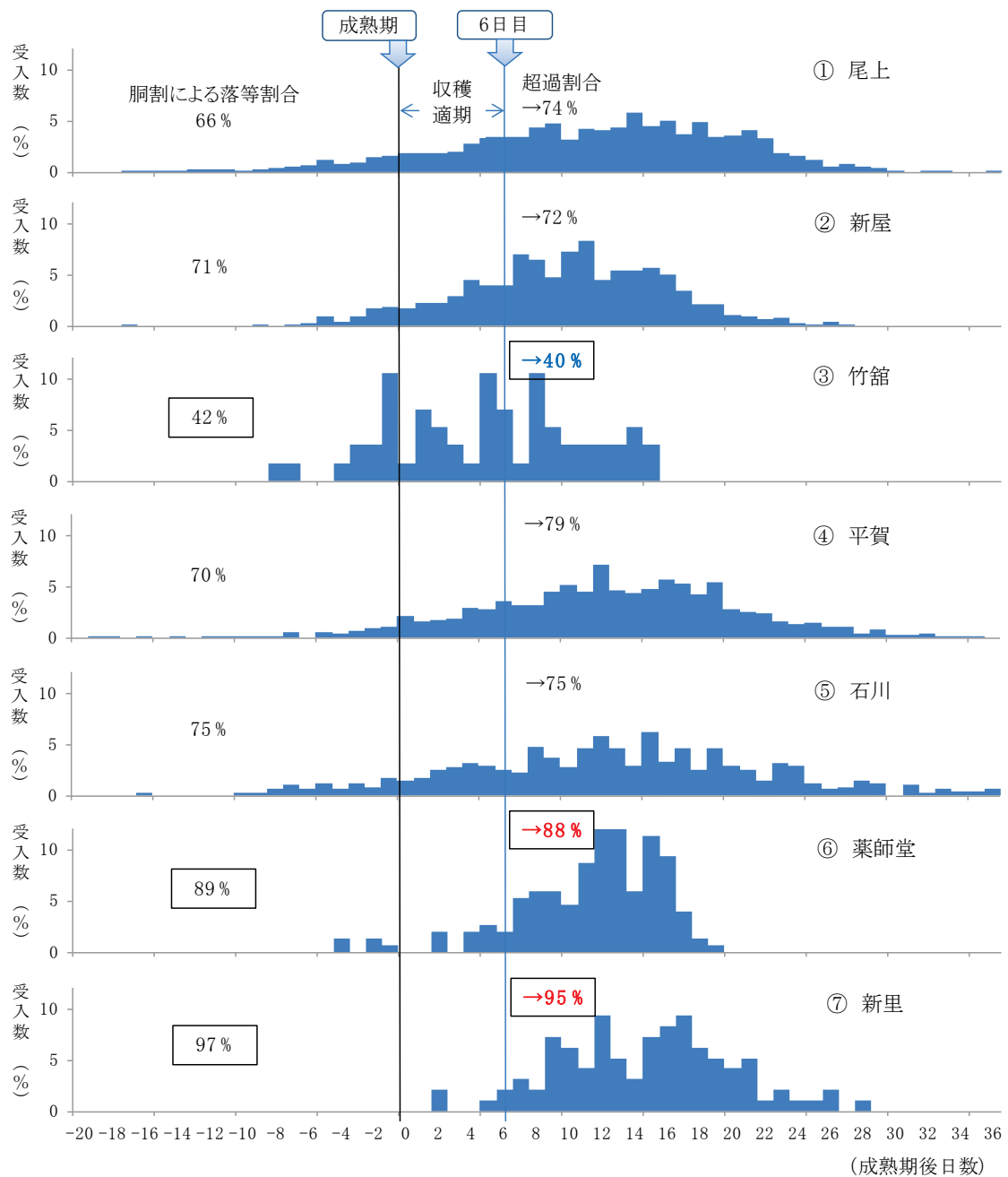


図 7-11 成熟期後日数でみた収穫日の推移

成熟期後日数の推定方法

- (A) 衛星データから推定した成熟期の平均日 (地区ごと)
- (B) 荷受日の平均日 (地区ごと)
- (C) 荷受けした籾の水分の平均値 (地区ごと)
- (D) 成熟期における籾水分 → 25%と規定した  
(平成 21~22 年①~④地区調査地点データ n=660 から求めた成熟期 籾水分を参考にした。水分推定値 25.4% ≒ 25%)

上記A~Dを用いて、1日当たりの籾水分減少率を算出した

$$\text{籾水分の減少率 (1日あたり)} = (D - C) / (B - A)$$

地区ごとの籾水分の減少率をもとに、荷受米それぞれについて、籾水分から成熟期後日数を推定した。

$$\text{成熟期後日数} = (D - \text{荷受米の籾水分}) / \text{籾水分の減少率}$$

## 2.2 適期収穫への予測マップの活用

前項で解析を行った 2012 年の胴割米の発生は、収穫時期の高温の影響で収穫適期幅が大幅に短くなり、これと実際の収穫時期をうまく合致できなかったことが原因と考えられた。胴割米は、数日単位の収穫時期の差が外観品質に影響を与える。収穫適期の予測は、現行法では地域の平均的な状況しか判別できないことから、適時にかつ効率的な収穫を可能にするため、圃場毎の収穫適期を広域で予測できる技術が望まれている。第 4 章で、リモートセンシングによる収穫適期の広域マップ作成手法について述べた。本項では、適期収穫に向けた収穫適期予測マップ（以下、予測マップと呼ぶ）の活用法について述べる。なお、生産現場での収穫作業の形態は、コンバインなどの収穫機械を個人で所有し作業も個人で実施する形態と、機械を共同で所有し作業を生産組合で実施する形態の 2 種類ある。平川市の場合、両者の比率は、個人が 4 割、生産組合が 6 割ほどである。両者の割合が拮抗していることから、作業形態別に予測マップの活用法を地元農協および県の農業普及振興室と検討した。

個人での収穫には、図 7-12 の予測マップを用いることができると考えられる。個人収穫では、人手の確保や兼業している職業の都合で、休日の収穫が多い傾向があるため、計画的・効率的な作業管理のためにマップ情報が役立つ。圃場単位での収穫適期の情報を各農家に伝達するため、マップを地区の掲示板や農協の広報、収穫研修会などで用いることで収穫適期の周知が期待できる。なお、タンパクマップの場合は、マップが食味の優劣を示すことから、農家への情報伝達は、その農家が耕作する圃場に限定して行う必要があったが、予測マップの場合は、時期の早晚に関する情報であり、情報の守秘性は高くない。そのため、インターネットや ICT などを利用し、より多様な手段による適時の情報伝達が期待できると考えられる。

生産組合向けの予測マップのバージョンとしては、各生産組合の収穫担当地区をポリゴンでエリア分けし、生産組合単位で収穫適期を平均化したマップ（図 7-13）、および圃場単位の予測マップ（図 7-12）に生産組合の担当地区のポリゴンを重ねたマップ（図 7-14）を作成した。図 7-13 によって生産組合単位で収穫適期が判れば、従来の全地域単一の予測適期よりも細かい単位で収穫開始日を決定することができる。たとえば、適期に応じて農協がどの生産組合から収穫を開始するか決定し、地域全体の米が適期で収穫されるようマネジメントが可能となる。また、図 7-14 のマップによって生産組合の担当地区と地区内

での収穫適期を圃場単位で明確にできる。実際には様々な要因のため、収穫作業を全圃場でそれぞれの最適時に行うことは容易ではないが、地区内でも収穫適期が早い圃場が多いエリアから先に収穫を進めるよう、担当地区を区切って収穫順序を工夫することは可能であり、適期収穫に向けた収穫計画の立案に有効と考えられる。生産組合では、平日も休日も同様に収穫作業が進められることから、より多角的なマップの活用が期待できる。

また、北海道における小麦の生育早晚マップの事例（奥野・岩田 2004）では、品質向上効果のほか均質な水分での収穫が可能となったことで乾燥費用の低減効果も報告されており、稲の場合でも適期収穫により乾燥費用の低減効果が期待される。

なお、予測マップの作成に必要な分光画像は、タンパクマップ作成に必要な分光画像と取得時期が共通するため、同一画像を利用できる(図 7-15)。予測マップとタンパクマップを同時に活用することは、費用や画像処理を効率化できるメリットがある。観測日程についても、速報版タンパクマップを用いた区分集荷の実施スケジュールを参考にできる。

本研究で対象地域とした平川市でも、胴割米の発生が問題となっており、適期収穫がその回避に有効であることから、予測マップはこの対策に活用が期待されている（青森県産業技術研究推進会議 2013）。外観品質は農家の収入に直接影響するほか、食味と並び、産地の米の販売を左右する重要な要素である。収穫適期の予測マップは、産地における米の外観品質の安定と向上に役立つと考えられる。

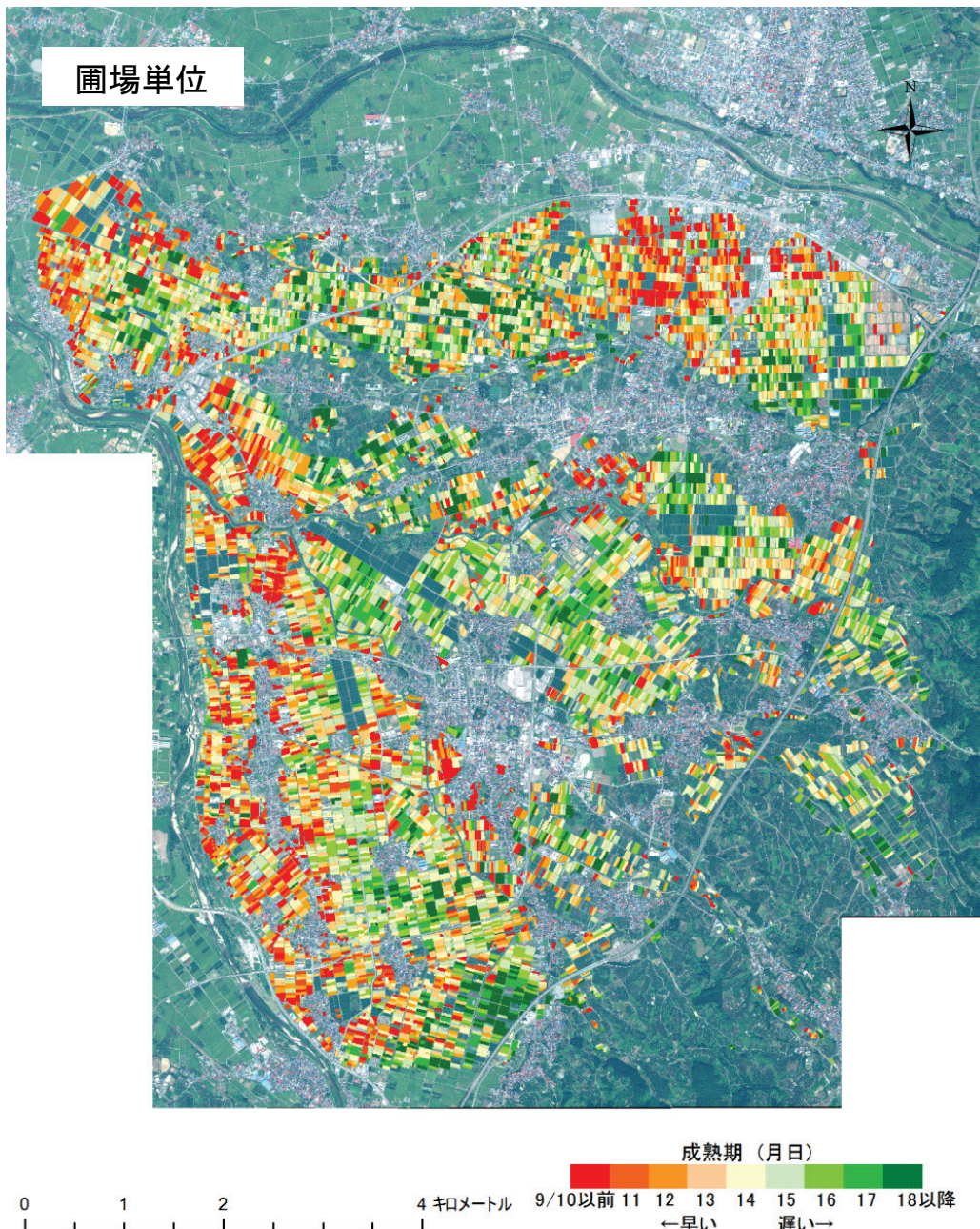


図 7-12 収穫適期予測マップ①

分光画像

観測手段 衛星：WorldView-2

観測日 2011年8月28日（出穂後24日）

マップの作成手法

- ①衛星データ（660nm） ， ②平均 9/14（出穂後積算気温から） ，
- ③標準偏差 2.7（前年までの収穫適期マップ[2007～2010]における標準偏差の平年値）
- ①～③を用いて，正規分布を利用して求めた（詳細は第4章を参照）



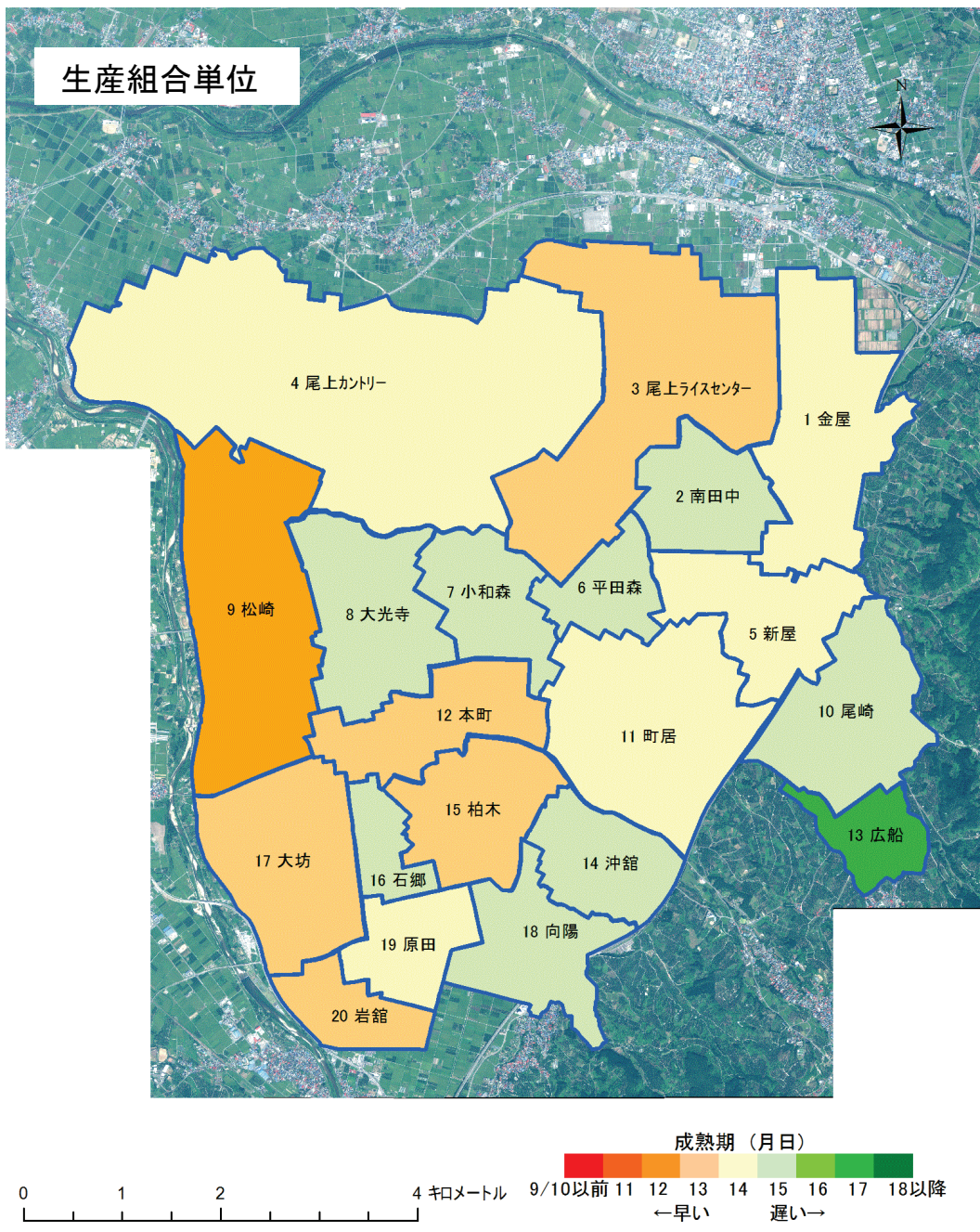


図 7-13 収穫適期予測マップ②

分光画像

観測手段 衛星：WorldView-2

観測日 2011年8月28日（出穂後24日）

マップの作成手法

生産組合ごとのポリゴンを作成し、予測マップ①をポリゴンで平均化した。



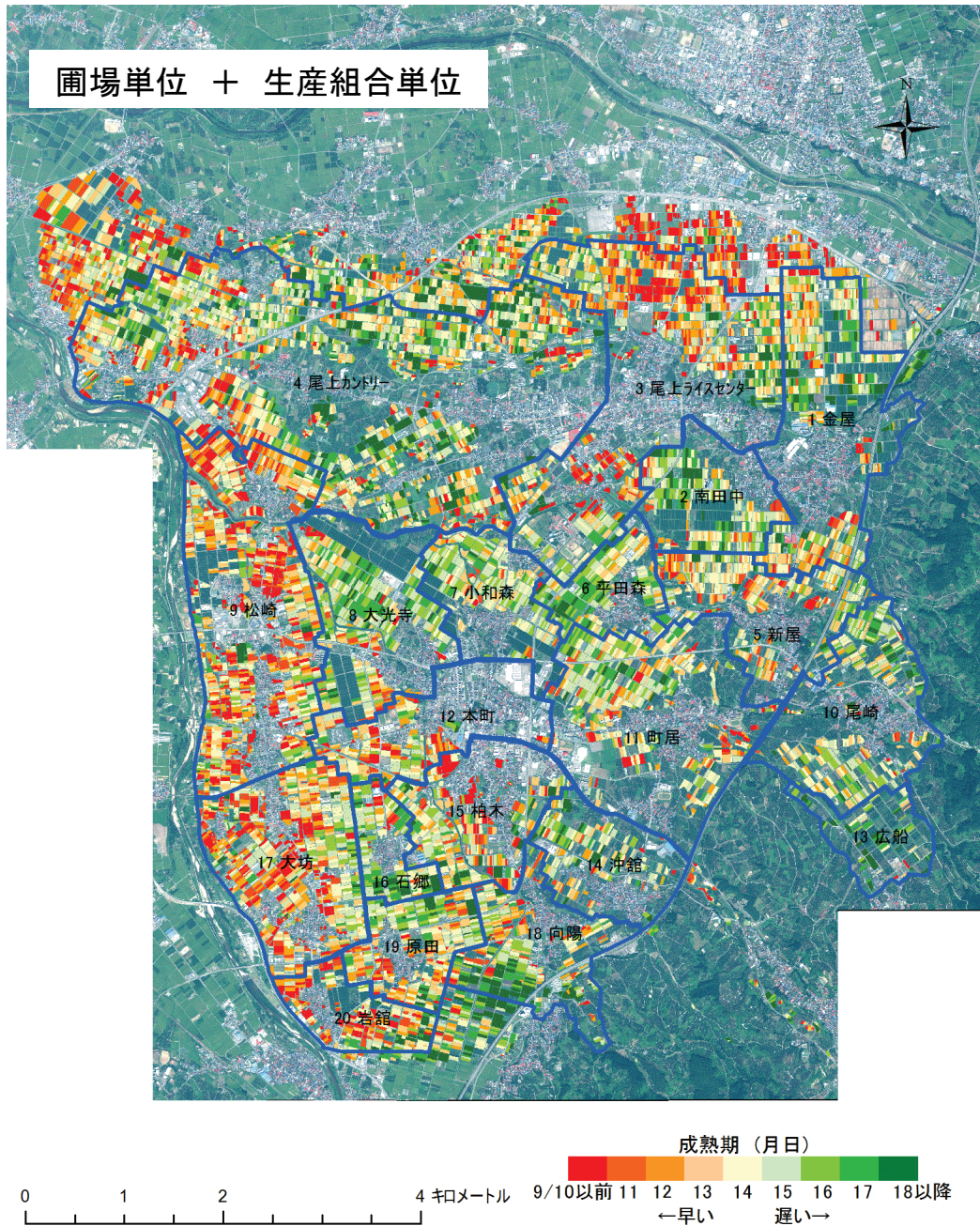


図 7-14 収穫適期予測マップ③

分光画像

観測手段 衛星：WorldView-2

観測日 2011年8月28日（出穂後24日）

マップの作成手法

予測マップ①に、生産組合のポリゴンを重ね合わせした。

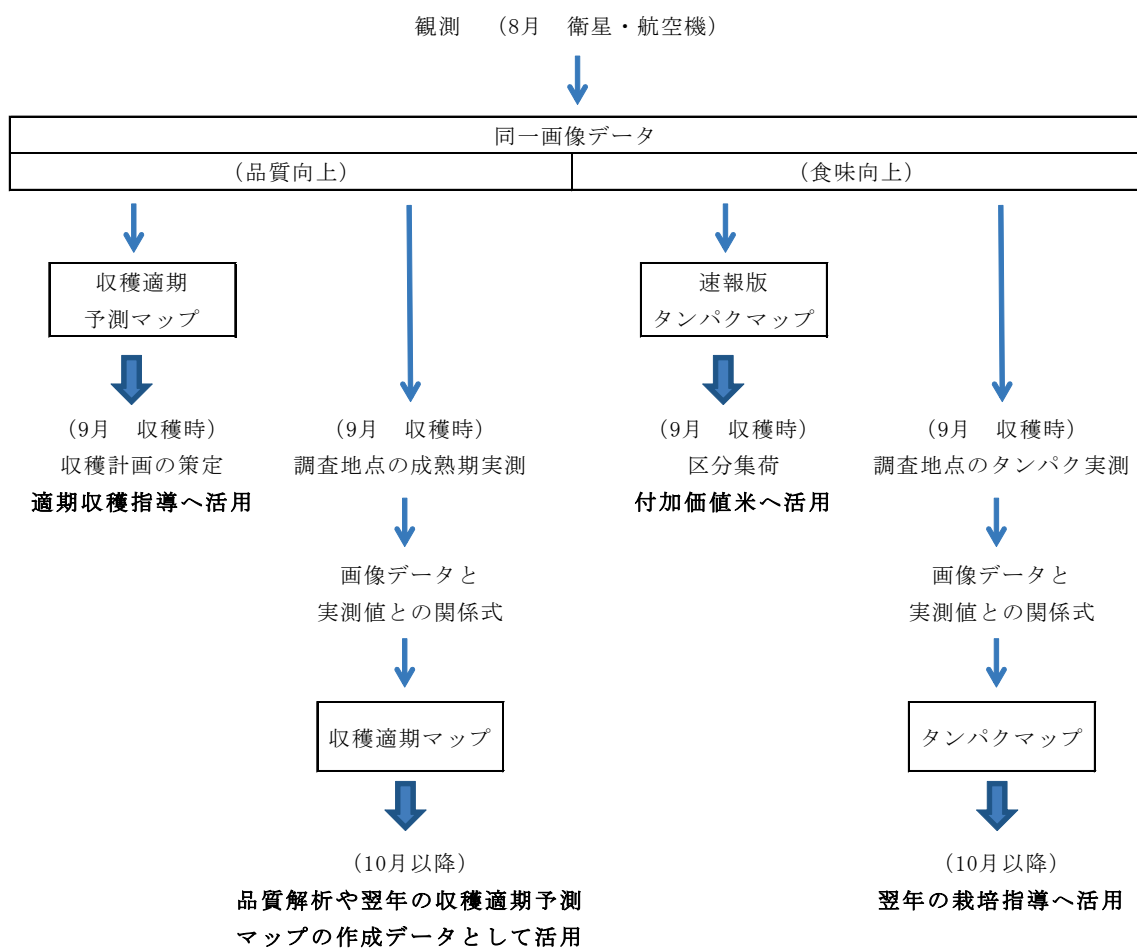


図 7-15 品質および食味向上を目的としたマップ作成フロー

### 3 産地におけるリモートセンシング・GIS利用の課題

#### 3.1 リモートセンシングに係る費用

リモートセンシングで得られる農作物の広域的な情報は、個々の圃場での栽培管理への適用だけではなく、品質価値の向上による地域ブランド化など産地戦略を考える上で有用である。しかし、タンパクマップの例でも、行政や農業団体、国の研究開発費等による費用支援を受けて始めるものの、数年間の支援期間が終了した後は、実施されなくなる事例が多い。推定精度が十分でないといった技術的な問題だけではなく、リモートセンシングに係る費用負担がネックとなることも少なくないと考えられる。産地でリモートセンシングを導入する場合には、データの広域性から、農協が事業主体となる場合が多いが、農協組織であっても、高額な費用の負担は厳しく、実施したとしても費用対効果が問われる。衛星や航空機による観測データから得られるタンパクマップは、圃場ごとの食味レベルを一目で把握でき、これを利用した栽培指導は従来の指導よりも大きな効果が期待できるが、栽培指導の効果は価値として直接的に評価しづらい場合が多く、費用対効果の明確な線引きは困難である。

青森県内でタンパクマップを栽培指導に活用している津軽みらい農協の事例では、このリモートセンシング費用を回収する仕組みとして、区分集荷による付加価値米「おいしさキャッチ米」の販売を行っている。「おいしさキャッチ米」は一般米よりも白米10kg当たり100円高い価格で販売されており、これによる付加価値収入が毎年100万円前後得られている。一方、リモートセンシングに要する費用は、対象面積の大小やGISに係る費用で大幅に変動する。表7-6に津軽みらい農協の事例を示した。農協では、2010年にリモートセンシング対象面積を農協全域の279km<sup>2</sup>まで拡大した(A)。費用が499万円に達し403万円の赤字となった。しかも、農協では2009年までは県や市から補助金を受けていたため費用負担は総額の1/3で済んでいたが、2010年からは全額農協負担に変わった。農協内部では、負担が急に膨らんだことから費用対効果が問題となった。そこで、2011年にリモートセンシング技術の研究および活用を検討する場として、青森県産業技術センター(以下、試験場と呼ぶ)、農協、県普及振興室を構成員とするリモートセンシング研究会を立ち上げ、リモートセンシング費用の削減の可能性について検討を行った(B)。①衛星撮影の面積については、必要最小限の100km<sup>2</sup>程度に限定することで、撮影費用が2010年よりも133

万円少ない 78 万円に縮小可能であった。100 km<sup>2</sup>に関しては、当時の GIS 地図情報（田区データ）の整備済み地域の面積である。2010 年は地図情報の未整備地域まで範囲を拡大したが、未整備地域では農家単位での指導が上手くいかず、タンパクマップを栽培指導へ十分活用できなかった。これも費用対効果が問題となる要因となった。②タンパクマップ作成については、試験場では玄米タンパク質含有率の推定精度向上や収穫適期の推定に向けた研究を行っていたが、研究会で調査研究を共同で行う体制を明確にし、労力および費用の効率化を図ることとした。衛星画像費用は農協が負担し、タンパクマップは試験場が作成を分担する形としたことで、タンパクマップ作成費用は発生しなくなった。また、③現地調査や打ち合わせに係る費用についても、地元の関係機関だけなので省略できた。④GIS 基本ソフトの保守費用については、使用に慣れているこれまでのソフトを継続することとし 2010 年と同額を見込んだ。⑤GIS 追加ソフトと⑥GIS 属性データの更新費用については、お米の通信簿作成のために必要な費用である。しかし、⑤と⑥合計で 112 万円と費用負担が大きいことに加え、「お米の通信簿」を 5 年間継続し、農家の意識改革にある程度繋がったことから、当面見合わせることにした。以上、タンパクマップの活用は「おいしさキャッチ米」に限定することによって、リモートセンシング費用が 94 万円、「おいしさキャッチ米」による収益が 99 万円となった。収益が費用を若干上回り、リモートセンシング費用を安定して回収できるようになった。今後、農協では付加価値収入の増加に見合った形で、事業規模の拡大や新技術の導入を図っていくことを方針とした。なお、今後、収穫適期予測マップを外観品質の向上に活用する予定であるが、この技術については、タンパクマップと衛星画像が共用できることから、新たな費用負担は発生しない見込みである。

### 3.2 GIS の整備費用

リモートセンシングで得られる広域の情報を効率良く、各農家に伝達するには GIS の利用が便利である。GIS は、土地と土地に関わる情報を結び付け、情報管理を効率的に行うことができる。タンパクマップによる栽培指導では、タンパクの高低が食味の優劣を表すことから、耕作圃場のタンパクが高かった場合には、周囲の農家に知られるのを避けたいと思う場合もあり得る。GIS を活用することで、「お米の通信簿」などの手段で情報を個人単位で効率的に伝達することが可能になる。ただし、GIS ソフトを購入しただけでは、これを行うことはできない。事前に対象地域の地図データの整備が必要となる。宅地の場合は、

一軒一軒の家に個別の住所が割り振られ、そこに住む人の情報も明らかになっていることから、郵便（情報）がスムーズに配達される。一方、農地の場合は、農地一筆ごとの住所が明確でなく、その所有者や耕作者の情報も共有されていない場合が多い。農地を対象に、GIS で効率的に情報管理するには、圃場の地図情報（圃場一筆ごとの区画を示す田区）と所有者や耕作者情報といった属性データの両者を整備することが必要となる。表 7-7 は 2006 年の津軽みらい農協での GIS システム導入事例である。①地図情報の整備については、2000ha で 432 万円の多額の初期投資が必要であった。また、②所有者や耕作者情報といった属性データの整備には、2000ha で 100 万円の費用が必要であった。さらに、③GIS 基本ソフトの導入が 2 ライセンスで 80 万円、④GIS 追加ソフトの導入が 2 ライセンスで 336 万円を要し、合計で 948 万円の費用が発生している。GIS は、このように多額の費用が必要であったが、最近、GIS フリーソフトの開発や地図情報の共用など、費用の面で改善の動きがみられている。例としてあげた QGIS も GIS フリーソフトの一つで、③GIS 基本ソフトの費用を削減することができる。最近、国の事業（農林水産省 水土里情報利活用促進事業 2006～2010 年）で、日本のほぼ全ての農地で地図情報が整備され、水土里ネットを通じて安価な利用料（青森県事例 10 万円/1 ライセンス）を支払うことで、地図情報を利用できるようになった。使用可能な GIS ソフトは、水土里ネット専用ソフトに限定され、市販ソフトのように機能は豊富ではないが、地図情報の整備費用と GIS ソフトの導入費用を大幅に抑えることが可能となる。

また、所有者や耕作者情報といった属性データは、直近の情報に基づき、定期的に更新する必要がある。そのため、属性データの管理にも、多額の維持費用が必要となる。市役所や土地改良などの農業関係機関では、大部分が GIS システムをすでに導入している。しかし、属性データの管理は、関係機関が独自で行っている場合が多く、それぞれの機関で更新費用が発生しているのが現状である。水土里ネットの場合でも、青森県の事例では属性データの管理は、各々の機関で行う必要がある。地域の農業関係機関で、土地の所有者や耕作者などの基本的な情報を共有できれば、各機関でのデータ更新費用の軽減が期待できる。現状では、税金の徴収を目的とした市役所などの機関では GIS の導入がかなり進んでいるが、農協ではデータ更新に係る費用やデータ入手の問題から導入はまだ少数である。市町村役場から農協へのデータ提供についても、個人情報に対する考え方から協力が難色を示す事例も見受けられる。農業関係機関での GIS 導入や費用低減に向け、地域において

GIS データの入手についての協力や情報共有の仕組みづくりが望まれる。

表 7-6 リモートセンシングに係る費用

(A) 2010 年

項 目	作業実施	費用 (万円)	実施項目	
			(a) 付加価値米+	(b) 栽培指導
			(キャッチ米+	お米の通信簿)
費用 ① 衛星撮影 (農協全域 279km <sup>2</sup> )	業者	211	○	
② タンパクマップ作成	業者	89	○	
③ 現地調査・打合せ	業者・農協・研究所	71	○	
④ GIS基本ソフト保守 (2ライセンス)	業者	16	○	
⑤ GIS追加ソフト保守 (2ライセンス)	業者	12	○	
⑥ GIS属性データ更新	業者	100	○	
合 計				499
収益 付加価値米 (おいしさキャッチ米販売: 白米96t)				96
利益				-403

(B) 2011 年

項 目	作業実施	費用 (万円)	実施項目	
			(a) 付加価値米	(a) 付加価値米+ (b) 栽培指導
			(キャッチ米)	(キャッチ米+お米の通信簿)
費用 ① 衛星撮影 (キャッチ米地域 103km <sup>2</sup> )	業者	78	○	○
② タンパクマップ作成	研究会 (農協・研究所)	0	○	○
③ 現地調査・打合せ	研究会 (農協・研究所)	0	○	○
④ GIS基本ソフト保守 (2ライセンス)	業者	16	○	○
⑤ GIS追加ソフト保守 (2ライセンス)	業者	12	—	○
⑥ GIS属性データ更新	業者	100	—	○
合 計			94	206
収益 付加価値米 (おいしさキャッチ米販売: 白米99t)			99	99
利益			5	-107

衛星撮影 279km<sup>2</sup> 津軽みらい農協全域 (平川市, 黒石市, 田舎館村, 板柳町, 藤崎町, 鶴田町, 弘前市の一部)

衛星撮影 103 km<sup>2</sup> キャッチ米実施地域に限定 (平川市, 田舎館村・黒石市・弘前市の一部)

衛星撮影単価 (WorldView-2) 7,200 円/ km<sup>2</sup>\*消費税

GIS 基本ソフト (ArcView), GIS 追加ソフト (お米の通信簿帳票排出用の ArcView カスタマイズ版)



表 7-7 GIS 整備に係る費用

項 目	費用 (万円)		
	導入事例 (2006年, 津軽みらい農協)	試算事例	
		QGIS	水土里ネット青森
① 地図情報の整備 (2000ha)	432	432	0
② 属性データ更新 (2000ha)	100	100	100
③ GIS基本ソフト導入 (2ライセンス)	80	0	20
④ GIS追加ソフト導入 (2ライセンス)	(336)	—	—
合計	612 (948)	532	120

GIS 基本ソフト (ArcView 等, 一般的な GIS 基本機能をもつソフト)

GIS 追加ソフト (お米の通信簿帳票排出用の ArcView カスタマイズ版)

## 第8章 総合考察

衛星リモートセンシングは、1972年に打ち上げられたLANDSAT衛星の登場で一般への門戸が開かれた。その後、1986年にSPOT衛星が打ち上げられ、これらの衛星から取得された画像が、環境、農業、森林、災害監視など様々な分野で利用されてきた。しかし、この段階での利用は、研究レベルでの利用がほとんどであった。農業分野での実利用は2000年代に入ってから、北海道でSPOT衛星を米のタンパク質含有率（以下、タンパクと呼ぶ）の測定に活用したのが初めてである。その後、北海道では小麦の適期収穫やテンサイの糖分含量の推定にも活用を始めたが、最近では、この畑作への利用がメインとなっている。北海道での畑作の圃場サイズは2~3haと、本州以南に比べて桁違いに大きく、SPOT衛星の解像度である10~20mでも圃場単位での情報が取得可能である。こうした違いも北海道で実利用が先行している理由となっている。

衛星は広域かつ圃場単位の情報を容易に取得できる類まれな特徴を有し、これを作物の生産管理に応用できれば、産地レベルで農産物の品質向上を図る有効なツールとして期待できる。本研究では、我が国の主要農作物である米を対象に、価格や販売動向に大きく影響する食味および外観品質の向上を目指して、リモートセンシング技術を産地レベルで実践的に活用する手法を検討した。なお、リモートセンシングのプラットフォームは、水田の一般的な圃場サイズ10~30aから圃場単位の情報を取得できるよう、解像度1.5~2mの高解像度衛星または航空機を用いた。

このような背景と全体的なねらいのもとに実施した本研究について、各研究テーマでの結果を総括する形で考察を進める。

### 1 米の食味推定技術の精度向上と活用

これまで、全国の米産地では、北海道で開発されたタンパク推定技術をそのまま適用する形で導入を試みていたが十分な精度が得られた事例は少なかった。本研究では、米の食味の指標である玄米タンパクの推定について、田植時期の違いに起因した稲の生育ステー

ジのバラツキが大きな誤差要因となること、また観測時期が早いほど誤差が相対的に大きくなりやすいことを明らかにした。田植期間の長さは、全国的にみて気象条件が厳しい地域ほど短い傾向があり、北国では精度の確保および観測時期の前進に関して、より有利な条件が得られやすい。また、推定精度についても、赤の波長は生育ステージの違いに対する感度が鋭く、田植時期のバラツキの影響を受けやすいことから、緑の波長を使用した正規化分光反射指数 $[(NIR-G)/(NIR+G)]$ で向上が可能なことを明らかとした。青森県では、この推定アルゴリズムの改良によって、観測時期を 8 日程度早めることが可能になり、画像取得の確実性向上や区分集荷実施に必要な期間の余裕を生みだすことに繋がっている。

青森県内の農協では、リモートセンシングによる「タンパクマップ」を活用し、食味の良好な圃場の米の区分集荷に 2007 年から取り組んでおり、これによる付加価値米は県内の消費者から一定の評価を得ている。リモートセンシング技術が、農産物の付加価値を生み出したこと、これを社会実装できたことの意義は大きい。現在、同農協では、リモートセンシング費用を付加価値米の収益から回収できており、補助金に頼らずに、事業を軌道に乗せることができた。

## 2 米の収穫適期推定と品質向上への活用

高温障害である胴割米の発生には、気温と収穫のタイミングが大きく影響し、防止には成熟期の早晩に対応した適時での収穫が必要であることを明らかにした。また、産地レベルで胴割米の発生防止を図るため、収穫適期である成熟期をリモートセンシングデータから予測する手法を開発した。生育ステージに対して感度が鋭い赤の波長を用いて、反射率の空間分布を積算気温等から規定した正規分布に変換することで、広域で圃場ごとに成熟期の予測が可能であった。また、これをマップ化した「収穫適期予測マップ」の精度は、現行法（地域平均の出穂日＋積算気温）だけではなく、産地全体への適用が実際には労力的に困難な手法である参考法（圃場ごとの出穂日＋積算気温）よりも優れる。これは、稲では籾数が多いほど成熟までの日数を要するが、リモートセンシングでは、衛星画像の面積当たり葉緑素量の情報を成熟期の遅速の情報（稲が大型で葉緑素量が多い＝籾数が多い）として利用できるためである。リモートセンシングでは、広範な地域を一斉観測できるメ

リットがある反面、現行法に比べ精度が劣るケースが多いが、この成熟期の推定に関しては、波長別の画像計測が可能なリモートセンシングの特性を利用することで、現行法よりも高い精度を実現することが可能である。また、広域マップの作成によって、地域や圃場における成熟期の差はこれまでの現行法における想定よりもかなり大きいことが明らかとなったほか、この見込みの違いが現場での収穫の遅延程度の拡大に繋がっていることが考えられた（第7章2.1項）。成熟期を広域でマップ化することは、圃場単位で成熟期を把握できるだけでなく、産地全体の収穫計画の立案を可能にする。個人農家または生産組合がマップを活用することで、産地全体の収穫時期の最適化が図られ、産地での胴割米の発生防止が期待できる。活用場面に応じたマップとして、個人農家向けおよび生産組合向けのバージョンを考案した（第7章2.2項）。開発した成熟期の予測技術は、青森県で平成25年度に普及技術として取り上げられ（青森県産業技術推進会議 2013）、今後の技術活用が予定されている。

### 3 土壌からの窒素発現程度の推定

リモートセンシングデータから、可給態窒素量を指標に土壌からの窒素発現量（地力窒素）を推定することを目指し、①リモートセンシングデータからの腐植含有率の推定程度、②腐植含有率からの可給態窒素量の推定程度を検討した。まず、①リモートセンシングデータからの腐植含有率の推定に関して、単バンドの分光反射率を用いた場合には、赤と近赤外で腐植含有率と密接な関係がみられ、腐植含有率を Log 値とした場合には相関係数がさらに 0.02～0.07 ポイント高まった。NDSI 値と腐植含有率の決定係数は、青と赤の組合せが最も高く、単バンドで最も高かった決定係数をさらに上回った。②腐植含有率からの可給態窒素量の推定に関しては、指数回帰による当てはまりが良く、高い決定係数が認められた。そのため、①と②の両方で密接な関係が認められることから、リモートセンシングデータから圃場ごとに土壌窒素発現量を推定できる可能性が示唆された。なお、腐植含有率と可給態窒素量との関係は、土壌タイプや腐植含有率のレベルによって異なる傾向がみられた。そこで、土壌図などで予め土壌タイプのデータが得られれば、これと腐植含有率を組み合わせることで、より高い精度で土壌窒素発現量を推定できる可能性が考えられた。

さらに、湛水前の土壌の乾燥程度や地温上昇による窒素発現への影響を評価するモデルと組み合わせることで、土壌窒素発現量を絶対値で予測できる可能性がある。土壌の窒素発現の傾向が圃場単位で把握可能になれば、適切な施肥管理が容易になり、広域で食味や外観品質の向上に効果が期待できると考えられる。

#### 4 生育診断指標の推定

リモートセンシングデータを生育診断に応用することを目指し、生育診断指標を推定するに当たっての誤差要因と観測条件を検討した。幼穂形成期頃の水田の反射スペクトルは、湛水条件および土壌条件で大きく影響を受けた。

現地圃場において、湛水条件が異なる条件下では、湛水の有無が近赤外の反射スペクトルに大きく影響し、近赤外において生育量および生育量×葉色値との決定係数が大幅に低下した。湛水条件が同一の条件下（全地点で落水条件）では、近赤外における生育診断指標の決定係数は、生育量および生育量×葉色値で高かった。葉色値では、土壌条件の違いが可視の赤色域を中心に大きく影響することで、可視でも決定係数がかなり低かった。葉色値は、反射スペクトルでの評価程度が低いことから、リモートセンシングを生育診断に適用する場合は、評価対象を生育量とすることで精度の高い推定が期待できると考えられた。

以上、湛水条件が一定に揃う時期であれば、生育量のある程度推定可能と考えられた。推定に用いる波長については、単バンドでは近赤外、2つの波長を組み合わせた場合ではNDSIよりもSAVIの推定力が高かった。なお、近赤外とSAVIの推定力はほぼ同程度であった。今後、追肥量決定のための生育診断技術として活用するためには、観測時期の設定や圃場ごとの生育ステージの違いの影響などについて、さらに検討を加える必要がある。

## 5 リモートセンシングを利用した産地での 総合的な生産管理モデルの実現に向けて

近年、温暖化の影響から米品質の高温障害が全国的な問題となっており、農家サイドから解決策が強く望まれている。また、米の品質や環境配慮、食の安全に対する消費者の関心は極めて高く、これらが付加価値として価格に反映される。これらは、国内的には産地間での価格差を生じさせ、国外的には我が国の農産物全体に対する重要な付加価値となっている。食味や外観品質は、価格や販売動向に対する影響程度が大きく、産地戦略上、特に重要な特性となっている。

圃場ごとのデータを広域的に得られるリモートセンシングは、米の食味と外観品質の向上を図る上で、有効な手段になり得る。たとえば、広域での玄米タンパクの推定は、直接的には米の食味を把握することに繋がる。この食味データを利用し、産地のブランド化や区分集荷による付加価値米の生産が行われている。一方、低タンパクの米が重視されるあまり、過度の窒素制限が白未熟粒の発生による外観品質の低下に繋がっている事例が報告されている。よって、食味・外観品質の向上には、玄米タンパクを適値内に制御することが必要となる。リモートセンシングから得られるタンパクマップは、広域で圃場単位の情報が得られることから、玄米タンパクを制御するための有効なツールになり得る。また、広域での収穫適期の推定は、成熟期の早晩に応じた収穫計画の立案を可能にし、産地における収穫時期の最適化に貢献できる。適期での収穫は、特に胴割米の防止に対して効果が見込まれるが（第7章2.1項）、茶米や白未熟粒についても被害軽減がある程度期待できることから、従前から高品質米生産の基本技術に位置づけられてきた（青森県 2011）。また、食味に関しても、適期外での収穫は食味を低下させることが報告されている（松江ら 1991）。このように、タンパクマップと収穫適期マップは、それぞれ別なアプローチで、食味と外観品質の向上に効果が期待できる。

土壌からの窒素発現量や生育診断指標の推定に関しては、今後、データを広域でマップ化し、これを施肥管理に利用することを目指している。農家レベルでの最適な施肥量の判断が容易となることから、食味を向上させるための具体的な手段として技術活用が期待できる。また、土壌に関する衛星データの活用場面としては、既存の土壌図の補完情報としての利用も考えられる。現在、土壌図データの入手は容易になったが、昭和 50 年代以降、



土壌図が更新されていないことから、その後の圃場造成や土壌改良による乾田化等の影響で現状と異なる部分が生じている。しかし、新たに土壌調査を行い確認することは、非常に多くの労力と時間を必要とする。衛星画像から土壌図の確認が可能になれば、更新が容易になる。熊谷ら（2000）は解像度 30m の Landsat 衛星画像を用いて、泥炭の分類が可能であったことを報告している。現在、解像度 2m 程度の高解像度衛星が利用可能であることから、泥炭以外の土壌タイプへの適用の拡大やより精度の高い分類が期待できる。今後、GIS 等を活用し、圃場単位で土壌図の高度な利用を図るためには、最新の土壌状況への更新が必要と考えられる。

以上、リモートセンシングで得られる広域データの活用事例および活用方向を示した。これら産地での活用には、次に挙げる測定条件が揃っていることが必要となる。井上（2011）は、実践的利用からみたリモートセンシングデータの好適性について、①実質地上解像度、②実質観測周期、③目的変量に好適な波長特性、④観測範囲、⑤適時性、⑥単位面積当たりのコストについての考慮が必要であるとしている。これを我が国の米産地に当てはめると、①地上解像度については、圃場単位でのデータ取得が必要なことから、解像度が圃場サイズより細かいことが要求される。一般的な水田の圃場サイズは 10～30a 程度であり、短辺が 10m 程度の場合もみられる。そのため、畦畔や農道を除き圃場内のデータだけを抽出するには、最低 5m 程度の解像度が必要と考えられる。また、畦畔が確認できる場合には、圃場の特定が容易になるメリットがある。本研究では航空機の解像度は 1.5m、衛星では 2m 程度の高解像度衛星を用いたが、いずれも畦畔を明確に視認できた。よって、現状の高解像度衛星は、水田での利用には十分な解像度のレベルに達していると考えられた。②実質観測周期については、航空機では毎日の観測が可能であるのに対して、現状の高解像度衛星ではおよそ 3 日ごとである。観測リクエストの競合があった場合には、実質観測周期はさらに低下する。そのため、高解像度衛星を農業に使用する場合には、観測頻度の点ではまだ懸念が残る。ただし、高解像度衛星でも同一タイプの衛星を複数機揃えることによる高頻度化が計画されており、2018 年頃には毎日の観測が実現される見込みである。⑤適時性については、第 7 章 1.1 項で付加価値米生産のための観測計画を検討した。タンパクマップによる区分集荷や収穫適期予測マップによる収穫指導では、収穫が開始される以前に生産組合や農家までマップ情報を伝達する必要がある。撮影後の画像の入手やマップ作成等にある程度の期間が必要になることから、タンパクマップを翌年度の栽培指導に活用する

のに比べ、より早い段階での撮影が必要になる。ただし、タンパクマップでは観測時期が早いほど精度が低下することから、青森県内では出穂後 20 日目頃を観測時期の早限として設定している。このように活用の種類や推定精度との兼ね合いによって、撮影の適時性のハードルが異なってくる。また、土壌の腐植含有率の推定では、田植後が観測のタイミングになるが、大部分の圃場で田植えが終了しており、かつ稲が小さい時期である必要がある。寒冷地では気象条件の制約から田植えが比較的集中して行われる傾向があり、稲の生育も暖地に比べ遅いことから、観測の適時性の点では、寒冷地では暖地よりも恵まれた条件にあると考えられる。生育診断への活用では、現行の生育診断では追肥時期である幼穂形成期が診断時期となる。しかし、リモートセンシングでは、撮影からマップ情報の伝達までの期間が必要であるため、幼穂形成期に撮影したのでは間に合わない。光学衛星では天候の考慮が必要であることから、幼穂形成期のかなり前に観測体制に入る必要がある。また、幼穂形成期前は、圃場の水を落水する中干しの時期と重なる。第 6 章 4.1 項で湛水条件の違いが近赤外の反射率に大きく影響することを述べたが、この影響を避けるタイミングでの観測が必要となろう。③目的変量に好適な波長特性については、第 3 章で述べたが、従来の NDVI = NDSI (赤, 近赤外) から、NDSI (緑, 近赤外) に推定波長を変更することで、本県でも必要精度の確保が容易となった。また、精度向上により観測の前倒しが可能となり、区分集荷に必要な期間の余裕を生み出すことに繋がった。④観測範囲については、本研究では 103~279km<sup>2</sup> を対象にしており、航空機および高解像度衛星でも 1 日で観測が可能な面積である。⑤単位面積当たりコストについては、航空機では約 200km<sup>2</sup> の撮影で 300 万円程度の費用が必要となる。高解像度衛星では航空機よりも安価であるが、約 100km<sup>2</sup> の撮影で 78 万円程度が必要である。なお、衛星撮影の費用は、解像度がやや粗い中解像度衛星に変更することで面積当たり単価を大幅に低下させることができるが、最小撮影面積が数千 km<sup>2</sup> であることから、対象面積が小さい場合ではむしろ割高となる。観測対象の面積によって使い分けが必要となろう。また、単位面積当たりコストは、同じ撮影画像を複数の用途で使用すれば、用途当たりコストを削減できる。タンパクマップと収穫適期マップは、撮影時期が共通することから、撮影回数は 1 回で済み、撮影費用および画像処理の作業を半減できるメリットがある。なお、リモートセンシングの費用については、第 7 章 3 節で詳しく述べたが、衛星撮影費用のほかに、データ活用のための GIS に関する費用が発生する。最近では GIS ソフトについてはフリーソフトが、圃場の地図データについては国の

水土里情報利活用促進事業での成果品を使用できるようになってきた。属性情報に関して、農業関係機関で地域において GIS データの入手についての協力や情報共有の仕組みづくりが望まれる。

筆者は、これまで青森県内で、いくつかの品種の生育診断等の基準を普及に移した。しかし、目指している農家段階での診断技術の活用はほとんど進んでいない。なぜなら、生育診断では葉緑素計による葉色値を用いた基準が一般的であるが、十数万円もする高価な葉緑素計を自前で所有する農家はまずいないからである。また、草丈・茎数など専門的な調査が必要となる。農協および県の普及振興室が指導に基準を活用しているが、限られた人員と期間で測定できる圃場は全体のごくわずかである。これは一例であるが、現行技術では、アルゴリズムとしては測定可能でも、多数の圃場を対象とした場合にはデータ取得が困難なことが多い。一方、リモートセンシングでは、産地全体の膨大な数の圃場の状況を把握できる可能性をもつ。ただし、産地全体のデータが得られたとしても、現場で情報を実践活用するためには、現場へのタイムリーな情報伝達が欠かせない。情報の最終的な実需者が、農協や生産組合、農家のどのレベルなのかによって情報の伝達方法も変わってくる。今後、リモートセンシングによる情報把握に加えて、情報の伝達技術が重要となってくると考えられる。数年前まではパソコンでしかできなかったことが、スマートフォンやタブレットで手軽にできるようになった。これらは数年後、大半の人が所有する汎用機器となることが確実であり、農家が圃場で作業する際にも常に持ち歩くものである。スマートフォンなどの汎用的な ICT 機器の活用が可能になることで、リモートセンシングデータを実需者まで伝達する環境が急速に整ってきた。

以上、リモートセンシングの測定技術に関しては、農業利用では主に衛星の高解像度化・高頻度化が望まれてきたが、高解像度化は複数の衛星が既に登場し、高頻度化も数年後に実現の見込みとなっている。データの伝達手段も、GPS 機能をもつスマートフォンなどの汎用機器の利用が誰でも可能な環境が急速に整ってきた。今後、産地でのリモートセンシングデータの活用について、技術開発や実践利用が急速に進むことが期待される。本研究は、リモートセンシング技術を産地スケールで高品質米生産に実践活用した先駆的モデルであり、今後、他の産地での活用の指針となるものである。本研究成果であるタンパクマップおよび収穫適期マップの活用技術は、産地レベルでの食味や外観品質の向上に効果が期待できる。土壌の窒素発現量や生育診断指標の推定についても、今後の研究進展に向け

て、観測条件やスペクトル特性の抽出等、有意義なデータが得られた。今後、乾土効果や地温等を考慮した土壌窒素の発現や生育予測モデルと組合せ、土壌および稲の生育状況から最適な施肥量の判定が可能なシステムの構築を目指している。これらリモートセンシングによる産地スケールでの米の食味・外観品質の総合的な生産管理技術は、産米のブランド化や付加価値化、高温障害防止等に役立つものと期待される。

## 謝辞

本研究の遂行および論文執筆に当たり、有益かつ懇切なるご指導を終始いただいた筑波大学大学院生命環境科学研究科教授井上吉雄博士（独立行政法人農業環境技術研究所上席研究員/研究リーダー併任）に深く感謝の意を表す。本論文をご校閲いただき、論文を完成させる上で欠かすことのできないご助言を多数頂戴した同研究科教授瀧川具弘博士，同研究科准教授野口良造博士，同研究科教授林久喜博士に感謝いたします。

青森県では玄米タンパク推定に係るリモートセンシング技術の導入事業を2006年に開始したが、リモートセンシング研究の前例がなく、同年、農業環境技術研究所での依頼研究員を希望した。井上博士には、依頼研究員当時から、農業環境技術研究所において技術指導や現場へ技術展開するに当たり貴重な助言をいただいていた。現在、青森県では農業現場でリモートセンシング技術の社会実装が始まり、津軽地域の農協が付加価値米を販売するに至っている。このことについても、井上博士と農業環境技術研究所でお世話になった方々に感謝申し上げたい。

本研究データは、関係機関の協力によって得られている。2006～2009年の県事業では、農協、市役所、県農産園芸課、県中南地域県民局、試験場の総勢12名が4台の車に分乗し、100km<sup>2</sup>に及ぶ地域を調査して回った。この他にも、農協や県中南地域県民局からは、生育観測圃場の調査データ提供や調査地点の農家との調整について多大な協力を受けた。津軽みらい農協の藤田係長、佐藤係長、長尾主任、今井指導員、小林指導員、山口主任、加藤指導員、高木調査役、鎌田調査役、三上主任、つがる弘前農協の中野係長、平川市役所の對馬係長、県農産園芸課の新相技師、澁谷主査、藤田総括主幹、小林主幹、田中主幹、今主幹、高橋主幹、館山主査、県中南地域県民局の鳥谷部主幹、黒瀧技師、成田主査、山田主幹、旗谷主査、長谷部主査（全て当時の役職名）にこの場を借りてお礼申し上げる。また、試験場圃場での栽培や調査をサポートしてくれた農場員および職員の方々に感謝する。

筆者の勤務する地方独立行政法人青森県産業技術センターでは、2009年の独法化を契機に中核研究者育成事業を立ち上げ、大学院博士後期課程への研究員の就学およびこれに係る学費を補助している。これに適用いただいたことに感謝したい。今後、後輩が続いてくれることを期待している。

最後に、博士後期課程に進むことを快諾し、支えてくれた妻と双子の息子達に感謝する。

## 引用文献

- 秋田県農林水産部 2013. 稲作指導指針. 秋田県. 秋田.
- 秋山 侃・川村健介 2003. Landsat 5 号の快晴データ取得率に関する農林業分野からの一考察. 写真測量とリモートセンシング 42(3): 29-34.
- 青森県「攻めの農林水産業」推進本部生産・構造政策推進委員会 2011. 稲作改善指導要領. 青森県. 青森.
- 青森県産業技術研究推進会議 2013. リモートセンシングを利用して広範囲で圃場ごとの刈取適期が推定できる. 平成 25 年度普及する技術・指導参考資料 23-24.
- 青柳 斉 2005. 新政策下の農協米マーケティングの展開形態—北海道の農協事例から—. 新潟大学農学部研究報告 58(1): 1-9.
- 安積大治・志賀弘行 2003a. 水稻成熟期の S P O T / H R V データによる米粒蛋白含有率の推定. 日本リモートセンシング学会誌 23: 451-457.
- 安積大治・渡邊祐志・吉原洋・田中英彦・丹野久・後藤英次・中辻敏朗・五十嵐俊成・三浦周 2003b. 衛星リモートセンシングによる米粒タンパクマップの高度化と利活用方策. 北海道農業研究成果情報 平成 15 年度 41-42.
- 有坂通展 2002. 新潟県における 2000 年産米の胴割米の発生要因解析. 北陸作物学会報 37:52-53.
- 伴敏三 1971. 人工乾燥における米の胴割に関する実験的研究. 農業機械化研報 8 :1-80.
- 土壤保全調査事業全国協議会 1979. 日本の耕地土壌の実態と対策 農林水産省農蚕園芸局監修. 土壤保全調査事業全国協議会. 東京.
- Guanter, L., Richter, R. and Moreno, J. 2006. Spectral calibration of hyperspectral imagery using atmospheric absorption features. Applied Optics 45: 2360-2370.
- 葉上恒寿・及川あや・高橋政夫・多田勝郎 2007. 玄米タンパク質含有率を考慮した「ひとめぼれ」の栄養診断基準. 東北農業研究 60: 13-14.
- 林陽生 2003. 日本の水稻栽培への影響. 地球温暖化—世界の動向から対策技術まで—. 大政謙次・原沢英夫・(財)遺伝学普及会編. 生物の科学 遺伝別冊 17 号 : 119-127.
- 日塔明広 2001. 東北農試編, 東北地域における夏期の異常高温が水稻生育およびコメ品質におよぼす影響の解析と今後の対策. 東北農試. 盛岡.33-42.



- 日塔明広・伊藤修・我妻因信 2001. 宮城県における 1999 年, 2000 年産米の玄米品質低下の主要因. 東北農業研究 54: 35-36.
- 北海道農政部 2004. 衛星リモートセンシングによる米粒タンパクマップの高度化と利活用技術. 北海道農政部 道総研農業研究本部 試験研究成果一覧 普及推進事項.  
<http://www.agri.hro.or.jp/center/kenkyuseika/ippan16.html> (2013/8/25 閲覧) .
- 本田勝男・諏訪充・佐藤尚雄・三本弘乗・中堀登示光 1976. 水稻の刈取り適期とその簡易判定法. 東北農業研究 18: 76-79.
- 星川清親 1967a. 米の胚乳発達に関する組織形態学的研究 第 1 報 胚乳細胞組織の形成過程について. 日作紀 36: 151-161.
- 星川清親 1967b. 米の胚乳発達に関する組織形態学的研究 第 2 報 胚乳細胞の肥大成長について. 日作紀 36: 203-209.
- 星川清親 1968a. 米の胚乳発達に関する組織形態学的研究 第 10 報 胚乳澱粉粒の発達について. 日作紀 37: 97-106.
- 星川清親 1968b. 米の胚乳発達に関する組織形態学的研究 第 11 報 胚乳組織における澱粉粒の蓄積と発達について. 日作紀 37: 207-216.
- Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment 25(3): 295-309.
- 稲田勝美 1963. 作物生葉の緑色程度ならびに葉緑素含量の測定法とその応用に関する研究: 1. 生葉の緑色程度ならびに葉緑素含量の測定原理について. 日作紀 32: 157-162.
- 稲田勝美 1965. 作物生葉の緑色程度ならびに葉緑素含量の測定法とその応用に関する研究: 2. 葉緑素計の特性ならびに示度と葉緑素含量との関係. 日作紀 33: 301-308.
- 稲田勝美 1985. 葉の葉緑素含量推定に有効な反射率の二波長間の比について. 日作紀 54: 261-265.
- 稲津脩 1985. 北海道産米の食味特性. 日本土壤肥料科学雑誌 56(5): 446-448.
- 稲津脩・柳原哲司・宮森康雄・三浦周 1991. 北海道産米の品質解析とその改善技術に関する研究: 第 14 報 成熟期の葉色と食味特性の関係. 土肥北海道支部要旨集 37: 227.
- 井上每子・今野周・武田正宏 1992. コメの食味関連化学特性の品種, 地域間変動. 東北農業研究 45: 37-38.

- 井上吉雄 1997. 作物・農地の精密管理のためのリモートセンシング. 1.情報知識集約型作物生産の基礎としてのリモートセンシングー応用可能性と到達点ー. 日作紀 66: 335-344.
- Inoue, Y., Moran, M.S. and Horie, T. 1998. Analysis of spectral measurements in Rice paddies for predicting rice growth and yield based on a simple crop simulation model. Plant Prod. Sci. 1: 269-279.
- 井上吉雄・Giashuddin Miah・境谷栄二・中野憲司・川村健介 2008. ハイパースペクトルデータに基づく正規化分光反射指数 NDSI マップおよび波長選択型 PLS による植物・生態系変量の評価ー米粒タンパク含有率・クロロフィル濃度・バイオマス評価を事例としてー. 日本リモートセンシング学会誌 28: 317-330.
- 井上吉雄 2011. 食糧-環境インテリジェンスのための生態系リモートセンシングー問題解決に向けた信号データ利用法ー. 日本リモートセンシング学会誌 31: 2-26.
- Inoue, Y., Sakaiya, E., Zhu, Y. and Takahashi, W. 2012. Diagnostic mapping of canopy nitrogen content in rice based on hyperspectral measurements. Remote Sensing of Environment 126: 210-221. DOI10.1016/j.rse.2012.08.026.
- Inoue, Y. and Sakaiya, E. 2013. Relationship between X-band backscattering coefficients from high-resolution satellite SAR and biophysical variables in paddy rice. Remote Sensing Letters 4: 288-295. DOI10.1080/2150704X.2012.725482.
- 井上吉雄・境谷栄二 2013. ハイパースペクトルリモートセンシングによる作物特性評価法とその水稻生育診断・収穫管理への応用. 農業環境技術研究所研究成果情報 平成 24 年度 29. [http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result29/result29\\_52.html](http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result29/result29_52.html) (2013/10/5 閲覧) .
- 石田頼子・鎌田易尾・片平光彦 2003. 水稻の生育診断のための作物生育情報測定装置の利用 第 1 報 作物生育情報測定装置の性能試験. 東北農業研究 56: 19-20.
- 石倉教光・升尾洋一郎 1967. 水稻の立毛胴割米の発生. 農業技術 22: 281-283.
- 岩澤紀生・松田智明・長田健二・吉永悟志・新田洋司 2006. 胴割れ米の構造的特徴に関する走査電子顕微鏡観察. 日作紀 75(別 1): 266-267.
- 金田吉弘・児玉徹・三浦昌司・長野間宏・佐々木昭太郎 1986. 八郎潟干拓地における水稻の栄養診断と追肥の要否判定. 東北農業研究 39: 55-56.

- 金田吉弘・進藤勇人 2000. 高温条件下における水稻窒素吸収パターンが白粒発生に及ぼす影響. 日作東北支部報 43: 73-75.
- 児玉徹・宮川英雄・伊藤征樹 1993. 登熟期の積算気温が米の窒素・アミロース及び無機成分の集積様式に及ぼす影響と刈取適期の判定. 東北農業研究 46: 49-50.
- 木野田憲久・清藤文仁・桑田博隆・高城哲男 2001. 東北農試編, 東北地域における夏期の異常高温が水稻生育およびコメ品質におよぼす影響の解析と今後の対策. 東北農試, 盛岡. 19-24.
- 古土井悠・大竹茂登 1991. 米の良質・良食味化のための葉色診断と穂肥施用法について(現場における作物診断). 日作中支集報 32: 16-17.
- 小出章二・田子雅則・西山喜雄 2001. 胴割れ米とひび割れ米の水浸裂傷. 日本食品化学工学会誌 48: 69-72.
- 近藤萬太郎・岡村保 1932. 玄米が吸湿せし時の膨張の方向と胴割米生成との関係. 農学研究 19: 128-142.
- 近藤始彦・野副卓人・吉田光二 1990. 白米アミロース含量に与える栽培条件の影響 第2報 玄米窒素含量と白米アミロース含量の相関における品種間差異. 東北農業研究 43: 85-86.
- 近藤始彦・野副卓人 1993. 食味関連物質と官能試験による食味評価の関係. 東北農業研究 46: 53-54.
- 近藤始彦・安田道夫 1994. 食味関連成分の変動要因 第1報 気象条件の影響. 東北農業研究 47: 53-54.
- 近藤始彦・森田敏・長田健二・小山豊・上野直也・細井淳・石田義樹・山川智大・中山幸則・吉岡ゆう・大橋善之・石井正志・大平陽一・中津紗弥香・勝場善之助・羽嶋正恭・森芳史・木村浩・坂田雅正 2006. 水稻の乳白粒・基白粒発生と登熟気温および玄米タンパク含有率との関係. 日作紀 75(別2): 14-15.
- 近藤始彦・岩澤紀生・吉田ひろえ・中川博視・大野宏之・中園江・臼井靖浩・常田岳志・長谷川利拡・桑形恒男・森田敏・長田健二 2012. 2010年の夏季高温下での玄米外觀品質の低下要因 ko-on-net 連絡試験の解析. 日作紀 81(別1): 120-121.
- 高分解能衛星リモートセンシング研究会 2011. 速報 東北地方太平洋沖地震・津波災害の高分解能衛星リモートセンシング. 日本リモートセンシング学会誌 31: 344-367.

- 熊谷千冬・関口道 2000. ランドサット TM データから得た土壌腐植分布図を利用した簡易土壌図の作成. 東北農業研究 53: 63-64.
- 真鍋尚義・今林惣一郎・古城斉一・木崎原千秋 1983. コシヒカリの安定栽培のための生育診断. 日作九支報 50: 27-29.
- 松江勇次・水田一枝・古野久美・吉田智彦 1991. 北部九州産米の食味に関する研究 第2報 収穫期が米の食味および理化学的特性に及ぼす影響. 日作紀 60(4): 497-503.
- 松江勇次・小田原孝治・比良松道一 1997. 北部九州産米の食味に関する研究 第8報 黒ボク土産米の食味向上のための窒素施肥法およびゼオライトの施用. 日作紀 66(2): 189-194.
- 松村修 2005. 高温登熟による米の品質被害—その背景と対策—. 農業技術 60: 437-441.
- 松崎昭夫・刈屋国男・町田寛康・角田公正 1980. 水稻の生育調節と栄養診断に関する研究 第1報 色票による葉色診断と単位面積当たり穎花数の推定. 日作紀 49: 439-444.
- 宮下慶一郎・新毛晴夫・遠藤雅彦・高橋政夫 1986. 水稻の生育診断と予測 第1報 SPAD葉緑素計の適応性. 東北農業研究 39: 53-54.
- 宮下慶一郎・小菅裕明・新毛晴夫 1988. 水稻の生育診断と予測 第2報 水稻の窒素含有量推定と栄養診断. 東北農業研究 41: 67-68.
- 宮田邦夫・伊藤邦夫 1991. 稲体窒素栄養条件と玄米窒素含量の関係. 日作中支集報 32: 6-7
- 文部科学省 科学技術学術審議会 資源調査分科会 2005. 五訂増補 日本食品標準成分表. 国立印刷局. 東京.
- Moran, M.S., Inoue, Y. and Barnes, E.M. 1997. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. Remote Sensing of Environment. 61: 319-346.
- 森静香・横山克至・藤井弘志 2010. 山形県の庄内地域における登熟期の葉色診断による産米の玄米タンパク含有率別仕分け法. 日作紀 79: 113-119.
- 村上芳子・小野剛志 1986. 水稻安定多収のための窒素供給に関する研究 第1報 土壌別培養態窒素の発現. 東北農業研究 39: 59-60.
- 村田敏・小出章二・河野俊夫 1992. 水浸時の精白米の裂傷に関する研究. 農業機械学会誌 54: 67-72.

- 長田健二・滝田正・吉永悟志・寺島一男・福田あかり 2004. 登熟初期の気温が米粒の胴割れ発生におよぼす影響. 日作紀 73(3): 336-342.
- 長田健二・小谷俊之・吉永悟志・福田あかり 2005. 胴割れ米発生におよぼす登熟初期の水管理条件の影響. 日作東北支部報 48: 33-35.
- 長田健二 2006a. 高温登熟と米の胴割れ. 農業および園芸. 養賢堂. 81(7): 797-801.
- 長田健二・森田敏・小山豊・上野直也・細井淳・石田義樹・山川智大・中山幸則・吉岡ゆう・大橋善之・岩井正志・大平陽一・中津紗弥香・勝場善之助・羽嶋正恭・森芳史・木村浩・坂田雅正・近藤 始彦 2006b. 米粒の胴割れ発生におよぼす登熟気温および玄米窒素条件の影響—全国連絡試験による解析—. 日作紀 75 (別 2): 16-17.
- 長田健二 2013. 米の外観品質・食味研究の最前線 [21] —胴割れ米の発生に関わる諸要因—. 農業および園芸. 養賢堂. 87(10): 1006-1010.
- 長戸一雄・小林喜男 1959. 米の澱粉細胞組織の発達について. 日作紀 27: 204-206.
- 長戸一雄・江幡守衛・石川雅士 1964. 胴割れ米の発生に関する研究. 日作紀 33: 82-89.
- 長戸一雄・江幡守衛 1965. 登熟期の高温が穎果の発育ならびに米質に及ぼす影響. 日作紀 34: 59-66.
- 中川博視・堀江武 1989. イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究—(5)窒素施肥が発育に及ぼす影響の実験的解析. 日作紀 58(別 1): 18-19.
- 中村啓二・橋本良一・永島秀樹 2003. 登熟期間の水管理の違いが胴割粒・乳白粒の発生に及ぼす影響. 北陸作物学会報 38: 18-20.
- 中村公則・原城隆 1966. 胴割れ米発生機構の解析に関する研究 第1報 寒冷地における立毛胴割れ米発生の実態と加温乾燥に伴う胴割れ米発生の变化について. 東北農試研究速報 6: 47-52.
- 日本土壌協会 2007. 地力保全基本調査による土壌図データベース 土壌図データ CD-ROM. [http://www.japan-soil.net/PUBLI/cdrom/cdrom\\_info.pdf](http://www.japan-soil.net/PUBLI/cdrom/cdrom_info.pdf) (2013/10/10 閲覧).
- 日本土壌協会 2012. 土壌診断と作物生育改善. 一般財団法人 日本土壌協会. 東京.
- 日本リモートセンシング学会 2011. 基礎からわかるリモートセンシング. 理工図書. 東京. 1-319.
- 農業技術協会 2010. 次世代大規模経営品質管理システム実用化事業実績報告書(17-21年度). 財団法人農業技術協会. 1-168.

- 農業環境技術研究所 2011. 農業と環境の空間情報技術利用ガイドーリモートセンシング,GIS,GPS 利用のためにー. 農業環境技術研究所. 1-171.
- 農林水産省 2007. 平成 19 年地球温暖化影響調査レポート 生産局.  
<http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/report.html>. (2009/12/17 閲覧) .
- 農山漁村文化協会 2004. 農業技術体系 土壤施肥編 4 土壤診断・生育診断. 社団法人 農山漁村文化協会. 東京.
- 織田健次郎・三輪睿太郎・岩元明久 1987. 地力保全基本調査代表断面データのコンパクトデータベース. 土肥誌 58: 112-131.
- 小田中温美・鈴木良則・伊藤公成・小野剛志 1994. 米の食味と玄米及び白米成分の関係. 東北農業研究 47: 49-50.
- 小田中温美・鈴木良則・伊藤公成・小野剛志 1995. 玄米及び稲体窒素濃度と施肥法の関係. 東北農業研究 48: 27-28.
- 奥野林太郎, 岩田幸良 2004. 衛星リモートセンシングによる生育早晚マップを活用した小麦収穫システム. 農業土木学会北海道支部研究発表会要旨集 53: 52-55.
- 小野允・田口喜久治・三浦昌司 1975. 稚苗移植栽培における土壤型別施肥法と養分吸収. 東北農業研究 16: 85-87.
- 大瀨光一・今田孝弘・小南力・柴田康志・小林英明・桃谷英 1990. ササニシキの食味関連理化学性の変動 第 1 報 窒素施肥条件と食味関連の理化学性. 東北農業研究 43: 87-88.
- 大瀨光一・柴田康志・山川淳・小林英明・深澤昭吾 1991. ササニシキの食味関連理化学性の変動 第 3 報 窒素施肥と食味及び玄米窒素濃度の関係. 東北農業研究 44: 43-44.
- Penuelas, J., Pinol, J. Ogaya, R. and Filella, I., 1997. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). International Journal of Remote Sensing. 18(13): 2869-2875.
- 齊藤研二・深山政治・山本淳一・勝木田博人 1991. 葉緑素計によるコシヒカリの生育期の窒素栄養診断と玄米窒素含有率の予測. 日作紀 60(別 2): 17-18.
- 境谷栄二・清藤文仁・金谷浩・高城哲男・木野田憲久 1998. 青森県における水稻の栽培条件と食味および食味関連成分の関係. 東北農試研究資料 22: 49-53.



- 境谷栄二・井上吉雄・藤田道成 2008a. 航空機リモートセンシングによる玄米タンパク含有率の推定[2]. 日作紀 77(別 1): 178-179.
- 境谷栄二・澁谷玲・新相五月・井上吉雄 2008b. 津軽中央地域における米収穫管理への航空機リモートセンシングの実践的利用. 日本リモートセンシング学会 44 回学術講演会論文集 173-174.
- 境谷栄二, 木村利行, 井上吉雄 2012a 津軽中央地域における胴割米の発生要因の解析. 日作紀 81(別 1): 290-291.
- 境谷栄二 2012b 胴割米の発生要因の解明 (現場における実態調査から). あおもり農業. 青森県農業改良普及会. 63(8): 32-35.
- 境谷栄二・井上吉雄 2012c. リモートセンシングによる玄米タンパク含有率の推定精度に影響する誤差要因ー地域スケールでの実践的応用に向けてー. 日作紀 81(3): 317-331.
- 境谷栄二・井上吉雄 2013. 米の適期収穫への航空機および衛星リモートセンシングの実践的利用. 日本リモートセンシング学会誌 33 (3): 185-199.
- 佐藤正夫 1964. 粳の胴割機構について. 農業及び園芸. 養賢堂. 39: 1421-1422.
- 佐藤之信・上野正夫・熊谷勝巳・大竹俊博 1988. 水田の乾土効果発現量の予測について. 東北農業研究 41: 55-56.
- 佐藤雄幸 2001. 秋田県における品質低下の実態解析と今後の対策. 堀末登 監修. 東北地域における夏季の異常高温が水稻生育およびコメ品質に及ぼす影響の解析と今後の対策. 東北農業試験場. 盛岡. 43-49.
- 関口道・佐々木次郎 2004. WEB カメラを利用した遠隔水稻生育監視システムの開発 第 1 報 システムの開発と概要. 東北農業研究 57: 57-58.
- 芝山道郎・秋山侃 1986. 作物群落用反射スペクトル解析装置の開発:第 6 報 野外分光反射測定による水稻のクロロフィルインデックスの推定. 日作紀 55: 433-438.
- 多田勝郎・本田孝子・伊五澤正光 1993. 「ひとめぼれ」の栄養診断. 東北農業研究 46: 37-38.
- 高城哲男・浪岡実・立田久善・小野清晴 1980. 昭和 54 年水稻立毛胴割米発生の特徴. 東北農業研究 27: 39-40.
- 高城哲男・山崎来季好・諏訪充 1990. 青森県産米の食味と理化学的特性及び栽培環境条件の解明 第 1 報 窒素施肥条件と食味特性 東北農業研究 44: 43-44.

- 高橋渉・尾島輝佳・野村幹雄・鍋島学 2002. コシヒカリにおける胴割米発生予測法の開発. 北陸作物学会報 37: 48-51.
- 高橋鴻七郎・布施成人 1967. 土壌条件と水稻の生育収量. 東北農業研究 9: 51-53.
- 高橋真理・長谷川政俊 2003. 水稻籾水分と収穫時期予測. 東北農業研究 56: 21-22.
- 高橋美智則・香村敏郎・釈一郎・谷口学・伊藤和久 1983. 水稻品種の特性解析に関する研究 第5報 県内主要品種の刈り遅れによる米質変動と刈り取り許容幅. 愛知農総試研報 15: 35-46.
- 滝田正 2002. 胴割れ米発生の品種間差異と関連形質および遺伝. 東北農研報 100: 41-48.
- Tamaki, M., Ebina, M., Tashiro, T. and Ishikawa, M. 1989. Physico-ecological Studies on Quality Formation of Rice Kernel. II. Changes in quality of rice kernel during grain development. 日作紀 58(4): 659-663.
- 寺島一男・斉藤祐幸・酒井長雄・渡部富雄・尾形武文・秋田重誠 2001. 1999年の夏期高温が水稻の登熟と米品質に及ぼした影響. 日作紀 70: 449-458.
- 照井儀明・中村英明・多田勝郎・佐藤喬・高橋正樹・扇良明・小田中浩哉・神山芳典 1998. 岩手県における水稻品種「ひとめぼれ」の食味成分と変動要因. 東北農業研究 51: 15-16.
- 中鉢富夫・浅野岩夫・及川勉 1986. 葉緑素計による水稻(ササニシキ)の窒素栄養診断. 土肥誌 57: 190-193.
- 中鉢富夫・川島典子・武田良和・山家いずみ 1993. 土壌型と追肥時期の違いが玄米窒素濃度に及ぼす影響. 東北農業研究 46: 83-84.
- 東北農政局 2007. 平成19年産米の検査結果(速報値)(青森)(平成20年2月末日現在). <http://www.maff.go.jp/tohoku/press/aomori/pdf/ao080314.pdf> (2013/8/17 閲覧).
- 東北農政局 2012. 平成24年産米の検査結果(確定値)(青森)(平成25年10月末日現在). [http://www.maff.go.jp/tohoku/syokuryou/data/komeken/file/2012\\_kensa/pdf/kome\\_h24\\_201310\\_ao.pdf](http://www.maff.go.jp/tohoku/syokuryou/data/komeken/file/2012_kensa/pdf/kome_h24_201310_ao.pdf) (2014/1/17 閲覧).
- 上野直也・石井俊幸 2008. 水稻胴割れ粒の発生と登熟期間の気温の関係. 日作関東支部報 23: 34-35.
- 山野博哉・石原光則・石山隆・川村健介・小松義典・作野裕司・島崎彦人・井上吉雄 2011. リモートセンシングを用いた生態系の問題解決に向けた応用場面と要件の収集. 日

- 本リモートセンシング学会誌 31(1): 87-90.
- 柳瀬肇・大坪研一・石間紀男・佐川博子 1985. 精米加工と米飯食味の関係 (第2報) 精米品質と官能検査法による米飯の食味. 食総研報 47: 1-10.
- 横田陽生・斉藤研二・宮崎丈史・駒塚富男・深山政治 1995. 水稻の収穫時期と食味および葉色との関係. 日作関東支報 10: 55-56.
- 若松朋亨・本郷千春・丹羽勝久 2011. Landsat データによる農耕地土壌炭素貯留量の解析. 日本リモートセンシング学会 51 回学術講演会論文集 199-200.
- 財団法人全国食糧検査協会 2002. 農産物検査ハンドブック 米穀篇. 全国瑞穂食料検査協会. 東京.
- Zhi, X., Inoue, Y. 2011. Spectral Assessment of Soil Content as affected by Soil WaterContent. 日本リモートセンシング学会 51 回学術講演会論文集 195-196.