

近接リモートセンシング手法を用いた  
農作物の生育・品質推定手法に関する研究

Study on growth and quality estimation method for crops  
using proximal remote sensing

鹿児島大学連合農学研究科  
生物環境保全科学専攻 生物生産工学

石川 大太郎  
2010 年

## <目次>

	頁
<b>第1章 序論</b>	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的	1
<b>第2章 リモートセンシング技術の農業への利用</b>	3
2.1 リモートセンシングの概念	3
2.2 センサーが取得する電磁エネルギー	3
2.3 分光反射率と分光反射特性	3
2.4 衛星・航空機リモートセンシングと近接リモートセンシング	4
2.5 リモートセンシング技術の農業への利用	4
2.6 正規化指標の定義	5
<b>第3章 分光反射特性を用いた茶葉の生育・品質推定手法の考案</b>	6
3.1 緒言	6
3.2 材料及び方法	6
3.3 実験結果	7
3.4 考察	13
3.5 まとめ	13
<b>第4章 分光画像を用いた茶葉の生育・品質推定手法の開発</b>	15
4.1 緒言	15
4.2 材料及び方法	15
4.3 実験結果	17
4.4 考察	22
4.5 まとめ	23
<b>第5章 分光画像を用いた水稻の等級推定手法の開発</b>	24
5.1 緒言	24
5.2 材料及び方法	24
5.3 実験結果	25
5.4 考察	28
5.5 まとめ	29

<b>第6章</b>	<b>分光反射特性によるサツマイモの塊根部重量推定の可能性</b>	30
6.1	緒言	30
6.2	材料及び方法	30
6.3	実験結果	31
6.4	考察	36
6.5	まとめ	36
<b>第7章</b>	<b>総合考察</b>	37
<b>第8章</b>	<b>総括</b>	39
<b>参考文献</b>		40
<b>謝辞</b>		44
<b>論文要旨 ( Summary )</b>		45

## 第1章 序論

### 1.1 研究背景

鹿児島県は、平成21年度現在、北海道、千葉、茨城について、日本第4位の4,200億円程度の農業産出額となっており、全国有数の農業県として知られている<sup>1), 2)</sup>。

鹿児島県の農業生産の特徴として、工芸作物の農業産出額全体に占める割合が14.9%、イモ類の占める割合が13.9%と日本の全国平均値(2.2%程度)に対して非常に高くなっていることが挙げられる。その他の農作物の産出額が、全国平均より少ないことを鑑みれば、工芸作物とイモ類の生産が実質的に鹿児島の農業産出額を牽引している要因であるといえることができる。

鹿児島県の工芸作物としては、特に茶栽培が盛んである。これは、茶樹が年平均気温14~15℃以上、年降水量1,300mm以上の温暖で湿潤な気候を好むことや、土壌の排水性等の観点から鹿児島の風土に適した作物であることに起因する。また、イモ類の中ではサツマイモが土壌の乾燥に強いいため、古くから栽培が行われてきた。さらに近年、焼酎の需要が急増したことを背景に、原料用のサツマイモの需要も大幅に増加している。従って、茶やサツマイモの生産性を向上させれば、鹿児島県の農業産出額に大きく寄与すると考えられる。

農作物の生産性を向上させるためには、生育中の肥培管理が重要となってくる。しかし、現在の茶やサツマイモを含めた多くの農作物における肥培管理は、生産者の勘や経験に頼っている場合が多く、JAによる管理日誌等はあるものの、施肥の種類・時期や投入量は、生産者によってまちまちな場合が多い。さらに、地球温暖化等によって農作物の生育環境が変化した場合、従来までの経験や勘に頼った肥培管理では、対応が困難になることが予想される。鹿児島県においては、特に水稻の等級低下は温暖化によって引き起こされていると報告されている<sup>3)-5)</sup>。また、茶・サツマイモについても、温暖化によって栽培適地が拡大し、地域の特産物としての価値が低下することが予想されるため、環境条件を加味した肥培管理技術の提案が求められている。

的確な肥培管理を行う上では、作物の生育量や品質を生育段階で把握することが必要不可欠である。現在、茶では、採摘調査によって、サツマイモや水稻では抜き取り試験によって生育量や品質の把握が行われている。しかし、破壊的調査であるため、圃場の一部のみしか対象とする事ができない。生育量や品質を広範囲に調査するためには、多大な労力と時間を要し、尚且つ生産量を低下させてしまうという問題点がある。

このような現状を打破し、鹿児島県の農作物の生産性を維持、向上させていくための適切な肥培管理技術を提案するには、まず、現在の栽培環境下における生育・品質の変動を客観的に推定する手法の開発が必要であると考えられる。

リモートセンシング技術は非破壊・非接触で広域な面積をモニタリングできる特性を有し、しかも時系列な解析が可能であることから農作物の生育・品質推定のモデル構築等に利用されている<sup>6)-10)</sup>。日本でも北海道・東北や北陸地方を中心に小麦、水稻の生育モニタリングが近年盛んに行われており<sup>11)-15)</sup>、客観的な生育・品質推定手法を確立する有効な手段であると考えられる。

### 1.2 研究目的

肥培管理を行う上では、農作物の生育・品質を生育中に推定することは、非常に重要である。しかし、現在の農作物の生育・品質予測法は、破壊試験に基づいており、多大な労力と時間を要する。また、近年の地球温暖化の影響によって、従来の生産者の勘や経験に頼った肥培管理では、今後生産性の向上が見込めない可能性がある。

本研究では、リモートセンシング技術を用いて、農作物の生育量や品質を推定する手法を開発し、最終的に、肥培管理の指針として供することを目的として研究を行った。対象とする農作物としては、鹿児島県の農業産出額の増加に最も寄与すると考えられる茶葉とサツマイモ及び、近年の温暖化の影響で早急な肥培管理技術の提案の必要性が求められている水稻を取り上げた。

ここで、鹿児島を含めた日本の農業生産は一般に基盤が脆弱である。そのため、リモートセンシング技術を圃場レベルで導入には、費用面で負担が大きいと考えられる。また、衛星や航空機を用いた生育モニタリングでは、データの取得頻度(時間分解能)や取得領域(空間分解能)、取得波長帯(波長分解能)が限定されてしまうため、詳細な生育状態を把握することが困難であるという問題点がある。

そこで、リモートセンシング技術の中でも特にビデオカメラなどの簡易な装置を使用して圃場毎の診断を任意の時期に実施可能である近接リモートセンシングの手法を用いて、農作物の生育・品質推定手法の開発を行うこととした。

## 第2章 リモートセンシング技術の農業への利用

### 2.1 リモートセンシングの概念

リモートセンシング技術は、20世紀の中ごろに写真測量や写真判読等を統合する形で提唱された。この技術は、「どのような対象物でも、固有の電磁エネルギーを反射または、放射」という理論に基づいている。電磁エネルギーは、対象物の種類や環境条件の差異等によっても、固有の反射(放射)をすることから、対象物の同定や成分状態の追跡が可能である<sup>16)</sup>。

リモートセンシングでは、通常、400nm～11,000nm 付近の波長帯の電磁エネルギーを利用している。このうち 400nm～3,000nm の範囲の電磁エネルギーを用いたものは可視・近赤外リモートセンシング、3,000nm～14,000nm 付近のエネルギーを用いたものは熱赤外リモートセンシング、14,000nm～30,000nm 付近のエネルギーを用いたものはマイクロ波リモートセンシングと呼ばれている。

各センシングにおいて電磁エネルギーを検出する装置をセンサーと呼び、対象物から放射されたエネルギー量を測定する手法(能動型)と対象物によって反射された量測定する手法(受動型)の二種類に分けられる。

### 2.2 センサーが取得する電磁エネルギー

見かけの単位面積から単位時間で単位立体角に放射される電磁エネルギーは放射輝度と呼ばれる。入射した放射輝度を全て吸収する(反射、透過しない)性質を持つものを黒体と呼ぶ。黒体の放射輝度は、以下のプランクの法則によって定義される。

$$\beta_{(\lambda)} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} \quad (1)$$

ここで、

- $\beta_{(\lambda)}$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-4}$ ): 黒体の分光放射輝度
- $T$  (K): 黒体の絶対温度
- (nm): 波長
- $c$  ( $2.98 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ): 光速
- $h$  ( $\text{J} \cdot \text{s}$ ): プランク定数 ( $6.626 \times 10^{-34}$ )
- $k$  ( $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ ): ボルツマン定数 ( $1.380 \times 10^{-23}$ )

今  $c$ ,  $h$ ,  $k$  は定数であるため、プランクの式(1)は、黒体の絶対温度  $T$ (K)と波長 (nm)の関数として捉えることができる。

太陽を 6,000K、対象物を 300K の黒体とした場合、放射輝度は波長に依存し、その最大は太陽では 500nm、対象物の最大は、10,000nm に存在する。このため、500nm 付近では、太陽光由来の放射輝度がセンサーに最も多く検出される。すなわち、400nm～1,000nm の波長帯を用いた可視・近赤外リモートセンシングは、地表面に入射した太陽の放射輝度が対象物に反射し、センサーで検出される。また熱放射リモートセンシングは、対象物の放射輝度をセンサーで検出している。植生を対象とした場合、この2種類の波長帯の放射輝度を用いたリモートセンシングが一般的である。

しかし、式(1)より、波長が長くなれば、対象物から放射される放射輝度は小さくなる。そのため、十分な放射輝度をセンサーで取得するためには、観測領域を拡大し、エネルギー量を増やす必要がある。

### 2.3 分光反射率と分光反射特性

ある面に入射した放射輝度と反射した放射輝度の比は、反射率と定義されている。また、波長毎の反射率は分光反射率と呼ばれ、分光反射率の定性的な変化は分光反射特性といわれている。

しかし、入射した放射輝度を正確に測定することは、困難であるため、入射した全放射輝度を全ての方向に均等に反射する完全拡散面を仮定することが多い。同一入射に対して、完全拡散面によって反射された放射輝度と、対象物の放射輝度の比は分光反射係数と呼ばれ、実際の圃場等では、この分光反射係数を分光反射率として用いている場合が多い。

## 2.4 衛星・航空機リモートセンシングと近接リモートセンシング

リモートセンシング技術は、それぞれのセンサーが搭載されている装置(プラットフォーム)によって、衛星リモートセンシング、航空機リモートセンシングと近接リモートセンシングに大別される。

衛星リモートセンシングは、広域性、同時性、周期性などの特性から陸域・海域・大気の変動等、地球規模での環境観測に有効である。特に Landsat/TM は、400nm～900nm の可視・近赤外域の 4 つのセンサーに加え、14,000nm の熱赤外域と 20,000～30,000nm の短波長赤外の領域にも 2 つのセンサーが搭載され、多用な対象物の観測に有効であること、過去 30 年間のデータを保有していることから最も汎用性の高いデータとして用いられている<sup>18), 19)</sup>。植生に対しては、Landsat/TM の Band3 と Band4 を組み合わせた正規化植生指数(NDVI: Normalized Difference Vegetation Index)や比植生指標(RVI: Ratio Vegetation Index)を用いて活性度、生育量や生育状態の推定が可能であることが示されている<sup>3), 4)</sup>。NDVI と RVI は以下の式(2)及び(3)で定義される。

$$NDVI = \frac{R(Band4) - R(Band3)}{R(Band4) + R(Band3)} \quad (2)$$

$$RVI = \frac{R(Band4)}{R(Band3)} \quad (3)$$

ここで、 $R(Band4)$ 、 $R(Band3)$ は、Landsat/TM の Band3 と Band4 の平均分光反射率(%)である。

しかし Landsat/TM を含めた衛星データは、時間分解能が悪くなり、大気の影響が大きな誤差要因となる。さらに、各 Band の波長分解能が約 100nm であることや Landsat/TM の可視・近赤外 Band の空間分解能が 30×30m あることから、微少な反射エネルギーの差異が平均化されて、特徴量を見出しにくいというデメリットがある。このうち特に空間分解能の問題点を解決するため、より近年では、IKONOS などの超高分解能(1m×1m)衛星が地上観測に用いられている<sup>12)</sup>。

航空機リモートセンシングは、地上 1500m 付近を飛行するため大気の影響をほとんど受けない。また任意の時期に観測が可能のため、天候に左右されずに地上の反射エネルギーをより頻繁に取得できるという利点がある<sup>17)</sup>。

しかし、衛星と同様に、波長分解能が 100nm と広いことや搭載されているセンサーには近赤外域の波長帯がないことから NDVI を作成できない等の問題点がある。より近年では、近赤外を搭載した航空機や数 100 個のバンドを搭載したハイパースペクトラルセンサーが検討<sup>20), 21)</sup>されている。しかし、ハイパースペクトラルセンサーに用いる波長帯の明確な定義は現在のところなく、航空機データを取得するための費用が莫大であることから、実用上の問題点を包含している。

近接リモートセンシングは、対象物の状態を最もよく反映する波長帯を抽出し、ビデオカメラなどの簡易な装置を使用して観測を行う技術である<sup>22)-24)</sup>。近接リモートセンシングは、衛星・航空機リモートセンシングに比べ、広域性は劣るが、時間分解能、波長分解能を任意に設定できる点が大きな特徴である。この手法を用いて対象物の変動特性を最もよく表現する波長を決定することで、ハイパースペクトラルセンサーの波長を提案することが可能となる。また、頻繁にデータを取得することで、対象物情報の精度を向上させ、衛星・航空機リモートセンシングでは取得できない時期の補完が行えるなど、他のリモートセンシングへの応用性を保持している。

## 2.5 リモートセンシングの農業への利用

農作物に対しても現在まで NDVI や RVI を生育状態や成分推定に用いる試みが多くなされている<sup>18)</sup>。日本では、北海道・東北地方で特に研究事例が多い<sup>25)-27)</sup>。これはそれらの地域の圃場が広大な面積であることに由来している。このことから自明であるが農業生産現場に、衛星データを用いる最大のメリットは、広域に農作物の生育・品質把握が可能であるという点である。日本の基幹作物である水稻では、東北地方のみならず、日本全国の作付面積マップ等の開発がなされている<sup>28)</sup>。また、航空機を用いることで、圃場単位での収量や品質を生育期間中に評価可能となっており<sup>29)</sup>、実用化の途が開けている。

しかし、衛星や航空機を用いる場合では、前述したように、農作物の生育・品質の推移を詳細に把握することが困難である。さらに、データ取得の費用が莫大であることが日本の一般的な農業生産現場への導入の妨げになっている。

近接リモートセンシング手法は、近年序々に農業生産現場へ利用しようという動きが広まってきてい

る．代表的なものとしては，小麦の穀実収量と，786nm～823nm と 661nm～673nm の平均分光反射率を用いた NDVI の積算値には，高い相関があることが報告されている<sup>30)</sup>．水稻の葉内クロロフィル含有量に対して，Aoki ら<sup>31)</sup>は，800nm と 600nm を用いる RVI が有効であることを示している．また，水稻群落内のクロロフィル含有量に対して，Shibayama ら<sup>32)</sup>は，800nm～900nm の平均分光反射率と 560nm の分光反射率を組み合わせた RVI が有効であると報告している．以上のように近接リモートセンシングでは，NDVI や RVI を応用し，農作物の生育・品質と最も相関の高い 2 つ(ないしはより多数)の波長帯を抽出することで，種々の農作物に対して，多くの正規化指標が考案されている．

## 2.6 正規化指標の定義

前述したとおり，近接リモートセンシング手法では，任意の波長を選択することで，種々の農作物の生育・品質をよりの確に推定できる正規化指標が提案提案されている．そこで，本研究においても，任意の 2 つの波長を組み合わせることで農作物の生育・品質を推定するための正規化指標を導出した．本研究における正規化指標を  $ND_{ij}$  指標と呼び，以下の式(4)で定義した．ここで，添え字  $i, j$  は波長(nm)を示し， $R$  は  $i, j$  の波長(nm)のときの分光反射率(%)である．

$$ND_{ij} = \frac{R(i) - R(j)}{R(i) + R(j)} \quad (4)$$

ここで  $ND_{ij}$  指標に用いる波長帯  $i, j$  の選択として分光反射特性の微分・二次微分を用いる試みが報告されている<sup>33)</sup>．すなわち  $ND_{ij}$  指標に用いる波長として，分光反射特性を微分・二次微分し，正・負の極値を示した波長帯を抽出し，それらの波長帯に対応する分光反射率を用いる手法である．そこで，本研究においても分光反射率の微分，二次微分から正・負の極値が出現した波長帯を特性波長と定義し，それらの波長を種々に組み合わせて指標の作成を試みた．本研究における分光反射率の微分値  $\frac{R}{\lambda}$  は， $R$  を分光反射率(%),  $\lambda$  を波長(nm)としたとき以下の式によって算出した．

$$\frac{R}{\lambda} = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{R(\lambda + \lambda) - R(\lambda)}{\lambda} \quad (5)$$



### 第3章 分光反射特性を用いた茶葉の生育・品質推定手法の考案

#### 3.1 緒言

茶葉の生育・品質は、これまで採摘みによって調査がなされてきた。しかし、採摘み調査は破壊的な手法であるため、調査回数を増やすことで直接収量の減少をまねく<sup>34)</sup>ことに加え、多大な労力と時間がかかるという問題点がある。

また茶葉の品質判定は専門審査員による判断であるため、主観的な要素が含まれている可能性がある。吉川ら<sup>35)</sup>は、製茶の得点と種々の茶品質成分との関係や、茶葉に対して近赤外分析法を用いて品質を推定する方法が考案されてきつつある<sup>36), 37)</sup>が、試料の取得には、依然として領域、労力や時間等の問題点が残る。

以上のことから、生長段階で非破壊的、客観的に生育・品質推定が可能となれば、生茶の生産性向上に繋がると考えられる。

リモートセンシング手法は、非破壊的に繰り返し測定が可能であるため上記の問題点解決に有効であると考えられる。

本章では、採摘み調査結果から新芽の生長量を測定し、それらの変動が近接リモートセンシング手法を用いて非破壊に推定可能であるかについて調査を行った。品質に関しては、種々の品質成分を用いた主成分分析と現在茶の品質判定現場で用いられつつあるAF値(近年茶葉の品質として用いられつつある指標で、葉内アミノ酸含有率と繊維含有率の比として定義され<sup>38)</sup>、値が高い程高品質を示す。)を茶の品質と定義した方法について検討を行った。

#### 3.2 材料及び方法

##### 3.2.1 供試材料と実験圃場

供試材料は、鹿児島県枕崎市の(独)農業・食品産業技術総合研究機構 野菜茶業研究所 枕崎拠点内で栽培されているヤブキタ(*Camellia sinensis* L.cv.Yabukita, 移植後20年経過の成木)を用いた。供試材料に対して、5.5m×1.8mの試験区を15反復を設定した。施肥は鹿児島県の奨励施肥時期に従った。萌芽日は、中野の報告<sup>29)</sup>に従って、圃場内で60%以上の新芽が展開した日とした。

##### 3.2.2 分光反射率の測定

茶葉の分光反射率は、携帯用分光放射計(ELM. Co.: KE-1, 視野角: 3度, 観測波長領域: 400nm~1,100nm, 観測波長間隔: 3nm)を用いて測定した。分光反射率測定の概要を図3-1に示す。5.5m×1.8mの試験区内に0.3m×0.3mの領域を設け、その中心部を測定対象とした(以下対象領域)。測定は、分光放射計を茶木のキャノピーから約0.7mの高さに設置し、俯角を30度として行った。測定時刻は太陽のエネルギー変動が少ない南中時刻を中心に前後2時間の時間帯に行った。

本研究では、分光反射率として硫酸バリウム(BaSO<sub>4</sub>)を塗布した標準白色板からの反射エネルギーと茶葉からの反射エネルギーの比である分光反射係数を用い、以下の式(6)で定義した。分光反射率は、対象領域毎に5回ずつ測定し、その平均値を解析に用いた。

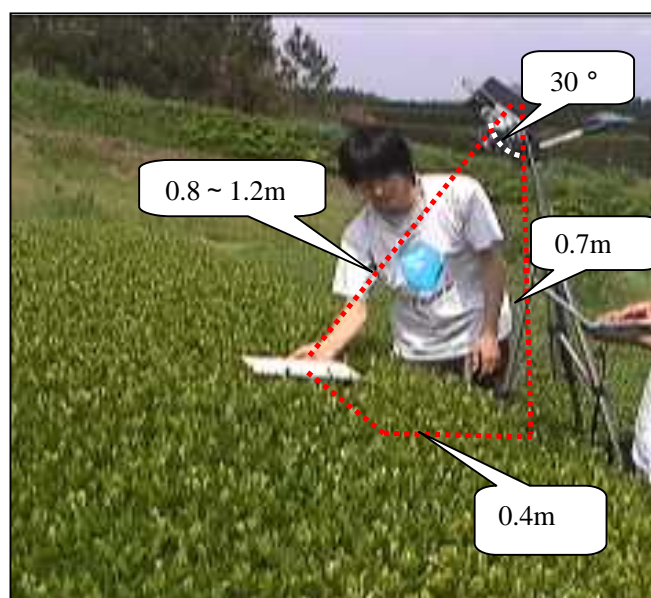


図3-1 分光反射率測定時の機器の位置関係の概要

$$R = 100 * E / W \quad (6)$$

ここで、

$R$  (%) : 分光反射率

$E$  (W/m<sup>2</sup>・sr・sec) : 対象物からの分光放射輝度

$W$  (W/m<sup>2</sup>・sr・sec) : 標準白色板からの分光放射輝度

(nm) : 波長

### 3.2.3 採摘調査

生育量を把握するため、DOY:88～DOY:120までの期間に3～7日おきに7回にわたり、採摘調査を実施した。ここでDOYは、1月1日を1とした場合の年通算日のことである。採摘調査は、各試験区に0.3m×0.3mの枠を設け、枠内の全新芽に対して行った。採摘後、新芽数、一芯あたりの葉数、新芽長さと生新芽重を測定した。

摘葉した新芽に対して、生鮮重と含水量を測定後60～48時間乾燥した。乾燥した新芽は乾物重および含水量を測定し、粉碎後、近赤外分析計(INSTALAB-600, Shizuoka Seiki Co., Ltd., GT-8s)で葉内窒素、テアニン、タンニン、アミノ酸、繊維含有率とAF値の測定を行った。測定は、直径0.1m程度のセルを粉碎した茶葉サンプルで満たし、密封した後800nm～2500nmの近赤外光を照射し、吸光度の差異を検出することで行った。

#### 3.2.4-1 ND<sub>ij</sub>指標を用いた生育・品質推定

生育推定のためのND<sub>ij</sub>指標を考案するため、測定した生育量と分光反射率の関連性を調査した。品質に関しては、窒素、テアニン、タンニンとアミノ酸含有率及びAF値を品質と定義しND<sub>ij</sub>指標の考案を行った。ND<sub>ij</sub>指標は、生育量・葉内成分含有率及びAF値との回帰直線に有意性が認められ、最も相関が高いものを選択した。

#### 3.2.4-2 ND<sub>ij</sub>指標を用いた主成分分析

茶の品質は葉内含有成分の構成割合によって決定されるため、より総合的な含有量推定法の導入が必要であると考えられる。しかし、成分の最適な構成割合は明らかになっていないため、各葉内成分含有率を変数とした主成分分析を行い、品質推定の可能性を調査した。

解析には、茶の品質に関わる葉内成分として、アミノ酸、タンニン、テアニン含有率を取り上げた。前項(3.2.4-1)にて述べた各成分含有率推定ND<sub>ij</sub>指標に実験日を代入し、実験開始から終了までにわたる一日毎の各成分指標値を算出することで、主成分分析の説明変数とした。実験期間全体のデータを用いて、各変数の固有値ベクトル、主成分負荷量を求めた。その後、実験日毎に主成分得点を求め、時系列変動を検討した。また、採摘調査を行った日の各葉内成分の推定指標値を用いて検証した。

### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 新芽数、一芯あたりの葉数と新芽の長さの経時変化

新芽数を図3-2に、一芯あたりの葉数と新芽の長さの経時変化を図3-3と図3-4に示す。新芽数は、生育期間全体では、増加傾向であったが、DOY:100以降ほぼ横ばいの傾向であり、ばらつきも大きい結果となった。一芯あたりの葉数も、新芽数と同様に、DOY:100付近以降、横ばいの傾向を示した。一方

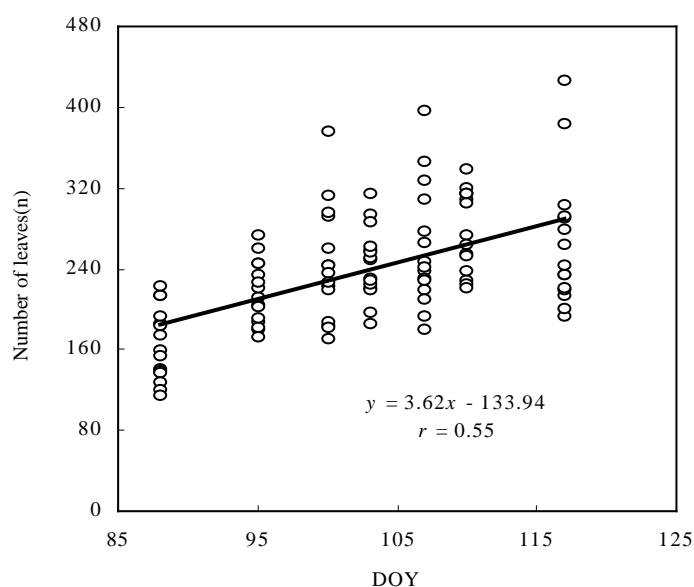


図 3-2 枠内の新芽数の経時変化

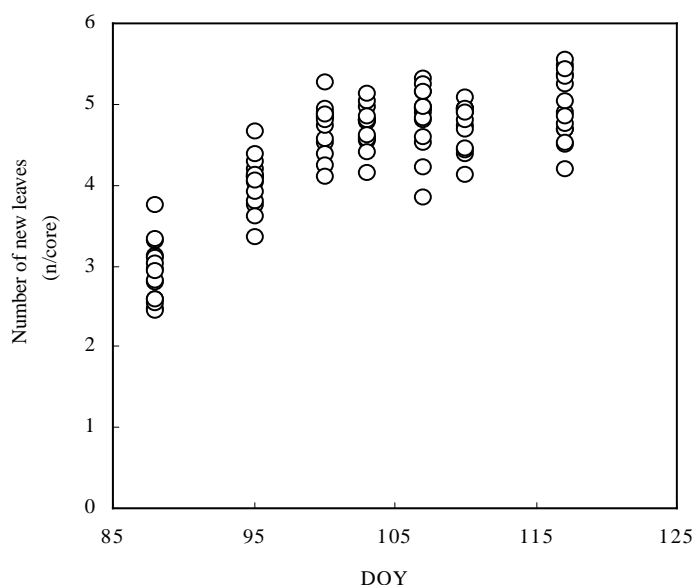


図 3-3 枠内の新芽数の経時変化

新芽の長さは、生育期間全体で、直線的な変動を示した。新芽数と一芯あたりの葉数は、全体的なばらつきが大きく、さらに生育後期において飽和してしまうため、生育量の傾向を掴むためには不向きであると考えられる。新芽の長さは、生育後期まで一定の変動を示し、全体的なばらつきも小さいことから、生育量の傾向を得るために有効な指針となりうると考えられる。そこで、本研究では、新芽の長さを茶における生育量として解析に用いた。

### 3.3.2 品質成分含有率の経時変化

葉内成分の一例として葉内窒素含有率(%)の経時変化を図 3-5 に示す。葉内窒素含有率は、DOY: 88 の 4.9% から 5.7% 程度まで上昇し、その後、DOY:118 の 4.8% まで直線的に減少した。

今回の実験における萌芽日は、DOY: 95 付近であったため、新芽の窒素含有率は、萌芽日以降は減少に転じると考えられる。この傾向は、アミノ酸含有率、タンニン含有率にも認められた。繊維含有率に関しては、経過時間とともに多少増加する傾向があるものの、摘採期までに一定の傾向をもった明確な推移は見出せなかった。

### 3.3.2 茶葉の分光反射特性の経時変化

茶葉の分光反射特性の経時変化の一例を図 3-6 に示す。分光反射特性は、全ての実験日において、可視域では 460nm 付近から増加し、540nm 付近で最大値を示した。その後 660nm 付近で最小値を示した。可視域から近赤外域の境界では、660nm ~ 800nm の範囲にかけて急激な反射率の上昇が認められた。また、800nm ~ 930nm 付近までプラトーとなり、930nm 以降わずかに低下した。

新芽生育に伴う 400nm ~ 700nm の反射率の差異は明確ではないが、770nm 以降の反射率には、生育期間全体で、20% 前後の変動が認められた。

可視域の 460nm や 660nm に見られる分光反射率の最小値や、550nm の最大値は、460nm と 660nm がクロ

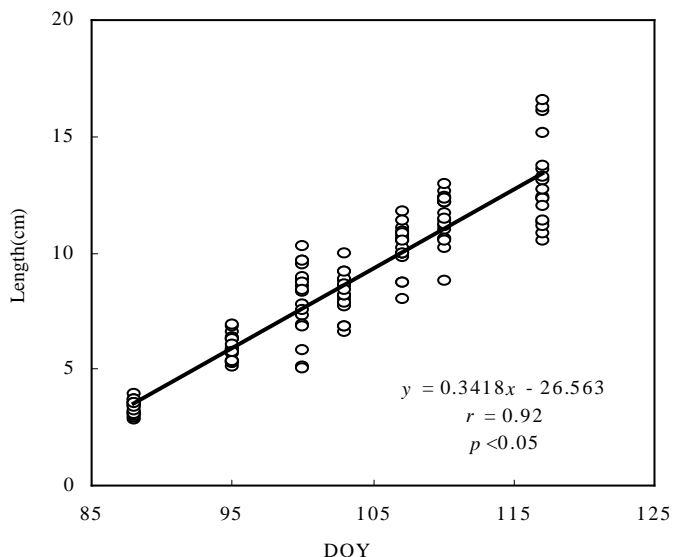


図 3-4 枠内の新芽長の経時変化

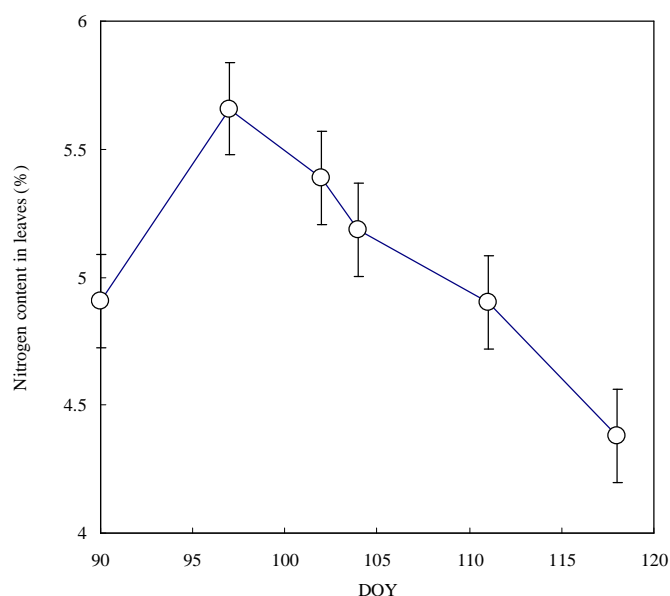


図 3-5 葉内窒素含有率の経時変化

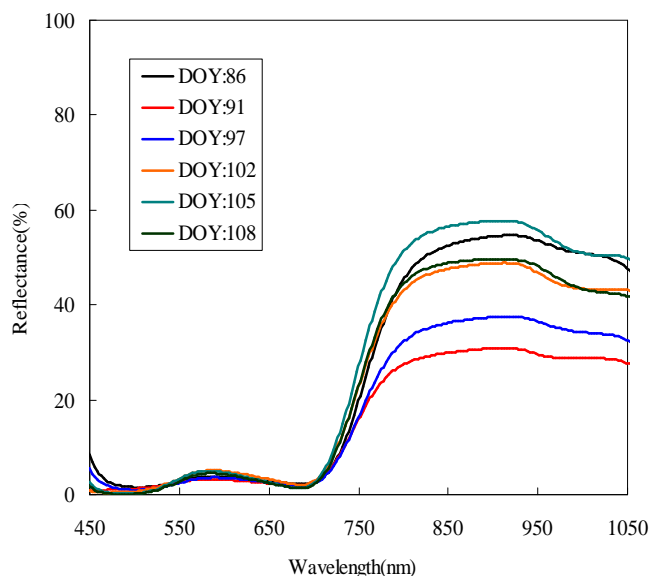


図 3-6 分光反射率の経時変化の一例

ロフィル a,b の吸収帯を示しており,550nm が反射帯を示していることから,全てクロロフィル由来の変動であると考えられる<sup>40),41)</sup>。また 660nm~770nm 付近の波長は,レッドエッジと呼ばれている。これらの波長帯における反射率の変化は,植物の活性やクロロフィルの増加量と密接に関連していることが報告されている<sup>42),43)</sup>。

茶葉の一次微分スペクトルを図 3-7 に,二次微分スペクトルを図 3-8 にそれぞれ示す。一次微分の正負の極値として 540nm と 710nm の 2 波長が,二次微分の正負の極値として,520nm,720nm,740nm と 770nm の 4 波長の計 6 波長が認められた。一次微分,二次微分で正負の極値を生じた波長帯の分光反射率の経時変化の一例として 540nm のデータを図 3-9 に示す。

540nm の分光反射率の一次微分値は,DOY の経過(生育)と密接な関係を持って上昇することが認められた。他の波長についても相関係数  $r=0.50 \sim 0.90$  があることが認められた。このことから,もとの分光反射特性曲線の視認のみでは,明瞭ではなかった変化が微分を用いることによって抽出出来ると考えられる。本研究では,図 3-6 の最大値,最小値である 460nm,550nm と 660nm と図 3-8 および図 3-9 において極値を生じた波長を特性波長と定義し解析に用いた。

### 3.3.3ND<sub>ij</sub> による生育・品質推定法の開発

#### 3.3.3-1 生育量推定のための ND<sub>ij</sub> 指標の考案

生育量(新芽の長さ)と ND<sub>ij</sub> 指標との関係を検討した。その結果を図 3-10 および式(7)に示す。

$$ND_{770,660} = (R_{770} - R_{660}) / (R_{770} + R_{660}) \quad (7)$$

左辺の ND<sub>770,660</sub> は特性波長 770nm と 660nm を用いた ND<sub>ij</sub> 指標値を,右辺の R は 770nm と 660nm を中心波長とした  $\pm 5$ nm の平均分光反射率である。

ND<sub>770,660</sub> 指標値と生育量(新芽の長さ)には有意な関係が確認されたが,指標値が 0.93 付近でばらつきが大きくなった。これは,図 3-4 の経時変化より,DOY:120 付近の生育量のばらつきが大きかったことに起因している。DOY:120 で生育量のばらつきが大きくなった原因として,本研究では,採摘調査を枠内の全

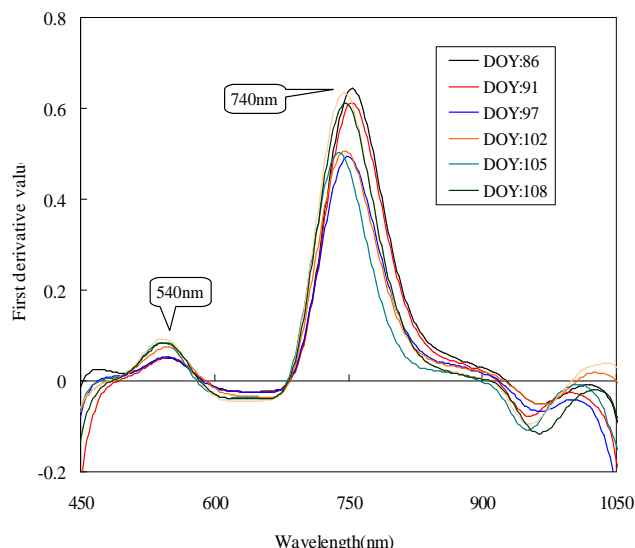


図 3-7 分光反射率の一次微分による特性波長の抽出

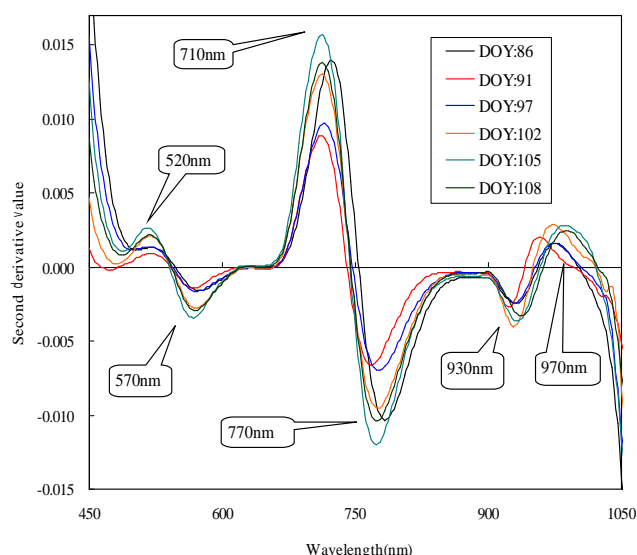


図 3-8 分光反射率の二次微分による特性波長の抽出

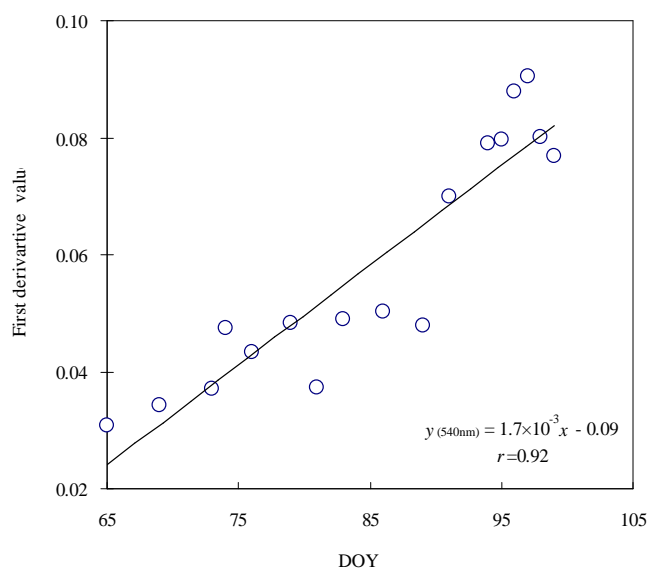


図 3-9 特性波長(540nm)の一次微分値の経時変化の一例



新芽に対して行ったことが挙げられる。全新芽を摘葉する方法では、生育後期になるに従って、二次的に展開し始める微少な新芽がサンプルに含まれてしまう。それらの新芽は本来ならば、摘採機の刃部分が届かないため、実際には摘採されない。本研究では、含めて生育量として平均化したため、ばらつきが大きくなってしまったものと考えられる。

ND<sub>770,660</sub> 指標値と生育量の関係が示されたので、ND<sub>770,660</sub> 指標値の経時変化から生育量の変動傾向を調査した。図 3-11 に ND<sub>770,660</sub> 指標値の経時変化を示す。DOY:85 付近から上昇し、DOY:100 付近から DOY:120 までは、多少の増減があるものの、0.94 程度で横ばいであった。

本研究においては、DOY:85 付近が萌芽日であったので、DOY:85 以降の新芽の生長が ND<sub>770,660</sub> 指標値を用いることで非破壊的に推定可能であると考えられる。しかし、DOY:100 以降から、指標値が飽和傾向にあるため摘採時期の正確な推定は困難であった。

本研究において、生育量(新芽の長さ)と葉内窒素含有率は、どちらも 770nm と 660nm を用いた ND<sub>770,660</sub> 指標で推定が可能であった。これは、茶の生育が葉内窒素含有率の変動と連動していることを示していると考えられる。

しかし、生育量と ND<sub>770,660</sub> 指標の関係では、指標値が 0.93 ~ 0.96 付近のデータのばらつきが大きく、葉内窒素含有率と ND<sub>770,660</sub> 指標値においても、0.96 ~ 0.99 の付近でばらつきが大きくなる結果となった。

また ND<sub>770,660</sub> 値の経時変化を用いることで、生育量の推定の可能性となったが、生育 ND 指標の経時変化は、DOY:100 付近で飽和してしまいうため、正確な摘採適期を推定することは困難であった。これは、ND<sub>770,660</sub> は、波長帯が狭いことを除けばとりうる値が -1 ~ 1 までと NDVI と同様であることが原因であると考えられる。種々の報告においてもなされているように、指標値が 1 付近になると NDVI は、飽和傾向を示すと考えられる<sup>44),45)</sup>。こ

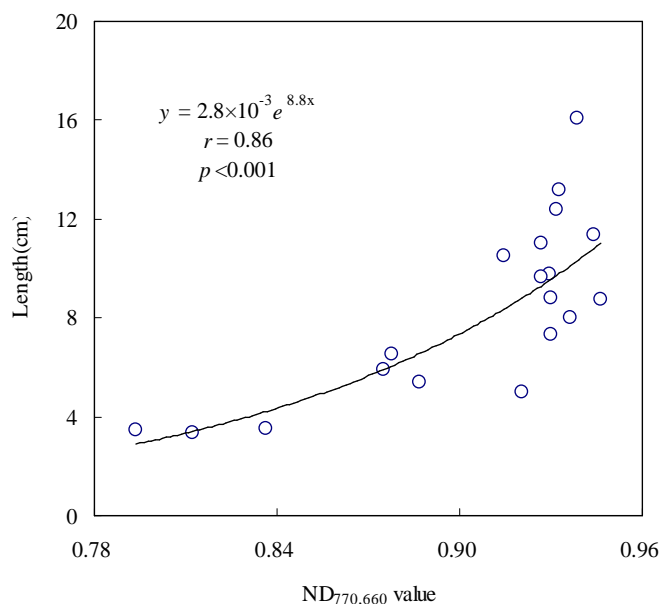


図 3-10 生育量と ND<sub>770,660</sub> の関係

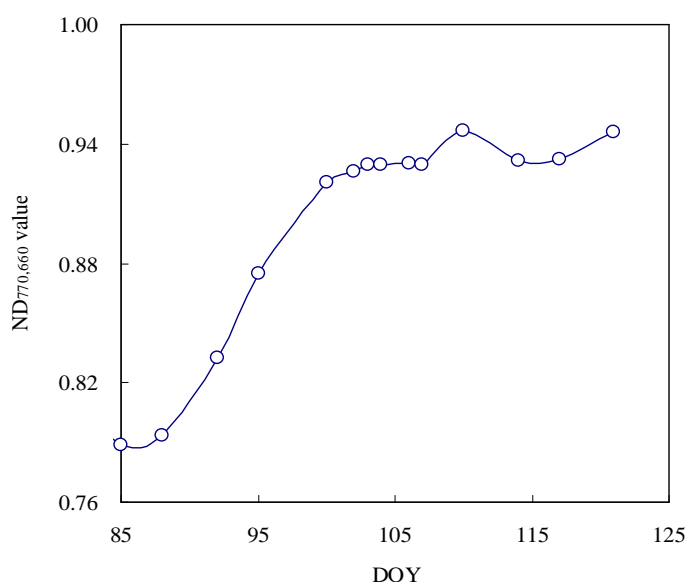


図 3-11 ND<sub>770,660</sub> 指標値の経時変化

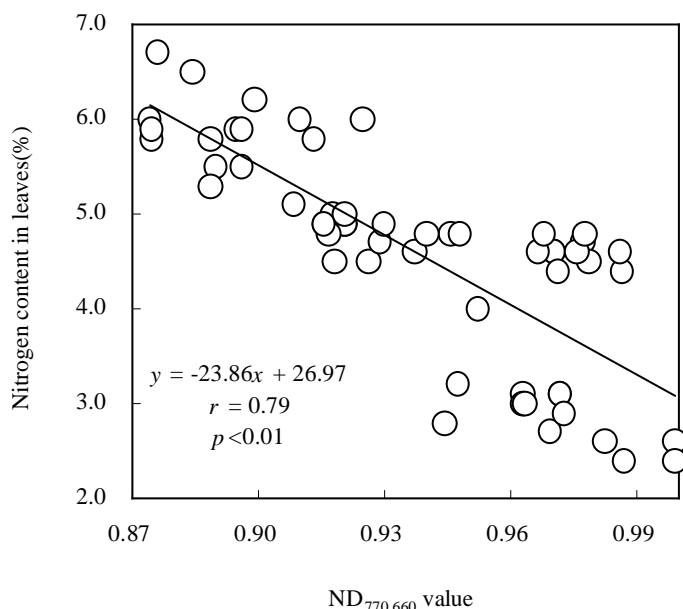


図 3-12 葉内窒素含有率と ND<sub>770,660</sub> の関係

のことを解消するために、小川らは、NDVI を指数化することで NDVI の拡張を提唱している<sup>46)</sup>。本結果においてもそれらの手法を適応することで  $ND_{ij}$  指標による生育量の推定精度が向上するものと考えられる。

### 3.3.3-2 品質成分含有率と $ND_{ij}$ 指標の関係

葉内窒素、葉内アミノ酸および葉内タンニン含有率と  $ND_{ij}$  指標との関係の一例を図 3-12～図 3-14 に示す。各々の品質成分含有率と  $ND_{ij}$  指標値との間には全て有意な負の相関があることが確認された。本研究にて考案した  $ND_{ij}$  指標は以下の通りである。

葉内窒素含有率推定  $ND_{ij}$  指標

$$ND_{770,660} = (R_{770} - R_{660}) / (R_{770} + R_{660}) \quad (8)$$

葉内テアニン含有率推定  $ND_{ij}$  指標

$$ND_{710,520} = (R_{710} - R_{520}) / (R_{710} + R_{520}) \quad (9)$$

葉内タンニン含有率推定  $ND_{ij}$  指標

$$ND_{770,520} = (R_{770} - R_{520}) / (R_{770} + R_{520}) \quad (10)$$

葉内アミノ酸含有率推定  $ND_{ij}$  指標

$$ND_{540,520} = (R_{540} - R_{520}) / (R_{540} + R_{520}) \quad (11)$$

ここで、各式の両辺の添え字は波長を示し、右辺の  $R_{770}$ ,  $R_{710}$ ,  $R_{660}$ ,  $R_{540}$  と  $R_{520}$  は添え字のときの分光反射率(%)を示す。

窒素含有率との関係では、3.3.3-1 項にて述べた生育量と同様の波長を用いた  $ND_{770,660}$  指標が最も相関が高い結果となった。これは、茶の新芽の生育量と葉内窒素含有率は密接に対応して変動することを表していると考えられる。従って、茶の葉内窒素含有率は、 $ND_{ij}$  指標を用いることで、生育量からも推定可能であると考えられる。タンニン、テアニンとアミノ酸含有率は、それぞれ、 $ND_{710,520}$ 、 $ND_{770,520}$  および  $ND_{540,520}$  指標値と最も高い相関が得られた。しかし、特にタンニン含有率、テアニン含有率と  $ND_{ij}$  指標との関係においては、 $ND_{770,520}$  指標値が 0.95 付近や  $ND_{710,520}$  指標値が 0.75 以上の場合において、実測値が推定値より高くなる傾向が認められた。

### 3.3.3-3 主成分分析による品質推定

3.3.3-2 項において導出したタンニン、テアニンとアミノ酸含有率推定のための  $ND_{ij}$  指標値を用いて主成分分析を行った

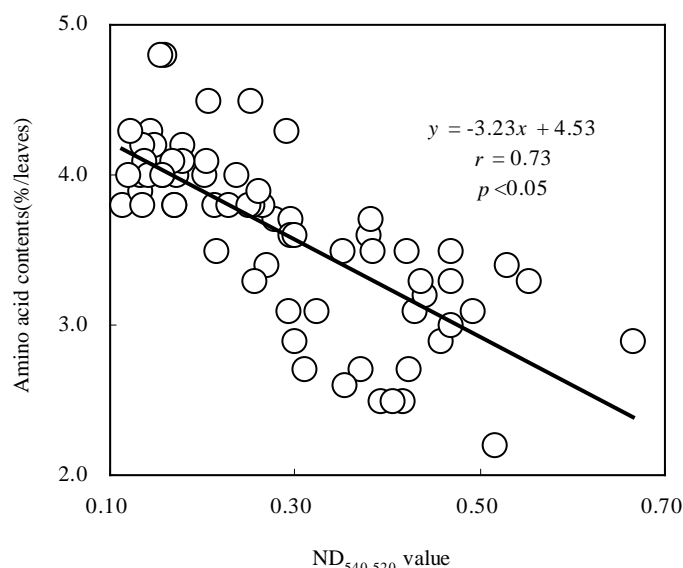


図 3-13  $ND_{540,520}$  指標と葉内アミノ酸含有率の関係

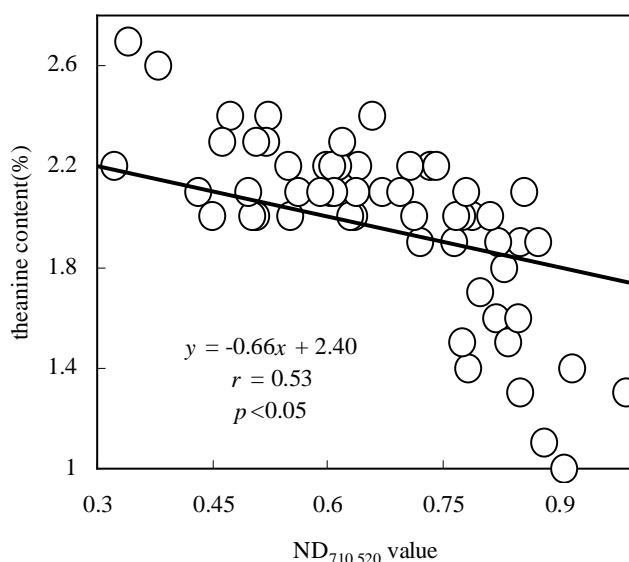
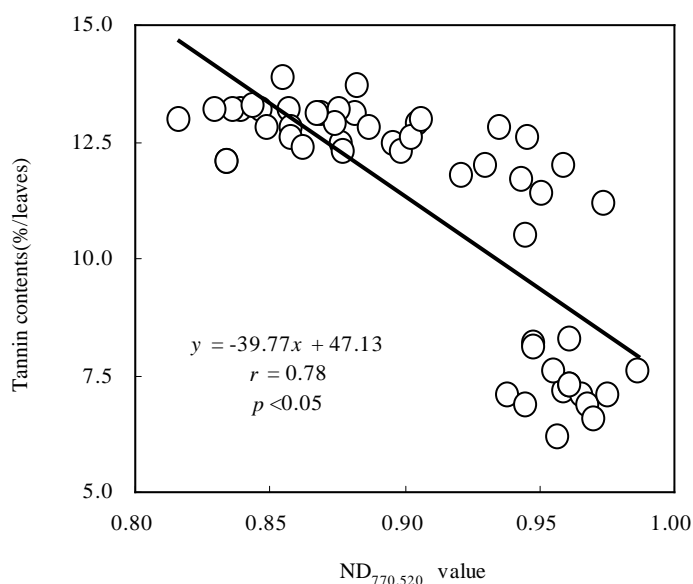


図 3-14  $ND_{ij}$  指標と葉内タンニン含有率及びテアニン含有率の関係

結果を表3-1に示す。表より、第一主成分の固有値が1以上であり、累積寄与率も75%と高い値を示した。また、第二主成分以下の固有値は0.5程度であった。タンニン、テアニン、アミノ酸含有率の生育期間中の変動は、茶葉の品質に大きくかかわっていると考えられるので、第一主成分を新芽の生長段階での総合的な品質推定の尺度とした。

第一主成分得点の経時変化を図3-15に示す。第一主成分の主成分得点は、DOY:97からDOY:106まで上昇した。DOY:106付近では、第一主成分得点が1以上となり、最も高い値を示した。その後第一主成分得点は低下し、DOY:108での値は、0.5程度となった。生育期間全体では、第一主成分得点は相関係数 $r=0.71$ で、二次関数的に変化した。

第一主成分得点が高いほど品質が高いと仮定すると、本研究の結果から、DOY:106付近が最も高品質であると考えられる。また、その後急激に第一主成分得点が低下することから、品質面から考えた場合の摘採最適期はDOY:106の前後1日程度の期間であると考えられる。本結果は、枕崎市における平年の摘採時期であるDOY:105~110の期間内であることから、本手法による摘採適期推定の可能性が示唆された。

### 3.3.3-4 AF値を品質と定義した場合の $ND_{ij}$ 指標との関係

葉内のアミノ酸含有率と繊維含有率の比であるAF値と分光反射特性との関係を検討すると、710nmと520nmの波長を用いた $ND_{ij}$ 指標に最も高い相関があることが確認された。710nmと520nmを用いた指標とAF値の関係を図3-16に、式を(12)に示す。

$$ND_{710,520} = (R_{710} - R_{520}) / (R_{710} + R_{520}) \quad (12)$$

左辺の $ND_{710,520}$ は710nmと520nmを用いた $ND_{ij}$ 指標値を、右辺の $R$ は710nmと520nmを中心波長とした $\pm 5$ nmの平均分光反射率である。AF値を品質と定義した場合においても $ND_{ij}$ を用いた品質推定が可能であると考えられる。

$ND_{710,520}$ 指標値の経時変化を図3-17に示す。 $ND_{710,520}$ は、DOY:100付近までは0.28前後で横ばいであった。またDOY:103付近までは、値が上昇し、その後急激に値が下がる傾向を示した。さらにDOY:120付近で再び上昇する傾がも確かめられた。図3-16から、AF値と $ND_{710,520}$ 指標値との間には負の相関が確認されたため、品質が高いほど $ND_{710,520}$ 指標値は低くなる。従って、本手法において、最も高品質な時期は、最も指標値の低

表3-1 主成分分析結果の概要

Principal component	Eigen value	Contribution ratio(%)
No.1	2.25	75.01
No.2	0.54	18.00
No.3	0.21	6.98

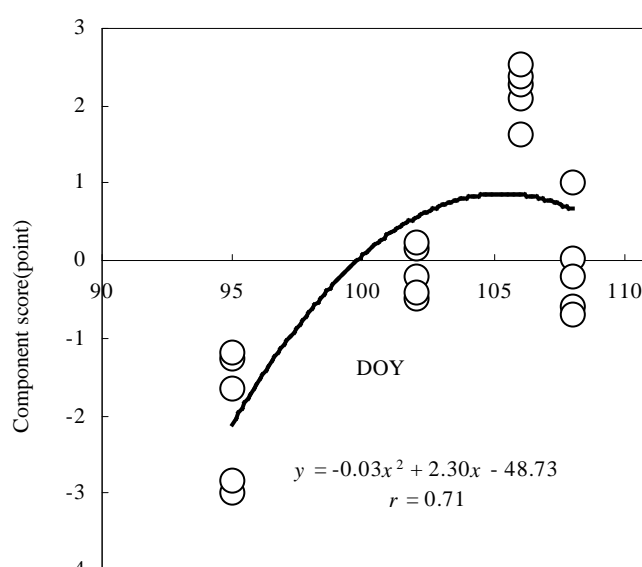


図3-15 第1主成分得点の経時変化

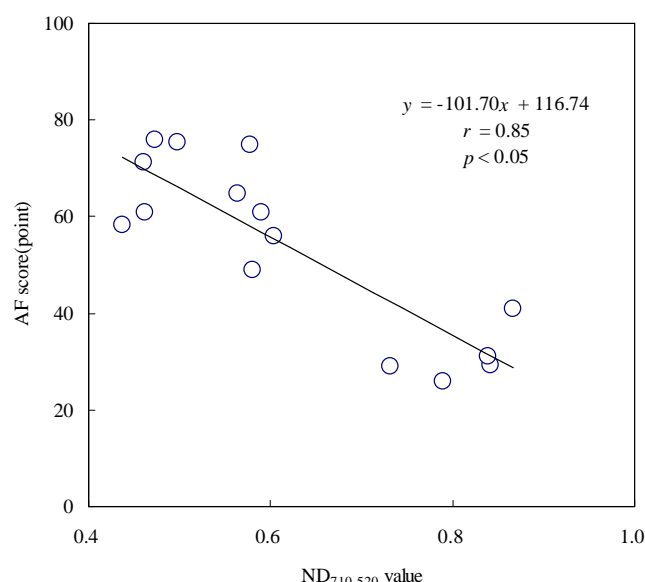


図3-16 AF値と $ND_{710,520}$ 指標の関係

い,DOY:105 から DOY:115 付近であると考えられる．3.3.3-3 において述べた枕崎市の平年の摘採時期とほぼ一致していた．さらに,DOY:120 を過ぎると指標値が急激に上昇することから,品質は,摘採時期を過ぎると

急激に低下していることを示している．しかし,枕崎市の奨励摘採時期以後の測定点が非常に少ない為,今後さらに DOY:120 以降の測定回数を増やすことで,品質がどのように変動するか検討する必要があると考えられる．

### 3.4 考察

本章では,近接リモートセンシング手法を用いて栽培条件が同一な茶葉の生育・品質推定のための  $ND_{ij}$  指標の考案を行った．

一方,品質に関しては,品質成分含有率と  $ND_{ij}$  指標値の関連性から  $ND_{ij}$  指標を変数とした主成分分析を用いる方法,AF 値を品質と定義して  $ND_{ij}$  指標で推定する方法を検討した．主成分分析では,第 1 主成分分析得点の経時変化が,2 次関数的に変動する傾向にあり,DOY:108 付近にピークを生じる結果となった．品質指定  $ND_{ij}$  指標の経時変化は,DOY:105 付近で,それ以前の日より値が小さくなり,DOY:115 まで指標値が 0.25 程度と低い値であった．その後,DOY:115 付近で,指標値が 0.55 まで急激に上昇する結果であった．

品質推定に用いた第 1 主成分得点と  $ND_{710,520}$  指標値は,同様の時期にピークやボトムを生じることから,品質面からの摘採適期の推定に有効な方法と考えられる．しかし,第 1 主成分得点では,ピークは特定の日に限定されてしまう．一方  $ND_{710,520}$  指標では,指標値のボトムは,10 日程度にわたっていた．ヤブキタの摘採適期は,一週間程度あるといわれているため<sup>47)</sup>, $ND_{710,520}$  指標を用いた手法の方がより摘採適期推定に適していると考えられる．

### 3.5 まとめ

本章では,近接リモートセンシング手法を用いて茶の摘採適期を推定するための基礎データとして,栽培条件が同一である 1 筆の圃場を用いて生育・品質推定手法の考案と摘採適期推定に関して検討を行った．

分光反射特性を用いた  $ND_{ij}$  指標を用いることで,茶葉の生育量・品質が非破壊的に推定可能であることが明らかとなった．生育量を推定するための  $ND_{770,660}$  指標は,生育後期に指標値が飽和してしまうため,摘採のための最適時期を推定することが困難であった．しかし,品質成分であるアミノ酸,テアニンおよびタンニン含有率を用いた主成分分析結果と,品質を推定するための  $ND_{710,520}$  指標は,摘採時期とその他の時期で値に明確な差異が生じた．このことから,本研究によって,品質面からの摘採適期の推定が非破壊で可能であることが明らかとなった．

本章における主要な結果は以下のとおりである．

1. 分光反射特性は可視域の 460,660nm で最小値を示し,540nm で最大値を示した．また,770nm 以降の反射率は横ばいとなったが,生育とともに 25% 程度の変動があった．
2. 分光反射特性の一次・二次微分の結果,520nm,540nm,710nm,720nm,740nm と 770nm が特性波長として抽出された．
3. 生育量と  $ND_{770,660}$  指標値には,正の相関  $r=0.86$  が確認された．
4. 各葉内成分含有率と  $ND_{ij}$  指標値には,負の相関  $r=0.75$  以上が確認された．
5. AF 値と  $ND_{710,520}$  指標値には,負の相関  $r=-0.85$  が確認された．
6.  $ND_{770,660}$  指標値は,萌芽日以降上昇し,DOY:100 付近で横ばいとなった．
7.  $ND_{ij}$  指標値を説明変数とした主成分分析を行った結果,第 1 主成分得点は,二次関数的な変動を示し

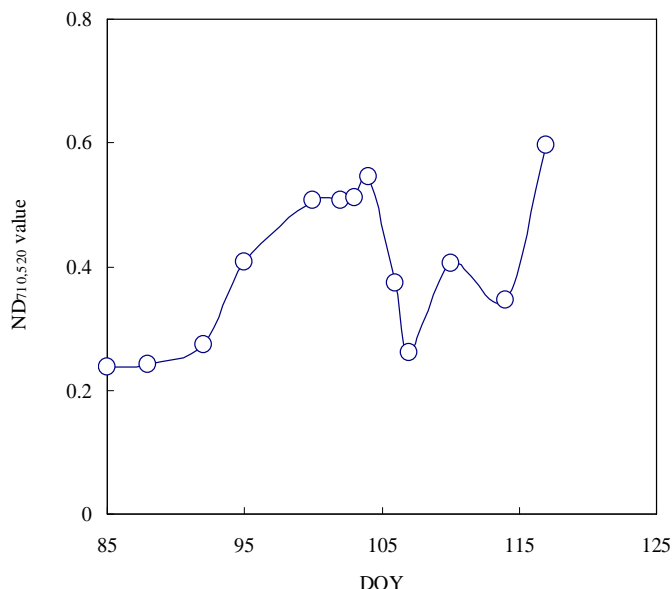


図 3-17  $ND_{710,520}$  指標の経時変化



た．

8.  $ND_{710,520}$  指標値は、萌芽日以降減少し、摘採期付近で最も低い値を示した．また、その後値が上昇する傾向が認められた．

## 第4章 分光画像を用いた茶葉の生育・品質推定手法の開発

### 4.1 緒言

第3章において、 $ND_{ij}$  指標による非破壊的な茶の生育・品質推定が可能であることを示した。しかし、第3章の結果は、分光反射特性を測定したある特定の領域を対象にしたものである。 $ND_{ij}$  指標を実際の生産現場に適用するためには、圃場全体を対象とした  $ND_{ij}$  指標を用いた生育・品質の把握必要であると考えられる。

また生育量や葉内窒素含有率などは、圃場内の肥培条件や肥培のむらに影響されると考えられる<sup>48)</sup>。

そこで、本章では、第3章にて生育や品質を推定する要素として抽出した特性波長や  $ND_{ij}$  指標を画像に適用し、一筆の圃場全体にたいする茶の生育・品質の推定が可能かどうかについて検討を行った。あわせて、画像のヒストグラムの変動から、茶葉の圃場内の分布と圃場内の施肥条件との関係を調査することで、茶栽培での肥培管理手法へ本研究結果の利用の可能であるかについても検討した。

図 4-1 対象地区の肥培管理条件と生茶収量

Field No.	Nitrogen Fertilization(kg/10a)	Picking date(DOY)	Yield(kg/10a)
1	24	118	657
2			
3	24.4	120	460
4	12	125	150
5	24	120	465
6			
7	22.9	126	550
8	12	127	221
9	12.6	113	300
10	14.5	115	300
11	15.2	119	400
12	14.4	118	400

### 4.2 材料及び方法

#### 4.2.1 供試材料と実験圃場

供試材料としてヤブキタ (*Camellia sinensis* L. cv. Yabukita)を用いた。対象圃場として2007年は、第2章と同様の枕崎茶業研究所内の1圃場、2008年は、さつま町内の12圃場を選定した。さつま町の各圃場の位置を図4-1に示した。またさつま町の測定対象圃場の窒素施肥条件、摘採期と収量は表4-1のとおりであった。実験は、2007年、2008年とも2月～3月までは、隔週1回、4月上旬は週1回で摘採期付近の4月中旬から5月上旬までは週2～3回の計12回行った。

#### 4.2.2 分光画像の撮影方法

全ての実験日に枕崎では、分光反射特性の対象領域に対して、さつま町では、圃場全体に対して分光画像の撮影を行った。分光画像は、図4-2のようにデジタルビデオカメラ(SONY製、DCR-TRV20型、ダイナミックレンジ:40～50dB、解像度7万画素)のレンズの前面に干渉フィルタ(MI-Y、日本真空光学製、半値幅:20nm)を装着して撮影した。バンドパスフィルタは、中心波長が440nm、520nm、550nm、570nm、660nm、710と770nmで、中心波長に対する半値幅は全て±8nm以下、各波長の最大透過率は30～50%であった。撮影時のそれぞれのバンドパスフィルタの切り替えは、手動で行った。バンドパスフィルタは、縦:横:厚さ=50:50:5mmで、石英板の上に半透明非金属膜、透明誘電体膜と半透明金属膜をコーティングした3層構造のものを利用した。

測定位置は、枕崎では、地上部からビデオカメラまでの高さを1.5mとし、俯角を30°とした。さつま町では、圃場の外から撮

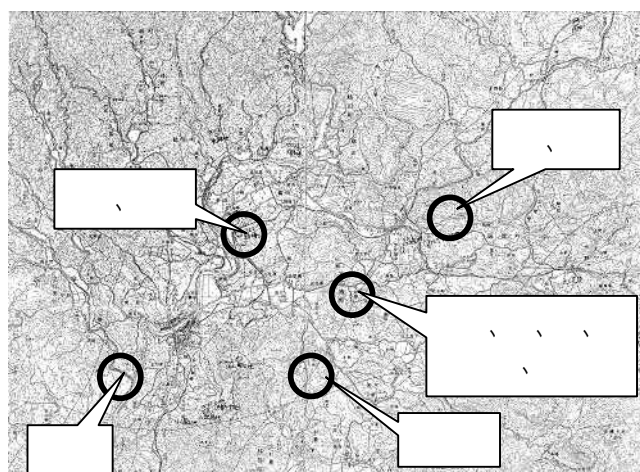


図 4-1 測定対象地区の位置関係(さつま町)



図 4-2 分光画像撮影方法

影を行い、地上部からビデオカメラまでの高さを 1.7m～2.5m とし、圃場全体が入るようにそれぞれの圃場で俯角を調節した。また、三脚の設置位置にマーカーをつけ、全ての実験日で同一の方向・角度で測定できるようにした。枕崎において撮影した画像を試験区画像、さつま町において撮影した画像を全体画像と呼ぶ。

それぞれの画像の一例を図 4-3 および図 4-4 に示す。画像の撮影に際して、分光反射特性測定に用いたものと同様の標準白色板を画像に挿入した。挿入した白色板の DN 値が飽和してしまうことを防ぐため、可視領域の測定時は、露光をマニュアル化し、明るさを手動で調整した。また近赤外領域は Night Shot 機能(測定波長領域：約 700nm-約 850nm, 透過率:不明)で測定した。近赤外域では、露光をマニュアル化することができなかったため、減光フィルタ(49s pro-ND8, (株)ケンコー, 東京)を用いて光量を通常値の 1/8 に制御して撮影を行うこととした。取得した画像は ERDAS IMAGINE ver.8.7(ESRI. CO)を用いて解析した。画像間演算処理精度を向上させるため全ての画像データに実数処理を施した後、RMSE が 0.09 画素以下になるように位置補正を行った。

#### 4.2.3 特性波長による生育推定手法

茶葉は新芽の生育量が直接収量に結びつくため、新芽の増加量の的確な把握が重要となる。また前章の 3.2 項で示したとおり、茶葉では、クロロフィル含有率の増加が生育量に密接に関連していると考えられる<sup>49)</sup>。そこで、クロロフィル含有率の増加量を最も反映していると考えられる特性波長帯である 540nm の分光画像を用いて解析を行った。各実験日の分光画像は、教師つき分類にてレベルスライスを行い、各カテゴリーに対して閾値を決定した。教師つき分類は、ある基準(教師)となる画像を元に、画像内のカテゴリーを分類する手法である。教師つき分類では教師が無い場合に比べ、解析に要する時間が長くなるが、実際の土地被覆状況に基づいて分類を行うため精度が高くなる利点がある。

レベルスライス法は、教師つき分類の代表的な手法の 1 つで、画像内の Digital Number(画像の濃淡を 0-255 までの正数値で表示。以下 DN 値と略記)に閾値を設け画像を分割する手法である。分割したそれぞれの DN 値の範囲はカテゴリーと呼ばれる。本研究において用いた教師は、対象領域のカラー画像である。

#### 4.2.4 $ND_{ij}$ 指標による茶葉の生育・品質推定手法

圃場全体を対象として茶葉の生育・品質を推定するため、 $ND_{770,660}$  と  $ND_{710,520}$  指標を適用して作成した画像のヒストグラムを解析に用いた。ヒストグラムを比較する統計量として、最頻値( $ND_{ij}MAX$ )を用いた。

品質に関しては、どの時期に最高品質になるかに加えて、圃場内の品質にどの程度のばらつきがあるかを検討する必要がある。そこで、圃場内の品質のばらつきを表すため、正規分布を最適な分布状態と仮定し、正規分布に対して、どの程度裾野が重いかを示す、「尖度」を用いることとした。

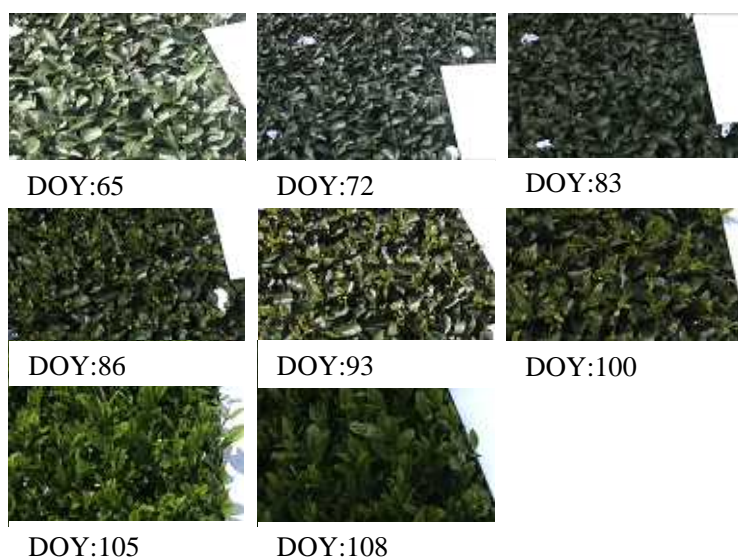


図 4-3 分光画像の経時変化の一例(試験区画像)

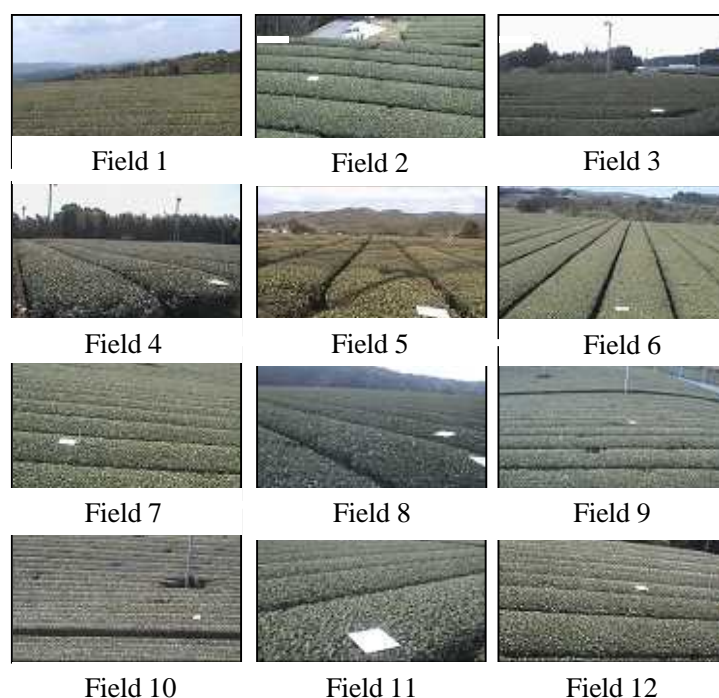


図 4-4 分光画像の一例(圃場全体, DOY: 93)



1 シーンに対して取得された画像の DN 値を  $X_1, X_2, \dots, X_i$  とし, これらの平均を  $\mu$ , 標準偏差を  $\sigma$ ,  $N$  を総度数とすると, 尖度( $K$ )は, 式(13)で示される。

$$K = \sum \frac{(X_i - \mu)^4}{(N \times \sigma^4)} - 3 \quad (13)$$

#### 4.2.5 $ND_{ij}$ 指標と窒素施肥量との関係

窒素施肥量の生育に対する影響を調査するために, 第 3 章において, 考案した  $ND_{770,660}$  指標適用画像の最頻値( $ND_{770,660}MAX$ )と葉内窒素含有量の関連性を調査した。さらに, 投入窒素施肥量と葉内窒素含有量の関係を調査し投入施肥の  $ND_{770,660}MAX$  による推定の可能性について検討した。また, 一番茶摘採日の新芽・旧葉の葉内窒素含有量を算出し, 窒素利用効率を算出することで最適窒素施肥量の検討を行った。新芽の葉内窒素含有量は, 図 4-1 に記載した各圃場の収量(kg/10a)に前章の 3.2.3 項に記載した方法で摘採, 定量した葉内窒素含有率(%)を乗算することで算出した。旧葉の葉内窒素含有量は年間を通じてほとんど変動がないため, 2 月前半に, 1 回採摘調査を行い, 採内の重量と窒素含有率を測定した。

また, 施肥量中の窒素成分の利用効率を算出し, 葉内窒素含有量との関連性を調査した。本研究における施肥量の利用率は, 以下の式(14)で算出した。単位は全て, kg/10a である。

$$\text{利用率} = \frac{\text{旧葉の窒素含有量} + \text{新芽の窒素含有量}}{\text{投入された施}}$$

(14)

### 4.3 実験結果

#### 4.3.1 分光画像と分光反射率の関係

さつま町での全て実験日での 520nm, 660nm, 720nm と 770nm の波長帯における分光画像と分光反射率との関係を図 4-5 示す。データは 12 圃場の平均値を用いて算出した。分光反射特性と分光画像の関係は, 分光画像の輝度値を  $Y$ , 分光反射率を  $x$  としたとき,  $Y = 1.07x + 23.69$  ( $r = 0.96$ ) となった。図 4-5 の近似直線の傾きが, 1.07 と, ほぼ 1 となったので, 分光反射特性によって提案した指標をそのまま分光画像に適用した検討を行うことが可能であると考えられる。ここで, 切片が現れたことについては, 分光反射特性と分光画像の視野領域の差異が理由として挙げられる。分光反射特性と分光画像の視野は, 図 4-2 のようになっているため, 直下以外に余弦成分からのエネルギーが分光反射率計より多く入射してしまったものと考えられる。しかし, 今回は, 余弦成分による画像 DN 値の増幅は考慮せず検討を行った。

#### 4.3.2 分光画像による生育推定手法

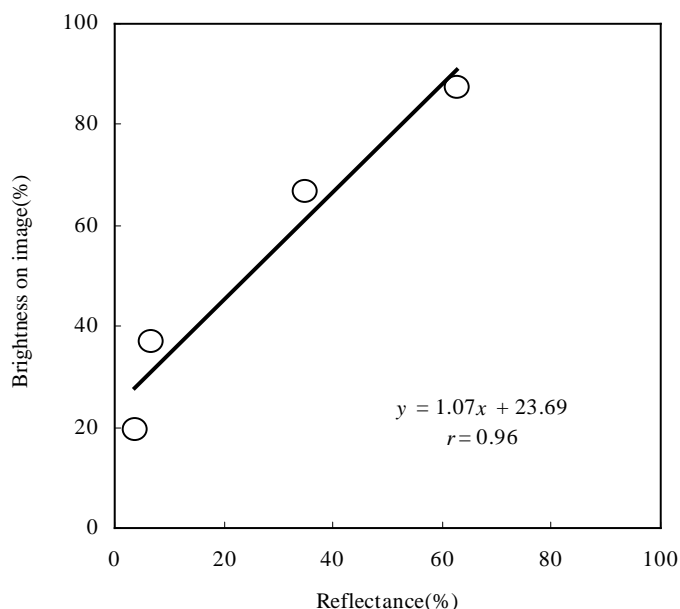


図 4-5 分光画像の輝度値(DN 値)と分光反射率の関係

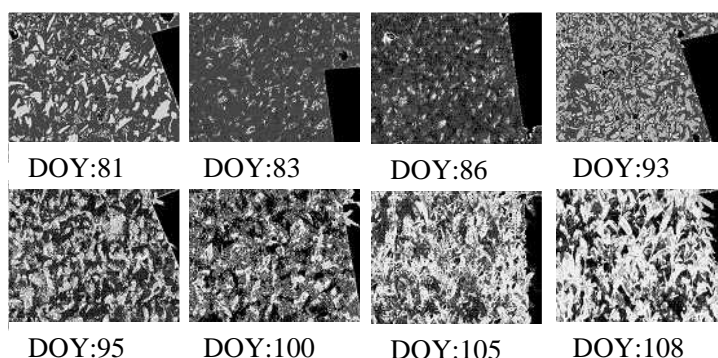


図 4-6 レベルスライス処理後の分光画像(540nm)

表 4-2 レベルスライスに用いた画像 DN 値の閾値

4-2(a)

Category(1st stage)	Minmum	Maximum
Shadow	3.06±1.52	8.51±1.53
Dark Part of old leaves	-----	11.09±1.50
Old leaves	9.83±0.45	12.42±1.20
Bright part of Old leaves	26.45±0.11	50.05±4.23
New leaves	-----	21.72±0.82

4-2(b)

Category(2nd stage)	Minmum	Maximum
Shadow	3.06±1.53	8.51±1.40
Old leaves	9.55±1.22	16.39±2.52
Bright part of Old leaves	-----	19.14±0.92
Dark part of new leaves	-----	22.04±1.54
New leaves	14.75±0.63	25.79±0.22
Bright part of new leaves	28.72±0.67	31.59±1.20
Most bright part of new leaves	-----	35.99±1.69

4-2(c)

Category(3rd stage)	Minmum	Maximum
Shadow	3.02±1.52	7.36±0.59
Old leaves	-----	9.82±0.43
Dark part of new leaves	-----	11.99±0.90
New leaves	14.75±0.68	25.79±0.19
Bright part of new leaves	28.71±0.67	31.58±1.24
Most bright part of new leaves	-----	35.99±1.66

レベルスライス手法を用いて 540nm の分光画像を分類した結果を図 4-6 に示す。各カテゴリーの閾値は、茶園が旧葉のみの時期を第 1 ステージ、萌芽日を基準に萌芽前後 1 週間を第 2 ステージ、萌芽後 1 週間から、摘採日付近までの期間を第 3 ステージとして決定した。本研究では、レベルスライスするために用いた閾値の一例を表 4-2 に示す。表の---部分は、画像上で確認されなかった箇所である。第 1 ステージでは、表 4-2(a) のように新芽の量が 0 であるため、この時期は、最も明るい部分が旧葉の明るい部分、最も暗い部分が影の部分である。第 2 ステージでは、表 4-2(b) のように新芽、旧葉それぞれの明部、暗部、影部が考えられるので、7 つのカテゴリーに大別した。第 2 ステージの初期では、新芽の DN 値より、旧葉の DN 値の方が高いことが確認された。これは、新芽生育の初期段階では、葉が展開しておらず、微小な反射エネルギーであったためと考えられる。さらに第二ステージにおいて他の二つのステージと画像内の DN 値に大きな差異が生じた日は新芽が出現した日と一致していた。このことから、第 1 ステージと第 2 ステージの画像を連続的に測定することで、新芽の展開時期の推定が可能であると考えられる。

閾値に従って、確実な新芽の増加であると考えられる場所を抽出し、新芽被覆率の変動を調査した。新芽被覆率は式 (15) を用いて定義した。

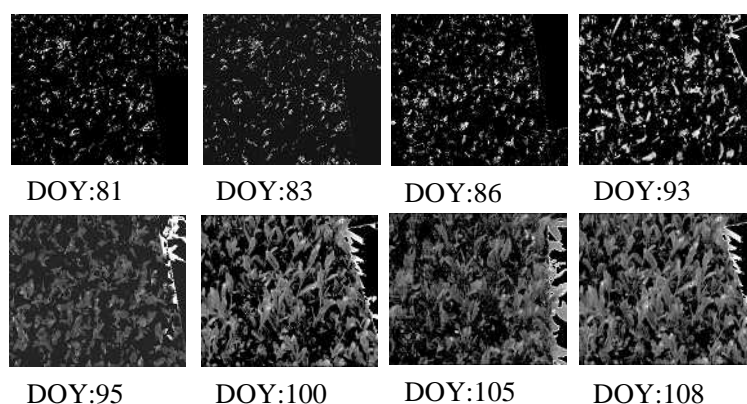


図 4-7 新芽抽出画像の経時変化

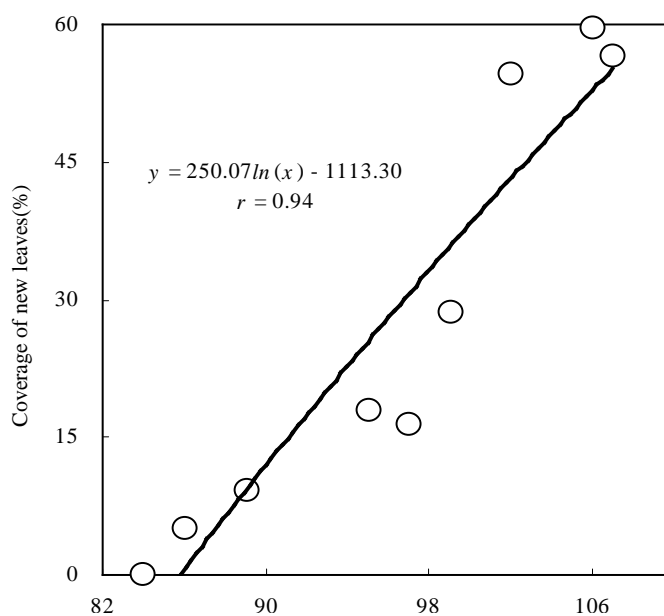


図 4-8 新芽被覆率の経時変化

新芽の抽出画像の経時変化を図 4-7 に示す．画面右の黒部は白色板である．画像上で白色または灰色で表されている部分が新芽として抽出された箇所である．画像の右部分の白色板に写っている部分は、白色板に写りこんでしまった影である．

$$\text{新芽被覆率}(\%) = 100 \times \frac{\text{抽出した新芽の画素数}}{\text{画像全体の画素数}} \quad (15)$$

画像 DN 値から算出した新芽被覆率の経時変化を図 4-8 に示す．この際白色板に映ってしまった新芽の影を取り除いて経時変化を作成している．新芽被覆率は DOY : 85 付近から DOY : 97 付近まで緩やかに上昇し、その後、DOY : 104 まで急激に上昇することが確かめられた．DOY : 104 以降は、DN 値は横ばいとなる結果であった．新芽の生育期間全体では、対数関数的に変動することが確認された．このことから、540nm の分光画像のみでも茶の生育量を推定できる可能性があることが示される．

### 4.3.3 ND<sub>770,660</sub> による生育推定手法の開発

#### 4.3.3-1 ND<sub>770,660</sub> 指標適用画像の経時変化

萌芽日以降の ND<sub>770,660</sub> 指標適用画像 (以下 ND<sub>770,660</sub> 画像) の経時変化の一例を図 4-9 に示す．前章 3.3.3-2 項の図 3-10 の生育量と ND<sub>770,660</sub> 値との関係より、ND<sub>770,660</sub> 画像の DN 値が高い方が生育量が多いと考えられる．ここで、DOY:93 の画像は 770nm の白色板の DN 値が 255 を超えてしまい、正確な DN 値を算出できなかったことから除外した．作成した画像から、生育量の視覚化は可能となったが、画像のみでは、生育量の変動を正確に追う事ができなかったため、画像のヒストグラムを用いて解析を行った．ND<sub>770,660</sub> 画像の DN 値の最頻値 (ND<sub>770,660</sub>MAX) の経時変化の一例を図 4-10 に示す．ND<sub>770,660</sub>MAX は、DOY:103 付近から上昇し、その後 DOY:116 付近でわずかに減少した．萌芽日以降の生育期間の全体的な傾向としては対数的な変動であった．この傾向は、他の圃場でも同様のものとなった．このことから ND<sub>770,660</sub>MAX を用いることによる生育量の画像的な推定が可能であると考えられる．

ここで圃場の新芽は、DOY:120 付近で摘採された．本研究においては、生育 ND<sub>770,660</sub>MAX が減少に転じる DOY:116 以降のデータが 1 点しかなかったため、対数近似とした．これは、各圃場の摘採日が異なるためであるが、前章 3.3.3-2 項で示した ND<sub>770,660</sub> 指標値の経時変化の場合と同様、作物の生育は一般的にシグモイド曲線に従うと考えられる．そのことが関係し、生育中のある時期を越えると ND<sub>770,660</sub>MAX が横ばいになってしまうと考えられる．以上の

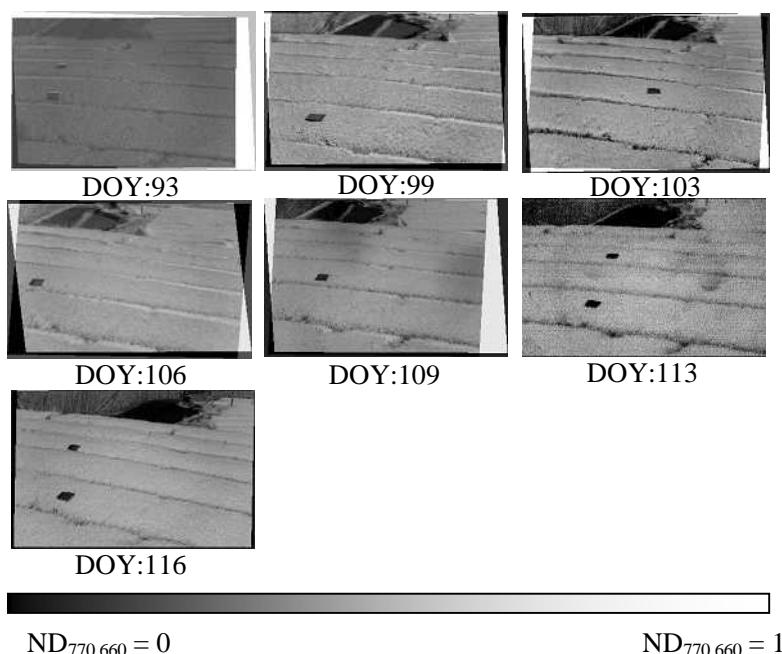


図 4-9 ND<sub>770,660</sub> 画像の経時変化(2008 年, Field 1)

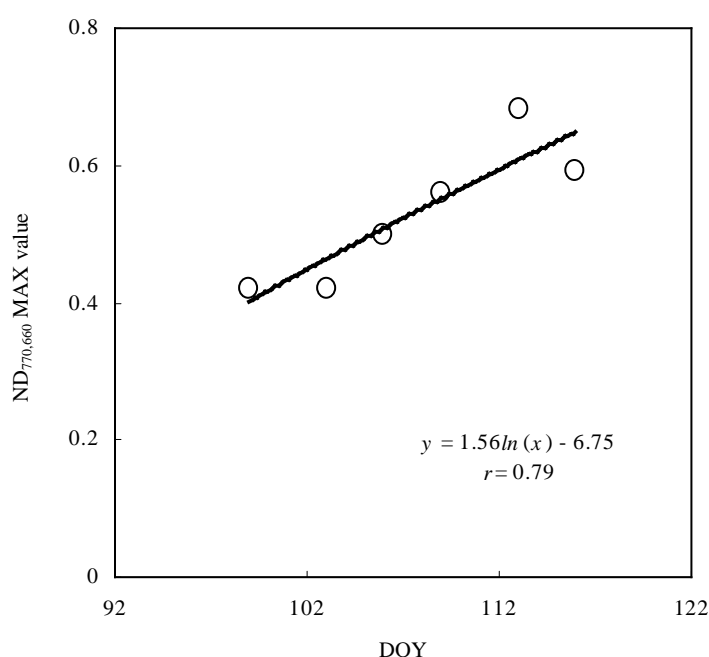


図 4-10 ND<sub>770,660</sub>MAX の経時変化(2008, Field1)

ことから、ND<sub>770,660</sub>MAX を用いることで、圃場内の生育量の推定は非破壊的に可能であるが、正確な摘採適期を推定するまでには至らなかった。

#### 4.3.3-2 ND<sub>770,660</sub> と肥培条件(窒素施肥量)との関係

摘採日の葉内窒素含有量(kg/10a)と ND<sub>770,660</sub>MAX には、図 4-11 に示したように、負の相関  $r=-0.63$  が確認された。これは、3.3.3-1 に示した関係を反映しており、ND<sub>770,660</sub>MAX によって面的な葉内窒素含有量の推定が可能であることが示された。

各圃場に投入された窒素施肥量(kg/10a)の合計と摘採日の葉内窒素含有量(kg/10a)の関係を図 4-12 に示す。投入された窒素施肥量と葉内窒素含有量には、正の相関  $r=0.92$  が確認された。このことから、本研究に用いた圃場では、窒素施肥量を増やすほど、葉内窒素含有量が増加することが示された。

窒素利用効率と投入施肥量の関係を調査したところ、図 4-13 のように 17kg/10a 付近まで、投入量に従って利用率が増加する傾向が伺えるものの、20kg/10a 以上の窒素の施用は利用率をむしろ低下させると考えられる。

#### 4.3.4 ND<sub>ij</sub> による品質推定手法

品質推定 ND 指標(ND<sub>710,520</sub>)を画像に適用した ND<sub>710,520</sub> 画像の経時変化の一例を図 4-14 に示す。

第 3 章において、ND<sub>710,520</sub> 値と AF 値は、負の相関を示すことを報告した(図 3-16)。よって白色板以外の画像に対して、DN 値が 0(黒)に近い箇所は AF 値が高い(高品質な)場所である。しかし、生育量での結果と同様、画像上のみからでは品質の変動を検証することはできなかった。

窒素投入量(kg/10a)と利用率の関係 ND<sub>710,520</sub> 画像の DN 値の最頻値(ND<sub>710,520</sub>MAX)の経時変化の一例を図 4-15 に示す。図は圃場の変動をプロットしたものである。ND<sub>710,520</sub>MAX は、生育初期から徐々に上昇した。圃場では、萌芽日が DOY:80 付近であったことから、萌芽日まで ND 値が上昇し、萌芽日以降ある程度品質が変わらない時期を経て、DOY:105 付近で減少する傾向とな

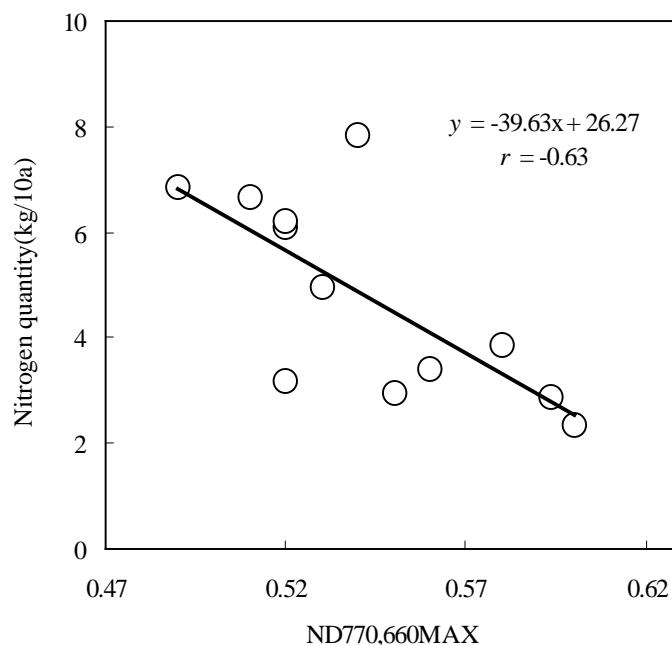


図 4-11 ND<sub>770,660</sub>MAX と葉内窒素含有量(kg/10a)の関係

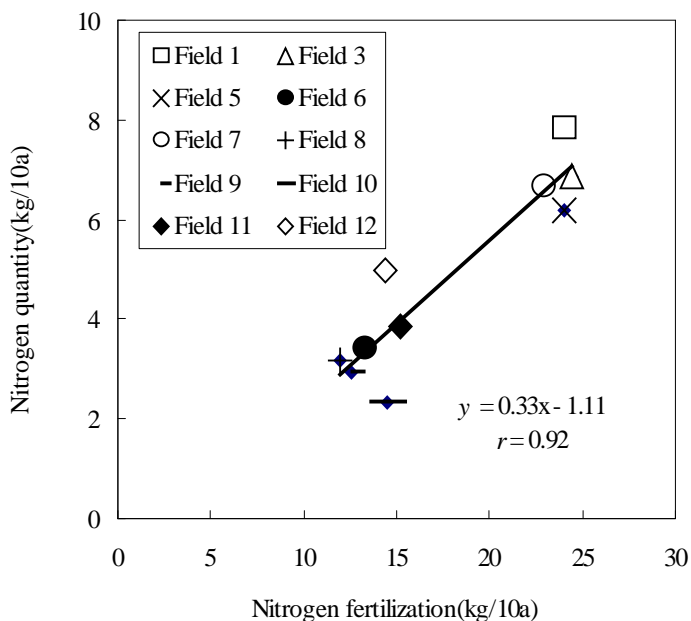


図 4-12 窒素投入量(kg/10a)と葉内窒素含有量(kg/10a)の関係

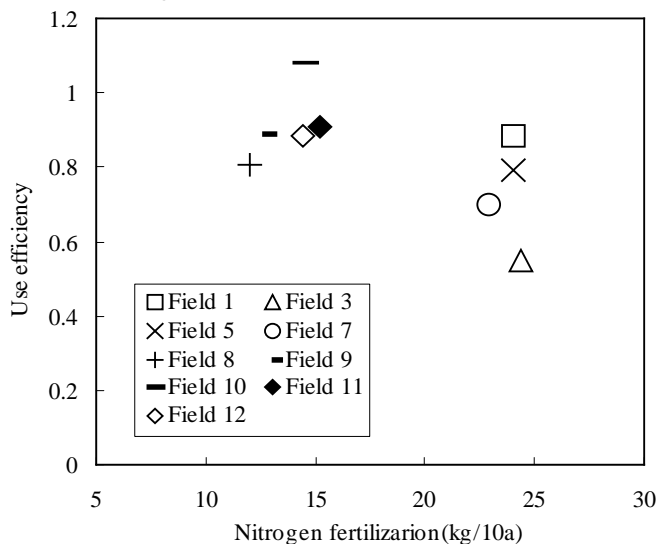


図 4-13 窒素投入量(kg/10a)と利用率の関係

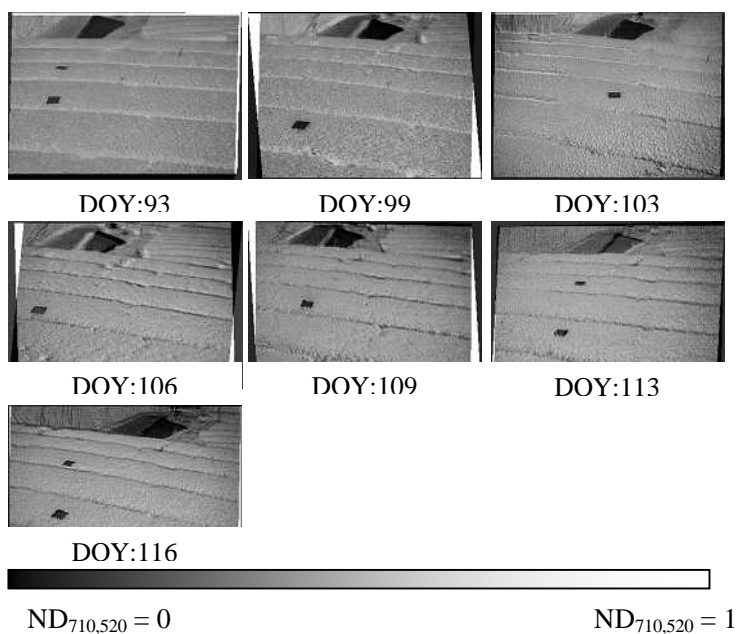


図 4-14  $ND_{710,520}$  指標適用画像の経時変化

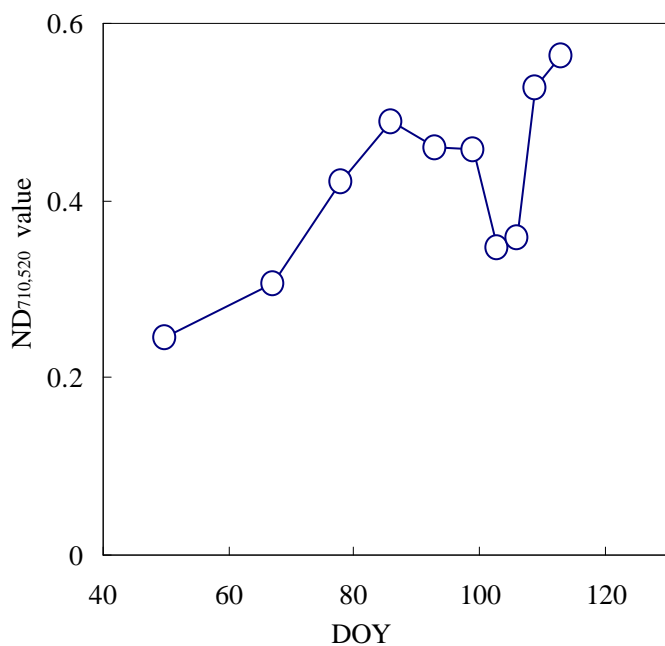


図 4-15  $ND_{710,520}MAX$  の経時変化(2008, Field1)

表 4-3  $ND_{710,520}MAX$  の最小値と収穫日の値

Field No.	$ND_{max}(minimum)$	DOY(minimum)	$ND_{max}(harvesting\ day)$	Ratio of deterioration
1	0.347	103	0.360	1.038
2	0.330	103	0.499	1.511
3	0.246	93	0.551	2.235
4	0.332	106	0.332	1.000
5	0.135	93	0.669	4.958
6	0.262	93	0.396	1.510
7	0.331	93	0.331	1.002
8	0.215	113	0.437	2.033
9	0.333	106	0.498	1.495
10	0.198	106	0.505	2.554
11	0.064	93	0.332	5.206
12	0.273	106	0.382	1.402

った．さらに,DOY:115 付近で上昇した．この傾向は他の圃場に関しても同様であった．

以上のことから,圃場 についての最高品質となる時期は,萌芽日以降で, $ND_{710,520}MAX$  が最も低くなる DOY:103-106 付近である事が画像的に把握可能であると考えられる．

各圃場における  $ND_{710,520}MAX$  の最低値と最低値を示した日を表 4-3 に示す．また比較のため摘採日における  $ND_{710,520}MAX$  及び品質劣化度を示した．品質劣化度は,摘採日の  $ND_{710,520}MAX$  と  $ND_{710,520}MAX$  の最低値の比として定義した．

各圃場の  $ND_{710,520}MAX$  が最低値を示した日を比較すると,DOY:93-113 までの差異があった．これらの差異には,図 4-1 に見られる位置的な要因と各圃場管理者による肥培条件の差異が挙げられる．本実験の場合では,圃場 と ,圃場 - 等位置に近い圃場の  $ND_{710,520}MAX$  が最低値を示した日が同一であったことから, $ND_{710,520}MAX$  が最低値によって最高品質の日摘採した場合,圃場 , と が最も品質が良いと考えられる．しかし,圃場 , , ととも摘採日の品質の劣化が大きくなっている．特に圃場 は,摘採日に他の圃場に対して最も低い品質となっているため,より早い摘採が必要となると考えられる．

#### 4.3.5 品質分布の推定

圃場内の品質分布を検討するため,各圃場の尖度を調査した結果の一例を図 4-16 に示す．図は,圃場 の尖度を代表として用いた．圃場 では,DOY:93 付近で尖度が最低値を示し,DOY:103 付近まで 4 付近,その後,DOY:106 でもう一度 2 程度に下がり,DOY:106 を過ぎると急激に上昇する

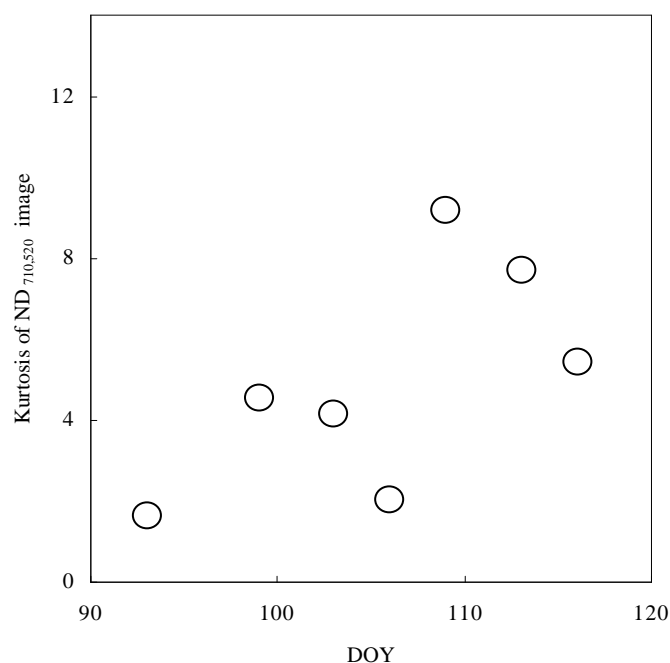


図 4-16  $ND_{710,520}$  画像の尖度の経時変化



結果となった．本研究では、正規分布が最も均質な分布としているので、圃場 では尖度が最低を示した DOY:96 と 106 付近が最も品質のむらの少ない日であると考えられる．しかし、DOY:96 では、萌芽直後であるため、新芽が完全に展開していないと考えられる．3-3 節の品質  $ND_{max}$  の変動とも関連させると、圃場 では、DOY:106 付近が摘採期として適当であると考えられる．DOY:109 を経過後の尖度の上昇は、株ごとに過度に成熟してしまった葉の割合が多くなり、圃場内の均一性が崩れてしまったことに起因している可能性があると考えられる．

各圃場における  $ND_{710,520}$  画像の尖度の最低値と最低値を示した日、また摘採日の尖度を表 4-4 に示す．尖度が最低の日が最も均質な品質分布と仮定すると、圃場 が高品質であると考えられる．特に圃場 は尖度の低下が他の圃場より小さいため、摘採日においても均質な品質分布であると考えられる．また、表 4-3 と対応させると、 $ND_{710,520}MAX$  が最低を示す日と、尖度が最低を示す日はほぼ同時期であることが確かめられた．特に圃場 は、どちらの値も最も低いことから、全ての圃場の中で最高品質であることが示唆される．

表 4-4  $ND_{710,520}$  画像の尖度の最小値と収穫日の値

Field No.	Kurtosis(minimum)	DOY(minimum)	Kurtosis(harvesting day)	DOY(harvesting day)
1	0.600	93	9.474	116
2	1.608	106	5.430	116
3	2.723	93	3.106	120
4	0.181	93	3.843	123
5	0.613	120	0.613	120
6	2.732	106	6.169	120
7	1.090	120	1.090	123
8	0.202	113	0.626	120
9	1.957	113	5.858	113
10	0.521	99	7.853	113
11	1.009	99	4.670	116
12	1.102	99	2.490	116

#### 4.4 考察

本章では、第 3 章で考案した  $ND_{ij}$  指標を画像に適用することで、広範囲な生育・品質推定が可能かどうかについて検討を行った．

生育量に関しては、レベルスライスを用いた手法、 $ND_{770,660}$  指標を用いた手法の 2 種類の方法で検討を行った．どちらの場合においても、分光画像によって、新芽の生育量を画的に推定することが可能であると考えられる．ここで、レベルスライスを用いた手法では、画像の DN 値に閾値を設けることで、新芽被覆率を抽出することが可能となった．ここで、本手法に用いた 540nm の波長帯は、可視域において最もクロロフィルの反射率が高いと報告されている<sup>16)</sup>．540nm での新芽の分光反射特性は、前章の 3.4 項にて述べたように、生育後期になるほど高くなることが確認されている．また旧葉のみのときの 540nm の分光反射特性は、日にちによらずほぼ一定であったことから、540nm は、閾値の設定が他の波長帯に比べて容易であると考えられる．しかし、単一の波長帯のみを用いる場合、対象物の起伏の影響等、測定時の誤差がそのまま画像上に反映されてしまうことが報告されている<sup>50)</sup>．これに対して、正規化された指標である  $ND_{ij}$  指標は、測定時の起伏等の影響をある程度軽減できる<sup>51)</sup>．よって、生育量を推定する場合は、 $ND_{ij}$  指標を用いた方がより有効な手法と考えられる．しかし、 $ND_{770,660}$  指標は、摘採適期付近で、指標値が飽和してしまう傾向にあったため、摘採適期の推定が困難であった．これは、前章の図 3-14 と同様の傾向であると考えられるため、画像によって、圃場全体の生育量の推定も可能であるが、依然として指標値を対数的に表現することや経過時間の総和等であらわすような修正が必要であると考えられる．

$ND_{770,660}$  指標値は、前章にて窒素含有率との相関を示した(図 3-10)．このことから、 $ND_{770,660}$  指標を画像に適用し、窒素肥培管理との関係を調査したところ、図 4-11 に示すように、 $ND_{770,660}MAX$  を用いて、圃場内の葉内窒素含有量の推定も可能である事が示された．さらに葉内窒素含有量は、投入施肥量と相関が認められたことから、 $ND_{770,660}MAX$  を用いて圃場の施肥量を推定することが可能であると考えられる．

圃場の窒素利用効率は、窒素の利用効率は、投入量 15g/10a までは投入量が増える程上昇し、25kg/10a 付近では、投入量が増える程減少する傾向が認められた．しかし、25kg/10a での投入量の差異はほとんどなかったため明確な傾向を得ることが出来なかった．さらに、図 4-11 に示すように、本研究では、窒素投入量が増えるに従って、葉内窒素含有量も増加傾向にあることから、最適な窒素投入量を推定することはでき

なかった。

$ND_{710, 520}MAX$  は、図 4-15 に示したように、摘採適期付近で、指標値が減少し、適期を超過すると指標値が上昇した。品質の分布は、尖度を用いて検討を行ったが、 $ND_{710, 520}$  画像の尖度は、DOY：100 付近で最もばらつきが大きくなり、DOY：105 付近で最も正規分布に近づいた。また DOY：109 付近において急激に上昇することが確かめられた。このことから、品質面では、 $ND_{710, 520}MAX$  と画像の尖度を用いることで、近接リモートセンシング手法を用いた摘採適期推定が可能であると考えられる。

#### 4.5 まとめ

本章では、第 3 章にて提案した  $ND_{ij}$  指標を画像に適用した生育量・品質推定手法開発の可能性について検討を行った。 $ND_{ij}$  指標適用画像の  $ND_{ij}MAX$  を用いることで、茶の生育・品質を推定が圃場単位で可能であることが示された。さらに、 $ND_{770, 660}MAX$  は、葉内窒素含有量の推定に有効であることが明らかとなった。茶葉の場合、葉内窒素含有量と施肥量に関連性があることから、 $ND_{770, 660}MAX$  が肥培管理へ利用可能であることが明らかとなった。本章における主要な結果は以下のとおりである。

1. 分光反射特率と分光画像の DN 値には高い正の相関が確認され、傾きもほぼ 1 となった。
2. 540nm の分光画像をレベルスライスすることによって、新芽の被覆率の推定が可能であることが示唆された。
3.  $ND_{770, 660}$  指標を画像に適用したところ、指標値は、新芽の生育に従って、上昇し、その後飽和傾向にあることが確認された。
4.  $ND_{770, 660}MAX$  と窒素含有量には、正の相関が認められ、窒素含有量と投入施肥量にも正の相関が認められた。
5.  $ND_{710, 520}$  指標を画像に適用したところ、指標値は、生育初期に 0.6 程度となり、摘採適期付近で減少し、その後再度上昇する傾向があることが確認された。
6. 圃場内の品質の分布を  $ND_{710, 520}$  指標の尖度によって検討したところ、摘採適期付近で最も正規分布に近い傾向を示した。

## 第5章 分光画像を用いた水稻の等級推定手法開発

### 5.1 緒言

水稻に対するリモートセンシング技術、近接リモートセンシング技術の提案は、これまで多くの研究がなされている。特に、北海道・東北地方においては、食味や収量を推定する手法が提案されている<sup>52)-54)</sup>。

しかし、一般に米価は等級で決定されている。等級は、圃場内で収穫された玄米の一部に対して、「色・つや」と「大きさ・形」の2項目を基準に行われている。最終的にふるいを通過した玄米の割合、透過度検査によって異常とみなされた玄米が圃場内で30%未満(正常粒が70%以上)の圃場は一等級圃場、40%以上の圃場は二等級圃場と判断される。

等級の変動には、水稻の生育状態(草丈・分けつ数<sup>55)</sup>や葉内窒素含有率<sup>56)</sup>)の差異に加えて、気温や水温などの環境条件<sup>57)-60)</sup>等が複雑に関与していること、1圃場で、1つの等級しか判定されないことや収穫後に等級の判定がなされることから、生育中の等級推定手法が提案されるに至っていない。

気温や水温等が等級に与える影響について  $ND_{ij}$  指標を用いて推定することは困難であると考えられるため、水稻の草丈・分けつ数や葉内窒素含有率等と等級の関係が認められれば、 $ND_{ij}$  指標による等級推定が可能になると考えられる。

そこで、本章では、水稻の生育状態を調査し、最も等級の変動をよく表す要因と生育に伴う  $ND_{ij}$  指標の変化との関係を検討することで、一筆の圃場で生産された玄米の等級を非破壊的に推定することを試みた。また、等級の上下は圃場内の等級分布の差異によると考えられるため、最終的に  $ND_{ij}$  指標適用画像を作成し、画像の輝度値の分布から等級を推定する手法の考案を検討した。

### 5.2 材料及び方法

#### 5.2.1 供試材料と測定対象地区

供試材料は、水稻の品種ヒノヒカリ(*Oryza sativa* L. cv. Hino-hikari)を用いた。ヒノヒカリは現在、コシヒカリ、ひとめぼれに次ぎ日本で3番目に多く生産されている品種である。

測定対象として2006年と2007年の2年間、鹿児島県北部に位置するさつま町の全域から2006年7圃場、2007年8圃場を抽出した。それぞれの圃場面積は1,000~5,000m<sup>2</sup>であった。

生育ステージは、栗原ら<sup>61)</sup>のステージ分けに従って、移植日から幼穂分化期までを分けつ期( )、幼穂分化期から出穂日( )までを幼穂発育期( )、出穂日から収穫日までを登熟期( )とした。出穂日( )は、圃場内の出穂率が50%を超えた日と定義した。各生育ステージは、実験日に圃場での生育状態の観察により決定した。

#### 5.2.2 $ND_{ij}$ 指標の作成

分光反射特性は、第3章と同様の分光反射率計(KE-1, (株)ELM, 鹿児島)を用いてDOY:210~DOY:282の期間に12回の測定を行った。分光反射特性測定のために、圃場内で2~3株の測定対象株(以後、対象株)を抽出した。対象株は、畦付近を避け、可能な限り圃場全体に散らばるようにし、圃場全体の分光反射特性を代表できるような株とした。分光反射率計は対象物との距離が100cm、俯角が30度となるように設定し、株の中心付近の葉群が視野におさまるように測定した。測定時は、常に標準白色板(30×30cm, 表面にBaSO<sub>4</sub>を蒸着, 阿部設計)の反射エネルギーと対象株の反射エネルギーを交互に取得し、分光反射率は標準白色板と対象株の反射エネルギーの比として算出した。測定は、1対象株に対して5回行い、その平均値を1対象株の分光反射特性とした。また、1圃場の分光反射率は、各対象株の平均値とした。 $ND_{ij}$  指標は、2.6項に掲載した式(4)を用いて作成した。

#### 5.2.3 $ND_{ij}$ 指標の画像への適用

分光画像は第3章と同様の市販のデジタル・ビデオカメラ(DCR-TRV20, Sony(株), 東京, 有効画素: 7.8万画素, ダイナミックレンジ: 15dB)のレンズ部分にバンドパスフィルタ(MIF-S, 日本真空光学(株), 東京)を密着して撮影した。分光画像の撮影は、分光反射特性測定と同日に、圃場全体が撮影できる位置から行った。測定時の地上からの高さは、2~4m程度、ビデオカメラのレンズ部と三脚との角度は、40度~70度程度に設定した。これらの設定は各圃場で常に同一とした。

分光画像は、第4章と同様に、画面に数点のGCP(Grand Control Point)をとり位置補正を行った。解析には、作成した  $ND_{ij}$  画像の最頻値( $ND_{ij}MAX$ )を用いた。 $ND_{ij}MAX$  は等級毎に平均し、経時変化の検討に用いることとした。一等級圃場の  $ND_{ij}MAX$  の変化から、実験的な一等級推定式の作成を行った。等級の差異は、圃場内の等級のばらつきであると考えられるため、一等級推定式に対するばらつきを二乗平均平方根誤差(RMSE)を用いて検討した。RMSEは式(16)を用いて算出した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum \{E(k) - T(k)\}^2}{n}} \quad (16)$$

ここで、 $E(k)$ は  $ND_{ij}MAX$  の実測値、 $T(k)$ は一等級推定式による  $ND_{ij}MAX$  の推定値、 $n$  は測定点数(圃場数)である。

#### 5.2.4 生育調査

株あたりの草丈、分けつ数の測定は、いずれの年も DOY:205 ~ DOY:272 までの期間に 9 回行った。草丈は、株全体を直立になるよう中心部に束ね、株元から最も高い位置までの長さをメジャーで測定した。分けつ数は、株の茎数を計数した。

SPAD 値は、これまでの研究で、葉内窒素含有率と高い相関があることが報告されている<sup>62)</sup>。本章では、生育中に葉を採取して成分分析することができなかつたため、SPAD 値を葉内窒素含有率の代替として用いることとした。SPAD 測定は、分光反射特性測定と同日に、SPAD 計(SPAD-502, コニカミノルタセンシング(株), 大阪)を用いて測定した。測定位置は、分けつ期及び幼穂発育期では株の最上部の葉とし、出穂日以降は止葉とした。

草丈、分けつ数と SPAD 値は、対象株周辺の 10 株の平均値を対象株の値として用いた。また、圃場内の全対象株の測定値を平均し、圃場を代表させ解析に用いた。

#### 5.2.4 等級調査

各圃場の玄米の等級検査は、JA さつまの基準に従って行った。各圃場で収穫された穂についている籾を採取後抽出した 1000 粒の玄米に対して基準のふるいによって選別を行った。次に色やつやを判断するため、光の透過度を調査した。最終的に基準のふるいを通じた玄米の割合、透過度検査によって不完全とみなされた玄米が圃場内で 30% 未満(正常粒が 70% 以上)の圃場は一等級圃場、31% ~ 40% 未満の圃場は二等級圃場として判定した。

### 5.3 実験結果

#### 5.3.1 草丈と分けつ数の経時変化

2007 年度の草丈と分けつ数の等級別の経時変化を図 5-1 および図 5-2 に示す。草丈は DOY:240(出穂日)付近まで次第に上昇し、100cm 程度で DOY:272(登熟期後期)までほぼ横ばいであった。草丈は、2006 年についてもほぼ同様の傾向を示し、また、全生育ステージを通して等級間での差異は小さかった。

分けつ数の経時変化は、一等級圃場、二等級圃場とも DOY:230(幼穂発育期)で最大値をとり、その後わずかな減少傾向となった。このことから本研究における最高分けつ数は DOY:220-230 の間であったと考えられる。しかし、一等級圃場の分けつ数は、二等級圃場の分けつ数より、全生育期間を通して高くなる傾向を示したものの有意性は見られなかった。

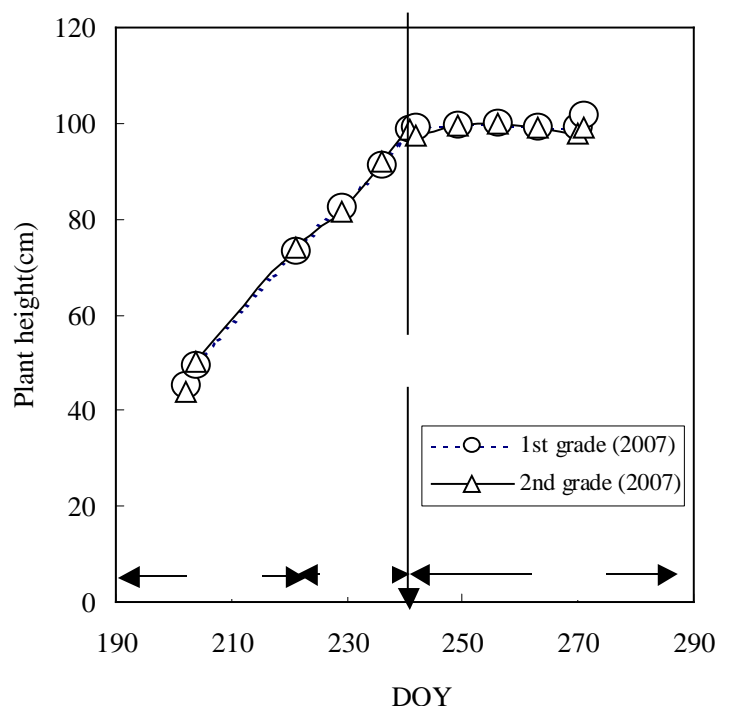


図 5-1 草丈の経時変化

#### 5.3.2 SPAD の経時変化

2007 年度の SPAD 値の経時変化を図 5-3 に示す。SPAD 値は、一等

級圃場，二等級圃場とも，DOY:215( 分けつ期)から DOY:240( 出穂期)までわずかな減少傾向を示した．その後 DOY:260( 登熟中期)までわずかに上昇し，DOY:260(9 月 17 日， 登熟期)以降減少した．SPAD 値は，DOY:240 以降，一等級圃場の方が高い傾向にあり，特に DOY:272(9 月 29 日)付近では，等級間に有意差がみられた( $p < 0.05$ )．このことから，SPAD 値の変動を追うことで等級の推定がある程度可能であると考えられる．

### 5.3.3 水稻の分光反射特性

生育期間中に測定された分光反射特性の Field-A(一等級圃場，2006)の一例を図 5-4 に示す．生育中の分光反射特性曲線は可視域では 540nm において最大値を示し，680nm において最小値を示した．近赤外域では 770nm 以降高い反射率のプラトーとなった．

経時的な変動では，DOY:215( 分けつ期)から可視域，近赤外域の反射率とも時間とともに上昇し，DOY:262( 登熟期)以降においては，ほとんど分光反射率に差異はなかった．しかし，DOY:215( 分けつ期)の近赤外域は，他の生育期間に比べて非常に低い反射率を示し，特に，1,000nm 以降の反射率の低下が顕著であった．DOY:215 の変動に関しては，近赤外域の強い吸収から，視野領域内に対する圃場面の水の割合が大きくミクセルの影響が強く現れてしまったためであると考えられる．また DOY:235 から DOY240 までの期間に近赤外域では，分光反射率の変動が 40% ~ 60% まで変化した．DOY:235 付近から出穂がはじまっていることから，この期間の分光反射率の大きな変動は生育ステージの変化に起因しているものと考えられる．

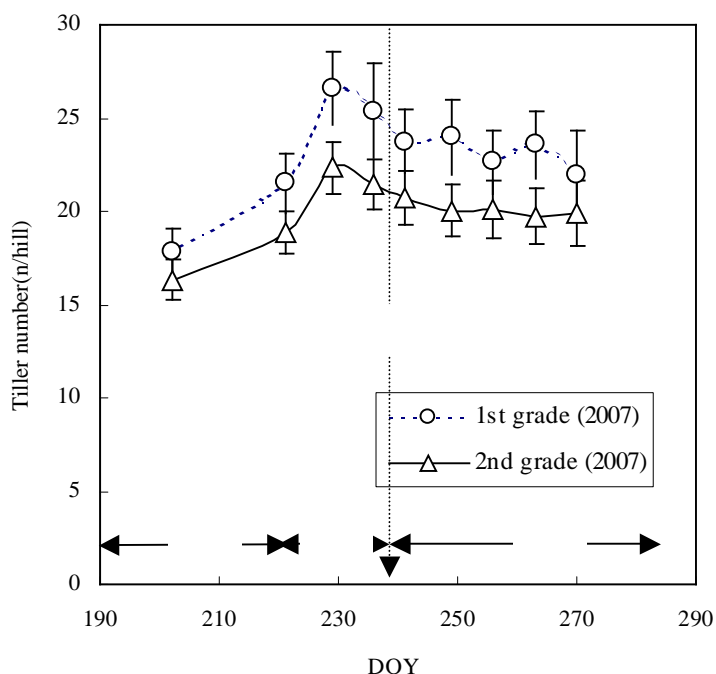


図 5-2 分けつ数の経時変化

### 5.3.4 $ND_{770}$ 指標と SPAD の関係

SPAD 値を用いることで，等級推定がある程度可能であることが示された．そこで，第 3 章にて提案した葉内窒素推定指標  $ND_{770,660}$  を用いて SPAD 値との関係を調査した．SPAD 値と  $ND_{770,660}$  の関係を図 5-5 に示す．SPAD 値と  $ND_{770,660}$  は  $r=0.82$  の有意な正の相関( $p < 0.05$ )が認められた．SPAD 値が 30 以上であった場合，データが密集してしまい相関が低くなると考えられる．また SPAD 値が 30 以下の場合，2006 年度では，一等級の方が指標値も低くなる傾向にあったが，2007 年度では，その傾向は明確ではなかった．図 5.3 より SPAD 値が 30 以下であるのは，出穂期以降のデータであると考えられ，2007 年度のデータでは， $ND_{770,660}$  指標を用いることで，出穂期以降の等級推定が可能であると考えられる．

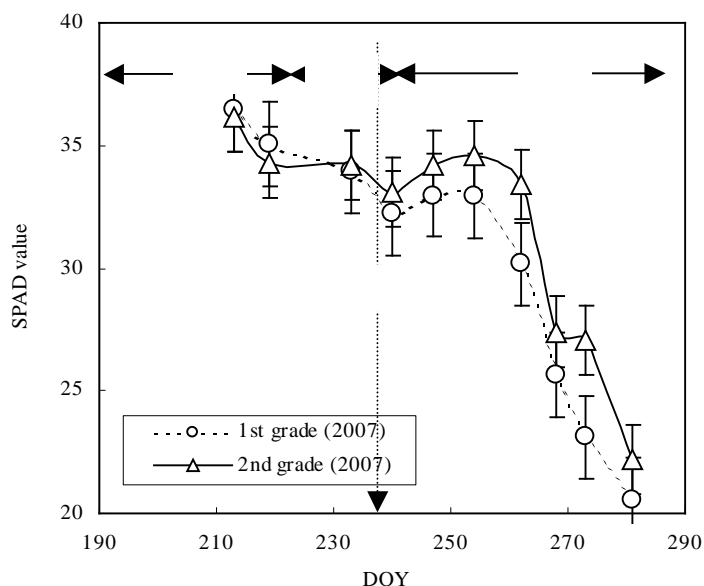


図 5-3 SPAD 値の経時変化

### 5.3.5 ND<sub>770,660</sub>MAX の経時変化

2007 年度の Field-A(二等級)と Field-B(一等級)の ND<sub>770,660</sub> 画像の経時変化を図 5-6 に示す。図 5-5 の関係から、画像は、ND<sub>ij</sub>指標値が高く、輝度が高い(DN 値が高い)ほど、窒素含有率が高いことを示している。DOY:253 付近から、序々に画像の濃淡が大きくなる傾向にあることが確かめられた。また、DOY:282 では、等級の高い Field-B の方が均質に暗い画像であることが視認された。

一等級圃場の ND<sub>770,660</sub>MAX の経時変化は、図 5-7 に示すように、DOY:205-DOY:215( 分けつ期)まで低下し、その後、DOY:235( 出穂期の初期)まで単調に増加した。DOY:235 以降は、単調に減少する結果となった。二等級圃場に関しても、ほぼ同様の変動を示したが、Table 5-1 に示したように等級間の指標値の差異は DOY:276 のみでしか認められなかった。

### 5.3.4 ND<sub>770,660</sub>MAX の RMSE の経時変化

圃場内の等級のばらつきを検討するため、図 5-7 の結果から実験的に作成した一等級圃場の ND<sub>770,660</sub>MAX 推定式を(17)、(18)に示す。DOY:214( 分けつ期)以前のデータは、一点しかなかったため、解析から除外した。

・ 分けつ期後期～出穂期初期

$$Y = 0.99 \times 10^{-2}x - 1.73 \quad (17)$$

・ 出穂期初期～登熟期後期

$$Y = -0.86 \times 10^{-2}x + 2.59 \quad (18)$$

ここで、 $Y$  は、ND<sub>770,660</sub> 画像の輝度値の最頻値(ND<sub>ij</sub>MAX)を示し、 $x$  は DOY を示している。

一等級圃場の ND<sub>770,660</sub>MAX に対する RMSE の経時変化を調査した結果を図 5-8 に示す。圃場内の RMSE は、DOY:215( 分けつ期)では等級間に大きな差異が認められ、その後、DOY:240 までは、どちらの等級においてもほぼ同じ値であった。しかし、DOY:240 以降、二等級圃場の方が RMSE は大きくなる傾向が確認された。

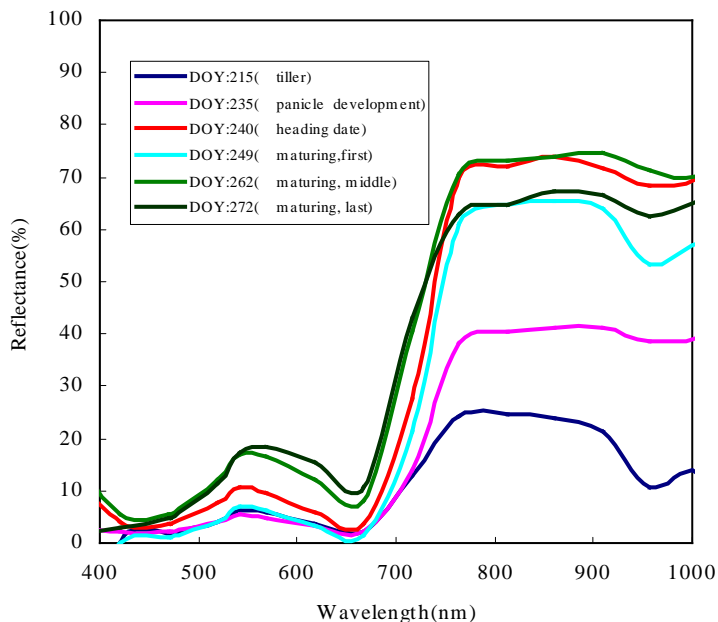


図 5-4 分光反射率の経時変化

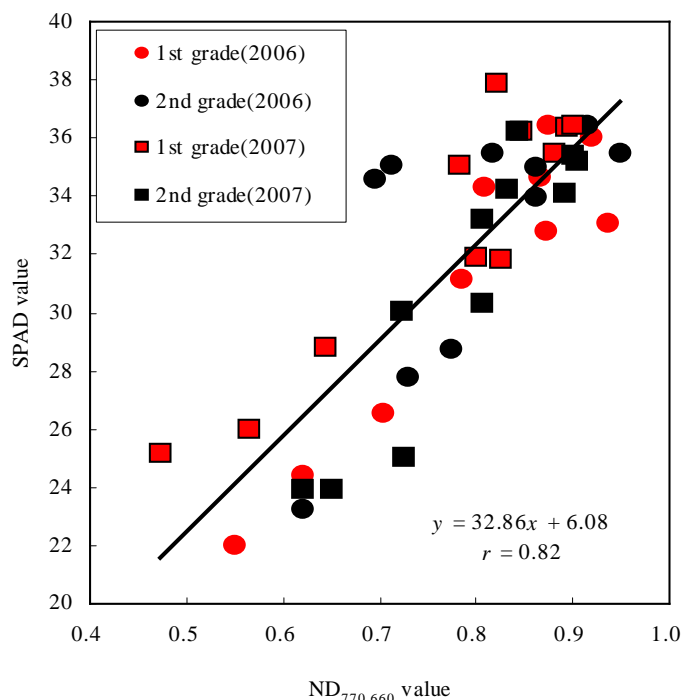


図 5-5 SPAD 値と ND<sub>770,660</sub> 指標との関係

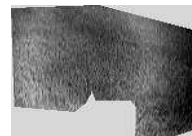
a) 1st grade(Field-B)



DOY:240



DOY:262

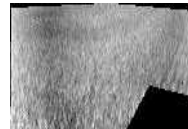


DOY:282

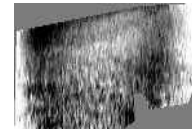
b) 2nd grade(Field-A)



DOY:240



DOY:262



DOY:282

ND<sub>770,660</sub>=0

ND<sub>770,660</sub>=1

図 5-6 等級毎の ND<sub>770,660</sub> 画像の経時変化



DOY:215( 分けつ期)での差異は、図 5-4 の分光反射率の変動に見られるように、圃場内のミクセルによる影響が大きく正確に等級間の差異と判断することはできない。しかし、出穂期以降には、等級間の RMSE に明確な差異があったことから、出穂期以降に分光画像を撮影し、 $ND_{770,660}MAX$  の RMSE を調査することで、等級の推定がある程度可能であることが示された。

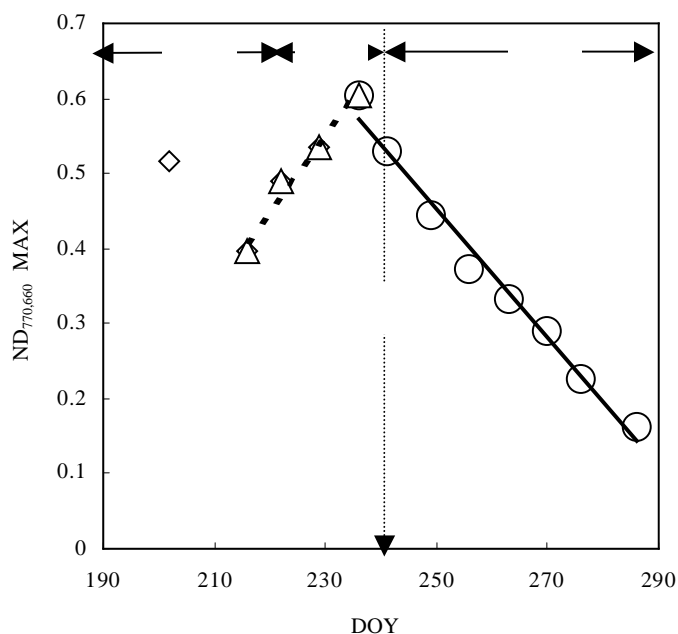


図 5-7  $ND_{770,660}MAX$  の経時変化

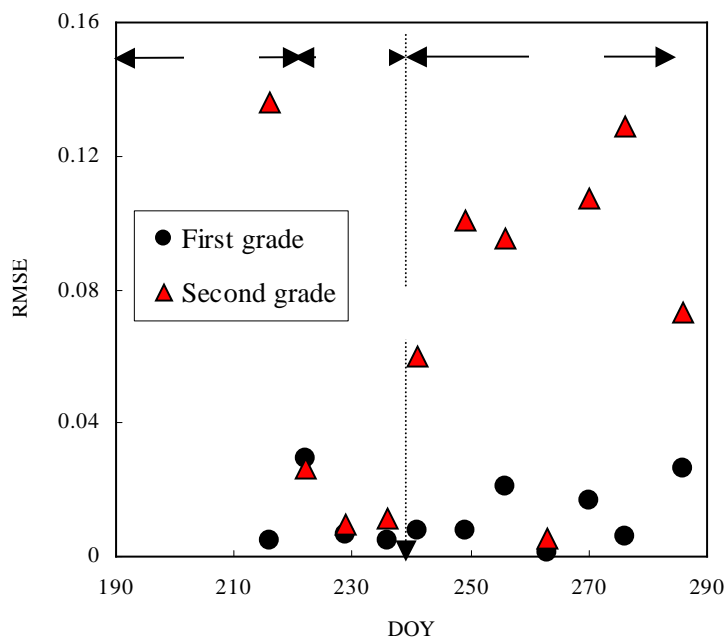


図 5-8  $ND_{770,660}$  画像の RMSE の経時変化

#### 5.4 考察

水稻の等級を推定するために、生育量(草丈・分けつ数)と SPAD 値の経時変化を調査した。草丈は、等級間で差異は見られなかったものの、分けつ数、SPAD 値は、等級間に差異が生じる結果となった。しかし分けつ数は、どちらの等級ともに、DOY:240 以降ほぼ横ばいの傾向であったため、 $ND_{ij}$  を用いて等級を推定するための目的変数としては不向きであると考えられる。SPAD 値は、DOY:272 以外は、有意差はみられないものの、出穂期以降の値の変動が大きかったため、分けつ数に比べ、等級推定に有効であると考えられる。

$ND_{770,660}$  と SPAD の関係は、図 5-5 のように正の相関が認められ、2007 年度の SPAD 値 30 以下の場合、 $ND_{770,660}$  が低い値であるほど、等級も高い傾向が確かめられた。このことから、等級は、葉の窒素含有率の変動とある程度関連していると考えられる。しかし、図 5-5 では、2006 年度のように、SPAD 値が低くても  $ND_{770,660}$  値が高い圃場も認められた。これは、SPAD、分光反射特性ともに対象株の測定結果であることに起因している。等級は、圃場全体で評価されているため、対象株の等級が圃場の等級と異なってしまっていた可能性がある。今後  $ND_{770,660}$  による等級推定の精度を向上させるためには、各対象株の等級を実測し、 $ND_{770,660}$  との関連性を検討する必要があると考えられる。

$ND_{770,660}MAX$  の経時変化は、生育ステージ (分けつ期) ~ (出穂日) と ~ (登熟期) で回帰直線の傾きが異なり、分光画像を用いることでステージの変換点が明確になることが示唆された。また、 $ND_{770,660}MAX$  推定式(式(18))によって算出した値に対する各等級での RMSE は、DOY:240( 出穂日)以降二等級圃場の方が大きくなることが確認された。このことから、圃場内の窒素含有率のばらつきを調査することで、出穂期以降において等級推定が可能であることが示された。しかし、DOY:215( 分けつ期)では RMSE の差異が大きく、DOY:262( 登熟期)では差異がほとんどない結果であった。この理由として、DOY:215 は、図 5-4 における近赤外域の反射率の低下から、画像領域内が圃場表面の水と水稻のミクセルの状態になってしまったものと考えられる。農地のミクセルの問題に関しては、小阪らが農地のミクセルデータを独立成分分析によって、定性化することで精度よくミクセル除去する方法を提案している<sup>63)</sup>。DOY:215 以前の水田では、水の反射率の影響が強いと考えられるため、解析対象から除外するか、小阪によって提案された方法によって水の反射率を正確に分離する必要がある。

DOY:262( 登熟期)での一等級圃場、二等級圃場の RMSE の一致の理由は、明確ではないが、近接の

実験日である DOY:253, DOY:270 では, 二等級圃場のばらつきが大きい結果であった。このことから DOY:262 では, 何らかの測定時の誤差が含まれ, RMSE が偶然一致しまった可能性がある。本手法による推定の精度を向上させるため, DOY:260 付近のデータの拡充が必要であると考えられる。

## 5.5 まとめ

本章では, 近接リモートセンシング手法を用いた等級推定手法の開発を目的として, 生育量(草丈・分けつ), SPAD 値と分光反射特性の変動を調査した。等級は, 生育状態や環境条件等の変動要因があるが, SPAD 値(葉内窒素含有率)を用いることで出穂期以降の等級判定が可能であることが明らかとなった。また分光反射率から導出した  $ND_{ij}$  指標は, SPAD 値と正の相関を示したことから, 近接リモートセンシング手法を等級推定に用いることが可能であることが示された。最終的に,  $ND_{ij}$  指標を画像に適用することで, 圃場内の等級推定が出穂期から可能であることが明らかとなった。主要な結果は以下のとおりである。

1. 草丈の経時変化は等級間でほとんど差異はなかった。また, 分けつ数は, 一等級圃場の方が二等級より値が高い傾向があったが, 有意差は認められなかった。
2. SPAD 値は, DOY:240(出穂期)以降低下した。また, 一等級圃場の方が二等級圃場より値が低い傾向にあった。
3.  $ND_{770,660}$  と SPAD 値の関係は, 正の相関  $r=0.82$  が認められた。
4.  $ND_{770,660}$  画像の最頻値は, DOY: 240( 出穂日)まで上昇し, その後収穫前まで低下する傾向となった。
5.  $ND_{770,660}$  画像の RMSE は, DOY:240( 出穂期)以降, 二等級圃場の方が一等級圃場より大きくなった。



## 第6章 近接リモートセンシング手法を用いたサツマイモの塊根部重量推定の可能性

### 6.1 緒言

本章では、近接リモートセンシング手法が、匍匐型の農作物に対して適用可能かについて、鹿児島県の主要農作物であるサツマイモを対象として検討を行った。

サツマイモの収量・品質は、塊根部の生体重(以下塊根部重量)、塊根数、塊根長とデンプン収量を向上させることが問題とされる。ここで、地上部の乾物重や葉内成分(特に葉内窒素含有率)と塊根部重量には関連性があることが報告されている<sup>64)-66)</sup>。また、デンプン収量は、塊根部重量と塊根部のデンプン含有率の関係と捉えることできる<sup>67)</sup>。このことから、地上部の乾物重や葉内窒素含有率を推定できれば、サツマイモの収量・品質の推定が  $ND_{ij}$  指標を用いることでも可能性になる。

しかし、サツマイモに連しては予測対象が地下に存在することから、塊根部重量と分光反射特性の関連性に言及した例は稀である。芝山らは、分光反射特性によって、ある時期の葉面積指数(Leaf Area Index: LAI,  $m^2 m^{-2}$ )を測定する手法の検討を行っている<sup>68)</sup>が、生育に伴う地上部の変動と塊根部重量との関連性、塊根部重量を推定するための波長帯等の検討については言及されていない。

そこで本章では、2004年から2005年までの2年間実験を行い、一定の栽培条件下にあるサツマイモの地上部、すなわち総葉面積・葉内成分含有率と塊根部重量の関係を調査し、生育時の分光反射特性の経時変化との対応を検討し、 $ND_{ij}$  指標によるサツマイモの塊根部重量推定手法の考案を試みた。

### 6.2 材料及び方法

#### 6.2.1 供試材料と実験圃場

供試材料としてウイルスフリーで培養したコガネセンガン(*Ipomoea batatas* L. cv. kogane-sengan)を用いた。実験は鹿児島大学内の農場にて2004~2005年の2年間実施した。各年とも畦幅は0.9m、畦高は0.3mとして、マルチカバーした後両年とも6月4日に斜め植えで植え付けを行った。マルチによる高温障害を避けるため、移植した株付近に少量の盛り土を行なった。2004年、2005年度は圃場全体の面積を90 $m^2$ とし、7.8 $m^2$ /畝を8畝作成した。施肥は鹿児島県枕崎市のサツマイモ栽培標準施肥量(窒素:3kg/10a、リン酸:10kg/10a、カリウム:10kg/10a)で行った。

#### 6.2.2 株あたりの総葉面積、葉内窒素含有率と塊根部重量の測定

挿苗したサツマイモの苗が活着後、各試験区3株ずつ対象株を選定した。対象株は活着状態が良好であるものの中から抽出した。地上部の生育量調査として、DOY:190以降から実験終了まで、1週間毎に苗の抜き取り調査を行い、株あたり総葉面積(LA)を測定した。

LA測定は、まず摘採した葉を50×50cm(ピクセル数既知)の黒板に敷き詰めビデオカメラによって撮影した。取得画像の一例を図6-1に示す。1シーンのみで株あたりの全葉の画像を取得できなかった場合、撮影を繰り返し行った。LAは、黒板の面積に対する葉の面積として以下の式(19)で算出した。

$$LA(m^2/plant) = \text{黒板の面積}(0.5m \times 0.5m) \times \frac{\text{葉の部分のピクセル数の総和}}{\text{黒板のピクセル数}} \quad (19)$$

通常、作物の生育量推定には葉面積指数(Leaf Area Index: LAI)が用いられる。LAIは、単位土地面積あたりの葉面積( $m^2 m^{-2}$ )と定義されており、分光反射特性を用いたLAIの推定手法やLAIをパラメータとした種々の非破壊指標の考案も行なわれている<sup>69)-71)</sup>。

しかし、サツマイモにおいては、植物の生長に伴って葉をつけた茎が地面と水平に拡大する。そのため限られた圃場内でのLAIの測定は、試験区の各個体の茎葉が入り込んで、他の個体の生育に多大な影響を及ぼしてしまうと考えられる。そこで本章では、個体に着目して株あたりのLAを地上部の生育量とみなすことで、地下部との関連性に関する基礎データを得ることとした。

株あたりの葉内窒素含有率の測定は、2004年度は各実験日に採取した対象株のうち、1株を用い、DOY:181, 205, 215, 229, 254, 266と274の7回実施した。2005年度は4回(DOY:159, 164, 223と279)の実験日の3株全てを用いて実施した。葉内窒素含有率はケルダール法で定量した。

塊根部重量は、2004年度は、DOY:181から、2005年度は、DOY:150から測定した。塊根部重量とLAの関係は、各実験日の3個体の平均値を用いて検討した。また、塊根部重量と葉内窒素含有率の関係は、葉内窒素含有率を測定した19データに対応する株あたりの塊根部重量を用いて検討した。

### 6.2.3 分光反射特性の測定

分光反射特性は、対象株の中心部の葉を携帯用分光反射率計((株) エルム 鹿児島, 測定波長領域:400~1,050nm, 波長分解能:3nm, 視野角:3度)を用いて測定した。経過時間とともに対象株が生長していくが、分光反射率測定は対象株の株元を中心に固定した。分光反射率計と対象物の距離は約1mとし、俯角を30度に保って測定を行った。

ND<sub>ij</sub>指標は、種々の波長帯の組み合わせに対して、回帰式の有意性が認められたものを選択し、相関係数と二乗平均平方根誤差(RMSE)を用いて精度を検討した。RMSEは第5章の式(16)を用いて算出した。またND<sub>ij</sub>指標の有効性を検討するため、既存のNDVIとRVIとの比較を行なった。



図 6-1 株あたりの総葉面積(LA)測定の一例

## 6.3 実験結果

### 6.3.1 LA・葉内窒素含有率と塊根部重量の関係

2004,2005 年の LA と塊根部重量の経時変化を図 6-2

に示す。グラフのプロットは LA, 塊根部重量とも対象株の平均値である。2004 年度の LA は DOY:180 以降次第に上昇し、DOY:220 付近で一度わずかに減少するが、その後 LA=3.5 程度まで上昇した。DOY:260 付近からはわずかな減少傾向であった。2005 年度では DOY:200 付近で最高値を示し、DOY:250 まで減少した。DOY:250 以降は DOY:275 付近で LA=1 程度まで減少し、その後 LA=2.5 程度となった。

塊根部重量は、DOY:150 付近まではほぼ一定値であり、その後、両年とも DOY:255 まで次第に増加した。DOY:255 以降は、2004 年度はほぼ一定値、2005 年度はわずかな減少傾向であった。

そこで、本研究では、生育ステージを2つに区分し、塊根部重量が次第に上昇する DOY:250 までを第1ステージ、DOY:250 から実験最終日までを第2ステージとした。

2 年間の全生育期間に対する LA と塊根部重量の関係を図 6-3 に示す。LA と塊根部重量は、二次関数による近似式に有意性(F 値 = 28.74,  $p < 0.001$ )が示された。決定係数  $R^2$  は 0.78 となった。

$$Y = -0.71x^2 + 4.20x + 0.81 \quad (20)$$

ここで  $x$  は LA(m<sup>2</sup>/plant),  $Y$  は自然対数で表示した塊根部重量(g/plant)を示す。津野らによると、塊根部重量は、植え付けからの経過時間が長くなるほど増加すると考えられる。しかし、本結果では、その傾向は顕著ではなかったため、二次関数によって近似を行った。

式(20)により最大塊根部重量を得る LA は 2.7-3.2m<sup>2</sup> 付近であった。これは津野らによる結果<sup>72)</sup>とほぼ同等の値であった。ことから本論文のサツマイモの地上部生育は通常の範囲内であったと考えられる。

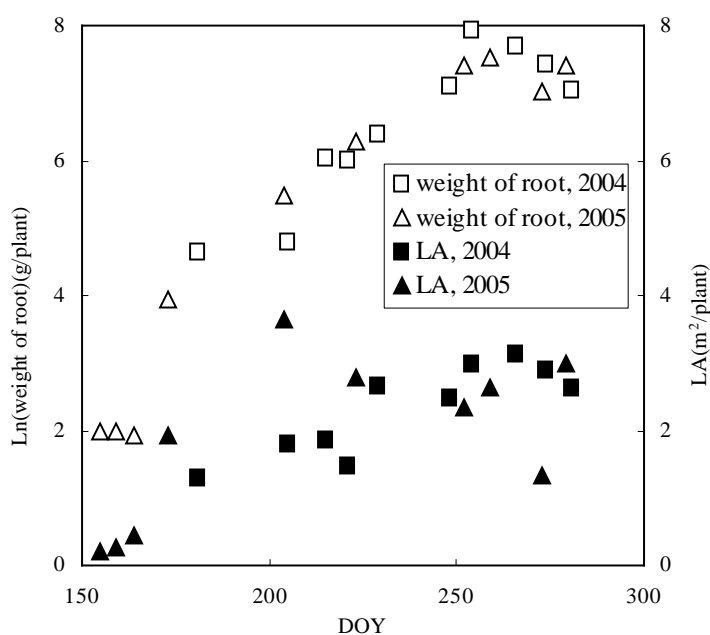


図 6-2 LA(m<sup>2</sup>/plant)と塊根部重量(g/plant)の経時変化

しかし、LA が 1.5～2.5 の区間では、塊根部重量の推定曲線に対するばらつきが大きい結果であった。これは、図 6-2 にみられるように 2004 年度と 2005 年度の DOY：200 付近、DOY：275 付近の生育差異に起因していると考えられる。LA が 2.7-3.2m<sup>2</sup> は第 2 ステージの DOY：250-270 付近であると考えられる。

葉内窒素含有率と塊根部重量の経時変化は両年とも同様の傾向を示したので、2004 年度の例を図 6-4 に、2 年間の葉内窒素含有率と塊根部重量との関係を図 6-5 に示す。

葉内窒素含有率は、DOY：240 付近まで 4%程度で推移し、収穫直前に減少する傾向となった。2004 年度と 2005 年度を比較すると、収穫期まで 2004 年度が 4%前後で推移したのに対し、2005 年度ではやや変動が大きく 5.5%付近から 3%付近で推移した。

葉内窒素含有率と塊根部重量は負の相関( $R^2=0.67, n=19$ )を示した。回帰分散分析の結果回帰式の F 値 = 51.99( $p<0.001$ )であった。推定式を示す。

$$Y = -1.67x + 11.73 \quad (21)$$

ここで  $x$  は窒素含有率(%),  $Y$  は自然対数で表示した塊根部重量(g/plant)を示す。

戸畑は二次関数的な近似を行い、株当たりの塊根部重量と葉内窒素含有率から、最大塊根部重量を得る最適窒素含有率を 2.8-3.3%と推定している<sup>73)</sup>。本研究においても最大塊根部重量を得た、葉内窒素含有率は、ほぼ戸畑の結果と同程度であったが、直線近似を用いた理由として、含有率 3.5%以上から 4.5%付近の変動と、2%以下の場合の変動が明確ではなかったためである。このため式(21)では窒素含有率 2%以下の場合でも塊根部重量は増加することになる。

しかし、2004 年度の 2%以下の場合、データ数が 1 点しかないものの 2%付近の塊根部重量とほぼ同程度であった。

### 6.3.2 サツマイモの葉の分光反射特性の経時変化

全生育期間に対する分光反射特性の一例(2004 年度)を図 6-6 に示す。分光反射特性は可視領域では約550nm付近が他の可視領域よりもわずかに高い反射率を示し、近赤外領域では高い反射率のプラトーとなった。これは、植物の一般的

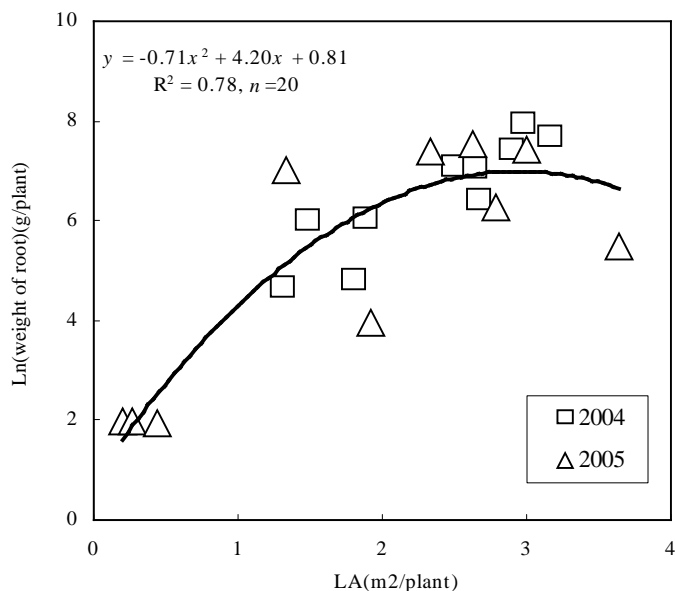


図 6-3 LA(m<sup>2</sup>/plant)と塊根部重量(g/plant)の関係

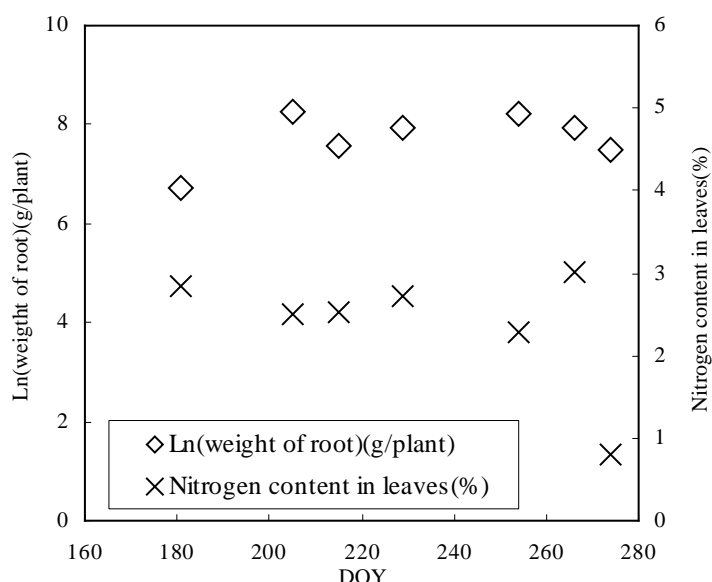


図 6-4 葉内窒素含有率(%)と塊根部重量(g/plant)の経時変化

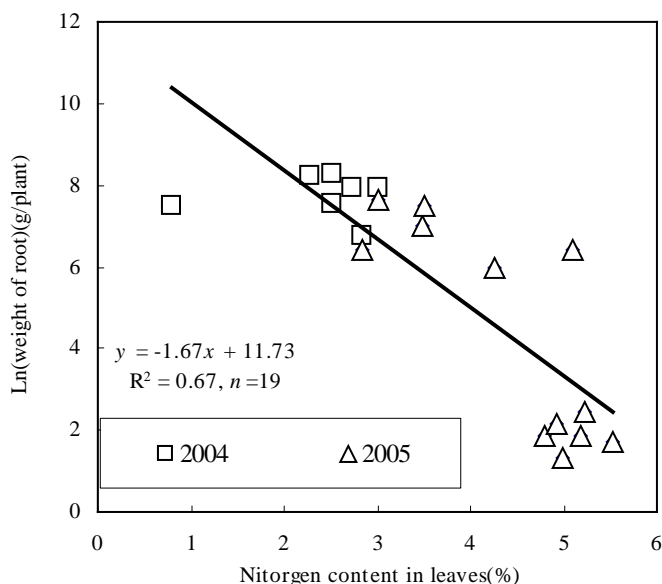


図 6-5 葉内窒素含有率(%)と塊根部重量(g/plant)の関係

な分光反射特性と同様の傾向であった。

可視領域では DOY:181 で反射率が高くなったが他の時期には大きな差異は無かった。近赤外領域では DOY:181 に最も高い反射率を示し、第1ステージでは生育にともない反射率が減少し、DOY:245 付近反射率は最も低くなった。第2ステージにおいては、再び反射率が高くなる結果となった。葉の分光反射特性は、生育ステージにある程度対応した変動を示したが、この分光反射曲線のみではサツマイモの生育の特徴を最もよく現す波長を導出することは困難であった。ND<sub>ij</sub> 指標に用いる特性波長を決定するため、分光反射特性を一次微分した結果の一例を図 6-7 に示す。一次微分では530, 660, 740 と950nmの4つの波長で極値を生じた。また、二次微分では510, 560, 710 と770nmの4つの波長で極値を生じた。一次、二次微分における極値は2年間ともに同一波長に出現した。そこで本章では、これらの波長を特性波長と定義し ND<sub>ij</sub> 指標の作成に用いた。

### 6.3.3 塊根部重量推定手法の開発

全生育期間に対する LA と NDVI, RVI 及び特性波長を組み合わせた ND<sub>ij</sub> 指標との関係を表 6-1 に示す。NDVI, RVI のいずれの指標も全生育期間中の LA の変動に対して有意性が認められなかった。一方、710 と 510nm を用いた ND<sub>ij</sub> 指標は有意となった。このことから 710 と 510nm を用いた ND<sub>ij</sub> 指標を生育指標と定義した。式を以下に示す。

$$ND_{710, 510} = (R_{710} - R_{510}) / (R_{710} + R_{510}) \quad (22)$$

ここで、ND<sub>710, 510</sub> は指標値を R<sub>710</sub> と R<sub>510</sub> は 510 と 710nm における分光反射率を示す。

生育期間中の LA と ND<sub>710, 510</sub> との関係を図 6-8 に示す。グラフは、LA、生育指標とも対象株の平均値である。生育指標は、LA と負の相関があることが確かめられ、相関係数は  $r = -0.72$  となった。

NDVI, RVI とともに LA との有意性が認められなかったことから、サツマイモの LA 推定のためには、提案した生育指標が有効であると考えられる。

しかし生育指標は RMSE が 0.74m<sup>2</sup> と多少大きい誤差を生じた。特に LA の自然対数値が 0 以下(LA が 1 以下)である

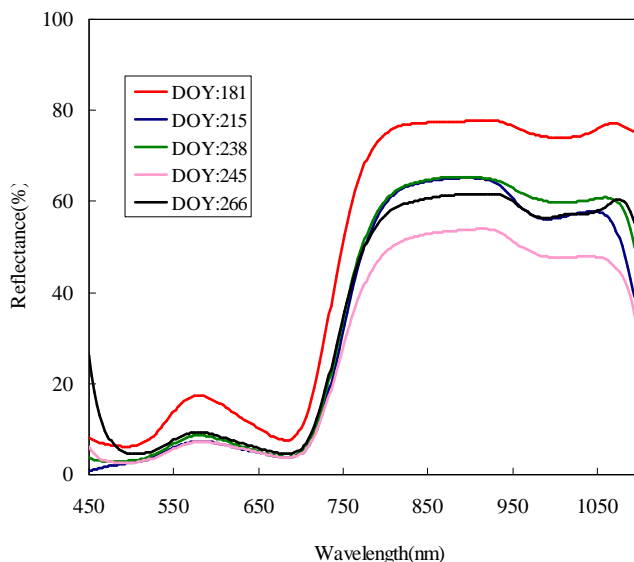


図 6-6 分光反射率の経時変化

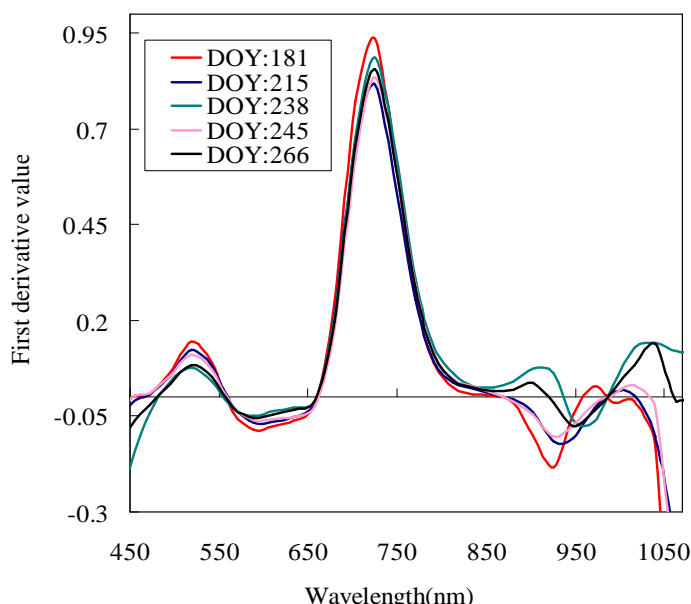


図 6-7 特性波長の抽出(分光反射率の一次微分)

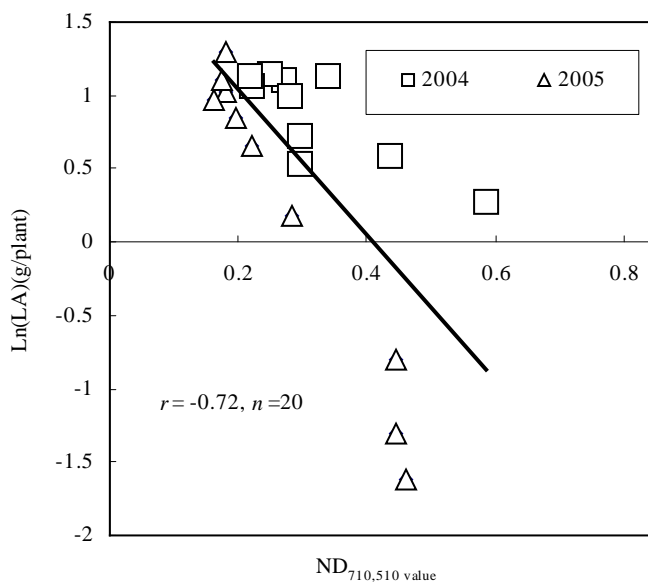


図 6-8 LA と ND<sub>710,510</sub> 指標との関係

第 1 ステージ初期段階では，生育指標値にほとんど変動がなく，推定精度を低下させる要因となった．また 2004 年度は指標による推定値に対して過大評価し，2005 年度は過少評価しており，年度における差異が生じる結果となった．

全生育期間に対する葉内窒素含有率と NDVI, RVI 及び特性波長を組み合わせた  $ND_{ij}$  指標との関係を表 6-2 に示す．窒素含有率に対しては，770nm と 660nm を用いた指標， $ND_{770,660}$  と 510nm と 530nm を用いた  $ND_{530,510}$  が有意という結果であった．また，NDVI, RVI を用いても有意であることが確かめられた．しかし，RVI では，相関は  $r=0.81$  と高かったものの，回帰直線の切片に有意性が認められなかった．全生育期間を通じた RMSE は  $ND_{770,660}$  指標，NDVI と RVI が 0.75% ~ 0.81%， $ND_{530,510}$  が 0.11% となった．

$ND_{770,660}$  指標と， $ND_{530,510}$  指標を葉内窒素含有率推定指標と定義し，式を (23)，(24) に，葉内窒素含有率と各推定指標の関係を図 6-9 及び図 6-10 に示す．

葉内窒素含有率推定指標 1：

$$ND_{770,660} = (R_{770} - R_{660}) / (R_{770} + R_{660}) \quad (23)$$

葉内窒素含有率推定指標 2：

$$ND_{530,510} = (R_{530} - R_{510}) / (R_{530} + R_{510}) \quad (24)$$

ここで， $ND_{770,660}$ ， $ND_{530,510}$  は指標値を  $R_{770}$ ， $R_{660}$   $R_{530}$  と  $R_{510}$  は 770，660，530 と 510nm における分光反射率を示す．グラフのプロットは，葉内窒素含有率の測定に用いた 19 株の測定値を用いた．窒素含有率とそれぞれの  $ND_{ij}$  指標には直線回帰に有意性が認められたが，図 6-9 および図 6-10 より，窒素含有率が 5% を超えると指標値の変動が少なくなり，推定精度を下げる結果となった．

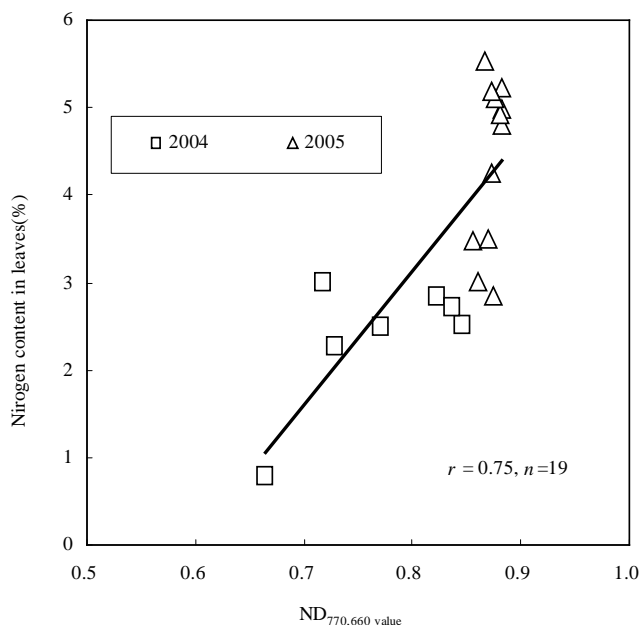


図 6-9 葉内窒素含有率(%)と  $ND_{770,660}$  指標との関係

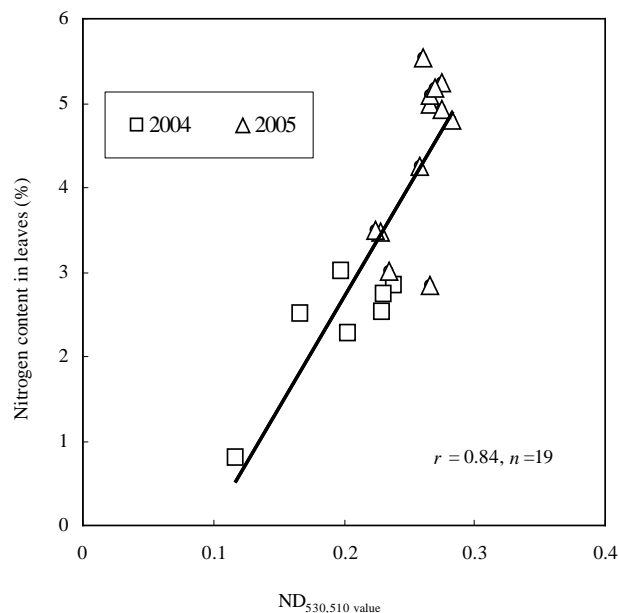


図 6-10 葉内窒素含有率(%)と  $ND_{530,510}$  指標との関係

表 6 1 LA と NDij 指標との関係

LnLA(m <sup>2</sup> /plant)	F-value	p-value	coefficient	intercept	r	RMSE	n
NDVI	1.18	0.37(NS)			-0.21		20
RVI	1.62	0.29(NS)			-0.19		20
ND <sub>710,510</sub>	29.31	***	-4.99**	2.01***	-0.69	0.74m <sup>2</sup>	20

ここで、表中の

\*\*\* : 有意水準  $p < 0.001$

\*\* : 有意水準  $p < 0.01$

NS : Not significant(有意水準  $p > 0.05$ )

また、

$$\text{NDVI} = (R_{\text{Band4}} - R_{\text{Band3}}) / (R_{\text{Band4}} + R_{\text{Band3}})$$

$$\text{RVI} = R_{\text{Band4}} / R_{\text{Band3}}$$

$$\text{ND}_{710,510} = (R_{710} - R_{510}) / (R_{710} + R_{510})$$

$R_{\text{Band4}}$  および  $R_{\text{Band3}}$  は 700 ~ 790nm と 600 ~ 690nm の平均分光反射率

$R_{710}$  および  $R_{510}$  は、710nm と 510nm のときの分光反射率

表 6 2 葉内窒素含有率と ND<sub>ij</sub> 指標との関係

Nitrogen contents in leaves(%)							
	F-value	p-value	coefficient	intercept	r	RMSE(%)	n
NDVI	26.87	***	14.09***	-7.34***	0.78	0.77	19
RVI	31.55	***	0.41***	-0.013(NS)	0.81	0.75	19
ND <sub>770,660</sub>	22.77	***	15.30***	-9.12***	0.75	0.81	19
ND <sub>530,510</sub>	40.96	***	26.39***	-2.58***	0.84	0.11	19

ここで、表中の

\*\*\* : 有意水準  $p < 0.001$

NS : Not significant(有意水準  $p > 0.05$ )

また、

$$\text{NDVI} = (R_{\text{Band4}} - R_{\text{Band3}}) / (R_{\text{Band4}} + R_{\text{Band3}})$$

$$\text{RVI} = R_{\text{Band4}} / R_{\text{Band3}}$$

$$\text{ND}_{770,660} = (R_{770} - R_{660}) / (R_{770} + R_{660})$$

$$\text{ND}_{530,510} = (R_{530} - R_{510}) / (R_{530} + R_{510})$$

$R_{\text{Band4}}$  および  $R_{\text{Band3}}$  は 700 ~ 790nm と 600 ~ 690nm の平均分光反射率

$R_{770}$  と  $R_{660}$  及び  $R_{530}$  と  $R_{510}$  は、それぞれ 770nm, 660nm, 530nm と 510nm のときの分光反射率



## 6.4 考察

本章では、地下部に測定対象が存在するサツマイモの塊根部重量を  $ND_{ij}$  指標を用いて推定するために、まず、サツマイモの地上部(LA,葉内窒素含有率)と塊根部重量の関係を調査した。

サツマイモの地上部(LA と葉内窒素含有率)は、塊根部重量との関係があることが確かめられた。このことから、サツマイモの地上部を調査することによる塊根部重量の推定はある程度可能であると考えられる。しかし、LA は、図 6-3 の  $LA = 1.3-2.2$  付近の変化に見られるように、塊根部重量の変動全体を正確に表しているとは考えがたい。また、図 6-2 の DOY : 209 付近にみられるように、2 年間の LA においても生育差が大きい。一方、葉内窒素含有率からの塊根部重量の推定は、飯塚らによる既報と合致しており<sup>74)</sup>、LA からの塊根部推定に比べ有効である可能性が示された。しかし、戸畑は、葉内窒素含有率が 2% 以下の場合、及び 5% 以上の場合、塊根部重量との関係が明確でなくなっている<sup>75)</sup>。今回の測定においても 5% 以上においては、ほとんど塊根部との相関が認められなかった。また、式(21)より葉内窒素含有率が 2% 以下であった場合、塊根部重量は増加すると考えられるが、本研究では、塊根部の増加は認められなかった。窒素含有率が 5% 以上であるのは、第 1 ステージ初期であると考えられるため、式(21)による塊根部重量の推定の精度を向上させるためには、特に葉内窒素含有率 2% 以下になる場合のデータと、3.5%-4.5% 付近のデータの補充が必要となると考えられる。

$ND_{ij}$  指標は、LA に対しては、710nm と 510nm を用いた指標が最も相関が高く、葉内窒素含有率に関しては、770nm と 660nm、530nm と 510nm を用いた指標が最もよく推定可能であることが示された。

しかし、LA に関しては、 $ND_{ij}$  指標を用いるための根拠である塊根部重量との関係が明確に示されていない。また、2004 年度では、回帰式に対して、LA を過大評価する傾向にあり、2005 年度では、過小評価する傾向にあるなど年次をまたいで推定することが困難であると考えられる。葉内窒素含有率を介在した  $ND_{ij}$  指標による塊根部重量は、 $ND_{770,660}$ 、 $ND_{530,510}$  値とも相関係数  $r=0.75$  以上となり、LA の場合にみられた年次間の差異も小さかったことから LA に比べて有効な推定指標になりうると考えられる。

$ND_{770,660}$  指標は、第 3 章にて葉内窒素含有率を推定するのに最もよい指標であったが、サツマイモの場合、 $ND_{530,510}$  値の方が相関が高く、RMSE も小さくなった理由として、図 6-9 の指標値が 0.85 付近で見られる飽和傾向が挙げられる。第 3 章の図 3-10 においても同様の飽和傾向が認められたが、第 3 章で目的変数とした茶新芽は、測定終了時点においても生長段階であったといえる。しかし、サツマイモの場合 LA の変動が 2 つのステージに分かれるように、生育初期において  $ND_{ij}$  指標値の飽和の影響をより強く受けると考えられる。今回の結果では、生育ステージ全てのデータを均等に取得したため、一括して塊根部重量の推定を行ったが、サツマイモの場合、第 2 ステージのデータをより多く取得することで、指標の有効性を検討していく必要があると考えられる。

## 6.5 まとめ

本章では生育形態が匍匐型で予測対象が地下に存在するサツマイモに対しても、第 2 章で提案した  $ND_{ij}$  指標が適用可能かについて検討した。地上部(LA と葉内窒素含有率)と塊根部重量にある程度の関連性がみられたことから、地上部を調査することで塊根部重量の推定が可能であることが明らかとなった。また、LA と葉内窒素含有率は、分光反射率を用いて導出した  $ND_{ij}$  指標によって推定可能であったことから、予測対象が地下に存在するサツマイモに対しても近接リモートセンシング手法の適用が可能であることが示された。主要な結果は以下のとおりである。

1. LA と塊根部重量は、2 次関数で近似することが可能であった。しかし、 $LA = 1.5 \sim 2.0$  付近ではばらつきが大きく、 $LA=4$  以上では、塊根部重量の変動が小さい結果となった。
2. 葉内窒素含有率と塊根部重量の関係は、負の相関で直線近似が可能であった。しかし、葉内窒素含有率 5% 付近のみでは、塊根部重量との相関が認められなかった。
3. LA と  $ND_{ij}$  指標には、負の相関  $r=-0.72$  が認められた。しかし、年次において、指標値が LA を過大・過小評価してしまう結果となった。
4. 葉内窒素含有率は、 $ND_{770,660}$  と  $ND_{530,510}$  に対して、相関係数  $r=0.75$  以上で負の相関が確認された。
5.  $ND_{ij}$  指標同士の RMSE を比較すると、 $ND_{530,510}$  が  $RMSE=0.11\%$  と最も小さいことからサツマイモの塊根部重量を推定するためには、 $ND_{530,510}$  が最も有効な指標となった。

## 第7章 総合考察

本論文では、農作物の最適な肥培管理技術の提案のための第1歩として、茶・水稻・サツマイモを対象として、近接リモートセンシング手法を用いた生育・品質推定手法の考案と肥培管理への利用の可能性を検証することを目的として研究を行った。茶・水稻・サツマイモは、それぞれ栽培形態が異なるが、最終的に決定する肥培管理は、施肥の種類・施肥量および施肥時期に集約されると考えられる。このうち施肥の種類に関しては、作物によらず、生長を促進させ、また現在地球環境への影響が深刻化している「窒素施肥」に着目する必要がある。

本研究において生育中の分光反射特性から考案した  $ND_{770,660}$  指標は、どの作物でも葉内窒素含有率とある程度の相関があった(図 3-10, 図 5-5 及び図 6-9)。

$ND_{770,660}$  指標に用いた、波長である 770nm と 660nm は、可視域の赤波長(660nm)にクロロフィルの吸収帯が存在し、近赤外域(770nm)はクロロフィルの吸収がほとんどない波長帯であることから、クロロフィルの変動をよく表す組み合わせであると考えられる。この概念は、第2章で述べたとおり基本的には、NDVI と同様のものである。しかし、NDVI は、赤・近赤外領域の 100nm 間での平均値を用いている。これに対して、本研究では、より狭い波長帯を用いて、種々の農作物の窒素含有率が推定できることが明らかとなった。この結果は、将来的に、航空機搭載されるハイパースペクトルセンサーの波長帯決定に有効であると考えられる。特に茶の場合では、図 4-11 に示したとおり、圃場に投入された窒素施肥量と葉内窒素含有量にも正の相関があることが確認されたことから、近接リモートセンシングを用いて葉の分光反射特性を取得することで施肥量を推定することが可能であることが示唆された。しかし、本研究に用いたさつま町の圃場では、施肥量が増加する程、窒素含有量も増加しているため、最適な施肥量を推定するまでに至らなかった。

水稻に対しては、圃場内の  $ND_{770,660}MAX$  には、等級間差異は DOY: 276 付近のみでしか確認できなかった(表 5-1)。しかし、圃場の RMSE には、出穂期以降等級間に差異が生じた。これは、葉内窒素含有量の圃場内でのばらつきが等級低下への影響を示唆していると考えられる。茶の結果(図 4-11)で示したように、水稻でも圃場内の葉内窒素含有量と窒素施肥量には正の相関であると考えられるので、圃場内の窒素施肥のばらつきを軽減することで等級低下を抑制することが可能であると考えられる。特に水稻栽培では、窒素の吸収を促進するための肥培管理として落水処理を行っている。等級間で、RMSE が大きく変動するのは出穂期以降であるので、この時期に圃場内に均一に窒素が吸収されるような落水処理を行う必要があると考えられる。

茶と水稻において、分光画像を用いることによって近接リモートセンシング手法を肥培管理へ繋げていける可能性を示した。分光画像は、航空機や衛星の取得できない時期にも容易に取得が可能であるため、本結果を実際の生産現場へ適用することで、破壊を伴わない、生育・品質推定に有効であると考えられる。

しかし、本研究における分光画像の撮影は、近傍からの斜め撮影に限定されてしまう。松田らは、分光画像の撮影時における歪曲収差を正投影に変化することによって、斜め撮影によっても、精度よく葉内窒素含有率が推定できることを示している。しかし、松田らの手法には、詳細な位置情報のデータが不可欠であり、多くの圃場を対象とするためには、不向きであると考えられる。そのため画像撮影角度をより直下にする必要がある<sup>76)</sup>。撮影角度を直下にすると測定可能領域が狭まるため、同時に、可能な限り測定位置を上昇させる必要があると考えられる。

また、茶・水稻ともに生育期間中に連続的に測定を行う場合、画像内のミクセルの割合が重要な問題となる。小阪らは、農地のミクセルデータを独立成分分析によって、定性化することで精度よくミクセル除去する方法を提案している。本研究においては、ミクセルについて考慮せず検討を行ったが、生育全体を一括して検討する場合、小阪らの手法を用いてミクセル成分を除去することでより推定精度の向上が望めると考えられる<sup>77)</sup>。

本研究では、画像撮影時に白色板を常に挿入した。これは、生育・品質の時間的変動を追う際に、分光画像のエネルギーの日時による差異を除去することを目的としている。本手法を実際に現場で用いる際にもエネルギー変動の標準化が重要な問題となってくると考えられる。この問題に対して、大嶺は、白色板が装着された簡易画像取得装置を報告しているが、本手法においても、分光反射率の時間的変動の標準化をより詳細に検討する必要があると考えられる<sup>78)</sup>。

サツマイモの場合では、 $ND_{770,660}$  指標より、530nm と 510nm の波長を用いた  $ND_{530,510}$  値の方が葉内窒素含有率との相関が高く、ばらつきも小さい結果であった。これは、3.4 に述べたとおり、 $ND_{770,660}$  が式の性質上 -1~1 までの範囲しかとり得ないため、葉内窒素含有率が高いと飽和してしまう傾向にあることが原因であると考えられる<sup>34),35)</sup>。この傾向を緩和するため、小川らは、NDVI を指数化して、新たな



指標の考案を試みている。また、L. Serrano らは、NDVI の積算値を求めることで解決策を見出している。本研究においても  $ND_{770,660}$  指標にそれらの補正法を適用することでより精度の向上が期待され则认为られる<sup>46),79)</sup>。

また、サツマイモの場合では、地下に対象が存在したため、本研究では、個体に着目した検討を行ってきた。その結果匍匐型作物であっても、株の中心部を測定することで、個体全体の窒素含有率の推定が可能であることが示唆された。しかし、本研究は、一定条件下の栽培における結果であった。サツマイモ栽培では、戸畑らが報告しているように、特に地上部が過繁茂してしまった、つるぼけが発生した場合、地下部と地上部の関連性が明確ではなくなる<sup>80)</sup>。つるぼけは、窒素の過剰な施肥によって増加し、カリウムの施肥によって抑制されるという報告もある<sup>81)</sup>。このことから、窒素施肥のみならず、カリウムの施肥量の影響も考慮した形で、 $ND_{ij}$  指標の修正を行っていく必要があると考えられる。

## 第8章 総括

本論文では、茶、サツマイモ及び水稻の3種類の農作物を対象として、近接リモートセンシング手法を用いた生育・品質推定開発に関する検討を行った。

第4～6章の茶葉、サツマイモ及び水稻の結果より、分光反射率から導出した  $ND_{ij}$  指標を用いることで、生育量や葉内成分含有率の推定が可能であることが示唆された。このことから、近接リモートセンシング手法を用いることで、生育中に非破壊で各農作物の収量や品質を推定可能であることが明らかとなった。

第4章および第6章の茶葉、水稻の結果より、分光画像に  $ND_{ij}$  指標を適用し、ヒストグラムを解析することで、圃場内の茶葉の生育・品質分布の推移及び等級の判定が可能であることが示された。このことから、茶葉、水稻ともに、近接リモートセンシング手法による品質の把握及び評価が可能であることが明らかとなった。

第4章の茶葉の結果では、 $ND_{ij}$  指標と葉内窒素含有量の関連性が示された。窒素施肥量と葉内窒素含有量にも関連性があることから、近接リモートセンシング手法を肥培管理へ適用可能であることが明らかとなった。

しかし、各農作物とも本研究にて得られた作物情報をどのように、肥培管理へ活かすかという点について検討を行うことができなかった。特に、サツマイモについては、測定部位の設定方法に依然として問題点が残る。今後、茶および水稻に関しては、生育中に行われる施肥と本研究結果の整合性の検証を行い、サツマイモに対しては、圃場単位での指標適用の可能性を検討することで、本研究結果が生産者にとってより有益なものとなると考えられる。

本研究における主要な結果は以下のとおりである。

1. 茶の新芽の葉内成分含有率と分光反射特性から導出した  $ND_{ij}$  指標には、それぞれ負の相関が認められた。また、生育量は、 $ND_{770,660}$  と、品質(AF値)は、 $ND_{710,520}$  と相関があった。 $ND_{770,660}$  の経時変化は、生育後期において飽和傾向を示すのに対し、 $ND_{710,520}$  は、摘採期付近で値が減少し、摘採期を過ぎると上昇する傾向が認められた。
2. 圃場内の品質変動や分布を検討するため、 $ND_{710,520}$  指標を画像に適用した結果、 $ND_{710,520}$  画像の最頻値は、分光反射率と同様、摘採期付近で、減少し、その後上昇する傾向が認められた。 $ND_{710,520}$  画像の尖度は、摘採期付近で最も正規分布に近づく傾向があった。このことから、最頻値と尖度を同時に検討することにより、最適摘採日の推定が可能であると考えられる。
3. サツマイモの LA、葉内窒素含有率と塊根部重量には、ある程度の関連性があることが示された。
4. サツマイモの LA は  $ND_{710,510}$  と葉内窒素含有率は、 $ND_{770,660}$  と  $ND_{530,510}$  の  $ND_{ij}$  指標を用いることで非破壊的に推定できる可能性が示唆された。
5. 水稻の葉の SPAD 値は、等級間に差異が生じることが確かめられた。このことから、SPAD 値と  $ND_{ij}$  指標の関係を調査した結果、正の相関  $r=0.82$  が認められた。
6. 一等級圃場の  $ND_{770,660}$  画像の最頻値は、出穂期まで上昇し、その後値が下がる傾向を示した。また二等級圃場は、一等級圃場に比べて出穂期以降の RMSE が大きくなった。 $ND_{770,660}$  は、圃場内の窒素含有率を表す指標であるため、圃場内の窒素含有率のばらつきが大きいほど等級が低下する可能性があることが示された。

## 引用文献

1. 農林水産統計，平成 20 年 農業産出額；農林水産省大臣官房統計部編．
2. 農林水産統計，平成 20 年 都道府県別生産農業所得統計表；農林水産省大臣官房統計部編．
3. 長田健二：高温登熟と胴割れ，農業および園芸，81(7)，pp.797-801，2006．
4. 森田敏：イネの高温障害克服に向けて，日作紀，77，pp.1-12，2008．
5. 八木忠之：水稻ヒノヒカリと温暖化対策，農業および園芸，84(1)，pp.29-35，2009．
6. Compton, J.T.: Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. J. Remote Sensing Environment, 8, pp.127-150, 1979.
7. John C.PRICE: Estimating Leaf Area Index from Satellite Data, IEEE Trans. J. Geosciences Remote Sensing, 31(3), pp.727-734, 1993.
8. P.S Thinkbail: Biophysical and yield information for precision farming from near-real-time and historical Landsat TM images : Int. J. Remote Sensing, 24(14), pp.2879-2904, 2003.
9. P.C. Doraiswamy, J.L. Hatfield, T.J. Jackson, B. Akhmedov, J. Prueger, A. Stern : Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS, J. Remote Sensing Environment, 92, pp.548-559, 2004.
10. 竹内渉・安岡善文：MODIS 250m データを用いた中国の水田面積比率分布図の作成，日本リモートセンシング学会誌，26(3)，pp.213-223，2006.
11. 寺田優：北陸地域における水稻の生育診断・予測技術開発の現状，日本作物学会紀事，62(4)，pp.641-646，1993.
12. 池田順一・奥野林太郎・山縣真人：高解像度衛星 IKONOS の衛星データによるコムギ収量の予測，日本土壌肥料学雑誌，72(6)，pp.786-789，2001.
13. 斉藤元也：農業リモートセンシング，日本リモートセンシング学会誌，21(1)，pp.78-81，2001.
14. 脇山恭行・井上君夫・中園江：水稻の登熟期における衛星データ及びアメダスデータを用いた収量予測法，農業気象，59(4)，pp.277-286，2003.
15. 安積大治・志賀弘行：水稻成熟期の SPOT/HRV 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(5)，pp.451-457，2003.
16. ASRAR: Theory and Application of Optical Remote Sensing, Chapt. 1 ,John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1989.
17. 大原源二：最近の農業における航空機リモートセンシングと GIS 技術の利用，農業技術，59(9)，pp.419-422，2004.
18. 井上吉雄：作物・農地の高精度管理のためのリモートセンシング(2)高精度農業管理におけるリモートセンシングの将来展開，日本作物学会紀事，66(3)，pp.511-523，1997.
19. 秋山侃：宇宙からみた農業のかたち，日本作物学会紀事，76(3)，pp.470-472，2007.
20. 井上吉雄・ギャシュデインミア・境谷栄治・中野憲司・河村健介：ハイパースペクトル計測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-米粒タンパク質・クロロフィル濃度・バイオマス評価を事例として-，日本リモートセンシング学会誌，28(4)，pp.317-320，2008.
21. 秋山侃：分光計測による作物生育診断技術，日本作物学会紀事，65(2)，379-389，1996.
22. 井上吉雄：作物・農地高精度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-応用可能性と到達点-，日本作物学会紀事，66(2)，pp.335-344，1997.

23. Shibayama, M. and Munakata, K.: A spectroradiometer for field use. VII. Radiometric estimation of nitrogen levels in field rice canopies, *J. Crop Science*, 55(4), 439-445, 1986.
24. Inoue, Y: Radiative Transfer Process of Vegetation in Visible and Near Infrared Wavelength Regions as related to Remote Sensing of Eco-physical Plant Variables - Comparative Analysis of Canopy Reflectance Models and Assimilation of Reflectance Information in Radiation-based Growth Model -, *J. Remote Sensing*, 20(5), pp.56-72, 2000.
25. 興石肇：光学センサの最新トレンド、日本リモートセンシング学会誌，11(1)，pp.104-108，1991.
26. Okamoto, K. and Fukuhara, M.: Estimation of paddy field area using the area ratio of categories in each mixel of Landsat TM, *Int. J. Remote Sensing*, 17(9), pp.1735-1749, 1996.
27. 高橋一義・力丸厚・向井幸男：水稲作付面積の高精度推定について-輪郭参照方式の適用事例-、日本リモートセンシング学会誌，23(5)，pp. 491-496，2003.
28. 石塚直樹・斉藤元也・村上拓彦・小川茂男：RADARSAT データによる水稲作付面積算出手法の開発，日本リモートセンシング学会誌，23(5)，pp. 458-472，2003.
29. 小阪尚子・斉藤元也：航空機ハイパースペクトル画像による農作物の品目同定と生育ステージ把握，写真測量とリモートセンシング，41(4)，21-24，2002.
30. Rudorff, B. F. T. and Batista, G. T.: Spectral response of wheat and its relationship to agronomic variables in the tropical region, *J. Remote Sensing Environment*, 31, pp.53-63, 1990.
31. 青木正敏・戸塚績：分光反射特性に基づく植物群落クロロフィル量及び葉面積指数の遠隔計測に関する基礎研究，国立公害研究所研究報告，82，pp.137-147，1985
32. Shibayama, M. and Akiyama, T.: Estimating grain yield of maturing rice canopies using high spectral resolution reflectance measurement, *J. Remote Sensing Environment*, 36, 45-53
33. Ishiguro, E., Ishikawa, D., Kuroiwa, S., Sato, M., Yoshitomi, H. and Takeda, Y.: Study of tea plant growing conditions with spectral reflectance. *J. Agric. Meteorol.*, 60(5), 929-932, 2005.
34. 大前英：秋製枝の高さの違いが翌年チャ新芽の収量及び一番茶品質に与える影響，75(1)，51-56，2006.
35. 吉川総一郎・下門久：近赤外分析計による茶の品質評価，九農研，60，pp.24，1998.
36. 池ヶ谷賢次郎・高柳博次・阿南豊正・西成勝好・岩元睦夫・魚住純：茶の主要化学成分の近赤外分光法による非破壊迅速定量法（その4）緑茶のテアニン）茶業研究報告（講要），63，pp.75-76，1986.
37. 池田奈実子・堀江秀樹・向井俊博・後藤哲久：チャ品種の一番茶新芽の化学成分含有量の年次変動，日本作物学会紀事，75(4)，pp.511-517，2006.
38. 私信：野菜茶業研究所枕崎拠点(吉富氏)
39. 中野敬之：冬から春にかけての気温が茶芽の生育ステージと耐凍性に及ぼす影響，日本作物学会紀事，71(1)，pp.43-49，2002.
40. 高橋俊守・安岡善文：分光反射率の計測と植生指数による河道内植生の葉面積指数の測定、*水工学*, 50, pp.1213-1218
41. 井上吉雄：作物群落の生産機能及び状態の非破壊非接触診断に関する研究 第5報 群落表層における分光反射率分布の解析と分光反射率による葉身クロロフィル濃度の推定，日本作物学会紀事，57(1)，pp.105-111，1988.
42. Onesimo M and Andrew K.S: Red edge shift and biochemical content in grass canopies *J. Photogrammetry &*

- Remote Sensing 62, pp.34-42, 2007.
43. Munden, R., Curran, P.J. and Catt, J.A.: The relationship between red edge and chlorophyll concentration in the broad balk winter wheat experiment at Rothamsted. *Int. J. Remote Sensing.*, 15, 705-709, 1994.
  44. Casanova D. Epema G. F. and Goudriaan. J :Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI, *J. Field Crop Science.*, 55, pp.83-92, 1998.
  45. Cem U and Kim L : Linerized vegetation indices based on a formal statistical framework, *IEEE Trans. J. Geosciences. Remote Sensing*, 42(7), pp.1575-1584, 2004.
  46. 小川進・牧野育代・富久尾歩・斉藤元也：水田の NDVI 季節変動とその葉面積指数，*日本リモートセンシング学会誌*，20(2)，pp.17-26，2000.
  47. 私信：野菜茶業研究所枕崎拠点(吉富氏)
  48. 成木茶園における施肥時期と新芽への分配, *鹿児島茶研報*，14，pp.1-11，2000.
  49. Aoki S: Effects of plucking of young tea plants on their photosynthetic capacities in the mature and overwintered leaves., 50(4), pp.445-451, 1981.
  50. 小野朗子・藤原昇・小野厚夫：Landsat/TM スペクトル値の正規化による地形効果と大気効果の抑制，*日本リモートセンシング学会誌*，22(3)，318-327. 2000.
  51. 石川大太郎・湯田健之・関岡信一・肥山浩樹・石黒悦爾：分光反射特性を利用した斜面崩壊地の予測—樹冠の水分変動による土壌水分変動域の抽出事例—，*農業気象*，64(1)，pp.61-68，2008.
  52. 岡本正弘・堀野俊郎：米の窒素含有量の品種間差異及び栽培条件による変異と葉色との関係，*育種学雑誌*，44，pp.177-181，1994.
  53. 金子大二郎：衛星を用いた光合成型モデルによる日本の水稲作況指数推定，*日本リモートセンシング学会誌*，26(3)，pp.202-212，2006.
  54. 小川茂男・福本昌人・島武男・大西亮一・武市久：衛星データを用いた水田水入れ時期のモニタリング，*日本リモートセンシング学会誌*，23(5)，pp.497-505，2003.
  55. 中谷治夫：水稲の栽培条件と収量，米質に関する研究，第 7 報 分けつ次位，節位及び枝梗別米質について，*日本作物学会紀事北陸支部*，10，pp.18-22，1997.
  56. 中谷治夫：水稲栽培条件と収量，米質に関する研究，第 8 報米質向上に関する現地実証実験，*日本作物学会紀事北陸支部*，10，pp.23-26，1975.
  57. 境垣内岳雄・森田茂紀・阿部淳・山口武規：水稲における追肥後の窒素吸収の経時変化，*日本作物学会紀事*，74(3)，pp.285-290，2005.
  58. 平俊雄：出穂期における水稲品種コシヒカリの玄米窒素含有率の推定，*日本作物学会紀事*，66(4)，pp.706-707，1997.
  59. 長戸一雄・江幡守衛：登熟期の高温が頸果の発育ならびに米質に与える影響，*日本作物学会紀事* 34(1)，pp.59-66，1965.
  60. 河津俊作・本間香貴・堀江武・白岩立彦：近年の日本における稲作気象の変化とその水稲収量・外觀品質への影響，*日本作物学会紀事*，76(3)，pp.423-432，2007.
  61. 栗原浩志・蓬原雄三・津野幸人：イネ，作物栽培の基礎，第 4 章，pp.100-204，(社)農山漁村文化協会，東京，2002.
  62. 中鉢富夫・浅野岩夫・及川勉：葉緑素計による水稲(ササニシキ)の窒素栄養診断，*日本土壌肥料学会雑誌*，57(2)，pp.190-193，1986
  63. 小阪尚子・小杉幸夫：ICA を用いた周期性ハイパースペクトルミクセルデータの分離，*日本リモート*

- トセンシング学会誌, 23(5), pp.530-542, 2003.
64. 佐々木修・湯田敦彦・植木健至：甘藷の地上部の発達と塊根形成の関係，第3報 分枝系の発達とその品種間差異，日本作物学会紀事，62(2)，pp.157-163，2004.
  65. 佐々木修・津曲雄治・西原英典・下田代智英：カンショの塊根肥大と形状の成立要因，日本作物学会紀事，73(2)，pp.197-203，2004.
  66. 津野幸人・藤瀬一馬：甘藷の乾物生産に関する研究，第3報 葉分吸収と乾物生産との関係，日本作物学会紀事，32(4)，pp.297-300，1964.
  67. 片山健二・田宮誠司：サツマイモ品種の塊根品質からみた成熟期，日本作物学会紀事，68(2)，pp.224-230，1999.
  68. M. Shibayama, S. Takahashi and T. Oku: degrees of Polarization, Reflectance and Vegetation Indices of Mixed Seeding Pasture. J. Remote Sensing., 15 (4), pp.22-37, 1995.
  69. Wiegand C., Shibayama M. and Yamagata Y.: Spectral observations for estimating the growth and yield of rice. J. Crop Science, 58(4), pp.673-683, 1989.
  70. Toby, N.C. and David, A.R., On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index. J. Remote Sensing. Environment, 62, pp.241-252, 1997.
  71. Y. Inoue, M. S. Moran and T. Horie: Analysis of Spectral Measurements in Paddy Field for Predicting Rice Growth and Yield Based on a Simple Crop Simulation Model. J. Plant Production Science, 1(4), pp.269-279, 1998.
  72. 津野幸人・藤瀬一馬：甘藷の乾物生産に関する研究，第2報 群落の乾物生産と乾物生産構造，日本作物学会紀事，31，pp.285-288，1963.
  73. 戸畑秀：サツマイモの塊根肥大特性に関する研究，第1報 地下部環境条件の差異が塊根部肥大に及ぼす影響，日本作物学会紀事，57(4)，pp.608-613，1988.
  74. 飯塚隆治・増田泰三・三尾智秋：マルチ栽培下サツマイモ品種コガネセンガンの好適栄養状態の簡易診断法，日本土壌肥料学会雑誌，64(1)，pp.81-84，1993.
  75. 戸畑秀：サツマイモの塊根肥大特性に関する研究，第2報 養分供給量の差異が塊根肥大に及ぼす影響，日本作物学会紀事，58(3)，pp.209-296，1989.
  76. M. Shibayama and K. Munakata: A spectroradiometer for field use. III. A comparison of some vegetation indices for predicting luxuriant paddy rice biomass, J. Crop Science, 55(1), pp.47-52, 1986.
  77. 松田真典・大澤昭一・保坂幸男・金田和文・山下英生：近接リモートセンシングによる水稻の生育診断-デジタルカメラによる葉身窒素含有率の測定-，日本リモートセンシング学会誌，23(5)，pp.506-515，2003.
  78. 大嶺政朗：分光デジタルカメラによる大豆の生育センシング，農業機械学会誌，69(6)，pp.18-20, 2007.
  79. L. Serrano, I. Filella and J. Penuelas: Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies, J. Crop Science, 40, pp.723-731, 2000.
  80. 高瀬昇・坂田公男：甘藷の過繁茂抑制に関する研究，日本作物学会紀事(九州支部)，19，pp.31-32，1962.
  81. 戸畑秀：サツマイモの塊根肥大特性に関する研究，第3報 養分供給量の差異が塊根肥大に及ぼす影響の品種間差異，日本作物学会紀事，58(4)，pp.495-501，1989.



## 謝 辞

本研究は、近接リモートセンシング技術を農業へ導入し、生産者の方へよりよい栽培情報を提供することにより、肥培管理に利用して頂けることを目的に開始いたしました。本研究を遂行する過程で、第3章の一部を纏めた主論文は、農業気象学会学術奨励賞を頂き、第3章、第4章及び第5章は、(独)日本学術振興会の特別研究員の研究課題として新たな発展に繋げる事ができたと感じております。

本研究を遂行するにあたり、主指導教官として、学部生時代より厳しいご指摘と暖かいご支援を頂きました鹿児島大学農学部教授 石黒悦爾先生には、多大なご配慮を頂きました。本当にありがとうございました。また、鹿児島大学農学部教授 岩崎浩一先生と琉球大学農学部教授 川満芳信先生には副指導教官として指導して頂きました。佐賀大学農学部教授 野瀬昭博先生と琉球大学農学部教授 上野正実先生には学位論文審査にあたって懇切丁寧な助言を頂きました。さらに、鹿児島大学農学部教授 箱山晋先生には、審査協力のみならず水稻の実験当初から研究方法や考察方法に関して多くのご助言、叱咤激励を頂きました。心より感謝申し上げます。

実験全般にあたっては、鹿児島大学農学部准教授 館野隆之輔先生に化学的な見地からの多くのアドバイスを頂きました。

第3,4章をまとめるにあたり、(独)食品農業研究開発機構・野菜茶業研究所枕崎拠点の根角厚司拠点長、茶機能性チーム荻野暁子研究員を始め研究員の皆様、同機構・九州沖縄農業研究センター気象特性研究室の大場和彦室長(当時)と丸山篤史博士には大変ご迷惑をおかけいたしました。

第4,5章の圃場を提供していただきました鹿児島県さつま町の生産農家の皆様、JA さつまの木原成孝常務(当時)、井出之上利弘係長、宮之脇幸喜係長と北敏美係長と(株)富士通鹿児島インフォネットの皆様には多大なご配慮を頂きました。

第6章に用いたサツマイモの苗は、(株)さつま酒造鮫島吉博専務(当時、現・鹿児島大学農学部教授)に提供いただきました。また鹿児島大学農学部附属農場松元仁志技官(当時)・田浦一成技官を始め技術職員の皆様には、圃場の整備等で大変ご迷惑をおかけいたしました。

また、各人の研究が多忙であるにも関わらず、私の博士論文研究のお手伝いをしていただきました、鹿児島大学農学部環境情報システム学 石黒研究室の卒業生、在校生の皆様には、大変お世話になりました。

以上のお世話になりました諸先生方・諸学兄の皆様のご助言とご支援に深く感謝しつつ、今後さらに、日本の農業生産性向上に寄与する研究に邁進していきたいと思っております。

最後に私をここまで育ててくれ、常に暖かい声援を送ってくれた両親に心から感謝いたします。

平成 22 年 2 月

石川 大太郎

## 博士論文要旨

農作物の生育状況を常時把握することは肥培管理を行う上で、極めて重要であり、従来は経験に基づいて行われてきたところが多い。しかし、近年の地球温暖化に伴う急激な気象変化は、従来の勘や経験に頼った肥培管理方法では対応が困難となっている。しかも、持続的農業の必要性から、肥培管理の再構築の重要性は益々高まっている。これらを背景として、鹿児島県の主要な農作物である茶、サツマイモと水稻に対して、非破壊・非接触の特徴を有するリモートセンシング手法を用いて生育・品質推定手法の開発を行い、新しい肥培管理方法の構築に供することを目的として研究を行った。

研究は、気象条件、肥培管理等が各作物の生育に及ぼす影響について、作物の葉の分光反射特性を計測し、葉面積、葉成分(葉緑素、アミノ酸、窒素含有率等)との関係を検討する基礎実験と、得られた指標を基に分光画像の解析を行い、リモートセンシングの実用化に向けての実証実験よりなる。

茶樹の新芽の生育量と葉内窒素含有率に対しては 770nm と 660nm の波長を用いた正規化指標、 $ND_{770,660}=(R_{770}-R_{660})/(R_{770}+R_{660})$  が有効であり、一方、荒茶品質判定の基準となっている AF 値(アミノ酸と繊維の割合)に対しては 710nm と 520nm の  $ND_{710,520}$  を用いると推定は可能であった。この  $ND_{710,520}$  は、摘採期付近になると減少し、それ以後は上昇する傾向にあるため品質面からの荒茶の摘採期の推定がリモートセンシングにより可能であることを定量的に示した。さらに、710nm と 520nm の分光画像を合成した  $ND_{710,520}$  画像のヒストグラム変化から圃場における最適摘採日を決定できることを明らかにした。

一等米・二等米圃場を判定するため、各圃場の草丈・分けつ数、葉緑素濃度、分光反射特性の経時変化を調査した。葉緑素値(SPAD)は生育初期から等級間に差異を生じることを明らかにした。また、770nm と 660nm の反射率を用いた正規化指標、 $ND_{770,660}$  値は SPAD 値と高い正の相関関係が認められ、非接触状態で広範囲に測定できるリモートセンシングの有効性を見いだした。770nm と 660nm の分光画像による  $ND_{770,660}$  画像の解析により、ヒストグラムの最頻値と分散分析により一等米圃場と二等米圃場を出穂期以後より判別できることが示された。

葉が匍匐型に展開するサツマイモでは、葉面積、葉内窒素含有率のいずれも塊根部重量と相関関係を有することを明らかにした。また、710nm と 510nm の反射率を用いた正規化指標、 $ND_{710,510}$  は葉面積と有意な負の相関関係を示し、 $ND_{770,660}$  と  $ND_{530,510}$  は葉内窒素含有率の推定に有効であることを明らかにした。

以上、農作物の生育ならびに品質推定を非破壊・非接触で行う近接リモートセンシング手法の開発とその実用化を目指した本研究は、作物の生育段階や生育状況に応じて作物体からの反射光の特異性を抽出できることを明らかにし、品質を重視した茶の摘採時期の決定や一等米・二等米圃場の出穂期以降の非破壊的な判定は、肥培管理面への有効な情報を与えるものである。またサツマイモの葉面積・葉内窒素含有率をリモートセンシングで測定することによる塊根部重量の推定は、本研究の匍匐型作物や地下茎作物への応用の可能性を導くものと考えられる。

## Summary

It is important to understand the growth situation of crops for the manuring practice. However, a rapid weather change according to the global warming in recent years is difficult in the method of the manuring practice of dependence on the experience. Moreover, the importance of the reconstruction of the manuring practice has risen more and more because of the necessity of the sustainable agriculture.

This study was carried out to develop growth and quality estimation methods using proximal remote sensing that had the feature of nondestructive and noncontact, finally to contribute of the manuring practice method for tea, the sweet potato, and paddy rice that was the main crop in Kagoshima prefecture.

It was shown to be able to estimate the nitrogen content and growth quantity per leaves with  $ND_{770,660}$  index that used the wavelength of 770 nm and 660 nm. Moreover, it was shown the change of the AF value was to prospect with  $ND_{710,520}$ . Especially, the  $ND_{710,520}$  index value has decreased during harvest period, and after increase of the value was confirmed.

Mode of the  $ND_{770,660}$  image ( $ND_{770,660}MAX$ ) indicated the possibility that nitrogen content on the field was able to be presumed. The result was suggested that the  $ND_{ij}$  index was effective for the manuring practice of the tea plant. Moreover, it was shown that the  $ND_{710,520}MAX$  and the kurtosis of  $ND_{710,520}$  image becomes an effective indicator for the decision of optimum harvest period.

To judge the paddy rice field such as the 1st and 2nd grade, a change of the plant length, the tiller number, the density of chlorophyll and the spectral reflectance of each field were investigated with growing period. SPAD value was difference from the first stage of growth between grades. Between SPAD value and  $ND_{770,660}$  index was confirmed positive correlation,  $ND_{770,660}MAX$  of the  $ND_{770,660}$  image of the 1st grade field rose to heading, and it was decreased afterwards. The distribution of the  $ND_{770,660}MAX$  in the field was examined by RMSE, the RMSE of 2nd grade field was more widely than first grad field. These result were shown that it was able to estimate the grade from the heading by  $ND_{770,660}MAX$  and RMSE of the field.

The result of the sweet potato with the creeping type leaves, it was clarified to have correlation among weight of the tuberous root, the leaf area and the nitrogen content in leaves. Moreover, it was confirmed that  $ND_{710,510}$  derived from spectral reflectance of 710 nm and 510 nm showed a significant negative correlation to the leaf area, and  $ND_{770,660}$  and  $ND_{530,510}$  were effective for the estimate of the nitrogen content in the leaves.

Therefore, the decision of optimum harvest period for tea plant and judgment of grade after the heading derived from proximal remote sensing method is given the effective information on reconstruction of manuring practice. Moreover, it is shown nondestructive estimation of weight of the tuberous root for the sweet potato is able to apply to the other crops of the creeping and tuber type.