

委託試験成績（平成26年度）

担当機関名 部・室名	千葉県農林総合研究センター 水稲・畑地園芸研究所・水稲温暖化対策研究室																									
実施期間	平成26年4月～27年3月																									
大課題名	I 大規模水田営農を支える省力・低コスト技術の確立																									
課題名	無人ヘリコプタを利用した生育量の計測技術の評価																									
目的	生育情報測定装置を搭載した無人ヘリによって植生指数（以下、NDVI）を計測し、植生指数から推定される生育量が実際の生育量に即しているか、また、追肥法を決定するための生育指標として、NDVI が有用であるか検証する。																									
担当者名	水稲・畑地園芸研究所 水稲温暖化対策研究室 研究員 望月 篤																									
<p>1. 試験場所 千葉県千葉市緑区刈田子町 千葉県農林総合研究センター水稲・畑地園芸研究所 水稲温暖化対策研究室圃場</p> <p>2. 試験方法</p> <p>(1) 本年度試験の概要 平成25年度試験の結果から、幼穂形成期頃のNDVIと稈長や粒数との相関が高く、効率的に追肥の施用法を決定する上でNDVIが有用であると考えられた。 このため、本年度は、以下の5試験を行った。 試験1：NDVIと生育量の関係性の評価 試験2：NDVIを生育指標とした追肥法の実証 試験3：土性の違いがNDVIと生育量との関係に及ぼす影響についての評価 試験4：撮影条件の違いが取得するNDVIに与える影響についての評価 試験5：NDVI取得にかかる作業時間についての評価</p> <p>(2) 試験1：NDVIと生育量の関係性の評価 平成25年度と同様に幼穂形成期頃のNDVIと生育量、及び稈長や粒数との関係を検証した。</p> <p>1) 試験区 供試品種：「ふさおとめ」、「ふさこがね」、「コシヒカリ」 土性：壤土 移植期：4月10日、4月23日、5月14日、6月3日（4処理） 基肥窒素量：3kg/10a(全ての移植期)、0kg/10a(4月23日移植のみ)、 1.5kg/10a(5月14日、6月3日移植のみ) 6kg/10a(4月23日移植のみ) 追肥窒素量：3kg/10a施用（出穂21～14日前頃施用） 反復はなし</p> <p>2) 耕種概要</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>播種日 (月/日)</th> <th>移植日 (月/日)</th> <th>基肥窒素量 (kg/10a)</th> <th>追肥時期 (出穂前日数)</th> <th>追肥窒素量 (kg/10a)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3/15</td> <td>4/10</td> <td>3</td> <td>20～16</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>4/2</td> <td>4/23</td> <td>0、3、6</td> <td>21～17</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>4/23</td> <td>5/14</td> <td>1.5、3</td> <td>18～15</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>5/20</td> <td>6/3</td> <td>1.5、3</td> <td>17～14</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table> <p>3) 調査方法 ア 無人ヘリコプタによるNDVIの撮影</p>		播種日 (月/日)	移植日 (月/日)	基肥窒素量 (kg/10a)	追肥時期 (出穂前日数)	追肥窒素量 (kg/10a)	3/15	4/10	3	20～16	3	4/2	4/23	0、3、6	21～17	3	4/23	5/14	1.5、3	18～15	3	5/20	6/3	1.5、3	17～14	3
播種日 (月/日)	移植日 (月/日)	基肥窒素量 (kg/10a)	追肥時期 (出穂前日数)	追肥窒素量 (kg/10a)																						
3/15	4/10	3	20～16	3																						
4/2	4/23	0、3、6	21～17	3																						
4/23	5/14	1.5、3	18～15	3																						
5/20	6/3	1.5、3	17～14	3																						

(ア) 供試機械名

無人ヘリコプタ (ヤンマーヘリ&アグリ社 AYH-3 高高度飛行可能タイプ)
搭載カメラ 2眼方式デジタルカメラ

(農研機構 中心波長: 赤 635nm、近赤外 820nm、半値幅: 約 80nm
CCD 実行画素数: 約 140 万画素、画角: 長辺方向 69.4 度 短辺方向 54.2 度)

(イ) 撮影方法

6月21日及び7月7日に、無人ヘリコプタに搭載した生育情報測定装置で試験区を約50m上空から撮影し、50cmメッシュのNDVIを算出した。

イ 生育調査

(ア) 生育調査 NDVI の調査時 (6月21日及び7月7日)

各試験区の草丈、茎数、葉色、葉面積指数、稲体の地上部乾物重を調査した。

(イ) 成熟期

籾数、稈長、倒伏程度、収量を調査した。

(3) 試験2: NDVI を生育指標とした追肥法の実証

平成25年度の試験で得たNDVIと生育量との関係を基に、幼穂形成期頃のNDVIを指標に追肥の施用方法を変えた実証区を設け、本技術導入の効果を検証した。

1) 試験区

供試品種: 「コシヒカリ」

土性: 壤土

移植期: 4月10日、4月23日 (2処理)

基肥窒素量: (4月10日移植) 3kg/10a、(4月23日移植) 0、3、6kg/10a

追肥窒素量: (実証区) 幼穂形成期-4~+2日のNDVIが、

0.75以下 : 4kg/10a(出穂17日前に施用)

0.75~0.82 : 3kg/10a(")

0.82以上 : 1.5kg/10a(出穂12日前に施用)

(対照区) 3kg/10a(出穂18~17日前施用)

※ 対照区は、試験1の試験区を兼ねる

反復はなし

2) 栽培概要

播種日 (月/日)	移植日 (月/日)	基肥窒素量 (kg/10a)	追肥時期 (出穂前日数)	追肥窒素量 (kg/10a)	
3/15	4/10	(実証区)	3	17	3
		(対照区)	3	17	3
4/2	4/23		0	18	4
		(実証区)	3	12	1.5
			6	12	1.5
		(対照区)	0、3、6	18	3

注1) 実証区のNDVIは、4/10移植: 0.79(幼穂形成期+2日)、4/23移植基肥0kg/10a: 0.73(幼穂形成期後-4日)、3kg/10a: 0.83(幼穂形成期後-4日)、6kg/10a: 0.84(幼穂形成期後-4日)

2) 実証試験の慣行区は検証試験の試験区と同じ

3) 調査方法 試験1と同じ

(4) 試験3: 土性の違いがNDVIと生育量との関係に及ぼす影響についての評価

土性が異なる場合、NDVIに基づいた追肥の施肥方法も異なると考えられる。このため、土壌条件の異なる試験区(壤土、粘土及び砂壤土)を設け、幼穂形成期頃のNDVIと生育量(稈長や籾数等)との関係を調査した。

1) 試験区

供試品種: 「コシヒカリ」

土性: 砂壤土、壤土、粘土 (3処理)

反復はなし

2) 栽培方法

移植期：4月23日

窒素施用量：基肥 3kg/10a、追肥 3kg/10a 施用（追肥は出穂 16 日前に施用）

3) 調査方法 試験 1 と同じ

(5) 試験 4：撮影条件の違いが取得する NDVI に与える影響についての評価

取得する NDVI の再現性について検証するため、太陽高度の異なる時間に 3 回（6 月 21 日 9 時、11 時、13 時）、試験 1 の各試験区を撮影し、太陽の位置によらず取得する各試験区の NDVI の値に及ぼす影響を調査した。

(6) 試験 5：NDVI 取得にかかる作業時間についての評価

NDVI を取得するための作業時間を調査し、慣行栽培において追肥の施用法を決定するために用いられている草丈・茎数・葉色の調査にかかる時間と比較した。

1) NDVI 取得にかかる作業時間の算出方法

20a の圃場に対して、4 回（6 月 21 日に 3 回（9 時、11 時、13 時）、7 月 7 日に 1 回（10 時）撮影し、それぞれの NDVI の取得に要した人数及び作業時間を算出した。なお、作業時間は、ヘリの浮上から、撮影、着陸までの実作業時間とし、ヘリの整備・点検等の準備時間は含めなかった。

2) 草丈・茎数・葉色の調査にかかる作業時間の算出方法

10a の圃場において、幼穂形成期の「コシヒカリ」30 株（10 株×3 か所）の草丈、茎数及び葉色の調査を行い、調査に要した人数及び作業時間を算出した。

3. 試験結果

(1) 試験 1：NDVI と生育量の関係性の評価

1) NDVI と撮影時の生育量との関係

各品種の NDVI と、草丈、茎数、葉面積指数及び地上部乾物重との間には 1% 水準で有意な正の相関が認められたが、得られた NDVI を説明変数、各生育量を目的変数とする推定式の 2 乗平均平方根誤差は、草丈で 4.7~5.6cm、茎数で 44~132 本/m²、葉面積指数で 0.45~0.72 m²/m²、地上部乾物重で 96~204g/m²であった（表 1）。

これまで、追肥の施用法は、幼穂形成期の草丈、茎数、葉色を生育指標として、決定してきた。このため、NDVI でこれら生育量を推定することが出来れば、これまでの知見を用いて、NDVI から追肥の施用法を決定することができる。しかし、NDVI と葉色については有意な相関関係が認められず、草丈や茎数との間に相関関係は認められるものの、推定式から求めた推定値と実測値との誤差が大きかったことから、NDVI から草丈、茎数などの生育量を推定することは難しいと考えられる。

2) 幼穂形成期頃の NDVI と稈長及び籾数との関係

幼穂形成期-4~+2 日の NDVI が大きいほど、稈長が大きくなる傾向が認められた（図 1）。また、幼穂形成期-4~+2 日の NDVI が 0.8 を超える試験区では倒伏程度が大きかった（図 1）。

籾数は、「ふさおとめ」及び「ふさこがね」では、幼穂形成期-4~+2 日の NDVI が 0.78 以下の試験区で少なく、精玄米収量は 600kg/10a 以下であった（図 2）。また、「コシヒカリ」では、幼穂形成期-4~+2 日の NDVI が 0.8 を超える試験区では、籾数が多かったが、倒伏程度も大きくなり、登熟歩合及び千粒重が低下して精玄米収量が 600kg/10a 以下であった（図 2）。

以上のことから、幼穂形成期以降の栽培条件が同じ場合、幼穂形成期頃の NDVI は稈長及び籾数を推定する指標となると考えられる。

(2) 試験 2：NDVI を生育指標とした追肥法の実証

追肥として窒素 1.5kg/10a を出穂前 12 日に施用した実証区（幼穂形成期-4~+2 日の NDVI：0.83~0.84）では、追肥として窒素 3kg/10a を出穂前 18 日に施用した

対照区と比べ、稈が短くなって、倒伏程度も軽微となり、精玄米収量も 9~63kg/10a 多かった (表 2)。

一方、追肥として窒素 4kg/10a を出穂前 18 日に施用した実証区 (幼穂形成期 - 4 日の NDVI : 0.73) では、窒素 3kg/10a を出穂前 18 日に施用した対照区と比べ、精玄米収量が 21kg/10a 多かった (表 2)。

以上より、追肥の施用方法を決定する指標として NDVI は有用であると考えられる。

(3) 試験 3 : 土性の違いが NDVI と生育量との関係に及ぼす影響についての評価

粘土区は、砂壤土区と比べ、幼穂形成期 (幼穂形成期 - 4 日) の NDVI が 0.11 低かったが、稈は長く、籾数及び精玄米収量が多かった (表 3)。このことから、幼穂形成期以降の管理が同じであっても、土性によって幼穂形成期頃の NDVI と稈長及び籾数の関係は異なるので、追肥の施用方法を決定するための NDVI の基準値は土性に応じて設定する必要があると考えられる。

(4) 試験 4 : 撮影条件の違いが取得する NDVI に与える影響についての評価

撮影時の天候は、9 時 : 晴れ、風速 4.1m/s、11 時 : 曇、風速 4.3m/s、13 時 : 晴、風速 5.3m/s であったが、9 時、11 時、13 時に撮影した画像から算出した各試験区の NDVI に差は認められなかった (図 3)。このことから、晴天時であれば、9~16 時いずれの時間であっても生育評価に有効な NDVI を取得することができると考えられる。

(5) 試験 5 : NDVI 取得にかかる作業時間についての評価

NDVI の調査にかかる延べ作業時間は平均で 0.19 時間/10a であり、10a の圃場において 30 株 (連続した 10 株 × 3 か所) の草丈、茎数及び葉色の調査に要した延べ作業時間 0.57 時間/10a と比べ 66% 短かった (表 4)。

実測によって圃場内の生育量を把握するには、圃場ごとに連続した 10 株 × 3 か所以上の生育調査を行う必要がある。しかし、生産者は多数の圃場を管理しているため、それぞれの圃場の生育量を実測するのは労力的に困難であり、達観や、圃場内のごく一部の稲株の生育調査により圃場の生育状況を推定している状況にある。更に大区画圃場になると圃場全体の生育量を把握することはより困難になる。本技術では、一度の撮影で 60a 程度の圃場の NDVI が測定できるので、1 筆の圃場面積が大きい、もしくは、圃場が隣接しており、一度の撮影で多くの圃場の NDVI を取得することが出来れば作業時間はより短縮されると考えられる。

4. 主要成果の具体的データ

表 1 NDVI との相関係数、NDVI を説明変数とした推定式及びその二乗平均平方根誤差

品種		草丈 (cm)	茎数 (本/m ²)	葉色 (SPAD値)	葉面積 指数 (m ² /m ²)	地上部 乾物重 (kg/10a)
ふさおとめ	相関係数	0.91 **	0.83 **	-0.23	0.78 **	0.73 **
	推定式	11.51e ^{2.05x}	147.3e ^{1.67x}	-	0.014e ^{6.41x}	0.626e ^{7.65x}
	RMSE	4.7	44	-	0.49	148
ふさこがね	相関係数	0.89 **	0.74 **	-0.18	0.84 **	0.71 **
	推定式	9.57e ^{2.27x}	108.3e ^{1.99x}	-	0.004e ^{7.96x}	0.075e ^{10.07x}
	RMSE	5.6	132	-	0.45	204
コシヒカリ	相関係数	0.90 **	0.83 **	-0.22	0.77 **	0.74 **
	推定式	13.44e ^{2.01x}	125.6e ^{2.03x}	-	0.007e ^{7.16x}	0.514e ^{7.86x}
	RMSE	5.6	80	-	0.72	96

注 1) 草丈、茎数 : n=22、葉色 : n=18、葉面積指数、地上部乾物重 : n=14

2) **は 1% 水準で有意な相関があることを示す

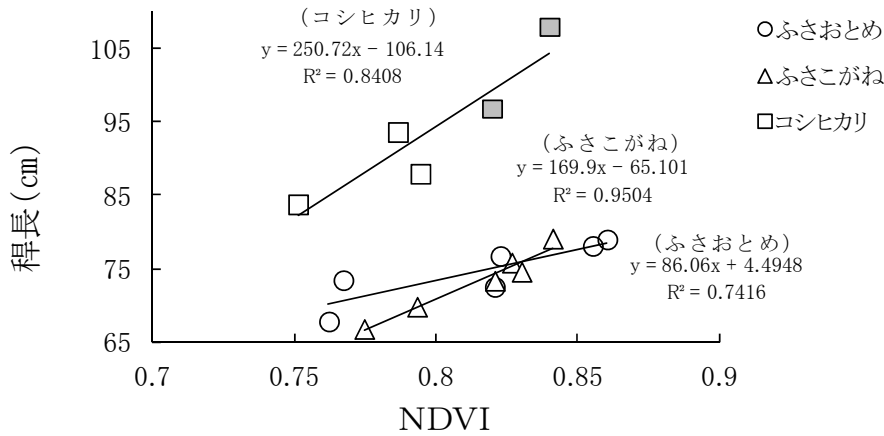


図1 追肥窒素を3kg/10a施用した試験区における幼穂形成期-4~+2日のNDVIと稈長との関係

注) 塗りつぶしのあるシンボルは倒伏程度4以上であることを示す(倒伏程度は0(無)~5(甚)の6段階評価)

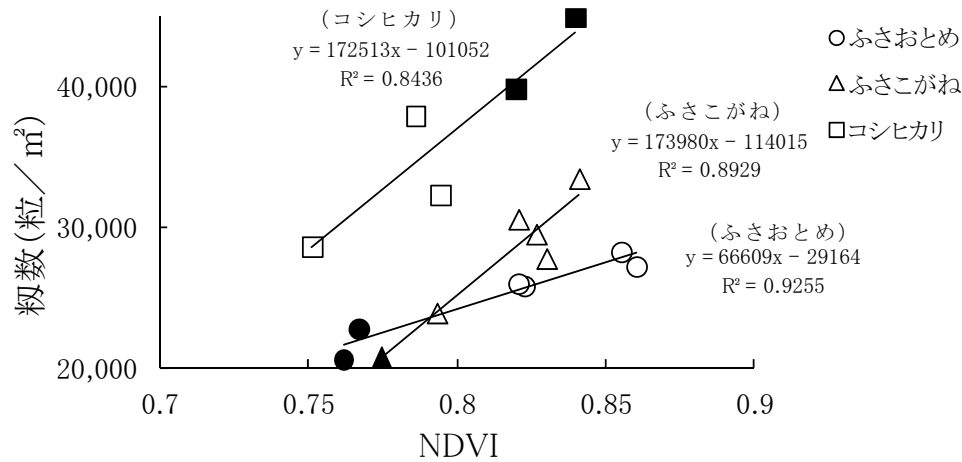


図2 追肥窒素を3kg/10a施用した試験区における幼穂形成期-4~+2日のNDVIと粒数との関係

注) 塗りつぶしのあるシンボルは精玄米収量が600kg/10a以下であることを示す

表2 追肥方法の違いが、「コシヒカリ」の稈長、粒数、倒伏程度、収量に及ぼす影響

基肥窒素量 (g/m ²)	移植日 (月/日)	試験区	幼穂形成期 -4~+2日のNDVI	追肥窒素量 (kg/10a)	稈長 (cm)	粒数 (千粒/m ²)	倒伏程度	精玄米収量 (kg/10a)
0	4/23	実証区	0.73	4.5(18)	90	33.3	2.5	652
		対照区	0.75	3(18)	84	28.6	2.0	631
3	4/10	実証区	0.79	3(18)	88	32.3	2.5	637
		対照区	0.79	3(18)	92	36.6	3.5	662
	4/23	実証区	0.83	1.5(12)	94	37.8	3.0	640
		対照区	0.82	3(18)	97	39.8	4.0	577
6	4/23	実証区	0.84	1.5(12)	98	38.5	4.0	560
		対照区	0.84	3(18)	108	44.9	4.5	551

注1) 追肥窒素量の()内は追肥の施用時期(出穂前日数)を示す

2) 倒伏程度は0(無)~5(甚)の6段階評価

3) 精玄米収量は水分15%換算

表3 土性の違いが、「コシヒカリ」の稈長、籾数、倒伏程度、収量に及ぼす影響

土性	幼穂形成期 +1日の NDVI	草丈 (cm)	茎数 (本/m ²)	葉色 (SPAD 値)	稈長 (cm)	籾数 (千粒/ m ²)	倒伏 程度	精玄米 収量 (kg/10a)
砂壤	0.72	65	580	32.6	77	28.7	0.0	468
壤土	0.68	63	549	33.2	88	31.2	0.5	548
粘土	0.61	57	490	36.8	90	30.4	0.5	559

- 注1) 倒伏程度は0(無)～5(甚)の6段階評価
 2) 精玄米収量は、水分15%換算

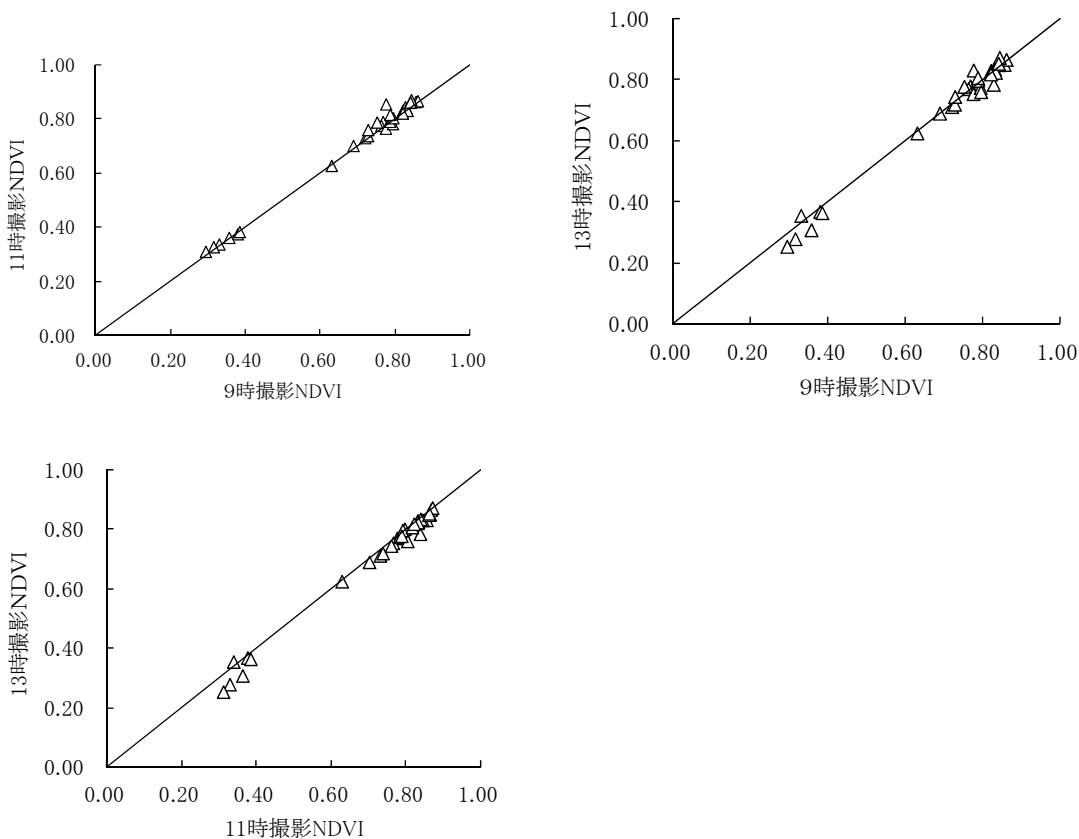


図3 異なった時間に取得したNDVI相互の関係

注) NDVIの取得日:6月21日

表4 NDVIの測定に要した作業時間

調査項目	調査日	調査時	圃場面積 (a)	作業人数 (人)	作業時間 (時間)	延べ作業時間 (時間/10a)
NDVI	6月21日	9時	20	2	0.07	0.14
		11時			0.11	0.22
		13時			0.08	0.17
	7月7日	10時	20	2	0.12	0.24
	平均		20	2	0.09	0.19
草丈・茎数・葉色	6月24日		10	2	0.28	0.57

注) 「草丈・茎数・葉色」は幼穂形成期を迎えた「コシヒカリ」30株(10株×3地点)にて、草丈、茎数、葉色を測定するのに要した時間

5. 経営評価

本技術の導入により、短い期間に各圃場の NDVI を取得し、NDVI に応じて圃場ごとに追肥の施用方法を変えることにより、これまで各圃場の生育状況を把握するための時間が確保できず、全ての圃場の追肥施用量や施用時期を均一に行う栽培体系と比べ、生育過多な圃場では、倒伏程度が軽減し、生育不足な圃場では収量が増加することが期待できる。

6. 利用機械評価

NDVI の測定に要した延べ作業時間 0.19 時間/10a であり、10a の圃場で 30 株（10 株×3 か所）の生育調査に要した時間と比べ 66% 少なかった。また、晴天時においては 9 時以降の太陽高度が保てている 9～16 時であれば、生育評価に有効な NDVI を取得することができると考えられる。

7. 考察

平成 25 年度、平成 26 年度試験ともに幼穂形成期の NDVI と稈長や粒数との相関が高かったことから、NDVI が追肥の施用法を決定する上で有用であると考えられた。しかし、幼穂形成期頃の草丈や茎数、葉色等これまで追肥の決定に用いてきた生育指標を NDVI から推定することは困難であった。したがって、土性等、栽培条件や品種ごとに追肥の施用方法を決定するための NDVI の基準値をそれぞれ設定する必要があると考えられる。

8. 問題点（と次年度の計画（削除できないか問い合わせ中））

本測定機器は、生産者に普及している薬散用の無人ヘリコプタに搭載することが出来ないため、新たに専用の無人ヘリコプタを購入する必要がある。また、50m 程度の上空から撮影するため、空港近くなど、撮影の出来ない圃場が存在する。また、薬散用の無人ヘリコプタの免許では本測定機を搭載した無人ヘリコプタの操縦はできない。無人ヘリコプタによる本測定機の利用を普及させるためには、生産者がすでに装備している無人ヘリコプタでの利用が可能となるようにする必要があると考えられる。

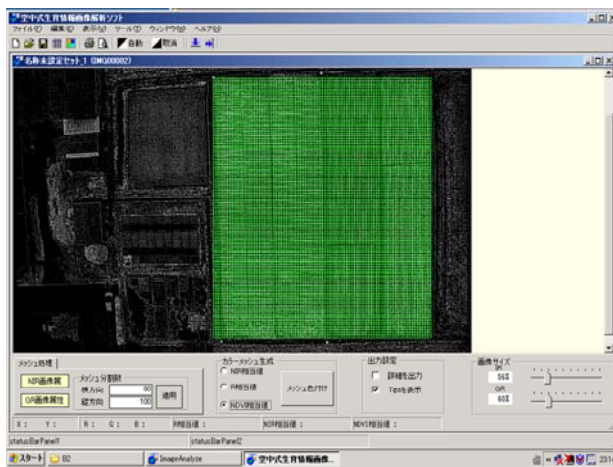
9. 参考写真



NDVI を搭載した無人ヘリコプタ

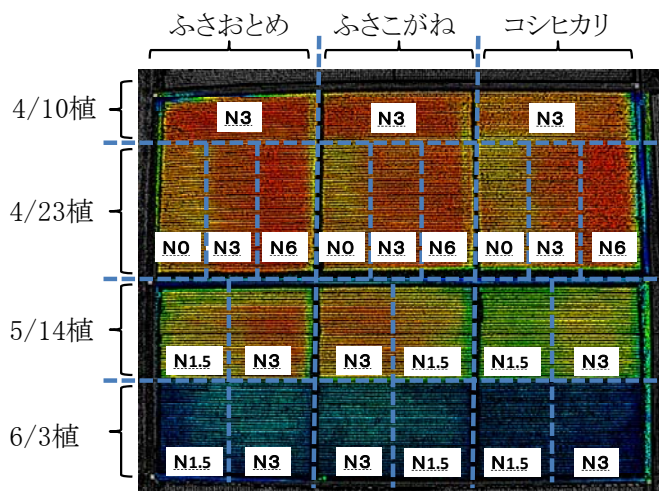


画像データの取得
高度 50m 程度から撮影



撮影した画像

専用のソフトを用い、画像内で NDVI の必要な圃場範囲を指定し、各メッシュの NDVI を算出する



取得した NDVI 画像

注) N○の○は、基肥の窒素施用量(kg/10)を示す

