

委託試験成績（令和5年度）

担当機関名 部・室名	栃木県農業試験場 研究開発部 水稻研究室																																										
実施期間	令和04年度～05年度、新規開始																																										
大課題名	V 情報処理等先端技術の活用による高生産システムの確立																																										
課題名	リモートセンシングによる栃木県オリジナル水稻品種の生育診断指標値の策定及び現地ほ場における衛星データ・連動農機の精度評価																																										
目的	<p>近年、稲作経営の大規模化が進み広範囲のほ場管理が必要とされる一方で、肥料高騰に対応するため、過剰施肥を防止する観点からリモートセンシングによる生育診断技術及び連携農機の活用が求められている。令和2～3年度、ヤンマーアグリジャパン(株)との共同研究において、ドローン搭載マルチスペクトルカメラによる栃木県オリジナル水稻品種「とちぎの星」の NDVI 値及び実測した葉色等のデータを比較したところ、両年度とも幼穂形成期における NDVI 値と生育診断値(葉色(カラースケール)×茎数値)との間に高い相関がみられた。</p> <p>令和4年度は「とちぎの星」について NDVI 値等による生育診断指標値を作成し、現地ほ場においては、今後導入が期待される衛星によるセンシングデータとドローン搭載マルチスペクトルカメラによる NDVI 値等とを比較し、その精度評価を行う。さらに、得られたデータを基に施肥設計を作成し、次年度はデータ連動農機による施肥を行い、その効果を検証する。</p>																																										
担当者名	研究開発部水稻研究室 技師 菅原 夏紀																																										
1. 試験場所	栃木県農業試験場 ほ場（宇都宮市瓦谷町） 3a 現地農家ほ場（高根沢町花岡） 47.4a																																										
2. 試験方法	<p>窒素施肥量を変えたグラデーションほ場を設置し、生育量等（草丈、茎数、葉色（カラースケール、SPAD）、窒素含有率、草丈×茎数、葉色（カラースケール、SPAD）×草丈、葉色（カラースケール、SPAD）×茎数、葉色（カラースケール）×草丈×茎数、葉色（SPAD）×草丈×茎数）と NDVI 値等の相関比較を行う。現地ほ場においては、上記項目に衛星データも追加し相関比較を行う。</p> <p>(1) 供試機械名 ドローン搭載マルチスペクトルカメラ（P4 Multispectral）</p> <p>(2) 試験条件</p> <p>ア. 栃木県農業試験場 ほ場（宇都宮市瓦谷町） 以下、本場</p>																																										
	<table border="1"> <tr> <td>品種名</td> <td colspan="3">とちぎの星</td> </tr> <tr> <td>(7)圃場条件</td> <td colspan="3">3a 厚層多腐植質黒ボク土、排水良好</td> </tr> <tr> <td>(イ)栽培等の概要</td> <td>R3</td> <td>R4</td> <td>備考</td> </tr> <tr> <td>播種</td> <td>4月19日</td> <td>4月15日</td> <td>播種量130g/箱手巻き、薬剤消毒、平置き出芽法</td> </tr> <tr> <td>耕起・碎土、整地</td> <td colspan="2">4月中旬</td> <td>ロータリ耕起</td> </tr> <tr> <td>代掻き(荒中代)</td> <td colspan="2">4月下旬</td> <td>ドライブハロー</td> </tr> <tr> <td>代掻き(植代)</td> <td>5月7日</td> <td>5月7日</td> <td>ドライブハロー</td> </tr> <tr> <td>施肥(基肥)</td> <td>5月7日</td> <td>5月7日</td> <td>基肥窒素 0.0、0.1、0.4、0.7kg/a</td> </tr> <tr> <td>施肥(追肥)</td> <td>7月19日</td> <td>7月16日</td> <td>追肥窒素 0.3kg/a</td> </tr> <tr> <td>移植</td> <td>5月12日</td> <td>5月11日</td> <td>22.2株/m<sup>2</sup>、4本/株、手植え</td> </tr> </table>			品種名	とちぎの星			(7)圃場条件	3a 厚層多腐植質黒ボク土、排水良好			(イ)栽培等の概要	R3	R4	備考	播種	4月19日	4月15日	播種量130g/箱手巻き、薬剤消毒、平置き出芽法	耕起・碎土、整地	4月中旬		ロータリ耕起	代掻き(荒中代)	4月下旬		ドライブハロー	代掻き(植代)	5月7日	5月7日	ドライブハロー	施肥(基肥)	5月7日	5月7日	基肥窒素 0.0、0.1、0.4、0.7kg/a	施肥(追肥)	7月19日	7月16日	追肥窒素 0.3kg/a	移植	5月12日	5月11日	22.2株/m <sup>2</sup> 、4本/株、手植え
品種名	とちぎの星																																										
(7)圃場条件	3a 厚層多腐植質黒ボク土、排水良好																																										
(イ)栽培等の概要	R3	R4	備考																																								
播種	4月19日	4月15日	播種量130g/箱手巻き、薬剤消毒、平置き出芽法																																								
耕起・碎土、整地	4月中旬		ロータリ耕起																																								
代掻き(荒中代)	4月下旬		ドライブハロー																																								
代掻き(植代)	5月7日	5月7日	ドライブハロー																																								
施肥(基肥)	5月7日	5月7日	基肥窒素 0.0、0.1、0.4、0.7kg/a																																								
施肥(追肥)	7月19日	7月16日	追肥窒素 0.3kg/a																																								
移植	5月12日	5月11日	22.2株/m <sup>2</sup> 、4本/株、手植え																																								

除草・病害虫防除	—	5月18日	トップガンR 1kg/10a
	5月20日	—	トップガンGT 1kg/10a
	5月24日	—	トレボンEW
	—	5月26日	モゲトン粒剤 3kg/10a
	—	5月30日	トレボン粒剤 2kg/10a
	6月1日	—	モゲトン粒剤 3kg/10a
	6月17日	—	スミチオン乳剤
	7月21日	7月16日	モンガリット粒剤 3kg/10a
	8月2日	—	ブラシンジョーカー
	—	8月3日	スタークル
	—	8月5日	ブラシンジョーカー
	8月6日	—	ブラシンフロアブル
	—	8月19日	トレボンEW
	8月20日	—	スタークル

イ. 現地農家ほ場（高根沢町花岡）

品種名	とちぎの星	
(ア) 圃場条件	47.4a 厚層多腐植質黒ボク土、水路からの水漏れにより排水不良	
(イ) 栽培等の概要	R4	備考
播種	4月15日	乾粳200g/箱
耕起・砕土、整地	4月下旬	ロータリ耕起
代掻き(荒中代)	4月下旬	ドライブハロー
代掻き(植代)	5月上旬	ドライブハロー
施肥(基肥)	5月上旬	基肥窒素0.7kg/a 側条施肥 SRコート101(住友)
移植	5月20日	19.0株/m <sup>2</sup> 植え付け本数 平均 4.4本
除草・病害虫防除	現地慣行	
収穫	9月26日	収量コンバイン
(ウ) 衛星データ取得方法	ザルピオフィールドマネージャー バイオマスマップ（葉面積指数：LAI）ゾーン1～5の五段階評価	

(3) 試験区の構成

表1 本場

区名	基肥量(kg/a)	追肥量(kg/a)
N0	0	0.3
N1	0.1	0.3
N4	0.4	0.3
N7	0.7	0.3

基肥のP205は2.0kg/a、K20は1.5kg/aで統一  
生育調査株数：1区30株×2反復

表2 現地ほ場

区名	
移植後30日	移植後45日～
A	A
B	B
C	E
D	F

基肥量は0.7kg/a（全量基肥）  
移植後30日時点で生育差のある地点に区を設置  
C、Dは次年度可変施肥の都合上取り止め、  
45日調査時新たにE、F設置  
生育調査株数：1区20株×2反復

表3 撮影日等

	本場			現地			
	撮影日	調査日	実測日	撮影日	調査日	実測日	衛星データ取得日
移植後30日	6/10	6/10	—	6/21	6/21	—	6/26
移植後45日	6/24	6/23	—	7/5	7/5	—	7/8
幼穂形成期	7/12	7/12	7/11	7/21	7/21	7/20	7/29
出穂期	—	8/2	8/2	—	8/15	8/13	—
成熟期	—	8/24	9/20	—	9/14	9/27	—

### 3. 試験結果

令和2年度は予備試験（機械植え、反復なし）、移植後30日調査は令和3年度はドローン配備時期の関係で移植後30日調査が未実施であることから、令和3～4年度における移植後45日、幼穂形成期のデータを用いて解析した。

#### (1) NDVI 値等と生育量等との関係（表4、図1～2）

移植後45日では、NDVI 値及びNDVI 値×植被率と全項目との間に相関がみられたが、葉色（カラスケール）、SPAD との相関はNDVI 値で高くなった。植被率は、茎数、葉色（カラスケール）、SPAD、葉色（カラスケール）×茎数値、葉色（SPAD）×茎数値との間に相関がみられなかった。

幼穂形成期になると、NDVI 値及びNDVI 値×植被率と草丈以外の全項目との間に相関がみられたが、植被率と草丈関連要素（草丈、草丈×茎数等）との間に相関はみられなかった。

以上のことから、「とちぎの星」の生育量の推定にはNDVI 値との関係が最適と考えられた。

#### (2) 目標収量および構成要素と生育診断指標値の策定

（表4、表5、図3、図4、図5、図6、図7、図8、図9）

総粒数と登熟歩合、千粒重との間に相関がみられ、総粒数 32,000 粒/m<sup>2</sup>以上ではどちらも低下して収量がばらつき、29,000 粒/m<sup>2</sup>以下では収量が低下する傾向がみられた。総粒数と精玄米の整粒率に相関はみられなかったが、総粒数と玄米タンパク質含有率には相関がみられ、目標総粒数に対する玄米タンパク質含有率は6.2%以下であった（図3、図4、図5、図6、図7、図8、図9）。

以上のことから、目標収量 650kg/10a を得るための最適総粒数は 30,000～31,000 粒/m<sup>2</sup>と判断され、その場合の穂数は 380～400 本/m<sup>2</sup>、登熟歩合 86～88%、千粒重 24.5～24.7 g、玄米タンパク質含有率は 6.2%以下であった（表5(1)）。

生育診断指標値には、両時期を通して総粒数との相関が安定して高くなった葉色（カラスケール、SPAD）×茎数値が最適と判断された（表4、図1、図2）。これにより、目標総粒数 30,000～31,000 粒/m<sup>2</sup>に対応する生育診断指標値を推定し、NDVI 値への読み替えを行った（表5(2)）。

#### (3) 現地ほ場における NDVI 値等と生育量等および衛星データ（ゾーン）との関係

（表6、図10、図11、図12）

移植後30日、45日では、NDVI 値と生育量等との相関はみられなかった。幼穂形成期ではNDVI 値と草丈、葉色（SPAD）、葉色（SPAD）×草丈値、葉色（SPAD）×茎数値との間に相関がみられた（表6、図10）。

全ての時期でNDVI 値等と衛星データ（ゾーン）の間に相関はみられなかった（表6、図11）。

衛星データは晴天時の撮影に限定されるため、調査・撮影日とデータ取得日が一致しなかったとも考えられるが、理由は判然としなかった。

#### 4. 主要成果の具体的データ

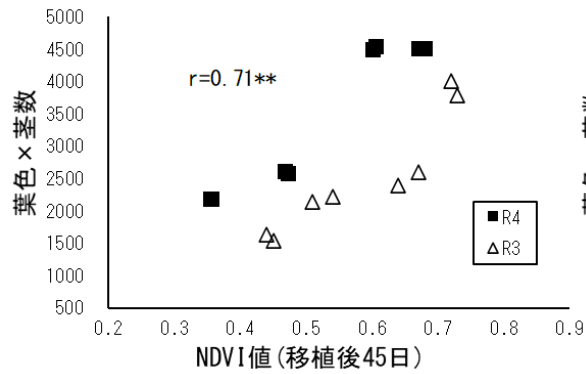


図1 NDVI値と葉色×茎数との関係（移植後45日）

rは相関係数、\*\*は1%水準で有意、n=16

※ 葉色はカラースケールで測定

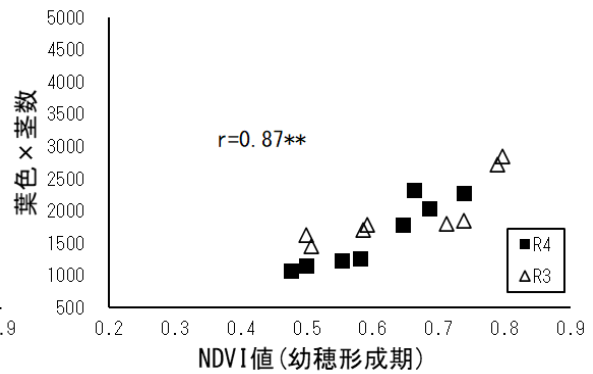


図2 NDVI値と葉色×茎数との関係（幼穂形成期）

rは相関係数、\*\*は1%水準で有意、n=16

※ 葉色はカラースケールで測定

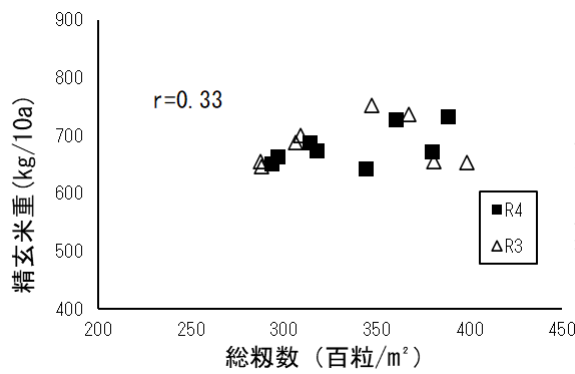


図3 総粒数と収量(精玄米重)との関係

rは相関係数、n=16

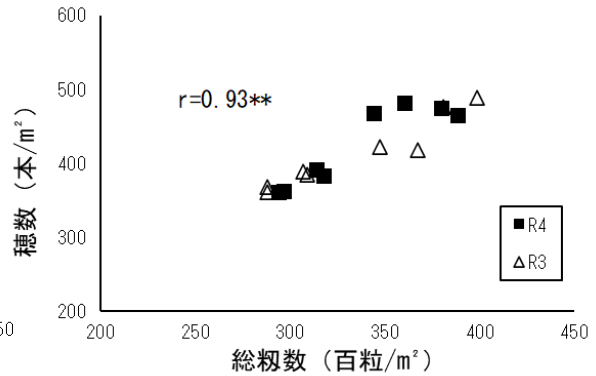


図4 総粒数と穂数との関係

rは相関係数、\*\*は1%水準で有意、n=16

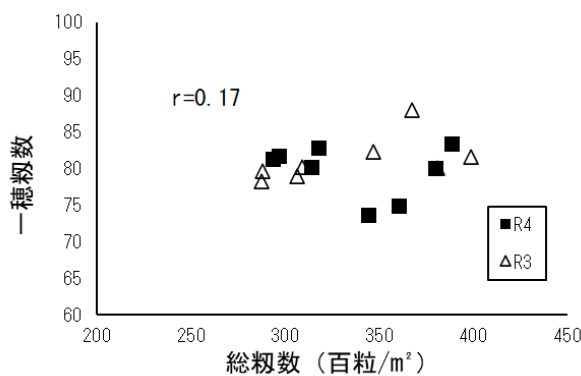


図5 総粒数と一穂粒数との関係

rは相関係数、n=16

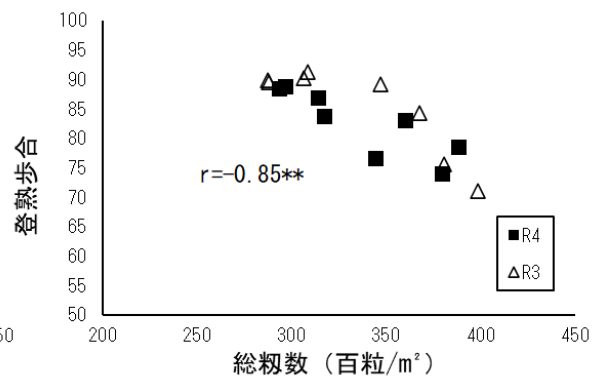


図6 総粒数と登熟歩合との関係

rは相関係数、\*\*は1%水準で有意、n=16

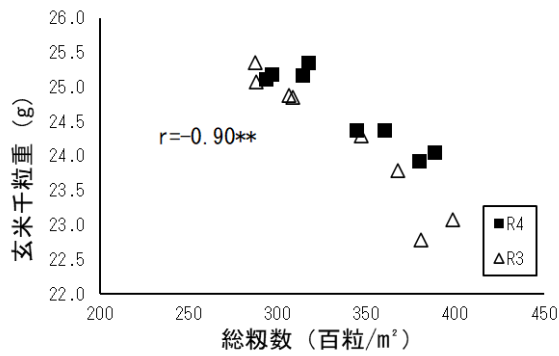


図7 総粒数と玄米千粒重との関係  
rは相関係数、\*\*は1%水準で有意、n=16

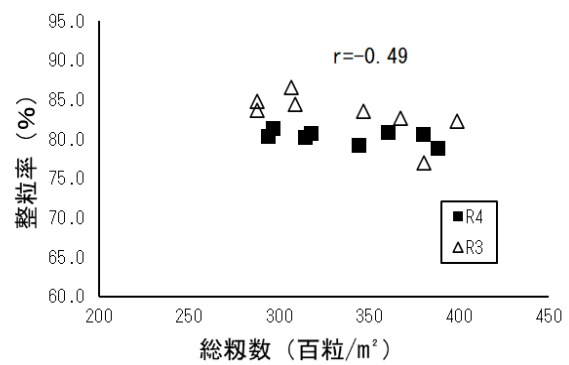


図8 総粒数と整粒率との関係  
rは相関係数、n=16

表4 NDVI値等と生育量等および総粒数との関係 (R3~R4)

	移植後45日				幼穂形成期			
	NDVI	植被率	NDVI × 植被率	総粒数	NDVI	植被率	NDVI × 植被率	総粒数
草丈	0.78 **	0.95 **	0.85 **	0.61 *	0.36	0.14	0.35	0.43
m茎数	0.72 **	0.34	0.66 **	0.80 **	0.83 **	0.65 **	0.81 **	0.85 **
葉色	0.67 **	0.22	0.57 *	0.82 **	0.80 **	0.87 **	0.83 **	0.75 **
SPAD	0.64 **	0.14	0.53 *	0.82 **	0.85 **	0.87 **	0.89 **	0.75 **
草丈 × 茎数	0.95 **	0.79 **	0.95 **	0.92 **	0.68 **	0.44	0.66 **	0.74 **
葉色 × 草丈	0.95 **	0.77 **	0.94 **	0.95 **	0.70 **	0.59 *	0.71 **	0.72 **
SPAD × 草丈	0.95 **	0.88 **	0.97 **	0.89 **	0.65 **	0.49	0.66 **	0.66 **
葉色 × 茎数	0.71 **	0.30	0.64 **	0.83 **	0.87 **	0.81 **	0.88 **	0.87 **
SPAD × 茎数	0.71 **	0.30	0.64 **	0.83 **	0.90 **	0.79 **	0.90 **	0.87 **
草丈 × 茎数 × 葉色	0.91 **	0.63 **	0.88 **	0.95 **	0.80 **	0.64 **	0.80 **	0.83 **
草丈 × 茎数 × SPAD	0.94 **	0.69 **	0.92 **	0.96 **	0.79 **	0.60 *	0.79 **	0.81 **
窒素含有率	0.84 **	0.85 **	0.85 **	0.83 *	0.72 **	0.76 **	0.76 **	0.56 **

注) \*\*は1%、\*は5%水準で有意、n=16

注) 葉色はカラスケールで測定

表5 「とちぎの星」の生育診断指標値

(1) 目標収量及び収量構成要素等 (栃木県農政部)

収量	650 kg/10a		
m <sup>2</sup> 当たり穂数	380	~	400 本
一穂粒数	78	~	79 粒
m <sup>2</sup> 当たり粒数	30,000	~	31,000 粒
登熟歩合	86	~	88 %
玄米千粒重	24.5	~	24.7 g

(2) 生育診断指標値 (22株/m<sup>2</sup>)

時期	茎数 (本/m <sup>2</sup> )	葉色	SPAD	葉色 × 茎数	SPAD × 茎数	NDVI値
最高分けつ期	560~600	3.2~3.4	35.8~36.9	1,750~2,050	20,000~22,200	0.46~0.48
幼穂形成期	450~470	2.7~2.8	29.6~30.8	1,200~1,350	13,300~14,500	0.53~0.55

注) 葉色はカラスケールで測定

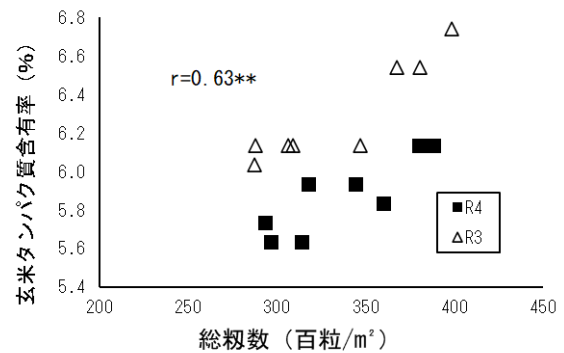


図9 総粒数と玄米タンパク質含有率との関係  
rは相関係数、\*\*は1%水準で有意、n=16

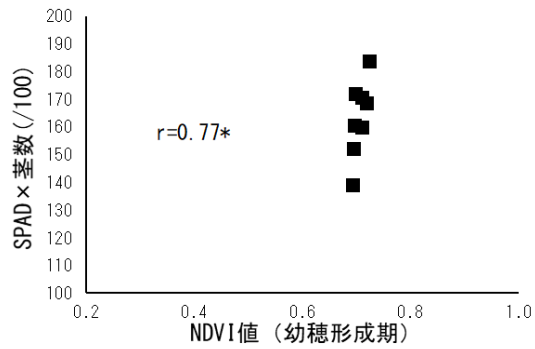


図10 NDVI値とSPAD×茎数との関係（幼穂形成期）  
rは相関係数、\*は5%水準で有意、n=8

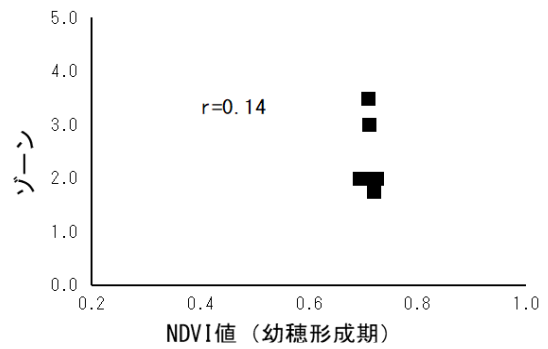
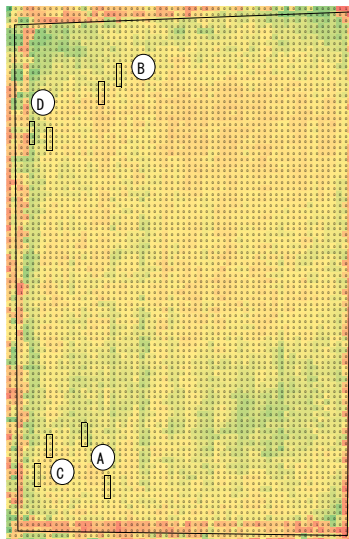
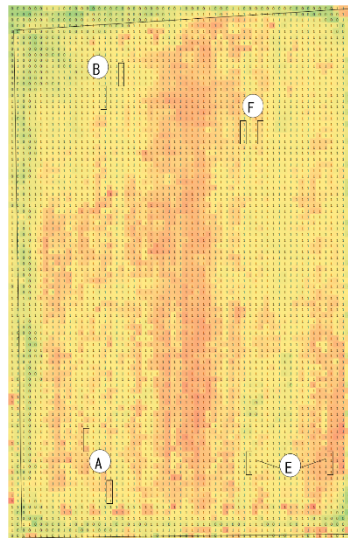


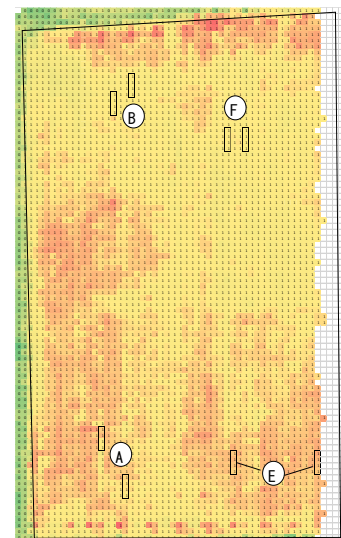
図11 NDVI値とゾーンとの関係（幼穂形成期）  
rは相関係数、n=8



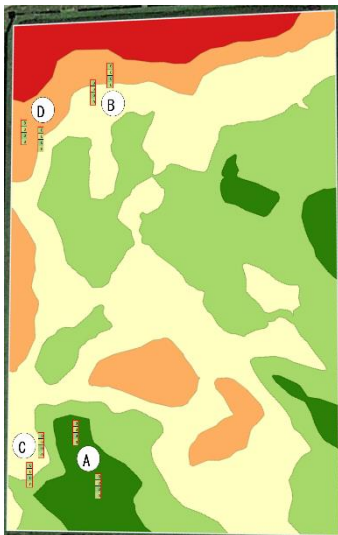
6月21日



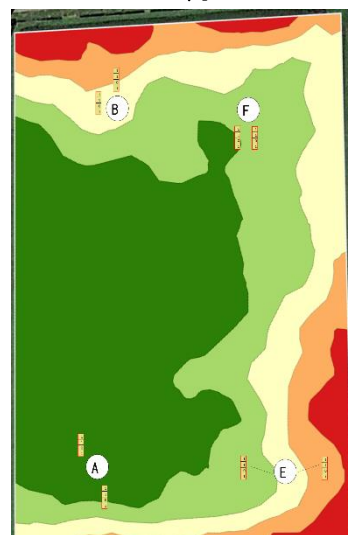
7月5日



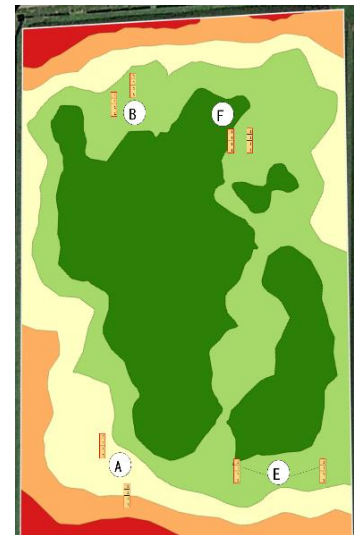
7月21日



6月26日



7月8日



7月29日

図12 生育時期別NDVI値(上)とゾーン(下)の推移  
(左：移植後30日、中央：移植後45日、右：幼穂形成期)

(参考) 左：NDVI値基準、右：ゾーン基準



表6 NDVI値等と生育量等および衛星データ（ゾーン）との関係（R4）

	移植後30日				移植後45日				幼穂形成期			
	NDVI	植被率	NDVI × 植被率	ゾーン	NDVI	植被率	NDVI × 植被率	ゾーン	NDVI	植被率	NDVI × 植被率	ゾーン
ゾーン	-0.12	-0.38	-0.19	-	0.05	-0.46	-0.04	-	0.14	0.05	0.19	-
草丈	0.40	0.37	0.45	0.37	-0.32	0.01	-0.27	-0.44	-0.79 *	0.34	-0.43	0.25
m茎数	-0.11	-0.17	-0.12	0.93 **	0.02	-0.27	-0.04	0.72 *	0.16	-0.05	-0.26	-0.29
葉色	-0.21	-0.60	-0.32	0.89 **	0.55	0.71 *	0.60	-0.31	0.33	0.13	0.51	0.56
SPAD	0.26	0.70	0.39	-0.82 *	0.48	0.55	0.52	-0.10	0.94 **	0.04	0.71 *	0.27
草丈 × 茎数	-0.05	-0.11	-0.04	0.91 **	-0.38	-0.39	-0.40	0.51	-0.11	0.07	-0.42	-0.21
葉色 × 草丈	0.06	-0.26	0.00	0.91 **	0.22	0.54	0.30	-0.49	0.05	0.23	0.32	0.57
SPAD × 草丈	0.57	0.81 *	0.70	-0.13	0.33	0.64	0.41	-0.41	0.83 *	0.17	0.69	0.41
葉色 × 茎数	-0.15	-0.25	-0.17	0.95 **	0.49	0.39	0.49	0.33	0.40	0.06	0.20	0.21
SPAD × 茎数	-0.09	-0.12	-0.08	0.91 **	0.40	0.29	0.40	0.30	0.77 *	-0.01	0.36	0.01
草丈 × 茎数 × 葉色	-0.09	-0.19	-0.10	0.94 **	0.31	0.47	0.35	0.03	0.18	0.16	0.08	0.27
草丈 × 茎数 × SPAD	-0.02	-0.05	-0.01	0.90 **	0.33	0.41	0.36	0.13	0.68	0.08	0.30	0.08
窒素含有率	-0.34	-0.42	-0.38	0.82 *	0.54	-0.08	0.44	0.57	-0.27	0.42	-0.10	-0.06

注) \*\*は1%、\*は5%水準で有意、n=8

注) 葉色はカラースケールで測定

表7 生育調査結果（R4）

ほ場	区名	移植後30日調査								移植後45日(最高分けつ期)調査									
		草丈 cm	茎数 本/m <sup>2</sup>	葉色	SPAD	葉色 × 茎数	窒素含有率 %	NDVI	植被率 %	ゾーン 1~5	草丈 cm	茎数 本/m <sup>2</sup>	葉色	SPAD	葉色 × 茎数	窒素含有率 %	NDVI	植被率 %	ゾーン 1~5
本場	N0	26.3	354	3.6	34.2	1291	3.68	0.11	0.35	-	38.5	597	3.7	38.7	2187	2.04	0.36	0.42	-
	N1	26.3	460	3.7	37.7	1691	4.06	0.18	0.35	-	42.0	689	3.8	39.8	2599	2.16	0.47	0.44	-
	N4	26.8	568	3.6	41.8	2070	4.43	0.25	0.37	-	45.5	975	4.6	43.3	4523	2.57	0.60	0.50	-
	N7	31.2	474	3.9	44.5	1852	4.59	0.29	0.35	-	51.0	856	5.3	45.7	4516	2.77	0.68	0.51	-
現地ほ場	A	34.3	272	4.4	44.0	1191	3.76	0.26	0.37	1.00	61.8	543	4.0	43.2	2179	2.11	0.60	0.52	1.13
	C(E)	33.8	312	4.7	43.2	1456	4.17	0.27	0.35	2.63	59.8	561	3.9	41.7	2172	2.48	0.59	0.51	3.00
	B	35.8	403	4.7	43.1	1873	4.38	0.28	0.37	3.50	62.4	566	3.7	38.5	2088	2.10	0.57	0.51	3.25
	D(F)	34.6	411	4.8	42.4	1968	4.42	0.23	0.34	3.75	64.4	515	3.9	38.4	1988	2.05	0.60	0.52	1.63

注) 葉色はカラースケールで測定

ほ場	区名	幼穂形成期調査								出穂期		
		草丈 cm	茎数 本/m <sup>2</sup>	葉色	SPAD	葉色 × 茎数	窒素含有率 %	NDVI	植被率 %	ゾーン 1~5	葉色	SPAD
本場	N0	67.2	437	2.6	30.0	1115	1.08	0.49	0.50	-	3.7	35.6
	N1	72.0	488	2.6	29.6	1248	0.99	0.57	0.51	-	3.6	34.7
	N4	51.7	595	3.2	32.4	1911	1.08	0.67	0.53	-	3.6	33.2
	N7	83.9	593	3.9	35.2	2303	1.14	0.70	0.54	-	3.8	33.5
現地ほ場	A	82.1	459	3.6	36.0	1655	1.21	0.71	0.53	3.25	3.2	31.6
	C(E)	79.5	475	3.4	37.0	1622	1.22	0.72	0.53	1.88	3.4	32.7
	B	81.8	494	3.3	33.6	1633	1.21	0.70	0.53	2.00	3.4	33.0
	D(F)	82.6	449	3.4	32.4	1520	1.26	0.69	0.53	2.00	3.3	31.8

注) 葉色はカラースケールで測定

表8 成熟期調査結果および収量構成要素、品質等（R4）

ほ場	区名	稈長 cm	穂長 cm	穂数 本/m <sup>2</sup>	倒伏程度	精玄米重 kg/a	1穂粒数 粒/穂	総粒数 百粒/m <sup>2</sup>	登熟歩合 %	千粒重 g	整粒率 %	タンパク質含有率 %
本場	N0	82.0	21.3	362.1	0.0	65.8	81.5	295.1	88.6	25.2	80.9	5.7
	N1	85.9	21.4	387.7	0.0	68.1	81.5	315.7	85.3	25.3	80.5	5.8
	N4	93.1	20.2	474.6	3.0	68.5	74.2	352.2	79.8	24.4	80.1	5.9
	N7	99.2	20.2	470.1	4.0	70.2	81.7	384.0	76.2	24.0	79.7	6.1

注) 精玄米重、千粒重は、網目1.80mm以上、水分は14.5%調整

注) タンパク質含有率はK社製AN-820（水分14.5%換算）により測定。

注) 整粒率S社品質判定機RGQ120Aにより調査

ほ場	区名	稈長 cm	穂長 cm	穂数 本/m <sup>2</sup>	倒伏程度	収穫量 (乾燥前) kg/47.4a	精玄米重(実収) kg/47.4a	反収 kg/10a
現地ほ場	A	97.6	19.4	423.3	0.0	3673.2	2983.0	62.9
	E	94.4	19.3	442.2	0.0			
	B	97.1	19.1	497.2	0.0			
	F	95.5	19.1	440.0	0.0			

注) 収穫量(乾燥前)は収量コンバインのメッシュデータ(生収量)を使用

## 5. 成果の普及

成果をとりまとめ、生育診断指標値を公表する。

## 6. 考察

「とちぎの星」の生育量の推定には NDVI 値との関係が最適と考えられた。現地ほ場における衛星データと NDVI 値の比較に関しては、衛星データによる生育量の把握は難しいことが示唆された。

## 7. 問題点と次年度の計画

NDVI 値の生育マップ結果によりほ場全体の生育差は認められたため、施肥設計を作成し、次年度はデータ連動農機による可変施肥を行い、その効果を検証する。

## 8. 参考写真



参考写真 収量コンバインによる収穫