

担当機関名、部・室名	栃木県農業試験場 開発研究部 水稻研究室
実施期間	令和4年度～5年度、継続
大課題名	IV 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	栃木県オリジナル水稻品種「とちぎの星」における可変基肥による収量向上及び化学肥料削減効果の検討
目的	<p>近年、経営の大規模化が進み広範囲のほ場管理と並行して、ほ場ごとの生育診断による収量や品質の向上、環境負荷軽減や、昨今の資材高騰への対応など課題の解決が求められている。本課題では、水稻栽培において、ICT農機により生育・収穫量を把握し可変施肥を行うことで収量向上及び化学肥料の削減を図る。</p> <p>令和4年度は、本県オリジナル水稻品種「とちぎの星」について各生育調査項目、NDVI値や衛星データにより生育量を把握し、収量コンバインによる収穫量マッピング機能の精度を検討した。</p> <p>令和5年度は、令和4年度に得られた生育データを基に、可変ブロードキャストを活用した基肥施肥により、生育・収量の均一性と化学肥料の削減を検証する。</p>
担当者名	研究開発部水稻研究室 技師 大田原有咲
<p>1. 試験場所 現地農家ほ場（高根沢町花岡） 47.4a</p> <p>2. 試験方法</p> <p>令和4年度の幼穂形成期のNDVI値（ドローン搭載マルチスペクトルカメラによる測定）を基に施肥設計を作成し、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> <p>令和4年度は移植後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が、幼穂形成期ではNDVI値と草丈、葉色（SPAD）、葉色（SPAD）×草丈値、葉色（SPAD）×莖数値との間に相関がみられた。その結果を踏まえ、令和5年度は幼穂形成期の生育調査に加え、出穂期調査及び成熟期調査を行う。</p> <p>(1) 供試機械名 トラクタ（ヤンマー EG782 Ecotra）、可変施肥ブロードキャスト（STAR GPS ナビキャスト MGL604P）、ドローン搭載マルチスペクトルカメラ（DJI MAVIC 2 PRO）、収量コンバイン（ヤンマー YH6135）</p> <p>(2) 試験条件</p> <p>ア. ほ場条件 礫質厚層多湿黒ボク土</p> <p>イ. 栽培等の概要</p> <p>品種名 とちぎの星</p> <p>播種 4月中旬 乾籾 200g/箱</p> <p>耕起・砕土・整地 4月中旬 ロータリ耕起</p> <p>代掻き（荒代） 4月20日 ドライブハロー</p> <p>代掻き（植代） 4月22日 ドライブハロー</p> <p>施肥 5月11日 スーパーSRコート（住友化学） （施肥量は試験区の構成を参照）</p> <p>移植 5月24日 16.5株/m<sup>2</sup>、植え付け本数平均3.0本</p> <p>除草・病虫害防除 現地慣行</p> <p>田植え同時 サキドリ 1キロ粒剤 1kg/10a</p> <p>6月1日 アクシズMX 1キロ粒剤 1kg/10a</p> <p>収穫 9月22日 収量コンバイン</p>	

ウ. 試験区の構成

表 1 基肥施肥

区名	基肥窒素量(kg/a)
可変施肥区	0.5, 0.7, 0.9
慣行区	0.7

肥料はスーパーSRコート  
(住友化学, 窒素21%) を使用  
現物換算で2.38, 3.33, 4.28(kg/a)

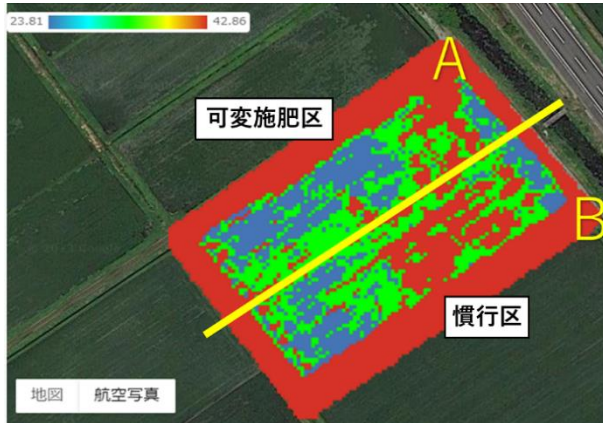


図 1 可変施肥マップ

表 2 調査日・撮影日等

	調査日	実測日	衛星データ 取得日	ドローン 撮影日	調査項目
幼穂形成期	7/21	7/19	7/16 7/24	7/20 7/27 7/31	草丈、茎数、葉色、SPAD、ドローン撮影、衛星データ
出穂期	8/10	8/9	8/10	—	葉色、SPAD、衛星データ
成熟期	9/7	9/24	—	—	稈長、穂長、穂数、倒伏程度、 玄米重、粒厚分布、タンパク含有率、整粒率

可変施肥区 慣行区

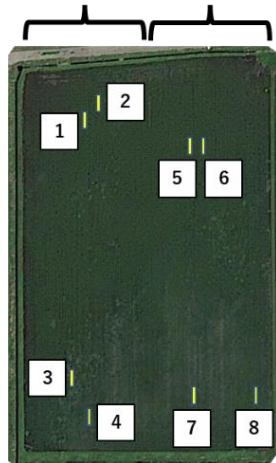


図 2 生育調査実施地点  
(調査株数は 1 区 20 株とした。)

## エ. 衛星データ取得方法

ザルビ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. 試験結果

#### (1) 可変施肥ブロードキャストの散布精度（表3、図3、図4、図5）

前年度の NDVI 値を基に施肥マップを作成した（図1）。可変施肥マップから算出した総散布量（理論値）は、可変施肥区で 77.4kg、慣行区で 78.9kg であった（表3）。ブロードキャストに搭載された重量計で測定された散布量は 155kg、ブロードキャストに残った肥料を回収し重量を測定して算出した散布量は 152kg であり、理論値との誤差はそれぞれ 0.84%、1.94% であった。散布後に取得した作業ログから、おおむね施肥マップ通りの場所に散布できたことが確認された（図3）。

ほ場にタライを設置して散布された肥料を測定し（図4）、10a 当たりの散布量の平均値を算出した結果、可変施肥区の散布予定量が多い地点（予定では現物 4.28kg）の散布推定量は 3.22kg、散布予定量が少ない地点（予定では現物 2.38kg）の散布推定量は 3.94kg、慣行区の散布推定量は 3.46kg となった（図5）。なお、作業ログとのかい離があり、タライを用いた肥料散布量の調査は誤差が大きいと考えられた。

#### (2) 幼穂形成期、出穂期の生育調査及びリモートセンシング結果（表4、表5、表6、表7、表8、図6、図7、図8）

生育調査は各水準4反復で調査を行った。幼穂形成期調査結果は、茎数、葉色、SPAD、葉色×茎数は可変施肥区で高い値となった（表5）。また、葉色、SPAD について、標準偏差が低くばらつきが少なかった。出穂期の葉色、SPAD についても、幼穂形成期と同様の結果となった（表7、表8）。

リモートセンシングは、衛星及びドローンにより行った。7月16日、24日に取得した衛星データ（ゾーン）について、可変施肥区で生育量の多いゾーン1の部分が少なくなった（図6）。また、令和4年と令和5年の衛星データ（ゾーン）について、生育ステージが近い日の画像を比較した結果、令和5年の可変施肥区では、ゾーン1及びゾーン5の面積が減少し、ゾーン4の割合が増加した（図7）。幼穂形成期（7月20日）、7月27日、7月31日にドローンによりセンシングした NDVI についても、可変施肥区において標準偏差が小さく、ばらつきが少なかった（表6、図8）。

#### (3) 成熟期調査及び収穫物調査（表9、表10、表11、図9）

倒伏について、慣行区で一部発生が認められたが、可変施肥区では認められなかった（表9）。収量コンバインで計測されたほ場全体の収量は、乾燥前籾重量で 4430.0kg であった。作成された収量メッシュマップ（図9）について、ほ場周縁部と区境を除き収量を比較すると、可変施肥区の方が平均値は高くなったが有意差はみられなかった。収穫の際にそれぞれの区で、籾を約 2 kg×10 サンプルずつサンプリングし、玄米千粒重、整粒歩合、タンパク質含有率の調査を行った。その結果、可変施肥区において、玄米の粒厚、千粒重、整粒率が慣行区と比べて高い値となった（表11、図10）。タンパク質含有率は同等となった。

### 4. 主要成果の具体的データ

表3 総散布量の精度

	ほ場全体の 散布量 (kg)	理論値と の誤差 (%)
理論値	156.32	—
重量計測定値	155	-0.84
実測値	152	-1.94

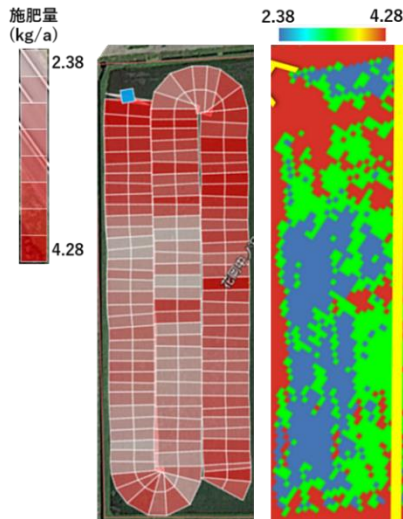


図3 可変施肥の作業ログ（左）と可変施肥マップ（右）

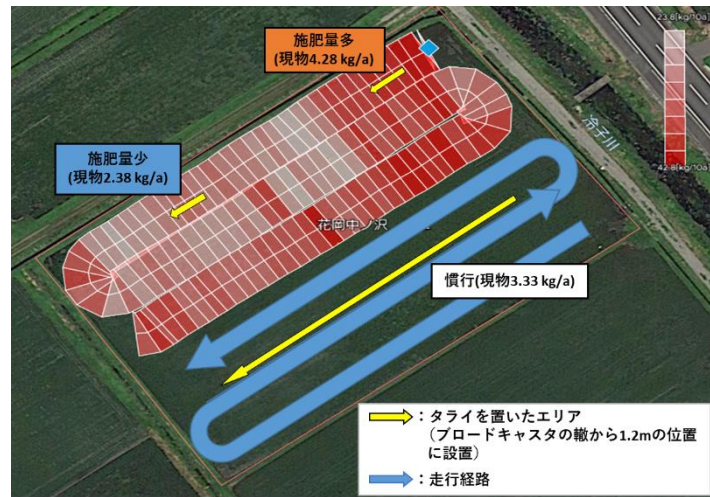


図4 施肥量の調査地点

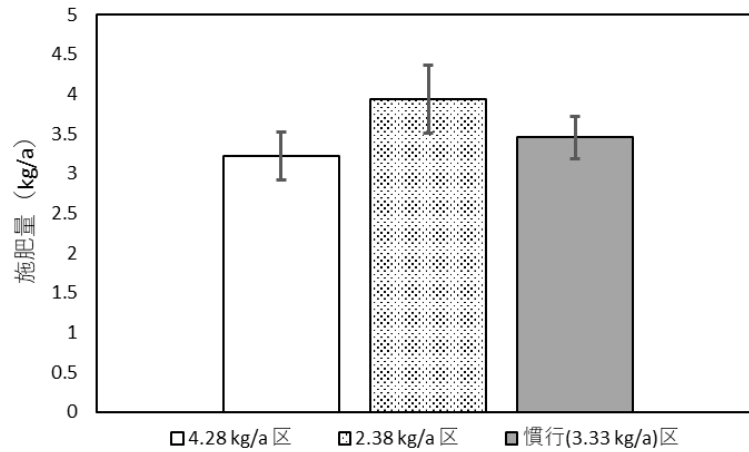


図5 1a 当たりの推定施肥量（現物）

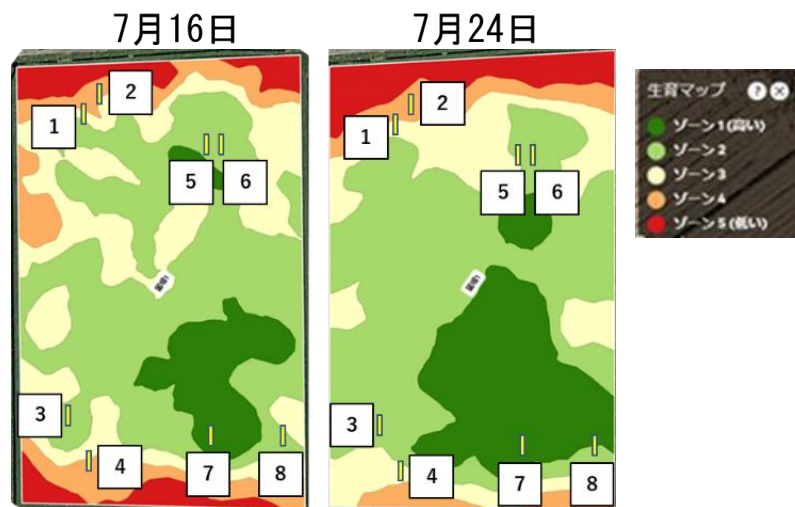


図6 幼穂形成期-3日、+5日の衛星データ（ゾーン）マップ

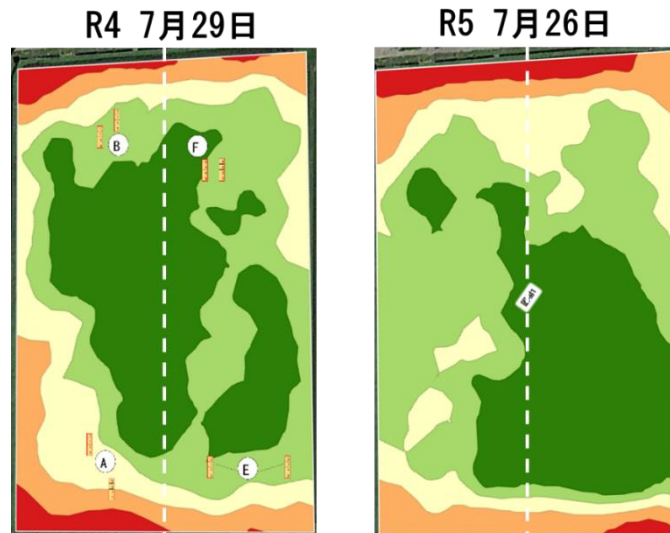


図7 令和4年と令和5年の同時期における衛星データ（ゾーン）マップ

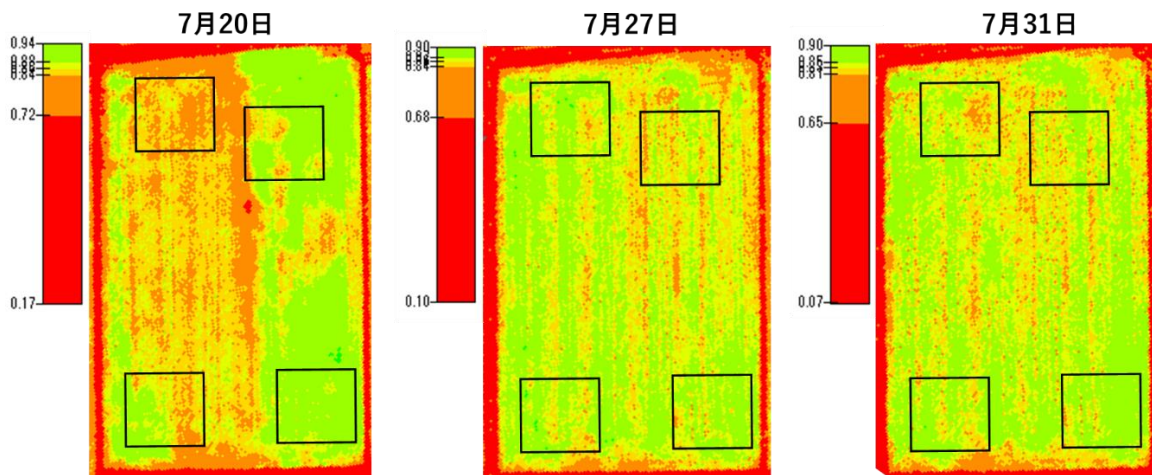


図8 NDVI 値マップ

図内の4つの枠の範囲を各調査区のNDVI値解析に使用した。

(左上：調査区1、2 左下：調査区3、4 右上：調査区5、6 右下：調査区7、8)

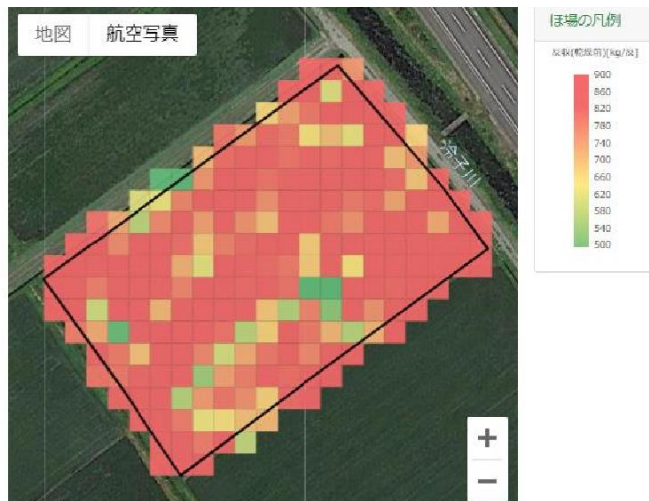


図9 収量マップ

表4 生育調査結果（幼穂形成期、出穂期）

幼穂形成期調査											
区名	草丈 (cm)		茎数 (本/m <sup>2</sup> )		葉色		SPAD		葉色×茎数 (本/m <sup>2</sup> )		
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
可変施肥区	1	84.2 b	2.07	427.4 a	111.8	3.24 a	0.339	41.5 ab	1.94	1381.2 a	382.7
	2	78.3 de	2.98	342.4 a	108.2	3.24 a	0.339	39.2 bcd	2.01	1105.6 ab	381.1
	3	78.2 de	2.56	330.0 a	116.2	2.93 bc	0.245	39.5 bcd	1.40	971.7 bc	359.2
	4	81.2 c	2.46	358.1 a	112.8	3.31 a	0.269	40.3 abc	5.17	1194.8 ab	423.3
慣行区	5	78.2 de	1.69	322.6 b	86.9	2.68 cd	0.265	36.6 d	2.43	862.6 bc	239.9
	6	80.1 cd	2.10	312.7 b	102.6	2.99 ab	0.262	38.1 cd	4.35	934.7 bc	330.5
	7	76.6 e	1.54	303.6 b	71.7	2.79 bcd	0.292	37.5 cd	2.84	843.5 bc	208.0
	8	86.7 a	2.83	394.4 a	122.9	3.49 a	0.439	42.9 a	2.57	1384.7 a	512.8

注) 葉色はカラースケールで測定

注) Tukey法により、異なるアルファベット間に有意差あり (p<0.05)

表5 可変施肥区と慣行区の比較（幼穂形成期調査）

幼穂形成期調査										
区名	草丈 (cm)		茎数 (本/m <sup>2</sup> )		葉色		SPAD		葉色×茎数	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
可変施肥区	80.5	3.52	364.4	116.5	3.18	0.330	40.1	3.09	1163	408.3
慣行区	80.4	4.39	333.3	102.6	2.98	0.444	38.8	3.93	1006	404.0
有意差	ns		*		**		**		**	

注) 葉色はカラースケールで測定

注) t検定で有意差を判定 (\*\*: p<0.01、\*: p<0.05、ns: 有意差なし)

表6 NDVI 値測定結果

区名	NDVI 値						
	7月20日		7月27日		7月31日		
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
可変施肥区	1, 2	0.844	0.0140	0.872	0.0139	0.839	0.0183
	3, 4	0.870	0.0262	0.873	0.0140	0.851	0.0193
	全体	0.851	0.0314	0.870	0.0176	0.841	0.0294
慣行区	5, 6	0.878	0.0271	0.861	0.0138	0.839	0.0174
	7, 8	0.900	0.0153	0.873	0.0123	0.859	0.0191
	全体	0.876	0.0432	0.858	0.0379	0.842	0.0343

注) 図8の枠内のNDVI値を各試験区の解析範囲とした。

表7 出穂期における生育調査結果

区名	出穂期				
	葉色		SPAD		
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
可変施肥区	1	2.8 abc	0.193	32.7 a	1.02
	2	2.8 abc	0.235	32.6 a	1.45
	3	3.0 a	0.147	33.1 a	1.18
	4	2.8 abc	0.173	32.1 a	1.46
慣行区	5	2.9 ab	0.224	32.4 a	1.21
	6	2.7 c	0.154	30.7 b	1.05
	7	2.6 c	0.131	30.3 b	1.15
	8	2.9 a	0.192	32.1 a	1.34

注) 葉色はカラースケールで測定

注) Tukey法により、異なるアルファベット間に有意差あり (p<0.05)

表8 可変施肥区と慣行区の比較（出穂期調査）

区名	出穂期			
	葉色		SPAD	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
可変施肥区	2.83	0.199	32.6	1.31
慣行区	2.78	0.221	31.4	1.47
有意差	*		**	

注) 葉色はカラースケールで測定

注) t検定で有意差を判定

(\*\* : p<0.01、\* : p<0.05、ns : 有意差なし)

表 9 成熟期調査結果及び収量

区名	稈長 cm		穂長 cm		穂数 本/m <sup>2</sup>		倒伏程度	単収 (乾燥前) kg/10a	収穫量 (乾燥前) kg/47.4a	精玄米重 (実収) kg/47.4a	単収 kg/10a	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差						
可変施肥区	1	93.4 a	2.94	19.7 b	0.94	370.4 a	104.7	0.0	721.5	4430.0	3005.6	634.1
	2	86.4 b	3.23	19.9 ab	1.42	311.0 ab	88.5	0.0	1009.5			
	3	88.2 b	2.31	19.8 b	1.26	304.4 ab	110.6	0.0	1114.3			
	4	88.7 b	3.56	21.0 a	1.55	314.3 ab	103.7	0.0	862.0			
慣行区	5	86.6 b	2.01	20.5 ab	0.77	278.9 b	65.3	1.5	962.7			
	6	87.6 b	2.54	20.4 ab	1.19	274.7 b	82.1	0.0	1198.5			
	7	82.8 c	1.82	19.7 b	0.66	276.4 b	65.1	0.0	835.0			
	8	92.3 a	3.19	19.9 ab	1.17	333.3 ab	111.6	0.0	709.0			

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  
 注) Tukey法により、異なるアルファベット間に有意差あり (p<0.05)

表 10 可変施肥区と慣行区の比較 (成熟期調査及び単収)

区名	稈長 cm		穂長 cm		穂数 本/m <sup>2</sup>		単収 (乾燥前) kg/10a	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
可変施肥区	89.1	3.96	20.1	1.38	325.1	103.7	945.5	191.1
慣行区	87.3	4.16	20.1	1.01	290.8	85.3	898.9	205.1
有意差	**		ns		*		ns	

注) 乾燥前単収は収量コンバインのメッシュデータ(生収量)を使用  
 注) t検定で有意差を判定 (\*\*: p<0.01, \*: p<0.05, ns: 有意差なし)

表 11 可変施肥区と慣行区の比較 (収穫物調査)

区名	玄米千粒重 g		整粒率 %		タンパク質含有率 %	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
可変施肥区	24.0	0.149	71.5	1.07	6.21	0.057
慣行区	23.7	0.181	70.0	1.32	6.21	0.060
有意差	**		**		ns	

注) t検定で有意差を判定 (\*\*: p<0.01, \*: p<0.05, ns: 有意差なし)  
 注) 整粒率はS社品質判定機RGQ120A、タンパク含有率はS社食味分析計SREIにより測定

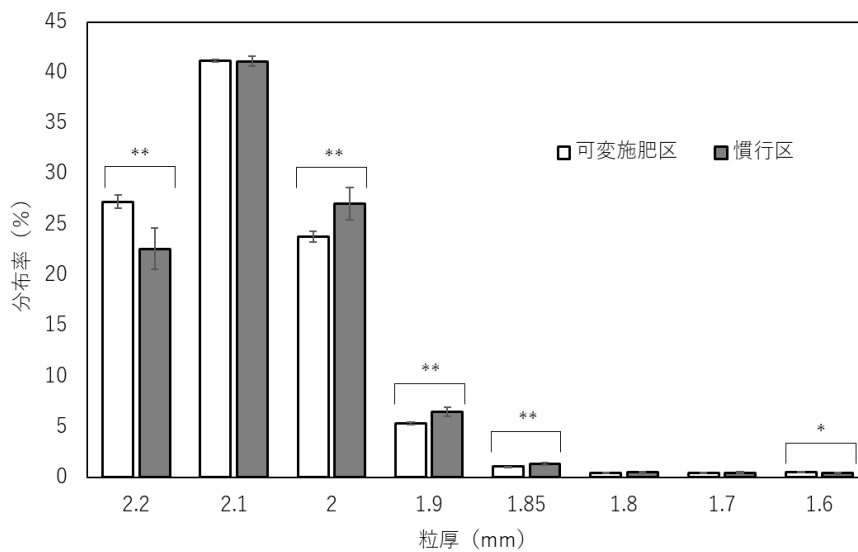


図 10 粒厚分布

t 検定で有意差を判定 (\*\*: p<0.01, \*: p<0.05)

## 5. 考察

- (1) 取得した散布マップデータ及び総散布量の測定結果から、事前に作成した可変施肥マップ通りに高い精度で散布することができたと考えられる。
- (2) 生育調査及びセンシング結果から、可変施肥により生育が均一化されたと考えられる。また、倒伏も抑制できることから、合筆するなどして地力に差があるほ場で、特に有効な技術であると考えられる。
- (3) 可変施肥が食味に与える影響はみられなかったものの、粒張りが向上し整粒率も増加した。このことから、可変施肥は玄米品質向上の可能性があると考えられる。

## 7. 問題点と次年度の計画

- ・リモートセンシングによってほ場の生育状況をより正確に把握するためには、複数回の撮影を行い総合的に判断する必要がある。
- ・大豆、野菜の後作にコシヒカリを作付けする等、倒伏がより懸念される状況での検討が必要。

(終了年度のため次年度の計画はなし。)

## 8. 参考写真



写真1 トラクタ



写真2 可変施肥ブロードキャスタ



写真3 収量コンバイン