

令和 3 年 5 月 11 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H02306

研究課題名(和文) コンバインの穀粒タンクに堆積する初のかさ密度によるコメの登熟歩合計測法の開発

研究課題名(英文) Development of the measurement method for percentage of ripened grains using bulk density of rough rice piled in the combine grain tank

研究代表者

平井 康丸 (Hirai, Yasumaru)

九州大学・農学研究院・准教授

研究者番号：10432949

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：コンバインの穀粒タンク(グレンタンク)に堆積する初層の粒子密度(質量/真体積)により、コメの登熟歩合を計測する方法を開発することを目的に、主にはタンク内に堆積した初層の質量および真体積を計測する方法の開発に取り組んだ。質量については、穀粒タンク底面の前方・後方にロードセルを設置する計測法により、種々の初層の堆積形状を対象にした場合に、現行の計測誤差を80%低減する高精度化を実現した。真体積については、音響共鳴法(ヘルムホルツ共鳴)を用いることにより、空隙を含む初層の真体積計測の可能性を示した。今後の実験データの蓄積と検証により、穀粒タンクに適用できる計測法として確立されることが期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

登熟歩合は、コメの収量・品質を反映する基盤データである。従来の登熟歩合の計測は手刈りのサンプルを用いて限られた試験田で計測されるのみであった。コンバイン収穫時に計測できる方法を開発することにより、多数の水田で登熟歩合のデータを収量・品質の安定化に有効利用できる。学術面では、穀粒タンク内の初層の質量計測について、堆積形状と計測精度の関係を実験的・理論的に解明した意義は大きく、現場の試行錯誤を減らし、計測装置の高精度化に寄与する。また、音響計測法(ヘルムホルツ共鳴)による粒子層の空隙の影響を考慮した真体積の計測法は国内外で初めて提案されたものであり、新たな計測法開発のシーズとなる成果である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to develop the method of measuring the percentage of ripened grains using particle density (mass/true volume) of rough rice layer piled in a combine grain tank. This study mainly focused on the method of measuring mass and true volume of rough rice layer in the tank. For the mass measurement, we developed the measurement method using two load cells installed on the front and rear bottom of the tank. This method reduced measurement error of a conventional method by 80% when measuring rough rice layers of various shapes. In addition, we showed the possibility of measuring true volume of rough rice layer including porosity among particles by using the method of acoustic resonance (Helmholtz resonance). This method is expected to be applicable to a combine grain tank after further investigation and validation.

研究分野：農業機械

キーワード：空隙率 質量 収量 真体積 精玄米 底面圧力 ヘルムホルツ共鳴 粒子密度

1. 研究開始当初の背景

収量コンバインは、国内外で30年余り研究され、現在市販されている。一方、収量コンバインの計測は籾重のみが対象とされてきた。国外の収穫物取引が籾ベースであるのに対し、我が国では品質を重視するため、一定粒厚以上の登熟した精玄米が取引される。すなわち、登熟歩合(精玄米粒数と籾数の比)が農家収入を反映する重要な収穫物指標となる。また、登熟歩合は水稻の収量構成要素の一つであり、精玄米収量だけでなく、品質に影響を与える重要な指標である。登熟歩合は、気象条件、肥培管理、病害虫の発生などにより変動するため、当年度の生産管理を分析し、次年度の改善を検討する上で、個々の水田において把握されることが望ましい。一方、現行の登熟歩合の計測は、40~60株のサンプルの刈取り、脱穀、籾すり、篩による粒厚選別、粗籾重、籾数、精玄米重および千粒重の計測の作業を伴い、時間と労力を要する。したがって、登熟歩合は限られた試験田のみで計測されているのが現状である。以上の背景から本研究は、収量・品質の基盤データである登熟歩合をコンバイン収穫時に計測できる方法の開発を目指したものである。

2. 研究の目的

本研究の目的は「コンバインの穀粒タンク(グレタンク)に堆積する籾層のかさ密度によりコメの登熟歩合を計測する方法を開発する」ことである。本目的の達成するために以下の4課題に取り組んだ。

- (課題 I) 予備的研究として、籾層のかさ密度 (BD) による登熟歩合の計測可能性の検証
- (課題 II) かさ密度の高精度な計測法を開発するために、穀粒タンクに堆積する籾の質量 (M) 計測の高精度化 (現行の収量コンバインから 50%向上)
- (課題 III) 堆積籾層のかさ密度は、登熟歩合の指標である粒子密度 ( $\rho_p$ ) だけでなく、堆積籾層の空隙率 ( $\phi$ ) の影響を受けることから、穀粒タンクに堆積した籾層の空隙率の推定法の開発
- (課題 IV) 穀粒タンク内の籾層の体積計測法の開発

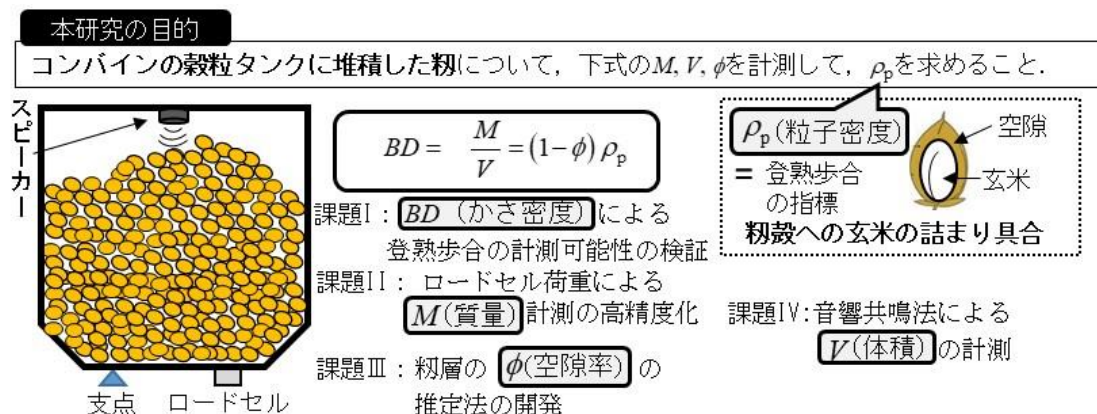


図1 本研究の目的と実施課題

3. 研究の方法

(課題 I) 籾層のかさ密度による登熟歩合の計測可能性の検証

コンバインの穀粒タンクに堆積した籾層のかさ密度による登熟歩合推定の可能性を検討するために、鉛直円筒容器(内径2.6cm, 高さ160cm)を用いて、穀粒での籾の堆積状態を模した基礎実験を行った。籾は食用米品種のヒノヒカリおよび酒米用の大粒品種の山田錦を用いた。含水率は3段階(低:11-14%前後, 中:18-19%, 高:23-24%)に調整した。さらに、籾の円筒内の充填程度を3段階(疎, 自然落下, 密)に調整して実験を行い、かさ密度と登熟歩合の指標である粒子密度の線形性および、同線形性に与える品種, 含水率, 充填程度の影響を明らかにした。

(課題 II) 穀粒タンクに堆積する籾の質量計測の高精度化

収量コンバインの籾質量計測には、穀粒タンク底面で計測したロードセル荷重を説明変数とする検量式が用いられている。本課題では、籾層の種々の堆積形状に対して、現方式の検量式の推定精度を評価し、推定誤差を低減する検量式を検討した。具体的には3条刈コンバインに100, 200, 300, 400kgの籾を堆積させる際に、図2の位置から籾を投入し、水平にならした形状を含む11パターンの堆積形状を形成した。続いて、籾層の堆積形状を3Dスキャナにより計測し、重心位置を求め、同時にタンクの前・後方底面の支持荷重をロードセルにより計測した(図3)。本計測データに基づき、5つの説明変数の組み合わせにより籾質量の検量式を作成し、精度評価を行った。作成した検量式は次の通りである。検量式1-説明変数: 前方ロードセル荷重, 検量

式 2—説明変数：堆積粉層の重心の  $z$  座標， 検量式 3—説明変数：前方ロードセル荷重， 後方ロードセル荷重， 検量式 4—説明変数：前方ロードセル荷重， 堆積粉層の重心の  $x$  座標，  $z$  座標， (e) 検量式 5—説明変数：前方ロードセル荷重， 後方ロードセル荷重， 堆積粉層の重心の  $z$  座標。

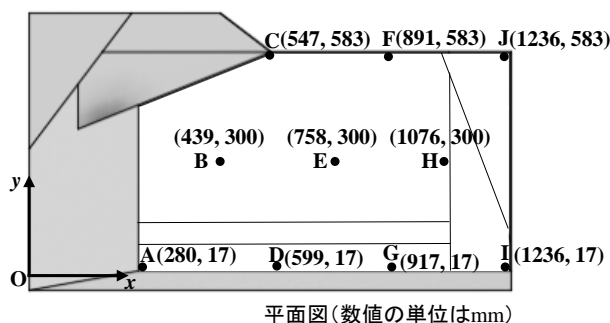


図2 グレンタンクに粉を投入した位置(x座標, y座標)

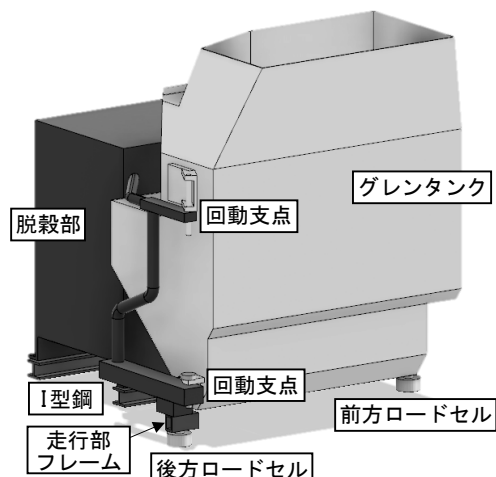


図3 ロードセルの設置位置

### (課題 III) 穀粒タンクに堆積した粉層の空隙率の推定法の開発

粉層の空隙率と負の相関があると予想され，空隙率の指標になり得る粉層の底面圧力について，粉層の堆積実験により，堆積高さおよび空隙率との関係を明らかにするとともに，Janssen の式により底面圧力が推定可能であるかを検討した。

本課題の遂行に当たり図 4 に示す実験装置を作成した。粉を堆積する四角柱容器は，内寸が 45 (幅) × 30 (奥行) × 120 (高さ) cm の角型パイプの底面に，44.8 (横) × 29.8 (縦) cm の平板を配置して作成した。角型パイプおよび平板は何れもアクリル製であった。容器の寸法は，6 条刈コンバインの穀粒の幅と奥行の比 (1.64) に近似するように決定した。

角型パイプは，中央部に長方形の空洞 (45 (横) × 30 (縦) cm) がある木板の台座に静置した。底面の平板は，ラボジャッキ上に静置した台秤上に置き，角型パイプの底部の中央に，内壁に触れないように位置を調整した。これにより，容器の底面と壁面で支持される堆積粉層の自重の内，底面が支持する粉の自重のみが台秤で計測される。粉の堆積実験には，コシヒカリ約 100 kg を，含水率 14%，18%，25%，30% の 4 段階に調製して使用した。

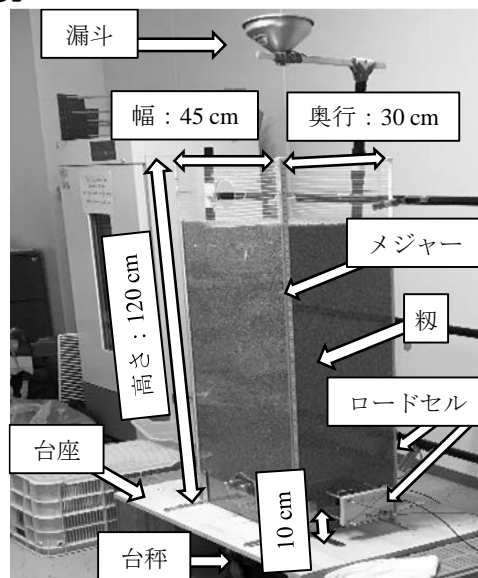


図4 粉の堆積実験装置

### (課題 IV) 穀粒タンク内の粉層の体積計測法の開発

課題 III の実施結果から，収穫時の穀粒タンク内の堆積粉層の空隙率について，さらに調査を実施する必要性が生じたことから，当初の空隙率を推定する研究方針を変更し，堆積粉層の空隙率無しの実体積を計測する方法を検討した。実体積を計測できれば，粉層の質量を実体積で除することにより，登熟歩合の指標である粒子密度が直接計算できる。実体積の推定にはヘルムホルツ共鳴を用いた音響計測法を適用した。小型の共鳴器 (容積 1 L) を用いて (図 5)，ガラスビーズ (粒径：1 mm，粒子密度：2.5 g/cm<sup>3</sup>)，ガラスフリッタ ( $\phi > 0.7$  mm，粒子密度：2.5 g/cm<sup>3</sup>) および籾米 (粒子密度：1.27 g/cm<sup>3</sup>) を堆積させたときの実体積を，従来式 (西津ら，1995) により推定し，その精度を明らかにした。続いて，粒子間の空隙率による音圧の減衰の影響を考慮した体積推定式を新たに導出し，その精度を評価した。

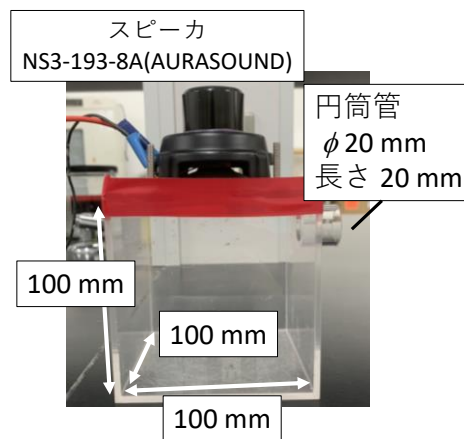


図5 小型共鳴器および寸法

#### 4. 研究成果

##### (課題 I) 籾層のかさ密度による登熟歩合の計測可能性の検証

鉛直円筒容器に堆積した籾層のかさ密度と登熟歩合の指標である粒子密度の線形回帰式の決定係数は、0.71~0.96 と良好であり、かさ密度を用いた登熟歩合推定の可能性は一定程度示された。一方、回帰式は籾の充填程度が密になるにつれて、かさ密度の大きい側に平行移動した（図 6, 高含水率条件の結果）。また、回帰式の傾きは籾の含水率によって変動した。以上から、かさ密度により登熟歩合の推定を行うためには、穀粒タンクにおける籾の充填条件および籾の含水率の回帰式への影響を明らかにする必要があることが示された（Yoshizaki et al., 2018）。

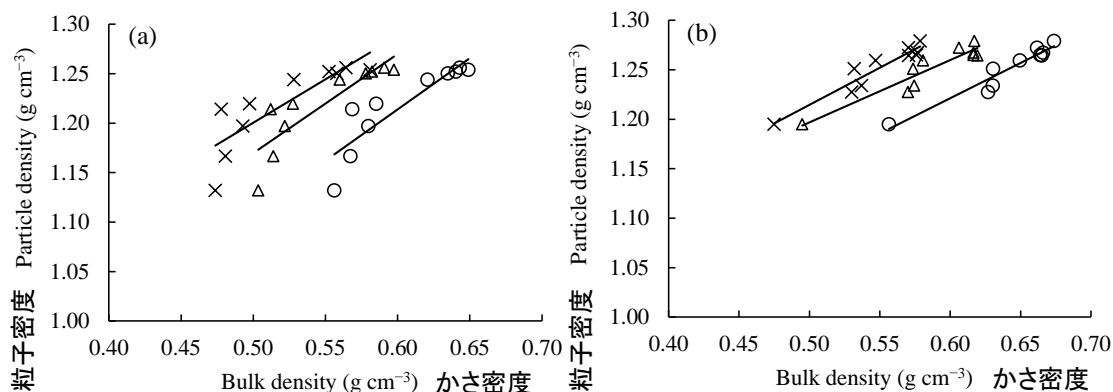


図 6 かさ密度と粒子密度の関係（高含水率条件）

- (a) ヒノヒカリ, 疎 (×):  $y = 0.88x + 0.76$  ( $R^2 = 0.71, p < 0.01$ ), 自由落下(Δ):  $y = 1.00x + 0.67$  ( $R^2 = 0.75, p < 0.01$ ), 密 (○):  $y = 1.04x + 0.59$  ( $R^2 = 0.80, p < 0.01$ ).  
 (b) 山田錦, 疎 (×):  $y = 0.75x + 0.84$  ( $R^2 = 0.91, p < 0.01$ ), 自由落下 (Δ):  $y = 0.63x + 0.88$  ( $R^2 = 0.88, p < 0.01$ ), 密 (○):  $y = 0.71x + 0.79$  ( $R^2 = 0.93, p < 0.01$ ).

##### (課題 II) 穀粒タンクに堆積する籾の質量計測の高精度化

現方式の検量式のクロス・バリデーション時の二乗平均平方根相対誤差 (RMSRECV) は 22 % であった。特に質量 100 kg において、堆積籾層の形状の違いにより重心の  $x$  座標の変動が大きくなり、相対誤差の範囲が -41 % ~ 60 % と大きかった。堆積籾層の重心の  $z$  座標を説明変数とした場合の RMSRECV は 10.9 % であり、現方式に比べて半減した。しかし、本説明変数は、高さ方向の堆積形状に再現性がある場合のみ有効である。堆積形状に起因する誤差を低減するには、前方・後方ロードセル荷重を説明変数とする検量式が実用的と考えられた。全堆積形状の RMSRECV は 4.4 % であり、フック支持の影響が大きい堆積形状を除くと、RMSRECV は 2.5 % であった（平井ら, 2020）。本結果は、現行の収量コンバインの籾の質量計測精度の大幅な向上に寄与する価値ある成果である。

##### (課題 III) 穀粒タンクに堆積した籾層の空隙率の推定法の開発

Janssen の式による推定値は、四角柱容器に堆積した籾層（含水率：14 %、18 %、25 %、30 %）の底面圧力を良好に再現し、RMSE は 0.04 ~ 0.13 kPa であった（図 7）。本結果から、断面形状が概ね矩形の穀粒タンクに Janssen の式を適用可能と判断した。しかし、四角柱容器に堆積した籾層の空隙率は 45.4 ~ 49.7 % と密充填化しており、各含水率でほぼ一定であった。したがって、収穫時の籾層の空隙率が底面圧力と負の相関を示す範囲にあるかについて、さらに検証を要する（吉寄ら, 2019）。

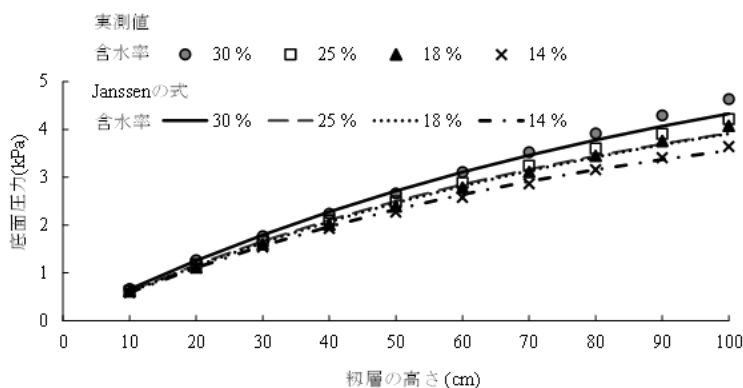


図 7 四角柱容器に堆積した籾層の底面圧力の実測値と推定値

(課題 IV) 穀粒タンク内の粗層の体積計測法の開発

従来式による真体積の推定は、粒子間の空隙率が大きくなるにつれて過小推定の程度が大きくなった (図 8, Inoue et al, 2021). 一方, 新たに導出した減衰の影響を考慮した真体積推定式の相対誤差は, ガラスビーズにおいて 2.5%以下と良好であったが, ガラスフリッタは 200 ml で 6%, 粃は 150 ml で 7.3%と大きかった (図 9). 本課題については, 相対誤差が大きくなった理由についてさらに検討を要する. さらに, 新たに導出した推定式の減衰項は特定の材料および空隙率にのみ対応する実験式 (真体積を説明変数とする一次式) であるため, 材料および空隙率を考慮した一般式を作成する必要がある. そのために, 材料の種類と空隙率の条件を増やして実験データを蓄積する必要がある. また, 本真体積の計測法の精度を大型の容器を用いて確認することにより, 穀粒タンクに適用可能な方法であるかを検証する必要がある.

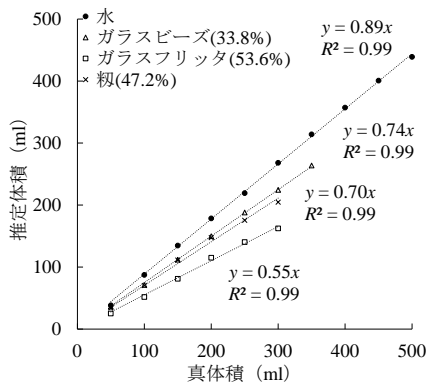


図8 従来式による推定体積と真体積の関係

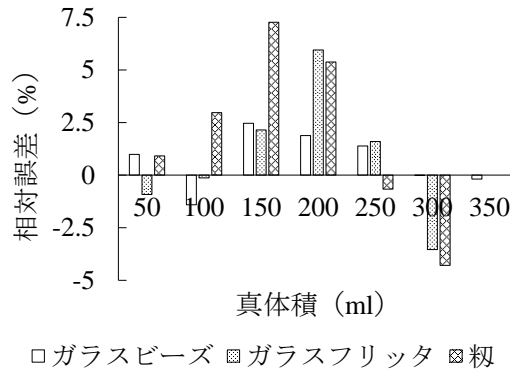


図9 減衰を考慮した新たな推定式の真体積推定精度

<引用文献>

- 平井 康丸, 樫野 雅和, 上加郁朗, 光岡宗司, 井上英二, 岡安崇史, 2020. グレンタンクに種々の形状で堆積した粗層の重量検量式. 農業食料工学会誌, 82(4), 362-369.
- Inoue, S., Hirai, Y., Inagaki S., Inoue, E., Okayasu, T., Mitsuoka, M., 2021. Volume Measurement of Particle Layers in a Container by Using Helmholtz Resonance. Journal of Faculty of Agriculture, Kyushu University, 66(1), 91-95.
- 西津貴久, 池田善郎, 1995. 農産物の音響的体積測定法 (第 1 報) : ヘルムホルツ共鳴による体積測定法の推定精度. 農業機械学会誌, 57(5), 47-54.
- Yoshizaki, R., Hirai, Y., Inoue, E., Okayasu, T., Mitsuoka, M., 2018. Relationships between bulk density and particle density of rough rice piled in a vertical cylinder. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 80(5), 280-288.
- 吉寄 隆一, 平井 康丸, 井上 真大朗, 稲垣 紫緒, 井上 英二, 岡安 崇史, 光岡 宗司, 2019. 四角柱容器に堆積した粗層の底面圧力と空隙率. 農業食料工学会誌, 81(6), 383-391.



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 平井 康丸, 樫野 雅和, 上加郁朗, 光岡宗司, 井上英二, 岡安崇史	4. 巻 82(4)
2. 論文標題 グレンタンクに種々の形状で堆積した初層の重量検量式	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 農業食料工学会誌	6. 最初と最後の頁 362-369
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Inoue, S., Hirai, Y., Inagaki S., Inoue, E., Okayasu, T., Mitsuoka, M.	4. 巻 66(1)
2. 論文標題 Volume Measurement of Particle Layers in a Container by Using Helmholtz Resonance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Faculty of Agriculture, Kyushu University	6. 最初と最後の頁 91-95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5109/4363556	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 吉崎隆一・平井康丸・井上真大朗・稲垣紫緒・井上英二・岡安崇史・光岡宗司	4. 巻 81
2. 論文標題 四角柱容器に堆積した初層の底面圧力と空隙率	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 農業食料工学会誌	6. 最初と最後の頁 383-391
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ryuichi YOSHIZAKI, Yasumaru HIRAI, Eiji INOUE, Takashi OKAYASU, Muneshi MITSUOKA	4. 巻 80
2. 論文標題 Relationships between Bulk Density and Particle Density of Rough Rice Piled in a Vertical Cylinder	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery and Food Engineering	6. 最初と最後の頁 280-288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11357/jsamfe.80.5_280	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 井上真大朗, 平井康丸, 稲垣紫緒, 井上英二, 岡安崇史, 光岡宗司
2. 発表標題 ヘルムホルツ共鳴による容器内に堆積した粒子層の体積推定
3. 学会等名 第74回九州農業食料工学会例会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上真大朗, 平井康丸, 稲垣紫緒, 井上英二, 岡安崇史, 光岡宗司
2. 発表標題 ヘルムホルツ共鳴による容器内に堆積した粒子層の体積推定
3. 学会等名 第74回九州農業食料工学会例会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasumaru Hirai
2. 発表標題 Measurement of percentage of ripened grain using bulk density of rough rice piled in a combine tank
3. 学会等名 International Symposium on Agricultural, Food, Environmental and Life Sciences in Asia (AFELISA 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上真大朗, 平井康丸, 井上英二, 岡安崇史, 光岡宗司
2. 発表標題 コンバインのグレタンクに堆積した籾層の底面圧力の推定
3. 学会等名 第73回農業食料工学会九州支部例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎野雅和, 平井康丸, 井上英二, 岡安崇史, 光岡宗司
2. 発表標題 2つのロードセル荷重を用いた場合のコンバイングレタンク内の初質量検量式の精度評価
3. 学会等名 第73回農業食料工学会九州支部例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎野雅和, 平井康丸, 井上英二, 岡安崇史, 光岡宗司
2. 発表標題 初の堆積状態を考慮したコンバイングレタンク内の初質量検量式の作成
3. 学会等名 農業食料工学会・農業施設学会・国際農業工学会第6部会合同国際大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上真大朗, 吉寄隆一, 平井康丸, 稲垣紫緒, 井上英二, 岡安崇史, 光岡宗司
2. 発表標題 グレタンクに堆積した初層の空隙率の指標となる底面圧力の推定法
3. 学会等名 農業食料工学会・農業施設学会・国際農業工学会第6部会合同国際大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryuichi Yoshizaki, Yasumaru Hirai, Muneshi Mitsuoka, Shio Inagaki, Eiji Inoue, Takashi OKAYASU
2. 発表標題 Relationships between Mass and Porosity of Rough Rice Piled in a Combine Grain Tank
3. 学会等名 Proceedings of the 9th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Biosystems Engineering (ISMAB) (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 平井 康丸, 古川 大二郎, 吉寄 隆一, 榎野 雅和, 上加 郁朗, 光岡 宗司, 井上 英二, 岡安 崇史
2. 発表標題 粉の堆積状態がグレンタンクの支持荷重および粉質量の推定精度に及ぼす影響
3. 学会等名 農業環境工学関連学会2018年合同学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉寄 隆一, 平井 康丸, 上加 郁朗, 古川 大二郎, 榎野 雅和, 光岡 宗司, 稲垣 紫緒, 井上 英二, 岡安 崇史
2. 発表標題 グレンタンクに堆積した粉の空隙率と底面圧力の関係
3. 学会等名 農業環境工学関連学会2018年合同学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榎野 雅和, 平井 康丸, 古川 大二郎, 吉寄 隆一, 岡安 崇史, 光岡 宗司, 井上 英二
2. 発表標題 粉の堆積状態を考慮したグレンタンクの支持荷重推定モデルの検討
3. 学会等名 第72回農業食料工学会九州支部例会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	稲垣 紫緒  (Inagaki Shio)  (20452261)	九州大学・理学研究院・准教授   (17102)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	田中 史彦  (Tanaka Fumihiko)  (30284912)	九州大学・農学研究院・教授    (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関