

シミュレーション技術を活用した 穀物用コンバイン開発の効率化に関する研究*

佐々木 駿**、大里 達朗***、桑嶋 孝幸***、佐々木 龍徳****

穀物の収穫には作業効率の良さから一般的に収穫機械であるコンバインが利用される。コンバインは、機械前方にある刈取機によって穀物を刈り取り、刈り取られた穀物は機械内部の脱穀機で脱穀された風選別によって子実のみ収穫する機械である。しかし、雑穀は長稈であることから、子実と大きな葉や茎を選別する網に詰まり収穫作業が中断されてしまう。また、子実が小さく質量も小さいため風選別が難しく、収穫ロスが大きい。これらの課題を解決するため、本研究ではコンバイン内部の状況把握を目的とし、シミュレーションによるコンバイン内部の空気流れの調査と実験による内部の観察を実施した。シミュレーション結果からはコンバイン内部の空気流れの傾向を確認することができ、実験ではフレームレートの異なるカメラを使用して子実の飛散する様子や枝葉の堆積する様子を観察することができた。

キーワード：雑穀、コンバイン、シミュレーション、数値解析

Research on Improving Efficiency of Grain Combine Harvester Development Using Simulation Technology

SASAKI Shun, OSATO Tatsuro, KUWASHIMA Takayuki, SASAKI Tatsunori

Key words: grain, combine harvester, simulation, numerical analysis

1 はじめに

岩手県は雑穀の生産が日本一であり国産の9割を占めているが、雑穀は収穫作業の効率が悪く、かつ収穫ロスが大きいことから生産をやめる農家が多い。そこで、作業の負担軽減と生産性の向上の対策として、岩手県農業研究センター県北農業研究所では、雑穀に適した収穫機械（コンバイン）のセッティングを試行錯誤している。

穀物の収穫に使用されるコンバインは普通型と呼ばれ、刈取り機で刈り取られた作物全体（子実、茎、葉）が機械内部へ搬入され、機械内部で脱穀と風力による選別（風選別）が行われている（図1）。雑穀は長稈であることから脱穀機のこぎ胴と呼ばれる回転部品と選別用の網（コンケープ）の間に絡まりやすい（図2）。完全に詰まってしまうとこぎ胴の回転が止まり、収穫作業が中断されてしまう。さらに、雑穀の子実は小さく軽いため風選別の調整が難しく、収穫率が小さいことも課題となっている。これらの課題を解決するには、様々な部品形状を検討する必要があるが、実験による試行錯誤では費用や時間がかかる。シミュレーションは一般的に試作・実験行程を削減できるため、開発期間を短縮し、開発コストを削減できる利点がある。



図1 雜穀の収穫に使われる普通型コンバイン

* 令和5年度技術シーズ創生・発展研究事業（発展研究）

** 素形材プロセス技術部

*** 岩手県農業研究センター 県北農業研究所

**** 素形材プロセス技術部（現：ものづくり技術統括部長）

***** 素形材プロセス技術部（現：DX推進特命部）



図2 コンバイン内部で雑穀が詰まっている様子

近年の研究では、コンバインの風選別に着目して粒や藁の物理特性や風選別の流れ特性の実験、粒や藁の飛行シミュレーションが行われている¹⁾。この研究では、粒や藁をモデル化することで風選別における空気流れをシミュレーションし、最適な選別風速を調査している。しかしながら、コンバイン内部に子実が堆積する現象や枝葉が詰まる現状のメカニズムについて調査されていない。

そこで、本研究では簡易的なシミュレーションによってコンバイン内部の空気流れと、実験によってコンバイン内部に枝葉が詰まる様子や子実が堆積する様子を調査し、雑穀用コンバインの部品形状等の最適化に反映させることで、効率的にコンバインを開発する手法の確立を目的として実施した。

2 調査方法

コンバイン内部の空気流れを把握するため、内部形状のモデルを作成し、流れ解析のシミュレーションを実施した。また、収穫作業中のコンバイン内部の様子を把握するため、観察窓を作製し、ビデオカメラなどで撮影と観察をした。具体的な内容について以下に述べる。

2-1 シミュレーション方法

シミュレーションに使用した流体解析ソフトは Ansys 2022 R1 の Fluent である。簡易モデルは、こぎ胴への入り口から雑穀の枝葉が排出される出口までをモデル化した（図3）。内部の寸法はメジャーにより測定し、こぎ胴のサイズはカタログ値を参照した。

解析条件に必要となるのは、こぎ胴の回転数とコンバイン内部への入口流速である。こぎ胴の回転数はカタログ値より 316 rpm とし、入口流速はハンディ風速計（CW-50, カスタム社）を用いて測定した。コンバイン内部へ空気が流入する入り口は、刈り取られた作物全体が搬入される入り口と風選別のためにファンから送られた風がに入る入口の 2 カ所ある。作物全体が搬入される入口はこぎ胴（回転部品）の奥に位置しているため、直接流速を測定することができない。そこで、出口流速と風選別のための入口流速を測定し、連続の式より、作物搬入のための入口流速を求めた。

○ 測定値

$$\text{作物搬入のための入口面積 } A_1 = 0.1680 \text{ m}^2$$

$$\text{風選別のための入口面積 } A_2 = 0.0168 \text{ m}^2$$

$$\text{出口面積 } A_3 = 0.1288 \text{ m}^2$$

$$\text{風選別のための入口流速 } V_2 = 5.0 \text{ m/s}$$

$$\text{出口流速 } V_3 = 3.0 \text{ m/s}$$

○ 作物搬入のための入口流速 V_1 の算出

$$V_2 \cdot A_2 = Q_2 \text{ より}$$

$$Q_2 = 0.084 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$\text{同様に } Q_3 = 0.3864 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$\text{連続の式 } Q_1 + Q_2 = Q_3 \text{ より}$$

$$Q_1 = Q_3 - Q_2 = 0.3024$$

$$Q_1 = V_1 \cdot A_1, \quad A_1 = 0.168 \text{ m}^2 \text{ より}$$

$$V_1 = Q_1 / A_1 = 1.8 \text{ m/sec}$$

内部を流れる気体は空気とし、流速が音速よりも明らかに小さいため非圧縮性流体として計算する。モデルのメッシュサイズは全体を 10 mm、細部を 5 mm とし、壁面近傍はインフレーションを成長率 1.2 の 5 層とした。

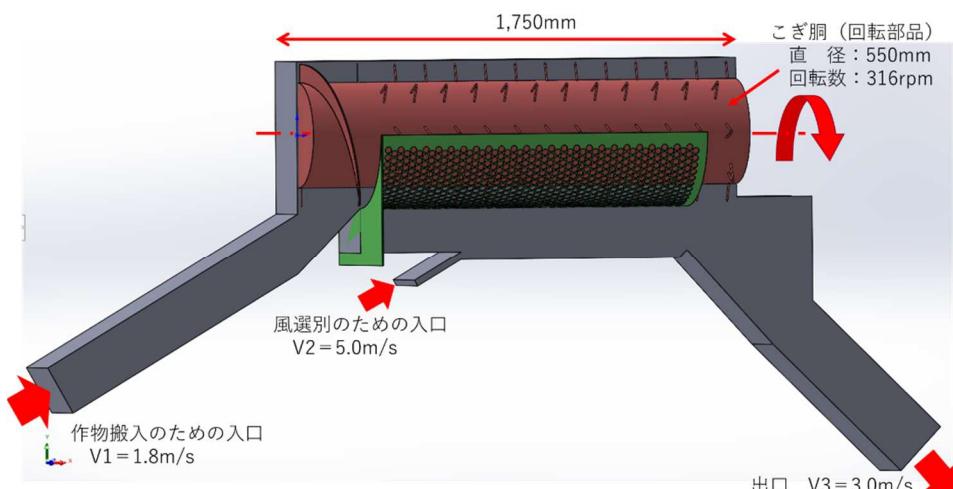


図3 コンバイン内部の3Dモデル

	アワ（10月）	キビ（11月）
ほ場		
穀物		

図4 ほ場の様子と収穫した雑穀

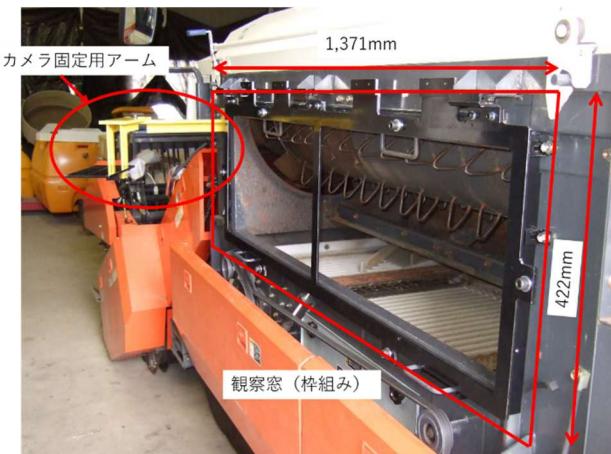


図5 観察窓とカメラ固定用アーム



図6 実験の様子

2-2 実験方法

実験で収穫した雑穀はアワとキビである（図4）。収穫時期が異なるため、実験は10月と11月の2回実施した。実験内容は、コンバイン内部状況の観察と子実の飛散速度測定である。コンバイン内部の撮影のため作製した観察窓はコンバインのカバーを外したところに取り付けている。観察窓からは、脱穀と風選の様子が見られる。また、撮影用カメラを固定するアームも作製した（図5）。撮影に使用したカメラは、高速度ビデオカメラ（Motion Pro HS-4、IDT社）、ホームビデオカメラ（HC-W580M、Panasonic）、iPhoneのカメラである。3種類のカメラによって撮影した主な理由は、フレームレートにある。フレームレートが大きいほどスローモーション撮影が可能と

なり、コンバイン内部の様子を観察し易くなる。しかし、フレームレートが大きく、鮮明な画像を撮影するには焦点距離が小さいレンズとなるため、画角も小さくなり、内部全体の撮影が難しくなる。フレームレートは、高速度ビデオカメラは3,000fps、ホームビデオカメラは60fps、iPhoneは120fpsである。実験の様子を図6に示す。高速度ビデオカメラは、カメラ本体と別に電源と操作用PCを有線で接続する必要がある。そこで、電源はポータブルバッテリーをコンバインのキャビンに設置し、操作用PCは実験者が持ち、撮影中はコンバインと並走しながらPCの操作を行った。

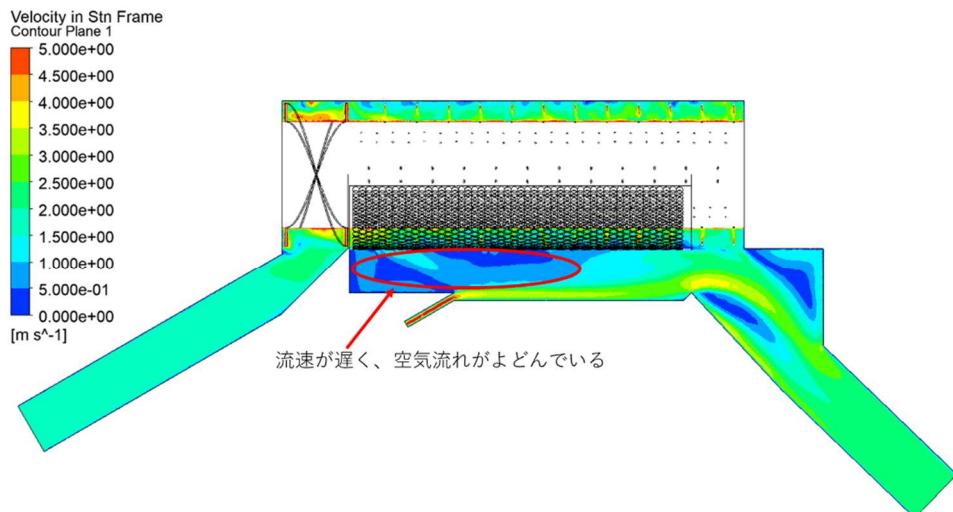


図7 コンバインの解析結果（速度分布）

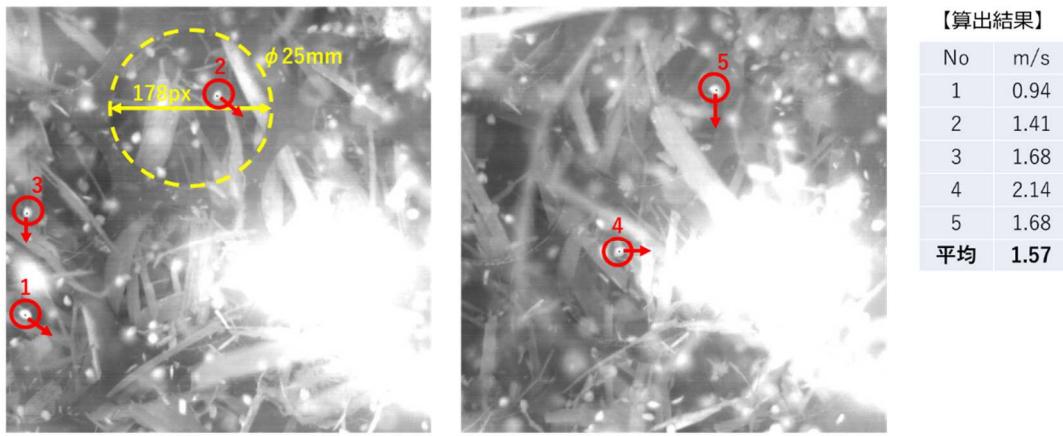


図8 高速度ビデオカメラによる撮影画像と子実の飛散速度測定

3 結果及び考察

3-1 数値解析結果

解析結果を図7に示す。2か所の入口流量の和と出口流量を比較すると、その差は0.02%しか変わらず、出入口における質量保存が成立している。このことから、数値解析は問題無く計算が終了している。速度分布の結果から、こぎ胴下の特に上流側の流速が遅く、よどんでいることがわかる。実機においても枝葉の堆積が多く確認されていた場所であり、解析結果から流れの傾向は予測できると考えられる。

3-2 各カメラによる内部監察

はじめに、高速ビデオカメラによる撮影結果について述べる。こぎ胴付近を撮影し、選別の網目から飛散する子実の速度を測定した。撮影した画像の分解能は網目の穴寸法 ($\Phi 25 \text{ mm}$) が178 px前後であることから、0.14 mm/pxである。飛散速度は、2枚の撮影画像から子実が移動したピクセル数と、フレームレート数 (3,000 fps) か

ら算出した時間 (1/3,000 sec) で除して求めた。飛散速度は5個の測定結果を平均し、約1.57 m/sであった(図8)。求めた飛散速度は平面上の移動速度であるのに対し、実際の子実は立体空間を移動するため正確な飛散速度ではないが、粒子挙動を含めたシミュレーションを実施した際に、検証用として参考にしたい。

次にホームビデオカメラによる撮影結果について述べる。このカメラでは、コンバイン内部全体を撮影した(図9)。カメラ固定アームにカメラを取り付けるとフレームレートが小さいためコンバインの振動の影響が大きく、内部を鮮明に撮影できない。そこで、コンバインに直接取り付けず、コンバインから離れた位置にカメラを支持して撮影した。また、撮影時は観察窓に当たる自然光が反射するため、観察窓を囲うように暗幕を設置することで対策した。撮影動画はフレームレートが小さいため、雑穀の飛散状況を細かく観察することはできないが、雑穀がどの位置から詰まり始めるのか、過程を観察することができた。

最後にiPhoneのカメラによる撮影結果について述べ

る。このカメラでは、高速度ビデオカメラと同様にこぎ胴付近を撮影し、雑穀の飛散・落下状況を確認した（図10）。フレームレートと画角は、高速度ビデオカメラとホームビデオカメラの間の性能であり、内部の観察用であれば最もバランスの取れた動画が撮影できた。また、カメラレンズを観察窓に張り付けることで自然光の反射の影響も無く撮影することができた。

以上のことから、撮影はカメラによって撮影環境の影響が異なるため、カメラの固定方法や暗幕の設置などが必要となる。今後の実験・観察に当たっては、画角が大きい順（ホームビデオカメラ → iPhone のカメラ → 高速度ビデオカメラ）に、撮影対象を絞り込みながら撮影実験することが最適と考えられる（表1）。



図9 ホームビデオカメラによる撮影画像



図10 iPhone カメラによる撮影画像

表1 各カメラの使い分け

カメラ	高速度 ビデオカメラ	iPhone スローモーション 撮影	ホームビデオ カメラ
画角	狭い 約72×72mm	中間 約300×200mm	広い 約600×400mm
フレームレート	3,000fps	120fps	60fps
使用目的	子実等の飛散速度 の測定	こぎ胴と風選別の 様子を同時に観察	コンバイン内部全 体において詰まる 様子を観察

4 まとめ

本研究では、雑穀用コンバイン部品形状等の最適化に向けて、収穫作業中のコンバイン内部の状況を観察し把握するため、シミュレーション技術を活用した流れ解析と高速度ビデオカメラ等による撮影を実施した。得られた成果は以下の通りである。

- (1) 初めて収穫作業中のコンバイン内部を高速度ビデオカメラ等で撮影することに成功し、内部での雑穀の子実等の動きを確認できた。これによって、雑穀がどの位置から堆積し詰まり始めるのかなどを調査することや、コンバインの設定において風選別の風速やこぎ胴の回転数などの調整が容易になった。
- (2) コンバイン内部の空気流れに関するシミュレーションを行い、こぎ胴のような回転体を含む流れ解析の手法を確認できた。これによって、コンバイン内部の空気流れの傾向を確認することができるようになった。
- (3) シミュレーションを活用することで実機での実験よりも容易に内部の空気流れを確認できるようになった。実機による実験は雑穀の収穫時期に限られ、さらにカメラの画角やフレームレートによって撮影する範囲も限られるため、より多くの条件で調査することが困難である。それに対して、シミュレーションはいつでもコンバイン内部全体の空気流れを評価することができ、雑穀用コンバインの開発に大いに貢献できる。

今後は、実験結果からシミュレーション精度を高め、シミュレーションを中心とした雑穀の詰まる原因調査とコンバインの設定最適化を実施することで、実験回数を大幅に削減して開発コスト・期間の縮小に貢献していきたい。

文 献

- 1) 井上英二, 森健, 岡安崇史：コンバイン脱穀内部の風選メカニズムの理論的解明と選別制御への応用, 科学研究費補助金研究成果報告書 (2009)