

自脱型コンバイン揺動選別部の性能向上のための数値解析法の開発

江口, 寛
九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻

岡安, 崇史
九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門

山形, 友佑
九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻

新開, 聡
九州大学農学部生物資源生産化学コース

他

<https://doi.org/10.15017/9850>

出版情報：九州大学大学院農学研究院学芸雑誌. 63 (1), pp.47-56, 2008-02-28. 九州大学大学院農学研究院

バージョン：

権利関係：

自脱型コンバイン揺動選別部の性能向上のための数値解析法の開発

江口 寛¹・岡安 崇史*・山形 友佑¹・新開 聡²
光岡 宗司・井上 英二・今村 英一³

九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門生産システム科学講座生物生産工学研究室
(2007年11月8日受付, 2007年11月30日受理)

Development of Numerical Method for Improving Performance of Shaking Separator in Head-Feeding Combine Harvester

Hiroshi EGUCHI¹, Takashi OKAYASU*, Yusuke YAMAGATA¹, Satoshi SINKAI²,
Muneshi MITSUOKA, Eiji INOUE and Eiichi IMAMURA³

Laboratory of Bioproduction Engineering, Division of Bioproduction System Science,
Department of Bioproduction Environmental Sciences, Faculty of Agriculture,
Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

緒 言

自脱型コンバインにより収穫された作物桿は、脱穀部において脱穀された後、選別部内で穀粒と夾雑物に分離・選別される。同選別部は主に揺動選別部と風選別部に大別され、前者は脱穀された原料に振動を与えて比重の異なる穀粒と夾雑物を選別し、次工程である風選別部に原料を移送する作業を担っている。つまり、本工程の性能の良否は、風選別部の性能ひいてはグレンタンク内に移送される穀粒の品質に影響を及ぼすこととなる。揺動選別機構は、収穫後穀粒の乾燥・精選別を行う穀粒調整・加工技術としても広く採用されているため、従前より、揺動選別部の性能向上に関する研究が盛んに行われている(児島・山下, 1989, 児島・坂口, 1992)。一方、自脱型コンバインに搭載されている揺動選別装置に関しては、脱穀部回転数に同期し

た揺動柵制御や揺動柵穀粒に応じたチャフシープ開口制御等に関しては実用化されているものの、その合理的で最適な設計指針を提案できるまでには至っていない。特に、圃場内における作物生育状態の空間的バラツキや収穫機の走行速度(穀粒流量)、機体振動等によって、選別条件が時々刻々変化していることが予想されるため、従来の設計・開発においては、選別性能を左右する揺動柵の揺動周波数、揺動振幅、角度等の設計パラメータが試行錯誤的に決定されてきた。つまり、自脱型コンバインの揺動選別機構の全容解明ひいてはそれに基づく同機構の最適設計パラメータの同定には未だ至っていないのが現状といえよう。

他方、Cundall (1971) により提案された個別要素法 (Discrete Element Method, 以下 DEM と略称) は、要素集合体の個々の要素に対して、それぞれ独立した 2 階常微分運動方程式を与え、これを各時刻間で

¹九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻生物システム科学講座生物生産工学研究室

²九州大学農学部生物資源生産科学コース生物生産システム工学分野生物生産工学研究室

³井関農機株式会社

¹Laboratory of Bioproduction Engineering, Division of Bioproduction System Science, Department of Bioproduction Environmental Sciences, Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University

²Laboratory of Bioproduction Engineering, Division of Bioproduction System Science, Course of Agricultural Production, Engineering and Economics, Department of Bioresource and Bioenvironment, School of Agriculture, Kyushu University

³Iseki & Co. Ltd.

*Corresponding author (E-mail: okayasu@bpes.kyushu-u.ac.jp)

差分近似して逐次計算することにより、個々の要素については要素集合体の動的挙動を追跡可能である。このように本解析法は離散体の挙動をよく表現できるため、土供試体の変形挙動 (Matsushima, 2002)、地盤破壊現象 (田中, 2006) やサイロにおける原料の充填と排出に関する研究 (Mark *et al*, 1999; Masson and Martinez, 2000; Sanad *et al*, 2001) 等、土や粉体を対象とする地盤工学や粉体工学の分野において広く利用されている。一方、坂口他 (1996) は、粳と玄米の揺動選別現象について 2 次元要素を用いた DEM モデルを構築し、容器内の穀粒群の挙動を解析するとともに、実測結果との比較・照査から、その妥当性を実証している。しかしながら、自脱型コンバイン用揺動選別部に対して DEM を応用した事例は無く、その適用性については未知な部分も少なくない。

そこで本研究では、実際の自脱型コンバイン用揺動選別部を改良した揺動選別実験装置を製作し、これを用いて様々な選別条件下での揺動選別実験を行った。一方、上記選別実験装置を模擬した DEM モデルを用いて、揺動選別実験を再現し、両結果の比較・照査から、その妥当性について検討を行った。さらに、DEM を用いて揺動棚振動数を種々変えたケーススタディを行うことにより、揺動棚振動数の違いが比重差のある粒子群の挙動に与える影響についても考察を行った。

揺動選別実験装置の開発

1. 揺動選別実験装置の概要

図 1 に揺動選別実験装置の構成を示す。本実験装置は、小型 2 条刈コンバイン (型式: HVA216, 井関農機株) に搭載されている揺動選別装置 (揺動棚材質: SECC-P, 電気亜鉛メッキ鋼板) を改良したものである。特に、実験中の供試材料の選別過程を高速カメラで撮影し易いように、実際の揺動選別装置から切り取った揺動棚の一部とアクリル板から成る揺動選別箱を新たに製作し、揺動選別装置の揺動棚上面に取り付けた。揺動選別箱は、仕切り板の装着位置を奥行き方向に移動させることにより、任意の幅に調整することが可能であり、2 次元断面から 3 次元断面にわたる広範の選別・移送実験を実施できる。また、揺動棚振幅は水平方向変位が 20mm および垂直方向変位が 7mm と固定されているが、振動数については回転軸のプーリにベルト接続されたモータの回転数を変化させることによって、0.02Hz 間隔で任意に設定可能である。なお、揺動棚振動数は光センサで読み取ったプーリの

回転数から算出される。供試材料は、後述する DEM 解析プログラムの予測精度の評価が検討し易いように、比重の異なる 2 種類のプラスチック球 (粒径 6 mm, 質量 (黒: 0.12g, 白: 0.25g)) を混合したものをを用いた。

2. 実験方法

実験では、まず、所定の混合比になるように 2 種類のプラスチック球を混ぜ合わせて供試材料を作成し、揺動選別箱の左端部に充填した (図 2 参照)。次に、揺動実験装置を動作させ、揺動棚が所定の振動数に達したと同時に、ストッパーを解除して、供試材料が揺動棚上を振動作用により選別・移送される様子を、高速カメラ (FASTCAM-1024PCI, Photron) を用いて撮影した (図 3 参照)。実験条件を表 1 に示す。

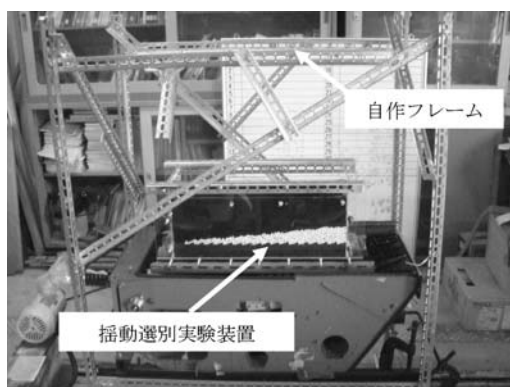


図 1 揺動選別実験装置

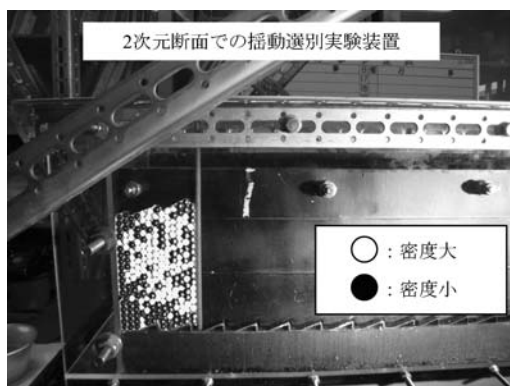


図 2 供試粒子の充填状況

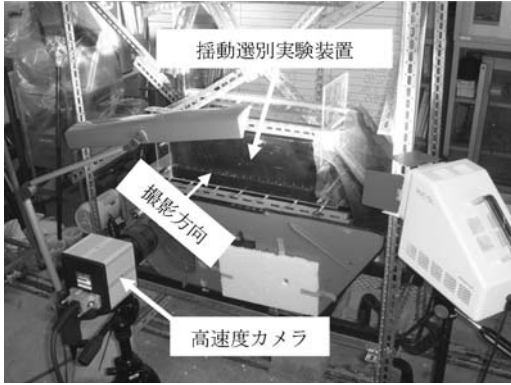


図3 高速度カメラによる選別現象の撮影の様子

表1 実験条件

項目	設定値
揺動棚の振動数 (Hz) (プーリの回転数 (rpm))	5.0, 5.5, 6.0 (300, 330, 360)
供試粒子混合比 (白 : 黒)	1 : 1, 2 : 1, 4 : 1

DEMによる揺動選別機構のモデル化

1. DEMの基礎

粒子集合体に外力が作用すると、これらを構成する各粒子は近接の粒子と衝突や摩擦接触を繰り返しながら運動する。DEM (Cundall (1971)) では、このような粒子間の挙動の線形性や非線形性をバネ、ダッシュポット、スライダ等で表現することにより、各粒子の運動をモデル化している。図4に円形粒子を用いた最も単純なDEMモデルを示す。一般に、粒子間の接触力は様々な方向に作用すると考えられるが、DEMではこれらを便宜的に各粒子の中心を結ぶ線分方向成分、すなわち、法線方向成分とそれに直交する接線(せん断)方向成分に分解し、それぞれの成分に対してフォークトモデルを適用する。さらに、接線方向成分については、粒子間の摩擦の影響を考慮するために、摩擦スライダを挿入するのが一般的である。

いま、2粒子間に働く相互作用力による運動方程式が次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} + \boldsymbol{\eta} \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \mathbf{K}\mathbf{u} &= \mathbf{0} \\ I \frac{d^2 \Psi}{dt^2} + \eta_t r^2 \frac{d\Psi}{dt} + K_t r^2 \Psi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

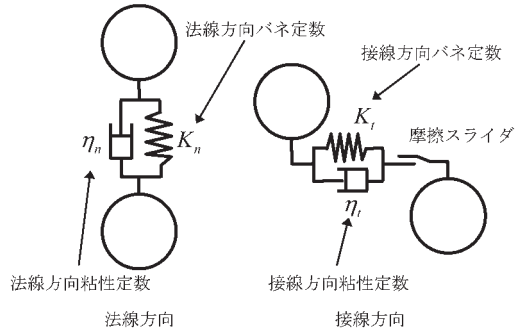


図4 フォークトモデル (Voigt model)

ここに、 m は質量、 I は慣性モーメント、 Ψ は角変位、 r は粒子半径をそれぞれ表す。また、粒子の変位ベクトル \mathbf{u} 、粘性定数マトリクス $\boldsymbol{\eta}$ およびバネ定数マトリクス \mathbf{K} はそれぞれ次式で与えられる。

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u_n \\ u_t \end{Bmatrix}, \boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \eta_n & 0 \\ 0 & \eta_t \end{bmatrix}, \mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_n & 0 \\ 0 & K_t \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここに、 u_n および u_t は法線および接線方向変位、 η_n および η_t は法線および接線方向粘性定数、 K_n および K_t は法線および接線方向バネ定数をそれぞれ表す。式(1)は粒子集合体を構成する各粒子の接触点について常に成立するものと仮定される。

いま、任意の1粒子の周囲に多数の粒子が接触している場合を考える。このとき、個々の粒子との接触点において、式(1)が成立するので、参照粒子の運動を追跡するには接触点数と同数の方程式を連立して解く必要がある。これを避けるため、DEMでは、次式のように時間増分 Δt に関して差分近似を行い、順次計算を進めていく。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} m \{\ddot{\mathbf{u}}\}_t &= -[\boldsymbol{\eta}] \{\dot{\mathbf{u}}\}_{t-\Delta t} - [\mathbf{K}] \{\mathbf{u}\}_{t-\Delta t} \\ I \ddot{\Psi}_t &= -\eta_t r^2 \dot{\Psi}_{t-\Delta t} - K_t r^2 \Psi_{t-\Delta t} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

本式より、時刻 t における加速度ベクトル $\{\ddot{\mathbf{u}}\}_t$ は、時間 Δt だけ前の速度ベクトル $\{\dot{\mathbf{u}}\}_{t-\Delta t}$ と変位ベクトル $\{\mathbf{u}\}_{t-\Delta t}$ から算出される。得られた加速度 $\{\ddot{\mathbf{u}}\}_t$ を数値積分することで、時間 t における速度ベクトル $\{\dot{\mathbf{u}}\}_t$ と変位ベクトル $\{\mathbf{u}\}_t$ が算出され、この計算を時間刻み Δt で前進的に解くことにより、粒子群の動的挙動を追跡可能にしている。

2. 揺動選別装置のモデル化

図5に揺動選別現象の解析に用いた二次元DEMモデルを示す。本モデルは、前述の自作揺動選別箱と同

じサイズで作成している。まず、揺動柵モデル内に、実験で用いた供試材料と同じ比重の2種類の円形粒子150個（個数も実験と同じにしている）を所定の混合比になるように発生させた後、自由落下させて充填した。このとき、粒子の初期配置は、全ての粒子の運動がほぼ無くなった状態としている。解析では、揺動柵をモデル化した波状の境界部分を所定の振動数で振動させることにより、実際の揺動選別実験の様子を再現した。各粒子の座標値、回転角、接触力等の計算結果は、一定の計算ステップ毎にファイルへ出力し、計算終了後、Visual Basicで開発したポスト処理プログラムによってアニメーション処理を行った。表2にDEM解析に用いた材料定数を示す。

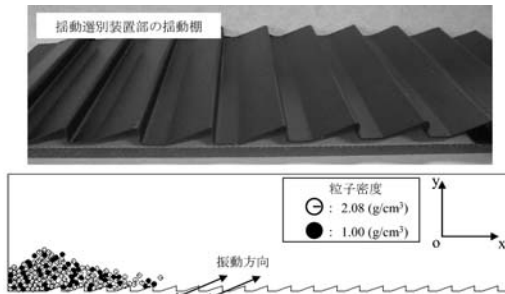


図5 揺動選別装置の2次元DEMモデル

表2 DEM解析に用いた材料定数

粒子	粒子数	150
	粒径 (m)	0.006
	密度 (kg/m ³)	2083 1000
バネ定数 (法線方向)	粒子-粒子 (N/m)	1.8×10^4
	粒子-境界 (N/m)	2.2×10^4
粘性定数 (法線方向)	粒子-粒子 (N/s/m)	5.5
	粒子-境界 (N/s/m)	4.0
バネ定数 (接線方向)	粒子-粒子 (N/m)	7.0×10^3
	粒子-境界 (N/m)	7.0×10^3
粘性定数 (接線方向)	粒子-粒子 (N/s/m)	5.0
	粒子-境界 (N/s/m)	3.5
摩擦係数	粒子-粒子	0.4
	粒子-境界	0.5
時間増分 Δt	(s)	4.0×10^{-5}

結果と考察

揺動柵振動数や供試粒子の混合比の違いが供試粒子の運動ならびに揺動選別性能に与える影響について、実験と数値解析の両面から検討を行った。

1. 揺動柵振動数の差異が選別性能に与える影響

揺動柵振動数の違いが粒子運動特性に及ぼす影響を調べるために、揺動柵の振動数を5.0、5.5および6.0Hzの3段階に変えた実験を行った。図6に供試粒子の挙動の差異が最も顕著に見られた5.0Hzと6.0Hzの実験結果を示す。図は、高速度カメラで撮影された揺動選別時の供試粒子の運動状態を0.4s毎にt=2.0sまで表示したものである。また、実験では供試粒子の混合比を2:1（比重大:比重小）とした。本図から、振動数の違いによって供試粒子の挙動が明確に異なる様子が確認できる。特に、振動数が低い場合（5.0Hz）には、粒子の鉛直方向への変位量が比較的小さく、揺動柵の形状に沿って右側に供試粒子が厚い層を形成しつつ移送されているのがわかる。一方、振動数が高い場合（6.0Hz）には、供試粒子の鉛直方向への運動が激しくなっており、供試粒子の移送が進むにつれて、黒色粒子（比重小）の鉛直方向への運動が大きくなることが確認される。

図7に揺動選別シミュレーションの結果を示す。ここで、解析条件は実験とほぼ同じ条件になるように設定した。実験で観察された挙動と同様、揺動柵振動数が低い場合には、粒子の鉛直方向への運動が比較的小さく、揺動柵の形状に沿って右側に全粒子が層状に移送されるのに対して、振動数が高い場合には、粒子の鉛直方向への運動が激しくなり、時間経過とともに黒色粒子（比重小）の鉛直方向への運動が顕著となる粒子が表現できていることがわかる。

図8にDEMシミュレーションで得られた全粒子の鉛直方向平均位置（以下単に平均位置と略称）の経時変化を示す。グラフから明らかなように、初期状態では、両粒子は無作為に充填されているため、比重差に関係なく両粒子の平均位置はほぼ同じ値を示している。次に、揺動選別が開始されると、いずれの振動数の場合も比重の大きい粒子の平均位置は小さくなり、比重の小さい粒子のものよりも常に小さな値で推移するようになる。つまり、これは比重の大きい粒子が比重の小さい粒子の下側に移動していることを示しており、揺動選別が行われているといえる。また、振動数の高い6.0Hzの結果では、揺動選別開始直後から時間経過

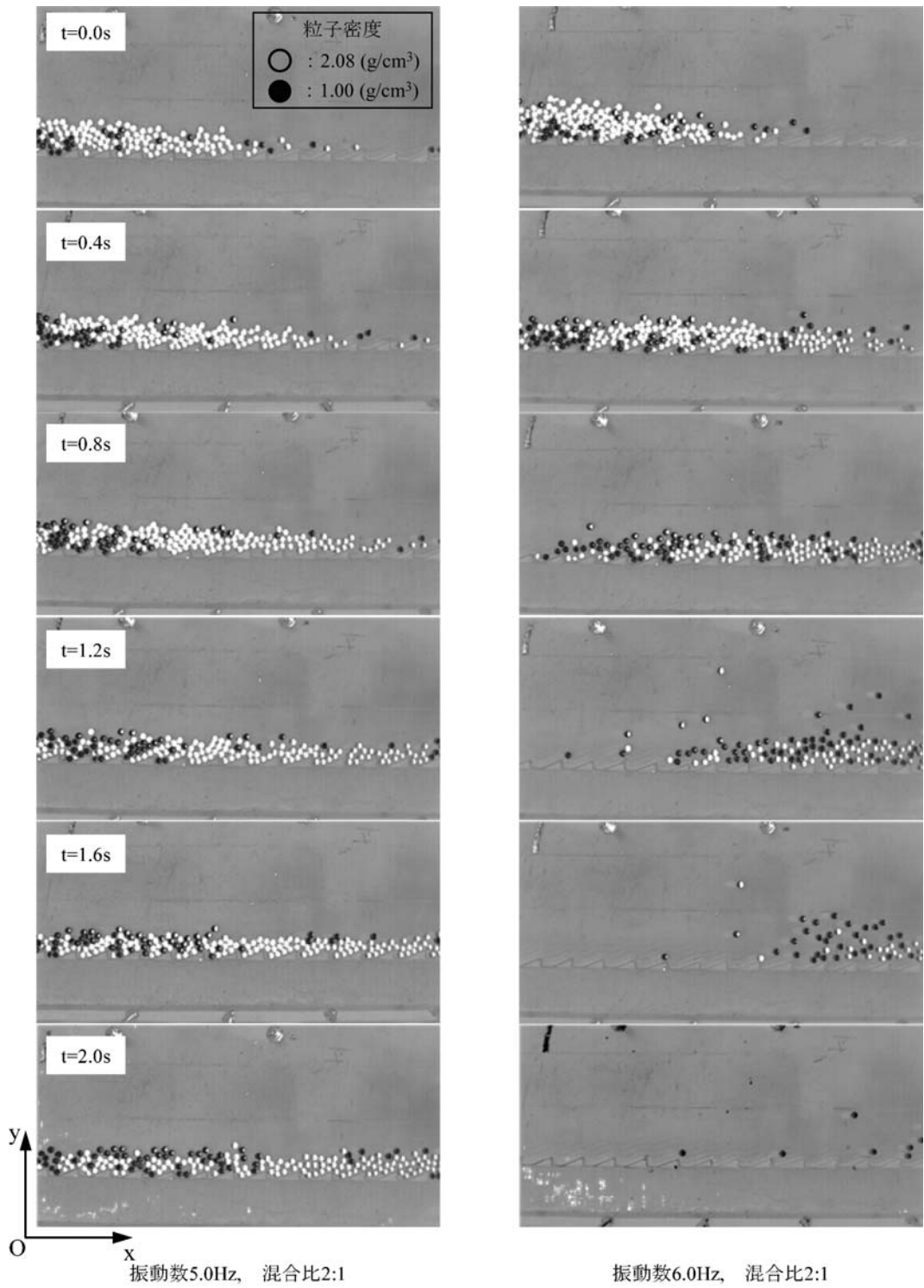


図6 揺動棚振動数の違いによる粒子運動特性の比較 (実験)

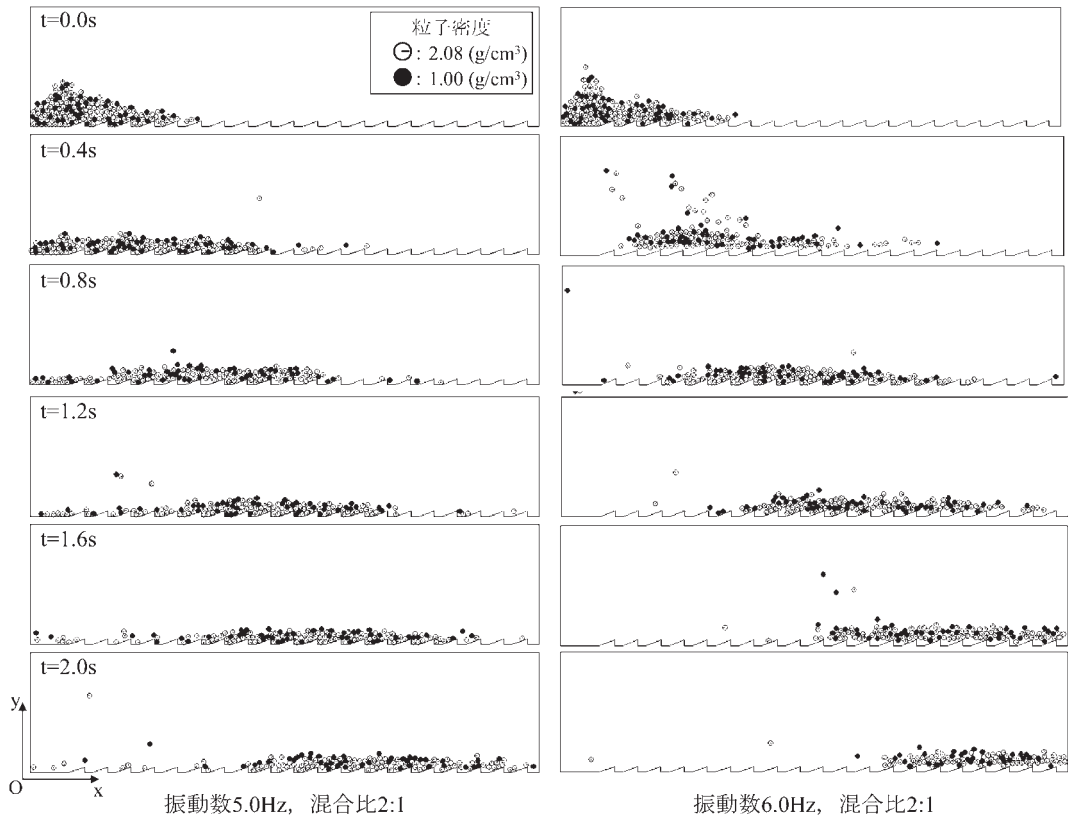


図7 揺動棚振動数の違いによる粒子運動特性の比較（解析）

に伴い、揺動作用を受け粒子の平均位置が上下している様子がわかる。これは、粒子が鉛直方向に激しく挙動しながら移送されていることを示している。一方、振動数の低い5.0Hzの結果については、揺動選別開始直後から平均位置の低下が始まり、1.0s後にほぼ一定の平均位置に収束している様子がわかる。これは、1.0s後に粒子が層を伴い移送されていることを示している。

2. 混合比の差異による選別挙動の比較

コンバイン収穫時は、天候や収穫時の圃場の状態等により選別部に投入される穀粒の状態が時々刻々変化することが予想される。特に、穀粒と夾雑物の割合は作物の状態に強く依存するため、これらの混合割合が変わっても常に適切な選別が可能となる選別条件を見出す必要がある。そこで、混合比を表1に示すように種々変化させて、前述と同様の選別実験を行った。図9に供試粒子の挙動の差異が最も顕著に見られた混合比1:1と4:1の実験結果を示す。結果は図6同様

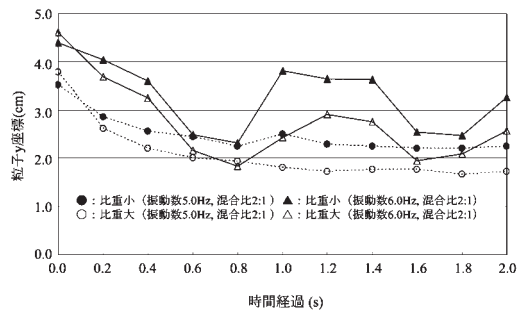


図8 粒子の鉛直方向平均位置の経時変化（解析）

の $t=2.0$ s まで表示している。本実験における揺動棚の振動数は5.0Hzとした。本図からわかるように、混合比に関わらず時間経過に伴って揺動棚の振動作用を受けて、白色粒子（比重大）と黒色粒子（比重小）が移送されていく様子が観察される。しかしながら、本実験では、比重差による鉛直方向の分離・選別現象に

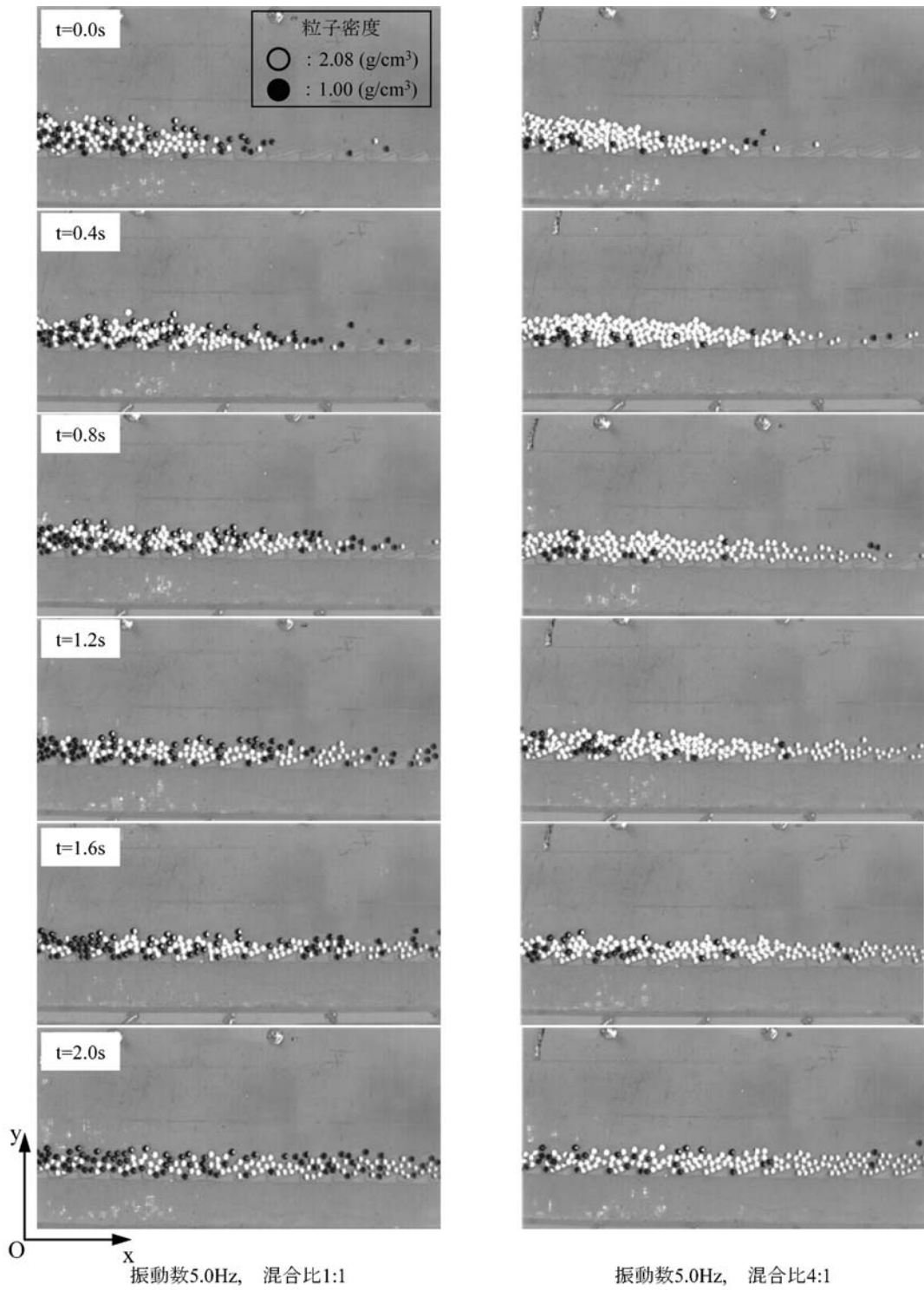


図9 粒子混合比の違いによる粒子運動特性の比較 (実験)

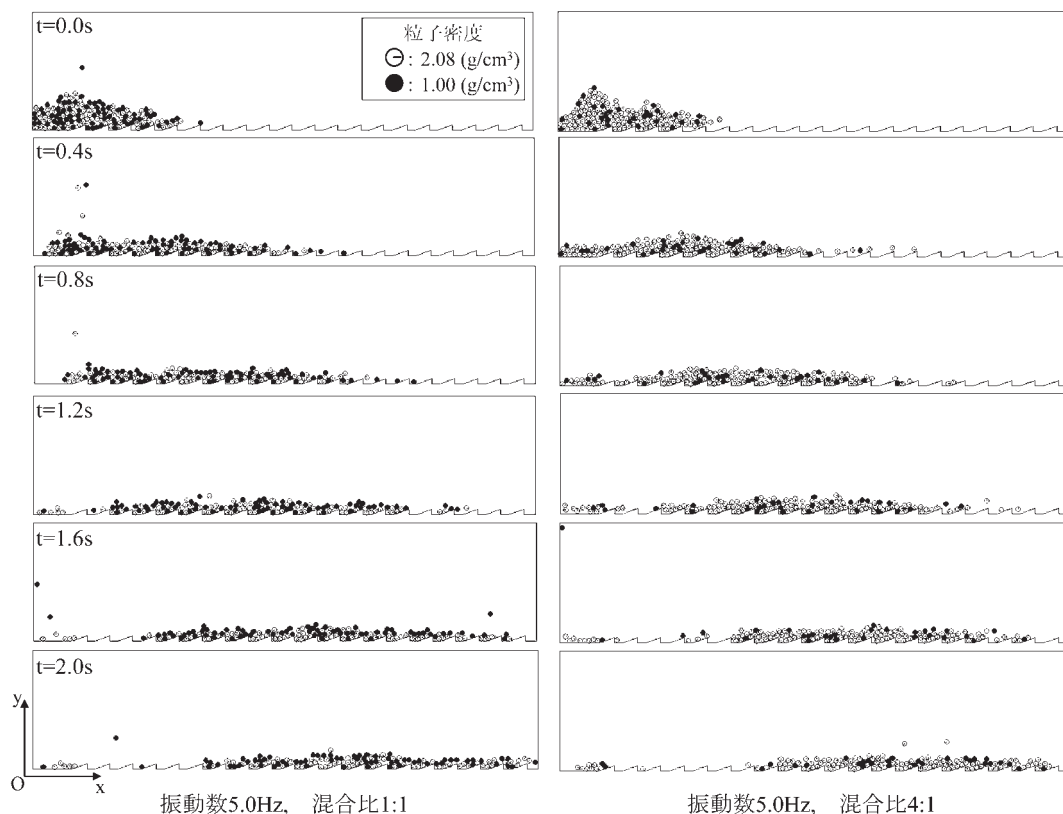


図10 粒子混合比の違いによる粒子運動特性の比較（解析）

ついて明瞭な差異は確認できなかった。これは供試粒子の比重差が小さかったことが一因であると思われる。

図10に揺動選別シミュレーションの結果を示す。解析条件は実験とほぼ同じになるように設定した。本図から、DEMシミュレーションによって、実験結果と同様の粒子運動をある程度再現可能なことがわかる。いずれの解析結果でも時間経過に伴って、白色粒子（比重大）と黒色粒子（比重小）が振動作用により右側へ移送されていく様子を再現できている。

図11に前述同様、DEMシミュレーションで得られた全粒子の鉛直方向平均位置の経時変化を示す。前述の結果と同様、初期状態における両粒子の平均位置は同じ値を示している。揺動選別が開始されると、振動作用によって粒子が層状に再配置されるので、いずれの粒子の平均位置も減少する。また、いずれの混合比についても比重の大きい粒子の平均位置の方が、比重の小さい粒子のそれよりも常に小さな値で推移している様子がわかる。つまり、これは比重の大きい粒子が

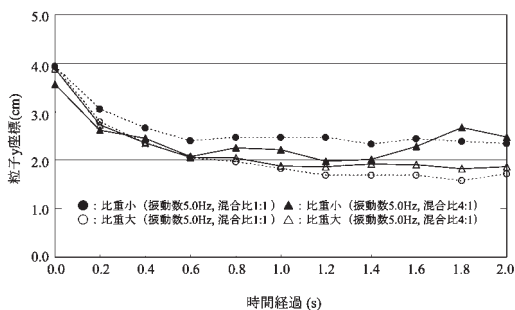


図11 粒子の鉛直方向平均位置の経時変化（解析）

比重の小さい粒子の下側に移動していることを示しており、時間経過とともに揺動選別が進行していく様子を示唆している。しかしながら、粒子混合比の差異が揺動選別現象に及ぼす影響については、顕著な相違は認められないことがわかった。

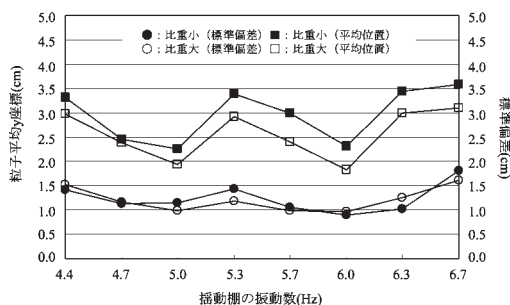


図12 種々の揺動棚振動数による粒子運動特性の比較 (0.8s 後)

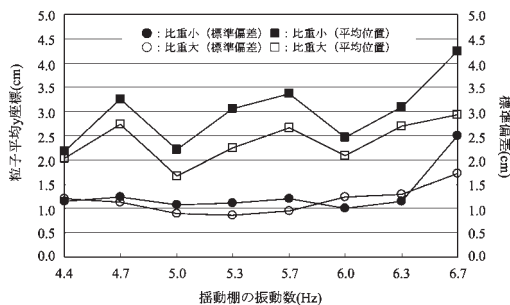


図13 種々の揺動棚振動数による粒子運動特性の比較 (1.8s 後)

3. ケーススタディ

前述の揺動選別実験結果とDEMシミュレーション結果の比較・照査から、DEMによって揺動棚振動数の違いによる粒子運動の差異を定性的に予測可能であることが示された。そこで、揺動棚の振動数に着目し、揺動棚の振動数の相違が粒子の選別挙動にどのような影響を及ぼすのかさらに詳しく検討するため、揺動棚振動数を4.4~6.7Hzの範囲にわたって0.3Hz間隔で変化させたDEMシミュレーションを行い、そのときの粒子の運動特性を調べた。また、いずれの解析でも粒子の混合比は2:1とした。

図12および13に、揺動選別開始後0.8および1.8sの粒子群の位置と運動の状況を振動数別にグラフ化したものである。ここで、グラフの横軸は揺動棚振動数を、また、縦軸はDEMシミュレーションで得られた粒子群の鉛直方向平均位置および標準偏差をそれぞれ表す。これらの図から、揺動棚振動数の増加に伴い、標準偏差が大きくなる傾向が確認される。標準偏差は、全粒子の平均位置からの各粒子の隔たりの量を表す指標であり、この値が大きい場合には、粒子が上下方向に激しく運動していることを意味する。よって、振動数の高い6.7Hzの場合には、平均位置は比重差によって顕著な差異が認められる一方で、標準偏差は大きくなる傾向があり、粒子が激しく上下に運動しているだけで良好な選別が行われていない可能性が示唆される。これに対して、振動数の低い4.4Hzの場合には、平均位置の比重差による差異は小さく、標準偏差も小さい値となっているので、粒子群は一樣に層を成して移送されるだけで、分離・選別はほとんど行われていない様子が推察される。

一方、振動数5.3および5.7Hzにおいては、いずれの時刻でも、比重差による平均位置の差異がある程度

確認でき、また、標準偏差の比重差による差異も大きくなっている点から、粒子群が比重差によって上下方向へ適度に分離・選別されつつ、層状に移送されている様子が伺える。このように、DEMの活用によって、コンバイン揺動選別部の最適な揺動選別条件を推定できる可能性が示唆されたといえる。

結 言

自脱型コンバイン用揺動選別部を改良した揺動選別実験装置を製作し、これを用いて揺動棚振動数や供試材料の混合比を種々変えた揺動選別実験を行った。さらに、揺動選別実験のDEMシミュレーションを行うとともに、実験結果と解析結果を比較・照査することにより、DEMモデルの妥当性を検討した。その結果、揺動棚振動数ならびに混合比の違いによる供試粒子の運動ひいては選別・分離現象を定性的に表現可能であることがわかった。さらに、DEMによるケーススタディとして揺動棚振動数を種々変えた解析を行った結果、揺動棚振動数の差異による粒子挙動の変化を表現できることを示した。特に、DEM解析結果から最適な選別を行うための揺動棚振動数を推定できる可能性が示唆された。

今後は、実際の籾と藁、糞等の混合体を用いた現実に近い揺動選別実験や3次元DEMによる数値解析法の高度化を行っていく予定である。

文 献

- Cundall P. A. 1971 A computer model for simulating progressive large-scale movement in blocky rock systems, *Symp, ISRM, Nancy, France, Proc, 2*: 129-136
 児島初男, 山下律也 1989 揺動選別機の精選別特性(Ⅲ). 農業機械学会誌, 51(5): 97-103

- 児島初男, 坂口栄一郎 1992 テーブル型揺動式選別機の選別特性. 神大農研報, **20**(1): 123-128
- Mark J 1999 Numerical modeling of silo filling. II: discrete element analyses. *J. Eng. Mech.*, **125**: 104-110
- Masson S 2000 Effect of particle mechanical properties on silo flow and stresses from distinct element simulation. *Powder Technol.* **109**: 164-178
- Matsushima T 2002 Discrete Element Modeling for Irregularly-shaped Sand Grains. *Proc. NUMGE 2002*
- 佐伯暢人, 皆川利宣, 高野英資 1998 個別要素法による振動輸送の3次元数値シミュレーション. 日本機械学会論文集 (C編), **64**(625): 3264-3270
- 坂口栄一郎, 川上昭太郎, 田中 聡, 飛田布美子 1996 離散要素法による穀粒排出現象のシミュレーション—要素の形状が流動状態に及ぼす影響—. 農業機械学会誌, **58**(4): 9-17
- SANAD A. M. 2001 Computations of granular flow and pressures in a flat-bottomed silo. *J. Eng. Mech.*, **127**: 1033-1043
- 田中宏明 2006 振動式サブソイラによる土層破碎の個別要素法 (DEM) シミュレーション. 農業機械学会誌, **68**(4): 13-17

Summary

Shaking separation test apparatus was developed by reconstruction of shaking separation unit in a commercial head-feeding combine harvester in order to improve the performance of shaking separation system. Shaking separation tests were conducted under various conditions such as the frequency of shaking table and mixture ratio of the particles tested. The motion of particles in the test was measured directly by using a high-speed camera. On the other hand, the numerical simulations on the shaking separation tests were carried out by DEM (Discrete Element Method) and its validity was verified by comparison with the test data. As a result, the behavior of particles simulated by the DEM agreed qualitatively with that observed in all the tests under the various conditions mentioned above. Case studies by the DEM were conducted for solving the mechanical behavior of particles under the various frequency conditions. The results would give the good suggestions to determine the optimal frequency condition for shaking separation system in the head-feeding combine harvester in particular.