

ロゼット解析およびDEMを用いた子実コーン収穫時の汎用 コンバイン脱穀部天板の負荷解析

誌名	農業食料工学会誌 = Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery and Food Engineers
ISSN	2188224X
著者名	大塚,望実 平井,康丸 岡安,崇史 深見,公一郎 高橋,仁康
発行元	農業食料工学会
巻/号	85巻6号
巻号補足	
掲載ページ	p. 400-406
発行年月	2023年11月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



ロゼット解析およびDEMを用いた子実コーン収穫時の 汎用コンバイン脱穀部天板の負荷解析

大塚望実^{*1†}・平井康丸^{*2}・岡安崇史^{*2}・深見公一郎^{*3}・高橋仁康^{*3}

要 旨

汎用コンバインは、稲、麦、大豆を主な対象作物とするため、子実コーン収穫時の脱穀部天板の強度不足が懸念される。本研究では、ロゼット解析とDEMを用いて、コーン収穫時の天板負荷を解析した。その結果、von Mises 応力のピーク 10 点平均は、天板中間部やや前方寄りでピークを示し、手前側の 88.5 MPa が最大であった。負荷方向はこぎ胴の周方向寄りであった。また、201 MPa の von Mises 応力が計測され、このときの天板の安全率は 1.34~2.19 であった。DEM 解析より、大きな負荷を与えるコーンの衝突挙動は挟まれ衝突であり、天板手前側に集中することが示された。この結果はロゼット解析と対応した。

[キーワード] コンバイン, 3 軸ひずみゲージ, 衝突, 飼料用トウモロコシ, 数値解析, 脱穀部, DEM, 負荷, ロゼット解析

Examining Load on the Top Plate of a Combine for Multi-crops during the Harvesting of Feed Corns through Rosette Analysis and DEM

Nozomi OTSUKA^{*1†}, Yasumaru HIRAI^{*2}, Takashi OKAYASU^{*2},
Koichiro FUKAMI^{*3}, Kimiyasu TAKAHASHI^{*3}

Abstract

Combines for multi-crops might have insufficient strength on the top plate of the threshing section during corn harvesting. This study examined the load on the top plate through rosette analysis and DEM. The results showed that the average von Mises stresses peaked at slightly forward position of the middle of the top plate, reaching a maximum stress of 88.5 MPa on the front side. The load direction approximately followed the circumferential direction of the threshing drum. The safety factor of the top plate was 1.34-2.19 when a von Mises stress of 201 MPa was measured. DEM analysis showed that large loads resulting from sandwiched collisions were concentrated on the front side; this finding is consistent with the rosette analysis.

[Keywords] combine harvester, triaxial strain gauges, collision, feed corn, numerical analysis, threshing section, DEM, load, rosette analysis

I 緒 言

我が国では濃厚飼料の低自給率を背景として、近年子実コーン（以下、コーン）を水田で栽培する取り組みが

推進されている。また、数値目標として、農林水産省は濃厚飼料の自給率を 2021 年時点の 13 % から 2030 年までに 15 % に向上させることを掲げている（農林水産省畜産局飼料課, 2023）。

* 2022 年 10 月第 76 回九州農業食料工学会例会（オンライン）、2023 年 9 月農業環境工学関連学会 2023 年合同大会にて一部講演

*1 会員、九州大学大学院生物資源環境科学府（〒819-0395 福岡市西区元岡 744）、Graduate School of Bioresources and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

*2 会員、九州大学大学院農学研究院（〒819-0395 福岡市西区元岡 744）、Faculty of Agriculture, Kyushu University, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

*3 会員、農研機構九州沖縄農業研究センター筑後・久留米研究拠点（筑後）（〒833-0041 福岡県筑後市大字和泉 469）、Chikugo Research Station, Kyushu Okinawa Agricultural Research Center, NARO, 469 Izumi, Chikugo, Fukuoka 833-0041, Japan

† Corresponding author : otsuka.nozomi.624@s.kyushu-u.ac.jp

コーンの栽培を推進する方策として、大豆や小麦、水稲などの作物と組み合わせて輪作体系の一部に組み込む形が多く、農家でとられている（荒木，2019）。この輪作体系にはコーンの自給率向上に加えて複数のメリットがある。例えば、①圃場の排水性が改善されること、②連作障害が回避されること（富沢，2016）、③労働時間当たりの収益性が高いことなどがある（荒木，2019）。しかし、これらのメリットがあるにも関わらず、コーンの作付面積は他の作物と比べて依然として小さい（鶴川，2020）。その原因の一つとして収穫機の問題が考えられる。

一経営体が複数の穀物を栽培するのであれば、各穀物専用の収穫機ではなく、多様な穀物を収穫可能な汎用コンバインを導入した方がコスト面で有利である。しかし、ここで問題となるのが汎用コンバインでコーンを収穫する際の脱穀部の損傷である。コーンの穂は稲や小麦、大豆に比べ質量が大きく、硬いため、脱穀部天板に衝突した際の衝撃音が大きく、その強度不足が懸念されている。この懸念について、(株)クボタは、天板の補強材をアタッチメントとして販売することで対応している。

一方、農業機械開発においては、耐久性に加えて、コスト削減、機体の軽量化や省資源化への対応が求められている。そこで、実作業を再現した機械への負荷解析に基づく設計指針の提示がますます重要になっている。しかし、収穫機開発においては、対象作物と機械の相互作用が複雑なため、負荷解析に関する研究例は少ない。Kovács and Zwierczyk (2018) は、DEM (Distinct Element Method) - FEM (Finite Element Method) 連成解析を用いて、コーン専用収穫機械の茎葉ローラについて負荷の集中箇所を解析した。一方、脱穀部天板を対象とした負荷解析の研究例はない。

そこで本研究では、コーン収穫時の汎用コンバイン脱穀部天板の負荷解析を行った。本研究の目的は、1) ロ

ゼット解析より天板負荷の大きさ、方向、発生位置等の特徴を明らかにすること、2) DEM 解析よりコーンの天板への衝突挙動と衝突位置を明らかにすることであった。

II 材料および方法

1. 収穫試験

九州沖縄農業研究センター内のほ場で、コーン収穫時に脱穀部天板に生じるひずみを計測した。コーンの品種は P9027 であった。収穫には汎用コンバイン (ARH350, クボタ) を用いた。計測系 (図 1) は、3 軸ひずみゲージ (FRAB-3-11-3LJBT-F, 東京測器研究所), ブリッジボックス (SB-120DD-1R, 東京測器研究所), ひずみ 4 ゲージユニット (8 チャンネル/ユニット) を 2 台 (TMR-321, 東京測器研究所), マルチレコーダコントロールユニット (TMR-311, 東京測器研究所), 発電機, 計測用 PC で構成した。ひずみゲージは、こぎ胴カバー天板 (縦 310 mm × 横 1730 mm) 16 か所に、第 1 軸がコンバインの進行方向に一致するように貼付した。また、コーンの天板への衝突方向を解析するために、第 1 軸から 70° ~ 110° の範囲を「第 2 軸寄り」の方向として定義した (図 1)。

試験区間 10 m を設定し、2 条のコーンを走行速度 0.16 ~ 0.20 m/s で収穫した。1 回の試験で 4 か所のひずみを計測し、4 回の試験により 16 か所を計測した。各試験の計測時間は約 60 秒、ひずみのサンプリング周波数は 10 kHz であった。10 m の試験区間のコーンの株数は 2 条の合計で 100 株、1 株当たりの穂数は 1 本であった。したがってコーンの流量は 1.6 ~ 2.0 本/s となる。また、試験ほ場において採取した穂 5 本の平均全長は 170 mm、穂中央部の平均直径は 37.2 mm、平均質量は 152 g であった。含水率は子実部分が 26.5 %、芯部分が 57.9 % であった。

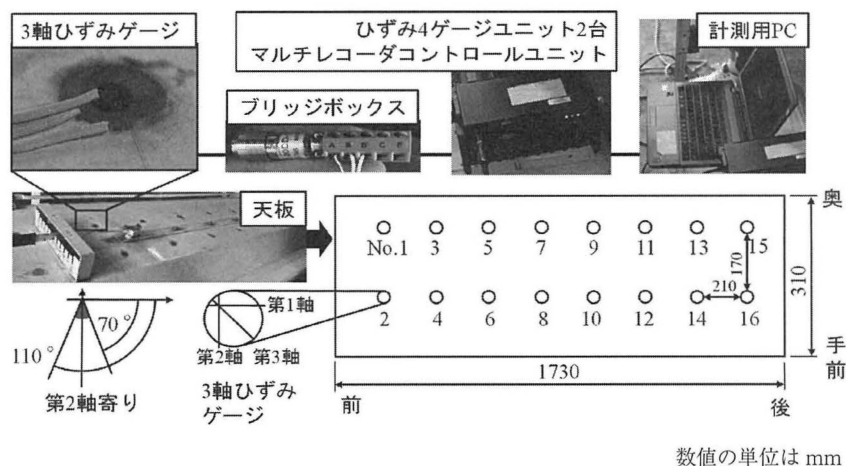


図 1 計測系および 3 軸ひずみゲージの貼付位置

Fig. 1 The measurement system and the attachment positions of triaxial strain gauges

2. 天板負荷のロゼット解析

脱穀部内でコーンが天板に与える負荷の方向は不明であり、単軸ひずみゲージによる天板負荷の計測は困難である。そこで、3軸ひずみゲージを用いたロゼット解析により、主応力の大きさと方向を求めた。ただし、ここでは天板の板厚方向の応力成分を0とする平面応力状態として近似した。その理由は、天板の縦横の寸法に対し、板厚が1.5 mmと薄いためである。

ひずみゲージの第1軸、第2軸、第3軸は45°間隔で配置されており(図1)、各方向の垂直ひずみの計測値を ε_1 、 ε_2 、 ε_3 とする。このとき、主応力 $\sigma_{\max, \min}$ はそれぞれ式(1)より求められる(菅野ら, 1988)。

$$\sigma_{\max, \min} = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{1 - \nu} \pm \frac{1}{1 + \nu} \sqrt{2((\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2)} \right] \quad (1)$$

ここで、 E : ヤング率, ν : ポアソン比である。収穫試験に使用した ARH350 の天板材料は不明であった。そこで、後継機種 ARH380 の天板材料が SPHC-P (熱間圧延鋼板 酸洗) であることに基づき、 $E=205$ GPa, $\nu=0.3$ を用いることとした。SPHC-P の基準強度は 270 ~ 440 MPa である。

また、第1軸から時計回りを正としたとき、第1軸から最大主応力の方向までの角度 ϕ は式(2)より得られる(菅野ら, 1988)。

$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{2\varepsilon_3 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \right\} \quad (2)$$

ただし、 $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ の場合、第1軸から最大主応力の方向は $\phi + \pi/2$ である。

続いて、天板負荷の指標として von Mises 応力 σ_{vm} を式(3)により算定した(青木ら, 2018)。von Mises 応力は多軸に生ずる応力を引張圧縮方向に相当した量的な応力である。

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{1}{2} \{ \sigma_{\max}^2 + \sigma_{\min}^2 + (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})^2 \}} \quad (3)$$

さらに、数値解析ソフトウェア MATLAB ver. R2022a (MathWorks) を用いて、von Mises 応力のピーク値の大きいものから10点を抽出し、コーンの衝突による応力の代表値とした。また、この10点について衝突時における最大主応力の方向を抽出し、その角度が第2軸寄り(図1)となる回数を求めた。

3. コーンモデル

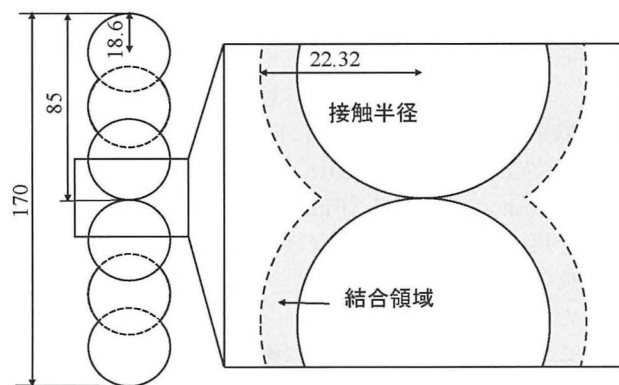
3次元個別要素法 (DEM) を用いて、コーンを結合粒子によりモデル化した。コーンモデルの作成および脱穀部内での挙動の解析には EDEM ver. 2022.1 (Altair) を用いた。

コーンはこぎ室を通過する際に、こぎ歯やコンケーブ、

天板との相互作用により、ほとんどが折れる。そこで、外力が加わることによるコーンの折れを表現した。

図2にコーンモデルの概略図を示す。まず、半径18.6 mmの3個の球を連結させ、全長170 mmの半分サイズ(85 mm)を1粒子とみなし、剛体コーンを2粒子作成した。続いて、この2粒子を接触させた状態で結合モデルを付加し、外力が加わることにより折れるモデルを作成した。結合モデルには Bonding V2 を用いた。このモデルでは Hertz-Mindlin (no slip) の接触モデルに従って接触判定を行い、2粒子の接触半径が重なるとき、粒子間に結合が形成される。接触半径は粒子半径の1.2倍(22.32 mm)に設定した。また、結合した粒子に設定された臨界値以上の法線・接線力が加わると結合が消滅する。表1に使用した結合パラメータを示した。

表2にコーンモデルに使用した物性値を示した。密度はコーンの子実部分と芯部分の各5サンプルをピクノメータ法により計測し(八幡ら, 1967)、それぞれの平均値を求めた。続いて、子実と芯部分の体積割合により加重平均し、コーン全体としての密度を算定した。ヤング率については、天板と衝突する子実部分のみを計測し



数値の単位は mm

図2 コーンモデルの概略図

Fig. 2 Schematic diagram of the cone model

表1 コーンモデルの結合パラメータ

Table 1 Bonding parameters of the cone model

法線剛性 (GN/m ³)	10
せん断剛性 (GN/m ³)	10
臨界法線応力 (MPa)	80.4
臨界せん断応力 (MPa)	80.4

表2 コーンおよび Geometry の物性パラメータ

Table 2 Physical property parameters of cone and Geometry

物 性	コーン	Geometry
密度 (g/cm ³)	1.08	7.85
ヤング率 (MPa)	2.07	2.05 × 10 ⁵
ポアソン比	0.25	0.3

た。荷重変位測定ユニット (EMX-1000N-FA, ZTA-1000N, IMADA) を用いて、直径 3 mm の丸棒を子実に 0.20 mm 貫入させた際の荷重からヤング率を算定した。貫入速度は 60 mm/min であった。5 サンプル計測した平均値を求めた。ポアソン比は、Wei et al. (2017) のコーンのパイル形成に関するシミュレーションで用いられた値を使用した。

4. DEM によるコーン挙動と天板の負荷解析

DEM を用いて、コーンの挙動と天板負荷を解析した。まず、こぎ胴、こぎ歯、スクリュ、こぎ胴カバー、コンケーブ、送塵弁により構成される脱穀部の 3 次元モデルを Autodesk 製 Fusion360 で作成した (図 3)。加えて、脱穀部通過後のコーンの折れの状態を確認するために、コーンの受け箱を脱穀部後方に作成した。続いて、作成モデルを EDEM (Altair) に取り込み、Geometry とした。ここでは、EDEM 内で脱穀部を構成する構造物を Geometry と呼ぶ。Geometry の材料は鋼鉄とし、表 2 に物性値を示した。さらに、こぎ胴を収穫試験と同様の 350 rpm で回転させ、脱穀部前方からコーンを 1.8 個/s で投入した。この時のコーンの挙動を 20 秒間解析した。計算のタイムステップは 2.3×10^{-6} s であった。20 秒間の解析の後、受け箱に排出されたコーンから、脱穀部通過後のコーンの折れの状態を確認した。また、天板へコーンが衝突した際の法線方向の接触力 (以下、法線接触力) を 2×10^{-3} s ごとに出力した。ただし、各出力において、天板の複数箇所にコーンが衝突した場合は、法線接触力

表 3 コーン-コーンおよびコーン-Geometry の相互作用パラメータ

Table 3 Cone-cone and cone-Geometry interaction parameters

相互作用	コーン-コーン	コーン-Geometry
反発係数	0.182	0.308
静摩擦係数	0.40	0.464
転がり摩擦係数	0.01	0.01

が最大の箇所の値を採用した。

表 3 に脱穀部内のコーン挙動の解析に用いたコーン-コーン間およびコーン-Geometry 間の相互作用に関するパラメータを示した。コーン-Geometry の反発係数は 1 m の高さからコーンを板厚 1.5 mm の鉄板に対して落下させ、この時の跳ね返り高さから求めた。跳ね返り高さは鉄板へのコーンの接触位置により異なる。そこで、コーンの底面、側面、先端の 3 か所が接触した際の反発係数を各 10 回計測し、合計 30 回の計測の平均値を求めた。コーンが落下する一連の挙動はハイスピードカメラ (DETECT, HAS-U2) により 500 fps で撮影した。跳ね返り高さは、画像解析ソフトウェア (TEMA, Photon) を用いて求めた。

コーン-Geometry の静摩擦係数は、傾斜法により計測した (Varnamkhasti et al., 2008)。コーンを静置したステンレス板を徐々に傾斜させ、コーンが滑り出した瞬間の角度から静摩擦係数を算出した。コーンの先端あるいは底面を傾面の低い側に向けて各 5 回計測し、合計 10 回の計測の平均値を求めた。さらに、コーン-コーンの静摩擦係数は、安息角測定器 (ASK-01, アズワン) を用いて、子実粒子を堆積させた時の安息角に基づき決定した。DEM により子実粒子の堆積挙動を再現し、静摩擦係数が 0.28, 0.32, 0.36, 0.40 の時の安息角を求めた。安息角は各係数で 4 回解析し、平均値が実測値に最も近い静摩擦係数を採用した。コーン-コーンの反発係数は Wei et al. (2017) の値を使用した。

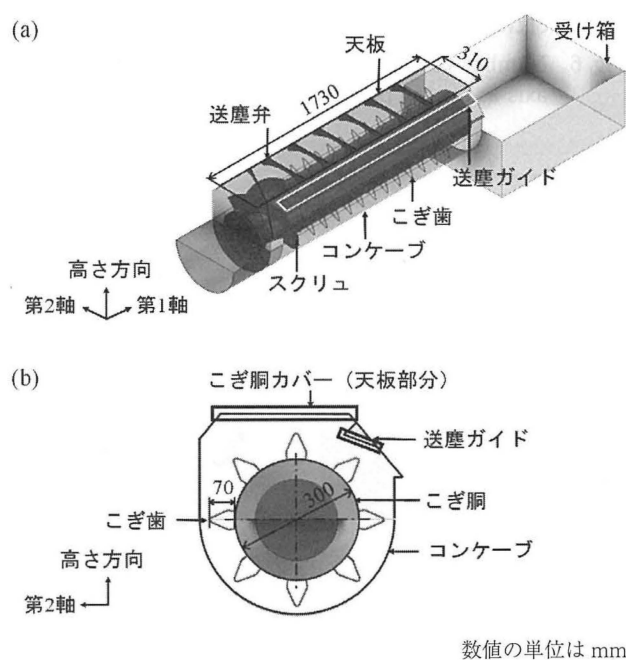


図 3 脱穀部の 3D モデル (a) 全体の立体図, (b) 主要構造の正面図

Fig. 3 3D model of the threshing section, (a) 3D view, (b) front view of main structure

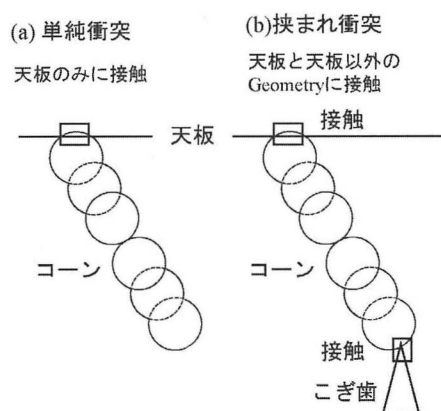


図 4 コーンの衝突の分類 (a) 単純衝突, (b) 挟まれ衝突
Fig. 4 Classification of collisions of a corn (a) simple collision, (b) sandwiched collision

5. DEM 解析結果の分析

法線接触力の時系列波形のピーク点におけるコーンの衝突を単純衝突と挟まれ衝突に分類した(図4)。ここで、単純衝突はコーンが天板のみに接触する衝突、挟まれ衝突はコーンが天板と天板以外の Geometry に挟まれる衝突と定義した。さらに、縦 310 mm×横 1730 mm の天板を、縦 10 mm×横 20 mm の小区画 (2697 個) に分け、各区画におけるコーンの衝突回数を出力した。衝突の判定はコーンと天板の間に重なりが生じているか否かでを行った。

III 結 果

1. 天板負荷のロゼット解析

図5に天板における von Mises 応力のピーク 10 点の平均と標準偏差を示す。天板手前側・奥側ともに天板中間部やや前方寄りにおいてピークが生じた。具体的には、手前側は No.4 の 88.5 MPa が、奥側は No.5 の 62.6 MPa が最も大きかった。また、天板奥側より手前側の方が大きい傾向であった。さらに、全計測データ中の von Mises 応力の最大値は No.4 における 201 MPa であった。このときの天板の安全率は 1.34 ~ 2.19 であった。

図6に天板における von Mises 応力の大きさが上位の 10 回のコーンの衝突の内、「第2軸寄り」に衝突した回数を示す。最大値は No.6, 10 における 8 回であった。また、天板手前側の方が「第2軸寄り」となる衝突回数が多い傾向であった。

2. DEM 解析におけるコーンの「折れ」の状態

20 秒間の解析において、受け箱の中には、折れたコーンが 35 本、折れていないコーンが 3 本排出された(図7)。このことから、DEM 解析において、コーンは脱穀部を通過することでそのほとんどが折れることが分かった。

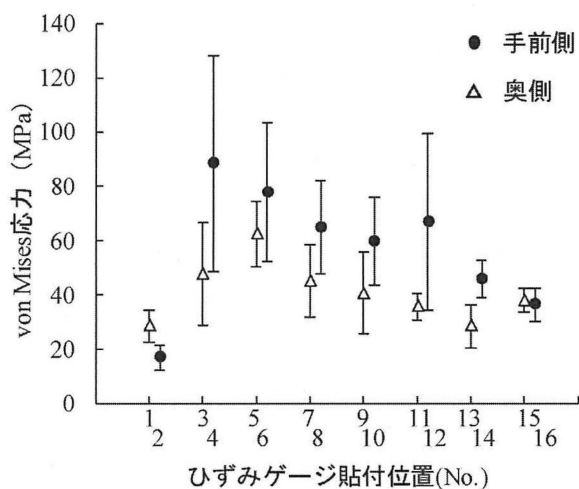
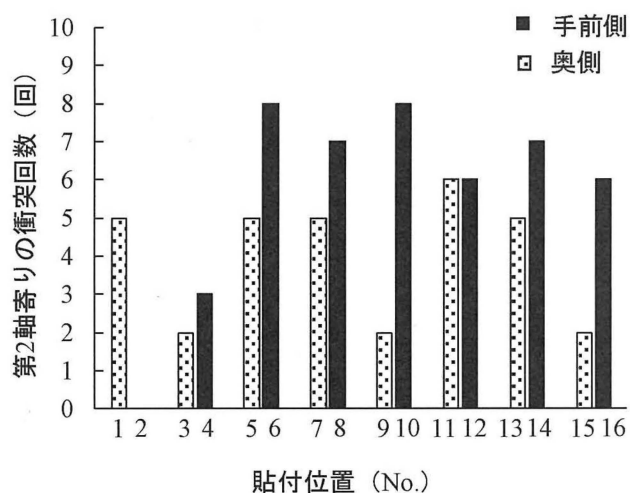


図5 天板における von Mises 応力
Fig. 5 von Mises stress at the top plate

3. 天板への法線接触力

図8に法線接触力の時系列波形を示す。この波形から検出されたピーク数は 579 点であった。579 点の内、487 点が単純衝突 (84 %), 残りの 92 点が挟まれ衝突 (16 %) であった。単純衝突によるピーク値は $2.57 \times 10^{-6} \sim 1.26$ kN であった。一方、挟まれ衝突によるピーク値は 0.42 ~ 17.4 kN であった。挟まれ衝突による法線接触力は、単純衝突に比べ顕著に大きく、値の範囲も広がった。



縦軸は von Mises 応力の大きさが上位 10 回の衝突の内「第2軸寄り」に衝突した回数
「第2軸寄り」は第1軸から時計回りに 70° ~ 110° の範囲で定義される (図1)

図6 天板において「第2軸寄り」にコーンが衝突した回数
Fig. 6 Number of the cone collisions close to the second axis at the top plate

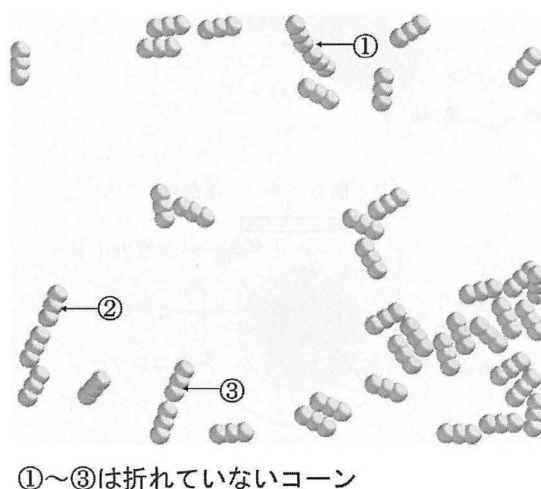


図7 脱穀部通過後のコーンの「折れ」の状態
Fig. 7 State of broken cones after passing through the threshing section

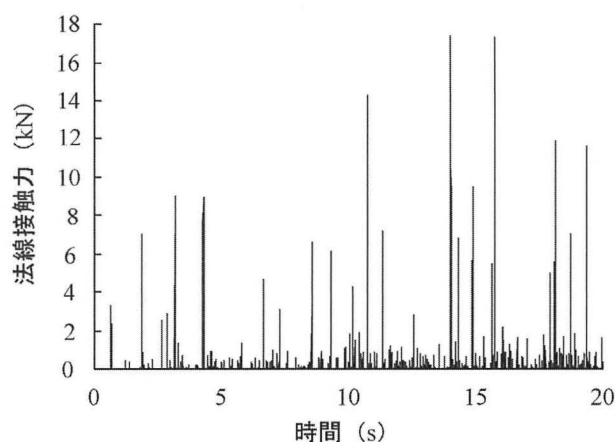


図8 天板への法線接触力の時系列波形

Fig. 8 Time series waveform of normal contact force to the top plate

4. 天板におけるコーンの衝突回数

図9に天板におけるコーンの衝突回数を示す。すべての衝突を対象とした場合、衝突回数の最大値は6回であった(図9(a))。また、天板の前方から300 mmの区間はほとんど衝突が見られなかった。さらに、天板中間部に衝突回数が集中していた。天板の手前・奥方向における衝突回数の偏りは見られなかった。一方、法線接触力が1.5 kN以上の挟まれ衝突を対象とした場合、衝突回数の最大値は5回であり、天板手前側に衝突が集中していた(図9(b))。

IV 考 察

1. ロゼット解析より示された天板の負荷傾向

von Mises 応力は天板手前側において大きい傾向であった(図5)。さらに、「第2軸寄り」となる衝突回数は手前側において多い傾向であった(図6)。また、第2軸はこぎ胴の周方向に一致する。これらのことから、こぎ胴の回転により投げ出されたコーンが天板手前側に強く衝突する現象がこぎ室内で起こっていると推察される。

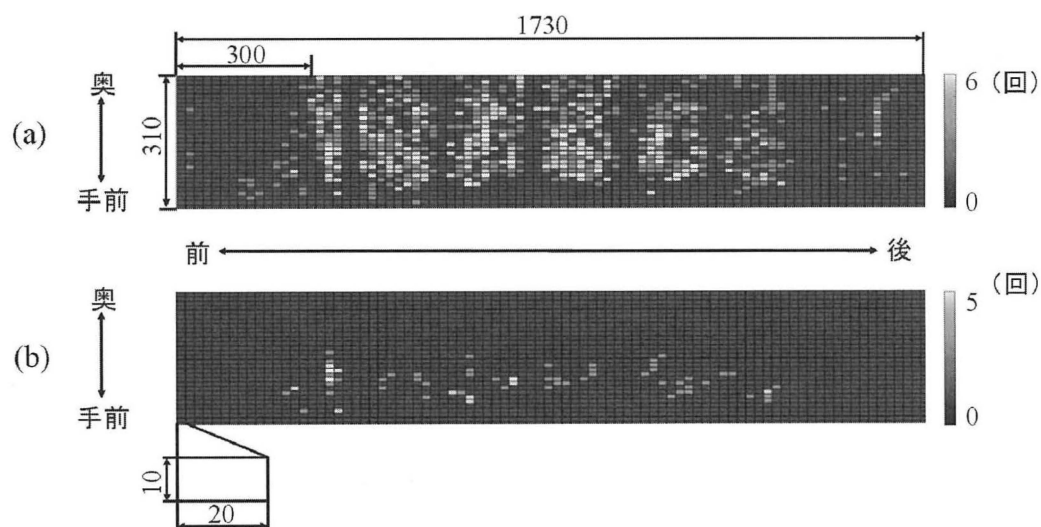
2. 安全率

von Mises 応力から得られた天板の安全率は1.34～2.19であった。この値は、鋼および軟鋼が衝撃荷重を受ける際に推奨される安全率12以上に比べて極めて低い(宇津木, 2014)。そのため、汎用コンバインをコーン収穫に適用するためには、天板により大きな基準強度をもつ材料を使用する、天板の厚みを増やすなどの補強が必要と考えられる。

3. DEM 解析より示されたコーンの衝突挙動および衝突位置

DEM 解析の結果、脱穀部を通過したコーンのほとんどが折れていた(図7)。収穫試験における「折れ」の割合については正確なデータを収集していないが、脱穀後に排出されたコーンを観察したところ、その多くは折れていた。このことから、脱穀過程でコーンの「折れ」が生じていることが確認された。今後は、収穫試験において詳細な「折れ」のデータを収集し、DEMによる「折れ」の解析結果の妥当性を検証する予定である。

法線接触力の時系列波形のピーク点における衝突挙動の分類の結果、挟まれ衝突による法線接触力は、単純衝



色が明るい箇所が衝突回数が多いことを示す。

図9 天板におけるコーンの衝突回数, (a) すべての衝突, (b) 1.5 kN 以上の挟まれ衝突

Fig. 9 Number of corn collisions at the top plate, (a) all collisions, (b) sandwiched collisions greater than 1.5 kN

突に比べ顕著に大きいことが示された。このことから、挟まれ衝突は天板に大きな負荷をもたらす衝突といえる。

さらに、1.5 kN 以上の挟まれ衝突を対象とした衝突回数は天板手前側に集中した (図 9 (b))。この原因の一つが脱穀部内部の構造である。脱穀部内部で最も狭くなっている箇所は天板手前側に位置する送塵ガイド (図 3) とこぎ歯先端の間であり、その間隙はわずか 19 mm である。一方、コーンモデルの全長は 170 mm、直径 37.2 mm と脱穀空間に対してかなり大きい。このため、送塵ガイド-こぎ歯間で挟まれ衝突が生じやすく、負荷の大きい衝突が天板手前側に集中した。また、図 9 (b) の結果は von Mises 応力が天板手前側において大きい傾向を示したことと対応している (図 5)。したがって、DEM 解析の結果を踏まえると、実測した von Mises 応力の傾向は天板手前側の挟まれ衝突に起因するものと推察される。

また、天板の前方から 300 mm の区間において、ほとんど衝突が見られなかった (図 9 (a))。この原因は、同区間のこぎ胴はこぎ歯がないスクリュ構造であるためである (図 3)。このスクリュの回転作用により、投入されたコーンがかき込まれて脱穀部後方に送られる。この時、スクリュ真上の天板にコーンがほとんど衝突しなかったと推察した。

V 結 論

本研究の目的は、1) ロゼット解析より天板負荷の大きさ、方向、発生位置等の特徴を明らかにすること、2) DEM 解析よりコーンの天板への衝突挙動と衝突位置を明らかにすることであった。得られた結論は以下の通りである。

- 1) von Mises 応力のピーク 10 点の平均は、天板中間部やや前方寄りでピークを示し、手前側の 88.5 MPa が最大であった。
- 2) 天板負荷の方向はこぎ胴の周方向寄りであった。
- 3) 全計測データ中の von Mises 応力の最大値は 201 MPa であり、このときの天板の安全率は 1.34 ~ 2.19 であった。

- 4) DEM 解析の結果、天板に大きな負荷をもたらす衝突挙動は挟まれ衝突であった。また、挟まれ衝突は天板手前側に集中した。この結果は、ロゼット解析の結果と対応するものであり、結論 1) は天板手前側の挟まれ衝突に起因すると推察された。

謝 辞

本論文の発表に関わる費用の一部は JSPS 科研費 23K05479 の助成を受けたものです。ここに記して感謝の意を表します。

References

- 青木隆平, 長嶋利夫, 2018. 設計技術者が知っておくべき有限要素法の基本スキル. オーム社, 東京, 206-207.
- 荒木和秋, 2019. 国産子実トウモロコシ生産の可能性—北海道道央地帯転作トウモロコシを対象として—. 農業経営研究, 57 (2), 65-70.
- 菅野 昭, 高橋 賞, 吉野利男, 1986. 応力ひずみ解析. 朝倉書店, 東京, 53-55.
- Kovács, A., Zwierczyk, P. T., 2018. Coupled DEM-FEM Simulation on Maize Harvesting. Proceedings of 32nd European Conference on Modelling and Simulation (ECMS), Wilhelmshaven, 405-411.
- 農林水産省畜産局飼料課, 2023. 飼料をめぐる情勢. https://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/lin/l_siryo/attach/pdf/index-896.pdf. Accessed May. 1, 2023.
- 富沢ゆい子, 2016. 北海道における子実用コーンの栽培法と輪作体系への導入効果. 牧草と園芸, 64 (1), 6-9.
- 鶴川洋樹, 2020. 子実用コーン生産の可能性と展開条件: 都府県の耕種経営における大規模生産事例. 畜産の情報, 373, 60-74.
- 宇津木諭, 2014. 絵ときでわかる 材料力学 (第2版). オーム社, 東京, 16-17.
- Varnamkhasti, M. G., Mobli, H., Jafari, A., Keyhani, A. R., Soltanabadi, M. H., Rafiee, S., Kheiralipour, K., 2008. Some physical properties of rough rice (*Oryza Sativa* L.) grain. Journal of Cereal Science, 47 (3), 496-501.
- Wei, H., Zan, L., Li, Y., Wang, Z., Saxén, H., Yu, Y., 2017. Numerical and experimental studies of corn particle properties on the forming of pile. Power Technology, 321, 533-543.
- 八幡敏雄, 田淵俊雄, 中野政詩, 1967. 土粒子の真比重試験方法. 東京大学農業工学教室編, 土壌物理実験 改訂版. 東京大学出版会, 東京, 32-34.
- (受付: 2023 年 5 月 13 日・受理: 2023 年 10 月 5 日・質問期限: 2024 年 1 月 31 日)