

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：10105

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23580342

研究課題名(和文) 3D-CAD/CAEを利用した次世代型ビートタッパの高速高精度化に関する研究

研究課題名(英文) Development of high performance sugar beet toppler using a 3D-CAD and CAE system

研究代表者

佐藤 禎稔 (SATOW, Tadatoshi)

帯広畜産大学・畜産学部・教授

研究者番号：90142794

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：テンサイ収穫のビートタッパは作業速度が増すとタッピング機構の追従性が低下するため、高速高精度なビートタッパの開発が望まれている。本研究は3D-CADとCAEを利用して新たなビートタッパを開発することを目的とした。

慣行機の3DモデルをCAD上に構築し、CAEを利用してタッピング機構の運動解析を行った。また、慣行機の動作は模擬走行シミュレータと高速ビデオカメラで求めた。その結果、CAEは慣行機の動作をある程度計算できることを確認した。そこで、慣行機の構造をCAD上で変更し、CAEでその有効性を確認した。さらに、改造機を試作し、室内と圃場実験で評価した結果、高速作業に対応できることを検証した。

研究成果の概要(英文)：The following performance of topping work with sugar beet topplers decreases when the working speed increases. It is impossible to harvest at a high speed with conventional machines. This study aimed to develop new sugar beet toppler using a 3D-CAD and CAE software.

The 3D model of conventional sugar beet toppler was constructed on the CAD of a computer. The movement of topping mechanism of the test machine was simulated by the motion mechanism analysis software of the CAE. Real motions of the machine were captured with a high-speed video and simulator, and their motion trajectories were measured. The 3D-CAD and CAE were confirmed that it was possible to simulate the real motion of a conventional sugar beet toppler to some degree. Moreover, the 3D-CAD and CAE of the simulation system proposed to enable a topping work faster than the conventional sugar beet toppler. The topping performance of the modified machine in the high speed work was proven in the laboratory and the field experiment.

研究分野：農業機械学

キーワード：農業機械 テンサイ ビートタッパ タッピング作業 CAD CAE 運動機構解析 シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

わが国の砂糖の自給率は約 40%であり、その約 80%が北海道でのみ生産されているテンサイ（ビート）である。テンサイは、10月から11月にかけての降雪前に機械で収穫されるため、農家の方々はその際、使用するビートハーベスタ等に高い作業能率を要求している。テンサイは収穫時でも茎葉が繁茂しており、土中に生育している根部を掘り取る際、糖分が含まれない茎葉を除去するためにビートタッパによるタッピング作業を必要とする。

慣行のビートタッパは図1に示すように、フィーラホイールがテンサイの根部や地上の高さに追従して上下に動作し、フィーラホイールに4節リンク機構で取り付けられているタッピングナイフが茎葉を除去する。そのため、フィーラホイールがテンサイに衝突する度に跳ね上がり、作業速度が増すとタッピングナイフの追従性能が低下する。タッピング精度は農家の収入や製糖効率に影響を与えるため、ビートハーベスタは高速で根部を掘り取ることができるが、慣行のビートタッパでは高速で作業することは困難である。また近年、北海道の農業規模が拡大しており、農家の方々は今以上に高速高精度なビートタッパの開発を望んでいる。

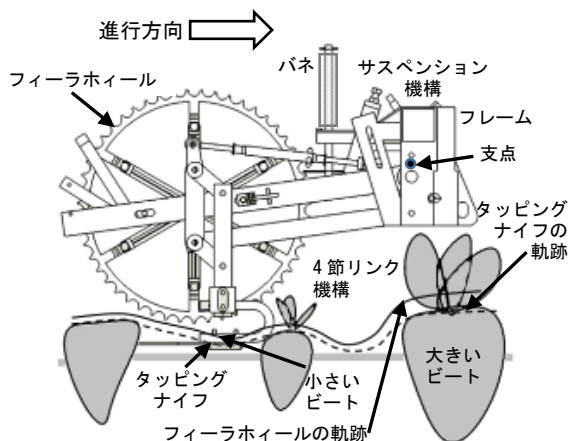


図1 ビートタッパの構造

### 2. 研究の目的

ビートタッパは、わが国に1930年代に輸入され、1940年代に国産化された。これまでに、佐藤らはテンサイの根部高さをそり式センサと超音波センサによって検出し、電気油圧サーボ機構を利用してタッピングナイフの高さを自動制御するビートタッパを開発した<sup>①</sup>。また、Zhuらは慣行のビートタッパを高速化するための数理モデルを提唱した<sup>②</sup>。しかし、現在のビートタッパの基本的なメカニズムはほとんど変化していないのが現状である。

北海道の農家の経営規模が拡大している中で、晩秋に行われるビート収穫には高い能率が要求される。しかし、慣行のビートタッ

パでは跳ね上がり現象が生じることから、一般に作業速度は1.3m/s以下に制限されている。

そこで本研究は、これまで勘と経験で行われてきた開発手法に代わり、近年急速に普及しているパソコンで利用可能な3次元CADとCAEの運動機構解析ソフトを活用して高速高精度化を達成するための新たなビートタッパの改良と開発を行うことを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 慣行のビートタッパの概要

図1に示した慣行のトラクタ直装型ビートタッパのタッピング機構は主に、フィーラホイール、4節リンク機構、タッピングナイフ、サスペンション装置およびPTO駆動装置で構成されている。フレームの支点に取り付けられたフィーラホイールはテンサイの根部高さに追従して振り子のように上下に動く。そして、そのフィーラホイールの回転軸に4節リンク機構で取り付けられているタッピングナイフが上下に動作して茎葉が切断される。その際、タッピング位置は図のようにテンサイの大きさに応じて変化する。したがって、作業速度が増すと、フィーラホイールは個々の根部に衝突する度に跳ね上がってしまうため、タッピング精度は低下する。なお、走行に伴ってフィーラホイールがテンサイを押し倒さないように、作業速度と同期してPTOで回転駆動される。

#### (2) 慣行機のタッピング機構の挙動とCAEによる高速化のためのビートタッパモデルの提案

供試機は、PTO駆動のトラクタ直装型2畦用ビートタッパである。まず、供試機の各部品の形状や寸法を実測し、3次元CADを利用してコンピュータ上に3Dモデルを構築した。運動機構解析のコンピュータシミュレーションは、CADにアドインされるCAEを利用した。供試の慣行機と後述の改造機のタッピングナイフの運動は、フィーラホイールと根部が衝突する際の反発係数を0.4に設定し、作業速度1.25~2.25m/sの範囲でCAEによってコンピュータシミュレーションを行った。

高速化のためのビートタッパの提案は、フィーラホイールの軽量化による慣性力の低減と跳ね上がり動作を防止するためにサスペンション機構に運動エネルギーを吸収するダンパを利用したことである。また、CAEのシミュレーションでは、フィーラホイールの材質を鋼鉄からアルミニウムに変更して重量を約60%軽減し、サスペンション機構のバネを減衰係数1.0~7.0N/mm/sのダンパに仮想的に変更して運動シミュレーションを行い、その運動性能を評価した。

#### (3) 室内実験と圃場実験

CAEのシミュレーション結果の妥当性を検証するために、アルミ製フィーラホイールと

サスペンション機構にダンパを採用した図2の改造機を実際に試作した。左側のフィーラホイールとタッピング機構が慣行の状態であり、右側がアルミ製フィーラホイールとダンパで改造したタッピング機構である。

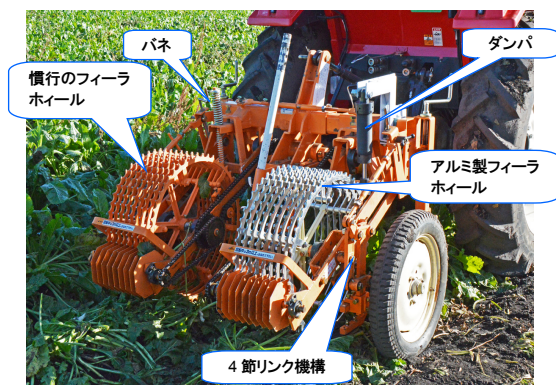


図2 慣行機と改造機のビートタッパ

室内実験では、慣行機と改造機のタッピング機構の上下動は製作したテンサイモデル模擬走行シミュレータを利用し、作業速度1.25~2.25m/sの範囲で運動を評価した。両機のタッピングナイフの上下動は図3に示すように、横方向から高速ビデオカメラ(300fps)で撮影し、2次元運動解析ソフトで市松模様のマーカの位置を計測して、軌跡を求めた。

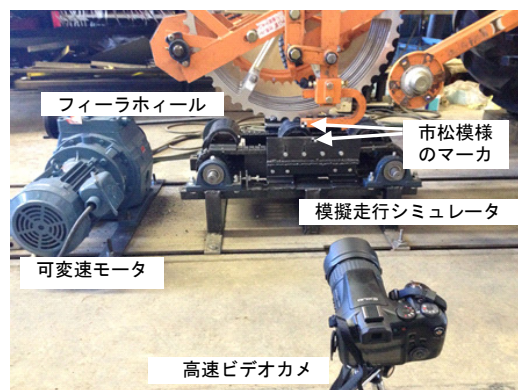


図3 模擬走行シミュレータによるタッピング機構の運動計測

また、テンサイを栽培している農家の圃場で作業速度を1.13~2.0m/sの範囲で変化させ、慣行機と改造機のタッピング精度を評価した。実験は、タッピング作業の前に両機ともそれぞれ30個のテンサイの根部高さや株間などの生育調査を行った。両機のタッピング後の精度は実際にメーカーでビートタッパを設計した技術者の目視によって評価して頂き、また適正なタッピング高さは根部高さから求められる次式の関係式の値で評価した<sup>③</sup>。

$$P = 0.568 H - 1.277$$

1)

ここに、 $P$ :適正タッピング高さ [mm]  
 $H$ :テンサイの根部高さ [mm]

#### 4. 研究成果

##### (1) CAEによるタッピング機構の運動解析

運動機構解析のCAEのシミュレーションでは、テンサイモデルを株間247mm、80個並べた状態で、フィーラホイールが根部の上を通過するときのタッピングナイフの運動をコンピュータシミュレーションを行い、タッピングナイフの軌跡を解析した。なお、テンサイの圃場調査によって根部の高さは平均55mmであり、解析時のタッピング高さは50mmに設定した。

図4は一例として作業速度1.75m/sの場合の実際の慣行機とCAEで計算した慣行機の仮想モデル、およびアルミ製フィーラホイールと減衰係数5N/mm/sのダンパを採用した仮想改造機のタッピングナイフの高さの軌跡を示す。1番目(R1)と4番目(R4)の根部の位置で、慣行機とそのCAEのモデルでは、フィーラホイールの衝突によってタッピング機構が跳ね上がり、根部を飛び越していることが実測並びにシミュレーションの結果に示された。しかし、ダンパとアルミフィーラホイールを利用した改造機はそのような跳ね上がり現象が生じておらず、またタッピングナイフが個々のテンサイモデルの頂部よりも下方の位置を通過していることから、改造による性能向上の効果がシミュレーション結果に現れている。

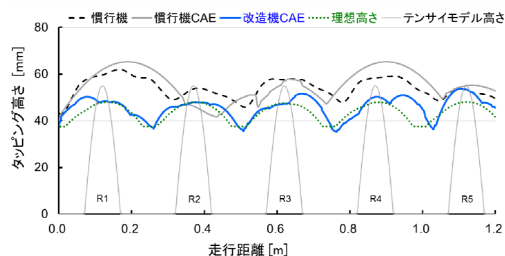


図4 慣行機と改造機の実測値およびCAEによるタッピング位置のシミュレーション結果 (v=1.75m/s)

##### (2) 慣行機と改造機のタッピン性能の室内実験

試作した改造機のタッピング性能を評価するために模擬走行シミュレータを利用して室内実験で評価した。図5は、一例として作業速度2.0m/sの場合の慣行機と改造機のタッピングナイフの実際の高さの上下動作の軌跡を示す。

慣行機のタッピング機構はフィーラホイールが根部に衝突する度に(R2, R4)大きく跳ね上がり、その次のテンサイを飛び越してしまうことが観察された。しかし、アルミ製フィーラホイールとダンパを利用した改造機では、跳ね上がり動作が減少し、高速作業においても、改造機のタッピングナイフは

個々の根部の高さに追従することが確認された。

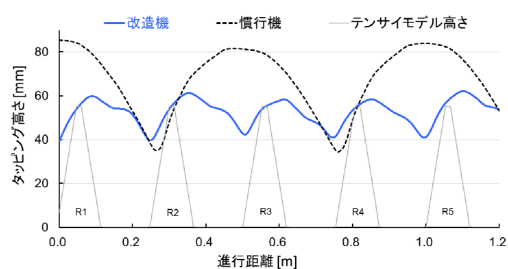


図5 室内実験による慣行機と改造機のタッピングナイフの挙動(v=2.0m/s)

図6は作業速度と両機のタッピングナイフの高さとの関係を示し、改造機の場合は設定したダンパの減衰係数別の値を示す。中央の記号はタッピング高さの平均値を示し、上下端は標準偏差を表す。

全体的に、改造機の標準偏差は慣行機よりも少なく、作業速度1.75m/s以上では慣行機の場合、跳ね上がり現象によって標準偏差は大きくなっているが、改造機ではその現象が少なかった。図中の薄い塗りつぶしは、最適なタッピング高さを示す。タッピング高さがその範囲以内に収まっているのは、慣行機では作業速度1.5m/s以下であり、改造機ではダンパの減衰係数を5.0~7.0N/mm/sに設定することによって、高速作業でもタッピング高さが安定している。

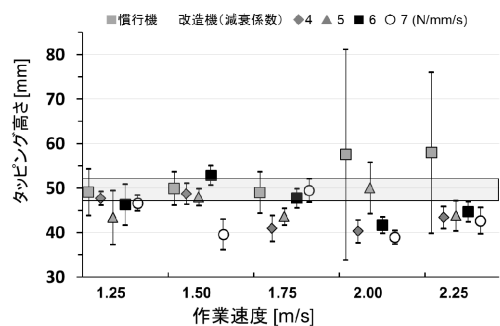


図6 作業速度別の慣行機と改造機（ダンパ別）のタッピング高さの関係

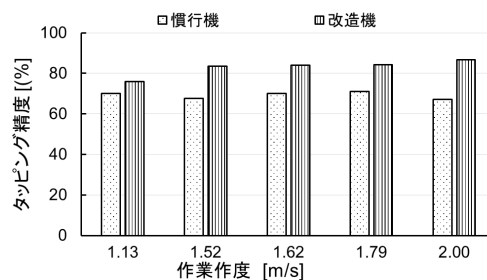
3次元CADとCAEを利用して、高速化に対応させるためにビートタッパを改造したが、その効果はこのように、室内実験で検証された。

### (3) 圃場実験での改造機の評価

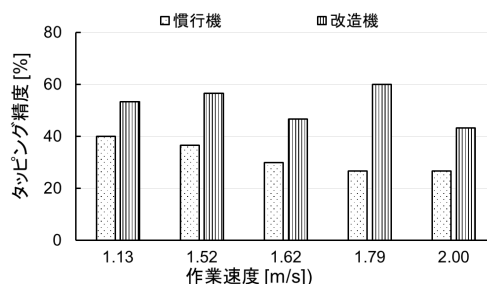
図7は慣行機と改造機のタッピング精度を目視と関係式1)で評価した結果を示す。

a)の目視による評価では、作業速度1.79m/sの場合、慣行機と改造機によって適切に切断された根部の個数割合は、それぞれ71.0%, 84.2%であった。また、作業速度2.0m/sの条件では、それぞれタッピング精度は

67.2%, 86.7%であり、特に高速作業では明らかに改造機のタッピング精度が高いことが判明した。



a) 目視による評価



b) 理論式による評価

図7 圃場実験でのタッピング精度の評価

また、b)の関係式による評価では、図のように、作業速度が1.13m/sから2.0m/sまで増すと、適切に切断された個数割合は、慣行機の場合、40%から27%に低下したのに対し、改造機ではその低下割合が少なかった。特に、作業速度1.79m/sでは、適切にタッピングされた個数割合は、慣行機が33.4%であったのに対し、改造機は60.0%であった。

以上のことから、高速作業においても、改造機のタッピング精度は低下しないことが判明し、3次元CADとCAEを利用したビートタッパの新たな開発手法は圃場実験においてもその性能向上が検証された。

### 〔引用文献〕

- ① 高井宗宏, 端 俊一, 川上克己, 佐藤禎稔, 玉城勝彦, ビートハーベスタの電子制御について, てん菜研究会報, 30巻, 1988, pp.168-174
- ② Zhu, Z., T. Eisaka, Practical approaches for the design of an agricultural machine. International Journal of mathematical models and methods applied sciences, 3(3), 2009, pp. 291-298
- ③ 高井宗宏, 岡村俊民, 伊藤道秋, ビート収穫機械の性能を考える上でのビートの特性—特にタッピング機構を中心に—, 農業機械学会北海道支部報, 14巻, 1973, pp. 85-92

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① T. SATOW, X. Liu, t. TAKEUCH, A. FUJIMOTO, Proposal of a 3D-CAD and CAE Utilization for Development of High Speed Sugar Beet Topper, Proceedings of the 7th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agricultural and Biosystem Engineering, 査読無, Vol.7, 2014, pp. 411-416
- ② A. FUJIMOTO, T. SATOW, T. KISHIMOTO, Development of a Mobile Farm Field Computer to Recode Tractor Operations for Cloud Computing, Proceedings of the 7th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agricultural and Biosystem Engineering, 査読無, Vol.7, 2014, pp. 25-30
- ③ 藤本 与, 佐藤 禎稔, 岸本 正, 農業情報クラウドシステムのためのトラクタ用農作業フィールドコンピュータの開発, 農業情報研究, 査読有, Vol.24, No.2, 2015, 印刷中

[学会発表] (計 5 件)

- ① 佐藤禎稔, 3次元CAD・CAEによるビートタッパの高速高精度化に関する研究-タッピング機構のモデリングと運動機構解析の基礎-, 農業機械学会, 2011年9月28日, 弘前大学(青森県, 弘前市)
- ② 佐藤禎稔, 3次元CAD・CAEを利用したビートタッパの高速高精度化に関する研究 タッピング機構の運動シミュレーション結果の妥当性評価-, 農業環境工学関連合同学会, 2012年9月14日, 宇都宮大学(栃木県, 宇都宮市)
- ③ 佐藤禎稔, 3次元CAD・CADを利用したビートタッパの高速のためのタッピング機構の改良, 農業食料工学会, 2013年9月11日, 帯広畜産大学(北海道・帯広市)
- ④ 佐藤禎稔, 3次元CAD・CADを利用したビートタッパの高速高精度化に関する研究-運動機構解析による改造機のタッピング性能-, 農業食料工学会, 2014年5月18日, 琉球大学(沖縄県・西原町)
- ⑤ Tadatoshi Satow, Proposal of a 3D-CAD and CAE Utilization for Development of High Speed Sugar Beet Topper, ISMAB2014, 22, May, 2014, Yilan University (台湾)

[その他]

ホームページ等

<http://www.obihiro.ac.jp/~fmsatow/research.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 禎稔 (SATOW, Tadatoshi)  
帯広畜産大学・畜産学部・地域環境学研究  
部門・教授

研究者番号：90142794