

高速播種を可能としたISOBUS対応型ポテトプランタの開発

中西 洋介, 井川 久, 稲野 一郎*, 吉田 邦彦**, 飯島 裕治***

Development of ISOBUS Potato-Planter that Achieves a High-Speed Operation

Yohsuke NAKANISHI, Hisashi IGAWA
Ichiro INANO*, Kunihiko YOSHIDA**, Yuji IIJIMA***

抄 録

大規模農場経営が進むなか、北海道の畑作経営においては作業効率の高い農業機械を導入し、生産性の向上を図ることが望まれている。特に、収益確保や輪作の維持に欠かすことができない馬鈴しょ栽培の生産性向上が望まれているが、現状の国産ポテトプランタでは機構上の制約から高速に播種することができない。そのため栽培面積を拡大できず、生産性の向上を図ることが困難であることが課題となっている。

本研究では、ISOBUS通信規格に対応した高速播種型ポテトプランタを開発したので報告する。圃場での播種試験を行った結果、現状の作業速度の約2倍にあたる時速7kmでの高速播種が可能であることを確認した。

キーワード：ポテトプランタ、高速播種、車速連動制御、ISOBUS

Abstract

In the upland field farming in Hokkaido, while large-scale farm management advances, improvement of productivity is needed using agricultural machinery with high working efficiency. Especially, in the potato cultivation that is indispensable to securing of profit and the maintenance of crop rotation, improvement of productivity is the most needed. However, high-speed seeding operation cannot be achieved using domestic potato planter from limitation of the mechanism. Therefore, improvement of the productivity by the expansion of the cultivation area cannot be attained, because the seeding operation cannot be carried out at the speed that is higher than the present speed.

In this study, development of ISOBUS potato planter that achieved a high-speed seeding operation is shown. As the result of seeding test in the field, it is verified that the high-speed seeding operation is able to be carried out at the speed of 7 km/h, that is almost two times as large as the present speed.

KEY-WORDS : Potato Planter, High-Speed seeding, vehicle speed-interlocking control, ISOBUS

1. はじめに

経営耕地面積の増大が進むなか、北海道の畑作経営においては高速仕様等の作業効率の高い農業機械を導入し、生産性の向上を図ることが望まれている。特に、収益確保や輪作の

維持に欠かすことができない馬鈴しょ栽培においては、播種時期（4月下旬～5月中旬）が天候不順で短いため、播種作業を高速化して栽培面積を拡大することで生産性の向上を図りたいとの要望が寄せられている。しかし、現状のカップ式国産ポテトプランタ（以下、プランタ）では、機構上の制約

* 十勝農業試験場 * Tokachi Agricultural Experiment Station

** 中央農業試験場 ** Central Agricultural Experiment Station

*** 十勝農機株式会社 *** Tokachi Noki Co. Ltd.

事業名：重点研究

課題名：高度通信制御技術を活用した次世代型ポテトプランタの開発

から現状の作業速度（4 km/h）を超える速度での播種作業は不可能なため、馬鈴しょの栽培面積を拡大することが困難であることが課題となっている。

このような背景のもと、海外製の高速播種対応型ISOBUSプラントの導入が試みられているが、機体が大型で圃場旋回時に大きな面積を必要とするため、旋回面積を極力小さくして作物の栽培面積を広くする日本の慣行農法に合わず、日本国内での導入は進んでいない。しかし、担い手不足による国内の耕作放棄面積は40万haに達し、昨年度より農地中間管理機構（農林水産省）が、これら耕作放棄地の借り受け・貸し付けによる農地集積制度を推し進めるなど、近年、急速な勢いで農場経営の大規模化が進みつつある。したがって、近い将来、大規模農場の最適管理に適した情報化農業の基盤技術であるISOBUS通信に対応した海外製の大型高速播種対応型プラントの導入が進み、国産プラントの国内市場を圧迫するのは必至である。そのため、海外の高効率プラントに匹敵する性能を持ち、かつ、日本の慣行農法に対応した国産プラントの開発が望まれている。

本報告では、海外輸入機にはない小旋回機能を有したISOBUS仕様の高速播種対応型国産ポテトプラントを開発し、現状の作業速度の約2倍にあたる車速7 km/hでの高速播種試験を行ったので報告する。

次章で種芋をV字状に配置した速度差のある一対の平ベルトで挟み、回転・攪拌しながら搬送することで隙間なく一列に整列させる播種ベルトと、ホッパから播種ベルトへ適量の種芋を供給・制御する供給コンベア等から構成される高速搬送・播種機構について説明した後、その性能評価試験について報告する。次に第3章で、車速に連動してコンベア搬送速度を制御する油圧式コンベア速度制御システムと、フィードバック制御による制御手法について説明する。最後に第4章で、高速搬送・播種機構と油圧式コンベア速度制御システムを搭載したISOBUS通信仕様の屋外走行型プロトタイプ試作機について説明した後、屋外での種芋播種性能確認試験について報告する。播種試験の結果、車速7 km/hでの高速播種時において、海外製の高速播種機と同等の播種精度を実現できることがわかった。

2. 高速搬送・播種機構の開発

プラントには種芋を一定の株間隔で播種する性能が求められる。図1に従来のプラント（カップ式）を示す。循環するチェーンに一定ピッチ毎に配置されたカップでホッパから種芋を受け取り、1個ずつ播種する方式である。確実に一定間隔で種芋を播種することができる半面、作業速度が4 km/hを超過するとカップが高速に移動するため、カップに芋が入らない、あるいは、カップに2個以上の芋が入るなどの不具合が発生する。そのため、本報告では、種芋を高速に搬送す

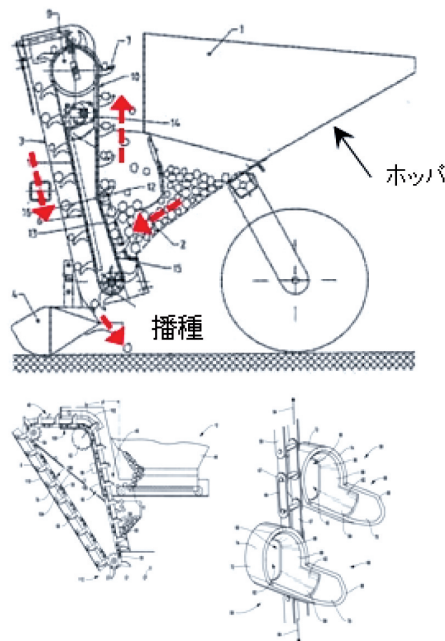


図1 従来の播種機（カップ式）

ることが期待できる平ベルトを使用して高速搬送・播種機構を開発した。

2.1 播種ベルト

カップ式播種機で高速播種する場合、高速に移動するカップに種芋を確実に1個ずつ投入することは困難である。したがって、本報告では図2に示すように種芋をV字状に配置した一対の平ベルト（以下、播種ベルト）で挟みながら高速に搬送・播種する機構を考案した。本機構で種芋を圃場に一定間隔で播種するためには、播種ベルト上に種芋を隙間なく一列に整列させることが必要である。そのためには以下の2点に留意する必要がある。

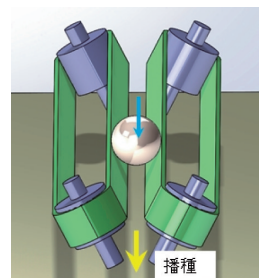


図2 播種ベルト

① 播種ベルトに種芋を過剰供給する

播種ベルトに供給する種芋が播種する種芋より少なければ、播種ベルト上で隣り合う種芋に隙間ができる。一方、播種ベルトに種芋を過剰供給することで隣り合う種芋の隙間を小さくすることが期待できる（余剰な種芋は

播種ベルトから振り落とす)。

② 播種側に向かって上り傾斜とする (図3)

播種側に向かって上り傾斜とすることで、搬送中に種芋が自らの自重で上流側に転がるため(上流に戻る)、隣り合う種芋の隙間が小さくなることが期待できる。

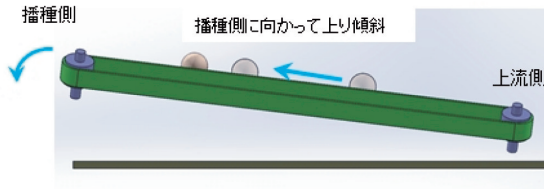


図3 播種側に向かって上り傾斜となった播種ベルト

図4に上記①, ②の機能を有した播種ベルト試作機を示す。幅50mmの一对の平ベルト(播種ベルト1, 2)をV字状に配置し、種芋を挟みながら搬送する。播種ベルト上流部(複数列搬送部)には播種ベルトと平行して両脇に搬送ベルトが設けられており、下流部(整列搬送部)に種芋を過剰供給する。また、播種側に向かって傾斜角5度の上り勾配としている。

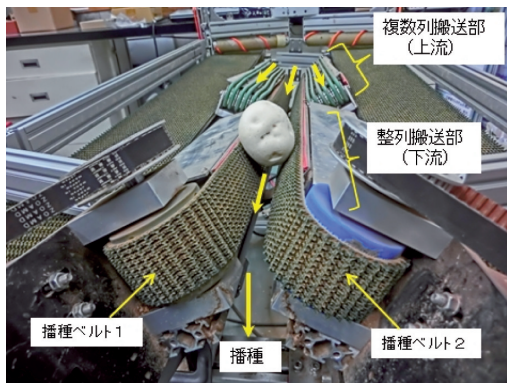


図4 播種ベルト試作機

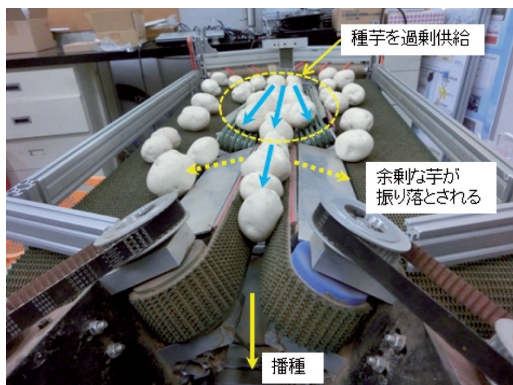


図5 播種ベルト上での種芋の状態

図5に、複数列搬送部により整列搬送部へ種芋が過剰供給され、整列搬送部では過剰供給された余剰分が振り落とされることで種芋が隙間なく一列に整列している状態を示す。

2.2 高速搬送・播種機構

次に、ホッパに溜められた種芋を、圃場に一個ずつ播種する高速搬送・播種機構について説明する。

前項で説明した播種ベルトを使用する場合、整列搬送部で振り落とされた種芋は播種ベルト上流に還流させることが望ましい。一方、播種機には数百kgの種芋がホッパに溜められており、ホッパから逐次、播種量に相当する適量の種芋を播種ベルトへ供給・制御する必要がある。以上を考慮し、高速搬送・播種機構は次のコンベア類で構成した。

i) 播種ベルト

種芋を隙間なく一列に整列させ、播種する。

ii) 還流コンベア

播種ベルトから振り落とされた種芋を、播種ベルト上流へ還流する(戻す)。

iii) 供給コンベア

ホッパ直下に設置し、ホッパに溜められた種芋を播種ベルトあるいは還流コンベアへ供給・制御する。

図6にホッパに溜められた種芋が播種されるまでの種芋の流れを示す(図の実線矢印)。

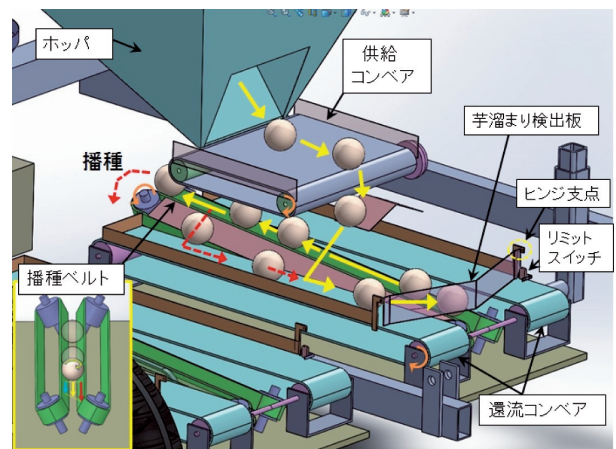


図6 種芋の流れ(ホッパ~播種まで)

- ① ホッパ
- ② 供給コンベア
- ③ 還流コンベア(播種ベルトと逆方向へ種芋を搬送)へ落下
- ④ 還流コンベアで搬送され、芋溜まり検出板に衝突し、播種ベルト上流へと誘導される。
- ⑤ 播種ベルトで一列に整列され、播種地点へ搬送される。
- ⑥ 地面へ落下・播種される(図6 左方が播種地点)

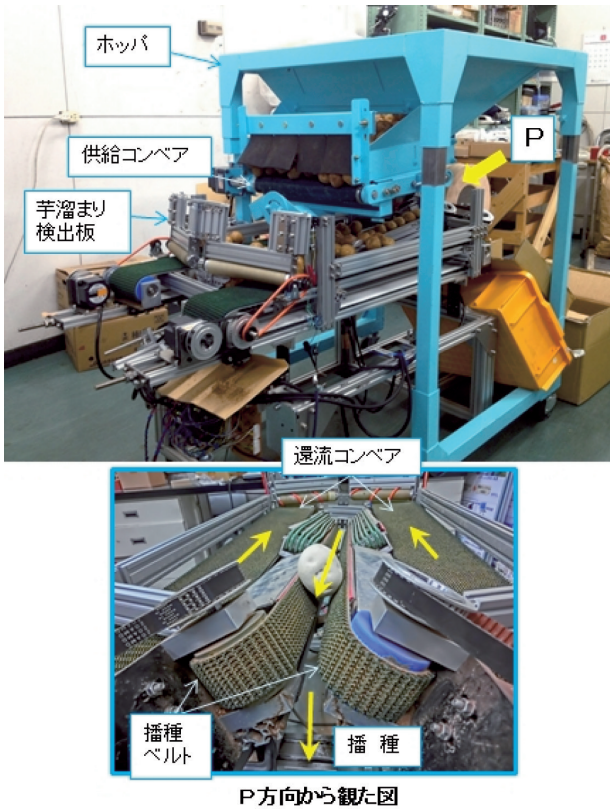


図7 高速搬送・播種機構（その1）

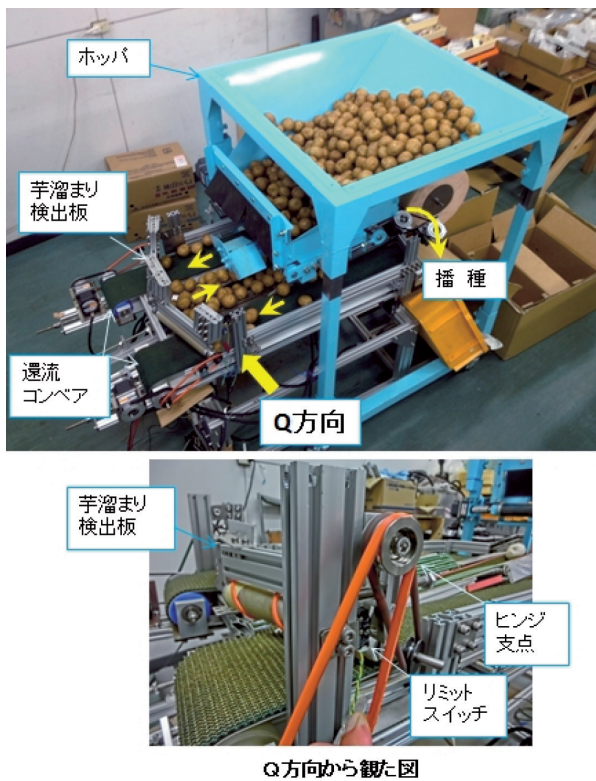


図8 高速搬送・播種機構（その2）

播種ベルトの両脇には還流コンベアが配置されており、播種ベルトから振り落とされた余剰な芋（図6の点線矢印）を

播種ベルト上流へ還流する。

ホッパから種芋が過剰供給された場合（播種量以上の種芋がホッパから供給された場合）、供給コンベアを一定時間停止するなどして、播種ベルトへの種芋供給量を適量に調整する必要がある。以下に、その調整・制御方法を記す。

ホッパから過剰供給された種芋は、還流コンベアで播種ベルト上流へ搬送され、集積する。そのため、播種ベルト上流に「芋溜まり検出板（以下、検出板）」を設置して、集積した種芋（過剰供給分）を検出することにした。検出板は上端をヒンジで回転支持し、背部にリミットスイッチ（以下、LS）を設置している。種芋が過剰供給された場合、播種ベルト上流に集積した種芋が検出板を圧迫し、LSがオンとなるため過剰供給状態が検出可能である。

LSがオフの場合はホッパからの種芋供給量が正常と判断し、供給コンベアを運転する。LSがオンとなった場合、供給コンベアを一定時間停止、あるいは減速することで、ホッパからの種芋供給量を適量に調整・制御可能である。

図7、8に開発した高速搬送・播種機構を示す。各コンベア類はDCモータで駆動しており、個別に運転・停止や搬送速度が制御可能である。

2.3 種芋播種性能評価試験

播種機には圃場に種芋を一定の株間間隔で播種する性能が求められる。播種ベルトから1個ずつ落下する（播種される）種芋の時間間隔のばらつきを測定・評価することで、圃場で種芋を播種した時の株間間隔のばらつきを評価することがで

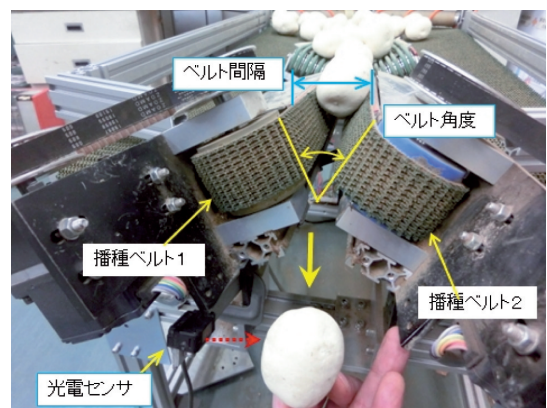


図9 光電センサとベルト間隔，ベルト角度

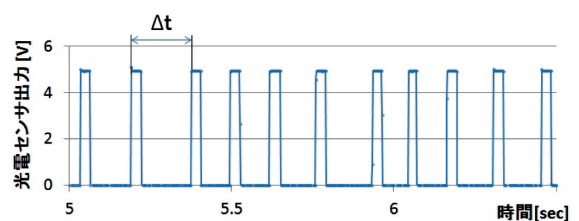


図10 種芋落下時の光電センサ出力値



図11 種芋（北あかり、大きさ平均49mm）

きる。したがって、ここでは図9に示す種芋落下位置に光電センサを設置して播種ベルトから落下する種芋を検出し、光電センサ出力値を用いて高速搬送・播種機構の播種性能（播種間隔のばらつき）を評価した。具体的には、種芋が光電センサを横切った時の出力パルスの立ち上がりから、次の種芋の出力パルスの立ち上がりまでの時間間隔（図10の Δt ）を測定し、それらのばらつきを評価した。時間間隔 Δt のばらつきの評価には、変動係数CV値（ Δt の標準偏差/ Δt の平均値）を使用した。

なお、試験には平均49mm（Sサイズ）の大きさの種芋（北あかり）を使用した（図11）。また、播種ベルトのベルト間隔とベルト角度（図9）は各々47mm、54度とし、ベルト搬送速度は350mm/sとした。これは、株間距離を280mmとして車速7.2km/hで播種作業を行う時のベルト搬送速度に相当する。

上記条件で種芋播種試験を行った結果、播種ベルトの複数列搬送部（図4参照）から過剰供給された種芋が、整列搬送部で重なったまま搬送されることがわかった（図12）。搬送中に播種ベルト上で重なった種芋は、播種ベルト1、2を異なる搬送速度で駆動して回転・攪拌することで隣り合う種芋の隙間に入り込む、あるいは還流コンベア上に振り落とすことが期待できる。さらに、重なった種芋が隣り合う種芋の隙間に入り込むことで、播種間隔のばらつきが小さくなること



図12 整列搬送部で重なった種芋（播種ベルト速度比1）

が期待できる。

以上より、播種ベルト1、2を異なる搬送速度で駆動した場合の播種間隔のばらつきを調べることにした。播種間隔のばらつき（変動係数CV値）は、220~250個程度の種芋を連続播種し（時間にして約30秒間）、その時の光電センサ出力値を解析して評価した。播種ベルト速度比は1から3まで変化させ、試験は各速度比に対して各々3回ずつ行った。

表1に各播種ベルト速度比に対する光電センサ出力パルスの立ち上がり時間間隔 Δt （播種間隔）の平均値、標準偏差、および変動係数CV値を示す。また、図13に播種ベルト速度

表1 播種ベルト速度比と播種間隔のばらつき

播種ベルト速度比	試験No	パルス立ち上がり時間間隔 Δt			
		平均値 [ms]	標準偏差 [ms]	CV値 [%]	CV値平均 [%]
1	1	138.7	39.8	28.7	28.4
	2	136	39.3	28.9	
	3	135.2	37.1	27.5	
1.5	1	131.7	27.3	20.7	19.7
	2	134.4	24.3	18.1	
	3	134.4	27.1	20.2	
2	1	134.7	23.5	17.4	17.0
	2	134.8	23.7	17.5	
	3	135.6	21.9	16.2	
3	1	138.4	24.2	17.5	17.0
	2	139.4	24.8	17.8	
	3	137.2	21.7	15.8	

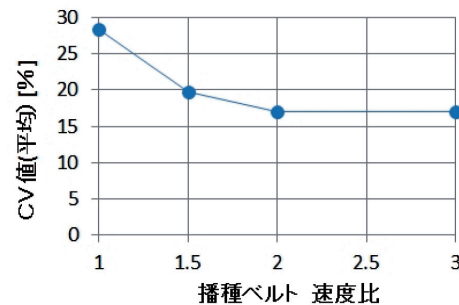


図13 播種ベルト速度比と播種間隔のばらつき

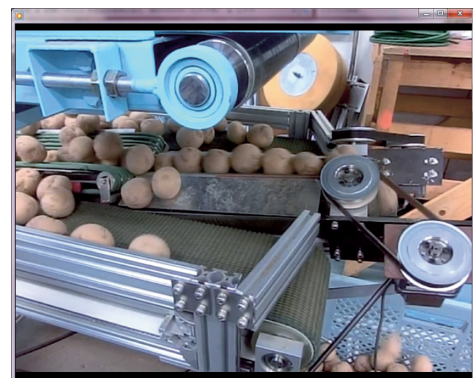


図14 播種ベルト上で整列・搬送される種芋（播種ベルト速度比2）

比に対するCV値（平均値）をグラフ化して示す。

表1, 図13より, 速度比を1から2に上げるにしたがって播種間隔のばらつきの度合いを示すCV値が28.4%から17%へと激減することがわかる。これは, 播種ベルト1, 2を異なる搬送速度で駆動し, 種芋を回転させながら搬送することで播種間隔のばらつきが小さくなることを意味する。なお, 速度比2と3ではCV値は変化せず, 17%となっている。したがって, 本報告では播種ベルトの速度比を2に設定することにした。図14に速度比2で整列・搬送した種芋を示す。種芋が重なり合うことなく, ほぼ隙間なく一列に整列していることが確認できる。

なお, 実際に圃場で種芋を落下・播種した場合, 地面に着地した種芋が転がることで, さらに株間間隔のばらつきが大きくなる懸念される。しかし, 本報告で目標とする圃場での株間間隔のCV値は25%であることから, 17%という値は種芋が地面に着地する直前のCV値として問題のない数値と考える。

以上より, V字状に配置した一対の平ベルトで種芋を挟みながら搬送・播種する場合, 一方の平ベルトをもう一方の平ベルトの2倍の搬送速度で駆動して種芋を回転させながら搬送することで播種間隔のばらつきを抑制できることがわかった。

3. 車速連動型コンベア速度制御システムの開発

車速が変化しても株間距離は一定でなければならない。そのためは, 高速走行時にはコンベアの搬送速度を上げ, 低速走行時にはコンベア速度を下げるなど, 車速に応じてコンベアの搬送速度を精度良く制御する必要がある。

前章で説明した高速搬送・播種機構は室内試験を前提として製作しており, コンベア類はすべて電気式モータで駆動した。しかし, 農業機械で一般的に使用されるアクチュエータは, 大動力を得ることができ, かつ, 電気式アクチュエータと比較して耐候性の高い油圧式アクチュエータである。したがって, ここでは農業機械で一般的な油圧を動力源とし, 逐次車速センサからの車速情報を参照することで, 車速に応じてコンベアの搬送速度を制御する油圧式コンベア速度制御システムを開発した。

3.1 油圧式コンベア速度制御システム

図15に開発した油圧式コンベア速度制御システムを示す。図16はその回路図である。本システムは, 作業機駆動用としてトラクタに設置されているPTO (Power Take Off) 軸を用いて油圧ポンプを駆動し, 搬送コンベアを駆動する油圧モータへの油の流量を電磁比例弁で制御することで, 油圧モータの回転数を制御する構造となっている。電磁比例弁 (KYBエンジニアリングアンドサービス(株)製: 最大流量7.5L/min, 最高使用圧力10MPa) は100Hz周期のPWM (Pulse With

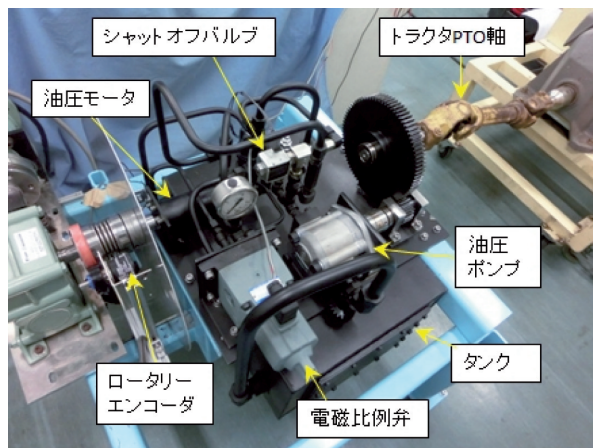


図15 油圧式コンベア速度制御システム

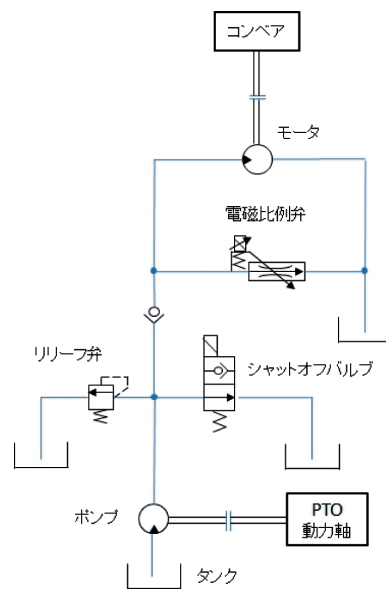


図16 油圧回路

Modulation) 信号で制御可能であり, デューティ比 (以下, duty比) を指定することで弁開度を調整し, モータ回転数を制御することができる。また, モータ回転軸にはロータリーエンコーダを設置しており, 逐次, モータ回転数の値を回転数制御に使用可能である。

3.2 制御手法

3.2.1 PWMデューティ比とモータ回転数の関係

車速に応じてコンベア搬送速度 V_p を制御するためには, 次式で求めた回転数 N_p でモータを駆動すればよい。

$$V_p = V/L \times S \quad \dots(1)$$

$$N_p = V_p/r \quad \dots(2)$$

ここで, V は車速, L は株間距離, S は芋の大きさ (以下, 芋サイズ), r はコンベア駆動プーリの半径である。株間距

離Lと芋サイズSはユーザーが指定し、車速Vは逐次、車速センサから取得する。

回転数 N_p でモータを回転させるduty比を電磁比例弁に与えることで、逐次変化する車速Vに連動してコンベアを搬送速度 V_p で駆動することができる。

電磁比例弁への弁開度指令であるduty比とモータ回転数の関係に再現性（一意性）があれば、以上のように電磁比例弁にduty比を与えることでモータを目標回転数 N_p で駆動することができる。しかし、油圧システムは油温や負荷の影響を受けるのが一般的である。そこで、所定の負荷をかけた状態でモータを駆動し、duty比とモータ回転数の関係に再現性があるかを調べた。なお、再現性を調べるため試験は3回

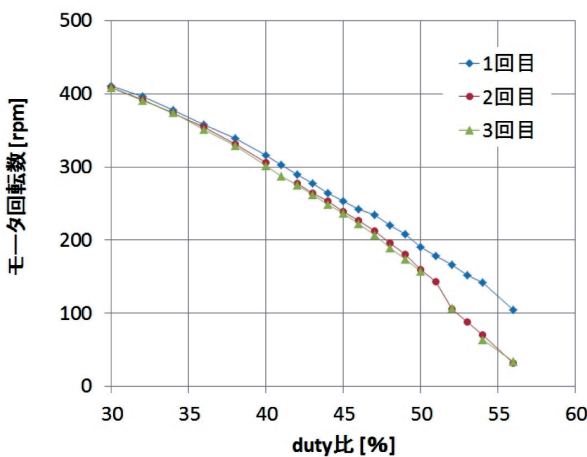


図17 duty比とモータ回転数の関係

行い、1回目の実験後、2日後に2、3回目を連続して行った。

図17にduty比とモータ回転数の関係を示す。図より1回目の実験データと2回目、3回目の実験データが大きく異なっており、再現性がないことがわかる。これは、電磁比例弁に同じ値のduty比を与えてもモータが同じ回転数で回転しないこと、すなわち、モータを意図した回転数で駆動できないことを意味する。この原因として、気温や油圧システムの稼働時間の長短によって油温が大きく変動することや電磁比例弁の精度の問題などが考えられる。

したがって、ここではduty比とモータ回転数の関係に再現性がない場合でも、確実にモータを意図した回転数（目標回転数 N_p ）で駆動することができるフィードバック制御を用いてモータを駆動した。

3.2.2 フィードバック制御によるモータ回転数制御

図18に、車速に連動した油圧モータ回転数制御のブロック線図を示す。車速V、株間距離L、芋サイズSを入力として式(1)、(2)からモータの目標回転数 N_p を計算し、 N_p を元に電磁比例弁へ与えるduty比Pを求めている。なお、Pは以下

の①、②で計算したP1とdPの加算値としている。

①P1: 「duty比とモータ回転数の関係（図17）」から求めたduty比

②dP: フィードバック制御で求めたduty比

P1は、図17に示す3回目の実験値を2次式で近似し、求めた近似式を元に計算したduty比である。電磁弁にP1を与えることでモータは回転するが、3.2.1項の議論より、モータが目標回転数 N_p で回転する保証はない。

dPは、モータ回転数の現在値 N_c が目標回転数 N_p とずれている場合、その差（偏差 $e = N_p - N_c$ ）が0となるように調整するためのduty比である。現在値を目標回転数にフィードバックし、その差を元に制御することからフィードバック制御^{1~4)}と呼ばれる。図19にフィードバック制御のアルゴリズムを示す。過去2秒間の偏差eの平均値EaveにゲインK

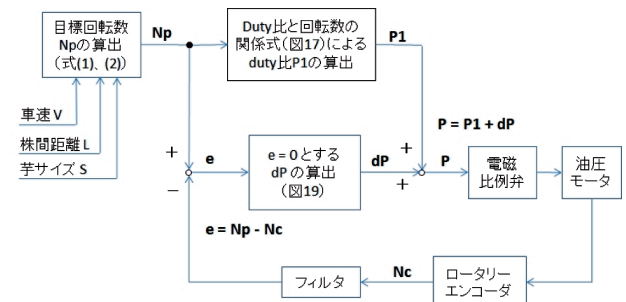


図18 制御アルゴリズム

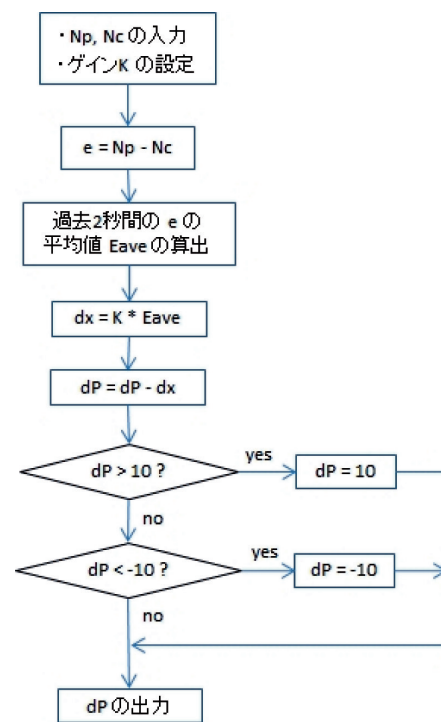


図19 フィードバック制御アルゴリズム

を乗じた量をdxとし、制御周期ごとにdxを加算してdPを算出している。ゲインKは実験により試行錯誤で求めた。なお、電磁弁破損防止のため、dPが±10%以下となるように制限している。

一般的に使用されるフィードバック制御としてPID制御⁵⁾があげられる。しかし、偏差がある状態でPID制御を施した場合、積分効果で操作量が蓄積されて一時的にe=0となることが期待できるが、e=0の状態が継続すると操作量が0となる。したがって、再び偏差が発生するため制御量(ここではモータ回転数)が振動的になる懸念がある。本アルゴリズムは偏差の過去2秒間の平均値を元に操作量dxを計算し、逐次dPに加算して、加算後のdPの値を保持することができる⁶⁾。したがって、制御量が振動的になることはない。

3.2.3 モータ回転数制御試験

前項で説明した制御手法で油圧式コンベア速度制御システムを制御した場合、車速に連動して油圧モータの回転数が変化するか、また、モータ回転数が目標回転数に一致するかを確認するため室内実証試験を行った。

図20に操作端末と制御基盤を示す。操作端末では、株間距

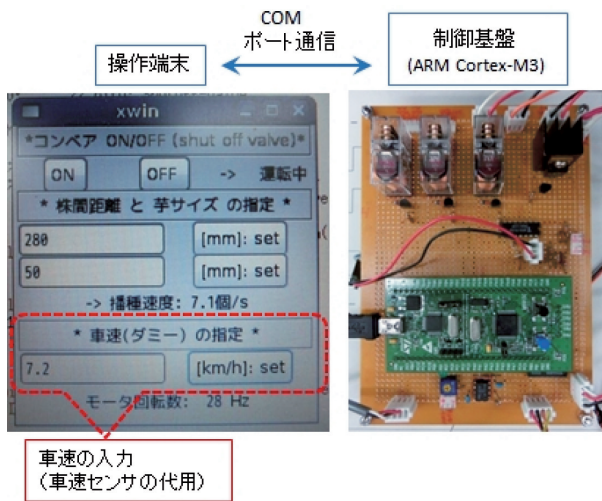


図20 操作端末および制御基盤

離と芋サイズが入力可能である。また、室内試験である都合上、車速情報は操作端末から手動で入力できるようにした。ロータリーエンコーダや電磁比例弁等の入出力機器はARMマイコン制御基盤(STM32discovery: ARM Cortex-M3)で制御し、操作端末と制御基盤の通信はCOMポートで行った。

図21に電磁比例弁へ与えるduty比をP=P1(フィードバック制御無し)としてモータを駆動したとき、すなわち図17に示す実験値の近似式から計算したduty比のみを電磁比例弁に与えてモータを駆動したときのモータ回転数を示す。車速に連動してモータ回転数が変化しているが、目標回転数とは一致していないことがわかる。

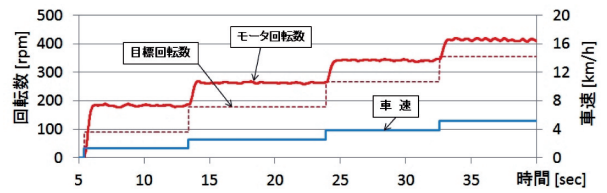


図21 回転数制御試験1 (P=P1: フィードバック制御無)

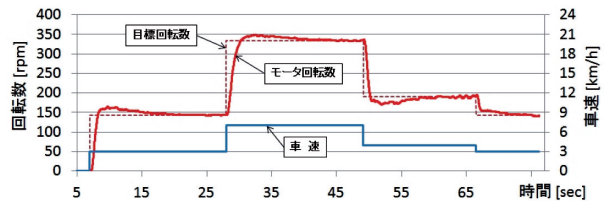


図22 回転数制御試験2 (P=P1+dP)

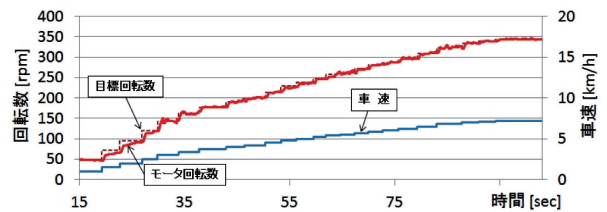


図23 回転数制御試験3 (P=P1+dP)

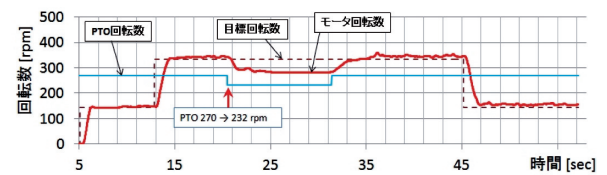


図24 PTO回転数変化時 (P=P1: フィードバック制御無)

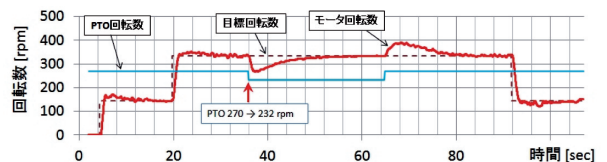


図25 PTO回転数変化時 (P=P1+dP)

図22はP=P+dP(フィードバック制御有り)としてモータを駆動したときのモータ回転数である。車速の急激な変化(28秒地点で車速が3 km/hから7 km/hに変化)に伴い目標回転数がステップ状に変化しているため多少のオーバーシュートが観察されるが、時間経過とともにフィードバック制御の効果でモータ回転数が目標回転数に収束していることがわかる。

図23に実際の播種作業を想定して車速を漸増させ、図22と同じくP=P+dPとしてモータを駆動したときのモータ回転数を示す。モータ回転数はオーバーシュートすることなく目標回転数に追従していることがわかる。

ところで、傾斜地走行時等ではトラクタのエンジン負荷変動に伴いPTO回転数が変動し、油圧ポンプから突出する油

の流量と圧力が変動する。その結果、油圧モータで駆動されるコンベアの搬送速度が大きく変動する。この場合、フィードバック制御を施すことでコンベア搬送速度の変動を抑制することが可能に確かめた。

図24に $P = P1$ (フィードバック制御無し) としてモータを駆動し、途中でPTO回転数を270rpmから232rpm (14%減) へ変化させたときのモータ回転数を示す。図24よりPTO回転数の低下に伴いモータ回転数も低下していることがわかる。

図25に $P = P + dP$ として、同じくPTO回転数を変化させたときのモータ回転数を示す。図25より、PTO回転数変化時直後にモータ回転数は低下するが、時間経過とともにフィードバック制御の効果で目標回転数に復帰・収束することがわかる。

以上より、油圧式コンベア速度制御システムに図19に示すアルゴリズムに基づくフィードバック制御を施すことで、車速に連動して搬送コンベアの速度を制御できること、さらにPTO回転数変動しても搬送コンベアの速度が一定値を保つことが確認できた。

4. 屋外走行型プロトタイプ試作機による種芋播種試験

高速播種・搬送機構と油圧式コンベア速度制御システムを搭載した屋外走行型の2畦用プロトタイプ試作機を製作し、圃場での種芋性能確認試験を行った。なお、制御系はISOBUS通信仕様とし、トラクタに搭載した操作端末でプラントに搭載した制御基盤を制御した。

4.1 動力伝達系

高速搬送・播種機構を構成する5個のコンベア (播種ベルト×2, 還流コンベア×2, 供給コンベア×1) は、油圧式コンベア速度制御システムに搭載した1個の油圧モータで駆動するものとし、油圧モータの動力は、動力伝達系の簡素化とメンテナンス性を考慮し、スプロケットとチェーンを使用して各コンベアへ分岐させた。図26にPTO軸から各コンベアへの動力伝達系のブロック線図を示す。

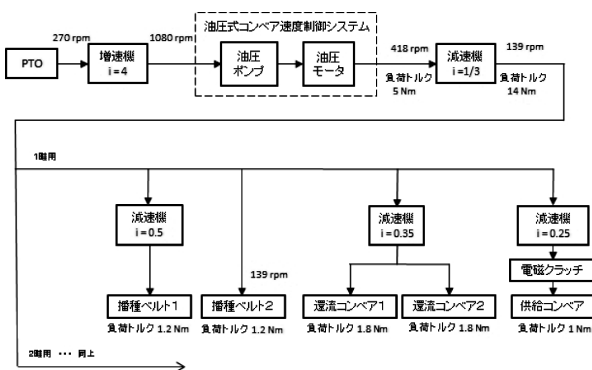


図26 PTO軸から各コンベア類への動力伝達系

各コンベアの種芋搬送力を20~40Nと仮定すると、モータへの負荷トルクは2畦合わせて5Nm程度である。一方、モータ回転数を418rpmとすることで車速7km/hでの高速播種に対応したコンベア搬送速度を得ることができる。この場合、全体の動力伝達効率を30%と仮定すると、モータに必要な動力は730Wとなる。以上より、油圧式コンベア速度制御システムには、最高1.2kWの動力が出力できるモータを搭載した。

4.2 屋外走行型プロトタイプ試作機

図27に開発した2畦用の屋外走行型プロトタイプ試作機を示す。機体重量は970kgであり、ホッパへ種芋を満載した場合、1400kg程度の重量となる。したがって、72PS以上のトラクタであれば3点ヒッチ (トラクタ後部に設置された作業機懸架用アーム) で持ち上げることができる。海外製の大型

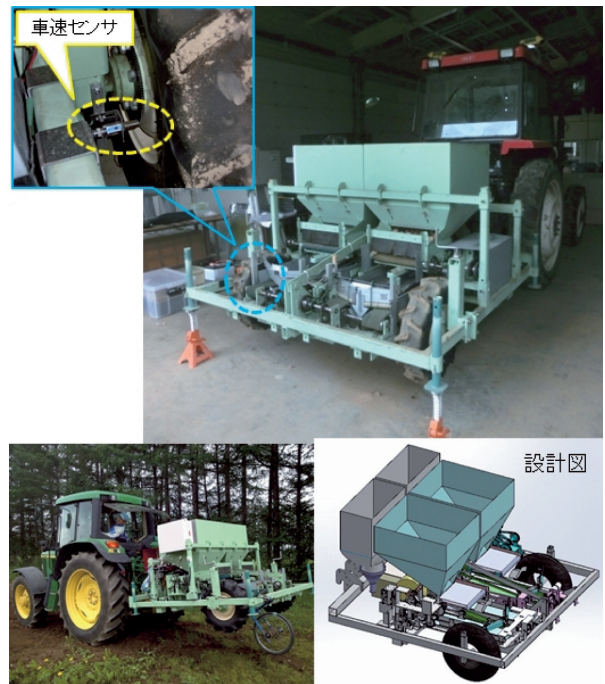


図27 屋外走行型プロトタイプ試作機

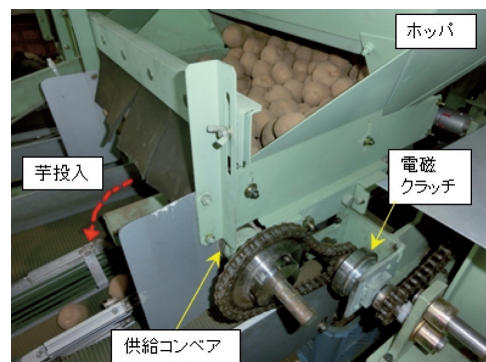


図28 ホッパと供給コンベア

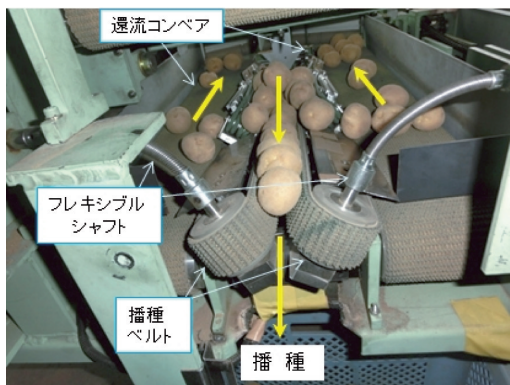


図29 播種ベルトと還流コンベア

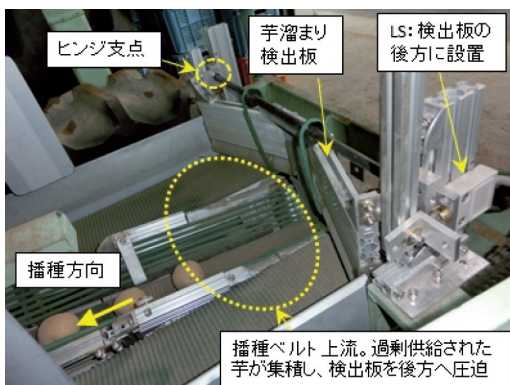


図30 芋溜まり検出板とリミットスイッチ (LS)

播種機は重量が大きく、トラクタで持ち上げることは不可能である。したがって、播種機を牽引したまま旋回するため旋回時に大きな面積を必要とする。播種機をトラクタで持ち上げることができれば、トラクタの旋回半径で小旋回できるため、圃場端の旋回用枕値面積を極力小さくすることが可能となる。これは、圃場面積の有効利用を図ろうとする日本の慣行農法にしたがった播種作業を行うことができることを意味する。

また、車輪には車速を検出するための磁気センサを装着しており、車速に応じたコンベア搬送速度の制御が可能である。

図28にホップと供給コンベア、図29に播種ベルトと還流コンベアを示す。コンベア類の構成・レイアウトは2.2節で説明した高速播種・搬送機構と同様である。

なお、プロトタイプ試作機に搭載したコンベア類はすべて1個の油圧モータで駆動している。したがって、播種作業中の供給コンベアの運転・停止は電磁クラッチで行った。また、播種ベルトの駆動プーリが鉛直方向に対して27度傾斜しているため、フレキシブルシャフトを使用して動力伝達を行った。

図30に播種ベルト上流部（還流ベルト下流部）を示す。ホップから種芋が過剰供給された場合、図中の点線付近に種芋が集積する。その結果、芋溜まり検出板が圧迫され、後方に設置されたLSがオンとなる。LSオンと同時に供給コンベア駆動軸に設置した電磁クラッチを開放することで供給コンベアが停止し、種芋の過剰供給を抑制することが可能である。

4.3 ISOBUS通信によるプロトタイプ試作機の制御

4.3.1 ISOBUS規格

ISOBUS規格（ISO-11783）はトラクタに設置した操作端末（バーチャルターミナルという。以下、VTと表記）と作業機に設置した作業機ECU（電子制御ユニット。作業機を制御する制御基盤）の通信に関わる国際標準規格であり、現在、欧米を中心に急速な勢いで普及しつつある。ISOBUSに準拠することで、メーカを問わず様々な作業機を同じトラク

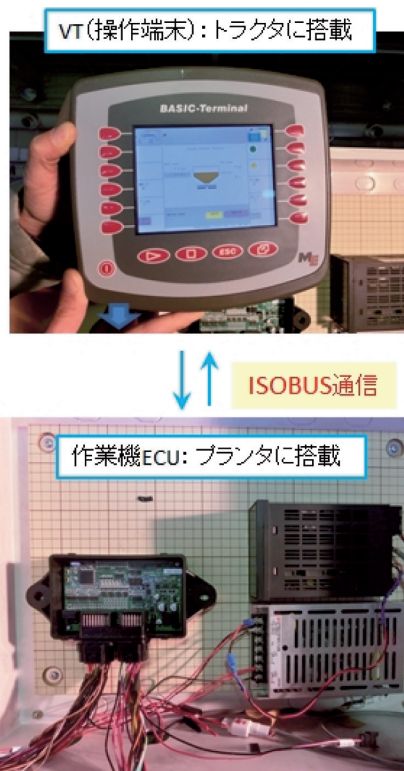


図31 VT（操作端末）と作業機ECU

表2 VT～作業機ECU間通信メッセージ

●メイン画面

1. VT(操作端末) から 作業機ECU へのメッセージ

名称	データ	内容	備考	送信形態
コンベアON	1 or 0	・ボタン押下で、1 送信(シャットオフバルブON) →「コンベアON確認」= 1 受信でボタン点灯 ・再度押下で、0 送信(シャットオフバルブOFF) →「コンベアON確認」= 0 受信でボタン消灯	・ボタン ・「コンベアON確認」は作業機ECUから受信	不定期
株間設定	2byte	・ボタン押下で株間データ送信	ボタン	不定期
芋サイズ設定	1byte	・ボタン押下で芋サイズデータ送信	ボタン	不定期
播種数リセット	1 or 0	・ボタン押下で、播種数(光電センサ値)リセット (2秒同時にリセット)	ボタン	不定期

※ 補足

株間(mm)	データ範囲: 250 ~ 350	ボタン押下で10増分
芋サイズ(mm)	データ範囲: 30 ~ 60	ボタン押下で5増分

2. 作業機ECU から VT(操作端末) へのメッセージ

名称	データ	内容	備考	送信形態
コンベアON確認	1 or 0	・「コンベアON」= 1 受信 → 仮応答未へ1 送信(ボタン点灯) ・「コンベアON」= 0 受信 → 仮応答未へ0 送信(ボタン消灯)	・「コンベアON」はVTから受信	不定期
播種数(1畦)	2byte	1畦の手の播種数(光電センサでのカウント値)		定期
播種数(2畦)	2byte	2畦の手の播種数(光電センサでのカウント値)		定期

●デバッグ画面

2. 作業機ECU から VT(操作端末) へのメッセージ

名称	データ	内容	備考	送信形態
モータ回転数	2byte	rpm		定期
LS1	1 or 0	芋溜り検出板開閉検知LS(1畦用)ON/OFF状態		定期
LS2	1 or 0	芋溜り検出板開閉検知LS(2畦用)ON/OFF状態		定期
シャットオフバルブ	1 or 0	油圧モータのON/OFF状態		定期
クラッチ1	1 or 0	ホップコンベア1のON/OFF状態		定期
クラッチ2	1 or 0	ホップコンベア2のON/OFF状態		定期

表3 入出力機器

タで制御することが可能となる。また、大規模農場の最適管理に適した情報化農業や精密農業を行うための農業用情報端末機器類の多くがISOBUSに準拠していることあり、農場経営の大規模化が進む北海道においても、今後、ISOBUS仕様の作業機の導入が進んでいくものと考えられる。以上より、プロトタイプ試作機を制御するにあたり、制御系はISOBUS通信仕様とした。

図31にVT（操作端末）とプロトタイプ試作機を制御するために開発した作業機ECUを示す。また、表2にVTと作業機ECU間で送受信される通信メッセージを示す。

VTには表2に記載した「コンベアON、株間設定、芋サイズ設定、播種数リセット」メッセージに対応するボタンを用意した。たとえば、ユーザーが「コンベアON」ボタンを押した場合、VTから作業機ECUへ「コンベアON」メッセージが送信される。このメッセージを受信した作業機ECUは、シャットオフバルブ（図16参照）をオンにしてコンベアを駆動すると同時に、「コンベアON確認」メッセージをVTへ送信する。「コンベアON確認」メッセージを受信したVTは「コンベアON」ボタンをハイライト（点灯）し、ユーザーにコンベアが駆動されていることを知らせる。

以上のように、表2のメッセージを送受信することで、ユーザーはVTを使用してプロトタイプ試作機を制御することが可能である。

4.3.2 制御方法

次にプロトタイプ試作機の制御方法について説明する。表3はプロトタイプ試作機の制御に使用したセンサ、アクチュエータ等の入出力機器の機能と仕様である。これらの入出力機器を使用して、次の制御を行っている。

- ① 全搬送コンベアの運転・停止制御
- ② 車速に連動した搬送コンベアの速度制御
- ③ ホッパから播種ベルトへの種芋供給量制御
- ④ 種芋播種数の計測

以下に各々の制御方法について記す。

- ① 全搬送コンベアの運転・停止制御

PTO動力軸を回転させた後、ユーザーがVTに配置された「コンベアON」ボタンを押すことでシャットオフバルブ（図16参照）がオンとなり、油圧モータ（全搬送コンベア）が駆動される。再度、同じボタンを押すことで停止する。
- ② 車速に連動した搬送コンベアの速度制御

ユーザーはVT上で株間距離と芋サイズを入力し、「株間設定」ボタンと「芋サイズ設定」ボタンを押すだけでよい。運転開始後、3.2節に記載した制御手法で自

入 力

機 器	機 能	入力ポート	電 源	仕 様	メーカ(型番)
ロータリーエンコーダ (インクリメンタル)	・モータ回転数の計測 ・目的:モータ回転数制御	タイマ Input Capture	5~ 24V	・100 p/rev ・NPN 出力 ・レンジ 0~1500Hz	オムロン E6C2-CWZ6C
磁気センサ (アンプよりアナログ出力)	・車輪回転数の計測 ・目的:車速の計測	A/D	12V	・0~300Hz ・0~5V 出力	小野測器
LS1	・芋溜まり検出板開閉検知 ・目的:供給ホッパー制御 クワッチ1の ON/OFF制御	GPIO			オムロン D4C-1302
LS2	・芋溜まり検出板開閉検知 ・目的:供給ホッパー制御 クワッチ2の ON/OFF制御	GPIO			同上
光電センサ(透過型)	・播種された芋の検出 ・目的:播種数計測 (1畦目用)	GPIO	10~ 30V	・PNPオーブ ン コレクタ	キーエンス PZ-G51P
光電センサ(透過型)	・播種された芋の検出 ・目的:播種数計測 (2畦目用)	GPIO	同上	同上	同上

出 力

機 器	機 能	出力ポート	電 源	コイル仕様	メーカ(型番)
電磁比例弁 (ソレノイド・コイル)	・モータ回転数制御	タイマ: PWM (トランジスタ 駆動)	12V	・1.58A (最大) ・無極性	KYBエンジニアリング アドサービス CCP012L
シャットオフバルブ (ソレノイド・コイル)	・モータのON/OFF制御 (全コンベアのON/OFF)	GPIO (リレーコイル 駆動)	12V	・1.58A ・無極性	KYBエンジニアリング アドサービス CSC012L
クラッチ1 (ソレノイド・コイル)	・ホッパコンベア1の ON/OFF制御	GPIO (リレーコイル 駆動)	24V	・0.46A(保 持) ・無極性	三木ブーリ 101-06-13G
クラッチ2 (ソレノイド・コイル)	・ホッパコンベア2の ON/OFF制御	GPIO (リレーコイル 駆動)	同上	同上	同上

動的に車速に連動した全搬送コンベアの速度制御が行われる。

③ ホッパから播種ベルトへの種芋供給量制御

2.2節に記載した制御方法で自動的に種芋の供給量制御が行われる。なお、供給コンベアは、LSオンの状態が続いている間、あるいはLSオン（立ち上がり後）後の2秒間停止するようにしている。図32に供給コンベア

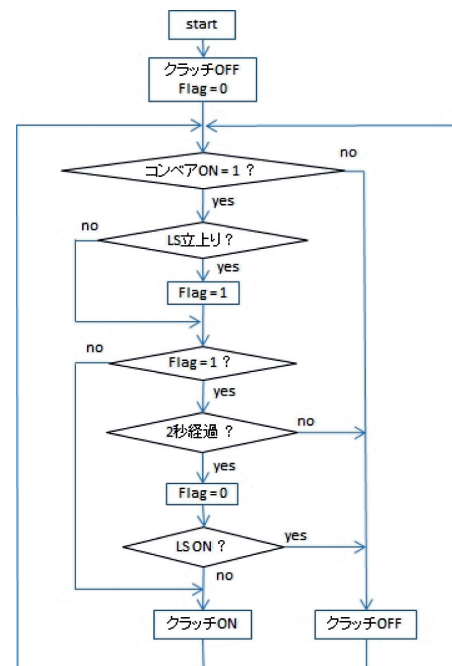


図32 クラッチ制御アルゴリズム

を運転・停止するクラッチの制御アルゴリズムを示す。

④ 種芋播種数の計測

種芋播種位置（図9参照）に設置した光電センサで種芋播種数をカウントする。

これらの制御を行うことで、ユーザーはVTを使用してプロトタイプ試作機を制御することが可能である。

4.4 種芋播種試験

屋外走行型プロトタイプ試作機による圃場での種芋播種性能確認試験を行った。試験は株間距離を30cmに設定して車速3, 5, 7 km/hで30m走行し、その間に播種した種芋の株間距離のばらつきを評価するものである。なお、ばらつきを評価するにあたり、10mを1区間とし、1区間毎に株間距離を測定して標準偏差と変動係数CV値を求めた。

表4 種芋播種試験結果1

	株間間隔	車速 [km/h]		
		3	5	7
区間1	平均 [cm]	31.2	31.1	31.2
	標準偏差 [cm]	7.8	9.8	12.4
	CV値 [%]	24.9	31.4	39.9
区間2	平均 [cm]	32.7	26.6	28.6
	標準偏差 [cm]	8.0	6.0	8.2
	CV値 [%]	24.6	22.5	28.9
区間3	平均 [cm]	29.2	29.6	28.5
	標準偏差 [cm]	7.3	8.4	11.1
	CV値 [%]	25.1	28.3	38.9
各区間 平均値	平均 [cm]	31.0	29.1	29.4
	標準偏差 [cm]	7.7	8.3	10.6
	CV値 [%]	24.9	28.5	36.1

表4に試験結果を示す。車速3 km/hではCV値の各区間の平均値が24.9%であるのに対し、車速7 km/hでは36.1%となった。特に、区間1（最初の10m区間）ではCV値が40%近くとなっており、株間距離が大きくばらついていることがわかる。この原因として、地面に着地した直後の種芋の転がりが考えられる。

種芋を播種する際、作溝器で土を掻き分けて播種用の溝を作り、その溝の中に種芋を落下・播種する。作成された直後の溝は凹凸が少なく種芋が転がりやすい。一方、地面に着地する直前の種芋はプランタと同じ速度で運動しているため、地面に着地すると同時に凹凸の少ない溝の中で転がり始める。そのため、車速が大きくなるにしたがって種芋の転がる距離が大きくなり、株間距離のばらつきが大きくなると考えられる。図33に、車速7 km/hで播種した種芋が、作溝器で作成された溝の中を転がる様子を示す。

地面に着地した直後の種芋の転がりを抑制することで、株間距離のばらつきを小さくすることが期待できる。図34に着地直後の種芋をすみやかに土で覆うことで転がりを抑制するために開発した覆土棒を示す。くの字の形状をしており、一

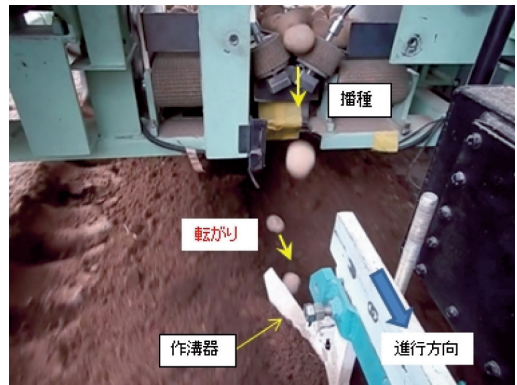


図33 種芋が作溝器で作成された溝の中を転がる様子

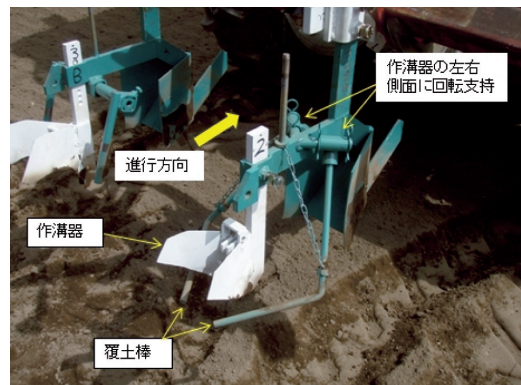


図34 覆土棒

端を作溝器フレームに回転支持し、中間部をチェーンで支持している。図35に車速7 km/hでの播種時に、覆土棒が着地直後の種芋を土で覆う様子を示す。

表5にプランタに覆土棒を装着して種芋を播種した結果を示す。表4と比較して、いずれの車速においてもCV値が小さく、株間距離のばらつきが抑制されていることが確認できる。特に、車速7 km/hでは覆土棒の装着の有無によってCV値が36.1%から24%へと激減しているなど、覆土棒を装着することで高速走行播種時における種芋の転がりが効果的に抑制され、その結果、株間距離のばらつきが小さくなっていることが確認できる。なお、海外製の高速播種機の株間距離

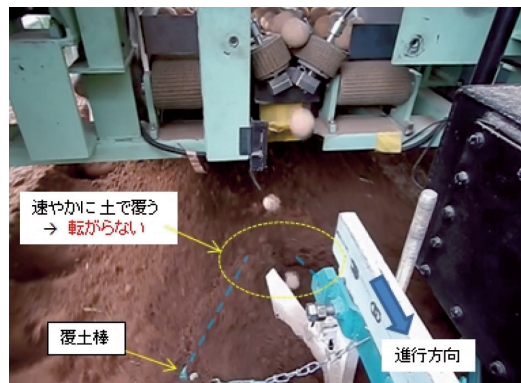


図35 覆土棒が着地直後の種芋を土で覆う様子

表 5 種芋播種試験結果 2 (覆土棒有り)

	株間間隔	車 速 [km/h]		
		3	5	7
区間1	平均 [cm]	28.7	29.3	31.4
	標準偏差 [cm]	5.3	8.1	7.2
	CV値 [%]	18.4	27.6	23.1
区間2	平均 [cm]	29.1	30.9	28.5
	標準偏差 [cm]	7.6	6.4	5.5
	CV値 [%]	26.0	20.8	19.6
区間3	平均 [cm]	28.1	30.0	28.2
	標準偏差 [cm]	5.4	9.2	7.9
	CV値 [%]	19.3	30.5	28.1
各区間 平均値	平均 [cm]	28.6	30.1	29.4
	標準偏差 [cm]	6.1	7.9	7.0
	CV値 [%]	21.3	26.1	24.0



図36 種芋播種試験風景



図37 播種後の種芋 (車速 7 km/h)

CV値が25%程度であることから、プロトタイプ試作機は実用上問題ない播種精度を実現しているといえる。

図36に種芋播種試験風景、図37に播種後の種芋 (車速 7 km/h) を示す。

5. まとめ

本報告では、高速播種可能なISOBUS対応型ポテトプランタの開発を行い、以下のことを確認した。

- (1) 以下から構成される高速搬送・播種機構を開発し、屋内での播種性能評価試験を行ったところ、播種間隔のばらつきは17%であった。
 - ①種芋をV字状に配置した速度差のある一对の平ベルトで挟み、回転・攪拌しながら搬送することで隙間なく一列に整列させる播種ベルト
 - ②播種ベルトからこぼれ落ちた余剰な芋を上流へ搬送する還流コンベア
 - ③ホッパーから適切な量の種芋を播種ベルトへ供給する供給コンベア
- (2) 車速に連動してコンベア搬送速度を制御する油圧式コンベア速度制御システムを開発し、フィードバック制御を用いて制御した結果、車速に連動してコンベアの搬送速度が制御可能であり、さらにPTO軸回転数が変動してもコンベア搬送速度は一定値を保持した。
- (3) 高速搬送・播種機構と油圧式コンベア速度制御システムを搭載したISOBUS通信仕様の屋外走行型プロトタイプ試作機とともに、地面に着地した種芋の転がりを抑制する覆土機構を開発し、圃場での播種性能確認試験を行った結果、車速 7 km/hでの高速播種時における播種間隔のばらつきが24%となり、海外製の高速播種機と同等の播種精度であった。

実用化にあたっては、以下の技術的課題を解決する必要がある。

- 種芋のサイズに応じてユーザーが簡単に播種ベルトの間隔を調整できる機構の開発
- フレーム等のさらなる軽量化
- 高速散布に対応した施肥機構の開発
- 溶接構造を主体として部品点数を削減し、かつ、強固な構造とするなど、堅牢性・メンテナンス性を考慮した各種機構の再設計

今後も引き続き、実用化に向けた開発を進めていく予定である。

謝辞

本研究で振動の計測・データ処理に使用した機械性能記録装置は、財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。また、高速搬送・播種機構をはじめとする各種試作機の設計・解析に使用した3次元CAD解析システムは地域産学官共同研究拠点整備事業により整備されました。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 中西洋介ほか3名：ダイナミックダンパーによる振動低減技術の開発，北海道立工業試験場報告，No312，pp77-83，(2013)
- 2) 中西洋介ほか5名：農業機械の姿勢・振動制御技術の開発，北海道立工業試験場報告，No310，pp23-30，(2011)
- 3) 中西洋介ほか2名：モーダル解析を用いた柔軟作業アームの制振制御，北海道立工業試験場報告，No307，pp13-19，(2008)
- 4) 中西洋介ほか3名：柔軟作業アームの制振制御，北海道立工業試験場報告，No305，pp25-38，(2006)
- 5) 中西洋介ほか3名：低コストセンサ類を使用した農用車両の自律走行，北海道立工業試験場報告，No302，pp23-32，(2003)
- 6) 中西洋介ほか10名：農作業車両自律走行作業支援システムの開発，北海道立工業試験場報告，No300，pp43-51，(2001)