

委託試験成績（令和5年度）

担当機関名 部・室名	地方独立行政法人青森県産業技術センター農林総合研究所 スマート農業推進室
実施期間	令和4～5年度、継続
大課題名	IV 情報処理等先端技術の活用による高生産システムの確立
課題名	ロボットトラクターによる完全無人走行に向けた道路走行の実証
目的	スマート農業技術レベル3の実現に向けて、「経路マッチングソフト」を導入し、無人道路走行が可能となったロボットトラクターにより、①有人トラクターとの協調作業、②2台のロボットトラクターによる複数台作業について、これらが作業員1名で運搬作業を含み可能か検証する。また、前年度に検証した無人道路走行の走行精度について、走行速度との関係性についても検証する。
担当者名	地方独立行政法人青森県産業技術センター 農林総合研究所 スマート農業推進室 主任研究員 千葉 祐太
<p>1 試験場所 農林総合研究所内道路及び圃場（青森県黒石市中）</p> <p>(1) 道路：待機場所から圃場もしくは圃場間をつなぐ道路、コンクリート舗装、横幅約4～7m 私有地のため、一般車両の往来はほとんどなく、道路の封鎖が可能。</p> <p>(2) 圃場：ロボットトラクターの自動操舵機能が活用可能な大区画圃場（1ha規模）。圃場に 進入時の畦畔の傾きは圃場により異なり0～10°程度</p> <p>2 試験方法 前年度までに無人道路走行の基本性能（走行精度、障害物対応）を検証したことを踏まえ、 本年度は無人道路走行を活用した省力性、走行精度と走行速度の関係性について検証した。</p> <p>(1) 供試機械名 ア 実証機械：「経路マッチングソフト」を導入したロボットトラクター (ア) 経路マッチングソフト（開発：ヤンマーアグリジャパン株式会社） 作業員が走行した経路（基準経路）を記録し、ロボットトラクターに走行経路として ティーチングするソフトウェア。ソフト名は仮称であり、現時点で社会実装は未定。 (イ) ロボットトラクター（ヤンマーアグリジャパン株式会社製） 型式：YT4104A（ホイール仕様）、104馬力、車体幅1,850mm イ 慣行機械：ロボットトラクター（実証機械と同型）</p> <p>(2) 無人道路走行を活用した省力性の検証 作業員1名で運搬作業を含み以下の条件での作業が可能か検証 ・実証機械と慣行機械の協調作業：実証機械と慣行機械が同一圃場で耕起作業をする ・2台の実証機械による同時作業：実証機械それぞれが異なる圃場で耕起作業をする 速度は道路走行、圃場作業ともに直進時は5km/h、旋回（カーブ）は3km/hとした。</p> <p>ア 圃場1筆作業 (ア) 試験区（協調）（図1） ・供試機械 実証機械1台：完全無人で道路走行及び圃場内での耕起。耕起の作業経路 は自動走行の設定画面における利用条件を「ロボットトラ クター 有人トラクターが並走」とし、間接耕とした。 慣行機械1台：作業員による手動操舵、ただし圃場内の作業は自動直進。 ・作業経路 ①待機場所→圃場 実証機械：慣行機械に先行し、無人で待機場所から圃場へ移動 慣行機械：実証機械を後続し、手動で待機場所から圃場へ移動 ②圃場内周作業 実証機械：無人で間接耕 慣行機械：実証機械を後続し、手動で間接耕（直進は自動操舵）</p>	

③圃場外周作業

実証機械：無人で圃場から停止位置（図1 停止）まで移動し、停止

慣行機械：手動で外周を耕起

④停止位置もしくは圃場→待機場所

実証機械：無人で停止位置から待機場所へ移動

慣行機械：実証機械を後続し、手動で圃場から待機場所へ移動

(イ) 対照区（自動）（図2）

- ・ 供試機械 実証機械 1 台：完全無人で道路走行及び圃場内での耕起。耕起の作業経路は自動走行の設定画面における利用条件を「ロボットトラクター単独」とし、全面耕起の設定とした（ただし、最外周はロボットトラクターが作業できないため除く）。

- ・ 作業経路 ①待機場所→圃場：無人で待機場所から圃場まで移動  
②圃場：〃 で耕起（最外周は除く）  
③圃場→待機場所：〃 で圃場から待機場所まで移動

- ・ 備考 作業時間には作業者による最外周の耕起時間を追加した。

(ウ) 対照区（手動）（図2）

- ・ 供試機械 慣行機械 1 台：作業者による手動操舵

- ・ 作業経路 ①待機場所→圃場：手動で待機場所から圃場まで移動  
②圃場：〃 で圃場全面を耕起  
③圃場→待機場所：〃 で圃場から待機場所まで移動

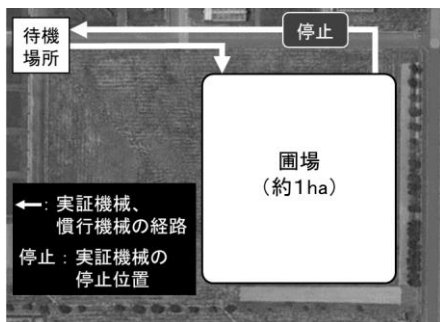


図1 圃場1筆作業における試験区（協調）の作業経路

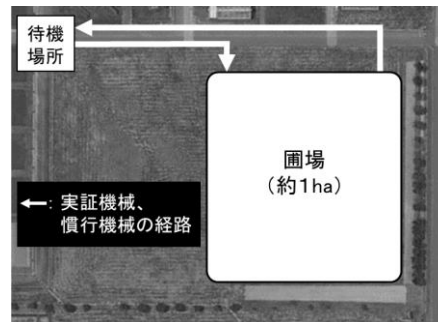


図2 圃場1筆作業における対照区（自動）及び（手動）の作業経路

イ 圃場2筆作業

(ア) 試験区（協調）（図3）

- ・ 供試機械 実証機械 1 台：完全無人で道路走行及び圃場内での耕起。耕起の作業経路は自動走行の設定画面における利用条件を「ロボットトラクター 有人トラクターが並走」とし、間接耕とした。

慣行機械 1 台：作業者による手動操舵、ただし圃場内の作業は自動直進。

- ・ 作業経路 ①待機場所→圃場1  
実証機械：慣行機械に先行し、無人で待機場所から圃場1へ移動  
慣行機械：実証機械を後続し、手動で待機場所から圃場1へ移動

②圃場1（内周作業）

実証機械：無人で、圃場1を間接耕による耕起

慣行機械：実証機械を後続して、手動で間接耕（直進は自動操舵）

③圃場1（外周作業）

実証機械：無人で、圃場1から停止位置（図3 停止1）まで移動し、停止  
慣行機械：手動で、外周を耕起

④停止位置もしくは圃場1→圃場2

実証機械：無人で、停止位置から圃場2へ移動

慣行機械：実証機械を後続し、手動で圃場1から圃場2へ移動

⑤圃場2（内周作業）

実証機械：無人で、圃場2を間接耕

慣行機械：実証機械を後続して、手動で間接耕（直進時は自動）

⑥圃場2（外周作業）

実証機械：無人で、圃場1から停止位置（図3停止2）まで移動し、停止

慣行機械：手動で、外周の耕起

⑦停止位置もしくは圃場2→待機場所

実証機械：無人で、停止位置から待機場所へ移動

慣行機械：実証機械を後続し、手動で圃場2から待機場所へ移動

(イ) 試験区（同時）（図4）

- ・ 供試機械 実証機械2台：完全無人で道路走行及び圃場内での耕起。耕起の作業経路はロボットトラクターの利用条件を「ロボットトラクター単独」とし、全面耕起の設定とした（ただし、最外周はロボットトラクターが作業できないため除く）。

・ 作業経路 ①待機場所→圃場1もしくは2

実証機械Ⅰ：実証機械Ⅱに先行し、無人で待機場所から圃場1へ移動

実証機械Ⅱ：実証機械Ⅰを後続し、無人で待機場所から圃場2へ移動

②圃場作業

実証機械Ⅰ、Ⅱ：各圃場で耕起（最外周は除く）

③圃場1もしくは2→待機場所

実証機械Ⅰ：実証機械Ⅱが圃場1の近傍を通過後、実証機械Ⅱを後続して、無人で圃場1から待機場所まで移動

実証機械Ⅱ：無人で圃場2から待機場所まで移動

- ・ 備考 作業時間には作業による最外周の耕起時間を追加した。

(ウ) 対照区（自動）（図5）

- ・ 供試機械 実証機械1台：完全無人で道路走行及び圃場内での耕起。耕起の作業経路はロボットトラクターの利用条件を「ロボットトラクター単独」とし、全面耕起の設定とした（ただし、最外周はロボットトラクターが作業できないため除く）。

・ 作業経路 ①待機場所→圃場1：無人で待機場所から圃場1まで移動

②圃場1 : // で耕起（最外周は除く）

③圃場1→圃場2 : // で圃場1から2まで移動

④圃場2 : // で耕起（最外周は除く）

⑤圃場2→待機場所：// で圃場2から待機場所まで移動

- ・ 備考 作業時間には作業による最外周の耕起時間を追加した。

(エ) 対照区（手動）（図5）

- ・ 供試機械 慣行機械1台：作業による手動操作

・ 作業経路 ①待機場所→圃場1：手動で待機場所から圃場1まで移動

②圃場1 : // で耕起

③圃場1→圃場2 : // で圃場1から2まで移動

④圃場2 : // で耕起

⑤圃場2→待機場所：// で圃場2から待機場所まで移動

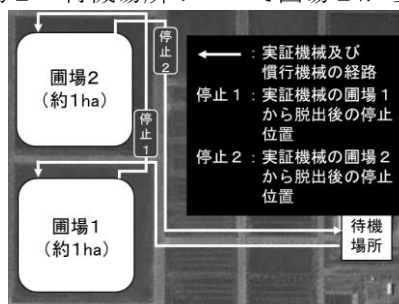


図3 圃場2筆作業における試験区（協調）の作業経路

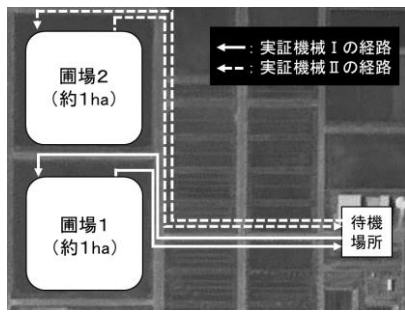


図4 圃場2筆作業における試験区（同時）の作業経路

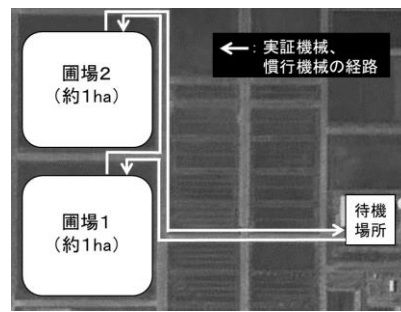


図5 圃場2筆作業における対照区（自動）（手動）の作業経路

ウ 調査項目

(ア) 作業時間

供試機械各1台に RTKGNSS ロガー（ギョロマン社製）を取付け、得られた GNSS ログから作業時間を算出。

(イ) 作業性評価

試験区（協調）及び（同時）において、作業者一名で複数台を操作した場合の作業上の問題点などを評価。

(ウ) 道路走行時の安全性評価

IS018497:2018 に準じた障害物を設置し、緊急停止などの事故防止対策を行えるか評価。

(3) 無人道路走行における精度と速度の関係性の検証

R 4 試験結果より、実証機械での無人道路走行はカーブの際に基準経路との誤差が大きくなった。本年はカーブ時の誤差について、走行速度との関係性を検証する。

ア 走行経路

70m 直進し、90° 右折し、70m 直進（図6）。

イ 走行速度

無人道路走行における速度の設定は直進が1～10km/h、カーブが1～5 km/h の範囲であるため、表1に示す直進とカーブの速度の組み合わせで各3回、無人道路走行を行った。

イ 精度検証

実証機械に RTKGNSS ロガー（ギョロマン社）を取付け、GNSS ログ得た。GIS ソフト

（ESRI ジャパン社）により、無人道路走行の GNSS ログポイントから線形化した基準経路までの距離を算出し、道路走行精度の誤差とした（図7）。

表1 走行精度検証の速度条件

走行速度 (km/h)	
直進	カーブ
1.0	1.0
	2.5
	5.0
2.5	1.0
	2.5
	5.0
5.0	1.0
	2.5
	5.0
7.5	1.0
	2.5
	5.0
10.0	1.0
	2.5
	5.0

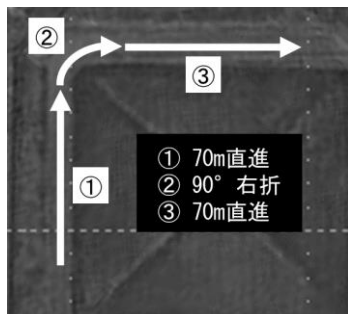


図6 走行精度検証用の走行経路

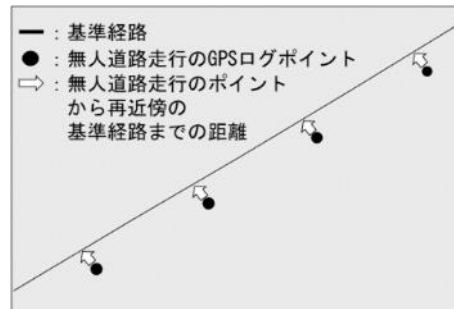


図7 基準経路に対する無人道路走行の誤差の算出方法

### 3. 試験結果

#### (1) 無人道路走行を活用した省力性の検証

##### ア 圃場1筆作業

###### (ア) 作業時間

作業時間は、試験区（協調）（80.8分、対照区（手動）対比74）＜対照区（手動）（109.9分、同100）＜対照区（自動）（117.2分、同106）の順に短かった（図8）。

試験区（協調）では、慣行機械が耕起中に、実証機械が停止している時間があった（図8、実証機械 白抜き部分）。停止時間は34.9分であり、慣行機械の耕起時間（74.9分）に対し、47%となった。要因は実証機械が圃場内部の間接耕しか行えないため、慣行機械が外周4周分を耕起を担当し、その間の実証機械が待機する必要があったためであった（図9）。

###### (イ) 操作性

試験区（協調）では、作業者が慣行機械に搭乗しながら、実証機械を遠隔操作したが、実証機械の障害物センサーに慣行機械が探知されないように一定の距離（耕起2行程分程度）を保ちつつ、タブレットの安全通信範囲である50m以上離れないようにする必要があった。

###### (ウ) ロボットトラクター2台による圃場1筆での耕起作業について

ロボットトラクター2台による圃場1筆での耕起作業の実証も検討したが、以下の理由により中止した。

- ①ロボットトラクターを含む2台による作業の際には、ロボットトラクターの利用条件を「ロボットトラクター 有人トラクターが追走」もしくは「ロボットトラクター 有人トラクターが並走」のどちらかしか選択できず、ロボットトラクター2台を圃場1筆で利用する設定条件が実装されていない。
- ②①の2つの利用条件のどちらを選択しても、外周作業は作業者による作業となるため、ロボットトラクター2台では（最外周を除いても）圃場全面の作業ができない。
- ③2台のトラクターでは間接耕となる。しかし、ロボットトラクター間での作業マップの共有ができず、一方のロボットトラクターが耕起した行程を認識して、もう一方で耕起していない行程を正確に作業する、という条件が設定できずに、同じ作業経路での間接耕となってしまう。

##### イ 圃場2筆作業

###### (ア) 作業時間

試験区（同時）（141.5分、対照区（手動）対比54）＜試験区（協調）（193.7分、同74）＜対照区（手動）（260.8分、同100）＜対照区（自動）（265.1分、同102）の順に短かった（図10）。

試験区（協調）では、圃場1筆作業と同様に、実証機械が停止している時間があり（図10、試験区（協調）実証機械、白抜き部分）、要因も圃場1筆作業と同じだった（図11）。停止時間は2筆合計 $53.0+48.4=101.4$ 分であり、慣行機械の耕起時間（ $86.2+81.4=167.6$ 分）に対し、61%となった。

試験区（同時）では、2台の実証機械がそれぞれ異なる圃場で作業したため、試験区（協調）のような停止時間が発生せず、作業時間が最も短くなった（図12）。

###### (イ) 操作性

試験区（協調）は、圃場1筆作業と同様だった。

試験区（同時）は、完全無人での作業となるため、作業者が各実証機械のタブレット計2台を持って機体外で作業した。そのため、一方の実証機械に近づくと、もう一方の実証機械からタブレットの安全通信距離50mより離れてしまうことがあり、通信が不安定な時間が発生した。また、作業者が持つ2台のタブレットがどちらの実証機械のものか瞬時に判断できない、実証機械に搭乗しないためタブレットの充電ができない、という問題点があった。その他、ロボットトラクターでは圃場の最外周の作業ができない、という従来の課題もあった。

##### ウ 障害物対応

R4の試験結果と同様に、無人道路走行では直進時の時速5km/h、カーブ時の3km/hともに障害物を探知し、停止した（データ省略）。また、停止からの再始動はタブレットを操作し、行った。

(2) 無人道路走行における精度と速度の関係性の検証

ア 直進時の基準経路との誤差

誤差は6.5~7.2cmの範囲(表2)であったが、直進速度との単相関係数は-0.227、カーブ速度は0.031で、ともに有意水準10%区間で有意性は認められなかった(データ省略)。

イ カーブ時の基準経路との誤差

誤差の最小は直進及びカーブ速度が最低値の1.0km/hの組合せで38.1cm±0.6、最大が直進速度は最高値の10.0km/hとカーブ速度も最高値の5.0km/hの組合せで42.6cm±0.3であり、最小と最大の差は4.5cmだった(表2)。また、目的変数をカーブでの誤差、説明変数を直進速度及びカーブ速度とした場合の重回帰分析では、偏回帰係数が直進速度で0.222(p<0.01)、カーブ速度で0.445(p<0.01)であり、標準偏回帰係数は直進速度で0.412、カーブ速度で0.429だった(表3)。

4. 主要成果の具体的データ

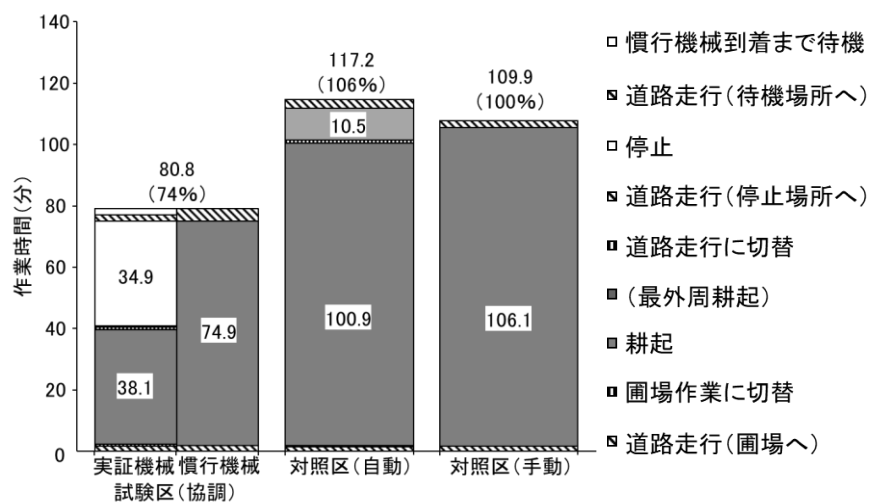


図8 圃場1筆作業における各区の作業時間

注 棒グラフ中の数値は耕起に係る作業時間を示す(図10同様)

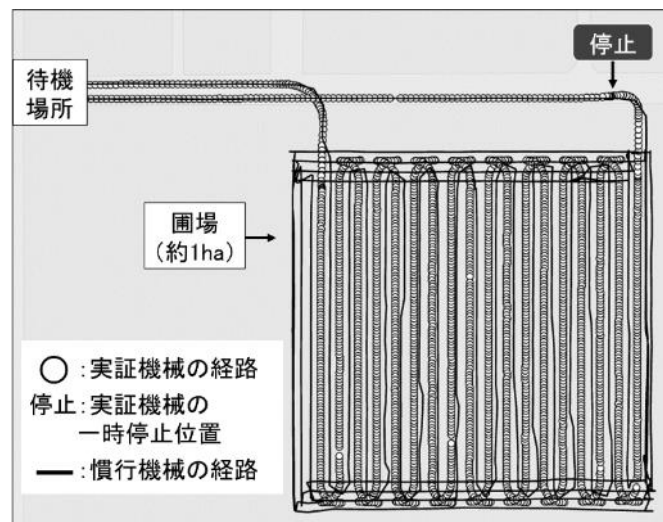


図9 圃場1筆作業の試験区(協調)の実証及び慣行機械の作業経路

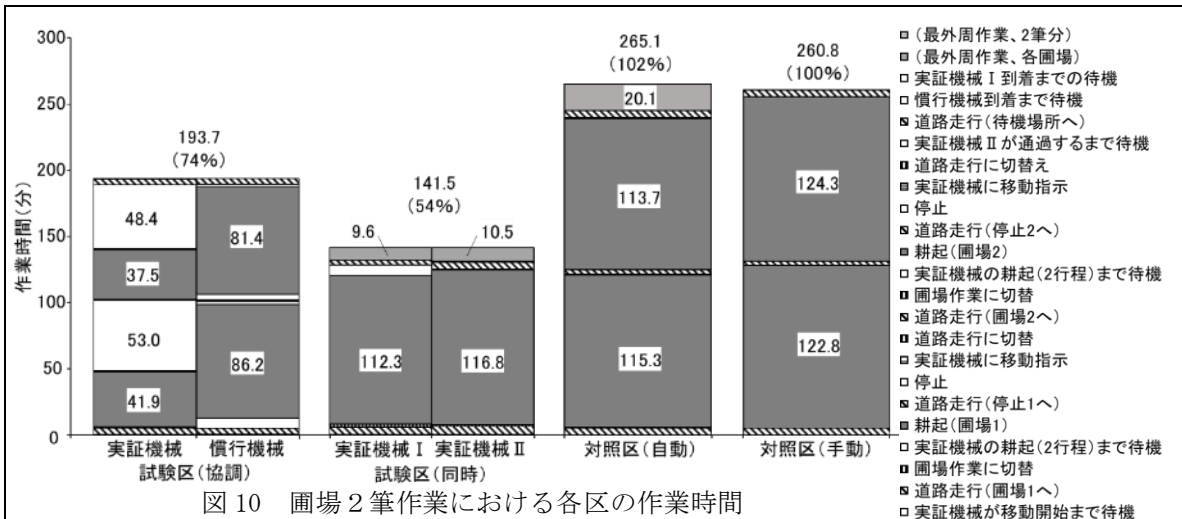


図 10 圃場 2 筆作業における各区の作業時間

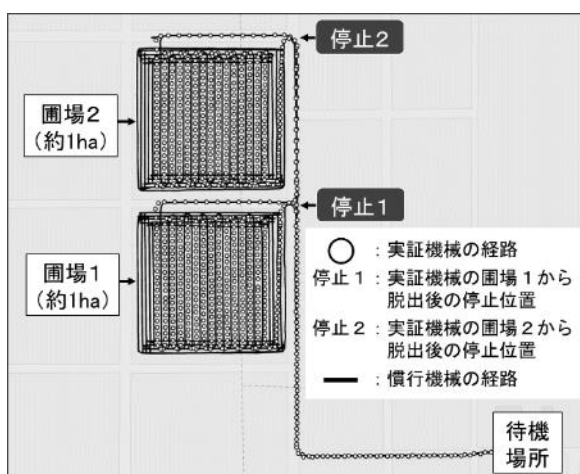


図 11 圃場 2 筆作業の試験区(協調)の実証及び慣行機械の作業経路

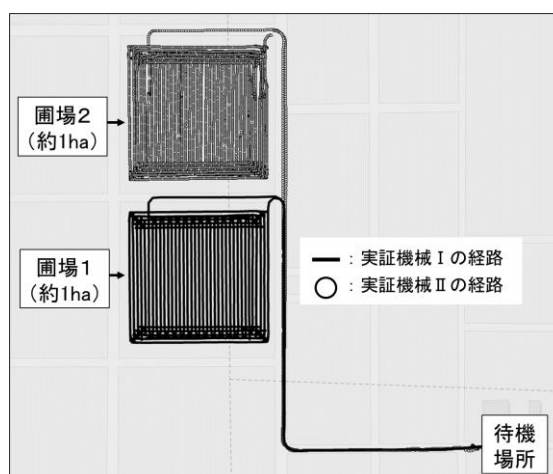


図 12 圃場 2 筆作業の試験区(同時)の実証及び慣行機械の作業経路

表 2 無人道路走行における各速度条件の基準経路との誤差

走行速度(km/h)	基準経路との誤差(cm)	
	直進	カーブ
1.0	1.0	7.2 ± 0.6
	2.5	6.9 ± 0.3
	5.0	7.0 ± 0.1
2.5	1.0	7.1 ± 1.4
	2.5	6.9 ± 0.8
	5.0	6.5 ± 0.3
5.0	1.0	7.1 ± 0.6
	2.5	7.1 ± 0.5
	5.0	7.1 ± 0.6
7.5	1.0	6.8 ± 0.1
	2.5	7.1 ± 0.4
	5.0	7.0 ± 0.4
10.0	1.0	6.6 ± 0.2
	2.5	7.1 ± 0.9
	5.0	6.9 ± 0.7

注 基準経路との誤差は3回の平均±標準偏差を示す。

表 3 目的変数をカーブの誤差、説明変数を直進及びカーブ速度とした重回帰分析

説明変数	偏回帰係数	標準誤差	標準偏回帰係数	T値	P値	有意性	単相関係数
直進速度	0.222	0.071	0.412	3.142	0.003	**	0.425
カーブ速度	0.445	0.136	0.429	3.272	0.002	**	0.442
定数項	38.673	0.582		66.445	<0.001	**	
重回帰式	重相関係数	0.604					
	F値	10.61					
	P値	<0.001					

## 5. 経営評価

社会実装前の技術のため、利用経費を算出できず、経営評価は行えなかった。

## 6. 利用機械評価

圃場までの運搬に作業が必要というロボット農機の課題を解決できる技術である。この技術が社会実装されれば、スマート農業技術レベル3の実現に貢献できると考えられる。

## 7. 成果の普及

社会実装前の技術のため、成果の普及はなし。

## 8. 考察

### (1) 無人道路走行を活用したロボット農機の複数台運用について

ロボット農機は複数台による運用での省力化が提唱されてきたが、運搬時に農機1台に作業員1名を要するため、生産現場では複数台の運用は現実的ではなかった。しかし、本課題では、無人道路走行により作業員1名がロボット、手動問わず2台の農機の運用を実証した。以上から、無人道路走行の活用により、農機の複数台運用が技術的に可能なことが示された。

### (2) 無人道路走行を含んだロボット農機による省力性について

1台の農機による作業を2台で行うと作業量は2倍になり、作業時間の理論値は最大半分になると考えられる。本課題では圃場2筆作業の試験区（同時）の作業時間が54%（図10）であり、理論値に近い結果だった。これより、無人道路走行を活用して2台のロボット農機を運用することが、最も省力性が高い方法だと示された。これに対し、試験区（協調）では圃場1筆または2筆作業でも作業時間が74%（図8、10）であり、ロボット農機が外周作業を行わないことが要因だった。そのため、協調作業においても、ロボット農機が外周作業を行えるようにする必要があったと考えられた。

### (3) 無人道路走行の走行精度に影響を与える要因について

カーブ時の走行精度の誤差が大きくなる要因は、実証機械が基準経路を逸脱したことを感知してからハンドル操作を行うためであった（R4試験結果）。カーブ時の誤差はカーブのみならず、直進速度が速いほど誤差が大きくなった（表2）。これは、実証機械のカーブ及び直進速度が速いと、基準経路からの逸脱を感知するまでに移動した距離が長くなるためと思われる。また、標準偏回係数が直進とカーブ速度で近い値（表3）で、カーブ誤差に与える影響は同程度だと考えられた。しかし、カーブ誤差の最小値と最大値の差は4.5cmであり、走行速度より、実証機械の逸脱感知の感度向上の方が誤差低減に効果が高いと考えられた。

## 9. 問題点と次年度の計画

無人道路走行を活用した農機の複数台運用について、以下に今後の技術開発の必要性を記載。

(1) ロボット農機の最外周の作業を可能にする。

(2) 協調作業時のロボット農機の外周作業を可能にする。

(3) 複数台のロボット農機をタブレット1台で運用可能にし、タブレットの通信距離を長くする、もしくはリアルタイムでの遠隔監視及び操作技術を確立する。

## 10. 参考写真



圃場1筆作業での試験区（協調）の無人道路走行

圃場2筆作業での試験区（協調）の無人道路走行

圃場2筆作業での試験区（同時）の無人道路走行