

自律走行トラクタの圃場作業性

関口 建二* 竹中 秀行* 原 令幸*

自動追尾型光学測量システムを使用した自律走行トラクタを用いてロータリ耕および小麦の施肥・播種作業の作業性、省力性、取扱性を検討した。作業員1名で2台同時運用を行うロータリ耕作業では、圃場作業量や作業員能率は慣行の約2倍となり、小麦の施肥・播種作業では1人作業の可能性が認められた。トラクタの直進走行性、左右の振幅、軌跡の平行度は慣行作業区に優った。取扱性や安全性の面で改善の余地が残されているものの、自動追尾型光学測量システムを用いた自律走行システムは農作業へ適応可能と考えられる。

緒 言

無人作業による大幅な省力化、高精度作業の実現などを目指し、圃場内のトラクタ位置計測に自動追尾型光学測量システムを用いた自律走行トラクタが生研機構で開発された。水田や小區画圃場での経路計画法や制御アルゴリズム、取扱性や安全性などの検討の後、主にロータリ耕が可能なハードやソフト群が開発された。この自律走行トラクタをロータリ耕および小麦の施肥・播種作業に供試し、その作業性、省力性、取扱性を検討した。

試験方法

1. ロータリ耕試験

- 1) 試験場所 中央農試
- 2) 試験期日 平成10年5月～10月
- 3) 供試機および試験区

試験には自律走行が可能なトラクタと比較対照として同一型式のトラクタを供試した。自律走行トラクタのベーストラクタ (GL321) は33PS, 4WDで、自律走行を可能とするため改良を行っている (表1)。圃場内のトラクタの位置計測は自動追尾型光学測量システム (AP-L1) で行い、測距範囲は7～700m, 測位誤差は3mm (静止時), 10mm (移動時) である。レーザ光による測位システムであるため、障害物がある場合やトラクタに装着したプリズムが隠れる傾斜地や凹凸圃場では利用できない。また、固定局からトラクタへの位置情報伝送には特定小電力無線を使用しており、通常の通信距離は500m程度である (図1)。自律走行トラクタを走行させるためには、固定局の設定、圃場区画のティーチング、作

業前の初期設定を行う必要がある。固定局はトラクタの位置計測および位置情報の通信を行うために必要で、商用電源あるいは発電機が必要である。圃場区画のティーチングは圃場最外周を有人で走行する作業で、圃場区画情報の入手とトラクタの区画外逸脱防止に必要であるが、次回からこの作業は不要である。作業前の初期設定は作業ソフトの起動、ティーチングデータの読み込み、変速段やPTO速度段の確認などで、設定が終了すると、セルフチェック機能が働き、問題がなければ作業開始となる。作業中に速度や作業負荷の異常、障害物との遭遇、区画外への逸脱などが発生すれば、異常時対応機能が作動し、走行を停止してホーンやライトで監視者に異常を知らせる。また、緊急時にはリモコンにより非常停止も可能である。

使用したロータリは作業幅が172cmで、耕深を12cm, 耕うん軸回転数は193rpmに設定した。試験圃場は平坦なえん麦刈取り跡地で、土性は未熟火山性土である。16.5×30m, 面積49.5aで同一形状の圃場を2区画設け、自律走行トラクタにより無人でロータリ耕を行う自律区と

表1 自律走行トラクタの仕様諸元

型式	GL321	
機体	全長	(mm) 3,180
	全幅	(mm) 1,455
	全高	(mm) 1,980
	重量	(kg) 1,280
機関	形式	水冷4サイクル 3気筒ディーゼル
	排気量	(ml) 1,499
変速機	出力/回転数 (PS/rpm)	33/2,800
		前・後進16段 (パワーシフト・シャトル変速)
安全対策	非常停止用リモコン	
	緊急停止用フェンダボタンスイッチ	
	パンパスイッチ (接触感知用)	
	超音波センサ (近接感知用)	

2000年8月4日受理

* 北海道立中央農業試験場, 069-1395 夕張郡長沼町

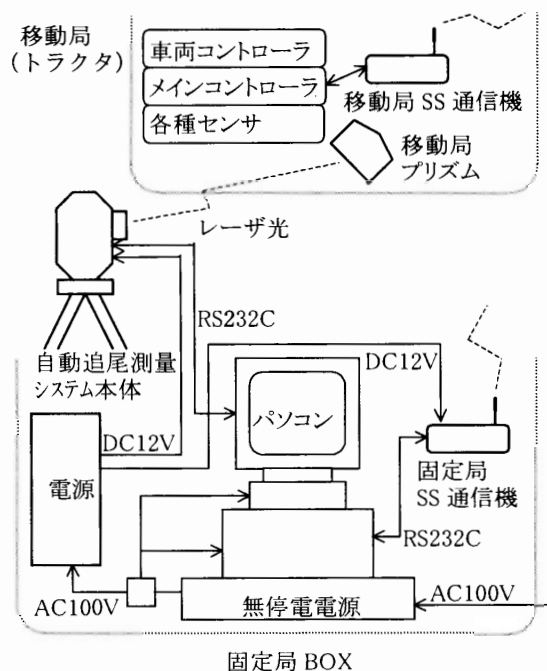


図1 固定局および移動局の機器構成

作業者が慣行作業を行う慣行区とした。作業行程は中央部は長辺方向の隣接往復作業で、仕上行程に外周2行程の回り耕を設けた。

4) 調査項目および方法

圃場作業量を増加させる利用法として、作業員1名が通常のロータリ耕を行いながら、自律走行トラクタの作業状態を管理する2台同時運用方式を検討した。2台同時運用方式は、自律走行トラクタを圃場端に運搬、初期設定を終えた後、無人のロータリ耕を開始させる自律区とその後通常のトラクタにより別圃場で運転者がロータリ耕を行う慣行区を設けた。作業者は慣行作業を行いながら、自律走行トラクタの作業状況やトラブル発生などを監視する方式で、異常が発生すればトラブルに対応、緊急時にはリモコンによりトラクタの停止が可能である。調査項目はロータリ耕の作業精度、圃場作業量、作業時間および取扱性である。作業精度の各項目で、残耕および既耕地の踏付距離については実測し、直進走行性、左右の振幅、軌跡の平行度についてはAP-L1で記録される作業軌跡データを解析した（表2）。

表2 直進性の評価項目

項目	定義
直進走行性	進行方向に対する作業軌跡の振幅の標準偏差
左右の振幅	進行方向に対する作業軌跡の最大振幅
軌跡の平行度	作業軌跡の1次回帰直線が目標方向となす角度

注) 作業軌跡のサンプリングは5 Hz

2. 小麦の施肥・播種試験

- 1) 試験場所 芽室町
- 2) 試験期日 平成11年8月～10月
- 3) 供試機および試験区

自律走行トラクタはロータリ耕試験で使用した自律走行トラクタと同じである。施肥・播種機は7畦用施肥播種機（TW-7）を9畦用に改造したもので畦間30cm、作業幅は2.7mである。機体重量は480kg、種子と肥料を満載すると約1トンとなり、前輪荷重の減少が大きい。このため、トラクタフロントに195kgの付加重錘を取り付け、操舵性の安定を図った。作業行程は圃場長辺方向の隣接往復作業、枕地で種子・肥料の補給作業を行う方式で、走行制御プログラムはロータリ耕で使用したプログラムを改修して用いた。試験圃場はほぼ平坦で、土性は乾性火山性土である。区画は286.1×86.4m、面積は2.47haで、自律走行トラクタが無人で作業を行う自律区と作業者が自律走行トラクタを運転して作業を行う慣行区を設定した。

4) 調査項目および方法

小麦の施肥・播種作業は自律区、慣行区ともに2名で作業を行った。自律区は2名とも種子と肥料の補給に従事するが、慣行区ではそのうち1名が運転者を兼ねる。肥料補給は旋回後、枕地で自動的に停止した作業機に、500kgフレコンバッグから供給した。自律区は2往復毎に種子と肥料の補給を行う区（以下自律A区）、1往復毎に種子と肥料の補給を行う区（以下自律B区）である。慣行区のアペレータは現地農家で、作業方法は自律A区と同じである。調査項目は作業精度、圃場作業量、作業時間および取扱性である。

結 果

1. ロータリ耕試験

自律および慣行の両試験区ともトラブルは発生せず、12～13cmの耕深で順調に作業が終了し、2台同時運用が可能であった。慣行区では空走や旋回などの移動時に車速を変更したため、走行速度は自律区に比べてやや高くなった。圃場作業量は慣行区が25.4a/hと自律区23.1a/hより高くなり、2台同時作業の圃場作業量は慣行作業の約2倍となった。また、作業員能率（作業員が拘束される時間当りの能率）は慣行区が23.6分/10aであったが、2台同時運用では12.2分/10aであり、慣行作業の約半分となった。両区とも残耕はなく、既耕地の踏付距離、直進走行性などの作業精度は自律区の方が優った（表3）。

表3 2台同時ロータリ耕作時の圃場作業量と作業性

試験区	圃場面積 (a)	実耕面積 (a)	作業速度 (m/s)	総作業時間 (min)	初期設定時間 (min)	無人作業時間 (min)	有人作業時間 (min)	撤去時間 (min)	圃場作業量 (a/h)	作業時間 (min/10a)	作業能率 (min/10a)	残耕面積 (a)	総踏付距離 (m)	直進走行性 (cm)	軌跡の平行度 (deg)
総合	98.6	98.1		127.6	2.9	123.9	115.5	0.8	46.1	13.0	12.2				
慣行区	49.3	49.0	0.51	-	-	-	115.5	-	25.4	23.6	23.6	0.0	49.3	11.0	0.1
自律区	49.3	49.1	0.50	-	2.9	123.9	-	0.8	23.1	26.0	0.8	0.0	47.1	4.3	0.0

表4 小麦施肥・播種作業の作業性および作業能率

試験区	面積 (ha)	区画		作業 速度 (m/s)	総作業 時間 (min)	作業の内訳 (%)						圃場 作業量 (h/ha)	作業 時間 (h/ha)	作業者 能率 (h/ha)	作業 効率 (%)
		長辺 (m)	短辺 (m)			補給	播種	移動			旋回				
								初回	補給前	補給後					
自律A区 (2往復補給)	1.85	286.1	64.8	0.86	163.09	11.5	82.0	0.4	0.6	0.9	4.5	0.68	1.47	1.47	77.5
自律B区 (2往復補給)	1.85	286.1	64.8	0.86	181.41	20.6	73.8	0.3	1.1	1.7	2.5	0.61	1.63	1.63	69.7
慣行区 (2往復補給)	0.62	286.1	21.6	1.17	42.95	14.5	76.2	1.7	0.7	1.2	5.7	0.86	1.16	2.32	72.0

注：初回移動は圃場端から播種開始位置までの移動 作業人員は自律区・慣行区ともに2名

2. 小麦の施肥・播種試験

1) 圃場作業量

両区とも順調に作業を終了した。作業速度は自律区が一定の速度に設定されていたのに対し、慣行区では運転者が任意に変更したため、1.17m/sと自律区の0.86m/sより高かった。圃場作業量は自律A区が0.68ha/hと自律B区の0.61ha/hより高く、これは自律A区の補給回数が少ないためである。慣行区は0.86ha/hと自律区より高く、これは作業速度が高いことによる（表4）。

2) 播種時の直進性

自律区の直進走行性は平均3.1cmであった。行程の約80%は5cm以内であったが、1行程のみで10cmを越えた。慣行区は平均8.7cmであり、5cm以内で操縦することが不可能と考えられる。左右の振幅、軌跡の平行度は慣行区に比べて自律区の方が優った（表5）。

表5 直進性

試験区		直進走行性 (cm)	左右の振幅 (cm)	軌跡の平行度 (deg)
自律区 (A, B合計)	平均値	3.1	15.1	0.003
	標準偏差	2.6	12.0	0.013
	最大値	10.6	41.0	0.059
	最小値	0.0	0.0	-0.015
慣行区	平均値	8.7	38.3	-0.027
	標準偏差	1.3	6.0	0.014
	最大値	9.7	44.0	-0.011
	最小値	7.3	32.0	-0.036

3) 隣接条間

長辺方向の播種列に対し、直角方向に5列、隣接条間を測定した。設定畦間30cmに対し、自律区の隣接条間は31.8cm、標準偏差8.2cm、慣行区はそれぞれ31.5cm、6.6cmであった。両区とも設定に対し5%程度広くなったが、

自律区と慣行区に差は認められなかった（表6）。自律区の隣接条間の標準偏差が大きくなったのは、トラクタの位置計測を高さ2mの安全フレーム上に取り付けたプリズムにより行っており、このプリズム位置と播種位置が異なることが原因と考えられる。

表6 隣接条間

	自律区 (A, B合計 n=115)	慣行区 (n=35)
平均値 (cm)	31.8	31.5
標準偏差 (cm)	8.2	6.6
最大値 (cm)	65	45
最小値 (cm)	12	20

考 察

1. 作業性

肥料や種子の補給、収穫物の排出による作業停止を伴わないロータリ耕やスプリングハローによる碎土・整地作業などでは、無人作業や1人で複数のトラクタを制御することが可能であり、圃場作業量の大幅な増加や作業人員の削減が可能である。

補給作業を伴う作業は、慣行では2人組作業が基本であるが、トラクタ操縦を無人化することで1人作業が可能となり、労力軽減や作業人員の削減に寄与すると思われる。また、補給や排出作業に改良を加えれば、圃場作業量は更に向上すると推察される。本試験では、作業速度0.5～1.0m/sで検討を行ったが、作業速度が極めて低いトレンチャ作業では作業労力の軽減に大きく寄与すると思われる。

今後、無人作業を前提とした作業システムの構築、種々の作業に対応したプログラムの開発や矩形以外の圃場作業に対応したプログラムの開発とともにシステムの安定

性や確実性、安全性などの検討が進めば、実用化が可能であろう。

2. 取扱性

自律走行トラクタは、自動追尾型光学測量システムを使用しているため、固定局と移動局間の見通しが確保できず測位不能な圃場では利用できない。また、特定小電力無線通信の電波が障害を受ける条件下でも利用不可である。作業中にシステムが停止すると極めて危険な状態となるため、事前に十分に利用条件を検討することが必要である。また、固定局は作業する圃場外に設置するが、圃場にうねりがある場合、固定局の設置高さにも留意が必要である。

補助作業が必要な作業では、作業者が自律走行トラクタの作業状態を監視する。しかし、トラクタと作業者の距離が300mを超えるような状況では作業状態の監視が困難となるため、作業状態表示モニタの検討が必要である。

供試したシステムでは固定局の設定、圃場のティーチングや初期設定などの際にキーボード操作が必要で、モニタ画面を見ながら入力操作が行える程度の初歩知識は必要であるが、システムの操作性向上について更なる検討が必要であろう。

試験では故意に位置情報を停止させるとトラクタは停止し、その後位置情報を正常に取り込むと継続作業が可能であった。また、バンパースイッチが障害物に触れた場合、あるいはトラクタが区画外に出るとトラクタは停止し、装備している安全装置は正常に作動した。開放空間における自律車両の走行では、ハードおよびソフトウェアを含むシステム全体の異常やトラブルが重大な事故に直結する危険性を持つ。供試システムには作業前に実行する自己診断機能や作業時に異常時対応機能などが組み込まれているが、今後安全装置の信頼性向上、フェイルセーフシステムの装備、トラクタに近づく人間や動物の感知など、より安全なシステムへの検討が必要であろう。

Field Performance of Autonomous tractor

Kenji SEKIGUCHI* Hideyuki TAKENAKA*
Yoshiyuki HARA*

* Hokkaido Central Agricultural Experiment Station, Naganuma, Hokkaido, 069-1395 Japan.