

ロータリ耕うんにおける直進補助制御に関する基礎研究 －ロータリ取付けヨー角の制御によるトラクタヨー姿勢角変化の抑制－

佐藤 邦夫^{1*}, 新谷 康夫², 福島 崇志¹, 趙 光龍³

1 三重大学大学院生物資源学研究科共生環境学専攻環境情報システム工学講座

2 株式会社サタケ

3 ものづくり協同組合

Basic Study on the Compensatory Rectilinear Progress Control for a Rotary Tillage Tractor － Reduction of Fluctuation of Yaw Attitude Angle of a Tractor Using the Yaw Angle Control for a Rotary Tiller －

Kunio SATO¹, Yasuo SHINTANI², Takashi FUKUSHIMA² and Guanglong ZHAO³

1 Dept. of Environmental Science and Technology, Graduate School of Bioresources, Mie University,
1577 Kurimamachiya-cho, Tsu, Mie 514-8507, Japan

2 Satake Corporation

3 Monodukuri Cooperative Society

Abstract

In this study, some basic experiments were carried out for the purpose of constructing the oncoming compensatory rectilinear progress control system that controls the yaw angle of a rotary tiller automatically, to improve the straightness of the tractor path in the rotary tillage work. Primarily, some experiments were carried out to confirm that tractors turn by setting the yaw angle of the rotary tiller largely.

Following, the steering wheel of a tractor was manipulated so that the tractor was traveling straight while the rotary tiller was set at a certain angle to the tractor, while the front steering angle was measured simultaneously to investigate the effectiveness of the yaw angle of the rotary tiller. In addition, the compensatory rectilinear progress control system that controlled the yaw angle of the rotary tiller was tried to be constructed with an oscillatory type yaw rate sensor and a telescopic lower link in order to reduce the yaw attitude angle of the tractor. Lastly, some control experiments were carried out. The effectiveness of this system was confirmed using estimations of the potentiality of the compensatory rectilinear progress control derived from the turning characteristics of the tractor obtained in the preliminary experiments by setting the yaw angle of the rotary tiller.

Key words: トラクタ, ロータリ, 直進制御, ヨーレートセンサ, テレスコピックロワリンク

2015 年 12 月 22 日受理

¹ 〒 514-8507 津市栗真町屋町 1577

² 〒 739-8602 東広島市西条西本町 2 番 30 号

³ 〒 328-0042 栃木市沼和田町 5-41

* For correspondence (e-mail: sato@bio.mie-u.ac.jp)

1. 緒 言

電子技術の急速な発展により、農用トラクタに装着される作業機には種々の制御要素が付加されるようになった。特にロータリ耕うん装置の耕深の電子制御は歴史が古く、既に 1970 年代の後半には電子回路による耕深制御が広く行われ、車速も含めた耕うん制御なども研究された^{1,2)}。その後ロータリの水平制御機構も一般化され、現在に至っている。作業機の制御に関する研究の方向は、ロータリも一つの対象作業機ととらえ一般的な 3 点リンクの制御系が構想され、更により一般的な CAN の利用へと進み、作業機を巡るいかなるアイデアも実現することがより容易となってきた^{3,4)}。

ここで、日本における農業の傾向を概観してみると、農業従事者の減少や高齢化が問題となっている。また農作業事故の大半が農用車両に関わることもあり、農用車両の操作を容易化して操縦者の負担を軽減し、安全性や快適性を向上させることも求められている^{5,6)}。

本研究はこのような環境を踏まえ、ロータリのトラクタ本体への取付け角を自動制御してトラクタの直進性を補助する、直進補助制御系の構築を将来的な目標として位置付け、そのための基礎実験およびその考察を行う。

未熟練者はロータリ耕うん作業において湾曲した航跡を残し、前の航跡に沿って作業を続けると、その後の航跡が益々湾曲してしまうことがある。湾曲した航跡となるのは、トラクタのヨー姿勢角（以下、「トラクタの姿勢角」）が変化していることに気が付かず、また姿勢角の変動を独立して補正する手段を持たずに操縦するからである。操縦者が姿勢角の変化に気が付かない原因は、その変化が緩やかであることと、湾曲が直進に対する誤差であるとするとその誤差が積分的に累積する傾向があることが挙げられる。

さらに、2 輪操舵車両はもともと横変位を修正する過程で姿勢角も変化してしまい、このとき視線の方向も変化するので、元の方向を維持するにはある程度の熟練を要する。このような理由により、未熟練者にとっては修正動作そのものが横変位や姿勢角のオーバーシュートの原因になっており、特に圃場境界や畦畔のような明確な目標がない圃場中央部において車両の直進性を確保する

のは容易でない。田植機にも同様な直進性確保の問題があり、直進自動制御に重点が置かれた研究が成されている^{7,8)}。

筆者らは、4 輪操舵車両の研究において、前後操舵系を独立に制御することによって横変位と姿勢角を分離して独立に制御する事ができることを示した⁹⁾。本研究ではこの結果を受け、一般の前 2 輪操舵ロータリ耕うんトラクタにおいて、ロータリの取付け角制御機構を 4 輪操舵車両の後輪操舵機構と類似の機構として設定し、ロータリ耕うんトラクタの姿勢角を分離して自動的に制御し、姿勢角の変化を抑制することにより直進性の確保を補助し、操縦者が極力横変位の操作に専念できるようなシステムが可能かどうか、実験することとした。

そのため、本研究の前半ではまずロータリ取付け角を積極的に設定することにより、トラクタが旋回動作を行うことを確認する実験を行った。次に、供試するトラクタのロータリ耕うん装置に後輪操舵機構の機能を持たせるため、通常の右側ロワリンクをテレスコピックロワリンクに置き換え、ロータリの取付け角を自動制御することにより直進補助制御実験系を構築した。さらに本研究の後半では、構成した制御実験系を評価する基礎実験を行い、その結果を考察した。

なお本研究を通じ、実験に供試した路面は研究用に造成された大学敷地内の水平な畑地であり、全面に 1 度ロータリ耕うんし、それを 7 日から 10 日間放置することによって準備した裸地である。実験時の土壌硬度は山中式土壌硬度計により計測した。

2. ロータリ取付け角の操舵効果に関する実験

本研究で供試したトラクタとロータリの組み合わせは表 1 の通りである。各組の組み合わせを、それぞれ「ロータリ付きトラクタ A」および「ロータリ付きトラクタ B」と呼ぶ。

ここでは、水平なアスファルト路面上でトラクタが直進するときの前輪舵角を基準直進舵角とし、供試土壌路面で前輪を基準直進舵角に固定してロータリ耕うんを行なったときにトラクタが直進する状態をロータリ取付け角 0.0 rad とする。ロータリ取付け角および前輪舵角は、上方から見て左

表1 トラクタとロータリの組み合わせ

	ロータリ付き トラクタ A	ロータリ付き トラクタ B
トラクタ出力 [kW]	22.4	21.0
エンジン定格回転数 [rpm]	2750	2650
トラクタ質量 [kg]	1350	1310
軸距 [m]	1.75	1.75
輪距 前輪／後輪 [m]	1.15/1.14	1.15/1.14
後車軸 / ロータリ軸間距離 [m]	1.22	1.38
ロータリ質量 [kg]	420	343
ロータリ耕うん幅 [m]	1.80	1.70
ロータリ耕うん軸回転半径 [m]	0.25	0.25
耕うん爪種類	なた爪	なた爪
爪本数 [本]	40	40

表2 ロータリ位置における旋回半径 (1)

(ロータリ付きトラクタ A, 前輪舵角: -0.044 rad, 車両速度: 0.56 m/s, 耕うん軸回転速度: 155 rpm, 耕深: 0.12 m, 深さ 0.05 m における土壌硬度 0.39 MPa, 水平な実験用裸地)

ロータリ取付け角 [rad]	旋回半径 [m] と旋回方向
0.00	48.3 右
0.076	43.4 右
0.151	24.2 右

回りを正とする。特に前輪舵角は、左右前車輪の回転面の方向が直進方向に対して持つ角度を、キングピンまわりの回転角度により計測し、左右輪の舵角を平均した数値に換算して用いる。

2.1 旋回実験

本研究の旋回実験は、右側ロワリンクの長さをロータリ取付け角 0.0 rad の状態から後方および前方に伸縮して固定することによりロータリ取付け角を設定し、前輪を一定の舵角で固定して圃場を耕うん走行するもので、「ロータリの旋回半径」としてロータリ耕うん幅の中心位置の旋回半径を計測した。なお、ロータリ取付け角の設定に伴い、トラクタ後車軸からロータリ耕うん軸までの平均距離の変化も伴うことを付記しておく。

表2は、ロータリ付きトラクタ A の前輪舵角

表3 ロータリ位置における旋回半径 (2)

(ロータリ付きトラクタ B, 前輪舵角: 0.0 rad, 車両速度: 1.15 m/s, 耕うん軸回転速度: 264 rpm, 耕深: 0.10 m, 深さ 0.05 m における土壌硬度 0.47 MPa, 水平な実験用裸地)

ロータリ取付け角 [rad]	旋回半径 [m] と旋回方向
0.096	69.3 右
-0.068	45.3 左

を -0.044 rad に固定し、ロータリ取付け角を 0.0 rad, 0.076 rad および 0.151 rad の3段階に設定して計測したロータリの旋回半径である。これはロータリ取付け角を積極的に付加することによって、前輪舵角による旋回動作が助長されるかを調べたもので、実験中車両速度を 0.56 m/s, ロータリ耕うん軸回転速度を 155 rpm, 耕深を 0.12 m とした。本表により、取付け角が大きくなるに従い、トラクタの旋回半径が小さくなるのが分かる。なお、本実験で供試した路面は深さ 0.05 m における土壌硬度が 0.39 MPa の水平な実験用裸地である。

次に表3は、ロータリ付きトラクタ B の前輪舵角を 0.0 rad に固定し、ロータリ取付け角をそれぞれ正負の最大値に設定して実験した旋回実験結果である。これは直進状態でもロータリ取付け

角によって旋回動作が惹起されるかを調べたものである。本実験で供試した路面は深さ 0.05 m における土壌硬度が 0.47 MPa, 土壌含水比が 16.6% (d.b.) の水平な実験用裸地である。なお, ロータリ取付け角の正の最大値は 0.096 rad, 負の最大値は -0.068 rad である。本実験では理論車両速度, すなわちエンジン定格回転速度のときのアスファルト路面上での車両速度を 1.15 m/s, ロータリ耕うん軸回転速度を 264 rpm, 耕深を 0.1 m に設定した。この実験結果によると, 取付け角が正の場合車両は右へ旋回し, 取付け角が負の場合は車両は左へ旋回することが確認される。

さらに, 実際の PTO 軸トルクが旋回半径にどのような影響を与えるかを調べるため, ロータリ付きトラクタ B について, 安定した走行状態が得られる比較的低速な走行速度で, PTO 軸トルクと旋回半径の関係を調べた。本実験では車両速度を 0.461 および 0.575 m/s, ロータリ耕うん軸回転速度を 201 および 264 rpm, 耕深を 0.12 および

0.1 m に設定し, その全ての組み合わせについてロータリ位置におけるトラクタ旋回半径と平均 PTO 軸トルクを計測した。本実験で供試した路面は, 深さ 0.05 m における土壌硬度が 0.31 MPa の水平な裸地で, 土壌含水比は 27.9% (d.b.) であった。

表 4 に実験結果を示す。これによると, やはり取付け角が正のとき車両は右へ旋回し, 取付け角が負のとき車両は左へ旋回する。さらに PTO 軸トルクが大きいほどロータリの旋回半径は小さくなる傾向があることが分かった。

なおロータリ取付け角が負の場合 (-0.068 rad) と正の場合 (0.096 rad) では, 1 例を除き, 他の条件が同じ全ての実験の組み合わせにおいて取付け角が負の方がロータリの旋回半径が小さかった。取付け角の絶対値はロータリ取付け角負の方が正の場合より小さい。しかしこのとき, トラクタ後車軸とロータリ耕うん軸の間の平均距離が取付け角正のときより長くなり, トラクタに作

表 4 ロータリ位置における旋回半径と PTO 軸トルク
(ロータリ付きトラクタ B, 前輪舵角: 0.0 rad, 深さ 0.05 m における土壌硬度 0.31 MPa, 水平な裸地)

車両速度 [m/s]	耕深 [m]	耕うん軸回転 速度 [rpm]	ロータリ取付 け角 [rad]	旋回半径と 旋回方向 [m]	PTO 軸トルク [N・m]
0.461	0.12	201	-0.068	61.7 左	125.4
0.461	0.12	264	-0.068	58.0 左	137.2
0.575	0.12	201	-0.068	32.4 左	147.0
0.575	0.12	264	-0.068	37.9 左	146.7
0.461	0.10	201	-0.068	70.8 左	60.1
0.461	0.10	264	-0.068	62.7 左	59.8
0.575	0.10	201	-0.068	58.2 左	55.5
0.575	0.10	264	-0.068	57.9 左	60.2
0.461	0.12	201	0.096	51.3 右	195.1
0.461	0.12	264	0.096	68.4 右	170.5
0.575	0.12	201	0.096	60.0 右	197.6
0.575	0.12	264	0.096	101.7 右	182.2
0.461	0.10	201	0.096	73.8 右	154.7
0.461	0.10	264	0.096	100.2 右	149.5
0.575	0.10	201	0.096	68.6 右	149.6
0.575	0.10	264	0.096	92.5 右	136.7

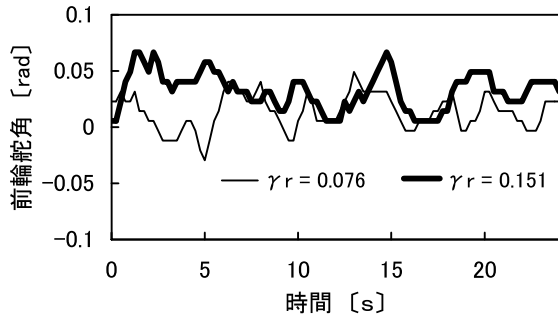


図1 直進実験における前輪舵角の変化
(ロータリ付きトラクタ A, 走行速度: 0.56 m/s, 耕うん軸回転速度: 155 rpm, 耕深: 0.12 m, γ_r : ロータリ取付け角 rad)

用するロータリの横方向力によるモーメントが大きくなるため、旋回半径が小さくなった可能性がある。ロータリ回転軸中心部の後車軸からの距離は、ロータリ取付け角が負のとき 1.41 m, ロータリ取付け角が正のとき 1.36 m であった。

2.2 直進実験

ロータリ取付け角を一定値に固定したロータリ付きトラクタ A について、石灰による白線に沿って車両が直進するように前輪の操舵を操縦者が行い、その操舵の結果、すなわち前輪舵角の変化を計測した。供試した路面は深さ 0.05 m における土壌硬度が 0.39 MPa の実験用裸地である。

本実験においては、ロータリ取付け角を 0.076 rad および 0.151 rad の 2 段階に設定した。図 1 に前輪舵角の変化の様子を示す。走行速度は 0.56 m/s, ロータリ耕うん軸回転速度は 155 rpm, 耕深は 0.12 m である。なお、供試トラクタは 4 輪駆動方式であり、また前輪舵角は、アッカーマン・ジャントー式操舵方式にも関わらず、 ± 0.087 rad の範囲であれば、左右輪とも等しいとして差し支えなかった。

図 1 のように、時間の推移により変動はあるものの、平均的には、ロータリ取付け角が増すに従い車両を直進させるために必要な前輪舵角が大きくなるのが分かる。ロータリ取付け角に対する舵角の平均値を取得データから計算したところ、それぞれ 0.0135 rad および 0.0327 rad であった。

2.3 ロータリ取付け角の操舵効果に関する考察

ロータリ取付け角の操舵効果に関する基礎実験の結果、ロータリ取付け角は定性的に 4 輪操舵車両の後輪操舵角と同様の効果を車両に及ぼすことが分かった。すなわち、ロータリ取付け角が正の

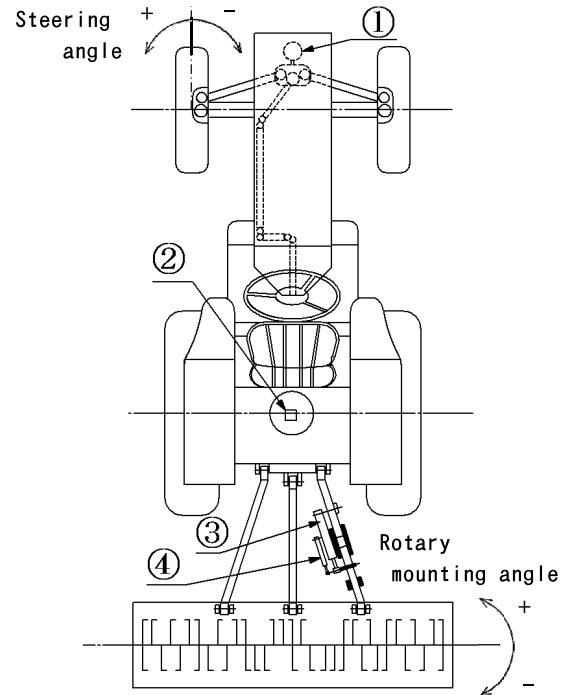


図2 直進補助制御実験車両概要
(①: 前輪舵角センサ ②: 振動型ヨーレートセンサ③: ロワリンク伸縮用油圧シリンダ ④: ストロークセンサ)

方向に増加すると車両は右旋回する方向に、また負の方向に増加すると車両は左旋回する方向に影響を受ける。

さらに、ロータリ取付け角を一定角度に固定した車両では、直進を維持するために前輪操舵角をロータリ取付け角と同じ方向に設定する必要があることが分かった。これは横変位を修正するために前輪を操舵したときに、ロータリ取付け角を同相に設定することにより、旋回動作を引き起こさずに走行する、あるいは姿勢角の変化を軽減することが可能であることを示唆している。

3. 制御実験車両および制御実験系

3.1 制御実験車両概要

本研究では、ロータリ付きトラクタ B の右ロワリンクを油圧により伸縮制御するテレスコピック構造とし、直進補助制御実験車両を構成した。

図 2 は直進補助制御実験車両の概要である。通常のロータリ付きトラクタと異なるのは、前輪舵角センサ (図 2 の①) と振動型ヨーレートセンサ (同②: M 社製 ENV-05A) を搭載し、さらに右ロワリンクを油圧シリンダ (同③) により伸縮制

御可能なテレスコピックロワリンクに変更していることである。テレスコピックロワリンクにはストロークセンサ（同④）が付加されている。

前輪舵角センサは操舵輪から連動するピットマンアームの動きを回転型ポテンシオメータを用いて計測する。テレスコピックロワリンクのストロークセンサはロワリンクの伸縮を直線型ポテンシオメータにより計測する。

車両の姿勢角は振動型ヨーレートセンサの出力を積分して計測する。温度変化によるヨーレートセンサのドリフトを避けるため、電気制御による恒温水槽を設置し、ヨーレートセンサには防水処理を施して水槽内に浸潤させ、温度を $30 \pm 1^\circ\text{C}$ に設定して実験を行った。

3.2 制御実験系概要

図3に直進補助制御実験系の概要を示す。本制御実験系は16ビット12MHz車載コンピュータを中心とするシステムで、1秒間に50回の制御を行なう。

前輪舵角センサ、ヨーレートセンサおよびストロークセンサによるアナログ値はA/D変換器により500Hzの周波数でコンピュータに取り込まれるが、10個の値を平均して一回の制御動作のフィードバック値として用いる。

振動型ヨーレートセンサは出力に高周波成分が混入しているので、A/D変換器の直前にローパスフィルタを配置した。また本研究で使用したヨーレートセンサ個体は、トラクタ停止時（エンジンはアイドリング）に計測した60秒間の積分誤差が $\pm 0.0025 \text{ rad}$ ($\pm 0.15 \text{ deg}$) 以内であり、誤差としてはほとんど無視できるレベルであったが、センサの近くの支持体を加振器で振動させると4倍程度の積分誤差が発生した。そこで、トラクタへの搭載に当たってインシュレータなどで防振処置を施した結果、60秒間のトラクタ走行実

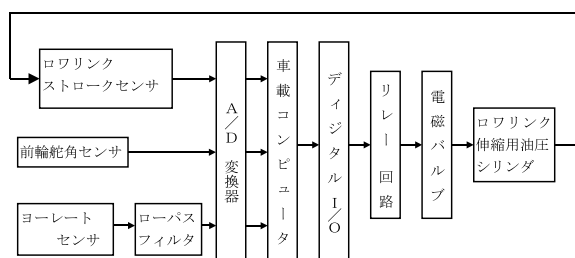


図3 直進補助制御系概要

験中における積分誤差を $\pm 0.008 \text{ rad}$ ($\pm 0.45 \text{ deg}$) 以内に押さえることができるようになった。

なおテレスコピックロワリンクは4ポート3位置切換電磁弁によりON/OFF制御される油圧シリンダによって伸縮され、この電磁弁はリレー回路を介してデジタルI/O出力により制御される。油圧シリンダを駆動する油圧は、トラクタ3点リンクヒッチ昇降用油圧ポンプによる油圧を、優先流量調整弁により分流して得る。上記電磁弁の開閉タイミングは、ストロークセンサの出力をフィードバックしてPID制御する。

3.3 制御理論

本研究では通常の2輪操舵車両の直進補助を目的とし、自動制御される要素はロータリの取付け角 γ_r のみであるが、前輪の舵角 γ_f は操縦者により直接制御されているものとする。本制御実験系は、ロータリ作業中にあらかじめ決められた方向に車両が直進している状態で、車両の姿勢角の変化を自動的に抑制することを目的とするが、結果的に車両の姿勢角が変化して操縦者の視線の方向が乱されることを防ぐことができる。その結果、操縦者は極力横変位の修正に専念して操舵を行なうことができるようになると思われる。

このような目的でロータリ取付け角を自動制御するため、本制御実験系では、操縦者による横変位修正量の指示手段として前輪舵角 γ_f の計測値 γ_{fM} を、また決められた姿勢角からの偏差を検出する手段としてヨーレートセンサによる姿勢角の計測値 ϕ_M を入力する。これに対し、ロータリ取付け角 γ_r の制御規則を、

$$\gamma_{rR} = k_{ry} \gamma_{fM} - k_{rp} u_{\phi} (-\phi_M) \quad (1)$$

とすることによりロータリ取付け角は、操縦者により指示された横変位修正量と同相に、また計測された姿勢角の偏差と逆相に制御される。ここで、 γ_{rR} はロータリ取付け角 γ_r を制御する油圧シリンダの制御参照値、 $-\phi_M$ は本制御実験系の目標値である姿勢角 0.0 rad からの偏差を表す。更に $u_{\phi} (-\phi_M)$ は、上記姿勢角の偏差を入力とし姿勢角制御量を出力するPI調節関数である。

また、式(1)は上記横変位修正量 γ_{fM} と姿勢角制御量 $u_{\phi} (-\phi_M)$ の線形結合とみなされるが、 k_{ry} および $-k_{rp}$ はそれぞれ横変位修正量および姿勢角制御量に関する寄与率を規定する係数と考えられる

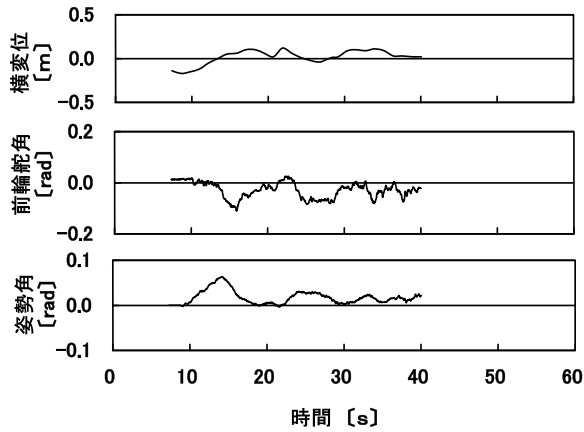


図4 無制御走行実験

(走行速度：1.15 m/s, 耕深：0.1 m, 耕うん軸回転速度：264 rpm)

ので、ここでは以後 k_{ry} および k_{rp} をそれぞれ横変位係数および姿勢角係数と呼ぶことにする。

本制御実験系では、積極的に横変位を変更するときには式(1)の操舵量 γ_M と同相に、また走行中の微小な姿勢角の変化に対しては式(1)の姿勢角の偏差 $-\phi_M$ と逆相に、いずれも姿勢角の変化を抑制しつつ、操縦者が極力横変位の修正に専念して操縦するシステムを目指した。

なお、予備的な走行実験の結果、制御をスムーズなものとするために、式(1)の γ_M を計算するに当たり、前輪舵角に対し ± 0.0436 rad の不感帯を設けることとした。

4. 走行実験

以下に示すように直進走行実験と車線乗替え実験を行った。いずれの実験もロータリ付きトラクタ B を供試し、エンジン回転速度を定格回転数、走行速度を 1.15 m/s, 耕深を 0.1 m, ロータリ耕うん軸回転速度を 264 rpm に設定した。また本実験では、走行する直前に 2 秒間静止して計測した方向を姿勢角 0.0 rad とした。なお、本実験における供試路面は水平な実験用裸地で、土壌硬度は 0.47 MPa, 土壌含水比は 16.6% (d.b.) である。

走行実験ではトラクタはあらかじめ路面に引かれている石灰による白線に沿って走行するように操舵する。後述の実験結果の図における横変位は、ロータリ耕幅の右端位置を時刻ごとに人手により定位し、実験終了後、上記白線と平行に引かれた基準直線からの距離を測定して記録したものであ

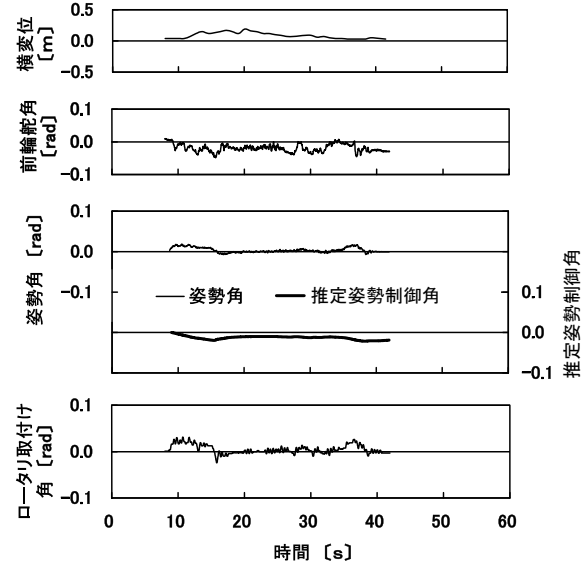


図5 直進補助制御実験(1)

(実験モード：直進走行実験, 走行速度：1.15 m/s, 耕深：0.1 m, 耕うん軸回転速度：264 rpm, k_{ry} ：1000, k_{rp} ：300)

る。

4.1 直進走行実験

図4は、制御実験系を動作させずに行った、未熟練操縦者の直進ロータリ作業の様子である。本実験では計測開始後約9秒まで静止し、ヨーレートセンサによる姿勢角の変動の有無を記録した後、走行を開始し、その後30秒間の直進走行の後に再び静止した。走行開始時、初期の前輪舵角が正の値でありまた横変位も目標に比べ負の値をとっていたため、操縦者は5秒間程度正の前輪舵角を維持した。その結果、横変位が0 m となり姿勢角も増大したため、計測開始後14秒から前輪舵角の修正により姿勢角を減少させ横変位の増加を収束させようとする。しかし同20秒以後、操縦者による操舵動作が行き過ぎたため、再び姿勢角が増加する兆候を見せ、減衰しながらではあるが姿勢角が0 rad の周りを振動する傾向にあることが分かる。

次に、図5は直進補助制御実験系を動作させたときの直進走行実験の様子である。図4の例と同様に計測開始後約9秒まで静止し、その後約35秒間の直進走行の後に再び静止した。走行開始時、若干姿勢角が増加し始めるが、直後にロータリ取付け角が正の側に動作しその結果車体の姿勢が右に補正され、姿勢角が大きく増大することはない。前輪舵角もほとんど操作されることなく、

その後の姿勢角の乱れに対してもロータリ取付け角が姿勢角を自動補正し、結果的に横変位の変動も図4に比較して小さい。

このように定性的にはロータリ取付け角による姿勢角の補助制御が有効であることが裏付けられる。しかし、ロータリ取付け角の制御が実際にどの程度の補助制御を行ったのか実測値により評価することは容易でない。そこで本研究では、次式により、ロータリ取付け角 γ_r により車両に及ぼされた姿勢角の変化 $\rho(t)$ を推定することとした。

$$\rho(t) = \int_0^t \omega(t) dt \quad (2)$$

本研究ではこれを推定姿勢制御角と名付ける。ただし、 $\omega(t)$ はロータリ取付け角のみによって車両の姿勢角が変化するときの角速度であり、走行開始時を 0 s とする時刻 t におけるロータリ取付け角 $\gamma_r(t)$ が正のとき、

$$\omega(t) = \frac{V}{R_R} \frac{\gamma_r(t)}{\gamma_{r\max}} \quad (3)$$

と表せる。ここで V および R_R はそれぞれトラクタの走行速度および最大ロータリ取付け角 $\gamma_{r\max}$ における最小旋回半径（右回り）であり、本節では表3よりそれぞれ 1.15 m/s および 69.3 m の数値を用いる。これはロータリ取付け角が最大のときのトラクタ姿勢角の角速度 V/R_R から、時刻 t におけるロータリ取付け角による角速度を比例演算により推定したもので、前輪舵角を 0.0 rad としたときに $\gamma_r(t)$ のみによって発生する旋回動作の角速度を、前輪舵角がその他の値のときにも援用した推定式である。

同様に $\gamma_r(t)$ が負のときは、

$$\omega(t) = \frac{V}{R_L} \frac{\gamma_r(t)}{\gamma_{r\min}} \quad (4)$$

とする。ここで R_L は最小ロータリ取付け角 $\gamma_{r\min}$ による最小旋回半径（左回り）であり、本節では表3より 45.3 m を用いる。ここで、最大ロータリ取付け $\gamma_{r\max}$ 角および最小ロータリ取付け角 $\gamma_{r\min}$ の実測値はそれぞれ 0.096 rad および -0.068 rad である。

なお、本研究ではロータリの旋回半径とはロータリ中央位置の旋回半径を指すが、車両の旋回に伴うこの部分の角速度は車両のものと同一とし、ロータリ取付け角の制御に伴う微小な角速度については無視する。

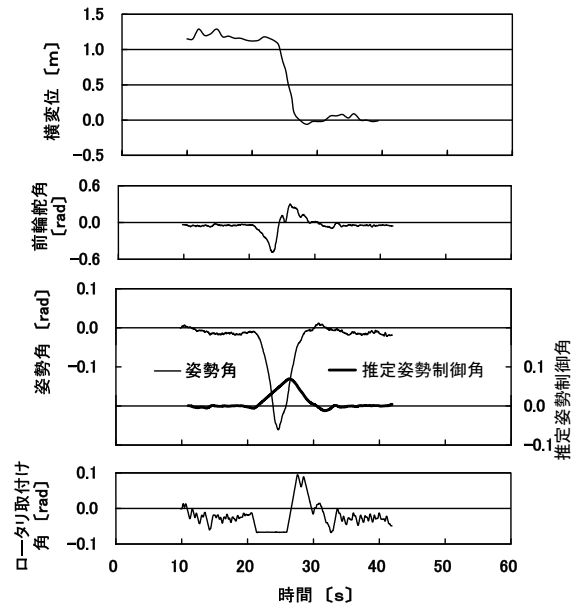


図6 直進補助制御実験 (2)

(実験モード：車線乗り替え実験，走行速度：1.15 m/s，耕深：0.1 m，耕うん軸回転速度：264 rpm， k_D ：1000， k_P ：300)

図5における推定姿勢制御角は、制御実験系の動作のみによって車両に与えられた姿勢角の推定値であるが、図中の曲線は、式(2)に同図のロータリ取付け角 $\gamma_r(t)$ の推移を適用した結果である。計算には走行速度 V を用いるため、実際に走行した区間のみで有効である。図5では走行開始直後、推定姿勢制御角は計測された正の姿勢角に対して負の側に暫増し、少し値を戻した後また負の側に暫増して停止する。単純に考えれば、ロータリ取付け角が制御されていないければ、推定姿勢制御角と大きさが等しく方向が逆の角度が、図の姿勢角のグラフに付加されるものと考えられる。

このような仮定の下で、図5における姿勢角の変動の大きさは、ロータリ取付け角の制御によりおよそ 50 % 程度軽減されていると考えることができる。

4.2 車線乗替え実験

制御実験系を動作させて車線乗換実験を行った。本実験では、1m 離して平行に引かれている2本の石灰による白線のうち、進行方向に向かって左側の白線に沿ってロータリ耕うんしながら直進中に右側の白線に向けて操舵し、車線を乗替える。

図6に実験結果の一例を示す。本実験では計測開始後 10 秒にて走行を開始し、その後 10 秒の時

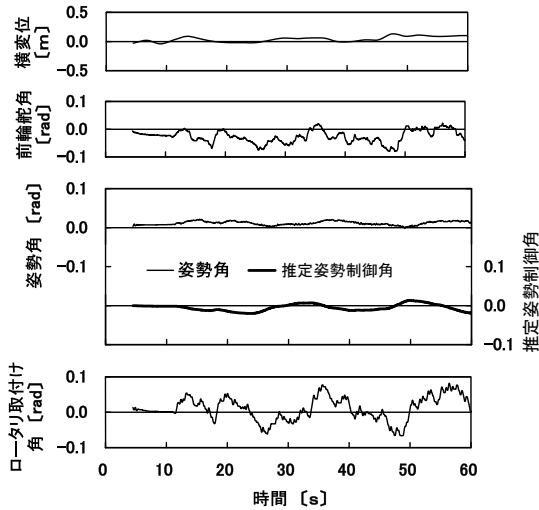


図7 直進補助制御実験 (3)

(実験モード：, 直進走行実験走行速度：0.46 m/s, 耕深：0.12 m, 耕うん軸回転速度：264 rpm, k_{ry} : 650, k_{rp} : 650)

点で操縦者は車線を変更するために操舵輪を右に切り、最短と考えられる方法で右の車線に乗替える動作を行なう。

操舵の結果、姿勢角はほぼ即座に、またロータリ耕幅右側位置 (図の横変位) は若干反対方向への揺り返しの後に追従しはじめ、その後およそ10秒で車線乗替え動作が完了する。その間、操舵角が負の区間ではロータリ取付け角は最小値に張り付き、更に操舵角が正となった区間ではロータリ取付け角はほぼ最大値となるまで増加する。

このように操舵量が大きい場合、式(1)によるロータリ取付け角の制御量は主に操舵量の大きさに支配される。その結果、計算されたロータリ取付け角 $\gamma_{rR}(t)$ はトラクタの姿勢角に対し図中の推定姿勢制御角に示されるような影響を与える。これによると、ロータリ取付け角が当初最小値に張り付いたため推定姿勢制御角は直線的に増加し、最大値で姿勢角をおよそ 0.08 rad 補正したことになる。計測された乗替え中の姿勢角の最大変動幅がおおよそ 0.26 rad であり、両者のピーク時刻は若干ずれているものの、ピーク値で約 30% の姿勢角の補助制御が行なわれていたことが推定される。

5. 考 察

上記実験で示したように、構成した直進補助制御実験系はトラクタの姿勢角を数十パーセント補

助制御する効果が得られ、所期の目的、すなわち姿勢角の変化を抑制することが可能となったものと考えられる。実車両に振動型ヨーレートセンサを搭載するとなると、その初期値の設定手順やドリフトなどの問題が解決される必要があるが、これらの問題が改善されたり、他の姿勢角検出手段が整備された後には、本研究の方式により姿勢角従って操縦者の視線方向の変化を軽減させる意味における直進補助制御が可能となり、未熟練操縦者であったとしてもロータリ耕うん作業の直進精度を向上させることができるものと思われる。

ただし、実際の圃場では、路面の凹凸や傾斜、走行抵抗のアンバランスなどによる影響も考えられるので、今後はそれらの要因を加味した実験も行う必要がある。

なお本研究においては、ロータリ取付け角 γ_r の制御規則である式(1)を構成する横変位係数 k_{ry} および姿勢角係数 k_{rp} は、予備実験における試行の過程で決定した値、すなわち $k_{ry} = 1000$ および $k_{rp} = 300$ を用いている。本実験系を実際のトラクタに应用する場合、これらの値の最適化を図る必要がある。

また前述したように、テレスコピックロワリンク伸縮制御実験系への前輪舵角入力に比較的大きな不感帯を設けている。その結果現状のパラメータでは、均一の畑地でしかもトラクタの速度が比較的遅い範囲において、ロータリ取付け角を前輪舵角と同相に動作させる制御の機会がほとんど無いことが分かった。 k_{ry} および k_{rp} を改善することによって必要な不感帯幅を圧縮し、さらに低速な作業でも有効な制御が得られるような制御系を目指すことが望まれる。

図7は、走行速度 0.45 m/s, 耕深 0.12 m における直進補助制御実験の結果であるが、前述の走行実験より低速であるにもかかわらず、 k_{rp} の値が 650 と大きく、また前輪舵角入力に不感帯を設けなかったため、実際に計測された姿勢角より推定姿勢制御角の変動の方が大きくなっている。この場合、操縦者はむしろ前輪舵角を頻繁に操作して姿勢角の変動を防ぐ動作を行なっている。このような実験と考察は、 k_{ry} や k_{rp} を改善するために有効な予備実験となりうる。例えばこのような実験により前輪舵角をほとんど操作せずに姿勢角が補助制御される条件を見出し、さらに横変位操作に

対する必要な操舵にも感知する不感帯幅を見出せばよいものと考えられる。

なお実用面からは、トラクタ姿勢角の設定値からの逸脱を警告したり、直進補助制御の効果を操縦者に積極的に通知することも有効であると考えられる。さらに現在のトラクタの姿勢角が当初の目標方向とどれだけ異なるのか、モニタや音・光で操縦者に知らせるようにすると、操縦者は安心して横変位の修正のみに専念して操縦できる。

また、本研究で提案したような方法でロータリ取付け角を制御し、トラクタの姿勢角を変化させようとする場合、耕うん爪を含むロータリ耕うん装置にどのような負荷を与えるのか、また逆に、このような制御により、耕うんされる側の土の状況、すなわち均一性、碎土性や反転性への影響がどのようなものか、今後研究を進める必要がある。

要 約

本研究では、ロータリ耕うん作業においてトラクタの直進性を改善するために、ロータリのトラクタへの取付け角（ヨー角：以下「ロータリの取付け角」）を自動制御する直進補助制御系を構成することを将来の目的とし、これに関連するいくつかの基礎実験および考察を行った。

まず、ロータリの取付け角を大きく採ることにより、トラクタが旋回運動をすることを確認する実験を行った。次にトラクタの旋回に対し、ロータリの取付け角がどの程度影響するのかを調べるために、ロータリの取付け角を固定した状態で直進するように操舵して走行実験を行い、そのときの前輪舵角を計測した。

さらに、トラクタに振動型ヨーレートセンサとテレスコピックロワリンクを搭載し、トラクタのヨー姿勢角の変化を抑制するようにロータリ取付け角の制御を試みる直進補助制御実験系を構成し、実験を行った。また、予備実験により得られたロータリ取付け角によるトラクタの旋回特性から、走行実験における直進補助制御実験系の制御効果を推定する手法も提案した。

参考文献

- 1) JSAM: Agricultural Machinery Handbook New Edition, Corona Publishing Co., Tokyo, p.433-434 (1984)
- 2) Kawamura, N., T. Fujiura: Automatic Control of Rotary Tilling Tractor (II) – Automatic Control of Traveling Speed and Tilling Depth by Detecting Tilling Reaction Force –, Journal of JSAM, **41**(3), 397-403 (1979)
- 3) Jiang, Y., N. Honami, S. Umwda: Microcomputer Control System for Tractor Implements (Part1) – Constitution of Programable Control System for Three-point Linkage by Electro-hydraulic Method –, Journal of JSAM, **54**(3), 5-13 (1992)
- 4) Motobayashi, K.: Tractor-Implement control and communication data network based on CAN, Journal of JSAM, **63**(4), 17-22 (2001)
- 5) JAMA (Japan Agricultural Mechanization Association): Summary of the Fatal Accidents Concerning Farm Work in 2000 (in Japanese), Public Information for Agricultural Mechanization, **382**, 7-9 (2002)
- 6) JAMA (Japan Agricultural Mechanization Association): Survey on the Consciousness about Safe Farm Work (in Japanese), Public Information for Agricultural Mechanization, **355**, 2-6 (1999)
- 7) Nonami, K., M. Komatsu, H. Higuchi, S. Nakao, K. Adachi: Studies on Automatic Traveling Control of Riding-type Rice Transplanter (Part2) – Development of Automatic Control System for Straight Driving –, Journal of JSAM, **56**(3), 77-84 (1994)
- 8) Masuda, Y.: Development of Auto-steering System for Straight Operation, Journal of JSAM, **64**(5), 30-31 (2002)
- 9) Sato, K., H. Miyamoto, N. Inoue, M. Hoki, M. Nakazawa: A Study on the Active Control of Four-wheel Steering Vehicles (Part1) – Measurement of the Characteristics of the Independent Control for Transverse Displacement and Attitude Angle –, Journal of JSAM, **65**(4), 139-147 (2003)