

研究論文

# 大規模畑作地帯におけるトラクタ作業機の うね合わせ作業の現状

申 宝明\*・佐藤禎稔\*・今村城久\*\*・弘中和憲\*・岸本 正\*

\* 帯広畜産大学, 畜産学部

\*\* 岩手大学大学院連合農学研究科 (帯広畜産大学)

Present Situation of Tractor Implement Row-following Operation  
in Large-scale Upland Farming

Baoming SHEN\*, Tadatoshi SATOW\*, Kunihisa IMAMURA\*\*,

Kazunori HIRONAKA\* and Tadashi KISHIMOTO\*

\* Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine

\*\* The United Graduate School of Agriculture Science, Iwate University

(Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine)

## 1. 緒言

北海道十勝地方の大規模畑作地帯では、農家1戸あたりの平均耕地面積は、平成19年に38haと全国平均の約22倍の規模である(十勝の農業2007)。このため、大規模畑作経営では、大型機械化農業が展開され、日本有数の食料基地として重要な地位を占めている(飯澤2006)。一方、後継者が不足しているにもかかわらず、地域の担い手に経営が集中している。そのため、経営規模は拡大し、労働力不足が問題となり、農業従事者の労力負担が増大しつつある。さらに、農業機械の大型化や高速化に伴い、トラクタ作業機を作物列のうねに正確に合わせる運転操作が次第に困難になりつつあり、労力負担と共に農業従事者の疲労に拍車をかけている。

近年は減農薬や持続的循環型農業を実現するために機械的な除草が行われるようになった。その除草作業の前段階の播種・移植作業はうね合わせ

作業の基礎となり、適正にうね間を保たないとその後のトラクタ作業に悪影響を及ぼす。具体的には、通常の播種機や移植機は2畦または4畦用が利用され、その後の中耕・除草作業は4畦用のカルチベータや株間除草機などが利用されている。したがって、播種・移植機の隣接行程のうね間が大きく変化すると、その後の中耕除草機の除草刃などが作物に接触してしまい、作物に致命的な損傷を与え、収量に大きな影響を及ぼす。

また、一般にトラクタ作業機は、トラクタ後方の3点リンクヒッチに装着されているので、作業者は時々体をねじった姿勢で後方を振り返りながらの長時間労働となるため、作業員への肉体疲労が問題となる。

このような問題を解決するために、農作業の軽量化や自動化に対する要望が高まっている。近年画像処理技術(岡本ら1999)やレーザーセンサを利用したトラクタ作業機のうね合わせのための作物列センサ(佐藤ら2004)に関する研究が行われるようになった。筆者らもレーザー式作物列センサによるトラクタ作業機のうね自動追従システムの開発研究を実施している(Shen *et al.* 2008)。このようなシステムを開発する際、実際の畑作におけるトラクタ作業の作業状態やうね合わせ精度などを把握することは極めて重要である。

平成21年10月1日受付

平成22年1月27日受理

Corresponding author

佐藤 禎稔 Tadatoshi SATOW

〒080-8555 北海道帯広市稲田町西2線11番地

Nishi 2-11, Inada-cyo, Obihiro, Hokkaido 080-8555, Japan

E-mail : fmsatow@obihiro.ac.jp

そこで本研究は、トラクタ作業機のうね自動追従システムを開発するための基礎資料を得るために、畑作でのトラクタ作業（以後、作業者と称する）の作業状態やうね合わせの作業精度の実態を調査分析し、さらに、自動追従システムに要求される制御速度などを明らかにすることを目的とした。

## 2. 調査圃場および方法

トラクタによるうね合わせ作業は、播種・移植作業と中耕除草作業および収穫作業に大別されるが、ここでは播種・移植作業と中耕除草作業を取り上げた。播種・移植時のうね合わせ作業は図1に示すように、トラクタの往復作業時の隣接行程のうね間を一定に保つ作業である。一方、中耕除草時のうね合わせ作業は生育している作物の条間

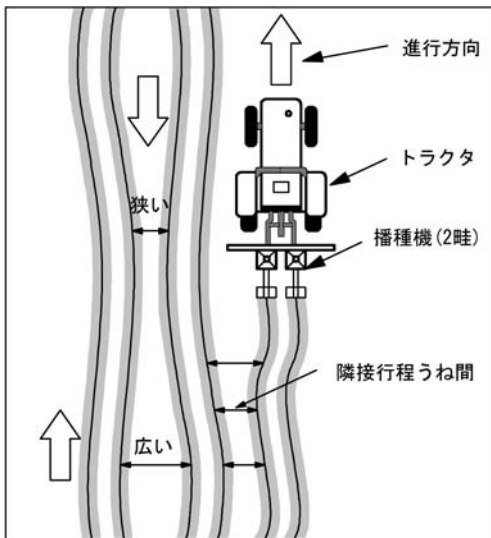


図1 播種・移植作業のうね合わせの模式図

の中心にカルチベータなどの除草刃を正確に通過させ、作業機の除草刃が作物に損傷を与えないようにうね合わせする作業である。

### 1) 調査対象農家

調査対象農家は、大型畑作農業が展開されている帯広市近郊の5農場であり、農場A、B、C、D、Eと称する。農場A、B、Cでは、播種・移植時のうね合わせ作業の実態を調査し、農場Dと農場Eでは、中耕除草作業時のうね合わせ作業の調査を実施した。調査した圃場の栽培作物、供試作業機などの圃場条件を表1に示す。

### 2) 調査項目

#### (1) トラクタ作業者の作業状態

作業者は図2に示すように、播種・移植作業の場合、常に前方を向いた姿勢で作業しているわけではない。うね間を均一に保つために、播種機や移植機で用いられるうね合わせ用のラインマークで土壌表面に描いた跡に前輪を合わせるようにハンドルを操作し、また後方の作業機の作業状態を



図2 トラクタ作業者の運転姿勢

表1 各農場の作業条件

農場名	農場 A	農場 B	農場 C	農場 D	農場 E
調査日	5月11日	6月1日	5月8日	5月28日	7月11日
作物名	パレイシヨ	菜豆	テンサイ	テンサイ	小豆
経営規模 [ha]	18	20	38	27	35
就農年数 [年] (年齢)	39 (58)	30 (60)	29 (50)	2 (26)	16 (38)
作業内容	播種	播種	移植	中耕除草	中耕除草
供試作業機	ポテトプランタ 十勝農機 PALH-4R	総合施肥播種機 田端農機 TEB-4WR	ビート移植機 サークル鉄工 BST-2	カルチベータ 日農機製工 NCK-5	株間除草機 日農機製工 NAK-5
トラクタ	クボタ M7970	Ford 3000	Massey Ferguson MF165	International 444	Ford 3000

確認したりしている。中耕除草作業の場合、作業者はカルチベータを正確にうね間中心を通過させるために、しばしば後方確認をしたり、またトラクタの前輪が作物を踏まないように、前方確認するなど、常に腰をひねっている状態で作業を行っている。

作業者の作業姿勢の状態を明らかにするために、ビデオカメラを圃場に設置し、トラクタの後方から各圃場の作業の様子を撮影した。その後、撮影したビデオテープを再生し、ストップウォッチを用い、作業者がうね合わせのために行った前方確認と後方確認の時間とその頻度を測定し、作業姿勢の状態を解析した。

### (2) うね合わせの作業精度

図1に示したように、播種・移植機で往復作業の隣接行程のうね間は変動する。そこで、そのうね間の変動はトラクタの進行方向に対して0.1 m 間隔に約 50 m 間を実測した。

中耕除草作業時のうね合わせの作業精度の調査は、カルチベータや株間除草機による作業が終了した直後に除草刃などが土壌表面に作用した痕跡を利用して行った。具体的には図3に示すように、その痕跡と作物列との水平距離を進行方向に対して1 m 間隔に50 m 間定規で実測し、除草刃がうね間の中心に対して左右に変動した軌跡を求めた。除草刃の軌跡は、進行方向に対してうね間中心の左側に位置する場合を正の値とした。また、各農場とも進行距離10 m ごとに作業機が作用した土表面の痕跡の幅を測定し、除草機によって処理された除草範囲を求めた。

### (3) うね自動追従システムに要求される制御速度

緒言で述べた筆者らが開発するうね自動追従システムは、図4に示すように、レーザ式作物列センサ、コンピュータ、電磁比例方向流量制御弁、油圧シリンダなどで構成される。作業機が作物列からずれた場合、その誤差を作物列センサによって検出し、作業機は油圧シリンダによって適切な位置に左右に制御される。

トラクタ作業機のうね自動追従システムを開発する際、作業機をうねの中心に速やかに制御するための油圧シリンダの動作速度を把握することは重要である。そのため、以下のような方法で解析を行った。

まず、播種・移植作業の場合、農場 A, B, C での調査結果からうね間変動の周期性を分析する。

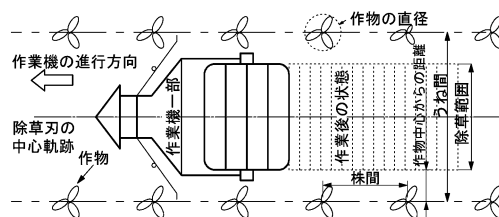


図3 中耕除草作業の作業精度の測定方法

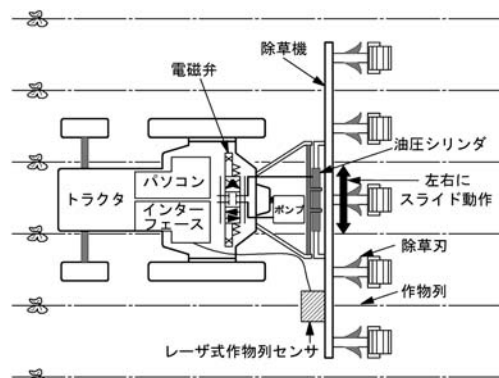


図4 うね自動追従システムの概要

その方法として、作業軌跡のランダム波形からパワースペクトル密度 (Power Spectrum Density, 以後 PSD と称する) を算出し、うね間変動の周波数特性を明らかにする手法を採用した (近江谷 1986)。PSD とは、単位距離当たりの振動波形の平均エネルギーを表す (安居ら 1981)。なお、PSD の計算は Microsoft Excel のアドインである分析ツールのフーリエ解析 (FFT) を利用した。

つぎに、中耕除草作業の場合、作業速度を 1 m/s に設定し、農場 D, E での調査結果から除草刃の変動を進行方向に対して 1 m ごとにその前後データの差分を求め、作業機を左右に移動させるための制御速度を算出した。

## 3. 結果および考察

### 1) 作業者の作業状態

各農場での作業別トラクタ後方確認時間割合と後方確認時間間隔および1回当たりの確認時間の調査結果を図5に示す。なお、後方確認時間割合とは後方確認時間を実作業時間で除したものである。

農場 A のバレイショの播種作業では、全自動

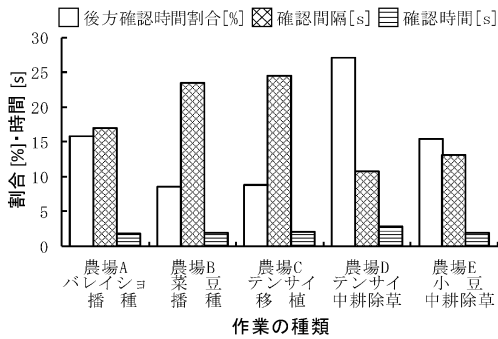


図5 各農場のトラクタ作業者の作業状態

型ポテトプランタで種イモを機械的に切断する状態や種イモの残量、植付状態などを確認するため、作業による後方確認時間割合は他の作物に比べて多く、後方確認時間割合は15.9%であった。一方、農場Bの菜豆の播種作業と農場Cのテンサイの移植作業は、種子や苗の形状がほぼ揃っているため、農業機械にトラブルが発生しない限り順調に進行する。そのため、作業者は次のうね間を均一に保つように、トラクタのハンドル操作を慎重に行い、片方の前輪をうね合わせ用のラインマーカ跡に合わせることに集中して作業している。また、作業者は時折、肥料の繰出し状況や苗の植付状態を確認していたが、その後方確認時間割合は10%以下であった。また、確認間隔は24.5秒であり、1回当たりの継続時間は2.2秒であった。

中耕除草作業の後方確認時間割合は、農場Dのテンサイ圃場で27.2%、農場Eの小豆圃場で15.5%となり、前述の播種・移植作業より作業者の後方確認時間割合が高くなった。その要因として、カルチベータや株間除草機の除草刃は、生育している作物のうね間の中心を正確に通過させることが求められるためである。作業機は進行方向に対して左右に大きく変動すると作物に損傷を与え、その後の生育に影響を及ぼしてしまうことから、作業者は除草刃を隣接する作物列の中央を通過させるように、常に後方の作業機と作物列の位置関係に細心の注意を払うため、後方確認時間割合が高くなったものと考えられる。また、両作業とも作業者は、残りの時間はトラクタの前方を向いて作業をしており、その割合はそれぞれ農場Dが62.9%、農場Eが73.5%であった。農場Dの中耕除草作業の後方確認間隔は10.8秒であったことから、中

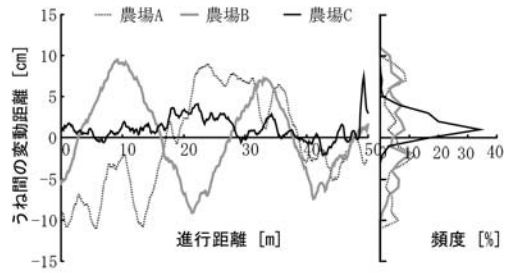


図6 播種・移植作業時のうね間の変動とその度数分布

耕除草作業では短い間隔で後方を確認していることが判明した。

以上のように、いずれの作業においても、作業者はただ漠然と前を見て作業しているわけではなく、片手でハンドルを握り、もう片方の腕をトラクタの後輪フェンダに載せて、体を斜めにした姿勢で運転してうね合わせ作業を行っている。

## 2) 各農場のうね合わせ精度

### (1) 播種・移植作業

図6は播種・移植作業時のうね間の変動とその度数分布を示す。横軸は進行距離と頻度を表し、縦軸はうね間の変動距離を示す。この変動距離は、往復作業の隣接行程のうね間が農場ごとに設定したうね間に対する変動軌跡を表す。なお、表2は各農場の作業精度を示す。

農場Aではうね間が大きく変動していることにより、作業後のうね間は設定うね間の75cmに対して進行距離22mの地点で最大9.0cmに広がり、また7mの地点で最小の11.5cm狭くなった。農場Bでも同様の傾向が見られ、設定うね間の66cmに対し、9.5cmの拡大から9.0cmの縮小でうね間が変動していた。農場Cの移植作業でのうね間の変動幅は、全体的に見ると10cm以内であった。なお、この場合、設定うね間が66cmであるのに対し、作業後の隣接行程のうね間の最大変動は、進行距離49m付近で7.5cmであり、その場所でのうね間は73.5cmとなる。しかし、農場Cのうね間変動の標準偏差は1.4cmであるため、ほぼ良好なうね合わせ作業であったと言える。

浜田らの報告によると、カルチベータの除草刃が左右に5cm以上変動すると作物に損傷を与えてしまう可能性を指摘している(浜田ら2001)。



表 2 各農場の作業精度

農場名	農場 A	農場 B	農場 C	農場 D	農場 E
作業名	バレイショ 播種	菜豆 播種	テンサイ 移植	テンサイ 中耕除草	小豆 中耕除草
設定うね間 [cm]	75.0	66.0	66.0	60.0	60.0
平均うね間 [cm]	75.1	64.3	65.1	61.7	60.1
草高 [cm]	—	—	3.0	6.0	7.0
平均株間 [cm]	26.6	20.3	21.6	22.4	21.5
作業速度 [m/s]	0.8	1.0	0.9	0.7	0.9
最大変動 [cm]	11.5	9.5	7.5	8.2	7.2
平均 [cm]	5.1	4.3	1.4	3.2	3.1
標準偏差 [cm]	5.8	5.0	1.4	3.8	3.5
変動係数 [%]	56.2	52.2	42.9	65.1	53.3

そのため、うね間の変動距離の度数分布を求めた。図 6 の右側に表したように、隣接行程のうね間が設定うね間より±5 cm 以上変動した割合は、農場 C が 1% と少なかったのに対し、農場 A と B ではそれぞれ、28, 34% であり、その後の中耕除草作業に影響を及ぼすことが十分に予想された。

(2) 中耕除草作業の場合

図 7 は農場 D と農場 E での中耕除草時のうね合わせの作業精度を測定した結果とその変動の度数分布を示す。横軸は作業機の進行距離と頻度を示し、縦軸はうね間の中心位置を基準としたトラクタの進行方向に対する除草刃中心の左右の変動軌跡とその変動位置を 1 cm ごとに区切り、その出現頻度を表す。

農場 D のテンサイの中耕除草作業では、進行距離 20 m までは除草刃の作用位置は左側に偏っていたが、30 m 以降では右側に偏って進行した。進行距離 16 m と 31~46 m の地点では、除草刃の大きな変動が見られ、その地点での変動はうね間の中心から 5 cm を超えていた。最大変動は 16 m の地点で 8.2 cm であり、作物に機械的な損傷を与えたことが観察された。図 3 を参考に式 (1) を用いて作物に損傷を与えないための除草刃のうね間中心からの許容移動範囲を推定した。最大変動が起きた地点のうね間は 59.2 cm であり、カルチベータの除草範囲が 36.4 cm、またテンサイの株を真上から見たときの作物の直径が 9.0 cm であったことから、除草刃の許容移動範囲は±6.9 cm となる。そのため、この地点では、除草刃の変動が許容移動範囲よりも大きくなり、作物に損傷を与える状態になったと考えられる。

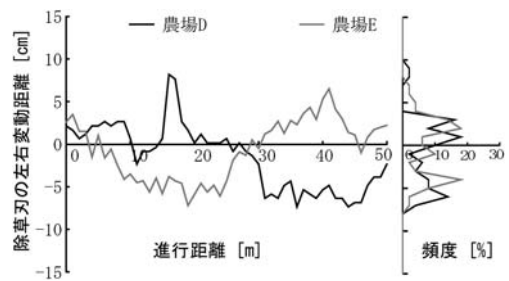


図 7 中耕除草作業時の除草刃の軌跡とその度数分布

$$\text{除草刃の許容移動範囲[cm]} = \pm \frac{\text{うね間[cm]} - \text{除草範囲[cm]} - \text{作物の直径[cm]}}{2} \quad (1)$$

つぎに、小豆の農場 E では、除草刃は-7.2~6.5 cm の範囲で大きく変動し、進行距離 19 m の地点で最大 7.2 cm の変動があった。しかし、その地点のうね間が 60.1 cm、平均除草範囲が 32.8 cm、小豆の作物の直径が 7.6 cm であったことから、作物に損傷を与えないための除草刃の許容移動範囲は±9.9 cm となるため、除草刃が作物に損傷を与えなかったと考えられる。しかし、株間の雑草を処理するために株間除草機に取り付けられている除草タインが大きく変動したことによって、それが作物に強く接触し、小豆を引き抜いてしまったことが観察された。

2) うね自動追従システムに要求される制御速度  
(1) 播種・移植作業

図 8 はうね間変動の周波数特性を示す。横軸は周波数、すなわち進行距離 1 m 当たりの左右変動

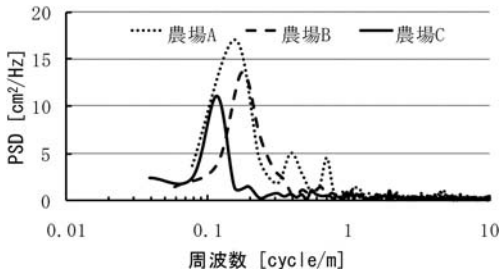


図8 各農場のうね間変動の周波数特性

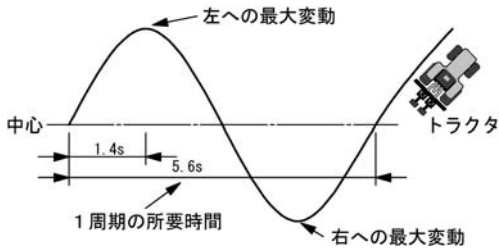


図9 トラクタの正弦波状の蛇行とうね間変動の周期性の関係

の周期を示し、縦軸は PSD を表す。農場 A, B, C の PSD には図のように大きなピークが見られ、それぞれ、0.16, 0.18, 0.12 cycle/m の周期的な変動が存在することが明らかとなった。ここで、農場 B でうね間変動の周期性が 0.18 cycle/m の場合について、図 9 で説明する。農場 B のトラクタの作業速度を 1 m/s とし、進行方向に対して正弦波状に 0.18 cycle/m でトラクタが左右に蛇行したと仮定すると、その 1 周期の所要時間は 5.6 秒となり、変動の中心から最大または最小までの時間は 1.4 秒となる。そこで、0.1 m 間隔の元のデータを 1.4 秒 (14 個) 間隔のデータとし、今回の調査結果から進行方向に対して 1.4 m ごとにうね間変動のデータを読み出し、その偏差すなわち差分を算出した。その結果、差分の最大値は 3.9 cm であった。したがって、式 (2) に示すように、播種機などの作業機を左右に移動させるための制御速度は 2.8 cm/s となる。なお、農場 A と C の制御速度はそれぞれ 3.3, 1.4 cm/s である。ここで、トラクタ作業の高速化を考慮し、作業速度を 2 m/s に設定すると、作業機を進行方向に対して左右に追従させる制御速度は農場 A で最大 6.6 cm/s 必要になることが推察された。

$$\text{制御速度 [cm/s]} = \frac{\text{差分の最大 [cm]}}{\text{制御時間 [s]}} = \frac{3.9}{1.4} \approx 2.8 \quad (2)$$

## (2) 中耕除草作業

図 7 に示した農場 D と農場 E の除草刃の変動軌跡を進行方向に対して 1 m 間隔に前後データの差分を求めると、農場 D でその差分の最大は 5.0 cm であった。播種・移植機の場合で述べたように作業機が 1 m 進行すると除草刃が 5.0 cm 左右に変動することになるため、中耕除草機をうね間の中心、すなわち作物列に追従させるための作業機の左右の制御速度は 5.0 cm/s になる。また、慣行の作業速度の 2 倍である速度 2 m/s の場合では最大 10 cm/s の制御速度が必要であると考えられる。

## 4. 摘要

本報はうね自動追従システムの開発のための基本研究として畑作のトラクタ作業者の作業状態とうね合わせ作業精度を明らかにし、自動追従システムに要求される制御速度を検討し、以下のことが明らかになった。

- 1) 作業者の後方確認時間割合は播種・移植作業の場合 10～16% であるのに対し、中耕除草作業では 16～27% と高くなった。
- 2) うね合わせの作業精度は、播種・移植作業の場合、隣接行程のうね間の変動は、最大 7.5～11.5 cm であり、その後の中耕除草作業への影響が懸念される。一方、中耕除草作業の場合では、その最大変動は 8.2 cm に達し、作物に機械的な損傷を与えることが観察された。
- 3) うね間の周期性から求めたうね自動追従システムに要求される制御速度は、トラクタの作業速度を 2 m/s に想定すると、播種・移植作業では最大 6.6 cm/s であり、中耕除草作業の場合、10 cm/s 必要であると推定された。

## キーワード

管理作業, トラクタ作業機, うね間, 作物列センサ, 制御速度, 循環型農業

## 引用文献

- 安居院猛・中嶋正之 (1981): FFT の使い方, 産報出版株式会社, 東京, pp.39, pp.149-153.  
 浜田浩一・岡本博史・片岡 崇・寺脇正樹・端

- 俊一 (2001) : 除草機のうね自動追従制御に関する研究, 農業機械学会北海道支部第 52 回年次大会講演要旨; 15-16.
- 飯澤理一郎 (2006) : 北海道農業動向解析, 農業機械学会誌 68 (5) ; 9-12.
- 岡本博史・端 俊一・高井宗宏 (1999) : 自動うね合わせのための作物列センサ (第 1 報), 農業機械学会誌 61 (6) ; 159-167.
- 近江谷和彦 (1986) : ほ場面のプロフィールに関する研究 (第 3 報) —ほ場面の粗さについて—, 農業機械学会誌 47 (4) ; 469-474.
- 佐藤禎稔・松田清明・佐藤栄基・申宝 明 (2004) : 三次元視覚センサによる作物列出システムの応用, 農業機械学会北海道支部報 44 ; 29-34.
- Shen, B., Satow, T., Hironaka, K., Zhang, S. (2008) : Development of laser Crop Row Sensor for automatic Guidance System of Tractor-mounted Implements, Journal of JSAM 70 (6) ; 90-96.
- 十勝農業協同組合連合会 (2007) : 十勝の農業 2007 ; 2.

## Summary

This study was to examine farmer's working conditions and the accuracy of tractor implements in following rows in a field, and to consider the most appropriate control speed of such implements as preliminary research for

the development of an automatic guidance system.

1) In the case of seeding and transplanting, 10 to 16 percent of farmers' work time (driving a tractor) was used to check the position of attached implements. In cultivating and weeding, it was 16~27%.

2) Concerning the accuracy of the row-following function of tractor implements, uniformity in row spacing is important. However, in actuality, the spacing of most fields varies between rows. Differences in row spacing ranged from 7.5 cm to 11.5 cm in the cases of seeding and transplanting. Moreover, for cultivating and weeding, the biggest observed difference was 8.2 cm. Consequently, implement damage to crops was observed.

3) When tractor working speed was adjusted to 2 m/s for seeding and transplanting, the control speed of an actuator for the automatic guidance system was calculated to be 6.6 cm/s. The maximum control speed of the actuator must be at least 10 cm/s for cultivating and weeding.

## Key Words

crop management, tractor implements, row spacing, crop row sensor, control speed, circulation type agriculture