

レーザ式作物列センサによるトラクタ用作業機の
うね自動追従システムの開発に関する研究

**Development of Automatic Guidance System for
Tractor-mounted Implements Using Laser Crop Row Sensor**

2009.3

岩手大学大学院
連合農学研究科
生物環境科学専攻
(帯広畜産大学)

申 宝明

目 次

| | |
|--|----|
| 第1章 緒論 | 1 |
| 1.1 研究の背景 | 1 |
| 1.2 既往の研究 | 4 |
| 1.2.1 作物列センサに関する研究 | 4 |
| 1.2.2 トラクタ用作業機の自動追従に関する研究 | 9 |
| 1.3 研究目的と論文の構成 | 12 |
| 1.3.1 研究目的 | 12 |
| 1.3.2 本論文の構成 | 12 |
| | |
| 第2章 畑作の播種・移植, 中耕除草作業時のトラクタの うね合わせ作業の現状とその精度 | 14 |
| 2.1 緒言 | 14 |
| 2.2 調査圃場および方法 | 15 |
| 2.2.1 調査対象農家 | 17 |
| 2.2.2 調査項目 | 17 |
| 2.2.2.1 トラクタ作業者の作業状態の調査 | 17 |
| 2.2.2.2 うね合わせの作業精度の調査 | 19 |
| 2.3 実験結果および考察 | 20 |
| 2.3.1 トラクタ作業者の作業状態 | 20 |
| 2.3.2 各農場のうね合わせ精度 | 22 |
| 2.3.2.1 播種・移植作業の場合 | 22 |
| 2.3.2.2 中耕除草作業の場合 | 26 |
| 2.4 本章のまとめ | 30 |

| | |
|---|--------|
| 第3章 レーザ式作物列センサの開発 | 32 |
| 3.1 緒言 | 32 |
| 3.2 開発する作物列センサの基本システム | 32 |
| 3.2.1 CCD レーザ変位センサ | 34 |
| 3.2.2 6面体ポリゴンミラー | 36 |
| 3.2.3 ロータリエンコーダ | 37 |
| 3.2.4 ブラシレスDCモータ | 38 |
| 3.2.5 計測用コンピュータとインターフェース | 39 |
| 3.3 作物列位置の認識方法（ソフトウェア） | 40 |
| 3.3.1 作物列センサの計測波形 | 40 |
| 3.3.2 対象物の水平位置検出方法 | 41 |
| 3.3.3 作物列の位置検出法 | 43 |
| 3.3.4 ラインマーカ跡の位置検出法 | 45 |
| 3.4 ポリゴンミラーの回転数と計測可能対象物の 大きさに関する基礎実験 | 47 |
| 3.4.1 実験目的 | 47 |
| 3.4.2 基礎実験の方法 | 47 |
| 3.4.3 基礎実験の結果と考察 | 49 |
| 3.5 本章のまとめ | 51 |
| 第4章 レーザ式作物列センサの計測精度の評価 | 52 |
| 4.1 緒言 | 52 |
| 4.2 室内実験 | 52 |
| 4.2.1 実験装置および方法 | 52 |
| 4.2.1.1 実験装置および対象物形状 | 52 |

| | | |
|---------|--------------------|----|
| 4.2.1.2 | 実験方法 | 54 |
| 4.2.2 | 実験結果および考察 | 57 |
| 4.2.2.1 | V字モデルの位置検出精度 | 57 |
| 4.2.2.2 | 作物モデルの位置検出精度 | 60 |
| 4.2.2.3 | 圃場作業を想定した場合の位置検出特性 | 62 |
| 4.3 | 圃場実験 | 64 |
| 4.3.1 | 実験装置および方法 | 64 |
| 4.3.1.1 | 実験装置および計測対象 | 64 |
| 4.3.1.2 | 実験方法 | 66 |
| 4.3.2 | 実験結果と考察 | 66 |
| 4.3.2.1 | ラインマーカ跡の位置計測精度 | 66 |
| 4.3.2.2 | 作物列の位置計測精度 | 69 |
| 4.4 | 本章のまとめ | 73 |

第5章 トラクタ用作業機のうね自動追従システムの

| | | |
|---------|------------------------|----|
| | 油圧制御機構の開発 | 75 |
| 5.1 | 緒言 | 75 |
| 5.2 | トラクタ用作業機のうね自動追従システムの概要 | 75 |
| 5.2.1 | 油圧制御機構の概要 | 76 |
| 5.2.1.1 | 油圧スライド装置 | 77 |
| 5.2.1.2 | 油圧シリンダ | 78 |
| 5.2.1.3 | 油圧ポンプ | 78 |
| 5.2.1.4 | 電磁弁 | 80 |
| 5.2.2 | 油圧制御機構の制御特性 | 82 |
| 5.2.2.1 | 制御電圧による油圧シリンダの | |

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| 移動速度の測定方法 | 83 |
| 5.2.2.2 電磁弁の制御電圧と油圧シリンダの 動作特性の結果 | 84 |
| 5.2.3 指令出力装置の概要 | 85 |
| 5.2.3.1 制御用コンピュータと インターフェースボード | 85 |
| 5.2.3.2 制御用ソフトウェア | 87 |
| 5.3 本章のまとめ | 90 |
| 第6章 うね自動追従システムの制御精度の評価 | 91 |
| 6.1 緒言 | 91 |
| 6.2 実験装置および方法 | 91 |
| 6.2.1 実験装置 | 91 |
| 6.2.2 実験方法 | 92 |
| 6.2.2.1 室内実験方法 | 92 |
| 6.2.2.2 圃場実験方法 | 95 |
| 6.3 実験結果および考察 | 96 |
| 6.3.1 室内実験での制御結果の評価 | 96 |
| 6.3.1.1 追従システムのステップ応答特性 | 96 |
| 6.3.1.2 追従システムの周波数応答特性 | 99 |
| 6.3.2 圃場実験での制御結果の評価 | 111 |
| 6.3.2.1 ラインマーカ跡の場合の追従制御の結果 | 111 |
| 6.3.2.2 作物列の場合の追従制御の結果 | 113 |
| 6.4 本章のまとめ | 115 |

| | |
|---|---------|
| 第7章 総括 | 117 |
| 7.1 畑作の播種・移植, 中耕除草時のトラクタによる うね合わせ作業の現状とその精度(第2章) | 117 |
| 7.2 レーザ式作物列センサの開発(第3章) | 118 |
| 7.3 レーザ式作物列センサの計測精度の評価(第4章) | 119 |
| 7.4 トラクタ用作業機のうね自動追従システムの 油圧制御機構の開発(第5章) | 120 |
| 7.5 うね自動追従システムの制御精度の評価(第6章) | 121 |
| 7.6 結語 | 122 |
| 量記号一覧 | 123 |
| 謝 辞 | 124 |
| 参考文献 | 126 |

第1章 緒 論

1.1 研究の背景

近年、食糧危機に備えて、世界中で食糧の増産が必要不可欠な状況にあるにもかかわらず、日本の食料自給率は年々減少し、2006年度にはカロリーベースで39%と13年ぶりに40%を割り込んだ。この年は、折しも日本政府が2015年度までに自給率を45%に向上させる取り組みが始まった矢先であった¹⁾。こうした中、国際化の進展によって、海外から安価な農産物が輸入されているが²⁾³⁾、地球温暖化や自然破壊、発展途上国の人口増加などから、今後食糧が世界的に不足する時代を迎えつつある⁴⁾。特に、アジア諸国の経済成長の速さと、それ以上に加速する消費によって、益々熾烈になる農産物をめぐる国際競争の結果、日本は今後10年以内に豊かで多様な現在の食生活を大幅に変革しなければならなくなると言われている。この潜在的な食糧危機に対して、日本農業を振興させることが重要であるが、農業就業者の高齢化も進んでおり、基幹的農業従事者の57%が65歳以上と高齢化し、将来の国産の食料供給力に不安を感じる状況にある。この厳しい状況を打開するため、農作業における従事者の労働軽減や作業の安全、作業の高能率化、高精度化が求められている。そのため、これまで以上に農業機械の高精度化や自動化、ロボット化に対する要望が高まっている⁵⁾⁶⁾。

そこで、改善が求められる農作業のひとつに畑作における中耕除草作業の自動化が挙げられる。一般に、除草作業は化学農薬を用いた処理と除草機やカルチベータを利用した物理的な処理に大別されるが、除草剤の目覚ましい発達により大幅な省力化がもたらされた。しかしその反面、除草剤への依存が強まるにつれて、食品としての安全性や生態系の破壊などの環境問題を誘発した⁷⁾。このため、消費者側の農産物の安全性に対する要求は益々高くなっている。ま

た、消費者に食の安全・安心を保障する目的で農林水産省は、産地や品種および使用農薬などの基礎的な生産・流通情報を消費者に提供するトレーサビリティ制度を導入した。このような理由により、無農薬もしくは低農薬で栽培されていない農産物の商品価値は相対的に低下しつつあり、除草剤に依存する農業生産システムは変更を迫られている。

一方、畑作の物理的な除草作業ではうね間の中耕除草にカルチベータやウィーダが使われ⁸⁾、また株間の除草には近年生産コストの低減や省力化のために株間除草機の利用が伸びている。しかし、このような中耕除草の管理作業は、初夏から盛夏にかけて数回行われ⁹⁾、かつトラクタ用作業機と作物の位置関係の調整に極めて精度の高いトラクタのハンドル操作技術を必要としている¹⁰⁾¹¹⁾。また、播種・移植作業をはじめ収穫までの農作業は、トラクタや作業機の大型化、高速化、キャビン付きトラクタの普及に伴って、作業機を作物のうねに合わせる作業が精度的に不十分になっている。特に、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農作業に悪影響を及ぼす。例えば、通常の播種機や移植機は2畦または4畦用が利用されている。しかし、その後の中耕除草作業は4畦用のカルチベータなどが一般的に利用されていることから、播種・移植機で順次往復作業を行う場合、隣接する作物列とのうね間が狭くなったり広がったりすると、図 1.1 に示すように、中耕除草作業時に、カルチベータの除草刃などが赤い枠で示した作物に接触し、その後の作物の生育に重大な損傷を与えてしまうことが予想される。

一般に作業者は、トラクタを運転してうね合わせ作業を正確に行うために、頻繁にトラクタの前輪の位置を調節したり、後方の作業機の状態を無理な姿勢で長時間監視したりしており、単純作業であるにも関わらず、精神的にも肉体的にも重労働となり、その作業を改善することは極めて重要な課題であると考えられる。北海道十勝地方の中耕除草作業時のうね合わせ作業の実態を調査した報

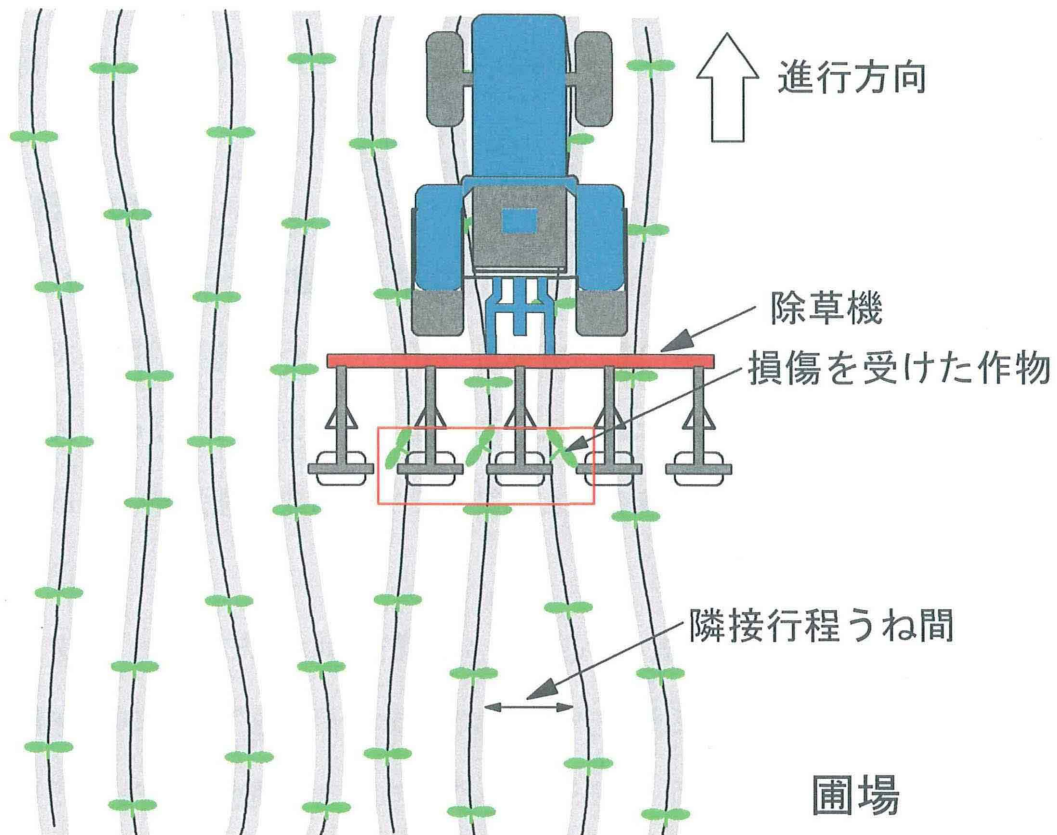


図 1.1 隣接行程でのうね間変動の問題点

告¹²⁾によると、トラクタ作業者は約 10%の割合で後方を振り向いて作業機と作物列の位置関係に注意を払い、前を向いている場合でもトラクタの前輪を作物列に合わせるために細心の注意を払って作業していることが明らかにされている。

このように、畑作の播種・移植、中耕除草、収穫作業は、後方の作業機を作物列やうねに高精度にうね合わせすることが要求され、トラクタ作業者は絶えず重労働を強いられている。また、土壌表面が膨軟な圃場や傾斜地ではトラクタのハンドル操作が難しく、作業者はそのうね合わせ作業に多大な労力を費やしている。さらに、北海道の畑作地帯では年々規模拡大が進む一方、農作業が天候に左右されることから、トラクタ作業機の高速度化や多条化に対する要望も

高くなりつつあり、今後益々トラクタ作業におけるうね合わせ精度の向上に対する新技術の開発が切望されているのが現状である。

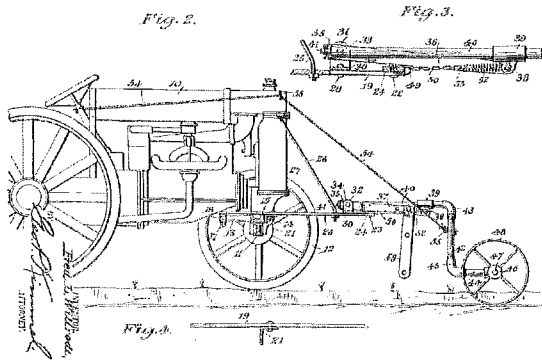
1.2 既往の研究

1.2.1 作物列センサに関する研究

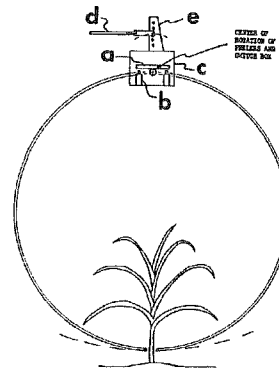
トラクタ用作業機のうね合わせの自動化には作物列の位置を計測するセンサが不可欠である。これまでに、研究されたうね合わせのための作物列センサは大別すると、接触追従方式、マシンビジョン方式、非接触追従方式の3つに分類される。

ここで、3つの方式について詳しく述べると、まず表 1.1 に示す接触追従方式は、機械式のガイドをプラウなどのれき溝や作物列などに接触させてなぞることによってトラクタを自動操舵する方式である。また、図 1.2 は主な作物列センサに関する既往の研究例を示すが、A) 図に示したのは、1924 年にアメリカの特許として出願されたもので、最も古い作物列センサのひとつと考えられる¹³⁾。これは、トラクタのハンドルと前方に設置したガイド車輪をワイヤで結び、ガイド車輪がうねをなぞる接触センサとして機能させることで、トラクタのハンドル操舵を行い、それを自動走行させる手法である。

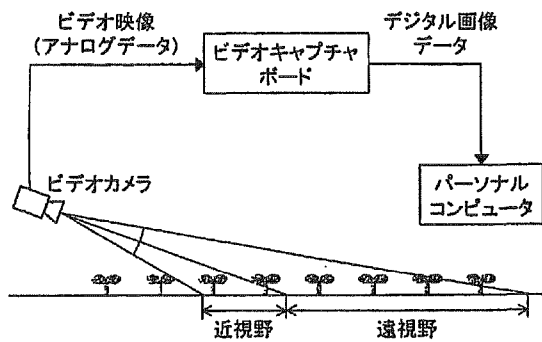
また、1959 年 Richey は、図 1.2 の B) に示すように、円形のワイヤとマイクロスイッチで構成される機械式接触センサを開発し、トラクタ作業のうね合わせの自動化について報告している¹⁵⁾。その後、プラウ耕や中耕除草、収穫作業など多くのトラクタ作業に応用された。しかし、この方式は、目標経路に対する追従精度はある程度確保できるものの、接触させる対象が必要となるため利用条件、作業環境が限定されるという欠点があり、1980 年以降はこの方式の研究はほとんど見られなくなった。しかし、現在一般化している条追従自動操向機能を有した自脱型コンバインにはこの方式が採用されている。



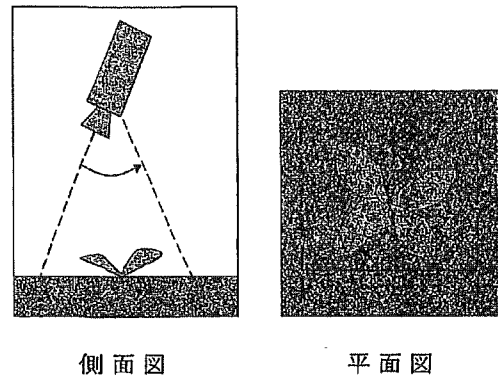
A) Steering attachment for tractors
U.S. Patent, No. 1506706, 1924¹³⁾



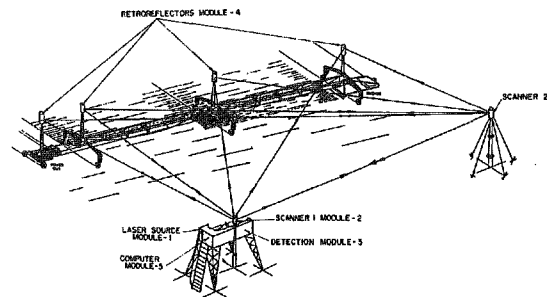
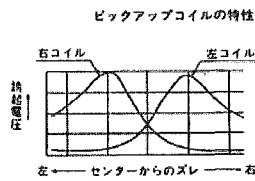
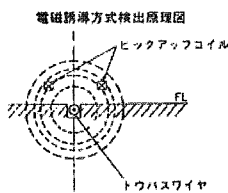
B) Arrangement of feelers and micro switches¹⁵⁾



C) ソフトウェア処理システム⁶⁾



D) 被写体全体の撮影 (飯野)⁸⁾



E) 電磁誘導方式における信号と出力特性³⁸⁾

F) Guiding concept for cable-based gantry system⁴⁰⁾

図 1.2 作物列センサに関する主な研究事例の原理

表 1.1 接触追従方式の研究事例

| 年次 | 代表開発者 | 作業内容 | センサの種類 | 文献 |
|------|----------------|-------------------|-------------------|-----|
| 1924 | Wilrodt, F.L. | Following furrows | wheel | 13) |
| 1939 | Andrew, F.W. | Plowing | piano wire | 14) |
| 1959 | Richey, C.B. | Following rows | mechanical feeler | 15) |
| 1960 | Gilmor, W.D. | Following furrows | | 16) |
| 1960 | Wolfe, J.S. | Cultivations | mechanical feeler | 17) |
| 1962 | Sieling, S. | Plowing | three wheels | 18) |
| 1963 | Mittebach, B | Plowing | mechanical feeler | 19) |
| 1971 | Rushing, K. | Following rows | mechanical feeler | 20) |
| 1972 | Warner, M.G.R. | Plowing | mechanical feeler | 21) |
| 1974 | 池田善郎 | コンバイン | 機械式接触 | 22) |
| 1976 | 笈田昭 | プラウ耕 | 機械式接触 | 23) |

表 1.2 マシンビジョン方式の研究事例

| 年次 | 代表開発者 | 作業内容 | センサの種類 | 文献 |
|------|---------|----------------|--------------------------|--------|
| 1989 | 三竿善明 | トラクタ走行 | CCD camera | 24) |
| 1990 | 韋 学軍 | トラクタ間引き | CCD camera | 25) |
| 1992 | 端 俊一 | 作物列センサの開発 | CCD イメージ | 26) |
| 1995 | 草野信之 | 作物列の検出 | CCD camera | 27) |
| 1997 | 鹿沼隆宏 | 作物列の検出 | CCD camera | 28) |
| 1997 | 鳥居 徹 | 作物列検出制御 | CCD camera | 29-32) |
| 1999 | 岡本博史 | 作物列の検出 | イメージセンサ | 5-6) |
| 2002 | 寺脇正樹 | テンサイと 雑草の識別 | Hyper spectral camera | 33) |
| 2003 | 山崎 哲 | トラクタ走行 | CCD カメラ | 34) |
| 2005 | ECO-DAN | Row following | CCD Camera | 35) |
| 2005 | 飯野泰明 | 作物と雑草の識別 | Hyper spectral camera | 8) |

つぎに、マシンビジョン方式はカメラとコンピュータを利用したリアルタイム方式の画像処理システムである。車両に CCD カメラやハイパースペクトルカメラなど、「機械の目」を取り付け、画像処理技術を利用して対象物の位置を検出する方式である。表 1.2 にこの方式の主な研究事例を示した。

この方式は、作物の色と土壌の色の違いを利用して作物列を検出する手法である。しかし、発芽直後や作物が圃場面全体に繁茂した時期では、両者の色の違いが明確にならないため、作物列の位置を機械的に特定することは困難になる。また、天候状態によって晴天や曇天、日中や夕方など自然光が大きく変化する状態では色温度補正技術も必要となるなど、高度なコンピュータやソフトウェア技術を必要とする。

さらに、非接触追従方式は表1.3に示すように、電磁気や超音波、レーザ光などを利用した非接触センサによる方式が見られる。

表 1.3 非接触追従方式の研究事例

| 年次 | 代表開発者 | 作業内容 | センサの種類 | 文献 |
|------|----------------|------------------|--------------------|--------|
| 1965 | Pickon, D.J. | | 電磁誘導 | 36) |
| 1970 | Grovum, M.A | トラクタ走行 | Laser sensor | 37) |
| 1986 | 中村明德 | 無人搬送 | 電磁誘導 | 38) |
| 1987 | 大下泰生 | 果樹園管理機走行 | 超音波 | 39) |
| 1989 | Shmulevich, I. | Machine guidance | Laser sensor | 40) |
| 1999 | Toda, M. | 作物列の検出 | 超音波センサ | 41) |
| 1999 | Sogaard, H.T. | Tractor seeding | Laser sensor | 42) |
| 2004 | 佐藤禎稔 | 作物列の検出 | 三次元視覚センサ | 10)11) |
| 2006 | Ahamed, T | 作業機自動装着 | Laser range finder | 43)44) |
| 2008 | 申宝明 | うねと作物列の検出 | レーザ変位センサ | 45) |

1965年にPickonらは電磁気に関する研究について報告している³⁶⁾。その原理は図1.2のE) に示すように、電磁誘導ケーブルを地中に埋設し、センサで磁界強度分布を測定してケーブルの位置を検出する方法である。この方法は位置検

出精度が優れているが、走行経路が固定化されるため汎用性に欠ける他、トラクタ走行による土壌踏圧の発生、ケーブル設置コストの問題などから大面積の圃場には適さないことが考えられる。また、超音波に関する研究は大下らが報告しており³⁹⁾、走行車両の前後に超音波センサを装着し、車体と障害物との距離を計測して障害物に接触しないように走行車両の方向制御を行い、果樹園の管理機の走行制御に利用されている。

最後に、レーザ光を利用したセンサについては、1989年にShmulevichらによって報告されている⁴⁰⁾。これは、図1.2のF) に示すように、スキャナモジュールからレーザ光を発し、作業機に設置した角立方体型逆反射体によって反射させ、光センサに投光する。そのときのレーザビームを角度光センサで検出し、そのデータをコンピュータに入力して作業機の位置を算出するものである。その結果によると、400×400 mの圃場で作業機の位置計測精度の誤差は150 mm以内であった。また、Sogaardはレーザセンサを用いた自律走行車両で農作業を行い、走路からの変位が3.5 cm以下であったと報告している⁴²⁾。

近年一般的に利用されているGPSは、全地球的に車両の位置情報を測定できるが、その姿勢を測定することはできない。また、ジャイロは方向情報を計測できるが、それは初期状態からの相対変化であり、地図上の絶対位置を測定できないことからGPSと組み合わせて利用される場合が多い。

一方、レーザセンサは、位置計測に関して多くの利点を持ち、第1に対象物体の姿勢を計測できることである。また、レーザセンサは、予め圃場に目印を設置すれば、その情報を利用して地図上の情報を比較的簡単に取得することができる。第2に、レーザセンサは、第3章でも述べるが、センサ自体は主にレーザ発光素子と受光素子で構成され単純な構造を持ち、GPSなどのセンサと比べて比較的安価に利用できる特徴がある。

以上のことから、本研究で開発するレーザ式作物列センサは、2Dレーザスキ

ャナを三次元視覚センサとして応用したものであり、その計測精度はすでにキヤベツ結球の立体形状計測で実証されている⁴⁶⁾。また、この三次元視覚センサを作物列センサに応用した場合の基本的な位置検出性能とその有効性についてもすでに佐藤らが報告している¹⁰⁾¹¹⁾。

1.2.2 トラクタ用作業機の自動追従に関する研究

トラクタに作業機を装着し、作物列に沿って自動追従させる場合、その制御方式を大別すると、トラクタのハンドルを直接制御する走行制御方式とトラクタとは別に作業機側をうねに自動制御させる方式の2つに分類される。

まず、トラクタの走行制御方式とは、トラクタに自動操舵ユニットを取り付

表1.4 トラクタ自動操舵ユニットと作業機アクチュエータの研究事例

| 年次 | 代表開発者 | 論文タイトル | 文献 |
|------|---------------|--|---------|
| 1990 | Choi, C. H. | Navigational tractor guidance system | 47) |
| 1993 | 石井一暢 | 学習機能を有した自律走行車両 | 48)-51) |
| 1999 | 井上慶一 | 自律走行のためのGPS とジャイロのカルマンフィルタによるセンサーフュージョン技術 | 52) |
| 2000 | Pinto, F.A.C. | Vehicle guidance parameter determination from crop row images using principal component analysis | 53) |
| 2001 | 木瀬道夫 | RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット | 54)-56) |
| 2004 | Inoue, K. | A Modeling of a Movement of a Semi-crawler Tractor and an Adaptive Operational Steering Control | 57) |
| 2005 | ECO-DAN | Local positioning system | 35) |
| 2008 | 東洋農機株式会社 | ビートハーベスタ取扱説明書 | 58) |
| 2008 | 日農機製工株式会社 | ビートハーベスタ取扱説明書 | 59) |

け、トラクタのハンドルをアクチュエータで操舵し、進行方向を自動制御する方式である。トラクタの自律走行に関する研究では、ほとんどがこの方式であり、その主な研究事例を表1.4に示す。

マシンビジョンやGPSを航法センサとした自動操舵ユニットに関する研究は数多く見られ、特に近年のGPSを利用した研究は、農業分野でも、最も完成度が高く、技術的には実用化に近い技術と言える。しかし、GPSのコストや安全対策などの課題も山積しており、実用化までには至っていない。また、無人トラクタが周囲の人間や障害物を認識して回避動作を行う機能を具備することは、安全の確保という点で必要不可欠である。そのために無人トラクタが作業する環境を完全に隔離し、人や他の障害物が存在しない農作業環境を整備することが無人作業にとっては最も都合が良いが、現実的には不可能である。また、この制御方式は条件の良い畑では、問題なく制御できるが、膨軟な圃場や傾斜地ではハンドル操作で走向を迅速に制御できない場面も考えられる。

一方、トラクタ用作業機をうねに追従制御させる方式は、文字通りトラクタ後方の作業機を進行方向に対して左右に制御する方式である。これは、トラクタの3点リンクヒッチと作業機の間には油圧シリンダなどのアクチュエータを装着し、トラクタの走向と独立した状態で作業機を左右にスライドされる方式である。現在、この方式を利用したトラクタ用作業機が市販され、例えば、デンマークのECO-DAN社では、畑作の中耕、除草、防除ならびに施肥作業において油圧操舵機構を利用して作業機の自動うね合わせ作業を実現している³⁵⁾。また、東洋農機株式会社⁵⁸⁾や日農機製工株式会社⁵⁹⁾も接触式センサを利用し、ビートハーベスタの高性能自動うね合わせ装置を開発し、作物列への追従制御を行っている。

以上のことから、本研究では、トラクタの自動走行制御方式ではなく、作業機側をうねに自動追従させる方式を採用した。この研究で最終的に目標として

いるトラクタ用作業機のうね自動追従システムの開発概念は図1.3に示すように、トラクタの3点リンクヒッチと作業機の間、油圧シリンダで構成される油圧制御機構を開発し、トラクタの進行方向に対して作業機を左右にスライドさせてうねに自動追従させるシステムであり、本研究ではその核となるレーザ式作物列センサの開発も含まれる。作物列センサは作業機側に取り付けられ、その下方を通過する作物列や播種・移植機で用いられるうね合わせ用のラインマーカ跡の水平位置を非接触で検出するものであり、本研究のレーザ式作物列センサは簡便で安価なうね合わせ制御を実現し、畑作の播種・移植、株間除草、防除作業および収穫作業などのトラクタ用作業機の高精度自動化への利用を目的とする。

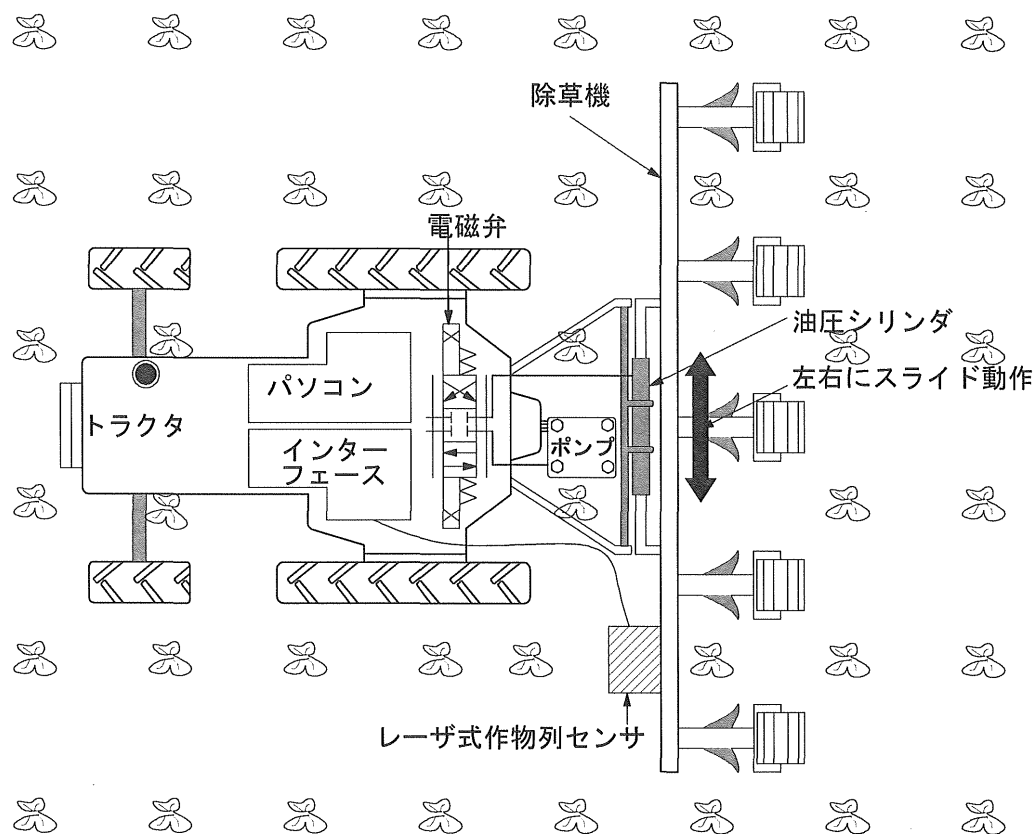


図 1.3 トラクタ用作業機のうね自動追従システムの概念

1.3 研究目的と論文の構成

1.3.1 研究目的

トラクタ作業は、一般にトラクタの後方に種々の作業機を取り付け、作物や土壌の作業位置に対して適切にうね合わせすることが求められる。特に、畑作の播種・移植、中耕除草および収穫作業は、トラクタ後方の作業機を作物列やうねに高精度にうね合わせすることが要求される。しかし現状では、トラクタのハンドル操作は作業者に依存することが多く、作業者の熟練度や操舵技術によって作業精度が大きく変化し、作業者にとってそのうね合わせ作業は精神的にも肉体的にも重労働となっている。このため、トラクタ作業者のハンドル操作を補助するうね自動追従システムの開発が期待されている。

そこで本研究は、実際の畑作作業におけるトラクタ用作業機の作業精度を調査し、また作物列を検出するためのレーザ式作物センサの開発および検出精度を評価し、さらに油圧制御機構の開発と追従精度の評価を行い、最終的に高精度・高能率作業を行える農業機械システムの開発を行う。また、環境保全型農業のために、播種・移植や中耕除草作業の省力化が期待されていることに加え、トラクタ作業者の労働負担を低減する新技術として、レーザ式作物列センサによるトラクタ用作業機のうね合わせのための自動追従システムの開発を目的としている。

1.3.2 本論文の構成

本論文は7章で構成され、まず、第1章では、研究の背景、既往の研究、研究の目的について述べた。

つぎに、第2章では、本研究の必要性を確認するために、畑作での播種・移植、中耕除草作業時のうね合わせ作業の現状と要求される制御特性の実態調査を実施し、その結果について述べる。

第3章では、作物列を検出するために、レーザ式作物列センサを開発し、その概要について述べ、第4章では、開発したレーザ式作物列センサの計測精度を確認するために、室内実験および圃場実験によって作物列センサとしての位置計測精度を評価する。

第5章では、トラクタ用作業機を進行方向に対して左右に制御するために、油圧制御機構を開発し、その概要について述べる。また第6章では、レーザ式作物列センサと油圧制御機構で構成されるうね自動追従システムの制御特性とうね追従精度について室内実験と圃場実験で評価する。

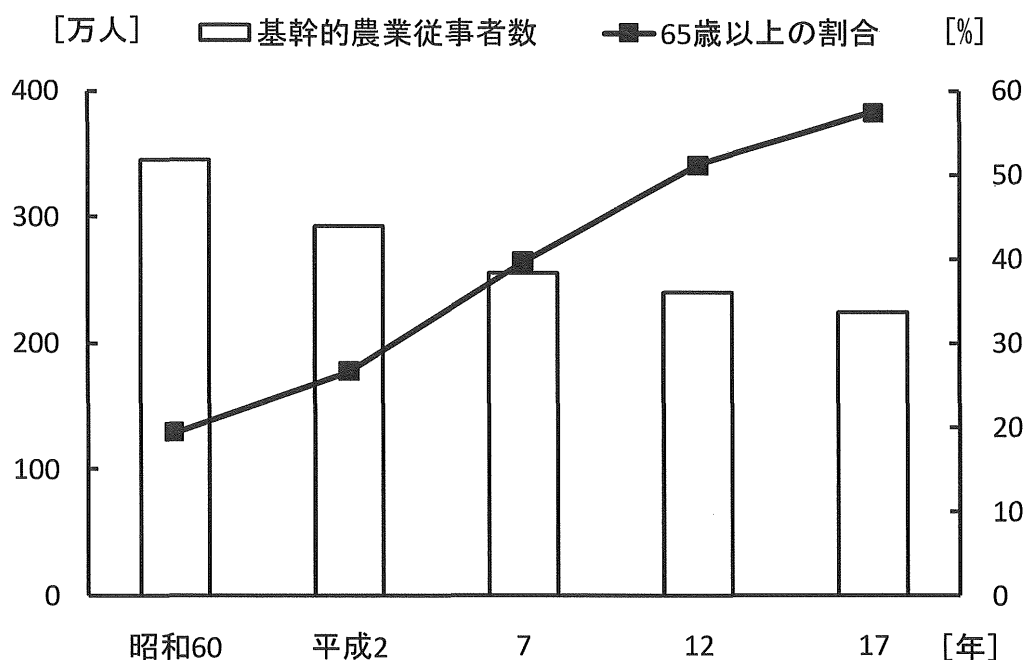
最後の第7章は、本研究の全体のまとめとしての総括である。

第2章 畑作の播種・移植，中耕除草作業時のトラクタの うね合わせ作業の現状とその精度

2.1 緒言

北海道農業は，日本の耕地面積の約25%を占める約119万haである。その農業粗生産額は約1兆700億円に上り全国の約10%を占め，壮健で意欲に富んだ労力を有する大規模専門的農家群を所有しており，政府の各種計画などで絶えず日本の食料供給基地として位置づけられてきた⁶⁰⁾。

その中で十勝地方は，平成17年の統計によると農家1戸あたりの平均耕地面積は35.7haと全国平均の22倍の規模になっている⁶¹⁾。このように，農家の経営規模が大きく，恵まれた土地資源を生かし，大規模で機械化された生産性の高い農業が展開されているように見えるが，図2.1に示すように，基幹的農業



資料：農林水産省「農林業センサス」

図2.1 基幹的農業従事者等の動向

従事者数（農業に主として従事した世帯員のうち、調査期日前1年間の普段の主な状態が農業の仕事に従事していた者の数）は減少し続ける傾向にあり、また65歳以上の農業従事者は57.4%を占めている⁶²⁾。こうした中、農作業の軽労化や自動化に関するシステムの開発が不可欠であるが、その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精度、従事者の作業状態などに関する研究例はほとんど見られない。

そこで本章は、実際の農作業でのうね合わせ精度を把握するために、畑作における播種・移植および中耕除草作業時のトラクタによるうね合わせ作業の現状とその作業精度を調査し、本研究で開発するトラクタ用作業機のうね自動追従システムに要求される応答性や制御精度などについて検討することを目的とした。

2.2 調査圃場および方法

圃場調査では、トラクタによる播種・移植作業時と中耕除草作業時のうね合わせの状態とその精度について調査した。播種・移植時のうね合わせ作業は図2.2に示すように、作物を播種または定植する際に、トラクタの往復作業による隣接行程のうね間を均一化にするためのうね合わせ作業である。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にカルチベータなどの除草刃を通過させ、除草刃が作物に損傷を与えないようにうね合わせすることである。一般に、中耕・除草の作業時間は全農作業時間の約30%であり、また年間の中耕・除草回数は1作物あたり3~5回である。したがって、播種・移植時のうね合わせ作業はその後のトラクタ作業のうね合わせの基礎となり、極めて重要な作業である。

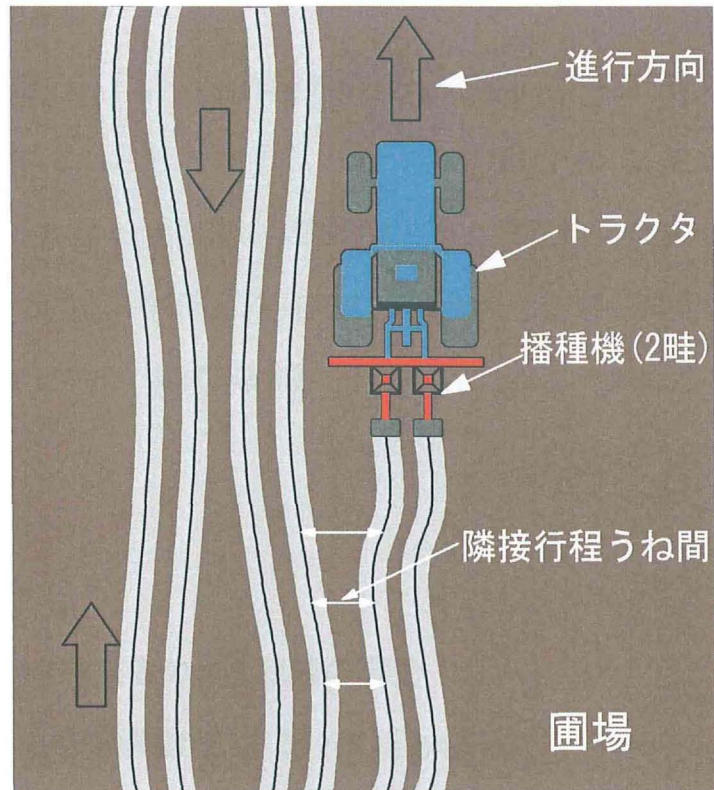


図 2.2 播種・移植作業時のうね合わせの模式図

表 2.1 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 | バレイショ | 菜豆 | テンサイ | テンサイ | 小豆 |
| 作業内容 | 播種 | 播種 | 移植 | 中耕除草 | 中耕除草 |
| 供試 作業機 | 十勝農機 ポテト プランタ PALH-4R | 田端農機 総合施肥 播種機 TEB-4WR | サークル鉄工 ビート移植機 BST-2 | 日農機製工 カルチベータ NCK-5 | 日農機製工 株間除草機 NAK-5 |
| トラクタ | クボタ M7970 | フォード 3000 | マッセイ ファーガソン MF-165 | インターナ ショナル 444 | フォード 3000 |

2.2.1 調査対象農家

トラクタ作業機のうね合わせ作業の調査対象農家は帯広市近郊の5農場であり、それぞれ農場AからEと称する。川西地区の農場A, B, Cの3ヶ所では、播種・移植時のうね合わせ作業の実態を調査し、幕別町の農場Dと川西地区の農場Eの2ヶ所では、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、作業内容、トラクタなどの圃場条件を表2.1に示した。

2.2.2 調査項目

2.2.2.1 トラクタ作業者の作業状態の調査

一般にトラクタ用作業機は、トラクタ後方の3点リンクヒッチ⁶³⁾に取り付けられていることから、作業者は常に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、作業者への肉体的影響が問題となる。具体的には図2.3と図2.4に示すように、播種・移植作業の場合、トラクタ作業者は常に前方を向く姿勢で作業しているわけではなく、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カで土壌表面に描いた跡に沿ってハンドルを操作したり、後方の作業機の作業状態を確認したりしている。中耕除草作業時も同様に、トラクタ作業者はカルチベータなどの除草刃を正確にうね間の中心を通過させるように、後方を振り向いて、作業機と作物列の位置関係を確認したり、前方を向いている場合でもトラクタの前輪が作物を踏まないように、ハンドル操作に細心の注意を払い、常に腰をひねっている状態で作業を行っている。

そこで、本研究ではトラクタ作業者の作業状態を明らかにするために、ビデオカメラ（SONY, DCR-TRV70）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、トラクタ



図 2.3 播種作業におけるトラクタ作業者の運転姿勢



図 2.4 中耕除草作業におけるトラクタ作業者の運転姿勢

の枕地旋回や作業機の上げ下ろしなどの時間を除いて、播種・移植と中耕除草作業を行っている実作業時間の部分だけを切り取り、3分ごとに時間を区切り、ストップウォッチを用いて、トラクタ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、作業状態を解析した。

2.2.2.2 うね合わせの作業精度の調査

a) 播種・移植作業の場合

播種・移植作業時のうね合わせ精度の調査では、トラクタ作業者がうね合わせを行うために、播種機や移植機の両側に取り付けられているラインマーカを交互に利用して、土壌表面にうね合わせ用のラインを描き、旋回した後のつぎの作業行程で片方の前輪をその跡に合わせてトラクタのハンドル操作を行っている。実際には、図 2.2 に示したように、播種・移植機で往路作業した後に、復路作業でうねつなぎとなった隣接行程のうね間は広くなったり、狭くなったりする。そのうね間の変動に着目し、トラクタの進行方向に対して 0.1 m 間隔に約 50 m に渡ってうね間を実測し、作業者がトラクタ作業機に設定したうね間と実測したうね間の関係を調査分析した。

b) 中耕除草作業の場合

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た。具体的には図 2.5 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 間隔で 50 m に渡って定規で実測し、除草刃がうね間の間で変動した軌跡を求め、作業機の進行方向に対する作業機の左右の変動を算出した。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。

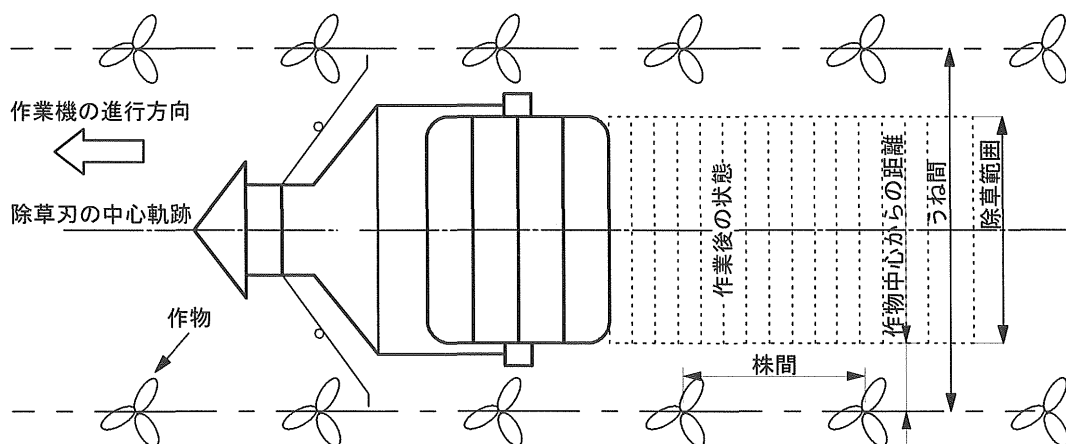


図 2.5 中耕除草作業の作業精度の測定方法

2.3 実験結果および考察

2.3.1 トラクタ作業者の作業状態

ビデオ映像から求めた各農場での作業別トラクタ後方の確認割合と後方確認時間間隔およびその1回当たりの継続時間の調査結果を図 2.6 に示す。まず、農場 B の菜豆の播種作業、農場 C のテンサイの移植作業の後方確認割合は 10% 以下であり、農場 A のバレイショの播種でも 15.9%であった。このように、播種・移植作業は、種子や苗の形状がほぼ均一化しているため、農業機械にトラブルが発生しない限り順調に作業できる。そのため、トラクタ作業者はうね間を均一に保つことが重要と考え、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、作業者は時折施肥状態や苗の植付状態を確認していたが、その割合は低かった。一方、バレイショの播種作業では、全自動型ポテトプランタで種イモを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、トラクタ作業による後方確認割合は他の作物に比べて若干多い結果となった。

一方中耕除草作業では、農場 D のテンサイ圃場で 27.2%、農場 E の小豆圃場

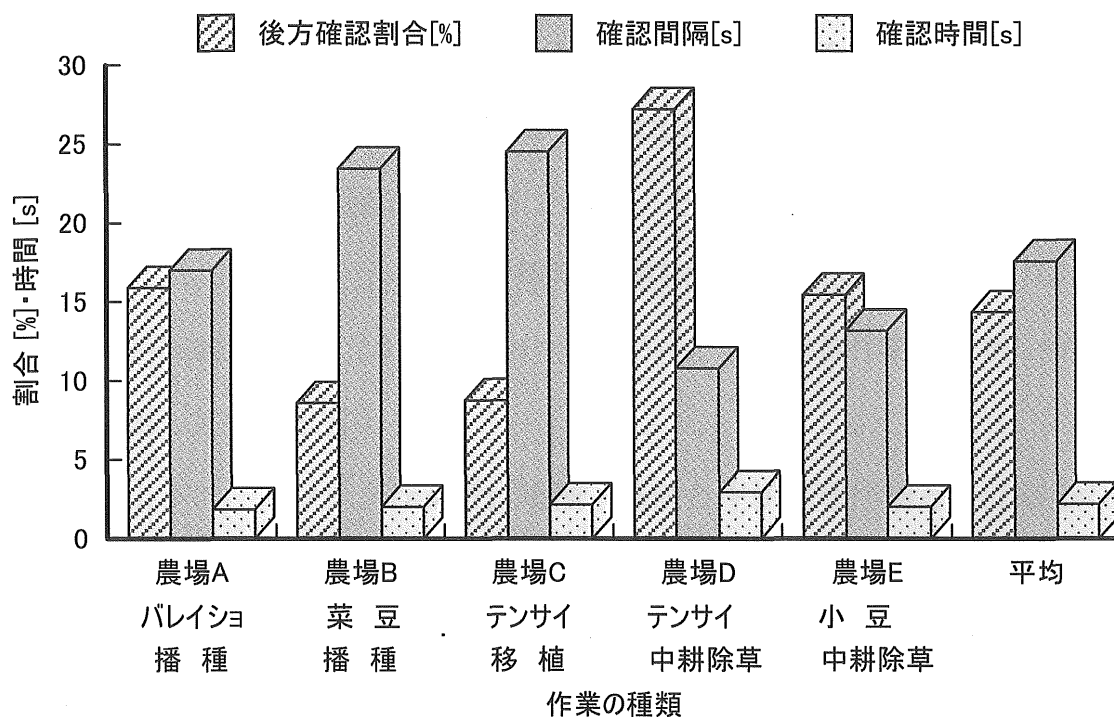


図 2.6 各農場のトラクタ作業者の作業状態

で 15.5%となり、トラクタ作業者の後方確認割合が高くなる結果となった。このように、後方確認割合が高くなる要因として、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が、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す。そのため、トラクタ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ことから、後方確認の割合が高くなるものと考えられる。

また、両作業とも作業者は残りの時間に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 は 73.5%であった。しかし、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、もう片手の腕をトラクタ後輪のフェインダに載せて体を斜めにした姿勢で

運転し、播種・移植作業ではトラクタの前輪をラインマーカ跡に合わせ、中耕除草作業ではうね間の中央に前輪を合わせて作業している。

つぎに、菜豆の播種とテンサイの移植作業では、トラクタ後方確認割合は比較的少なく、その確認間隔は24.5秒であり、その1回当たりの継続時間は2.2秒であった。しかし、テンサイの中耕除草作業の後方確認間隔は10.8秒であり、1回あたりの確認時間は2.9秒であったことから、中耕除草作業では短い間隔で後方を確認していると言える。

以上のように、トラクタ作業者は播種・移植と中耕除草作業ともに細心の注意を払ってトラクタ作業を行っていることが調査結果からも明らかになった。

2.3.2 各農場のうね合わせ精度

2.3.2.1 播種・移植作業の場合

図2.7は農場A, B, Cでの播種・移植作業時のうね間の変動を示す。横軸は進行距離であり、縦軸はうね間の変動を表す。この変動は、往復作業の隣接行程のうねつなぎのうね間が作業機ごとに設定したうね間に対して広くなったり、狭くなったりしていることを示す。なお、表2.2は各農場の作業精度を示す。

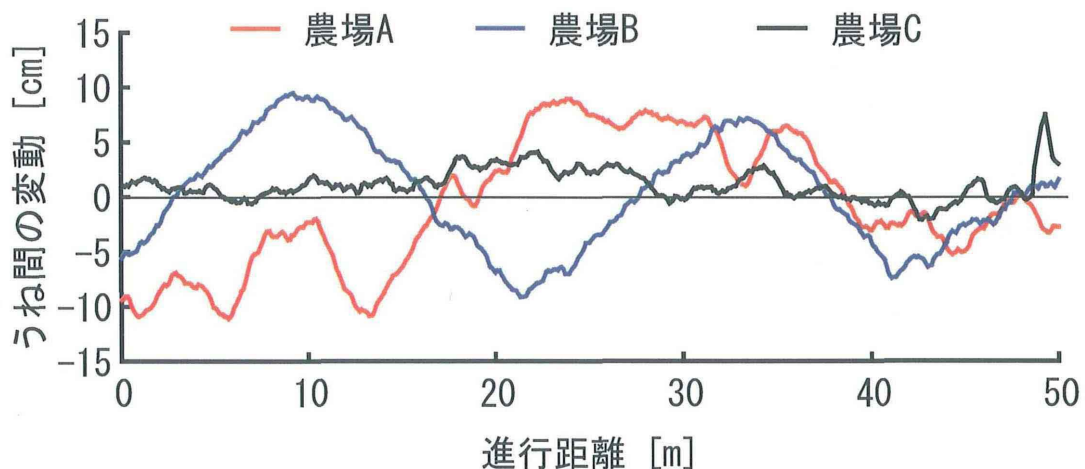


図2.7 播種・移植作業の隣接行程のうね間の変動

表 2.2 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 |
|-----------|------|------|------|------|------|
| 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 |
| 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 |
| 標準偏差[cm] | 5.8 | 5.0 | 1.4 | 3.8 | 3.5 |
| RMS[mm] | 59.0 | 50.0 | 18.0 | 41.0 | 36.0 |
| 変動係数[%] | 56.2 | 52.2 | 42.9 | 65.1 | 53.3 |

注：RMS は 2 乗平均平方根

農場 C でのテンサイの移植作業でのうね間の変動は、全体的に見るとその変動幅は約 10 cm 以内であることが分かる。なお、この場合、設定うね間が 66 cm 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 45 m 付近で 7.5 cm であり、その場所でのうね間は 73.5 cm となるが、ほぼ良好なうねつなぎ作業が行われていたと言える。しかし、バレイショの播種作業の農場 A ではうね間が大きく変動していることが分かる。作業後のうね間は設定うね間の 75 cm に対して進行距離 22 m の地点で最大 9.0 cm に広がり、また 7 m の地点で最小の 11.5 cm と狭くなった。農場 B でも同様の傾向が見られ、設定うね間の 66 cm に対して、9.5 cm の拡大から 9.0 cm の縮小でうね間が変動していた。

さらに、これらのうね間の変動を度数分布で表したのが図 2.8 である。うねつなぎ作業のうね間が設定うね間より ± 5.0 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。

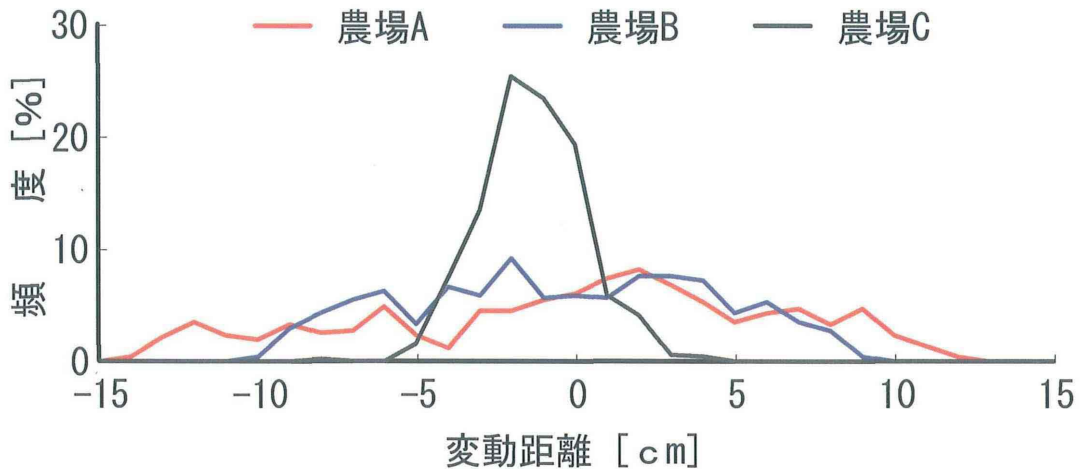


図 2.8 うね間変動の度数分布

トラクタ用作業機のうね自動追従システムを開発する際、要求される周波数応答特性を明らかにするために、これまで述べた圃場での調査結果からうね間の周期性を分析する必要がある。その方法として、高速フーリエ変換のFFT (Fast Fourier Transform) 法を利用した。この方法は不規則な変動に対し、その周期的な特徴を知る手段として利用される。また、FFT 法により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した。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し⁶⁴⁾、その結果を図 2.9 に示す。横軸は周波数であり、縦軸は PSD を表す。なお、FFT 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を利用した。

図中の比較的大きな PSD を示す部分から求めた各農場のうね間の変動の周期性は 0.12~0.18 c/m である。ここで、農場 B でのうね間変動の周期性 0.18 c/m について述べると、図 2.10 に示すように、トラクタの作業速度が 1 m/s のとき、進行方向に対して正弦波状に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

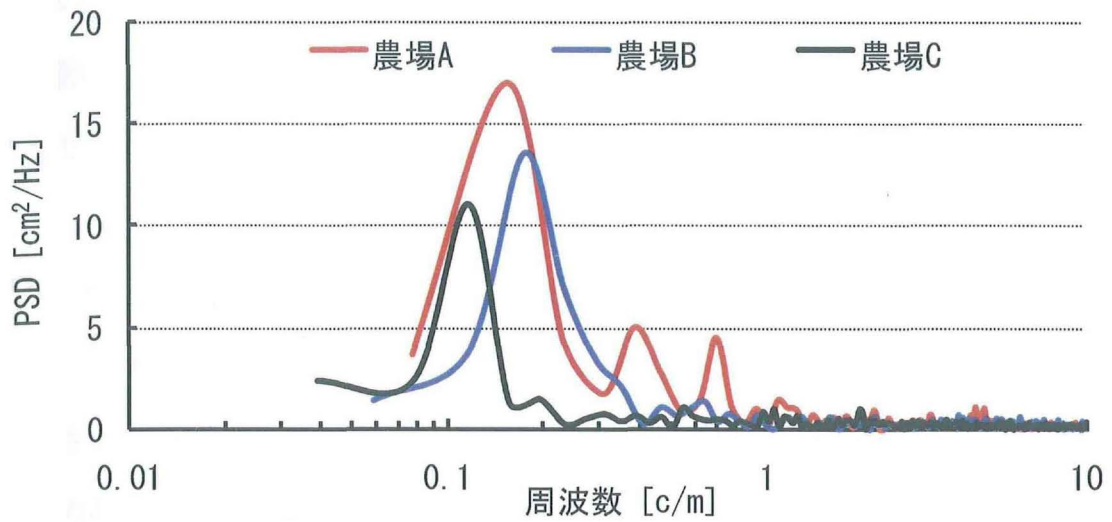


図 2.9 各農場のうね間変動の周波数特性

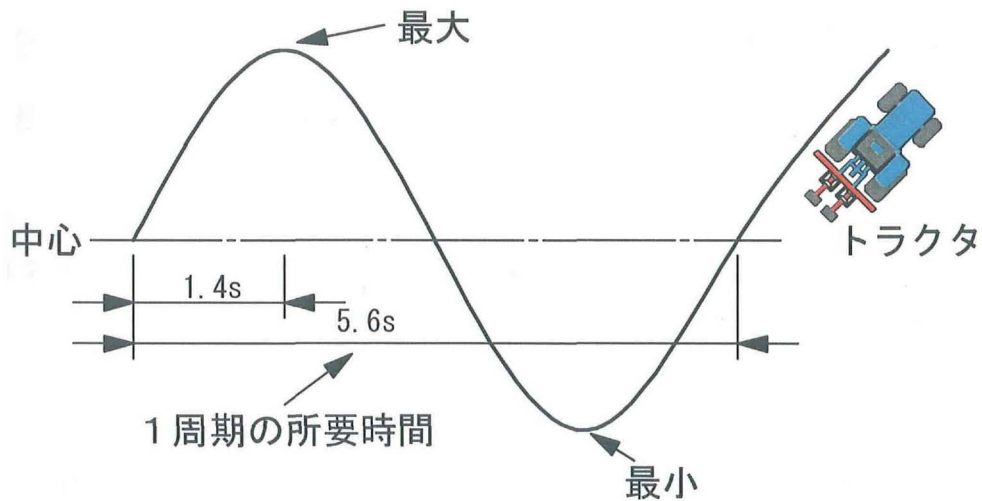


図 2.10 トラクタの正弦波状の蛇行とうね間変動の周期性の関係

$$\text{制御速度} = \frac{\text{差分の最大 [cm]}}{\text{時間 [s]}} = \frac{3.9}{1.4} \approx 2.8 \text{ [cm/s]} \quad (2.1)$$

1.4 秒となる。そこで、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、1.4 m ごとの前後のデータの偏差すなわち差分を算出した結果、その最大値は 3.9 cm であった。本研究の追従システムは第 1 章の図 1.1 に述べたように、トラクタの 3 点リンクヒッチと作業機の間油圧のアクチュエータを装着し、作業機を左右に移動させる自動追従システムを採用している。したがって、調査結果から、2.1)式によって播種・移植機を左右にスライドさせてうねに自動追従させる場合、作業機を左右に移動させるアクチュエータの制御速度は農場 B の場合毎秒 2.8 cm となる。

また、トラクタの作業速度が増加すると、要求される制御速度も速くなる。表 2.3 はトラクタの作業速度を 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s に変化させた場合の各農場での要求されるアクチュエータの制御速度を示す。また、トラクタ作業の高速化を考慮し、作業速度を 2.0 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アクチュエータの制御速度は農場 A で最大 6.6 cm/s 必要になる。

表 2.3 トラクタの作業速度と要求されるアクチュエータの制御速度の関係

| 作業速度 [m/s] | 追従システムに要求される制御速度 [cm/s] | | | |
|------------|-------------------------|-----|-----|------|
| | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 |
| 農場 A | 1.7 | 3.3 | 5.0 | 6.6 |
| 農場 B | 1.4 | 2.8 | 4.2 | 5.6 |
| 農場 C | 0.7 | 1.4 | 2.1 | 2.8 |
| 農場 D | 2.5 | 5.0 | 7.5 | 10.0 |
| 農場 E | 1.5 | 3.0 | 4.5 | 6.0 |

2.3.2.2 中耕除草作業の場合

図 2.11 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を示す。横軸は作業機の進行距離を示し、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を示す。正の値は進行方向に対して除草刃の中心が左に偏っていたことを表す。また、図 2.12 はうねの中心位置から除草刃が左右に変動した位置を 1.0 cm ごとに区切り、その出現頻度を求めたものである。

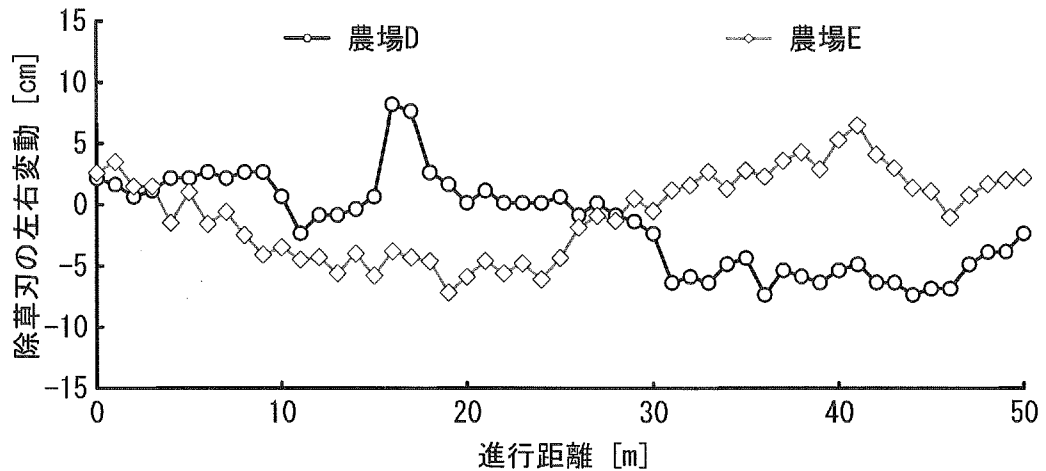


図 2.11 中耕除草作業時の除草刃の変動軌跡

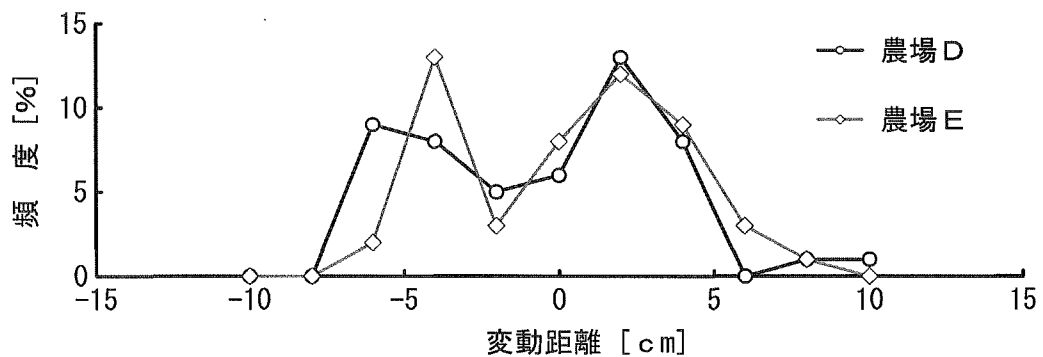


図 2.12 除草刃の変動の度数分布

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 5.0 cm を超えており、最大変動は 16 m の地点で 8.2 cm であり、また全体的な変動は 15.6 cm の範囲であった。特に、除草刃の変動が大きかった地点の様子を図 2.13 に示すが、これはトラクタのハンドル操作が不適切に行われたため、作業機が大きく蛇行し、この付近で生育していた作物に機械的な損傷を与えたことが観察された。この原因は、農場 D の場合、平均うね間が 61.7 cm、カルチベータの平均除草範囲が 36.4 cm、またテンサイの株を真上から見たときの作物の径が 9.0 cm であったことから計算すると、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は ± 8.2 cm となるため、このように除草刃が作物に損傷を与える状態になったと考えられる。なお、カルチベータの許容移動範囲の算出方法は 2.2)式に示す。また、除草刃の中心位置の分布は左右に広範囲に渡って分布しており、その標準偏差は 3.8 cm であった。



図 2.13 作物に損傷を与えた様子（農場 D）

$$\text{除草刃の許容移動範囲} = \pm \frac{\text{うね間} - \text{除草範囲} - \text{作物の茎}}{2} \quad (2.2)$$

つぎに、小豆の中耕除草作業の農場 E について考察する。農場 D と同様に除草刃は 13.7 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、農場 E の平均うね間が 60.1 cm、平均除草範囲が 32.8 cm、小豆の作物の径が 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るまでに至ら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、図 2.14 に示すように小豆を引き抜いてしまったことが観察された。また、除草刃中心の変動分布を見ると、農場 D と同様に、-6~+8 cm の範囲に分布しており、その標準偏差は 3.5 cm であった。



図 2.14 除草作業後の作物の様子（農場 E）

また、中耕除草作業でカルチベータなどの作業機を作物列に追従制御する場合、どの程度アクチュエータの制御速度が必要かを確認するために、農場 D と農場 E での除草刃の変動を進行方向に対して 1 m ごとに前後データの差分を求めた。その結果は表 2.3 に併記したように、農場 D が最大の 5.0 cm であった。したがって、トラクタの作業速度を 1 m/s と想定すると、前節の播種・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アクチュエータの制御速度は 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 10.0 cm/s になる。

2.4 本章のまとめ

農作業の軽労化や自動化に関する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うね合わせの作業精度や作業者の作業状態についての研究例はほとんど見られない。そこで本章では、トラクタ用作業機のうね合わせ精度を把握するために、畑作の播種・移植および中耕除草作業時のうね合わせ作業の現状とその精度を調査し、開発するトラクタ用作業機のうね自動追従システムに要求される応答性を調査分析した。

- 1) トラクタ作業者の作業状態は、播種・移植作業の場合、農場 B の菜豆の播種、農場 C のテンサイの移植作業では、作業者がトラクタの後方を確認する割合は 10%以下であったが、農場 A のバレイショの播種は 15.9%であった。一方、中耕除草作業では、農場 D のテンサイ圃場で 27.2%、農場 E の小豆圃場では 15.5%となり、トラクタ作業者の後方確認割合が高くなる結果となった。
- 2) 各農場のうね合わせの作業精度は、播種・移植作業の場合、農場 A, B, C の隣接行程のうね間は、作業者が設定したうね間に対してそれぞれ最大 11.5,

9.5, 7.5 cm 変動した。また、中耕除草作業のうね合わせ作業では、トラクタ用作業機はうね間の中心すなわち作物列に沿って水平位置が概ね調節されているが、その最大変動は農場 D が 8.2 cm, 農場 E が 7.2 cm に達したことから、作物に機械的な損傷を与えることも観察された。

- 3) 圃場調査から求めた開発目標のうね追従システムに要求される応答性は、作業の高速化を念頭に入れてトラクタの作業速度を 2.0 m/s に想定すると、播種・移植作業では作業機をうねに追従させるためのアクチュエータの制御速度は 6.6 cm/s と推定された。また、中耕除草作業では、播種・移植作業と比較すると、制御速度の最大が大きくなり、制御速度は 10 cm/s となった。

以上のように、畑作の播種・移植、中耕除草作業はトラクタ作業者にとって重労働であり、作業者の労力を軽減し、より高能率で高精度なうね合わせ作業を実現するためにはトラクタ用作業機のうね自動追従システムの開発は極めて重要である。