

第4章 レーザ式作物列センサの計測精度の評価

4.1 緒言

前章では、開発したレーザ式作物列センサの概要を述べた。本章は、作物列センサの基本的な位置検出精度を評価するために室内実験と圃場実験を行い、作物列やラインマーカ跡の検出特性を明らかにすることを目的とした。そのために、以下の実験を実施した。

室内実験では、まず生育している作物を想定した作物モデルと播種機や移植機で土壌表面に描かれるうね合わせ用のラインマーカ跡を想定したV字モデルについて、それらが静止している状態での位置計測精度を明らかにする。つぎに、実際の圃場作業を想定し、作物がセンサの下方を連続的に通過する走行シミュレータを利用して作物が一定の株間で断続的にセンサの下方に現れることを再現した場合の作物列検出特性を実験的に明らかにする。

また、圃場実験では、作物列センサをトラクタの前部に取り付け、圃場で走行させ、播種・移植機用のラインマーカ跡および実際の作物列を対象物とした場合の検出特性を明らかにすることを目的とした。

4.2 室内実験

4.2.1 実験装置および方法

4.2.1.1 実験装置および対象物形状

室内実験で利用した実験装置は、図4.1に示すように、圃場模擬走行試験装置と開発した作物列センサである。圃場模擬走行試験装置は、図のように回転ドラムの表面に等間隔に厚紙で製作した作物モデルを取り付け、それを回転させてセンサの下方を作物が連続的に通過する状態を再現した。さらに、これはモータとクランク機構によってトラクタが進行方向に対して左右に蛇行する状

態を再現できる走行シミュレータである。

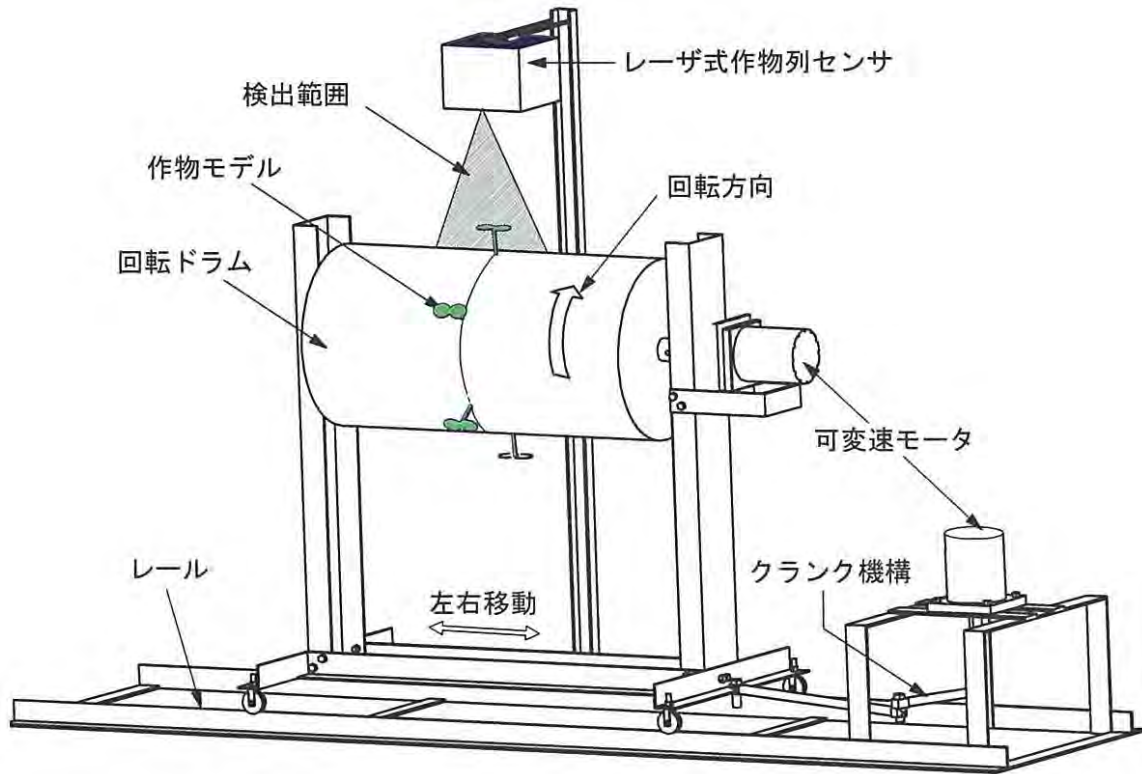


図 4.1 圃場模擬走行試験装置によるセンサの計測精度評価

つぎに、供試した対象物は V 字モデルと作物モデルである。一般に畑作の播種・移植作業のうね合わせ作業を行う場合、トラクタ作業者は播種機の両側に装備しているラインマーカを交互に土壤に作用させて、土壤表面に V 字状断面のラインマーカ跡を物理的に描いて、次の行程では図 2.2 に示したようにトラクタ作業者は前輪をそれに合わせてハンドル操作を行っている。本研究では図 4.2 に示すように、このラインマーカ跡を模倣して厚紙で作製したものが V 字モデルであり、また作物モデルはマメ科作物が 2 葉になったときを想定して厚紙で作製したものである。なお、V 字モデルは 1 種類、作物モデルは 3 種類であり、それぞれモデル A, B, C, D と称し、その詳細を表 4.1 に示す。

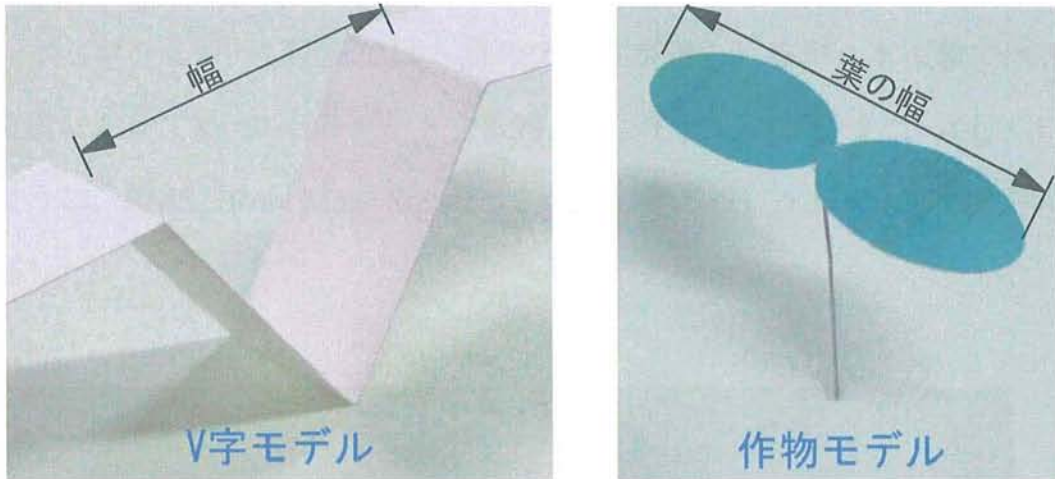


図 4.2 検出対象物の形状

表 4.1 検出対象物形状の詳細

		V字モデル		作物モデル		
モデル		A	モデル	B	C	D
幅	[mm]	60	葉の幅	100	150	200
高さ	[mm]	70	高さ	60	75	100

4.2.1.2 実験方法

まず、検出対象物が静止している状態で、作物列センサの位置計測精度を評価した。供試レーザ変位センサの計測基準距離が 500 mm であるため、作物列センサの地面からの設定高さは 400, 500, 600 mm の 3 段階に設置した。対象物は図 4.3 に示すように、センサの鉛直下方に設置し、指示針とスケールを用いて対象物をセンサの中心から左右 200 mm の範囲で、順次 20 mm 間隔に水平移動させ、それぞれの位置で対象物の計測を行い、その設置位置とセンサの検出位置の関係を求めた。なお、ポリゴンミラーの回転数は 100 rpm に設定し

た。位置検出データは1枚のミラーが回転するごとに1点のデータが取得され、ポリゴンミラー1回転では6個のデータが得られるが、本実験では各設置位置において約50点のデータを取得した。それらのデータは、4.1)式に示すように、RMS (Root Mean Square : 2乗平均平方根) を算出して検出精度を評価した。



図 4.3 圃場模擬走行試験装置による対象物の計測方法

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^2} \quad 4.1)$$

ここで, n : データ数

x_i : 基準値に対する誤差 [cm]

圃場作業を想定した実験は, 実際に圃場実験を行う前に, 室内で外乱を取除き, さらに冬季間でも実験を行えるように, それを再現したものである。図 4.1 に示したように, 作物列センサは圃場模擬走行試験装置の上方に設置した。草高 100 mm の作物モデルを回転するドラム表面に 221 mm 間隔で 6 個取り付けた。その回転ドラムは可変速モータ (ORIENTAL MORTER, MSD590-501CD) によって, 実際のトラクタ用作業機の数になるようにドラム表面での周速度を設定し, 圃場作業のように一定株間で作物がセンサの下方を断続的に通過する状態を再現した。なお, 設定した回転ドラムの周速度すなわち想定した作業速度は 0.5, 1.0, 1.5 m/s である。

また, 実際の圃場作業では, トラクタ作業者のハンドル操作などによってセンサの下方を通過する作物列が進行方向に対して左右に変化することが考えられる。そこで, 本実験装置はクランクと滑り子機構によって回転ドラム全体を回転軸方向に左右に揺動させることができ, その揺動振幅はクランクアームの長さを変えることで 100, 150, 200, 300 mm の 4 段階に調節することができる構造とした。さらに, 圃場作業での蛇行運転を想定する正弦波状の揺動は, クランク軸に取り付けた可変速 AC モータ (ORIENTAL MORTER, BHF62AT-50) によって 0~48 rpm (0~0.8 Hz) の間で無段階に調節することにより, 正弦波の波長を変化させて行った。なお, 揺動時の作物列の位置は表 4.2 に示すレー

ザ距離センサ（松下電工，LM100）でその軌跡を計測した。

表 4.2 作物列移動軌跡の計測用レーザ距離センサの仕様

センサヘッド形式	Matsushita Electric Works LM100
アンプユニット形式	Matsushita Electric Works ANL1251
分解能	150/500/150 μm
測定範囲	250 \pm 150 mm
耐環境性	0 \sim 45 $^{\circ}\text{C}$

4.2.2 実験結果および考察

4.2.2.1 V字モデルの位置検出精度

作物列センサの設定高さを 400, 500, 600 mm の 3 段階に設置した場合の V 字モデルの設置位置とセンサがその V 字モデルを検出した位置の関係を図 4.4 に示す。図の横軸は V 字モデルの設置位置を示し、縦軸は作物列センサがその V 字モデルを計測した位置を表す。

図のように、V 字モデルの設置位置が左右 \pm 180 mm の範囲では、その設置位置とセンサの検出位置の関係はほぼ直線関係を示した。ここで、センサの計測精度の詳細を表 4.3 に示すが、両者が直線関係を示す範囲のセンサの設定高さ別の検出精度の 2 乗平均平方根の RMS は設定高さが低い方から順にそれぞれ 2.8, 3.0, 1.9 mm であった。

この結果から V 字モデルがセンサの鉛直下方の水平距離 \pm 180 mm の任意の位置に存在する場合、開発したセンサは作物列センサとしてほぼ十分な位置計測精度を有すると判断できる。このように、V 字モデルの設置位置が左右 \pm 180 mm 以内では、設置位置とセンサの検出位置の関係はほぼ直線関係を示しているが、この範囲よりも広い両端の左右 \pm 200 mm 付近ではセンサの検出位置が設置位置よりも若干内側に検出する傾向が見られた。特に、センサの設

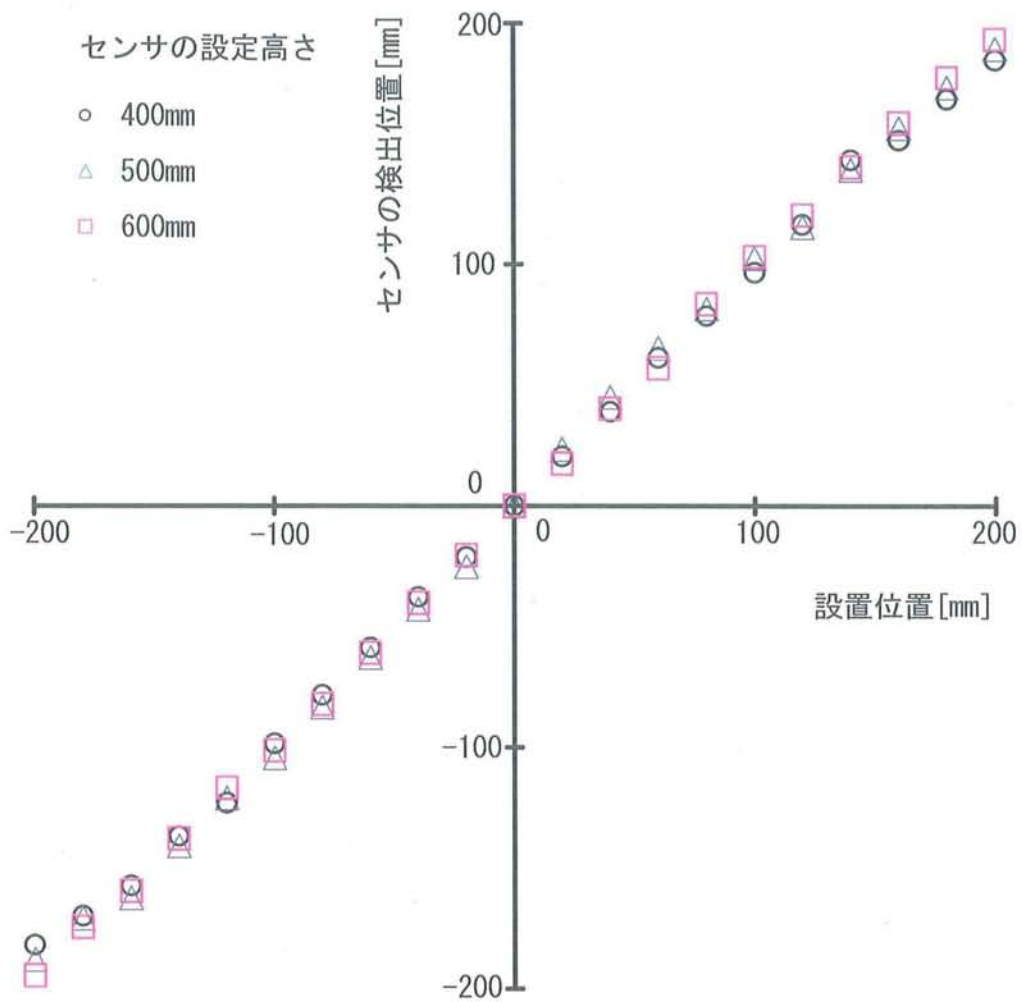


図 4.4 V 字モデルの設置位置とセンサの検出位置の関係

表 4.3 作物列センサの検出精度 (V 字モデル)

センサの 設定高さ [mm]	設置位置 (± 200 mm の範囲)	設置位置 (± 180 mm の範囲)
	計測誤差 RMS [mm]	計測誤差 RMS [mm]
400	5.1	2.8
500	3.7	3.0
600	3.0	1.9

定高さが 400 mm の場合，V 字モデルを 200 mm に設置するとセンサの検出位置は 184.9 mm となり，これは作物列センサがセンサの中心から V 字モデルまでの距離を短く計測したということを意味する。この現象が起こる理由は図 4.5 に示すように考えられる。センサの設定高さを 400 mm にした場合，V 字モデルの一部がセンサの検出範囲からはみだしていることに起因する。具体的には，コンピュータは検出範囲以内の断面形状のデータのみでその対象物の中心位置を算出することから，図のように実際の V 字モデルの設置位置よりもセンサの中心方向に近い状態でその位置を計測する特性を示す。しかし，開発するトラクタ用作業機のうね自動追従システムは，図 1.3 に示したように，制御システムによってセンサが常に制御目標のラインマーカ跡や作物列の真上に位置するように制御されることから，センサの計測範囲の両側で若干計測精度が低下することは，本研究の追従システムを考えると実用上問題にならないと考えられる。

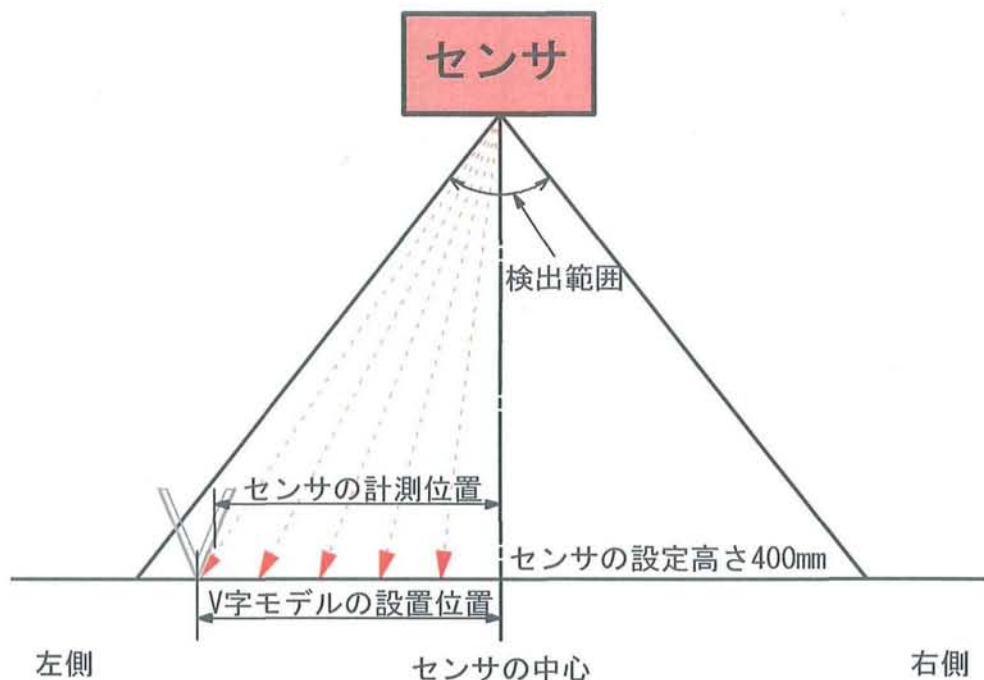


図 4.5 センサの計測範囲付近で計測誤差が大きくなる理由

4.2.2.2 作物モデルの位置検出精度

作物モデルの設置位置は茎の位置を基準として設置し、作物列センサの設定高さを400, 500, 600 mmにした場合の作物モデルの設置位置とセンサがその作物モデルを計測した位置の関係を作物モデルごとに図4.6から図4.8に示した。また、表4.4は作物モデルを対象とした場合の作物列センサの検出精度を示す。

いずれの図もV字モデルの場合と同様に作物モデルの設置位置がセンサの中心から左右 ± 180 mm以内の範囲では、作物モデルの葉の幅別のセンサの計測精度のRMSは、モデルBが4.2 mm, Cは4.3 mm, Dが5.7 mm以下であり、作物モデルの設置位置とセンサの検出位置の間にはほぼ直線関係が見られる。しかし、水平距離が ± 180 mmを超えると検出位置は設置位置に対して逡減的に減少する傾向が見られた。これは前述のV字モデルでも述べたように作物がセン

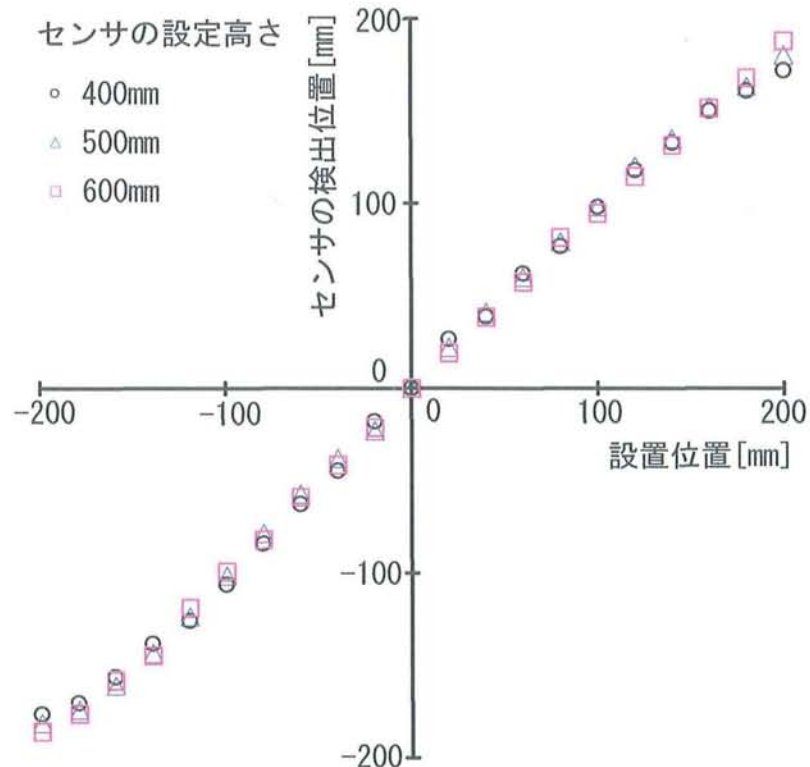


図 4.6 Bモデルの設定位置とセンサの検出位置の関係

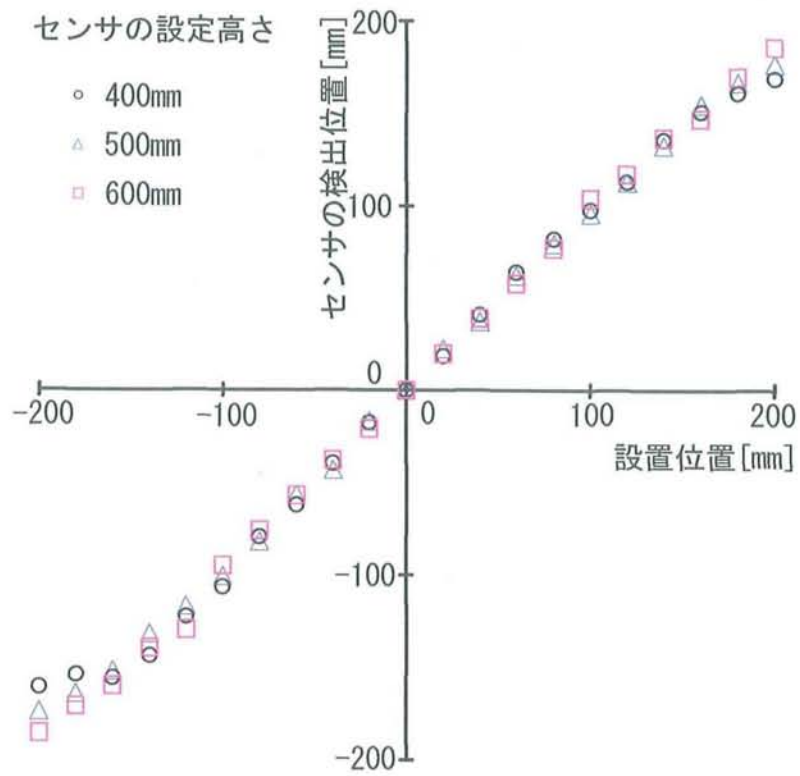


図 4.7 Cモデルの設置位置とセンサの検出位置の関係

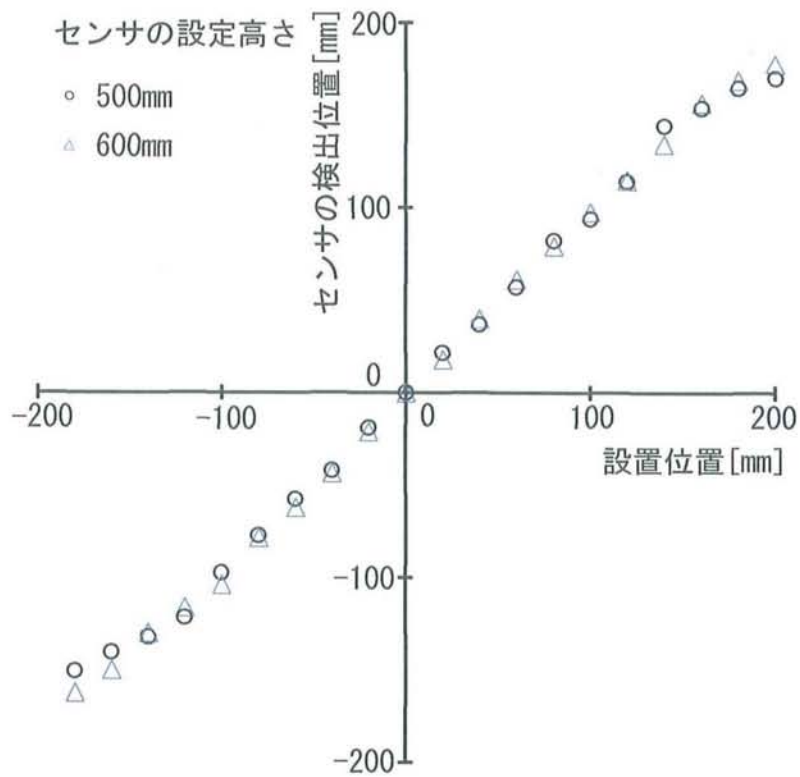


図 4.8 Dモデルの設置位置とセンサの検出位置の関係

表 4.4 作物列センサの検出精度(作物モデル)

設定高さ [mm]	設置位置(±200 mm の範囲) 計測誤差 RMS [mm]			設置位置(±180 mm の範囲) 計測誤差 RMS [mm]		
	400	500	600	400	500	600
モデル B	6.3	4.9	5.1	4.2	2.6	3.5
モデル C	7.2	7.0	6.0	3.8	4.2	4.3
モデル D	—	7.5	7.2	—	5.7	4.1

サの測定範囲の境界からはみ出したことに起因する。また、各図に示すように、いずれのセンサの設定高さにおいても葉の幅が大きく草高が高くなると、センサの検出範囲が狭くなり、センサの誤差の RMS は大きくなる。しかし、3種類の作物モデルの計測誤差の RMS は 5.7 mm 以下であった。

このように、作物列センサの V 字モデルと作物モデルの位置検出精度は、実験の範囲において誤差の RMS はいずれも 6 mm 以下であり、作物列センサとしての計測精度は十分に高いと判断できる。

4.2.2.3 圃場作業を想定した場合の位置検出特性

図 4.9 から図 4.11 に葉の幅 100 mm のモデル B を供試し、圃場模擬走行試験装置を利用して室内で圃場走行を想定した実験結果を示す。これらは、周速度（作業速度）を 0.5, 1.0, 1.5 m/s の 3 段階に変化させ、作物列に正弦波状の左右の変化を与えた場合の作物列センサの位置計測精度である。各図の上図は、作物列の軌跡とセンサが検出した個々の作物モデルの位置検出結果であり、下図はセンサの検出誤差を示す。

いずれの周速度でも、実線で示す作物列の軌跡に対して、センサはその下方を不連続に通過する個々の作物モデルの水平位置を正しく計測していることが明らかであり、作物列の正弦波状の軌跡と丸印で示すセンサの計測値はほぼ一

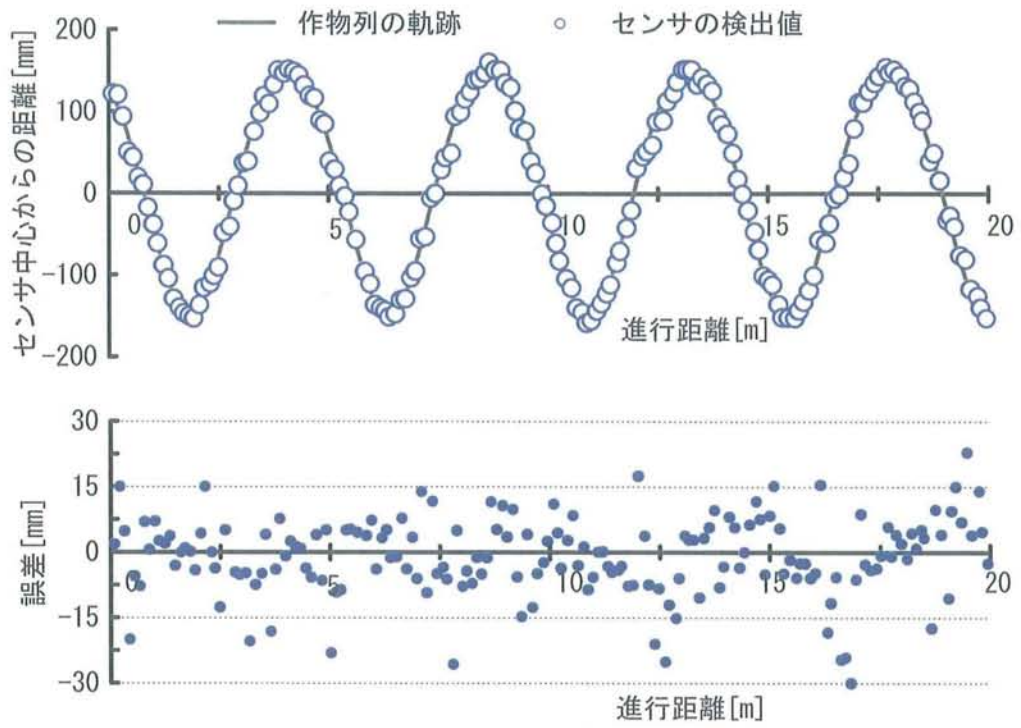


図 4.9 センサの検出精度 (周速度 0.5 m/s, 周波数 0.2 Hz)

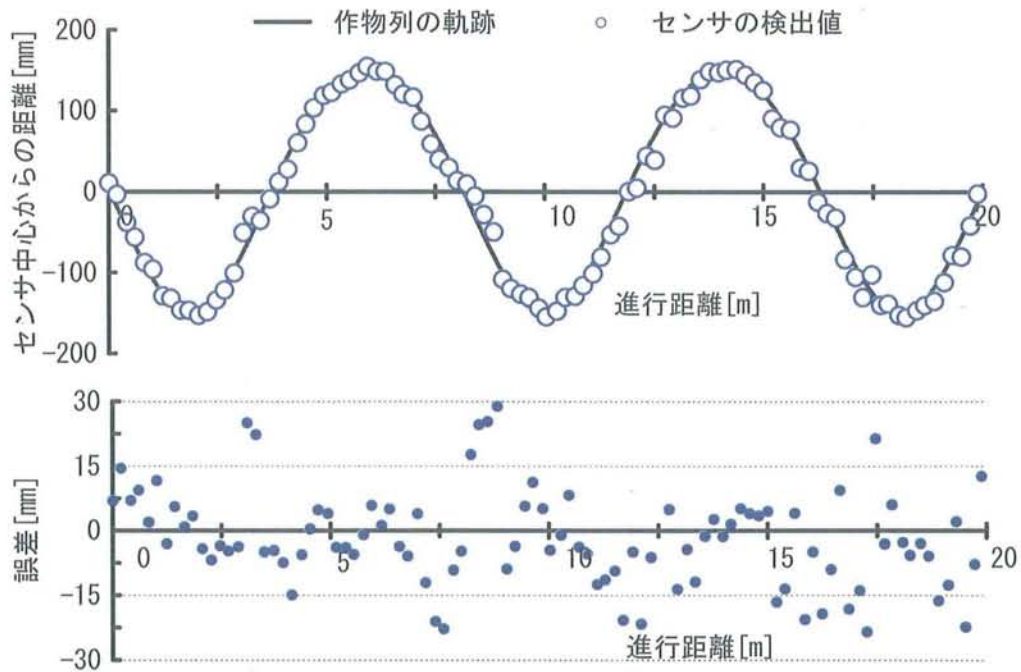


図 4.10 センサの検出精度 (周速度 1.0 m/s, 周波数 0.1 Hz)

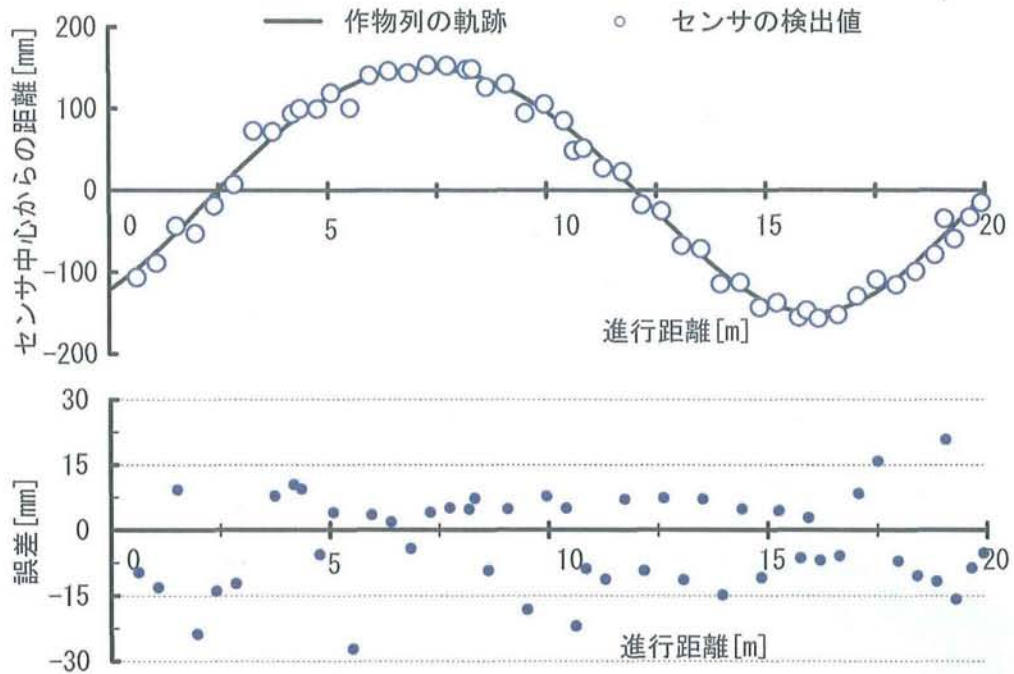


図 4.11 センサの検出精度 (周速度 1.5 m/s, 周波数 0.08 Hz)

致していることが確認できる。下図の検出誤差を見ると、個々の作物モデルの誤差が ± 25 mm を超える場合が見られるものの、全体的に見ると誤差はほとんどが ± 10 数 mm 以内に収まっている。また、センサの検出誤差の RMS は作業速度が低い順に、それぞれ 5.6, 5.8, 5.2 mm であり、実験の作業速度の範囲以内では作物列センサの位置検出特性に影響を与えないと言える。

4.3 圃場実験

4.3.1 実験装置および方法

4.3.1.1 実験装置および計測対象

圃場実験の実験装置は、図4.12に示すように、主にトラクタ(クボタ, ZL1-33)と作物列センサおよびトラクタの走行軌跡を記録する導水管などである。また、計測対象物は図 4.13 に示すように、うね合わせのためのラインマーカ跡と作物

列とした。ラインマーカ跡の場合は4畦用の播種機（タバタ，TJC-4U）でV字溝のラインマーカ跡（幅 60mm，深さ 70mm）を土壤表面上に描き実験に供試し，また作物列の位置計測実験では供試作物として菜豆（大正金時）を本学の精密実験圃場に栽培し，草高が約 120 mm の状態のときに実験に供試した。



図 4.12 供試したトラクタと作物列センサ

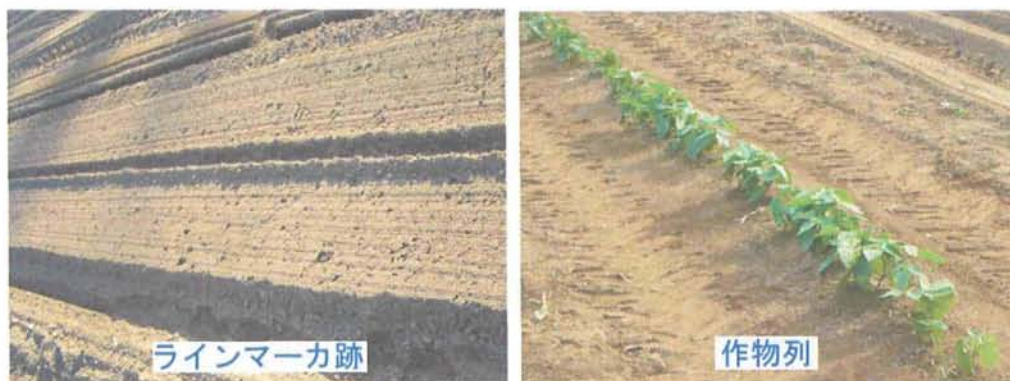


図 4.13 圃場での計測対象物

4.3.1.2 実験方法

圃場で作物列センサの計測精度を評価するために、図 4.12 に示したように作物列センサを地面から 500 mm の高さになるようにトラクタの前部に取り付けて実験を行った。また、実験は図 4.14 に示すように、ラインマーカ跡や作物列に沿って走行させるが、故意に蛇行運転したときのトラクタの軌跡はセンサ横に設置した導水管から地面に水を滴下させて描き、その水滴の軌跡から作物列までの距離を実測してセンサの検出精度を評価した。なお、ラインマーカ跡および作物列の測定区間はトラクタの進行距離を約 20 m とし、トラクタの作業速度は 0.5, 1.0, 1.5 m/s の 3 段階に設定して実験を行った。

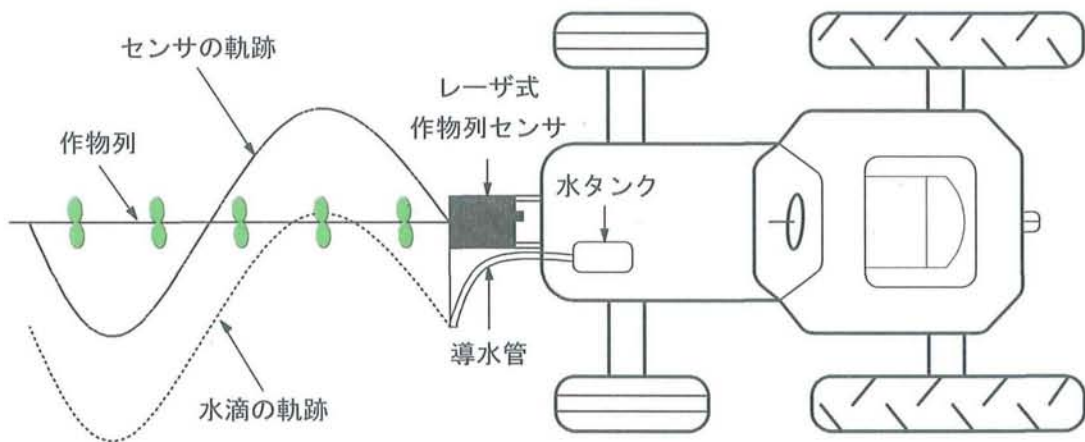


図 4.14 圃場実験による作物列センサの評価法

4.3.2 実験結果と考察

4.3.2.1 ラインマーカ跡の位置計測精度

図 4.15 は、圃場でのラインマーカ跡について、作業速度を 0.5, 1.0, 1.5 m/s の 3 段階に変化させ、作物列センサによる位置検出結果を示し、表 4.5 はそ

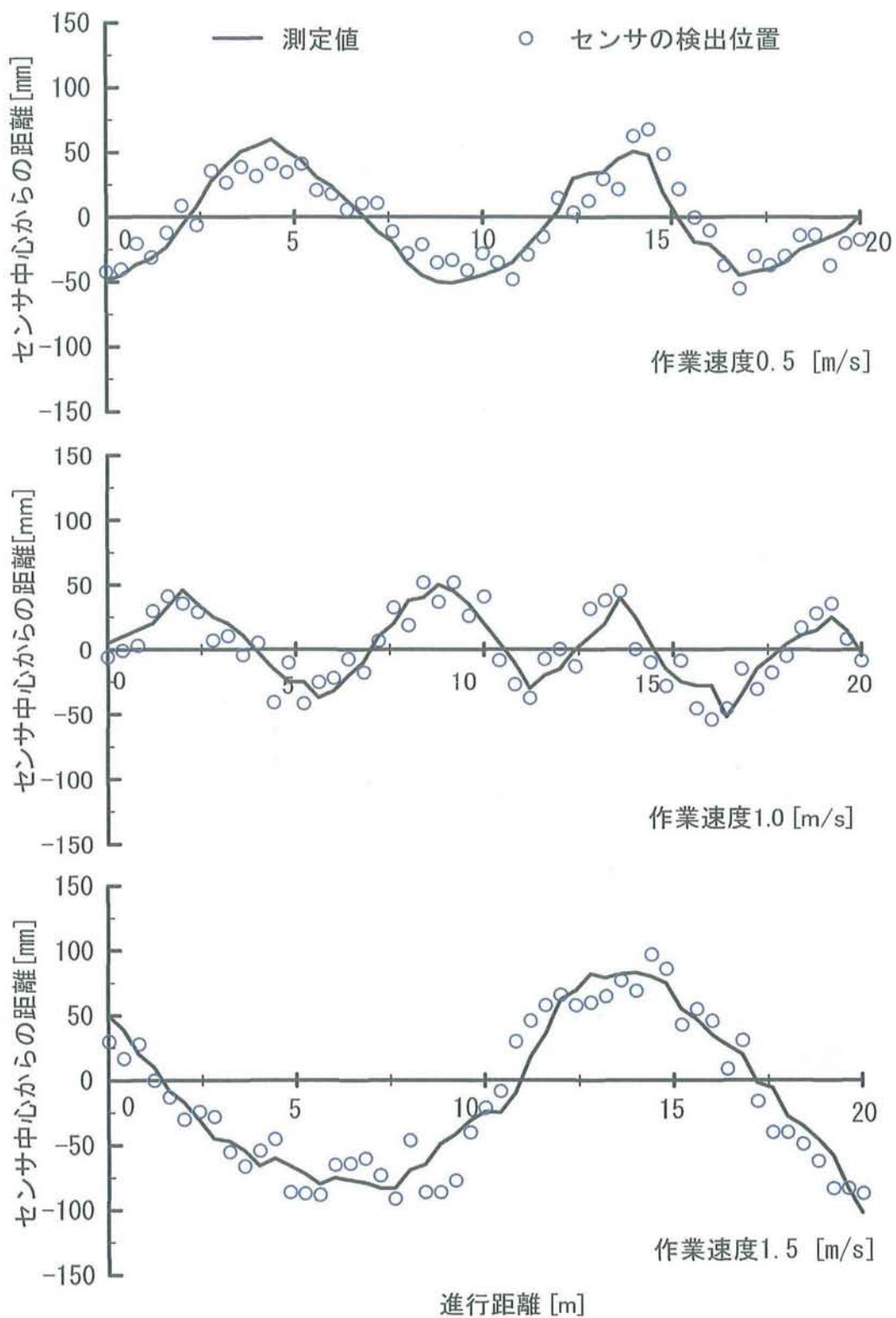


図 4.15 圃場でのラインマーカ跡の計測結果

の計測精度の評価結果を示す。いずれのグラフも横軸は実験を行ったトラクタの進行距離を示し、縦軸は作物列センサの中心を基準にトラクタの進行方向に対する横方向の左右のラインマーカ跡の中心位置を示し、正は進行方向に対して右にずれていることを示す。

表4.5 ラインマーカ跡の検出精度

作業速度 [m/s]	RMS [mm]	変動係数 C_v [%]
0.5	14.5	54.5
1.0	14.0	57.9
1.5	17.6	40.4

上図のトラクタの作業速度を 0.5 m/s に設定して蛇行した場合、図のように実線で示す水滴の軌跡から求めたラインマーカ跡の位置に対して、丸印で示す作物列センサの計測位置は全体的にほぼ一致していることが判断できる。また、このときの進行距離 20 m 間のセンサの位置計測誤差は RMS で 14.5 mm であった。しかし、進行距離 4 m および 13 m 付近では、23 mm および 26 mm の差異が見られた。この原因は土壌表面に大きい土塊が存在し、センサがその土塊を計測した影響で誤差が大きくなったと考えられる。

つぎに、作業速度を 1.0 m/s に設定した場合は、進行距離 5 m と 16 m の付近で、前述の理由により約 30 mm の差異が見られたが、全体的には水滴の位置から求めた実線で示す実際のラインマーカ跡とセンサが検出した位置は中図のようにほぼ一致していることは明らかである。なお、この作業速度での全体のセンサの位置計測誤差は RMS で 14.0 mm であった。

さらに、作業速度が 1.5 m/s の場合、進行距離 10 m の付近では 40 mm の差異が見られ、誤差の RMS は 17.6 mm となった。このように、ラインマーカ跡は通常連続的に土壌表面に描かれるため、計測精度の RMS の違いは小さくなり、作業速

度の変化によるラインマーカ跡の位置検出特性への影響は少ないと考えられる。

以上のように、作物列センサでラインマーカ跡の位置検出を行った結果、室内実験の結果に比べると計測誤差の RMS は 3 倍ほど大きくなったが、描かれる土壌表面の V 字溝の形状や土塊の状態を考慮すると、播種・移植機のうね合わせの位置を検出するセンサとしてはほぼ実用的な計測精度であると判断できる。

4.3.2.2 作物列の位置計測精度

図 4.16 は草高 120 mm の大正金時の作物列について、作業速度を 0.5, 1.0, 1.5 m/s の 3 段階に変化させ、前述のラインマーカ跡の場合と同様に作物列センサによるその作物列の位置計測結果を示し、表 4.6 はセンサの計測精度を示す。

トラクタの作業速度が 0.5 m/s の場合、進行距離 5.5 m および 13 m 付近では、26 mm と 32 mm の差異が見られたが、全体的には水滴の位置から求めた実線で示す実際の作物列とセンサが検出した丸印で示す個々の作物の計測位置はほぼ一致しており、センサの位置計測誤差の RMS は 17.4 mm であった。計測誤差が部分的に大きくなった原因は、本研究の場合、作物の生育位置は土壌表面に株が現れた位置をその水平位置としているが、作物の生育状態によって真上に直線的に生育することはなく、曲がって生育する。一方、作物列センサは上部の作物の葉の位置を計測する原理であるため、作物が曲がって生育した場合、このように誤差が大きくなると考えられる。

表4.6 作物列の検出精度

作業速度 [m/s]	RMS [mm]	変動係数 C_v [%]	決定係数 R^2
0.5	17.4	39.9	0.9848
1.0	22.6	42.7	0.9685
1.5	29.6	58.3	0.9773

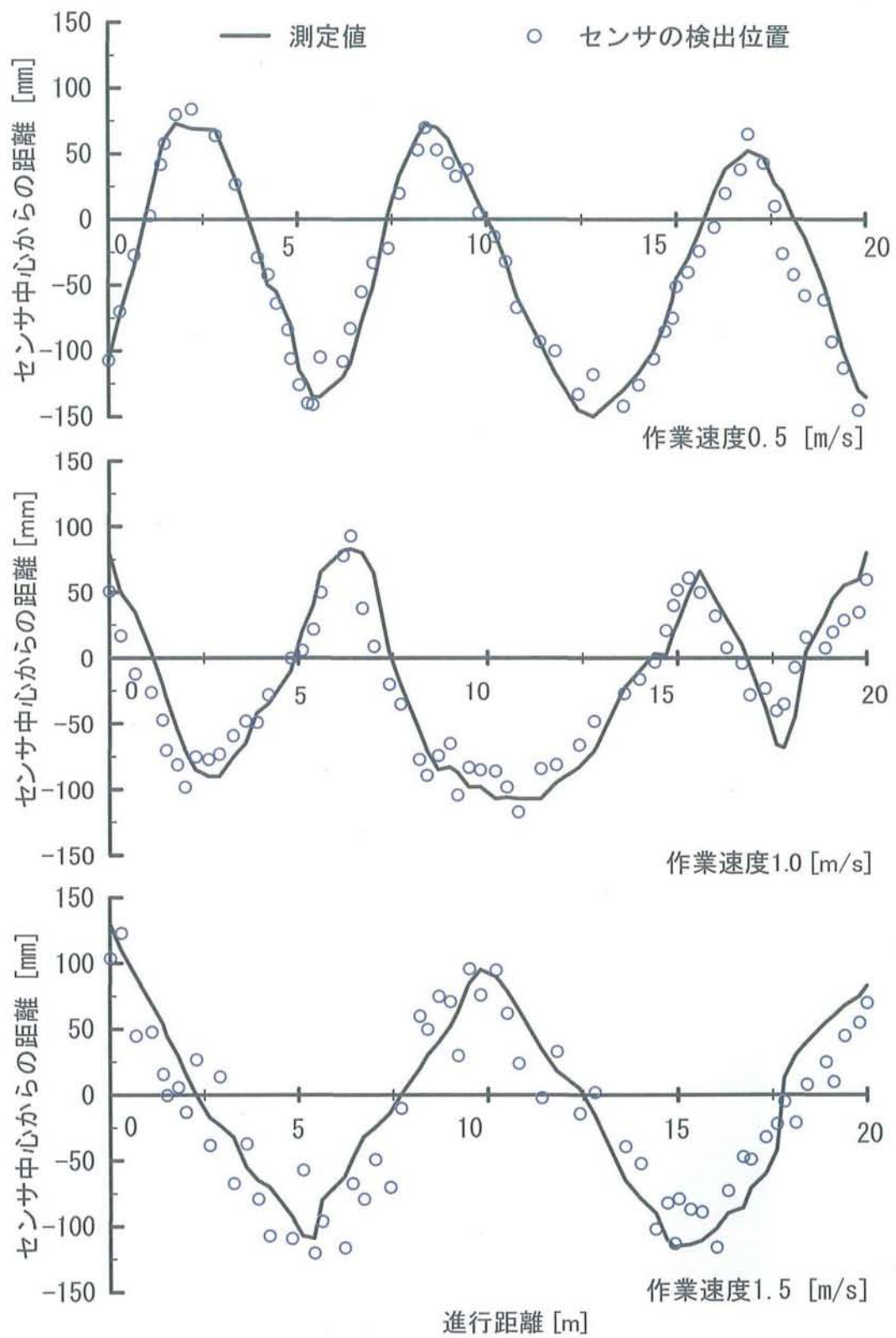


図 4.16 圃場での作物列の計測結果

つぎに、作業速度 1.0 m/s の場合は、進行距離 1 m と 7 m の付近では、センサの計測位置に前述の速度と同様に 39 mm と 40 mm の差異が見られた。しかし、センサの計測誤差は実線の作物列の位置に対して左右にほぼ平均的に変動しており、計測誤差の RMS は 22.6 mm であった。さらに、作業速度 1.5 m/s の条件では、センサの計測誤差の RMS は 29.6 mm となり、作業速度の増加に伴ってセンサの位置計測誤差が若干大きくなる傾向が見られた。しかし、表に示したように実際の作物列の位置とセンサが検出した位置の間には高い直線関係が認められ、両者の決定係数はいずれも 0.968 以上であり、作物列センサは作物列の位置を十分に検出できると判断できる。なお、決定係数とは、回帰直線の当てはまりの良さを示す指標であり、両者の相関係数を 2 乗することで求められる。

以上、圃場実験でのラインマーカ跡および作物列において作物列センサの計測精度を述べたが、両者の誤差を比較すると図 4.17 に示すように、いずれの作業速度においても、ラインマーカ跡の方が作物列の計測結果よりも高い計測精度

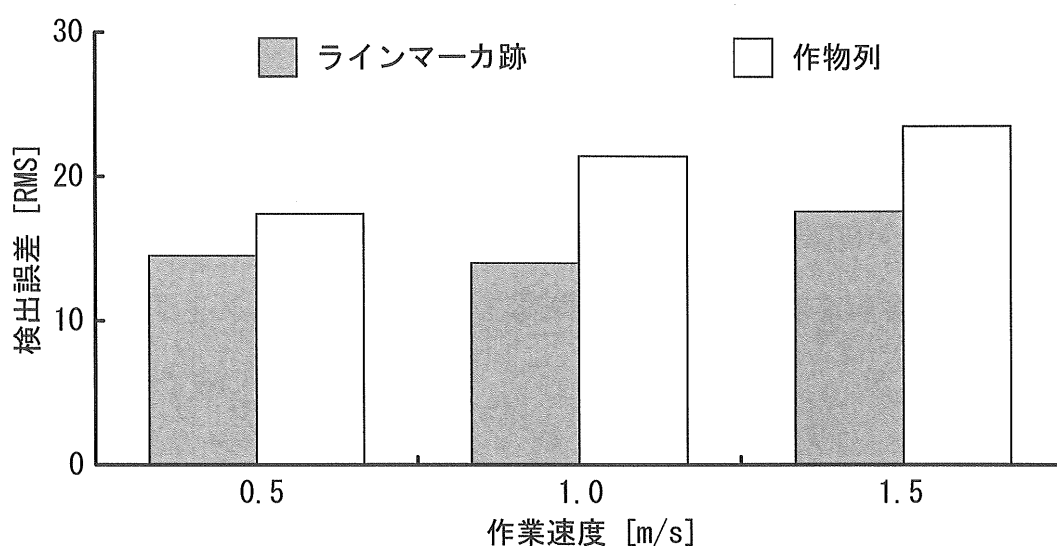


図 4.17 圃場実験での検出精度の比較 (RMS)

を示している。これは、ラインマーカ跡の実験結果でも述べたように、V字溝が連続して土壌表面に描かれることに起因し、このようにトラクタが走行していても、V字溝は進行方向に対して静止状態となり、左右方向のみに水平位置が変化することになるためであると考ええる。

一方、作物列の場合は、作業速度が増加するにつれて、センサの計測誤差は増える傾向を示した。これは、作業速度が速くなると、作物列センサはポリゴンミラーを回転させてトラクタの進行方向に対して断面の方向を走査してその形状を計測することから、進行方向に対する走査間隔が広くなることと、センサの走査軌跡とうね断面方向となす角度（以後、センサの走査角度と称する）が大きくなるために作物列の計測誤差が大きくなったと考えられる。この現象は図 4.18 に示すように、ポリゴンミラーの回転数を一定にした場合、センサの進行速度が 1 m/s から 2 m/s に変化すると、図に示すようにセンサが地面を走査する間隔が 2 倍に広がる。また、作業速度が遅い場合は走査角度が小さくなり、図のように作物が生育している場合、センサは作物の全幅を検出し、その中心位置を作物列の中心として検出する割合が多くなる。しかし、作業速度が増すとセンサの走査角度も大きくなり、作物の中心をレーザ光が通過して正しい中心位置を検出する場合もあるが、図のように作物の両端をレーザ光が走査する割合も多くなる。したがって、2 葉の片方の葉の情報のみで作物の中心位置を算出して作物列を求めるため、センサの検出位置は作物列の中心から離れて算出される割合も多くなり、センサの計測誤差の RMS が作業速度の増加に伴って大きくなったものと推察できる。

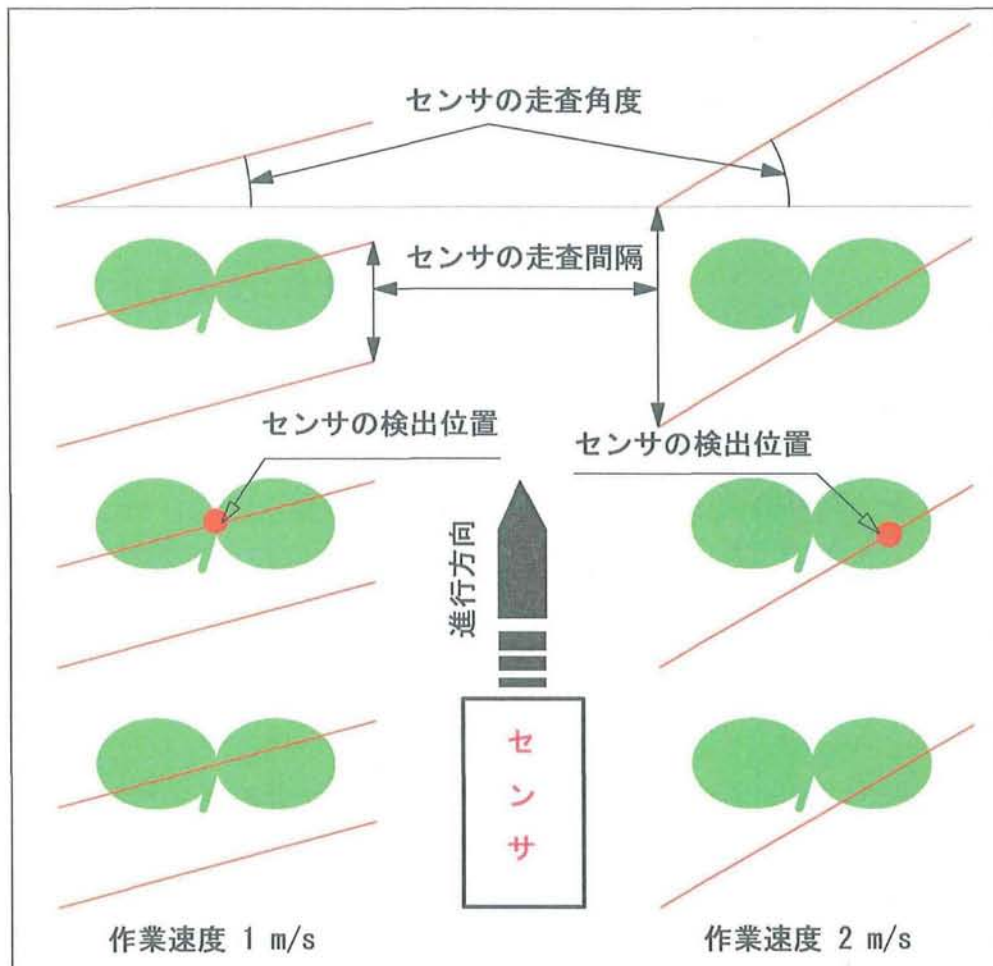


図 4.18 作物列の場合のセンサーの計測精度に及ぼす要因

4.4 本章のまとめ

本章では、前章で開発したレーザ式作物列センサーの位置計測精度について室内実験と圃場実験を実施して評価した。

- 1) 室内実験において、センサーは水平面上に置かれた作物モデルの水平位置をセンサー中心から左右 ± 180 mm の範囲で計測可能であり、V 字モデルと作物モデルを検出した場合の検出誤差 RMS はいずれのセンサーの設定高さにおいてもその最大が 5.7 mm 以下であった。

- 2) 圃場実験において、V字溝のラインマーカ跡を計測した実験では、トラクタの作業速度を0.5~1.5 m/sに設定した場合、センサが検出した位置の誤差のRMSは20 mm以下であった。また、作業速度が増加しても誤差のRMSは大きく変化しなかったことから、ラインマーカ跡を検出する場合にはトラクタの作業速度には影響されないと言える。
- 3) 実際の圃場に作付けした大豆の作物列の検出実験の場合は、トラクタの作業速度が増加するにつれて、センサの検出誤差のRMSは17 mmから29 mmに増加したものの、全体的には作物列センサでその作物列の水平位置を計測することは精度的にも十分であり、作物列センサの有効性が圃場実験でも確認できた。

以上のように、本研究で開発したレーザ式作物列センサはトラクタ用作業機のうね自動追従システムのセンサとして十分に利用可能であると結論づけられた。そこで、つぎの第5章ではうね自動追従システムを実現するための油圧制御機構の開発を行う。

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

5.1 緒言

これまで述べたように、実際のトラクタ作業、特に畑作の播種・移植、中耕除草作業では、作業者がうねに作業機を合わせるために、肉体的にも精神的にも重労働が強いられており、その高精度自動化に対する要望も高い。そこで、前章ではトラクタ用作業機のうね自動追従システムの核となるレーザ式作物列センサを開発し、その概要を述べ、その作物列センサが実際の作物列やラインマーカ跡を十分に検出できることを実験的に明らかにした。

うね自動追従システムを開発する次の段階として、トラクタ用作業機を自動制御するための油圧制御機構の開発が必要となる。本章では、その油圧制御機構を開発し、その構成と基本的な制御特性について説明する。

5.2 トラクタ用作業機のうね自動追従システムの概要

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の基本構想は第1章で述べたように、トラクタの3点リンクヒッチと作業機の上に新たな油圧スライド装置を開発して装着し、その装置によって作業機側をトラクタの進行方向に対して左右に動作させるものである。図5.1に供試トラクタとうね自動追従システムの様子を示す。うね自動追従システムは主に油圧制御機構、レーザ式作物列センサおよび計測制御用コンピュータで構成される。油圧制御機構はコンピュータの指令制御電圧によって作業機をトラクタの進行方向に対して左右に制御する。また、作物列センサはうねの位置情報や作物列の情報を計測し、入出力ボードを介してコンピュータに入力する。制御方式は、コンピュー

ソフトウェアによって算出される位置情報を基に対応する制御電圧を出力する後述のPID (Proportional Integral Derivative) 制御⁶⁵⁾⁶⁶⁾⁶⁸⁾の比例要素の部分を採用した。コンピュータから出力される制御電圧は油圧の電磁弁のスプールの開閉操作を行い、油圧の切換方向と油圧流量を制御し、トラクタ用作業機を高速かつ滑らかにうねに追従させることができる。



図 5.1 供試トラクタとうね自動追従システムの外観

5.2.1 油圧制御機構の概要

開発する油圧制御機構は、主に油圧スライド装置、油圧ポンプ、電磁弁で構成される。以下にそれぞれの機器について述べる。

5.2.1.1 油圧スライド装置

油圧スライド装置は図 5.2 に示すように、固定フレーム、移動フレーム、油圧シリンダで構成され、トラクタのロワーリンクと作業機のロワーリンクヒッチの間に取り付けられる。トラクタのロワーリンクを触れ止めで固定することで、固定フレームはトラクタ本体に固定されるため、油圧シリンダを左右に作動させることにより、そのロッドに取り付けられている移動フレームが固定フレーム上でトラクタ本体と独立した状態で左右に制御できる。これによって、移動フレームのロワーリンクに取り付けられている作業機をトラクタの進行方向に対して左右に移動させることができる。また、シリンダの制御にはコンピュータから電気信号を電磁弁に出力し、その制御電圧の正負によって油圧シリンダに流れ込む作動油の方向を制御する方式を採用した。

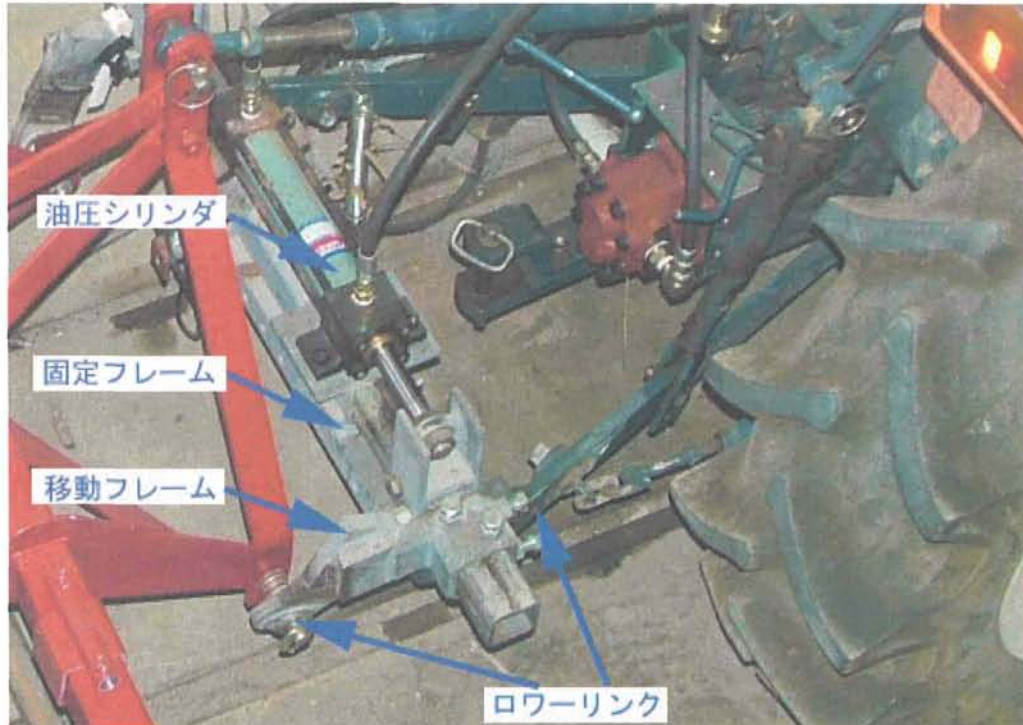


図 5.2 油圧スライド装置の概要

5.2.1.2 油圧シリンダ

本研究で供試した油圧シリンダ（油研工業，CJT140）は市販されているものであり，その主要諸元を表 5.1 に示す。最大ストロークは 200 mm の両ロッド型油圧シリンダであり，最高制御速度は 400 mm/s である。第 2 章で述べた播種・移植，中耕除草作業を行う場合，うね合わせ作業に要求される最大のトラクタ用作業機の左右の制御速度は，トラクタの作業速度が 2 m/s の場合 100 mm/s であるため，この油圧シリンダは十分対応できると考える。

表 5.1 シリンダの仕様

形 式	油研工業株式会社CJT140-LA50B200B-ABD-EKN-2
シリンダ内径	50 mm
ロッド径	18 mm
呼び圧力	14 MPa
最大ストローク	200 mm
使用速度	最高400 mm/s, 最低8 mm/s
出 力	9.43 kN
流量（速度10 mm/s）	0.8 L/min

5.2.1.3 油圧ポンプ

トラクタ用作業機を作物列に追従させるための油圧シリンダの油圧源として，室内実験では，油圧発生ユニット（油研工業，YA-16-B）を利用し，その詳細を表 5.2 に示す。圃場実験では，携帯の不便さや圃場に電源がないことなどの理由で油圧発生ユニットを利用することが困難であり，また今後の圃場作業を考慮して油圧発生ユニットと同等の油圧発生能力を持つギヤポンプ（三星，GPF3N-44-L）を供試した。その詳細を表 5.3 に示す。また，ギヤポンプを駆動するために，トラクタの PTO 軸に図 5.3 に示す自作の変速機を取り付けた。この変速機は供試油圧ポンプの常用回転数がトラクタ PTO 軸の回転数よりも高いことから，PTO 軸回転数を 2.5 倍に増速するように設計して供試した。

表 5.2 油圧発生ユニットの仕様

形 式	油研工業株式会社 YA-16-B-4-1.5-41
押しのけ容積	15.8 cc/rev
最高使用圧力	7.0 MPa
圧力調整範囲	1.2~7 MPa
タンク容量	40 L
電動機出力	1.5 kW×4P
電源電圧	AC 200 V

表 5.3 油圧ポンプの仕様

形 式	MITSUBOSHI GPF3N-44-L
押しのけ容積	44 cc/rev
定格圧力	6.8 MPa
回転数	500~2300 rpm

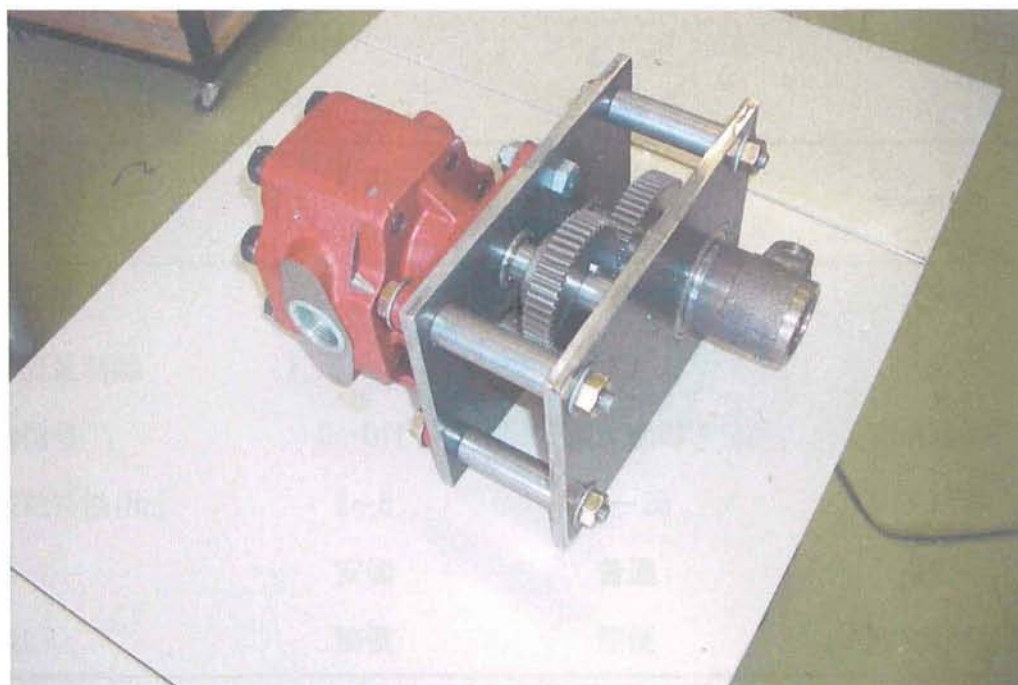


図 5.3 油圧ポンプと PT0 軸変速機

5.2.1.4 電磁弁

作物列センサで作物の水平位置を検出してコンピュータによって油圧制御機構を自動制御する際、電磁式制御弁が必要であり、その電磁式制御弁の選定を行った。なお、電磁弁とは、電氣的駆動弁の一種であり、電磁石（ソレノイド）の磁力を用いてプランジャと呼ばれる鉄製のスプールを動かすことで弁の開閉を行い、流体を通す管での流れの開閉制御に用いられる。

一般に、油圧制御弁は表 5.4 に示すように 3 種類に大別される。いずれも作動油の流動方向の制御は可能であるが、通常の方法制御弁はその制御信号にオンオフ信号を利用し、電磁弁から出力される作動油の流量は制御できないことからアクチュエータの速度制御には不向きである。また、その切換頻度は低く、毎秒約 2~5 回である。これに対して電磁比例方向流量制御弁とサーボ弁は方向制御だけではなく流量も制御でき、しかも高速制御できることから有効である。しかし、サーボ弁は高価であり、しかも取扱いが難しいことから、本研究では電磁比例方向流量制御弁（以後、単に電磁弁と称する）を利用した。

表 5.4 油圧制御弁の特徴

	方向 制御弁	電磁比例方向流 量制御弁	サーボ弁
方向制御	○	○	○
速度流量制御	×	○	○
制御信号	On-Off	電流制御	電流制御
周波数特性[Hz]	2~5	10~25	100~450
価格	安価	普通	高価
取扱い	簡便	簡便	ノウハウが必要

供試した電磁弁（不二越，ESD-G01）は従来の4方向電磁弁に直流比例ソレノイドを採用することにより，方向切換と速度制御の両機能を兼ねた電磁比例弁であり，左右の直流比例ソレノイドに入力する電流によって油圧の方向切換と流量が制御でき，その切換頻度は毎秒25回である。一般に，コンピュータから出力された制御電圧で直接電磁弁を駆動するにはパワーが不足するので，それをあるレベルまでパワー増幅することが必要である。そのため，小形パワー増幅器（不二越，EBA-PD1）を利用した。その特性としては，小さな偏差信号にも応答するように高い増幅率を有し，制御部のソレノイドを駆動するのに十分な出力が得られる。また，パワー増幅器の零点調整で使用する圧力，流量の下限を設定することができ，ゲインの調整で入力信号電圧と出力電流の比率を調整できることから，制御の安定度，応答性を容易に調節できる。なお，供試した電磁弁と小形パワー増幅器を図5.4に示し，それらの仕様を表5.5に示す。

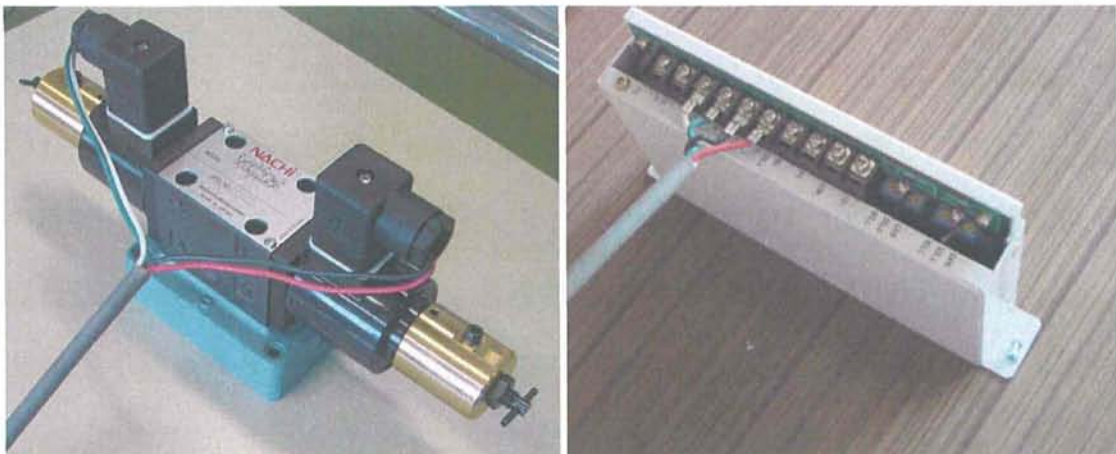


図 5.4 供試した電磁弁（左）と小形パワー増幅器（右）

表 5.5 供試した電磁弁と小形パワー増幅器の仕様

電磁弁		小型パワー増幅器	
型 式	ESD-G01 -C520-12	型 式	EBA-PD1-NW(Z) -D2-10
最高使用圧力	25 MPa	駆動ソレノイド	S0La, S0Lb
定格流量	20 L/min	最大出力電流	900 mA
最大流量	25 L/min	入力電圧	-10~+10V DC
定格電流	850 mA	零点調整(NULL)	0~900 mA
コイル抵抗	20 Ω (20 °C)	ゲイン調整(GAIN)	(0~900 mA)/5 V 入力
ヒステリシス	5%以下	許容周囲温度	0~50 °C
応答時間	0.04 s	駆動対象弁	方向流量制御弁
質 量	2.2 kg	質 量	0.6 kg

5.2.2 油圧制御機構の制御特性

開発した自動追従システムのための油圧制御機構の動作特性は、供試する電磁弁の流量や応答性などによって変化する。特に、本研究で供試した電磁弁は前節で述べたように、作動油の方向と流量を同時に制御できる。その関係は図 5.5 に示すように、入力電流が 400 mA 以上にならないと、作動油の流量はゼロとなり、また入力電流が 800 mA 以上になると流量が最大に達し、油圧シリンダの移動速度は頭打ちとなる。油圧シリンダの移動速度を 100 mm/s で移動させる場合、青い矢印線に示すように、電磁弁に出力する電流は約 600 mA である。この電流を発生させるための電圧はパワー増幅器のゲインの調整によって変化するが、実線に示すようなゲインに設定した場合、制御電圧は 4.2 V になる。この関係を求めるため、制御電圧と油圧シリンダの移動速度の関係を求めるための予備実験を行った。

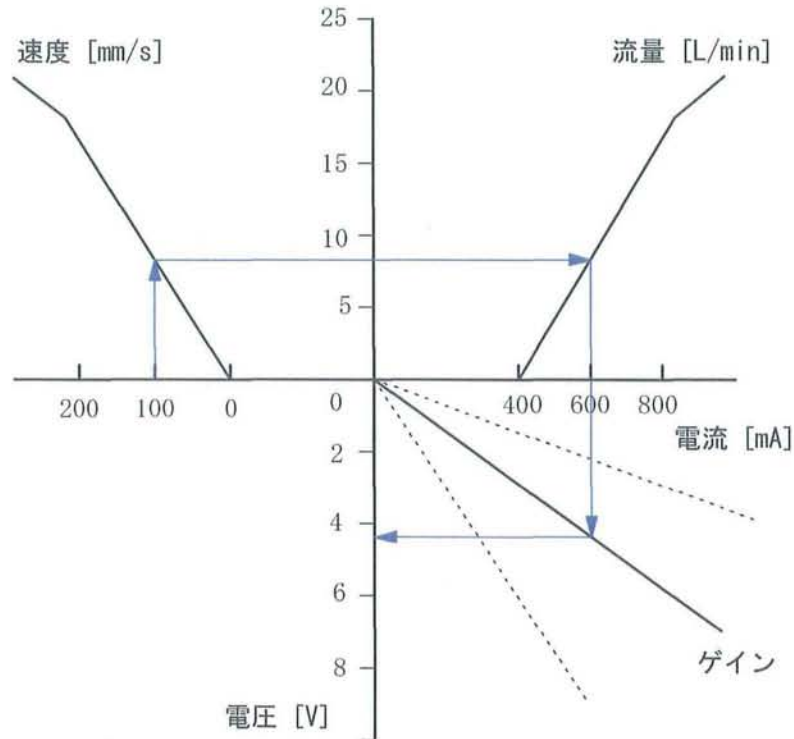


図 5.5 制御電圧と電磁弁の流量特性

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

電磁弁の流量特性の測定方法は、図 5.6 に示すようにコンピュータから、 ± 10 V の範囲で 1 V ごとに制御電圧を出力し、小型パワー増幅器を介して、油圧シ

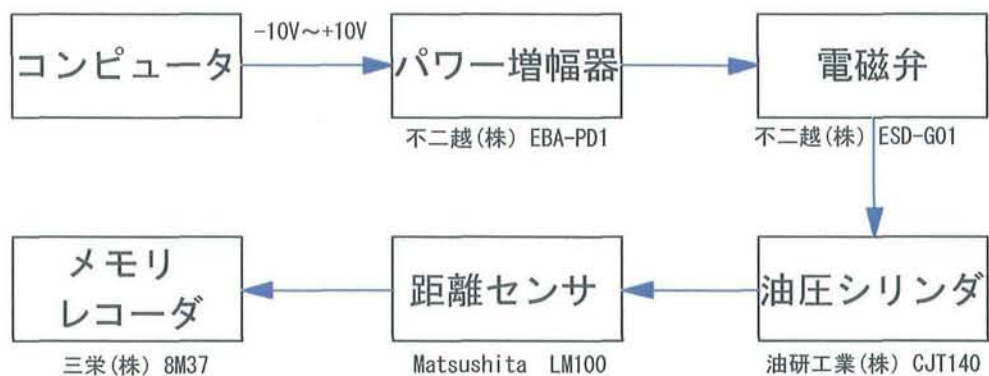


図 5.6 制御電圧と油圧シリンダの移動速度の測定方法

リンダを無負荷状態で動作させる。また、油圧シリンダの移動距離はレーザ距離センサで計測し、メモリレコーダで記録して求めた。

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

図5.7は電磁弁へ入力した制御電圧と油圧シリンダの移動速度の関係を示す。制御電圧が正の場合は、油圧シリンダのロッドは右に動き、負の場合は左に動作していることを示す。全体的に見ると、制御電圧の正負によって油圧シリンダの動作する方向が変化するが、 ± 1 V以内に電磁弁が動作しないオフセットが存在する。また、制御電圧が ± 8 Vを超えると、制御電圧がそれ以上高くなっても、油圧シリンダの移動速度が比例的に増加しない特性を示した。しかし、制御電圧を $\pm 1 \sim \pm 8$ Vに設定した場合、油圧シリンダの制御速度がほぼ直線的に増加する特性を示すことが明らかになり、線形制御が可能になる。

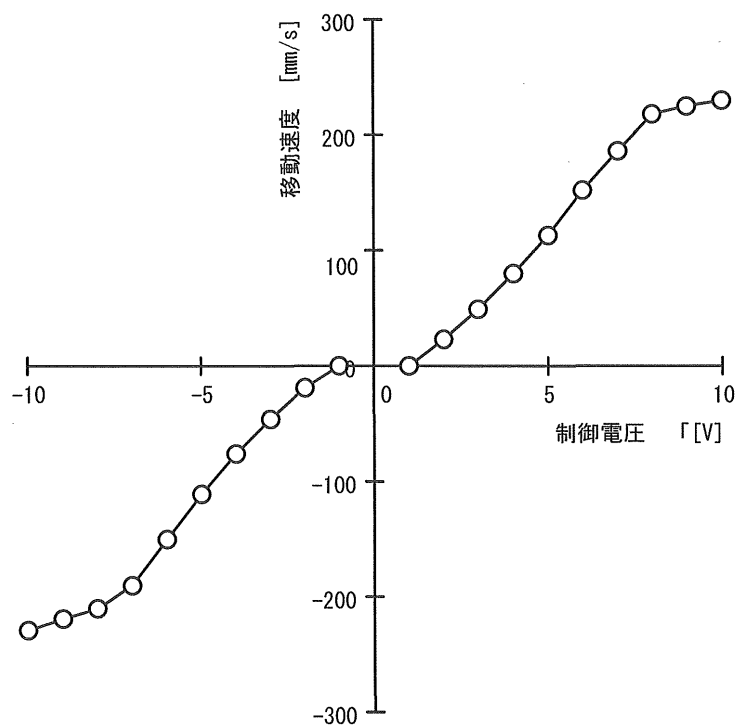


図 5.7 制御電圧と油圧シリンダの移動速度

また、図 5.8 は、図 5.7 を基に 5.1)式により電磁弁の流量特性を求めたものである。制御電圧が±8 V 以上になると流量は 18 L/min 程度で頭打ちになり、電磁弁の仕様書とほぼ同じ特性を示し、この制御機器構成で本油圧制御機構は問題なく作動していることが確認できた。

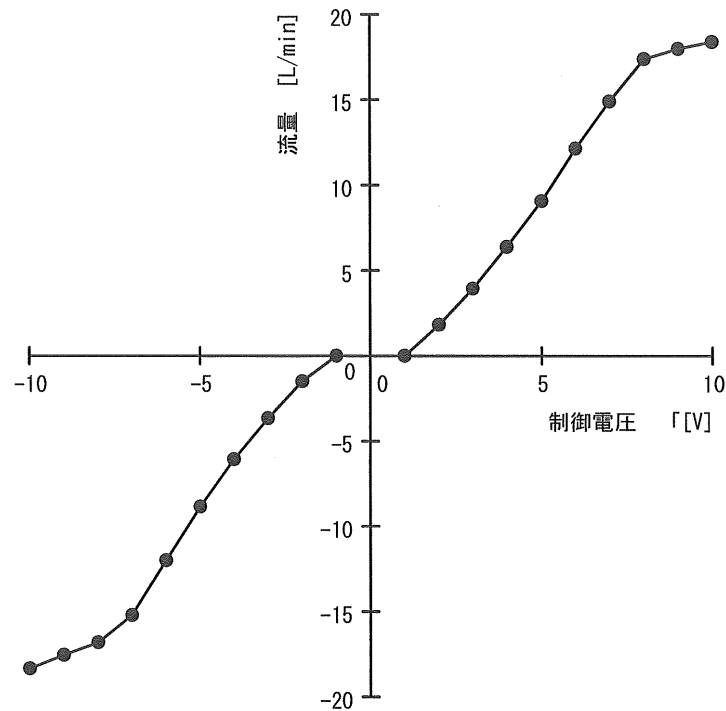


図 5.8 電磁弁の流量特性

$$\text{油圧流量[L/min]} = \frac{\text{シリンダ断面積[cm}^2\text{]} \times \text{流速[mm/s]}}{600} \quad 5.1)$$

5.2.3 指令出力装置の概要

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

指令出力装置の全景を図 5.9 に示す。これは、制御用コンピュータとデジタル入出力インターフェースボードおよび D/A 変換ボードで構成される。制御用

コンピュータは第3章で述べた計測用コンピュータと同様であり、作物列センサによって制御目標の位置情報を取得して制御量を決定し、制御電圧を出力するものである。また、D/A変換ボード（CONTEC, DA12-16）は電磁弁を駆動する小形パワー増幅器にアナログ信号を出力する装置である。前述のように、トラクタ用作業機を自動制御する際、電磁弁を利用したが、本研究で供試した電磁弁は、コンピュータからのデジタル信号で直接制御できないため、D/A変換ボードを介してデジタル信号をアナログ信号に変換し、制御電圧を出力した。その詳細を表5.6に示す。なお、図に示される電光表示ボードは作物列センサが検出している作物列の位置を視覚的にモニタできるようにしたものである。作物列センサが計測した作物列の水平位置がセンサ中心から±10 mm（後述の不感帯が10 mmの場合）以内であれば、ボードの中央にある緑のLEDが点灯し、それ以上の場合には、その水平位置に応じたLEDが点灯するようにした。

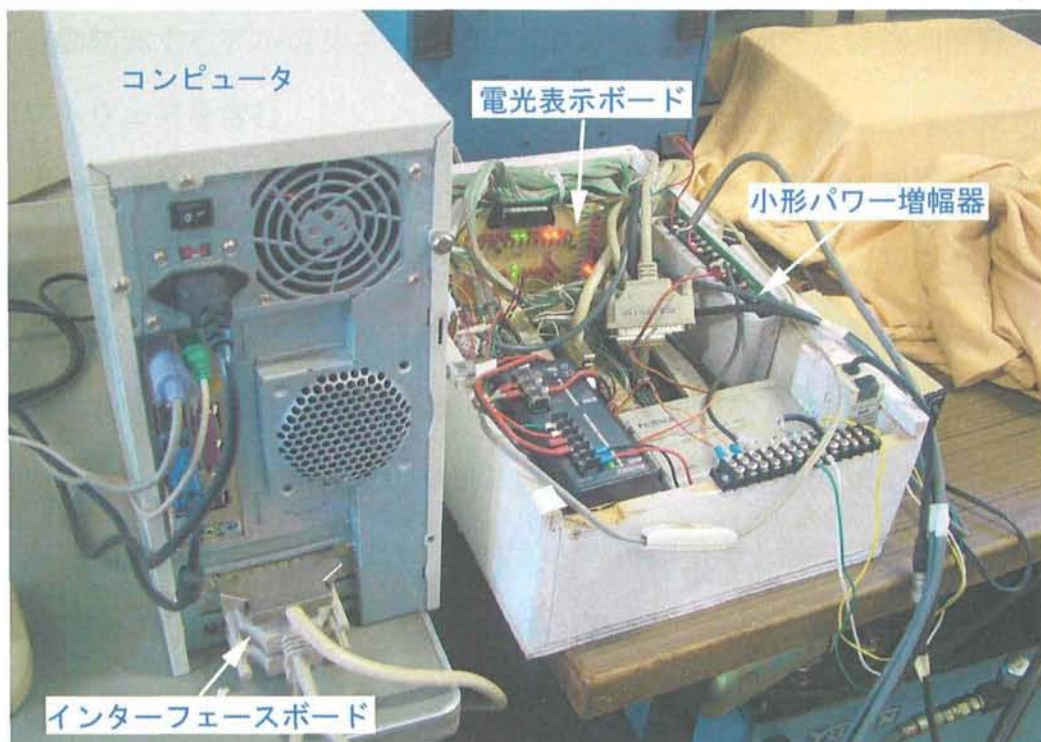


図 5.9 制御用コンピュータとインターフェースボードの外観

表 5.6 アナログ出力ボードの主要諸元

形式	CONTEC DA12-16 (PCI)
出力形式	シングルエンド出力 16 チャンネル
出力レンジ	非絶縁ユニポーラ 0~+10 V
アナログ入力抵抗	1 M Ω 以上
変換速度	最大 10 μ sec/ch
非直線性誤差	± 3 LSB
消費電流	DC5V 1400 mA (最大)
外部回路電源	DC12~24 V ($\pm 15\%$) (1 点あたり 4 mA/12 V~8 mA/24 V)
使用条件	温度 0~50 $^{\circ}$ C 湿度 20~90% (ただし, 結露しないこと)

5.2.3.2 制御用ソフトウェア

制御用ソフトウェアは、作物列センサで計測した作物列の位置情報に基づいて油圧制御機構に取り付けられている作業機をトラクタの進行方向に対して左右に自動制御するアルゴリズムで構成され、第 3 章で述べた作物列位置の計測用ソフトウェアを含む。

まず、この制御プログラムは、トラクタ用作業機を安定的に制御するために不感帯と移動平均法を採用している。不感帯とは、設定値に対して上下に許容する範囲を与えることであり、制御誤差がその範囲内では制御信号を出力しないことを意味し、本研究ではその不感帯の幅を変更できるようにした。一般に、制御を行う場合、制御目標との制御誤差はゼロであることが求められる。しかし、本追従システムでは、ほんのわずかな制御誤差でも制御信号を出力すると制御が頻繁に行われ、トラクタ用作業機が過度に左右に移動して振動が生じ、制御が不安定になる。そこで、不感帯を設け、わずかの制御誤差では制御せず、ある程度制御目標から離れた時点で制御信号を出力することで、制御の安定性を向上させた。

また、作物列センサはトラクタの走行に伴って作物列の株ごとの位置情報を順次計測するが、移動平均法はその個々の位置情報を順次 n 個分加算して平均値を求める方法である。この方法を本研究の追従システムに採用することによって、急激な株の左右の変動があっても、作物列計測のデータが平滑化されて安定的な制御が得られると考えられた。

追従システムの滑らかで迅速な制御を得るために、PID 制御の比例要素の部分を採用した。PID 制御は、フィードバック制御の一種であり、入力値の制御を出力値と目標値との偏差を取り、その積分および微分の 3 つの要素によって制御を行う方法である⁶⁶⁾。その中の比例要素によって、作物列センサが計測したセンサ中心から作物列までの水平距離に応じて制御電圧を変化させて出力するものであり、その偏差すなわち制御誤差が大きいほど油圧シリンダの制御速度を速くして制御目標に迅速に制御させるものである。

つぎに、本研究で開発した制御ソフトウェアのアルゴリズムについて説明する。図 5.10 は開発したうね追従制御アルゴリズムのフローチャートを示す。図のように、作物列センサが計測したセンサ中心から作物列までの水平距離が予め設定した不感帯以上になった場合、制御電圧の正負と大きさを決定し、電磁弁にその制御電圧を出力する。それによって、トラクタ用作業機は油圧制御装置によってトラクタの進行方向に対して左右に移動し、制御目標の作物列に追従するように制御される。

このように、作物列センサが計測した制御誤差が不感帯以上であればその誤差に応じた制御電圧が油圧制御装置の電磁弁に出力され、その正負によって方向を制御し、電流の大きさによって制御速度を決定する。本研究では、これら一連の制御方法でトラクタ用作業機をうねに自動追従制御できるようにし、次章の第 6 章では室内実験および圃場実験でその制御特性を評価する。

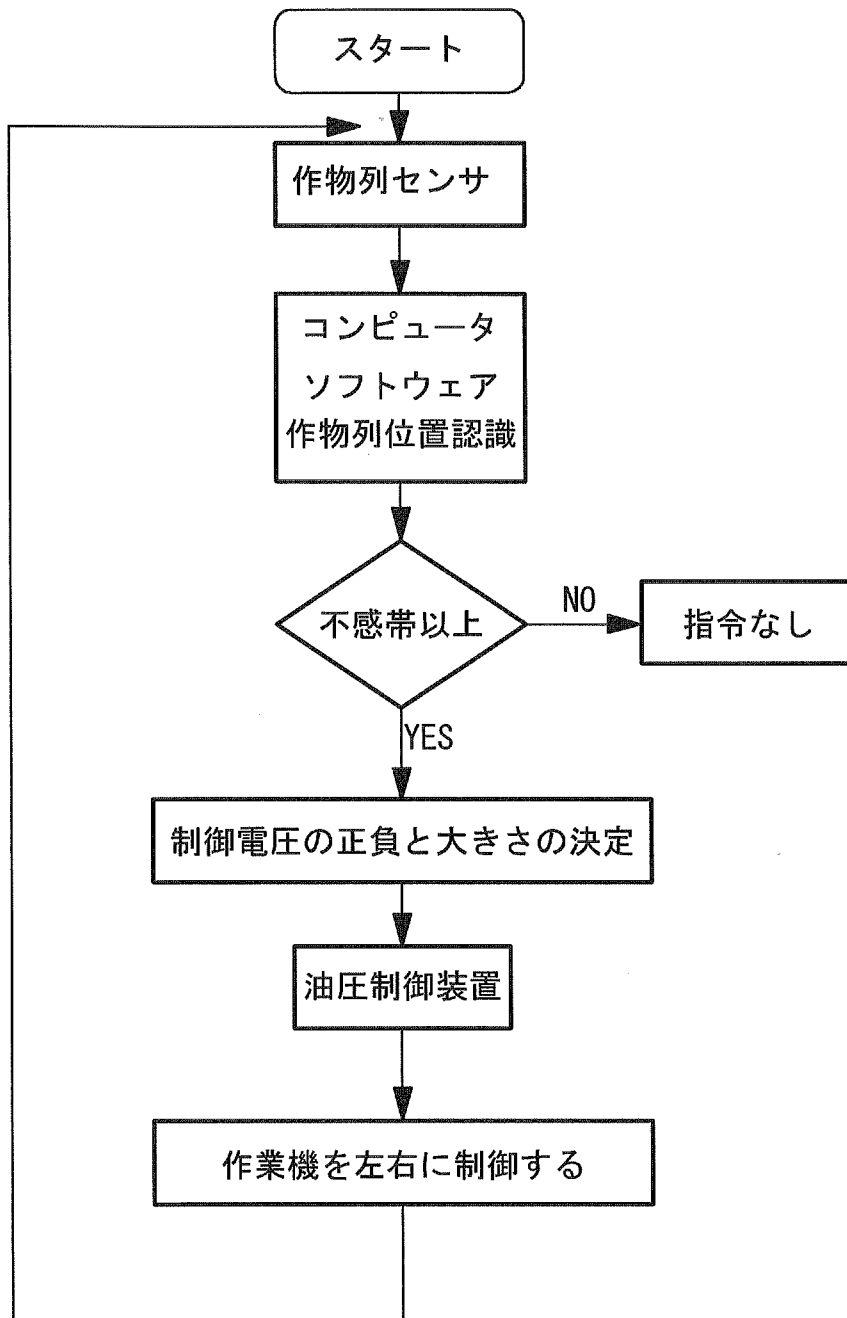


図 5.10 制御のアルゴリズムのフローチャート

5.3 本章のまとめ

本章では開発した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概要とその基本的な油圧装置の制御特性について述べた。本研究の油圧制御機構は主に油圧スライド装置，油圧ポンプ，電磁弁，計測制御用コンピュータおよび制御ソフトウェアで構成される。

- 1) 油圧スライド装置はトラクタのローリンクと作業機のローリンクヒッチの間に取り付けられ，油圧シリンダによって作業機を左右に移動させるものである。
- 2) 油圧制御機構の制御特性は制御電圧の正負によって，動作方向を制御し，電流の大きさによって制御速度を変えることができる。なお，制御電圧を $\pm 1 \sim \pm 8 \text{ V}$ の範囲に設定すると，制御電圧と油圧シリンダの移動速度は正比例関係となり，線形制御が可能となった。
- 3) 本研究で開発した制御ソフトウェアは，トラクタ用作業機のうね追従制御を滑らかにかつ迅速に行うためにPID制御の比例要素の部分を基本とし，さらに制御の安定性を向上させるために不感帯処理法や移動平均法などを採用した。