

## ブームスプレーヤにおける噴霧高さ制御の応答性評価

佐藤 禎 稔

畜産環境科学科草地畜産機械学講座

### 1. 目 的

北海道の畑作地帯の防除作業には、1950年代後半からブームスプレーヤによる液剤散布が普及した。畜力式や初期のトラクタ用スプレーヤの散布幅は6m程度であり、圃場の起伏や機体のローリングによる噴霧高さの変動やそれによる散布むらはそれほど問題にはならなかった。しかし、近年になってトラクタ直装式ブームスプレーヤの散布幅が10mから18mに拡大したために噴霧高さの変動が大きくなり、散布むらやブームが作物に接触するなど作業精度を低下させたり、スプレーヤの操作が困難になっている。

これまでに、ブームスプレーヤ作業の精度向上と省力化を目的として、超音波センサとマイクロコンピュータで構成されるブームスプレーヤの噴霧高さ自動制御装置を開発した。さらにトラクタのローリングに対しても制御精度を向上させるために、トラクタ前輪の上下動から後輪通過時に起きる機体のローリングを事前に感知し、機体が傾く直前に左右ブームの高さを修正するローリング予測制御法を完成させた。そこで本研究は、開発した噴霧高さ自動制御装置の応答性と制御精度を実験的に評価し、本制御装置の実用性について検討することを目的とした。

### 2. 方 法

#### 1) 実験装置

供試機は左右根元の第1、左右先端の第2および中央ブームの5本で構成される散布幅15mのトラクタ直装式両竿形ブームスプレーヤであり、油圧シリンダによって各ブームを手動調節できる国産機である。自動化のための主な改造点は油圧回路の左右独立化と油圧ポンプの吐出量増大および手動操作弁を電磁弁に交換したことであり、これに噴霧高さを検出する5組の超音波センサと噴霧高さ自動制御装置を追加した。制御装置は8ビットのマイクロプロセッサで構成され、プログラム容量は機械語で4kバイトであり、ROM化して制御装置に組み込んだ。

噴霧高さを超音波センサで検出して各ブームを制御する超音波方式の制御法は、予めブームの高さ変化量と油圧シリンダの伸縮量の関係を求めておき、設定高さとの偏差に応じた電磁弁作動時間を演算して制御出力を決める方法である。また、トラクタのローリングを予測してブームを制御するローリング予測制御法は、傾斜計または変位計により前車軸のロール角を感知して後輪通過時のローリングで起きる噴霧高さの変化量を予測し、これと超音波センサが検出した噴霧高さを加算してブームを制御するものである。

## 2) 実験方法

超音波方式の噴霧高さ制御法の応答性評価実験は、散布位置が地面から作物へ移行したり、急に作物の草高が変化するなどの場合を想定したステップ応答実験と噴霧高さが連続的に変化する場合に相当する周波数応答実験を行い、基本的な動特性を求めた。ステップ応答実験は各ブームの高さ検出位置にステップ状入力の高さ変化量 20~80 cm の外乱を与えた。周波数応答実験は地面の高さ変化にならった模擬地面を単振動させ、周波数 0.013~0.45 Hz、全振幅 40, 60, 80 cm の正弦波状の外乱を与えた。

実作業での制御特性を把握するためにブームスプレーヤ作業時の調査結果をもとに、機体に作用するローリングを実験圃場に再現して噴霧高さの制御精度と実用性を評価した。実験は平坦な圃場のトラクタ走行路面上、機体が最大  $10 \times 10^{-2}$  rad ローリングして第 2 ブーム先端の高さが約 70 cm 変化する条件を設置した。作業速度は 0.5~2 m/s までの 5 段階とし、無制御、超音波方式、傾斜角および相対角方式のローリング予測制御法の 4 条件で実験を行った。いずれの実験でも噴霧高さは制御に使われている超音波センサの出力を並列に取り出して解析した。

## 3. 結果および考察

### 1) ステップ応答実験

第 1 および第 2 ブームは粘性減衰のある 1 自由度振動系の過渡現象が見られた。ステップ状入力の高さ変化量が 40 cm のときで、むだ時間は第 1 ブームで 0.6 sec、第 2 ブームで 0.6 sec、中央ブームで 0.5 sec であり、立ち上がり時間はそれぞれ 0.4, 1.1, 2.9 sec、整定時間は 3.7, 2.9, 3.9 sec であり、急激な噴霧高さの変化に対してブームはすばやく応答する。制御間隔は供試電磁弁の切り替え頻度の関係から 0.5 sec 以上に制約されるが、制御間隔が短いほど各ブームの立ち上がり時間と整定時間は二次曲線的に減少する。また、立ち上がり時間と整定時間は入力される外乱の大きさに比例して増加する。

### 2) 周波数応答実験

噴霧高さが正弦波状に変化する場合、制御誤差が不感帯幅を越えるたびに、制御装置が電磁弁を制御するためにブームは階段状に動作する。入力の周波数が 0.1 Hz 以下ではいずれのブームも不感帯幅 (第 1 ブームと中央ブームは  $\pm 4$  cm、第 2 ブームは  $\pm 6$  cm) 以内の標準誤差で追従し、ゲインのピークが現れる周波数は 0.1~0.3 Hz であり、0.3 Hz 以上ではゲインが次第に低下し、噴霧高さの変化に対してブームは十分に追従できなくなる。位相遅れは入力される全振幅が小さいほど少なく、各ブームとも周波数が 0.1 Hz 以上になると位相角はほぼ直線的に増加した。全振幅が 40 cm の場合、ブームが設定高さに対して制御目標の許容範囲  $\pm 15$  cm 以内で制御される最大周波数は第 1 ブームで 0.24 Hz、第 2 ブームで 0.27 Hz、中央ブームで 0.16 Hz であり、ブームスプレーヤ作業時の実態調査で明らかとなった噴霧高さの変動成分を減少させる必要がある路面周波数をほぼ満足する。

### 3) 圃場実験

超音波方式の噴霧高さ制御の場合、機体のローリングが噴霧高さを変化させる原因となるが、制御装置によってブームをほぼ設定高さに維持することができた。作業速度 0.5~1.5 m/s の実験範囲

では無制御に比べて制御誤差を 45~25% 低下させることが可能となり、作業速度約 1 m/s 以下の条件では噴霧高さ制御の効果は十分に認められ実用性も高い。しかし、作業速度 1 m/s 以上で利用する場合、制御効果は認められるものの、機体に作用するロール角速度が  $5 \times 10^{-2}$  rad/s 以上となるために、噴霧高さは一旦機体のローリングに比例して変化した後、ブーム制御が開始されることから超音波方式の噴霧高さ制御法だけでは機体のローリングに対して制御遅れが生じる。

一方、ローリング予測制御法は事前にトラクタの後輪通過時に起きるローリング量を感知してその予測された噴霧高さの変化量を修正する制御信号を出力し、トラクタが傾く直前にブームを制御することから超音波方式のような制御遅れは見られず、作業速度 1 m/s 以上の条件でも良好にブームを制御することができた。コンクリート路面にローリングを発生させるブロックを設置した予備実験の結果では、機体に作用するロール角速度が  $6.5 \times 10^{-2}$  rad/s 以下で、ローリング予測制御法の制御精度は超音波方式に比べて第 1 ブームで 46~62%、第 2 ブームで 11~49% 向上した。圃場実験の作業速度 0.94 m/s の条件では、ロール角速度の最大値が  $5 \times 10^{-2}$  rad/s 以上になり、無制御の第 2 ブームの高さは噴霧高さの許容範囲  $\pm 15$  cm 以内に全測定点の 76% が入るにとどまり、噴霧高さ制御の必要性が認識された。しかし、超音波方式では許容範囲に 87% が入り、さらにローリング予測制御法の傾斜角方式では 95%、相対角方式では 98% 以上の値を示し、制御精度が大幅に向上した。仮に、噴霧高さの測定点が許容範囲に 85% 以上入れば良いとすると、ローリング予測制御法は作業速度を約 2 m/s まで高められると判断できる。なお、ローリング予測制御法の相対角方式はトラクタ前車軸のロール角検出精度が高いことから傾斜角方式に比べて約 10% 制御精度が高くなるが、後者はセンサの取り付けや計算方法が簡便であることを考慮すると、傾斜角方式のローリング予測制御法はより実用性が高いと結論付けられる。

以上のように本研究は、ブームスプレーヤの作業精度と操作性の向上を目的として噴霧高さを均一化するスプレーヤの噴霧高さ自動制御装置を開発した。各ブームに超音波センサを取り付けてブームを制御する超音波方式は機体のローリングに対して若干の制御遅れが見られるものの、作業者のブーム調節を不要にし、簡便な噴霧高さ制御法としての効果が期待できる。また、トラクタのローリングを予測してブームを制御するローリング予測制御法はほとんど制御遅れが見られず、高い応答性と作業精度を示すばかりか、作業速度を高めて散布能率を向上させることも可能にした。したがって、ブームスプレーヤの散布幅が拡大する傾向にあるなかで、本研究の噴霧高さ制御法は防除作業改善のための有効な技術手段となる。