

二段ベルト式搬送機構による

野菜の播種間隔精度向上に関する研究

筑波大学大学院

生命環境科学研究科

先端農業技術科学専攻

博士（農学）学位論文

松 尾 健 太 郎

目 次

量記号一覧	iv
第1章 序論	1
1.1 研究の背景	2
1.1.1 日本の農家人口と就業構造の変化	2
1.1.2 露地野菜生産の動向	2
1.1.3 野菜の直まき栽培を取り巻く現状	2
1.1.4 市販されている野菜用播種機とその特徴	4
1.2 既往の研究成果	5
1.2.1 播種間隔の精度向上に関する研究	5
1.2.2 間引き作業の簡略化に関する研究	6
1.3 本研究の目的と構成	7
第2章 ベルト式播種機構において播種間隔精度を低下させる要因の 説明	18
2.1 はじめに	19
2.2 高速度カメラによる播種間隔の推定	19
2.2.1 播種間隔の測定方法	19
2.2.2 試験方法および測定項目	19
2.2.3 結果および考察	21
2.3 種子を取り出されて地面に着地するまでの挙動の解析	21
2.3.1 ベルト式播種機の特徴	21
2.3.2 試験方法および測定項目	21
2.3.2.1 放出直後の挙動	22
2.3.2.2 種子誘導管に種子が衝突した時の挙動	22
2.3.2.3 地面に着地する直前の挙動	23
2.3.3 結果および考察	23
2.3.3.1 放出直後の挙動	23

2. 3. 3. 2	種子誘導管に種子が衝突した時の挙動	24
2. 3. 3. 3	地面に着地する直前の挙動	25
2. 4	シミュレーションモデルによる種子の挙動の解析	26
2. 4. 1	種子の落下軌跡の推定方法	26
2. 4. 2	結果および考察	29
2. 5	まとめ	30
第3章	二段ベルト式播種機の開発	55
3. 1	はじめに	56
3. 2	二段ベルト式播種機の概要	56
3. 3	定置試験における播種間隔精度	57
3. 3. 1	試験方法および測定項目	57
3. 3. 2	結果および考察	59
3. 4	圃場試験における播種間隔精度	60
3. 4. 1	試験方法および測定項目	60
3. 4. 2	結果および考察	60
3. 5	まとめ	61
第4章	間引き作業簡易化のための二段ベルト式狭条点播機の開発	72
4. 1	はじめに	73
4. 2	狭条点播方法の概要	73
4. 3	二段ベルト式狭条点播機の概要	73
4. 4	二段ベルト式狭条点播機における種間隔精度および間引き作業の短縮化	74
4. 4. 1	試験方法および測定項目	74
4. 4. 2	結果および考察	75
4. 4. 2. 1	苗立ち精度	75
4. 4. 2. 2	収穫物の揃いおよび収量	76
4. 4. 2. 3	間引き作業時間	77
4. 5	まとめ	77

第5章 総括	93
5.1 直まきする野菜栽培の現状と間引き作業の簡略化のための技術的 課題の現状	94
5.2 ベルト式播種機構において播種間隔精度を低下させる要因 の解明	95
5.3 二段ベルト式播種機の開発	96
5.4 間引き作業簡易化のための二段ベルト式狭条点播機の開発 ..	97
5.5 まとめと今後の課題	98
引用文献	99
Summary	105
謝辞	109

量記号一覧

- A : 投影面積 (m^2)
 C_l : 抵抗係数(-)
 d_a : 空気抵抗の抗力(N)
 D : 高速度カメラで測定した播種間隔(mm)
 D_b : ベルトコンベアで計測した播種間隔(mm)
 D_c : 接地駆動輪の直径(m)
 D_h : 高速度カメラを用いて通過位置の補正を行う場合の播種間隔(mm)
 D_t : 高速度カメラを用いて通過位置の補正を行わない場合の播種間隔(mm)
 F_b : 引っ張り力(N)
 g : 重力加速度(m/s^2)
 i : 順序数(-)
 m_s : 種子の質量(kg)
 N : サンプル数(-)
 P_f : 種子 1 の着地点から種子誘導管の中心線までの距離(mm)
 P_s : 種子 2 の着地点から種子誘導管の中心線までの距離(mm)
 t : 種子の落下時間(s)
 Δt : 種子の微小落下時間(s)
 t_f : 種子 1 が通過した時間(s)
 t_s : 種子 2 が通過した時間(s)
 T : 負荷トルク($\text{N}\cdot\text{m}$)
 v : 播種機の走行速度(mm/s)
 V_s : 種子の速度(m/s)
 V_{sy} : 種子の垂直方向 (y 方向) の速度(m/s)
 V_{sx} : 種子の垂直方向 (x 方向) の速度(m/s)
 x : シミュレーションによる種子の落下位置のx座標(m)
 y : シミュレーションによる種子の落下位置のy座標(m)
 α : 種子の加速度(m/s^2)
 α_y : 種子の垂直方向 (y 方向) の加速度(m/s^2)
 α_x : 種子の水平方向 (x 方向) の加速度(m/s^2)
 θ : 放出時のリンクベルトの角度($^\circ$)
 ρ : 空気密度 (kg/m^3)

第 1 章 序論

1. 1 研究の背景

1. 1. 1 日本の農家人口と就業構造の変化

日本における農業生産を行う主たる担い手である農業就業人口の推移と60歳以上の構成割合を図1-1に示す。農業就業人口は調査が開始された1960年から減少し続けており、2010年に約260万人となり、10年前に比べて約129万人(33.0%)減少している。さらに、農業就業人口における60歳以上の割合が50.6%から78.3%に増加し、急激に高齢化が進んでいる。その一方で一戸あたりの経営耕地面積は約1.7haになり、約0.4ha(約23%)増加し、規模拡大が進んでいる(農林水産省, 2013a)。そのために、面積あたりに投入できる労働力は減少しており、機械の大型化や新たな高性能機械の開発等による生産性の向上が求められている。

1. 1. 2 露地野菜生産の動向

農業就業構造の変化とともに、露地野菜の生産も年々変化している。露地野菜生産における販売農家の総従事者数と65歳以上の割合を図1-2に示す(農林水産省, 2013a)。販売農家の総従事者数は年々減少し続け2010年では109万人となる一方、65歳以上の割合は増加し続け42%を占めるまでになった。野菜の作付面積も、近年、僅かであるが減少を続け、2011年で約43万haとなっている(農林水産省, 2013b)。このような状況の中で、図1-3に示すように米の生産調整により水田転換畑での野菜栽培面積は増加し、2003年には130千haに達している(農畜産業振興機構, 2009)。これは、全転作面積613千haの21.3%、全野菜作面積482千haの27.1%にもなっている。このように水田転換畑での野菜生産は、大きな位置を占めるようになっており、今後も増加すると考えられる。しかし、稲作と野菜作における面積当たりの労働時間は大きく異なり、例えばダイコン作における労働時間は119時間/10a(農林水産省, 2007a)であり、稲作の28時間/10a(農林水産省, 2007b)と比較して4倍以上も必要となる。そのために、現状では稲作主体の農家に導入できる野菜の面積は限られ、露地野菜作における労働時間の短縮化が要望されている。

1. 1. 3 野菜の直まき栽培を取り巻く現状

露地野菜の栽培方法は、土を詰めたセルトレイで苗を育てて圃場に植える移植栽培方法と直接圃場に種子をまく直まき栽培方法の2種類に分けることができる。移植栽培と直まき栽培の利点と欠点を表1-1に示す。この2

つの栽培方法の違いは、生産費と作業性および栽培の安定性である。直まき栽培は、生産費が低く作業性も良いが、栽培が不安定となることから、キャベツやレタスなど移植栽培が可能な作目では、ほとんど直まき栽培は行われていない。しかし、近年、北海道で栽培されている畑作物のテンサイにおいて2000年に2,741ha(3.9%)であった直まき栽培の面積が、2009年には4,904ha(7.4%)に増加している(武居ら、2008)。北海道立十勝農業試験場マニュアル作成グループ(2004)の報告では、テンサイの栽培方法を移植栽培から直播栽培に変更した場合、収量は約10%低下するが、10aあたりの作業時間は6.3時間(移植の55%)低下し、特に春作業期間は移植栽培の39%の労働時間となる。さらに、10aあたりの経営費は、8,661円(23%)低下するとされている。この地域では、規模を拡大するために、収量が低下しても労働時間の短縮や生産費の削減などを考慮して直まき栽培を導入したと考えられる。このように、規模拡大や稲作主体の農家に野菜作を導入する場合、作業時間の短縮化は必須であり、今後、移植栽培で行われている作目についても直まき栽培が増加すると考えられる。

一方、ダイコンやニンジンなどの根菜類は、発芽直後から主根が真っ直ぐ伸びてそのまま肥大するために移植栽培方法が適さないので、直まき栽培が行われている。表1-1で示したように、直まき栽培では天候などにより出芽が不安定となることから予定の栽培本数よりも多くの種子を播いて、出芽後に苗を抜いて設定の株間隔に揃える間引き作業が必要となっている。

農林水産省の品目別経営統計(2007)の報告では、図1-4に示すようにダイコン栽培における10aあたりの作業別労働時間の内訳でもっとも多く占めるのが収穫作業であり、全体の約34%、次いで調製作業が約23%、出荷作業が約13%、管理作業が約13%となっている。同様に図1-5に示すようにニンジン栽培における10aあたりの作業別労働時間の内訳でも収穫作業がもっとも時間を要し全体の約31%を占め、次いで出荷作業が約19%、管理作業が15%、調製作業が約12%となっている。間引き作業は、管理作業に含まれており、石川県野菜園芸協会(2003)は、収穫・調製に要する作業時間95時間/10aの次に、間引き作業時間は12時間/10aと長時間を要していると報告している。

作業の機械化については、収穫・調製・出荷作業については精力的に研究・開発が進められている。収穫作業に関しては、1993年には2条用のニンジン収穫機が市販化されている。また、自走式のダイコン収穫機も開発研究が行われ(生研機構野菜機械等開発チーム第2, 1999)、2003年には市販化さ

れている。調製作業に関してはエンジン・ダイコンともに高性能の調製装置が市販化されている。その一方、直まき栽培に特有で多くの時間を費やしている間引き作業は未だに、ほとんど機械化されておらず人力で作業が行われている。

1. 1. 4 市販されている野菜用播種機とその特徴

直まき栽培を行う場合、出芽率とともに株間隔が重要となる。出芽率を高くするためには、種子の発芽率が重要であるが、播種機の播種精度も高い必要がある。播種機の種子を取り出す精度の意味で播種精度を使う例がある（農業機械化の知識編集委員会，1973；農業機械学会，1994）が、出芽率にとって重要な精度は、種子の取り出し精度，播種間隔精度，播種深さ精度であり，これらをまとめたものが播種精度である。

現在市販されている主な播種機は，図1-6と図1-7に示すようにベルト式播種機，ロール式播種機，傾斜円盤目皿式播種機，真空式播種機，テープシーダーがある。

ベルト式播種機（図1-6a）の種子の搬送方法は，種子の溜まっているホッパの底を穴（窪み）の開いているベルトが通過する。その間に種子がベルトの穴に落ち，上に運ばれ，折り返した所で自然に落下する。

ロール式播種機（図1-6b）の搬送方法は，ベルト式播種機とほぼ同じでベルトの代わりに穴（窪み）の開いたロールがホッパの底で通過する。その間に種子がロールの穴に入り，低い位置まで運ばれて自然に落下する。

傾斜円盤目皿式播種機（図1-6c）の搬送方法も，ベルト式播種機と同じような構造で，穴の開いた円盤が，ホッパの底を回転する。この円盤の穴に種子が落下し，所定の位置まで運ばれて自然に落下する。

真空式播種機（図1-7a）の搬送方法は，真空ポンプを用いてノズルの先端の小さな穴で種子を吸引してホッパから取り出し，落下位置で吸引が途切れ種子が自然に落下する。

テープシーダー（図1-7b）は，土壤中で分解するテープ状の資材に種子を任意の間隔で挟み込んだシードテープを圃場に埋めていく。

これらの播種機の利点と欠点を表1-2に示す。ベルト式とロール式および傾斜円盤目皿式は，セル方式と呼ばれ（農業機械学会，1996），構造が簡単で安価であるが播種間隔精度が低い。さらに、ロール式と傾斜円盤目皿式では構造上，種子をホッパから取り出す際に破損する場合がある。また，真空式は種子の取り出し精度は高いが，種子をホッパから取り出す際に破損す

ることや真空ポンプなどを使用するため高価である。テープシーダーでは、構造が簡単で播種精度は高いが、毎年、購入する必要があるシードテープが高価である。

このように、市販されている播種機には一長一短があるが、テープシーダーを除いて共通する問題点としては、播種間隔精度が低いことである。

1. 2 既往の研究成果

1. 2. 1 播種間隔の精度向上に関する研究

播種機における播種間隔の精度向上に関する研究は、1940年代に行われている (Bainer, 1947)。

播種方式に関する研究として、真空ポンプを利用して種子を吸引して取り出す吸引式 (Giannini et al., 1967; 伊藤ら, 1976; 小林, 1981; Fallak and Sverker, 1984), ゲル状の物質と種子を混ぜて播種を行う流体式 (Suhas et al., 1981; Ward, 1981; Ghate, 1982; Upadhyaya et al., 1982), 種子を封入した不織布のテープを埋設するシードテープ式 (William, 1969) や、そのほか様々な方式 (柴田ら, 1990; 岡田ら, 1982; Jamusz and Pawet, 2011) が提案され、種子の検出装置などの研究 (岡田ら, 1980) も行われている。しかし、これらの研究で開発された方式の多くは、駆動するための電源が必要な場合や、種子に特殊な加工を施すことが必要な場合などがほとんどである。

これとは別に、簡単な播種機構である傾斜回転目皿式やベルト式やロール式など、播種機構に設けられた穴 (窪み) に入った種子を搬送して放出する播種機についても検討が進められている。これらの播種機を使用した時に起こる播種精度の低下は、種子を取り出す過程、搬送装置から種子を放出する過程、種子が放出されてから圃場表面に着地するまでの過程、種子を覆土および鎮圧する過程の4つの過程で起こるとされている (Wilson, 1980)。

種子を取り出す過程については、傾斜円盤目皿式播種機による大豆播種において、作業速度 0.8m/s 以下なら播種粒数は低下しないこと (岡村ら, 1966) や、欠株を防ぐ確率的条件などが明らかにされている (小島ら, 1967)。円盤にある穴の配置などによって高速でも播種作業できる方法も研究されている (国立, 2011)。また、ベルト式播種機において種子の取り出し時に欠粒が起こる確率をモデル化し、ベルトの穴 (窪み) と種子が接する時間を長くすることにより欠粒を大幅に減少出来ることや、作業速度が 0.5m/s 以下であればダイコン種子の1粒取り出し精度は90%以上となることが明らか

とされている。このようにセル方式の播種機の取り出し精度は比較的高いと評価されている。ただし、取り出し精度が高くても、播種間隔精度は低いことから、種子取り出し以降の過程に播種間隔精度を低下させる要因があると指摘されている（大塚ら，1986）。

種子を放出する過程および種子が放出されて圃場表面に着地するまでの過程については、ロール式播種機におけるロール径やベルト式播種機におけるベルトの傾斜角度および種子放出時のロールとベルトの回転速度と走行速度の関係などの機械的な条件に関する研究が行われている（Wilson, 1980）。

種子を覆土および鎮圧する過程については、傾斜円盤目皿式播種機を用いて大豆種子の播種試験を行い、土壌の砕土率が高いほど株間隔の変動や播種の深さの変動は小さく、落下高さが低いほど株間隔の変動が小さいこと（下名迫ら，1989a）や、播種溝を作るオープナの特性（下名迫ら，1989b）について明らかにされている。また、ロール式播種機については種子と土壌の種類を変えて播種間隔の変動がもっとも少ない種子の衝突速度と角度が明らかにされている（Bufton et al.,1974）。

1. 2. 2 間引き作業の簡略化に関する研究

前述のように現状の播種機の播種精度が低く出芽が安定しないことから、野菜の直まき栽培においては予定の栽培本数よりも多くの種子を播き、出芽後に間引き作業を行い、株間隔を整えている。この間引き作業は重労働であるために、簡略化が古くから求められ、1960年代頃には研究が行われている（村田，1964）。間引き機に関する研究（Palmer and Owen, 1971；道場ら，1973；Eberhart and Lucas, 1972）や間引き機を導入するための播種条件についての研究（Becker, 1969；阿部，1971；西入，1971；山本ら，1968）や間引き姿勢の改善に関する研究（春原ら，1970；春原ら，1972）、除草剤や物理的な除草方法を用いた研究（McLean, 1969；Cox and McLean, 1969）などが行われているが、まだ、この時代は種子の発芽率が低いために、間引き作業を省略することは難しく普及していない。その後も間引きに関する研究は続けられ、被覆種子を利用した精密播種による間引きの省力化の検討（矢田，1982）やシミュレーションモデルを用いた間引き機の検討（Palmer and Owen, 1977；Fridley and Jorgensen, 1983；Jindal and Siebenmorgen, 1994）、電気よる植物体除去装置の研究（Diprose and Benson, 1984）が行われている。また、近年、画像処理を利用した間引き機の研究も活発に行わ

れ、ダイコン幼苗を緑色の画像情報を強調した ExG (Extra Green) と輝度データを用いて自動 2 値化手法を応用して識別する方法の検討(張ら, 2002) やテンサイを色情報から識別方法 (登坂ら, 1998) や 3 種類の雑草を 6 つの形状特徴量から識別する方法の検討(寺脇ら, 2002)なども行われている。しかし、植物体が重なると識別ができなくなることや、デジタルカメラおよびパソコンが必要となり、現在、市販化には至っていない。

間引き作業を行う時期の苗は小さく傷つきやすく、苗同士が接している場合に 1 苗だけを傷つけないで残すことは、時間を要する作業である。そこで、間引き作業を簡略化するために苗同士が接しない播種方式についての研究も行われている。間引き作業の機械化を前提として、畝間方向に 1 株分として 4cm 間隔で 1 粒播種を行い、間引き時期や収量について検討されている (張ら, 2001)。さらに、人力で間引き作業を行うことを前提とした播種方法の研究としては、ダイコンを対象に欠株発生を補う方法として、標準株間 24cm に対して株間をその約数に当たる 8, 6 及び 4cm に設定して 1 粒播種を行い、欠株が発生しているときの間引き方法についても検討されている (五十嵐ら, 2002)。同様の研究として、畝方向に 1 株分として 3, 4, 5cm で 1 粒播種を行い、その間引きに要する作業時間や収量などについても検討されている (張ら, 2004)。しかし、これらの研究は、すべて手で種子をまいて試験が行われており、これらの播種方式を再現できる播種機はない。

また、ダイコンの 1 粒播種による無間引き栽培のために、種子の粒径をあらかじめ選別することや、播種深度を安定させる方法、シードテープ式播種機の播種深度斉一のための機構が検討され、その可能性が明らかにされている。しかし、課題として気象条件による出芽の安定性を残している (福岡ら, 2010)。

1. 3 本研究の目的と構成

1. 1 で述べたように、露地野菜作の経営規模は拡大し、特に水田転換畑での野菜作が増加している状況の中で、農業従事者は減少し、高齢化が進んでいる。そのために、重労働で多くの人手を必要とする直まき栽培体系の中で行われている間引き作業の省力化が求められている。間引き機構や間引き作業の簡略化に関する研究はいくつか行われているが、これらの研究では、正確な位置に一定の間隔で播種できることが前提条件となっている。しかし、現在、播種間隔精度が高い播種機はなく、高精度な播種機の開発が求められている。また、1. 2 で述べたように、簡単な機構であるセル方式の播種機

はホッパから種子を取り出す精度が高いことは明らかとなっているが、播種の4つの過程の中で、種子を穴(窪み)から放出する過程および種子が穴(窪み)から放出され着地するまでの過程についての研究例が少なく、播種間隔精度を低下させている要因が明らかにされておらず、その解明が必要である。さらに、播種間隔精度の問題は、品質・収量にも影響し、例えば、ダイコン作やハクサイ作において欠株によって株間隔が大きくなると隣接株の個体重が増加することや播種間隔の変動で個体重の変動が大きくなることを明らかにされており(柳沢ら, 1976)、播種間隔精度を高くすることは、間引き作業の簡略化だけでなく、生育を揃える効果もある。

そこで、本研究では構造が簡単であり、比較的種子の取り出し精度が高いことが明らかになっているベルト式播種機を用いて、播種間隔精度が低下する要因を解明し、播種間隔精度の高い播種機を開発する。さらに、この播種機を利用することによる間引き作業の簡易化や生育の斉一化に及ぼす影響を調査し、野菜作における精密播種技術として確立することを目的とする。

本論文は、5つの章で構成されている。第1章では研究の背景、既往の研究成果及び本研究の目的について述べる。第2章ではベルト式播種機の播種間隔精度を低下させる要因を明らかにする。第3章では、第2章で明らかにした播種間隔精度を低下させる要因を改善した二段ベルト式播種機を開発し、1粒播きの精度を室内試験及び圃場試験で明らかにする。第4章では、第3章で開発した二段ベルト式播種機をさらに発展させた二段ベルト式狭条点播機を開発し、この播種機を用いて播種することによる間引き作業時間の短縮効果や播種間隔精度や欠株率などを明らかにして、野菜作における精密播種技術として確立する。第5章では前章までの論点を整理するとともに、本播種機の今後の方向や普及に向けての課題を述べる。

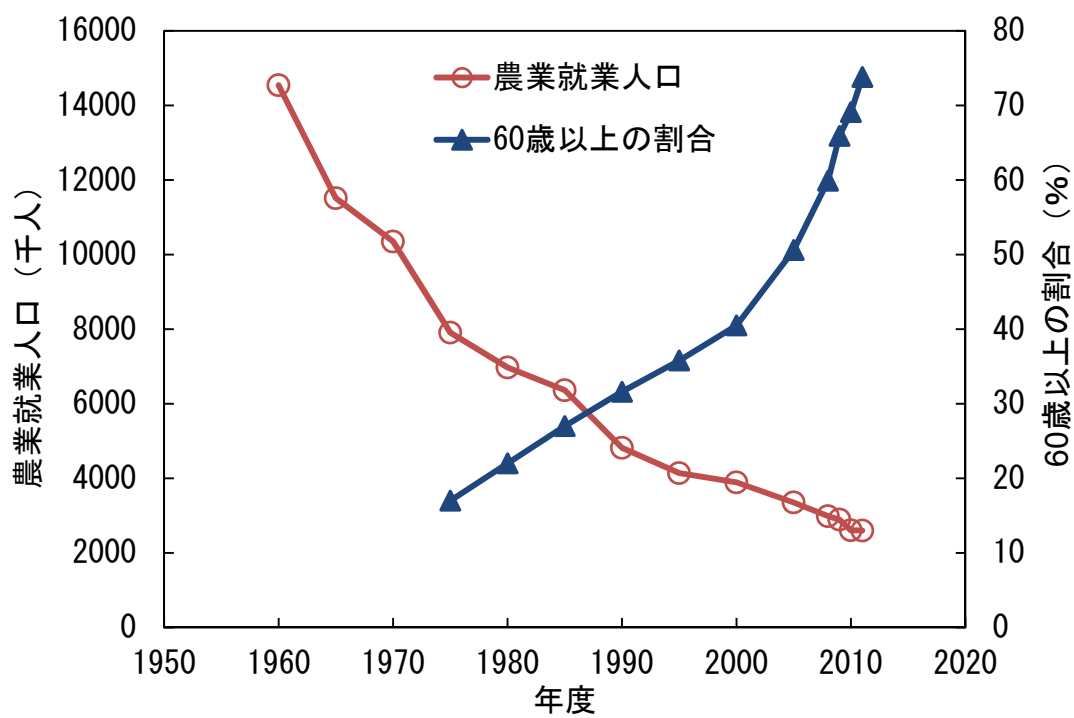


図1-1 農業就業人口と60歳以上の割合の推移
(農林水産省, 2013a)

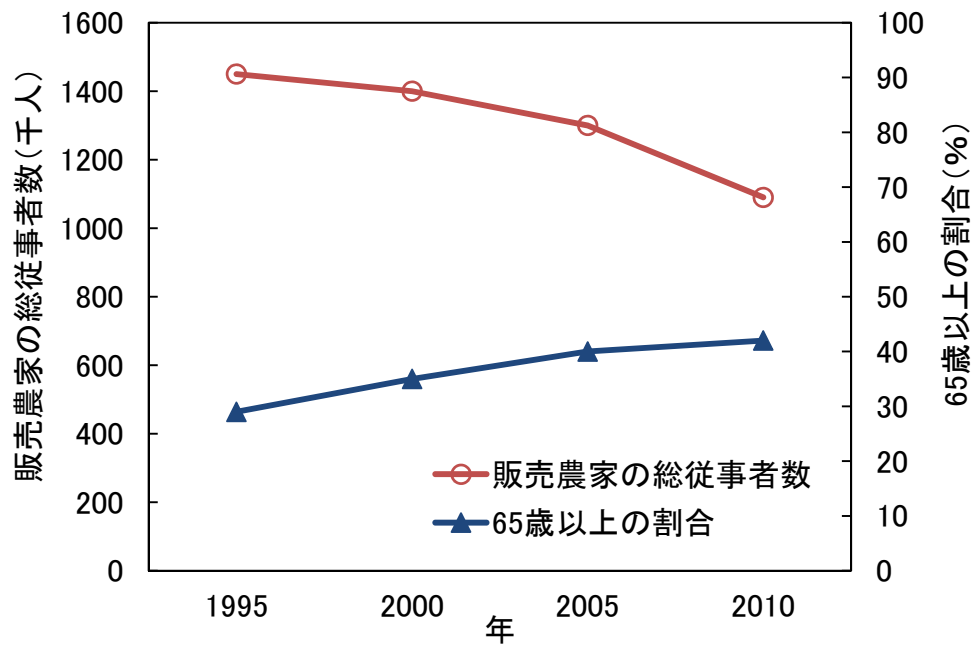


図1-2 露地野菜生産における労働力の推移
(農林水産省, 2013a)

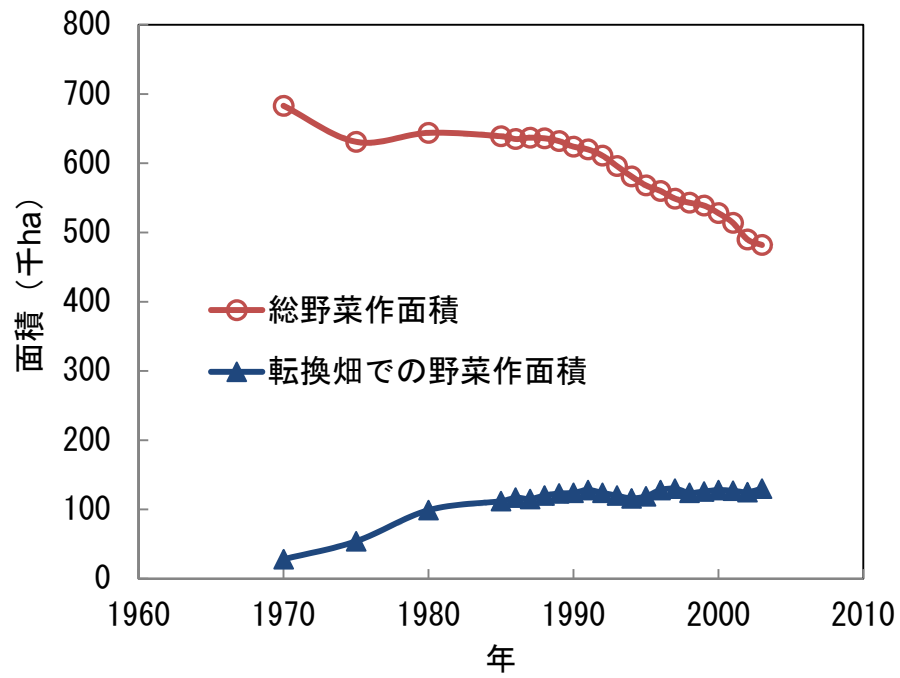


図1-3 総野菜作面積と転換畑での野菜作面積の推移
(農畜産業振興機構, 2009)

表1-1 移植栽培と直まき栽培の利点と欠点

	利点	欠点
移植栽培	<ol style="list-style-type: none"> 1. ハウス内で苗を育てることにより、均一な苗が得られる。 2. 苗を選んで植えることができ、欠株が少ない。 3. 圃場での栽培期間が短く、圃場の利用率を高くすることができる。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. セルトレイや育苗培土および育苗用のハウスおよび移植機が必要である。 2. 苗の搬送が重労働である。 3. 移植作業には時間を要する。
直まき栽培	<ol style="list-style-type: none"> 1. 育苗に関する資材が不必要で生産費が低い。 2. 播種機は移植機よりも安価である。 3. 播種作業は移植作業よりも時間が短い。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 天候などにより、出芽が不安定となる場合がある。 2. 品質も不均一となる可能性が高い。 3. 圃場での栽培期間が移植栽培よりも長い。

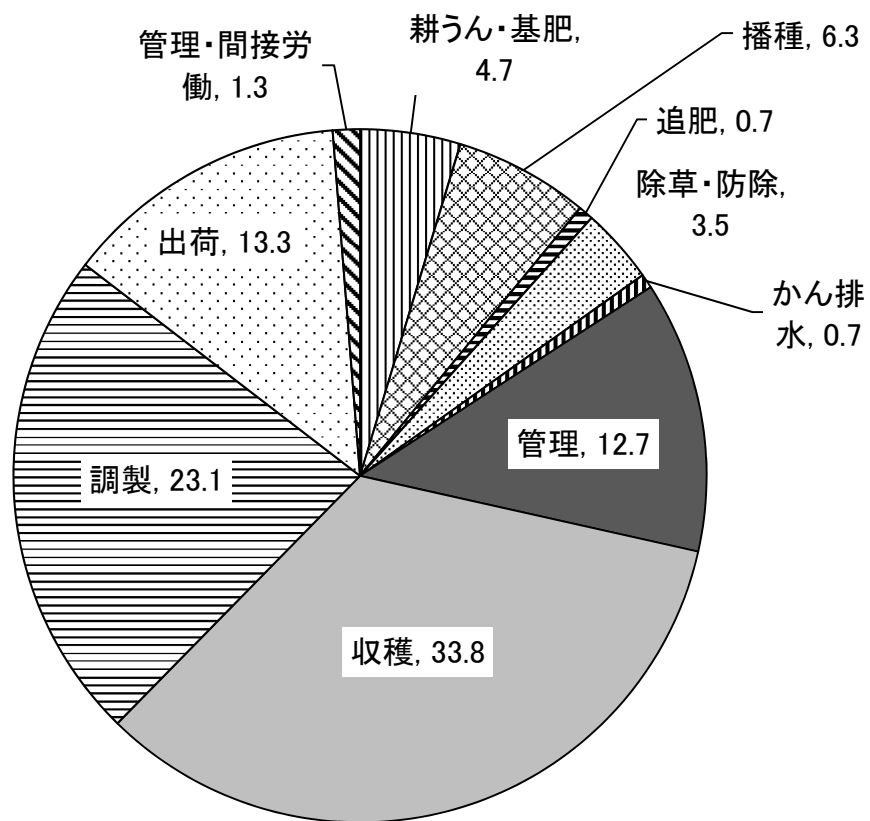


図1-4 2007年のダイコン作における作業部別労働時間割合(%)
(農林水産省, 2007a)

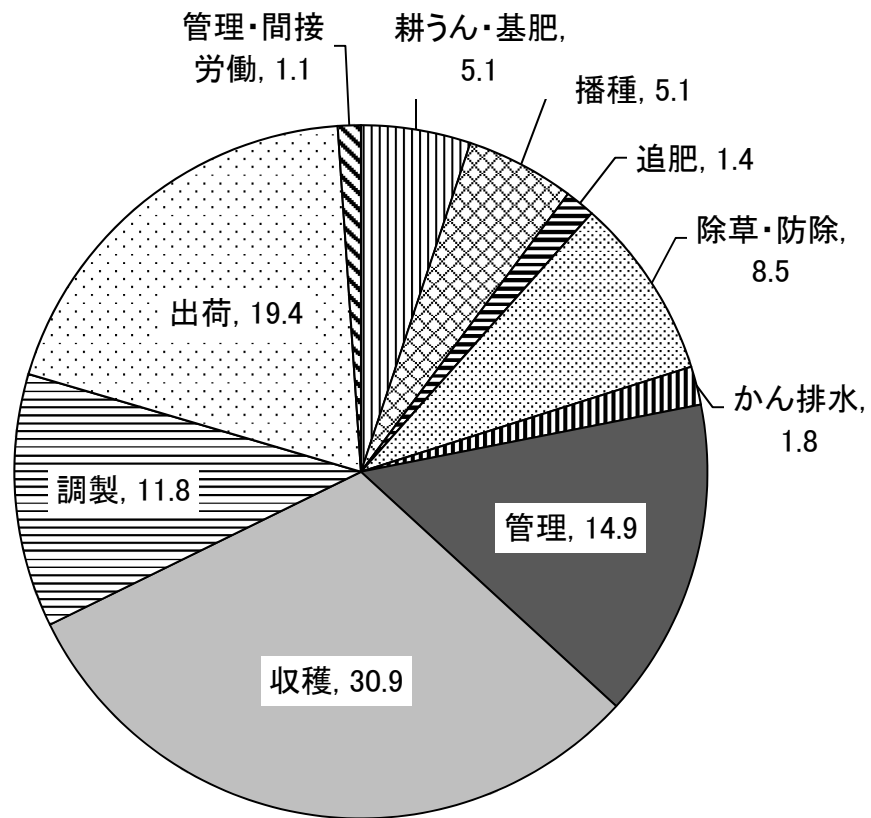
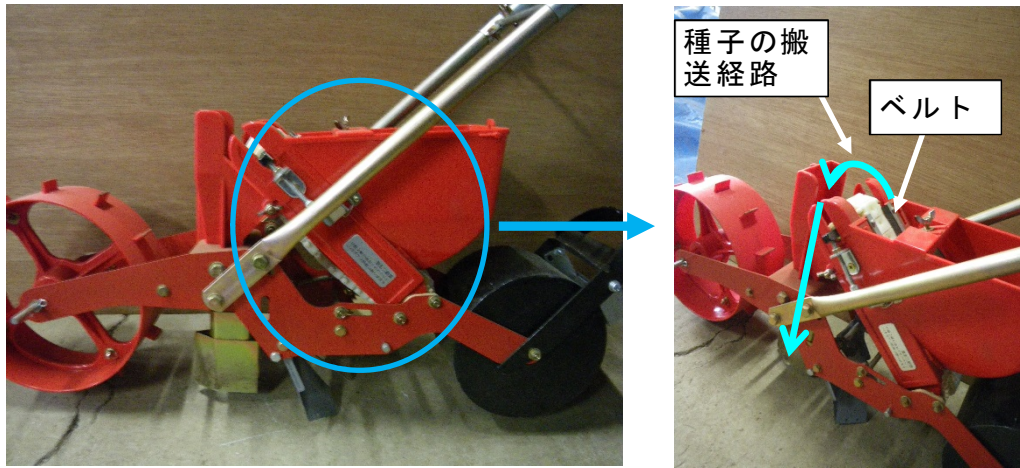
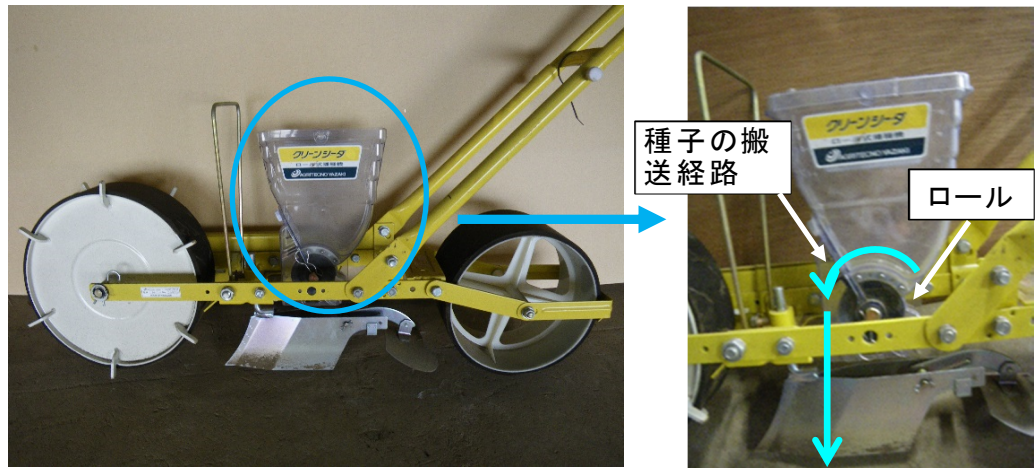


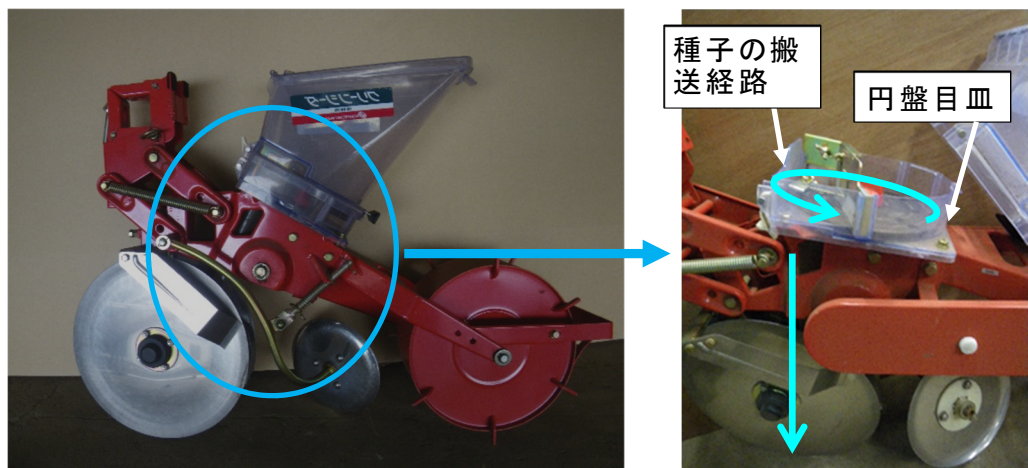
図1-5 2007年のニンジン作における作業部別労働時間割合(%)
(農林水産省, 2007a)



a. ベルト式播種機(向井工業(株), HS-650) (左:全体, 右:搬送部)



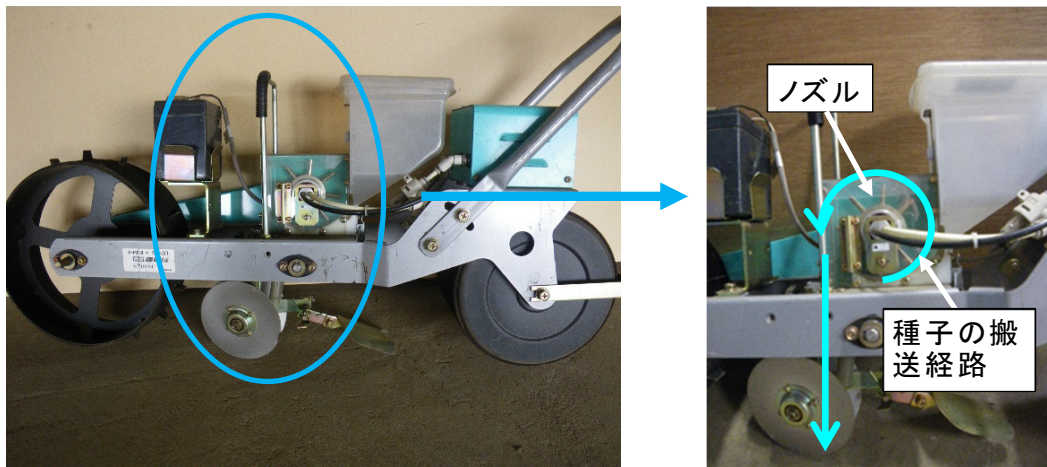
b. ロール式播種機(アグリテクノ矢崎(株), AP-1) (左:全体, 右:搬送部)



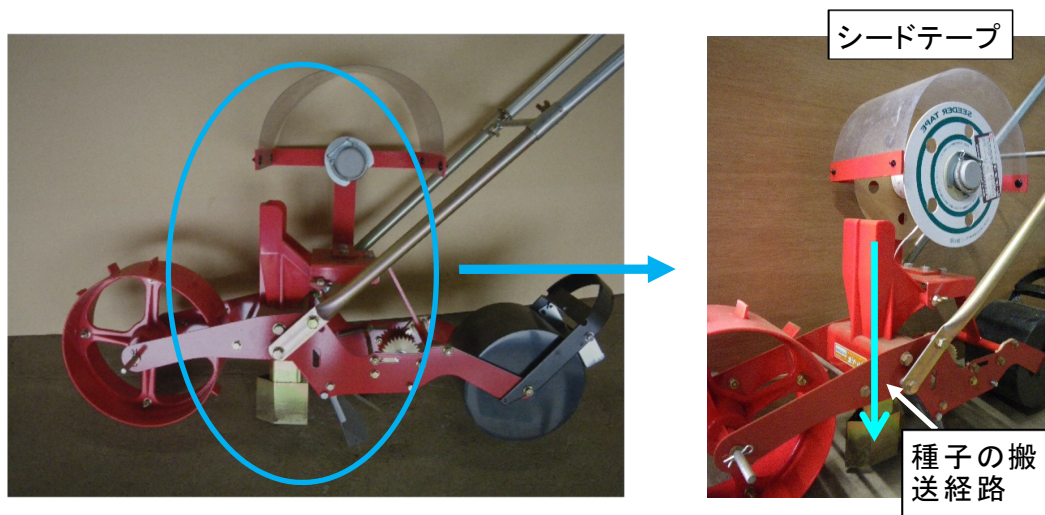
c. 円盤目皿式播種機(アグリテクノ矢崎(株), TFR-2CE)
(左:全体, 右:搬送部)

図1-6 セル方式の播種機

注: 写真のベルト式およびロール式は歩行型, 円盤目皿式は牽引型



a. 真空式播種機((株)啓文社製作所, SA-31)(左:全体, 右:搬送部)



b. テープシーダー(向井工業(株), HS-600T)(左:全体, 右:搬送部)

図1-7 セル方式以外の播種機

注: 写真のテープシーダーは, ベルト式播種機のオプションである.

表1-2 播種機の利点および欠点

播種機	利点	欠点
ベルト式	1) 構造が簡単で安価である。 2) 軽く、取り扱いが容易である。	1) 播種間隔精度が低い
ロール式		1) 播種間隔精度が低い。 2) ロールとホッパの間に種子が挟まり、種子が割れることがある。
傾斜円盤目皿式		1) 播種間隔精度が低い。 2) 小さい種子では円盤とホッパの底に種子が挟まり、種子が割れることがある。
真空式	1) 種子が少なくても取り出し精度が高い。	1) 真空ポンプ等が必要で、高価である。 2) バッテリーが必要で、重く、取り扱いに難がある。 3) コート種子では、ノズルとホッパに挟まり、種子が割れることがある。 4) 播種間隔精度が低い。
テープシーダー	1) 播種精度が高い。 2) 構造が簡単で、取り扱いが容易である。	1) 高価なシードテープを毎回、購入する必要がある。 2) 設定播種間隔が長い場合、必要なシードテープが長くなり、資材費が増加する。

第2章 ベルト式播種機構において播種間隔精度を 低下させる要因の解明

2. 1 はじめに

第1章で述べたように設定した間隔で播種することは、野菜の直まき栽培における間引き作業の簡易化のためだけではなく作物の生育を均一化できる可能性もある（柳沢ら，1976）。したがって，一斉収穫機を導入するためにも必要な技術であると考えられ，安価で播種間隔精度が高い播種機が求められている。

ベルト式播種機やロール式播種機は，機構が簡単であり，種子の取り出し精度は比較的高いが，播種間隔精度が低くなるという問題点がある。大塚ら（1986）が，ベルト式播種機の種子の取り出し精度は高く，この原因は種子が取り出された以降にあると報告しており，取り出し以降で播種間隔精度に影響を及ぼす要因を明らかにして，それを改善すれば安価で播種間隔精度が高い播種機が開発できると考えられる。

そこで，本章では，まず播種間隔を正確に把握するために，高速度カメラを用いた播種間隔の推定方法を検討する。次にこの推定方法を用いて，種子が搬送用のベルトから放出されて地面に着地する直前までの種子の挙動を解析して，ベルト式播種機の播種間隔精度を低下させる要因を明らかにする。

2. 2 高速度カメラによる播種間隔の推定

2. 2. 1 播種間隔の測定方法

播種機を台に固定して作業を行った場合の播種間隔の測定は，グリスが塗られたベルトコンベアに播種する方法で行われている（下名迫ら，1989a）。しかし，この方法では，落下中の種子の状態を調査できないために，播種間隔の変動要因を明らかにすることはできない。さらに，播種間隔の計測と種子の収集のためにベルトコンベアを頻繁に止める必要がある。

そこで，高速度カメラを用いて落下する種子を撮影し，その連続画像から落下位置や落下時間間隔を計測し，播種間隔や落下角度を推定する方法を検討する。これにより，落下中の速度や角度などの種子の状態を計測することができ，播種間隔の変動要因を分析することが可能になる。さらに，本手法はベルトコンベアを用いた場合に問題となった種子の回収の手間がほとんどない。

2. 2. 2 試験方法および測定項目

実験装置を図2-1に示す。本装置は，台に固定した傾斜ベルト式播種機（（株）向井工業製）の接地駆動輪の軸に，可変速モータ（オリエンタルモ

ータ (株), モータ DSP501M およびギアボックス 4GN9K) が取り付けられており, スピードコントローラ (オリエンタルモータ (株), MSM425-401) によりモータ速度が制御される. 地面と想定される高さ (接地駆動輪から 10mm 下の位置) にベルトコンベアと目盛板を設置した. 目盛板の目盛は, 種子誘導管の中心線を 0 として, 進行方向側を正とした. ベルトコンベアには, 種子が付着するようにグリスを塗布した. 使用した高速度カメラは Photron 社製の FASTCM-Rabit2 を用いた. 高速度カメラの性能諸元を表 2-1 に示す. 目盛板を正面で撮影できるように高速度カメラを設置した. 高速度カメラの撮影設定は, シャッター速度 1/4000sec, 画像数 400PPS とした. 種子には, ホウレンソウ (サカタのタネ, ‘アクティブ’, サイズ M, PRIMAX 処理済) を用いた. 播種機の走行速度は, 接地駆動輪の円周長と可変速モータの回転速度から 240, 520, 720mm/s とし, ベルトコンベア の速度も播種機の走行速度に合わせた.

調査項目は, 種子がベルトコンベアに付着した時の時間と落下位置 (目盛板の目盛) およびベルトコンベア上の播種間隔である.

イノティラ (1991) は, 通過センサを利用して種子落下時間間隔の計測を行ったが, この場合では種子の到達時間の情報しか得ることができないために, 通過センサを用いて推定する場合の播種間隔 D_t (mm) は,

$$D_t = (t_s - t_f) \times v \quad (2-1)$$

ただし,

t_f : 種子 1 が通過した時間(s)

t_s : 次の種子 2 が通過した時間(s)

v : 播種機の走行速度(mm/s)

となり, 種子がベルトコンベアに到達した時の落下位置は考慮されていない. しかし, 種子の落下位置は一定ではなく, 図 2-2 に示すように着地した時の落下位置の変動を考慮することにより, さらに播種間隔を正確に推定できると考えられる. ここで, 高速度カメラを用いて推定する場合の播種間隔 D_h (mm) は,

$$D_h = (t_s - t_f) \times v + (P_s - P_f) \quad (2-2)$$

ただし,

P_f : 種子 1 の着地点から種子誘導管の中心線までの距離(mm)

P_s : 種子 2 の着地点から種子誘導管の中心線までの距離(mm)

となる.

高速度カメラを用いた播種間隔の推定精度を明らかにするために、ベルトコンベアで計測した播種間隔 D_b (mm)を真値として、比較する式(2-1)および式(2-2)で求めた播種間隔 D_t (mm)および D_h (mm)との2乗平均平方根誤差(RMSE)(mm)を用いて、推定精度をそれぞれ評価した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_{bi} - D_i)^2} \quad (2-3)$$

ただし、

N : サンプル数(-), D : 高速度カメラで測定した播種間隔(mm)

2. 2. 3 結果および考察

式(2-1)および式(2-2)で計算した播種間隔の推定精度を図2-3に示す。式(2-1)で求めた播種間隔のRMSEは12.2~26.2mmであり、作業速度が速くなるにつれて推定精度が低下した。これに対して、式(2-2)で求めた播種間隔のRMSEは、4.54~4.88mmであり、作業速度が速くなっても推定精度はほとんど低下しなかった。この結果より、式(2-1)で求めた播種間隔のRMSEは、式(2-2)で求めた場合の2.69~5.37倍も大きくなり、通過センサのように種子の到達時間しか計測できない場合は、推定誤差が大きく播種間隔の推定に用いるのは適当でないと考えられる。これに対して、式(2-2)は、作業速度が速くなっても誤差の増加はわずかなので高速度カメラを用いた場合、種子の落下位置を考慮することにより高精度に播種間隔を推定できることが明らかとなった。

2. 3 種子が取り出されて地面に着地するまでの挙動の解析

2. 3. 1 ベルト式播種機の特徴

供試したベルト式播種機の概略を図2-4に示す。種子ホッパの下に、等間隔で穴(窪み)があるリンクベルトがあり、穴に入った種子を斜め上に搬送して排出口より自然落下させる簡単な機構である。

2. 3. 2 試験方法および測定項目

供試種子には、ハウレンソウ(サカタのタネ, 'アクティブ', サイズ M PRIMAX 処理済), ダイコン(サカタのタネ, '天宝大根', キャプタン・チウラム剤処理済)およびニンジン(みかど協和, '小泉冬越五寸', コート種

子 L) を用いた。その形状と重さを表 2-2 に、種子の写真を図 2-5 に示す。

実験装置を図 2-6 に示す。図 2-1 のように播種機の片側のフレームを透明なアクリル板で作り変え、落下する種子を側方から撮影できるようにする。播種用ベルトは、穴が 1 つあるコマをつなげて長さを調節できる野菜用リンクベルト (L1R ベルト, 32 コマ) を用いた。リンクベルトの位置合わせは垂直になったリンクを種子誘導管の中心線に合うように調節する。設定播種間隔は 66 mm である。リンクベルトの種子穴の大きさは、事前に種子の取り出し試験を行い、複粒取り出しおよび欠粒取り出しの合計が最小になる径を調査し、ハウレンソウおよびダイコンでは半径 2.25mm, ニンジンでは半径 3.00mm とした。

2. 3. 2. 1 放出直後の挙動

播種機のリンクベルトから放出される種子を撮影するために、種子誘導管を取り外し、リンクベルトの折り返し付近 (図 2-6 の測定点①) に目盛板を設置した。目盛板の原点は種子誘導管の中心線とし、x 軸は播種機の進行方向を正とした。種子がリンクベルトから完全に離れた時の水平方向の位置 (以後、放出位置) とそこから垂直に 20mm 下を通過した時の水平方向の通過位置と時間を測定して落下角度と落下速度を求めた。また、落下開始直後に圃場に落下したと想定した場合の播種間隔を調査するために、図 2-6 の測定点②を通過する種子を撮影して式(2-2)で播種間隔と播種間隔を推定する時に対象となる 2 つの種子の水平方向の通過位置のずれ (式(2-2)の右辺の $(P_s - P_f)$ 以後、通過位置のずれ) を求めた。リンクベルトの速度は、102, 123, 156, 185mm/s の 4 段階に設定した。

2. 3. 2. 2 種子誘導管に種子が衝突した時の挙動

種子誘導管を取り外した状態で、図 2-6 の測定点③のところに 50×80mm の透明アクリル板および目盛板を設置した。リンクベルトの移動速度を 156mm/s に設定し、アクリル板の角度を、垂直を 0° とし時計回りに 15, 25, 45° の 3 段階に傾けて播種作業を行いアクリル板に衝突した時の衝突位置と時間、そこから垂直方向に上下 20mm を通過する時の通過位置と時間を測定し、衝突前後の落下角度と落下速度を求めた。

また、種子誘導管の片面を切り落とし、図 2-6 の測定点②から種子誘導管の出口まで通過する種子を撮影し、種子が最初に衝突した管壁と落下時間

および種子誘導管に衝突した回数を調査した。リンクベルトの速度は156mm/sに設定した。

2. 3. 2. 3 地面に着地する直前の挙動

種子誘導管がある状態とない状態で播種を行い、地面に着地する直前の高さである種子誘導管の出口から30mm下および50mm下（図2-6の測定点④）を通過する種子を撮影し、通過位置と時間を測定して落下角度と落下速度および播種間隔を求めた。リンクベルトの速度は102, 123, 156, 185mm/sの4段階に設定した。

なお、種子の取り出し時の欠粒取り出しや複数粒取り出しによる影響を取り除くために試験中に欠粒を数え、実際の取り出し数と欠粒取り出し数を足した数から予定の取り出し数を引いたものを複数取り出し数として播種間隔の短い方から削除した。

2. 3. 3 結果および考察

2. 3. 3. 1 放出直後の挙動

リンクベルトの速度変化による放出位置と落下角度の関係を図2-7に示す。リンクベルトの速度156mm/sにおけるハウレンソウの水平方向の放出位置の標準偏差(以後、SD)は3.5mm、ダイコンでは2.9mmと変動が大きく、ニンジンでは1.6mmと小さかった。同様に、落下角度のSDはハウレンソウでは7.0°、ダイコンでは7.6°と変動が大きく、ニンジンでは3.9°と小さかった。また、放出位置が進行方向側（放出位置が0mm以上）での落下角度のSDは、ハウレンソウが4.2°、ダイコンが4.1°、ニンジンが4.3°となった。放出位置が進行方向の逆方向（放出位置が0mm未満）では、ハウレンソウが2.5°、ダイコンが3.4°、ニンジンが1.5°となり、進行方向側に放出された場合に変動が大きくなった。

落下開始直後の通過位置のずれと播種間隔の関係を図2-8に示す。落下開始直後の播種間隔のSDは、ハウレンソウが15~20mm、ダイコンが18~20mmと大きく、ニンジンが10~11mmと小さかった。水平方向の通過位置のずれのSDもハウレンソウが10~11mm、ダイコンが10~13mmと大きく、ニンジンが3~6mmと小さかった。また、直線回帰による相関係数はいずれの種子でも有意に高く、播種間隔と水平方向の通過位置のずれに相関関係が認められた。Y軸切片は設定播種間隔とほぼ同じ値となった。

水平方向の通過位置のずれが0mmの時に播種間隔は設定播種間隔と同等

になることと播種間隔と水平方向の通過位置のずれに高い相関関係が見られることから、落下開始直後の播種間隔の変動は、放出位置の変動が引き起こす水平方向の通過位置のずれが原因である。また、ハウレンソウとダイコンで放出位置の変動が大きく、ニンジンで小さいことから、種子の形状と大きさが不均一であることが放出位置の変動の原因であると考えられる。種子の形状や大きさが均一でないハウレンソウおよびダイコン等の裸種子ではリンクベルトの穴に種子が詰まる場合や種子の一部しか収まらない場合など、様々な状態で穴に入る。そのために穴からしばらく落ちない種子やすぐに落ちる種子などがあり、その結果、放出位置や落下角度の変動が大きくなり水平方向の通過位置のずれが大きくなる。種子の形状や大きさが不均一であることは、種子を取り出す過程において取り出し精度を低下させる要因でもあるが、放出する過程においても播種間隔精度を低下させることが明らかとなった。また、裸種子では進行方向側に放出された場合に落下角度の変動が大きいため、播種間隔精度を向上させるためには、種子が早期に放出されるのを防止し、リンクベルトの折り返しが終わった後に種子を放出させる必要がある。

2. 3. 3. 2 種子誘導管に種子が衝突した時の挙動

アクリル板の取り付け角度と衝突後の落下角度の関係を図 2-9 に示す。アクリル板に衝突する直前の種子の平均落下角度±標準偏差は、ハウレンソウが $-1.3 \pm 2.2^\circ$ 、ダイコンが $-1.7 \pm 2.8^\circ$ 、ニンジンが $-0.8 \pm 1.9^\circ$ であり、ほぼ垂直に落下していたが、ハウレンソウの衝突後の角度では、アクリル板の角度が 15° の場合で 17.5° 、 25° の場合で 31.1° 、 45° の場合で 55.5° とアクリル板の取り付け角度が大きくなると落下角度も大きくなる。この傾向は他の種子でも同様である。また、アクリル板の角度が 45° の場合、ハウレンソウとダイコンの落下角度のSDは、それぞれ 8.1° と 9.7° でニンジンよりも2倍大きい。

最初に衝突した管壁と種子誘導管を通過するまでに要した時間および管壁に衝突した回数を表 2-3 に示す。種子誘導管を通過する時に、管壁に種子が衝突する割合は、ニンジンでは23%と小さいが、ハウレンソウでは77%、ダイコンでは75%と高い。また、最初に管壁Dに衝突した場合、ニンジンでは衝突回数や落下時間の変動は小さいが、ハウレンソウとダイコンでは変動が大きい。さらに、ハウレンソウとダイコンにおいて最初に管壁Cに衝突した場合、最初に他の管壁に衝突した場合よりも衝突回数が増加し、

落下時間が 1.6～1.8 倍である。

ハウレンソウおよびダイコンでは、放出位置と放出時の落下角度が大きく変動するために、種子誘導管に衝突する種子の割合が増える。衝突すると、落下時間が長くなり変動も大きくなるために、播種間隔精度が低下する。このことから、播種間隔精度を向上させるためには、種子誘導管に衝突させないようにする必要がある。また、衝突した場合の影響を最小限にするためには、アクリル板の衝突試験の結果からも管壁の角度が大きい場合、衝突後の落下角度が大きくなり衝突回数が増えて落下時間が長くなるので、種子誘導管の管壁をできる限り垂直にすることが考えられる。

2. 3. 3. 3 地面に着地する直前の挙動

種子誘導管が地面に着地する直前の播種間隔に与える影響を表 2-4 に示す。地面に着地する直前の高さにおいて種子誘導管がある場合の播種間隔の SD をない場合の播種間隔の SD と比較するとハウレンソウは 3.0～4.1 倍、ダイコンでは 2.3～4.0 倍、ニンジンでは 1.2～3.1 倍である。

種子誘導管がない場合の地面に着地する直前の通過位置のずれと播種間隔の関係を図 2-10 に、種子誘導管がある場合を図 2-11 に示す。リンクベルトの速度 123mm/s における種子誘導管がない場合の水平方向の通過位置のずれの SD は、ハウレンソウが 25.7mm、ダイコンが 26.8mm と落下開始直後と比較して広く、播種間隔との相関が明らかではない。また、種子誘導管がある場合の水平方向の通過位置のずれの SD はハウレンソウが 10.7mm、ダイコンが 9.8mm とない場合と比較してそれぞれ 0.4 倍と狭いが、ハウレンソウとダイコンでは同じ水平方向の通過位置のずれであっても播種間隔の変動が大きい。この傾向は他の速度でも同様である。

ハウレンソウとダイコン等の裸種子で播種間隔が大きく変動した原因は、種子誘導管の通過時に管壁に多く衝突したためである。一方、ニンジン等のコート種子では種子誘導管に衝突することは少ないので、落下時間の変動は少なく、播種間隔の変動も少ない。ただし、本試験は定置試験の結果であり、実際の播種作業では播種機の姿勢が変動するのでさらに種子誘導管に衝突する可能性が高い。したがって、種子誘導管は使用しない方が良いが、裸種子では種子誘導管がない場合は落下距離が長いと水平方向の通過位置が広範囲となることから、種子誘導管がないと接地輪や溝切部に種子が衝突する可能性が高くなるので、落下距離を短くすることも必要である。また、種子誘導管がない場合の地面に着地する直前の播種間隔を落下開始直後の播

種間隔と比較すると、水平方向の通過位置のずれは大きい、播種間隔の変動は小さい。早期に種子が放出される場合は種子の放出の間隔は短い、落下角度が進行方向なので播種間隔が長くすることになり、結果として播種間隔が平均に近い値になると考えられる。逆に放出が遅い場合は種子の放出の間隔は長い、落下角度が進行方向と逆なので播種間隔を短くすることになり、結果として播種間隔が平均に近い値になる。これは、リンクベルトの移動方向が進行方向と同じであるためであり、逆方向に移動する場合には播種間隔の変動は大きくなる。

2. 4 シミュレーションモデルによる種子の挙動の解析

種子誘導管を用いない場合は、落下距離が長いと水平方向の通過位置の変動が大きくなり、覆土板などに衝突する可能性がある。そこで、ハウレンソウ種子およびニンジン種子とリンクベルトをモデル化して落下軌跡を数値的に解析し、種子がリンクベルトから放出されて地面に着地する直前（図2-6の測定点④）までの水平方向の通過位置の変動を明らかにして、衝突を防止できる許容落下距離を検討する。

2. 4. 1 種子の落下軌跡の推定方法

図2-12にベルト式播種機の種子放出部のモデルを示す。45°に傾いたリンクベルトが高さ370mmに設置した半径26mmのプーリーを回っていると仮定する。

また、種子の速度 V_s (m/s)の垂直方向(y方向)および水平方向(x方向)の速度をそれぞれ、 V_{sy} (m/s)、 V_{sx} (m/s)とする。質量 m_s (kg)の種子に働く加速度を $\alpha=(\alpha_x, \alpha_y)$ (m/s²)とする。また、空気抵抗の抗力を d_a (N)と重力加速度を g (m/s²)とする。

空気抵抗を加味した斜方落下の運動方程式は

$$\begin{aligned} m_s \alpha_x &= -d_a \\ m_s \alpha_y &= m_s g - d_a \end{aligned} \quad (2-4)$$

となる。

さらに、一般に落下する物質に作用する空気の抗力 d_a は、

$$d_a = \frac{1}{2} C_l \rho A V^2$$

ここで、

C_l : 抵抗係数(－) (2-5)

ρ : 空気密度 (kg/m³)

A : 投影面積 (m²)

で表される。

実測値からニンジン種子のモデルは直径 3.0mm, 質量 18.8mg の球体, ホウレンソウ種子は, 楕円の長径が 3.0mm, 短径が 2.2mm, 高さが 3.0mm, 質量 10.3mg の楕円錐とする。空気密度は, 1.14kg/m³ (温度 25℃) とする。抵抗係数は, レイノルズ数に比例するが, 本モデルでは抵抗係数は, ニンジン種子では 0.44 として, ホウレンソウ種子は, 底面では 1.2, 側面では 0.64 として, 重心に近いと底面から落下すると仮定する (日本機械学会, 2007 ; 澤田ら, 2003)。

斜方落下の運動方程式は,

$$m_s \alpha_x = -\frac{1}{2} \rho A C_l V_{sx}^2 \quad (2-6)$$

$$m_s \alpha_y = m_s g - \frac{1}{2} \rho A C_l V_{sy}^2$$

である。この運動方程式を 4 次のルンゲ・クッタ法により数値計算によって解を求める (松尾ら, 1976 ; 日本機械学会, 2003)。

まず, 時間 t (s) における加速度は,

$$\begin{aligned} \alpha_x &= -C V_{sx}(t)^2 \\ \alpha_y &= g - C V_{sy}(t)^2 \end{aligned} \quad (2-7)$$

ただし,

$$C = \frac{1}{2} \rho A C_l / m_s$$

となる。また, つぎの時刻における速度は,

$$V_{sx}(t+1) = V_{sx}(t) + \frac{1}{6} (\alpha_{x1} + 2\alpha_{x2} + 2\alpha_{x3} + \alpha_{x4}) \Delta t$$

$$\left[\begin{aligned} \alpha_{x1} &= -C V_{sx}(t)^2 \Delta t \\ \alpha_{x2} &= \alpha_{x1} + \frac{\Delta t}{2} \alpha_{x1} \\ \alpha_{x3} &= \alpha_{x1} + \frac{\Delta t}{2} \alpha_{x2} \\ \alpha_{x4} &= \alpha_{x1} + \Delta t \alpha_{x3} \end{aligned} \right. \quad (2-8)$$

$$V_{sy}(t+1) = V_{sy}(t) + \frac{1}{6}(\alpha_{y1} + 2\alpha_{y2} + 2\alpha_{y3} + \alpha_{y4})\Delta t$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{y1} = (g - CV_{sy}(t)^2)\Delta t \\ \alpha_{y2} = \alpha_{y1} + \frac{\Delta t}{2}\alpha_{y1} \\ \alpha_{y3} = \alpha_{y1} + \frac{\Delta t}{2}\alpha_{y2} \\ \alpha_{y4} = \alpha_{y1} + \Delta t\alpha_{y3} \end{array} \right.$$

となるので，落下位置は，

$$x(t+1) = x(t) + \frac{1}{6}(V_{sx1} + 2V_{sx2} + 2V_{sx3} + V_{sx4})\Delta t$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sx1} = \{V_{sx}(t) + \frac{1}{6}(\alpha_{x1} + 2\alpha_{x2} + 2\alpha_{x3} + \alpha_{x4})\}\Delta t \\ V_{sx2} = V_{sx1} + \frac{\Delta t}{2}V_{sx1} \\ V_{sx3} = V_{sx1} + \frac{\Delta t}{2}V_{sx2} \\ V_{sx4} = V_{sx1} + \Delta tV_{sx3} \end{array} \right.$$

$$y(t+1) = y(t) + \frac{1}{6}(V_{sy1} + 2V_{sy2} + 2V_{sy3} + V_{sy4})\Delta t \quad (2-9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sy1} = \{V_{sy}(t) + \frac{1}{6}(\alpha_{y1} + 2\alpha_{y2} + 2\alpha_{y3} + \alpha_{y4})\}\Delta t \\ V_{sy2} = V_{sy1} + \frac{\Delta t}{2}V_{sy1} \\ V_{sy3} = V_{sy1} + \frac{\Delta t}{2}V_{sy2} \\ V_{sy4} = V_{sy1} + \Delta tV_{sy3} \end{array} \right.$$

となる。

また，種子が放出される位置は，種子によって大きく異なる．図 2-13 に種子がリンクベルトの穴に入っている状態のモデルを示す．球体の場合，リンクベルトの穴に入る姿勢は一定で，穴に詰まることはない．それに対して，楕円錐の場合，穴に入った時に姿勢により，穴に詰まる場合がある．詰まらないために大きい穴にした場合は，2 粒以上入る可能性が高くなり正確

な播種ができない。そのため、実験結果からも、リンクベルトが完全に下向きになってもハウレンソウ種子やダイコン種子では、落下しない場合がある。また、逆に早く種子が落下する場合もある。そこで、本モデルでは、2.3.3.1の放出直後の挙動の実験結果から、放出される位置を表2-5と設定する。リンクベルトから種子が放出される時の速度は、リンクベルト速度を初速度として、放出時のリンクベルトの角度 θ の方向に放出される。ただし、ハウレンソウ種子では、放出時に運動エネルギーはリンクベルトのセル穴と種子が接している部分の摩擦抵抗分が大きいために、初速度は低下する。実験結果からもリンクベルトが下向きになっている時のリンクベルトから種子に伝わる速度は、ベルト速度の80~90%となったので、本モデルでは、ハウレンソウ種子の場合の初速度 V_0 は、リンクベルト速度の90%の速度とする。さらに、リンクベルトが上向きの時に放出された場合は、放出直後の落下角度が大きい場合があり、リンクベルトの穴から出た後に移動してくるリンクベルトに衝突していると考えられるので、放出される開始点での放出角度 θ' は、 $\theta' = 90 - \theta$ とする。

2.4.2 結果および考察

図2-14にニンジン種子の場合の落下軌跡のシミュレーション結果を示す。ニンジン種子の場合、放出角度が小さいことや球体であることなどによりほぼ垂直に落下する。また、リンクベルト速度102mm/sと185mm/sの水平方向の通過位置の範囲の差は10mmである。表2-6にニンジン種子の場合の水平方向の通過位置の実測値とシミュレーション値を示す。開始点の水平方向の通過位置の誤差は小さく、終点の誤差の方が大きい。平均では1.6mmと小さいので、本手法がシミュレーションモデルとして使用できると考えられる。

同様に、図2-15にハウレンソウ種子の場合の落下軌跡のシミュレーション結果を示す。ニンジン種子と比較して、放出角度が大きく、底面の空気抵抗より側面の空気抵抗が低いことから、通過範囲が広く、リンクベルト速度102mm/sと185mm/sの水平方向の通過位置の範囲の差は19mmと大きい。表2-7にハウレンソウ種子の水平方向の通過位置の実測値とシミュレーション値を示す。ハウレンソウ種子ではニンジン種子とは逆に、開始点の水平方向の通過位置の誤差が大きく、終点の誤差の方が小さい。しかし、誤差は平均2.6mmと小さいので、これもシミュレーションモデルとして使用できる。

種子が溝切りオープナ等に衝突しないための水平方向の通過位置範囲を $\pm 12.5\text{mm}$ 、 $\pm 25.0\text{mm}$ 以内と仮定した場合のリンクベルト速度と許容される落下距離との関係を図2-16に示す。水平方向の通過範囲を $\pm 12.5\text{mm}$ にした場合のリンクベルトからの許容落下距離は、ニンジン種子ではリンクベルトの速度 102mm/s で 300mm 以下、 185mm/s で 188mm 以下、ホウレンソウ種子ではリンクベルト速度 102mm/s の場合 32mm 以下、 185mm/s で 12mm 以下である。ニンジン種子と比べてホウレンソウ種子の場合はリンクベルトからの落下距離がかなり短く、溝切りオープナを設置することが困難である。また、水平方向の通過位置範囲を $\pm 25.0\text{mm}$ とした場合、ニンジン種子では、リンクベルトの速度が 350mm/s で許容落下距離が 300mm 以下となり、低速であれば許容落下距離はかなり長くすることができる。ホウレンソウ種子ではリンクベルトの速度 102mm/s で 289mm 以下、 185mm/s で 121mm 以下になり、水平方向の通過位置範囲が $\pm 12.5\text{mm}$ の場合よりも許容落下距離が長くなる。したがって、覆土板等に衝突しないための水平方向の通過位置範囲を $\pm 25.0\text{mm}$ でリンクベルトの最高速度を 185mm/s と仮定する場合、落下距離を 121mm 以下にする必要があることが明確となった。

2.5 まとめ

高速度カメラを用いた播種間隔の推定方法を検討し、傾斜ベルト式播種機において種子が放出されて地表面に着地する直前までの過程で播種間隔に影響を与える要因を明らかにした。

- 1) 高速度カメラを用いた播種間隔の推定は、種子の落下間隔時間と種子の落下位置を考慮することにより、播種間隔のRMSEは、 $4.54\sim 4.88\text{mm}$ と高精度に行うことができる。
- 2) 落下開始直後から播種間隔のSDは、ニンジンでは $10\sim 11\text{mm}$ と小さいが、ホウレンソウとダイコンでは、それぞれ $15\sim 20\text{mm}$ および $18\sim 20\text{mm}$ とばらつきが大きい。
- 3) この原因は、ホウレンソウとダイコンは種子の形が不均一でリンクベルトの種子穴に入る姿勢が一定にならず、放出位置が大きく変動することである。
- 4) リンクベルトからの放出位置が進行方向側で放出された場合は落下角度の変動が大きく、播種間隔のばらつきが大きくなる。
- 5) 種子誘導管の壁の角度が大きくなるほど、壁に衝突した後の落下角度が大きくなり、播種間隔のばらつきが大きくなる。

- 6) 種子は種子誘導管に衝突した割合はニンジン種子では 23%と少なく、ハウレンソウとダイコンでは 80%が衝突する。また、種子誘導管の角度が 50° の管壁に種子が衝突する場合、衝突しない場合と比較して、落下時間が 1.6~1.8 倍増加する。
- 7) その結果、ハウレンソウとダイコンでは種子誘導管がある場合は、ない場合と比較して水平方向の通過位置のずれの SD は 0.4 倍なるが、播種間隔の SD は 2.5 倍になる。
- 8) ハウレンソウとダイコンでは種子誘導管がなく落下距離が長い場合には、放出位置が広範囲であることから、溝切部などに衝突する可能性が増加する。
- 9) 4 次のルンゲ・クッタ法により数値計算する場合の種子の落下軌跡を運動方程式で表したシュミレーションモデルの予測精度は、ニンジン種子では平均誤差 1.6mm、ハウレンソウ種子では平均誤差 2.6mm と高精度である。
- 10) 種子は種子誘導管および溝切りオープナに衝突しないための水平方向の通過位置範囲を±25.0mm とした場合の許容落下距離は、ハウレンソウ種子でリンクベルト速度 102mm/s の場合に 289mm 以下、185mm/s で 121mm 以下となり、リンクベルトからの落下距離をどの程度に設定すべきか数値的に明らかにできる。

以上のことより、ベルト式播種機の播種間隔精度を低下させる要因は、種子はリンクベルトから放出される時の位置と角度が一定ではないこと、落下距離が長く、種子誘導管に衝突することにより、落下時間が変化することである。

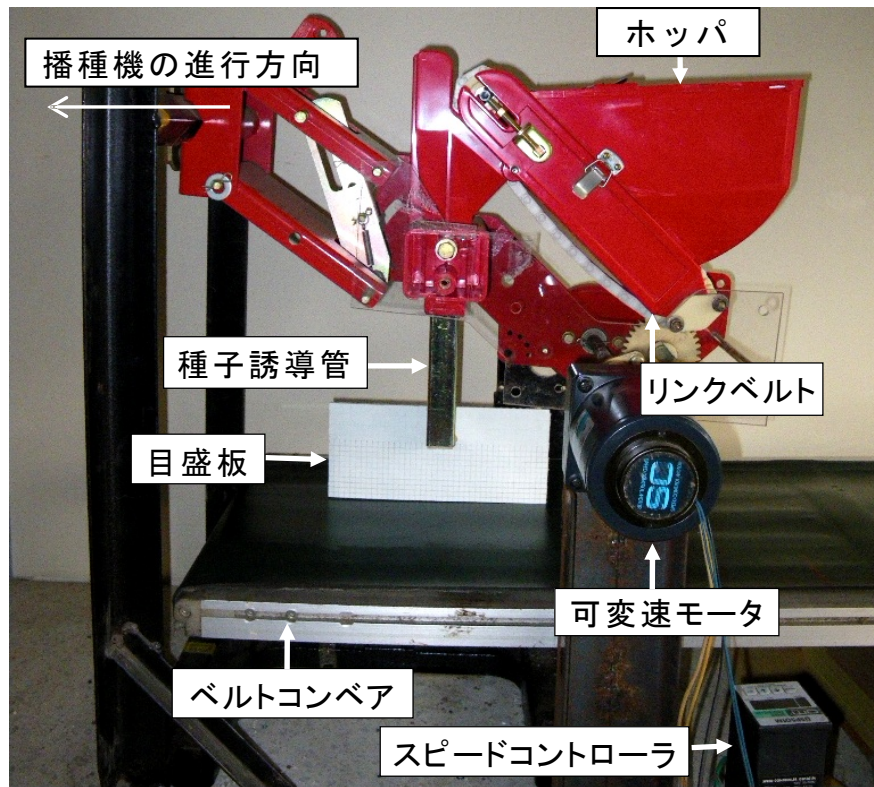


図2-1 実験装置

表2-1 高速度カメラの性能諸元

撮像素子	1/2 インチ インターライン方式 CCD	
記録媒体	IC メモリ(D-RAM)	
撮像速度 /画素数	フルフレーム:640×240ドット	30, 60, 120, 240 コマ/秒
	セグメントフレーム:640×120ドット	30, 60, 120, 240, 400 コマ/秒
	セグメントフレーム:640×60ドット	30, 60, 120, 240, 400, 600 コマ/秒
	セグメントフレーム:320×120ドット	30, 60, 120, 240, 400 コマ/秒
	セグメントフレーム:160×60ドット	30, 60, 120, 240, 400, 600 コマ/秒
記録枚数 /時間	フルフレーム:640×240ドット(240コマ/秒時)	1089 枚(4.54 秒)
	セグメントフレーム:160×60ドット(240コマ/秒時)	14560 枚(60.66 秒)
濃度表現	8ビット(256階調)グレースケール	
再生速度	1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30 コマ秒	
シャッター機能	電子方式:1/コマ数, 1/500, 1/1000, 1/2000, 1/8000, 1/10000 秒可変	
再生機能	再生, 早送り, 逆再生, 逆早送り, ポーズ, コマ送り, ブロック再生	
データ表示	撮影速度, ID ナンバー, 日付/時間(切替), 記録状態(記録時), 再生状態(再生時), シャッタースピード, 記録モード, 実時間(再生時), フレーム番号(再生時)	
RS-232C 制御	可能:RC-232C コントロールキット(オプション)	
本体/寸法/重量	130(W)×170(H)×290(D)mm/3.9kg(増設メモリ非搭載時)	
電源	DC12V4.5A	

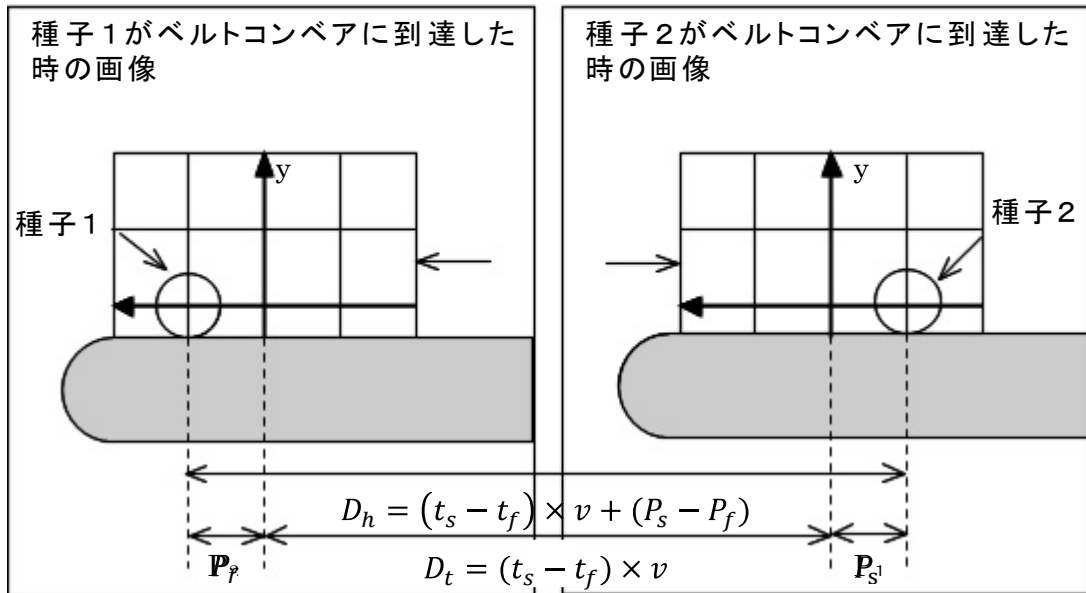


図2-2 播種間隔の推定の考察図

D_t : 通過センサを用いて推定する場合の播種間隔(mm)

D_h : 高速度カメラを用いて推定する場合の播種間隔(mm)

P_f : 種子1の着地点から種子誘導管の中心線までの距離(mm)

P_s : 種子2の着地点から種子誘導管の中心線までの距離(mm)

t_f : 種子1が通過した時間(s)

t_s : 種子2が通過した時間(s)

v : 播種機の走行速度(mm/s)

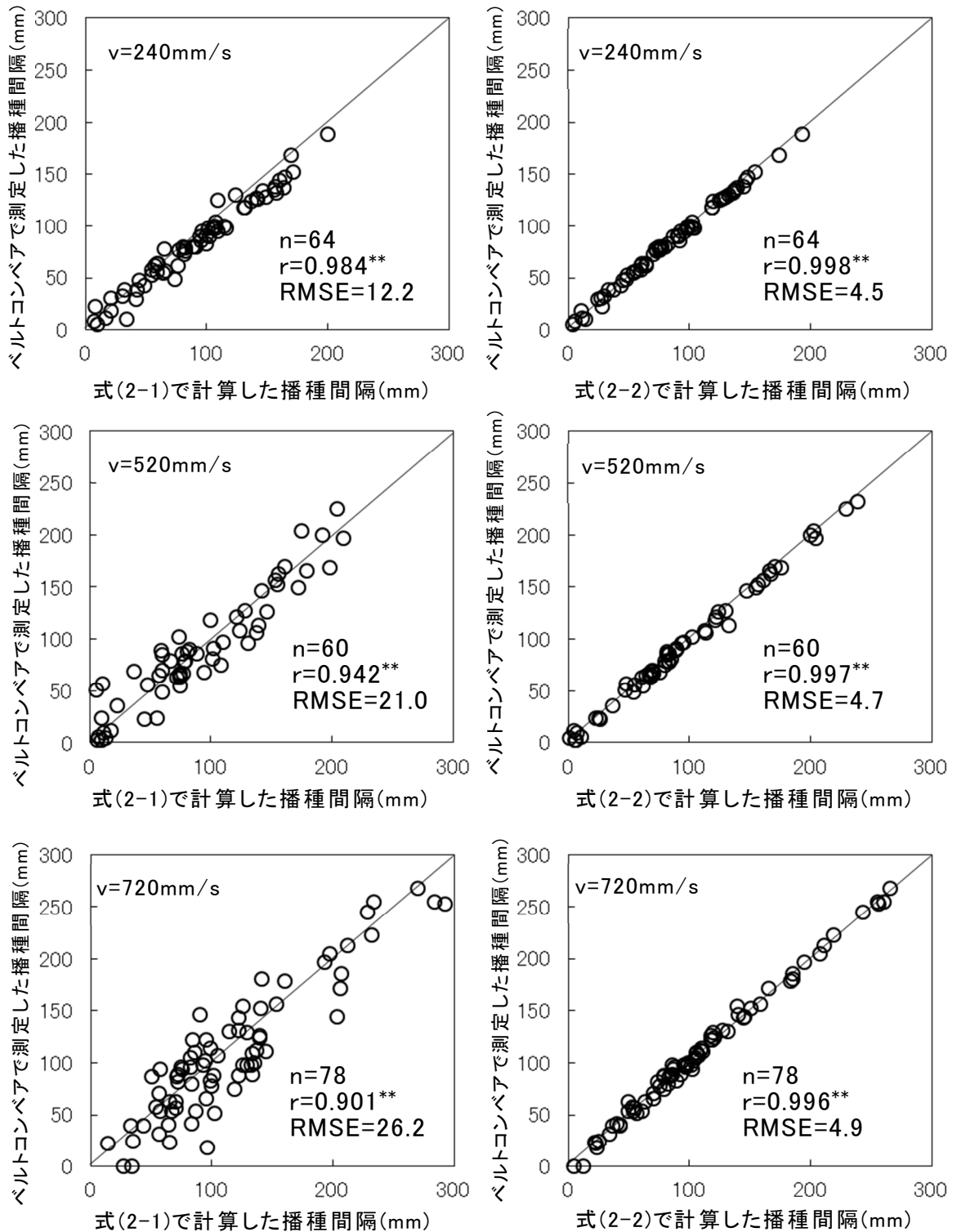


図2-3 推定式(2-1)と(2-2)で計算した播種間隔の推定精度

注：図中のvは、播種機の走行速度

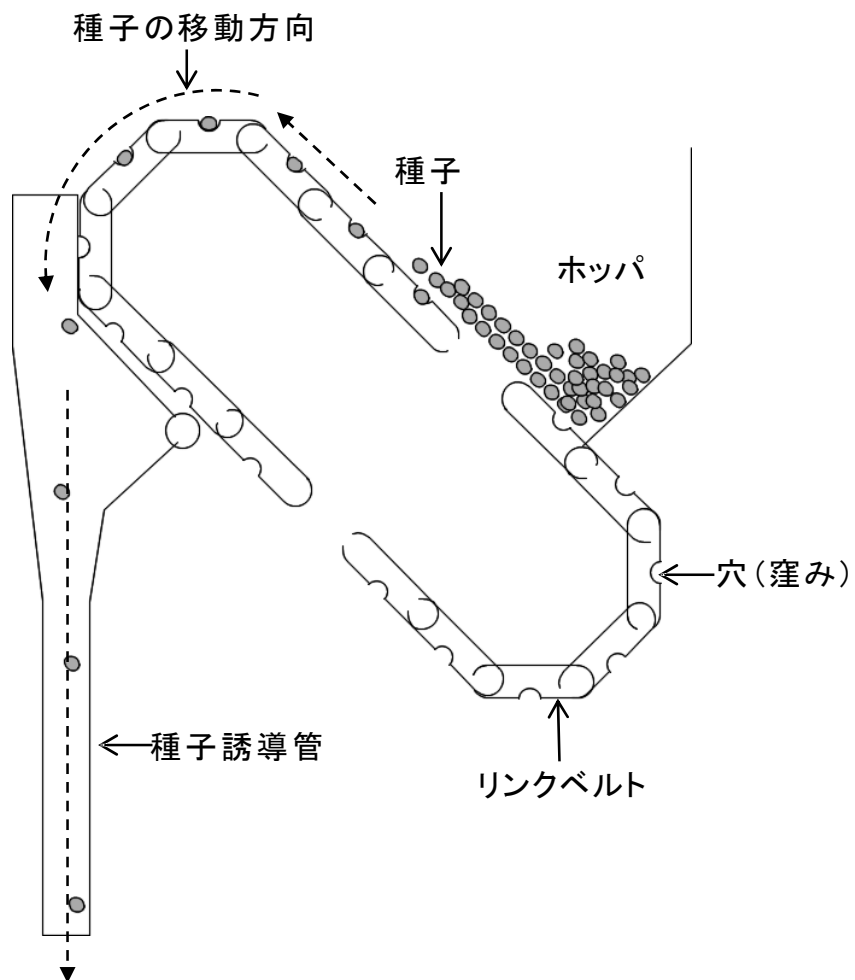


図2-4 傾斜ベルト式播種機の概略図

表2-2 種子の形状と質量

作物	形状	寸法 (mm)	質量 (mg)
ハウレンソウ	尖った 長扁平	3.3 × 3.0 × 2.2 (0.3 × 0.2 × 0.2)	10.3 (0.2)
ダイコン	長扁平	3.6 × 3.0 × 1.9 (0.3 × 0.3 × 0.3)	13.2 (2.5)
ニンジン	球(コート 種子)	3.3 (0.1)	18.8 (2.4)

注: 1) 寸法は, 高さ × 幅 × 厚さ

2) ()内の数値は標準偏差

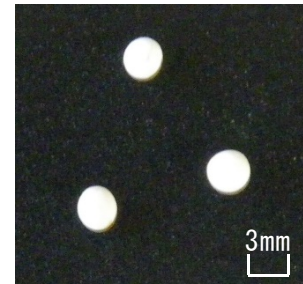
3) 調査数は, ハウレンソウ・ダイコンがそれぞれ 50 個, ニンジンが 30 個



a.ホウレンソウ



b.ダイコン



c.ニンジン

図2-5 種子の例

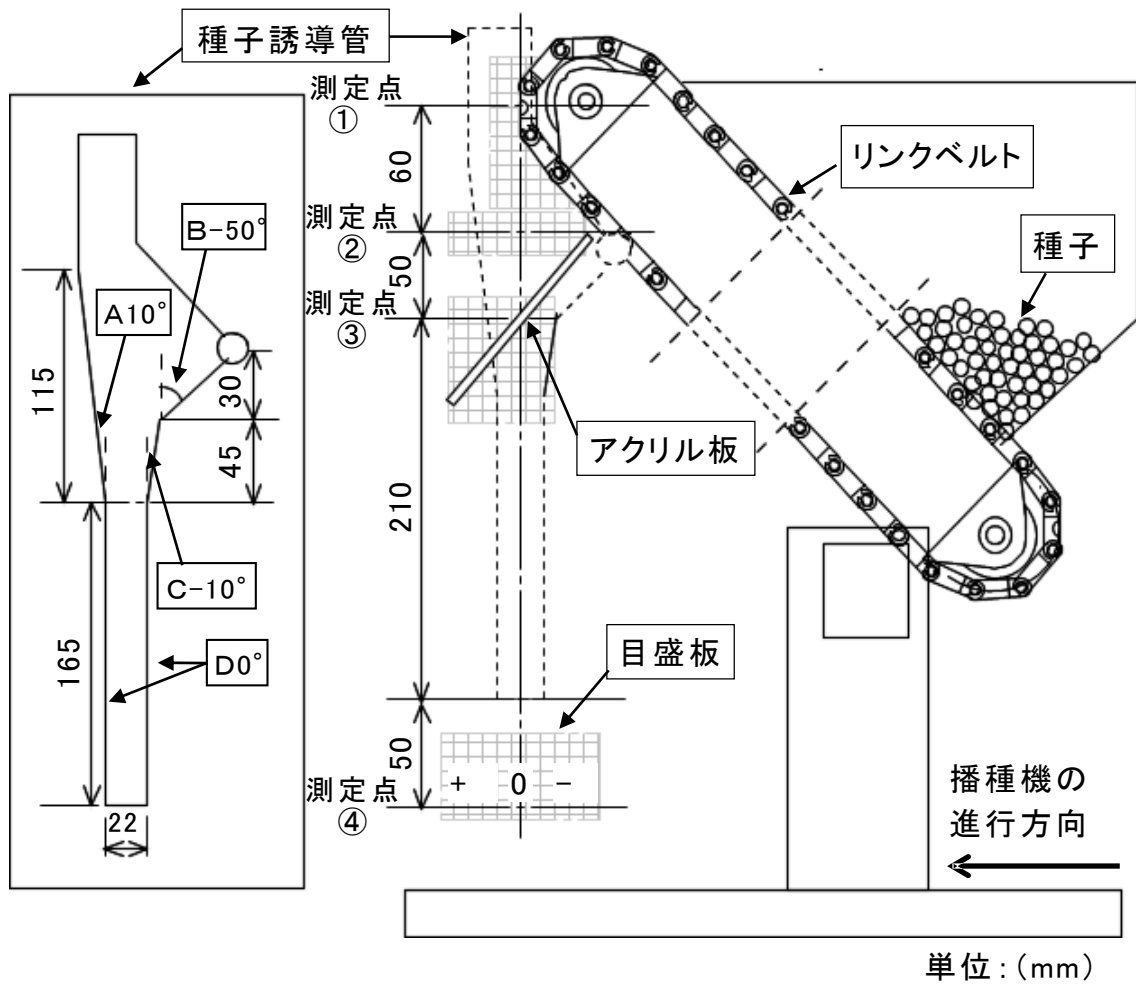


図2-6 目盛板の取り付け位置および種子誘導管の管壁角度
 (左:種子誘導管, 右:実験装置)

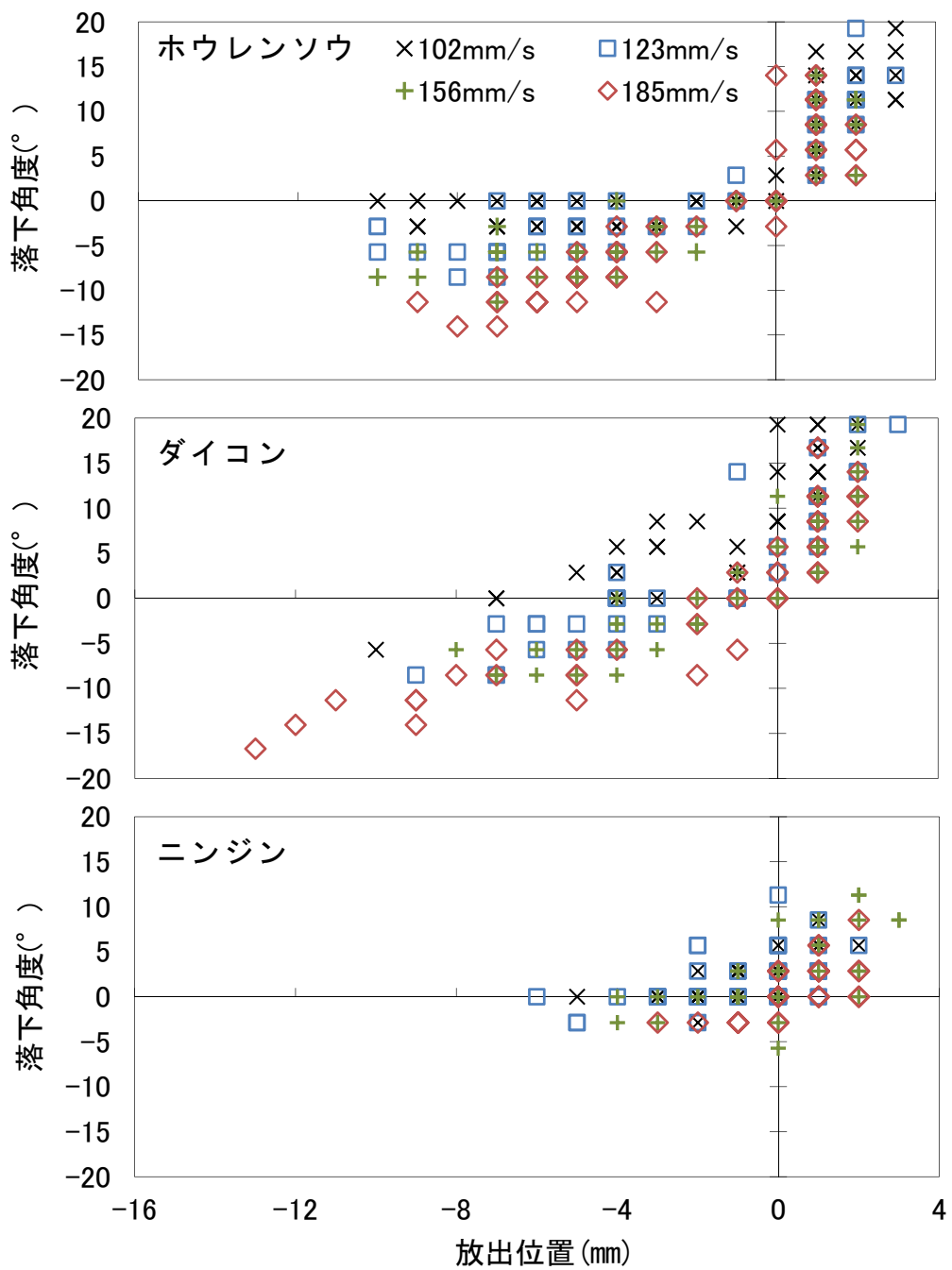


図2-7 リンクベルトの速度変化による放出位置と落下角度

注: 1) 落下角度は, 垂直落下を0度として進行方向を正, 進行方向の逆を負
 2) 凡例の数値はリンクベルトの速度

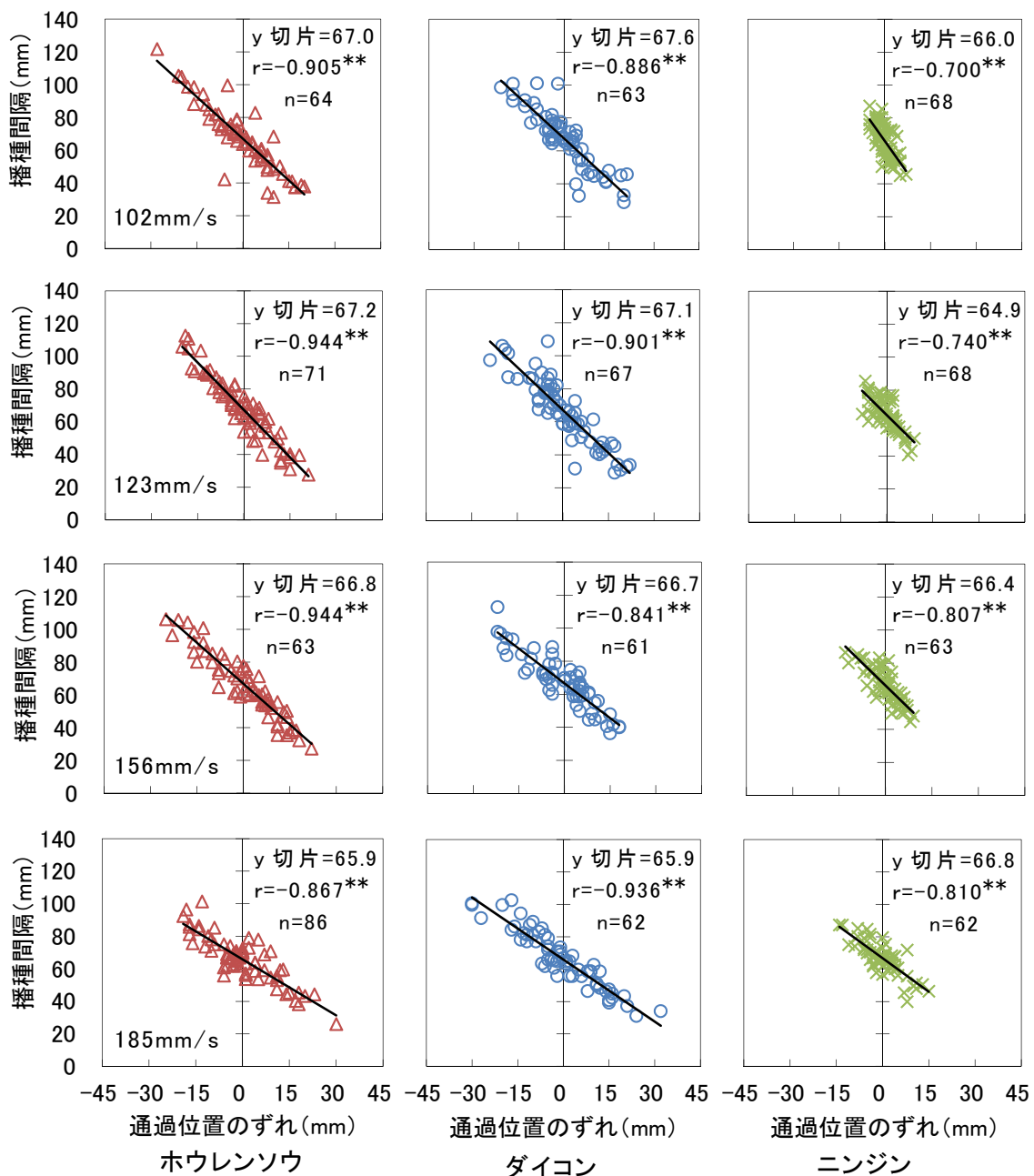


図2-8 落下開始直後の通過位置のずれと播種間隔

注： 1) 図中の速度は、リンクベルトの速度

2) 相関係数に付した**は1%で有意であることを示す

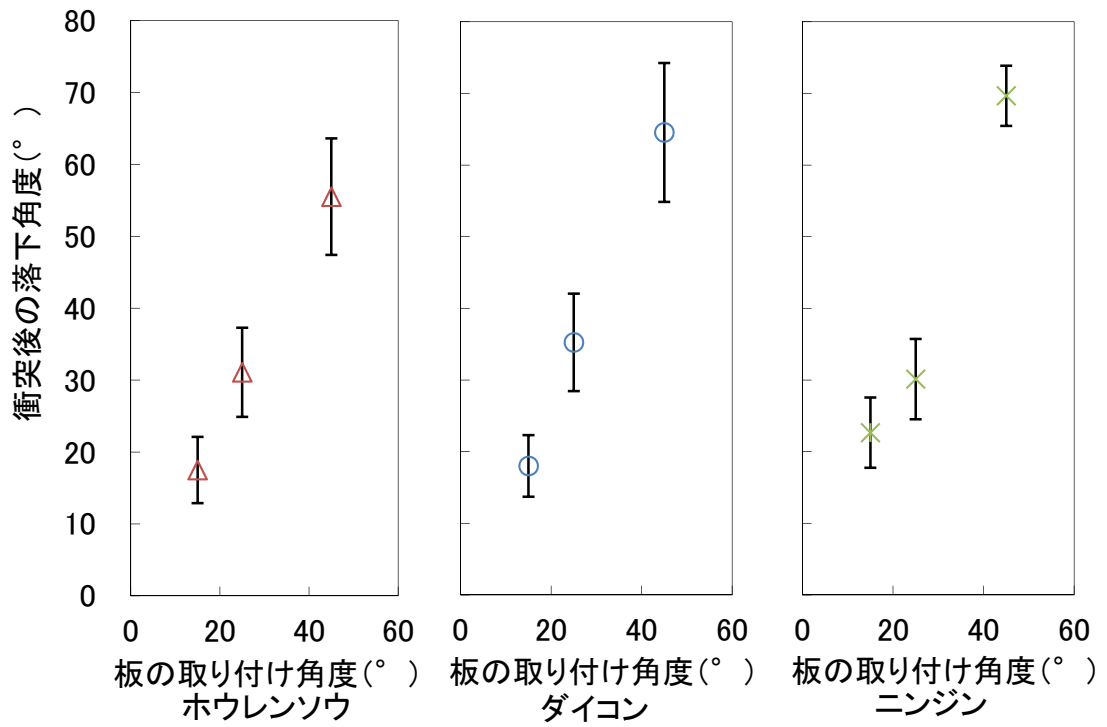


図2-9 アクリル板の取り付け角度と衝突後の落下角度

注:エラーバーは,標準偏差

表2-3 最初に衝突した管壁と種子誘導管を通過するまでに要した時間および管壁に衝突した回数

最初に 衝突し た管壁 ^Z	ハウレンソウ			ダイコン			ニンジン		
	落下時間 (s)	衝突回数 (回)	割合 (%)	落下時間 (s)	衝突回数 (回)	割合 (%)	落下時間 (s)	衝突回数 (回)	割合 (%)
A	0.14 ±0.01 ^Y	1.90 ±0.62	21.0	0.15 ±0.03	1.95 ±0.67	24.0	0.16	2.00	1.0
B	0.17 ±0.02	2.00 ±0.52	16.0	0.16 ±0.01	2.13 ±0.50	19.0	0.17	3.00	1.0
C	0.22 ±0.04	2.71 ±0.49	7.0	0.25 ±0.05	3.71 ±0.25	8.0	—	—	0
D	0.16 ±0.03	1.39 ±0.69	33.0	0.14 ±0.03	1.20 ±0.52	24.0	0.14 ±0.01	1.00 ±0.00	21.0
無	0.14 ±0.00	—	23.0	0.13 ±0.00	—	25.0	0.10 ±0.00	—	77.0

Z:最初に衝突した管壁は, 図2-6に記載

Y:落下時間と衝突回数の数値は, 平均±標準偏差

表2-4 種子誘導管が地面に着地する直前の播種間隔に与える影響

種子誘導管の有無	ベルトの移動速度(mm/s)	平均±標準偏差(mm)		
		ハウレンソウ	ダイコン	ニンジン
無	102	65.5±9.3	67.1±10.6	67.0±7.7
	123	64.6±8.6	66.6±8.7	66.4±8.8
	156	66.4±8.6	67.2±11.1	65.9±7.3
	185	66.7±8.6	67.1±10.6	65.8±6.0
有	102	63.9±29.8	64.1±30.1	67.7±9.4
	123	65.4±33.9	66.2±34.6	66.4±10.8
	156	66.8±25.7	67.8±29.1	66.9±11.3
	185	66.3±35.0	68.3±24.6	65.9±18.4

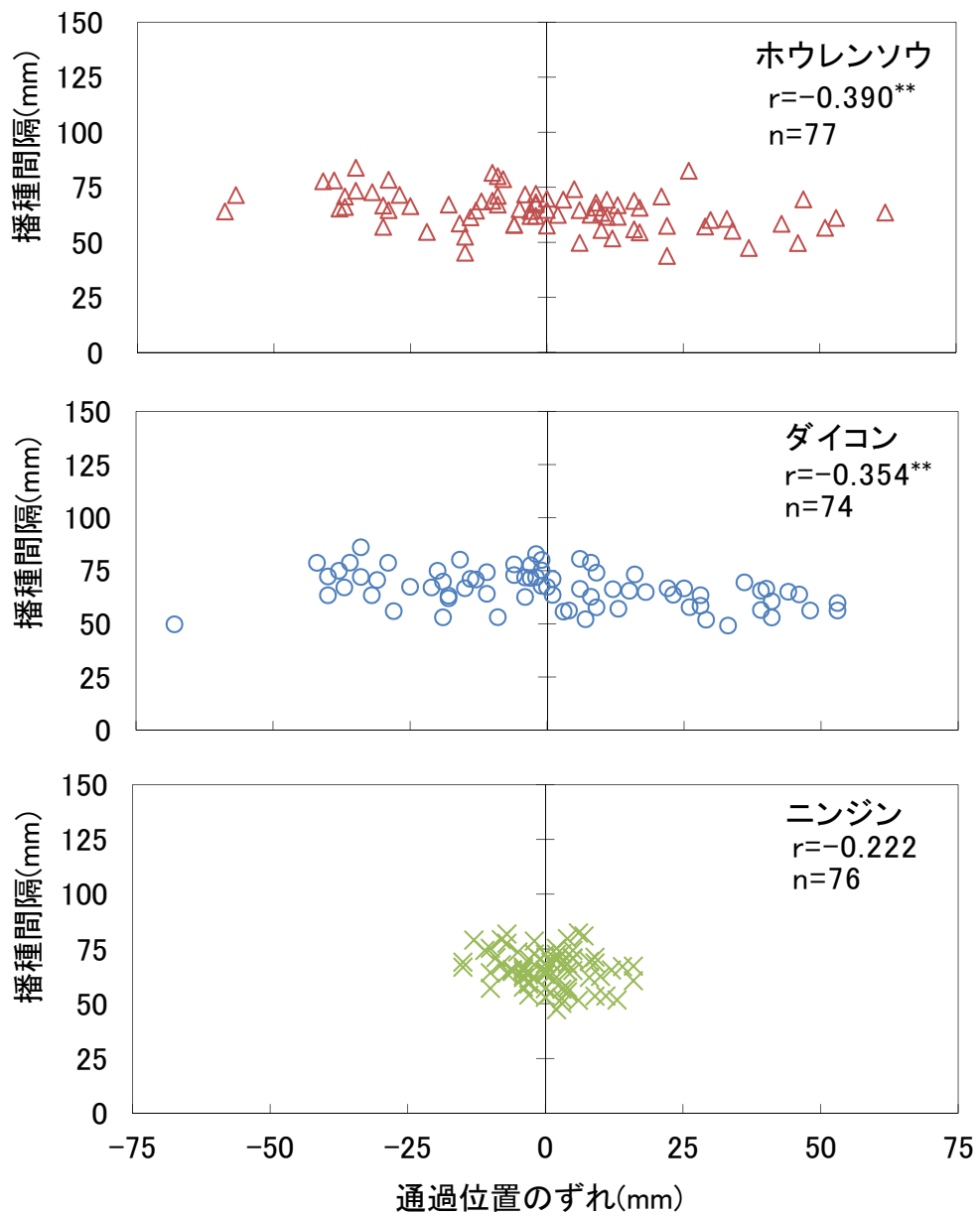


図2-10 地面に着地する直前の通過位置のずれと播種間隔
(種子誘導管なし, リンクベルトの速度 123mm/s)

注: 相関係数に付した**は1%で有意であることを示す

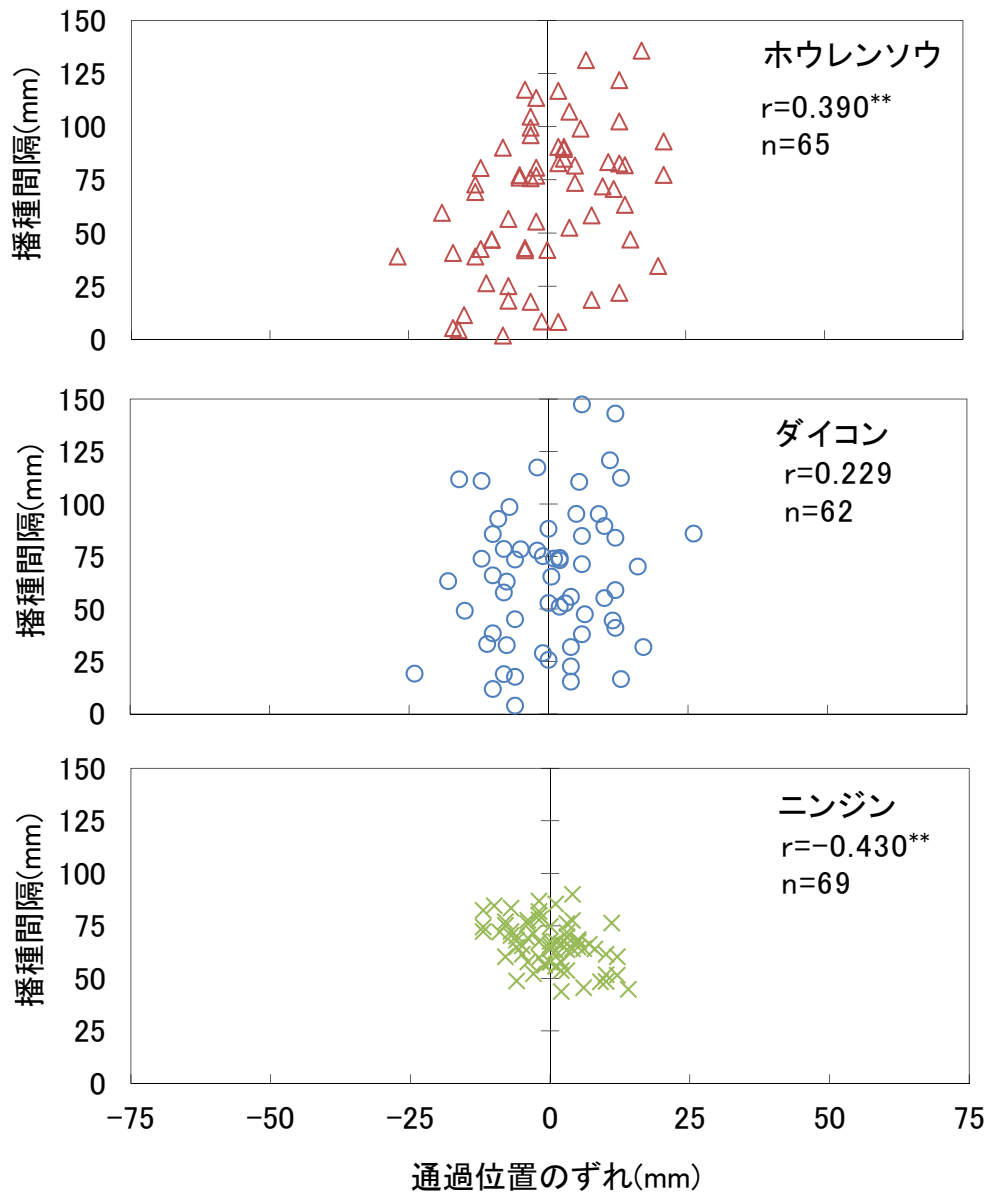


図2-11 地面に着地する直前の通過位置のずれと播種間隔
(種子誘導管あり, リンクベルトの速度 123mm/s)

注: 相関係数に付した**は1%で有意であることを示す

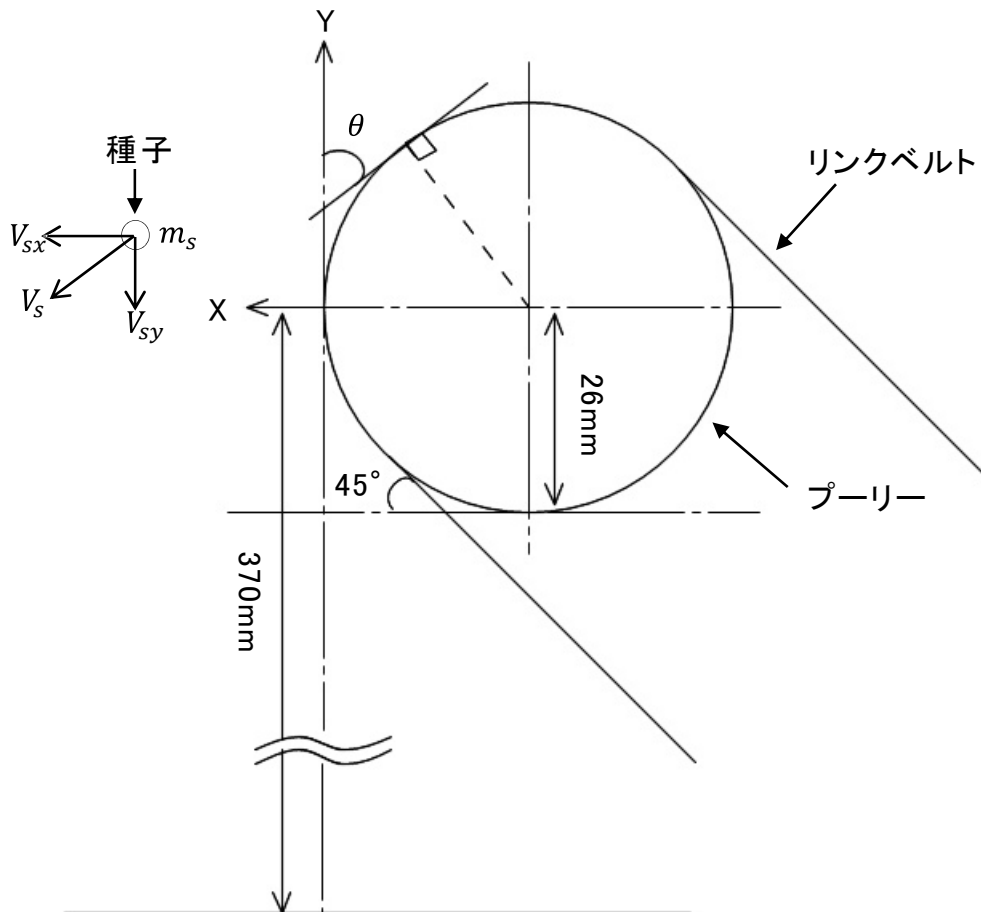


図2-12 播種機のモデル

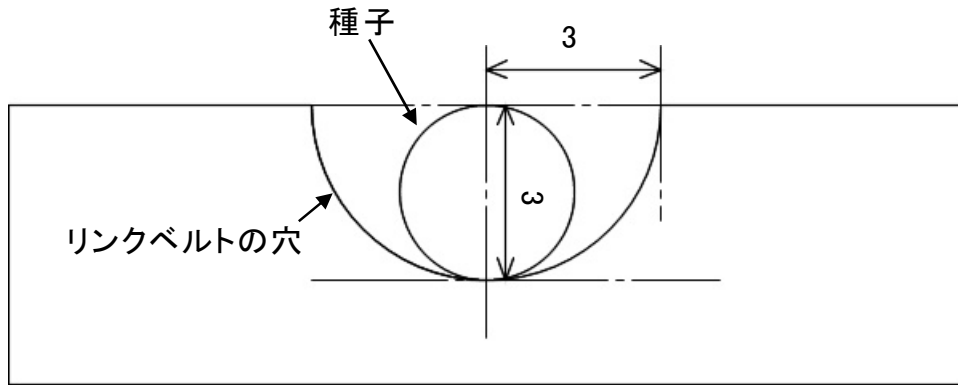
m_s : 種子の質量(kg)

V_s : 種子の速度(m/s)

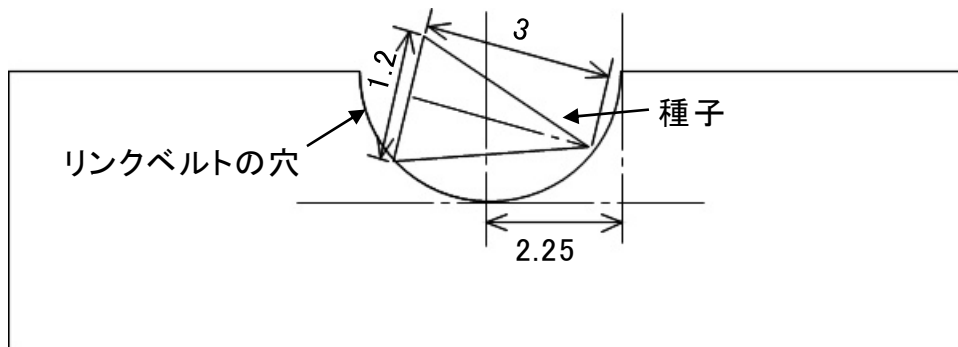
V_{sy} : 種子の垂直方向 (y 方向) の速度(m/s)

V_{sx} : 種子の垂直方向 (x 方向) の速度(m/s)

θ : 放出時のリンクベルトの角度($^{\circ}$)



a.ニンジン種子(球体)



b.ホウレンソウ種子(楕円錐)

図2-13 種子がリンクベルト穴に入っている状態のモデル

注: 図中の数値の単位は, mm

表2-5 シミュレーションで用いた種子がリンクベルトから放出される位置と放出角度

リンクベルト の速度 (mm/s)		ニンジン		ハウレンソウ	
		開始点	終点	開始点	終点
102	座標	(-2,10.0)	(-5,-15.3)	(-1,7.1)	(-10,-20.8)
	角度	22.6	36.1	74.1	45.0
123	座標	(-2,10.0)	(-6,-16.6)	(-3,12.1)	(-10,-20.8)
	角度	22.6	39.7	62.2	45.0
156	座標	(-1,7.14)	(-3,-12.1)	(-2,10)	(-10,-20.8)
	角度	15.9	27.8	67.4	45.0
185	座標	(-1,7.14)	(-3,-12.1)	(-2,10)	(-9,-19.8)
	角度	15.9	27.8	67.4	45.0

注：1) 図2-12のプーリーの中心を通る水平線をx軸，プーリーと接する垂直線をy軸とした。

2) 座標の数値の単位は，mm である。

3) 角度の単位は，度(°) である。

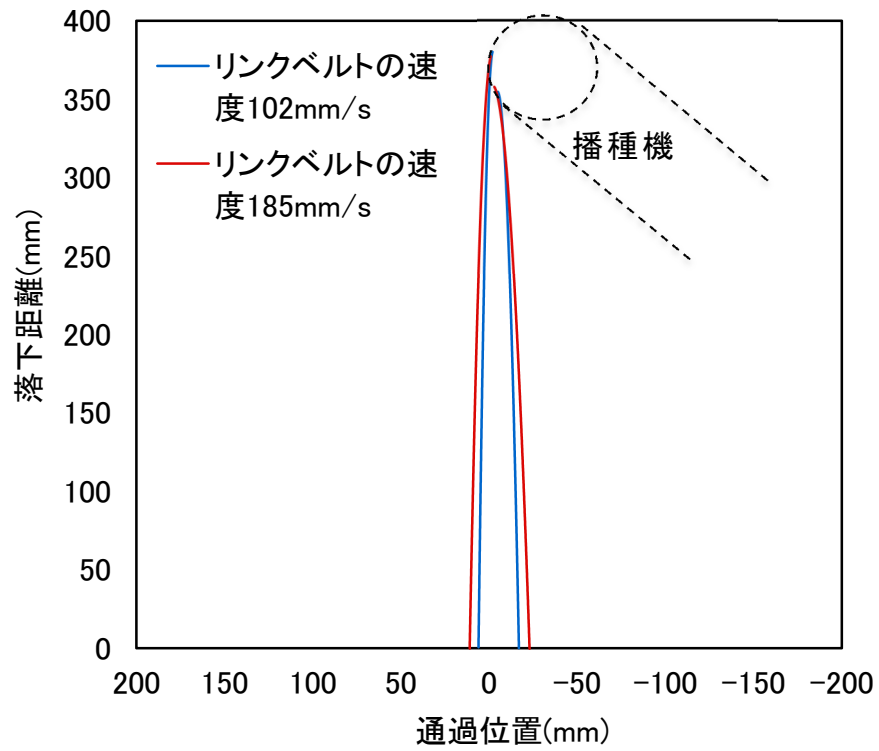


図2-14 ニンジン種子(球体)の場合の落下軌跡のシミュレーション結果

表2-6 ニンジン種子(球体)の場合の通過位置の実測値とシミュレーション値の比較

リンクベル トの速度 (mm/s)	放出位置	通過位置(mm)		誤差 (mm)
		実測値	シミュレーション値	
102	開始点	6	6	0
	終点	-15	-17	2
123	開始点	8	7	1
	終点	-19	-20	1
156	開始点	10	8	2
	終点	-21	-18	3
185	開始点	10	11	1
	終点	-25	-22	3

注:放出位置の開始点および終点は,表2-5の数値を用いた

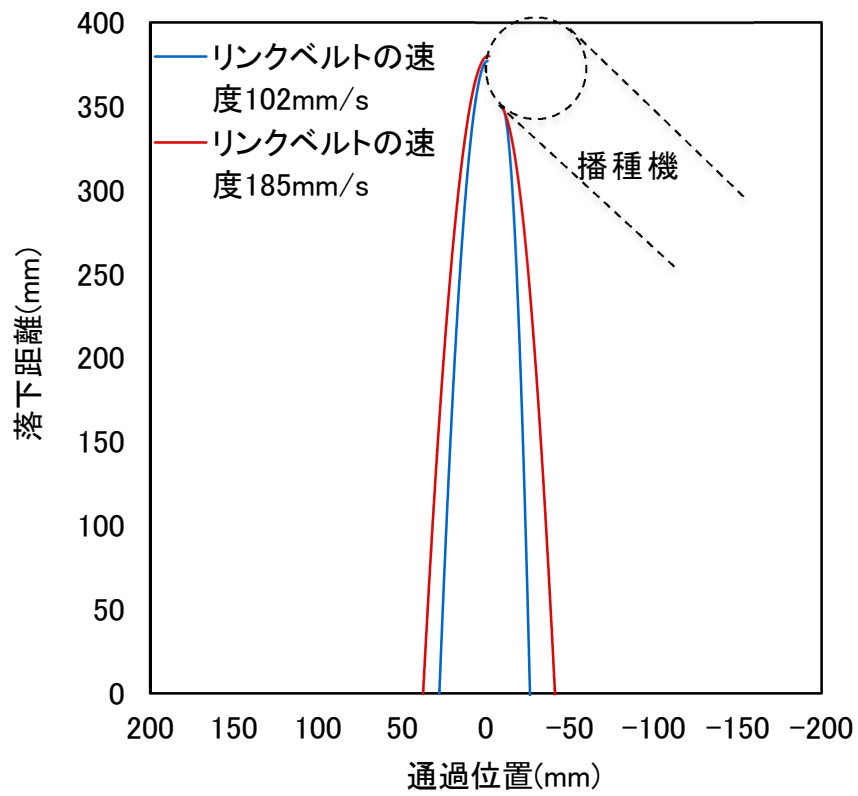
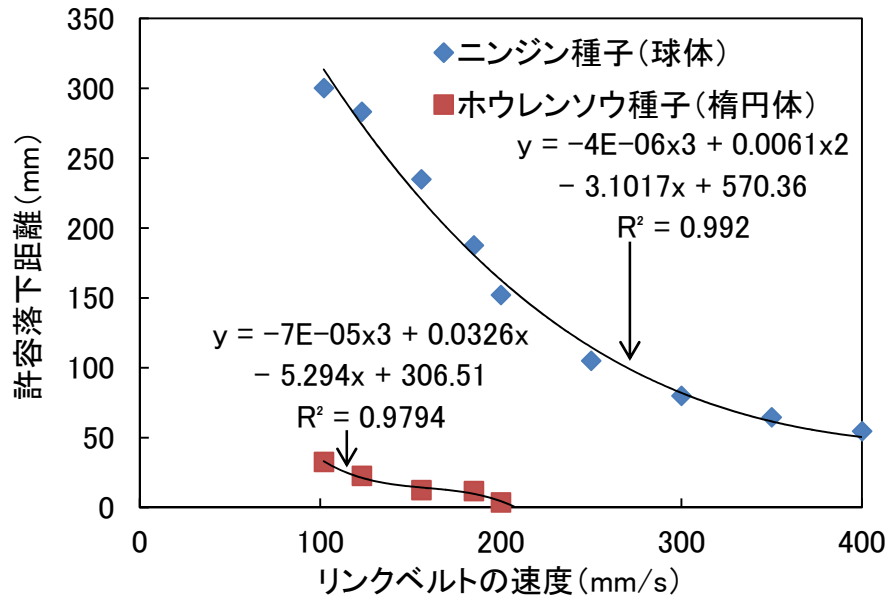


図2-15 ホウレンソウ種子(楕円錐)の場合の落下軌跡のシミュレーション結果

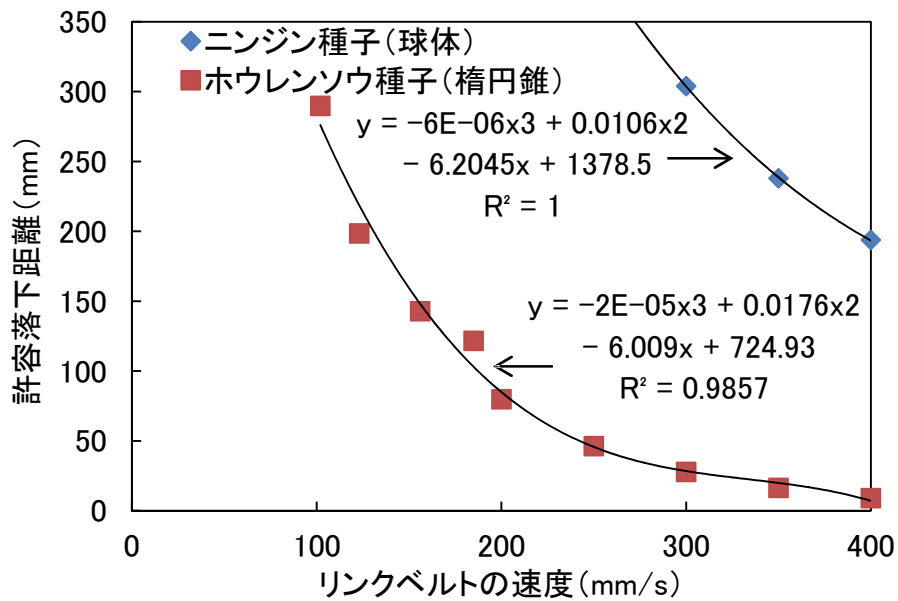
表2-7 ホウレンソウ種子(楕円錐)の場合の通過位置の実測値とシミュレーション値の比較

リンクベル トの速度 (mm/s)	放出位置	通過位置 (mm)		誤差 (mm)
		実測値	シミュレーション値	
102	開始点	28	27	1
	終点	-28	-26	2
123	開始点	31	33	2
	終点	-34	-31	3
156	開始点	31	35	4
	終点	-39	-37	2
185	開始点	37	31	6
	終点	-40	-41	1

注: 放出位置の開始点および終点は, 表2-5の数値を用いた



a. 設定の通過位置範囲が±12.5mm の場合



b. 設定の通過位置範囲が±25mm の場合

図2-16 種子が設定の通過位置範囲を超えない許容落下距離とリンクベルトの速度

第3章 二段ベルト式播種機の開発

3. 1 はじめに

第2章ではベルト式播種機における種子が放出されてから地面に着地する直前までにおいて、播種間隔精度を低下させている要因について検討した。その要因として

- (1) 種子の放出位置が一定ではないこと
- (2) 種子が種子誘導管に衝突すること
- (3) 落下距離が長いこと

等が明らかとなった。

これらを解決するには、種子が穴（窪み）につまらぬように穴（窪み）を大きくしてベルトからの放出を安定させ、放出位置を低くして落下距離を小さくすることが考えられる。しかし、単純に穴を大きくしたのではホッパから複数の種子を取り出すことになる。

そこで本章では、単純に穴を大きくするのではなく、ベルト式播種機の播種間隔精度を低下させる要因解析に基づき開発した二段ベルト式播種機の構造と基本性能について検討する。

3. 2 二段ベルト式播種機の概要

二段ベルト式播種機を図3-1に示す。この播種機は、二段ベルト式搬送機構と、溝切り部、覆土部、接地駆動輪および鎮圧輪で構成される播種機である。本機の大きな特徴は、ホッパから取り出された種子を放出位置まで搬送する二段ベルト式搬送機構にある。

二段ベルト式搬送機構を図3-2に示す。上下2本の種子搬送用ベルトで構成され、この2本のベルトにある穴が重なるように同期して動き、上ベルトの穴で種子を1粒ずつ取り出し、上ベルトと下ベルトが重なっている部分で種子が下ベルトの穴に落下し、下ベルトが低い位置まで種子を運び一定の放出位置で種子を放出する機構である。

搬送用ベルトの穴を図3-3に示す。上ベルトの穴は、種子ホッパから種子を1粒ずつ取り出すために種子の大きさに適合した大きさの穴である。下ベルトの穴は、種子が穴に入った状態を一定にするために直径16mmの円柱形の穴（ベルトに空けることができる最大の穴）である。上ベルトの上部と下ベルトの下部には種子の搬送を確実にを行うために取り付けられたカバーを図3-4に示す。このカバーはベルトの移動を阻害せずにベルトに密着するために、外側の素材が鉄板、中がスポンジ、内側が薄いプラスチックフィルムとなっている。

なお、二段ベルト式播種機は落下距離が短くできることから、種子誘導管はない。また、種子ホoppaには種子がベルトの直上のみに入るための仕切りと種子が少なくなってもベルトと種子が接する距離を長くするためにベルトに平行してスポンジがある。上ベルトの折り返し直前には、余分な種子を掻き出すためのブラシがある。さらに、播種溝を切るためのオープナは種子誘導管がないので種子の落下位置まで伸びたチゼル型である。また、覆土板は翼型とし、それぞれ独立して高さを設定できる。

3. 3 定置試験における播種間隔精度

圃場試験では土壌の碎土率や水分状態などの外乱の影響を受けて、播種機の基本性能を明らかにすることはできない。そこで、二段ベルト式播種機(以後、二段式)を台に固定して播種を行い、播種間隔精度および種子の取り出し精度の検討を行う。

3. 3. 1 試験方法および測定項目

対照の播種機は、種子の取り出し精度が比較的高いとされる真空播種機((株)啓文社製作所, SA-31 以後, 真空式)と、ベルトを『へ』の字にし、種子をホoppaから取り出す時にベルトは斜め上方向に移動し、その後播種位置を低くするために斜め下方向に種子を搬送して低い位置で放出する野菜用のベルト式播種機(向井工業(株), アップダウンベルト式播種機 HS-801 以後, アップ式)である。また、アップ式のベルトおよび二段式の上ベルトには、ハウレンソウおよびダイコンの播種では 4.5mm, ニンジンの播種では 7.0mm の直径の穴が空いたベルトを用いた。真空式のノズルには、ハウレンソウとダイコンおよびニンジンの播種用の直径 0.9mm の穴が空いたノズルを用いた。設定播種間隔は、ハウレンソウが 70mm, ダイコンが 280mm, ニンジンが 90mm である。供試した種子は、第 2 章で用いた種子と同じハウレンソウ(サカタのタネ, ‘アクティブ’, サイズ M PRIMAX 処理済), ダイコン(サカタのタネ, ‘天宝大根’, キャプタン・チウラム剤処理済)およびニンジン(みかど協和, ‘小泉冬越五寸’, コート種子 L)である。

接地駆動輪の速度制御は、接地駆動輪軸に取り付けた可変速モータ(オリエンタルモータ(株), モータ DSP501M およびギアボックス 4GN9K)および、スピードコントローラ(オリエンタルモータ(株), MSM425-401)を用いて行う。作業速度は、接地輪の外径とモータ回転速度を計算して、360,

460, 560mm/s の 3 段階に調節した。播種間隔は、接地輪から 10mm 下に目盛板を設置して、通過する種子を高速度カメラ（カシオ計算機（株）、EX-F1（設定撮像速度 600 コマ/s））で撮影して、保存した画像を動画再生ソフト（Apple 社、QuickTime7）でコマ送り再生を行い、種子の通過位置とコマ数から撮影時間を計算して式(2-2)により求める。試験は、1 区 60 粒(画像に写った種子数)ずつの 4 反復で行った。

作業速度 560mm/s でハウレンソウを播種した場合の播種間隔の頻度分布例を図 3-5 に示す。二段式において、階級 70mm と 140mm を中心としたふたつの山が生じる。140mm の山は、設定播種間隔が 70mm であることから、欠粒である。しかし、アップ式と真空式では播種間隔が連続して分布し、欠粒をはっきりと区別することはできない。これらのことから、播種間隔は正規分布にならないと考えられるために、平均や標準偏差で考察することは適切ではない。そこで、中央値と四分位範囲、および欠粒率と複粒播き率で播種間隔揃いを評価する。さらに、間引き作業の簡易化を考慮した場合、一定の播種間隔に揃っていることが重要なので、播種間隔の誤差の許容範囲を 20mm とし、この範囲を基準として播種間隔 0mm から走査してもっとも高くなる頻度割合（以後、最大頻度割合）を求めて播種間隔精度の指標として用いる。なお、欠粒は、前述の通りアップ式と真空式では分布から判断することが困難であったため、二段式の分布から判断して、中央値×2-20(mm)以上の播種間隔の場合を欠粒とする。また、複粒播きは播種間隔が 10mm 未満の場合とする。

また、播種機のベルトは接地駆動輪で駆動されているため、播種機の負荷トルクが大きい場合は、スリップを引き起こし、播種間隔精度を低下させる原因になる。そこで、二段ベルト式播種機の負荷トルクも定置試験により測定する。台に固定した播種機の接地駆動輪にワイヤを巻き付け、ワイヤにフォースゲージ（デジテック(株)：DTG-FX1) 取り付ける。そのフォースゲージを水平に引っ張り 0.5s 間隔で測定した引っ張り力 F_b (N)の平均を用いて、式(3-1)により負荷トルク T (N・m)を計算する。測定は 3 反復を行った。

$$T = \frac{F_b \times D_c}{2} \quad (3-1)$$

ただし、 D_c : 接地駆動輪の直径(m)

接地駆動輪の直径は、二段式が 0.28m、アップ式が 0.25m、真空式が 0.22m である。播種機に搬送機構を付けた状態と搬送機構を外した状態で負荷トル

クを求め、その差を搬送機構の負荷トルクとする。また、二段式は搬送機構の上下ベルトに取り付けられたカバーを取り外した状態およびベルトが一段の状態でも測定する。

統計検定には、二段式とその他の播種機（アップ式と真空式）との有意差を検定するために Dunnet 検定を用いる。また、作業速度が速くなると平均値が大きくなると仮定して、傾向検定である Jonckheere 検定を用いる。

3. 3. 2 結果および考察

定置試験におけるハウレンソウ、ダイコン、ニンジンの播種間隔の変動を表 3-1 に示す。二段式によるハウレンソウの播種において、四分位範囲は 6.9~8.6mm と他の方式よりも 2 分の 1 以下と狭い範囲である。最大頻度割合は 80.0~87.3% であり、真空式と比較しても 2 倍以上の高い割合である。この傾向は他の作業速度でも同様である。欠粒率は 0~1.2% で、真空式と同等で、アップ式より低い。複粒播き率は 2.5~7.9%、アップ式より低い。

二段式のダイコンの播種においても同様に、四分位範囲は 7.0~12.6mm で他の播種機の 2 分の 1 以下と狭い範囲である。また、最大頻度割合は 75.7~84.8% と二段式がもっとも高い。欠粒率はアップ式と同等であるが、真空式よりも高い。また、複粒播き率はアップ式と同等で真空式よりも高い。

ニンジンの播種においては、作業速度 560mm/s におけるアップ式でも四分位範囲が 23.2mm と狭い範囲であるが、二段式はさらに狭く 8.4mm である。さらに二段式の最大頻度割合は 94.5% と他の方式よりも高い割合である。二段式の欠粒率および複粒播き率はそれぞれ 0% である。なお、真空式はホップ内部でコート種子を破壊し、その欠片を吸引するために 360mm/s の低速で播種間隔精度や取り出し精度が低い。作業速度 460, 560mm/s では、さらに種子とノズルがかみ合い播種機が停止することがあるので、調査はできない。

二段式は、アップ式や真空式よりも播種間隔の変動が小さく、ニンジンのようなコート種子であれば最大頻度割合が 90% 以上と極めて正確に播種できることが明らかとなり、ベルト式播種機の播種間隔精度を低下させる要因を改善することができた。ただし、二段式においてハウレンソウとダイコンでは作業速度が速くなると四分位範囲が広がる傾向があり、ニンジンではその傾向は見られない。ハウレンソウとダイコンの種子は裸種子で形が扁平で不均一なために下ベルトの移動速度が速くなると種子が落ちにくくなる場合があり、落下する位置が変動する。ニンジンの種子は球体（コート加工さ

れている)のために落下するタイミングは変動しないと考えられる。他の播種機でも四分位範囲が狭い場合には、この傾向が確認でき、播種間隔精度が低い場合にはこの傾向はない。また、二段式の種子ホップ内部にスポンジ等を取り付けてベルトと種子が接する時間を長くしたことにより、同じベルト式播種機であるアップ式よりも二段式の欠粒率が低下すると考えられる。

また、二段式の負荷トルクを表3-2に示す。負荷トルクは真空式の3.7倍、アップ式の2.2倍となり、駆動させるために大きなトルクが必要である。また、ベルトを二段にしたことによる負荷トルクの増加量は $0.04\text{ N}\cdot\text{m}$ であったが、カバーを付けたことによる増加量は $0.14\text{ N}\cdot\text{m}$ と、カバーを付けることによって負荷が増大する。したがって、この負荷トルクについてはカバーの材料やベルトとの密着度を検討することによって低下すると考えられる。

3. 4 圃場試験における播種間隔精度

3. 4. 1 試験方法および測定項目

露地圃場において播種作業を行い、播種間隔精度および種子の取り出し精度を調査する。播種機は、定置試験と同様に二段式、真空式およびアップ式を用いる。また、アップ式のベルトと二段式および狭条式の上ベルトには、 7.0mm の直径の穴が空いたベルト、真空式のノズルは穴の直径 0.9mm のノズルを使用する。播種作業は、播種作業の速度を一定にするために、図3-6に示すように乗用管理機と二段ベルト式播種機をワイヤで繋ぎ、播種機のハンドルを作業者が支持した状態で行う。

播種間隔は、播種後に種子を連続して50粒掘り出して調査する。欠粒率および複粒播き率は定置試験と同様の方法で求める。

3. 4. 2 結果および考察

ハウレンソウ、ダイコン、ニンジンの播種における播種機と作業速度が播種間隔に及ぼす影響を表3-3に示す。

ハウレンソウの播種において、作業速度 440mm/s における二段式の播種間隔の四分位範囲は 21.4mm で、アップ式の0.4倍、真空式の0.5倍で狭く、どの速度の場合でも同様に二段式は真空式とアップ式よりも狭い。同様に最大頻度割合も他の方式と比較して、二段式がもっとも大きい。欠粒率も二段式がもっとも低く、作業速度 440mm/s において二段式の欠粒率は1.1%で、アップ式の0.2倍、真空式の0.6倍である。複粒播き率も二段式がもっとも

低く作業速度 440mm/s で 0.0%である。また、二段式において圃場試験の作業速度 440mm/s を定置試験の作業速度 460mm/s と比較した場合、四分位範囲が 16.2mm 広く、最大頻度割合が 33%低い。

ダイコンの播種においても、作業速度 500mm/s における二段式の播種間隔の四分位範囲は 20.0mm で、アップ式の 0.3 倍、真空式の 0.6 倍である。最大頻度割合も対照の播種機と比較してもっとも高い。欠粒率と複粒播き率は他の播種機とほぼ同等である。二段式において圃場試験の作業速度 500mm/s を定置試験の作業速度 460mm/s と比較した場合、四分位範囲は 11.6mm 広く、最大頻度割合は 6.1%低い。

エンジンの播種についても二段式がもっとも四分位範囲が狭く、最大頻度割合が大きく、作業速度 490mm/s における四分位範囲は 19.0mm で、アップ式の 0.4 倍、真空式の 0.5 倍である。欠粒率は二段式がもっとも小さく、複粒播き率は他の播種機とほぼ同等である。二段式において圃場試験の作業速度 490mm/s と定置試験の作業速度 460mm/s を比較した場合、四分位範囲が 11.8mm 広く、最大頻度割合が 34.3%低い。また、真空式の作業速度 710mm/s では、定置試験と同様にコート種子を破損して、ノズルの回転も停止したために調査ができなかった。

以上より、圃場試験においても二段式は、対照の播種機よりも非常に播種間隔精度が高いことが明らかになった。しかし、定置試験より圃場試験ではいずれの播種機でも播種間隔精度が低下した。さらに作業速度が速いと播種間隔精度が低下した。播種間隔精度の低下の原因として、圃場の碎土率、覆土板の影響、接地輪のスリップ等が考えられる。碎土率と覆土板の設定は、他の播種機とほぼ同一条件なので、接地輪のスリップの影響が最も大きい。本試験条件では圃場のせん断抵抗が小さいことから、接地輪から得られる駆動トルクは小さく、さらに、圃場の起伏などにより駆動トルクは変動する。そのために、負荷トルクが大きい二段式の接地駆動輪のスリップ率は変動し、播種間隔の変動が大きくなると考えられる。したがって、搬送機構の負荷を小さくする方法や接地駆動輪から大きい駆動トルクを得る方法を検討することにより、さらに播種間隔精度が高くなると考えられる。

3. 5 まとめ

ベルト式播種機構を改良して、簡単な構造で精密な播種が可能な二段ベルト式播種機を開発し、この播種機の播種間隔精度について固定試験および圃場試験で明らかにした。

- (1) 二段ベルト式播種機の特徴は、2本のベルトが同期して動き、上ベルトの小さな穴で種子をホoppaから1つずつ取出し、下ベルトの大きな穴に種子を渡し、低い位置で種子を放出することにより、種子の放出位置を安定させ落下距離が短くできることである。
- (2) 定置試験において、二段式を用いてニンジン種子(球体、コート種子)を播種した場合、作業速度 560mm/s でも播種間隔の四分位範囲は 8.4mm と真空式播種機(真空式)やベルトアップダウン式播種機(アップ式)の2分の1以下であり、最大頻度割合は 94%、欠粒率および複粒播き率も 0% と、正確に播種することができる。
- (3) 形が不均一な裸種子のハウレンソウやダイコンの播種でも、欠粒率が真空式よりも同等かやや高いが、作業速度 560mm/s でも播種間隔の四分位範囲は 8.6mm, 12.6mm で真空式およびアップ式の 0.25~0.55 倍で正確に播種することができる。
- (4) 二段式の負荷トルクは $0.36\text{N}\cdot\text{m}$ で、真空式の 3.7 倍、アップ式の 2.2 倍であり、駆動させるために大きなトルクが必要である。また、ベルトにカバーを取り付けることによる負荷トルクの増加量は、 $0.14\text{N}\cdot\text{m}$ とカバーが負荷トルク増大の原因である。
- (5) 圃場試験においても、二段式の播種間隔の四分位範囲は、作業速度 440mm/s のハウレンソウ播種では 21.4mm で、アップ式の 0.4 倍、真空式の 0.7 倍である。同様に、作業速度 500mm/s のダイコン播種では 20.0mm で、アップ式の 0.3 倍、真空式の 0.6 倍で、作業速度 490mm/s のニンジン播種では 19.0mm で、アップ式の 0.4 倍、真空式の 0.6 倍であり、他の作業速度でも二段式の播種間隔の四分位範囲が狭く、播種間隔精度が高い。
- (6) 圃場試験において、二段式の播種間隔の四分位範囲は、定置試験の場合と比較して、ハウレンソウで 16.2mm, ダイコンで 13.3mm, ニンジンで 11.8mm 広く、播種間隔精度が低下する。
- (7) 圃場試験で播種間隔精度が低下する原因に接地輪のスリップが考えられるので、ベルトのカバーの改良を行い、負荷トルクを減少させる必要がある。

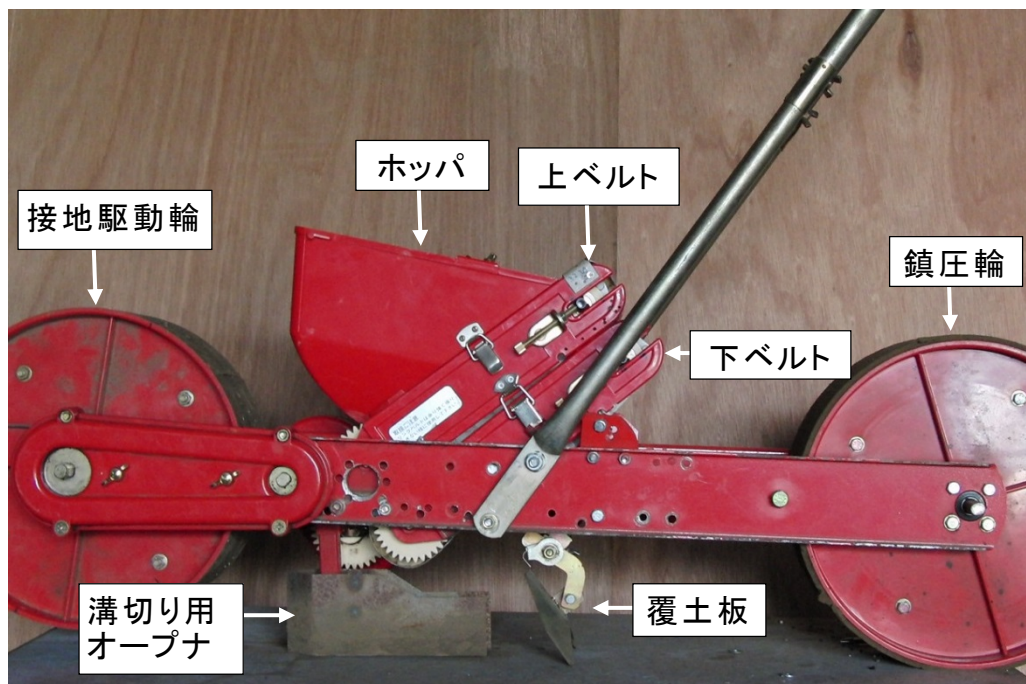


図3-1 二段ベルト式播種機

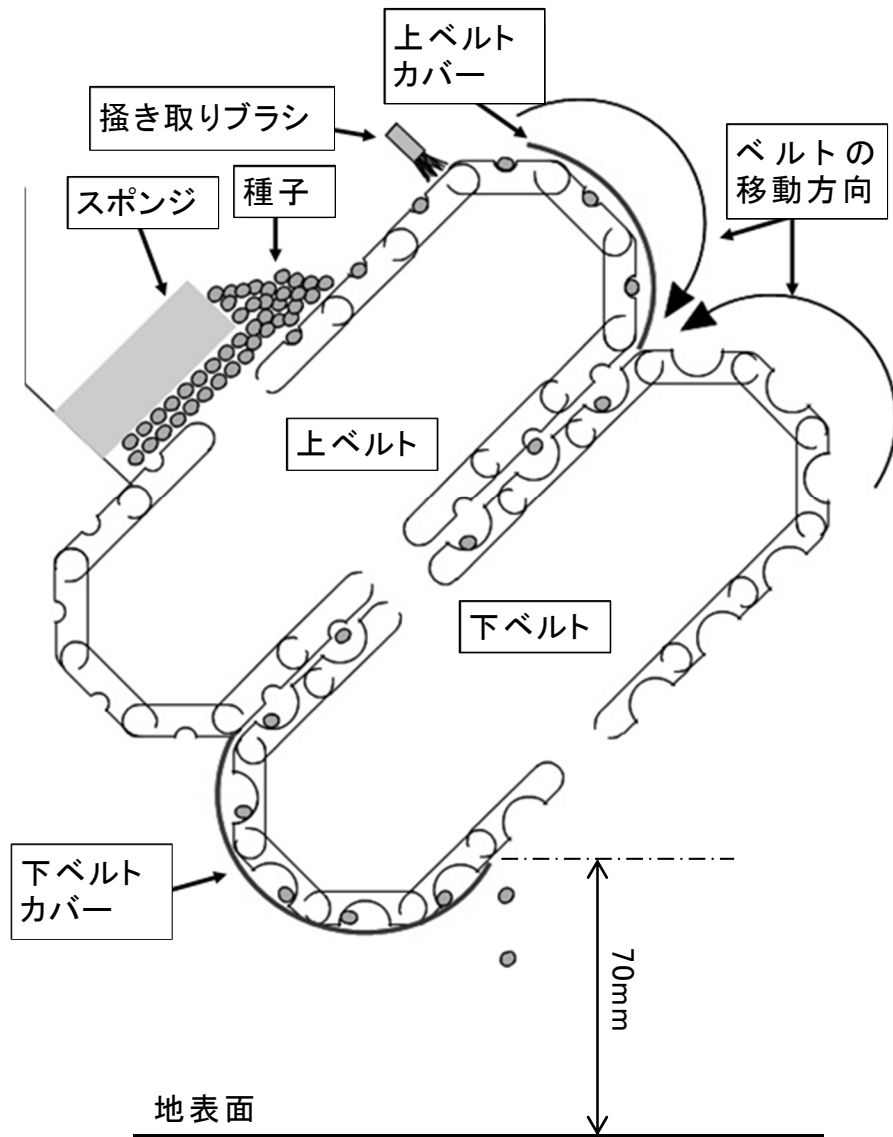


図3-2 二段ベルト式搬送機構の概要

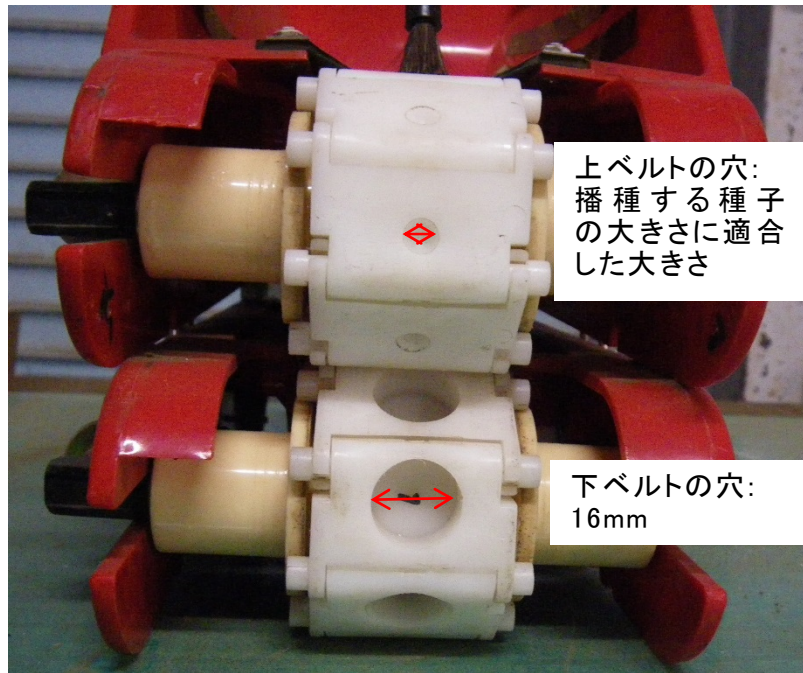


図3-3 搬送用ベルトの穴

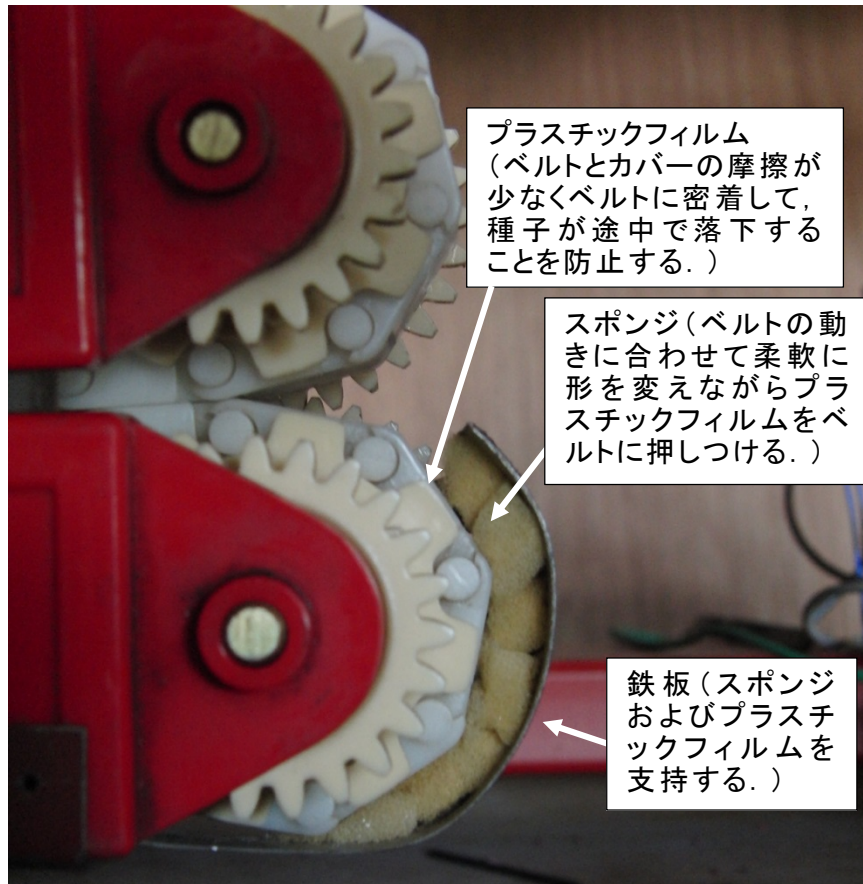


図3-4 種子の搬送を確実にを行うためのカバー

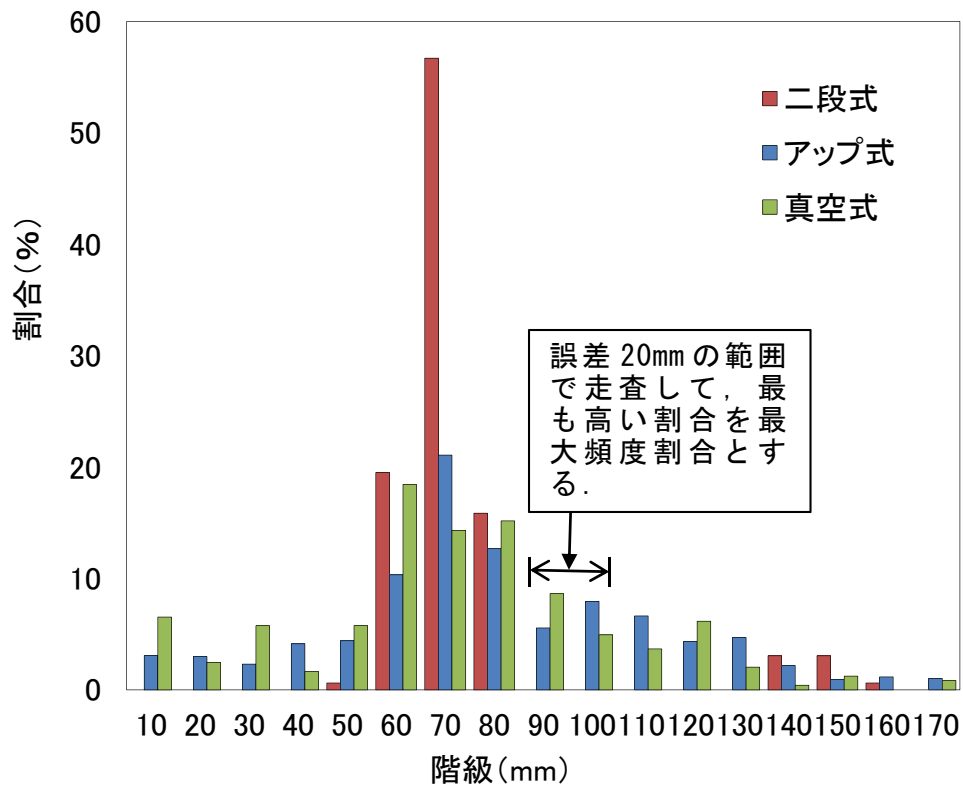


図3-5 作業速度 560mm/s でハウレンソウ種子を播種した場合の播種間隔の頻度割合

表3-1 定置試験における播種機が播種間隔に及ぼす影響

作物	作業速度 (mm/s)	播種機	中央値 (mm)	四分位範囲 (mm)	最大頻度割合 (%)	欠粒率 (%)	複粒播 き率 (%)
ホ ウ レ ン ソ ウ	360	二段式*	68.3	6.9±1.2	88.5±8.40	2.50	0.65
		アップ式	68.7	41.6±8.3**	31.8±6.18**	7.26	1.63
		真空式**	67.9	17.6±2.0**	57.3±4.99**	3.00	1.00
	460	二段式	63.3	8.0±2.1	80.0±7.00	3.70	1.22
		アップ式	69.8	45.8±12.0**	37.0±3.83**	7.60	1.77
		真空式	62.9	28.4±9.5**	46.5±5.80**	1.23	0.41
	560	二段式	66.0	8.6±1.9	87.3±7.04	7.93	0
		アップ式	69.6	41.0±4.6**	36.3±2.99**	12.47	3.06
		真空式	54.3	29.4±5.6**	40.0±6.32**	6.54	6.54
ダ イ コ ン	360	二段式**	266.9	7.0±1.6	84.8±0.50	6.73	5.29
		アップ式	267.1	49.2±6.0**	27.3±3.20**	6.78	2.21
		真空式	261.4	19.8±2.9**	56.3±6.85**	0	1.22
	460	二段式	263.1	8.2±1.4	79.3±2.22	6.25	6.25
		アップ式	265.6	27.0±2.6**	45.0±8.72**	7.48	1.96
		真空式	266.3	20.1±5.2**	56.5±11.0**	0	0.98
	560	二段式	265.1	12.6±4.2	75.7±7.37	7.69	1.28
		アップ式	263.8	27.4±4.1**	46.8±4.03**	8.82	5.39
		真空式	261.4	22.1±4.0*	50.3±5.32**	0	2.45
ニ ン ジ ン	360	二段式	95.8	7.8±2.3	91.5±5.20	0	0
		アップ式	84.3	13.8±1.0*	70.0±5.94**	0	0
		真空式	84.5	54.2±14.2**	37.8±6.45**	24.77	0.49
	460	二段式	93.0	7.2±0.5	95.3±1.71	0	0
		アップ式	85.6	16.2±1.8**	63.0±4.57**	0	0
		真空式	—	—	—	—	—
	560	二段式	84.0	8.4±1.2	94.5±6.36	0	0
		アップ式	88.1	23.2±8.0**	53.5±5.51**	1.94	0.97
		真空式	—	—	—	—	—

注：1)播種間隔は、式(2-2)で求めた推定値である。

2)四分位範囲および最大頻度割合に、**(p<0.05), *(p<0.1)が有る場合 Dunnet 検定の結果、二段式とそれぞれの播種機(アップ式, 真空式)の間に有意差あり。

3)作業速度 0.36m/s の播種機の項目内に、**(p<0.05), *(p<0.1)が有る場合 Jonckheere 検定の結果、作業速度が速くなると四分位範囲が広がる傾向が有意にある。

4)四分位範囲と最大頻度割合の数値は、平均値±標準偏差 その他の数値は平均値。

表3-2 播種機の種類および二段式のカバーの有無が駆動のための負荷トルク(N・m)に与える影響

二段式		一段	真空式	アップ式
カバー有り	カバー無し			
0.36±0.02	0.21±0.04	0.18±0.07	0.10±0.02	0.17±0.01

注：表中の数値は、平均値±標準偏差

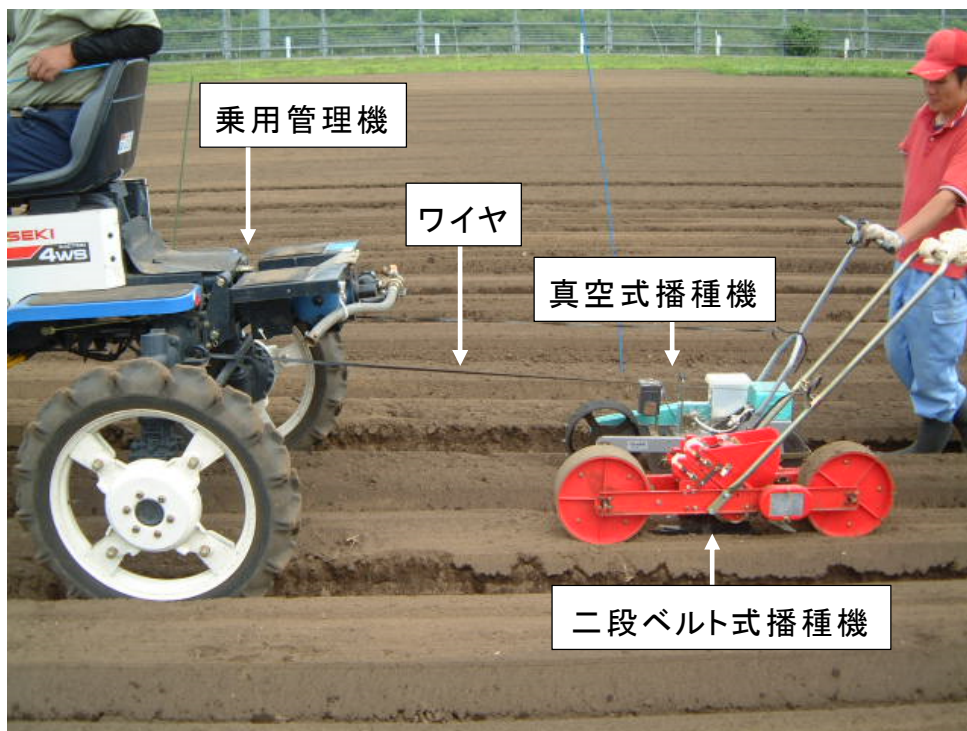


図3-6 圃場試験での播種作業

表3-3 圃場試験における播種機と作業速度が播種間隔に及ぼす影響

	作業速度 (mm/s)	播種機	中央値 (mm)	四分位数範囲 (mm)	最大頻度割合 (%)	欠粒率 (%)	複粒播 き率 (%)
ホ ウ レ ン ソ ウ	190	二段式	69.7	22.4	56.0	1.02	1.02
		アップ式	89.5	61.3	28.5	8.45	3.37
		真空式	79.0	37.6	36.5	1.00	7.44
	290	二段式	71.0	21.3	53.5	2.13	1.09
		アップ式	89.4	58.5	26.5	9.32	1.25
		真空式	84.0	36.9	37.5	3.57	1.19
	440	二段式	72.1	21.4	46.5	1.09	0.00
		アップ式	74.3	57.4	24.0	6.90	4.57
		真空式	79.7	47.0	30.0	1.92	4.05
ダ イ コ ン	350	二段式	265.0	10.0	77.0	0.00	1.52
		アップ式	250.0	55.0	25.0	1.33	4.05
		真空式	255.0	25.0	48.0	1.41	1.43
	500	二段式	265.0	20.0	72.0	1.45	0.00
		アップ式	255.0	70.0	26.0	2.70	2.74
		真空式	255.0	35.0	41.0	0.00	1.39
	640	二段式	272.5	20.0	56.0	1.56	1.59
		アップ式	272.5	76.3	23.0	1.56	0.00
		真空式	250.0	35.0	39.0	1.49	0.00
ニ ン ジ ン	340	二段式	100.0	10.0	70.0	3.57	0.00
		アップ式	97.5	20.0	57.0	1.72	1.72
		真空式	90.0	30.0	48.0	9.84	0.00
	490	二段式	98.0	19.0	61.0	0.00	0.00
		アップ式	103.0	43.3	28.0	0.00	1.79
		真空式	105.0	32.5	32.0	8.06	0.00
	710	二段式	95.5	30.8	47.0	3.33	0.00
		アップ式	111.0	76.5	21.0	10.00	0.00
		真空式	—	—	—	—	—

注: 1) 播種間隔は実測値である。

2) 播種間隔の測定の最小間隔は、ダイコンが5mm、ホウレンソウ、ニンジンが1mm

第 4 章 間引き作業簡易化のための二段ベルト式

狭条点播機の開発

4. 1 はじめに

第3章で開発した二段ベルト式播種機（以後、二段式）を用いて球体ではない形のダイコン種子を播種する場合は、作業速度 0.64m/s 以下で播種間隔の四分位範囲は 20mm 以下となり、供試した市販の播種機と比較して播種間隔を均一にすることが可能となった。

そこで、二段式の主要機構である二段ベルト式搬送機構をベースに改造して、間引き作業を容易にすることが可能な状態に播種することができる二段ベルト式狭条点播機を開発し、この播種機で播種した場合の間引き作業の簡略化の効果を明らかにする。さらに、収量および収穫物の揃いについても検討する。

4. 2 狭条点播方法の概要

間引き作業を容易にできる状態にするために、第1章で記述したように畝方向に設定播種間隔よりも短い間隔で精密に播種する方法がいくつか検討されているが、この方法で播種できる機械がなく手作業で播種状態を作り出しており、現実的ではない。また、この方法では必ず間引き後の播種間隔は均一にはならない。

これを解決する方法として、本研究では、図4-1に示すように、種子を狭い間隔の2条で点播する方法（以後、狭条点播方法）を提案する。この方法の利点は、苗と苗が接していないので間引き作業が容易になること、どちらかの条に欠粒播きや不発芽が起こった場合でも欠株にならないこと、2条の播種間隔が揃っていれば間引きを行った場合でも均一な播種間隔となることである。

4. 3 二段ベルト式狭条点播機の概要

二段ベルト式狭条点播機（以後、狭条式）は、播種位置が正確で播種間隔の揃いが良い二段ベルト式搬送機構の特徴を生かし狭条点播方法で播種できるようにした播種機である。基本構造は二段式と同じであるが、搬送用のベルトは図4-2に示すように二段式のベルト幅の約2倍の幅があり、並列に 30mm の間隔で2つの播種用の穴がある。このベルトに合わせて、播種機の幅や播種ベルトを支えるカセットの幅も同様に大きい。覆土板も図4-3に示すように他と同様に二段式と同様の形状で幅が広い翼型である。溝切り用のオープナは、二段式と同様のオープナの形状では落下した種子が着地後に跳ねた場合や転がった場合に、2条の種子が1カ所に集まる可能性があ

るので、確実に2条に分けることができる形状の播種溝を掘ることができる性能が必要である。そこで、図4-4に示すような溝の底が山型になるように底が凹んだ形状であるもの（以後、凹型オープナ）と図4-5に示すようなオープナの内部に小さな車輪が2つある形状であるもの（以後、車輪付きオープナ、）および二段式のオープナとほぼ同等で一般的な形状のもの（車輪付きオープナの車輪を外したチゼル型。以後、慣行オープナ）の三種類を試作して、特性を調査した。その結果、図4-6に示すように2条の間隔は作業速度に関係なくほぼ一定で、凹型オープナで平均 $48.7 \pm 12.8\text{mm}$ と広く、車輪付きオープナと慣行オープナは、それぞれ $24.0 \pm 13.8\text{mm}$ と $27.4 \pm 11.3\text{mm}$ で差は明らかではない。そこで、溝切りオープナは、平均間隔と標準偏差から、2条の種子が1カ所に集まる可能性が低い凹型オープナとする。

4.4 二段ベルト式狭条点播機における播種間隔精度および間引き作業の短縮化

4.4.1 試験方法および測定項目

狭条点播方法を用いて播種した場合の苗立ちの状態と間引き作業の短縮化を明らかとするために、市販の播種機と二段式および狭条式でエンジンおよびダイコンの2粒播きを行い、それぞれの播種間隔と間引き作業の労働時間および収量を計測する。また、エンジンでは無間引き栽培と間引き栽培との収量比較を行うために、1粒播きの無間引き栽培も同時に行う。

(1) エンジン（タキイ交配，‘向陽2号’，ペレット種子（サイズL））の播種は、狭条式と二段式を使用して2粒播き、アップダウンベルト式播種機（M社，HS-801 以後，アップ式）と二段式を使用して1粒播きで2012年5月27日に行った。間引きは7月3日（本葉が5枚程度），収穫は9月25日に行った。調査は1区2mの2反復である。畝幅は0.7mで、条間は0.15mの2条である。狭条式の上ベルト，2段式およびアップ式のセル穴の半径は3.5mmで、二段式の2粒播きの場合が4.0mmである。設定播種間隔は80mm，設定播種深さは10mmである。土壌は黒ボク土で、砕土率は篩い目19mm未満で98.7%，篩い目6.7mm未満で81.0%である。

(2) ダイコン（サカタのタネ，‘天寶’）の播種は、アップ式と真空播種機（K社，SA-31 以後，真空式）および狭条式を使用して2粒播きを2006年7月30日に行った。間引き作業は，8月9日（本葉が4枚程度），収穫は10月3日に行った。調査は1区10mの2反復である。畝幅は0.6mの1条播きである。アップ式のセル穴の半径は2.75mm，狭条式では

2.25mm, 真空式では直径 0.9mm の穴が 2 つ空いたノズルを使用した。設定播種間隔は 280mm, 設定播種深さは 10mm である。土壌は黒ボク土で、砕土率は篩い目 19mm 未満で 96.3%, 篩い目 6.7mm 未満で 80.2%であった。

(3) 苗立ち精度の調査は、間引き作業の前後に圃場で苗の間隔を計測する。間引き作業の方針は、間引きすると間隔が設定よりも広くなると考えられる場合は間引きをせずに苗を残すことにした。また、同じ位置にある場合は、小さい方の苗もしくは奇形と判断した苗を間引くことにする。間引き作業の状況を図 4-7 に示す。作業はほとんど間引き作業を行ったことがない 40 代の女性が行い、間引き作業の労働時間を測定する。収穫調査は、出荷基準(野菜供給安定基金, 2008)にしたがって葉を切除し収穫物の重量、直径、長さを計測する。

(4) 統計検定には、狭条式とその他の播種機に差があるのかどうかをあらかじめするために、対照区とその他の区を比較する方法である Dunnett の検定方法を用いる。また、等分散の検定では、F 検定を用いて検定の多重性を避けるために Bonferroni の方法で調整を行う(青木, 2009; 永田ら, 1997)。

4. 4. 2 結果および考察

4. 4. 2. 1 苗立ち精度

ニンジンの苗立ちの状態を表 4-1 に示す。ニンジンの株間隔は、狭条式が 83.5mm と二段式 1 粒播きが 87.2mm でほぼ設定通りで、二段式 2 粒播きが 95.1mm とアップ式が 93.2mm でやや広い。また、株間隔の四分位範囲は、二段式 1 粒播きで 23.0mm, アップ式 1 粒播きで 45.2mm, 二段式 2 粒播きでは 18.0mm で、アップ式で株間隔の変動が大きい。ニンジンの欠株率は、二段式 1 粒播きが 12.9%, アップ式 1 粒播きが 22.5%, 二段式 2 粒播きが 4.7%, 狭条式が 2.5% で、狭条式の欠株が少ない。狭条式の 2 条の間隔は 36.1mm とほぼ設定通りの間隔であるが、標準偏差が 13.5mm と変動が大きい。また、2 条のずれは 18.0 ± 11.4 mm であり、播種間隔が狭いので千鳥播きに近い状態になる場合がある。

ダイコンの苗立ちの状態を表 4-2 に示す。ダイコンの株間隔はアップ式 2 粒播きが 300mm, 真空式 2 粒播きが 340mm, 狭条式が 280mm で、真空式で設定よりも広い。欠株率は、アップ式 2 粒播きが 3.3%, 真空式 2 粒播きが 1.9%, 狭条式が 0% で、アップ式が大きい。狭条式の 2 条の間隔は 35mm

で 2 条のずれが 19mm と、ニンジン播種の場合と同等であるが、ダイコンの場合は播種間隔が広いので、図 4-8 に示すように苗立ちの状態は横並行の状態となり、千鳥状にはならない。

アップ式 2 粒播きのように 1 つの穴で 2 つの種子を取り出す方法では穴が大きいために、2 粒以上種子が同時に穴に入って詰まり欠株なる場合があるが、狭条点播方法は 2 つの穴で 1 粒ずつ取り出すために、それぞれの欠粒率は高いが、2 つの穴が同時に欠粒になることは少なく間引き後の欠株率が低くなる。

4. 4. 2. 2 収穫物の揃いおよび収量

ニンジンおよびダイコンの播種方式による個体重と収量に与える影響を表 4-3 に示す。ニンジンの場合では、狭条式の 10a あたりの収穫本数は 31,429 本で、二段式 2 粒播きの 27,857 本よりも多く、さらに 1 粒播きの播種方式よりも多かった。ただし、平均の個体重は狭条式が 85.7 g で、二段式 2 粒播きが 108.8 g と狭条式が小さく、1 粒播きの播種方式より小さい。10a 当たりに換算した収量では、狭条式が 2.82t で二段式 2 粒播きの 3.02t より少ないが、1 粒播きの播種方式よりも多い。個体重の標準偏差は、狭条式が 25.4g で二段式 2 粒播きの 43.0g より小さく、1 粒播きの播種方式とは差が明らかではない。狭条式は、欠株が少ないことや株間隔も狭いことなどにより収穫本数が多い。しかし、株間隔が狭いことによって隣接する株の影響が大きく、成長が抑制されて個体重が小さくなり、収量としては、同じ間引き栽培の二段式 2 粒播きよりも少ない。個体重の揃いについては、播種間隔の揃いとの関係は明らかではない。

ダイコンの場合でも、10a あたりの収穫本数は、狭条式が 9,714 本で、アップ式 2 粒播きが 8,571 本、真空式 2 粒播きが 7,857 本で、ニンジンと同様に狭条式が多い。個体重は、狭条式が 1273.9g、アップ式が 1283.6g、真空式が 1343.0g でほぼ同等である。10a 当たりに換算した収量では、狭条式が 6.69t/10a で多い。ニンジンの場合と同様に、狭条式は欠株が少なく播種間隔が狭いために収穫本数が多くなった。個体重は、狭条式でもダイコンが生長するために十分な株間隔であるために、他の播種方式との差がなく、狭条式の収量が多い。個体重の揃いについては株間隔の揃いとの関係は明らかではない。

個体重の揃いと株間隔の揃いの関係が明らかではない原因として、出芽の揃いが考えられる。柳沢ら (1976) の報告では、ハクサイの試験では苗の大

きさを均一にできるポット苗を使用し、ダイコンの試験では、トンネル被覆によって出芽を均一にして、株間隔と個体重の関係を明らかにしている。本試験では、トンネル被覆はしておらず、出芽が一定にはならなかったと考えられる。

4. 4. 2. 3 間引き作業時間

1株当たりの間引き時間を図4-9, 図4-10に示す。ニンジンの場合では狭条式が3.6s/本, 2段式2粒播きが4.0s/本で有意な差は明らかではないが、ダイコンの場合では狭条式が2.3s/本, アップ式2粒播きが4.9s/本, 真空式2粒播きが4.2s/本で, 狭条式とその他の播種方式で有意な差が明らかである。ニンジンの場合には, 狭条式の苗立ちの状態が千鳥播きに近い状態になり, 間引き作業を行ったことがない作業者ではどの苗を残して良いか判断に迷う場面が見られ, その結果, 作業時間が延びたと考えられる。それに対して, ダイコン播種では, 狭条式の苗立ち状態は点播状で, 株と残す苗を判別することが容易で, 作業時間が短くなったと考えられる。

1つの穴で2粒播きを行う場合では図4-11aに示すように苗と苗が接しており, 間引きを行う際には, 残す苗が傷つかないように株元を押さえるなど注意して抜く必要があるが, それに比べて狭条式では図4-11bに示すように, 苗と苗は接していないのですぐに抜くことができる。したがって, 間引き作業に慣れた作業者であれば, ニンジンの場合でも作業時間が短くなると考えられる。

4. 5 まとめ

間引き作業を容易にするために, 2条を狭い間隔で点播する方法(狭条点播方法)を考案し, 第3章で開発した播種間隔精度の高い二段ベルト式搬送機構を用いて, 狭条点播方法で播種することができる二段ベルト式狭条点播機を開発した。ニンジンおよびダイコン種子を播種して既存の播種機による2粒播きの間引き作業の時間や株間隔および収量などと比較して, 有効性を確認した。

- (1) 二段ベルト式狭条点播機は, ベルトに種子穴が並列に2つに設けられ二段ベルト式搬送機構で種子を搬送し, 狭い間隔で2条に点播することができる播種機である。
- (2) 狭条式は, 2つの穴で1株分の種子を取り出すので, 2つの穴で同時に欠粒を起こすことが少ないために, 欠株率はニンジンで2.5%と他の播

- 種機の 2 分の 1，ダイコンで 0%と他の播種機より 2.6%少ない。
- (3) 狭条式の 2 条の間隔は，ニンジンが 36.1mm，ダイコンが 35.0mm でベルトの穴間隔と同等で，設定通りに 2 条を狭い間隔で別けることが可能である。
 - (4) 狭条式の 2 条のずれは，ニンジンが 18.0mm，ダイコンが 18.8mm でほぼ同じであるが，播種間隔が 83.5mm と狭いニンジンでは，千鳥の状態になる場合がある。
 - (5) ニンジンの収量については，狭条式は他の播種方式よりも欠株が少なく株間隔も狭いために個体重は 85.7g で他の播種機より 17%低い。しかし，収穫本数は，31429 本となり，他の播種機の約 1.2 倍である。
 - (6) ダイコンの収量についても，狭条式は他の播種機よりも欠株が少なく株間隔が狭いので収穫本数は，他の播種機よりも約 1.2 倍増加する。株間隔がダイコンにとっては十分に広いために個体重に差がなく，狭条式の換算収量は 6.7t/10a で他の播種方式よりも 16%増加する。
 - (7) ニンジンの間引き作業においては，設定の株間隔が狭く，狭条式で播種した場合，千鳥播きに近い状態となり間引く苗を判断することに時間を要して，間引きの作業時間は他の 2 粒播きと同等となる。
 - (8) ダイコンの間引き作業においては，設定の株間隔が広く苗を区別することが容易で，狭条式の間引きの作業時間は，2.3s/本で，他の播種方式の作業時間と比べて 49%短縮される。

以上のことより，露地野菜の直まき栽培において，二段ベルト式狭条点播機により狭い間隔で 2 条に点播することにより，設定播種間隔の広いダイコン作では間引き時間が短縮されることと，欠株が減り本数が増えたので，収量が増加する。今後，間引きの作業時間が変わらなかったニンジン作においては，間引き作業に慣れている作業員で試験する。また，2 条のずれを狭くする方法を検討する。株間隔の揃いと播種間隔の揃いとの関係については，出芽を揃えることができる条件下で試験を行う必要がある。

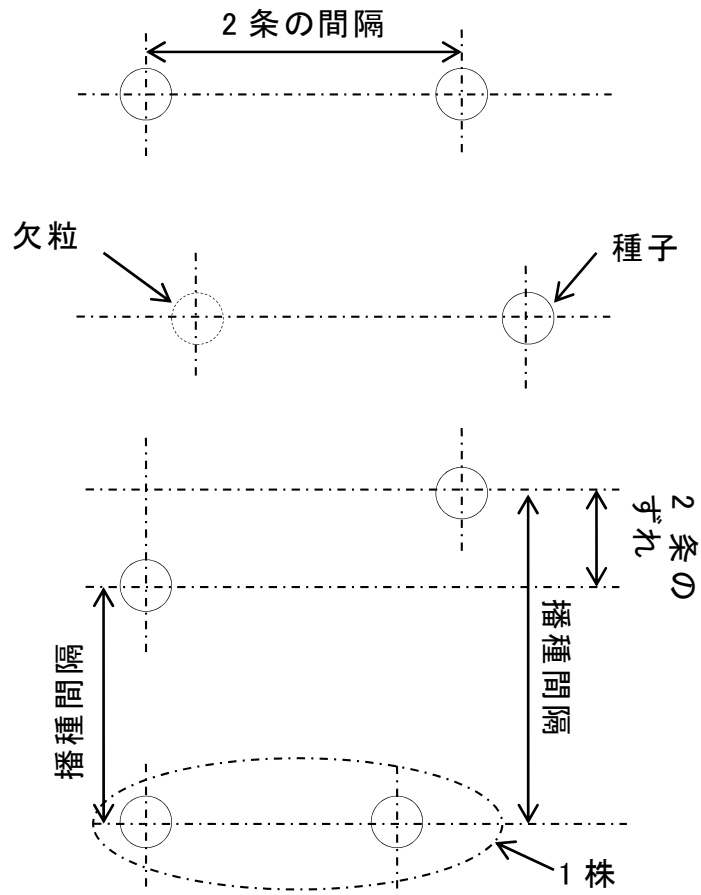


図4-1 狭条点播方法の種子列の模式図

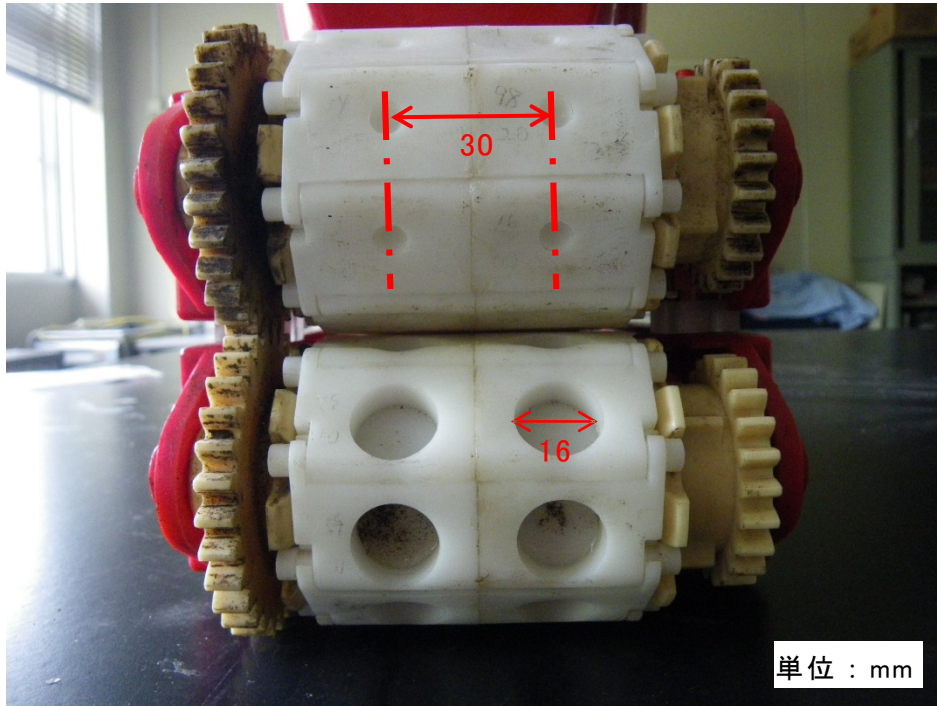


図4-2 二段ベルト式狭条点播機の搬送部

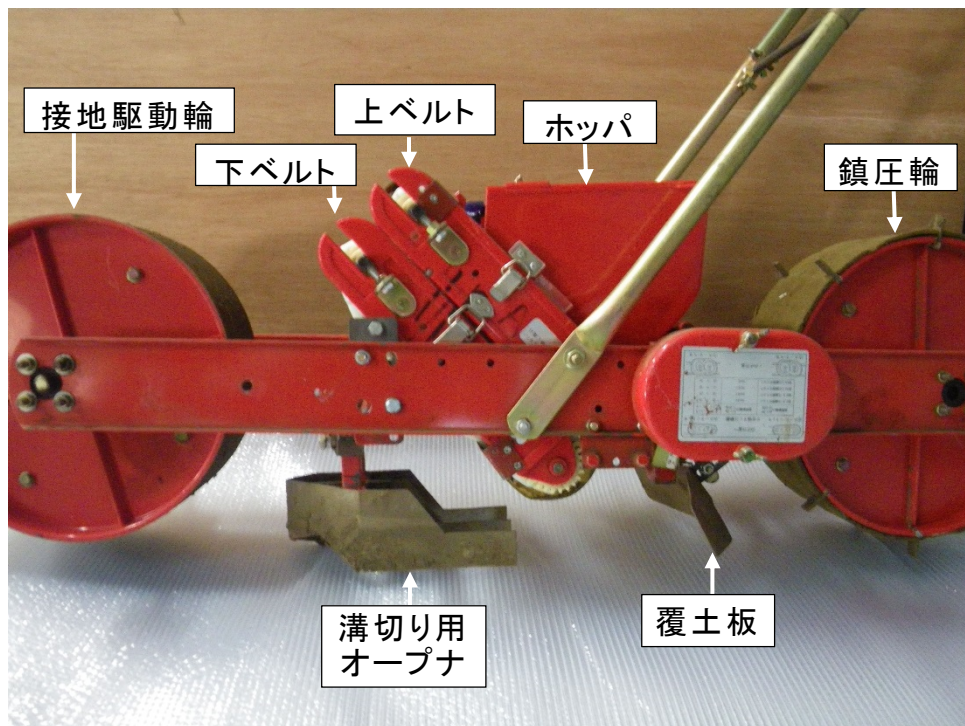
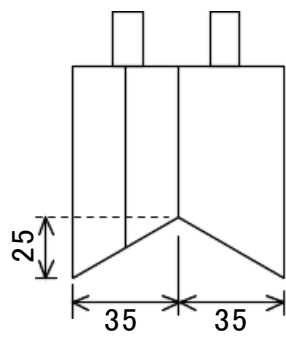
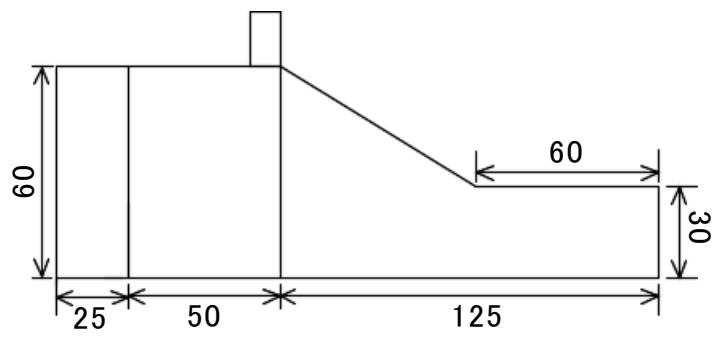


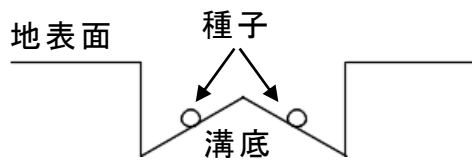
図4-3 二段ベルト式狭条点播機



a. 正面図



b. 側面図



c. 溝の形状



d. 正面写真

図4-4 凹型オープナの図面と正面写真および溝形状

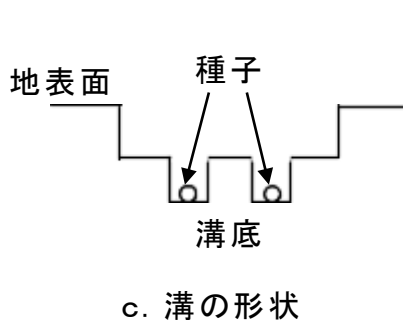
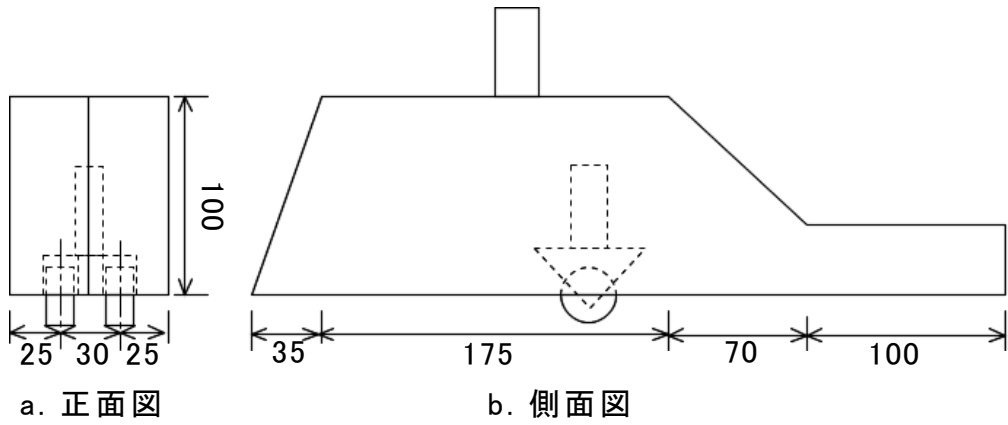


図4-5 車輪付きオープナの図面と底面写真および溝形状

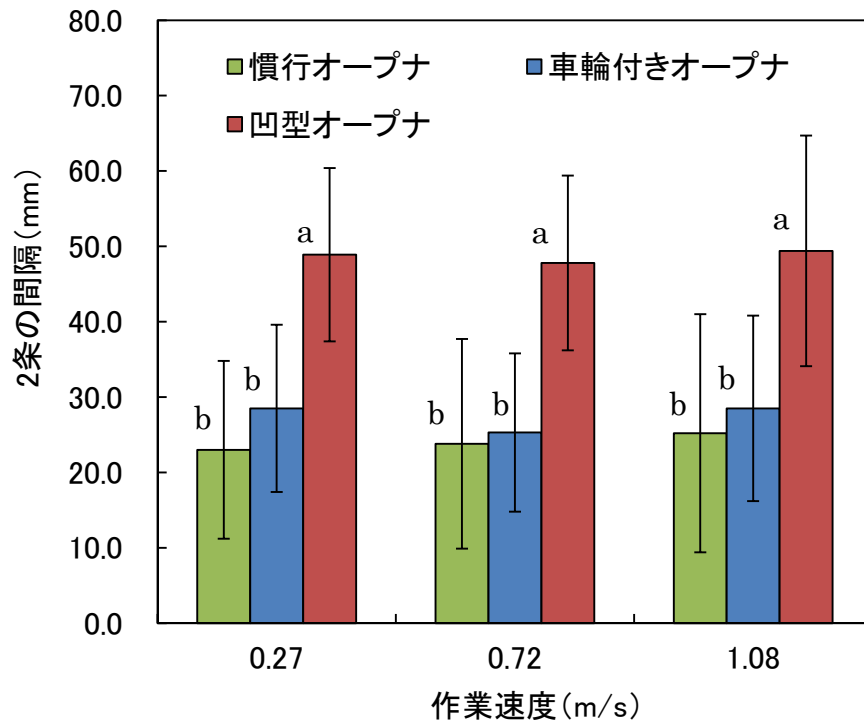


図4-6 溝きり用オープナの形状と2条の間隔の関係

- 注： 1) オープナの作用深さは 10mm
 3) グラフ内の異符号間には 5%で有意 (Tukey 法)
 4) エラーバーは標準偏差



図4-7 間引き作業の様子

表4-1 ニンジン栽培における播種機と苗立ちの状態の関係

播種方式	株間隔(mm) ^Z	欠株率(%)	本数 (本/株)	2条の間隔 (mm)	2条のずれ (mm)
狭条式	83.5±20.0	2.5±3.5	1.9±0.1	36.1±13.5	18.0±11.4
	$\left[\begin{array}{l} 84.0 \pm 19.3 \\ 80.0 \pm 13.3 \end{array} \right]^Y$	$\left[\begin{array}{l} 9.4 \pm 1.6 \\ 7.4 \pm 3.0 \end{array} \right]$			
二段式 2粒播き	95.1±18.0	4.7±0.0	1.8±0.7	—	—
二段式 1粒播き	87.2±23.0	12.9±4.1	—	—	—
アップ式 1粒播き	93.2±45.2	22.5±14.7	—	—	—

Z: 株間間隔は中央値±四分位範囲, その他の項目は平均値±標準偏差

Y: 括弧内の数値は, 間引き前の1条ずつの測定結果

表4-2 ダイコン栽培における播種機と苗立ちの状態の関係

播種方式	株間隔(mm) ^Z	欠株率(%)	本数 (本/株)	2条の間隔 (mm)	2条のずれ (mm)
狭条式	280.0±12.7	0	1.9±0.4	35.0±0.7	18.8±12.3
	$\left(\begin{array}{c} 272.0 \pm 21.0 \\ 270.5 \pm 20.3 \end{array} \right)^Y$	$\left(\begin{array}{c} 8.1 \pm 0.9 \\ 7.5 \pm 5.3 \end{array} \right)$			
アップ式 2 粒播き	300.0±50.0	3.3±0.0	2.1±0.7	—	—
真空式 2粒播き	340.0±30.0	1.9±2.6	2.2±1.5	—	—

Z: 株間間隔は中央値±四分位範囲, その他の項目は平均値±標準偏差

Y: 括弧内の数値は, 間引き前の1条ずつの測定値



図4-8 二段ベルト式狭条点播機でダイコン種子を播種した場合の
間引き前の苗立ち状態

表4-3 ニンジンおよびダイコンの播種方式による個体重と収量に与える影響

播種機	個体重 (g)		本数(本 /10a)	収量 (t/10a)	
	平均	標準偏差			
狭条式	85.7	25.4	31429	2.82	
ニンジン	二段式 2粒播き	108.8 ^{*Y}	43.0 ^{*Z}	27857	3.02
	二段式 1粒播き	94.5	28.4	28571	2.70
	アップ式 1粒播き	107.5 [*]	30.0	24286	2.61
ダイコン	狭条式	1273.9	332.2	9714	6.69
	アップ式 2粒播き	1283.6	374.5	8571	5.78
	真空式 2粒播き	1343.0	326.5	7857	5.48

Z:F 検定と Bonferroni 法を用いて, *がある場合に狭条式と比較して 5%の有意
Y:Dunnet 法を用いて, *がある場合に狭条式と比較して 5%の有意

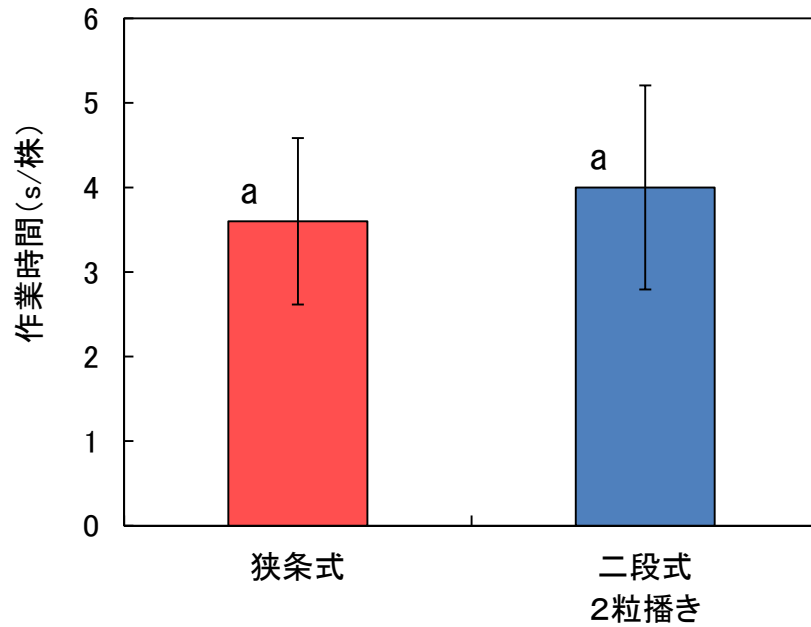


図4-9 ニンジン播種における播種機が間引きの作業時間に与える影響

注: 1) 図中の符号が異なる場合, 5%で有意(T検定)

2) 調査は, 4mの2反復で行い, 1株あたりの時間に換算した

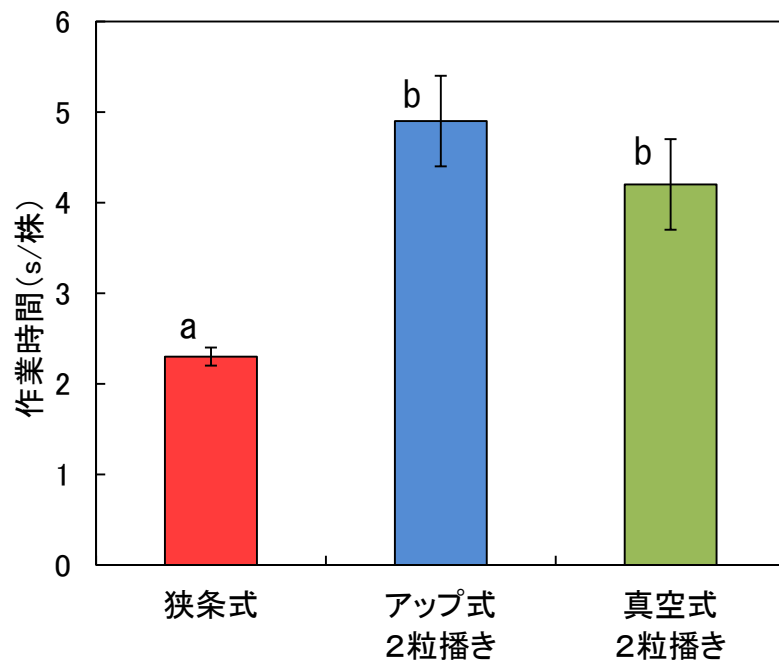
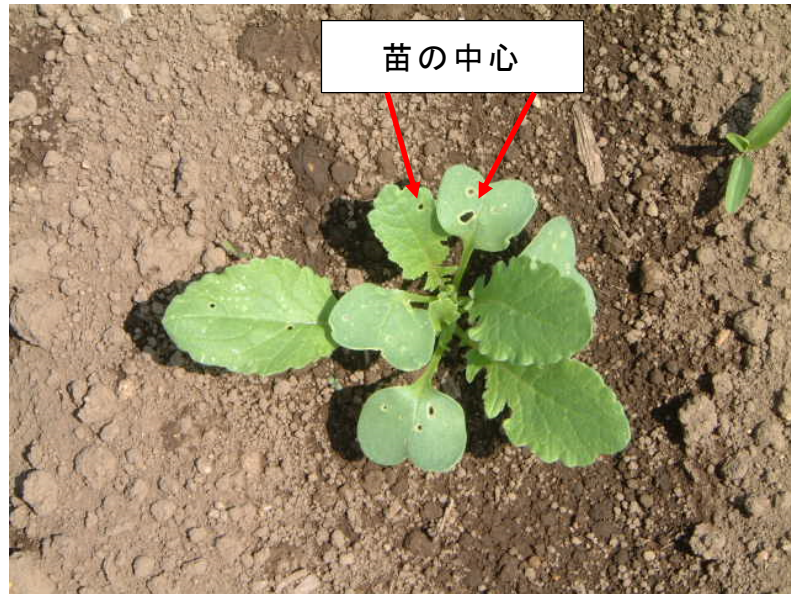


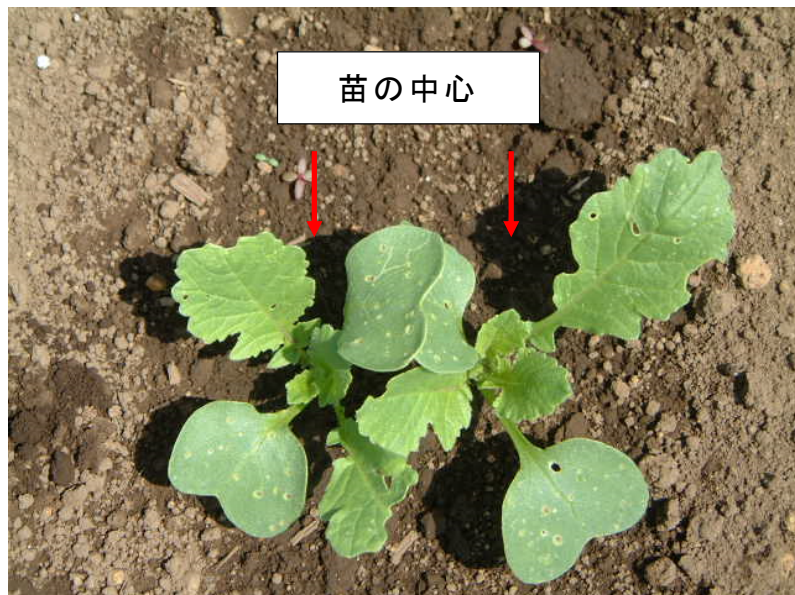
図4-10 ダイコン播種における播種機が間引きの作業時間に与える影響

注:1) 図中の符号が異なる場合, 5%で有意(Tukey 検定)

2) 調査は, 10m の 2 反復で行い, 1 株あたりの時間に換算した



a. 慣行(アップ式)の2粒播き



b. 狭条式の2粒播き

図4-11 間引き前の苗立ちの状態

第 5 章 総括

本研究の目的は、露地圃場に直接播種する野菜の直まき栽培において、重労働である間引き作業を省力化するために、ベルト式播種機の播種間隔精度を低下させている原因を解明して、均等な間隔に播種することが可能な播種機を開発することである。さらに、この播種機を利用して間引き作業が容易にできる状態に播種することができる播種方法を提唱し、間引き作業や生育に与える影響を明らかにする。

この目的を達成するため、第1章では直まき栽培の現状と問題点を明らかにし、既往の間引き作業の簡略化に関する研究と精密播種技術に関する研究の成果を分析した。

第2章では、ベルト式播種機で種子の放出直後から地面に着地するまでの過程で播種間隔の揃いを低下させる要因を、高速度カメラを用いて明らかにした。

第3章では、第2章で明らかにしたベルト式播種機において播種間隔の揃いを低下させる要因の影響を低減させるために、二段ベルト式搬送機構を考案し、二段ベルト式播種機を開発するとともに形状のことなる種子を用いて、この搬送機構の播種間隔精度や欠粒率などの性能を明らかにした。

第4章では、間引き作業を容易にするために、狭い間隔で2条を点播して、どちらか片方を間引きする播種方法を提案し、第3章で開発した二段ベルト式搬送機構を改造して、この播種方法を可能とする二段ベルト式狭条点播機を開発した。この播種機の2条の間隔や欠粒率や播種間隔精度などの播種性能を明らかにして、この播種機と市販の播種機で播種した場合の間引き作業時間を計測して、労働時間の短縮効果を明らかにした。

以下、本研究の内容について総括して述べる。

5.1 直まきする野菜栽培の現状と間引き作業の簡略化のための技術的課題の現状

発芽直後から主根が垂直に伸びて、肥大を開始するダイコンやニンジンなどの根菜類は移植栽培に適さず、圃場に直接播種して栽培されている。これらの野菜栽培体系の中でもっとも時間を必要としていたのは収穫作業や出荷・調製作業であるが、近年、収穫機や調製機が市販され、作業の効率化が進んでいる。このような中で、3番目に時間を必要としている管理作業の中で、重労働で機械化されていないのが間引き作業であり、省力化が求められている。この間引き作業は、出芽を安定させるために必要な作業である。さらに安定させるためには、播種機の播種精度が高い必要がある。しかし、現

在、市販されている播種機で、構造が簡単で播種間隔を均一に播種できる機械はない。間引き作業を簡略化するために、画像処理技術を用いた自動間引き機の開発や収量等が低下せず、間引き作業が容易に行える状態にする播種方法などが検討されてきたが、均等な間隔に播種することが前提条件となっている。また、間引き作業を省略化するために、種子の粒径選別や播種深度などの検討も行われたが、気象条件により発芽が不安定になる問題がある。種子の取り出し精度を向上させるために播種機のホッパからの取り出し部分についてはさまざまな機構の研究が行われたが、取り出し以降の播種間隔を乱す要因について研究例が少なく、明らかとなっていない。その中でベルト式播種機は、構造が簡単であるが種子の取り出し精度が高いことと、ベルトと種子が接する時間を長くすることにより、取り出し時の欠粒を大幅に軽減できることが明らかになっている。

また、播種間隔のばらつきが大きくなると、収穫物のばらつきが大きくなることが明らかにされており、播種間隔を揃えることは間引き作業を簡易化するためだけでなく、収穫物のばらつきを小さくする可能性がある。

以上のことから、ベルト式播種機を対象に、播種間隔精度を低下させる要因を明らかにして、新たに播種間隔精度の高い播種機を開発し、その上で、間引き作業が容易にできる状態に播種することができる点播方法及び播種機を開発する。

5. 2 ベルト式播種機構において播種間隔精度を低下させる要因の解明

まず、高速度カメラを用いた播種間隔の測定方法を確立するために、今まで行われていたベルトコンベアを用いた測定方法と高速度カメラを用いた測定方法を比較した。種子の落下した位置と時間を考慮して播種間隔を求めることにより、ベルトコンベアで求めた播種間隔に対して2条平均平方根誤差が4.5~4.9mmと小さく、高速度カメラを用いて精度良く播種間隔を測定できることを明らかにした。

次に、3種類の形状の異なる種子（ダイコン、ハウレンソウ、ニンジン（コート種子））を市販のベルト式播種機を用いて播種し、放出直後と種子誘導管を通過する時および種子誘導管通過後から着地する直前までの挙動を高速度カメラを用いて解析した。その結果、放出直後は、球体ではないハウレンソウやダイコンでは、種子を取出し搬送する穴に入る状態が一定とはならず、放出位置の標準偏差がハウレンソウでは3.5mm、ダイコンでは2.9mm（リンクベルトの速度が156mm/sの場合）と大きく、球体のニンジンでは

1.6mm と小さかった。同様に、落下角度の標準偏差もハウレンソウで 7.0°、ダイコンで 7.6°と大きく、ニンジンでは 3.9°と小さかった。種子誘導管に種子が衝突した場合の影響を確認するために、板の角度を変えて種子を衝突させた場合、ハウレンソウ種子で板の角度が 15°で衝突後の種子の落下角度が 17.5°、25°で 31.1°、45°で 55.5°とアクリル板の角度が大きくなると落下角度も大きくなった。他の種子もほぼ同様であった。ニンジンの種子が種子誘導管には衝突した割合は 23%と少なく、ハウレンソウとダイコンでは 80%が衝突した。また、種子誘導管の角度が 50°の管壁に種子が衝突した場合、衝突しない場合と比較して、落下時間が 1.6~1.8 倍増加した。ハウレンソウとダイコンでは、地面に着地する直前において種子誘導管がある場合は、ない場合よりも種子の通過位置のずれの標準偏差は 0.4 倍に小さくなるが、播種間隔の標準偏差は 2.5 倍に大きくなり、種子誘導管を使用しない方が播種間隔の変動は小さくなった。

種子誘導管がない場合は、落下距離が長くなると種子の通過位置の範囲が広くなり、覆土板に衝突する可能性があるため、種子の落下軌跡を 4 次のルンゲ・クッタ法により数値計算によってシミュレーションを行い、許容落下距離を明らかにした。シミュレーションの計算値と実測値との平均誤差は、ニンジン種子では 1.6mm、ハウレンソウ種子では 2.6mm と精度良く種子の挙動をシミュレーションすることが可能であった。このシミュレーションから、ハウレンソウ種子において、リンクベルトの最高速度が 185mm/s、種子が種子誘導管および溝切りオープナに衝突しないための水平方向の通過位置範囲が ±25.0mm の条件では、許容落下距離は 121mm であることが明確になった。

以上のことから、播種間隔精度が高い播種機を開発するためには、放出位置と種子の落下角度を一定にすること、落下距離を短くすること、種子誘導管を使用しないことの 3 点が必要であることが明らかになり、さらに、種子の落下距離の許容範囲を明確にできるシミュレーションモデルを作成した。

5. 3 二段ベルト式播種機の開発

第 2 章で明らかとなった播種間隔精度を低下させる要因の影響を少なくするために、ベルトが二段重ねになった二段ベルト式搬送機構を考案した。二段ベルト式搬送機構は、上ベルトの穴と下ベルトの穴が重なるように同期して動き、上ベルトには種子の大きさに合った穴があり、下ベルトには種子よりも十分に大きな穴がある。上ベルトでは、市販のベルト式播種機と同様

に1粒ずつ種子をホッパから取出し、上ベルトの穴と下ベルトの穴が重なっている部分で種子が下ベルトの穴に落下する。下ベルトの穴は大きいため種子が詰まることなどがなく、入った状態が一定となる。下ベルトは種子を下方向に搬送し、落下距離が短くなったところで、種子を放出する。落下距離が短くなったことで種子誘導管は必要がない。定置した状態で作業速度が460mm/sで播種した場合、二段ベルト式播種機の播種間隔の四分位範囲は、球体のニンジン種子で7.2mm、球体ではないハウレンソウ種子およびダイコン種子で8.0mmと8.2mmになり、市販の真空播種機やアップダウンベルト式播種機の播種間隔の四分位範囲の2分の1以下である。圃場で播種した場合でも、二段ベルト式播種機の播種間隔の四分位範囲は、ニンジン種子で19.0mm、ハウレンソウ種子で21.4mm、ダイコン種子で20.0mmになり、市販の播種機と比べ2分の1以下で、播種間隔精度が高いことが明らかとなった。

5. 4 間引き作業簡易化のための二段ベルト式狭条点播機の開発

間引き作業を簡易化するために、狭い間隔で2条を同時に点播する方法（狭条点播方法）を考案し、第3章で開発した播種間隔精度が高い二段ベルト式播種機を改造して、狭条点播方法で播種することができる二段ベルト式狭条点播機を開発した。二段ベルト式狭条点播機は、ホッパからの種子の取り出し・搬送方法は二段ベルト式播種機と同じだが、30mmの間隔で2条の穴がある幅の広いベルトを用いるために、全体の幅が二段ベルト式播種機より広い。また、二段ベルト式狭条点播機の溝切り用オープナは、2条の種子が確実に離れた状態にするために、播種溝の底が山型になるチゼルの底の真ん中が凹んだ形状のオープナである。

二段ベルト式狭条点播機を用いた場合のダイコンおよびニンジンの欠株率は、1条ずつに8%あったが、間引き後の欠株率は、ダイコンが0%、ニンジンが2%であった。ダイコンを真空式播種機で2粒播きした場合の欠株率が2%、ニンジン二段ベルト式播種機で2粒播きした場合の欠株率が4%であり、慣行の2粒播きの播種方法よりも欠株率が低い。

ニンジンの場合の1株あたり間引き作業時間は、二段ベルト式狭条播種機が3.6sで、二段ベルト式播種機で2粒播きを行った場合の4.0sと差がなかった。これは、播種間隔が短いために二段ベルト式狭条点播機で播いた2条が少しでもずれた場合、千鳥播きに近い状態となり、間引き作業の初心者ではどれを間引いて良いか判断に迷った結果、間引き時間にほとんど差がなく

なった。

ダイコンの場合の1株あたり間引き作業時間は、二段ベルト式狭条点播機が2.3sであり、アップダウンベルト式播種機が4.9s、真空式播種機が4.2sと比較して間引きの作業時間は短い。

二段ベルト式狭条点播機で播種した場合の収量は、ダイコンの収穫本数は9714本で他の播種機よりも1.2倍増え、個体重は1273.9gで他の播種機とほぼ同等である。したがって、10aあたりに換算した収量で、6.69t/10aで1.2倍増加する。ニンジンでも収穫本数は、1.2倍に増加する。以上のことから、二段ベルト式狭条点播機による狭条点播方法は、収量を減少させることなく間引き作業時間を短縮することが可能である。

5. 5 まとめと今後の課題

以上のように、ベルト式播種機における播種間隔精度を低下させる要因を明らかにして、播種間隔精度が高い二段ベルト式播種機を開発した。さらに、間引き作業を簡易にするために、狭い間隔の条間で正確に点播できる二段ベルト式狭条点播機を開発し、収量を低下させずに間引き作業の省力効果を明らかにした。なお、二段ベルト式播種機については特許公開を行った（松尾ら、2005）。

今後の課題としては、二段ベルト式播種機は、駆動負荷が他の播種機よりも高いために、接地輪がスリップを起こし、播種間隔の精度が低下すると考えられたので、スリップを防止する改良が必要である。また、二段ベルト式狭条点播機では、設定の播種間隔が短い場合、千鳥播きに近い状態になることがあったので、これを改善するとともに、播種機メーカーと共同で改良し、市販化を進める。

さらに、間引き作業を省略するために、無間引き栽培の研究を行う必要がある。無間引き栽培では、収量を確保するために出芽率と出芽の揃いが特に重要である。これを安定的に良くするためには、播種した土壌の水分を適正に制御することが必要となる。そこで、近年、大豆作で出芽や収量を増加させるために研究が進んでいる地下水位制御技術（村上ら、2007；農業・食品産業技術総合研究機構、2009）を野菜作に適応させる研究を進める。その上で、播種間隔を均一にできる本研究で開発した二段ベルト式播種技術を組み合わせ、将来的には無間引き栽培技術の開発を目指し、研究を進める。

引用文献

- 阿部勇, 1971. そ菜の機械化栽培における間引きについて, 農作業研究, 12, 71-72.
- 青木繁伸, 2009. Rによる統計解析, オーム社.
- B. エヴェリット, T. ホールトン, 2011. Rによる統計解析ハンドブック, (株)メディカル・パブリケーション.
- Bainier,R., 1947. Precision planting equipment, *Agricultural Engineering*, 28(2), 45-54.
- Becker,C.F., 1969. Influence of planting rate and thinning on sugar beet stand, *Trans of the ASABE*, 12(2), 274-276.
- Buften,L.P., Richardson,P., O'Dogherty,M.J., 1974, Seed displacement after impact on a soil surface, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 19, 327-338.
- Cox,S.W.R., McLean,K.A., 1969. Electro-chemical thinning of sugar beet, *JAER*, 14(4), 332-343.
- Diprose,M.F., Benson,F.A., 1984. Electrical methods of killing plants, *JAER*, 30, 197-209.
- Eberhart,R.C., Lucas,M.S.P., 1972. Crop thinning operations analysis, *JAER*17(4), 309-314.
- Fallak, S. S., Sverker, P. E. , 1984. Vacuum nozzle design for seed metering, *Transactions of the ASABE*, 27(3), 688-696.
- Fridley,J. L., Jorgensen,J. E., 1983. Geometric Modeling to Predict Thinning System Performance, *Transactions of ASABE*, 26(4), 976-982.
- 福岡信之, 橋本尚, 2010. ダイコン‘夏つかさ’の一粒播種栽培技術の検討, 農作業研究, 45(1), 21-27.
- Ghate,S.R., 1982. Rheological Properties of Gels used as Carriers of Germinated Seeds, *Transactions of the ASABE*, 25 (6), 1757-1762.
- Giannini,G.R.,Chancellor,W.J.,Garret,R. E. ,1967.Precision Planter

Using Vacuum for Seed Pickup, Transactions of the ASABE, 10(5), 607-610.

春原亘, 鹿子嶋力, 川延謹造, 1970. 間引き作業の合理化に関する研究 第2報慣行の間引き作業の作業能率と作業姿勢について, 農作業研究, 9, 123-128.

春原亘, 鹿子嶋力, 川延謹造, 1972. 間引き作業の合理化に関する研究 第3報トラクター直装作業台による間引作業の作業強度について, 農作業研究, 15, 74-83.

北海道立十勝農業試験場マニュアル作成グループ, 2004. てん菜直播栽培マニュアル 2004.

五十嵐大造, 三浦泰昌, 植松斉, 石川一憲, 2002, ダイコンの1粒播種による株間の違いが省力と生育に及ぼす影響, 農作業研究, 37(2), 67-71.

イノティ, I. カーリア, 並河清, 1991. 空気式精密播種機の研究(第2報) —種子検出方法と繰出し精度の評価—, 農業機械学会誌, 53(3), 67-73.

石川県野菜園芸協会, 2003. 石川の野菜園芸指針 ダイコン, 382.

伊藤道秋, 端俊一, 岡村俊民, 1976. 吸引式播種機に関する研究, 農業機械学会誌, 37(4), 526-532.

Jamusz, Z., Pawet, S., 2011, The Measuring of Beetroot Seeds Sowing Quality with Use of Precision Seed Plate Planter, Vegetable Crops Research Bulletin, 75, 51-55.

Jindal, V. K., Siebenmorgen, T.J., 1994. Computer Simulation of Nonselective Mechanical Thinning, Transactions of ASABE, 37(1), 57-65.

小林由喜也, 1981. 吸引式播種機に関する研究(第2報) 小粒不整形な種子の吸着特性, 秋田県立農業短大研究報告, 7, 61-74.

国立卓生, 2011. 傾斜回転目皿式播種機を利用したダイズの高速播種技術 —高速播種用傾斜回転目皿の開発—, 農作業研究, 46(3), 107-114.

小島和雄, 村田敏, 吉村克規, 大久保淳一, 1967. 回転目皿式排種装置の研究(第1報) —播種板上の種子の分布について—, 農業機械学会誌,

28(4), 208-211.

松尾健太郎, 屋代幹雄, 安場健一郎, 武蔵孝仁, 2005. 点播用精密播種装置, 特許公開 2005-33389.

松尾昌樹, 石川勝美, 1976. 空気式精密播種に関する研究 (第 3 報) — 上昇管内における種子の浮遊運動シミュレーション —, 農業機械学会誌, 41(3), 405-410.

McLean, K.A., 1969, Chemical thinning of sugar beet, JAER, 14(2), 147-153.

道場三喜雄, 村井信二, 高橋義明, 山島由光, 近石武, 阿部和好, 福田実, 1973. 自走式間引機の開発改良について, てん菜研究会報, 13, 79-84.

村上章, 佐々木長市, 安中武幸, 2007. 汎用水田におけるダイズ多収を目指した地下水位制御の試み, 土壌の物理性, 107, 45-55.

村田敏, 1964. てん菜の機械間引に関する理論的研究, 農業機械学会誌, 26(2), 105-110.

永田靖, 吉田道弘, 1997. 統計的多重比較法の基礎, サイエンティスト社.

中渡明弘, 2009. 米の生産調整政策の経緯と見直し問題, 調査と情報 659.

日本機械学会, 2003. 数値積分法の基礎と応用, コロナ社.

日本機械学会, 2007. 機械工学便覧 a. 基礎編, 丸善出版.

西入恵二, 1971. 間引作業における機械利用 II 機械化栽培における栽植密度と間引きについて, 農作業研究, 12, 72-76.

農業・食品産業技術総合研究機構, 2009. 地下水位制御システム (FOEAS) による大豆の安定生産マニュアル.

農業機械学会, 1994. 和英対訳農業機械解説書 (I) — トラクタ及び作業機 —.

農業機械学会, 1996. 生物生産機械ハンドブック, コロナ社.

農業機械化の知識編集委員会, 1973. 農業機械化の知識・第 2 巻畑作, 酪農, 稲作編, 農業技術研修会.

農林水産省, 2007a. 品目別経営統計. <http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhou/noukei/hinmoku/index.html> (2014 年 6 月 3 日閲覧).

農林水産省, 2007b. 農産物生産費統計. <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001070810> (2014 年 6 月 3 日閲覧).

農林水産省, 2013a. 農林業センサス累年統計 — 農業編 —. <http://www.e-stat>.

go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001047487&cycode=0 (2014年6月3日閲覧).

農林水産省, 2013b. 野菜生産出荷統計.

農畜産業振興機構, 2009. 野菜統計要覧IV-13 野菜への転換の推移.

<http://vegetan.alic.go.jp/2013yasaitoukeiyouuran/0413.xls> (2013年7月13日閲覧).

岡田芳一, 石川勝美, 永田雅輝, 1980. 精密播種に関する研究(第1報) - 光電測光による播種機用種子検出装置 -, 農業機械学会誌, 42(3), 347-353.

岡田芳一, 石川勝美, 永田雅輝, 1982. 精密播種に関する研究(第3報) - ボウル型振動フィーダを利用した種子の繰出し方式について -, 農業機械学会誌, 44(3), 431-437.

岡村俊民, 高畑英彦, 伊藤道秋, 外館隆二, 1966. 傾斜回転目皿式播種装置のビート種子排出性能について, 農業機械学会誌, 28(2), 90-94.

大塚寛治, 倉田久治, 小堀乃, 1986. セル繰出し方式による精密は種の可能性, 農業機械学会誌, 48(3, 4), 361-367.

Palmer, J., Owen, G.M., 1971, Automatic control of sugar beet singling and thinning by means of an on-line digital computer, JAER, 16(2), 107-125.

Palmer, J., Owen, G.M., 1977, A computer simulation of a selective thinner and its use to examine seedling detection requirements, JAER, 22(4), 341-351.

澤田秀夫, 国益徹也, 原田賢哉, 2003. 磁力支持天秤装置を用いた6:1回転楕円体の抗力測定, 日本風工学会誌, 28(4), 137-141.

生研機構野菜機械等開発チーム第2, 1999. 自走式だいこん収穫機. 研究成果情報-総合農業-(平成10年度), 322-323.

柴田洋一, 後藤美明, 田坂幸平, 1990. 小粒種子用点播装置の開発, 中国農業試験場研究報告, 7, 37-46.

下名迫寛, 矢治幸夫, 中精一, 今園支和, 1989a. 高精度施肥播種技術に関する研究(第1報)種々の碎土条件における大豆用傾斜大径目皿式播種機の適応性, 農作業研究, 24(3), 230-236.

- 下名迫寛, 中精一, 1989b. 高精度施肥播種技術に関する研究(第2報)オー
プナの作業特性, 農作業研究, 24(3), 237-242.
- Suhas,R.G., Sharad,C.P., Casimir,A.J., 1981. Seeding Pre-Germinated
Vegetable Seeds in Plots, Transactions of the ASABE , 24(5),
1099-1102.
- 武居正和, 戸田義久, 2008. てん菜直播栽培の普及状況について. 砂糖類情
報. http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/233288/sugar.lin.go.jp/japan/example_01/example0806a.htm (2014年12月1日閲覧).
- 寺脇正樹, 片岡崇, 岡本博史, 端俊一, 2002. 形状特徴によるテンサイと雑
草の識別, 農業機械学会誌, 64(2), 93-101.
- 登坂直範, 端俊一, 岡本博史, 高井宗宏, 1998. 直播ビートの自動間引きに
関する研究(第2報)ー画像の色情報によるてん菜の識別ー, 農業機械
学会誌, 60(2), 75-82.
- 張樹槐, 高橋照夫, 福地博, 嗟峨紘一, 2001. 根菜類野菜間引き作業の自動
化に関する研究(第1報)ーダイコンの栽培様式の検討ー, 農業機械学
会誌, 63(2), 47-52.
- 張樹槐, 高橋照夫, 福地博, 嗟峨紘一, 2002. 根菜類野菜の間引き作業の自
動化に関する研究(第2報)ー自動2値化によるダイコン幼苗の認識
方法ー, 農業機械学会誌, 62(2), 71-77.
- 張樹槐, 高橋照夫, 福地博, 嗟峨紘一, 2004. 栽培様式の違いがダイコンの
間引き作業及び生育に及ぼす影響, 農作業研究, 39(4), 191-196.
- Upadhyaya,S.K., Gautz,L.D., Garrett,R.E., 1982, Retrofitting Vegetable
Planters to Seed Gel Encapsulated Propagules, Applied Engineering
in Agriculture, 3(2), 211-214.
- Ward,S.M., 1981. Performance of a Prototype Fluid Drill, JAER, 26(4),
321-331.
- William,J.C., 1969. Seed Tape System for Precision for Selection and
Planting of Small Vegetable Seeds, Transactions of the ASABE,
12(6), 876-879.
- Wilson, J.M., 1980. The effect of release errors and the release point on

the design of precision seed drills , Journal of Agricultural Engineering Research, 25; 407-419.

矢田貞美, 1982. 野菜の被覆種子を利用した直播及び育苗の省力効果について, 農作業研究, 45, 1-8.

山本実, 中村宏, 1968. 機械によるそさい間引き作業の省力化に関する研究, 農作業研究, 6, 45-50.

柳沢健彦, 藤井信一郎, 1976. ダイコン・ハクサイのは種作業精度の許容幅に関する研究, 園学雑, 45(2), 143-152.

野菜供給安定基金, 2008. 野菜出荷規格ハンドブック (指定野菜).

Summary

Precision two-tiered belt seeder that can precisely and accurately sow seeds

Kentaro Matsuo

Chapter 1

Because the taproots of root vegetables grow and become enlarged immediately upon germination, agricultural methods where transplanted seedlings are grown in seeding trays, flats, or plug trays cannot be applied to root vegetables. Instead, seeds are sown directly into the soil of the field where the crop will be harvested. However, because seed germination in the field is unstable, direct seeding methods require a high number of seeds, which in turn necessitates the removal of extra seedlings (thinning) after germination and seedling establishment. Thinning is manually carried out by workers in a stooped position and is both time-consuming and labor-intensive; because of these difficulties, agricultural workers desire their labor hours for thinning to be reduced.

The objective of this study was the development of a precision seeder with a simple structure to place the seeds at correct intervals. To develop this precision seeder, understanding the causes for the lowered seeding accuracy with a belt-type seeder is necessary. The authors observed the behavior of seeds released from a belt-type seeder with a high-speed camera. Based on the results, a precision seeder consisting of two tiers of conveyer belts for transporting and sowing individual seeds was developed. The seeder was adapted to sow individual seeds in arrangements with narrow row distances.

Chapter 2

In order to develop a precision seeder with a simple structure, the causes

for the lowered seeding accuracy with a belt-type seeder were analyzed using a high-speed camera. When spinach seeds were sowed with a belt-type seeder, the range for the horizontal distance of the release points was between -12 mm and 3 mm, and the release angle was between -16° and 20° . When coated carrot seeds were sowed, the range of release points was between -6 mm and 3 mm, and the release angle was between -5° and 11° . When the height of the seeder was 60 mm, the standard deviation (S.D.) of the seed spacing for radish and spinach seeds was 19 mm. For coated carrot seeds, it was 10 mm. For unevenly shaped seeds like spinach and radish seeds, their balance as they enter the belt's holes is not stable; thus, the release point and angle of the seeds vary. As the angle of the wall of the guide pipe becomes more horizontal, the falling angle of the seeds after collision with the wall becomes large and uneven. When radish seeds or spinach seeds were passed through the guide pipe, about 80% of the seeds struck the pipe. When the seeds passed through the guide pipe, the S.D. of the seed spacing was approximately 2.5 times that without the guide pipe. The equations describing the seeds' motion are introduced here. The spinach seed is expressed by a conical model, and the coated carrot seed is expressed by a spherical model. The relationship between the velocity of the belt and the falling trajectories of the seeds was examined through simulations based on these seed models. When the belt speed was 400 mm/s, the maximum error of the falling position on the ground was 159 mm for the spinach seed and 66.7 mm for the coated carrot seed. When the guide pipe was not used and the seeds had a long falling distance, the probability of the seeds colliding with a tire or the furrow opener increased.

Chapter 3

As discussed in Chapter 2, the causes for the lower seeding accuracy with a belt-type seeder were considered. Based on the results, the authors designed and built a two-tiered belt-type seeder to place the seeds at correct intervals.

The performance of this seeder was evaluated. The seeder consists of two conveyor belts for transporting seeds, a chisel furrow opener, a covering plate, and a ground-contact drive wheel. The two conveyor belts are stacked one on top of the other. A hole in the upper conveyor belt picks up a seed, transfers it to a larger hole in the lower conveyor belt, and releases it at a low position. The experimental setup in the laboratory was as follows: the new seeder, a commercial belt seeder, and a commercial vacuum seeder were mounted on motors that were fixed on stands. This setup was driven at a working speed of 560 mm/s. To sow pelleted carrot seeds, the seed spacing interquartile range (IQR) of the new seeder was found to be 8.4 mm. This was less than half the IQR for a commercial belt seeder. For spinach seeds, the new seeder showed an IQR of 8.6 mm, which was less than a third of the IQR for both of the commercial seeders. For Japanese radish seeds, the new seeder showed an IQR of 12.6 mm, which was also less than the IQR for both of the commercial seeders. In field trials, the new seeder sowed three seed types with an IQR that was less than those of both commercial seeders.

Chapter 4

In order to reduce the hours of thinning labor, a new seeder that can precisely and accurately sow seeds in arrangements with narrow row distances was built on the basis of the two-tiered belt-type seeder. The new seeder consists of two conveyor belts for transporting seeds and a chisel-type furrow opener that can dig two narrow furrows. The width of the conveyor belts is twice that of the two-tiered belt-type seeder, and the conveyor belts have an array of holes. The performance of the new seeder was tested using Japanese radish seeds. When the seed spacing was set to 280 mm, the seed spacing of the two rows was 18.8 ± 12.3 mm, and the row distance was 35.0 ± 0.7 mm. The S.D. of the seed spacing with the new seeder after thinning was 12.7 mm, which was 58% less than the case for a vacuum-type seeder. The seed miss rate of the new seeder after thinning was 0%, while it was 1.9% for a vacuum-type seeder.

The labor time required to thin seedlings sowed with the new seeder was approximately 46% that with a vacuum-type seeder.

Chapter 5

Chapter 5 summarizes the information in chapters 1–4. In this study, the authors developed a seeder that can precisely and accurately sow seeds in arrangements with narrow row distances to reduce the labor time for thinning. To eliminate thinning labor, a groundwater control scheme needs to be developed to accelerate the emergence rate of vegetables. Combining this scheme with the above sowing technology will help with placing seeds at the correct intervals.

謝辞

本論文の取りまとめにあたり，当初より懇切なるご指導を頂き，公私にわたり研究推進にご協力くださいました筑波大学大学院 生命環境科学研究科 先端農業技術科学 屋代幹雄教授（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター）に心より深く感謝致します。

筑波大学大学院 生命環境科学研究科 瀧川具弘教授，筑波大学大学院 生命環境科学研究科 先端農業技術科学 宮崎昌宏教授（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 生物系特定産業技術研究支援センター），筑波大学大学院 生命環境科学研究科 先端農業技術科学 乙部和紀准教授（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター）には貴重なご助言とご校閲を賜りました。謹んで感謝の意を表します。

本研究は，元独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 九州・沖縄農業研究センター 富樫辰志領域長 元独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター 矢治幸夫部長 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター 西脇健太郎主任研究員 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 畜産草地研究所 天羽弘一上席研究員 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 東北農業研究センター 熊倉裕史領域長のご指導，ご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

本研究のほ場試験，試験装置の試作は，元独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 東北農業研究センター 武蔵孝仁氏，独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 東北農業研究センター 藤沢佳行氏，井上正人氏，藤澤忠一氏の献身的なご協力によって行われました。永井由美子氏には実験の遂行にあたり献身的なご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。