博士論文

大豆用高速畝立て播種機の開発

2021 年 3 月

重松 健太

岡山大学大学院
環境生命科学研究科

目次

I　緒論 1
1. 摘要 1
2. 研究の背景 3
(1) 大豆 3
a. 起源 3
b. 加工と利用 3
(2) 我が国の大豆生産 5
a. 作付面積，単収，収量 5
b. 国内の需要，自給率 7
c. 生産者の規模 8
d. 栽培体系 8
e. 大豆播種に利用される播種機 10
f. 大豆種子の生態・生理，出芽 13
(3) 国際比較 15
(4) 我が国の大豆生産の課題 17
(5) 生育初期の湿害 18
3. 既往の研究 19
(1) 大豆の湿害低減技術 19
a. 明渠 19
b. 畝立て栽培 19
c. 地下排水を促進する技術 20
d. その他の技術 21
(2) 湿害低減を図る播種機 23
a. 耕うん同時畝立て播種機（URS 機） 23
b. 小畝立て播種機 25
c. 小明渠作溝同時浅耕播種機 26
d. その他の播種機 27
(3) 播種機の高速化 28
4. 湿害対策と作業の高速化の検討 29
5. 研究の目的 31

II　ほ場状態と畝立て播種に係る測定項目と方法 32
1.　はじめに 32
2.　土壌の物理性測定試験 32
(1)　土粒子の粒径組成 32
(2)　含水比，液性指数 32
(3)　円錐貫入抵抗 33
(4)　ほ場の砕土率 34
3.　畝立て試験および畝立て播種試験 34
(1)　作業速度 34
(2)　畝高さ，畝上面幅 34
(3)　畝頂部の砕土率 34
(4)　播種深さ，播種間隔 34
(5)　出芽率 34
III　ディスクによる畝立てと播種機構 35
1.　はじめに 35
2.　ディスクによる畝立ての検討 37
(1)　供試機 37
(2)　供試ほ場および土壌の物理性測定 38
a.　供試ほ場 38
b.　土壌の物理性測定方法 38
(3)　畝立て試験方法 39
a.　ディスク式中耕培土機の設定項目 39
b.　畝立て方法と機械設定 40
c.　測定項目 40
(4)　試験結果と考察 41
a.　ほ場状態 41
b.　畝立て試験 42
c.　作業速度と畝立て前後の砕土率 44
d.　土壌壌水分と畝立て前後の砕土率 45
3.　播種機構の検討 46
(1)　基礎試験機の構成 46
(2)　供試ほ場および土壌の物理性 49
a.　供試ほ場 49

b. 土壌の物理性 49
(3) 試験方法 50
a. 播種方法 50
b. 測定項目 51
(4) 試験結果と考察 51
a. ほ場状態 51
b. 畝立て播種試験 52
4. まとめ 54
Ⅳ 種子消毒剤を塗抹した大豆種子に対応する播種機構 55
1. はじめに 55
2. 供試装置および試験方法 56
(1) 供試装置 56
a. ダブルプレート式種子繰り出し機構 56
b. 播種プレート 58
c. 播種プレートの改良 59
d. 繰り出し試験装置 61
(2) 試験方法 63
a. 供試種子 63
b. 裸種子の繰り出し試験 65
c. 薬剤種子の繰り出し試験 66
3. 試験結果と考察 67
(1) 供試種子 67
(2) 裸種子を用いた種子繰り出し試験 69
(3) 薬剤種子を用いた種子繰り出し試験 71
a. 薬剤種子の粒径別の損傷粒の割合 71
b. 薬剤種子の粒径別の繰り出し粒数割合 73
(4) 播種プレート上の種子の動き 75
4. まとめ 77
Ⅴ 試作機の播種性能 78
1. はじめに 78
2. 試作機の諸元 79
3. 土壌の物理性および播種試験における調査項目と測定方法 81
(1) 土壌の物理性 81

(2)　播種試験 81
4.　試作機の作業速度が播種精度に及ぼす影響 82
(1)　供試ほ場 82
(2)　試験方法および試作機の各部設定 82
a.　試験方法 82
b.　試作機の各部設定 83
(3)　試験結果と考察 84
a.　ほ場状態 84
b.　作業速度と畝形状 85
c.　作業速度と播種深さ 86
d.　作業速度と播種間隔 87
e.　作業速度と出芽率 89
f.　作業速度の上限 90
5.　湿潤土壌条件下における試作機と URS 機の比較 91
(1)　供試ほ場 91
(2)　供試機 91
(3)　供試機の各部設定および試験方法 92
a.　試作機の各部設定 92
b.　URS 機の各部設定 93
c.　試験方法 93
(4)　試験結果と考察 94
a.　ほ場状態 94
b.　試作機と URS 機の比較試験 95
6.　まとめ 101
Ⅵ　各公設試験場での試作機と URS 機の比較 102
1.　はじめに 102
2.　供試機 103
(1)　試作機 103
(2)　URS 機 105
3.　試験方法 106
(1)　供試ほ場 106
(2)　土壌の物理性 107
(3)　耕種概要 107

(4)　供試機の設定 108
(5)　播種試験測定項目 111
(6)　生育・収量 112
4.　試験結果と考察 113
(1)　ほ場状態 113
(2)　播種精度 114
(3)　生育調査 117
(4)　収量調査 118
(5)　試作機の導入効果 119
5.　まとめ 120
Ⅶ　結論 121
参考文献 124
本論文に関する著者の参考論文 130
謝辞 131

Ⅰ　緒論

1. 摘要

大豆は，日本人にとって重要な食料であるが，その自給率は 6 %と低く，単収や生産量が低迷している。その原因として，水田転換畑で多発する生育初期の湿害が挙げられる。大豆の播種時期は 5 月下旬から 7 月上旬であり，生育初期が梅雨期と重なり，土壌は湿潤条件になりやすい。湿害対策技術として，畝立て栽培に対応したロータリ式耕うん同時畝立て播種機（Up-cut Rotary Seeder，以下，URS 機）が実用化され，作付面積の 1 割程度まで普及している。しかし，URS 機は作業速度が遅いという問題があり，播種作業の高速化のために事前耕うんを行っても 0.6 m/s にとどまる。生産現場では近年，1 戸当たりの作付面積が急速に拡大していることから，作業速度の向上が求められている。また，大豆の播種適期は品種により異なるものの，2 週間程度と短い。このような背景から，URS 機の 2 倍以上の作業速度 1.5 m/s 以上を目標とする高速畝立て播種機を開発することとした。

まず，畝立て作業の高速化のためにロータリを使わない畝立て方法を検討し，市販のディスク式中耕培土機に着目した。これを用いて畝立て試験を行った結果，湿潤条件の水田転換畑で URS 機では対応困難な速度 1.9 m/s でも目標高さの畝が形成できた。また，畝立て作業により砕土率が 10 ポイント程度低下するため，大豆播種に適する砕土率 70 %を確保するには，事前耕うんにより 80 %以上とすることが求められることが明らかとなった。次に，この速度に対応できる播種機を検討したところ，ダブルプレート式種子繰り出し機構を備える飼料用トウモロコシ不耕起播種機が対応可能と判断された。これらを組み合わせた基礎試験機を製作し，畝立て播種試験を行った。その結果，乾燥した普通畑では速度 2.0 m/s でも播種深さや播種間隔のばらつきが小さく，安定した作業が可能であることが明らかとなった。

ここで，種子に生産現場で普及する薬剤を塗抹したところ，薬剤の粘着性が原因で種子の損傷が発生した。損傷が起きる場所は，播種プレート外周の V 字状の切り欠き部分と外枠フレームの間と考えられたため，切り欠きの形状を U 字状に変更した大豆用播種プレートを製作した。従来プレートと比較する繰り出し試験を行った結果，従来プレートで最大 25 %発生していた損傷粒を大豆用播種プレートでは 1 %未満に抑制するとともに，繰り出し精度を改善できることが明らかとなった。ハイスピードカメラにより種子の動きを観察したところ，従

来プレートでは種子が切り欠き内部で揺動し，もう 1 枚のプレートへの受け渡しに失敗することがあったが，大豆用播種プレートでは切り欠きの底部で安定し，円滑な受け渡しが可能であった。

これらの知見を基に，実用化を目指し民間企業と共同でディスク式畝立て部，ダブルプレート式種子繰り出し機構および大豆用播種プレートを組み合わせた試作機を開発した。試作機を用いて播種精度を確認する畝立て播種試験を行った結果，速度 3.2 m/s でも畝立て播種が可能であり，出芽率も 90 %以上であったが，設定の 4 倍の播種間隔となる場合があった。生産現場で求められる播種精度を満たす速度は，1.6 m/s までであった。

さらに，極度な湿潤土壌で試作機と市販の URS 機を比較する畝立て播種試験を行った結果，URS 機では土壌の練り付けや土壌表面のクラストが発生し，著しい出芽不良となった。一方，試作機では URS 機に比べて 2.5 倍以上の高速作業が可能で，出芽率は 9 割程度であった。播種適期が短い大豆において，作業可能な土壌水分条件を拡張できる意義は大きい。

最後に，土性や気候が異なる各地での適合性を調べるために，宮城県，新潟県，富山県および埼玉県の公設試験場で試作機と市販の URS 機を比較する播種，栽培試験を行った。その結果，試作機はすべての試験地で速度 1.5 m/s で畝立て播種が可能で，播種深さ，播種間隔ともに設定通りとなったのに対して，速度 0.6 m/s と限界付近に設定した URS 機では，播種間隔が 1 割以上広がる場合があった。大豆の生育では，両機でステージの進捗に差はなく，主茎長，主茎節数には開花期では差違があったが，成熟期にはその差が小さくなった。最終的な坪刈り収量に有意差はなく，試作機は高速作業を行っても，URS 機と同等の収量が得られることが明らかとなった。また，すべての試験区で葉の黄変や主茎節数の極端な減少もなかったことから，湿害などの生育障害の発生はなかったと判断された。

以上，本研究で開発したディスク式畝立て部，ダブルプレート式種子繰り出し機構と大豆用播種プレートを組み合わせた高速畝立て播種機は，目標の作業速度を満たし，URS 機よりも湿潤土壌への適応性が高く，高速作業を行っても URS 機と同等の播種精度，収量が得られた。試作機の普及によって，土壌が湿潤になりやすい時期でも高速作業で適期播種が可能になり，畝立て栽培による湿害低減効果と合わせて，播種遅れによる減収の抑制が期待でき，大豆の単収向上による生産量の向上が期待される。

2. 研究の背景

(1) 大豆

a. 起源

大豆は，古くから日本人の食生活に欠かせない農産物である。その起源は諸説（杉山，1992）あり，東アジアが原産とされる。日本では，東アジアから伝播した大豆が弥生時代（紀元前 300 年～250 年）の山口県および群馬県の遺跡から出土しており，この時代には広い範囲で大豆が伝播していたと考えられる。日本最古の歴史書である古事記（712 年）にも大豆の記述があり，食用作物として認識されていたことが分かる。

b. 加工と利用

大豆は，「畑の肉」と呼ばれ，タンパク質を多く含み，アミノ酸のバランスが優れた栄養豊富な食品である（鎌田ら，1992)。大豆は必須アミノ酸であるリジンの単位質量当たり含量が精白米，小麦などの数倍であり，これらの穀物の摂取では不足するリジンを補うことが期待できる（鎌田，2003)。そのため，精白米を主食とし，納豆，豆腐，味噌汁など大豆を原料とする食品を組み合わせることが多い日本食は栄養バランスが優れた食事といえる。

大豆は，その成分が様々な機能を持ち，日本では多くの食品に加工されてきた。図 I-1 に大豆を加工した食品を示す。煮豆など種子そのものの形を維持するもの，豆腐など豆乳が原料となり 2 次加工されたものと，多様な形態の食品となることが分かる。さらに，味噌や醤油などは日本食の味付けの要となる調味料にも加工される。また，大豆は食品に加工されるだけでなく，油糧種子であり，多くの油分を含み，食用油の原料となる。調理油であるサラダ油や植物性マーガリンの原料にもなっている。このように，大豆は一目で分かる食品だけでなく，他の食品を調理する過程で利用され，目には見えない形で摂取することも多く，豊かな食生活の基礎となってきた。

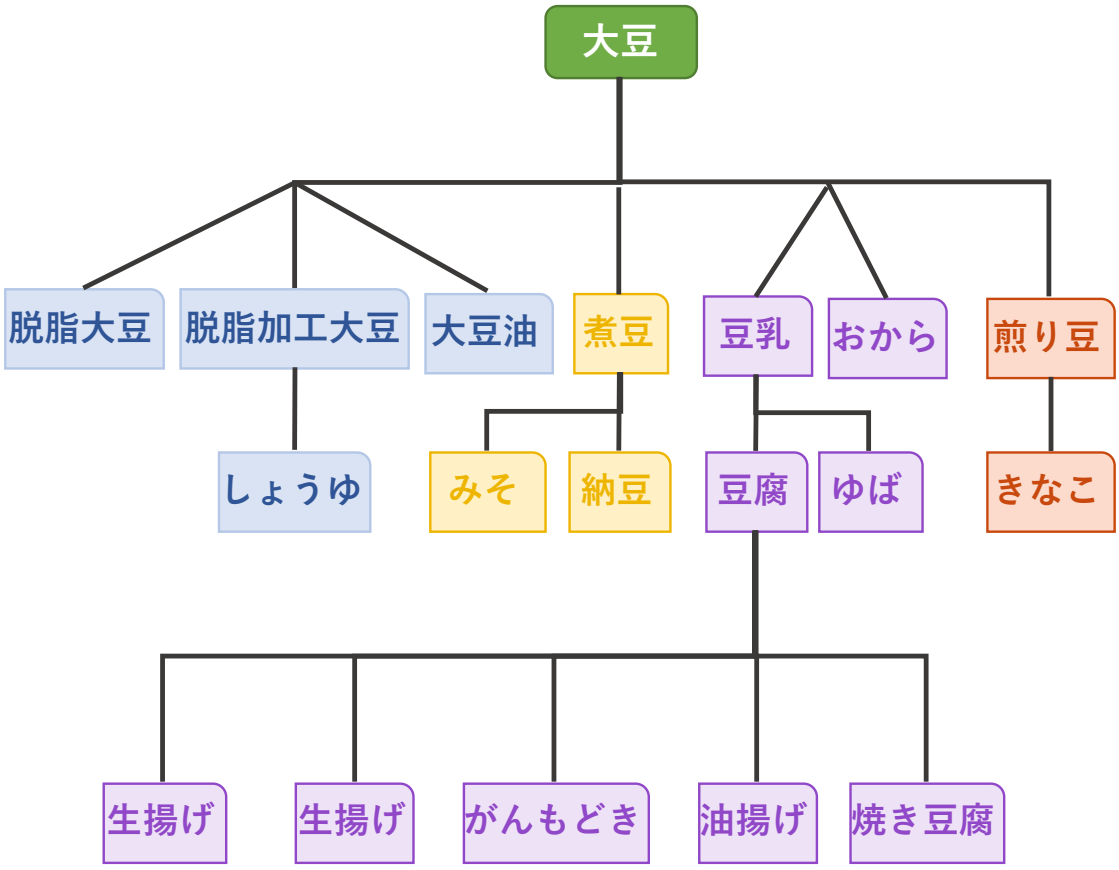


図 I-1　大豆を加工した食品

（農林水産省ホームページ（農林水産省，n.d.）を参考に作図）

(2) 我が国の大豆生産

a. 作付面積，単収，収量

表 I-1 に 2019 年の大豆の国内生産（農林水産省，2020a）を示す。作付けは沖縄を除いた全国で行われており，北海道，東北，九州の作付面積が大きい。大豆が水稲の代替作物として作付けされることから，特に都府県では水田面積の多寡に対応していると考えられる。大豆の単収は，水稲や小麦が概ね 400 kg/10a を超える水準であることから，穀物の中では比較的低い。地域別には北海道が高く，後述する国際的な収量水準に近くなっている。一方，北海道以外の地域では，単収が 150 kg/10a を下回り，地域差が大きい。これは気候的な要因もあるが，北海道では畑地，都府県では水田転換畑に作付けされることも要因と考えられる。

表 I-1　2019 年の大豆の国内生産

地域	作付面積 (ha)	単収 (kg/10a)	収穫量 (t)	水田転換畑への作付割合（%）
北海道	39,100	226	88,400	47
都府県	104,400	124	129,400	93
東北	35,100	148	52,100	93
北陸	12,400	148	18,400	94
関東	9,890	115	11,400	78
東海	11,900	101	12,000	96
近畿	9,410	107	10,100	98
中国	4,330	100	4,350	92
四国	489	137	668	94
九州	21,000	97	20,400	97
沖縄	0	18	0	－
全国合計	143,500	152	217,800	81

水田転換畑は水稲作のために湛水・灌漑の可能な耕地で，水田を畑作物生産のために利用形態を転換した農地であり，畑地とは土壌の物理性が異なる。水田土壌と畑土壌を比較すると，前者は水が得やすい低地に作られるため，地下水位が高く，排水不良が多いこと，灌漑が行われるため，酸素が不足し，土壌が還元状態になりやすいこと，代かきにより土壌の団粒構造がつぶされ，土壌が単粒化す

ることなどの特徴がある（西，1980）。水田に畑作物を繰り返し作付けすることで，土壌の特徴が水田から畑地に徐々に変化することが知られており（諸遊，1983），水田転換畑は転換年数が浅いほど，水田土壌の性質に近い。そのため，転換 1 年目は特にその影響を受け，対策が重要となる。

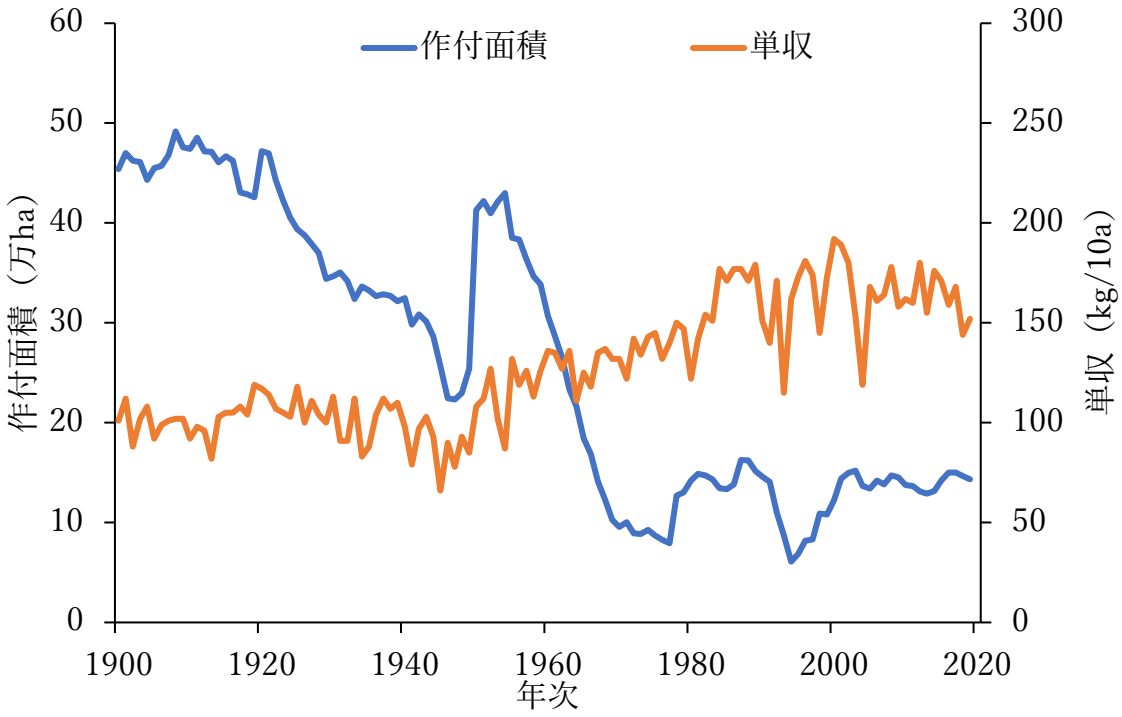


図 I-2　大豆の作付面積・単収の動向

図 I-2 に大豆の作付面積・単収の動向を示す（農林水産省，2015；農林水産省，2016；農林水産省，2017a；農林水産省，2018；農林水産省，2019；農林水産省，2020a）。作付面積は 1900 年代初めには 45 万 ha を超える水準であったが，1920 年頃から急激に減少し，第 2 次世界大戦後（1950 年頃）に急激に回復した。しかし，作付面積は 1961 年に輸入自由化などの影響で急速に減少し，1972 年には輸入関税撤廃もあり，10 万 ha を下回る水準となった。その後，作付面積は米の生産調整に伴う転作により増減しており，1977 年および 1986 年には米の生産調整の拡大により急増した。近年は 13～15 万 ha を推移している。

単収は 1950 年頃までは 100 kg/10a 前後を推移し，1950～1990 年頃にかけて漸増し，180 kg/10a 程度となった。この間の年次変動は ±15 kg/10a 程度で増減していた。1990 年以降の単収は 150～170 kg/10a 程度であるが，年次変動は大

きくなり，1993 年，2004 年には 120 kg/10a を下回る水準になった。単収の年次変動が大きくなることは，生産が不安定になっていることを示している。

b. 国内の需要，自給率

表 I-2 に大豆の需要状況と自給率（農林水産省，2020b）を示す。

表 I-2　大豆の需要量と自給率

年次	需要量（万 t）	需要量のうち食品用（万 t）	自給率（%）
2013	301.2	93.6	7
2014	309.5	94.2	7
2015	338.0	95.9	7
2016	342.4	97.5	7
2017	357.3	98.8	7
2018	356.1	101.2	6

国内の大豆の需要量は，2018 年に 356 万 t であった。そのうち，豆腐，煮豆，納豆などの食品用が 101 万 t，油糧用 239 万 t，その他 16 万 t となっている。食品用が全体の 1/3 を占めている。国産大豆はほぼ全量が食品向けに用いられる。国産大豆は輸入大豆に比べて，外観や品質が良く，価格が高いことが理由である。また，食品用の需要量の推移を見ると，増加傾向であることが分かる。消費者の食品に対する国産嗜好の高まりで，量販店で販売される豆腐，納豆，油揚げなどに「国産大豆使用」の表示が増え，国産大豆の需要が増えている。加えて，大豆に含まれるイソフラボンなどの機能性成分が注目され，大豆食品が健康食品と認知されたことも要因と考えられる。

次に，自給率は 2018 年の需要量に対して国内生産量は約 21 万 t であったことから，6 %であった。同年の米の自給率 97 %と比較して大幅に低く，同じ畑作物の小麦 12 %と比較しても低い。また，食品用の需要量に対して限定しても自給率は 21 %であり，8 割を輸入に依存しており，大豆の生産量拡大の余地は大きい。これらから，食品向けの国産大豆の需要が高まっているのに対して，供給が追いつかず，自給率が低迷していることがうかがえる。

c.　生産者の規模

図 I-3 に経営体の作付面積規模別の割合（農林水産省，2008；農林水産省，2013；農林水産省，2017b）を示す。

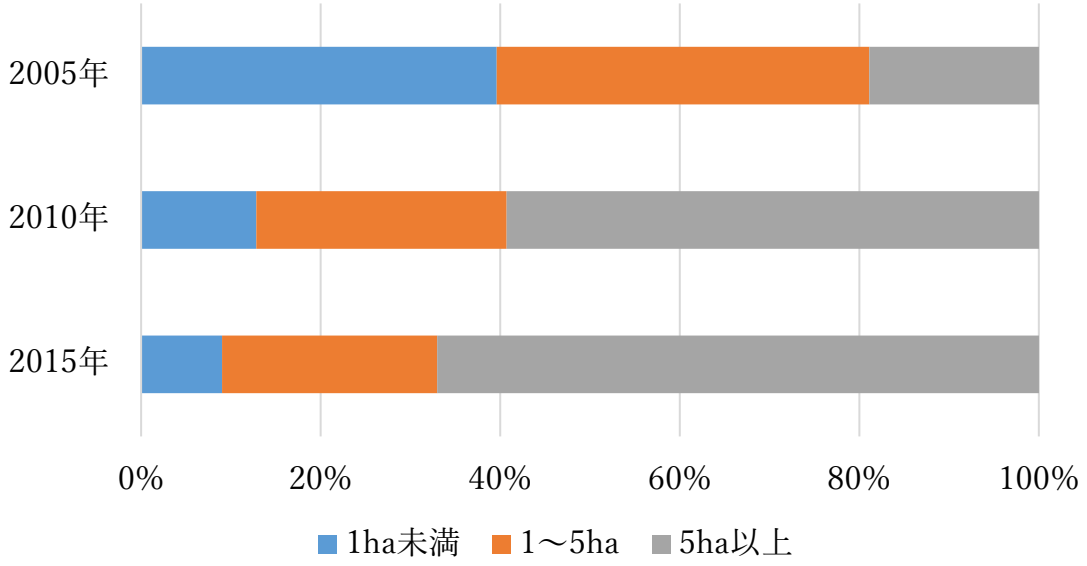


図 I-3　経営体の作付面積規模別の割合

2005 年に 5 ha 以上を作付けする経営体は 2 割未満であったが，2015 年には 7 割近くになっている。このことから，生産者の作付け規模が急激に拡大したことが分かる。また，農林業センサスの経営体規模の区分が変更となった 2015 年における 5 ha 以上作付けの経営体の内訳を見ると，10 ha 以上が 48%を占めており，大面積を作付けする経営体が大豆生産の中核となっている。この傾向は近年加速していると考えられ，10 ha 以上作付けの経営体は 5 割を超えていると推測される。

d.　栽培体系

大豆は，過去には畑地や水田の畦畔で作られていたが，現在では上述のように水田転換畑で作付けされることが多い（島田，2010）。そのため，水稲，麦類などの作物と組み合わせて栽培する水田輪作が多くなる。大豆は，春から初夏に播種し，秋に収穫する夏作物であることから，同じ年に同じほ場で水稲などの他の夏作物と合わせて栽培することができない。そのため，同じ年に大豆のみを栽培する単作大豆，冬作物である麦類の後作に大豆を栽培する麦跡大豆が多い。地域

により様々な輪作体系があり，関東地方以西では水稲－麦類－大豆を 2 年で作付けする 2 年 3 作体系が代表例である。一方，東北地方より北の地域では，気温が低いため，各作物の栽培期間が温暖な地域よりも長くなり，1 年に 1 作の栽培とする単作が多くなる。単作で水稲，大豆を年ごとに作付けする体系が多いと考えられる。

図 I-4 に単作大豆，麦跡大豆の栽培暦を示す。はじめに播種時期であるが，東北地方などの寒冷地で多い単作大豆の播種適期は 6 月初旬頃であり，梅雨期の前からはじめ頃に行う。大豆は生育適温が 22～27 ℃で比較的温暖な気候を好む。温暖な地方で春先など早期に播種すると，生育量が大きくなり過ぎて倒伏や蔓化することが懸念されるため，播種は 6 月中旬以降に行われる。一方，寒冷地では，生育期間中の気温が低く，生育量を確保するために，これより早い 5 月下旬から播種作業を始めることが多い。

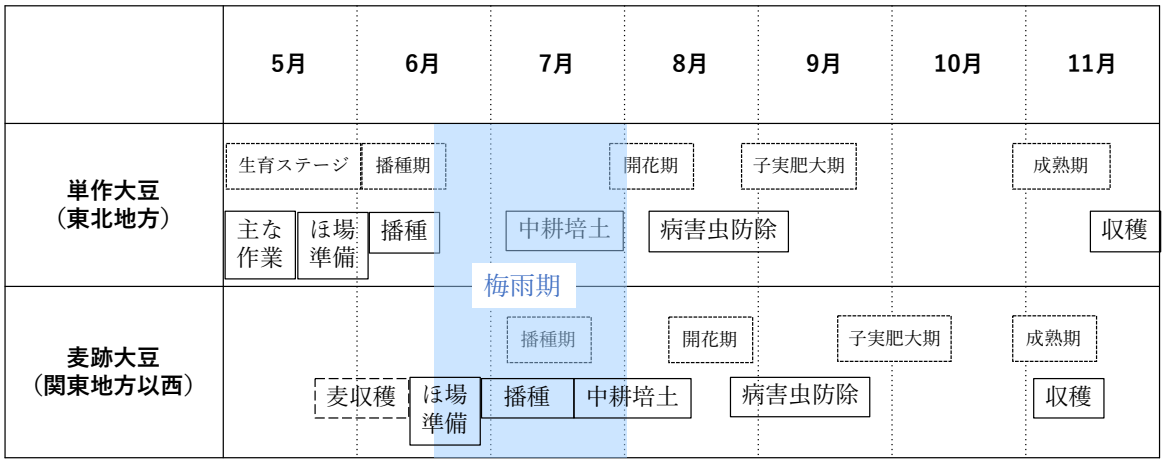


図 I-4　単作大豆，麦跡大豆の栽培暦とほ場内の作業
（作物栽培の基礎（国分，2004）を参考に作図）

関東地方以西の温暖地で多い麦跡大豆は，単作大豆に比べて 1 ヶ月ほど播種時期が遅くなる。麦の収穫後に麦稈の処理，土壌改良資材の散布，耕うん，整地などのほ場準備を行ってから播種作業となるため，播種適期は 7 月初中旬頃（梅雨期の中頃）となる。土壌の湿潤状態を避けるため梅雨明け後の 8 月以降に播種した場合，大豆は日長に反応して花芽をつけるため，十分な生育量が確保できないまま成熟し，収量を確保できない。そのため，播種作業は気候，栽培体系により一定の期間に固定される。これらのことに加えて，播種期間は，早生，晩生などの品種特性によっても絞られるため，品種ごとの播種適期は更に短くなり，

2 週間程度となることが多い。

大豆栽培における主な作業は，ほ場の準備，播種，中耕培土（除草），病害虫防除（薬剤散布），収穫がある。ほ場の準備作業は，土壌を大豆播種に適した砕土状態にすること，前作の残渣や雑草の埋没，元肥と土壌改良資材の混和などを目的にロータリによる耕うん作業を行うことが多い。土壌の砕土状態，資材の散布回数によって，複数回行うこともある。播種作業は，後述の播種機を利用して行うが，機種によってはほ場の準備の耕うん作業を併せて複合作業を行うことができるものもある。中耕培土（除草）作業は開花期までに 2 回程度行い，条間の土壌を耕起・反転し，株元に土壌を寄せて，畝形状にする作業である。これにより除草，乾土効果による地力窒素の発現，畝形状による排水促進，株元まで土壌を寄せることで耐倒伏性の向上などの効果が得られる。病害虫防除作業は，わい化病を伝染させるアブラムシ，食害などを及ぼすマメシンクイガ，カメムシ類，ハスモンヨトウなどを対象に薬剤散布を行う。収穫作業は莢の水分が 20 %以下になった段階で，大豆用コンバインまたは汎用コンバインを利用して行うことが多い。収穫以降はほ場外での乾燥調製作業，出荷作業へと続く。

e. 大豆播種に利用される播種機

日本で利用される大豆用の播種機は，ロータリシーダ（図 I-5）が多い。ロータリシーダはトラクタに装着した耕うんロータリの後ろにヒッチを介して播種機を装着したものである。播種機の種子繰り出し部には傾斜目皿式(図 I-6 上)，ロール式（図 I-6 下）の 2 方式があり，大豆播種には点播精度が高い傾斜目皿式が主に利用される。ロール式は麦類の播種と兼用する場合に選択されることが多い。

ロータリシーダは播種機前方のロータリで耕うんしながら，播種機でほ場表面に種子を落下させ，覆土・鎮圧する。播種機に加えて施肥機を装着することができるタイプもあり，装着すれば元肥の施用が同時にできる。上記 2 方式の播種機ともに作業速度の上限は，0.6 m/s 程度であり，これより高速化すると，種子の繰り出しが不安定になり，欠株や播種間隔のばらつきが懸念される。

図 I-5　ロータリシーダ（上：大豆，下：麦類）
（アグリテクノ矢崎株式会社より提供）

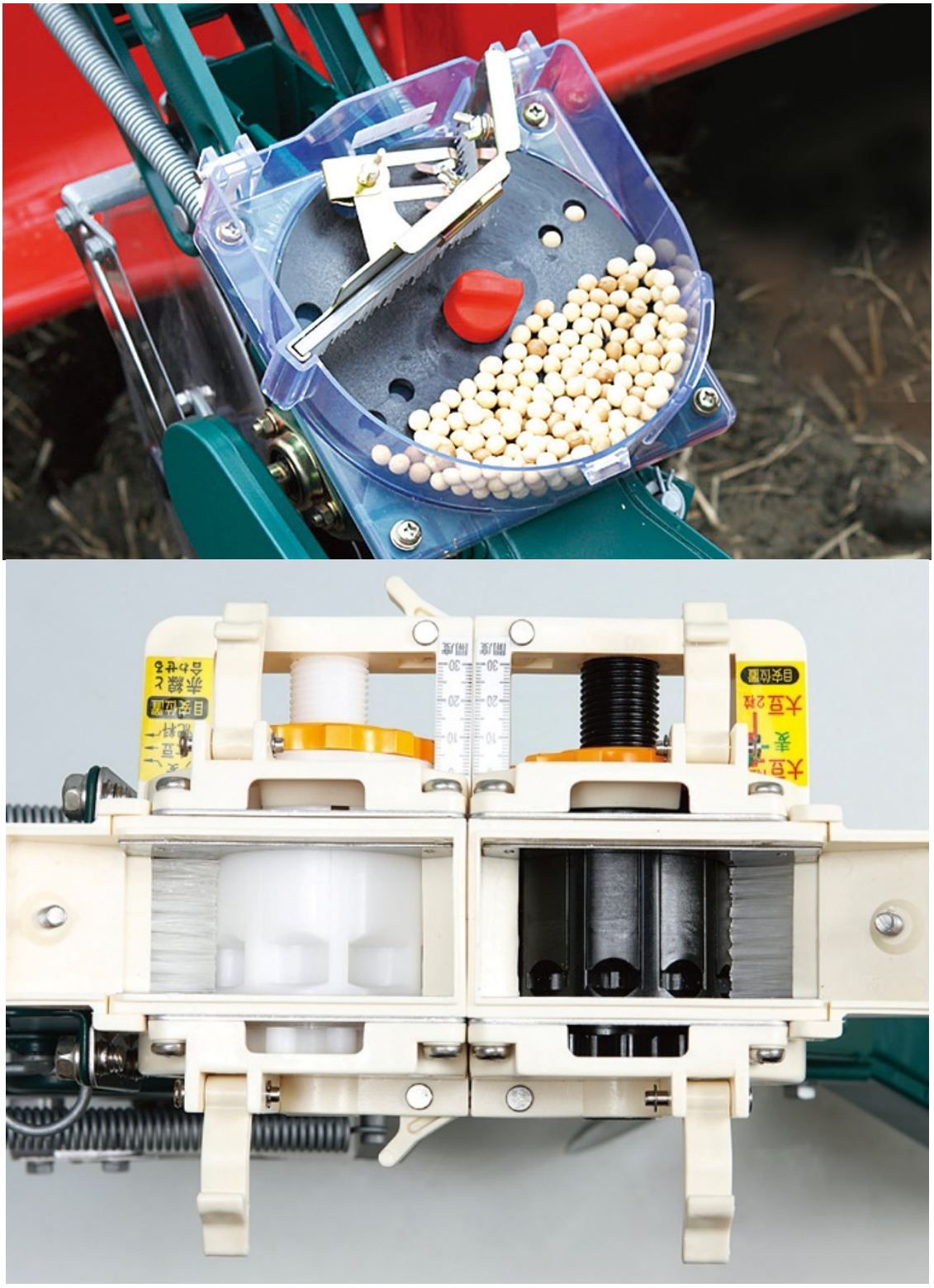


図 I-6　種子繰り出し部（上：傾斜目皿式，下：横溝ロール式）
（アグリテクノ矢崎株式会社より提供）

また，大規模な生産者では海外製の真空播種機を利用する例がある。真空播種機はブロアで発生させた負圧で円形の播種板に種子を 1 粒ずつ吸着させ，播種位置の直上で放出することで高精度な播種を実現させる。真空播種機は重厚な構造であることが多く，播種機，施肥機，ブロア等で構成されるため所要動力が大きくなり，機関出力が 73.5 kW 以上の大型トラクタが必要となる。大型トラクタでの利用となるので，トラクタタイヤの踏圧による耕盤形成が問題となる場合があり，日本では普及が進んでいない。

f.　大豆種子の生態・生理，出芽

図 I-7 に大豆種子を示す。大豆種子は，無胚乳種子であり，種皮と胚で構成される。胚は子葉，幼芽，胚軸および幼根で構成される。子葉には出芽に必要なタンパク質，脂肪などの養分が蓄えられている。

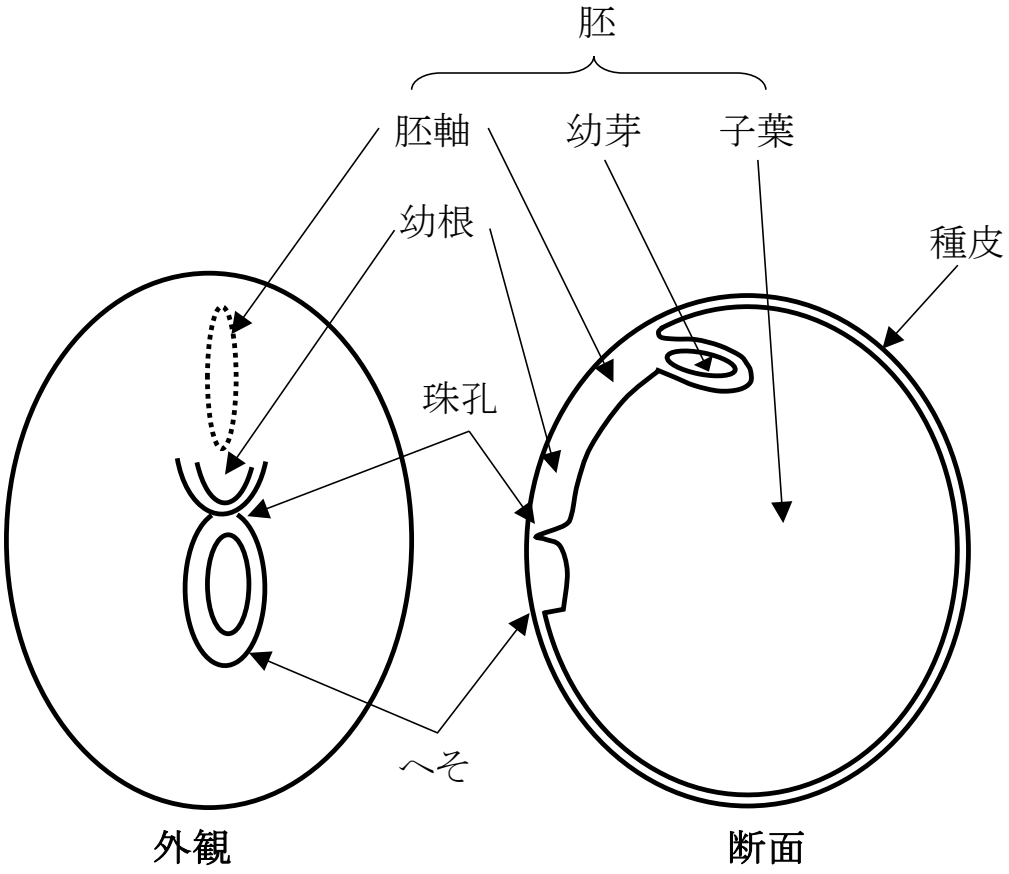


図 I-7　大豆種子
（作物栽培の基礎（国分，2004）を参考に作図）

出芽までの流れは，土壌に播種された種子は珠孔や種皮にある小穴を通して吸水する。吸水した組織は膨張し，幼根が下方に伸び，これと合わせて下胚軸が伸びることで，子葉が地表面に出てくる。出芽時にはタンパク質と脂肪が代謝され，アミノ酸と炭水化物となり，生長に利用される。その際の呼吸で酸素が必要となるため，種子が湛水状態に遭遇すると，出芽が抑制される。また，種皮には吸水速度の調節機能がある（小泉ら，2007）ことから，その損傷は水分の急激な浸入を招き，吸水部分と乾燥部分の膨張の差違によって，その境界で亀裂が発生し，細胞組織が損傷し，出芽が抑制される（石田ら，1989)。その他，大豆種子は上述のように子葉が地表面を通過するため，その地表面に強雨などで締め固められた土膜（クラスト）が発生すると，出芽が大幅に抑制される。

一方で，大豆種子は発芽に乾物質量の 50 %の水分を必要とするため，種子と土壌を接触させ，種子へ水分移行させることが重要となる。土壌との接触度合いについては，土壌の含水率だけでなく，土壌粒子の大きさも影響を及ぼす。土壌が乾燥している場合は，砕土作業を十分に行い，土壌粒子を細かくすることで，出芽率の向上につながる。また，養分が蓄えられた土中の大豆種子は，ダイズ茎疫病などの糸状菌やタネバエの標的となるため，殺虫剤，殺菌剤をまぶすことで，これらの障害を防止する。

(3) 国際比較

図 I-8 に世界の大豆生産量を示す。2019～2020 年の世界の大豆生産量（予測値）は 3.6 億トンであり，ブラジル，アメリカ合衆国，アルゼンチンの上位 3 カ国で全世界生産量の 8 割を占めている。日本の生産量は 20 万 t 強であり，上位 3 カ国の生産量は日本の 100 倍以上である。

日本と同じ東アジアに位置する中国は大豆の原産国のひとつであり，第二次世界大戦までは世界最大の生産国であった。アメリカでは 20 世紀に入り大豆油の溶媒抽出法や水素添加法などが開発され，本格的な生産が始まり（羽鹿，2011），20 世紀中頃には最大生産国となった。ブラジル，アルゼンチンでは本格的な生産は 1970 年代になってからであり，生産量が急激に拡大し，現在では南米が大豆生産の中心地となっている。

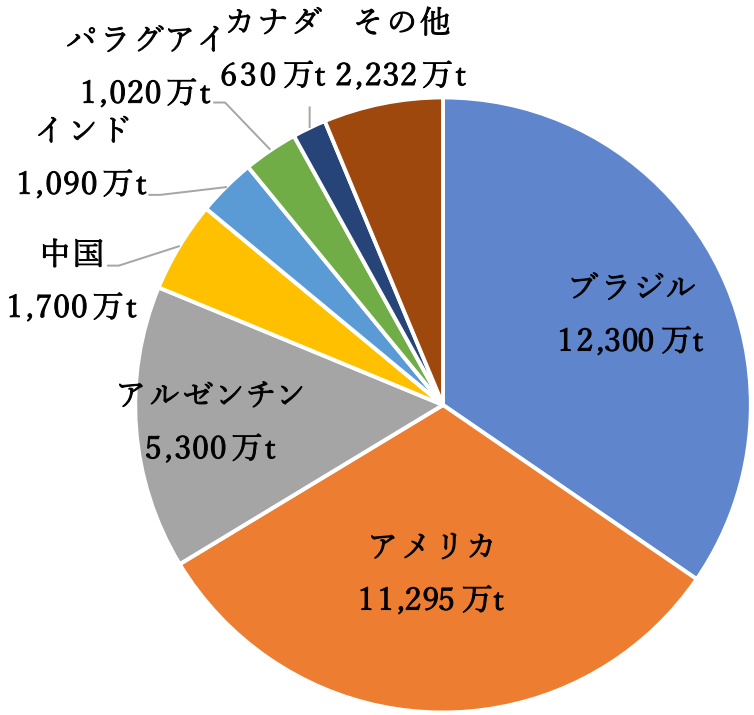


図 I-8　世界の大豆生産量（2019/2020 年予測値）
（FAO 統計（FAO，2020）を基に作図）

次に，図 I-9 に世界の大豆単収の動向を示す。日本，中国を除いた国の単収は FAO 統計が存在する 1961 年から漸増傾向である。日本の単収は 1980 年代までは中国を上回り，現在の主要生産国と差は小さかった。その後，中国を除く主要国の単収は品種改良，栽培技術の向上により急激に増加しており，300 kg/10a を

超える水準となっている。近年では日本の単収は中国を下回り，伸び悩みが鮮明になっている。

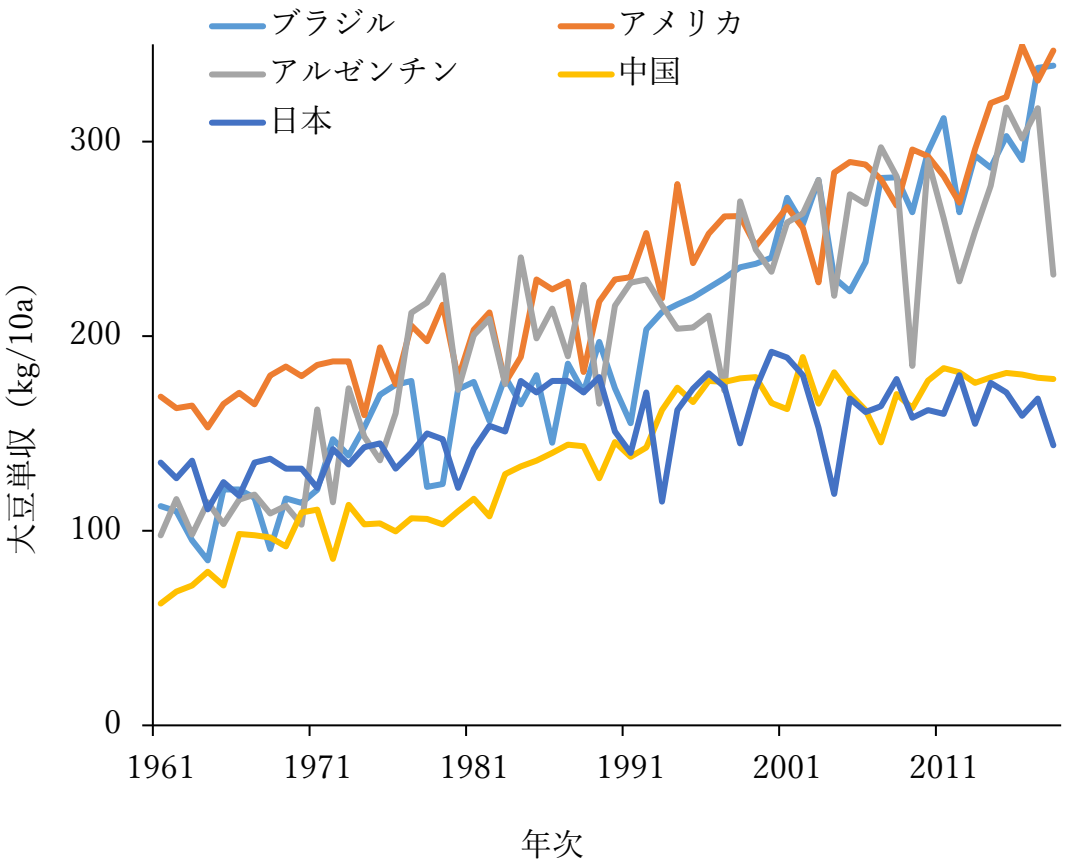


図 I-9　世界の大豆単収の動向
（FAO 統計（FAO，2020）を基に作図）

日本の単収の伸び悩みの原因は，栽培体系，品種など，複数の要因が挙げられる。栽培体系では，前述の水田転換畑への作付け，後述の梅雨時期の播種による生育初期の湿害などが代表に挙げられる。品種では，日本で生産される大豆が煮豆，豆腐など搾油以外の用途向けの大粒品種が多く，他国の油糧用の小粒品種に比べて，出芽不良になりやすいこと，害虫による食害に対する補償作用が小さいことから低収になることが指摘されている（島田ら，2013）。また，日本では遺伝子組換え作物への抵抗感が強く，他国で主流の除草剤耐性遺伝子を導入した品種などが普及しないことも一因と考えられる。

(4) 我が国の大豆生産の課題

上述の大豆生産の現状を踏まえ，その課題を整理する。国産大豆は外観特性や品質の良さから加工業者からの評価が高く，消費者の食品に対する国産嗜好の高まりから，その需要は増加傾向である。しかしながら，その生産量は少なく，自給率はわずか６％である。生産量が増加しない原因は，作付面積が増加しないこと，単収が低迷して向上しないことと考えられる。日本の大豆単収が低迷していることは諸外国の単収が向上していることから明らかである。

作付面積が増加しない理由は，大豆は転作作物の特徴を持ち，作付面積が米の生産調整の施策の影響を大きく受けるためであり，政策が米の増産方向に働くと，作付面積が大きく減少する。そのため，改善策は米の政策が見直される受動的なものにならざるを得ない。また，後述の単収が劇的に増加することや外国からの大豆の輸入が減少し，国産大豆の価格が急騰することなどで生産者の所得が増加することが増産の動機になるが，これらも外部要因に依存することとなる。

大豆の単収は，最近は全国平均で 170 kg/10a 前後を推移し，漸減する傾向が見られる。大豆主要生産国と比較すると，6 割程度の水準にとどまる。さらに，その年次変動も大きい。生産者にとって，単収が低く，その年次変動が大きいことは，収量ひいては所得が安定せず，生産意欲が低下する原因となっている（増田，2011）。そのため，生産拡大のためには単収の向上と安定化が最も重要な課題である。

低迷している単収であるが，その解決策として研究開発や耕種的対策がある。例として，多収品種の開発や選定，生育初期の湿害回避，ほ場への有機物補給による地力向上，輪作体系による連作回避等をほ場に合わせて実施することが有効とされる（島田ら，2013）。この中で生産者が既存の生産体系を維持したままで取り組みやすく，効果が得られやすい耕種的対策が生育初期の湿害回避である。また，生育初期の湿害回避が単収向上につながるとの報告もある（杉本ら，1988b）。

(5) 生育初期の湿害

大豆は, 生育初期では比較的乾燥した土壌条件が必要とされる (平沢, 1998)。しかしながら, 図 I-4 に示すように, 大豆の生育初期には梅雨が重なることや, 湛水を前提とした水田転換畑であることから, 土壌は湿潤状態になりやすく, 湿害が発生しやすい。水田転換畑における大豆の湿害は, 生育時期が早いほど影響が大きいことが報告されている（杉本ら，1988a)。

生育初期の湿害の要因は，第一に過剰な水分に由来する発芽に必要な土壌の空気不足，第二に(2) f.で述べた種子の急激な吸水による細胞組織の崩壊，第三に土壌病原菌による種子の腐敗が挙げられる。第一, 第二の要因は過剰な水分に起因しており, 土壌の水分を低下させることが有効と考えられる。対策としては, 暗渠，明渠，耕盤破砕，畝立てなどの耕種的対策が主体となる。第三の土壌病原菌については，加藤（2013）が解説しており，卵菌類や苗立枯病菌が関与し，これらに効果的な殺菌剤，登録農薬がある。例として，2012 年に登録されたチアメトキサム・メタラキシル M・フルジオキソニル水和剤があり，ダイズ茎疫病，紫斑病，苗立枯病に対して，高い防除効果が実証されている（宮城県，2012)。また, 原因菌の伝搬にも過剰な水分が関与しており, 薬剤と併せて土壌水分を低下させる耕種的な対策が重要である。

3. 既往の研究

(1) 大豆の湿害低減技術

a. 明渠

大豆の湿害低減技術は耕種的対策と病原菌に対応した薬剤に関するものがある。耕種的対策は，土壌の過剰な水分を低下させること，換言すると排水対策である。排水対策は地表排水と地下排水に分けられる。地表排水は，ほ場表面の水を短時間に排水することを目的とし，代表例が明渠と畝立て栽培である。明渠は，ほ場の周囲などにトレンチャやパワーショベルで排水路を掘削し，排水口へほ場内の地表水を逃がす役割を果たす。生産現場では古くから広く普及する一般的な対策であり，近年の研究では単独の評価は行われていない。小麦を対象に無灌排水，明渠，地下水位制御システム（FOEAS：Farm Oriented Enhancing Aquatic System）を比較した研究例では，明渠の湿害低減効果により無灌排水に比べて，全重，精子実重，および穂数が増大したことが報告されている（島田ら，2010）。

b. 畝立て栽培

畝立て栽培は，図 I-10 に示すようにほ場内に畝を形成し，畝の頂部に播種し，畝頂部の土壌と地下水の距離を取ることで，その土壌水分を低下させる技術である。畝間には明渠と同じく地表水を排出する効果があり，畝間と明渠，排水口を連結することでその効果が高くなる。また，畝立てはほ場表面に凹凸ができ，表面積が増加するため，日射を受ける面積が増加し，地温上昇と土壌の水分低下を促す。加えて，風を受ける面積も増加するため，同様に水分低下を促進する。

畝立て作業は播種作業と同時に行われることが多く，大豆 300A 技術の一部としてまとめられている。大豆 300A 技術は，農業・食品産業技術総合研究機構（以下，農研機構）において大豆の湿害を回避する播種技術などを地域ごとに選定したもので，単収 300kg/10a，品質 A クラス（1,2 等）を目指して名付けられた（有原，2007）。大豆 300A 技術で選定された播種機は，北海道地方の覆土前鎮圧機構を有する浅耕逆転ロータリシーダ，東北地方の大豆・麦立毛間播種機，関東地方のディスク駆動式汎用型不耕起播種機，北陸地方の重粘土転換畑向けの耕うん同時畝立て播種機，東海地方の広畦成形・浅耕播種機（小明渠作溝同時浅耕播種機），近畿中国四国地方のトリプルカット中型不耕起播種機がある。

様々な播種機が開発されたが，現状で生産者が利用しているのは北陸地方の耕うん同時畝立て播種機と東海地方の小明渠作溝同時浅耕播種機と考えられる。中でも，耕うん同時畝立て播種機はメーカーから市販され，北陸地方を中心に全

国的な普及がみられる。同機による播種を畝立て栽培による大豆作付面積と捉えると，2015 年時点で農林水産省からの聞き取りでは，14,000 ha 程度に普及しており，1 割を占めている。

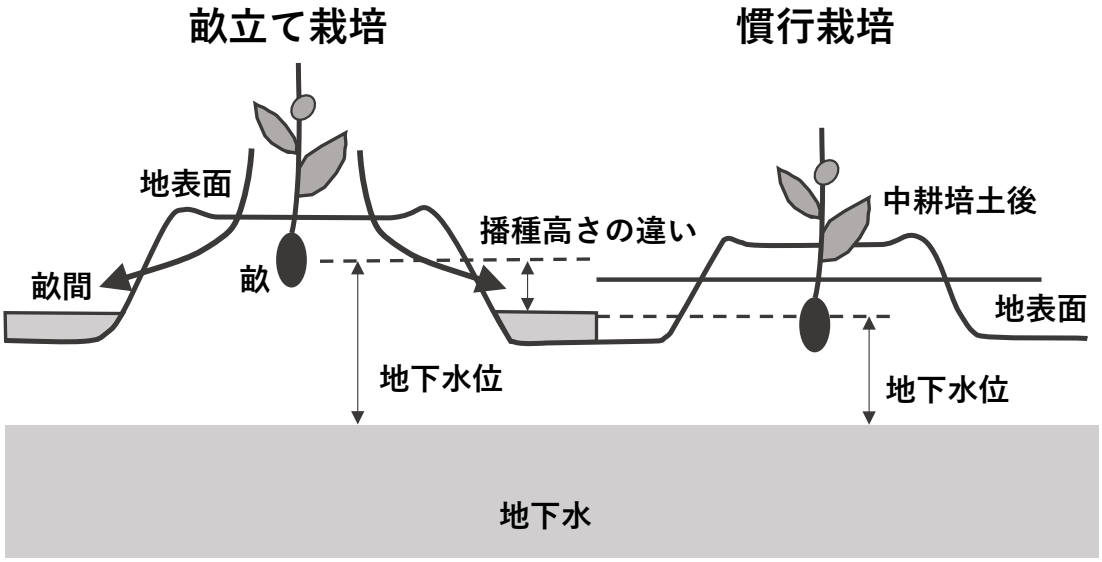


図 I-10　畝立て栽培
（農研機構細川氏より提供）

c.　地下排水を促進する技術

地下排水は，地表排水の後に残された土壌中の余分な水分を排除することを目的とする。地下排水を促進する技術は，暗渠，簡易暗渠，心土破砕，地下水位制御システムなどがある。暗渠は，勾配を付けて吸水管をほ場内に埋設し，管周辺の水分を排水口へ導く。埋設した吸水管と直交するように穿孔機で通水孔を施工する簡易暗渠も活用される。これらは，古くからほ場整備として行われており，広く普及する一般的な対策である。研究例では，冠ら（2010）は暗渠内の水位調節が可能な排水システムを考案し，気象条件に応じて暗渠内の水位を設定することで，水田輪作における大豆収量の向上を試みている。

心土破砕は，作土の下に形成された透水性の悪い土壌層をチゼルなどで破砕し，余分な水分を縦方向に浸透させる技術である。暗渠の吸水管の上部に形成された不透水層を破砕するために行うこともある。原口（1994）は水田転換畑の大豆播種において，ほ場全面で心土破砕を行い，耕盤を破壊することでにより出芽率が大幅に向上することを報告している。

地下水位制御システム（FOEAS）は，ほ場内に吸水管を埋設する点で暗渠と

同じであるが，排水だけでなく地下灌漑に利用できる技術であり，近年普及が進み，2017 年には 13,000 ha に導入されている。FOEAS の概要を図 I-11 に示す。FOEAS は小野寺ら（2005）が考案した技術であり，排水のみにしか用いられなかった暗渠管に水位制御器を組み込み，灌漑にも利用することで，湿害と干ばつ害を回避し，水田輪作における安定的な作物生産を可能にする。水稲作付け時と大豆，小麦などの畑作物作付け時で地下水位を変更することができ，これにより平均 40 %の増収効果が得られる画期的な技術である。このシステムを導入し，大豆栽培に適用した場合に単収が 3 倍を超えるなど劇的な効果も報告(若杉ら，2009）されている。普及が進む技術であるが，導入コストが高額となること，元来の地下水位が高いほ場には不向きであることなどが問題とされている。

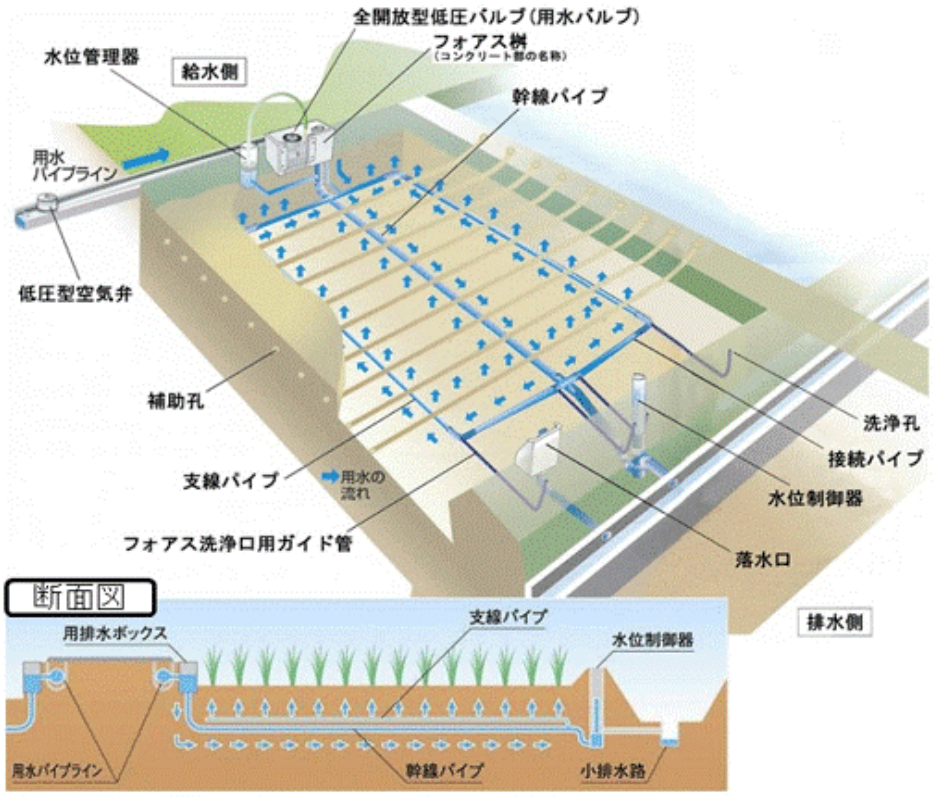


図 I-11　FOEAS の概要
（農研機構ホームページ（農研機構，2015）より引用）

d.　その他の技術

他にも土壌水分ではなく，種子の水分を高め，急激な吸水を抑制し，種子の細胞組織の崩壊を防ぐ対策がある。これは種子の含水率を播種前に 15 %w.b.程度に高めることで，播種後の吸水障害を抑制することが報告（国立ら，2009）され

ている。しかしながら，水分調節処理に 4 日程度を要することや水分を高めた状態の種子ではカビの発生が懸念されるため，保存期間を長くできないことから生産現場では普及していない。

(2) 湿害低減を図る播種機

a. 耕うん同時畝立て播種機（URS 機）

畝立て播種機に分類される播種機は URS 機，小畝立て播種機，小明渠作溝同時浅耕播種機がある。

URS 機（図 I-12）はアップカットロータリを用いて，耕うん作業と同時に高さ 10～15 cm の畝を形成し，畝の頂部に播種することで湿害低減，出芽の安定化を図る技術である（細川，2005）。URS 機は農研機構で開発され，畝立て播種機の中で唯一メーカーが市販している播種機であり，生産者が容易に入手できることから，北陸地方を中心に全国で普及している。図 I-13 に示すように，畝立てはアップカットロータリの爪配列を変更することで行う。ロータリ爪は曲がり方向に土が飛散する性質があり，爪配列を変更することで，天幅の狭い畝，広い畝など畝形状を変更できる。播種機は上述の傾斜目皿式，ロール式の播種機の両方が利用されるが，傾斜目皿式の播種機がセットで販売されている例が多い。

URS 機は 1 工程で耕うん，畝立て，播種，元肥施用を行うことができる複合作業が特長である。融雪の遅れなどでほ場準備の時間が確保できない地域において，播種前のほ場準備から播種までを一度の作業で行えるメリットは大きい。また，アップカットロータリの畝立てにより砕土率が向上し，出芽が安定するとともに，湿害低減効果が得られる。実証試験では畝立てをしない慣行区と比較して，7～12 %の増収が得られる（細川，2014）。

このように URS 機は大豆播種に適した機械であるが，重粘土質の土壌など砕土性の劣るほ場で 1 工程作業を行うと，播種作業の速度は 0.2 m/s 程度と極低速となる場合がある。そのため，作業速度が低下しにくい砕土性の良いほ場や雪解けの遅れなどで事前耕うん自体ができないほ場を除き，生産者は事前耕うんを行い，播種作業の高速化を図る例が多い。ただし，事前耕うんを行ったとしても，URS 機の作業速度は 0.6 m/s にとどまる。中村ら（2011）は，URS 機の作業速度を標準とされる 0.4 m/s よりも高速にした場合に播種精度が低下し，畝の高さが有意に低くなることを報告している。生産現場では近年，1 戸当たりの負担面積が急速に拡大し，都府県では 10 ha 以上を作付けする生産者が占める面積割合は約 5 割となっている。そのため，適期内に播種作業を完了するために作業速度，能率の向上が求められている。

図 I-12　耕うん同時畝立て播種機（URS 機）

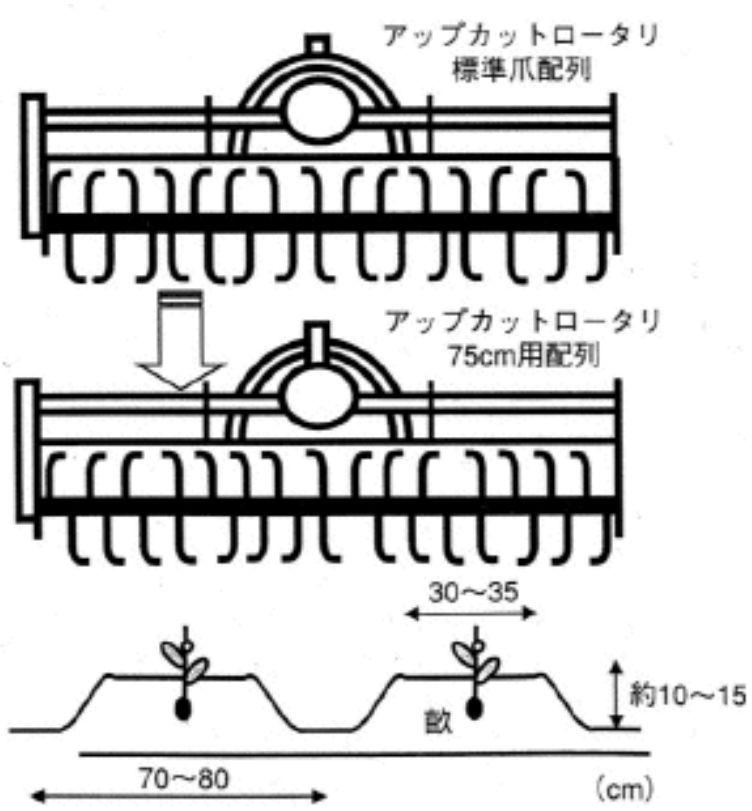


図 I-13　アップカットロータリの爪配列変更による畝の形成
（農研機構細川氏より提供）

b. 小畝立て播種機

小畝立て播種機（図 I-14）は，代かきハローを用いて，耕うん作業と同時に高さ 8～10 cm の畝を形成し，畝の頂部に播種することで湿害低減，出芽の安定化を図ることができる（高橋，2009）。同機は URS 機とロータリ爪の回転方向は異なるが，同様にロータリ爪の配列を変更し，土の飛散方向を調整することで小さな畝を形成する。同機の特徴は，生産者が所有する水稲用の代かきハローを生産者自身が改造することであり，改造用のマニュアル（岩手県，2008）に詳しい方法が解説されている。生産者が所有の代かきハローを改造するため，比較的安価に播種機を構成できる。また，ハローを利用するため，耕うん深さが浅く，所要動力が小さくなり，URS 機より小型のトラクタで利用可能である。

図 I-14　小畝立て播種機
（岩手県より提供）

小畝立て播種機の課題は，メーカーによる市販品ではないため，普及が進んでいないことである。また，播種機を装着する代かきハローはその前提の構造ではないため，使用頻度によっては破損の懸念がある。その他，播種機が一般的な傾斜目皿式，ロール式の播種機であるため，作業速度の上限は 0.6 m/s 程度と考えられ，作業速度向上が求められる。

URS 機と異なる点は，事前に耕うんされたほ場での利用を前提として，未耕起状態のほ場への播種には対応できないことである。また，耕うん同時畝立て播種技術よりも畝の高さが低いため，湿害の軽減効果が若干低いと考えられる。

c.　小明渠作溝同時浅耕播種機

小明渠作溝同時浅耕播種機（図 I-15）は，ダウンカットロータリの側面に溝を切るディスクを取り付け，耕うんと同時に作業工程の側面に深さ 12 cm の明渠を形成し，深さ 5 cm の浅い耕うん面に播種する（渡辺ら，2004）。平畝に溝が付けられた状態であり，側面の明渠を畝間とすると，幅の広い畝と捉えることができる。同機は小畝立て播種機と同様に生産者の所有するダウンカットロータリに溝切りディスク，畝形成用の側板，補強フレームなどを追加し，市販の播種機を装着することで構成される。播種機を所有していれば，改造費用は 20 万円程度と安価である。

図 I-15　小明渠作溝同時浅耕播種機
（農研機構渡辺氏より提供）

小明渠作溝同時浅耕播種機は農研機構で開発され，関東以西に多い水稲，麦，大豆の水田輪作体系の麦跡大豆の播種を対象として，東海地方を中心に利用されている。同機は浅く耕うんすることでほ場表面に形成されるクラストを防止する。また，浅く耕うんし，未耕起部分と形成された小明渠によって，ほ場の排水性を高め，湿害を軽減する。多雨条件の実証試験では慣行の平畝栽培と比較して 10 %程度の増収効果が得られている（農研機構，2007）。

小明渠作溝同時浅耕播種機の課題は，小畝立て播種機と同様に，メーカーが市販していないことによる生産者の入手のしにくさにある。また，作業速度も従来の播種機を利用することから，0.6 m/s より高速化することが難しいことである。さらに，近年の局地的な豪雨を考えると，浅い明渠では十分な湿害軽減効果を得られないことが懸念される。

d. その他の播種機

日本の大豆ではほとんど行われていない不耕起栽培を対象にその拡大を意図し，チゼル式不耕起播種機の研究が行われている（国立ら，2016）。同機は播種条ごとに小型のチゼルで深さ 150 mm 程度の溝を形成し，溝を介した地下排水により湿害の軽減を計っている。また，不耕起ほ場において 1 工程でチゼル作溝，播種ができ，市販の不耕起播種機と比較して，高収量が得られる傾向が報告されている（国立，2012）。同機においても市販の播種機が利用されており，その作業速度は 0.6 m/s が限界と考えられる。

(3) 播種機の高速化

大豆の播種機の高速化については，傾斜目皿式播種機の高速化を対象とした研究例が多い。傾斜目皿式播種機はロール式播種機に比べて点播精度が高い（皆川, 2005）こと，播種機メーカーが大豆播種に傾斜目皿式播種機を推奨していることが理由と考えられる。

宮下（1990）は，目皿の種子穴に種子が入りやすくなるように誘導する溝を作成し，その効果を検証している。これにより従来の傾斜目皿式播種機より高速な 0.7 m/s まで種子繰り出し精度が低下しないことを報告している。

下名迫ら（1989）は，300 mm の大型目皿の播種機を試作し，播種精度を検証しており，当時の傾斜皿式播種機の作業速度 0.2〜0.4 m/s に比べて，高速な 0.7 m/s でも高い播種精度が維持されたとした。

国立（2011）は，目皿の中心から種子穴までを半径とした円の直径と播種粒数の関係に着目し，市販の目皿の種子穴を変更した目皿を開発している。この目皿を従来の傾斜目皿式播種機に組み込んで播種した場合に，作業速度 1.5 m/s 以下では種子繰り出し精度が低下しないとした。目皿の種子穴の変更のみで種子繰り出し精度を向上させる画期的な成果であるが，播種機の溝切り，覆土などの各部の改良や播種深さなど播種精度についての検討は行われていないため，播種機としての性能は明らかにされていない。播種機メーカーでは傾斜目皿式播種機の高速化について，目皿の穴位置の変更ではなく，穴数を増加させることで対応しており，近年，穴数を増加させた目皿が販売されている。

井上ら（2003）は目皿式播種機でも海外製の横側排種式播種機を改造し大豆播種へ適用を報告している。作業速度 1.25 m/s で播種深さ，播種間隔ともに安定しているとのことであるが，実用化に至っていない。

加藤ら（2015）は，接地輪駆動の播種機で高速化を図る場合に問題となる駆動輪のスリップについて，ロール式播種機をベースとして GNSS 速度連動機能を付加したモータ駆動に改良した播種機の播種精度を検証している。有意差はないものの，改良により安定した播種が可能としている。作業速度は 0.6 m/s 程度までの検討であり，従来の播種機の速度範囲にとどまっている。

4. 湿害対策と作業の高速化の検討

ここまで述べたとおり，国産大豆の生産量を増加させるためには，単収を向上させる必要がある。単収向上には，生育初期の湿害を回避することが重要である。水田転換畑における生育初期の湿害対策には，明渠，暗渠などの従来の排水対策が基本となる。しかしながら，これら基本対策だけでは近年の局地的な豪雨など降水量の急激な増加に対応できない場合がある。そのため，本研究では，生産者が基本対策と併せて追加で実施できる畝立て栽培に着目した。

畝立て栽培は，ほ場表面の土壌をかき寄せて形成した畝の頂部に播種する栽培方法である。畝立て栽培の播種（畝立て播種）は，畝を形成する畝立てと播種の 2 つの作業に分けられる。野菜作では畝立て作業と播種（または移植）作業を分離して行うことが多いが，大豆のような土地利用型作物は，野菜作に比べて経営体当たりの作付面積が大きいため，作業の効率化，高速化が求められる。また，大豆は品種ごとの播種適期が 2 週間程度と短く，梅雨期などほ場が湿潤になりやすい時期に播種作業を行う必要がある。そのため，畝立て作業と播種作業を同時に複合作業で行う畝立て播種機が必然となり，さらに作業の高速化と湿潤土壌への対応が求められる。

畝立て播種機の構成について，作業機ごとに高速化と湿潤土壌への対応を検討すると，前方の畝立て機は，培土板，培土器，培土プラウ，爪配列を変更して土の飛散方向を調節したロータリ，回転ディスクが考えられる。

培土板，培土器は，十分に砕土されたほ場であれば，トラクタや乗用管理機でけん引することで畝立て作業を行うことができる。野菜作で利用されることが多く，経営体当たりの作付面積が小さいことから小型のものが多い。生産現場では畑地での利用が多く，水田転換畑の湿潤状態の土壌のように付着性が高い場合には作業が困難になることが懸念され，高速作業は難しいと考えられる。また，砕土機能を持つロータリと組み合わせて畝立て機を構成する場合も多く，前方のロータリで砕土し，後方の培土器で畝立てを行う。ロータリとの組み合わせでは，ロータリの作業速度に律速され，0.6 m/s 程度が限界の作業速度と考えられる。

同様に，爪配列を変更して土の飛散方向を調節したロータリでも作業速度 0.6 m/s 程度が限界とされる（中村ら，2011）。また，ロータリは湿潤土壌では土壌の練り付けが問題とされ，生産現場では湿潤土壌での利用を回避することが多い。

一方，回転ディスクは，ロータリと比較して砕土機能は劣るものの，スクレー

パが装備されていれば，土壌の付着が抑制され，湿潤土壌でもロータリに比べて，高速作業が可能と考えられる。回転ディスクを使用した作業機には，ディスク式中耕培土機があり，作業速度 1.0～1.6 m/s で安定した培土作業が可能とされる（後藤ら，2012a）。

これらのことから，本研究では畝立て播種機の畝立て部に回転ディスク方式を主候補として検討した。

次に播種機は，傾斜目皿式播種機，横溝ロール式播種機，海外製の真空播種機，ダブルプレート式種子繰り出し機構を搭載する播種機が考えられる。

傾斜目皿式播種機と横溝ロール式播種機は作業速度 0.6 m/s が限界の作業速度とされ，これ以上に速度を高くすると，目皿やロールの回転が速くなり，播種穴，溝に種子が入りにくくなり，播種精度が低下することが明らかとなっている（岩淵ら，2004）。

真空播種機は作業速度 1.7 m/s でも作業可能とされ，高速作業を行っても高精度な点播が可能とされる（高橋ら，2018）。しかしながら，同機は負圧を発生させるブロアが必要なことから播種機が重厚で大型となる。また，畑作の乾燥した土壌での利用が前提となるため，湿潤土壌では土壌の付着による作業精度の低下が懸念される。

一方，ダブルプレート式種子繰り出し機構を搭載する播種機は飼料用トウモロコシ不耕起播種機（以下，不耕起高速播種機）があり，2.2 m/s で高精度な播種が可能とされる（橘ら，2014b）。2 条仕様では機関出力 22 kW 程度の小型トラクタでの利用可能とされ，真空播種機に比べて，小型である。

これらのことから，本研究の畝立て播種機の播種部には，ダブルプレート式種子繰り出し機構を主候補とした。

5. 研究の目的

以上のことから，本研究は大豆の湿害対策と播種作業の高速化を目的に，大豆用高速畝立て播種機の開発を行った。

目標とする作業速度は，畝立て部のベースとして検討したディスク式中耕培土機において，安定した培土作業が可能な速度が 1.0〜1.6 m/s であることを参考に，1.5 m/s とした。

II　ほ場状態と畝立て播種に係る測定項目と方法

1. はじめに

本研究の畝立て播種機の開発の過程で実施した，畝立ておよび播種試験では土壌の物理性，作業速度，播種精度などついて調査した。本章では，共通する項目について予め示す。

2. 土壌の物理性測定試験

(1) 土粒子の粒径組成

測定対象の土壌は表層約 10 cm のものを，数カ所から採取して混合して用いた。土粒子の粒径組成は，土の粒度試験方法（JIS A1204:2009）に従って行い，国際土壌学会法の土性で示した。

(2) 含水比，液性指数

含水比は，表層約 10 cm の土壌を数カ所から採取して混合した土壌を 110 ℃-24 時間法で乾燥して測定した。

液性指数は，土壌の含水比がどの程度液性限界に近いかを示す指標であり，物理性の異なる土壌間で水分状態を比較する指標とした。液性指数 I_Lは，次の式（1）により求められる。

$$I_L = \frac{W - W_P}{W_L - W_P} \tag{1}$$

ここで，W：含水比（%），W_L：液性限界の含水比（%），W_P：塑性限界の含水比（%）である。土壌の性質により異なるものの，液性指数が 0.3～0.4 以上では湿潤状態，0.2 以下では乾燥状態である場合が多い。

塑性限界および液性限界の測定は，同様に採取した土壌（未風乾土）を混合し，前者については土の液性限界・塑性限界試験方法（JIS A1205:2009）に従い，後者については図 II-1 に示すフォールコーン式測定器（株式会社マルイ，MIS-214-0-04）で行った。

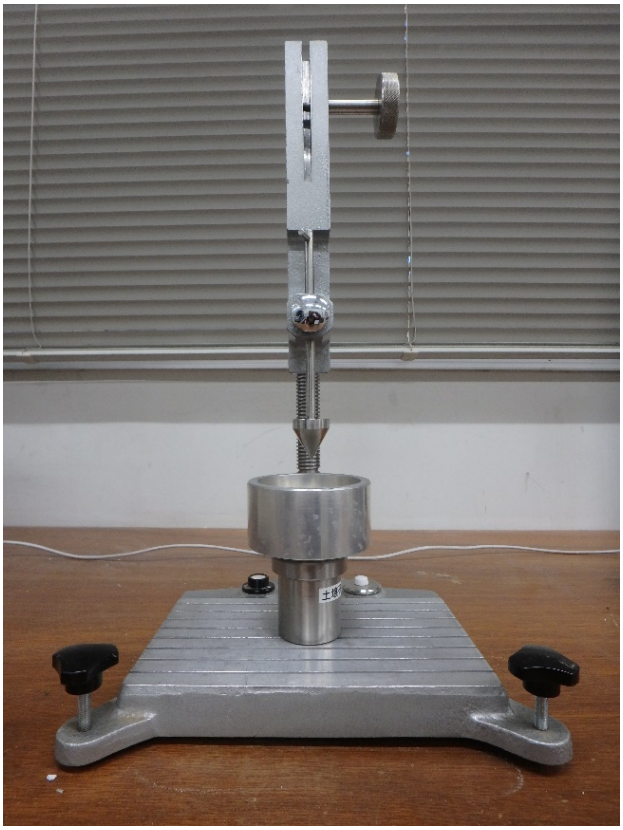


図 II-1　フォールコーン式測定器

(3) 円錐貫入抵抗

円錐貫入抵抗は, 図 II-2 に示す貫入式土壌硬度計(大起理化工業, DIK-5500)を用い, 試験区当たり 5 カ所で土壌表面から深さ 15 cm の範囲を 5 cm ごとに測定し，平均値で表した。

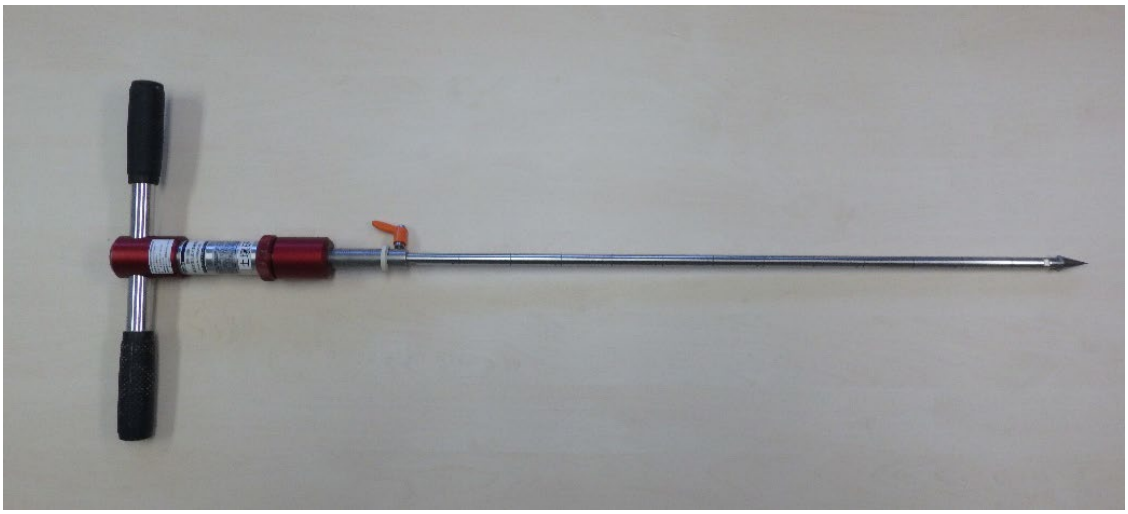


図 II-2　貫入式土壌硬度計（大起理化工業，DIL-5590（後継機種））

(4) ほ場の砕土率

播種前のほ場の砕土率は，畝立て部の前後列ディスクが作用する土壌表面から深さ 10 cm の範囲の土壌を採取し，目開き 2 cm のふるいで分け，土塊質量を秤で測定し，直径 2 cm 以下の土塊が占める質量割合として求めた。

3. 畝立て試験および畝立て播種試験

(1) 作業速度

作業速度は，20 m 間隔で立てたポール間を供試機が通過する時間をストップウォッチで測定して算出した。

(2) 畝高さ，畝上面幅

畝高さは，畝に直交方向水平に渡したアルミ角パイプを基準面として，金尺またはレーザー距離計で測定した。畝上面幅は金尺で測定した。

(3) 畝頂部の砕土率

畝頂部の砕土率は，畝の上部へ播種を行った場合に種子が位置する畝頂部から深さ 5 cm の範囲の土壌を採取し，ほ場の砕土率と同じ方法で測定した。

(4) 播種深さ，播種間隔

播種深さは，畝の頂部を掘り起こし，20 粒の種子の面を露出させ，掘り起こしてない頂部間に渡したアルミ部材から種子上面までの距離を金尺で測定した。播種間隔は，畝の頂部を掘り起こし，はじめに露出した種子を基準として，粒間 20 間隔を巻き尺で測定した。

(5) 出芽率

出芽率は，大豆の出芽が揃った状態で一定区間の出芽数を調査し，出芽数を分子に，種子百粒重，実播種量，播種工程長から算出した区間分の播種粒数を分母として除算し，百分率で表した。実播種量は試験区ごとに種子ホッパへの種子投入質量から残りの質量を減算して求めた。

III　ディスクによる畝立てと播種機構

1. はじめに

第 I 章で述べたように, 日本における大豆の生産振興では生育初期の湿害への対応が課題であり，この対策として URS 機が開発された。同機は湿害対策に有効であるが, 大豆生産者の作付け規模の拡大に伴い, 適期播種を実施するために播種作業の高速化が求められている。さらに, 本州では梅雨期のはしりから最中のほ場が湿潤状態になりやすい時期に播種作業を行うことから，アップカットロータリを使うことに起因する土壌の練り付け，畝の形成不良など湿潤土壌への対応が課題である。

そこで, 本章では播種作業の高速化と湿潤土壌への対応について, ロータリを用いず, ディスクによる畝立てを検討する。回転するディスクは，ロータリと比較して，高水分の土壌において土を練る現象が発生しにくいことが報告されている（佐藤ら，1970)。一方で，ディスクはロータリと比べて砕土作用が小さいため，安定した出芽を得るためには畝立て作業の前に十分な砕土作業を行う必要があると考えられる。そのため, ディスクによる畝立てが砕土状態に及ぼす影響について述べる。

次に, 高速化のための播種機構の検討を行った。大豆の生産現場で最も普及している傾斜目皿式の播種機の作業速度上限は 0.6 m/s 程度であり, これより作業速度を上げると, 目皿の回転が速くなり, 種子が目皿の穴に入りにくくなるため, 必要な播種量を繰り出すことができない (岩渕ら, 2004 ; 皆川, 2005)。そこで，本研究では，種子が入る穴の形状を変更した播種プレートと低い位置からの種子放出を実現する放出プレートを組み合わせることにより，2.2 m/s の高速作業が可能とされるダブルプレート式の播種機（橘ら，2014b）を搭載した不耕起高速播種機に着目した。不耕起高速播種機 (図 III-1) とディスク式中耕培土機 (図 III-2）を組み合わせて畝立て播種機を構成し，基本性能を明らかにする。

図 III-1　不耕起高速播種機（2 条仕様）

図 III-2　ディスク式中耕培土機（3 条仕様）

2. ディスクによる畝立ての検討

(1) 供試機

試験は市販の 3 条仕様のディスク式中耕培土機(小橋工業株式会社, DC300)を供し，機関出力 31 kW のトラクタに装着して行った（図 III-3)。畝立て作業は，株元へ土壌を移動させる中耕培土と土壌の移動方向が同じであることから，これを用いた。また，同機は本研究と同様の背景である作業の高速化，土壌水分過多のほ場への対応を目的として開発された。同機は従来のロータリ式中耕培土機と比較して，作業速度を 2 倍程度に高速化（1.0～1.6 m/s）し（後藤ら，2012a)，湿潤条件下のほ場においても従来機と同等以上の培土効果を発揮できる（後藤ら，2012b）特長を持つ。

図 III-3　ディスク式中耕培土機を用いた畝立て試験

(2) 供試ほ場および土壌の物理性測定

a. 供試ほ場

埼玉県鴻巣市の農研機構農業技術革新工学研究センター（以下，革新工学センター）附属農場において，土粒子の粒径組成が異なるロータリ耕起後のほ場 2 筆（転換後 1 年目の水田転換畑，普通畑）で土壌の水分状態が異なる日（高水分，低水分）に分けて計 4 試験区で試験を行った。

b. 土壌の物理性測定方法

土壌の物理性測定は，土粒子の粒径組成，含水比，液性指数，円錐貫入抵抗，ほ場の砕土率について，第 II 章の方法で測定した。土粒子の粒径組成，含水比，液性指数，円錐貫入抵抗は場内 5 カ所で，ほ場の砕土率は試験区当たり 3 カ所で測定した。

(3) 畝立て試験方法

a. ディスク式中耕培土機の設定項目

図 III-4 に 3 条仕様のディスク式中耕除草機の平面図と側面図を示す。

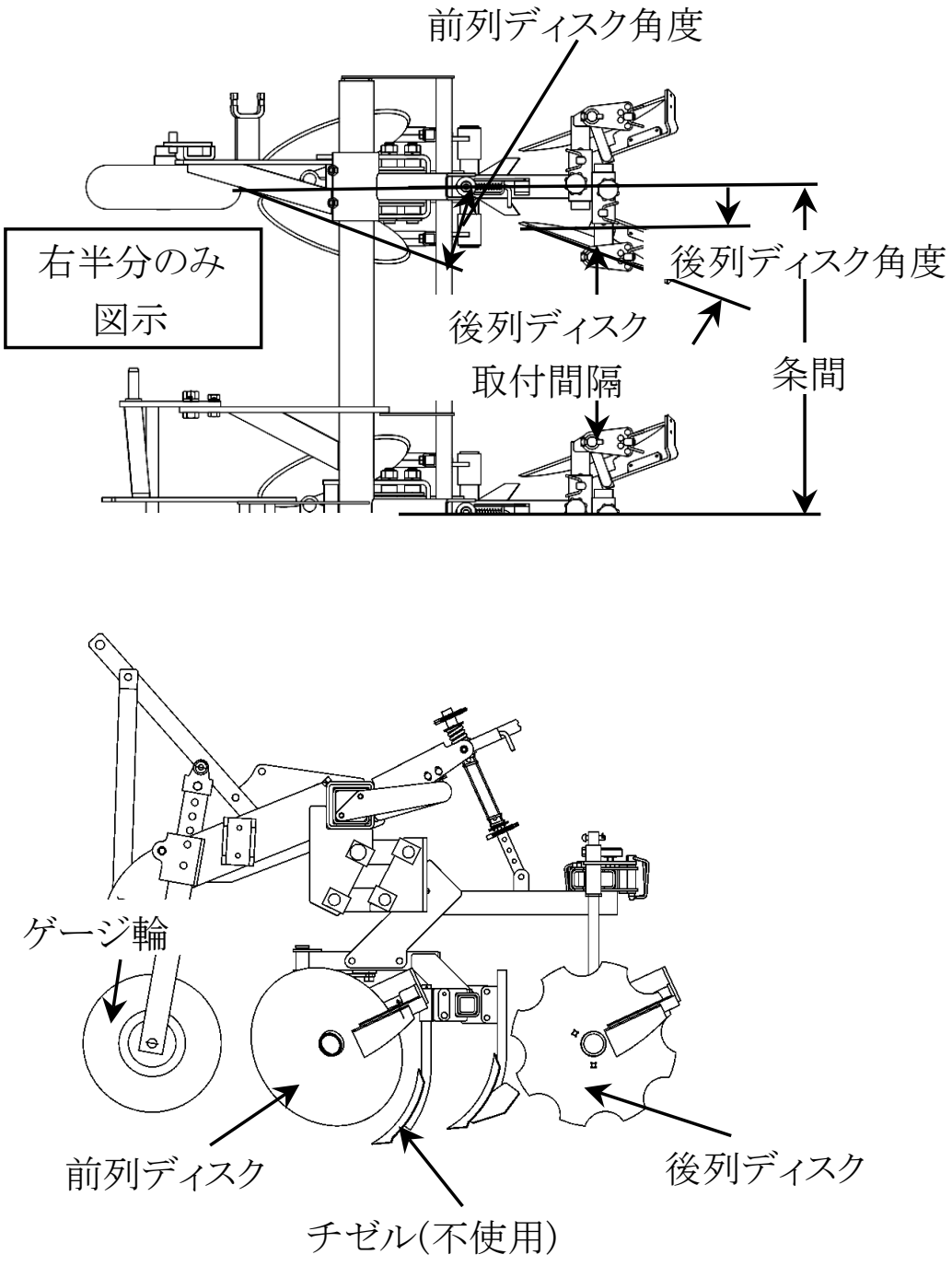


図 III-4　ディスク式中耕培土機の平面図と側面図

供試機の機械調節部分は，条間，前列ディスク角度，後列ディスク角度，後列

ディスク取付間隔，ゲージ輪位置，チゼルの有無である。このうち，畝高さの調節に関係する部分は前後列ディスク角度，後列ディスク取付間隔，ゲージ輪位置である。

b. 畝立て方法と機械設定

トラクタの速度を 3 段階（1.0，1.5，2.0 m/s）に設定して畝立て作業（50 m，2 反復）を行った。

機械設定は条間を 70 cm，チゼルは上向きに固定して不使用とした。畝高さは，URS 機の作業目標 10〜15 cm となるように予備試験により各部分を調節した。前列ディスク角度は中耕培土作業の条間 70 cm 設定時の標準角度（20 °），後列ディスク角度は設定速度 1.0，1.5 m/s では標準角度（20 °），2.0 m/s では標準角度で畝高さが高くなり過ぎたことから 1 段階鋭角（12.5 °）に，後列ディスク取付間隔は中耕培土の標準設定（40 cm）とした。

c. 測定項目

畝立て試験は，作業時に作業速度，作業後に畝高さ，畝頂部の砕土率について，第 II 章の方法で測定した。作業速度は 3 反復，畝高さはレーザー距離計を用いて試験区当たり 2 カ所×2 反復測定し，その差分から求めた。畝頂部の砕土率は試験区当たり 3 カ所測定し，畝立て前後の砕土率の変化は，畝頂部の砕土率からほ場の砕土率を減算して求めた。

(4) 試験結果と考察

a. ほ場状態

ほ場状態を表 III-1 に示す。

表 III-1　畝立て試験のほ場状態

試験場所	ほ場履歴	土性[1]	水分状態	土壌の物理性			
				含水比（%）	液性指数	円錐貫入抵抗[2]（kPa）	砕土率[3]（%）
埼玉県鴻巣市	ロータリ耕うん後の水田転換畑	砂質植壌土	低水分	31.0	0.09	650	91
			高水分	37.5	0.45	770	93
	ロータリ耕うん後の普通畑	植壌土	低水分	37.5	-0.14	360	83
			高水分	42.7	0.22	480	82

[1] 国際土壌学会法による分類。

[2] 頂角 30°・底面積 2cm^2 の円錐で測定，深さ 0~15cm の平均値。

[3] 2cm 以下の土塊の占める質量割合。

土壌水分（液性指数）は，水田転換畑の低水分条件では塑性限界付近であり，土壌がさらさらした乾燥状態であった。高水分条件では湿潤状態で土塊同士がくっつきやすい状態であった。普通畑の低水分条件では，水田転換畑と同様に土壌がさらさらした乾燥状態であった。高水分条件では水田転換畑より乾燥してやや湿潤で土塊同士が付着するほどではなかった。

円錐貫入抵抗は深さ 0～20 cm の平均値で 200 kPa 程度より低い場合にけん引作業が困難となるとの報告（八木，1971）がある。本試験ではディスクが作用する深さ 0～15 cm の平均値で 200 kPa を超えており，さらに深い深さ 20 cm を加味した抵抗値はより大きな値となることから，全ての条件で試験が可能と判断された。砕土率は全ての条件で 80 %を超えており，大豆の播種に適するとされる砕土率 70 %以上（中村，2015）を確保できていた。

b. 畝立て試験

表 III-2 に畝立て試験の結果を示す。

表 III-2　畝立て試験の結果

ほ場履歴	土壌の水分状態	作業速度 (m/s)	畝高さ (cm)	畝頂部の砕土率 [1] (%)
ロータリ耕うん後の水田転換畑	低水分	1.02	12.8	86
		1.47	14.6	85
		1.91	14.4	90
	高水分	0.92	15.5	83
		1.30	16.8	80
		1.85	16.0	82
ロータリ耕うん後の普通畑	低水分	1.01	15.5	79
		1.45	15.9	80
		1.96	14.8	78
	高水分	1.00	15.4	81
		1.47	13.4	78
		1.92	13.4	83

[1] 畝頂部から 5cm の範囲の採取土壌の 2cm 以下の土塊の占める質量割合。

作業速度は水田転換畑の高水分条件で設定速度に対して 10 %程度の速度低下があった。この条件は土壌が湿潤状態であったことからトラクタタイヤのスリップによるものと考えられた。これ以外の条件では 5 %程度の速度低下に収まり，スリップが小さかったと推察された。

いずれの条件においてもスリップによる急激な速度低下，タイヤによる過度な土壌の掘取りは観察されず, ロータリを用いた畝立てでは対応困難な 1.0～2.0 m/s の速度範囲でも円滑な畝立て作業ができた。畝高さはほ場の水分状態，作業速度にかかわらず，目標高さ 10～15 cm を確保することができた。なお，畝の断面は概ね三角形で，畝の天幅はほとんどなかった（図 III-5)。

図 III-5　畝形状（上：水田転換畑の高水分，下：普通畑の低水分）

c.　作業速度と畝立て前後の砕土率

図 III-6 に作業速度と畝立て前後の砕土率の変化を示す。

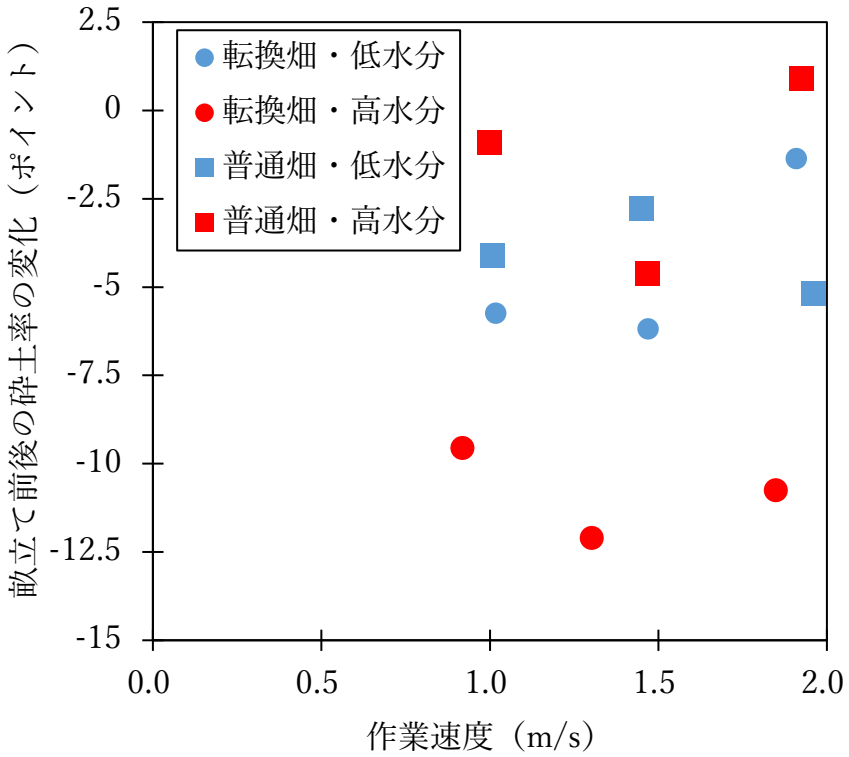


図 III-6　作業速度と畝立て前後の砕土率の変化

ほとんどの試験条件において，畝立て作業により作業後の砕土率は作業前と比較して低下していた。低下した要因は，土壌を反転，混合させた場合に小さい土塊が下に，大きな土塊が上に移動する現象によるものと考えられた。また，砕土率の変化は，作業速度の変化に比べて試験条件の違いの影響が大きいことが推察された。

例えば，転換畑・高水分条件では作業速度 0.9 m/s から 1.9 m/s に増加しても，砕土率の低下は 2.5 ポイントの幅に収まり，傾向が見られなかった。このことは，ディスク式中耕除草機で作業速度にかかわらず作業後の砕土率が同水準となるという研究例（後藤ら，2012a）と一致しており，畝立て作業の速度増加がもたらす砕土率低下の影響は小さいことが明らかになった。

d. 土壌壌水分と畝立て前後の砕土率

図 III-7 に土壌水分（液性指数）と畝立て前後の砕土率の変化を示す。

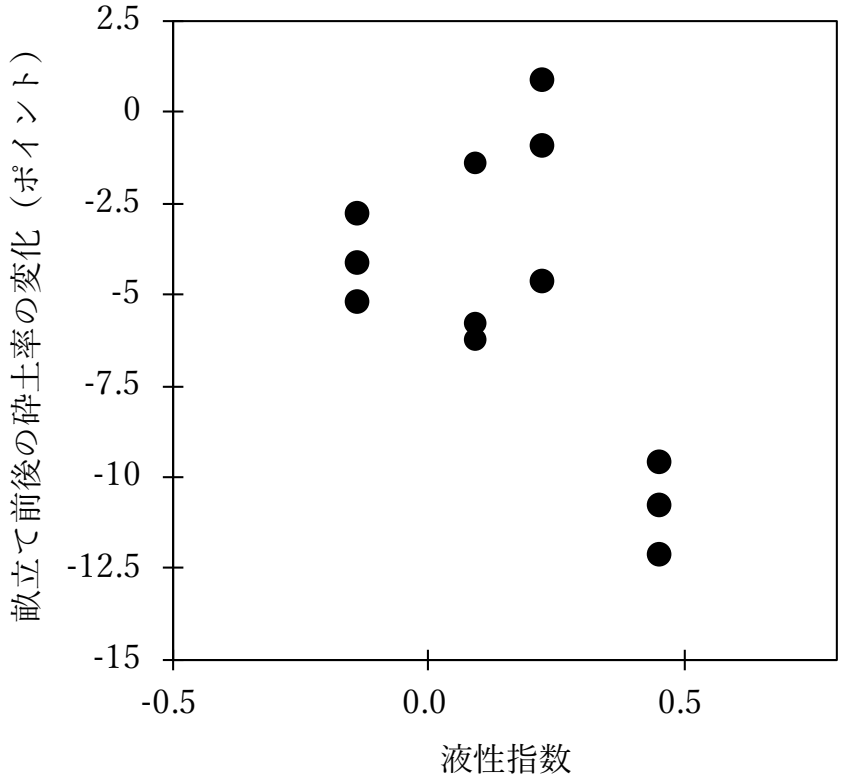


図 III-7　土壌水分と畝立て前後の砕土率の変化

液性指数-0.14～0.22 では畝立て後の砕土率が 7 ポイント以内の低下に収まっていたが，液性指数 0.45 では 10 ポイント程度低下し，低下が大きかった。後藤ら（2012b）は液性指数 0.35 以上を湿潤土壌と定義し，ディスク式中耕除草機による中耕培土作業において，湿潤土壌では非湿潤土壌に比べて平均土塊径が 1.5 倍程度になることを報告しており，本研究と同様の傾向であった。観察により，水田転換畑の高水分条件ではディスクに付着した土塊が剥がれて地面に落下したことで砕土率が低下したと推察された。

以上のことから，供試機は湿潤状態において URS 機では対応困難な 1.0～2.0 m/s の速度範囲でも畝立て作業が可能であること，作業速度によらず，同機の畝立て作業により砕土率が低下する可能性が高いこと，さらに，土塊同士が接着するような湿潤条件において砕土率の低下が大きくなることが明らかとなった。

3.　播種機構の検討

(1) 基礎試験機の構成

播種機構の検討は，畝立て作業と組み合わせて行うこととした。図 III-8 に基礎試験機を示す。

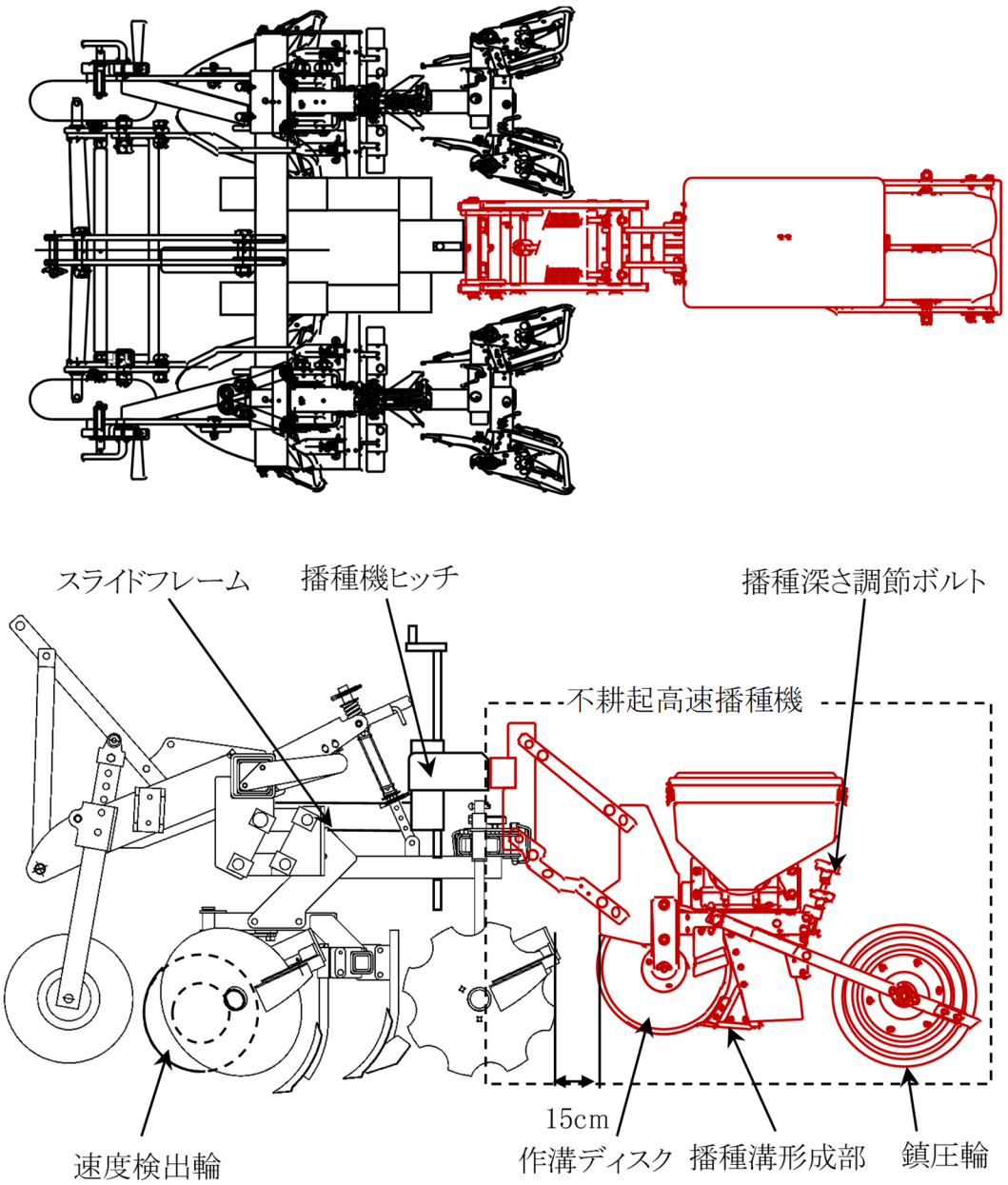


図 III-8　基礎試験機の平面図と側面図

基礎試験機は市販の 2 条仕様のディスク式中耕培土機（小橋工業株式会社，DC201），不耕起高速播種機（アグリテクノ矢崎株式会社，NTP-2），播種機ヒッチ（アグリテクノ矢崎株式会社，TH-DH），自作したスライドフレーム，速度

検出輪およびコントローラにより構成される。スライドフレームは前後方向，播種機ヒッチは高さ方向の調整機能を有する。

基礎試験機では市販機から以下の点を変更した。予備試験により同機は，表面の硬いほ場での動作を前提にした重厚な構造であり，垂直荷重（鎮圧力）が大きく，形成した畝が崩れることが明らかとなった。そのため，播種機の平行リンクに引張バネとアイボルトを組み込み，播種機の垂直荷重を小さく調節できるようにした。

次に，動力伝達を簡素化するため，接地輪，動力伝達軸等を取り外し，播種機の駆動方法をモータ駆動に改造・変更した。モータには中空軸のブラシレスモータ（オリエンタルモーター株式会社，BLH230K-30FR）を使用し，新たに設けた軸を介して種子操出部へ動力を伝達した。株間設定にはコントローラに設置した可変抵抗を使用し，コントローラ内のマイコン（Atmel, ATmega88）の A/D 変換器に接続した。

播種機をモータ駆動とした場合，株間を一定に維持するためには車速に連動させる制御システムが不可欠である。モータによる車速連動制御システムは，田植機に関するものが報告（山田ら，2015）されている。これは，植付機構の目標角度に対して実際の角度を制御することで，車速によらず一定の株間を維持する方式となっている。また，低コスト化のためにモータの電気角を積算して植付機構の角度を求めている。播種機の場合，田植機の植付機構ほどの負荷変動はなく絶対的な角度制御も不要なため，より簡素化した制御システムを構築した（図 III-9）。

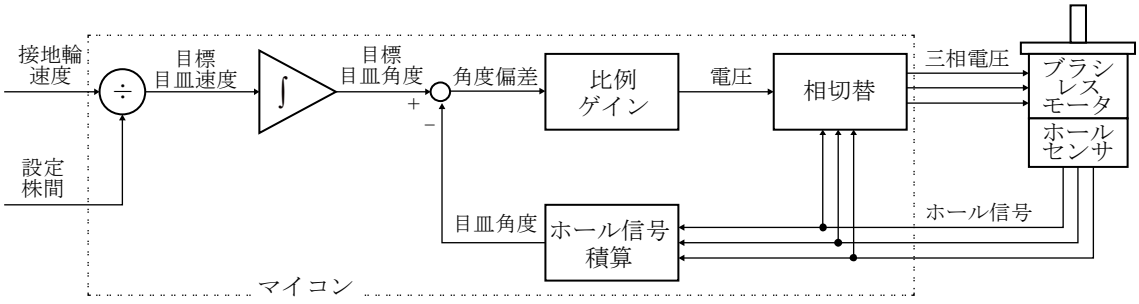


図 III-9　播種機の制御システム

制御システムはマイコン上に実装し，フィードバック方式は播種機の目皿プレート角度の比例制御方式とした。角度を制御するため，目標値との速度のずれ

が生じず，速度制御方式と比較して株間誤差を小さくできる。目皿プレートの角度は電気角積算を行って求める方式とし，電気角の検出にはブラシレスモータの相切替に使用するホールセンサの信号を利用した。目皿プレートの角度信号はある時点から積算した相対角度で十分なため原点検出は省略した。

(2) 供試ほ場および土壌の物理性

a. 供試ほ場

革新工学センター附属農場において，ロータリ耕起後のほ場（普通畑）で土壌の水分状態が異なる日（高水分，低水分）に分けて 2 試験区で試験を行った。

b. 土壌の物理性

土壌の物理性測定は，以下の項目について，第 II 章の方法で測定した。土粒子の粒径組成，含水比，液性指数，円錐貫入抵抗はほ場内 5 カ所で，ほ場の砕土率は試験区当たり 3 カ所で測定した。

(3) 試験方法

a. 播種方法

試験は，基礎試験機を機関出力 23 kW のトラクタに装着し，速度を 3 段階（1.0，1.5，2.0 m/s）に設定して，大豆の畝立て播種作業（50 m，反復なし）を行った（図 III-10）。その際の作業速度，畝高さ，畝上面幅，畝頂部の砕土率，播種深さ，播種間隔を測定した。

図 III-10　基礎試験機を用いた畝立て播種試験

基礎試験機のうちディスク式中耕除草機の機械設定はⅢ章 2.の設定と同じとした。播種機の機械設定は播種プレート（アグリテクノ矢崎株式会社，播種用目皿（分離））を ϕ 8.5，播種間隔を 12.5 cm とした。ϕ は種子が入る目皿の切り欠きの大きさであり，切り欠き内の内接円直径を表す。播種機のディスク式中耕除草機に対する前後位置，播種機の垂直荷重および播種深さは予備試験により決定した。

播種機の前後位置は，播種機前方の土壌の滞留具合からディスク式中耕除草機の後列ディスク後端と播種機作溝ディスク前端の距離を約 15 cm とした。播

種機の垂直荷重は，形成した畝が崩れないことを目安に 350 N に調整した。播種深さは，調節ボルトにより播種溝形成部底面に対する鎮圧輪の相対深さを調節し，3〜4 cm を目標とした。

b. 測定項目

播種試験は，以下の項目について，第Ⅱ章の方法で測定した。作業速度は 3 反復，畝高さと畝上面幅は 5 反復，畝頂部の砕土率は試験区当たり 3 カ所で，播種深さと播種間隔はそれぞれ 3 反復測定した。畝高さはレーザー距離計を用いて試験区当たり 5 反復測定し，その差分から求めた。

(4) 試験結果と考察

a. ほ場状態

表 III-3 に畝立て播種試験のほ場状態を示す。

表 III-3 畝立て播種試験のほ場状態

試験場所	ほ場履歴	土性 [1)]	土壌の水分状態	土壌の物理性			
				含水比（%）	液性指数	円錐貫入抵抗 [2)] (kPa)	砕土率 [3)] （%）
埼玉県鴻巣市	ロータリ耕うん後の普通畑	壌土	低水分	28.3	-0.74	820	83
			高水分	71.9	0.80	350	73

[1)] 国際土壌学会法による分類。

[2)] 頂角 30° ・底面積 2 cm^2 の円錐で測定，深さ 0~15 cm の平均値。

[3)] 2 cm 以下の土塊の占める質量割合。

土壌水分（液性指数）は，塑性限界以下の低水分条件であり，土壌がさらさらした乾燥状態であった。一方，高水分条件では液性指数 0.8 と明らかな湿潤状態であり，土塊同士がくっつきやすい状態であった。供試ほ場には，黒ボク土が混ざっているため，液性限界に近いようなドロドロした状態ではなかった。砕土率は，大豆の播種に適する 70 %以上であった。円錐貫入抵抗は両条件ともにトラクタがけん引可能な 200 kPa に達していた。

b. 畝立て播種試験

表 III-4 に畝立て播種試験の結果を示す。

表 III-4 畝立て播種試験の結果

土壌の水分状態	作業速度 (m/s)	畝高さ (cm)	畝上面幅 (cm)	畝頂部の砕土率 [1] (%)	播種深さ (cm)	播種間隔 (cm)
低水分	0.95	15.9	22.3	83	4.4±0.5	12.7±1.9
	1.41	15.1	25.7	84	4.0±0.5	13.1±3.1
	1.95	13.4	23.0	85	4.0±0.5	12.6±2.3
高水分	0.81	15.1	23.0	65	3.6±0.7	12.4±3.5
	1.20	13.3	27.3	67	3.5±0.8	13.0±3.9
	1.49	15.0	27.7	66	2.9±0.8	14.5±3.9

[1] 畝頂部から 5 cm の範囲の採取土壌の 2 cm 以下の土塊の占める質量割合。

低水分条件では作業速度は設定速度に対して 5 %程度の速度低下に収まっており，土壌が乾燥していたことからスリップが小さかったと推察された。いずれの設定速度においてもトラクタタイヤの沈み込みは観察されず，円滑な畝立て播種作業ができていた。一方，高水分条件では設定速度が高くなるに従い速度低下が大きくなり，1.5 m/s 以上の設定速度で 20 %を超える速度低下となった。

畝高さは全ての試験条件で目標高さを確保できていた。畝上面幅は低水分条件では 22.3〜25.7 cm，高水分条件では 23.0〜27.7 cm であった。また，畝頂部の砕土率は，低水分条件では作業前と同程度，高水分条件では作業前より 7 ポイント程度低下した。

播種深さは低水分条件では作業速度によらず，概ね目標とする深さ 3〜4 cm であり，ばらつきは同程度であった。高水分条件では作業速度が高くなると，播種深さが浅くなる傾向であった。原因は，ディスクによりかき寄せた土の抵抗が播種機の垂直方向の荷重より大きくなり，播種機が浮き上がったためと考えられる。播種機の平行リンクに取り付けた引張バネを調整し，播種機の垂直荷重を増加させることで浮き上がりが抑制されると考えられる。また，播種深さのばらつきは従来の小畝立て播種機の播種深さが作業速度 0.6 m/s の時に 2.4±0.6 cm

との報告（及川ら，2007）があり，基礎試験機は湿潤状態のほ場において，従来機よりも作業速度が高い場合でも同程度のばらつきに収まると推測された。

播種間隔は低水分条件では作業速度によらず，目標とする播種間隔 12.5 cm に近くなり，ばらつきも同程度であった。一方，高水分条件では作業速度が高くなると，播種間隔が広がる傾向があった。原因は，速度検出輪に垂直方向に押しつける機構がなく，車輪の自重のみで土壌表面に接しているため，検出輪がスリップしたことが考えられた。スリップを抑制するためには，バネ等で車輪の垂直方向の荷重を増加させることが考えられる。

4. まとめ

畝立てにロータリを用いず，ディスクの使用を検討するために，ディスク式中耕培土機を用いて試験を行った。その結果，水田転換畑の高水分条件において，URS 機では対応困難な作業速度 1.9 m/s 程度で目標とする 12〜15 cm の高さの畝が成形された。また，畝立て前のほ場の砕土率が 80 %以上確保されている場合には，畝立て後も大豆播種に求められる砕土率 70 %以上が確保されることが明らかとなった。

次に，ディスク式中耕培土機と不耕起高速播種機で構成した基礎試験機を製作し，播種試験を行った。その結果，低水分の普通畑では作業速度 2.0 m/s でも，播種深さや播種間隔のばらつきが小さく，安定した作業が可能であった。高水分では走行輪のスリップの影響で作業速度は 1.5 m/s にとどまったが，それでも従来機に比べて十分高速な播種が可能であった。これらからディスクによる畝立てと不耕起高速播種機に搭載されるダブルプレート式種子繰り出し機構の組み合わせにより畝立て播種作業の高速化の可能性が明らかとなった。

IV　種子消毒剤を塗抹した大豆種子に対応する播種機構

1. はじめに

第 III 章では，畝立ての高速化と湿潤土壌への対応を検討し，ディスク式中耕培土機による畝立て試験について述べた。また，播種の高速化に対応において，不耕起高速播種機に搭載されるダブルプレート式種子繰り出し機構に着目し，ディスク式中耕培土機と不耕起高速播種機を組み合わせた 1 条仕様の基礎試験機を作製し，播種試験を行った。その結果，高水分の普通畑では走行輪のスリップの影響で 1.5 m/s にとどまったが，低水分では 2.0 m/s と，URS 機など従来機に比べて高速な播種が可能との結果を得た。

しかしその後，基礎試験機を用いて，特定の種子処理用殺虫・殺菌剤を塗末処理した種子を供して播種を行ったところ，新たな問題が発生した。多くの種子に損傷が発生し，種子繰り出し機構の動作が止まる例が確認された。この薬剤は，生育初期に問題となる苗立枯れ性病害に高い防除効果を持つ（來田ら，2017）ことから，複数の県において使用が奨励され，普及が進んでいるが，種子表面がわずかに粘着性を呈している。これにより，播種プレート外周の V 字状の切り欠き部分と外枠内壁の間に種子が挟まり，損傷することが推測された。

そこで，本章では薬剤を塗抹した大豆種子に対応し，種子の損傷を減少させることを目的として，種子の入る切り欠きの形状を変更した播種プレートの製作とその改良効果について述べる。

2. 供試装置および試験方法

(1) 供試装置

a. ダブルプレート式種子繰り出し機構

図 IV-1 にダブルプレート式種子繰り出し機構の展開図を示す。

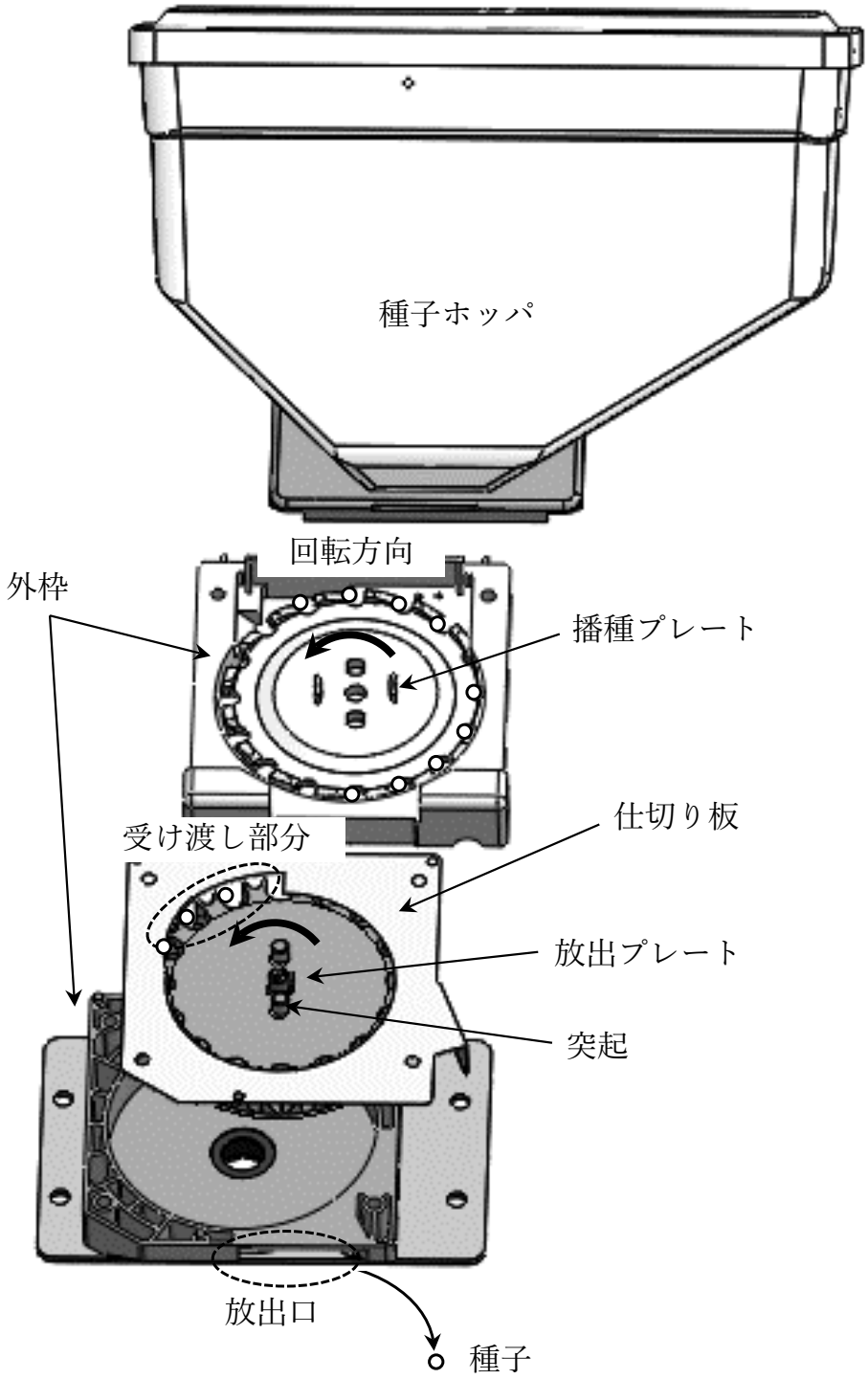


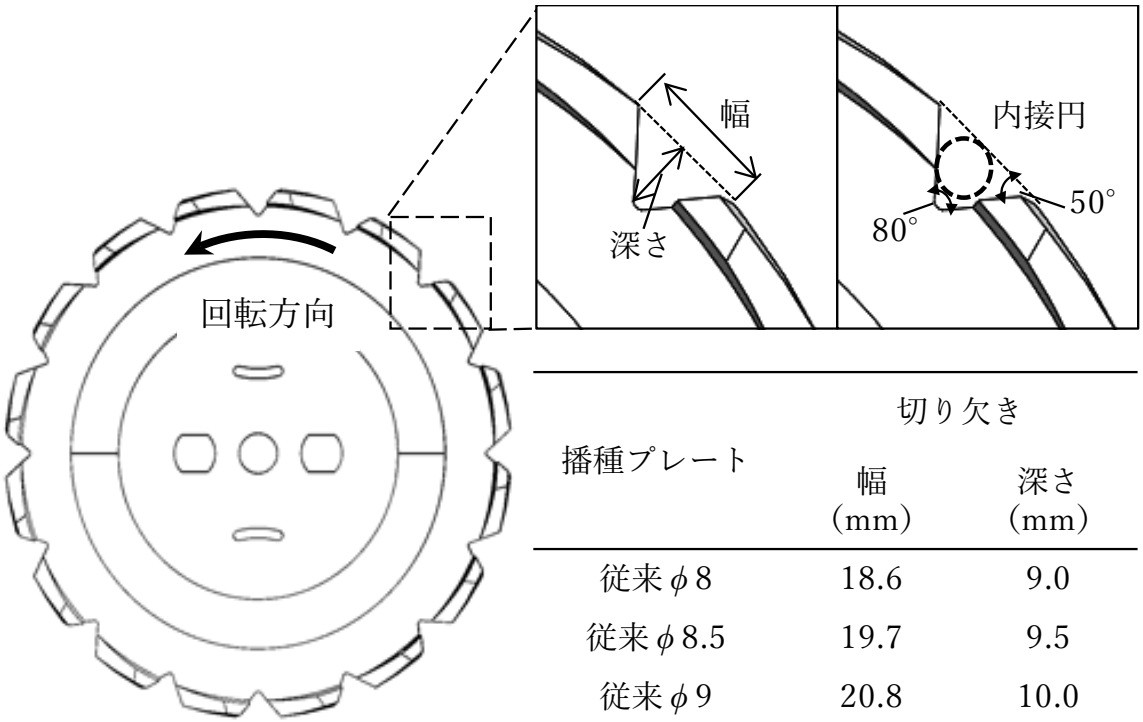
図 IV-1　ダブルプレート式種子繰り出し機構の展開図

この機構は，種子ホッパ，播種プレート，仕切り板，放出プレート，外枠等で構成され，橘ら（2014a）の研究に準拠した構造となっている。播種プレートと放出プレートは放出プレートに設けた突起により，同期して動く構造で，反時計回りの 1 回転でホッパから種子を分離し，放出する。種子ホッパから供給される種子を播種プレートが図中の 4〜6 時の位置で種子を 1 粒ずつに分離し，仕切り板の受け渡し部分（10〜12 時の位置）で放出プレートに種子を受け渡し，放出プレートが 6 時の位置で放出口から種子を放出する。

同機構で種子処理用殺虫・殺菌剤のチアメトキサム・メタラキシル M・フルジオキソニル水和剤（シンジェンタジャパン株式会社，商品名：クルーザー MAXX）を塗抹した種子を繰り出す場合に，種子が損傷することが確認された。大豆の播種量（普通畝幅栽培）は 3〜6 kg/10a であり，米麦の直播の播種量とほぼ同じであるが，米麦に比べて種子サイズが大きく，播種粒数が少ないことから，種子の損傷による欠株や生長阻害は避けなければならない。

b. 播種プレート

図 IV-2 に不耕起高速播種機の播種プレート（アグリテクノ矢崎株式会社，播種用目皿（分離），以下，従来プレート）を示す。



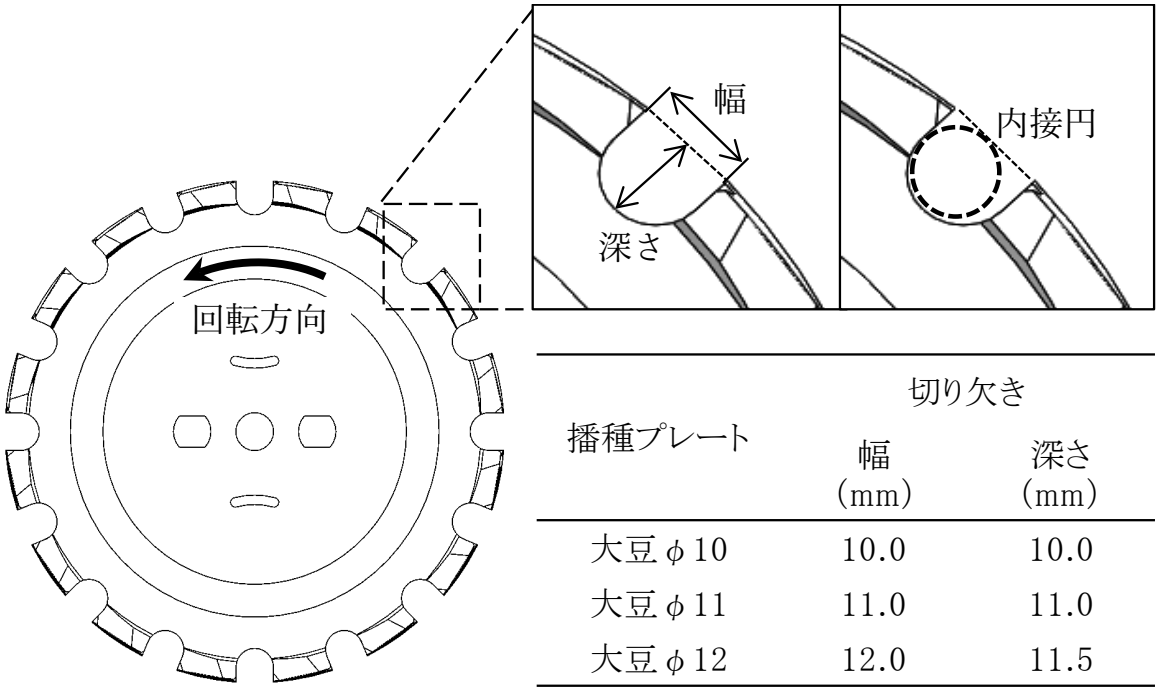
播種プレート	切り欠き	
	幅 (mm)	深さ (mm)
従来 ϕ 8	18.6	9.0
従来 ϕ 8.5	19.7	9.5
従来 ϕ 9	20.8	10.0

図 IV-2　飼料用トウモロコシ用播種プレート
（アグリテクノ矢崎株式会社，従来プレート）

従来プレートは円周上に V 字状の切り欠きが 16 個あり，切り欠きの大きさで 6 種類（ϕ 6.5～9 の 0.5 mm 毎）ある。ϕ は，切り欠きの大きさを表し，切り欠きと外枠内壁で形成される三角形状の内接円直径を示す。切り欠きの形状は飼料用トウモロコシ用に設計（橘，2016）されたが，大豆も播種可能とされ，種子に薬剤の塗抹がなければ動作は良好であった。試験では，大豆種子が切り欠き内に入るか確認し，ϕ 8，8.5，9 の 3 種類に絞って使用した。使用した従来プレートの外径は 158 mm，外周突起部（種子に作用する部分）の厚みは 8.8 mm である。

c. 播種プレートの改良

図 IV-3 に製作した大豆用の播種プレート（以下，大豆プレート）を示す。



播種プレート	切り欠き	
	幅 (mm)	深さ (mm)
大豆φ10	10.0	10.0
大豆φ11	11.0	11.0
大豆φ12	12.0	11.5

図 IV-3　大豆用播種プレート（大豆プレート）

従来プレートの切り欠き形状（V 字状で開き角度 80 °）は外周上の開口部が大きく，種子の供給には優れていると考えられるが，切り欠き内部の壁面は播種プレート外周の接線に対して 50 ° になっており，種子を外枠内壁方向に押しつける力が発生する。播種プレートを水平面上で回転させると仮定した場合に，種子が従来プレートから受ける法線方向の力は次式により表される。

$$F_n = F_S \cos\theta + mr\omega^2 \qquad (2)$$

ここで，F_S：種子が従来プレートから受ける力（N），θ ：切り欠きの播種プレート外周接線に対する傾き角度（°），m：種子の質量（kg），r：播種プレートの半径（m），ω：播種プレートの角速度（rad/s）である。

大豆プレートでは切り欠き形状を U 字状に変更した。これにより切り欠き内部の壁面は接線に対して直角になり，種子が外枠内壁方向に押しつけられる力を遠心力のみにできると考えた。なお，遠心力は種子の質量 0.35 g，播種プレートの半径 79 mm，角速度 2π rad/s 程度であることから，1.1×10^{-3} N 程度とな

る。

大豆プレートの外径と外周突起部の厚みは従来プレートと同じである。切り欠きの大きさは大豆種子より大きくなるように ϕ10〜12 の 1 mm ごとの 3 種類とした。ϕ は，従来プレートと同様に内接円直径を示す。切り欠き形状の変更は従来プレートの切り欠き加工前のプレートにフライス盤を用いて U 字状の切り欠きを切削加工して行った。なお，大豆プレート ϕ12 では加工前のプレートのプラスチック成型に伴う抜き加工の影響で深さは 11.5 mm となった。

d. 繰り出し試験装置

図 IV-4 に示す繰り出し試験装置は，不耕起高速播種機から繰り出し機構を取り外し，架台に取り付け，動力源を接地輪からモータ（オリエンタルモーター株式会社，BLH230K-30FR）に変更したものである。負荷に応じたトルクを発生させるために，モータは第 III 章の基礎試験機と同様に制御を行い，播種プレートの回転角度をフィードバックした。これにより，播種プレートの角度にずれが生じると目標の角度に修正される。

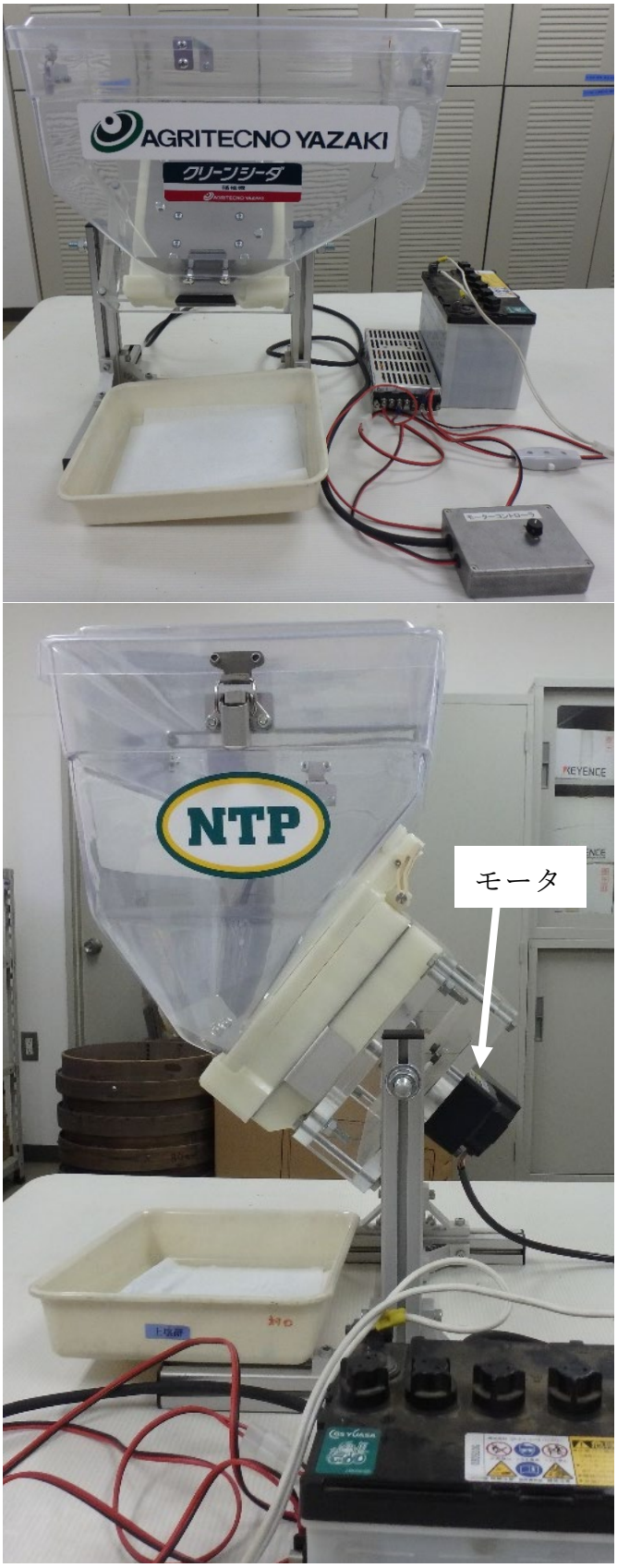


図 IV-4　繰り出し試験装置

(2) 試験方法

a. 供試種子

供試種子は 4 品種，粒径 3 種類，合計 10 種類を準備した。品種は，里のほほえみ，エンレイ，タンレイ，フクユタカである。粒径は，7.3 mm 以上 7.9 mm 未満，7.9 mm 以上 8.5 mm 未満，8.5 mm 以上 9.1 mm 未満（以下，7.3〜7.9 mm，7.9〜8.5 mm，8.5〜9.1 mm）である。粒径 7.3 mm 未満，9.1 mm 以上の種子は絶対数が少なく，生産現場で流通していないことから除外した。粒径の選別は，大豆の規格検査用ふるい（不二金属工業株式会社，大型丸目ふるい 7.3, 7.9，8.5，9.1）を使用して行った。殺虫・殺菌剤の塗抹処理は，裸種子 1 kg とこれに対応する量（8 ml）の殺虫・殺菌剤（液剤）をビニール袋に入れ，手動で振とうして行った。塗末処理後の種子（以下，薬剤種子）は，常温の室内でバットに広げた状態で 1 週間以上経過させ，十分に乾燥させた。

供試種子の質量，形状は，百粒重を秤により，種子 100 粒の長径，短径，厚みをノギスにより測定した。水分（含水率）は，穀類水分計（株式会社ケット科学研究所，PM-830-2）により測定した。また，薬剤種子の粘着性の指標として，図 IV-5 に示す 2 軸クリープメータ（山電株式会社，RE2-33005B(XZ)）を用いて鉄板に対する動摩擦係数を測定した。

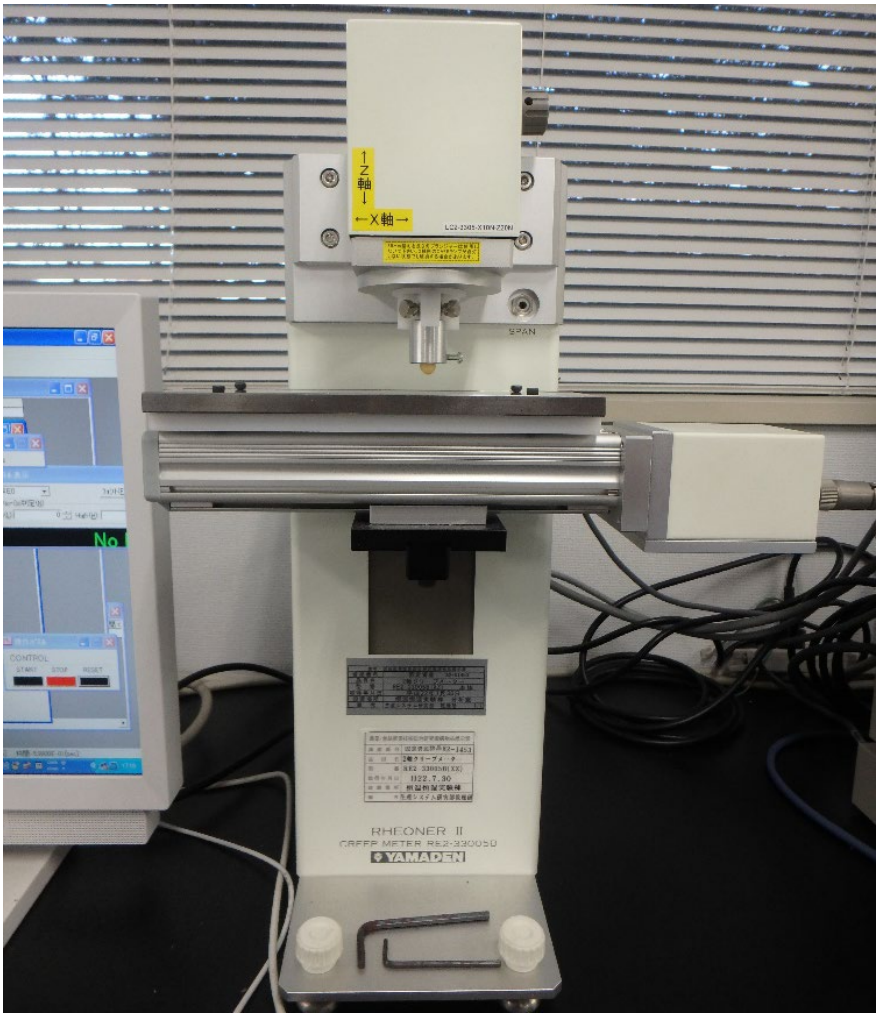


図 IV-5　2軸クリープメータ

b. 裸種子の繰り出し試験

薬剤を塗抹していない状態（以下，裸種子）で繰り出し試験を行った。試験は繰り出し試験装置に従来プレート（ϕ8，8.5，9）と大豆プレート（ϕ10，11，12）を変更・装着し，種子ホッパに裸種子を約 1 kg 充填し，繰り出し速度を 12 回/s に固定して，試験条件当たり 200 回の種子繰り出しを行った。繰り出し速度 12 回/s は，作業速度 1.5 m/s で播種した場合に，株間 12.5 cm 程度となる速度である。

種子の損傷の有無は，繰り出された種子を 1 粒ずつ目視により判定した。損傷の判定基準は，種皮の小さな破れを含めて傷が確認されたものを損傷粒とした。繰り出し粒数割合は，繰り出し試験装置の放出口をデジタルカメラ（カシオ計算機株式会社，EX-ZR1100）のハイスピード動画モード（240 fps）で撮影した後，1/2 倍速で再生して 1 粒，2 粒，欠粒の判定を目視で行った（図 IV-6）。

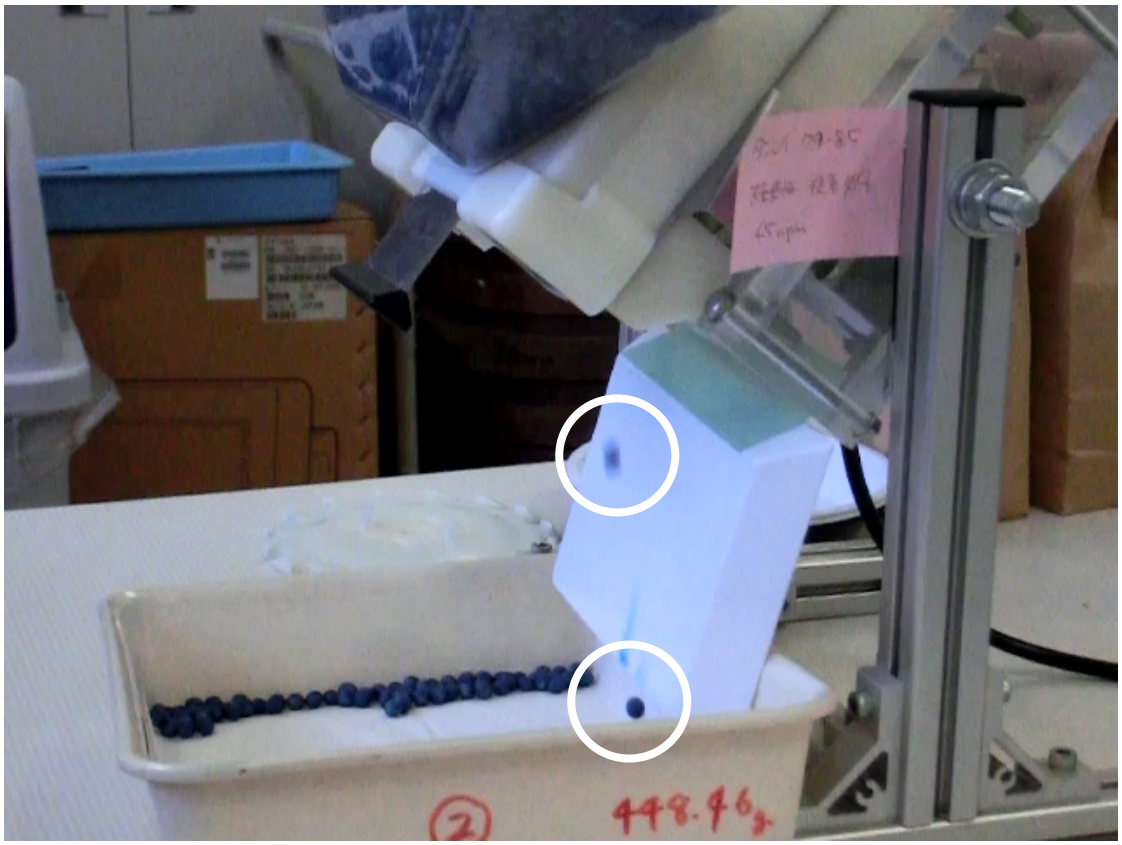


図 IV-6　ハイスピード動画による種子の粒数判定（動画の切り取り画像）

c.　薬剤種子の繰り出し試験

薬剤種子では, b 裸種子の繰り出し試験で種子粒径ごとに適すると判断した播種プレートを用いて，繰り出し速度を 8，12，16，20 回/s に変更して，それぞれのプレートを比較した。その他試験方法，評価方法は裸種子と同様である。

3. 試験結果と考察

(1) 供試種子

表 IV-1 に供試種子を示す。

表 IV-1　供試種子

品種	粒径[1)] (mm)	百粒重 (g)	含水率[2)] (%)	種子形状[3)] 長径 (mm)	短径 (mm)	厚み (mm)	長径/短径	動摩擦係数[4)] 裸種子	薬剤種子
里のほほえみ	7.9～8.5	32.8	13.1	9.0	8.3	7.1	1.08	0.17	0.29
	8.5～9.1	38.1	13.8	9.4	8.8	7.3	1.08	0.15	0.24
エンレイ	7.3～7.9	26.8	14.9	8.4	7.7	6.5	1.09	0.17	0.29
	7.9～8.5	33.5	14.7	9.0	8.3	7.0	1.09	0.16	0.29
	8.5～9.1	39.0	14.3	9.5	8.7	7.3	1.09	0.14	0.25
タンレイ	7.3～7.9	25.3	12.4	8.1	7.6	6.5	1.06	0.18	0.32
	7.9～8.5	29.4	14.0	8.4	8.1	6.7	1.04	0.16	0.30
	8.5～9.1	34.6	14.7	8.9	8.5	7.1	1.04	0.16	0.25
フクユタカ	7.3～7.9	24.9	11.1	7.8	7.6	6.5	1.03	0.13	0.29
	7.9～8.5	30.5	11.0	8.4	8.1	6.9	1.04	0.15	0.29

1) 不二金属工業株式会社，大型丸目ふるい 7.3，7.9，8.5，9.1 で選別。

2) 株式会社ケット科学研究所，PM-830-2 で測定。

3) ノギスで測定，N=100。

4) 鉄板に対する動摩擦係数を株式会社山電，RE2-33005B(XZ)で測定。

同じ粒径で品種間を比較すると，里のほほえみ，エンレイはタンレイ，フクユタカよりサイズが大きい傾向で，百粒重も大きかった。また，長径/短径の比も大きく，楕円形であった。ふるい目は短径で通り抜けることができるので，これら品種は同じ粒径区分であってもやや大きいサイズとなった。種子の含水率は 11.0～14.9 %であった。含水率が 16 %を超えるとカビが発生しやすくなり，10 %を下回ると割れの発生が懸念されるが，供試種子ではこのどちらにも該当しない水分状態であった。

裸種子の動摩擦係数は 0.13～0.18 であり，法貴ら（1975）が報告した大豆の鉄板に対する係数 0.17 とほぼ同じ値であった。品種および粒径間で有意差は認められなかった。薬剤種子の動摩擦係数は 0.24～0.30 であり，同様に品種およ

び粒径間で有意差は認められなかった。裸種子と薬剤種子間の同一品種，同一粒径で比較すると，全ての薬剤種子が有意に高い値となり，薬剤塗抹により種子の動摩擦抵抗が大きくなっていた。しかし，その状態でも種子同士が接着するほどではなく，種子を手で転がしても抵抗を感じない程度であった。また，動摩擦係数は薬剤の有無にかかわらず，品種，粒径，百粒重，種子形状との相関は認められなかった。

(2) 裸種子を用いた種子繰り出し試験

裸種子では，全ての試験条件で損傷粒はほとんど発生せず，里のほほえみ 8.5～9.1 mm の従来プレート ϕ8，エンレイ 7.9～8.5 mm と 8.5～9.1 mm の従来プレート ϕ9 で 1 粒ずつ発生した。その損傷は種皮が 1～2 mm 程度裂けた状態であった。

図 IV-7 に裸種子の粒径別の繰り出し粒数割合を示す。

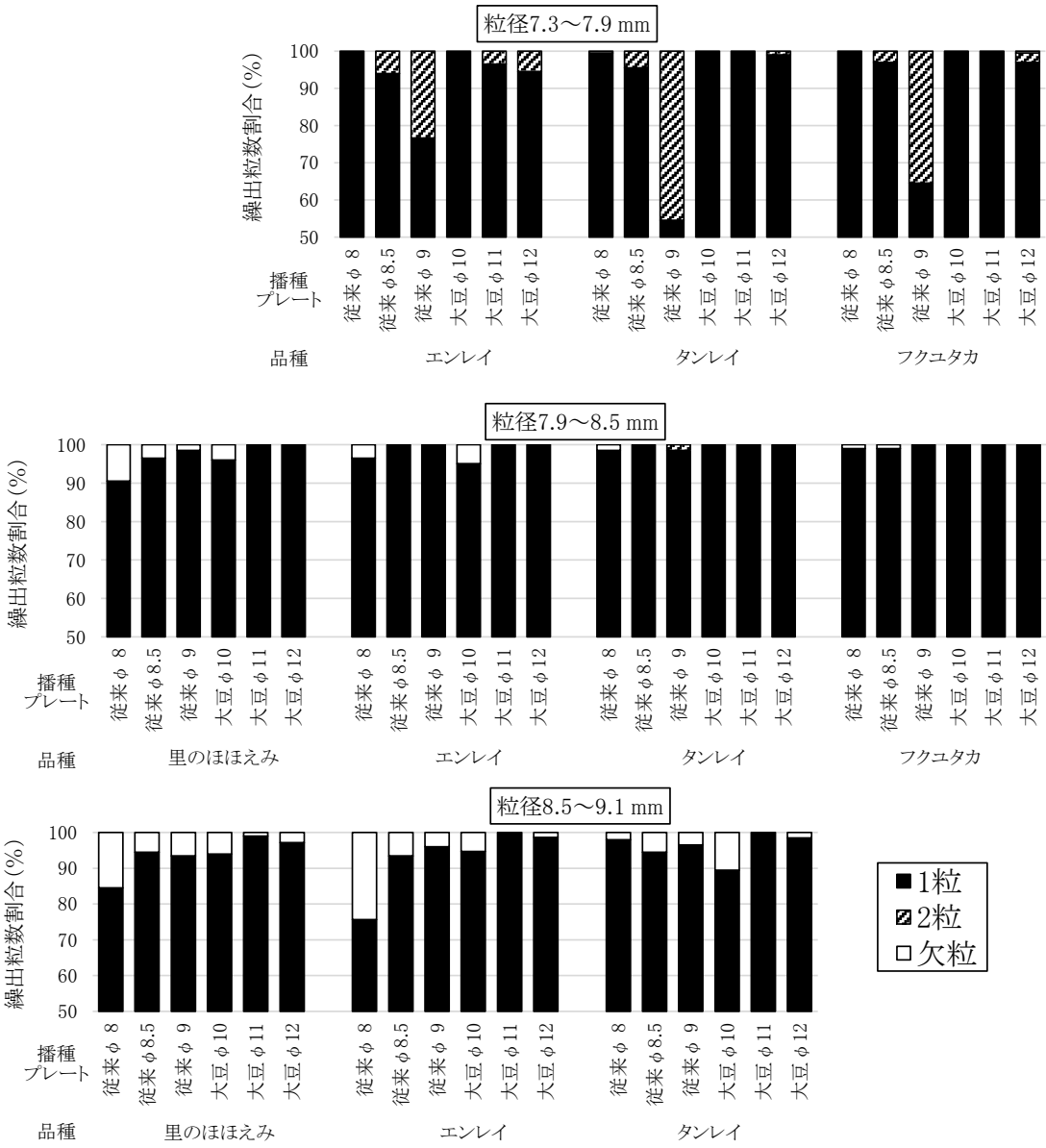


図 IV-7　裸種子の粒径別の繰出粒数割合

7.3～7.9 mm では，従来プレート，大豆プレートともに，欠粒はほとんど発生しなかった。一方，2 粒の割合は従来プレートの切り欠きのサイズが大きくなる

に従い増加し，タンレイの従来プレートϕ9 では 45 %となった。従来プレートの 2 粒割合が高くなった原因は，円周上の切り欠き幅が種子短径の 2 倍程度となることから，2 粒並んで入ったためである。ほ場で実施する播種試験ではこの 2 粒繰り出しの観察は難しかったが，従来プレートでは数多く発生していたことが明らかになった。これに対し，円周上でも切り欠き幅の変わらない大豆プレートでは，高くても 5 %程度であった。この粒径では，従来プレートϕ8，大豆プレートϕ10 が 1 粒の割合が最も高かったことから，次の薬剤種子の試験に適していると判断した。

7.9〜8.5 mm では，切り欠きのサイズが小さい従来プレートϕ8，大豆プレートϕ10 で欠粒が発生し，その割合は最も高かった里のほほえみの従来プレートϕ8 で 10 %程度であった。欠粒の原因は，切り欠きより種子のサイズが大きくなり，切り欠き内に種子が入らなかったためと推測される。長径の大きい品種では，大豆プレートでも，ϕ10 で 4 %の欠粒が発生した。このことから，大豆プレートでは長径を基準として，その 20 %程度大きな切り欠きサイズを用いることで，欠粒を防げると推測された。この粒径では，従来プレートϕ9，大豆プレートϕ11 または 12 が適していると判断した。

8.5〜9.1 mm では，従来プレート，大豆プレートともに欠粒の割合が高くなった。これは，今回準備できたプレートの厚みが 8.8 mm であったために，粒径の大きな種子では分離に成功しても，回転中に切り欠きからの脱落が発生したと考えられた。この粒径では，従来プレートϕ9，大豆プレートϕ11 が適していると判断した。

これらのことから，裸種子の場合，損傷は問題とならないが，粒径，特に長径を考慮したプレート選択を行わないと，欠粒が発生することが明らかとなった。また，従来プレートの場合は，大き過ぎるプレートを使用すると，高頻度で 2 粒の繰り出しが発生することが分かった。

(3) 薬剤種子を用いた種子繰り出し試験

a. 薬剤種子の粒径別の損傷粒の割合

図 IV-8 に薬剤種子の粒径別の損傷粒の割合を示す。

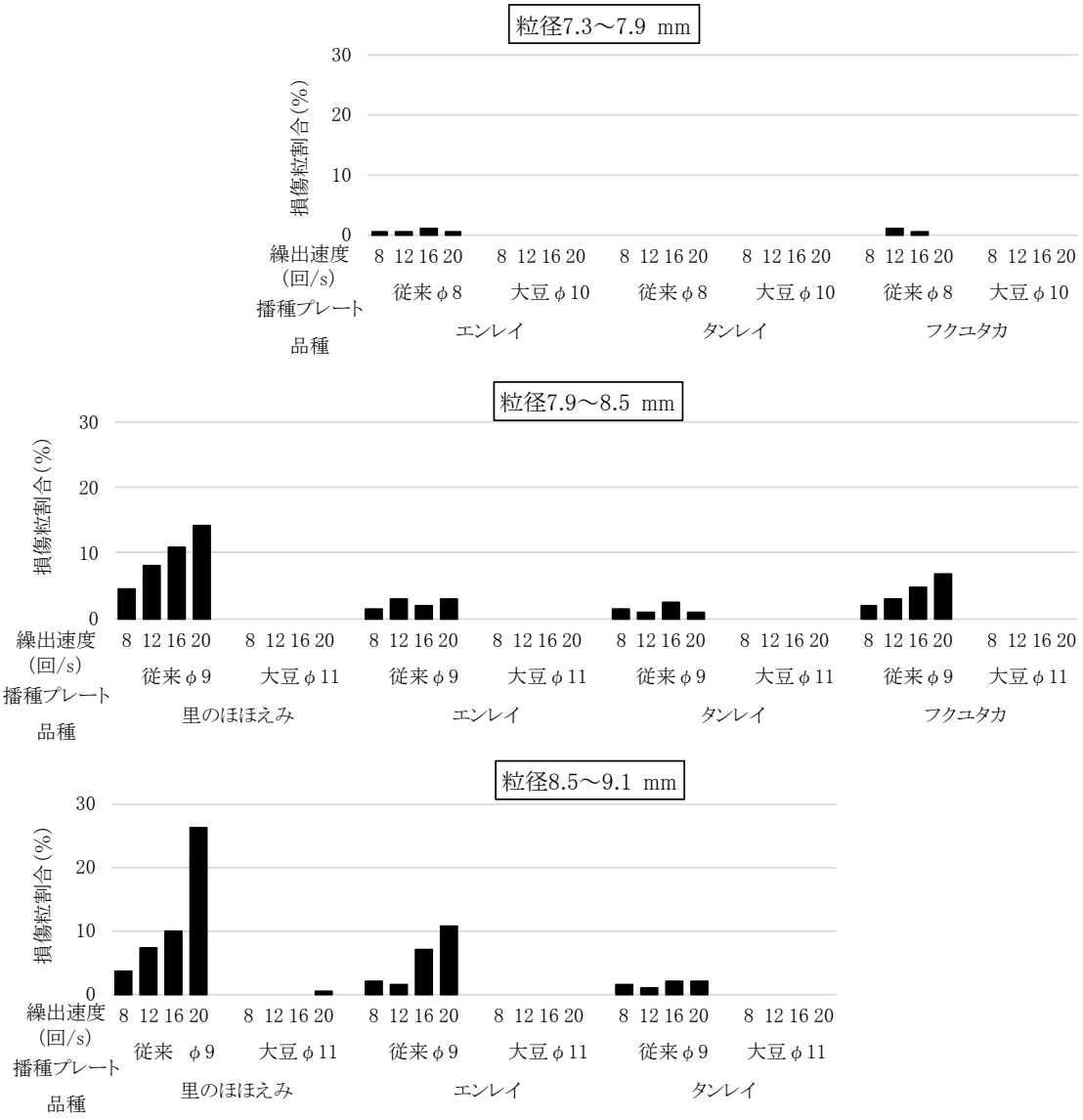


図 IV-8　薬剤塗抹種子の粒径別の損傷粒割合

従来プレートではほとんどの場合に損傷粒（図 IV-9）が発生し，粒径が大きいほどその割合は高くなった。ただし，タンレイと同じような形状のフクユタカの割合が高くなった理由については，種子を観察してもよく分からなかった。また，繰り出し速度が高くなるほど損傷が増加した。

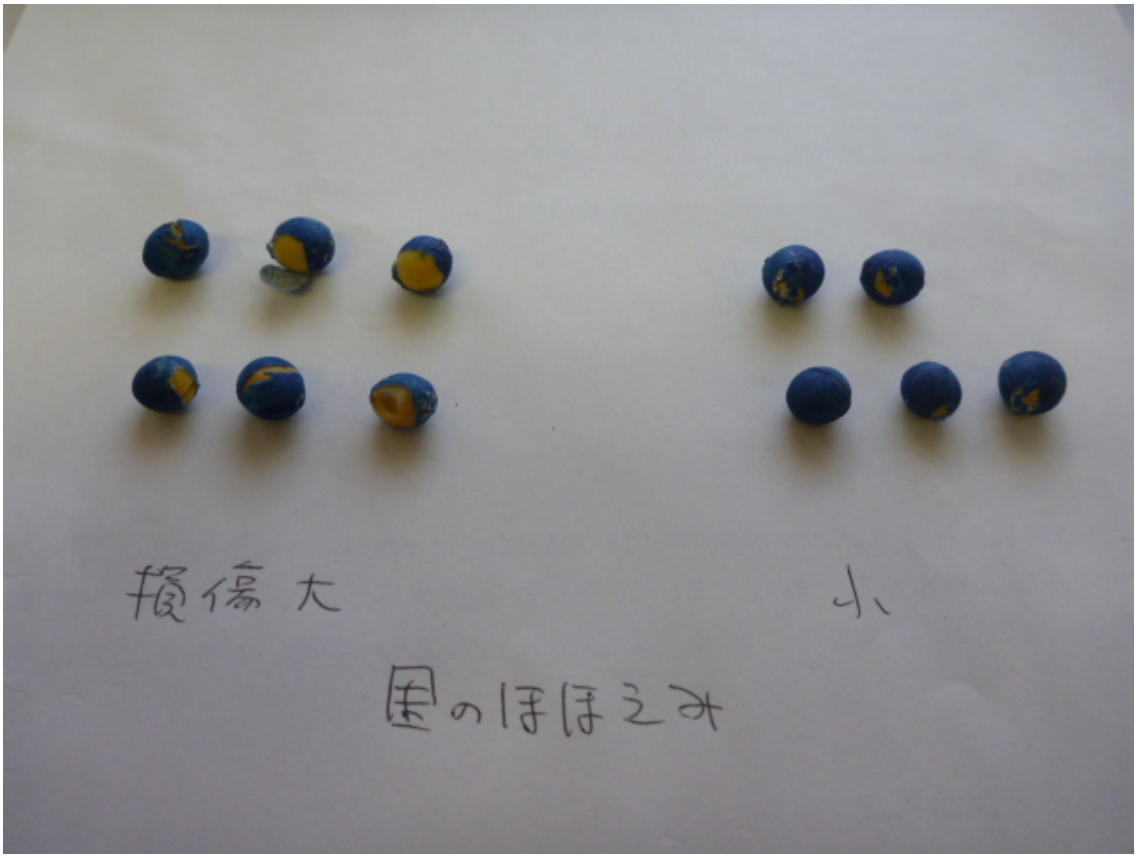


図 IV-9　損傷粒

大豆種子，特に種皮の損傷は，種皮が吸水速度の調節機能を持つ（小泉ら，2007）ことから，その損傷箇所から水分の急激な浸入を招き，種子の細胞組織の崩壊，出芽率の低下につながる。そのため，損傷粒の割合 1 %未満を目標とした場合，従来プレートを使用して薬剤種子を播種することは困難といえる。

一方，大豆プレートでは，里のほほえみの 20 回/s の条件で 1 粒に対して損傷が発生しただけであったので，このプレートにより薬剤種子の損傷問題は解決できたといえる。

b. 薬剤種子の粒径別の繰り出し粒数割合

図 IV-10 に薬剤種子の粒径別の繰り出し粒数割合を示す。

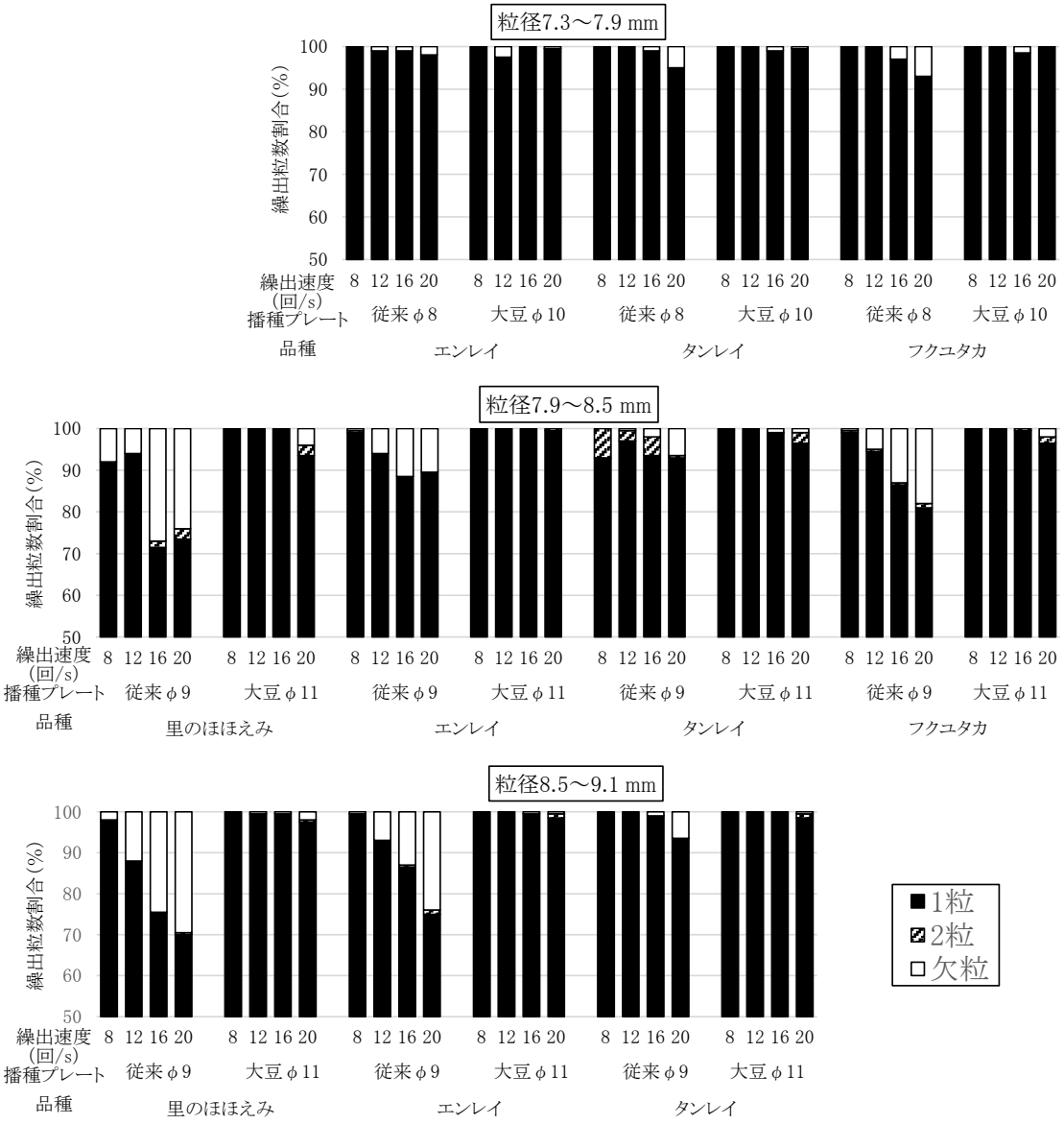


図 IV-10　薬剤塗抹種子の粒径別の繰出粒数割合

従来プレートでは損傷割合と同様の傾向で，粒径が大きいほど，繰り出し速度が高いほど，欠粒が多く発生した。主な原因は，播種プレートから放出プレートへ種子の受け渡しの失敗であると考えられた。大豆プレートでも欠粒は発生したが，いずれも数%であり，高い精度で種子の繰り出しができていた。

粒径 7.9 mm 以上の種子では，両プレートで 2 粒が発生した。これは，種子繰り出し機構のモータ制御に起因すると考えられる。播種プレートの回転角度が

目標角度より遅れた場合に，それを修正するために一時的に回転速度が高くなることで，繰り出しの間隔が短くなり，2 粒の繰り出しに見えたと考えられる。

(4) 播種プレート上の種子の動き

薬剤種子と従来プレートの組み合わせで損傷や欠粒が多く発生する原因を考察するために，種子ホッパを取り外し，播種プレートが種子を分離・搬送している状況をデジタルカメラのハイスピード動画モードで撮影して観察した（図IV-11)。観察によると，分離された種子は播種プレートの切り欠き内で転がり，外枠内壁に沿いながら，仕切り板が途切れる受け渡し部分を経て，放出プレートへ搬送されていた。

図 IV-11　播種プレート上の種子の動きの確認（動画の切り取り画像）

損傷の多くは種皮が裂けた状態であったため，この転がりが阻害されて種子と外枠内壁が擦れることで発生することが考えられた。観察を続けると，種子が外枠内壁と播種プレート切り欠きの種子に作用する面に挟まり，種子繰り出し機構の回転が止まる現象が確認された。その際に挟まった種子は 4 粒であり，いずれも種皮が引っ張られて裂けた損傷を受けていた。その損傷状態は本試験の薬剤種子の状態と酷似していた。また，種子繰り出し機構を分解すると，外枠内壁の薬剤種子が接する部分には薬剤が薄く付着していた。

そこで，鉄板の摺動面に薬剤を薄く塗布して，この状態に近づけて，薬剤種子の動摩擦係数を測定したところ，0.45 程度に上昇した。塗布しない鉄板と薬剤種子の動摩擦係数に比べて，1.5 倍になっており，有意に滑りにくくなっていた。なお，今回の試験中は種子繰り出し機構の回転が止まることはなかった。これは，付着した薬剤を毎回ウエスで丁寧に拭き取っていたため，種子が損傷はしても挟まるほどの抵抗にはならなかったと考えられる。

欠粒の原因も付着した薬剤であると考えられた。同様の観察の結果，従来プレートでは種子が 1 時から 12 時の位置でプレート上面方向に浮き上がり，飛び出す現象があった。12 時の位置では種子は重力により，切り欠き内の V 字頂部方向に移動するが，この移動が従来プレートでは 1 時過ぎから発生する。その際，種子は，回転軸が不安定で，かつ切り欠き内では外枠内壁方向に押す力が働くので，切り欠き内を動き回っていた。

一方，大豆プレートでは，種子の回転軸が常に播種プレートの中心方向を向くので，このような不安定な運動は観察されなかった。また，遠心力は 1.1×10^{-3} N に過ぎないので，プレートの 3 時の位置を過ぎた種子は重力により U 字の底方向に移動し，受け渡し部へ安定して搬送されていた。

従来プレートでは，裸種子でもこの不安定な運動は観察されたが，飛び出す現象は見られなかった。薬剤種子では，仕切り板に付着した薬剤によりできた板表面のランダムな凹凸によって，種子が浮き上がったと考えられた。この浮き上がりはほとんどの種子に発生していたと考えられるが，運動状態にある種子の重心が切り欠きの外周突起部の厚みを超えなければ飛び出すことはない。この重心の位置は種子が大きいほど高くなり，浮き上がりもプレートの回転数（種子の速度）増加に比例して高くなるため，欠粒も増加すると考えられる。今回の結果も同様の傾向であった。

橘ら（2014b）は，ダブルプレート式種子繰り出し機構と従来プレートを使用して，飼料用トウモロコシ種子を繰り出し速度 12 回/s とした場合，1 粒繰り出しは 90 %以上と報告している。今回試作した大豆プレートでは，同じ速度なら 100 %近く，速度を 20 回/s にしても 95 %以上で 1 粒の繰り出しに成功しており，飼料用トウモロコシより高精度な繰り出しが可能となった。

4. まとめ

基礎試験機と従来プレートで薬剤種子を繰り出した場合に問題となる種子の損傷について，従来プレートの種子が入る切り欠きの形状を変更した大豆プレートを製作し，裸種子と薬剤種子の繰り出し試験を行い，改善効果を確認した。

試験は 4 品種，粒径 3 種類の種子で行い，種子粒径により選択した従来プレートでは，裸種子で欠粒は 5 %程度で，損傷粒はほとんど発生しなかった。しかし，薬剤種子では欠粒は最大 3 割に達し，損傷粒は 25 %を超える場合があった。大豆プレートでは，薬剤種子で欠粒は数%程度で，損傷粒は 1 品種で 1 %未満発生したのみであった。播種プレートの V 字状の切り欠きにより生じていた種子の法線方向の力を，切り欠き形状を U 字状に変更することで取り除き，損傷粒の問題を解決できることが明らかとなった。

V　試作機の播種性能

1. はじめに

第 III 章では，ディスク式中耕培土機と不耕起高速播種機を組み合わせた 1 条仕様の基礎試験機を製作し，播種試験を行った結果，高水分の普通畑では走行輪のスリップの影響で 1.5 m/s にとどまったが，低水分では 2.0 m/s と従来機に比べて高速な播種が可能であることを述べた。第IV章では，基礎試験機と従来プレートを組み合わせて，近年普及が進む薬剤を塗抹した種子を播種した場合に問題となる損傷粒について，種子の入る切り欠き形状を変更した大豆プレートを製作し，解決したことを述べた。

本章では，基礎試験機で畝立て播種が可能であったことから，研究開発の社会実装を見据え，民間企業と共同で基礎試験機から播種部の構成を変更した 2 条仕様の試作機を製作した。その試作機の播種精度を明らかにすることを目的として，作業速度と播種精度の関係を検証する播種試験について述べる。また，試作機の湿潤土壌への適応性を検証することを目的として，極端な湿潤土壌条件において行った試作機と URS 機を比較する播種試験について述べる。

2. 試作機の諸元

図 V-1 に試作機を示す。試作機は日農工 3 点オートヒッチ S 規格のヒッチを介してトラクタへ直装する作業機で，ディスク式の畝立て部と 2 条の播種部は播種機ヒッチを介して連結される。

畝立て部は，1 条当たり相対する 2 枚の湾曲したディスクが前後 1 対，合計 4 枚のディスクを中心に構成される。後列ディスクのみに円周上に切り欠きがあり，かき寄せる土壌の砕土率が向上する作用を有する（後藤ら，2012a)。畝高さの調節は前後列ディスク角度(進行方向を 0 ° として左右に 5～35 ° ,5 段階)，後列ディスク取付間隔（鉛直方向の回動軸中心間 35～48 cm，5 段階)，ゲージ輪の高さ位置（1.5 cm ごとに 14 段階）の変更で行うことができる。

播種部は作溝ディスク，大豆用播種プレートを組み込んだダブルプレート式種子繰り出し機構 (以下, 種子繰り出し機構)，鎮圧輪, 駆動輪等で構成される。播種部は駆動輪が接地，回転し，駆動軸，ギヤを介して種子繰り出し機構に動力が伝達されることで動作する。播種部では，2 枚の作溝ディスクがくさび状に配置され, 畝立て部で形成された畝の上面に播種溝を形成する。種子繰り出し機構は種子を進行方向，2 枚の作溝ディスクの間（播種溝）に向けて，種子導管などを介さずに播種溝の中央に落下させる。種子を種子導管などで誘導した場合，導管内に種子が接触することで播種間隔が乱れるため，これを排し，種子を自由落下させることとした。播種後の播種溝は，扁平タイヤの鎮圧輪により鎮圧・閉塞される。鎮圧輪は，鎮圧面のゴムを柔軟にして，土壌の付着を低減した。日本で普及するロータリシーダに代表される播種機では，覆土板などで播種溝に土をかぶせるが，試作機ではこれらに比べて高速で，幅の小さい播種溝を作るため，溝は鎮圧のみで閉塞し，覆土機構が不要となった。このため本機では覆土機構を排し，作溝ディスクと鎮圧輪のみが土壌と接する構造として，湿潤土壌や夾雑物の付着を低減することが可能となった。

播種深さは，調節ボルト（1～6 cm，無段階）により鎮圧輪に対する作溝ディスクの相対深さを変化させ，調節する。播種間隔は播種部駆動輪のスプロケットを交換することで調節（14～23.5 cm，6 段階）する。

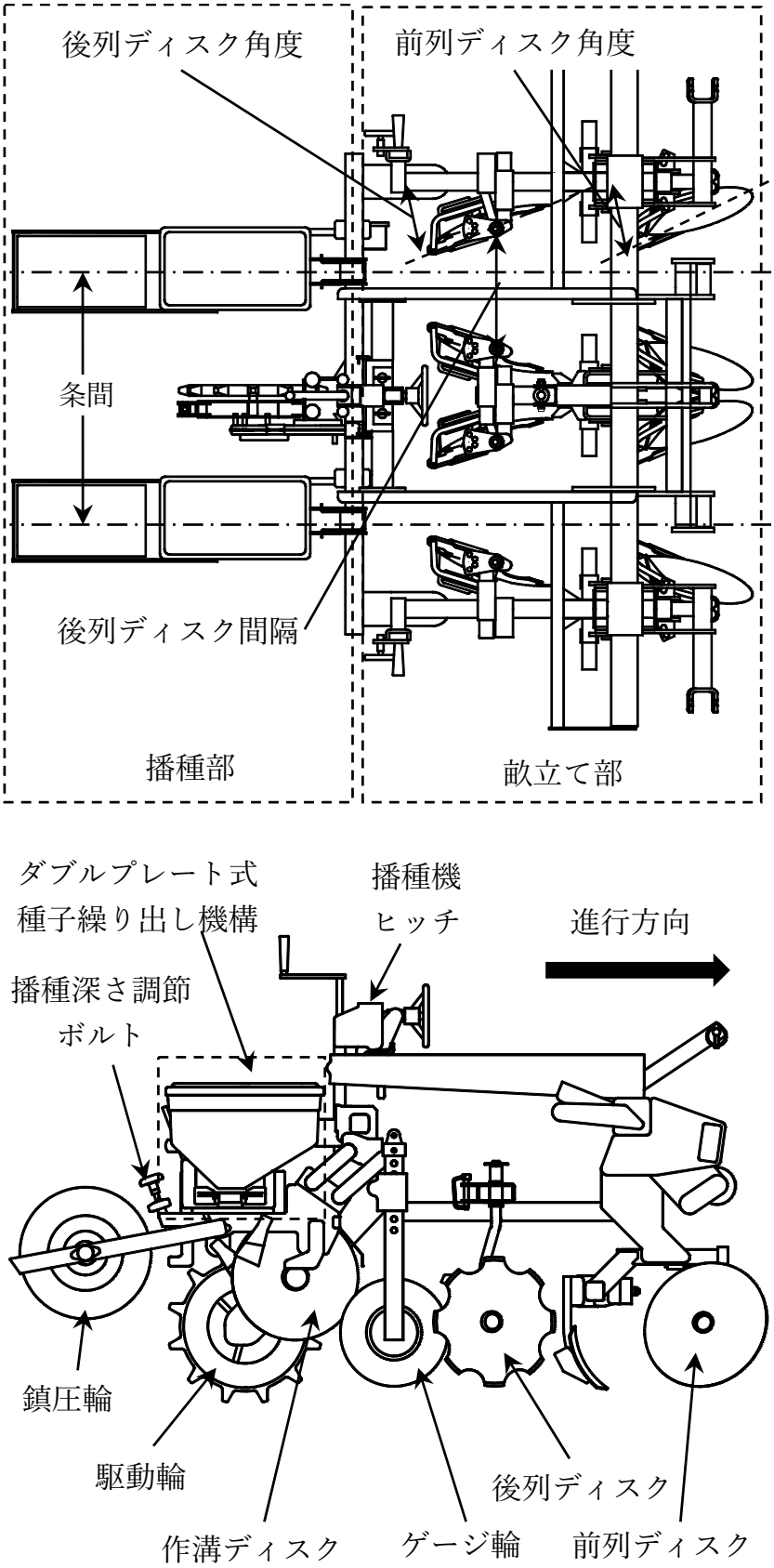


図 V-1　試作機の平面図，側面図

3. 土壌の物理性および播種試験における調査項目と測定方法

(1) 土壌の物理性

土壌の物理性測定は，以下の項目について，第II章の方法で測定した。土粒子の粒径組成，含水比，液性指数，円錐貫入抵抗はほ場内5カ所で，ほ場の砕土率は試験区当たり5カ所測定した。

(2) 播種試験

播種試験は，以下の項目について，第II章の方法で測定した。作業速度は3反復，畝高さと畝上面幅は金尺を用いて試験区当たり 5 カ所，畝頂部の砕土率は試験区当たり 5 カ所，播種深さと播種間隔はいずれも 3 反復，出芽率は各試験区の 10 m 区間を 3 反復調査して求めた。

4.　試作機の作業速度が播種精度に及ぼす影響

(1) 供試ほ場

革新工学センター附属農場の畑地ほ場（53 m×63 m）において，ロータリ耕うん後に播種試験を行った。

(2) 試験方法および試作機の各部設定

a.　試験方法

試作機を機関出力 36 kW のトラクタに装着し，速度を 5 段階（1.1，1.7，2.2，2.8，3.3 m/s；4，6，8，10，12 km/h）に設定して，大豆の畝立て播種（52 m×6 工程，反復なし）を行い（図 V-2），その際の作業速度，播種深さ，播種間隔，畝高さ，畝上面幅および畝頂部の砕土率を測定した。また，播種 26 日後に出芽率を調査した。

供試種子は，品種がタンレイ（粒径 7.9 mm 以上，百粒重 31.3 g）の薬剤種子を用いた。

図 V-2　試作機を用いた畝立て播種試験

b. 試作機の各部設定

畝立て部の設定は，条間を 75 cm とし，畝高さは URS 機の作業目標と同じ 10～15 cm となるようにディスク角度を調整した。前列ディスク角度は 20 ° に固定し，後列ディスク角度を設定速度 1.1，1.7 m/s では 20 °，2.2 m/s では畝高さが高くなり過ぎたことから 1 段階鋭角である 12.5 ° とし，2.8，3.3 m/s では土が散乱し，逆に畝高さが低くなったために 20 ° に戻した。後列ディスク取付間隔は 40 cm とした。

播種部の設定は，播種間隔を 16.5 cm とし，播種深さは，3～4 cm を目標とした。播種プレートは，試作した大豆プレート ϕ11（切り欠きの内接円の直径 11 mm）とした。

(3) 試験結果と考察

a. ほ場状態

表 V-1 にほ場状態を示す。土壌水分（液性指数）は，塑性限界を下回っており，土壌は乾燥状態であった。本試験ではロータリ耕うんを行って 1 日後であったため，深さ 0〜15 cm の円錐貫入抵抗の平均値は 320 kPa であり，土壌が膨軟な状態であった。砕土率は 93 %で土塊が小さく均一な状態で，大豆の播種に適するとされる 70 %以上（中村，2015）に達していた。

表 V-1　作業速度性能試験のほ場状態

試験場所	ほ場履歴	土性 [1)]	土壌の物理性			
			含水比（%）	液性指数	円錐貫入抵抗 [2)] (kPa)	砕土率 [3)] （%）
埼玉県 鴻巣市	ロータリ耕うん後の普通畑	軽埴土	33.6	-0.44	320	93

[1)] 国際土壌学会法による分類。

[2)] 頂角 30 ° ・底面積 2 cm^2 の円錐で測定，深さ 0~15 cm の平均値。

[3)] 直径 2 cm 以下の土塊の占める質量割合。

b. 作業速度と畝形状

表 V-2 に作業速度，畝形状，畝頂部の砕土率の結果を示す。

表 V-2　作業速度と畝形状，畝頂部の砕土率

設定速度 (m/s)	作業速度 (m/s)	畝高さ[1)] (cm)	畝上面幅[1)] (cm)	畝頂部の砕土率[2)] (%)
1.1	1.11	14.3±0.4	23.9±1.0	91
1.7	1.64	13.7±0.4	24.2±0.9	90
2.2	2.31	13.1±0.4	24.8±1.2	90
2.8	2.65	12.3±0.2	24.4±1.1	89
3.3	3.15	10.8±0.3	23.7±0.7	93

[1)]±は標準偏差を表す。

[2)]畝頂部から 5cm の範囲の採取土壌の 2cm 以下の土塊の占める質量割合。

作業速度は設定速度に近い値となり，2.8，3.3 m/s の試験条件でも進行低下率は 5 %程度にとどまった。土壌が乾燥状態であったので，試作機のけん引抵抗が小さく，トラクタ走行輪のスリップも小さくなったと推測される。

畝高さは作業目標の 10～15 cm を確保できた。ただし，2.8，3.3 m/s の試験条件では，ディスクによる土寄せが強く働き過ぎ，土壌が散乱し，後列ディスクの角度を 20 ° より鈍角に調節しても，これ以上に畝を高くすることができなかった。畝上面幅は，作業速度にかかわらず，ほぼ同じ値となった。畝頂部の砕土率は 90 %程度となり，作業前のほ場の砕土率と比較して，わずかに低下していた。このことは，第Ⅲ章のディスク式中耕培土機による畝立て前後の砕土率変化と同じ傾向であった。

c.　作業速度と播種深さ

図 V-3 に作業速度と播種深さを示す。

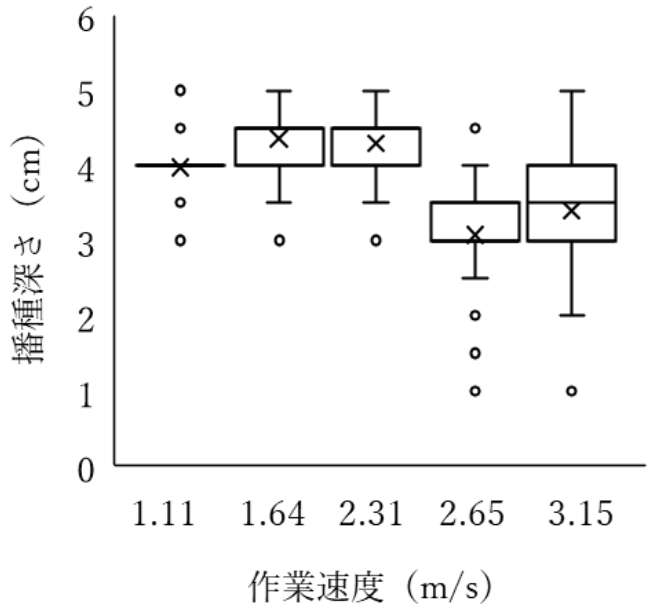


図 V-3　作業速度と播種深さ

作業速度 1.11 m/s では，外れ値を除いて全て 4 cm となり，高い精度で播種が可能であった。1.64 と 2.31 m/s では，外れ値を除くと 3.5～5 cm に収まり，うち中央値を含む 50 %は 4～4.5 cm の範囲内であり，中央値と第三四分位数は同じ 4.5 cm であった。一方，2.65 と 3.15 m/s では 25 %が目標の 3 cm の深さを維持できなかった。これは作業速度が高くなると播種機が浮き上がる現象に起因すると考えられるが，2 cm を下回るほど浅い場所は 4 点のみであった。また，3.15 m/s では分布範囲が最も大きくなり，他の速度と比較して 2 倍の 3 cm となった。この速度では土壌の散乱に加えて，播種機自体の上下方向の振動が大きくなることが原因と考えられた。

d. 作業速度と播種間隔

図 V-4 に作業速度と播種間隔を示す。

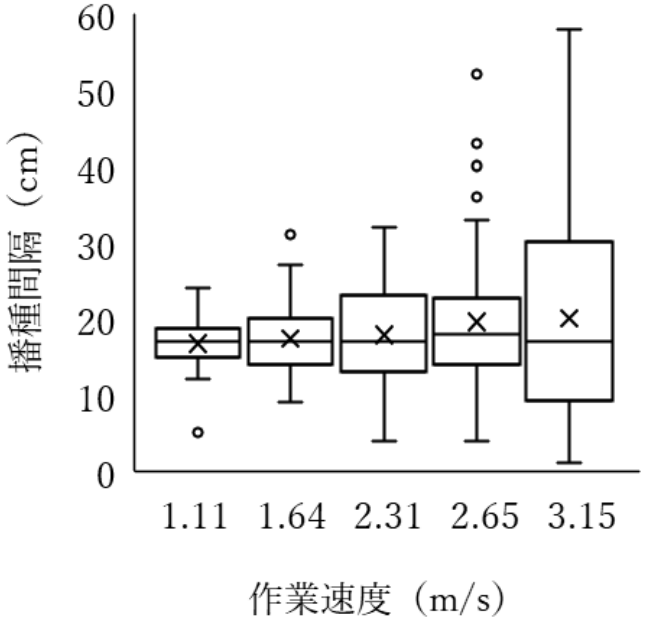


図 V-4　作業速度と播種間隔

全ての作業速度で中央値が設定の 16.5 cm に近い，17～18 cm となった。作業速度 1.11 m/s では，外れ値を除いて全て 12～24 cm の範囲であり，うち中央値を含む 50 %は 15～18.75 cm と 4 cm 以内の分布に収まった。この中央値を含む 50 %範囲の分布は速度 2.65 m/s までは 10 cm 以内と高い精度を保ったが，3.15 m/s では 20 cm を超えた。この速度では，播種溝底部での種子転動に加え，播種溝が形成，閉塞する際の土壌の流れによって種子が移動することが原因と考えられた。

日本で普及する傾斜目皿式播種機の研究例（下名迫ら，1989）では，目皿を改良し，播種精度を向上させた播種機を用い，作業速度 0.3～1.2 m/s で播種した場合に，播種間隔の変動係数は 15～25 %程度との報告がある。試作機の播種間隔の変動係数は，作業速度 1.11 m/s で 21 %，1.64 m/s で 26 %，2.31 m/s では 38 %であった。このことから，試作機の播種間隔の分布は作業速度 1.64 m/s までは一般的な播種機と同等以下に収まると考えられた。

図 V-5 に作業速度と出芽の様子を示す。作業速度増加に伴って，見た目にも間隔が不均一になっていることが分かる。

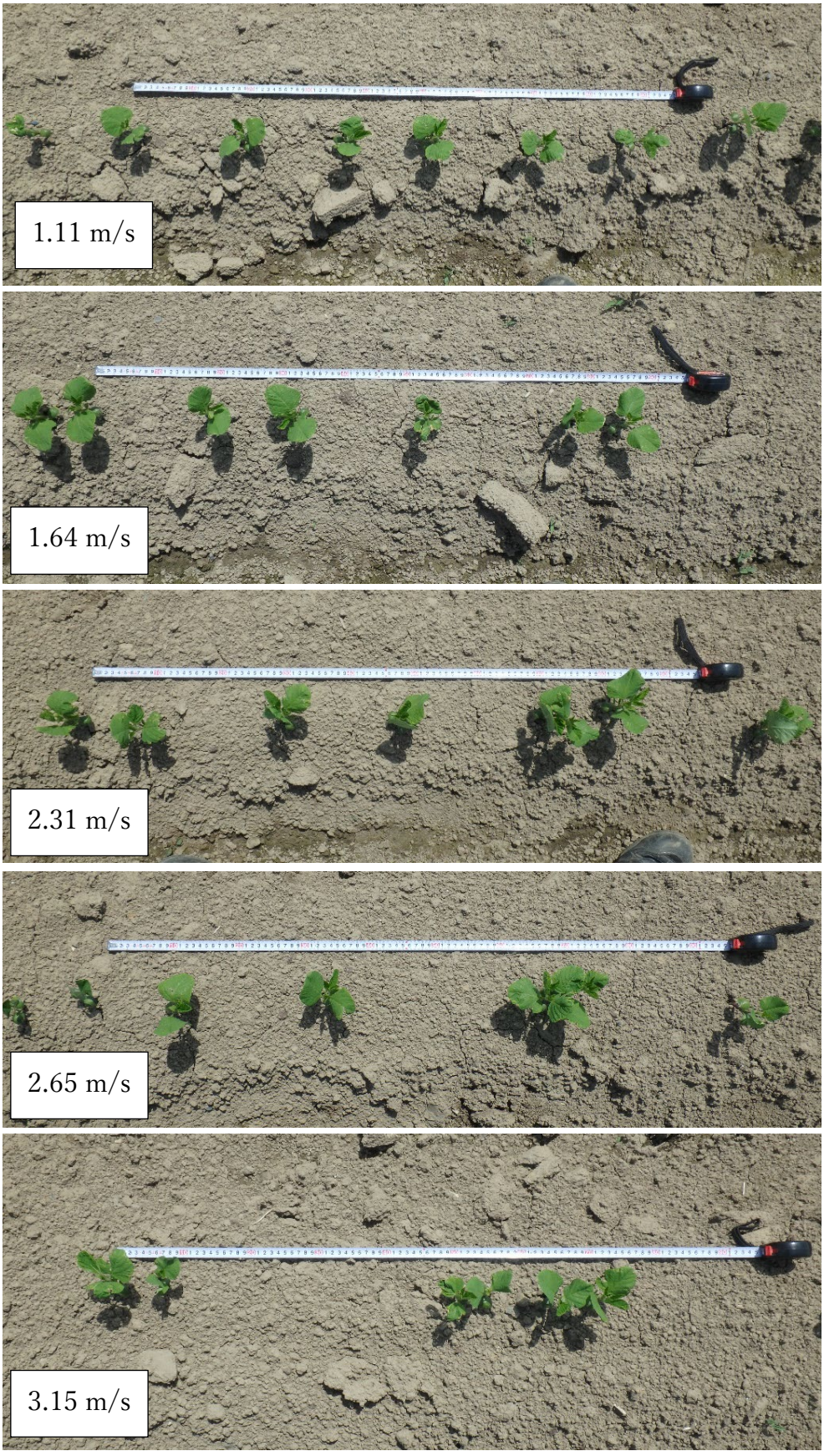


図 V-5　作業速度と出芽の様子

e. 作業速度と出芽率

図 V-6 に作業速度と出芽率を示す。全ての試験条件で出芽率が 90 %を超えており，生産現場の目安と考えられる 80 %を確保できていた。作業速度 2.65, 3.15 m/s では，他に比べて，3〜5 %程度出芽率が低下したが，作物列も整っていたことから，高速での播種に伴う種子の畝外への散逸はほとんどなかったと考えられた。播種深さが 2 cm を下回ると，覆土量が少なくなり，種子が露出しやすくなるため，鳥害や乾燥害が発生しやすくなる。2.65, 3.15 m/s 条件下では数%が 2 cm よりも浅かったので，これらの影響を受けた可能性がある。

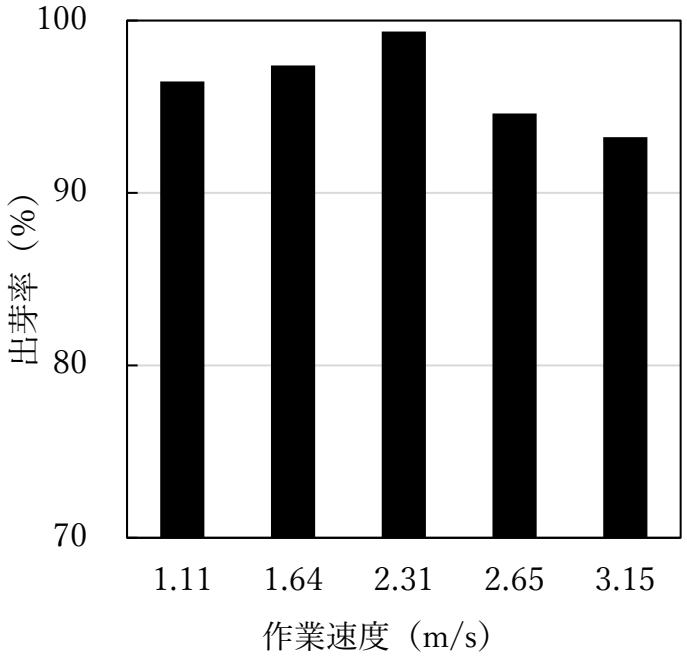


図 V-6　作業速度と出芽率

f.　作業速度の上限

以上より，試作機では URS 機の 5 倍程度の設定速度 3.3 m/s でも，10 cm の高さなら畝立て可能で，90 %以上の出芽率を達成できた。ただし，この速度では播種間隔が最大で設定の 4 倍も開く場合があり，欠粒による減収が予想される（高橋ら，2016）ため，収量などの検証を行う必要がある。播種精度，出芽率および欠株を問題視する生産現場の状況から判断すると，試作機の作業速度の上限は 1.64 m/s と考えられた。

なお，本試験では砕土率が高く，乾燥したほ場状態であったので，湿潤条件ではこれほどの速度は望めない。さらに，出芽までに適度な降雨があり，湿害や土壌表面のクラストの発生もなかったことから，全ての試験条件で高い出芽率となった。一般にほ場の砕土率が低い場合や乾湿害が発生する場合には，出芽のばらつき，出芽率の低下が懸念される。

5. 湿潤土壌条件下における試作機と URS 機の比較

(1) 供試ほ場

革新工学センター附属農場の水田転換畑のほ場（52 m×40 m）において，ロータリ耕うん後に播種試験を行った。

(2) 供試機

供試機はⅤ章２．の試作機と２条仕様の URS 機（アップカットロータリ：松山株式会社，APU-1610-0SU，目皿式シーダ：松山株式会社，MFR2CE-17，図 V-7）とした。また，これ以降の試験の播種粒数は生産現場で一般的に用いられている２粒とし，試作機用には新たに製作した。

図 V-7　URS 機

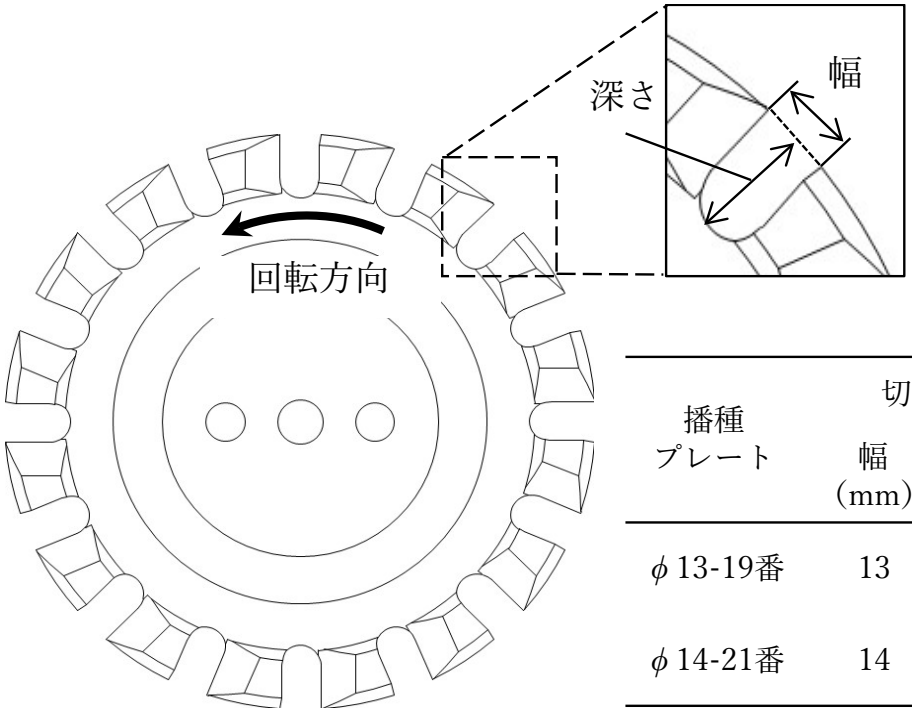
(3) 供試機の各部設定および試験方法

a. 試作機の各部設定

畝立て部の設定は，条間を 75 cm とし，畝高さが 10～15 cm となるように，前列ディスク角度を 20 °，後列ディスク角度を 20 ° とした。後列ディスク取付間隔は 40 cm とした。

播種部の設定は，繰り出し粒数を 2 粒とした。Ⅴ章 4.の試験では，播種精度を詳細に調査するために 1 回の繰り出し粒数を 1 粒としたが，本試験では普通栽培（条間 60～85 cm）で一般的な 2 粒とした。播種プレートは，2 粒繰り出し用に試作した大豆プレート（図 V-8）の ϕ13-19 とした。ここで，ϕ13-19 のうち ϕ13 は種子の入る U 字の切り欠きの幅，19 は U 字の深さを表す。

大豆プレートは外周上に種子が入る切り欠きが 16 個あり，切り欠きは長穴で外周方向に開放され，種子を 2 粒同時に捕捉する。また，播種間隔は 20 cm-2 粒（以下，-2 粒は 2 粒繰り出しを表す。）とし，播種深さは，3～4 cm を目標とした。播種間隔は試験場所（埼玉県）の大豆栽培基準の播種粒数 10～15 粒/m^{2}に準じて設定した。



播種プレート	切り欠き 幅 (mm)	切り欠き 深さ (mm)
ϕ13-19番	13	19
ϕ14-21番	14	21

図 V-8　試作した 2 粒繰り出し用の大豆プレート

b. URS 機の各部設定

畝立て部の設定は，条間を 75 cm とし，畝高さが 10〜15 cm となるようにゲージ輪とアップカットロータリのリアカバーの可動範囲を調整した。

播種部の設定は，繰り出し粒数を 2 粒とした。播種間隔は 19 cm-2 粒とし，播種深さは，3〜4 cm を目標とした。播種間隔は試作機の設定に最も近い設定値である。目皿は，大豆用目皿（松山株式会社，B-3）とした。

c. 試験方法

試作機は機関出力 40 kW のトラクタに装着し，作業速度の設定は 1.5 m/s とした。URS 機は機関出力 36 kW のトラクタに装着し，作業速度の設定は 0.6 m/s とした。両機で大豆の畝立て播種（52 m×6 工程，反復なし）を行い，作業速度，播種深さ，播種間隔，畝高さ，畝上面幅および畝頂部の砕土率を II 章の方法で測定した。播種間隔は 2 粒繰り出しとしたため，2 粒で 1 組として種子間中央を基準点として，この間隔を測定した。なお，欠粒などで 2 粒を発見できなかった場合は，1 粒の位置を基準点とした。また，播種 17 日後に出芽率を II 章の方法で調査した。

播種作業の設定は，供試種子を品種がタチナガハ（粒径 7.9 mm 以上，百粒重 40.2 g）の薬剤種子とし，目標の播種量を 5.4 kg/10a とした。なお，肥料は播種試験の前に全層施肥で 2 kg-N 施用し，ロータリで混和させた。

(4) 試験結果と考察

a. ほ場状態

表 V-3 にほ場状態を示す。

表 V-3　湿潤土壌条件下における試作機と URS 機の比較試験のほ場状態

試験場所	ほ場履歴	土性[1]	土壌の物理性			
			含水比（%）	液性指数	円錐貫入抵抗[2]（kPa）	砕土率[3]（%）
埼玉県鴻巣市	ロータリ耕うん後の水田転換畑	埴壌土	91.1	1.11	350	79

[1] 国際土壌学会法による分類。

[2] 頂角 30°・底面積 2cm²の円錐で測定，深さ 0~15cm の平均値。

[3] 2cm 以下の土塊の占める質量割合。

土壌水分（液性指数）は，試験の 2 日前に 45 mm の降雨があったため，液性限界を上回っており，土壌は極度な湿潤状態であった。生産現場では播種作業を行わないような土壌状態であったが，湿潤土壌条件下における播種性能を確認するため，あえて試験を行った。

深さ 0～15 cm の円錐貫入抵抗の平均値は 350 kPa であり，膨軟な状態であった。深さ 0～20 cm の平均値で 200 kPa 程度を下回る場合にけん引作業が困難となるとの報告（八木，1971）があるが，これは上回っていた。降雨の前に行った耕うん作業により播種作業前の砕土率は 79 %で，大豆の播種に適した 70 %以上に達していた。

b. 試作機と URS 機の比較試験

表 V-4 に試験結果を示す。作業速度は試作機が URS 機の 2.5 倍の速度を維持していた。両機ともに湿潤土壌の影響で進行低下率が 2 割程度となり，作業速度が設定速度に対して低下したが，作業速度（3 反復測定）の変動係数は試作機で 1.3 %，URS 機で 1.5 %と小さく，トラクタの走行は安定していた。そのため，トラクタの作業速度の低下が両機の播種に及ぼす影響は小さかったと考えられる。

表 V-4　湿潤土壌条件下における試作機と URS 機の比較試験結果

供試機	設定速度 (m/s)	作業速度 (m/s)	畝高さ[1] (cm)	畝上面幅[1] (cm)	畝頂部の砕土率[2] (%)	播種深さ[1] (cm)	播種間隔[2] (cm)	出芽率[3] (%)
試作機	1.5	1.23	13.0±1.1	29.9±1.9	−	5.0±0.7	−	93
URS機	0.6	0.42	13.8±1.6	30.9±3.4	−	4.4±0.5	−	16

[1] ±は標準偏差を表す。

[2] 土壌が極端に湿潤状態であったため欠測。

[3] 播種後 17 日目に調査。

畝高さは両機で 13 cm 前後, 畝上面幅は 30 cm 前後とほとんど差がなかった。形成された畝（図 V-9）の表面は，試作機では畝の上面は鎮圧輪の通過した部分のみが平坦で，側面では土塊の凹凸が多く発生していた。

ディスクを用いて水田転換畑の湿潤土壌条件で畝立て作業を行う場合に，砕土率が 1 割程度低下することは第Ⅲ章の結果と同様であり，本試験ではさらに土壌が湿潤だったことから，土塊同士の接着が促進され，砕土率が大きく低下したことが推測された。

一方，URS 機では，畝の上面が試作機に比べて平坦であり，表面は光沢を帯び，土壌の練り付けが確認された。側面は試作機と同様に土塊の凹凸が多く発生していた。なお，畝頂部砕土率と播種間隔は土壌が極度の湿潤状態であったため，測定することができなかった。

図 V-9　形成された畝（上：試作機，下：URS 機）

播種深さは両機ともに 5 cm 程度となり，目標値より 1 cm 程度深くなった。土壌が軟らかく深くまで作溝したためと考えられるが，吉田ら（2013）は排水不良のほ場において乾燥･過湿のリスクをある程度回避できる播種深さを 3〜7 cm としており，5 cm 程度の播種深さでは問題ないと判断した。

出芽率は試作機で 93 %，URS 機で 16 %と大きな差が出た。ほ場の様子も明らかに異なっていた（図 V-10）。生産現場では 80 %が目安と考えられるが，URS 機はこれをはるかに下回っており，本試験の土壌水分条件では播種作業を避けるべき状態だったと判断される。URS 機で出芽率が低下した原因は，播種作業の際にアップカットロータリにより土壌を練り付けたため畝上面にクラストが発生し，ほ場表面が硬い膜で覆われ，出芽できなかったことが考えられた。

そこで，出芽率の調査時に畝上面の土壌硬度をクラスト硬度計（大紀理化工業株式会社，DIK-5561）により試験区当たり 30 点測定したところ，試作機で 685 kPa，URS 機で 2224 kPa と有意に URS 機が高かった。URS 機の土壌硬度は水田の耕盤の円錐貫入抵抗値と同等であり，手で掘削できないほど硬かった。URS 機で出芽していない場所を移植ごてで掘ると，発根したものの座屈した種子を多数発見できた（図 V-11）。

図 V-10　供試機と出芽の様子（上：試作機，下：URS 機）

図 V-11　座屈し出芽できない種子

本試験のほ場の土性は埴壌土，粘土の含有率は 20 %で，重粘土に区分される土壌と比較すると半分以下であった。そのため，粘土割合が高く湿潤状態の土壌で URS 機を利用した場合，クラストの発生による出芽の阻害がさらに発生しやすくなると推測された。一方，試作機ではディスクにより土壌を帯状に削り取り，かき寄せるように畝を形成するため，土壌の練り付けが発生しにくいと考えられた。

以上より，極端な湿潤土壌条件下でも，試作機は URS 機に比べて，2.5 倍以上の高速で作業可能であり，出芽率は 9 割を超え，URS 機より大幅に高くなった。URS 機では播種作業自体はできたが，土壌の練り付けや土壌表面のクラストが発生し，出芽不良となった。このことから，試作機は URS 機より湿潤土壌への適応性が高いと考えられた。

生産現場では播種前の砕土作業と播種作業の時間間隔をできるだけ近づけることが求められ，一連の作業として認識される。これは砕土作業後に降雨があると，土壌がスポンジのように水を含み，乾燥に要する時間が長くなり，播種できない期間が長くなるためである。この問題の解決策のひとつが URS 機である。

一方，試作機では砕土作業と播種作業の間に降雨があり湿潤土壌になっても，播種作業が可能となることから，砕土作業と播種作業を分離することが可能となる。このことは，複数の作業者が分担して作業を行う体系に対応し，近年の大豆生産者の動向に適したものといえる。また，単一の作業者であっても，播種作業が可能となる日数が増えることから，播種適期に作業できる可能性が高まり，播き遅れによる減収を防ぐ効果が期待できる。

6. まとめ

ディスク式の畝立て部, ダブルプレート式種子繰り出し機構を持つ新たな 2 条仕様の試作機を民間企業と共同で開発し，試作機の播種精度を検証するために，乾燥土壌条件下で作業速度が播種精度に及ぼす影響を確認した。その結果, 試作機は設定速度 3.3 m/s でも，高さ 10 cm の畝形成が可能で，出芽率は 90 %以上であった。設定速度 1.6 m/s までであれば生産現場で求められる播種精度を満たしており，目標作業速度 1.5 m/s 以上を達成することができた。

さらに，湿潤土壌条件下で試作機と URS 機を比較し，試作機の湿潤土壌への適応性を検証した。その結果，極度の湿潤土壌条件下では，URS 機では播種作業自体は可能であったが, 土壌の練り付けや土壌表面のクラストが発生し, 著しい出芽不良となった。一方，試作機では URS 機に比べて 2.5 倍以上の高速で作業可能であり，出芽率は 9 割を超え，URS 機より湿潤土壌への適応性が高いことが明らかとなった。

Ⅵ　各公設試験場での試作機と URS 機の比較

1. はじめに

第Ⅴ章では，ディスク式の畝立て部，ダブルプレート式種子繰り出し機構を持つ 2 条仕様の試作機を製作した。試作機の播種精度は，1.6 m/s までであれば生産現場で求められるレベルを満たすことを述べた。また，極度の湿潤土壌条件で試作機と URS 機を比較し，URS 機では土壌の練り付けや土壌表面のクラストが発生し，著しい出芽不良となった一方，試作機では URS 機に比べてクラストの発生は軽微で，出芽率も 90 %以上を確保できた。このことから試作機が URS 機よりも湿潤土壌への適応性が高いことが明らかとなった。

そこで本章では，播種精度だけでなく最終的な収量の確認を行うこととした。試作機が URS 機と比較して，高速作業を行っても，同等の播種精度，収量が得られることを検証することを目的として，宮城県，新潟県，富山県および埼玉県の公設試験場内ほ場において，両機を比較した播種・栽培試験について述べる。

2. 供試機

(1) 試作機

図 VI-1 に試作機を示す。

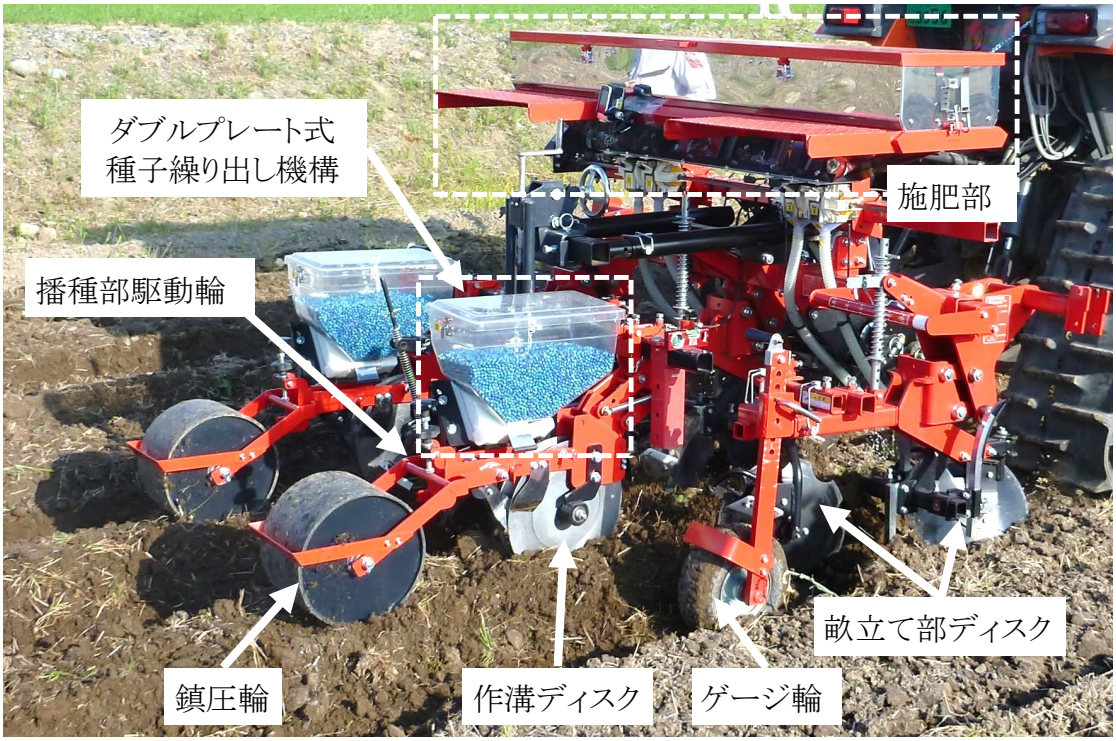


図 VI-1　試作機

試作機は，栽培試験を行うにあたり，V 章の試作機に施肥部を追加し，URS 機と同様の構成とした。試作機は，畝立て部，播種部，施肥部で構成され，全長は 1,880 mm である。試作機は日農工 3 点オートヒッチ S 規格のヒッチを介してトラクタへ装着する直装式の作業機であり，ディスク式の畝立て部に施肥部が取り付けられ，2 条の播種部は播種機ヒッチを介して連結される。

畝立て部は，1 条当たり相対する 2 枚の湾曲したディスクが前後 1 対，合計 4 枚のディスクを中心に構成される。ロータリによる畝立てでは 0.6 m/s 以上の作業が困難となるが，試作機ではディスクによる畝立てとすることで高速化を図った。したがって，試作機には URS 機のように耕うん機能がなく，播種作業のための砕土作業は別作業の事前耕うんで対応した。畝高さの調節は前後列ディスク角度，後列ディスク取付間隔，ゲージ輪の高さ位置の変更で行った。

播種部は，作溝ディスク，大豆用播種プレートを組み込んだダブルプレート式種子繰り出し機構，扁平タイヤの鎮圧輪，播種部駆動輪等で構成される。播種部

は駆動輪が接地，回転し，駆動軸，ギヤを介して種子繰り出し機構に動力が伝達されることで動作する。施肥部は，URS 機と同様のロール式施肥部（モータ駆動），肥料導管等で構成される。

試作機は，畝内施肥による施肥利用効率の向上のため，施肥部で地表面に条施用した直後，畝立て部で土寄せ・畝成形する。次に，播種部で畝立て直後の畝表面に播種溝を切り，播種溝内にダブルプレート式繰り出し機構から落下した種子を播種して鎮圧する。

(2) URS 機

図 VI-2 に URS 機を示す。

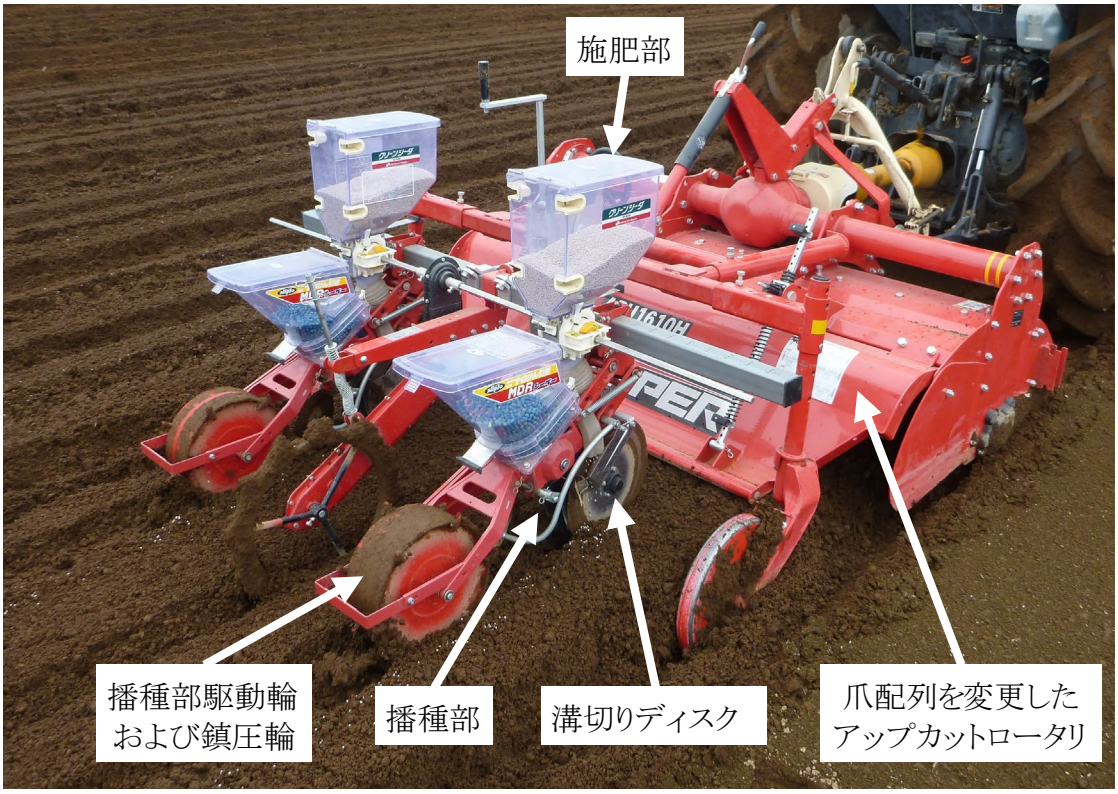


図 VI-2　URS 機

URS 機は爪配列を変更したアップカットロータリ，播種部，施肥部で構成され，全長 2,050 mm である。URS 機は 2 条仕様の市販機で，それぞれの公設試験場で所有するものを利用した。作業幅 1.6 または 1.7 m のアップカットロータリ（松山株式会社）と 2 条仕様の傾斜目皿式播種機（松山株式会社またはアグリテクノ矢崎株式会社）およびロール式施肥機（松山株式会社またはアグリテクノ矢崎株式会社）を，ヒッチを介して連結した。

URS 機は，ロータリ爪の曲がりの方向に土壌が飛散する特性を利用し，ホルダー型のアップカットロータリの爪配列を変更することで畝を形成する（細川, 2014）。次に，播種部で畝立て直後の畝表面に播種溝を切り，溝内に種子繰り出し機構から落下した種子を播種して鎮圧する。播種同時施肥は施肥部で畝の肩部の表面に側条で行った。

3. 試験方法

(1) 供試ほ場

宮城県, 新潟県, 富山県および埼玉県の公設試験場内のほ場で試験を実施した。表 VI-1 に試験ほ場を示す。

表 VI-1 試験ほ場

試験場所	播種日	試験区	ほ場履歴	面積	土性 [1)]
宮城県大崎市 水田転換畑	6 月 2 日	試作機, URS 機共通	前作水稲 ロータリ耕うん後	50a を 2 分割	シルト質 埴土
新潟県上越市 水田転換畑	5 月 30 日	試作機, URS 機共通	前作大豆 ロータリ耕うん後	30a を 2 分割	軽埴土
富山県富山市 水田転換畑	6 月 9 日	試作機 URS 機	前作水稲 ロータリ耕うん後 前作水稲 事前耕うんなし	18a を 2 分割	砂壌土
埼玉県鴻巣市 水田転換畑	6 月 20 日	試作機, URS 機共通	前作大豆 ロータリ耕うん後	28a を 2 分割	埴壌土

[1)] 国際土壌学会法による分類。

播種日は，各地の栽培基準で標準播種とされる時期に設定した。その中で，埼玉県は湿潤土壌時の性能を確かめるために梅雨時期とし，それ以外は入梅前とした。ほ場履歴は全てのほ場が水田転換畑であり，宮城県，富山県では前作が水稲，新潟県，埼玉県では前作が大豆であった。

事前耕うんは，富山県の URS 機では土性が砂壌土で砕土性が良く（新村ら，1974)，土壌が乾燥していたことから，未耕起状態から耕うん同時播種で大豆播種に適する砕土率 70 %以上に達すると判断し，実施しなかった。それ以外の試験区の事前耕うんはロータリ耕うん（耕深 10 cm 以上）により砕土率 70 %を目標に数回行った。なお，事前耕うんの最終回は，播種日当日または前日であった。

各試験ほ場の土性は，試験地域の代表的なものであり，新潟県，埼玉県で粘土

含有量が高く，粘りが強い傾向であった。宮城県，富山県のほ場は上記の県より粘土含有量が低かった。

(2) 土壌の物理性

土壌の物理性測定は，以下の項目について，第II章の方法で測定した。含水比，液性指数，ほ場の砕土率は試験区当たり5カ所測定した。

(3) 耕種概要

表 VI-2 に試験の耕種概要を示す。

表 VI-2　耕種概要

試験場所	品種	条間 (cm)	種子消毒	種子百粒重 (g)	播種量 (kg/10a)	施肥量 (kg/10a-N)	施肥方法
宮城県 大崎市	タンレイ	75	クルーザー MAXX	34.7	5.4	2.0	事前
新潟県 上越市	エンレイ	75	クルーザー MAXX	33.5	5.2	1.6	播種同時
富山県 富山市	エンレイ	80	クルーザー MAXX	34.8	5.5	3.0	播種同時
埼玉県 鴻巣市	タチナガハ	75	クルーザー MAXX	44.0	5.9	1.5	播種同時

耕種，栽培管理等は各地の栽培基準に準じて設定した。試験に供した品種は各県の奨励品種とし，種子用殺虫・殺菌剤（シンジェンタジャパン株式会社，クルーザーMAXX）を塗抹処理した種子を使用した。条間は富山県では80 cm，それ以外の試験場所では75 cmとした。播種量は5～6 kg/10a，基肥の窒素施用量は1.5～3.0 kg/10a-Nとした。基肥の施用は，宮城県は播種前に散布し，土壌に混和した。それ以外の試験場所では播種と同時に行った。

(4) 供試機の設定

表 VI-3 に供試機の設定を示す。

表 VI-3　供試機の設定

試験場所	試験区	トラクタの機関出力 (kW)	供試機の設定				
			作業速度 (m/s)	播種機の目皿[1)]	播種深さ (cm)	播種間隔 (cm)	畝高さ (cm)
宮城県大崎市	試作機	35.3	1.5	φ13-19番	3〜4	20cm-2粒	10〜15
	URS機	30.1	0.6	B-3	3〜4	19cm-2粒	10〜15
新潟県上越市	試作機	30.1	1.5	φ13-19番	5〜6	18.5cm-2粒	10〜15
	URS機	36.8	0.4	B-3	5〜6	18cm-2粒	10〜15
富山県富山市	試作機	36.8	1.5	φ13-19番	3〜4	16.5cm-2粒	10〜15
	URS機	36.8	0.4	B-3	3〜4	16cm-2粒	10〜15
埼玉県鴻巣市	試作機	40.4	1.5	φ14-21番	3〜4	20cm-2粒	10〜15
	URS機	36.0	0.6	B-3	3〜4	19cm-2粒	10〜15

[1)] 試作機では試作した分離用目皿で，φ13-19 であれば U 字の切り欠きの幅が 13 mm で，深さが 19 mm であることを表す。URS 機では松山株式会社の市販品の型番を表す。

試作機は全ての試験場所で同じ仕様とした。URS 機は富山県以外でアップカットロータリの作業幅 1.6 m，富山県で 1.7 m のものを使用した。供試機は機関出力 30〜40 kW のトラクタに装着した。富山県では同じトラクタに試作機と URS 機を付け替えて試験を行った。

作業速度は，試作機では 1.5 m/s に設定した。URS 機のうち新潟県では畝の形状を安定させるため，富山県では未耕起状態からの耕うん同時播種を行ったため 0.4 m/s とした。それ以外の試験場所は URS 機の上限とされる 0.6 m/s で試験を行った。図 VI-3 に富山県と埼玉県の播種試験風景を示す。

図 VI-3　富山県と埼玉県の試験風景（左：試作機，右：URS 機）

播種機の播種プレートおよび目皿を図 VI-4 に示す。試作機では 2 粒繰り出し用の大豆プレートを使用した。大豆プレートは外径 158.5 mm で，埼玉県では種子サイズが大きかったためφ14-21 とし，それ以外の試験場所ではφ13-19 とした。URS 機では大粒種子に対応する目皿（松山株式会社，B-3）を使用した。URS 機の目皿は外径 168 mm で，1 組当たり 2 個のφ12 の穴が，中心線上に外周から中心方向に 17 mm と 32 mm の位置に 8 組（計 16 個）配置されている。

播種深さは，各地の栽培基準に準じて設定した。新潟県では播種後から晴天が続く予報で土壌が乾燥することが予想されたため，他の試験場所より深い 5～6 cm とし，それ以外の試験場所は 3～4 cm とした。播種間隔は，耕種概要の播種量を目標に設定した。試作機の播種間隔の設定は URS 機に最も近い値に設定した。畝高さは，全ての試験区で URS 機の作業目安である 10～15 cm を目標に調整した。

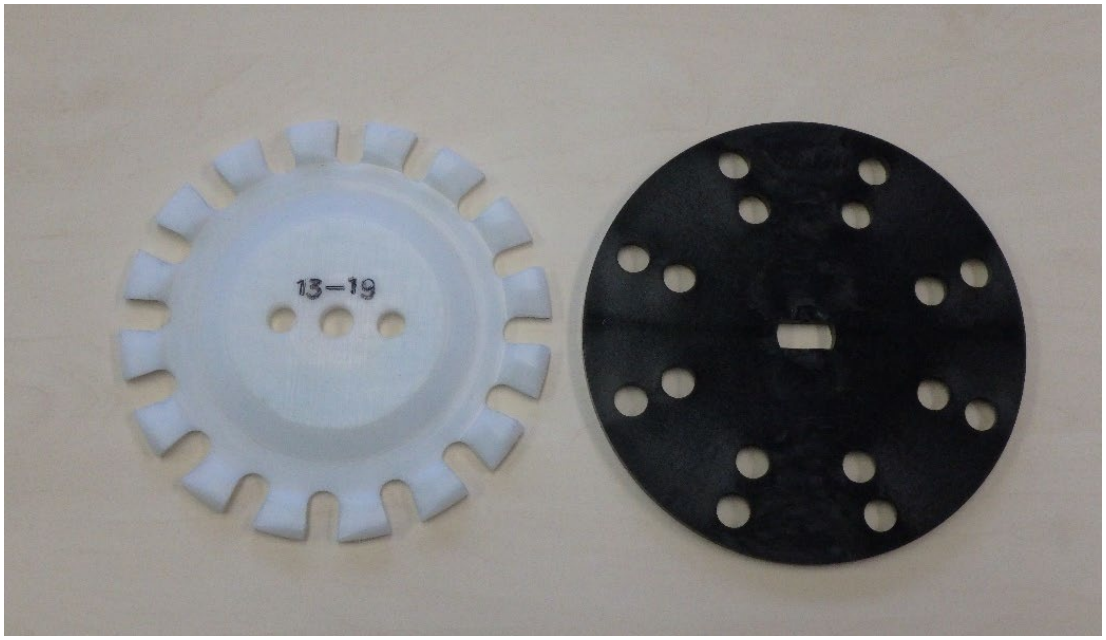


図 VI-4　播種プレートおよび目皿（左：試作機，右：URS 機）

(5) 播種試験測定項目

播種試験は，以下の項目について，第Ⅱ章の方法で測定した。作業速度は 3 反復，畝高さと畝上面幅は試験区当たり 3 カ所，畝頂部の砕土率は試験区当たり 3 カ所測定した。播種深さと播種間隔は 3 反復測定した。播種間隔は 2 粒繰り出しとしたため，2 粒で 1 組として種子間中央を基準点として，この間隔を測定した。なお，欠粒などで 2 粒を発見できなかった場合は，1 粒の位置を基準点とした。2 粒率は，2 粒 1 組で形成された株の割合（2 粒繰り出しが成功した割合），欠株率は播種間隔が設定値の 2 倍以上となった株の割合と定義し，播種間隔と併せて測定した。出芽率は各試験区の 2 m 区間を 5 反復測定した。

(6) 生育・収量

生育調査は開花期および成熟期に行った。開花期は全個体の 40〜50 %が開花に達した日，成熟期は全個体の 80〜90 %の莢が変色し，莢を振ると音がする日と定義し，各試験場所の担当者が達観により調査した。また，調査は主茎長，主茎節数について，試験区当たり宮城県 20 本，新潟県 18 本，富山県 30 本，埼玉県 30 本の株を生育中庸な場所で抜き取って行った。統計解析は試験場所ごとに試験区間で t 検定を行った。

収量調査は坪刈りで調査した。調査面積は試験区当たり宮城県 3 m^2×6 カ所，新潟県 0.4 m^2×3 カ所，富山県 0.7 m^2×3 カ所，埼玉県 0.8 m^2×3 カ所とした。宮城県では成熟期生育調査と異なる場所で，それ以外の試験場所では成熟期生育調査で抜き取った株を利用し調査した。統計解析は生育調査と同様に行った。併せて，子実の百粒重を測定した。

4. 試験結果と考察

(1) ほ場状態

表 VI-4 にほ場状態を示す。含水比は梅雨時期に試験を行った埼玉県のみが高く，湿潤状態であったが，それ以外の試験場所は乾燥状態か半乾燥状態であった。土壌の砕土率は，全ての試験場所で 70 %以上であった。

表 VI-4　ほ場状態

試験場所	試験区 [1)]	含水比（%）	液性指数	砕土率 [2)]（%）
宮城県大崎市	共通	34.8	0.02	71
新潟県上越市	共通	40.9	0.26	79
富山県富山市	試作機	34.6	-0.07	85
	URS 機	34.2	-0.10	－
埼玉県鴻巣市	共通	79.8	0.58	87

[1)] 共通は試作機と URS 機が同じ条件を表す。

[2)] 2cm 以下の土塊の占める質量割合，富山県の URS 機は事前耕うんなしのため測定不能。

(2) 播種精度

表 VI-5 に播種試験の結果のうち作業速度，畝形状，畝頂部の砕土率，播種深さ，播種間隔，2 粒率，欠株率を示す。

表 VI-5　播種試験の結果

試験場所	試験区	作業速度 (m/s)	畝形状		畝頂部の砕土率 (%)	播種深さ (cm)	播種間隔 (cm)	2粒率 (%)	欠株率 (%)
			畝高さ (cm)	畝上面幅 (cm)					
宮城県大崎市	試作機	1.49	13.3±1.0	28.2±1.2	71	4.1±0.8	19.7±4.5	98	0
	URS機	0.64	10.8±1.9	40.1±4.3	80	4.1±0.7	22.0±7.3	85	2
新潟県上越市	試作機	1.45	12.0±0.6	-	83	5.9±0.7	18.2±4.0	100	0
	URS機	0.40	15.2±0.7	-	81	5.8±0.6	17.9±3.5	83	0
富山県富山市	試作機	1.45	14.1±1.2	33.4±1.4	81	3.1±1.0	16.7±3.7	93	0
	URS機	0.39	14.3±1.0	38.4±4.5	84	3.0±0.6	16.4±3.5	93	0
埼玉県鴻巣市	試作機	1.51	14.0±1.2	30.3±1.4	91	3.6±0.5	20.0±5.5	100	0
	URS機	0.52	15.4±1.6	48.3±2.4	88	3.0±0.5	21.5±3.0	97	0

注 1）±は標準偏差を表す。
注 2）－は欠測を表す。

作業速度は，埼玉県の URS 機で設定より 1 割程度減少したのを除き，概ね設定通りであった。埼玉県の URS 機では，アップカットロータリによるけん引抵抗が大きくなり，トラクタタイヤのスリップにより速度低下したと考えられる。また，試作機では目標とする速度 1.5 m/s を満たした。試作機の速度は，URS 機と比較すると，0.4 m/s に速度を落とした新潟県，富山県で 4 倍程度，他の試験場所では 2.5 倍程度高かった。

畝高さは，全ての試験区で概ね作業目標の 10～15 cm となった。畝上面幅は畝立て部の構成の差違により，試作機で URS 機に比べて小さくなった。なお，新潟県の畝上面幅は欠測であった。

畝頂部の砕土率は，試作機で作業前のほ場の砕土率と同程度となった。このことは第Ⅲ章のディスクによる畝立て前後の砕土率の傾向と一致していた。事前耕うんにより大豆播種に求められる砕土率 70 %を満たせば，試作機による畝立て後に畝頂部の砕土率は同程度となることが追認された。URS 機では，試作機

と同様に畝立て前のほ場の砕土率が 70 %以上であれば，畝立て後に畝頂部の砕土率は 80 %以上になり，高く維持された。未耕起状態の富山県では，土性が砂壌土で乾燥しており，1 回の耕うんで 80 %を超えた。

播種深さは全ての試験区で設定に近い値となり，その偏差も同程度であった。一方，播種間隔は試作機では設定通りの値となった反面，URS 機では作業速度の高かった宮城県，埼玉県が 1 割以上広がった。

2 粒率は試作機で 90 %以上となり，全ての試験場所で試作機が URS 機より同等または高くなった。これらは播種プレート，目皿の形状に起因すると考えられる。試作機では外周方向に開放された切り欠きが外周上に配置されているため，重力でプレートの外周下部に寄せられた種子を効率よく捕捉することができる。切り欠きの周速度が速くなると，種子の捕捉率が低下することが報告されている（国立，2011）が，本試験では全ての試験場所において試作機でその周速度が URS 機よりも速くなっており，上述の播種プレートの形状が主因と考えられた。

橘ら（2014a）はトウモロコシ種子の 1 粒繰り出しを対象に試作機に搭載されるダブルプレート式種子繰り出し機構と傾斜目皿式種子繰り出し機構を比較して，前者は種子繰り出し速度を高くしても繰り出し精度が低下しにくいことを明らかにしている。本試験の結果は，大豆の 2 粒繰り出しでもダブルプレート式種子繰り出し機構が従来の播種機構より高速な種子繰り出しに適していることを示している。

欠株率は，宮城県の URS 機で 2 %発生し，これ以外の試験区では発生しなかった。この原因は 2 粒率と同様と考えられ，宮城県の URS 機は他の試験場所より作業速度が速く，目皿の穴の周速度が過度に速くなることで目皿の穴に種子が充填されにくくなったことが主因と考えられる。

これらのことから，URS 機の作業速度の上限である 0.6 m/s 付近での作業は，播種精度がやや落ちることが示唆された。また，試作機は URS 機に比べて，2 倍以上の高速作業を行っても，播種精度は同等以上となることが明らかとなった。

図 VI-5 に出芽率，図 VI-6 に埼玉県の出芽の様子を示す。全ての試験区で出芽率は 95 %を超え，良好な出芽であった。出芽に好適な砕土率であったこと，観察により出芽までにほ場表面にクラストが発生しなかったこと，両試験区ともに畝立てが行われ，湿害による発芽不良が発生しなかったことから，良好な出芽につながったと考えられた。

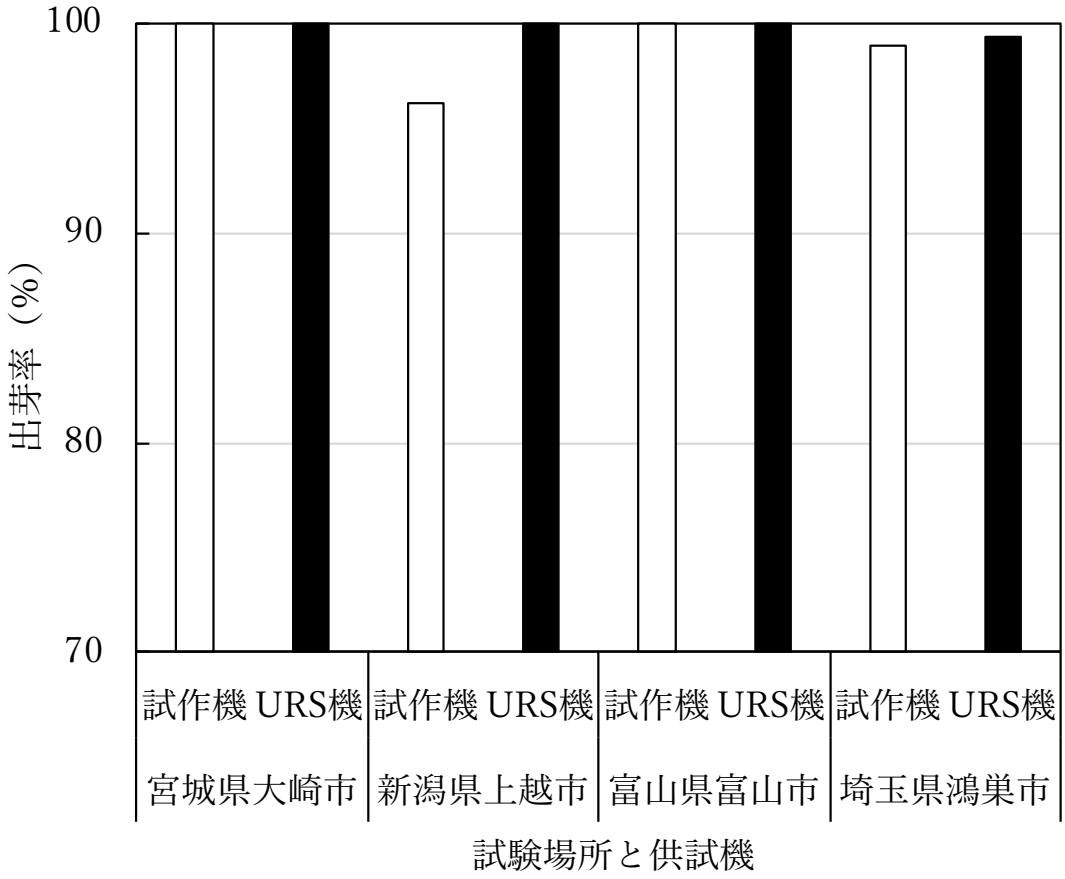


図 VI-5　出芽率

図 VI-6　埼玉県の出芽の様子

(3) 生育調査

表 VI-6 に生育調査の結果を示す。

表 VI-6　生育調査の結果

試験場所	試験区	開花期生育			成熟期生育			子実の百粒重（g）
		開花期	主茎長（cm）	主茎節数（/個体）	成熟期	主茎長（cm）	主茎節数（/個体）	
宮城県大崎市	試作機	7月29日	64.2	10.7	10月16日	74.5	15.0	32.3
	URS機	7月29日	66.2	11.9*	10月16日	76.5	15.6*	32.9
新潟県上越市	試作機	7月14日	50.5**	11.1	10月7日	71.6	14.0	31.9
	URS機	7月14日	43.1	10.9	10月7日	69.6	14.4	34.1
富山県富山市	試作機	7月22日	58.7	11.1	10月3日	67.5	12.7	30.2
	URS機	7月22日	69.6**	12.4**	10月3日	74.5**	13.2	28.3
埼玉県鴻巣市	試作機	8月2日	45.3	9.0	11月4日	45.5	12.5	35.9
	URS機	8月2日	47.0*	9.3	11月4日	48.6*	12.2	35.9

注）試験場所ごとに試験区間で t 検定を行った結果を**：1%有意，*：5%有意で表す。

全ての試験場所で試験区間の開花期，成熟期に差違はなく，生育ステージの進捗は同じであったと推測される。また，全ての試験区で観察により葉の黄変の発生がなく，主茎節数が極端に減少することもなかったことから，湿害などの生育障害の発生はなかったと判断された。

開花期生育の主茎長では新潟県の試作機が URS 機より有意に大きくなり，富山県，埼玉県では逆に URS 機が有意に大きくなった。また，主茎節数は宮城県と富山県で URS 機が有意に大きくなった。その原因については判然としなかった。成熟期生育の主茎長では富山県，埼玉県の URS 機が試作機より有意に大きくなった。主茎節数では宮城県で URS 機が有意に大きくなった。開花期生育の差が維持されたと考えられるが，その差は小さくなる傾向であった。試験に供した品種を含め日本で栽培される大豆品種は有限伸育型である（羽鹿, 2011）ことから，成熟期までに到達する主茎節数が品種や地域によりある程度決まっている。そのため，生育が進むに従い，差が小さくなったものと考えられた。子実の百粒重では，供試機間で傾向は見られなかった。

(4) 収量調査

図 VI-7 に収量を示す。

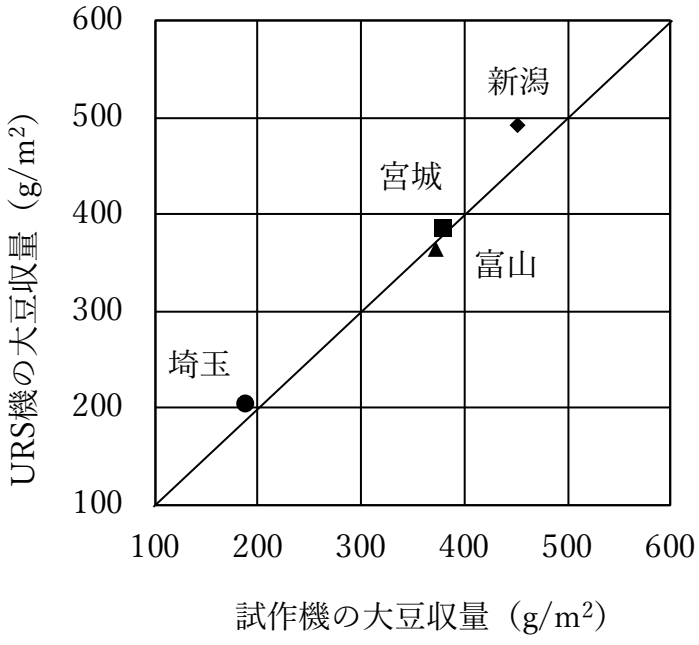


図 VI-7　大豆収量

全ての試験場所で試作機と URS 機に有意差は認められなかった。両機ともに出芽率が 95 %を超え，個体数に大きな差がなかったことが要因と考えられる。

埼玉県以外の試験場所の坪刈り収量は 350 g/m²を超えていた。これらの試験場所は大豆の原々種生産や品種改良を担当しているため，高い栽培管理技術に加えて，排水性向上などのほ場整備がなされ，高収量となったと考えられる。一方，埼玉県ではほ場の排水性が他の試験場所より劣ったため，生育期間を通して土壌水分が高く，特に初期生育が抑制され，200 g/ m²程度にとどまったと考えられる。ただし，参考のため設定した畝が形成されないロータリシーダで播種を行った区では，さらに低い 139 g/ m²であり，畝立てによる増収効果があったと推測された。

(5) 試作機の導入効果

試作機は, 地域性や土性によらず, URS 機よりも 2 倍以上高速で播種しても, URS 機と同等の播種精度，出芽率で，生育に大きな差はなく，収量にも差がないことが明らかとなった。すなわち，試作機は高速作業に加えて，URS 機の特長である畝立てによる生育初期の湿害軽減，増収効果も期待できる。

ただし, 事前耕うんが必要であることは, 適用可能地域をある程度限定する。例えば, 積雪などで播種作業まで十分な時間が確保できない場合や, ほ場が小さい場合は，総作業時間の少ない URS 機の方が適している。一方で，冬期に積雪がなく乾燥する地域，春先に除草のために耕うんを行う地域や高速化が求められる大きなほ場では，今回の試作機の導入効果が高いと考えられた。

5. まとめ

試作機の播種性能と生育，収量を把握するために，宮城県，新潟県，富山県および埼玉県の公設試験場のほ場で市販の URS 機との比較試験を行った。その結果，試作機は全ての試験場所で URS 機の 2 倍以上の作業速度 1.5 m/s で畝立て播種が可能であり，開発目標を達成できた。播種性能では，試作機は畝形状，播種深さ，播種間隔ともに設定通りとなったのに対して，作業速度を 0.6 m/s と限界付近に設定した URS 機では，播種間隔が 1 割以上広がった。2 粒率は全ての試験場所で試作機が URS 機より同等または高くなり，欠株は試作機では発生しなかった。

大豆の生育では，両試験区でステージの進捗に差はなかった。主茎長，主茎節数には開花期生育では差違があったが，成熟期生育にはその差は小さくなり，百粒重には差がなかった。収量にも両試験区間に差はなかった。このことから，試作機は高速作業を行っても，URS 機と同様の畝立てによる湿害軽減，増収効果が得られることが明らかとなった。

VII 結論

大豆は日本人にとって重要な食料で，国産の需要が高いにもかかわらず，単収や生産量が低迷し，自給率も 6 %程度である。その原因として，水田転換畑で多発する生育初期の湿害が挙げられる。本研究は大豆の湿害対策と播種作業の高速化を目的に，大豆用高速畝立て播種機の開発を行った。湿害対策として畝立て栽培を，高速化にはディスクによる畝立てとダブルプレート式種子繰り出し機構を採用した。

高速化で目標とする作業速度は，畝立て部のベースとして検討したディスク式中耕培土機において，安定した培土作業が可能な速度が 1.0〜1.6 m/s であることを参考に，1.5 m/s とした。

以下に各章で得られた結論を総括し，本論文の結論とする。

第Ⅲ章では，高速化と湿潤条件への対応を目指し，畝立てに現在主流のロータリを用いず，ディスクの使用を検討し，ディスク式中耕培土機を用いて畝立て試験を行った。その結果，水田転換畑の湿潤条件において，URS 機では対応困難な作業速度 1.9m/s 程度で目標とする 12〜15 cm の高さの畝が成形された。また，畝立て前のほ場の砕土率が 80 %以上確保されていれば，畝立て後も大豆播種に求められる砕土率 70 %以上が確保されることが明らかとなった。

次に，ディスク式中耕培土機と不耕起高速播種機で構成した基礎試験機を製作し，播種試験を行った。その結果，低水分の普通畑では作業速度 2.0 m/s でも，播種深さや播種間隔のばらつきが小さく，安定した作業が可能であった。高水分では走行輪のスリップの影響で作業速度は 1.5 m/s にとどまったが，それでも従来機に比べて十分高速な播種が可能であった。これらからディスクによる畝立てと不耕起高速播種機に搭載されるダブルプレート式種子繰り出し機構の組み合わせにより畝立て播種作業の高速化の可能性が明らかとなった。

第Ⅳ章では，基礎試験機と従来プレートで薬剤種子を繰り出した場合に問題となった種子の損傷について解決を試みた。従来プレートの種子が入る切り欠きの形状を変更したものを新たに大豆プレートとして開発し，裸種子と薬剤種子の繰り出し試験を行った。試験は作付面積の大きい 4 品種を，粒径で 3 段階に分けて行った。

種子粒径により選択した従来プレートでは，裸種子で欠粒は 5 %程度で，損傷粒はほとんど発生しなかった。しかし，薬剤種子では欠粒は最大 30 %に達し，損傷粒は 25 %を超える場合があった。

一方，大豆プレートでは，薬剤種子での欠粒が数%程度で，損傷粒が発生したのは 1 品種のみ，割合にして 1 %未満であった。播種プレートの V 字状の切り欠きにより生じていた種子の法線方向の力を，切り欠き形状を U 字状に変更することで取り除き，損傷粒の問題を解決できた。この成果は，共同研究企業の不耕起高速播種機の大豆用播種プレートとしても活用されている。

第Ⅴ章では，ディスク式の畝立て部とダブルプレート式種子繰り出し機構を持つ 2 条仕様の試作機を民間企業と共同で開発し，限界速度を検証するために，目標を大きく超える 3.3 m/s までの作業速度で畝立て試験を行った。乾燥土壌条件下で播種精度に及ぼす影響を確認した結果，試作機は設定速度 3.3 m/s でも，高さ 10 cm の畝形成が可能で，出芽率は 90 %以上であった。生産現場で求められる播種精度については，設定速度 1.6 m/s までであれば満たしており，目標作業速度 1.5 m/s 以上を達成することができた。

さらに，湿潤土壌条件下で試作機と URS 機を比較し，試作機の湿潤土壌への適応性を検証した。その結果，極度の湿潤土壌条件下では，URS 機では播種作業自体は可能であったが，土壌の練り付けによると考えられる土壌表面のクラストが発生し，著しく出芽不良となった。一方，試作機では URS 機の 2.5 倍以上の高速作業が可能であり，出芽率は 9 割を超え，URS 機より湿潤土壌への適応性が高いことが明らかとなった。

第Ⅵ章では，様々な気候や土性への適合性を評価するために，宮城県，新潟県，富山県および埼玉県の公設試験場で市販の URS 機との比較試験を行った。播種性能と生育，収量を比較した結果，試作機は全ての試験場所で URS 機の 2 倍以上の作業速度 1.5 m/s で畝立て播種が可能であり，開発目標を達成できた。播種精度では，試作機は畝形状，播種深さ，播種間隔ともに設定通りとなったのに対して，作業速度を 0.6 m/s と上限付近に設定した URS 機では，播種間隔が設定の 1 割以上広がった。2 粒率は全ての試験場所で試作機が URS 機より同等または高くなり，欠株は試作機では発生しなかった。

大豆の生育では，両試験区でステージの進捗に差はなかった。開花期の主茎長，主茎節数に差違があったが，成熟期にはその差は小さくなり，百粒重には差がな

かった。収量にも両試験区間に差はなかった。埼玉県で畝が形成されないロータリシーダと比較したところ, 試作機の収量はロータリシーダの 1.4 倍程度であった。このことから，試作機は高速作業を行っても，URS 機と同様の畝立てによる湿害軽減，増収効果が得られるものと推察された。

今後は実際の生産現場で，経済性評価を含めた試作機の実用性の検証を行う予定である。また, 試作機は事前耕うんを行ったほ場での利用を前提としていることから，事前耕うんを含めた播種作業体系全体の高速化の検討を行う予定である。

最後に試作機が国産大豆の増産に寄与し, 生産者の所得向上, 日本の食卓を豊かにする一助となることを期待している。

参考文献

有原丈二, 2007. 大豆 300A 研究センターの目指したもの. 第 223 回日本作物学会講演会要旨集, 茨城, 382-383.

FAO, 2020. Crops. FAOSTAT. http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC. Accessed Oct. 15, 2020.

後藤隆志, 手島司, 藤井幸人, 大西正洋, 遠藤準, 越智健市, 鋤柄忠良, 2012a. ディスク式中耕培土機の開発と基礎試験（第 1 報）. 農業機械学会誌, 74(1), 56-65.

後藤隆志, 手島司, 藤井幸人, 長澤教夫, 大西正洋, 遠藤準, 越智健市, 鋤柄忠良, 2012b. ディスク式中耕培土機の作業性能と大豆栽培への影響（第 2 報）. 農業機械学会誌, 74(2), 131-139.

羽鹿牧太, 2011. 遺伝と形態. 国分牧衛編, 豆類の栽培と利用. 朝倉書店, 東京, 13-29.

原口暢朗, 1994. 麦わらを被覆した輪換畑大豆播種体系における耕盤全面心土破砕による初期生育安定効果. 農業土木学会論文集, 1994(171), 145-151.

平沢正, 1998. 湿潤環境における作物の生理生態的特徴と水分欠乏. 日本作物学会紀事, 67(別), 305-310.

法貴誠, 市川真祐, 冨田和夫, 坂幸二, 1975. 穀粒の摩擦係数の測定. 三重大学農学部学術報告, 48, 469-482.

細川寿, 2005. 湿害回避のための大豆耕うん同時畝立て作業技術. 農業技術, 60, 254-257.

細川寿, 2014. 大豆の耕うん同時畝立て播種栽培技術の開発と普及. 特産種苗, 18, 64-67.

井上慶一, 村上則行, 宮浦寿美, 国岡浩由, 2003. 横側排種式繰り出し装置の大豆播種用への改造と性能. 農業機械学会誌, 65(Supplement), 61-62.

石田信昭, 狩野広美, 小林登史夫, 1989. NMR で見た大豆種子の出芽阻害. 化学と生物, 27(1), 66-68.

岩渕哲也, 田中浩平, 尾形武文, 2004. 大豆の 3 粒点播における播種機の改良と最適栽植密度. 平成 15 年度九州沖縄農業研究成果情報. http://farc.pref.fukuoka.jp/farc/seika/h14a/3-3.pdf. Accessed Jul. 27, 2018.

岩手県, 2008. 大豆の小畝立て播種栽培技術マニュアル. http://www2.pref.iwate.jp/~hp2088/labo/pdf/08042_kounetate_manual.pdf.

Accessed Nov. 15, 2020.
JIS A1204: 2009. 土の粒度試験方法.
JIS A1205: 2009. 土の液性限界・塑性限界試験方法.
鎌田慶朗, 山岸辰則, 1992. 大豆の化学. 山内文男, 大久保一良編, 大豆の科学. 朝倉書店, 東京, 27-56.
鎌田慶朗, 2003. 大豆に含まれるタンパク質の特徴. Ajico News, 208, 31.
冠秀昭, 菅原強, 岩佐郁夫, 千葉克己, 2010. 水田輪作のための多機能な低コスト暗渠排水システム. 農業農村工学会試, 78(11), 907-910.
加藤仁, 西脇健太郎, 長坂善禎, 建石邦夫, 関正裕, 2015. NARO CAN BOARD を利用した播種機の GNSS 速度連動. 農業食料工学会誌, 77(5), 384-386.
加藤雅康, 2013. ダイズ立枯性病害による出芽障害とその対策. 農山漁村文化協会編, 最新農業技術作物 vol.5. 農山漁村文化協会, 東京, 75-80.
小泉美香, 五十部誠一郎, 内藤成弘, 石田信昭, 菊池郁, 狩野広美, 2007. 大豆の吸水におけるある問題(2) 長期保存大豆の内容物漏出, 吸水不良及び膨潤不良の解決. 日本醸造協会誌, 102(8), 594-603.
国分牧衛, 2004. 豆類. 堀江武編, 作物栽培の基礎. 農山漁村文化協会, 東京, 159-180.
国立卓生, 堀金明美, 吉田充, 島田信二, 2009. ダイズの吸水障害回避に関する研究（第 1 報）. 農業機械学会誌, 71(6), 115-120.
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. 農作業研究, 46(3), 107-114.
国立卓生, 2012. 圃場排水性を改善して施肥・播種を 1 工程で行うチゼル式不耕起播種機. 2012 年中央農業総合研究センター普及成果情報. https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/narc/2012/111b3_02_04.html. Accessed Nov. 11, 2020.
国立卓生, 大下泰生, 高山定之, 佐々木武彦, 2016. チゼル式不耕起播種機の開発. 農業食料工学会誌, 78(2), 154-163.
來田康男, 榎悦朗, 澤田富雄, 2017. ダイズ・アズキ不耕起播種栽培におけるモリブデン付加播種が出芽と生育・収量に及ぼす影響. 作物研究, 62, 7-9.
増田亮一, 2011. 品質成分からみた国産大豆の特徴と利用. 日本食品科学工学会誌, 58(11）, 548-551.
皆川博, 2005. 傾斜回転目皿式播種機による大豆の定間隔播種技術. 平成 16 年度茨城県農業総合研究所農業研究所主要成果.

https://www.pref.ibaraki.jp/nourinsuisan/noken/seika/h16pdf/documents/32.pdf. Accessed Jul. 27, 2018.
宮城県, 2012. ダイズの病害虫を同時に防除できる新規薬剤チアメトキサム・メタラキシル M・フルジオキソニル水和剤（商品名：クルーザーMAXX）. 宮城県古川農業試験場普及情報.
https://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/223266.pdf. Accessed Nov. 10, 2020.
宮下高夫, 1990. 回転目皿式大豆播種機に関する研究. 農業機械学会誌, 52(Supplement), 121-122.
諸遊英行, 1983. 水田転換に伴う土壌の理化学性の変化. 日本土壌肥料学雑誌, 54(5), 434-441.
中村一要, 南山恵, 川口祐男, 松島知昭, 齋藤綾乃, 柳澤令, 2011. アップカットロータリを用いた大豆の耕うん同時畝立て播種技術における作業速度が畝高, 播種精度に及ぼす影響. 北陸作物学会報, 46, 66-68.
中村一要, 2015. 改良型アップカットロータリによるオオムギ跡ダイズの耕うん同時うね立て狭畦栽培. 農業技術大系作物編, 第 6 巻, 農山漁村文化協会, 東京, 技 255-263.
新村善男, 上森晃, 久津那浩三, 1974. 耕耘砕土に関する研究（第 2 報）. 日本土壌肥料学雑誌, 45(1), 42-46.
西勲, 1980. 水田転作の問題点と課題. 牧草と園芸, 28(2), 8-12.
農研機構, 2007. 小明渠作溝同時浅耕播種技術.
http://www.maff.go.jp/tokai/seisan/nosan/daizu/pdf/senkouhashu.pdf. Accessed Nov. 11, 2020.
農研機構, 2015. 地下水位制御システム FOEAS(フォアス).
https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/research_digest/digest_technology/digest_crops/054466.html. Accessed Dec.24, 2020.
農林水産省, n.d. 大豆のまめ知識.
https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/daizu/d_tisiki/index.html#Q26. Accessed Dec. 21, 2020.
農林水産省, 2008. 農林業センサス 2005.
https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000001202963&fileKind=0. Accessed Sep. 14, 2020.
農林水産省, 2013. 農林業センサス 2010.

https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000012667821&fileKind=0. Accessed Sep. 14, 2020.
農林水産省, 2015. 作物統計調査 2014. https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000029310690&fileKind=0. Accessed Sep. 14, 2020.
農林水産省, 2016. 作物統計調査 2015. https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000031404135&fileKind=0. Accessed Sep. 14, 2020.
農林水産省, 2017a. 作物統計調査 2016. https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000031567231&fileKind=0. Accessed Sep. 14, 2020.
農林水産省, 2017b. 農林業センサス 2015. https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000031522358&fileKind=0. Accessed Sep. 14, 2020.
農林水産省, 2018. 作物統計調査 2017. https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000031692110&fileKind=0. Accessed Sep. 14, 2020.
農林水産省, 2019. 作物統計調査 2018. https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000031818327&fileKind=0. Accessed Sep. 14, 2020.
農林水産省, 2020a. 作物統計調査 2019. https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000031916790&fileKind=0. Accessed Nov. 1, 2020.
農林水産省, 2020b. 大豆をめぐる事情. https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/daizu/attach/pdf/index-130.pdf. Accessed Sep. 4, 2020.
及川一也, 井村裕一, 2007. 浅耕砕土・小畦立て播種栽培による大豆の生育および収量の向上. 第 223 回日本作物学会講演会要旨集, 茨城, 96-97.
小野寺恒雄, 藤森新作, 2005. 独立行政法人農業工学研究所, 株式会社パディ研究所. 地下灌漑システム. 特許第 3671373 号. 2005-04-28.
佐藤雄夫, 湯村義男, 1970. 耕耘の立場からみた重粘性土壌の物理性に関する研究. 東海近畿農業試験場報告, 19, 127-149.
島田信二, 渡辺好昭, 浜口秀生, 藤森新作, 2010. コムギに対する地下水位制御

システム（FOEAS）の効果．第 230 回日本作物学会講演会要旨集，北海道，302-302.
島田信二, 2010. 生理・生態．国分牧衛編，豆類の栽培と利用．朝倉書店，東京，29-59.
島田信二，白岩立彦，桂圭佑，島村聡, 2013. 日米における大豆生生産技術の現状とわが国の課題．梅本雅，島田信二編，大豆生産振興の課題と方向．農林統計出版，東京, 69-123.
下名迫寛，矢治幸夫，中精一，今園支和, 1989. 高精度施肥播種技術に関する研究．日本農作業学会誌, 24(3), 230-236.
杉本秀樹，雨宮昭，佐藤亨，竹之内篤, 1988a. 水田転換畑におけるダイズの過湿障害．日本作物学会紀事, 57(1), 71-76.
杉本秀樹，雨宮昭，佐藤亨，竹之内篤, 1988b. 水田転換畑におけるダイズの過湿障害．日本作物学会記事, 57(1), 77-82.
杉山信太郎, 1992. 大豆の起源について．日本醸造協会誌, 87, 890-899.
橘保宏，川出哲生，志藤博克，平田晃, 2014a. 不耕起対応トウモロコシ高速播種機の開発．日本草地学会誌, 60(3), 200-205.
橘保宏，川出哲生，志藤博克，平田晃, 2014b. 不耕起対応トウモロコシ高速播種機の開発．日本草地学会誌, 60(3), 206-212.
橘保宏, 2016. 日本型飼料生産システムの高度化に向けた開発研究．筑波大学大学院生命環境科学研究科，博士（農学）学位論文, 17-55.
高橋昭喜, 2009. 小畝立て栽培で水田大豆を増収する．機械化農業, 3 月号, 17-20.
高橋真実，大野智史，高橋昭彦，中山則和，山本亮，関正裕, 2016. 水田転換畑で栽培されるダイズの欠株に対する収量補償作用．日本作物学会記事, 85(1), 51-58.
高橋智紀，片山勝之，西田瑞彦，浪川茉莉，土屋一成, 2018. 強粘質土壌転換畑においてダイズの根系を改善し増収させるスリット成形播種. http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/4th_laboratory/tarc/2017/17_001.html. Accessed Nov. 12, 2020.
八木茂, 1971. 農業機械と土壌水分量の関連について．土壌の物理性, 24, 27-31.
山田祐一，藤岡修，小西達也, 2015. 永久磁石同期モータによるロータリ式植付機構の車速連動制御．農業食料工学会誌, 77(6), 456-463.
吉田修一郎，細川寿，足立一日出, 2013. 播種時の過湿・過乾燥リスクを伴う粘

土質転換畑におけるダイズの適切な播種条件の解析. 土壌の物理性, 125, 17-27.
若杉晃介, 藤森新作, 2009. 水田の高度利用を可能とする地下水位制御システムFOEAS, 農業農村工学会誌, 77(9), 705-708.
渡辺輝夫, 松尾和之, 増田欣也, 中西幸, 2004. 小明渠作溝同時浅耕播種機による大豆の浅耕播種作業技術, 農作業研, 40(別 1), 39-40.

本論文に関する著者の参考論文

第Ⅲ章

重松健太, 山田祐一, 後藤隆志, 難波和彦, 2019. 湿潤土壌に対応した大豆用高速畝立て播種機の開発―ディスクによる畝立てと播種機構の検討―, 農業食料工学会誌, 81(2), 104-111.

第Ⅳ章

重松健太, 高山定之, 難波和彦, 2020. 湿潤土壌に対応した大豆用高速畝立て播種機の開発―殺虫・殺菌剤を塗抹した大豆種子に対応する播種機構の検討―, 農業食料工学会誌, 82(2), 129-137.

第Ⅴ章

重松健太, 大野智史, 高山定之, 遠藤準, 難波和彦, 2020. 湿潤土壌に対応した大豆用高速畝立て播種機の開発―試作機の播種性能―, 農業食料工学会誌, 82(6), 617-623.

第Ⅵ章

重松健太, 大野智史, 吉田修一, 南山恵, 高山定之, 遠藤準, 難波和彦, 2021. 大豆用高速畝立て播種機の開発―試作機と慣行機を比較する播種・栽培試験―, 農業食料工学会誌, 83(3), 印刷中.

謝辞

本研究の取りまとめに当たり，全般にわたって丁寧なご指導とご校閲を賜りました岡山大学大学院生命環境生命科学研究科 難波和彦准教授に心より感謝申し上げます。

また，本論文の審査に際して，有益なご助言とご指導をいただきました，岡山大学大学院生命環境生命科学研究科 門田充司教授，岡山大学農学部 齊藤邦行教授に心より感謝申し上げます。

機械開発に当たっては，数々の試作機を製作いただくとともに，改良や性能評価にご尽力いただいたアグリテクノ矢崎株式会社 髙山定之氏，有吉映明氏，小橋工業株式会社 遠藤準氏，長濵大輔氏，両社の皆様に心より感謝申し上げます。

試作機の性能評価，栽培試験の実施に当たっては，農研機構農業技術革新工学研究センター 橘保宏博士，農研機構中央農業研究センター 大野智史氏，関正裕博士，加藤仁博士，宮城県古川農業試験場 吉田修一氏，金原昭三氏，滝澤浩幸氏，星信幸氏，富山県農林水産総合技術センター 南山恵氏，長岡令氏，稲原誠博士，関係機関の多くの皆様に支えられました。皆様のご協力と数多くのご助言により本研究が円滑に遂行できました。心より感謝申し上げます。

所内試験の実施やデータ処理に当たっては，農研機構農業技術革新工学研究センター 千葉美貴子氏，後藤隆志博士，山田祐一氏，小高初枝氏に多大なご協力いただきました。心より感謝申し上げます。

農研機構農業技術革新工学研究センター 細川寿氏，同九州沖縄農業研究センター 渡辺輝夫氏，岩手県農業研究センター，アグリテクノ矢崎株式会社から論文に使用する資料，図を提供していただきました。心より感謝申し上げます。

次に，本研究とその取りまとめに専念できる環境を与えていただきました農研機構農業技術革新工学研究センター 日髙靖之氏，半田淳氏，清水一史博士，安原学氏，小林研博士に心より感謝申し上げます。

また，農研機構農業技術革新工学研究センター 野田崇啓博士，藤岡修博士より，貴重な資料と情報を提供していただきました。ここに感謝の意を表します。

本研究は，農林水産省農業機械等緊急開発事業において実施されました。本事業の遂行にご尽力いただきました農研機構農業技術革新工学研究センターおよび農林水産省生産局の皆様に感謝申し上げます。

最後に，日々の研究，業務の遂行および論文の取りまとめに当たり，協力体制を整えてくれた妻，子供たちに感謝いたします。