

博士学位論文

学位論文内容の要旨および審査結果の要旨

氏名 SONG LIANG

学位の種類 博士（農学）

学位授与の条件 酪農学園大学学位規程第3条第3項に該当

学位論文の題目 子実用トウモロコシに対する千鳥播栽培の適用条件に関する作物学的研究

審査委員	主査	教授	義平	大樹	（植物資源生産学）
	副査	教授	三枝	俊哉	（植物資源生産学）
	副査	教授	澤本	卓治	（植物資源生産学）
	副査	北海道大学大学院助教	中島	大賢	（作物学）

学位論文要旨

【目的】

子実用トウモロコシは北海道中央部の水田転換畑を中心に栽培面積470ha以上にのぼり、今後も増える見込みがある。子実用トウモロコシより幅広く普及させるためには安定多収栽培技術の確立が不可欠である。本報は、生産現場における千鳥播栽培（TR）の適用条件を明らかにするため、栽植密度、播種期、個体間距離、窒素追肥などの栽培条件や早晩性、草型などの品種特性が千鳥播栽培の増収効果に及ぼす影響とその要因を解析したものである。

【方法】

1. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす播種期の影響（試験1）

試験は、本学作物生産ステーション（江別市）、長沼町柳原農場（長沼町）で実施した。供試品種として2015年と2016年2ヶ年ともに相対熟度（以下RM）85、93日のP8025とP9027を用いた。栽植密度は10.3本 m^{-2} とし栽植様式処理として慣行栽培区（CR）、TRおよび狭畦栽培区（NR）を設けた。その畦幅と株間はそれぞれCRとTRにおいて75×13cm、NRにおいて50×19.5cmである。試験区配置は3反復分割区法（播種期を主区、品種を副区、栽植様式を副々区）である。

2. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす振幅距離の影響（試験2）

RM100、105日の36B08とP1543を用いた。2013年と2018年2ヶ年ともに畦幅75cm株間15cmの（8.9本 m^{-2} ）を慣行区とし、同じ栽植密度の振幅距離10、20、30cmに変えた千鳥播区（それぞれTR10、TR20、TR30）を設置した。試験区配置は3反復分割区法（振幅距離を主区、品種を副区）とした。

3. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす畦幅と栽植密度の影響（試験3）

供試品種として2015年と2016年2ヶ年ともにRM93日のP9027を用いた。栽植様式処理としてCR、TR、NRおよびNTR（狭畦千鳥区）を設け、それぞれに栽植密度処理として7.0、7.8、8.9、10.3、12.1本 m^{-2} の5水準を設置した。その畦幅と株間は、それぞれCRとTRにおいては75×19、17、15、13、11cm、NRとNTRにおいては50×28.5、25.5、22.5、19.5、16.5cmとした。試験区配置は3反復分割区法（品種を主区、栽植様式を副区、栽植密度を副々区）とした。

4. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす窒素追肥と栽植密度の影響（試験4）

RM85のP8025を供試し基肥に北海道のサイレージ用トウモロコシの施肥標準に基づいて硫安アンモニウム、過リン酸石灰、硫酸カリをそれぞれ、N-14、P205-18、K20-14 gm^{-2} を全層施肥した。窒素追肥処理区として2017、2018、2019年3ヶ年にN6 gm^{-2} を硫安により表層施肥した。試験3と同様の栽植様式と栽植密度を設けた。試験区配置は3反復分割区法（栽植様式を主区、栽植密度を副区、窒素処理を副々区）とした。

5. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす品種特性（早晩性、草型）と栽植密度の影響（試験5）

RM85、93、100のP8025（早生）、KD420（中生、下位多葉品種）、36B08（中晩生、上位多葉品種）を用い2017、2018、2019年3ヶ年に実施した。栽植様式、密度処理、試験区配置は試験3と同様である。

【結果】

1. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす播種期の影響（試験1）

晩播による子実収量の低下程度は、千鳥播および狭畦栽培において慣行区に比べて小さかった。また、慣行区と比較した時の千鳥播の増収効果は狭畦区に比べて、晩播区において高かった。その

増収要因は収量関連形質からみると、晩播による収穫指数および一穂粒数の低下程度が千鳥区≦狭畦区<慣行区であることに起因した。

2. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす振幅距離の影響（試験2）

慣行区と比較した時、千鳥播栽培の増収効果は振幅距離が増加するほど、高かった。その要因を収量関連形質からみると、地上部乾物重の高さと、一穂粒数の多さに由来した。受光態勢からみると、振幅距離の長いほど、千鳥播栽培における葉面積指数が高く、生殖生長期の穂重増加速度がやや高いこと、群落中層部（草高100-200cm）の相対照度が高いことに起因すると考えられた。

3. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす栽植密度の影響（試験3）

栽植密度反応を表す二次回帰式 $Y=a(X-b)^2+c$ の係数 a の絶対値は、狭畦千鳥区≦千鳥区≦狭畦区<慣行区の順に大きかった。これに対して、最大収量 c は狭畦千鳥区≧千鳥区≧狭畦区>慣行区であった。最適栽植密度 b は千鳥区、狭畦区が慣行区に比べて高かった。千鳥区と狭畦区を比較すると、最適栽植密度における最大収量には差がないが、疎植区および密植区の増収効果は千鳥播≧狭畦栽培であった。すなわち栽植密度に対する子実収量の安定性は、千鳥播栽培が狭畦栽培に比べて高いと考えられた。千鳥播栽培と狭畦栽培両者とも密植区ほど増収効果が高いが、慣行区の子実収量が最も高い、7.8~8.9本 m⁻²において千鳥播および狭畦栽培ともに最高収量を示した(Figure 1, Table 1)。

4. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす窒素追肥と栽植密度の影響（試験4）

- (1) N6区の子実収量はすべての栽植密度区でN0区に比べて大きかった。両区の差異はN0の子実収量の最も高い10本m⁻²の栽植密度付近で最も大きかった。
- (2) 追肥窒素の施肥効率（増収効果）は千鳥播区≧狭畦区≧慣行区であった。この千鳥播の追肥窒素施肥効率の高さは7.8本m⁻²以下の疎植区においては追肥窒素の利用率の差異、8.9本 m⁻²以上の密植では吸収窒素の増収効率の差は由来すると考えられる。

5. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす品種特性（早晚性、草型）と栽植密度の影響（試験5）

- (1) 千鳥播による増収効果は早生品種が中晩生品種に比べて高かった。千鳥播栽培と狭畦栽培と比較すると、早生品種では最適栽植密度（10.3本 m⁻²）では栽植様式間の差異はみられなかったが、7.8本m⁻²以下の疎植区および12.1本 m⁻²の密植区の増収効果は千鳥播区≧狭畦区であった。晩生品種の増収効果はすべての処理区において千鳥播区>狭畦区であった(Figure 2)。
- (2) 千鳥播栽培と狭畦栽培の増収効果は受光態勢の悪い上位葉割合の多い品種が、受光態勢の良い下位葉割合の多い品種に比べて高かった。受光態勢の悪い品種では千鳥播区>狭畦区であった。

6. 千鳥播栽培の安定多収要因

- (1) 千鳥播栽培の収量安定性は、収量関連形質の栽植密度反応からみると、密植にともなう収穫指数の低下程度および、一穂粒数と百粒重のどちらかの低下程度が緩和されることに由来した。千鳥播栽培における多収性は一穂粒数が大きい品種では、主として一穂粒数の低下程度が、百粒重の大きい品種では、主として百粒重の低下程度の緩和によってもたらされていた。
- (2) 千鳥播の多収性は、成長解析および受光態勢からみると、栄養成長中期の葉面積指数と受光率の高まりの早さと、生殖生長期の前半の受光態勢の良さによってもたらされていた。疎植では前者の、密植では後者の栽植様式間差異が大きかった。これら千鳥播における受光態勢の良さは栄養成長中期および生殖生長期前半の高い個体群成長速度をもたらし、これにより多収が実現していた。
- (3) 千鳥播栽培による増収効果は窒素追肥効果と相乗効果がみられた。この千鳥播の追肥窒素施肥効率の高さは7.8本m⁻²以下の疎植区においては追肥窒素の利用率の差異、8.9本m⁻²以上の密植で

は吸収窒素の増収効率の差は由来すると考えられた。

- (4) 早生品種が晩生品種に比べて栽植密度反応が安定している要因は、密植にともなう収穫指数の低下程度、および一穂粒数の低下程度、早生品種が晩生品種に比べて小さいことに由来した。これを受光態勢からみると、吸光係数の栽植密度に伴う変化は早生品種が晩生品種に比べて小さく、このことが子実収量の栽植密度反応の安定性と関係していた (Table 2)。
- (5) 下位葉割合の高い品種が通常草型の品種に比べて、多収で栽植密度に対する収量安定性が高い要因は、収量関連形質からみると①収穫指数と一穂粒数が高いこと、②これらの形質の密植ともなう低下程度は、下位葉割合の高い品種が小さいこと。受光態勢からみると③下位葉割合の高い品種の吸光係数が低いこと、④この吸光係数が栽植密度に対して変化が少ないことに由来した (Table 2, 3)。

7. 結論

子実用トウモロコシの安定多収を目的として千鳥播栽培を適用するのが望ましい条件は、①早生品種で安定多収を求める時 ②晩生品種 ③受光態勢の悪い品種 ④晩播せざるを得ない時 ⑤倒伏しやすい品種 ⑥倒伏しやすい条件 ⑦欠株の生じやすい通気性の悪い土壌条件などであると考えられた。また、減収をともなう倒伏がない場合には、北海道中央部において最も安定的に多収を実現できる品種と栽培方法の組合せは、KD420のような下位葉割合の高い早生品種を、5月初旬に10本 m^{-2} 程度の栽植密度で振幅距離は20cm以上で千鳥播し、第6～7葉期に窒素追肥する栽培条件であると考えられた。

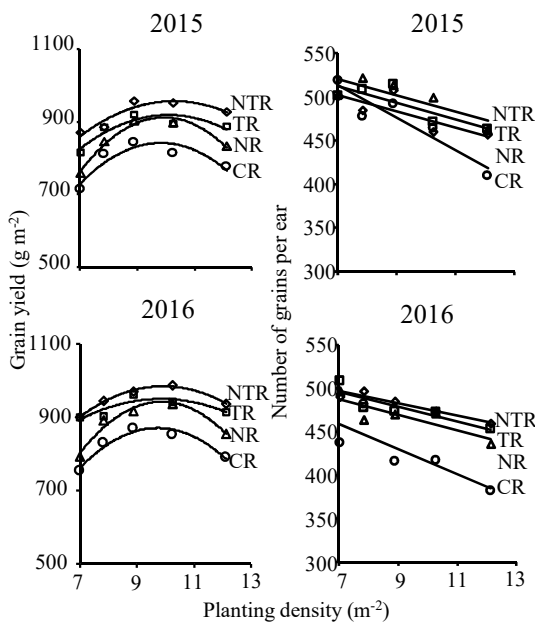


Figure 1. Responses of grain yield and number of grains per ear to planting density (P9027, Exp. 3).

Table 3 Correlation between ear growth rate (EGR), mean leaf area index (MLAI), net assimilation rate (NAR) and extinction coefficient in the first half of ripening period (Exp. 5).

Cultivar	Year		MLAI	NAR	Extinction coefficient
P8025 (RM85, Early cultivar)	2017	EGR	0.75*	0.80*	0.91***
		NAR	—	—	0.72*
	2019	EGR	0.90***	0.73*	0.71*
		NAR	—	—	0.92***
KD420 (RM93, Middle cultivar)	2017	EGR	0.86**	0.84**	0.75*
		NAR	—	—	0.75*
	2019	EGR	0.68*	0.95***	0.80**
		NAR	—	—	0.72*
36B08 (RM100, Late cultivar)	2017	EGR	0.19	0.80**	0.82**
		NAR	—	—	0.80**
	2019	EGR	0.83**	0.74*	0.73*
		NAR	—	—	0.75*

Table 1 Quadratic regression equation in grain yield and total dry matter yield to planting density, and optimum planting density (P9027, Exp. 3).

Year	Planting Pattern	Grain yield (g m ⁻²)	Total top dry matter yield (g m ⁻²)
2015	CR	$Y = -14.1(X - 9.8)^2 + 842$ ($r = 0.91^{***}$)	$Y = -29.9(X - 10.2)^2 + 1969$ ($r = 0.98^{**}$)
	TR	$Y = -9.7(X - 10.1)^2 + 918$ ($r = 0.89^*$)	$Y = -20.4(X - 10.2)^2 + 2046$ ($r = 0.93^*$)
	NR	$Y = -17.3(X - 9.9)^2 + 911$ ($r = 0.98^{***}$)	$Y = -35.2(X - 10.0)^2 + 2048$ ($r = 0.96^{**}$)
2016	NTR	$Y = -7.6(X - 10.4)^2 + 952$ ($r = 0.84^\dagger$)	$Y = -14.2(X - 10.4)^2 + 2077$ ($r = 0.76^{ns}$)
	CR	$Y = -14.7(X - 9.7)^2 + 870$ ($r = 0.97^{**}$)	$Y = -26.8(X - 10.2)^2 + 1906$ ($r = 0.97^{**}$)
	TR	$Y = -6.9(X - 9.8)^2 + 951$ ($r = 0.86^\dagger$)	$Y = -20.8(X - 10.0)^2 + 2012$ ($r = 0.97^{**}$)
	NR	$Y = -17.2(X - 9.9)^2 + 943$ ($r = 0.98^{**}$)	$Y = -30.8(X - 10.1)^2 + 1990$ ($r = 0.95^\dagger$)
	NTR	$Y = -9.8(X - 9.9)^2 + 985$ ($r = 0.99^{**}$)	$Y = -22.2(X - 9.9)^2 + 2073$ ($r = 1.00^{***}$)
Planting Patten(P)		*	**
Year(Y)		ns	**
P×Y		ns	ns

CR, TR, NR, NTR indicate conventional row, twin row, narrow row and narrow twin row planting cultivation respectively.

$^\dagger P < .1$, * $P < .05$, ** $P < .01$, *** $P < .001$ and NS, $P > .1$.

Table 2 Effect of nitrogen topdressing on grain yield response to planting density at average of three years (2017, 2018, 2019, Exp. 5).

Cultivar	Planting Pattern	Grain yield (g m ⁻²)	Total top dry matter yield (g m ⁻²)
P8025 (RM85, Early cultivar)	CR	$Y = -17.6(X - 10.1)^2 + 923$ ($r = 0.95^{**}$)	$Y = -37.7(X - 10.4)^2 + 1797$ ($r = 0.96^{***}$)
	TR	$Y = -13.9(X - 10.6)^2 + 1027$ ($r = 0.95^*$)	$Y = -31.5(X - 10.6)^2 + 1939$ ($r = 0.97^{**}$)
	NR	$Y = -17.1(X - 10.2)^2 + 1003$ ($r = 0.96^*$)	$Y = -42.2(X - 10.4)^2 + 1896$ ($r = 0.98^{***}$)
36B08 (RM100, Late cultivar)	CR	$Y = -23.6(X - 9.3)^2 + 866$ ($r = 0.97^{***}$)	$Y = -48.8(X - 10.0)^2 + 1802$ ($r = 0.98^{***}$)
	TR	$Y = -21.4(X - 9.8)^2 + 905$ ($r = 0.97^{**}$)	$Y = -38.5(X - 10.4)^2 + 1906$ ($r = 0.95^*$)
	NR	$Y = -21.2(X - 9.5)^2 + 859$ ($r = 0.98^*$)	$Y = -42.8(X - 10.3)^2 + 1818$ ($r = 0.98^{**}$)
Year(Y)		**	**
Cultivar(C)		**	**
Planting Patten(P)		ns	**
Y×C		ns	***
Y×P		ns	*
P×C		ns	ns
Y×C×P		ns	ns

CR, TR, NR indicate conventional row, twin row, and narrow row planting cultivation, respectively.

$^\dagger P < .1$, * $P < .05$, ** $P < .01$, *** $P < .001$ and NS, $P > .1$.

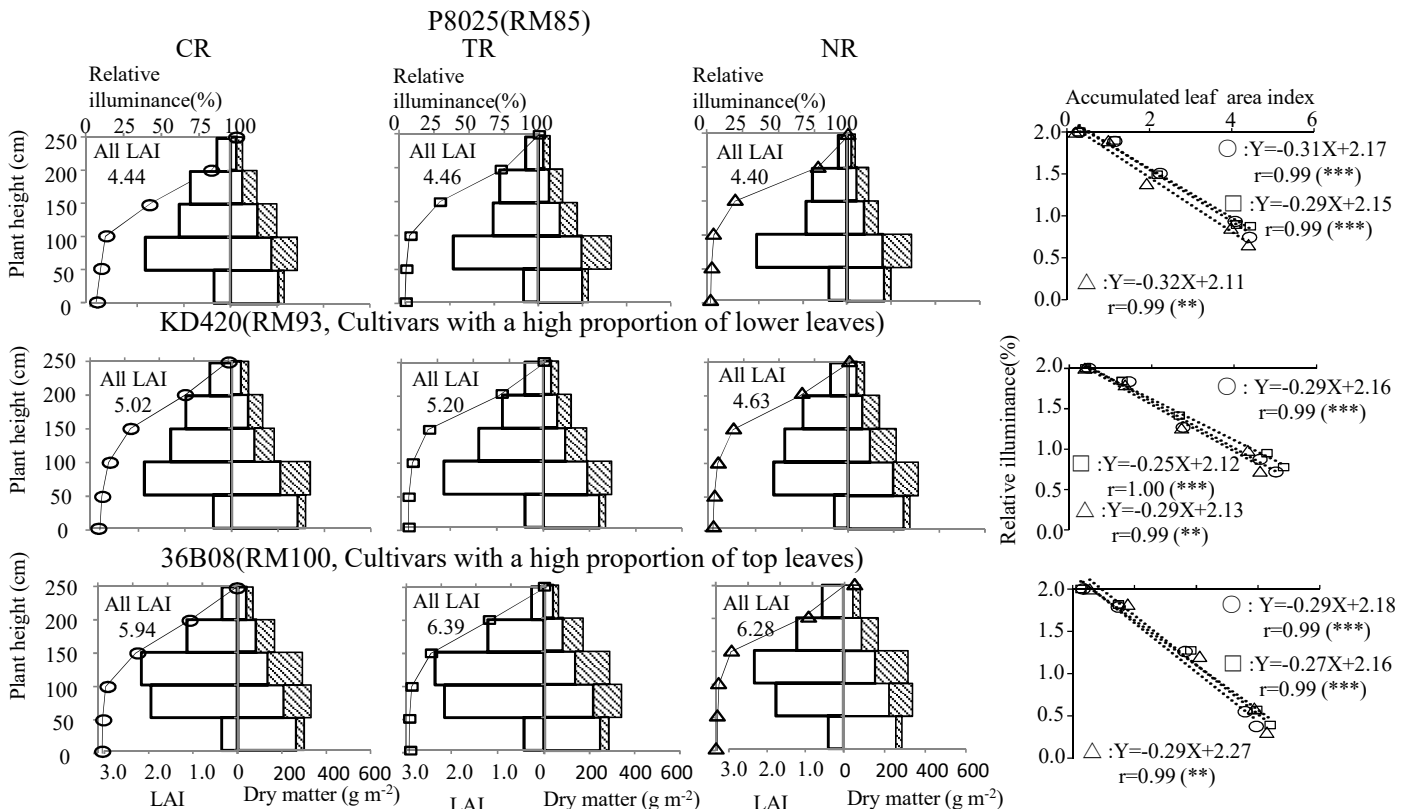


Figure 2 Canopy structure and relationship between accumulated leaf area index and relative illuminance (2017, Exp. 5).

○, □, and △ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation, respectively.

論文審査の要旨および結果

1. 論文評価点数

評価項目	主査（義平教授）	副査（三枝教授）	副査（澤本教授）	副査（中島助教）
テーマのたて方	5	5	3	5
研究の背景	5	5	5	5
研究の方法	5	5	3	5
研究の結果	5	5	5	5
考察と結論	5	3	5	3
参考論文	5	5	5	5
合計	30	28	26	28

・各評価項目を5点、3点、1点で評価

・全ての審査委員が20点以上（30点満点）をつけたことをもって、本審査終了

2. 論文審査の要旨および結果

1) 研究の背景

子実用トウモロコシは北海道中央部の水田転換畑を中心に2020年現在、栽培面積470ha以上ののぼり、今後も栽培面積が増加する見込みがある。子実用トウモロコシをさらに幅広く普及させるためには、安定多収栽培技術の確立が不可欠である。

2) 研究の目的

本報は、生産現場における千鳥播栽培の適用条件を明らかにするため、栽植密度、播種期、個体間距離、窒素追肥などの栽培条件や早晩性、草型などの品種特性が千鳥播栽培の増収効果に及ぼす影響とその要因を解析したものである。

3) 論文の要旨

第I章では、子実用トウモロコシ栽培における増収技術の必要性と、千鳥播栽培が増収技術として有望であると予想されることを、国内外の既往の関連研究を紹介しながら、仮説として提言した。

第II章では、本研究で用いた栽培方法と品種、調査方法の概略を述べた。

第III章では、まず、①機械播種による実規模試験を現地圃場で実施し、慣行栽培と比較した時の増収効果および、狭畦栽培と比較した時の有利性が精密試験圃場だけでなく、実規模試験圃場でも同様に得られることを明らかにした。次に、栽培条件が千鳥播栽培の増収効果に及ぼす②播種期、③千鳥播栽培における振幅距離、④畦幅と栽植密度の影響を、多収要因を解析しながら、下記のように紹介した。

晩播による子実収量の低下程度は、千鳥播および狭畦栽培において慣行区に比べて小さかった。その増収要因は収量関連形質からみると、晩播による収穫指数および一穂粒数の低下程度が千鳥区

≦ 狭畦区 < 慣行区であることに起因した。

振幅距離の比較試験 (③) から、千鳥播栽培の増収効果は振幅距離が増加するほど高かった。その要因を収量関連形質からみると、地上部乾物重の高さと一穂粒数の多さに由来した。受光態勢からみると、振幅距離の長いほど、千鳥播栽培における葉面積指数が高く、生殖生長期間の穂重増加速度がやや高いこと、群落中層部 (草高 100-200 cm) の相対照度が高いことに起因した。

栽植密度異試験 (④) から、栽植密度反応を表す二次回帰式 $Y=a(X-b)^2+c$ の係数 a の絶対値は、狭畦千鳥区 ≦ 千鳥区 ≦ 狭畦区 < 慣行区 の順に小さかった。これに対して、最大収量 c は狭畦千鳥区 ≧ 千鳥区 ≧ 狭畦区 > 慣行区 であった。最適栽植密度 b は千鳥区、狭畦区が慣行区に比べて高かった。千鳥区と狭畦区を比較すると、最適栽植密度における最大収量には差がないが、疎植区および密植区の増収効果は、千鳥播 ≧ 狭畦栽培 であった。すなわち、栽植密度に対する子実収量の安定性は、千鳥播栽培が狭畦栽培に比べて高いと考えられた。また千鳥播は、慣行区の子実収量が最も高い 7.8~8.9 本 m^{-2} で最高収量を示した。

第IV章では、千鳥播栽培の増収効果に及ぼす窒素追肥と栽植密度の影響を検討し、下記を明らかにした。子実収量は雄穂分化期の追肥ですべての栽植密度区で増収した。その差異は無追肥区の子実収量の最も高い 10 本 m^{-2} の栽植密度付近で最も大きかった。追肥窒素の施肥効率 (増収効果) は、千鳥播区 ≧ 狭畦区 ≧ 慣行区 であった。この千鳥播の追肥窒素施肥効率の高さは 7.8 本 m^{-2} 以下の疎植区においては追肥窒素の利用率の差異、8.9 本 m^{-2} 以上の密植区では吸収窒素の増収効率の差は由来すると考えられた。

第V章では、千鳥播栽培の増収効果に及ぼす品種特性 (早晩性、草型) を検討し、下記を明らかにした。千鳥播による増収効果は早生品種が中晩生品種に比べて高かった。千鳥播栽培と狭畦栽培と比較すると、早生品種では最適栽梢密度 (10.3 本 m^{-2}) では栽植様式間の差異はみられなかったが、7.8 本 m^{-2} 以下の疎植区および 12.1 本 m^{-2} の密植区の増収効果は、千鳥播区 ≧ 狭畦区 であった。晩生品種の増収効果はすべての処理区において千鳥播区 > 狭畦区 であった千鳥播栽培と狭畦栽培の増収効果は受光態勢の悪い上位葉割合の多い品種が、受光態勢の良い下位葉割合の多い品種に比べて高かった。受光態勢の悪い品種の増収効果は、千鳥播区 > 狭畦区 であった。

第VI章において、狭畦栽培と比較しても千鳥播栽培の有利性を発揮する栽培条件と品種特性、および収量関連形質と成長解析・受光態勢からみた千鳥播栽培の増収要因について総合的に論議した。

4) 論文の結論

子実用トウモロコシの安定多収を目的として千鳥播栽培を適用するのが望ましい条件は、①早生品種で安定多収を求める時 ②晩生品種 ③上位葉割合が高い等の受光態勢の悪い品種 ④晩播せざるを得ない時 ⑤倒伏しやすい圃場条件と品種 ⑥欠株の生じやすい通気性の悪い土壌条件 などであると考えられた。また、減収をとまなう倒伏がない場合には、北海道中央部において最も安定的に多収を実現できる品種と栽培方法の組合せは、下位葉割合の高い早生品種を5月初旬に10本 m^{-2} 程度の栽植密度で振幅距離は20cm以上で千鳥播し、第6~7葉期に窒素追肥する栽培条件であると考えられた。

5) 本研究の評価

生産者が子実用トウモロコシを栽培する際に選択する栽植密度の範囲内では、子実収量の栽植密度反応は2次の回帰曲線 $Y=a(X-b)^2+c$ でモデル化できることを実証し、栽植密度反応と関連の深

い栽培条件や品種特性を，この同帰式の係数により数値化して比較し，評価できることを示した点は，作物学上の意義は大きく，高く評価できる．

また，普及している狭畦栽培と比較し，千鳥播栽培が有利性を発揮する条件を整理し明示したことは，生産現場の安定多収栽培に寄与するものであり，将来的に生産コストの低減を通じた国産トウモロコシの濃厚飼料，ひいては食用利用を推進する一助となるものである．

さらに，千鳥播種の多収要因を収量関連形質と成長解析および受光態勢より明らかにした点は，更なる新品種に応じた栽植様式および栽植密度の改変を考える際の基礎理論となるものであり，多収品種の育種目標および栽培技術の改良のポイントを示唆していることも大いに評価できる．

以上より，審査員一同は，宋粮（Song Liang）氏の提出した本論文が博士（農学）に値すると評価した．

3. 最終試験の結果

審査委員4名が最終試験を行った結果，合格と認める．

2021年 2 月 9 日

審査員

主査 教授 義平 大樹

副査 教授 三枝 俊哉

副査 教授 澤本 卓治

副査 中島 大賢

(北海道大学大学院助教)