

2020 年度

博士論文

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

Cropological study on the applicable conditions of twin row cultivation for
grain yield increase in maize.

21833002 宋粮

Song Liang

指導教員 植物資源生産学 教授 義平大樹

酪農学園大学大学院酪農学研究科

目次

第Ⅰ章 緒言	・ ・ ・ ・ 1
1. 子実用トウモロコシの普及と，増収技術の必要性	・ ・ ・ ・ 1
2. 北海道中央部の子実用トウモロコシの収量性	・ ・ ・ ・ 2
3. トウモロコシの栽植密度反応の特徴と，日本における既往の研究	・ ・ ・ ・ 3
4. 海外におけるトウモロコシの子実収量の栽植密度反応と栽植様式の 改良を考案する背景	・ ・ ・ ・ 4
5. トウモロコシの狭畦栽培に関する既往の研究	・ ・ ・ ・ 5
6. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす栽培条件と品種特性の影響 とその解析手順	・ ・ ・ ・ 6
第Ⅱ章 材料および方法	・ ・ ・ ・ 8
1. 機械播種による実規模試験における千鳥播栽培の増収効果（試験 1）	・ ・ ・ ・ 8
（1）試験場所と供試品種	・ ・ ・ ・ 8
（2）栽植様式および栽植密度処理	・ ・ ・ ・ 8
（3）播種，施肥およびその他栽培方法	・ ・ ・ ・ 9
（4）調査方法	・ ・ ・ ・ 9
2. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす播種期の影響（試験 2）	・ ・ ・ ・ 10
（1）試験場所と供試品種	・ ・ ・ ・ 10
（2）栽植様式および栽植密度処理	・ ・ ・ ・ 11
（3）播種，施肥およびその他栽培方法	・ ・ ・ ・ 11
（4）調査方法	・ ・ ・ ・ 12

3. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす振幅距離の影響（試験 3）	・ ・ ・ ・ 13
(1) 試験場所と供試品種	・ ・ ・ ・ 13
(2) 栽植様式および栽植密度処理	・ ・ ・ ・ 13
(3) 播種，施肥およびその他栽培方法	・ ・ ・ ・ 13
(4) 調査方法	・ ・ ・ ・ 14
4. 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 4）	・ ・ ・ ・ 14
(1) 試験場所と供試品種	・ ・ ・ ・ 14
(2) 栽植様式および栽植密度処理	・ ・ ・ ・ 15
(3) 播種，施肥およびその他栽培方法	・ ・ ・ ・ 15
(4) 調査方法	・ ・ ・ ・ 15
5. 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 5）	・ ・ ・ ・ 15
(1) 試験場所と供試品種	・ ・ ・ ・ 15
(2) 栽植様式および栽植密度処理	・ ・ ・ ・ 16
(3) 播種，施肥およびその他栽培方法	・ ・ ・ ・ 16
(4) 調査方法	・ ・ ・ ・ 16
6. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす品種の早晚性と栽植密度の影響（試験 6）	・ ・ ・ ・ 17
(1) 試験場所と供試品種	・ ・ ・ ・ 18
(2) 栽植様式および栽植密度処理	・ ・ ・ ・ 18
(3) 播種，施肥およびその他栽培方法	・ ・ ・ ・ 18
(4) 調査方法	・ ・ ・ ・ 19
7. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす草型の異なる品種と栽植密度の影響（試験 7）	・ ・ ・ 19
(1) 試験場所と供試品種	・ ・ ・ ・ 19

(2) 栽植様式および栽植密度処理	・ ・ ・ ・ 20
(3) 播種、施肥およびその他栽培方法	・ ・ ・ ・ 20
(4) 調査方法	・ ・ ・ ・ 21
第Ⅲ章 栽培条件が千鳥播栽培の増収効果に及ぼす影響	・ ・ ・ ・ 22
1. 機械播種による実規模試験における千鳥播栽培の増収効果（試験 1）	・ ・ ・ ・ 22
(1) 子実収量	・ ・ ・ ・ 22
(2) 収量関連形質と、収量関連形質からみた栽植様式間差異が生じる要因	・ ・ ・ ・ 22
(3) 考察	・ ・ ・ ・ 24
2. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす播種期の影響（試験 2）	・ ・ ・ ・ 25
(1) 試験年次の気象条件	・ ・ ・ ・ 25
(2) 子実収量と地上部乾物重	・ ・ ・ ・ 26
(3) 地上部乾物重および葉面積指数の推移	・ ・ ・ ・ 26
(4) 成長解析	・ ・ ・ ・ 27
(5) 考察	・ ・ ・ ・ 27
3. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす振幅距離の影響（試験 3）	・ ・ ・ ・ 29
(1) 子実収量	・ ・ ・ ・ 29
(2) 収量関連形質と、収量関連形質からみた処理間差異が生じる要因	・ ・ ・ ・ 29
(3) 考察	・ ・ ・ ・ 30
4. 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 4）	・ ・ ・ ・ 32
(1) 子実収量	・ ・ ・ ・ 32
(2) 収量関連形質と、収量関連形質からみた処理間差異が生じる要因	・ ・ ・ ・ 33
(3) 考察	・ ・ ・ ・ 34

第Ⅳ章 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 5)	・ ・ ・ ・ 37
1. 試験年次の気象条件	・ ・ ・ ・ 37
2. 子実収量	・ ・ ・ ・ 38
3. 収量関連形質の栽植密度反応	・ ・ ・ ・ 38
4. 窒素吸収および窒素施肥効率の関連形質	・ ・ ・ ・ 40
5. 考察	・ ・ ・ ・ 41
(1) 栽植密度反応に及ぼす窒素追肥効果	・ ・ ・ ・ 41
(2) 収量構成要素からみた窒素追肥が栽植密度反応に及ぼす要因	・ ・ ・ ・ 42
(3) 窒素施肥効率およびその関連形質からみた栽植密度反応に及ぼす要因	・ ・ ・ ・ 42

第Ⅴ章 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす品種特性と栽植密度の影響

1. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす品種の早晩性と栽植密度の影響 (試験 6)	・ ・ ・ ・ 43
(1) 子実収量	・ ・ ・ ・ 44
(2) 収量関連形質の栽植密度反応	・ ・ ・ ・ 44
(3) 成長解析と群落構造	・ ・ ・ ・ 45
(4) 考察	・ ・ ・ ・ 47
1) 収量関連形質からみた早晩性の異なる品種間で栽植密度反応に差異が生じる要因	・ ・ ・ ・ 47
2) 成長解析および群落構造からみた早晩性の異なる品種間で栽植密度反応に差異が生じる要因	・ ・ ・ ・ 49
2. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす草型の異なる品種と栽植密度の影響 (試験 7)	・ ・ ・ ・ 50
(1) 子実収量	・ ・ ・ ・ 50

(2) 収量関連形質の栽植密度反応	・ ・ ・ ・ 50
(3) 成長解析と群落構造	・ ・ ・ ・ 52
(4) 考察	・ ・ ・ ・ 54
1) 収量関連形質からみた草型の異なる品種間で栽植密度反応に差異が生じる要因	・ ・ ・ ・ 54
2) 成長解析および受光態勢からみた草型の異なる品種間で栽植密度反応に差異が生じる要因	・ ・ ・ ・ 55
第Ⅵ章 総合考察	・ ・ ・ ・ 57
1. 千鳥播栽培の増収効果を高くする栽培条件および品種選定	・ ・ ・ ・ 57
2. 狭畦栽培と比較した時にも，千鳥播栽培の有利性を発揮する栽培条件および品種特性	・ ・ ・ ・ 58
3. 収量関連形質からみた千鳥播栽培の増収要因	・ ・ ・ ・ 60
4. 成長解析からみた千鳥播栽培の増収要因	・ ・ ・ ・ 61
5. 品種選定および多収要因の未解明部分と，今後の検討課題	・ ・ ・ ・ 63
6. 結論	・ ・ ・ ・ 64
第Ⅶ章 要約	・ ・ ・ ・ 66
第Ⅷ章 謝辞	・ ・ ・ ・ 72
第Ⅸ章 引用文献	・ ・ ・ ・ 73
第Ⅹ章 英文要約	・ ・ ・ ・ 79
第Ⅺ章 図表	・ ・ ・ ・ 86

第 I 章 緒言

1. 子実用トウモロコシの普及と、増収技術の必要性

トウモロコシ (*Zea mays L.*)は、イネやムギと並んで最も重要な作物の 1 つであり、世界の三大作物と呼ばれ、世界全体の生産量は約 9 億 6793 万トンにも及び、世界の食を支える重要な作物である (農水省 2016). 日本におけるトウモロコシ栽培はサイレージ用 56,300 ha (北海道農政部 2020), スイートコーン 7,990 ha (農水省 2017)であるのに対して、子実用トウモロコシは 530 ha (農水省 2020a)と非常に少なく、食用と飼料用も含めて、米国を中心に海外より 1140 万トン (農水省 2020b)のトウモロコシ子実を輸入している.

輸入トウモロコシ子実のうち日本国内の用途は、約 60%が畜産用配合飼料に使用されている. 輸入トウモロコシ価格の上昇は畜産経営に及ぼす影響が大きく、その解決策の 1 つとして、国産子実用トウモロコシへの転換が考えられている. しかし、輸入トウモロコシ子実の価格に比べて高いことから、さらなる安定多収技術の開発により国産子実用トウモロコシの 1 kg 当りの価格を下げ、低コスト生産の実現が求められている.

近年、子実用トウモロコシの栽培面積は北海道中央部の水田転換畑を中心に、特に、岩見沢市、長沼町など北海道中央部において増加しつつある (富沢 2016). これら北海道中央部の水田転換畑では従来、主要作物としてコムギとダイズが作付され、両作物の交互作を実施している地域が多かった. しかし、交互作のため、連作障害が起こりやすく、両作物ともに低収にとどまっている地域も少なくない. その回避のため、コムギ、ダイズに次ぐ第 3 の作物として子実用トウモロコシの導入が期待されている. 子実用トウモロコシの導入により、生産者は子実用トウモロコシ生産で得られる収益だけでなく、トウモロコシ残渣の鋤き込みによる緑肥効果や、深い根張りによる排水改善効果など連作

障害の回避から、コムギやダイズの収量が向上することもメリットとしてあげられる。

北海道中央部における子実用トウモロコシ生産の有利性は、新発田 (2017)によると、以下の 8 点がある。①子実収量がイネ、ムギ、ダイズなどの主要穀物と比べて高い。②雌穂収量が、他の用途のトウモロコシ栽培に比べて高い。③茎葉残渣量が多く緑肥効果が高い。④水稻栽培していた農業者は乾燥施設や汎用コンバインを有しており、初期投資の必要がほとんどない。⑤単位面積当りの労働時間がコメやコムギと比べて少ない。⑥近年の温暖化による秋の温度上昇に伴い子実水分含有率が低下しやすくコンバイン収穫が容易。⑦子実を乾燥させた後は長期保存・長期輸送が容易である。⑧畜産利用の場合、サイレージ調製に関わる作業技術を修得する必要がある。特に 10 a 当りの労働時間はイネ、ダイズ、コムギそれぞれ 24, 8, 5 時間であるのに対して、子実用トウモロコシは 1.4 時間と、従来最も省力作物であるとされてきたコムギに比べても少なく (柳原 2020), 省力的な作物である。上記のようなメリットから、子実用トウモロコシの栽培面積は北海道中央部を中心に 2020 年現在 470 ha まで拡大している。

現在、国産子実用トウモロコシは、主として、中小家畜用の濃厚飼用として使用されており、安全性の高い畜産物の出荷を経営目標とする、養鶏と養豚農家が購入している。そのため従来のサイレージ用トウモロコシと異なり換金作物であるため、より精度の高い増収技術とそれによる生産コストの低減が求められている。

2. 北海道中央部における子実用トウモロコシの収量性

子実用トウモロコシの栽培方法に関しては、北海道総合研究機構中央農業試験に関する一連の研究がある。中津ら (2015a)によれば安定的に機械収穫適水分 (約 30%以下) に達するためには、早生の早および早生の中晩生品種が有望で、5 月中旬に播種すれば概ね 800~1,000 g m⁻²の子実収量が見込まれ、その飼料成分 (デンプン含量 65%程度、粗タン

パク含量 9%程度) は市販の濃厚飼料と大差がない。また多収をねらうには、総窒素施肥量をサイレージ用トウモロコシの基準より $1\sim 2\text{ g m}^{-2}$ 増肥した 16 g m^{-2} 程度とし、基肥は 10 g m^{-2} を上限とし残りを 4~5 葉期に追肥することが適当である(中津ら 2015b)。さらに、道央地域における最適栽植密度は相対熟度(RM, Relative maturity) 73 日のクウィスおよび RM85 日のチベリウスともに、増収効果と折損による倒伏のリスクから考えて 9.0 本 m^{-2} 程度としている (中津ら 2015c)。

尾崎 (2015)によれば、早生、中生それぞれ 4, 2 品種を栗山町で供試し、5 ヶ年実規模栽培したところ、全品種平均の子実収量は 746 g m^{-2} で、その年次変動の範囲は $658\sim 862\text{ g m}^{-2}$ であった。また、長沼町子実用コーン利用組合の例では、RM93 日の早生品種 P9027 を栽培した生産圃場の平均の子実収量は、低収年次には 825 g m^{-2} 、多収年次には 998 g m^{-2} であり、それぞれの年次の圃場収量は $530\sim 1180$, $580\sim 1360\text{ g m}^{-2}$ の範囲にあると報告されている (義平 2019)。しかし、栽植様式や栽植密度および両者の相乗効果が子実用トウモロコシの収量に及ぼす影響を、年次間差異を含めて報告した例は、日本においてはほとんどみられない。

3. トウモロコシの栽植密度反応の特徴と、日本における既往の研究

一般に、畑作物の収量向上のためには適切な栽植密度が重要であり、現有品種の多収性を引き出すための数多くの栽植密度試験がなされてきた。トウモロコシはムギ類やマメ類など他の畑作物に比べて分けつや分枝の発達が少ないため、栽植密度に対する地上部生育の可塑性が低く、その栽植密度が子実収量に及ぼす影響は他の作物に比べて大きいことが分かっている (義平ら 2014b)。

サイレージ用トウモロコシにおいて乾物収量を最大とする最適栽植密度と品種の早晩性の関係はよく知られており、戸澤 (2015) によれば、早生品種ほど適正栽植密度が高く、

晩生品種で低い。サイレージ用トウモロコシの品種の早晩性は相対熟度で評価され、極早生 (RM73 日) から極晩生品種 (RM130 日) までは存在し (農水省 2010)、北日本で主要な RM85~100 日の早生、中生品種の最適栽植密度は、1980 年代までは 6.5~7.5 本 m^{-2} とされてきた (岩田 1973)。しかし、近年、直立葉型品種や RM75 日程度の極早生品種など密植適応性を持つ品種の開発、狭畦や千鳥播栽培などの新しい栽植様式の普及にともない、極早生品種 (RM75 日)、早生品種 (RM85 日)、中生品種 (RM100 日)それぞれ 10.0~12.0, 9.0~10.0, 8.0~9.0 本 m^{-2} が適正栽植密度として推奨され (林ら 2006, 義平 2015a)、従来よりも多収をねらった密植栽培が普及しつつある。

4. 海外におけるトウモロコシの子実収量の栽植密度反応と栽植様式の改良を考案する背景

子実用トウモロコシ品種の栽植密度反応を調査した報告は海外において多くみられる。Jeschke (2010)によれば、栽植密度に伴うトウモロコシの子実収量の変化には3段階に分かれ、密植にともない子実収量が急激に上昇する段階、子実収量の変化が2次の回帰曲線に近似し、最高収量を示す栽植密度が含まれる段階、栽植密度の増加にともない子実収量が漸減する段階がある。Russell (1991)、Devick (2005)によれば、トウモロコシの最適栽植密度は最近の新品種ほど高くなっている。Troyer (1996)によれば、高密度で栽植されるほど、水の養分競合、光競合が高まるために環境ストレス耐性に強くなる必要がある。Assefa et al. (2016)によれば、米国22州、カナダ22州における124,374のトウモロコシの子実収量のメカデータを用いて、栽植密度反応を解析すると、子実収量と栽植密度の関係は二次回帰曲線が最も良く適合することを確認し、さらに、近年リリースされた品種ほど最適栽植密度が高くなり、潜在収量が大きいこと、この傾向は水分、日射量などの栽培環境に恵まれた地域ほど強くなること。したがって、生産現場における栽植

密度の決定は品種と栽培環境の相互作用を考慮して決定すべきである。

菅野 (2015)によれば、サイレージ用トウモロコシの国内調査事例から、中生品種であっても平均 5 本 m^{-2} 以下の低密度で栽培されていることが低収要因であり、7 本 m^{-2} 以上に高める必要がある。森田 (2014) によれば、病虫害、鳥害、播種作業ミスによる欠株を考慮して、標準栽植密度の 10% 多く播種することを前提にすべきである。しかし、日本において子実用トウモロコシの栽植密度反応の栽植様式間や品種間の差異を検討した例は非常に少ない。

一方、義平ら (2008) は密植にともなう有効雌穂長の減少程度は、畦幅の短縮に比べて株間を短縮した場合に大きいとした。さらに、義平ら (2014a)は、株間の短縮に伴う穂乾物重および稈断面積の減少には変曲点がみられ、株間が 13 cm 以下となると、13 cm 以上の場合に比べて減少が加速するとしている。これらのことからトウモロコシの子実収量は、個体間距離の短縮による有効雌穂の減少を小さく保ちながら、最高収量を示す最適栽植密度付近まで密植すると、より安定的多収が得られやすいと考えられる。最短個体間距離を維持しながら、密植していく方法として、狭畦栽培 (Narrow row cultivation, NR) と千鳥播栽培 (Twin row cultivation, TR)が考えられる。

5. トウモロコシの狭畦栽培に関する既往の研究

最短個体間距離を保ちながら密植する方法の 1 つとして狭畦栽培がある。林ら (2006) によれば、狭畦栽培による増収効果は栽植密度によって異なり、栽植本数 11.0 本 m^{-2} で最大となりでは 20%程度の増収がみられたのに対して、栽植本数 9.3 本 m^{-2} のやや疎植、14.1 本 m^{-2} の超密植では増収効果がみられなかった。Fernando et al. (2002)によれば、トウモロコシの子実収量の狭畦栽培による増収効果は登熟期間の受光態勢の改善に由来する。また、Cox and Cherney (2002), Cox et al. (2006) によれば狭畦栽培と窒素の増肥と、

密植栽培を組み合わせると、さらに多収となる。また、狭畦栽培において千鳥播の個体配置をとると、増収効果はさらに高くなる。サイレージ用トウモロコシにおいて狭畦栽培と千鳥栽培を同時に実施し比較した例として義平ら (2013b) は極早生品種において千鳥播栽培は狭畦栽培と同様が、それ以上の増収効果を示し、受光態勢の悪い品種で増収効果が高くなるとした。原田と松野 (2012) によれば鹿児島県の事例で 6.7 本 m^{-2} の標準密度では千鳥播栽培と狭畦栽培も増収効果はみられないが、8.9 本 m^{-2} の密植区では千鳥播の増収効果が狭畦栽培に比べて高かった。しかし、子実用トウモロコシにおいて千鳥栽培と狭畦栽培を比較した例は日本においては非常に少ない。

6. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす栽培条件と品種特性の影響とその解析手順

本研究は、千鳥播栽培による増収効果が、①どのような栽培条件で高くなるか、②どのような特性を有する品種で高くなるか、③どのような栽培条件と品種に対して、狭畦栽培と比較して時、有利性を発揮するか、子実用トウモロコシの安定多収を実現するうえで、千鳥播栽培の望ましい適用条件を明らかにしようとするものである。さらに、千鳥播栽培の適用場面における増収要因を収量構成要素、成長解析と受光態勢から検討した (Figure I-1)。

第Ⅲ章において、2015 年に実施した「機械播種による実規模試験 (試験 1)」の結果を紹介し、子実用トウモロコシの生産現場においても千鳥播栽培による増収効果がみられるかを確認した。次に 2015、2016 年に実施した「千鳥播栽培の増収効果に及ぼす播種期の影響 (試験 2)」および 2013、2018 年に行った「千鳥播栽培の増収効果に及ぼす振幅距離の影響 (試験 3)」と 2015、2016 年に実施した「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 4)」の結果を紹介して、千鳥播栽培の増収効果を高くする栽培条件を明らかにしようとした。

さらに、第IV章において2017, 2018, 2019の3ヶ年にわたり実施した「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5)」の結果を示し、窒素追肥が千鳥播栽培の増収効果との間に、相乗効果がみられるかを狭畦栽培と比較して評価としようとした。また、その増収要因を窒素施肥効率とその関連形質から解析した。

第V章において2017, 2018, 2019年の3ヶ年にわたりを行った「千鳥播栽培の増収効果に及ぼす品種の早晩性との栽植密度影響(試験6)」と「千鳥播栽培の増収効果に及ぼす草型の異なる品種と栽植密度の影響(試験7)」の結果を示し、早晩性や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を、栽植密度反応を含めて明らかにしようとした。また、収量関連形質および成長解析からみた増収要因について検討した。

第VI章において千鳥播による増収効果に及ぼす栽培条件と品種選定の影響を整理し、さらに、最も多収となる諸条件の組み合わせについて提示し、これらの要因を収量構成要素と受光態勢から総合的に考察した。

第Ⅱ章 材料および方法

試験 1 として「機械播種による実規模試験における千鳥播栽培の増収効果」、試験 2 として「千鳥播栽培の増収効果に及ぼす播種期の影響」、試験 3 として「千鳥播栽培の増収効果に及ぼす振幅距離の影響」、試験 4 として「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 5 として「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 6 として「千鳥播栽培の増収効果に及ぼす品種の早晚性との栽植密度影響」を、試験 7 として「千鳥播栽培の増収効果に及ぼす草型の異なる品種と栽植密度の影響」を実施した (Table II-1)。

1. 機械播種による実規模試験における千鳥播栽培の増収効果 (試験 1)

(1) 試験場所と供試品種

試験は、酪農学園大学作物生産ステーション (江別市)、長沼町柳原農場で実施した。供試品種として、RM85 日の P8025 と RM100 日の P0023 の 2 品種を用いた。P8025 はデントコーンとフリントコーン交雑品種で、サイレージ用としては主に十勝、網走、上川地方等の比較的冷涼な栽培地帯向け品種である (農水省 2010)。道央地域における子実用トウモロコシ品種として、P9027 に次ぎ 2 番目に栽培面積が多い品種である (津別農業協同組合 2018)。P0023 はサイレージ用としては十勝・網走・上川の一部温暖な地域や道央道南の栽培地帯向けで、子実収量が高い。道央地域で子実用としては、完熟期が遅い品種である。

(2) 栽植様式および栽植密度処理

栽植様式処理として慣行区 (CR: Conventional row)、千鳥区 (TR: Twin row cultivation) および狭畦区 (NR: Narrow row cultivation) を設け (Table II-1, Figure II-1)、栽植密度処

理としては、CR と TR では 7.2, 8.6, 10.7 本 m^{-2} の 3 水準、NR では 8.7, 10.6 本 m^{-2} の 2 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 75×18.5 , 15.5 , 12.5 cm, NR において 50×23.0 , 18.9 cm とした。試験区配置は品種を主区、栽植様式を副区、栽植密度を副々区とする 3 反復分割区法である。

(3) 播種、施肥およびその他栽培方法

播種は 2015 年 5 月 6 日に長沼町柳原農場で、千鳥播専用機（グレートプレーンズ II, IDEC）により、CR および NR は畦幅を可変できる播種機 (NG plus, MONOSEM) により機械播種した。

基肥として、北海道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 , $\text{P}_2\text{O}_5\text{-18}$, $\text{K}_2\text{O-14 g m}^{-2}$ を全層施肥した。追肥として、第 6~7 葉期（雄穂分化期）に N , P_2O_5 , K_2O をそれぞれ 9 , 10 , 6 g m^{-2} を硫安アンモニウム、過リン酸石灰、硫酸カリにより表層施用した。さらに、土壌処理としてゲザノンフロアブル（アトラジン・メトラクロール水和剤）を 250 倍に希釈して動力噴霧器で全面土壌散布した。出芽後は間引きをし、1 株 1 本立てとした。欠株が生じた場合には、間引き個体を移植ごてにより補植し、欠株のない、均一な群落の確保につとめた。なお補植個体は調査から除外した。

(4) 調査方法

1) 収量調査

完熟期を迎えたことを確認して収量調査を行った。生育中庸な畦を選んで連続 5 m を地際部で選定鋏により刈取り、全重を電子天秤で測定した。さらに中庸な個体を 3 個体選抜し、茎葉と雌穂に分けて上述の乾物調査を行った。サンプリングした畦 5 m 内の個体すべてから、雌穂をもぎ取り、残った茎葉を茎葉原物重として電子天秤で測定した。

選抜した 5 個体は測定後、細断して紙袋に入れて乾燥機で 5 日間以上乾燥させた後に、茎葉乾物重を測定した。雌穂を薄い包皮だけが残るようにもぎ取り、全個体分を電子天秤で雌穂原物重として測定した。さらに、中庸な雌穂を 5 個体選抜して雌穂形質の横列数、縦粒数、有効雌穂長、先端不稔長および雌穂径の調査を実施した。選抜した雌穂サンプルは、網袋に入れて通風乾燥機で 5 日間以上乾燥させた後に雌穂乾物重を測定した。

2) 倒伏関連形質

倒伏関連形質として、引き倒し抵抗値と稈径を測定した。濃沼ら (1998) によれば引き倒し抵抗値は絹糸抽出日約 5 週間後に最も安定する。本試験においては引き倒し抵抗値と稈径を 2017 年 9 月 6, 7, 8 日に測定した。測定方法は濃沼 (2001) の方法に準じ、アルミニウムパイプ製の固定器具をトウモロコシの稈基部に装着し、この固定器具を地表から高さ 1m で稈と直角の方向に弧を描くように引き倒した時に要した最大荷重を、デジタルフォースゲージ (FGP-5, 日本電産シンポ (株) 社製) で測定した。なお、各区 10 株について測定し、中庸な 5 株を平均した。

稈径は株元から 1 つ目の節間中央部 (下位第 1 節間) の長径と短径を電子ノギスで、引き倒し抵抗値と同時に測定した。下記の式により稈の断面積を計算し、稈の太さとし、引き倒し抵抗値との関係を検討した。

$$\text{稈断面積 (mm}^2\text{)} = \pi/4 \times \text{長径 (mm)} \times \text{短径 (mm)}$$

2. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす播種期の影響 (試験 2)

(1) 試験場所と供試品種

試験は、酪農学園大学作物生産ステーション (江別市)、長沼町柳原農場で実施した。供試品種として 2015 年と 2016 年両年ともに RM85 日の P8025 と RM93 日の P9027 を用いた。

P9027 は RM93 日のデント種である．サイレージ用としては十勝を含む道東・網走・道北の比較的温暖な栽培地向けである．道央および道南地域では子実用品種としても適し，道央地域の子実用トウモロコシ品種として最も栽培面積が多い (農水省 2010) ．

(2) 栽植様式および栽植密度処理

栽植様式処理として CR, TR および NR を設け (Table II-1, Figure II-1), 栽植密度は 10.3 本 m^2 設置した．その畦幅と株間はそれぞれ，CR と TR において $75 \times 13 \text{ cm}$, NR において $50 \times 19.5 \text{ cm}$ である．試験区配置は播種期を主区，品種を副区，栽植様式を副々区とする 3 反復分割区法である．

(3) 播種，施肥およびその他栽培方法

播種は 2015 年に 5 月 6, 16, 26 日，2016 年に 5 月 3, 16, 29 日に播種深度 3 cm になるようにタマネギの移植機を改良した播種道具で手播きし，その後フォーで鎮圧した．第 4 葉期前後に間引きをし，1 株 1 本立てとした．欠株は，生育が比較的良好な間引き個体を移植ごとにより補植し，均一な群落の確保につとめて補植個体は調査から除外した．

基肥として，北海道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, P_2O_5 -18, K_2O -14 g m^{-2} を全層施肥した．追肥として，第 6~7 葉期 (雄穂分化期) に 2015 年に N 3 g m^{-2} を硫安アンモニウムで，2016 年に N, P_2O_5 , K_2O をそれぞれ 9, 10, 6 g m^{-2} を硫安アンモニウム，過リン酸石灰，硫酸カリにより表層施用した．

また，土壌処理としてロロックス (リニュロン水和剤) を 200 g 10 a^{-1} に希釈して動力噴霧器で全面土壌散布した．出芽後は間引きをし，1 株 1 本立てとした．欠株が生じた場合には，間引き個体を移植ごとにより補植し，欠株のない，均一な群落の確保につとめた．

なお補植個体は調査から除外した．さらに，生育処理剤として，ゲザノンフロアブル (アトラジン・メトラクロール水和剤) を 250 mL 10 a^{-1} , 第 5~6 葉期に動力噴霧器で散布した．

(4) 調査方法

1) 収量調査

完熟期を迎えたことを確認して収量調査を行った。生育中庸な 15 個体を選んで地際部を選定畝で刈取り、全重を電子天秤で測定した。さらに中庸な個体を 3 個体選抜し、茎葉と雌穂に分けて上述の乾物調査を行った。サンプリングした 18 個体から、雌穂をもぎ取り、残った茎葉を茎葉原物重として電子天秤で測定した。選抜した 3 個体は測定後、細断して紙袋に入れて乾燥機で 5 日間以上乾燥させた後に、茎葉乾物重を測定した。雌穂を薄い包皮だけが残るようにもぎ取り、15 個体分を電子天秤で雌穂原物重として測定した。さらに、中庸な雌穂を 5 個体選抜して雌穂形質の横列数、縦粒数、有効雌穂長、先端不稔長および雌穂径の調査を実施した。選抜した雌穂サンプルは、網袋に入れて通風乾燥機で 5 日間以上乾燥させた後に雌穂乾物重を測定した。

2) 部位別乾物重

絹糸抽出期、登熟後期を目安として 2015 年は 7 月 18 日、8 月 21 日に、2016 年では 7 月 22 日、8 月 12 日にそれぞれ部位別乾物重を調査した。各区より生育中庸な 3 個体をサンプリングし、葉身、稈および葉鞘、雌穂に分けて電子天秤にて原物重 (生重) を測定した。また葉面積計 (LI-3200) を用いて葉面積を調査し、葉面積指数 (LAI) を算出した。各部位は原物重測定後に紙袋に入れ、70 °C の通風乾燥機で 5 日間以上乾燥した。その後、乾燥機より取り出して紙袋ごとビニール袋に入れて 30 分間放冷した。電子天秤により乾物重を測定した。

3) 成長パラメーターの計算方法

生育ステージ T₁, T₂ の葉面積指数を L₁, L₂, 地上部乾物重を W₁, W₂, 雌穂乾物重を E₁, E₂ とすると (Figure II-3) ,

雌穂乾物重 (EGR: Ear growth rate) $= (E_2 - E_1) / (T_2 - T_1)$

個体群成長速度 (CGR: Crop growth rate) $= (W_2 - W_1) / (T_2 - T_1)$

平均葉面積指数 (MLAI: Mean leaf area index) $= (L_2 - L_1) / (\ln(L_2) - \ln(L_1))$

純同化率 (NAR: Net assimilation rate) $= CGR / MLAI$

3. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす振幅距離の影響 (試験 3)

(1) 試験場所と供試品種

試験は、酪農学園大学作物生産ステーション (江別市) にて、実施した。RM100, 105 日の 36B08 と P1543 を用いた。36B08 はパイオニア社育成の品種で、大型の草型で茎が太く茎葉収量が多い特性を持つ。すす紋病抵抗性とごま葉枯病抵抗性に極めて優れ北海道優良品種に指定されている。

P1543 はパイオニア社育成の RM105 日の晩生品種である。雌穂が大きく、葉身傾斜角度が高い直立葉型 (アップライトリーフ) で、すす紋病抵抗性を持ち、耐倒伏性にも優れる特性を持つ (農水省 2010)。

(2) 栽植様式および栽植密度処理

栽植密度は、2013 年と 2018 年両年ともに畦幅 75 cm 株間 15 cm (8.9 本 m^{-2}) を基準とした。TR には、同じ栽植密度で個体配置の振幅距離を 10, 20, 30 cm とする区 (TR10, TR20, TR30) を設置 CR と比較した (Figure II -2)。試験配置は品種を主区、栽植様式を副区とする、分割区法 3 反復とした。

(3) 播種、施肥およびその他栽培方法

基肥として、北海道施肥標準に基づいて硫安、熔成リン肥、硫加をそれぞれ、N-14, P_2O_5 -18, K_2O -11 g m^{-2} を全層施肥した。播種はそれぞれ、2013 年は 5 月 21 日、2018 年は 5 月 2 日に 1 株 3 粒ずつ手播きし、玉ねぎ手動移植機を用いて播種深度 3 cm になるよ

うに播種した。その後フォーで鎮圧した。第4葉期前後に間引きし、1株1本立てとした。

欠株は間引き個体を移植ごとにより補植し、均一な群落の確保につとめた。補植個体は調査から除外した。

その他の栽培管理は試験2と同様の方法で実施した。

(4) 調査方法

1) 収量調査

収量調査は試験2と同様の方法で実施した。

2) 根系調査

試験3においてのみ収量調査用の刈取り終了後、各区より茎の太さが平均的な5株を選んで掘り起し、高圧洗浄機を用いて土を落とし、根系調査を行った。下位1節、2節の支持根の水平角度、本数を計測した。更に下位第1節、第2節の支持根から平均的なものを5本選抜し、長さ、太さを計測した。その後、電子天秤で原物重を測定した。更に紙袋に入れて乾燥機で、5日間以上通風乾燥させ、乾物重を測定した。

3) 倒伏関連形質

倒伏調査は試験1と同様の方法で実施した。

4. 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4)

(1) 試験場所と供試品種

試験は、酪農学園大学作物生産ステーション (江別市) にて、実施した。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。P9027はサイレージ用としては十勝を含む道東・網走・道北の比較的温暖な栽培地向けである。道央および道南地域では子実栽培用品種としても適する。現在、北海道中央部で子実用トウモロコシとして最も多く栽培されている品種である (津別農業協同組合 2018)。

(2) 栽植様式および栽植密度処理

栽植様式処理として CR, TR, NR および NTR を設け (Table II-1, Figure II-1), 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, 11 cm, NR と NTR においては 50×28.5 , 25.5, 22.5, 19.5, 16.5 cm とした. 試験区配置は品種を主区, 栽植様式を副区, 栽植密度を副々区とする 3 反復分割区法である.

(3) 播種, 施肥およびその他栽培方法

基肥として, 北海道施肥標準に基づき N-14, P_2O_5 -18, K_2O -11 g m^{-2} を硫酸, 熔成リン肥, 硫加により全層施肥した. 播種はそれぞれ, 2015 年は 5 月 13 日, 2016 年は 5 月 15 日に 1 株 3 粒ずつ手播きし, 玉ねぎ手動移植機を用いて播種深度 3 cm になるように播種した. その後フォーで鎮圧した. 第 4 葉期前後に間引きし, 1 株 1 本立てとした. 欠株は比較的生育良好な間引き個体を移植ごとにより補植し, 均一な群落の確保につとめて補植個体は調査から除外した.

また, 土壌処理としてロロックス (リニュロン水和剤) を 200 g 10 a^{-1} に希釈して動力噴霧器で全面土壌散布した. さらに, 生育処理剤として, ゲザノンフロアブル (アトラジン・メトラクロール水和剤) を 250 mL 10 a^{-1} , 第 5~6 葉期に動力噴霧器で散布した.

(4) 調査方法

1) 収量調査

収量調査は試験 2 と同様の方法で実施した.

5. 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 5)

(1) 試験場所と供試品種

試験は, 2017 年, 2018 年, 2019 年 3 ヶ年にわたり酪農学園大学作物生産ステーション

(江別市) にて実施した。供試品種として RM85 日の P8025 を用いた。

(2) 栽植様式および栽植密度処理

栽植様式処理として CR, TR および NR を設け (Table II-1, Figure II-1), 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, 11 cm, NR においては 50×28.5 , 25.5, 22.5, 19.5, 16.5 cm とした。試験区配置は品種を主区, 栽植様式を副区, 栽植密度を副々区とする 3 反復分割区法である。

(3) 播種, 施肥およびその他栽培方法

基肥として, 北海道施肥標準に基づき $\text{N}-14$, P_2O_5-18 , $\text{K}_2\text{O}-11 \text{ g m}^{-2}$ を硫酸, 熔成リン肥, 硫加により全層施肥した。窒素追肥処理区として 2017 年, 2018 年, 2019 年 3 ヶ年ともに $\text{N } 6 \text{ g m}^{-2}$ を硫酸により表層施肥する区 (N6) を設けて, 無施用区 (N0) と比較した。

播種はそれぞれ, 2017 年は 5 月 2 日, 2018 年は 5 月 1 日, 2019 年は 4 月 27 日に 1 株 3 粒ずつ手播きし, 玉ねぎ手動移植機を用いて播種深度 3 cm になるように播種した。その後フォーで鎮圧した。第 4 葉期前後に間引きし, 1 株 1 本立てとした。欠株は間引き個体を移植ごてにより補植し, 均一な群落の確保につとめて補植個体は調査から除外した。

その他の栽培管理は試験 2 と同様の方法で実施した。

(4) 調査方法

1) 収量調査

収量調査は試験 2 と同様の方法で実施した。

2) 窒素分析

穂, 包皮および茎葉試料は乾物重測定後, 粉碎して窒素分析に供した。粉碎した穂,

包皮および茎葉試料は硫酸-過酸化水素法 (水野と南 1980) で、次のように湿式分解した。包皮、茎葉試料は約 0.125 g を 25 mL 溶ガラス試験管に精秤し、数滴の純水を加えた後、濃硫酸 1 mL を添加した。その後、過酸化水素水を加えた後、アルミヒートブラックを用いて加熱・分解した。

一方、穂試料は約 0.5g を 100 mL 溶ケルダールフラスコに精秤し、濃硫酸 4 mL を添加した。その後、過酸化水素水を加熱・分解した。いずれも無色または黄緑色の透明になった時点で分解終了とし、包皮、茎葉試料は 100 mL、茎、此穂試料は 250 mL に定容した。定容した試料 1 mL に純水 4 mL を添加し、全体で 5 mL とした上でフローインジェクション法 (中島ら 1982) によって試料中の N 含有率を定量した。

3) 窒素施肥効率とその関連形質

雄穂分化期の窒素追肥における施肥効率とその関連形質の計算方法は下記の式により算出した。

窒素施肥効率 (NUE, g g⁻¹) = 窒素追肥による増収/窒素追肥量

$$= \text{子実収量 (N6-N0)} / 6$$

施肥窒素の吸収利用率 (Nab, %) = 追肥由来の吸収窒素量/追肥窒素量

$$= \text{窒素吸収量 (N6-N0)} / 6 \times 100$$

吸収窒素の増収効率 (Ngy, g g⁻¹) = 窒素追肥による子実収量増加量/追肥由来の吸収窒素量

$$= \text{窒素施肥効率} / \text{吸収窒素の増収効率} \times 100$$

窒素施肥効率 (NUE, g g⁻¹) は、追肥した窒素量当りの子実収量の増収効率を、施肥窒素の吸収利用率 (Nab, %) は追肥した窒素を吸収し利用できる割合を、吸収窒素の増収効率 (Ngy, g g⁻¹) は、吸収窒素を子実収量の増加に結びつける効率を意味している。

6. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす品種の早晚性と栽植密度の影響 (試験 6)

(1) 試験場所と供試品種

試験は、酪農学園大学作物生産ステーション (江別市) にて、実施した。供試品種として 2017 年、2018 年と 2019 年 3 ヶ年ともに RM85 日の P8025 と RM100 日の 36B08 を用いた。

36B08 はパイオニア社育成の品種で、大型の草型で茎が太く茎葉の収量が多い特性を持つ、すす紋病抵抗性とごま葉枯病抵抗性に極めて優れている。また、北海道優良品種に指定されている (農水省 2010)。

(2) 栽植様式および栽植密度処理

栽植様式処理として CR, TR および NR を設け (Table II-1, Figure II-1), 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, 11 cm, NR においては 50×28.5 , 25.5, 22.5, 19.5, 16.5 cm とした。試験区配置は品種を主区, 栽植様式を副区, 栽植密度を副々区とする 3 反復分割区法である。

(3) 播種, 施肥およびその他栽培方法

基肥として、北海道施肥標準に基づき N-14 , $\text{P}_2\text{O}_5\text{-18}$, $\text{K}_2\text{O-11 g m}^{-2}$ を硫酸、熔成リン肥、硫加により全層施肥した。播種はそれぞれ、2017 年は 5 月 2 日、2018 年は 5 月 1 日、2019 年は 4 月 27 日に 1 株 3 粒ずつ手播きし、玉ねぎ手動移植機を用いて播種深度 3 cm になるように播種した。その後フォーで鎮圧した。第 4 葉期前後に間引きし、1 株 1 本立てとした。欠株は比較的生育良好な間引き個体を移植ごてにより補植し、均一な群落の確保につとめて補植個体は調査から除外した。また、土壌処理としてロロックス (リニエロン水和剤) を $200 \text{ g } 10 \text{ a}^{-1}$ に希釈して動力噴霧器で全面土壌散布した。さらに、生育処理剤として、ゲザノンフロアブル (アトラジン・メトラクロール水和剤) を $250 \text{ mL } 10$

a⁻¹, 第 5~6 葉期に動力噴霧器で散布した.

(4) 調査方法

1) 収量調査

収量調査は試験 2 と同様の方法で実施した.

2) 部位別乾物重

部位別乾物重調査は試験 2 と同様の方法で実施した.

3) 成長パラメーターの計算方法

成長パラメーターの計算方法は試験 2 と同様の方法で実施した.

4) 相対照度の測定と吸光係数の算出

第 9~10 葉期, 第 13~14 葉期, 雄穂抽出期を目安として 2015 は 7 月 4, 18 日, 8 月 2 日に, 2016 年では 7 月 8, 15 日, 8 月 6 日それぞれに光合成光量子束密度(PPFD) を測定し, 相対照度を計出した. PPFD は地際から群落上部まで各層ごと光量子センサーを 1 回目調査時には 25 cm 間隔, 2, 3 回目調査時には 50 cm 間隔で 300 cm のポールに取り付け, 草高ごとに測定した. 相対照度は下記の式により計算した (Figure II -4).

I: ある草高における光合成光量子束密度

I₀: 群落上面における光合成光量子束密度

$$\text{相対照度} = I / I_0 \times 100$$

さらに, 吸光係数を K, 積算面積指数を F とすると, 下記の式により求められる.

$$-KF = \text{Loge}(I / I_0)$$

7. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす草型の異なる品種と栽植密度の影響 (試験 7)

(1) 試験場所と供試品種

試験は, 酪農学園大学作物生産ステーション (江別市) にて, 実施した. 供試品種とし

て 2017 年、2018 年と 2019 年 3 ヶ年ともに RM93 日の KD420 と RM100 日の 36B08 両品種を用いた。KD420 はサイレージ用としては沿岸部、山間部を除く道東・道北における比較的寒冷な地域向けの RM90 日カネコ種苗のテント品種である。耐倒伏性が高く、子実収量の高いことから、子実用トウモロコシ品種としても期待されている (農水省 2010)。

Figure II-5 に 2017 年の 8 月中下旬の葉位別の葉面積を示した。KD420 の群落全体の総葉面積指数は KD420 が 36B08 に比べてやや小さかったが、雌穂着生節位の第 8 葉以下の下位葉の葉面積指数は KD420 が 36B08 に比べて大きかった。これに対して、第 9 葉以上の上位葉は KD420 が 36B08 に比べて小さかった。したがって、KD420 は下位葉面積割合が多い品種、36B08 は相対的に上位葉面積割合が多い品種として、位置づけられ、この両品種を草型の異なる代品種として、さまざまな形質を比較した。

(2) 栽植様式および栽植密度処理

栽植様式処理として CR, TR および NR を設け (Table II-1, Figure II-1) , 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, 11 cm, NR においては 50×28.5 , 25.5, 22.5, 19.5, 16.5 cm とした。試験区配置は品種を主区、栽植様式を副区、栽植密度を副々区とする 3 反復分割区法である。

(3) 播種、施肥およびその他栽培方法

基肥として、北海道施肥標準に基づき N-14 , $\text{P}_2\text{O}_5\text{-18}$, $\text{K}_2\text{O-11 g m}^{-2}$ を硫安、熔成リン肥、硫加により全層施肥した。播種はそれぞれ、2017 年は 5 月 2 日、2018 年は 5 月 1 日、2019 年は 4 月 27 日に 1 株 3 粒ずつ手播きし、玉ねぎ手動移植機を用いて播種深度 3 cm になるように播種した。その後フォーで鎮圧した。第 4 葉期前後に間引きし、1 株 1 本立てとした。欠株は間引き個体を移植ごてにより補植し、均一な群落の確保につとめて補

植個体は調査から除外した.

その他の栽培管理は試験 2 と同様の方法で実施した.

(4) 調査方法

1) 収量調査

収量調査は試験 2 と同様の方法で実施した.

2) 部位別乾物重

部位別乾物重調査は試験 2 と同様の方法で実施した.

3) 相対照度の測定

相対照度調査は試験 6 と同様の方法で実施した.

第Ⅲ章 栽培条件が千鳥播栽培の増収効果に及ぼす影響

1. 機械播種による実規模試験における千鳥播栽培の増収効果（試験 1）

(1) 子実収量

Figure III-1 に子実収量を示した。両品種の子実収量を比較すると、疎植区では $P0023 > P8025$ であったが、標準区および密植区では $P8025 > P0023$ であった。P8025 の子実収量はすべての栽植様式において 10.3 本 m^{-2} の密植区が最も高く、 7.3 本 m^{-2} の疎植区が最も低かった。栽植様式間で比較すると、密植区と 8.5 本 m^{-2} の標準区ともに $TR \geq NR \geq CR$ であったが、栽植様式間に有意な差異がみとめられなかった。

これに対して P0023 の子実収量は、TR と NR においては密植にともない増収したが、CR においては標準区が最も高く、密植区ではむしろ低下した。疎植区では $TR > CR$ 、密植区では $TR = NR > CR$ であったが、標準区では栽植様式間で大きな差異はみとめられなかった。

(2) 収量関連形質と、収量関連形質からみた栽植様式間差異が生じる要因

Figure III-2 に地上部乾物重と収穫指数を示した。両品種の地上部乾物重を比較すると、すべての区においても中晩生品種 P0023 が早生品種 P8025 に比べて高かった。また、両品種共通して、TR と NR においては密植にともなって増加したが、CR において標準区が最も高かった。栽植様式間で比較すると、両品種共通して疎植区で $TR > CR$ であるのに対して、標準区では $TR \geq NR, CR$ 、密植区では $TR, NR > CR$ であった。

収穫指数を両品種で比較すると、すべての区で P8025 の収穫指数が P0023 に比べて高かった。また、TR と NR の収穫指数が CR に比べて低い傾向にあった。TR の収穫指数が密度にともなって減少する傾向にあるほかは、CR と NR においては、収穫指数の栽植密度に対する変化は小さかった。

Figure III-3 に一穂粒数と百粒重を示した。一穂粒数は、すべての処理区において中晩生品種 P0023 が早生品種 P8025 に比べて多かった。また、両品種共通して、すべての栽植様式で密植にともなって減少した。その減少程度は P0023 が P8025 に比べて大きかった。栽植様式間で比較すると、両品種共通して、疎植区では $TR \geq CR$ 、標準区では $TR, NR \geq CR$ であった。密植区では P0023 の一穂粒数は $NR \geq TR \geq CR$ であったが、P8025 では栽植様式間差異がみとめられなかった。

百粒重は、両品種で比較すると、P8025 がすべての区において P0023 に比べて大きかった。また、両品種共通して、すべての栽植様式で密植にともなって百粒重は減少した。密植区においては、両品種ともに $TR \geq NR \geq CR$ であったが、疎植区と標準区においては、栽植様式間に一定の差異はみられなかった。

Figure III-4 に倒伏程度と稈断面積を示した。P8025 においては大きな倒伏の発生はみとめられなかった。しかし、P0023 においては倒伏が発生し、その倒伏程度は、すべての栽植密度区において、 $TR < CR, TR$ であった。また、CR においては、密植にともなって倒伏程度は増加した。

稈断面積を両品種で比較すると、すべての区において、中晩生品種の P0023 が早生品種の P8025 に比べて高かった。また、稈断面積は、両品種共通して、すべての栽植様式区において、密植にともなって減少した。この減少程度は P0023 が P8025 に比べて大きかった。また、栽植様式間で比較すると、稈断面積は疎植区では差異はほとんどみられないが、標準区と密植区では NR と TR が CR に比べて大きい傾向を示した。

Figure III-5, 6 に P8025, P0023 それぞれの下位第二節稈の稈径と引倒し抵抗値の関係を示した。P8025 の引き倒し抵抗値は総じて稈径の太さにともなって上昇した。その上昇程度は、疎植区が標準区と密植区に比べて大きかった。稈径の太さに伴う上昇は密植区

においては栽植様式間の差異がみられ、TR が CR と NR に比べて大きかった。NR は全体的に引き倒し抵抗値が低い傾向であった。

これに対して P0023 は疎植区では、P8025 に比べて稈径が太く、引倒し抵抗値も高かった。P8025 の稈径当りの引倒し抵抗値はいずれの栽植密度区においても TR が CR に比べて大きいのにに対して、P0023 は標準区と密植区とともに CR と TR との差が判然としなかった。NR は P8025 と同様に引倒し抵抗値は低い傾向であった。

Table III-1 に稈径当りの引倒し抵抗値を示した。P8025 の稈径当り引き倒し抵抗値は総じて、TR が CR と NR に比べて高かった。これに対して P0023 は、密植区と標準区では TR と CR が NR に比べて高かった。しかし、疎植区では栽植様式間の明確な一定の差異はみられなかった。

(3) 考察

サイレージ用トウモロコシにおける TR による増収効果は、精密圃場試験 (義平ら 2012a, 2012b, 高垣ら 2013)および実規模試験 (義平ら 2013a, 2015b)の両者において確認され、収量性、品種間差異、栽植様式間差異および倒伏性などの形質について類似した傾向を示すことが知られている。

子実用トウモロコシにおいても TR による増収効果は、精密圃場においては数多く確認されている (菅原ら 2014, Song L. 2020a)。しかし、実規模栽培試験においては、精密圃場試験の 70~80%の収量にとどまるために、実際に、専用播種機を使用した実規模試験において、増収効果を確認することは非常に重要である。

Song et al. (2020b) によれば、3 ヶ年の精密圃場試験を実施し、RM85 日の早生品種であっても 10 本 m^2 以上の密植栽培することで、RM100 日の中晩生品種を超える子実収量を確保できる。さらに、千鳥播栽培すると、早生品種の増収効果が晩生品種に比べて大き

い傾向にあるため、早生品種の密植栽培による子実生産が有利である。本実規模試験においても 10.3 本 m^{-2} の密植区においては栽植様式に関係なく、RM 85 日の早生品種の子実収量が RM 100 日の中晩生品種に比べて高く、その差異は TR で拡大していることから、この精密圃場と共通した結果を示したと解釈できる。

また、吉田ら (2013)によれば、千鳥播栽培したサイレージ用トウモロコシは稈径が太くなるばかりではなく、稈基部下位第 1, 2 節から出る支持根数が増加し、根径が太くなること、また進入角度が浅くなり、稈の周辺の土壌をより幅広くつかみ、植物体の支持力が向上する。本試験において稈径当りの引き倒し抵抗値が早生品種および晩生品種の密植区において TR が CR と NR に比べて高い要因も、TR による地下部競争の緩和と支持根域の拡大が関与していると予想される。

2. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす播種期の影響 (試験 2)

(1) 試験年次の気象条件

Table III-2 に試験年次 5 ヶ年のトウモロコシの生育期間の気象概要を示した。2015 年の平均気温は 5 月の播種期を除き、生育期間を通じて平年に比べて低く推移した。積算降水量は登熟後期の 9 月に多雨に経過したほかはほぼ平年並みに推移した。日射量は生育期間を通じて、多照に推移し、特に、出芽期の 5 月および登熟前期の 8 月、それぞれ 100, 55 MJ m^{-2} 以上多照に推移した。したがって、2015 年の気象は生育全般のやや低温、多照、登熟後期の多雨として特徴づけられる。

2016 年の平均気温は、7 月までの栄養成長期間、特に、6 月の栄養成長前期に低く推移し、8 月の開花期および登熟前期にやや高温に推移した。降水量は栄養成長前期から登熟前期までの 6 月から 8 月にかけて多雨に経過した。特に、登熟前期の 8 月の平年の 2.5 倍の降水量であった。日射量は栄養成長後期および登熟前期の 7, 8 月は多照に推移した。

したがって、2016 年の気象は栄養成長期のやや低温、登熟前期のやや高温、多雨として特徴づけられる。

(2) 子実収量と地上部乾物重

Figure III-7 に播種期が異なる栽植様式で栽培された P8025 の子実収量に及ぼす影響を示した。P8025 の子実収量は、2015、2016 両年とも晩播にともなって有意に減少した。子実収量の栽植様式間差異は 2015 年が 2016 年に比べて大きかった。これに対して P9027 の子実収量は 5 月 16 日播区から 5 月 31 日播区にかけて減少したが、5 月 1 日播区から 5 月 16 日播区の減少は P8025 に比べて小さく、むしろ 2016 年においては増加した。子実収量の栽植様式間差異は P8025 と同様に 2015 年が 2016 年に比べて大きかった。

分散分析の結果をみると(Table III-3), P8025 の子実収量は、2 ヶ年共通して播種期間差および播種期と栽植様式の間に有意性がみとめられた。しかし、2016 年で栽植様式と播種期の交互作用には有意性は認められなかった(Table III-4)。

Figure III-7 に播種期が異なる栽植様式で栽培された P9027 の子実収量に及ぼす影響を示した。P9027 では、2 ヶ年共通して栽植様式と播種期の交互作用に有意性が認められなかった (Table III-5, 6)。しかし、両年で栽植様式間には有意性は認められた。P9027 における子実収量および関連形質で分散分析を行ったところ、地上部乾物重と収穫指数に栽植様式、播種期およびその交互作用に有意性が認められ、晩播による地上部乾物重の減少程度に栽植密度間の差異があることが確認できた。さらに、品種、栽植様式、播種期の 3 要因での分散分析をみると、子実収量、地上部乾物重、収穫指数には様式と播種期の間の交互作用に有意性がみとめられた (Figure III-8, Table III-7)。

(3) 地上部乾物重および葉面積指数の推移

Figure III-9 に葉面積指数は晩播にともなって栄養成長前期の上昇は遅れ、最大期の葉

面積指数も低下する傾向にあった。5月29日播区の最大期の葉面積指数は、CRがTRとNRに比べて小さい傾向にあった。最大期の地上部乾物重も同様に晩播にともなって減少し、その減少程度はTRとNRがCRに比べて小さい傾向にあった。

(4) 成長解析

Figure III-10 に登熟期間における平均葉面積指数 (MLAI)および純同化率 (NAR)と穂重増加速度 (EGR)の関係を示した。栄養成長後期から生殖成長前期のCGRは栄養成長後期から生殖成長前期の個体群成長速度 (CGR)はTRとNRがCRに比べて高かった。同時期の平均葉面積指数は5月1日播区では栽植様式間の差異は認められなかったが、5月29日播区では差異が認められた。さらに、同時期の純同化率は播種期に関係なく、TR, NR > CRであった。

(5) 考察

Nguyen et al. (2017) によれば、米国の篤農家のデータを集めると、米国のトウモロコシの収量を最大とする播種期は緯度によってことなり 40~50° N 4月下旬が最適である。一方、北日本においてはサイレージ用トウモロコシの播種期の早限は平均気温 8℃、地温 10℃とされ (戸澤 2005), 北海道中央部は5月上旬である。試験地の江別市、長町町ともに 43° N であるが、播種適期は米国の基準に比べて遅いといえる。

最適播種と考えられる早播区の子実収量はすべて TR, NR ≥ CR であった。晩播にともない子実収量は低下いくが、その低下程度はTRにおいてP8025の2015年を除いて最も小さかった。この要因を収量関連形質から考察すると、地上部乾物重も晩播に伴う減少 TR < NR, CR であった。これに対して収穫指数の変化は両年ともに栽植様式間差異が小さかったことから、5月29日播区におけるTRの子実収量の高さは、TRの地上部乾物重の高さに起因した。さらに、一穂粒数と百粒重の関係からみると、晩播におけるTRの両者

の高さに由来し、特に百粒重の重さが主要因であると考えられた。

また、成長解析から検討すると、晩播区における TR の地上部乾物重の高さは、TR における高い栄養成長後期から生殖成長前期までの個体群成長速度 (CGR)によってもたらされているといえる。さらに、同時期の CGR が平均葉面積指数 (MLAI) と純同化率 (NAR) のどちらに影響されているのかを考察すると、NAR は播種期にかかわらず、栽植様式間で TR, NR \geq CR の傾向にあるのに対して、MLAI は晩播において TR \geq NR, CR の傾向にあることから、晩播区における TR の優れた地上部乾物重は、栄養成長後期から生殖成長前期までの MLAI の高さに由来すると考えられた。

この草冠が閉じる栄養成長後期までの TR の葉面積指数の上昇の早さは、後述する試験 5, 6, 7, 8 における栽植密度反応の栽植様式間差異のうち、疎植時の栽植様式の差異と共通するものであるととらえることができる。

また、子実収量の栽植様式間差異は、特に晩播区において 2015 年が 2016 年に比べて顕著であった。この年次間差異が生じる要因を両年の気象条件から考察すると、2015 年は播種を実施した 5 月の平均気温が 2016 年に比べてかなり高く、また、日射量も多かったことから、早播区と晩播区における初期生育の差異が生じやすい環境にあったといえる。さらに、2016 年は 6 月の低温は、早播区と晩播区における雄穂分化期までの葉面積指数の差異を打ち消す傾向に作用したと推察される。これらの事が年次間差異をもたらした気象要因であると考えられる。

以上より、狭畦栽培、千鳥播栽培の増収効果は、早生品種共通して晩播にともなって大きい傾向にあり、この変化は地上部乾物重の変化が収穫指数に比べて、百粒重が一穂粒数に比べて強く関与すると考えられた。さらに、晩播区では純同化率のみならず葉面積指数の差異も加わるため、子実収量の栽植様式間差の差が拡大すると推察された。ま

た、出芽期に当たる 5 月から 6 月前半が高温・多照に経過するほどこの傾向は顕著であると考えられた。

3. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす振幅距離の影響（試験 3）

(1) 子実収量

Figure III-11 に千鳥播栽培における振幅距離が子実収量に及ぼす影響について示した。2018 年の子実収量は全ての処理区において、2013 年に比べて収量が低かった。子実収量は両年、両品種通じて振幅距離が長くなるにつれ増加した。慣行区を 100 としたときの子実収量の百分比は 2 ヶ年込みにすると、TR10, 20, 30 それぞれ、36B08 では 112~118, 116~119, 132~136, P1543 では 108~114, 116~119, 131 であった。

2013, 2018 年 2 ヶ年の子実収量と収量関連形質を Table III-8 に示した。分散分析の結果をみると、子実収量は、2 ヶ年共通して品種間および振幅距離の間に有意性がみとめられた。しかし、品種と振幅距離の間の交互作用には有意性はみとめられなかった。

(2) 収量関連形質と、収量関連形質からみた処理間差異が生じる要因

2018 年の地上部乾物重は、子実収量と同様に全ての処理区において、2013 年に比べて低かった。また、両年および両品種共通して、振幅距離が長い処理区ほど地上部乾物重が大きかった (Table III-8)。分散分析の結果をみると、地上部乾物重は子実収量と同様に、2 ヶ年通じて品種間および振幅距離間に有意差がみられた。しかし、品種と振幅距離の交互作用には有意性は認められなかった。

2018 年の収穫指数は、2013 年に比べて両品種とも低かった。2018 年の収穫指数は両品種においては、2013 年の収穫指数は P1543 において TR30 が最も高く CR が最も低かった。しかし、両品種とも有意な処理間差異はみとめられなかった。

一穂粒数も両年、両品種を通じて、2018 年が 2013 年に比べて少なかった。36B08 では

両年通じて、 $TR30 \geq TR20 > TR10 > CR$ であった。しかし、P1543 は 2013 年においては、 $TR30 \geq TR20 \geq TR10 > CR$ であったものの、2018 年においては振幅距離にともなう一穂粒数の増加は小さかった。分散分析の結果、両品種とも品種間および振幅距離間で有意差が認められたが、品種と振幅距離の間には有意な交互作用がみとめられなかった。

百粒重は両年とも品種間差異がみられ、36B08 が P1543 に比べて大きかった。また、36B08 では多収年次の 2018 年が低収年次の 2013 年に比べて大きかった。さらに 2013 年における振幅距離にともなう百粒重の増加は 36B08 が P1543 に比べて顕著であった。分散分析の結果、百粒重の品種間については両年次とも有意性が認められた。しかし、振幅距離間差異は、2013 年には有意性が認められた。

完熟期の倒伏程度は、2013 年には倒伏の発生は皆無であったものの、2018 年に両品種で倒伏が発生した。特に、36B08 の倒伏程度が大きかった。

2018 年 9 月 5 日に台風 21 号の強風雨のため両品種とも倒伏が発生した。しかし、その発生程度には品種間差異がみられ、どの処理区においても倒伏程度は $36B08 > P1543$ であった。また両品種共通して、振幅距離が長いほど倒伏程度は低く、P1543 の TR20 と TR30 区では倒伏の発生はみられなかった。2018 年の分散分析の結果、倒伏程度には品種間および振幅距離間には有意性が認められた。しかし、品種と振幅距離の間の交互作用には両年とも有意性は確認できなかった。

Figure III-12, 13 に千鳥播栽培における振幅距離が成熟期の支持根域の大きさに及ぼす影響を示した。振幅距離が長くなるほど支持根の進入角度が浅くなり各植物体の支持面積が増加する傾向がみられた (Table III-9)。

(3) 考察

2018 年は栄養成長初期の低温と、栄養成長期中期、後期の多雨と日照不足、さらに 9

月 5 日の台風による倒伏のため、日射量が多く気温が高めに推移した 2013 年に比べて、子実収量は 25~35%程度低かった。しかし、両年、両品種共通して振幅が長いほど多収を示した。すなわち、収量レベルが異なる多収年次、低収年次であっても、千鳥播栽培によって振幅距離を広げることは増収につながる事が確認された。

子実収量が年間を通して $TR30 \geq TR20 \geq TR10 > CR$ であった要因を地上部乾物重と収穫指数の関係から考察すると、地上部乾物重の振幅距離による変化は、ほぼ子実収量と同調しており、2018 年地上部乾物重が 2013 年に比べて 30%減収しているのにもかかわらず、両年を通して $TR30 \geq TR20 \geq TR10 > CR$ であった。地上部乾物重の増収効果は TR10 が 13~23, TR20 が 13~22, TR30 が 23~36%であった。

一方、収穫指数は、2013 年において処理間差異が認められず、2018 年においても T30 が他の処理区に比べて若干高いほかは大きな処理間差異はみられなかった。この事から子実収量が振幅距離にともなう増加するのは、振幅距離にともなう地上部乾物重の増加を反映したものであると考えられる。

さらに、一穂粒数と百粒重の関係からみると、一穂粒数は、両年、両品種共通して $TR30 \geq TR20 > TR10 > CR$ と処理間差異が明確であった。これに対して、百粒重では品種間差異はあったものの、低収年次の 2018 年には処理間差異は認められなかった。この事から振幅距離にともなう子実収量の変化は、主として一穂粒数の差異に由来し、登熟条件の良い多収年次においては百粒重の差異も関与すると考えられた。

完熟期の倒伏程度は、振幅距離が長くなるほど両品種共通して低下した。さらに、支持根の進入角度が浅くなり各植物体の支持面積が増加した。また下位節の稈茎や稈断面積も増加した。振幅距離を広げることにより、ころび倒伏を軽減できることは確認できたが、2018 年度にみられなかった折損型倒伏 (稈が折れることによる倒伏)に対しては、

有効かどうか、今後地上部モーメントを測定するなどして確認する必要がある。また、倒伏を防止する上で重要な支持根の発達、品種の遺伝的な要因、土壌水分や温度などの影響されるものと考えられる。今後、TRによる根系全体の形態変化について調査していく必要がある。

4. 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 4）

(1) 子実収量

Figure III-14 に千鳥播栽培における畦幅が子実収量に及ぼす影響について示した。子実収量は、2015 年と 2016 年両年共通して、すべての栽植密度区において NTR が最も大きく、CR が最も小さかった。7.8 本 m^2 以下の疎植区における子実収量は、両年共通して、 $\text{NTR} \geq \text{TR} > \text{NR} > \text{CR}$ 、12.1 本 m^2 以上の密植区における子実収量は $\text{NTR} > \text{TR} > \text{NR} > \text{CR}$ であった。最も収量の高い 8.9~10.3 本 m^2 の範囲における子実収量は $\text{NTR} > \text{TR} = \text{NR} > \text{CR}$ であり、TR と NR の差異はみとめられなかった。分散分析の結果、子実収量には栽植様式、栽植密度およびその両者の交互作用にそれぞれ有意性がみとめられた (Table III-10)。

栽植密度にともなう子実収量の変化はすべて栽植様式において二次の回帰曲線が適合し (Figure III-14, Table III-10)、子実収量は 8.5~10.5 本 m^2 の栽植密度において最高値を示し、その最適栽植密度以下の疎植区でも最適栽植密度以上の密植区でも子実収量は減少した。

最適栽植密度における子実収量の最高値はすべての栽植様式において 2016 年が 2015 年に比べて大きかった。その最高値と、疎植区または密植区における子実収量の最低値の間の差異は、CR と NR が NTR と TR に比べて大きかった (Figure III-14)。栽植密度に対する子実収量の二次の回帰曲線の比例係数 a の絶対値は両年を通じて NTR と TR が NR

と CR に比べて低かった (Table III-10) .子実収量の回帰曲線の頂点から求めた最適栽植密度は TR, NR および NTR が CR に比べて高い傾向にあった. 栽植様式間には有意な差異がみとめられた.

(2) 収量関連形質と、収量関連形質からみた処理間差異が生じる要因

地上部乾物重は 2015 年と 2016 年兩年を通じて、子実収量と同様にどの栽植密度においても NTR が最も大きく、CR が最も小さかった (Figure III-15). これらの栽植密度間差異は 2016 年が 2015 年に比べて大きかった. 栽植密度間差異, TR の地上部乾物重は 7.0 本 m^{-2} の疎植区, 12.1 本 m^{-2} の密植区では NR に比べて大きかったが, 7.8~10.3 本 m^{-2} 区では両者の間で大きな差異がみとめられなかった. これら栽植密度にともなう地上部乾物重の変化は 2 次の回帰曲線が適合した (Figure III-15, Table III-10). 地上部乾物重における全体の分散分析結果では兩年ともに栽植様式, 栽植密度, 栽植様式と栽植密度の間の交互作用に有意性がみとめられた.

栽植密度に伴う地上部乾物重の回帰曲線の比例係数 a の絶対値は NTR と TR が NR と CR に比べて小さかった. しかし, 回帰曲線の頂点から求められる最適栽植密度は兩年を通じて栽植様式間の差異はみとめられなかった.

収穫指数はどの栽植様式においてもすべての栽植密度において 2016 年が 2015 年に比べて高かった (Figure III-15). すべて, 栽植密度区において収穫指数は密度にともなって減少した. その減少程度を収穫指数の最密植区と最疎植区の比でみると, この比は NTR, TR, NR<CR であった (Table III-11). 収穫指数の全体の分散分析結果では, 栽植様式間で有意な差異がみとめられた. しかし, 年次間, 栽植様式と年次の交互作用には有意性がみとめられなかった.

一穂粒数は, どの処理においても総じて 2015 年が 2016 年に比べて高かった. また,

一穂粒数は両年を通じてすべての栽植様式において栽植密度にともない減少し(Figure III-16), その変化は一次の回帰式が適合した (Table III-11). 栽植密度にともなう一穂粒数の減少程度, すなわち, 一次回帰式の傾きは NTR, TR および NR が CR に比べて大きかった. 一穂粒数における全体の分散分析結果では, 一穂粒数は栽植様式間および年次間の差異は有意であったが, 栽植様式と年次の間には有意性がみとめられなかった.

百粒重はすべての処理区において 2016 年が 2015 年に比べて大きかった. また, 両年を通じてすべての栽植様式において栽植密度にともなう低下した (Figure III-16). その低下程度には栽植様式間で差異がみられなかった. 栽植密度にともなう百粒重の低下にも一次回帰式が適合し, その回帰直線の傾きには栽植様式間で差異がみられなかった (Table III-11). 百粒重における全体の分散分析結果では, 有意な年次間差異がみとめられた. しかし, 栽植密度間および栽植密度と年次間の交互作用には有意性は認められなかった.

(3) 考察

トウモロコシの栽植密度試験は数多くなされているものの, ほとんどの場合栽植密度は 2~3 段階であることが多く, 5 段階以上の栽植密度反応を調査しようとした例は多くない. 本試験において 5 段階の密度試験を行い, 子実収量の栽植密度に対する変化は慣行区, 狭畦区, 千鳥区ともに二次の回帰式が適合した. また, 収穫指数および百粒重の栽植密度に対する変化は一次の回帰式が適合した.

義平ら(2008)よれば, サイレージ用トウモロコシに対して 6.0~16.7 本 m^{-2} の 9 段階の栽植密度試験を実施し, 地上部乾物重収量と雌穂収量は, 栽植密度に対して二次の回帰式が, 雌穂長と一穂粒数は一次の回帰式が適合する. さらに, Tetio-Kagho and Gardner(1998)よれば, トウモロコシの子実収量および面積当たり粒数の栽植密度反応は

二次回帰式に従う。また、Jeschke (2010)によれば 8.8~10.4 本 m^{-2} の 10 段階におけるトウモロコシの子実収量は栽植密度に対して 13 本 m^{-2} までの栽植密度区では 2 次の回帰式が適合するが、13 本 m^{-2} 以上の密植区になると、密植にともなう子実収量の減少は 2 次の回帰式には適合しなくなるとしている。本試験は栽植密度 7~12 本 m^{-2} における栽植密度試験であり、上記の報告と類似した結果を示しているといえる。また、Gozubenli et al. (2004)は慣行区と千鳥区両方において、子実収量の栽植密度に対する二次の回帰式が適合することを指摘しており、この報告ともほぼ一致した結果であるととらえることができる。

本試験においてトウモロコシの子実収量と地上部乾物重は、一部の栽植密度区を除き、ほとんどの処理区において $\text{NTR} \geq \text{TR} > \text{NR} > \text{CR}$ であった。また、栽植密度に対する子実収量の二次回帰曲線から求めた、収量を最大とする適正栽植密度は NTR, TR, NR が CR に比べて 0.5~1.6 本 m^{-2} 高かった。

また、Finck (2003)や Stewart (2000)も千鳥播区と慣行区を比較する多くの栽培試験を実施した結果、平均すると千鳥播区の子実収量は慣行区に比べて高いとしている。さらに、AgridGold Research (2009)によれば、米国コーンベルトを中心とした、アイオワ、イリノイ、インディアナ、オハイオ、ケンタンキー、テネシー、ミシシッピ州それぞれ 2, 13, 10, 1, 5, 14, 1 ヶ所の計 36 の試験地において、サイレージ用トウモロコシに対する千鳥播の栽培試験を実施し、その約 70 %の試験地において千鳥区の地上部乾物収量が慣行区に比べて高かった。千鳥播栽培区の適正栽植密度は 11 本 m^{-2} 程度であり、慣行区に比べて平均で 1~1.5 本 m^{-2} 程度高かった。本試験における子実収量および地上部乾物収量の栽植様式間差異および各様式の最適栽植密度もこれらの研究結果とほぼ類似した結果を示しているといえる。

一方、AgriGold Research (2009)は千鳥区が慣行区に比べて高かった事例を集め、10 本 m^{-2} の栽植密度付近では子実収量の増収効果は 7.5~14%の変異が存在する。また、多収とならなかった 30%のケースにおいては、千鳥播の増収効果が小さい傾向にある品種を使用したことも影響している。本試験は、北海道中央部で、子実用トウモロコシ品種として最も普及している P9027 のみの結果である。今後、千鳥播により増収効果の不安定さについて、どのような栽培環境の違いや品種間差異が関係するのかを検討していく必要がある。

子実収量の栽植密度反応を地上部乾物重と収穫指数の関係から考えると、地上部乾物重は子実収量とほぼ同様の栽植密度反応を示すのに対して、収穫指数の密植にともなう低下は、 $NTR \leq TR \leq NR < CR$ の傾向にあった。このことから、子実収量およびその密度反応の栽植様式間の差異は主として密植にともなう収穫指数の低下程度の差異によってもたらされているといえる。

次に子実収量の栽植密度反応を一穂粒数、百粒重との関係から考えると、密植にともなう百粒重の低下には栽植様式間に大きな差異が見られなかったのに対して、密植にともなう一穂粒数の低下は $NTR \leq TR \leq NR < CR$ であったことから、子実収量およびその密度反応の栽植様式間の差異は主として密植にともなう一穂粒数の減少程度の差に起因すると考えられる。

義平 (2015a) によれば、トウモロコシの雌穂長と一穂粒数は個体の最短距離に大きく影響され、株間 15 cm 未満になると、同じ栽植密度でも雌穂長と一穂粒数の減少が激しくなる。各処理区の最短個体間距離と一穂粒数における千鳥播 (TR) と慣行区 (CR) および狭畦千鳥区 (NTR) と狭畦区 (NR) の比の間の関係を検討したところ両者の間には、それぞれ、正の有意な相関関係がみとめられた。すなわち、同じ栽植密度でも千鳥播に

よって個体間距離を長く保つことが一穂粒数の多さにつながっていることが確認された。さらに、千鳥区における密植にともなう個体間距離の変化の小さい、NTR 区および TR 区における密植時における一穂粒数の減少を緩和し、NTR および TR における子実収量の二次回帰曲線の比例係数 a の絶対値が NR と CR に比べて低い (Table III-12)。すなわち、NTR と TR における子実収量の栽植密度に対する安定性をもたらしめていると考えられる。

第Ⅳ章 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 5)

1. 試験年次の気象条件

Table IV-1 に試験年次 5 ケ年のトウモロコシの生育期間の気象概要を示した。2017 年の平均気温は 7 月の栄養成長後期に高温に推移したが、登熟期間は平年に比べて 1.3~1.8 °C 低く推移した。降水量は栄養成長前期の 6 月と登熟後期の 9 月は多雨に経過したが、その他の期間はほぼ平年並みに推移した。日射量は栄養成長後期から登熟後期まで 7~9 月を通じて多照に推移した。したがって、2017 年の気象は、栄養成長後期の高温、多照、登熟期間のやや低温、多照として特徴づけられる。

2018 年の平均気温は生育期間を通じて低温に推移し、特に、栄養成長前期の 6 月に 1.7 °C、登熟前期は 2.3 °C 低く推移した。降水量は登熟後期の 9 月を除き、生育期間を通じて多雨に推移した。特に、栄養成長後期から登熟前期の 7 月から 8 月にかけて平年の 2 倍以上の降水量で経過した。日射量は他の 4 ケ年に比べて完熟期を迎える 10 月を除いて生育期間全般に寡照推移した。したがって、2018 年の気象は、栄養成長期から登熟前期にかけての低温、多雨、寡照として特徴づけられる。

2019 年の平均気温はほぼ平均並みに推移した。降水量は登熟前期の 8 月を除いて、平年に比べて少雨に経過した。日射量は平年に比べて多照に推移し、特に、8-10 月の生殖

生長期間を通じて高温に推移した。したがって、2019 年の気象は栄養成長期間の少雨，多照，生殖生長期間の高温，多照として特徴づけられる。

2. 子実収量

Figure IV-1 に 3 ヶ年の子実収量に栽植密度反応を示した。子実収量はすべての栽植様式のすべての栽植密度区においても 3 ヶ年においては追 N6 > 追 N0 であった。また，両処理の子実収量は 3 ヶ年に通してすべての密度区において $TR \geq NR > CR$ であった。また，追 N6 区と追 N0 区における子実収量の差異は，すべての年次と処理区において最適栽植密度付近で最も大きかった。また，年次で比較すると，2019 年が最も大きく，2018 年が最も小さかった。

P8025 における子実収量の栽植密度に対する変化は，3 ヶ年がすべての栽植様式において 2 次回帰式が適合した (Table IV-2)。分散分析の結果，子実収量の栽植密度反応の大きさを示す 2 次回帰式の係数 a の絶対値は有意な年次間と様式間差異は認められたが，窒素処理およびその交互作用には有意性が認められなかった。最適栽植密度を示す係数 b は年次間，栽植様式間およびその交互作用ともに有意性は認められたが，窒素処理と栽植様式および試験年次の間の交互作用には有意性が認められなかった。しかし，最適栽植密度時の最大収量を示す係数 c は窒素処理およびその年次，栽植様式との間の交互作用に有意性が認められた。

3. 収量関連形質の栽植密度反応

Figure IV-2 に 3 ヶ年の地上部乾物重の栽植密度反応を示した。地上部乾物重はすべての密度を通して $NR \geq TR > CR$ であった。また，両年を通じてすべての栽植様式，すべての栽植密度においても追 N6 > 追 N0 であった。また，その年次間差異は 2019 年が 2017 と 2018 年に比べて大きかった。P8025 における地上部乾物重の栽植密度に対する変化は

3 ヶ年すべての栽植様式において 2 次回帰式が適合した。地上部乾物重の 2 次回帰式においては係数 b および c についてはすべて有意な処理間差異が認められなかったが、係数 a の絶対値においては栽植様式間および年次間に有意性がみとめられた (Table IV-2)。

P8025 における収穫指数の疎植密植比は有意な栽植様式間差異がみとめられなかった、3 ヶ年共通して追 N6 \geq 追 N0 であった。収穫指数はいずれの栽植様式にも密植に伴い低下した (Figure IV-3)。その収穫指数の低下程度すなわち回帰直線の傾きは 3 ヶ年共通して、CR が他の栽植様式に比べて大きかった。

一穂粒数はすべての栽植密度において追 N6 $>$ 追 N0 であった。また、3 ヶ年共通して、栽植密度に伴う減少した (Figure IV-4)。その一穂粒数の減少程度は TR が NR と CR に比べて小さかった。

百粒重は、2017 年の NR を除いて両品種、両年次ともに栽植密度に伴って減少した (Figure IV-5)。減少程度を栽植密度に対する百粒重回帰直線の傾きから見ると、この回帰直線の傾きは、追 N0 区 $>$ 追 N6 区であった。また、百粒重の密植に伴う減少は、千鳥区と狭畦区が慣行区に比べて、また、追 N6 区が追 N0 区に比べて小さい傾向にあった。

一穂粒数および百粒数の栽植密度に対する変化は両年とも、すべての栽植様式において 1 次回帰式が適合した (Table IV-3, 4)。一穂粒数の 1 次回帰式の傾き a の絶対値は栽植様式間、窒素処理および年次間差異がみとめられなかった、3 ヶ年通じて追 N6 \geq 追 N0 区であり、また、総じて 2019 年が最も大きく、2017 年が最も小さかった。また、係数 b は年次間差異と窒素処理の間の交互作用は有意性が認められた。

百粒重の 1 次回帰式の傾き a の絶対値は、窒素処理及び年次間差異と様式間差異の交互作用が認められた、係数 b は窒素処理と様式間差異が認められ、2017 年が最も大きく、2018 年が最も小さかった。

4. 窒素吸収および窒素施肥効率の関連形質

Figure IV-6 に窒素施肥効率を示した。窒素施肥効率は 2019 年の 7.0 本 m^{-2} の疎植区を除いて、両年を通じて TR と NR が CR に比べて高かった。また、窒素施肥効率はすべての栽植密度区および栽植様式区において多収であった 2019 年が、低収であった 2018 年に比べて高かった。

Figure IV-7 に追肥窒素の吸収利用率を示した。追肥窒素の吸収利用率は 2019 年の 7.0 本 m^{-2} の疎植区を除いて両年を通じて TR と NR が CR に比べて大きかった。また、追肥窒素の吸収利用率は窒素施肥効率と異なり 2018 年と 2019 年の間に大きな年次間差異が見られなかった。

Figure IV-8 に窒素吸収量を示した。すべての栽植密度および栽植様式区において追 N6 区の窒素吸収量が追 N0 区に比べて有意に大きかった。また、窒素吸収量は 2018 年の CR を除いて 10 本 m^{-2} の密植区において他の密度区に比べて有意に大きかった。窒素吸収量はすべての処理区において、多収の 2019 年が低収であった 2018 年に比べて大きかった。この傾向は追 N6 区において追 N0 区に比べて顕著であった。

Figure IV-9 に吸収窒素の増収効率を示した。吸収窒素の増収効率は多収年次 2019 年が低収年次の 2018 年に比べて、すべての処理区において高かった。また、吸収窒素の増収効率は、2018 年においては 8.9 本 m^{-2} 以下の疎植区においては栽植様式間に差異がみられなかった。これに対して、10 本 m^{-2} 以上の密植区においては TR と NR が CR に比べて大きかった。また、2019 年においても 7.8 本 m^{-2} 以下の疎植区においては $\text{CR} \geq \text{TR} > \text{NR}$ であった。これに対して、8.9 本 m^{-2} 以上の密植区においては $\text{TR}, \text{NR} > \text{CR}$ であった。

Table IV-5 に雄穂分化期の窒素追肥における完熟期の窒素吸収量および窒素施肥効率とその関連形質を示した。追 N0 および追 N6 区の窒素吸収量は分散分析の結果、両年を

通じて栽植様式および栽植密度間に有意性が得られ、TR と NR が CR に比べて多く、また、10 本 m^{-2} 区では他の栽植密度区に比べて多かった。また、栽植様式と栽植密度の間の交互作用に有意性が認められた。

窒素施肥効率 (NUE)は分散分析の結果、両年ともに栽植様式および栽植密度間に有意性が認められ、TR と NR が CR に比べて高く、また、10 本 m^{-2} 区が他の栽植密度に比べて高い傾向を示した。また、栽植様式と栽植密度の間の交互作用にも有意性が認められ、両年通じて、10 本 m^{-2} 以上の密植区における TR と NR 区の窒素施肥効率が最も高かった。

施肥窒素の吸収利用率 (Nab)は、分散分析の結果両年ともに、栽植様式および栽植密度間に有意性が認められ、TR と NR が CR に比べて高く、また、10 本 m^{-2} 以上の密植区が他の栽植密度に比べて高かった。さらに、栽植様式と栽植密度の交互作用に有意性が認められ、10 本 m^{-2} 以上の TR と NR の施肥窒素の吸収利用率が最も高かった。

吸収窒素の増収効率 (Ngy)は 2018 年には栽植様式間、2019 年には栽植密度間に有意性が認められた。また、両年を通じて栽植様式と栽植密度の間に有意的な交互作用が認められ、疎植区では CR が他の栽植様式に比べて密植区では TR と NR が CR に比べてやや高い傾向を示した。

5. 考察

(1) 栽植密度反応に及ぼす窒素追肥効果

Cox and Cherney (2002), Cox et al. (2006) によれば、狭畦栽培によるトウモロコシの子実収量の増収効果は窒素増肥、密植栽培を組み合わせることにより高くなる。本試験結果も千鳥播および狭畦栽培の増収効果は 10.3 本 m^{-2} の密植と追 N6 区において最も高くなったことから、これらの報告と増収効果の栽植密度および窒素増肥の応答は一致する

といえる。

また、本試験結果では、最適栽植密度は、慣行区、千鳥区、狭畦区とともに追肥窒素により $0.1 \sim 0.5$ 本 m^{-2} 程度高くなった。しかし、この窒素追肥による最適栽植密度における最適様式間差異は非常に小さいと考えられた。この最適栽植密度の様式間差異は、子実収量の収量レベルとも関係のあると考えられる。すなわち、低収の 2018 年では慣行区、千鳥区、狭畦区ともに同程度の最適栽植密度であったのに対し、多収であった 2017 年では千鳥区と狭畦区で、慣行区に比べて最適栽植密度の差異が大きかった。言い換えると、追肥窒素による最適栽植密度の増加における栽植様式間差異は窒素吸収が不十分な場合は、それほど差がないが、窒素吸収が順調な場合は個体間距離が大きい様式 (千鳥区、狭畦区) が慣行区に比べて有利であると考えられる。

(2) 収量構成要素からみた窒素追肥が栽植密度反応に及ぼす要因

これらの増収効果を地上部乾物重と収穫指数の関係から見ると、地上部乾物重は子実収量と同様に栽植密度の間に二次回帰曲線が得られ、子実収量と同調した変化を示した。これに対して、収穫指数は追 N6 区と追 N0 区による差異があまり変化を示さず、判然としなかった。

また、一穂粒数と百粒重の関係から見ると、一穂粒数の密植にともなう低下は追 N6 区と追 N0 区で栽植様式間の差異はみられなかった。また、百粒重においても同様であり、密植にともなう低下は、千鳥区と狭畦区が慣行区に比べ小さい傾向にあった。したがって、千鳥播栽培、狭畦栽培と追肥窒素を結びつけた時の増収効果は、収穫指数、一穂粒数と百粒重の密植にともなう減少程度の緩和によりもたらされていた。

(3) 窒素施肥効率およびその関連形質からみた栽植密度反応に及ぼす要因

2019 年における品種、処理区を込みにした平均子実収量は概ね 1026 g m^{-2} であったの

に対して、2018 年は、 630 g m^{-2} にとどまった。2019 年の増収要因を気象データから考察すると、2019 年は 2018 年に比べて 7~9 月の平均気温 $0.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、日射量がそれぞれ 10 % 多く、7~8 月の降水量が 50 % 少なく、トウモロコシの成長速度が最も高く、雌穂の縦粒数が決定する重要な時期の気象条件が 2018 年に比べ恵まれたため、多収を示したと考えられる。

NUE は両年ともに密植にともない上昇した。多収年次 2019 年の窒素施肥効率 NUE は、すべての栽植密度区において低収年次 2018 年に比べて高かった。2019 年の高い NUE は、Nab と Ngy に分けて考察すると、Nab は、特に 8.3 本 m^{-2} 以下の疎植において 2019 年 \geq 2018 年であるのに対して、Ngy は栽植密度に関係なく、2019 年 $>$ 2018 年であった。

NUE を栽植様式間で比較すると、TR と NR の NUE が、多収年次、低収年次ともに、CR に比べて高く、密植にともなってその栽植様式間差異は拡大する傾向を示した。この要因を Nab と Ngy に分けて考察すると、 8.9 本 m^{-2} 以下の疎植区において Nab の栽植様式間差異が大きかったのに対して、Ngy は 10.3 本 m^{-2} 以上の密植区において、TR と NR が CR に比べて高かった。

これは、密植区においては、根長密度も高いと予想され、Nab の様式間差異が生じにくいのに対して、葉の相互遮蔽が多く、窒素代謝とは直接関係しない受光態勢の栽植様式間差異が反映しやすいために、Ngy に差異が生じやすいと推察される。逆に、疎植においては、根長密度が低いと予想され、個体配置の違いが、畦間に施用された窒素の吸収利用率の差異として反映しやすいのに対して、相対的に葉の相互遮蔽が少ないために、受光態勢の栽植様式間差異が相対的に小さく、Ngy の差異が生じにくいと考えられる。

第 V 章 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす品種特性と栽植密度の影響

1. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす品種の早晩性と栽植密度の影響 (試験 6)

(1) 子実収量

Figure V-1 に栽植密度にともなう子実収量の変化を示した。子実収量はすべての栽植様式のすべての栽植密度区においても両品種ともに2019年が最も大きく、2018年が最も小さかった。両品種の子実収量の差異は2019年においては非常に小さかった。両品種の子実収量は2017年と2019年においてすべての密度を通して $TR \geq NR > CR$ であったが、2018年において P8025 が $TN \geq NR > CR$ で、36B08 が $TR \geq CR > NR$ であった。さらに、この栽植様式間の差異は、両品種ともに2019年が2017年に比べて小さかった。

P8025 と 36B08 における子実収量の栽植密度に対する変化は、3ヶ年にすべての栽植様式において二次回帰式が適合した (Table V-2)。分散分析の結果、子実収量の栽植密度反応の大きさを示す2次回帰式の係数 a の絶対値は有意な年次間差異、品種間差異、様式間差異およびその交互作用は認められたが、栽植様式間、年次間差異、品種間差異の交互作用には有意性が認められなかった。

最適栽植密度を示す係数 b は年次間および栽植様式間の交互作用に有意性は認められなかった。しかし、最適栽植密度時の最大収量を示す係数 c は、栽植様式間、年次間、品種間および品種と年次の交互作用に有意性が認められた。

(2) 収量関連形質の栽植密度反応

Figure V-2 に栽植密度にともなう地上部乾物重の変化を示した。地上部乾物重は3ヶ年を通じてすべての栽植様式、すべての栽植密度においても $36B08 > P8025$ であった。しかし、その品種間差異は2018年と2019年が2017年に比べて小さかった。

地上部乾物重の栽植密度反応の大きさを示す。P8025 における地上部乾物重の2次回帰式においては係数 c および b についてはすべて有意な処理間差異が認められなかった。

が、係数 a の絶対値においては品種間差異およびその交互作用ともに有意性がみとめられた (Table V-2).

収穫指数は、両品種ともに3ヶ年共通して栽植密度にともない低下した (Figure V-3), その収穫指数の低下程度は、両品種, 3ヶ年共通して, CRが他の栽植様式に比べて大きかった. また, 3ヶ年ともに, すべての栽植密度において $36B08 > P8025$ であった.

一穂粒数は、両品種, 3ヶ年共通して, 栽植密度に伴う減少した (Figure V-4). その一穂粒数の減少程度は TRが他の栽植様式に比べて小さかった. また, 一穂粒数はすべての栽植密度において $36B08 > P8025$ であった.

百粒重は両品種, 3ヶ年ともに栽植密度に伴って減少した (Figure V-6). しかし, その百粒重の減少程度は明らかな栽植様式間差異は見られなかった. また, 百粒重はすべての栽植密度において $36B08 > P8025$ であった.

P8025 と 36B08 における収穫指数の密植疎植比は有意な栽植様式間と年次間差異がみとめられ, 両年共通して $TR \geq NR > CR$ であった. しかし, 栽植様式と品種間差異の交互作用には有意性は認められなかった (Table V-3).

一穂粒数および百粒重の栽植密度に対する変化は3ヶ年, すべての栽植様式において1次回帰式が適合した (Table V-3). 一穂粒数の1次回帰式の傾き a の絶対値は栽植様式間, 品種間および年次間差異がみとめられ, 交互作用が認められなかった. 3ヶ年通じて $TR \leq CR \leq NR$ であり, また, 総じて $36B08 > P8025$ 年であった.

百粒重の1次回帰式の傾き a の絶対値は, 品種間差異および栽植様式との交互作用はみとめられなかった. 係数 b においては品種間差異が認められ, $36B08 > P8025$ であった.

(3) 成長解析と群落構造

Figure V-7 に部位別乾物重の推移を示した. P8025 と 36B08 両品種ともに最大期の全

体乾物重は 2017 年が 2019 年に比べて大きかった。最大期の全体乾物重は 36B08 が P8025 に比べて大きく、その品種間差異は、多収年次 2017 年において 2019 年に比べて大きかった。

両品種とも最大期の全体乾物重は 75×11 cm 区で最も高く、75×19 cm 区で最も低かった。その密植にともなう乾物重の増加程度は P8025 が 36B08 に比べて顕著であった。また、最大期の地上部乾物重は年次で比較すると 2017 年が 2019 年に比べて明らかに大きく、36B08>P8025 であった。また、その品種間差異は 2017 年が 2019 年に比べて明らかに大きかった。乾物重の推移からみると、2017 年においては、7 月下旬から 8 月下旬にかけて稈乾物重の増加は 36B08 が P8025 に比べてはるかに大きかった。

Figure V-8 に葉面積の推移を示した。最大期の葉面積指数は 2017 と 2019 両年とも 36B08 が P8025 に比べて高く、また、両品種とも 2017 年が 2019 年に比べて大きかった。

葉面積指数は両年、両品種ともに 75×11 cm 区が最も高く、75×19 cm 区が最も低く推移した。どの栽植密度区においても両品種とも多収年次にあった。2017 年の葉面積指数が、2019 年に比べて高く推移した。

Figure V-9 に登熟期間における穂重増加速度 (EGR)、平均葉面積指数 (MLAI)、純同化率 (NAR)を示した。2017 の EGR は登熟前期と後期両期ともに、75×19 cm 区および 75×15 cm 区においては 36B08>P8025 であったのに対して、75×11 cm 区では P8025>36B08 であった。

この EGR の品種間差異を MLAI と NAR 分けて考えると、登熟前期両期と後期ともに、MLAI は栽植密度に関係なく、36B08>P8025 であった。これに対して NAR は、登熟前期と後期両期ともに、75×19 cm 区では 36B08>P8025 であったが、75×11 cm では P8025>36B08 であった。2019 年の EGR は、すべての栽植密度区において登熟前期では

P8025>36B08, 登熟後期では 36B08>P8025 であった.

この EGR の品種間差異を MLAI と NAR に分けて考えると, 2019 年の MLAI は 2017 年と同様に登熟前期と後期両期ともに 36B08>P8025 であった. これに対して, NAR は登熟前期では P8025>36B08 であったが, 登熟後期では 36B08>P8025 であった.

以上より, 両年通じては 12 本 m^{-2} を超える密植区の EGR は早生品種の P8025 が晩生品種 36B08 を上回り, その要因は, 主として密植区における NAR は登熟前期を中心として, 早生品種が晩生品種に比べて高いことに由来するといえる.

Figure V-10 と Figure V-11 にそれぞれ 2017, 2019 年における登熟初期の群落構造を示した. 層別合計の葉面積指数は 2017, 2019 年両年とも 36B08 が P8025 に比べて大きかったが, その品種間差異は 2017 年が 2019 年に比べて大きかった. 葉面積および葉乾物重の層位別分布をみると, 2017 年においては, P8025 では草高 50-100 cm の層が最も大きいのにに対して, 36B08 では草高 100-150 cm の層が最も大きかった.

草高 150 cm の相対照度を品種間で比較すると, 75×19 cm 区で P8025>36B08, 75×15 cm 区で P8025>36B08, 75×11 cm 区で P8025>36B08 と, すべての栽植密度区で P8025 が 36B08 に比べて高かった. 2019 年における葉面積指数および葉重の層位別分布をみると, 両品種とも草高 50-100 cm の層が最も大きかった.

Figure V-12 に積算葉面積指数と相対照度との関係を示した. 同じ栽植密度で比較すると, 両者の一次回帰式の傾き, すなわち吸光係数は, 2017 年においてはどの栽植密度においても P8025 が 36B08 に比べて低かった. 2019 年においても 75×11 cm 区において P8025 が 36B08 に比べて低かった.

(4) 考察

1) 収量関連形質からみた早晩性の異なる品種間で栽植密度反応に差異が生じる要因

P8025 は RM85 日に対して、36B08 は RM100 日であることから、子実収量は、当然ながら 10.3 本 m^{-2} 以上の密植区を除くと、36B08 が P8025 に比べて大きかった。しかし、10.3 本 m^{-2} 以上の密植区においては、3 ヶ年ともに P8025 の子実収量は 36B08 を上回った。

その要因について考察すると、地上部乾物重および収穫指数、さらには一穂粒数の 10.3 本 m^{-2} 以上の密植区における減少は、36B08 が P8025 に比べて著しく大きいことに由来した。これは、Figure V-12 で示した吸光係数の品種間差異は、密植区ほど大きいことから、36B08 は、10.3 本 m^{-2} 以上の密植において、激しい相互遮蔽を起こしていることを反映した結果であると推察される。

栽植密度に対する子実収量の回帰曲線の係数 a の絶対値は、P8025 が 36B08 に比べて有意に小さいことから、P8025 の子実収量は 36B08 に比べて栽植密度の影響が小さく、安定しているといえる。この P8025 の子実収量の栽植密度反応の安定性は、地上部乾物重の回帰曲線の係数で密度反応の大きさを表す a の絶対値の小ささと、収穫指数の密植にともなう減少程度を表す回帰直線の傾き a の絶対値の小ささの相乗効果によりもたらされていると判断できる。

しかし、一穂粒数と百粒重の関係からみると、P8025 の子実収量の栽植密度反応の安定性は、従来、一穂粒数の多い 36B08 では、密植にともなう一穂粒数の減少が、従来、百粒重の大きい P8025 では、密植にともなう百粒重の減少が大きく、両者が打ち消しあうために、どちら一方の栽植密度反応の安定性に主要因があるとは、判断できなかった。

いずれもこれら収量関連形質の栽植密度反応を表す回帰曲線および回帰直線の各係数は、子実収量の水準に影響を受け、いずれも年次間差異が大きい形質であると考えられた。

2) 成長解析および群落構造からみた早晩性の異なる品種間で栽植密度反応に差異が生じる要因

Figure V-13 に登熟期間における平均葉面積指数および純同化率と穂重増加速度の関係を示した。穂重増加速度は、P8025, 36B08 両品種を込みにすると、2017 年と 2019 年両年ともに、登熟前期における純同化率 ($r=0.64^{**}$, 0.86^{***}), また、登熟後期における平均葉面積指数 ($r=0.54^{*}$, 0.85^{***})との間にそれぞれ有意な正の相関関係がみとめられた。

登熟前期における NAR と EGR との関係は、2017 年と 2019 年両年ともに品種別にみても P8025 ($r=0.80^{**}$, 0.80^{**}), 36B08 ($r=0.73^{**}$, 0.74^{**})それぞれ有意な正の相関関係がみられた。登熟後期における MLAI と EGR の関係においては、両品種を込みにすると、2017 年では正の有意な相関関係がみとめられたが、2019 年においては一定の関係がみとめられなかった。

Figure V-14 に登熟前期における穂重増加速度、純同化率と吸光係数との間の関係を示した。吸光係数と穂重増加速度の関係においては両品種を込みにしても、2017 年 ($r=-0.89^{***}$)と 2019 年 ($r=-0.71^{***}$)それぞれに有意な負の相関関係がみとめられた。また、品種別にみても両年ともに、P8025 ($r=-0.91^{***}$, -0.71^{*}), 36B08 ($r=-0.82^{**}$, -0.73^{*})それぞれに負の有意な相関関係がみとめられた。

さらに、吸光係数と純同化率の関係においても、両品種を込みすると、2017 年 ($r=-0.65^{**}$), 2019 年 ($r=-0.71^{**}$)それぞれに有意な負の相関関係がみとめられた。また、品種別にみると、両年を通じて P8025 ($r=-0.72^{*}$, -0.92^{***}), 36B08 ($r=-0.80^{*}$, -0.75^{*})それぞれに負の有意な相関関係がみとめられた。

したがって、早生品種の場合、他の栽植様式に比べて高い、千鳥播の登熟前半の穂重増加速度は、純同化率と吸光係数の栽植様式間に大きな差異がみられないことから、主

として平均葉面積指数の差によってもたらされていたと考える。

しかし、中晩生品種の場合、千鳥播の高い登熟前半の穂重増加速度は平均葉面積指数の差に加えて、受光態勢の差異に基づく、純同化率の差異もこの栽植様式間の差異に関与していると考えられた。

第 V 章 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす品種特性と栽植密度の影響

2. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす草型の異なる品種と栽植密度の影響（試験 7）

(1) 子実収量

Figure V-15 に栽植密度にともなう子実収量の変化を示した。子実収量は、KD420 と 36B08 両品種ともに 3 ヶ年すべての年次においては $KD420 \geq 36B08$ であったが、すべての栽植様式のすべての栽植密度区においても 2019 年 > 2017 年 \geq 2018 年であった。両品種の子実収量は 2017 年と 2019 年においてすべての密度を通して $TR \geq NR \geq CR$ であった。この栽植様式間の差異は、両品種共通して 2017 年が 2018 年と 2019 年に比べて小さかった。

両品種における子実収量の栽植密度に対する変化は、両年にともにすべての栽植様式において二次回帰式が適合した (Table V-5)。分散分析の結果、子実収量の栽植密度反応の大きさを示す 2 次回帰式の係数 a の絶対値は有意な年次間差異、品種間差異は認められたが、栽植様式間およびその交互作用には有意性が認められなかった。最適栽植密度を示す係数 b は年次間、栽植様式間およびその交互作用ともに有意性は認められなかった。しかし、最適栽植密度時の最大収量を示す係数 c は年次間差異および品種間差異に有意性が認められた。

(2) 収量関連形質の栽植密度反応

Figure V-16 に栽植密度にともなう地上部乾物重の変化を示した。地上部乾物重は 3

ヶ年を通じてすべての栽植様式，すべての栽植密度においても KD420 \geq 36B08 であった。

地上部乾物重の栽植密度反応の大きさを示す，2 次回帰式の係数 a の絶対値および係数 b は，分散分析の結果すべて有意な処理間差異が認められなかったが，係数 c においては栽植様式間，年次間差異，品種間差異およびそれらの交互作用ともに有意性がみとめられた (Table V-5)。

収穫指数は，両品種ともに 3 ヶ年共通して栽植密度にともなって低下した (Figure V-17)，その収穫指数の低下程度は，両品種に共通して，CR が他の栽植様式に比べて大きく，また，3 ヶ年ともに KD420 が 36B08 に比べて大きく，その傾向は 2017 年が 2018 年と 2019 年に比べて顕著であった。

両品種における収穫指数の疎植密植比は有意な品種間差異およびその交互作用がみとめられ，3 ヶ年共通して KD420 $>$ 36B08 であった。しかし，年次および栽植様式の交互作用には有意性は認められなかった (Table V-6)。

一穂粒数は，両品種共通して，3 ヶ年ともに栽植密度にともなって減少した (Figure V-18)。その一穂粒数の減少程度は，TR がすべての栽植密度において KD420 が 36B08 に比べて大きかった。また，他の栽植様式に比べて小さかった。

百粒重は，すべての栽植密度において 36B08 $>$ KD420 であった。また，両品種共通して，3 ヶ年ともに栽植密度に伴って減少した (Figure V-20)。しかし，その百粒重の減少程度は明らかな栽植様式間差異は見られなかった。

一穂粒数および百粒重の栽植密度に対する変化は 3 ヶ年とも，すべての栽植様式において 1 次回帰式が適合した (Table V-6)。一穂粒数の 1 次回帰式の傾き a の絶対値は年次間差異がみとめられ，2018 年と 2019 年通じて KD420 $>$ 36B08 であり，しかし，KD420 $<$ 36B08 年であった。

百粒重の 1 次回帰式の傾き a の絶対値は栽植様式間、品種間差異、年次間差異およびその交互作用はみとめられなかった、係数 b においては年次間差異と品種間差異が認められ、 $36B08 \geq KD420$ であった。

(3) 成長解析と群落構造

Figure V-21 に部位別乾物重の推移を示した。最大期の全体乾物重はすべての栽植密度において KD420 と 36B08 両品種ともに 2017 年が 2019 年に比べて大きかった。また、最大期の全体乾物重は、どの密度区においても 36B08 が KD420 に比べて大きく、その品種間差異は、多収年次 2017 年において 2019 年に比べて大きかった。特に、部位別にみると、2017 年における 7 月下旬から 8 月下旬にかけて稈乾物重の増加は 36B08 が KD420 に比べてはるかに大きかった。

両品種とも最大期の全体乾物重は 75×11 cm 区で最も高く、 75×19 cm 区で最も低かった。その密植にともなう乾物重の増加程度は KD420 が 36B08 に比べて顕著であった。

Figure V-22 に葉面積指数の推移を示した。最大期の葉面積指数は 2017 と 2019 両年とも 36B08 が KD420 に比べて高く、また、両品種とも 2019 年が 2017 年に比べて大きかった。葉面積指数は両年、両品種ともに 75×11 cm 区が最も高く、 75×19 cm 区が最も低く推移した。どの栽植密度区においても両品種とも多収年次にあった。2017 年の葉面積指数が、2019 年に比べて高く推移した。

Figure V-23 に登熟期間の穂重増加速度 (EGR)、平均葉面積指数 (MLAI)、純同化率 (NAR)を示した。 75×11 cm の密植区における EGR は 2017 年と 2019 年両年とも登熟前期と後期両期とも、常に KD420 が 36B08 に比べて高かった。これに対して、 75×15 cm および 75×19 cm の標準以下の疎植区における EGR は 2019 年登熟前期を除いて、前期と後期両期ともに 36B08 が KD420 に比べて高かった。早生品種である KD420 の密植区

の EGR が中晩生品種の 36B08 を上回る要因を MLAI と NAR に分けて考えると、MLAI は両年ともに、登熟前期と後期両期において 36B08 が KD420 に比べて高いのに対して、MLAI の品種間差異以上は、NAR は両年とも登熟期間を通じて、逆に、KD420 が 36B08 に比べて高かった。

以上より、12 本 m^2 を超える密植区の EGR は両年通じて早生品種の KD420 が晩生品種の 36B08 を上回り、その要因は主として密植区における NAR が登熟期間を通じて KD420 が 36B08 に比べて高いことに由来するといえる。

Figure V-24 と Figure V-25 にそれぞれ 2017、2019 年における登熟初期の群落構造および葉群構造を示した。層別合計の葉面積指数は、2017 年では 36B08 > KD420 が、2019 年では KD420 > 36B08 であった。葉面積および葉乾物重の層位別分布をみると、2017 年においては、KD420 では草高 50-100 cm の層が最も大きいのに対して、36B08 では草高 100-150 cm の層が最も大きかった。

草高 100 cm と 150 cm 平均の相対照度を品種間で比較すると、75×19 cm 区で KD420 > 36B08、75×15 cm 区で KD420 > 36B08、75×11 cm 区で KD420 > 36B08 と、すべての栽植密度区で KD420 が 36B08 に比べて高かった。

2019 年における葉面積指数および葉重の層位別分布をみると、両品種とも草高 50-100 cm の層が最も大きかった。草高 150 cm の相対照度を品種間で比較すると、草高 100 cm と 150 cm 平均の相対照度を品種間で比較すると、75×19 cm 区で KD420 > 36B08、75×15 cm 区で KD420 > 36B08、75×11 cm 区で KD420 > 36B08 と、すべての栽植密度区で KD420 が 36B08 に比べて高かった。

Figure V-26 に 2 ヶ年の積算葉面積指数と相対照度の関係を示した。同じ栽植密度で比較すると、両者の一次回帰式の傾き、すなわち吸光係数は 2017 年と 2019 年両年ともに

KD420 が常に 36B08 に比べて低く、特に疎植区においてこの傾向は顕著であった。

(4) 考察

1) 収量関連形質からみた草型の異なる品種間で栽植密度反応に差異が生じる要因

草型の異なる品種間で、各栽植様式間で、栽植密度反応に差異がみられる要因を、収量関連形質の栽植密度反応より解析する。KD420 は、雄穂抽出期および完熟期が 36B08 に比べて、それぞれ、5 日、7 日早いものにも関わらず、3～18%多収であった (Table V-4)。

また、栽植密度に対する子実収量の回帰曲線の係数 a の絶対値は、KD420 が 36B08 に比べて有意に小さいことから、KD420 の子実収量は 36B08 に比べて 栽植密度の影響が小さく、安定しているといえる。

これら KD420 の多収性と栽植密度に対する安定性の要因を子実収量＝地上部乾物重×収穫指数の関係からみると、KD420 の子実収量の高さは、地上部乾物重の回帰曲線の最大収量 c の高さ、収穫指数の高さの両方に起因すると考えられる。

さらに、KD420 の子実収量の栽植密度反応の安定性は、地上部乾物重の回帰曲線の係数で密度反応の大きさを表す a の絶対値の小ささと、収穫指数の密植にともなう減少程度を表す回帰直線の傾き a の絶対値の小ささの相乗効果によりもたらされていると判断できる。

一穂粒数と百粒重の関係からみると、百粒重は、どの処理区においても KD420<36B08 であることから、KD420 の子実収量の高さは、密植にともなう一穂粒数の低下を示す回帰曲線の係数 b の高さ、すなわち、栽植密度に影響されない一穂粒数の多さに由来すると考えられる。しかし、KD420 の子実収量の栽植密度反応の安定性は、従来、一穂粒数の多い KD420 では、密植にともなう一穂粒数の減少が、従来、百粒重の大きい 36B08 では、密植にともなう百粒重の減少が大きく、両者が打ち消しあうために、どちら一方の

栽植密度反応の安定性に主要因があるとは、判断できなかった。

いずれもこれら収量関連形質の栽植密度反応を表す回帰曲線および回帰直線の各係数は、子実収量の水準に影響を受け、いずれも年次間差異が大きい形質であると考えられた。

2) 成長解析および受光態勢からみた草型の異なる品種間で栽植密度反応に差異が生じる要因

Figure V-27 に登熟期間における平均葉面積指数 (MLAI) および純同化率 (NAR) と穂重増加速度 (EGR) の関係を示した。EGR は、KD420 と 36B08 両品種を込みにすると、登熟前期の EGR は同時期の MLAI および NAR それぞれとの間に 2017 年 ($r=0.81^{***}$, 0.85^{***}), 2019 年 ($r=0.54^*$, 0.94^{***}) とともに、正の有意な相関関係がみとめられた。

また、登熟後期の EGR は MLAI との間に 2017 年 ($r=0.82^{***}$), 2019 年 ($r=0.92^{***}$) とともに有意な正の相関関係がみとめられた。

品種別にみると、登熟前期における KD420 の EGR は 2017 年, 2019 年それぞれに同時期の MLAI ($r=0.86^{**}$, 0.68^{\dagger}) と NAR ($r=0.84^{**}$, 0.95^{***}) との間で有意な正の相関関係がみとめられた。また、登熟後期における KD420 の EGR は同時期の MLAI ($r=0.84^{**}$, 0.86^{***}) の間に有意な正の相関関係がみとめられた。これに対して、登熟前期における、36B08 の EGR は 2019 年においては同時期の MLAI ($r=0.83^{**}$) および NAR ($r=0.95^{***}$) と有意な正の相関関係がみとめられた。また、登熟後期における EGR は同時期の MLAI ($r=0.88^{**}$) と有意な正の相関関係がみとめられたのに対して、2017 年においては登熟前期の EGR と同時期の NAR との間についてのみ、正の有意な相関関係がみとめられた ($r=0.74^*$)。

Figure V-28 に登熟前期における吸光係数と、穂重増加速度および純同化率との間の関係を示した。品種別にみても吸光係数と穂重増加速度の間には 2017 年と 2019 年それぞれ

れに KD420 ($r=-0.75^*, -0.80^{**}$)と 36B08 ($r=-0.82^{**}, -0.73^*$)両品種において有意な負の相関関係がみとめられた。

また、両品種を込みすると、吸光係数と EGR の間には登熟前期と後期において 2017 年 ($r=-0.86^{***}$)と 2019 年 ($r=-0.90^{***}$)それぞれに有意な負の相関関係がみとめられた。

また、吸光係数と純同化率の間にも、両年を通じて KD420, 36B08 それぞれに負の有意な相関関係がみとめられた (2017 年 $r=-0.75^*, -0.80^{**}$, 2019 年 $r=-0.72^*, -0.75^*$)。また、両品種を込みにしても、2017, 2019 年それぞれに有意な負の相関関係 ($r=-0.88^{***}, -0.88^{***}$)がみとめられた。

したがって、下位葉面積割合の高い KD420 の登熟前半の穂重増加速度は KD420 の同期間における平均葉面積指数が 36B08 に比べてむしろ小さいことから、主として良好な受光態勢に基づく、純同化率の差異によってもたらされていると考えられる。

Fernando et al. (2002) は狭畦栽培による増収効果は登熟期間の受光態勢の改良によりもたらされているとしている。本試験においても千鳥播および狭畦栽培による登熟前半の吸光係数の低下が同期間の純同化率の向上をもたらし、この高い純同化率が穂重増加速度を増加させ、多収に結びついていることから、Fernando et al. (2002) の報告と類似した結果であるといえる。

第VI章 総合考察

1. 千鳥播栽培の増収効果を高くする栽培条件および品種選定

子実用トウモロコシに対する千鳥播栽培の技術は、北海道中央部においても精密圃場試験だけではなく、専用播種機を用いて千鳥播した1区20a以上の実規模試験においても、10.0本/m²の栽植密度では平均14%増収効果が確認できた。専用播種機の導入にともなう初期投資費はかかるものの、サイレージ用トウモロコシだけでなく、子実用トウモロコシの増収技術として、実践的に近々に取り組める技術であるといえる。

この千鳥播栽培における増収効果が高くなる栽培条件について考察すると、まず、播種試験(実験2)の結果から、千鳥播栽培の増収効果は、相対的に晩播した時に高くなると考えられた。また、千鳥播栽培における振幅距離試験(実験3)の結果から、同じ栽植密度でも個体間距離を長く保つことのできる個体配置をとることで増収効果は向上した。

また、窒素追肥試験の結果から、第6～7葉期に追肥することにより、2次回帰曲線から求めた最大収量に栽植様式と窒素追肥効果に交互作用がみとめられたことから、千鳥播栽培の増収効果は、雄穂分化期頃の窒素追肥によって慣行区以上に向上すると判断できた。

さらに、実験5, 6, 7を通した3ヶ年の栽植密度試験の結果から、千鳥播栽培の増収効果は、密植区ほど高まる傾向にあった。しかし、12.1本/m²の最密植区では、慣行区の子実収量自体が10.3本/m²区に比べて減じてしまうので、結果として、千鳥播栽培の子実収量は、慣行区の最も収量が高くなる栽植密度で、最も高くなることが、栽植密度反応をモデル化した2次回帰曲線の結果から確認された。したがって、実験5, 6, 7で供試した相対熟度85～93日の早生品種においては10本/m²程度の栽植密度において

千鳥播栽培の子実収量が最も高くなると判断できた。

次に、千鳥播栽培の増収効果を高くする品種特性について論じると、早晩性の異なる品種を比較した試験 (実験 6)の結果から、千鳥播栽培の増収効果は、RM100 日の中晩生品種に比べて、RM85 日の早生品種において高かった。さらに、草型の異なる品種を比較した試験 (実験 7)の結果から、下位葉割合の高い品種の子実収量は上位葉割合の高い品種に比べて高いが、千鳥播栽培の増収効果そのものは、受光態勢の悪い上位葉割合の高い品種において高かった。これらの増収効果は早生品種と同様に疎植時には小さいが、8.9 本 m^2 以上の密植区で高くなる傾向を示した。

以上のことから、千鳥播栽培の増収効果を高くする栽培条件および品種選定は、相対熟度 85~93 日程度の早生品種を用い、第 6~7 葉期の追肥を前提とし、振幅距離 20 cm 以上の千鳥播栽培を実施し、10 本 m^2 程度の栽植密度を確保することが千鳥播栽培の増収効果を安定的に高める栽培条件であり、圃場、気象条件や春の他作物との農作業の競合から、5 月下旬までの晩播条件になった場合でもこの増収効果は維持される。また、上位葉割合の高いなど受光態勢の悪い品種を選定した場合には千鳥播栽培が実施できれば、さらに増収効果は高くなると結論づけられた。

2. 狭畦栽培と比較した時にも、千鳥播栽培の有利性を発揮する栽培条件および品種特性

上記に述べた、千鳥播栽培の増収効果を高くする栽培条件および品種選定のうち、狭畦栽培の増収効果を上回るものが千鳥播栽培を実施すべき適用条件となる。

第Ⅲ章の狭畦千鳥栽培が増収効果に及ぼす影響をみた試験 (実験 4)で示したように、千鳥播栽培の有利性は、栽植密度を高めた時の個体間距離の変化が狭畦栽培に比べて小さく、このことが栽植密度反応を安定させていると考えられる (Table III-12)。この栽植

密度反応の安定性は、実験 4 だけでなく、追肥試験 (実験 5)、早晩性や草型が異なる品種を比較した試験 (実験 6, 7)における栽植密度反応を表す二次回帰曲線の係数 a の絶対値は千鳥播栽培が狭畦栽培に比べて、小さいことから裏付けられる。したがって、密植栽培で多収をねらう場合、狭畦栽培よりも千鳥播栽培を実施する方が有利であると考えられる。

また、通気性の悪い土壌で播種前の碎土の状態が悪くなり、欠株が生じやすい圃場で栽植密度にムラが大きい場合などは、栽植密度反応が小さい千鳥播栽培の実施が狭畦栽培に比べて、子実収量の安定性が高いと考えられる。

また、早晩性の異なる品種を比較した試験 (実験 6)から、千鳥播栽培による増収効果は早生品種においては 7.0, 12.1 本 m^{-2} の最疎植および最密植区を除くと、狭畦栽培の増収効果と大差はみられなかった。しかし、RM100 日の中晩生品種における増収効果は、すべての栽植密度で、総じて千鳥播栽培>狭畦栽培であり、密植になるほどこの傾向は顕著であった。原田・松野 (2012) は、RM115 日のサイレージ用晩生品種を用いて狭畦栽培と比較した場合、千鳥播栽培の方が増収効果が高かったとしている。本報の実験 6 の結果もこれと一致するととらえることができる。したがって、相対熟度が 100 日以上の中晩生品種を用いる場合は、千鳥播栽培が狭畦栽培に比べて有利であると判断できる。

さらに、草型が異なる品種を比較した (実験 7)の結果から、千鳥播の増収効果は、受光態勢の良好な下位葉割合が多い品種に比べて、受光態勢の悪い上位葉割合が多い品種の方が高かった。狭畦栽培の増収効果と比較した場合においても、両栽培法の増収効果の差異は、受光態勢の良好な品種に比べて、受光態勢の悪い上位葉割合が多い品種において差がみられ、その増収効果は千鳥播栽培>狭畦栽培であった。したがって、受光態勢の悪い品種を用いる場合は千鳥播栽培を実施する方が有利であると考えられる。

加えて、播種期試験 (実験 2)の結果をみると、晩播にともなって子実収量は減少していくが、千鳥播栽培や狭畦栽培においてはその減少程度が慣行区に比べて小さいために、両栽培の増収効果は、晩播にともなって高まる傾向にあった。両栽培を比較すると、5月中旬播種までの晩播では増収効果に差異がみられないが、5月末播種まで晩播した場合は、千鳥播栽培の増収効果が、2ヶ年2品種共通して、狭畦栽培に比べて高かった。したがって、トウモロコシ播種時の天候不順や他作物の管理作業で労働競合があり、5月下旬以降に晩播せざるを得ない時は、千鳥播栽培を実施する方が狭畦栽培に比べて有利であるといえる。

また、倒伏関連形質について千鳥播栽培と狭畦栽培を比較すると、実規模栽培試験 (実験 1)から千鳥播栽培は、狭畦栽培に比べて完熟期のトウモロコシの下位第2節間の稈径が太く、引き倒し抵抗値も高かった。また、千鳥播栽培において振幅距離を変化させた試験 (実験 3)でみたように、千鳥播栽培においては根系の競争が少なく、支持根数や根の太さが増加し、土壌表面への進入角度が浅く支持根系の幅が広く (Table III-9, Figure III-12, 13), しっかりと土壌をつかみ、このことが引き倒し抵抗値の増大に結び付いていると推察された。

さらに、早晚性や草型が異なる品種を比較した試験 (実験 6, 7)において供試した相対熟度100日の36B08の倒伏程度は、台風通過で倒伏の発生が多かった2018年においては、千鳥播栽培が狭畦栽培に比べて低かった。また、2017, 2018, 2019年3ヶ年ともに引き倒し抵抗値は千鳥播栽培 \geq 狭畦栽培であった。これらのことから、耐倒伏性に劣る品種を用いる場合、ならびに、倒伏しやすい圃場条件や栽培方法を実施する際には、千鳥播栽培を実施する方が狭畦栽培に比べて有利であると考えられる。

3. 収量関連形質からみた千鳥播栽培の増収要因

千鳥播栽培における子実用トウモロコシの増収要因を収量関連形質から考察する (Figure VI-1). まず、地上部乾物重と収穫指数の関係 ($\text{子実収量} = \text{地上部乾物重} \times \text{収穫指数}$) からみると、7 つの実験を通して、千鳥播栽培の多収要因は、地上部乾物重の増加であった。また、栽植密度反応を含めて考えると、地上部乾物重が子実収量と同調して 2 次の回帰式に従うことと、密植にともなう収穫指数の低下程度が少ないこと、この両者が関係しあった結果であると解釈できた。

また、雌穂形質の一穂粒数と百粒重の関係 ($\text{子実収量} = \text{栽植密度} \times \text{一穂粒数} \times \text{百粒重} / 100$) からみると、7 つの実験結果より千鳥播栽培による増収効果の大部分は、一穂粒数の増加であるといえる。栽植密度反応を含めて考えると、千鳥播栽培の優れた収量安定性は、密植にともなう一穂粒数と百粒重両者の低下程度の小ささに起因した。この両者のどちらが強く密度反応に影響を及ぼすかは、品種特性により左右されと考えられた。すなわち、相対的に一穂粒数が多く百粒重が小さい品種の場合は前者に、逆に一穂粒数が少なく百粒重が大きい品種は後者に強く影響を受けると推察された。

また、密植にともなう一穂粒数の低下のうち、縦粒数と横列数との関係をみると、7.0 から 10.3 本 m^{-2} までの密植ともなう一穂粒数の低下は縦粒数の低下が中心であるが、10.3 から 12.1 本 m^{-2} までの密植には縦粒数だけでなく、横列数の低下も観察された。したがって、千鳥播栽培における栽植密度反応の安定性には、密植にともなう雌穂の縦粒数の低下の小ささだけでなく、10.3 本 m^{-2} 以上の超密植時の横列数の減少程度の少なさも関与していると推察される。

4. 成長解析からみた千鳥播栽培の増収要因

千鳥播栽培における子実用トウモロコシの増収要因を、登熟期間の成長解析から考察すると、葉面積と乾物重の推移の調査しなかった実規模試験 (試験 1) と窒素追肥試験 (試

験 5)以外の 5 つ試験から、千鳥播栽培の増収要因は、登熟前期 (出穂期から乳熟期)および登熟後期 (乳熟期から完熟期)の両方の雌穂乾物重増加速度の高さであることは共通おり、特に前者が主要因と考えられた。

千鳥播栽培の登熟前期の雌穂乾物重増加速度 (穂重増加速度)の高さを中心に、6 つ試験においてその成長解析からみた多収要因についてその傾向を考察する。この穂重増加速度の高さには、純同化率のみが関わっている場合と、同期間および登熟期間後期(乳熟期から完熟期)も含めた平均葉面積指数が関わっている場合があると考えられた。

まず、播種期試験 (試験 2)においては、早播区の多収要因は、主として登熟前期の千鳥播栽培の受光態勢の良さに基づく同期間の純同化率の高さであった。しかし、晩播区においては、葉面積指数が早播区に比べて減少するため、千鳥播栽培における葉面積拡大と受光率の上昇の速さから生じる平均葉面積指数の高さも関与すると考えられる (Figure VI-2)。

千鳥播栽培における振幅距離の試験 (試験 3)および畦幅と栽植密度に関する試験(試験 4)においては、振幅距離の大きい千鳥播栽培および狭畦千鳥栽培の多収性は、個体間距離が離れかつ栽植密度による変化が少ないことから生じる、葉長の長さの差に基づく平均葉面積指数の差異および葉の相互遮蔽の少なさから来る受光態勢の良さに基づく純同化率の高さによってもたらされていると考えられた(Figure VI-3, 8)。

早晩性および草型の異なる品種と栽植密度に関する試験 (試験 6, 7)においては、早生品種と中晩生品種、および下位葉割合が多い品種と上位葉割合の多い品種共通した千鳥播栽培の多収性は、主として葉の相互遮蔽の少なさから来る受光態勢の良さに基づく純同化率の高さによってもたらされていると考えられた。これら受光態勢を改善する効果は、中晩生品種が早生品種に比べて、また、受光態勢の悪い上位葉割合の多い品種が受

光態勢の良好な下位葉割合が多い品種に比べて、特に、密植区において高い傾向にあると考えられた。さらに、層別刈りを実施して得られた吸光係数からトウモロコシ群落内での下層部への光の透過しやすさが直接、純同化率の高さに結びついていると判断できた(Figure VI-4, 5, 6, 7)。

5. 品種選定および多収要因の未解明部分と、今後の検討課題

千鳥播栽培の増収効果における品種間差異をみるために、早晩性および草型の異なる組合せとして各 1 品種ずつのみしか供試できておらず、さらに中晩生品種と上位葉割合の多い品種は同一品種を用いて試験を実施した。これら品種比較試験においては、数品種供試できると、品種特性と栽植様式および栽植密度反応との交互作用について、さらに強く一般化できよう。今後、相対熟度の一致した草型の異なる品種の組合せを見出し、比較検討していく必要がある。

さらに、成長解析からみた千鳥播栽培の多収要因について、登熟期間における受光態勢に特に着目して、平均葉面積指数と純同化率を比較検討した。しかし、トウモロコシの成長速度が最も高く、草冠が完全に閉じる過程にある栄養成長後期において、葉面積指数の拡大と受光率の上昇における栽植様式間の差異、さらには、振幅距離や畦幅を含めた栽植密度や播種期などの諸条件での変化について調査することは、栄養成長期における多収要因の解明として重要である。今後、栄養成長期における多収要因についてもより詳しく検討していく必要がある。

Ignacio and Tony (2014) によれば、トウモロコシの窒素施肥効率は近代品種ほど向上しており、近年の多収品種は気象要因の変動を除くと確実に上昇しており、品種間差異がみられる。

本試験においては相対熟度 85 日の P8025 のみの結果である、早晩生や草型の異なる品

種を用いて、栽植様式と窒素施肥効率の関係について確認していく必要がある。

6. 結論

Table IV-1 に子実用トウモロコシの安定多収を実現するうえで、千鳥播栽培を適用が望ましい場面と、その場面での千鳥播の多収要因を示した。

前述したように、千鳥播栽培の多収性は、密植条件や晩生品種、受光態勢の悪い品種など葉面積指数が十分に確保されやすい条件では、主として草冠が閉じて群落が形成された後の登熟前期の高い純同化率のみによってもたらされていた (Figure V-1)。これに対して、早生品種や疎植条件、晩播など葉面積指数が栄養成長期前半に低く推移する条件では、上記の多収要因に栄養成長後期の受光率の上昇の早さも加わり、千鳥播の有利性が発揮されると推察された (Figure V-1)。その結果、狭畦栽培と比較して、千鳥播栽培が有利となる条件、すなわち、子実用トウモロコシの安定多収を実現するうえでの千鳥播栽培の適用条件は下記のよう

に結論づけられる。

- ①RM85 日程度の早生品種を密植して、多収を目指す場合。
- ②RM100 日以上の中晩生品種を用いる場合。
- ③上位葉割合が多い品種や水平葉型品種など受光態勢が悪い品種を用いる場合。
- ④晩播せざるを得ない時。
- ⑤通気性の悪い土壌条件で碎土が粗く、欠株や圃場内で栽植密度にムラがでやすい場合。
- ⑥倒伏しやすい品種や圃場条件。

また、倒伏が発生した圃場において、千鳥播栽培の倒伏程度が狭畦栽培に比べ

て低い傾向にある，主な要因は，第Ⅲ章に示した実規模試験，千鳥播栽培における振幅距離を変化させた試験において，支持根の侵入が浅く(Figure Ⅲ-12)，引き倒し抵抗値も高く(Table Ⅲ-8)，優れた作物体の支持力を示すことが要因であり，他の適用場面とは要因が異なると考えられた．

Table IV-2 に上記のことから考えられる．子実収量を最も安定多収が実現できる品種の選択と栽培条件を示した．5 ヶ年の試験結果より，安定多収が最も実現しやすい品種の選択と栽培条件の組み合わせは，品種特性を早晚性と草型に，栽培条件を栽植密度，振幅処理を含める栽植様式，および窒素追肥の有無に区分した場合，下記のように結論づけられた．KD420 のような下位葉割合の高い早生品種を選択し，10 本 m^{-2} の栽植密度で，振幅距離 20 cm 以上の千鳥播または，狭畦千鳥播し，第 6～7 葉で追肥する栽培法を実施する．

第Ⅶ章 要約

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

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 470 ha 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の栽培を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。

子実用トウモロコシの安定多収を実現するため、千鳥播栽培の増収効果に着目した。本報は、千鳥播栽培の適用が有利性を発揮する条件に関する基礎的知見を得るため、栽植様式、播種期、振幅距離、窒素追肥などの栽培条件や早晚性、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を、栽植密度反応との関連性を考慮しながら明らかにし、その増収要因を解析したものである。得られた結果は以下の通りである。

1. 実規模試験における千鳥播栽培の増収効果の確認

相対熟度 85, 100 日の早生品種と中晩生品種を供試し、千鳥播と狭畦栽培の専用播種機による実規模試験を 2 ヶ年実施し、慣行栽培と比較した時の増収効果を確認した。

(1) 千鳥播栽培による増収効果は、精密試験圃だけでなく、専用播種機で播種した実規模栽培試験においても、狭畦栽培に比べて高かった。

(2) 機械播種による実規模栽培試験においても、早生品種と中晩生品種共通して、千鳥播および狭畦栽培による増収効果が確認できた。その増収効果は千鳥栽培が狭畦栽培に比べてやや高かった。千鳥播栽培による増収効果と、その密植栽培による増収効果の向上は、早生品種が中晩生品種に比べて高く、精密試験と類似した結果が確認された。

2. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす播種期と振幅距離の影響

中晩生品種を供試し、千鳥播の振幅距離を 10, 20, 30 cm とした千鳥区を 2 ヶ年にわたり設け、子実収量を慣行区と比較した。さらに、早生品種を用いて、千鳥播の増収効果に及ぼす播種期の影響を 2 ヶ年あたり狭畦区と比較した。

(1) 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。これを成長解析と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すると考えられた。

(2) 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い傾向にあった。したがって、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 \leq 狭畦区 $<$ 慣行区であることに起因した。

3. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす栽植密度の影響

千鳥播栽培の増収効果に及ぼす栽植密度の影響を検討した。相対熟度 85, 93, 100 日の品種を 3 ヶ年にわたり供試し、7.0, 7.8, 8.9, 10.3, 12.1 本 m^{-2} の 5 段階栽植密度を設定し、栽植様式処理として狭畦、千鳥を設置し、慣行区と比較した。

(1) 子実収量(Y) の栽植密度反応は、栽植密度を X とすると、二次回帰式 $Y=a(X-b)^2+c$ で近似された。

(2) 栽植密度反応を表す二次回帰式の係数 a の絶対値は、狭畦千鳥区 \leq 千鳥区 \leq 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 \geq 千鳥区 \geq 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やや高かった。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みられないが、疎植

区および密植区の増収効果は千鳥播 \geq 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。

(3) 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。

4. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす窒素追肥の影響

早生品種を用いて雄穂分化期（第 6-7 葉期）に窒素 6 g m^{-2} を施用区する (N6) と無施用区 (N0) を設け、子実収量および収量構成要素、窒素吸収量を 3 ヶ年にわたり比較した。

(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 \geq 狭畦区 \geq 慣行区であった。

5. 千鳥播栽培の増収効果に及ぼす品種特性（早晚性、草型）の影響

千鳥播栽培の増収効果に及ぼす栽植密度の影響を検討した。相対熟度 85, 93 の早生品種、相対熟度 100 日の晩生品種を 3 ヶ年にわたり供試し、7.0, 7.8, 8.9, 10.3, 12.1 本 m^{-2} の 5 段階栽植密度を設定し、栽植様式処理として狭畦, 千鳥区を設置し、慣行区と比較した。

(1) 子実収量は 10.3 本 m^{-2} 以上の密植区を除き中晩生品種が早生品種に比べて高かった。

(2) 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、早生品種では供試品種 P8025 の最適栽植密度 (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 \geq 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。

(3) 子実収量はすべての栽植密度密植区において下位葉割合の高い品種が上位葉割合の高い品種に比べて高かった。

(4) 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においては千鳥播栽培の増収効果が狭畦栽培に比べて高かった。

6. 千鳥播栽培の多収要因

千鳥播栽培による増収効果が、栽植密度反応を含めた栽植様式、窒素追肥などの栽培条件、および早晩性、草型品種の異なる品種間で差異が生じる要因を収量関連形質の密度反応、成長解析、受光態勢から検討した。

(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。また、収量関連形質の密度反応からみると、密植にともなう収穫指数、および一穂

粒数の低下程度の緩和に起因した。

(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に関係していた。

(5) 下位葉割合の高い品種が通常の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傾向にある要因は、収量関連形質からみると、収穫指数と一穂粒数が高いこと、また、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普通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、下位葉割合の高い品種の吸光係数が低いこと、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。

7. 結論

以上より、千鳥播栽培は、第一に登熟前期の受光態勢の良さによる純同化率の高さ、第二に栄養成長期の受光率の上昇の早さによって子実収量の多収を実現していると考えられた。この子実用トウモロコシに対する千鳥播栽培の有利性が狭畦栽培に比べて発揮される条件、すなわち農業者が子実用トウモロコシを栽培するうえで、千鳥播栽培の適用が望ましい場面は① 相対熟度 85 日程度の早生品種を密植して、多収を目指す場合。② 相対熟度 100 日以上の中晩生品種を用いる場合。③ 上位葉割合が多い品種や水平葉型品種など受光態勢が悪い品種を用いる場合。④ 晩播せざるを得ない時。⑤ 通気性の悪い土壌条件で碎土が粗く、欠株や圃場内で栽植密度にムラがでやすい場合。⑥ 倒伏しやすい品種や圃場条件であると結論づけられた。

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選択し、5 月初旬に 10 本 m^{-2} 程度の栽植密度で、振幅距離 20 cm 以上の条件で千鳥播し、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。

第Ⅷ章 謝辞

本論文の作成に当り，業務多忙な中，特段のご配慮をいただき，多くのご助言と終始多大なご指導をいただいた主査の本学酪農学研究科で作物学研究室 義平大樹教授に心から感謝の意を表します．また，本論文の発表に際して副査の本学酪農学研究科で草地・飼料生産学研究室 三枝俊哉博士，土壤環境学研究室 澤本卓治博士並びに北海道大学農学研究科 作物学研究室 中島大賢博士から心より厚く感謝申し上げます．

また，本研究をすすめるにあたり，供試品種の提供に積極的に御協力いただいた佐藤智宏氏 (パイオニアエコサイエンス株式会社，元パイオニアハイブレッッドジャパン)，村井裕介博士および橋本和磨氏 (カネコ種苗株式会社)に深甚なる感謝を申し上げます．

環境空間情報学研究室の小川健太准教授には撮影画像解析の方法についてご指導いただきました．心から感謝申し上げます．

試験圃場の管理をはじめ，栽培から収穫までご指導や貴重なアドバイスを下さいました，フィールド教育研究センター作物生産ステーションの方々に心より御礼申し上げます．

最後に，本研究の作業および調査で多大な協力をして下さった 2015 年から 2019 年に作物学研究室に所属した研究補助員および学生の皆さまに感謝を表します．

第IX章 引用文献

- AgriGold Research. 2009. Genetic interaction in twin row corn. Retrieved from <http://www.agriold.com> (Cited 15 August, 2019).
- Assefa, Y., Prasad, P. V., Carter, P., Hinds, M., Bhalla, G., Schon, R., Jeschke, M., Paszkiewicz, S., & Ciampitti, I. A. 2016. Yield responses to planting density for US modern corn hybrids: a synthesis-analysis. *Crop Science* 56 (5).
- Cox, W. J., & Cherney, D. J. R. 2002. Evaluation of narrow-row corn forage in field-scale studies. *Agronomy Journal*, 94, 321–325.
- Cox, W. J., Hanchr, J. J., Knoblauch, W. A., & Cherney, J. H. 2006. Growth yield, quality, and economics of corn silage under different row spacings. *Agronomy Journal*, 98: 163–167.
- Duvick, D. N. 2005. The Contribution of Breeding to Yield Advances in Maize (*Zea Mays* L.). *Advances in Agronomy* 86: 83-145.
- Fernando, H. A., Calvino, P., Cirilo, A., and Barbieri, P. 2002. Yield Responses to Narrow Rows Depend on Increased Radiation Interception. *Agronomy. J.* 94: 975-980.
- Finck, C. 2003. Twin rows take to field. *Farm Journal*, 127, 8.
- Gozubenli, H., Kilinc, M., Sener, O., & Konuskan, O. 2004. Effects of single and twin row planting on yield and yield components in maize. *Asian Journal of Plant Sciences*, 2: 203–206.
- 原田直人・松野愛子. 2012. 狭畦および対列 (twin-row) 栽培がトウモロコシの収量および耐倒伏性に及ぼす影響. *日本草地学会誌* 58(別): 35.
- 林拓・佐藤尚親・牧野司. 2006. サイレージ用トウモロコシ早生品種の狭畦路地栽培における生育の特徴. *日本草地学会誌* 52 (別 1) : 56-67.

- 北海道農政部. 2020. 北海道の酪農・畜産をめぐる情勢. (農政部・生産振興局畜産振興課・畜産振興全般に関すること). <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ns/hsi/seisakug/singikai/R02bukai/R02-1siryoku1-5.pdf> (2020 年 12 月 21 日閲覧).
- Ignacio A. C., & Tony J. V. 2014. Understanding global and historical nutrient use efficiencies for closing maize yield gaps. *Agronomy Journal* 106 (6): 2107-2117.
- 岩田文男. 1973. トウモロコシの栽培理論とその実証に関する作物学的研究. 東北農試研報 46: 63-129.
- Jeschke, M. 2010. Twin-row corn production. *Crop Insights*. Pioneer Hi-Bred Int., Inc., Johnston, IA. (Cited 20 August, 2019).
- 菅野勉. 2015. 飼料用トウモロコシの栽培の現状と今後の作付け拡大に向けた技術開発. https://www.maff.go.jp/kanto/seisan/tikusan/kihon_zyoho/pdf/corn_gizyutu.pdf (2021 年 1 月 05 日閲覧).
- 濃沼圭一・池谷文夫・伊東栄作. 1998. 引倒し力によるトウモロコシの転び型倒伏抵抗性の非破壊・計量的検定法. *Grassland Science* 43 (4): 424-429.
- 濃沼圭一. 2001. サイレージ用トウモロコシの高品質・耐倒伏性育種に関する研究. 九州沖縄農研報告 39: 79-125.
- 水野直治・南松雄. 1980. 硫酸一過酸化水素による農作物中 N, K, Mg, Ca, Fe, Mn 定量のための迅速前処理法. *日本土壤肥料学雑誌* 51 (5): 418-420.
- 森田聡一郎. 2014. 飼料増産技術指標－飼料作物の生産利用技術－. https://www.maff.go.jp/kanto/seisan/tikusan/kihon_zyoho/pdf/corn_gizyutu.pdf (2021 年 1 月 08 日閲覧).
- 中島進・八木正一・善木道雄・高橋昭典・桐栄恭二. 1982. 分化. 31: 732.
- 中津智史・濱村美由紀・中本洋・甲田祐幸・飯田憲司・相馬潤. 2015a. 道央地帯における

- 子実用とうもろこしの栽培法 第 1 報 品種の早晚性が生育, 収量, 子実水分等に及ぼす影響. 北農第 82 巻第 2 号: 11–20.
- 中津智史・濱村美由紀・中本洋・甲田裕幸. 2015b. 道央地帯における子実用とうもろこしの栽培方法 (第 2 報) 無機養分の吸収推移と窒素施肥法. 北農第 82 巻第 3 号: 12–18.
- 中津智史・濱村美由紀・中本洋・甲田裕幸・相馬潤. 2015c. 道央地帯における子実用とうもろこしの栽培方法 (第 3 報) 栽植密度が子実収量・水分, 倒伏に及ぼす影響. 北農第 82 巻第 4 号: 20–25.
- Nguyen V. L., Assefa1, Y., Schwalbert, R., & Ciampitti1, I, A. 2017. Maize yield and planting date relationship: a synthesis-analysis for US high-yielding contest-winner and field research data. *Frontiers in Plant Science*, 8, 2106.
- 農林水産省. 2010. トウモロコシ牧草・飼料作物の 品種解説, 日本飼料作物種子協会.
- 農林水産省. 2016. 耕地及び作付面積統計. <http://www.maff.go.jp/e/data/stat/92nd/index.html.pdf>. (2019 年 12 月 11 日閲覧).
- 農林水産省. 2017. 「野菜生産出荷統計(平成 29 年産)」. (スイートコーンの需給動向 調査情報部). <https://www.alic.go.jp/content/001165977.pdf> (2020 年 12 月 21 日閲覧).
- 農林水産省. 2020a. 我が国の飼料事情 (国産濃厚飼料を巡る情勢). (農林水産省北海道農政事務所). <https://www.maff.go.jp/hokkaido/suishin/attach/pdf/011025-1.pdf> (2020 年 12 月 21 日閲覧).
- 農林水産省. 2020b. 飼料をめぐる情勢. (農林水産省生産局畜産部飼料課).
- 尾崎政春. 2015. 道央における子実トウモロコシ利用の取り組み. 北畜草会報 3: 73-77.
- Russell, W. A. 1991. Genetic improvement of maize yields. *Advances in Agronomy*. 46: 245–298.

新発田修治. 2017. 道産子実とうもろこしの利用: 道産飼料原料を利用した付加価値販売.
平成 29 年度子実コーン生産シンポジウム要旨集.

Song, L., Yoshihira, T., & Sato, C. 2020a. Grain yield responses to planting density in twin and narrow row cultivation of early cultivars in maize. *Grassland Science*, 66(3): 183–193.

Song, L., Yoshihira, T., & Sato, C. 2020b. Differences in grain yield responses to planting density in twin and narrow row cultivation between early and late maize cultivars. *Grassland Science*. In press.

Stewart, G. 2000. Twin row corn. Retrieved from <http://www.ontarioicorn.org/feb2000art4.html>.
(Cited 21 October, 2020).

菅原啓・義平大樹・佐藤智広・吉村暢彦・森稔明・小川健太. 2014. 子実用トウモロコシに対する千鳥播栽培が収量に及ぼす影響: 栽植密度が増収効果に及ぼす影響. 日本育種学会・日本作物学会北海道談話会会報 55: 35–36.

高垣淳・義平大樹・大野誉史・小阪進一. 2013. サイレージ用トウモロコシに対する千鳥播栽培が収量に及ぼす影響—地力の異なる圃場における中生品種 (相対熟度 100 日) の千鳥播による増収効果と栽植密度の関係—. 北海道畜産草地学会報 1: 84.

Tetio-Kagho, F., & Gardner, F. P. 1988. Responses of maize to plant population density. II. reproductive development, yield, and yield adjustments. *Agronomy Journal*, 80: 935–940.

富沢ゆい子. 2016. 子実用とうもろこしの栽培法と道央地域における輪作体系への導入効果. (中央農試・農業環境部・環境保全 G・病虫害部・クリーン病虫害 G, 生産研究部・生産システム G・畜試・基盤研究部・飼料環境 G・十勝農試・研究部・生産環境 G).

<http://www.naro.affrc.go.jp/harc/contents/seikajoho/folder6601/folder6604/2013kan01.pdf>.

(2020 年 11 月 21 日閲覧).

- 戸澤英男. 2005. トウモロコシ—歴史・文化, 特性・栽培, 加工・利用—. 農文協. 東京. 305-315.
- Troyer, A. F. 1996. Breeding widely adapted, popular maize hybrids. *Euphytica* 92: 163–174.
- 津別農業協同組合. 2018. 子実とうもろこし供給システムに関する調査研究事業. JRA 助成事業: 11.
- 柳原考二. 2020. 北海道子実コーン組合の取り組み. 農業シンポジウム「令和時代の日本農業における子実用とうもろこしの役割」. 令和元年度子実コーン生産シンポジウム要旨集.
- 吉田将大・義平大樹・小阪進一. 2013. サイレージ用トウモロコシに対する千鳥播栽培が収量に及ぼす影響: 振幅距離が増収効果に及ぼす影響. 日本育種学会・日本作物学会北海道談話会会報 54: 45–46.
- 義平大樹・中川直子・小阪進一. 2008. 相対熟度の異なるサイレージ用トウモロコシの栽植密度反応. 北海道畜産草地学会報 42: 50.
- 義平大樹・石川弘大・小阪進一・佐藤智宏. 2012a. 北海道中央部における飼料用トウモロコシに対する千鳥播栽培が収量に及ぼす影響: 早生品種 (RM85~95 日) における千鳥播効果と栽植密度の関係. 日本草地学会誌 58(別): 116.
- 義平大樹・石川弘大・小阪進一・佐藤智宏. 2012b. 北海道中央部における飼料用トウモロコシに対する千鳥播栽培が収量に及ぼす影響: 中生品種 (相対熟度 100 日) における千鳥播効果と栽植密度の関係. 日本草地学会誌 58(別): 115.
- 義平大樹・安田貴大・小阪進一・大塚博志・高陽憲基. 2013a. サイレージ用トウモロコシに対する千鳥播栽培が収量に及ぼす影響: 千歳市における実規模試験. 日本育種学会・日本作物学会北海道談話会会報 54: 47–48.

- 義平大樹・高垣淳・大野誉史・石川弘大・小阪進一. 2013b. サイレージ用トウモロコシに対する千鳥播栽培が収量に及ぼす影響—極早生品種における増収効果および狭畦栽培との比較—. 北海道畜産草地学会報 1: 83.
- 義平大樹・吉田将大・小阪進一. 2014a. 飼料用トウモロコシに対する千鳥播栽培が収量に及ぼす影響—振幅距離が増収効果に及ぼす影響—. 日本草地学会誌 60 別:34.
- 義平大樹・小阪進一・大塚博志・高陽憲基・照井英樹. 2014b. 飼料用トウモロコシに対する千鳥播栽培が収量に及ぼす影響—千歳市における実規模試験—. 日本草地学会誌 60 別: 33
- 義平大樹. 2015a. トウモロコシ栽培における最適個体間距離の検討. 北海道畜産草地学会報 3: 91－95.
- 義平大樹・阿部賀斗・佐藤智宏・柳原孝二・照井英樹. 2015b. 子実用トウモロコシに対する千鳥播栽培が収量に及ぼす影響: 長沼町における実規模試験および狭畦千鳥栽培. 日本草地学会誌 61 別: 28.
- 義平大樹. 2019. 北海道における濃厚飼料作物の潜在的生産性. 濃厚飼料を給与する高泌乳生産は本当に効率的な土地利用か?. 北海道畜産草地学会報 7: 95-97.

Chapter X. Summary

Cropological study on the applicable conditions of twin row cultivation for grain yield increase in maize

Abstract

More than 470 ha of converted paddy fields in central Hokkaido are occupied by maize grain production in recent years, and this number will likely increase in the future. It is crucial to establish a stable and high-yield cultivation technique, spacing the corn plants further apart than traditional planting methods.

We focused on grain yield increase using twin row (TR) cultivation to achieve a consistent and high maize yield. This report is based on testing several cultivation conditions such as planting pattern, nitrogen fertilizer amendments, the distance between plants, sowing time, and the genotype such as early and late cultivars and other different plant-type cultivars. We tested these treatments to obtain the basic knowledge of how the crops responded and to optimize methods that consistently produce a high yield of maize grain. We analyzed how TR planting increased grain yield and how it varied for different cultivation strategies and genotypes.

1. Confirmation of grain yield increase using TR cultivation in a full-scale practical field experiment

We conducted a 2-year, full-scale practical field experiment using a dedicated sowing machine for TR and narrow row (NR) cultivation. The study included an early maize cultivar that reached relative

maturity in 85 days and a late maize cultivar that reached relative maturity in 100 days. We confirmed a grain yield increase.

(1) The effect of the grain yield increase by TR cultivation was higher than that of NR cultivation in the precision field experiment and the full-scale practical field experiment sown with a dedicated machine.

(2) In the full-scale practical field experiment with mechanical sowing, we confirmed the effect of grain yield increase by TR and NR cultivation for both the early and the late cultivar. The grain yield increase was slightly higher in TR cultivation than in NR cultivation. The improvement of the grain yield increase by TR cultivation due to dense planting was higher in the early cultivar than in the late cultivar. The mechanical sowing results in the full-scale practical field experiment were similar to the precision field experiment.

2. Effect of sowing time and distance between plants on grain yield increase of TR

We sowed the late cultivar in a TR planting pattern with a distance of 10, 20, and 30 cm between plants. We compared the grain yield after the experiment ran for 2 years. We also planted the early cultivar and ran a 2-year study. We compared the effect of sowing time on grain yield increase with TR versus NR cultivation.

(1) In the TR cultivation plots, the grain yield increase was higher than the conventional row (CR) plots as the distance between plants increased. Some yield-related traits that are important to consider are the total dry mass and the number of grains per ear. From a growth analysis perspective, the ability of the crop to receive irradiance is critical. The longer the distance between plants, the higher the leaf area index in the TR cultivation arrangement, the slightly higher rate of ear weight increase during the

reproductive stage, and the middle plant height part of the canopy (plant height 100-200 cm) were considered to be due to the high relative illuminance.

(2) The degree of grain yield decrease due to late sowing tended to be smaller in the TR and the NR cultivated plots than in the CR plots. The degree of reduction in the harvest index and the number of grain per ear by late sowing is written as follows: $TR \leq NR < CR$.

3. Effect of planting density on grain yield increase of TR

We investigated the effect of planting density on the grain yield increase by TR cultivation. We tested the cultivars with a relative maturity of 85, 93, and 100 days for 3 years, and we set a 5-level planting density of 7.0, 7.8, 8.9, 10.3, and 12.1 plants m^{-2} . The planting pattern treatments were NR and TR, and we compared those with the CR cultivation.

(1) The change in grain yield (Y) concerning the planting density (X) could be expressed by quadratic curves $Y=a(X-b)^2+c$.

(2) The absolute value of the quadratic coefficient of the quadratic curve representing the planting density response was larger in the order of $TR \leq NR < CR$. In contrast, the maximum yield c was $TR \geq NR > CR$. The optimum planting density b was slightly higher in the TR and the NR cultivation settings than in the CR cultivation setting. When comparing TR and NR, there is no difference in the maximum yield at the optimum planting density, but the stability of grain yield-related to the planting density is higher in TR than in NR.

The grain yields associated with both twin row cultivation (TR) and narrow row cultivation (NR) increased more than those associated with conventional row cultivation (CR) as the planting density increased. However, the grain yields associated with TR and NR were greatest at the 7.8–8.9 plants

m^{-2} planting density, which also produced the greatest grain yield associated with CR.

4. Effect of nitrogen topdressing on grain yield increase of TR

A nitrogen topdressing level of 6 g per m^{-2} was applied (N6) during the panicle differentiation stage (the 6th to 7th leaf stage) in early cultivars as a fertilizer nitrogen treatment, and we compared this with a non-application treatment (N0). We compared the amount of nitrogen absorption, grain yield, and related traits for 3 years.

(1) The grain yield in N6 was greater than that in N0 at all the planting densities. The difference between N6 and N0 was the greatest at the 10.1 plants m^{-2} planting density, which produced the greatest grain yield in N0.

(2) The nitrogen use efficiency was $\text{TR} \geq \text{NR} \geq \text{CR}$.

5. Effect of cultivar characteristics on grain yield increase of TR

We investigated the effect of planting density on the grain yield increase in the TR cultivation plots. We tested early cultivars (relative maturity of 85 and 93 days) and late cultivars (relative maturity of 100 days) for 3 years, and we set a 5-level planting density of 7.0, 7.8, 8.9, 10.3, 12.1 plants per m^{-2} . The planting pattern treatments were NR and TR, and we compared those with CR.

(1) When we compared the early and late cultivars, the early cultivars had a smaller absolute value of a and had a large value b of the quadratic curve than the late cultivars.

(2) In the early cultivars, the absolute value of a and the absolute value of b was larger than that in late cultivars. In the low-yield years, the absolute value of a for the early cultivars exceeded that of the late cultivars in densely planted plots, but in other cases, the late cultivars had higher absolute values of a than the early cultivars.

(3) The grain yields of cultivars having high proportions of lower leaves were greater than those of cultivars having high proportions of upper leaves at all the planting densities.

(4) The grain yield increases associated with TR and NR for cultivars having high proportions of top leaves with poor light reception were greater than those for cultivars having high proportions of lower leaves with good light reception. In the former, the grain yield increase associated with TR was greater than that associated with NR.

6. High grain yield factor of TR

We examined planting patterns, nitrogen fertilizer, early and late cultivars, and different cultivar types that affect grain yield increase from the planting density response of yield-related traits, growth analysis, and canopy-light distribution characteristics.

(1) Some factors related to high yield and yield stability in TR and NR cultivation types include the degree of decrease in the harvest index associated with dense planting and the number of grains per ear or the hundred-grain weight based on the planting density response of yield-related traits. The degree of decrease was alleviated because of this. In cultivars with many grains per ear, the degree of reduction in the number of grains per ear was greatly influenced by cultivars with a substantial hundred-grain weight. This effect that large hundred-grain weight cultivars have is due to the alleviation of the degree of reduction in the hundred-grain weight.

(2) There are several high grain yield and yield stability factors to consider when using TR cultivation. Growth analysis and light distribution characteristics are two of them. The TR cultivation that caused high yield and stability outcomes resulted from a rapid increase of the leaf area index, the light-receiving rate in the middle of vegetative growth, and good light distribution characteristics in

the first half of the reproductive stage. These factors greatly impacted the difference between the planting patterns of the increase of the leaf area index in sparse planting and the light-receiving rate in dense planting. The best light distribution characteristics in the TR plantings resulted in a high crop growth rate and ear growth rate in the middle stage of vegetative growth. Early reproductive growth and high grain yield were achieved under these optimum light distribution conditions.

(3) Nitrogen topdressing was one factor that contributed to high-yield. This increase in yield was because of the harvest index and the reduction in the grain number per ear with dense planting in terms of the planting density response of yield-related traits.

(4) The early cultivar had a more stable planting density response than the late cultivar because of the degree of reduction in the harvest index and the number of grains per ear with dense planting. This phenomenon was smaller in the early cultivar than in the late cultivar varieties. The change in the extinction coefficient with the planting density was smaller in the early cultivar than in the late cultivar when considering the light distribution characteristics. This change was also related to the stability of the planting density response of the grain yield.

(5) Yield-related traits in lower leafy cultivars tend to be higher yield and higher yield stability concerning planting density than standard plant-type cultivars owing to the higher harvest index and the number of grains per ear. We determined the degree to which these traits were reduced owing to dense planting by observing that the lower leafy cultivar was smaller than the standard cultivar. When considering light distribution characteristics, we determined the degree of reduction of the dense planting-associated traits. The extinction coefficient of the lower leafy cultivar was lower, and planting density had little impact on these traits.

7. Conclusion

On the basis of our findings, we concluded that TR produced high grain yields because of the high net assimilation rate, owing to the good light reception during the early ripening period, and because of the rapid increase in the light interception rate during the vegetative growth stage. Cultivation conditions in which the yield increase associated with TR was greater than that of NR are recommended. They are as follows: (1) when aiming for high yields through elevated planting densities of early cultivars that reach relative maturity by 85 days; (2) when using middle and late cultivars that reach relative maturity after more than 100 days; (3) when using cultivars with poor light distribution characteristics, such as cultivars with high proportions of lower leaves or horizontal leaves; (4) at a late planting time; (5) under ventilated field conditions in which an uneven planting density is likely to occur and the numbers of stock shortages are very high; and (6) when using cultivars and field conditions that result in easy lodging.

If there is no lodging that causes a decrease in yield, the most suitable combination of cultivation conditions and cultivars for maximizing yield in central Hokkaido is the cultivars with a high proportion of lower leaves (i.e., KD420), which is about 10.0 plants m⁻² in early May. We considered that the cultivation conditions were such that the distance between plants was 20 cm or more, and the 6th to 7th leaf stage nitrogen was top-fertilized in the twin row cultivation.

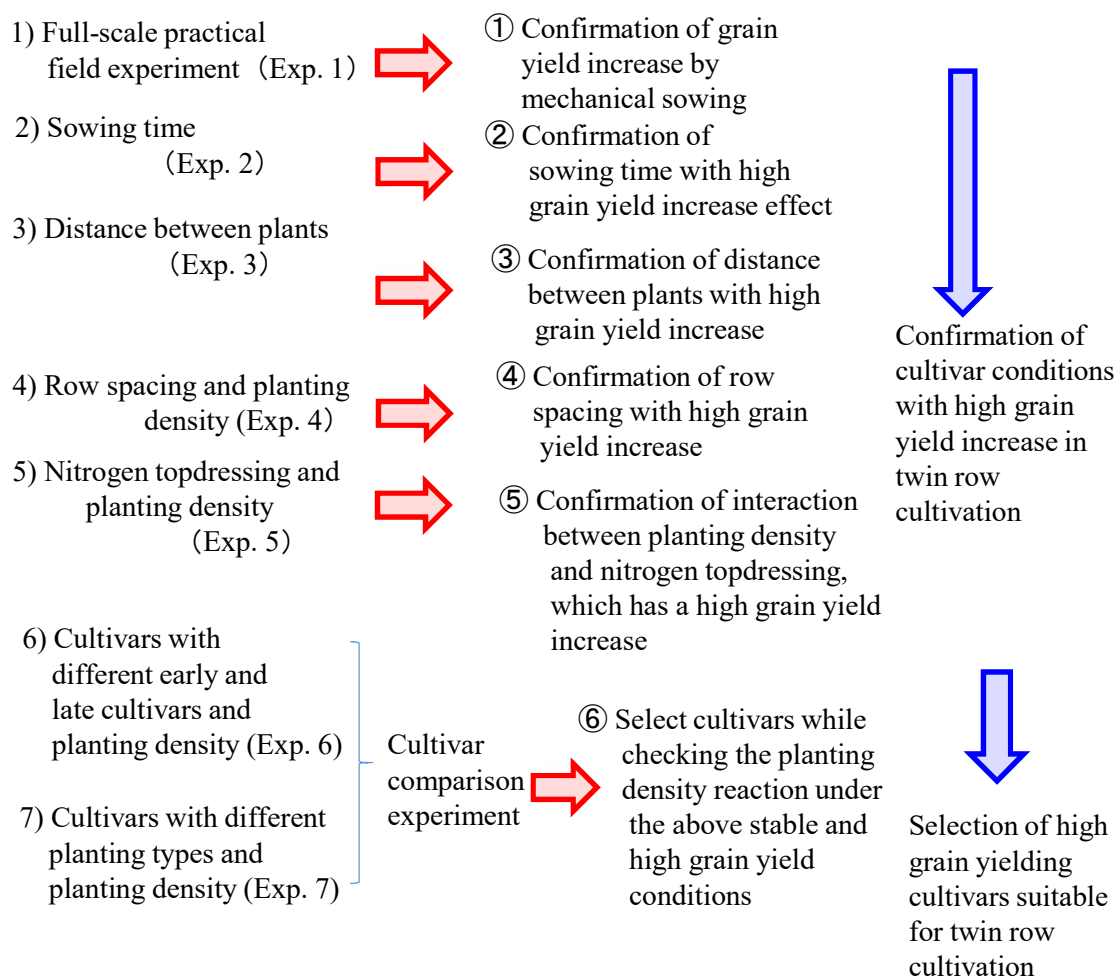


Figure I-1 Procedure for conducting the experiments.

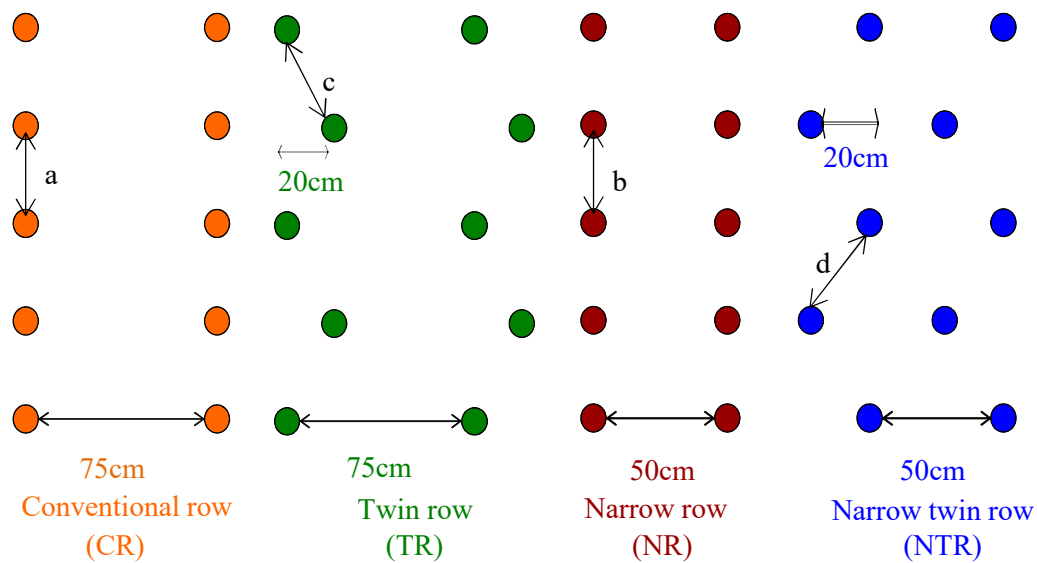
Table II-1. Abstracts of seven experiments.

No. of experiment	Description chapter	Title of experiment	Year	Sowing date (Month/date)	Experimental location	Cultivars	Planting pattern	Row spacing (cm)	Hill distance (cm)	Planting density (plants m ⁻²)
Exp. 1	Chapter III-1	Increased yield of TR in full-scale experiments by mechanical sowing	2015	5/10 5/6	Rakuno Naganuma	P8025, P0023	CR, TR NR	75 50	18.5, 15.5, 12.5 23.0, 18.9	7.2, 8.6, 10.9 8.6, 10.6
Exp. 2	Chapter III-2	Effect of sowing time on the grain yield increase of TR cultivation	2015 2016	5/6, 16, 26 5/1, 15, 29	Naganuma Rakuno	P8025, P9027 P8025, P9027	CR, TR NR	75 50	13 19.5	10.3 10.3
Exp. 3	Chapter III-3	Effect of the distance between plants on the grain yield increase of TR cultivation	2013 2018	5/21 5/2	Rakuno	36B08, P1543	CR, TR	75	15	8.9
Exp. 4	Chapter III-4	Effect of row spacing on the grain yield increase of TR cultivation	2015 2016	5/13 5/15	Rakuno	P9027	CR, TR NR, NTR	75 50	19, 17, 15, 13, 11 28.5, 25.5, 22.5, 19.5, 16.5	7.0, 7.8, 8.9, 10.3, 12.1
Exp. 5	Chapter IV	Effect of nitrogen topdressing and planting density on the grain yield increase of TR cultivation	2017 2018 2019	5/2 5/1 4/27	Rakuno	P8025 P8025 P8025	CR, TR NR	75 50	19, 17, 15, 13, 11 28.5, 25.5, 22.5, 19.5, 16.5	7.0, 7.8, 8.9, 10.3, 12.1
Exp. 6	Chapter V-1	Effect of early and late cultivars and planting density on the grain yield increase of TR cultivation	2017 2018 2019	5/2 5/1 4/27	Rakuno	P8025, 36B08 P8025, 36B08 P8025, 36B08	CR, TR NR	75 50	19, 17, 15, 13, 11 28.5, 25.5, 22.5, 19.5, 16.5	7.0, 7.8, 8.9, 10.3, 12.1
Exp. 7	Chapter V-2	Effect of cultivars with different plant type and planting density on the grain yield increase of TR cultivation	2017 2018 2019	5/2 5/1 4/27	Rakuno	KD420, 36B08 KD420, 36B08 KD420, 36B08	CR, TR NR	75 50	19, 17, 15, 13, 11 28.5, 25.5, 22.5, 19.5, 16.5	7.0, 7.8, 8.9, 10.3, 12.1

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

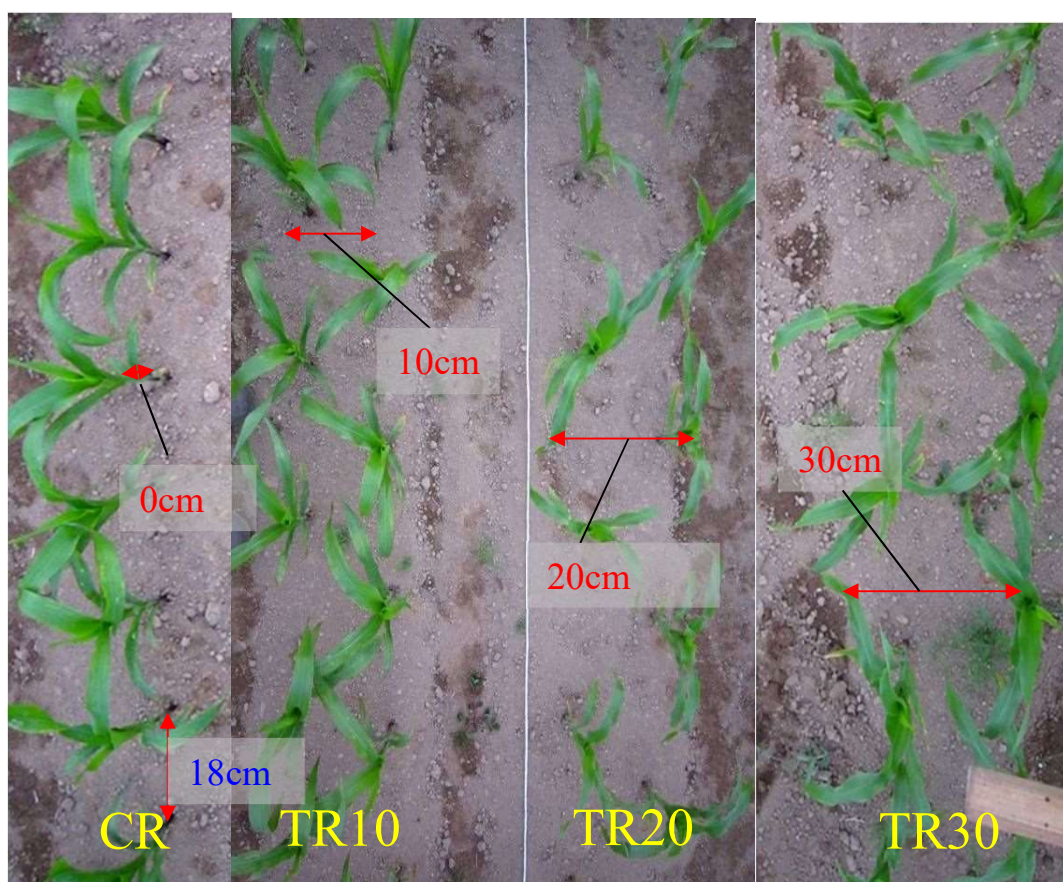
Rakuno indicate Field crop production station in Rakuno Gakuen University.

Naganuma indicate Yanagihara farm in Naganuma town, Hokkaido.



FigureII-1. Plant placement in each planting pattern (Exp.1, 2, 3, 4, 5, 6, 7).

Row spacing (a) was 11, 13, 15, 17 or 19 cm in conventional row (CR) and twin row (TR) cultivation.
 Row spacing (b) was 16.5, 19.5, 22.5, 25.5 or 28.5 cm in narrow row (NR) and narrow twin row (NTR) cultivation.
 a, c ($=\sqrt{a^2 + 20^2}$), b, and d ($=\sqrt{b^2 + 20^2}$) indicate shortest inter-individual distance in conventional row (CR), twin row (TR), narrow row (NR), and narrow twin row (NTR), respectively.
 Vertical distance with row in seed placement were 20 cm.



FigureII-2. Distance between plants (sub row spacing) in twin row cultivation (Exp. 3).

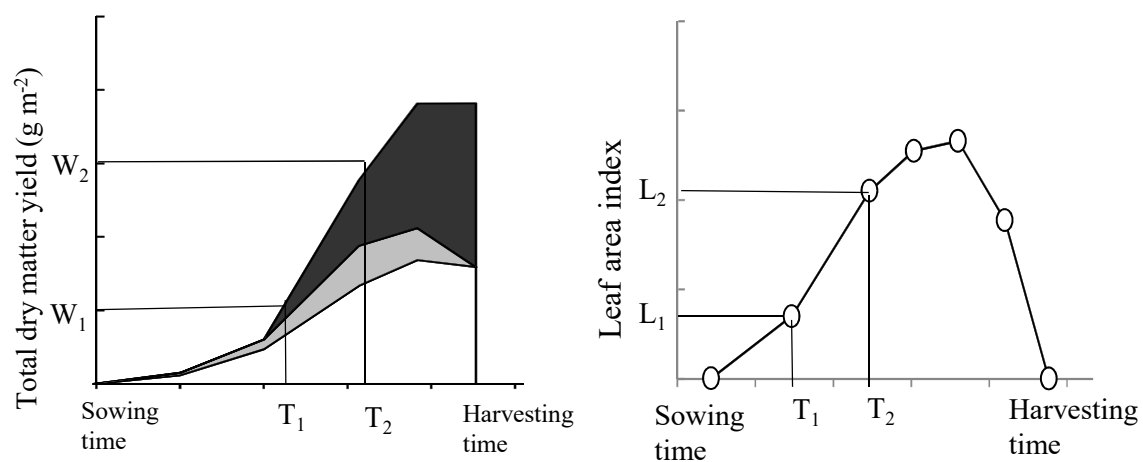


Figure II-3. Growth parameters calculation method (Exp.2, 6, 7).

When the total dry matter yield at T_1 and T_2 is W_1 and W_2 , the leaf area index is L_1 and L_2 , and the ear dry matter weight is E_1 and E_2

$$\text{CGR (Crop Growth Rate)} = (W_2 - W_1) / (T_2 - T_1)$$

$$\text{MLAI (Mean leaf area index)} = (L_2 - L_1) / (\ln(L_2) - \ln(L_1))$$

$$\text{NAR (Net Assimilation Rate)} = \text{CGR} / \text{MLAI}$$

$$\text{EGR (Ear Growth Rate)} = (E_2 - E_1) / (T_2 - T_1)$$



Figure II-4. Instruments used to measure the extinction coefficient, experimental scene in maize community and calculation method (Exp. 2, 6, 7).

I: Photosynthetic photon flux density at plant height

I_0 : Photosynthetic photon flux density on the upper surface of plant canopy

I/I_0 : Relative illuminance at plant height

F: Accumulated leaf area from the top

K: Extinction coefficient

$$-KF = \text{Loge}(I/I_0)$$

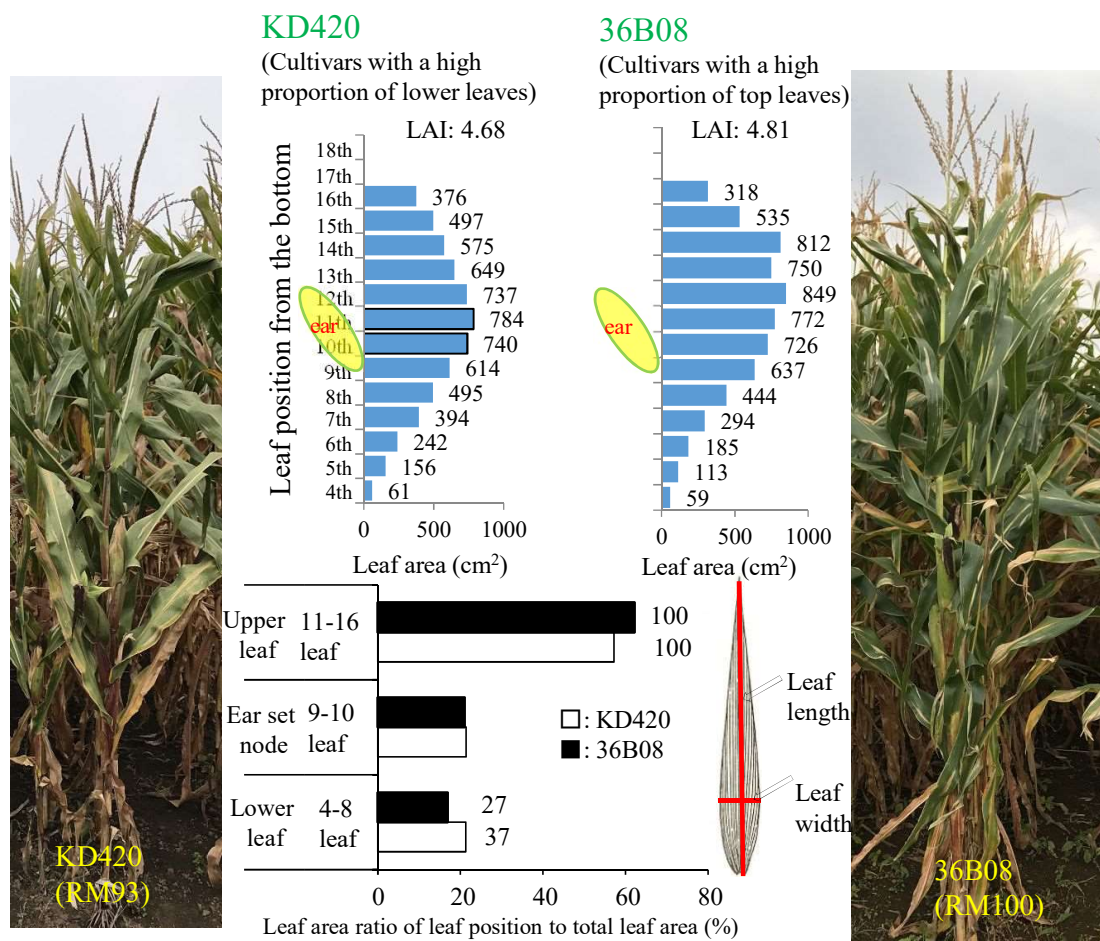


Figure II-5. Vertical distribution of leaf area by leaf position.

The numbers in the figure indicate percentage when the leaf area of the upper leaves is 100

$$\text{Leaf area} = \pi/4 \times (\text{Leaf length} \times \text{Leaf width})$$

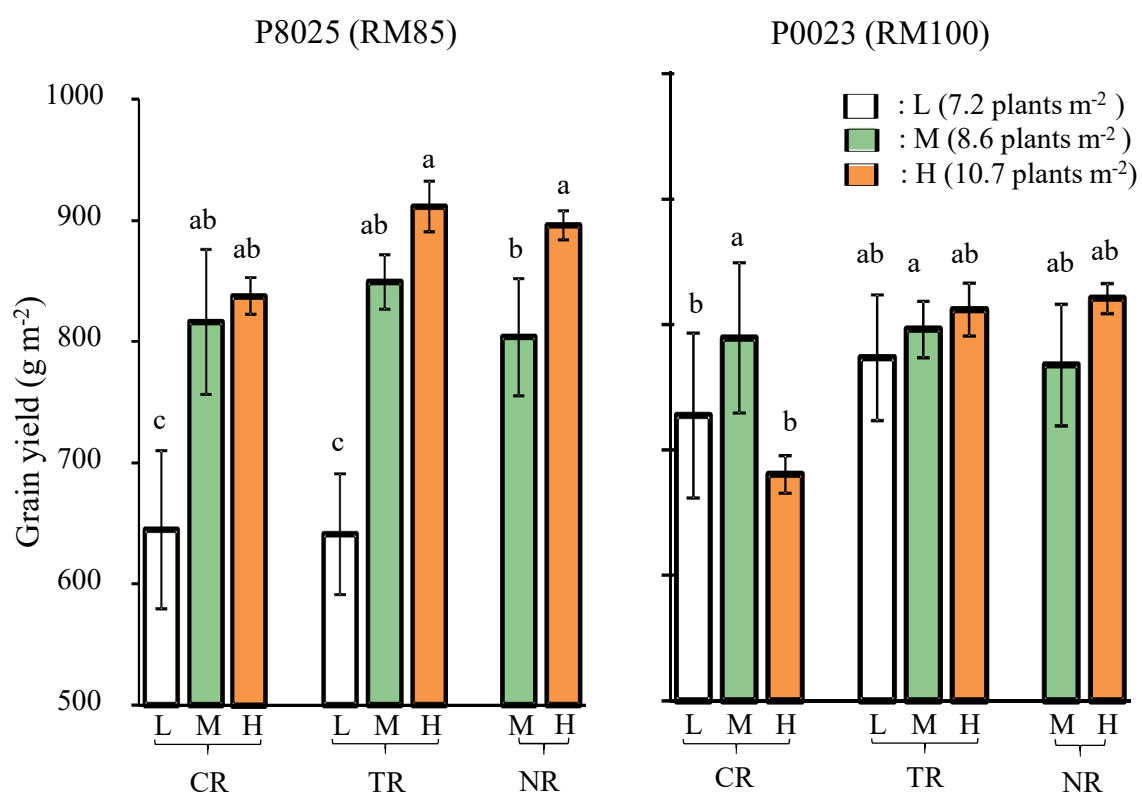


Figure III -1. Responses of grain yield to planting density (Exp.1).

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

L, M, and H indicate planting density of 7.2, 8.6, 10.7 plants m⁻² (Sparse planting, Standard planting, Dense planting), respectively.

P8025 (RM85) and P0023 (RM100) indicate cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

Different alphabets show significant at 5% level (Tukey-Kramer).

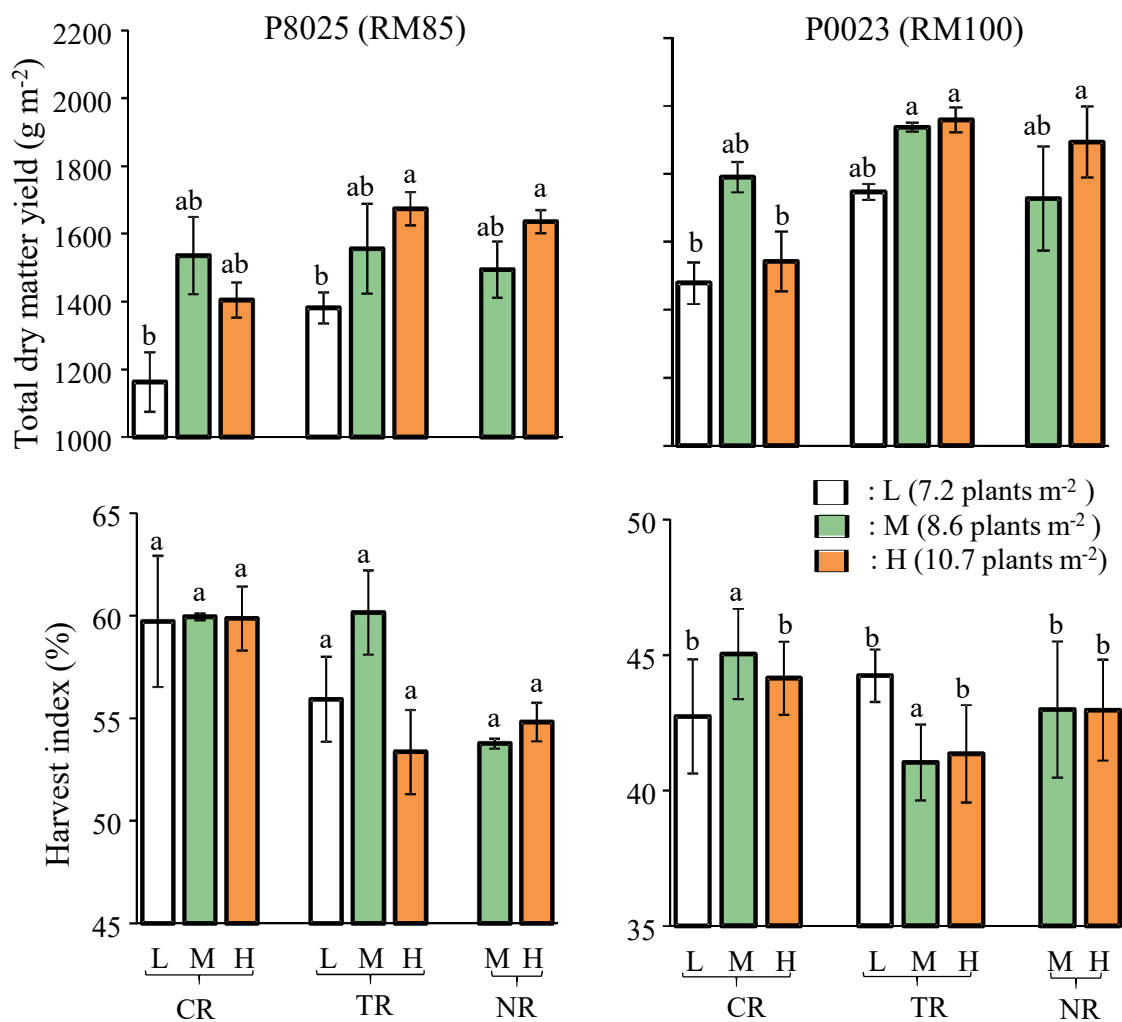


Figure III -2. Responses of total dry matter yield and harvest index to planting density (Exp.1).

CR, TR, NR indicate conventional row, twin row, and narrow row planting cultivation, respectively. L, M, and H indicate planting density of 7.2, 8.6, 10.7 plants m⁻² (Sparse planting, Standard planting, Dense planting), respectively.

P8025 (RM85) and P0023 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

Different alphabets show significant at 5% level (Tukey-Kramer).

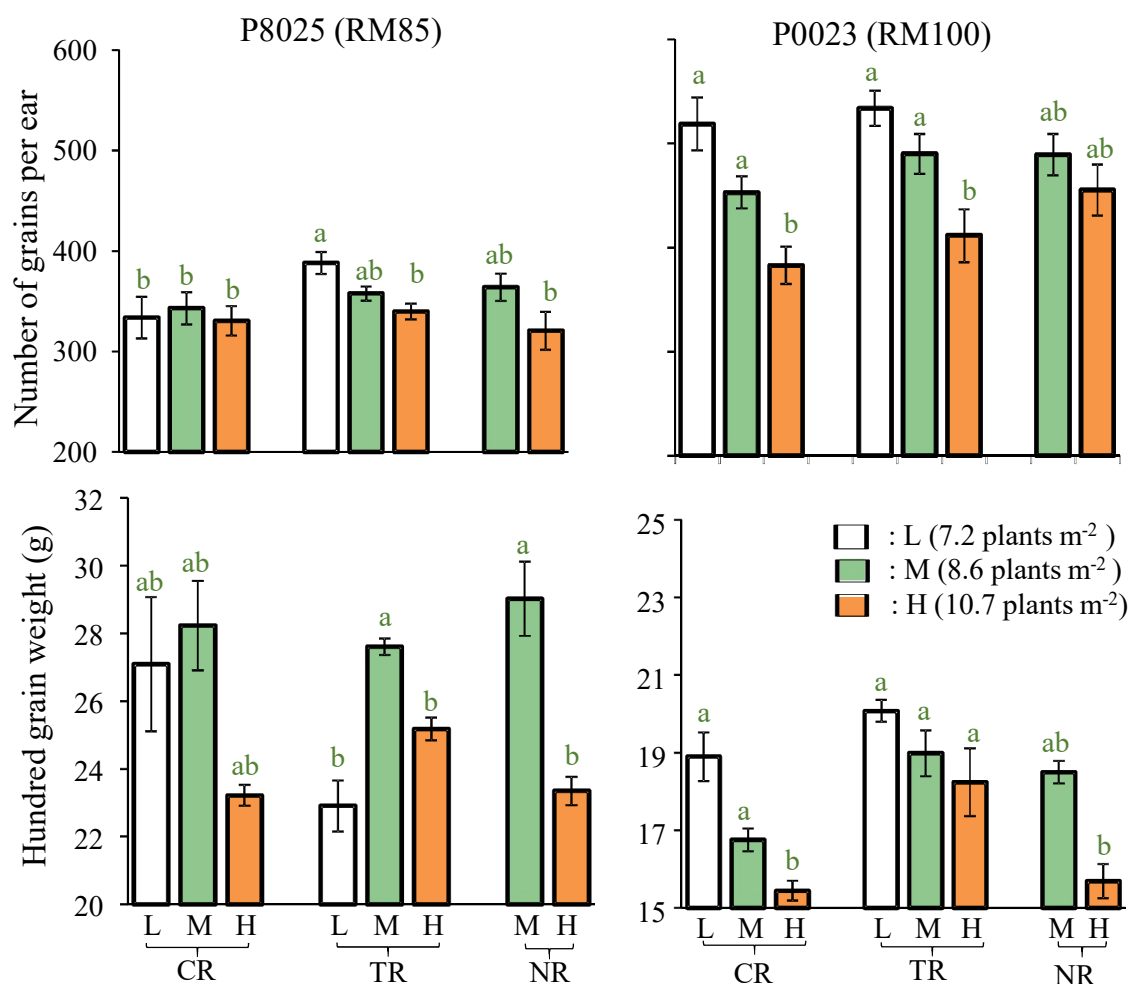


Figure III -3. Responses of number of grains per ear and hundred grain weight to planting density (Exp.1).

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

L, M, and H indicate planting density of 7.2, 8.6, 10.7 plants m⁻² (Sparse planting, Standard planting, Dense planting), respectively.

P8025 (RM85) and P0023 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

Different alphabets show significant at 5% level (Tukey-Kramer).

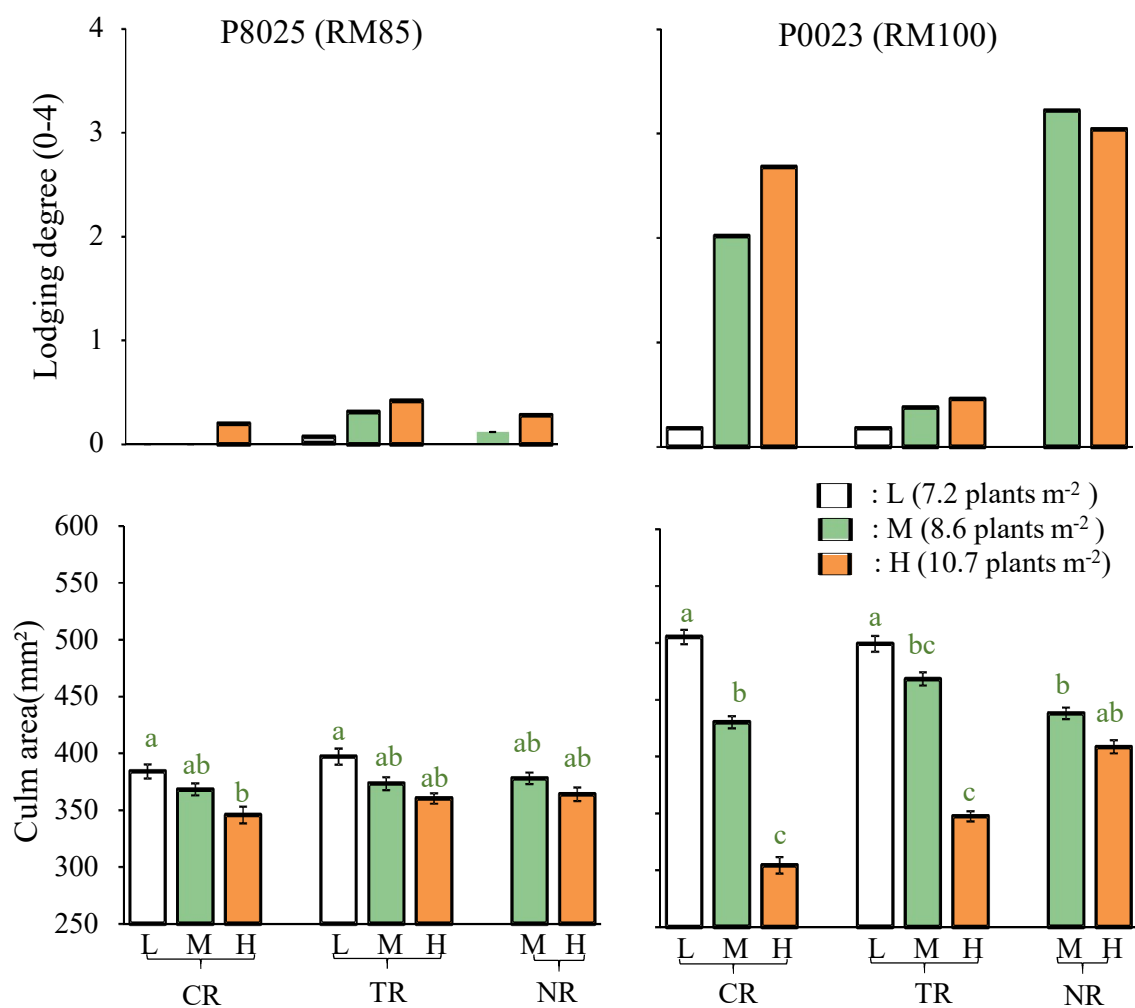


Figure III -4. Lodging degree and culm area (Exp.1).

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

L, M, and H indicate planting density of 7.2, 8.6, 10.7 plants m⁻² (Sparse planting, Standard planting, Dense planting), respectively.

P8025 (RM85) and P0023 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

Different alphabets show significant at 5% level (Tukey-Kramer).

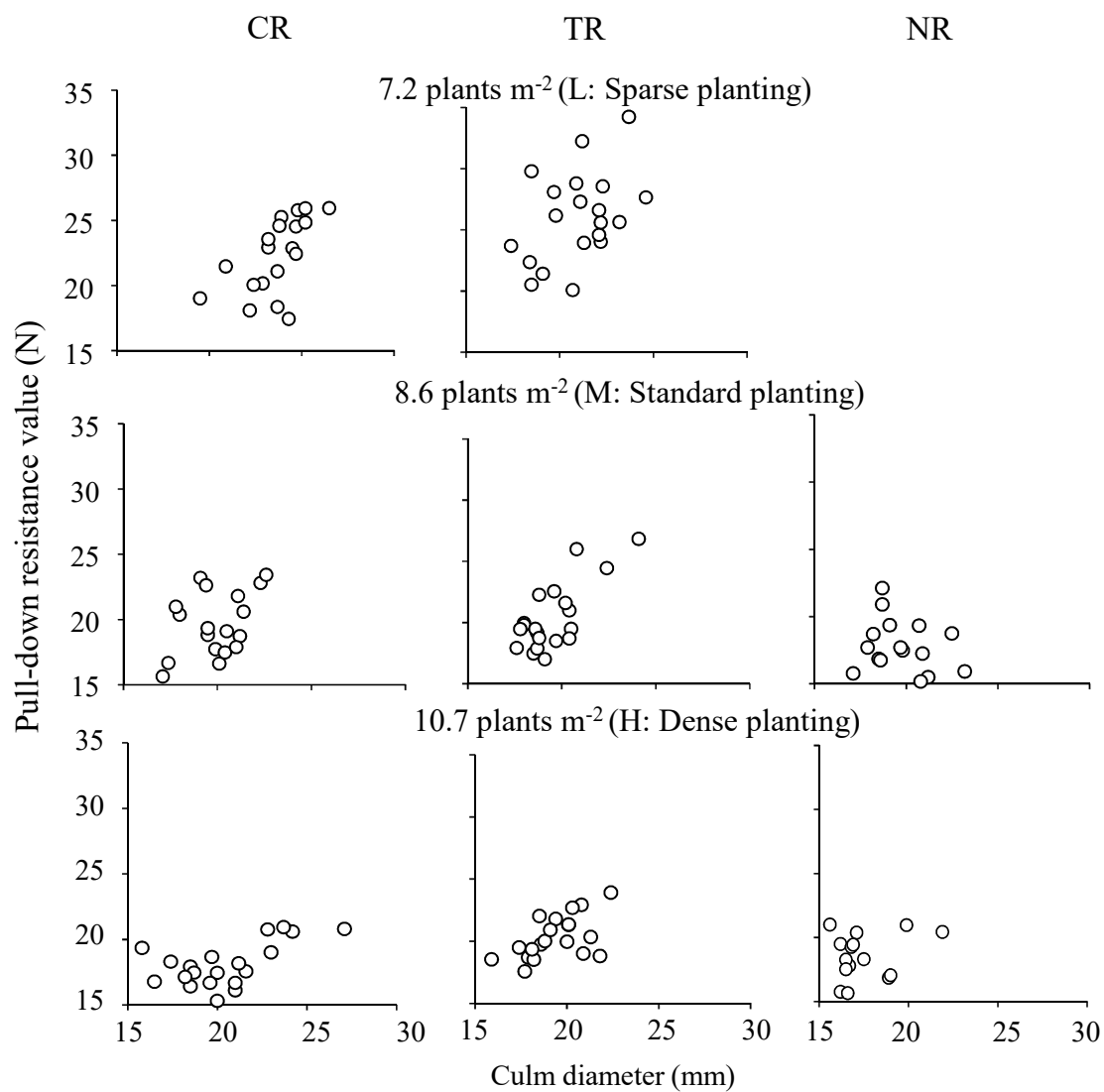


Figure III -5. Relationship between culm diameter and pull-down resistance (P8025, Exp.1).

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

L, M, and H indicate planting density of 7.2, 8.6, 10.7 plants m⁻² (Sparse planting, Standard planting, Dense planting), respectively.

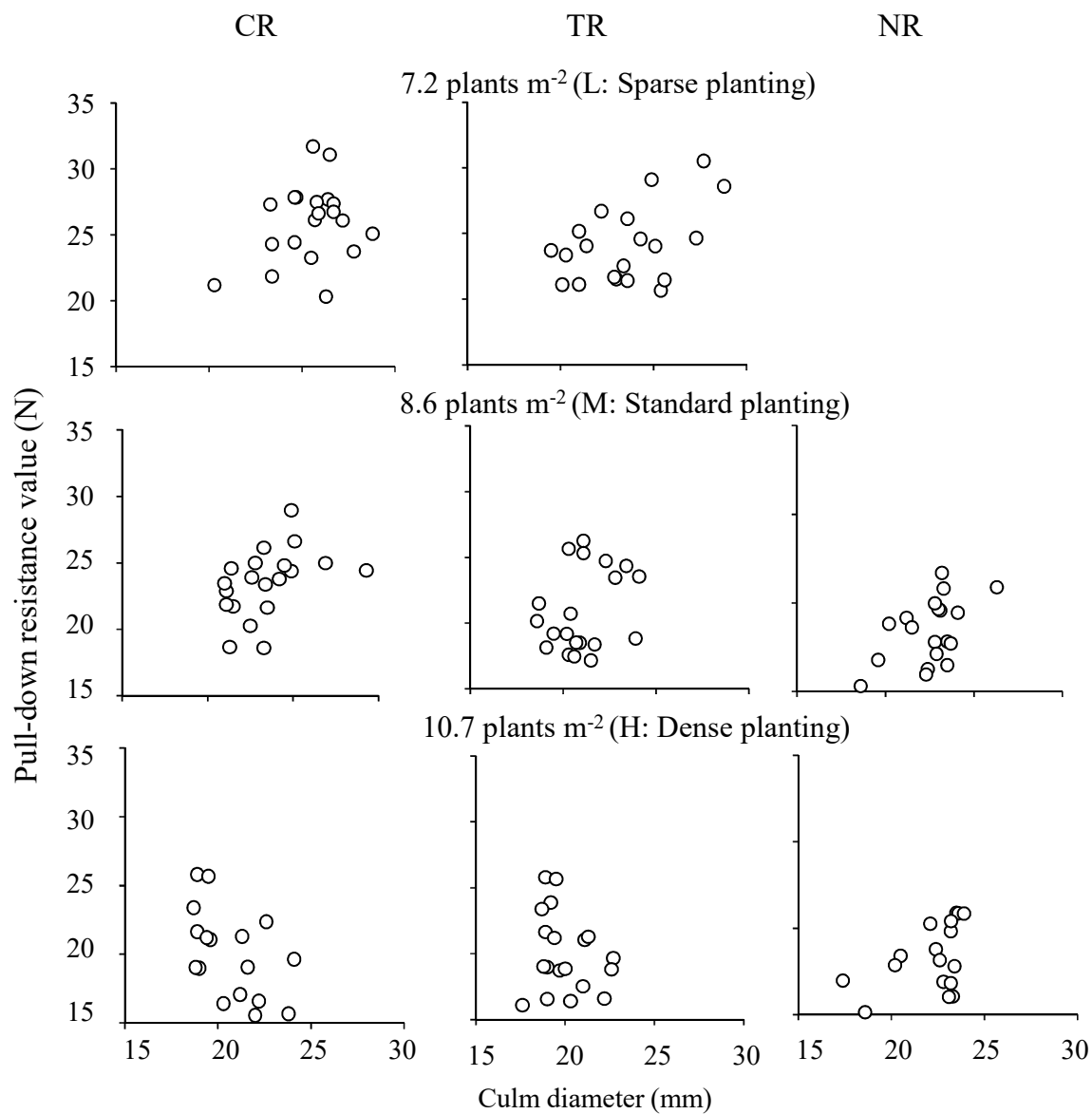


Figure III -6. Relationship between culm diameter and pull-down resistance (P0023, Exp.1).

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

L, M, and H indicate planting density of 7.2, 8.6, 10.7 plants m⁻² (Sparse planting, Standard planting, Dense planting), respectively.

Table III-1. Pull-down resistance value per culm diameter (Exp.1).

Planting density	Planting pattern	P8025 (RM85)				P0023 (RM100)			
H	CR	0.90	±	0.02	a	0.94	±	0.05	ab
	TR	1.05	±	0.02	b	0.99	±	0.05	b
	NR	0.99	±	0.06	ab	0.81	±	0.02	a
M	CR	0.96	±	0.03	b	1.01	±	0.02	b
	TR	1.04	±	0.02	b	1.00	±	0.03	b
	NR	0.89	±	0.03	a	0.81	±	0.02	a
L	CR	0.93	±	0.03	a	1.02	±	0.03	a
	TR	1.25	±	0.04	b	1.03	±	0.03	a

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

L, M, and H indicate planting density of 7.2, 8.6, 10.7 plants m⁻² (Sparse planting, Standard planting, Dense planting), respectively.

P8025 (RM85) and P0023 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

Different alphabets show significant at 5% level (Tukey-Kramer).

Table III-2. Average precipitation, air temperature, solar radiation during growing seasons (2015–2016, Exp.2).

Month	Precipitation (mm)			air temperature (°C)			Solar radiation (MJ m ⁻²)		
	2015	2016	2004-2014 ^a	2015	2016	2004-2014 ^a	2015	2016	2004-2014 ^a
5	56	56	64	12.4	13.0	11.2	719	675	574
6	112	150	64	15.2	14.7	16.3	557	538	597
7	69	145	107	19.6	18.6	19.8	576	613	554
8	95	308	123	20.5	22.1	21.8	541	566	484
9	184	92	128	16.7	17.6	17.9	400	422	391
10	79	54	88	9.4	9.2	11.4	326	308	297
Total	594	804	575	15.6 ^b	15.9 ^b	16.4 ^b	3118	3122	2897

a: Mean value for 2004–2014

b: Indicate average value

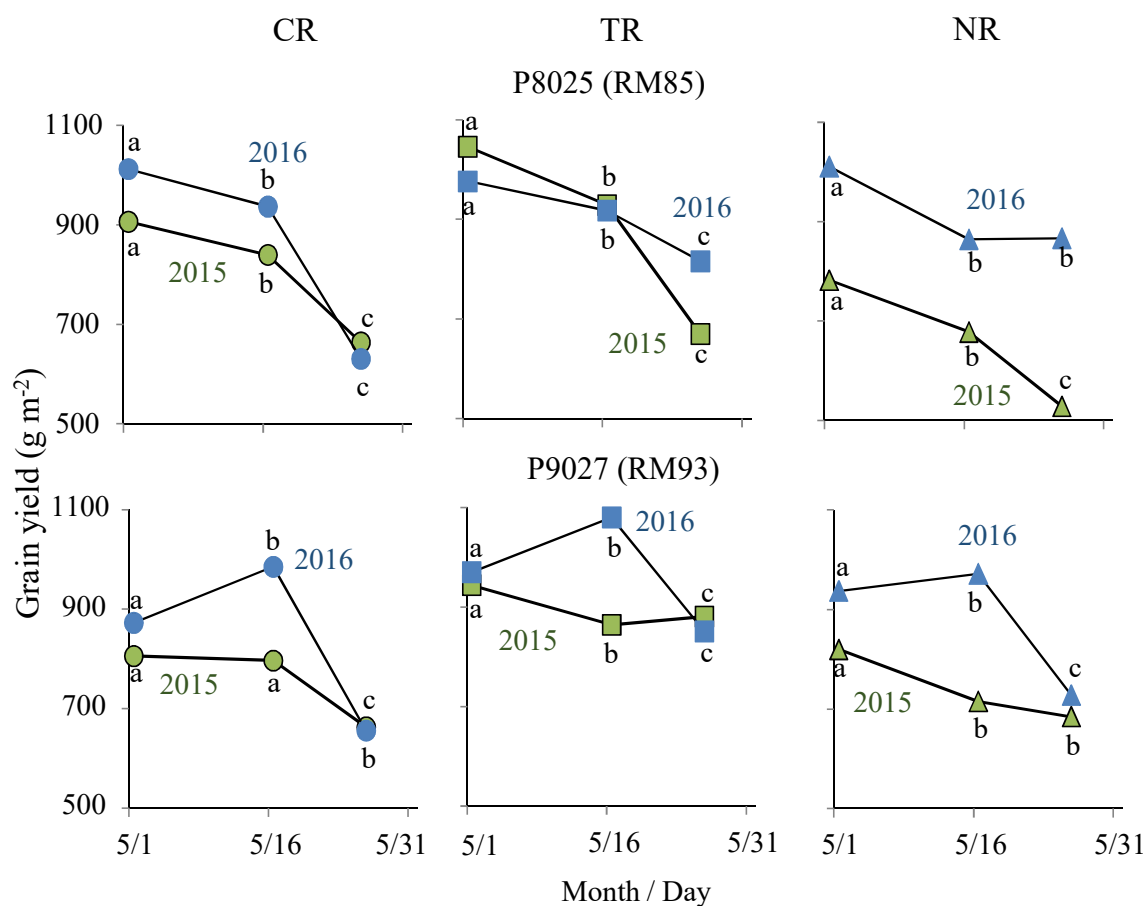


Figure III -7. Responses of grain yield to sowing date (Exp.2).

●, ■ and ▲ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation of 2015 in Naganuma town, respectively.

●, ■ and ▲ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation of 2016 in Ebetsu city, respectively.

P8025 (RM85) and P9027 (RM93) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

Different alphabets show significant at 5% level (Tukey-Kramer).

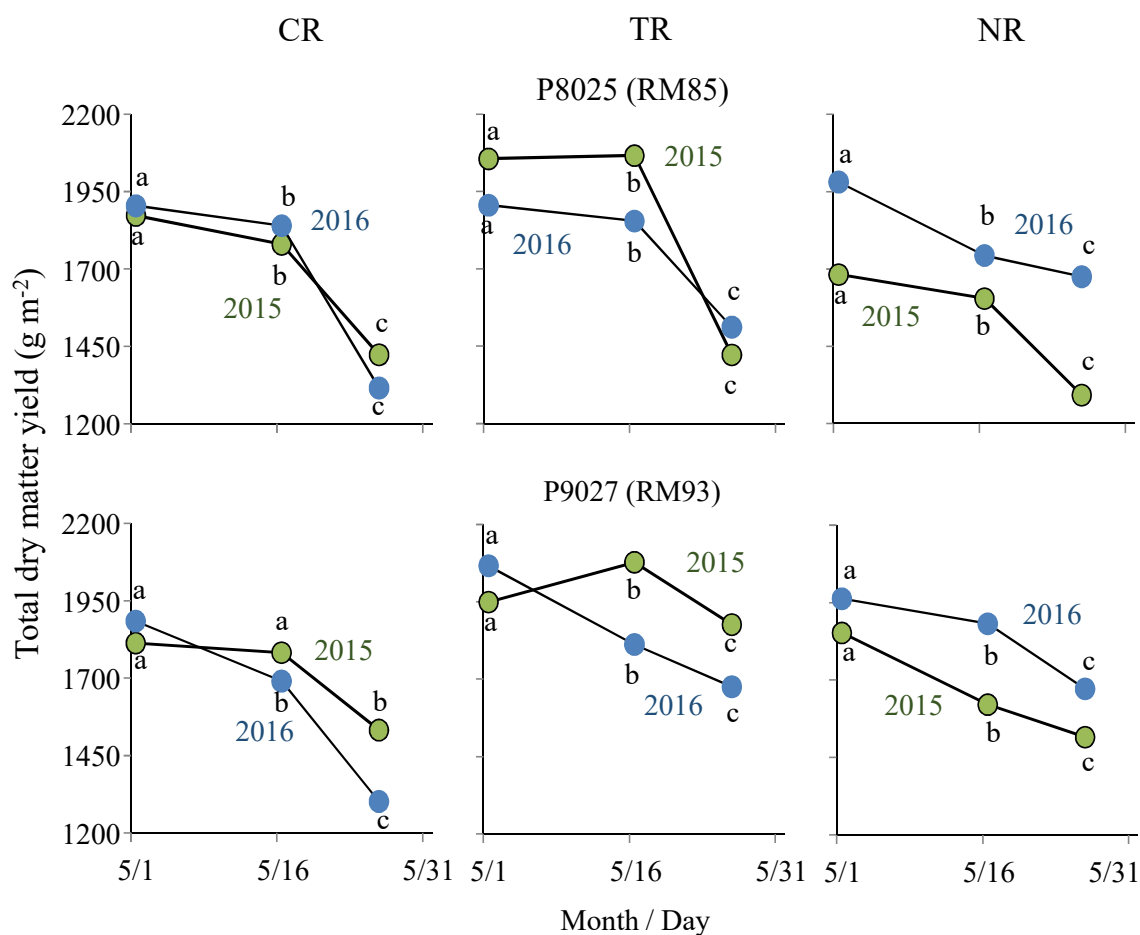


Figure III -8. Responses of total dry matter yield to sowing date (Exp.2).

●, ■ and ▲ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation of 2015 in Naganuma town, respectively.

●, ■ and ▲ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation of 2016 in Ebetsu city, respectively.

P8025 (RM85) and P9027 (RM93) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

Different alphabets show significant at 5% level (Tukey-Kramer).

Table III -3. Effect of sowing date on grain yield response to planting pattern
(P8025, 2015, Exp.2).

Sowing date	Planting Pattern	Grain yield (g m ⁻²)	Total top dry matter yield (g m ⁻²)	Harvest index (%)	Number of grain per ear	Hundred grain weight (g)
5/1 (Early sowing)	CR	906	1873	49.7	342	25.8
	TR	1047	2056	49.4	335	30.0
	NR	782	1682	47.6	320	23.8
5/15 (Standard sowing)	CR	839	1780	44.8	336	24.3
	TR	929	2066	43.6	361	25.1
	NR	678	1605	41.3	342	19.3
5/29 (Late sowing)	CR	664	1423	47.0	316	20.5
	TR	670	1422	45.6	332	19.7
	NR	529	1293	4.9	313	16.5
Sowing date (S)		***	**	†	*	ns
Planting pattern (P)		***	**	ns	*	ns
S × P		**	ns	ns	ns	ns

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

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

Table III -4. Effect of sowing date on grain yield response to planting pattern
(P8025, 2016, Exp.2).

Sowing date	Planting Pattern	Grain yield (g m ⁻²)	Total top dry matter yield (g m ⁻²)	Harvest index (%)	Number of grain per ear	Hundred grain weight (g)
5/1 (Early sowing)	CR	1012	1904	53.1	389	25.3
	TR	976	1906	51.3	400	23.7
	NR	1010	1981	51.0	389	25.3
5/15 (Standard sowing)	CR	937	1840	50.9	385	23.5
	TR	918	1855	49.5	383	23.3
	NR	864	1744	49.6	395	21.2
5/29 (Late sowing)	CR	631	1315	47.9	356	17.2
	TR	816	1512	54.0	361	22.0
	NR	866	1675	51.7	368	22.9
Sowing date (S)		*	**	ns	**	ns
Planting pattern (P)		ns	†	ns	ns	ns
S × P		ns	*	ns	*	ns

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

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

Table III -5. Effect of sowing date on grain yield response to planting pattern
(P9027, 2015, Exp.2).

Sowing date	Planting Pattern	Grain yield (g m ⁻²)	Total top dry matter yield (g m ⁻²)	Harvest index (%)	Number of grain per ear	Hundred grain weight (g)
5/1 (Early sowing)	CR	806	1813	44.3	388	20.3
	TR	944	1949	48.5	433	19.0
	NR	820	1853	44.2	416	19.2
5/15 (Standard sowing)	CR	797	1782	44.7	387	20.1
	TR	865	2078	41.7	419	20.5
	NR	715	1516	44.1	438	21.4
5/29 (Late sowing)	CR	663	1533	43.2	373	17.3
	TR	881	1876	47.5	365	25.0
	NR	685	1622	45.1	436	17.4
Sowing date (S)		ns	ns	ns	ns	ns
Planting pattern (P)		**	**	ns	ns	ns
S × P		ns	†	ns	ns	ns

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

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

Table III -6. Effect of sowing date on grain yield response to planting pattern
(P9027, 2016, Exp.2).

Sowing date	Planting Pattern	Grain yield (g m ⁻²)	Total top dry matter yield (g m ⁻²)	Harvest index (%)	Number of grain per ear	Hundred grain weight (g)
5/1 (Early sowing)	CR	873	1691	46.4	417	22.0
	TR	970	1813	47.0	473	20.0
	NR	938	1673	47.8	481	21.0
5/15 (Standard sowing)	CR	986	1884	58.3	435	24.0
	TR	1081	2066	59.6	478	22.0
	NR	971	1882	51.6	433	24.0
5/29 (Late sowing)	CR	656	1302	49.2	417	15.0
	TR	851	1676	50.8	440	18.8
	NR	728	1963	43.6	429	16.5
Sowing date (S)		**	**	**	†	ns
Planting pattern (P)		**	***	*	ns	†
S × P		ns	**	ns	ns	ns

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

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

Table III -7. Analysis of variance table for grain yield and related traits (2016, Exp.2).

Factor	Grain yield (g m ⁻²)	Total top dry matter yield (g m ⁻²)	Harvest index (%)	Number of grain per ear	Hundred grain weight (g)
Cultivar (C)	ns	ns	ns	ns	ns
Planting pattern (P)	***	***	†	†	ns
Sowing date (S)	**	***	*	ns	*
C × S	*	*	ns	ns	ns
C × P	*	**	†	ns	ns
P × S	**	***	†	ns	ns
C × S × P	ns	ns	*	ns	ns

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

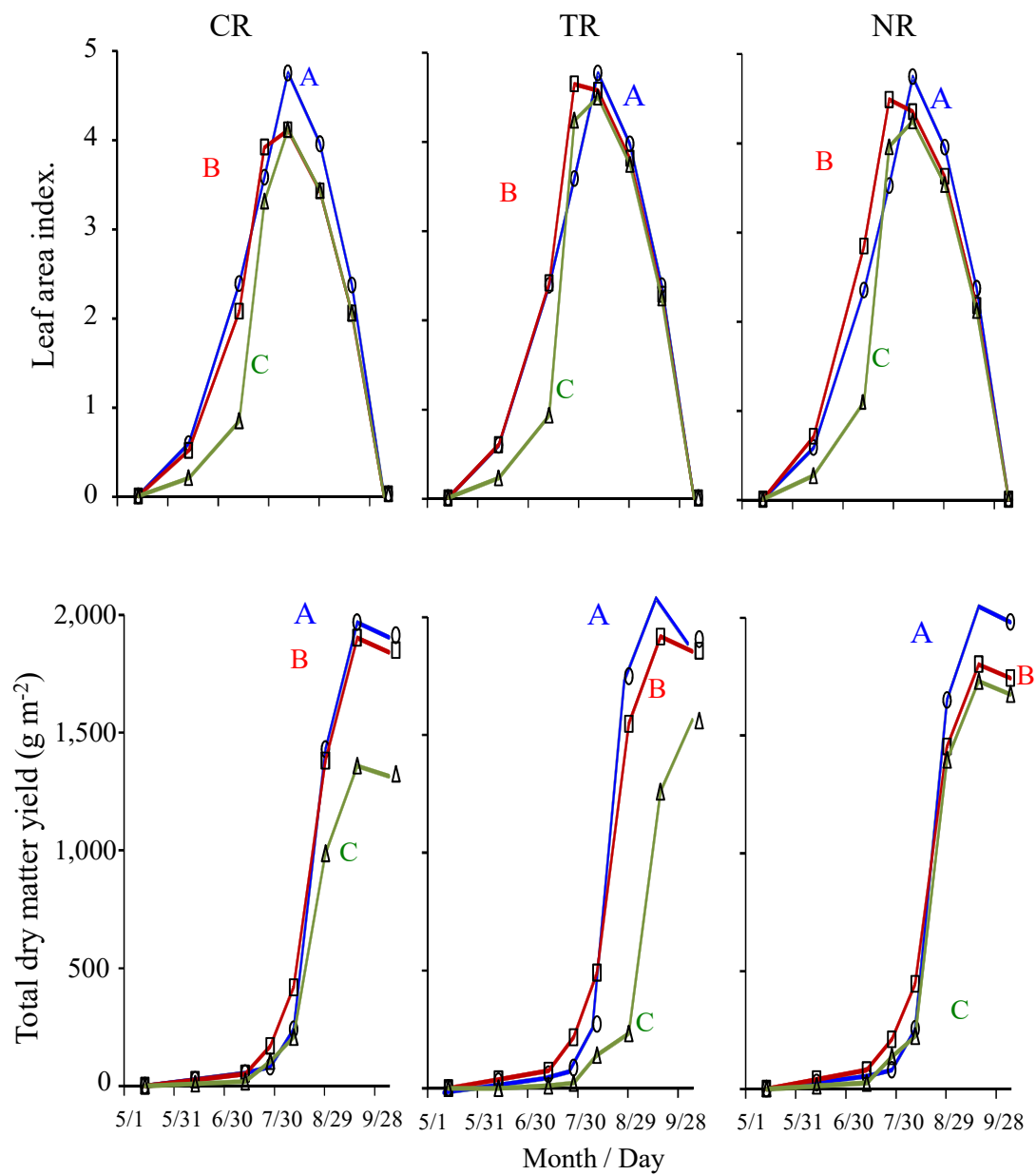


Figure III -9. Leaf area index and total dry matter yield (P8025, 2016, Exp.2).

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

A, B, and C indicate 5/1 (Early sowing), 5/15 (Standard sowing), and 5/31 (Late sowing), respectively.

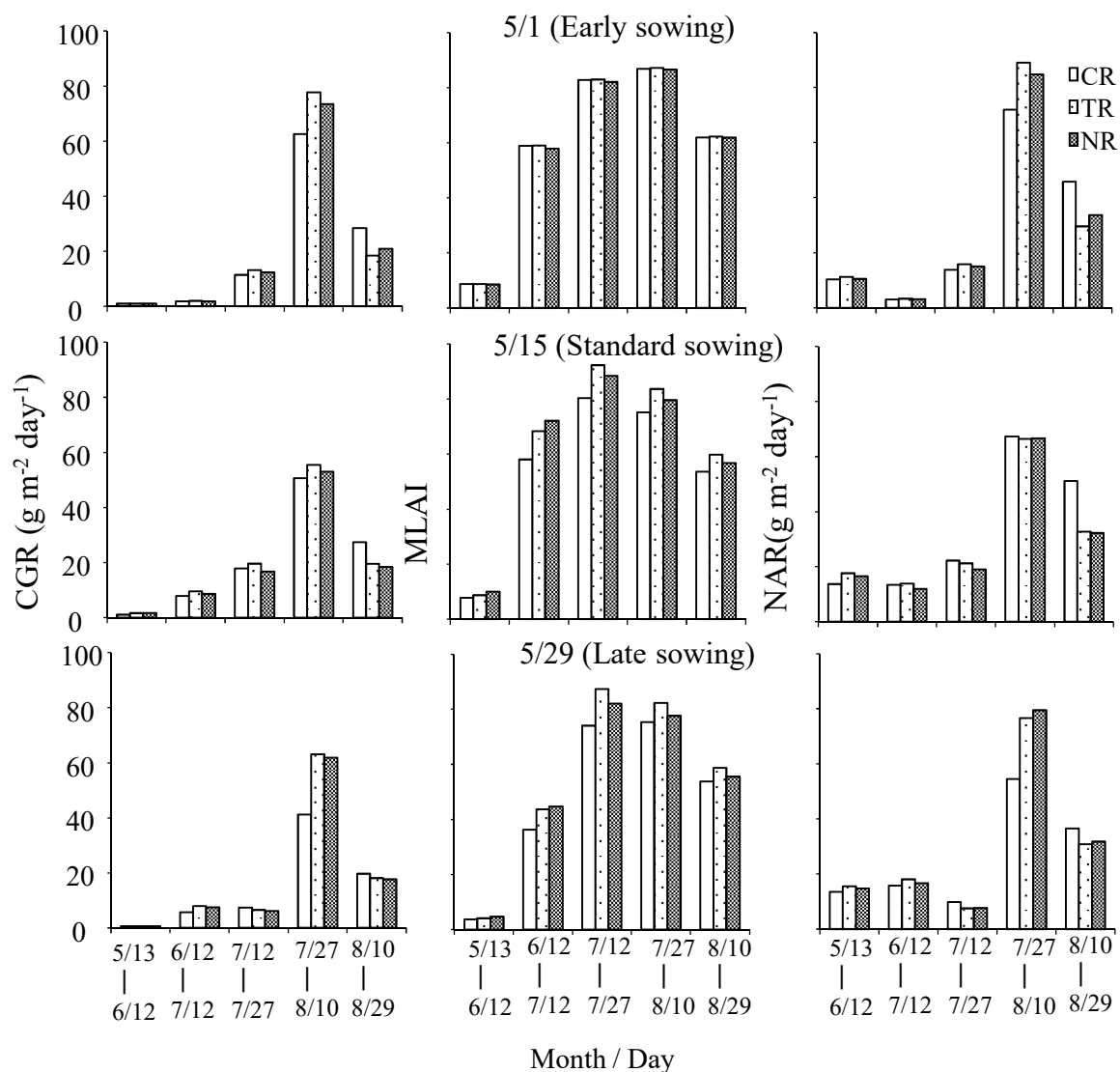


Figure III -10. Crop growth rate (CGR), Mean leaf area index (MLAI) and Net assimilation rate (NAR) at grain ripening stage (Exp.2).

CGR, MLAI, and NAR indicate Crop Growth Rate, Mean Leaf Area Index, Net Assimilation Rate, respectively.

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

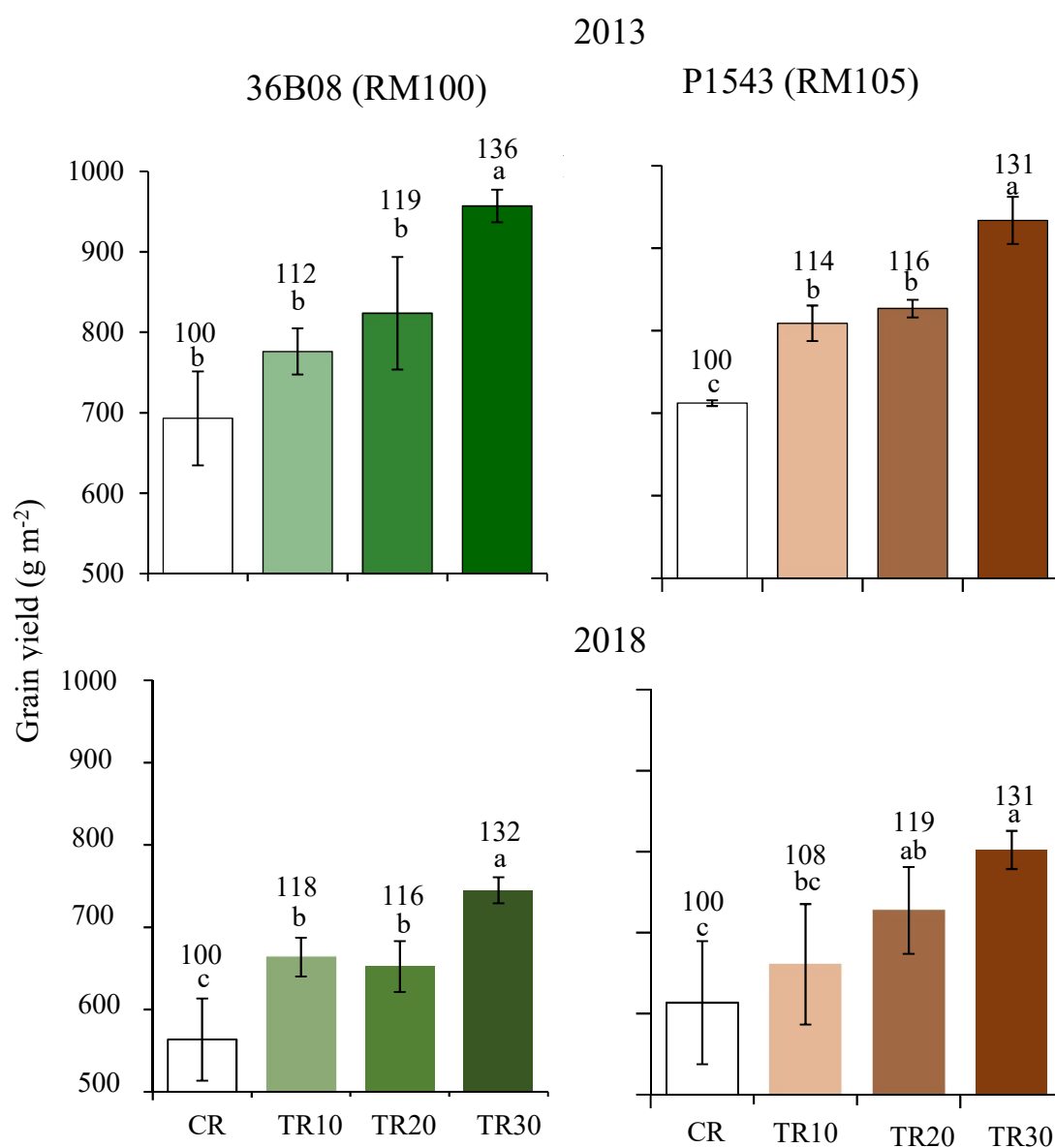


Figure III -11. Effects of distance between plants in twin row on grain yield in Maize (Exp.3).

CR, TR10, TR20 and TR30 indicate distance between plants 0cm, 10cm, 20cm and 30cm, respectively. 36B08 (RM100) and P1543 (RM105) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

The numbers on the bars indicate the percentages when CR is 100.

Different alphabets show significant at 5% level (Tukey-Kramer).

Table III -8. Grain yield and yield related traits in different distance between plants treatment in 2013 and 2018 (Exp.3).

Year	Cultivar	Planting Row	Pattern space	Distance between plants	Grain yield	Total top dry matter yield	Harvest index	Number of grain per ear	Hundred grain weight	Degree of lodging
			(cm)	(cm)	(g m ⁻²)	(g m ⁻²)	(%)		(g)	(%)
2013	36B08 (RM100)	CR	75	0	693 b	1534 b	45.0 a	354 c	27.2 b	-
		TR10	75	10	776 b	1890 a	44.7 a	389 b	27.7 b	-
		TR20	75	20	824 b	1878 a	45.6 a	404 b	28.3 b	-
		TR30	75	30	957 a	2121 a	45.2 a	446 a	29.8 a	-
	P1543 (RM105)	CR	75	0	712 c	1721 c	45.6 a	405 c	19.6 b	-
		TR10	75	10	809 b	1976 b	47.7 a	445 b	20.2 b	-
		TR20	75	20	827 b	1951 b	47.3 a	461 b	19.9 b	-
		TR30	75	30	934 a	2161 a	50.1 a	496 a	20.9 a	-
	Cultivar (C)				ns	ns	*	**	***	-
	Distance between plants (D)				***	***	ns	***	**	-
	D × C				ns	ns	ns	ns	ns	-
2018	36B08 (RM100)	CR	75	0	564 c	1398 c	40.3 a	307 b	26.6 a	85 a
		TR10	75	10	664 b	1575 b	42.2 a	342 ab	26.9 a	53 ab
		TR20	75	20	652 b	1619 b	40.3 a	379 ab	26.3 a	38 bc
		TR30	75	30	745 a	1723 a	43.3 a	376 ab	26.2 a	10 c
	P1543 (RM105)	CR	75	0	613 b	1564 c	39.0 a	383 b	20.2 a	22 c
		TR10	75	10	661 bc	1770 b	37.4 a	365 b	20.0 a	5 b
		TR20	75	20	727 ab	1899 a	38.3 a	439 a	21.3 a	0 a
		TR30	75	30	802 a	1949 a	41.4 a	405 ab	20.3 a	0 a
	Cultivar (C)				ns	**	†	*	**	**
	Distance between plants (D)				***	***	ns	**	ns	**
	D × C				ns	ns	ns	ns	ns	ns

CR, TR10, TR20 and TR30 indicate distance between plants 0cm, 10cm, 20cm and 30cm, respectively.

36B08 (RM100) and P1543 (RM105) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

Different alphabets show significant at 5% level (Tukey-Kramer)

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

Table III -9. Root number, diameter, angle and length in 2013 (Exp.3).

Cultivar	Planting Pattern	Row space (cm)	Distance between plants within twin row (cm)	Root number (pl ⁻¹)		Root diameter (mm)		Root angle (°)		Root length (cm)	
				Lower	Lower	Lower	Lower	Lower	Lower	Lower	Lower
				1st node	2nd node	1st node	2nd node	1st node	2nd node	1st node	2nd node
36B08 (RM100)	CR	75	0	9.2 b	9.9 a	4.5 a	4.7 a	44.5 a	49.3 a	4.1 b	7.3 a
	TR10	75	10	11.1 a	10.3 a	4.7 a	4.3 b	43.8 a	52.7 a	8.4 a	7.9 a
	TR20	75	20	11.4 a	10.7 a	4.8 a	4.8 a	42.9 a	50.7 a	7.9 a	8.0 a
	TR30	75	30	10.6 a	13.8 b	4.8 a	5.0 a	33.3 b	46.7 a	8.5 a	8.8 a
P1543 (RM105)	CR	75	0	11.8 a	14.0 a	4.5 b	4.5 b	26.8 a	42.1 a	8.9 a	9.2 a
	TR10	75	10	11.7 a	15.8 a	5.1 a	5.1 a	20.7 a	25.3 c	9.4 a	9.4 a
	TR20	75	20	11.3 a	15.2 a	5.2 a	5.3 a	24.5 a	32.7 b	10.0 a	9.9 a
	TR30	75	30	11.5 a	14.3 a	5.4 a	5.0 a	22.0 a	34.5 b	9.8 a	9.8 a
Cultivar (C)				**	†	†	**	**	**	**	*
Planting pattern(P)				ns	ns	*	†	†	†	†	ns
P × C				†	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns

CR, TR10, TR20 and TR30 indicate distance between plants 0cm, 10cm, 20cm and 30cm, respectively.

36B08 (RM100) and P1543 (RM105) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

Different alphabets show significant at 5% level (Tukey-Kramer)

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

36B08 (RM100) CR



36B08 (RM100) TR20



P1543 (RM105) CR



P1543 (RM105) TR20



Figure III -12. Comparison of maize supporting roots penetration angles in CR and TR (Exp.3).

CR and TR20 indicate distance between plants 0 and 20cm, respectively.

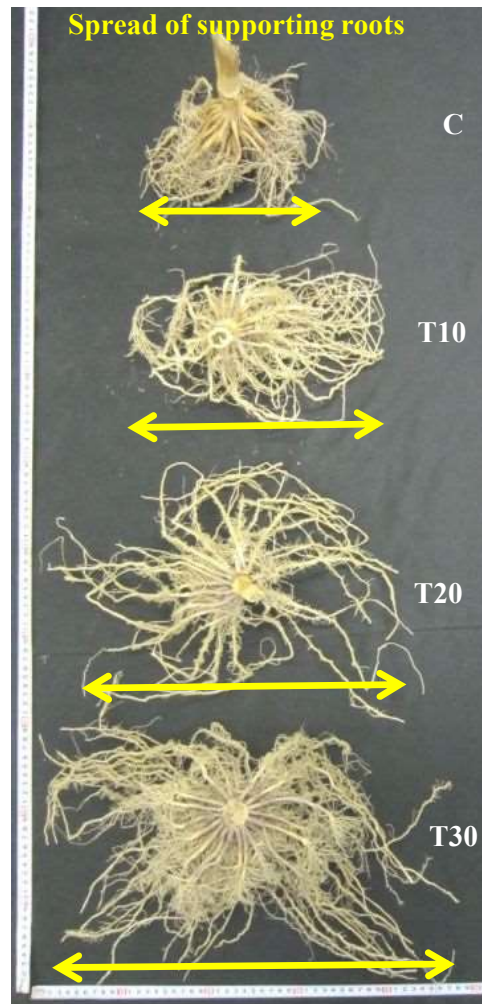


Figure III -13. Spreading of supporting roots of maize grown in twin cultivation with different distances between plants (Exp.3).

CR, TR10, TR20 and TR30 indicate distance between plants 0, 10, 20 and 30cm, respectively.

Spreading of supporting roots of corn grown in twin cultivation with different distances between plants.

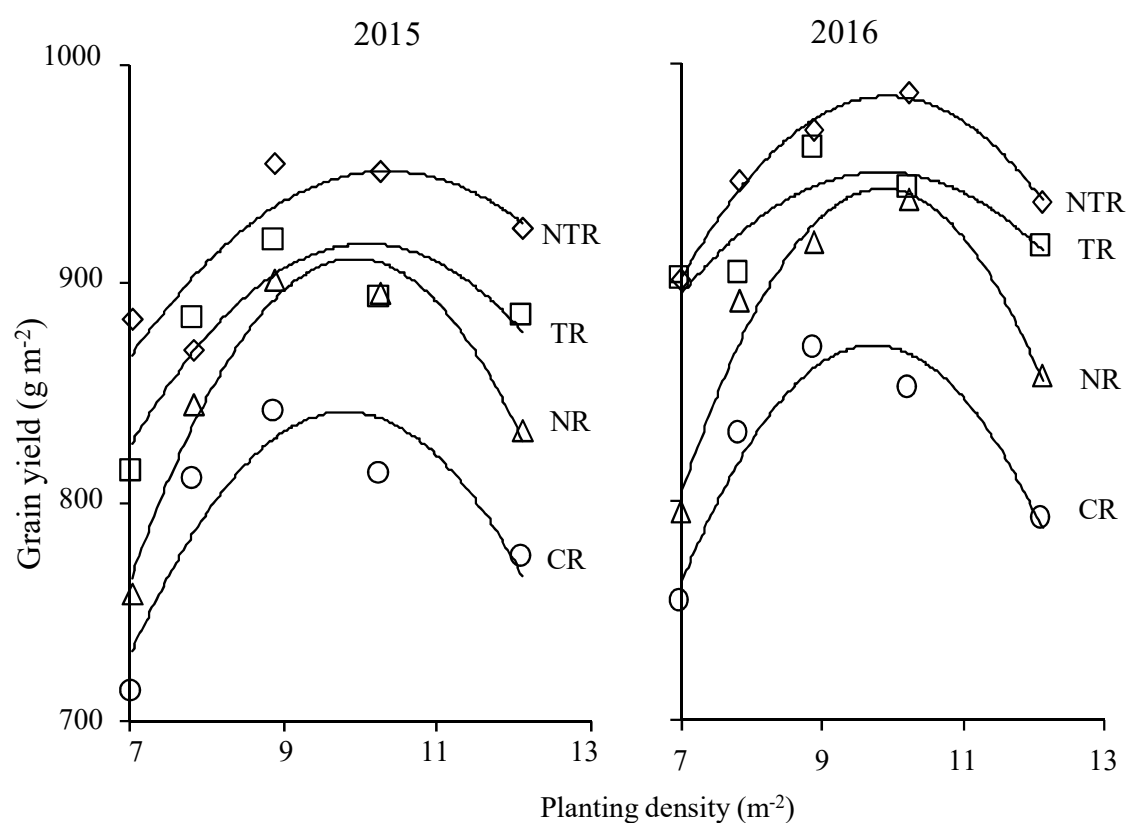


Figure III -14. Responses of grain yield to planting density.

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

---shows significant quadratic regression equation of grain yield.

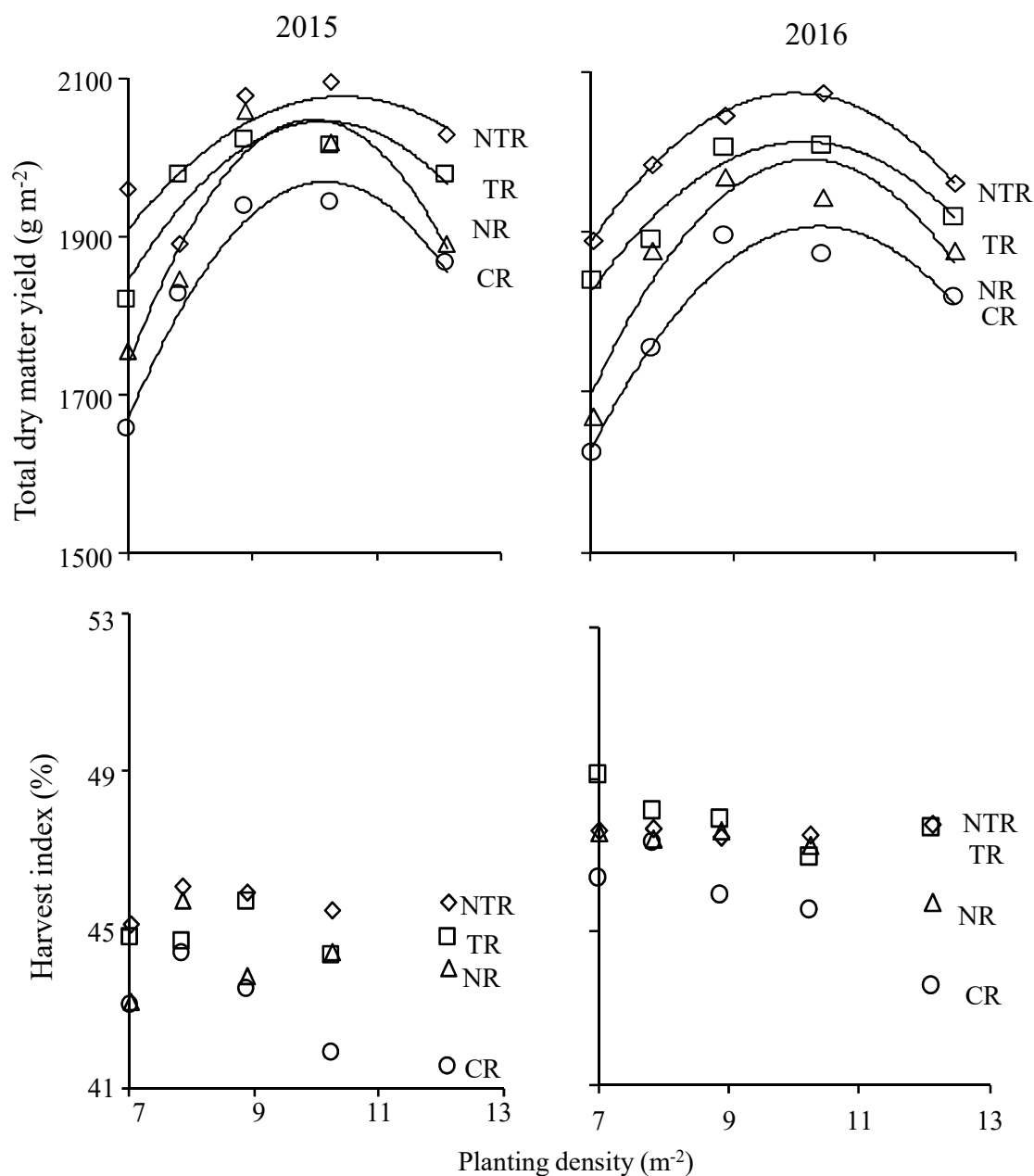


Figure III -15. Responses of total dry matter yield and harvest index to planting density (Exp.4).

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

---shows the significant quadratic regression equation of total dry matter yield and the primary regression equation of harvest index.

Table III -10. Quadratic regression equation in grain yield and total dry matter yield to planting density, and optimum planting density (Exp.4).

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**)
	NTR	$Y = -7.6(X - 10.4)^2 + 952$ (r=0.84 [†])	$Y = -14.2(X - 10.4)^2 + 2077$ (r=0.76 ^{ns})
2016	CR	$Y = -15.7(X - 9.1)^2 + 782$ (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 [†])	$Y = -20.8(X - 10.0)^2 + 2012$ (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 [†])
	NTR	$Y = -9.8(X - 9.9)^2 + 985$ (r=0.99**)	$Y = -22.2(X - 9.9)^2 + 2073$ (r=1.00***)
Planting Pattern(P)		* * **	* ns **
Year(Y)		ns ns **	** ns **
P × Y		ns † ns	ns ns ns

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

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

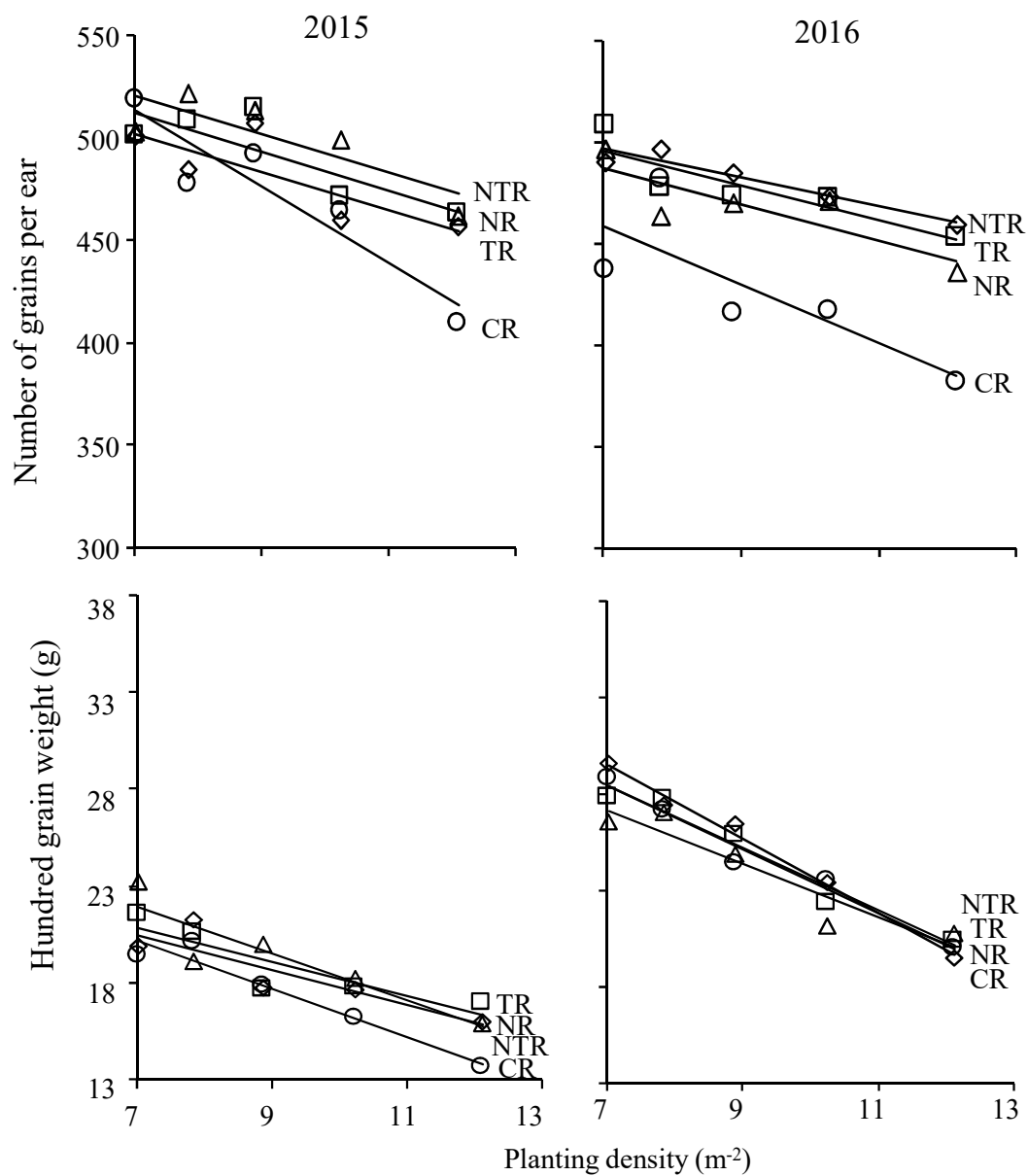


Figure III -16. Responses of number of grains per ear and hundred grain weight to planting density (Exp.4).

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

Table III -11. The ratio of sparse planting to densest planting in harvest index, and slope of regression of number of grains per ear and hundred grain weight to planting density (Exp.4).

Year	Planting Pattern	Harvest index (HI(12.1) #/HI(7.0) ¥)	Number of grains per ear	Hundred grain weight
2015	CR	104	$Y = -18.6X + 643$ ($r = 0.93^*$)	$Y = -1.2X + 29$ ($r = 0.97^{**}$)
	TR	100	$Y = -9.4X + 578$ ($r = 0.83^\dagger$)	$Y = -0.9X + 27$ ($r = 0.89^*$)
	NR	98	$Y = -9.3X + 585$ ($r = 0.82^\dagger$)	$Y = -1.2X + 30$ ($r = 0.91^*$)
	NTR	101	$Y = -9.3X + 567$ ($r = 0.8^{ns}$)	$Y = -0.9X + 27$ ($r = 0.88^*$)
2016	CR	107	$Y = -14.4X + 560$ ($r = 0.8^{ns}$)	$Y = -1.7X + 40$ ($r = 0.99^{**}$)
	TR	103	$Y = -8.7X + 558$ ($r = 0.88^*$)	$Y = -1.6X + 40$ ($r = 0.98^{**}$)
	NR	104	$Y = -8.9X + 550$ ($r = 0.84^\dagger$)	$Y = -1.4X + 37$ ($r = 0.94^*$)
	NTR	100	$Y = -7.1X + 547$ ($r = 0.96^{**}$)	$Y = -1.9X + 43$ ($r = 0.99^{***}$)
Planting Pattern(P)		ns	** †	ns ns
Year(Y)		†	† *	** **
P × Y		ns	ns ns	ns †

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

#, ¥ indicate harvest index in densest (75 × 11 cm) and sparse (75 × 19 cm) planting, respectively.

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

Table III -12. The ratio of narrow twin (NTR) to narrow row (NR) and twin row (TR) to conventional row (CR) in the shortest inter-individual distance, grain yield and yield-related traits, and their correlations (Exp.4).

Planting density (plants m ⁻²)	Row space (cm)	Hill distance (cm)	Distance between row in TR	Shortest distance between individuals			TR/CR				
				CR (cm)	TR (cm)	TR/CR	Grain yield	Total dry matter yield	Harvest index	Number of grain per ear	Hundred grain weight
7.02	75	19	20	19	27.6	1.45	1.12	1.12	1.05	1.06	1.04
7.84	75	17	20	17	26.2	1.54	1.09	1.08	1.01	1.03	1.02
8.89	75	15	20	15	25.0	1.67	1.10	1.05	1.05	1.09	1.03
10.26	75	13	20	13	23.9	1.83	1.10	1.06	1.05	1.07	1.05
12.12	75	11	20	11	22.8	2.08	1.15	1.06	1.09	1.16	1.23
Planting density (plants m ⁻²)	Row space (cm)	Hill distance (cm)	Distance between row in NTR	Shortest distance between individuals			NTR/NR				
				NR (cm)	NTR (cm)	NTR/NR	Grain yield	Total dry matter yield	Harvest index	Number of grain per ear	Hundred grain weight
7.02	50	28.5	20	28.5	34.8	1.22	1.09	1.10	1.01	0.99	0.98
7.84	50	25.5	20	25.5	32.4	1.27	1.05	1.06	1.00	1.00	1.06
8.89	50	22.5	20	22.5	30.1	1.34	1.06	1.02	1.03	1.01	0.98
10.26	50	19.5	20	19.5	27.9	1.43	1.06	1.05	1.00	0.96	1.04
12.12	50	16.5	20	16.5	25.9	1.57	1.10	1.06	1.04	1.02	1.07
Correlation coefficient with shortest distance ratio (TR / CR, NTR / NR)(n=10)							0.73	-0.23	0.82	0.86	0.78
Significance of correlation coefficient							*	ns	**	**	**

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

Each data show the average value of 2015 and 2016

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

Table IV-1. Average precipitation, air temperature, solar radiation during growing seasons (2017–2019, Exp.5).

Month	Precipitation (mm)				Air temperature (°C)				Solar radiation (MJ m ⁻²)			
	2017	2018	2019	2004-2014 ^a	2017	2018	2019	2004-2014 ^a	2017	2018	2019	2004-2014 ^a
5	58	60	36	64	12.5	11.5	13.6	11.2	629	621	725	574
6	175	130	73	64	14.4	14.6	15.8	16.3	604	536	628	597
7	103	172	37	107	20.9	19.4	19.6	19.8	608	557	585	554
8	107	265	181	123	19.5	19.5	21.0	21.8	539	453	525	484
9	191	12	93	128	16.1	16.9	17.3	17.9	447	428	477	391
10	84	185	81	88	10.2	11.5	11.5	11.4	314	328	334	297
Total	717	823	500	575	15.6 ^b	15.6 ^b	16.5 ^b	16.4 ^b	3141	2924	3274	2897

a: Mean value for 2004–2014

b: Indicate average value

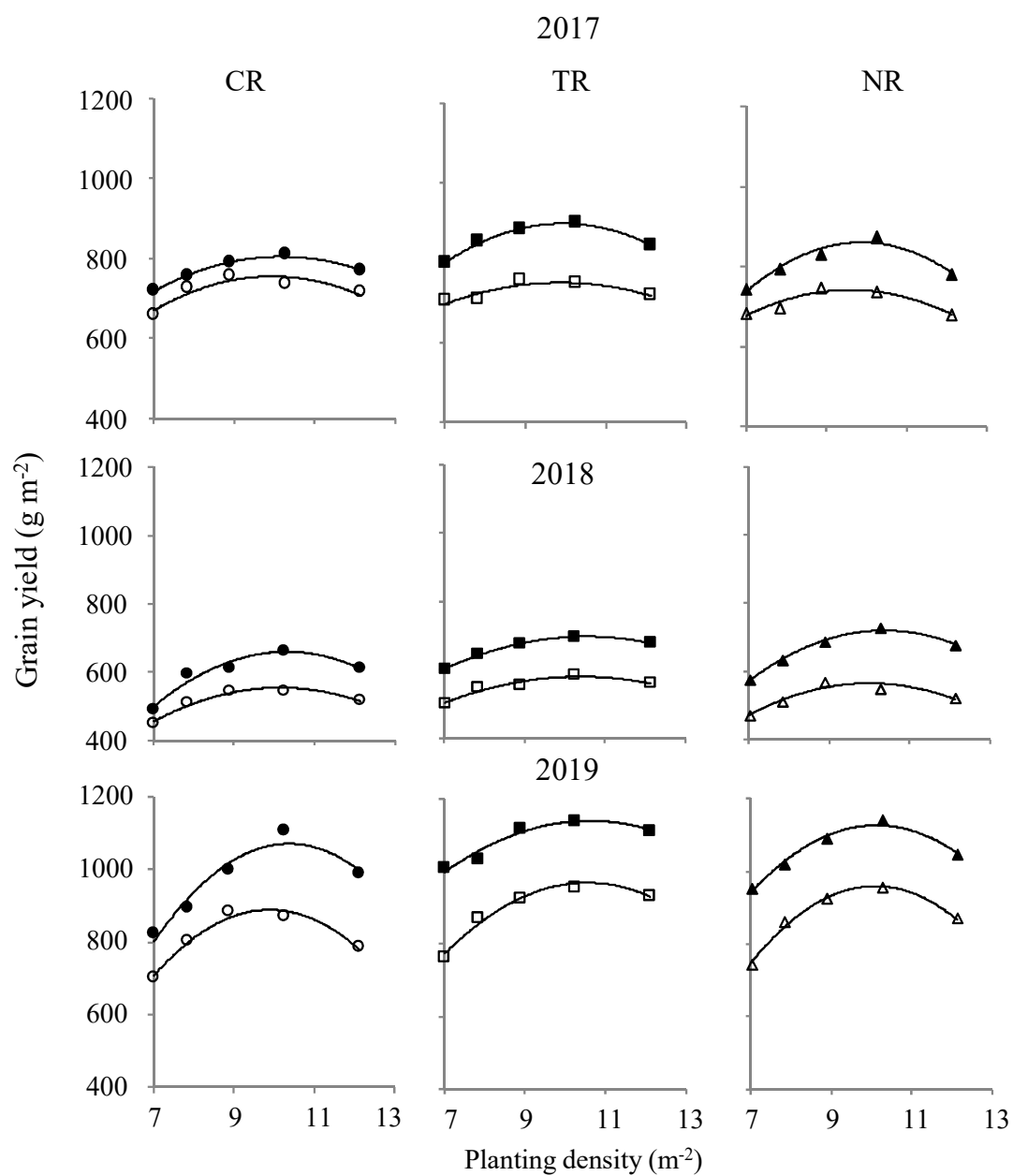


Figure IV-1. Responses of grain yield to planting density (Exp.5).

○, □ and △ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation of N0, respectively.

●, ■ and ▲ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation of N6, respectively.

N6, N0 indicate Nitrogen topdressing N 6 m⁻² and no nitrogen topdressing, respectively.

---shows significant quadratic regression equation of grain yield.

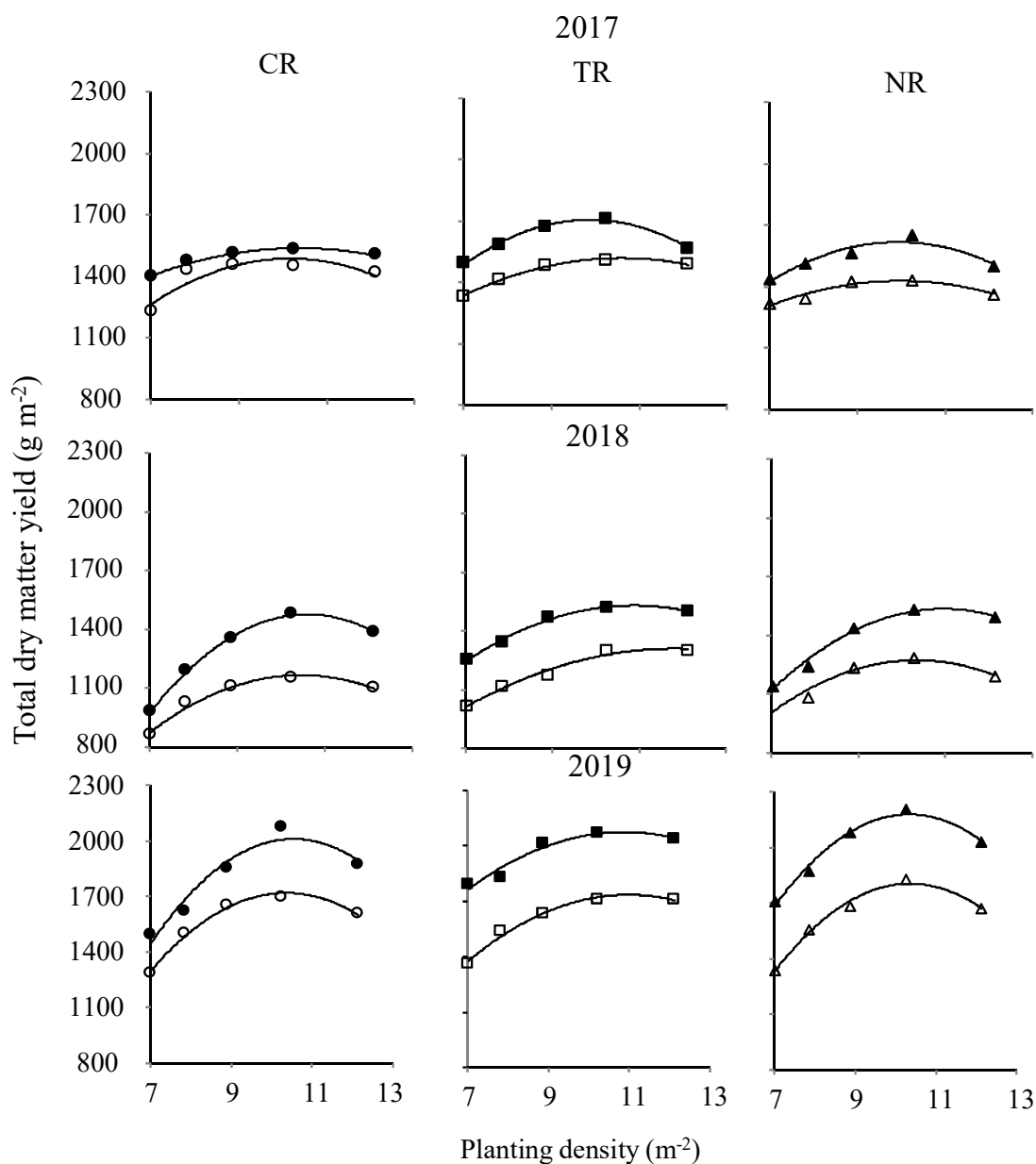


Figure IV-2. Responses of total dry matter yield to planting density (Exp.5).

○, □ and △ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation of N0, respectively.
 ●, ■ and ▲ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation of N6, respectively.
 N6, N0 indicate Nitrogen topdressing N 6 m⁻² and no nitrogen topdressing, respectively.
 ---shows significant quadratic regression equation of total dry matter yield.

Table IV-2. Effect of nitrogen treatment on grain yield response to planting density (P8025, Exp.5).

Year	Nitrogen topdressing	Planting pattern	Grain yield (g m ⁻²)			Total dry matter yield (g m ⁻²)		
2017	N0	CR	Y=-10(X-9.9) ² +755(r=0.91 *)			Y=-22(X-10.2) ² +1486(r=0.90 *)		
		TR	Y= -7 (X-9.9) ² +750(r=0.89 *)			Y=-14(X-10.6) ² +1518(r=1.00***)		
		NR	Y=-10(X-9.6) ² +741(r=0.95 *)			Y=-14(X-10.0) ² +1427(r=0.96 **)		
	N6	CR	Y= -9 (X-10.2) ² +805(r=1.00***)			Y=-12(X-10.4) ² +1537(r=0.99 **)		
		TR	Y=-11(X-9.9) ² +898(r=1.00***)			Y=-27(X-9.9) ² +1705(r=0.99***)		
		NR	Y=-15(X-9.9) ² +861(r=0.97 **)			Y=-23(X-9.9) ² +1618(r=0.95 *)		
2018	N0	CR	Y=-10(X-10.1) ² +555(r=0.98 **)			Y=-24(X-10.5) ² +1165(r=0.99 **)		
		TR	Y= -7 (X-10.4) ² +580(r=0.97 **)			Y=-12(X-11.9) ² +1310(r=0.99 **)		
		NR	Y=-10(X-10.0) ² +565(r=0.95 *)			Y=-24(X-10.3) ² +1273(r=0.97 **)		
	N6	CR	Y=-15(X-10.3) ² +660(r=0.96 **)			Y=-39(X-10.6) ² +1476(r=1.00***)		
		TR	Y= -8 (X-10.5) ² +697(r=1.00***)			Y=-19(X-10.9) ² +1531(r=1.00***)		
		NR	Y=-13(X-10.4) ² +720(r=1.00***)			Y=-27(X-10.9) ² +1535(r=0.99 **)		
2019	N0	CR	Y=-22(X-9.9) ² +889(r=0.99 **)			Y=-37(X-10.4) ² +1718(r=0.99***)		
		TR	Y=-16(X-10.5) ² +969(r=0.99 **)			Y=-23(X-11.0) ² +1734(r=0.99***)		
		NR	Y=-22(X-10.1) ² +960(r=0.99***)			Y=-42(X-10.4) ² +1805(r=0.99***)		
	N6	CR	Y=-24(X-10.4) ² +1070(r=0.97 **)			Y=-46(X-10.5) ² +2010(r=0.97 **)		
		TR	Y=-11(X-10.6) ² +1139(r=0.97 **)			Y=-21(X-10.9) ² +2074(r=0.97 **)		
		NR	Y=-19(X-10.1) ² +1127(r=0.99 **)			Y=-45(X-10.3) ² +2180(r=0.99***)		
Year (Y)			***	***	***	**	***	***
Nitrogen topdressing (N)			ns	*	***	ns	ns	***
Planting pattern (P)			***	***	***	**	***	***
Y×N			**	ns	***	*	†	***
Y×P			***	***	***	*	***	***
P×N			ns	ns	***	ns	***	**
Y×N×P			**	*	***	ns	***	ns

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

N6, N0 indicate Nitrogen topdressing N 6 m⁻² and no nitrogen topdressing, respectively.

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

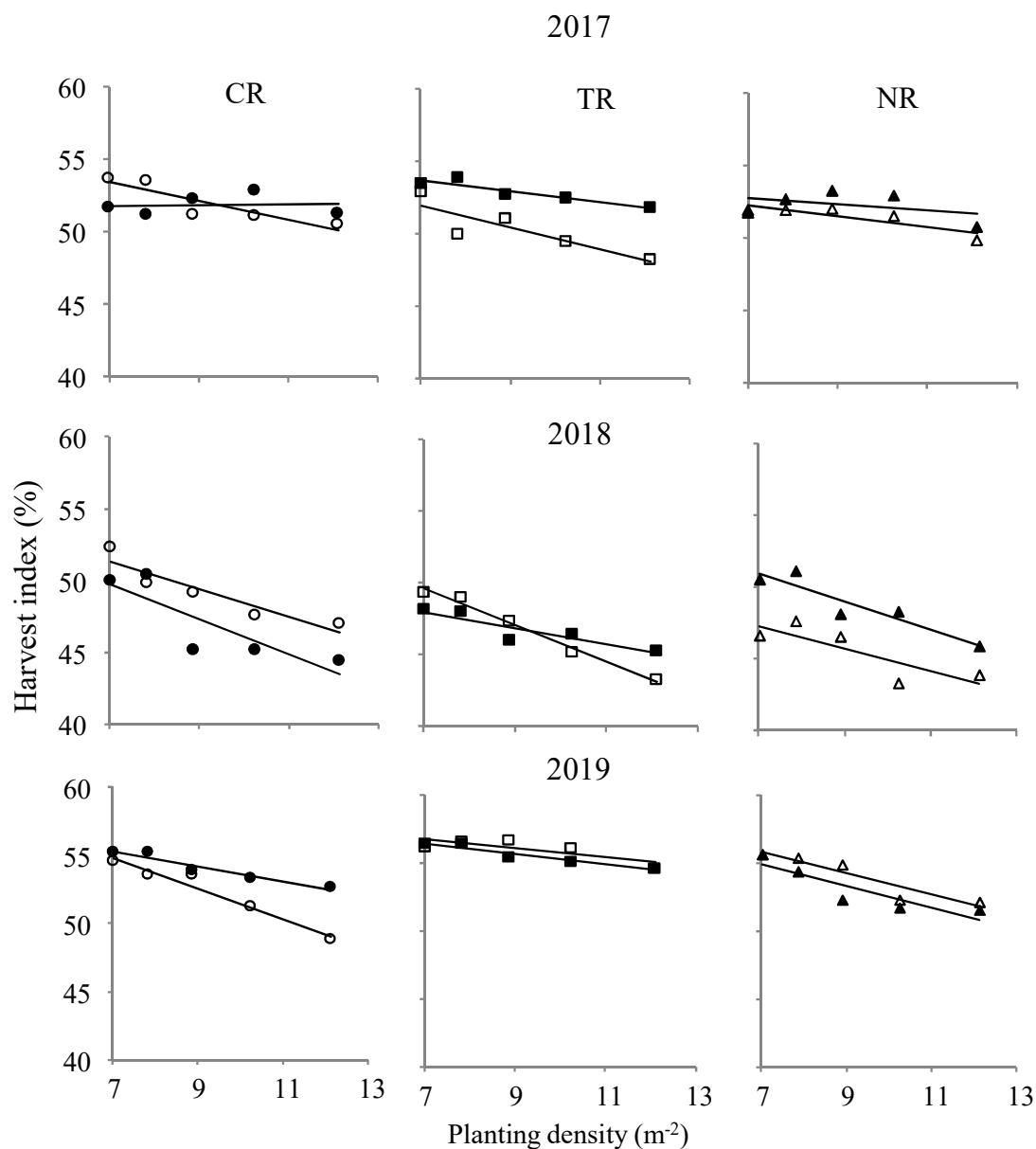


Figure IV-3. Responses of harvest index to planting density (Exp.5).

○, □ and △ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation of N0, respectively.
 ●, ■ and ▲ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation of N6, respectively.
 N6, N0 indicate Nitrogen topdressing N 6 m^{-2} and no nitrogen topdressing, respectively.
 ---shows the significant primary regression equation of harvest index

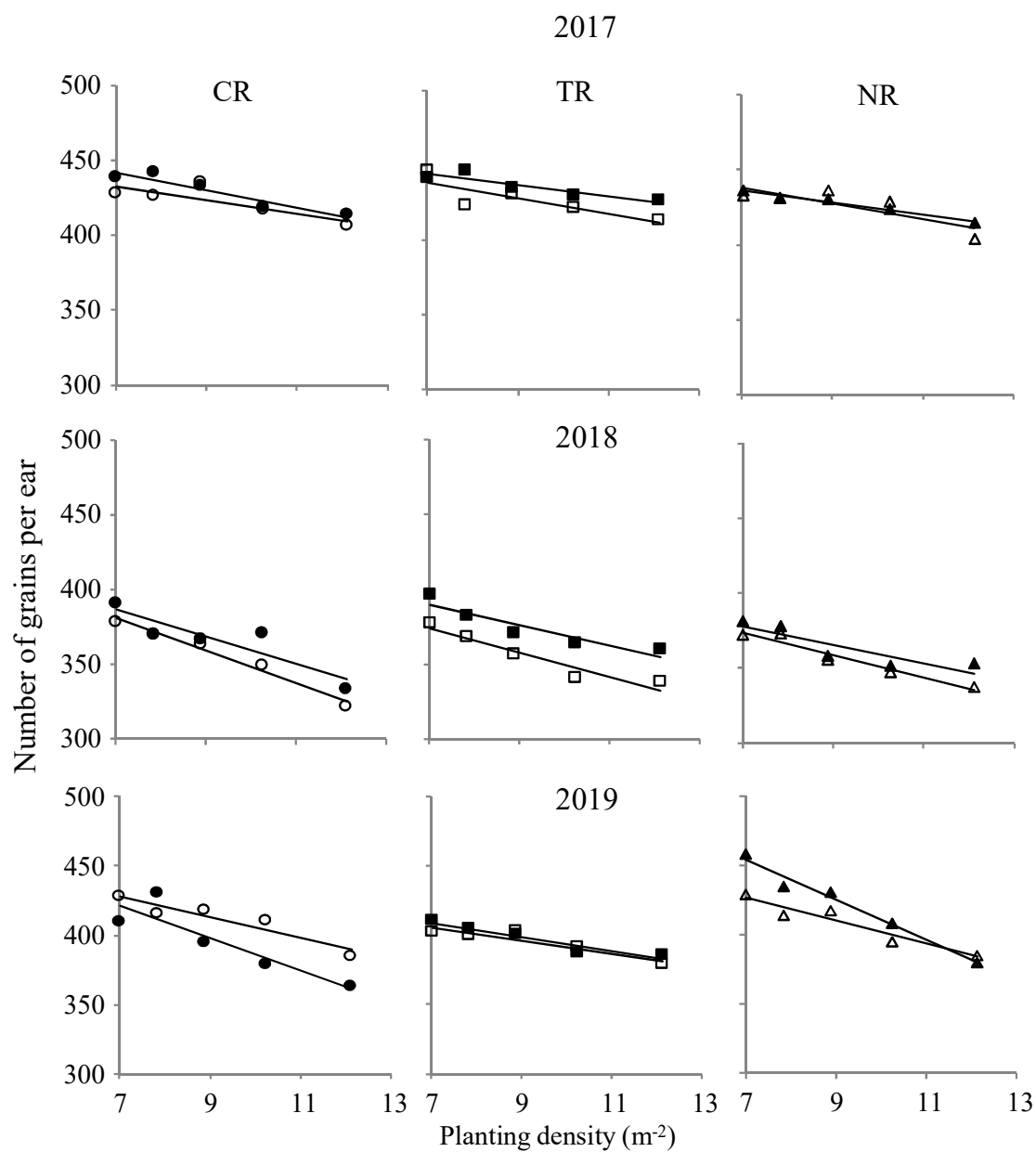


Figure IV-4. Responses of number of grains per ear to planting density (Exp.5).

○, □ and △ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation of N0, respectively.
 ●, ■ and ▲ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation of N6, respectively.
 N6, N0 indicate Nitrogen topdressing N 6 m^2 and no nitrogen topdressing, respectively.
 ---shows the significant primary regression equation of number of grains per ear.

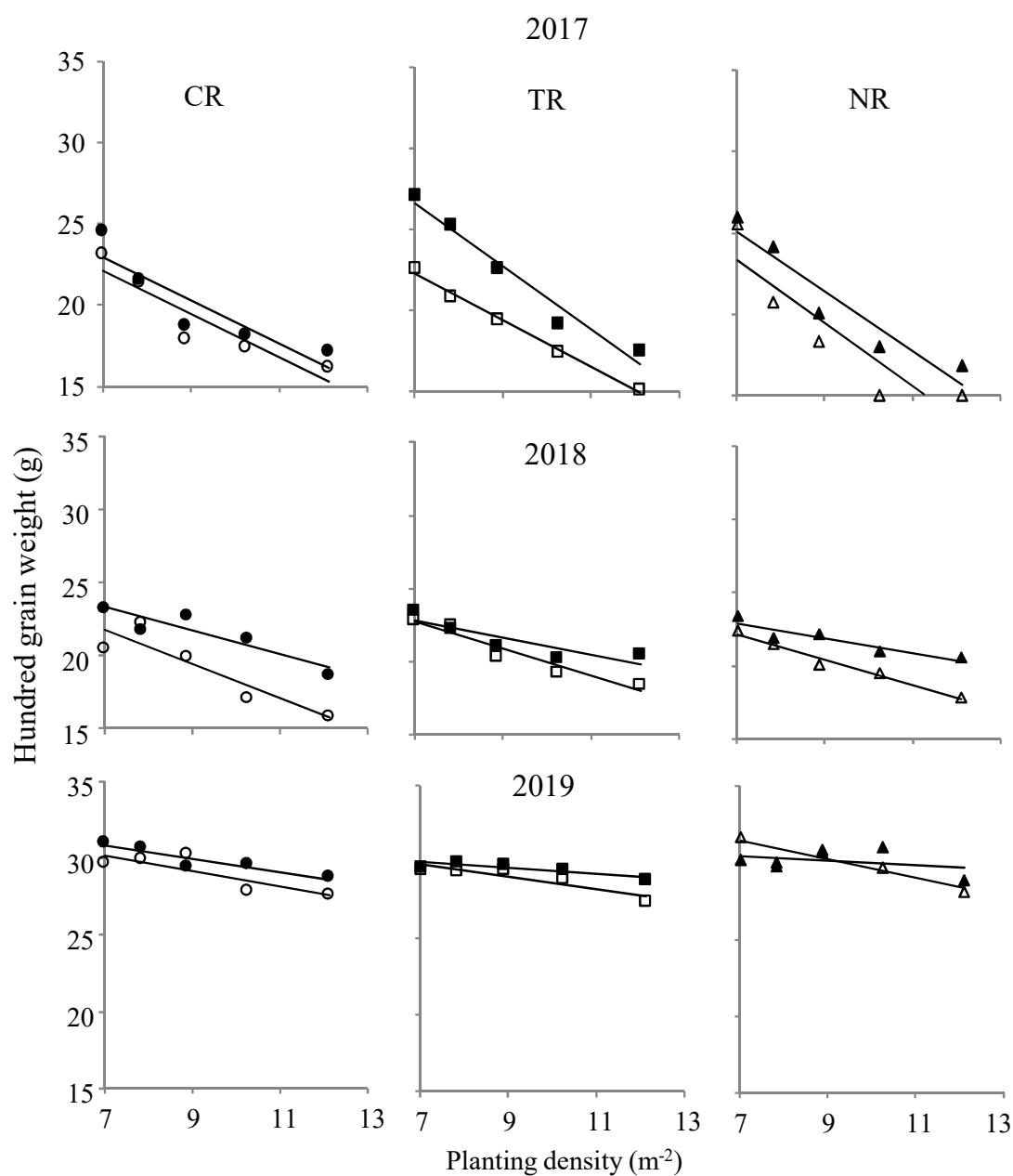


Figure IV-5. Responses of hundred grain weight to planting density (Exp.5).

○, □ and △ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation of N0, respectively.
 ●, ■ and ▲ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation of N6, respectively.
 N6, N0 indicate Nitrogen topdressing $\text{N } 6 \text{ m}^{-2}$ and no nitrogen topdressing, respectively.
 ---shows the significant primary regression equation of hundred grain weight.

Table IV-3. The ratio of sparse planting to densest planting in harvest index, and slope of regression of number of grains per ear and hundred grain weight to planting density (P8025, Exp.5).

Year	Nitrogen topdressing	Planting Pattern	Harvest index (HI(12.1) [#] /HI(7.0) [¥])	Number of grain per ear	Hundred grain weight		
2017	N0	CR	94	Y=-4.6 X+464(r=0.82 †)	Y=-1.3 X+32(r= 0.93 *)		
		TR	91	Y=-5.2 X+475(r=0.84 †)	Y=-1.4 X+32(r= 1.00***)		
		NR	96	Y=-5.3 X+476(r=0.83 †)	Y=-2.0 X+38(r= 0.91 *)		
	N6	CR	99	Y=-5.8 X+482(r=0.95 *)	Y=-1.3 X+32(r= 0.90 *)		
		TR	101	Y=-3.7 X+470(r=0.91 *)	Y=-1.9 X+40(r= 0.98 **)		
		NR	101	Y=-4.1 X+465(r=0.98 **)	Y=-1.8 X+38(r= 0.95 *)		
2018	N0	CR	90	Y=-11 X+458(r=0.99**)	Y=-1.2 X+30(r= 0.96 *)		
		TR	88	Y= -8 X+431(r=0.95 *)	Y=-1.1 X+30(r= 0.99 **)		
		NR	95	Y= -7 X+426(r=0.97**)	Y=-1.3 X+31(r= 0.96 **)		
	N6	CR	88	Y= -9 X+450(r=0.90 *)	Y=-1.0 X+30(r= 0.98 **)		
		TR	94	Y= -7 X+438(r=0.92 *)	Y=-1.0 X+31(r= 0.95 *)		
		NR	89	Y= -6 X+421(r=0.87 †)	Y=-1.0 X+30(r= 0.96 **)		
2019	N0	CR	89	Y= -7 X+480(r=0.94 *)	Y=-0.5 X+34(r= 0.85 †)		
		TR	97	Y= -5 X+438(r=0.92 *)	Y=-0.4 X+33(r= 0.91 *)		
		NR	94	Y= -8 X+486(r=0.96**)	Y=-0.6 X+36(r= 0.91 *)		
	N6	CR	95	Y=-12 X+503(r=0.90 *)	Y=-0.4 X+34(r= 0.94 *)		
		TR	97	Y= -5 X+445(r=0.96**)	Y=-0.2 X+31(r= 0.86 †)		
		NR	93	Y=-15 X+556(r=0.99**)	Y=-0.2 X+32(r= 0.38 ns)		
Year (Y)			***	*	ns	***	**
Nitrogen topdressing (N)			*	ns	ns	†	ns
Planting pattern (P)			ns	ns	ns	†	ns
Y×N			*	ns	ns	*	**
Y×P			ns	ns	ns	*	ns
P×N			†	ns	ns	*	ns
Y×N×P			ns	ns	ns	ns	ns

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

#, ¥ indicate harvest index in densest (75 \times 11cm) and sparse (75 \times 19cm) planting, respectively.

N6, N0 indicate Nitrogen topdressing N 6 m⁻² and no nitrogen topdressing, respectively.

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

Table IV-4-1. Analysis of variance table for grain yield and yield-related traits
(2017, Exp.5).

Treatment	Grain yield	Total dry matter yield	Harvest index	Number of grain per ear	Hundred grain weight
Nitrogen topdressing (N)	***	*	***	***	***
Planting pattern (P)	*	***	ns	*	*
Planting density (D)	***	***	***	***	***
N × P	***	***	ns	**	†
N × D	**	ns	ns	ns	**
P × D	***	***	**	**	**
N × P × D	**	*	ns	ns	†

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

Table IV-4-2. Analysis of variance table for grain yield and yield-related traits
(2018, Exp.5).

treatment	Grain yield	Total dry matter yield	Harvest index	Number of grain per ear	Hundred grain weight
Nitrogen topdressing (N)	***	***	**	***	**
Planting pattern (P)	ns	ns	ns	**	ns
Planting density (D)	***	***	***	***	***
N × P	***	***	ns	***	ns
N × D	***	***	***	***	**
P × D	***	***	***	***	**
N × P × D	***	***	***	***	**

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

Table IV-4-3. Analysis of variance table for grain yield and yield-related traits
(2019, Exp.5).

treatment	Grain yield	Total dry matter yield	Harvest index	Number of grain per ear	Hundred grain weight
Nitrogen topdressing (N)	***	***	ns	ns	ns
Planting pattern (P)	***	***	***	***	**
Planting density (D)	***	***	***	***	***
N × P	***	***	***	**	ns
N × D	***	***	*	ns	†
P × D	***	***	*	ns	ns
N × P × D	***	***	ns	ns	ns

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

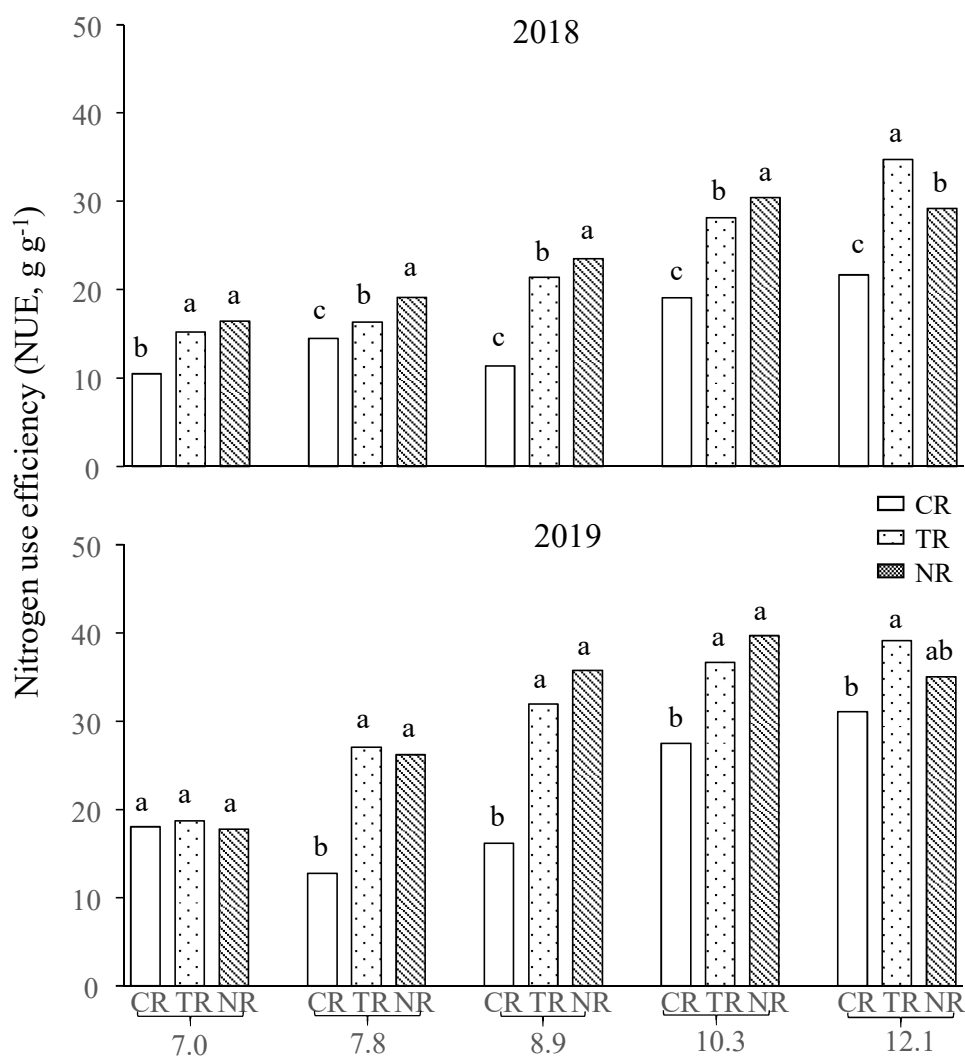


Figure IV-6. Nitrogen use efficiency (Exp.5).

CR, TR, NR indicate conventional row, twin row, and narrow row planting cultivation, respectively.
 7.0, 7.8, 8.9, 10.3, 12.1 indicate planting density of 7.0, 7.8, 8.9, 10.3, 12.1 plants m⁻², respectively.
 Different alphabets show significant at 5% level (Tukey-Kramer).
 NUE indicate Nitrogen use efficiency.

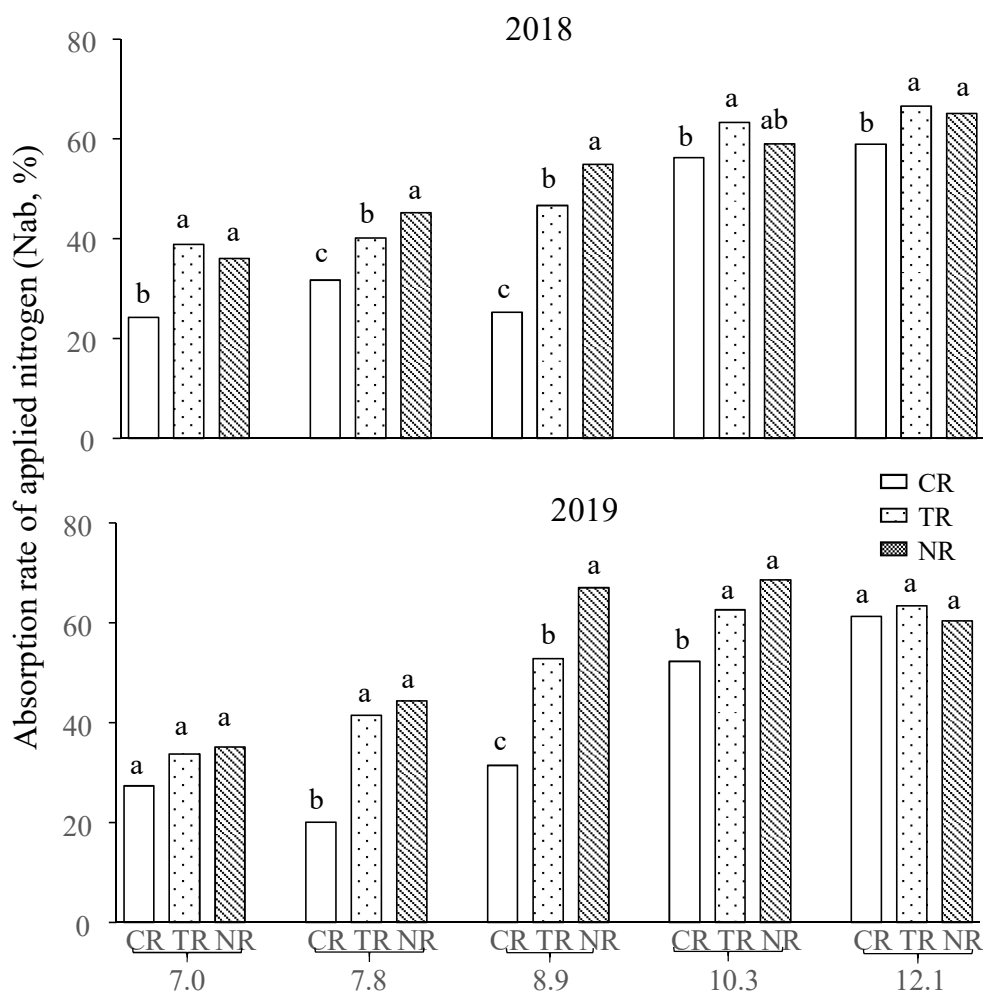


Figure IV-7. Absorption rate of applied nitrogen (Exp.5).

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

7.0, 7.8, 8.9, 10.3, 12.1 indicate planting density of 7.0, 7.8, 8.9, 10.3, 12.1 plants m⁻², respectively.

Different alphabets show significant at 5% level (Tukey-Kramer).

Nab indicate Absorption rate of applied nitrogen.

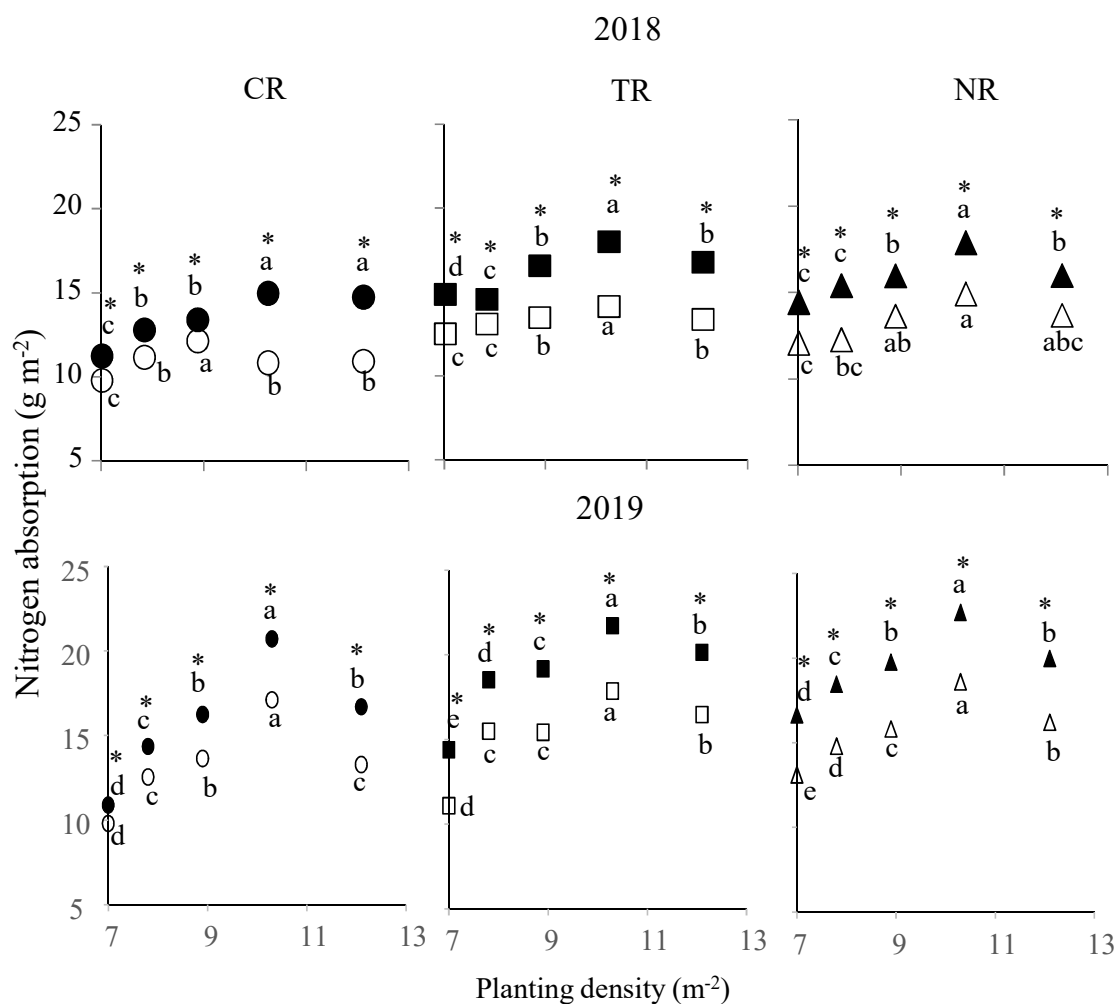


Figure IV-8. Nitrogen absorption at full ripe stage (Exp.5).

○, □ and △ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation of N0, respectively.
 ●, ■ and ▲ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation of N6, respectively.
 N6, N0 indicate Nitrogen topdressing N 6 m⁻² and no nitrogen topdressing, respectively.
 * indicate significant differences at 5% level (Tukey-Kramer) between N0 and N6.
 Different alphabets show significant at 5% level (Tukey-Kramer).

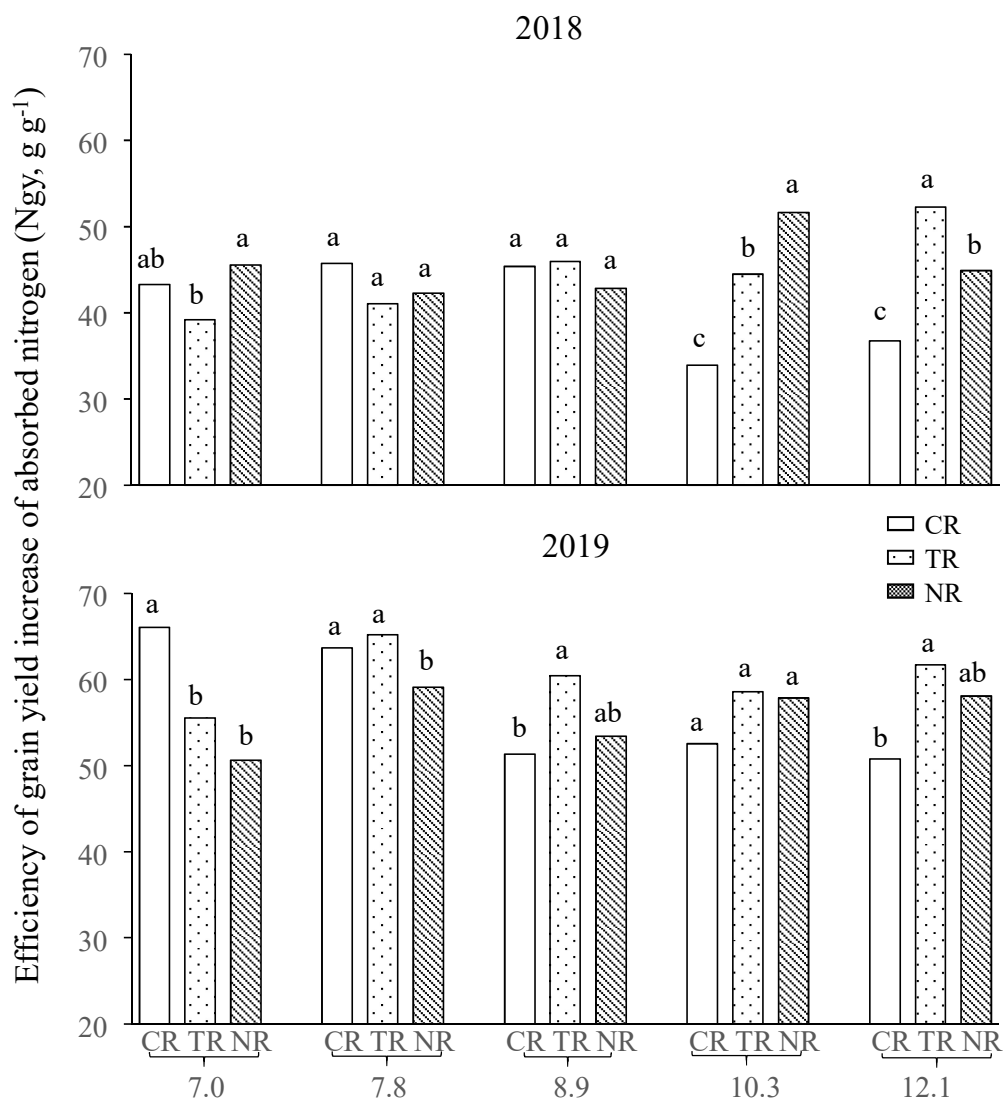


Figure IV-9. Efficiency of grain yield increase of absorbed nitrogen (Exp.5).

CR, TR, NR indicate conventional row, twin row, and narrow row planting cultivation, respectively.
 7.0, 7.8, 8.9, 10.3, 12.1 indicate planting density of 7.0, 7.8, 8.9, 10.3, 12.1 plants m⁻², respectively.
 Ngy indicate efficiency of grain yield increase of absorbed nitrogen.

Different alphabets show significant at 5% level (Tukey-Kramer).

Table IV-5. Nitrogen fertilizer efficiency of grain yield and related-traits by nitrogen topdressing on at the tassel differentiation stage (Exp.5).

Planting density	Row space	Hill distance	Planting pattern	2018					2019				
				Nitrogen absorption		NUE	Nab	Ng	Nitrogen absorption		NUE	Nab	Ng
				N0	N6				N0	N6			
(plants m ⁻²)	(cm)	(cm)		(g m ⁻²)	(g m ⁻²)	(g g ⁻¹)	(%)	(g g ⁻¹)	(g m ⁻²)	(g m ⁻²)	(g g ⁻¹)	(%)	(g g ⁻¹)
7.0	75	19	CR	9.8	11.2	10.5	24.3	43.3	10.0	12.0	18.0	27.3	66.0
			TR	12.5	14.8	15.2	38.9	39.2	11.7	14.1	18.7	33.7	55.5
			NR	12.1	14.4	16.4	36.0	45.5	13.9	16.6	17.8	35.1	50.6
7.8	75	17	CR	11.2	12.8	14.5	31.7	45.7	12.7	14.4	12.8	20.1	63.7
			TR	13.1	15.5	16.3	40.1	41.1	15.5	18.5	27.0	41.5	65.2
			NR	12.3	15.4	19.1	45.2	42.3	14.8	18.0	26.2	44.3	59.1
8.9	75	15	CR	12.1	13.4	11.4	25.3	45.4	13.9	16.2	16.2	31.5	51.3
			TR	13.5	16.6	21.4	51.4	41.9	15.4	19.2	31.9	52.8	60.5
			NR	13.6	17.6	23.5	54.9	42.8	15.4	20.1	35.8	67.0	53.4
10.3	75	13	CR	10.8	15.0	19.1	56.2	33.9	16.2	19.9	27.5	52.3	52.5
			TR	14.1	18.0	28.1	63.3	44.5	17.9	22.3	36.7	62.6	58.6
			NR	14.9	19.1	30.5	59.0	51.6	18.2	23.0	39.7	68.6	57.9
12.1	75	11	CR	10.9	14.8	21.7	59.0	36.8	12.5	16.7	31.1	61.2	50.8
			TR	13.4	16.8	34.8	66.6	52.3	16.5	20.9	39.1	63.4	61.7
			NR	13.7	17.6	29.2	65.1	44.9	15.8	20.1	35.0	60.4	58.1
Planting pattern (P)				***	***	***	***	*	***	***	**	***	ns
Planting density (D)				***	***	***	***	ns	***	***	***	***	*
P×D				**	*	***	***	***	***	***	***	**	**

NUE, Nab, and Ng indicate Nitrogen use efficiency, Absorption utilization rate of topdressing nitrogen, Efficiency of grain yield increase of absorbed nitrogen, respectively.

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

N6, N0 indicate Nitrogen topdressing N 6 m⁻² and no nitrogen topdressing, respectively.

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

Table V-1. Tasseling date and maturity date (Exp.6).

Year	Cultivar	Tasseling date (Month / Day)	Maturity date (Month / Day)
2017	P8025 (RM85)	7/26	9/18
	36B08 (RM100)	8/6	10/2
2018	P8025 (RM85)	7/25	9/17
	36B08 (RM100)	8/3	10/1
2019	P8025 (RM85)	7/15	9/16
	36B08 (RM100)	7/29	9/30

P8025 (RM85) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

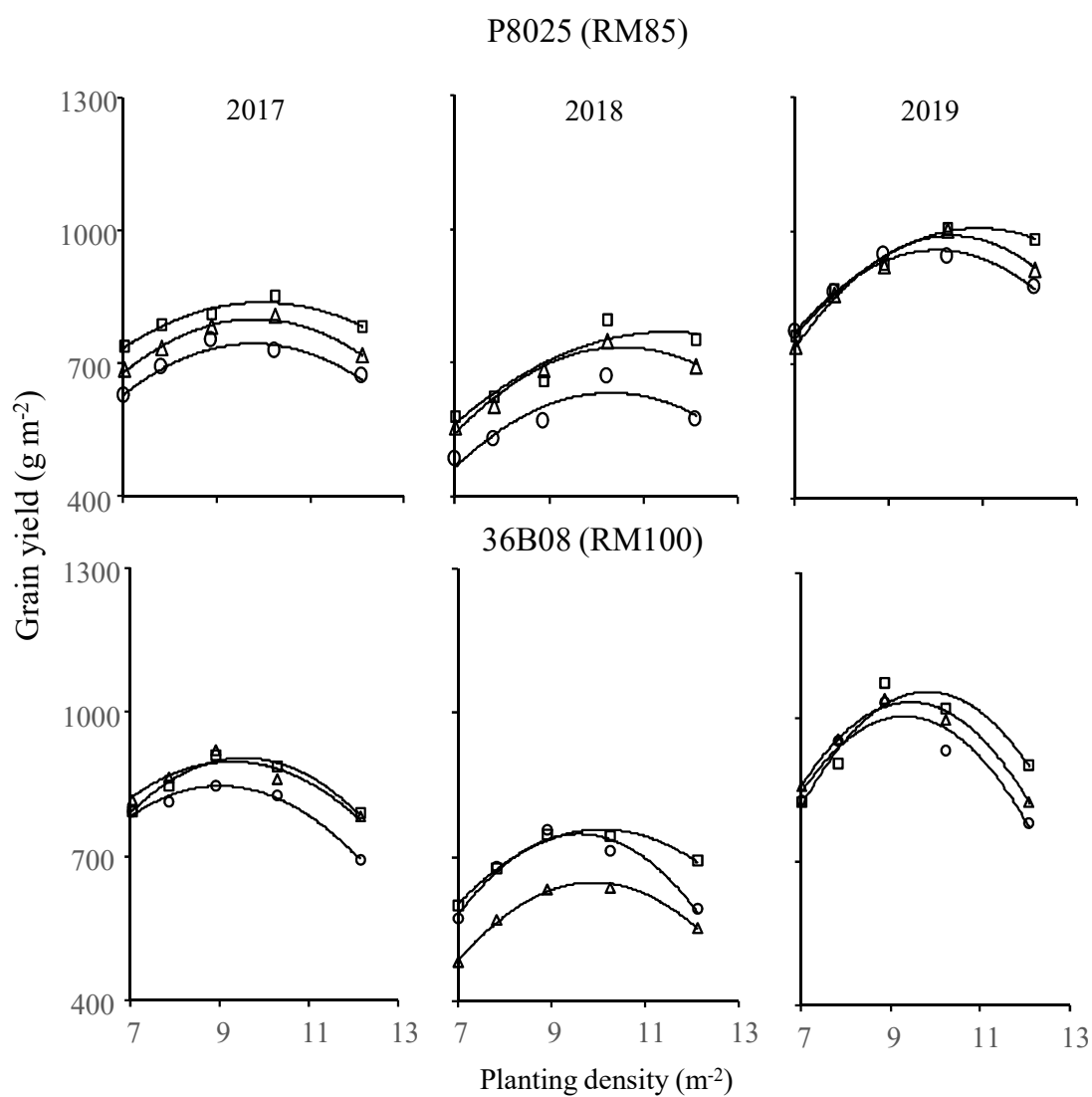


Figure V-1. Responses of grain yield to planting density (Exp.6).

○, □, and △ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation, respectively.
P8025 (RM85) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.
---shows significant quadratic regression equation of grain yield.

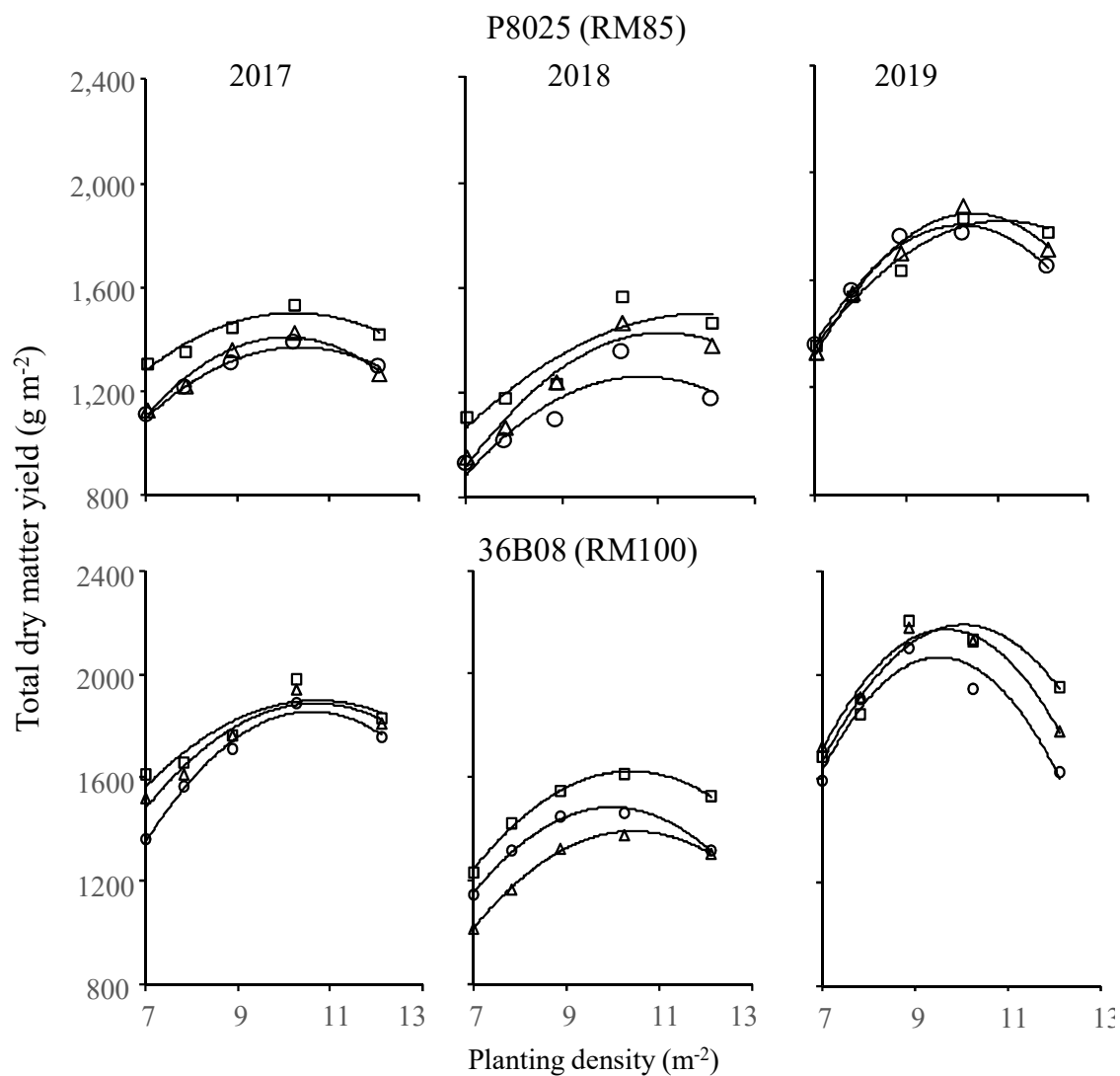


Figure V-2. Responses of total dry matter yield to planting density (Exp.6).

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

P8025 (RM85) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

---shows significant quadratic regression equation of total dry matter yield.

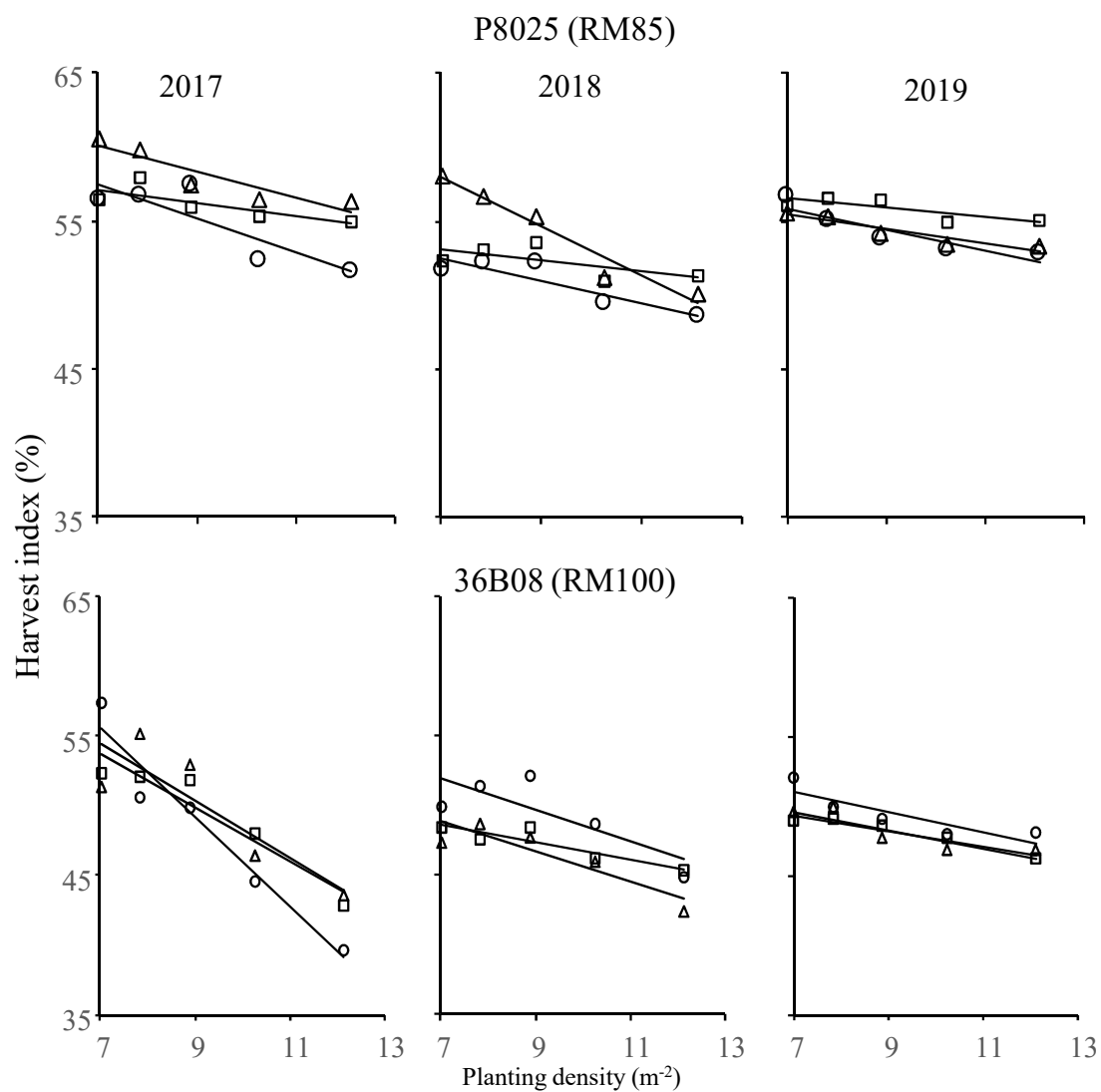


Figure V-3. Responses of harvest index to planting density (Exp.6).

P8025 (RM85) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

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

---shows the significant primary regression equation of harvest index.

Table V-2. Effect of grain yield and total top dry matter yield response to planting density (P8025 and 36B08, Exp.6).

Year	Cultivar	Planting Pattern	Grain yield (g m ⁻²)			Total top dry matter yield (g m ⁻²)		
2017	P8025 (RM85)	CR	Y=-15.1(X-9.8) ² +744 (r=0.97 **)			Y=-24.0(X-10.4) ² +1370(r=1.00***)		
		TR	Y=-11.8(X-10.0) ² +837 (r=0.98 **)			Y=-20.8(X-10.2) ² +1502(r=0.96 *)		
		NR	Y=-15.4(X-9.8) ² +800 (r=0.99 **)			Y=-31.8(X-10.1) ² +1409(r=0.98 **)		
	36B08 (RM100)	CR	Y=-15.7(X-9.0) ² +847 (r=0.99***)			Y=-39.3(X-10.6) ² +1855(r=0.99***)		
		TR	Y=-17.7(X-9.5) ² +905 (r=0.99 **)			Y=-24.4(X-10.7) ² +1898(r=0.91 *)		
		NR	Y=-14.7(X-9.3) ² +897 (r=0.94 *)			Y=-30.1(X-10.7) ² +1887(r=0.97 **)		
2018	P8025 (RM85)	CR	Y=-15.3(X-10.3) ² +633 (r=0.92 *)			Y=-27.7(X-10.7) ² +1262(r=0.91 *)		
		TR	Y=-10.1(X-11.5) ² +770 (r=0.94 *)			Y=-17.9(X-11.9) ² +1502(r=0.91 *)		
		NR	Y=-15.5(X-10.5) ² +735 (r=0.98 **)			Y=-30.3(X-11.1) ² +1429(r=0.98 **)		
	36B08 (RM100)	CR	Y=-25.4(X-9.6) ² +748 (r=0.98 **)			Y=-37.5(X-10.0) ² +1483(r=1.00***)		
		TR	Y=-16.5(X-10.1) ² +757 (r=0.99 **)			Y=-33.2(X-10.4) ² +1623(r=1.00***)		
		NR	Y=-19.6(X-9.9) ² +647 (r=1.00***)			Y=-31.9(X-10.4) ² +1391(r=1.00***)		
2019	P8025 (RM85)	CR	Y=-20.2(X-10.0) ² +958 (r=0.99 **)			Y=-43.2(X-10.2) ² +1804(r=0.99***)		
		TR	Y=-15.8(X-10.9) ² +1007(r=0.99***)			Y=-27.6(X-11.1) ² +1820(r=0.99 **)		
		NR	Y=-22.7(X-10.3) ² +990 (r=0.99***)			Y=-44.5(X-10.4) ² +1848(r=0.99***)		
	36B08 (RM100)	CR	Y=-29.7(X-9.3) ² +1002(r=0.95 *)			Y=-69.5(X-9.5) ² +2069(r=0.96 **)		
		TR	Y=-30.0(X-9.8) ² +1054(r=0.95 *)			Y=-57.8(X-10.0) ² +2196(r=0.96 *)		
		NR	Y=-29.4(X-9.4) ² +1032(r=0.99***)			Y=-66.2(X-9.7) ² +2177(r=0.99 **)		
Year(Y)			**	***	***	***	**	***
Cultivar(C)			***	***	***	***	***	***
Planting Patten(P)			**	***	***	***	***	***
Y×C			**	**	***	***	***	***
Y×P			†	ns	**	ns	*	***
P×C			*	*	***	**	*	***
Y×C×P			ns	**	***	ns	*	***

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

P8025 (RM85) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

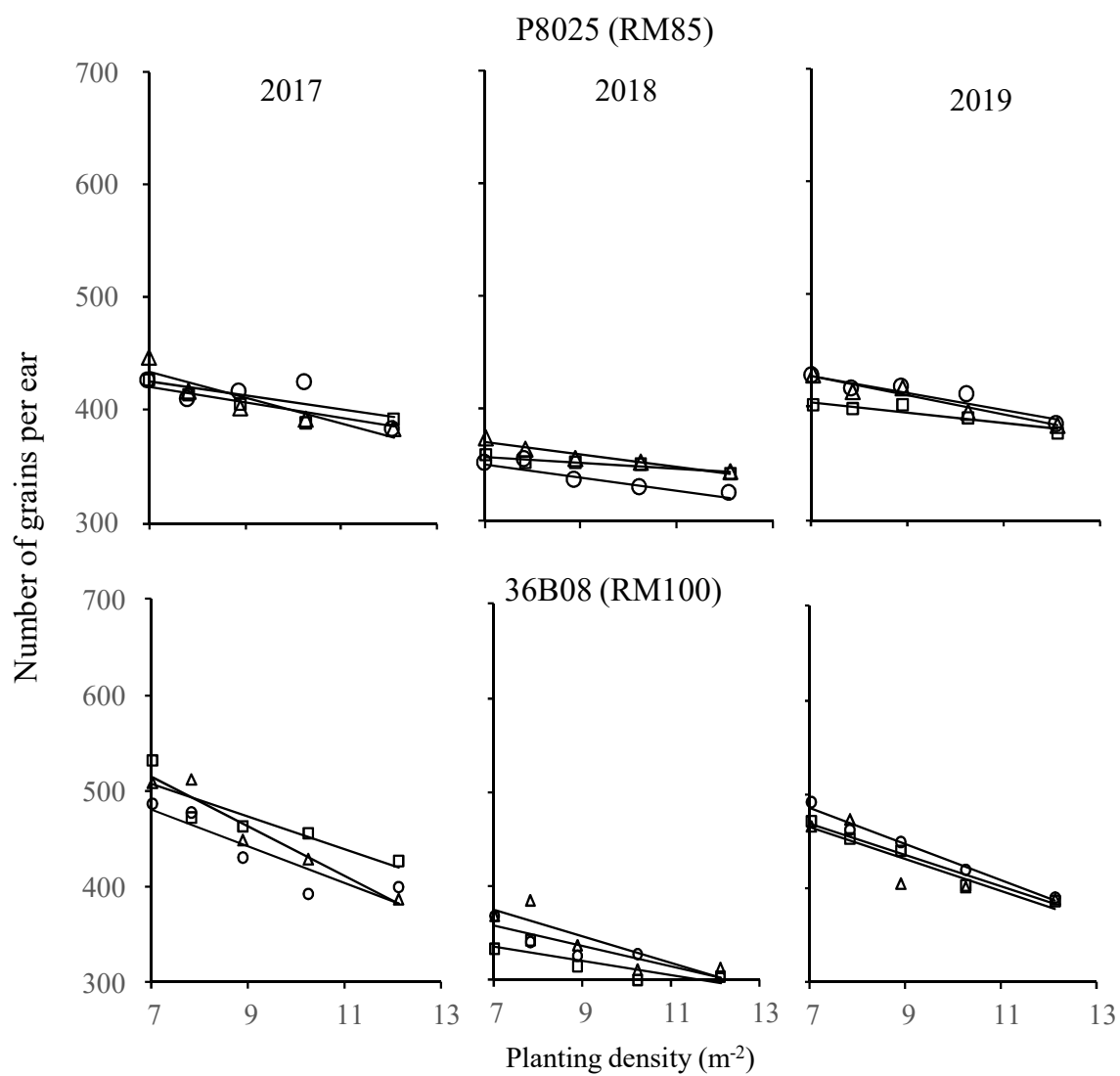


Figure V-4. Responses of number of grains per ear to planting density (Exp.6).

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

P8025 (RM85) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

---shows the significant primary regression equation of number of grains per ear.

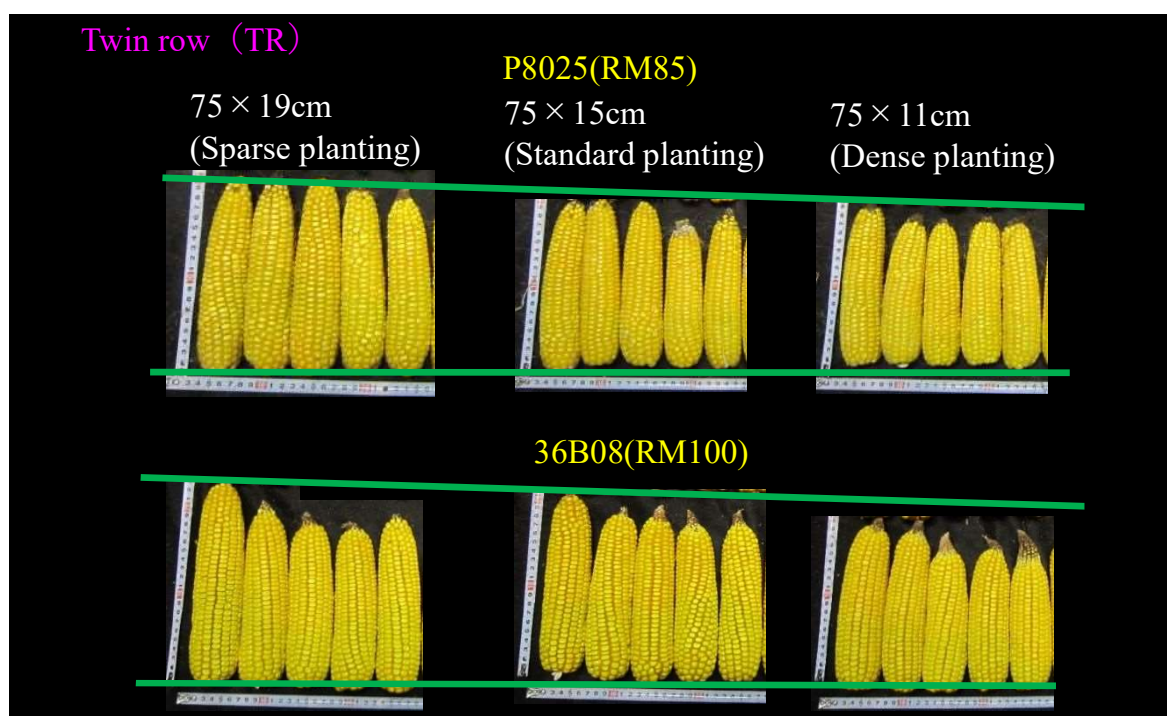


Figure V-5. Decrease in number of grains per ear due to dense planting (Exp.6).

P8025 (RM85) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

75 × 19, 15, 11cm indicate row spacing (cm) × hill distance (cm) in sparse, standard, dense planting, respectively.

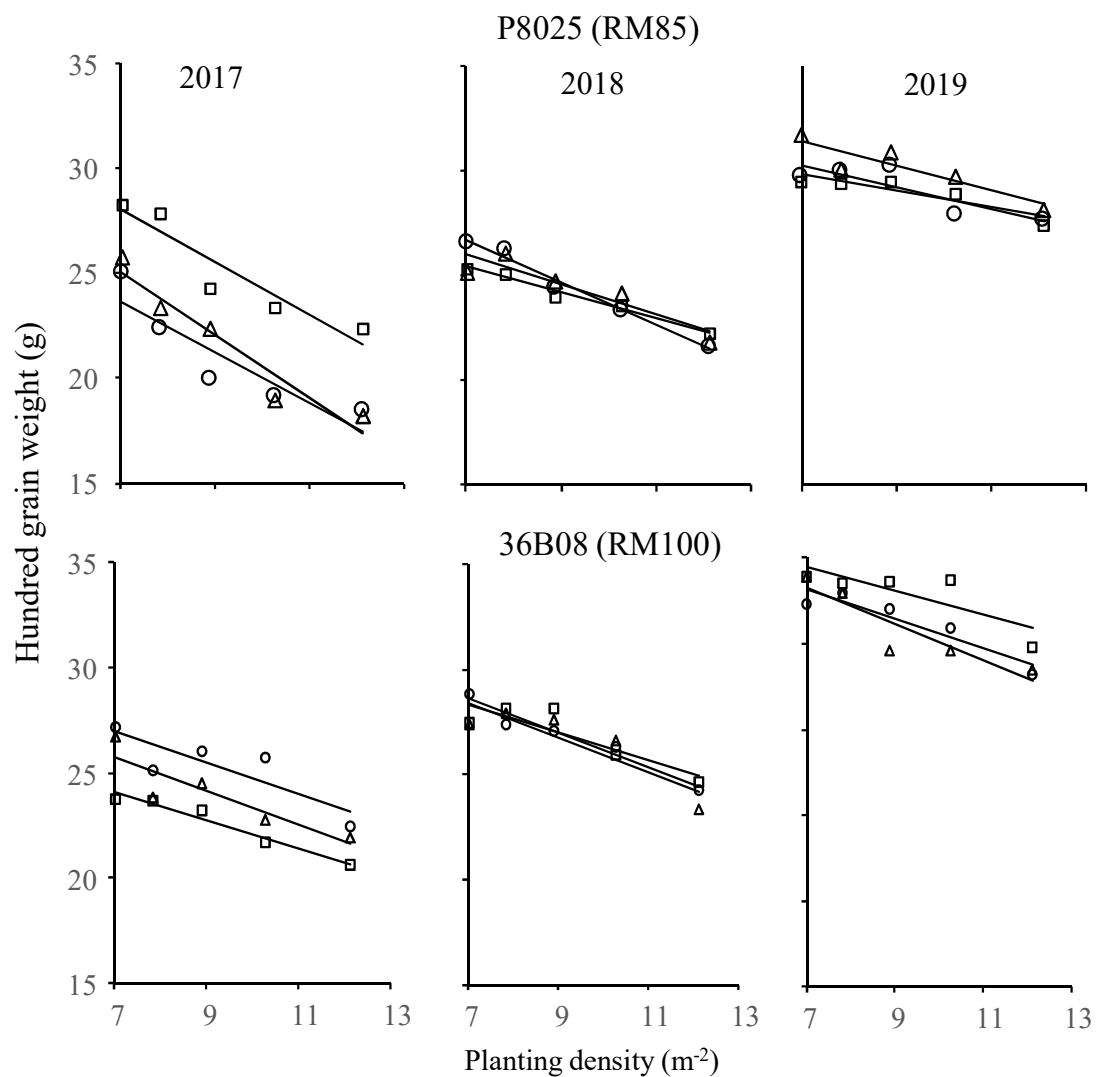


Figure V-6. Responses of hundred grain weight to planting density (Exp.6).

○, □, and △ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation, respectively. P8025 (RM85) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

---shows the significant primary regression equation of hundred grain weight.

Table V -3. The ratio of sparse planting to densest planting in harvest index, and slope of regression of number of grains per ear and hundred grain weight to planting density (P8025 and 36B08, Exp.6).

Year	Cultivar	Planting Pattern	Harvest index (HI(12.1) #/HI(7.0) ¥)	Number of grain per ear	Hundred grain weight
2017	P8025 (RM85)	CR	91	Y= -6.1 X+ 468 (r= 0.72 ns)	Y= -1.2 X+ 32 (r= 0.91 *)
		TR	97	Y= -7.0 X+ 470 (r= 0.90 *)	Y= -1.3 X+ 37 (r= 0.93 *)
		NR	93	Y= -11.3 X+ 514 (r= 0.91 *)	Y= -1.5 X+ 36 (r= 0.96 **)
	36B08 (RM100)	CR	69	Y= -19.4 X+ 617 (r= 0.90 *)	Y= -0.7 X+ 32 (r= 0.84 †)
		TR	82	Y= -17.0 X+ 627 (r= 0.89 *)	Y= -0.7 X+ 29 (r= 0.98 **)
		NR	85	Y= -25.7 X+ 694 (r= 0.97 **)	Y= -0.8 X+ 31 (r= 0.89 *)
2018	P8025 (RM85)	CR	94	Y= -6.1 X+ 394 (r= 0.93 *)	Y= -1.0 X+ 34 (r= 0.99***)
		TR	98	Y= -2.6 X+ 375 (r= 0.95 *)	Y= -0.6 X+ 30 (r= 0.99 **)
		NR	86	Y= -5.6 X+ 409 (r= 0.95 *)	Y= -0.7 X+ 31 (r= 0.92 *)
	36B08 (RM100)	CR	90	Y= -10.8 X+ 433 (r= 0.92 *)	Y= -0.8 X+ 34 (r= 0.98 **)
		TR	94	Y= -7.5 X+ 389 (r= 0.85 †)	Y= -0.7 X+ 33 (r= 0.88 †)
		NR	90	Y= -13.9 X+ 471 (r= 0.87 †)	Y= -0.8 X+ 34 (r= 0.88 †)
2019	P8025 (RM85)	CR	93	Y= -7.5 X+ 480 (r= 0.94 *)	Y= -0.5 X+ 34 (r= 0.85 †)
		TR	98	Y= -4.6 X+ 438 (r= 0.92 *)	Y= -0.4 X+ 33 (r= 0.91 *)
		NR	96	Y= -8.4 X+ 486 (r= 0.96 **)	Y= -0.6 X+ 36 (r= 0.91 *)
	36B08 (RM100)	CR	92	Y= -19.3 X+ 621 (r= 0.99 **)	Y= -0.9 X+ 39 (r= 0.93 *)
		TR	94	Y= -17.0 X+ 588 (r= 0.98 **)	Y= -0.7 X+ 39 (r= 0.82 †)
		NR	94	Y= -17.1 X+ 585 (r= 0.87 †)	Y= -1.1 X+ 41 (r= 0.91 *)
Year(Y)			†	**	**
Cultivar(C)			***	***	
Planting Patten(P)			†	*	ns
Y×C			ns	**	***
Y×P			*	ns	ns
P×C			ns	ns	ns
Y×C×P			ns	ns	*

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

#, ¥ indicate harvest index in densest (75 × 11cm) and sparse (75 × 19cm) planting, respectively.

P8025 (RM85) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

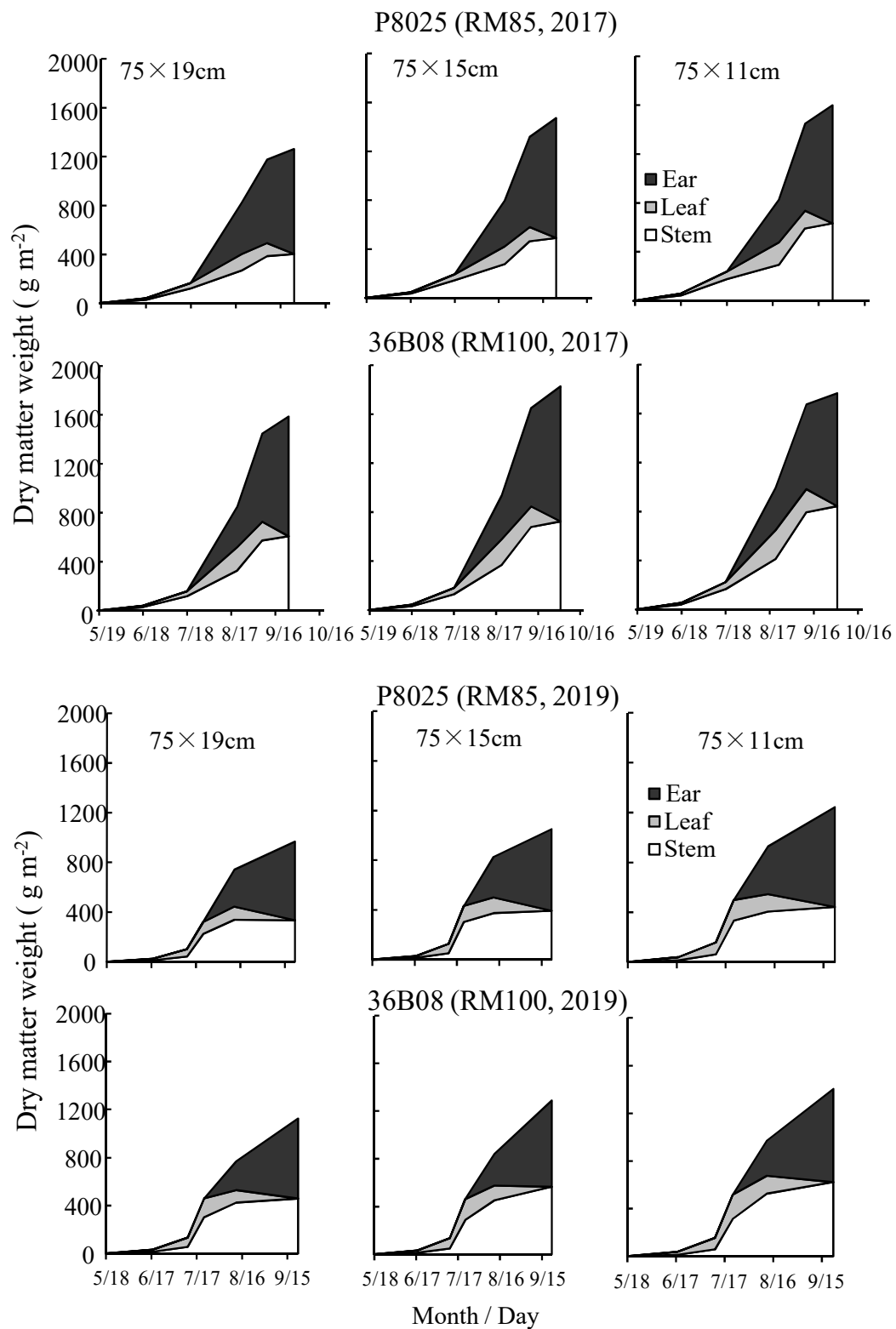


Figure V-7. Changes in partial dry matter weight (Exp.6).

P8025 (RM85) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively. 75 × 19, 15, 11cm indicate row spacing (cm) × hill distance (cm) in sparse, standard, dense planting, respectively.

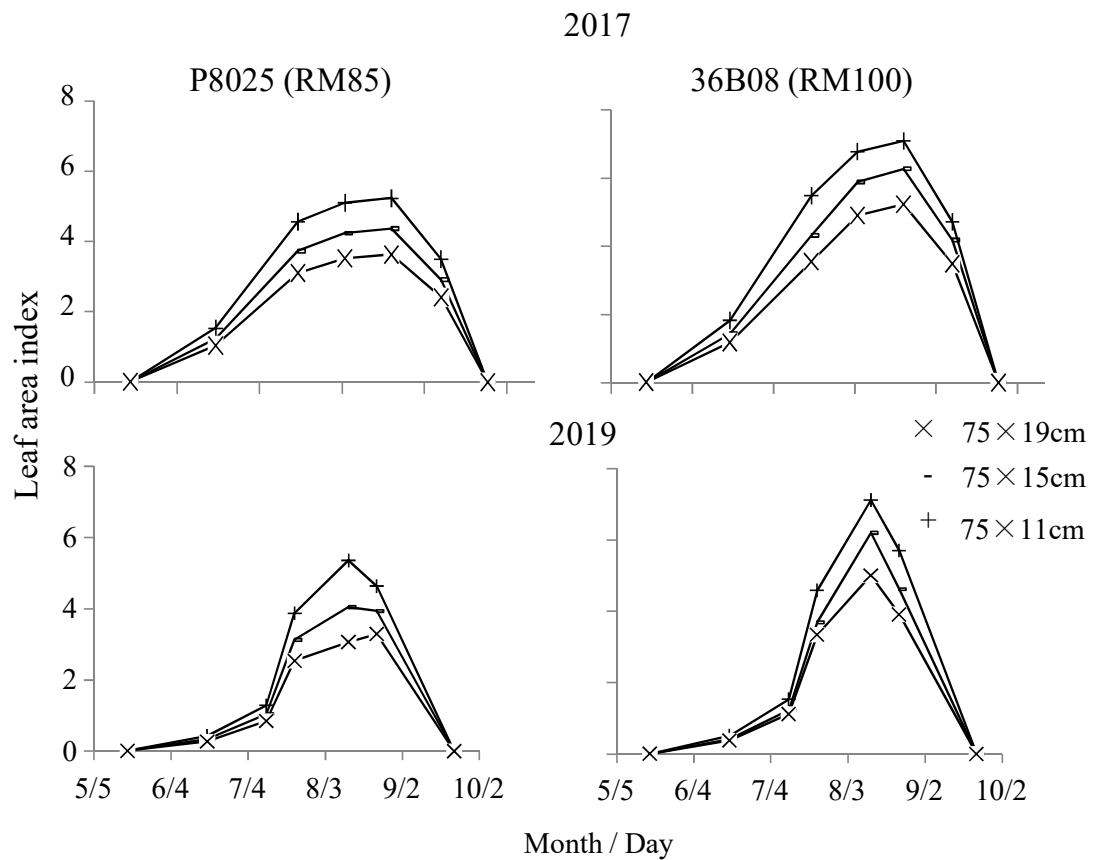


Figure V-8. Leaf area index (Exp.6).

P8025 (RM85) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

75 × 19, 15, 11cm indicate row spacing (cm) × hill distance (cm) in sparse, standard, dense planting, respectively.

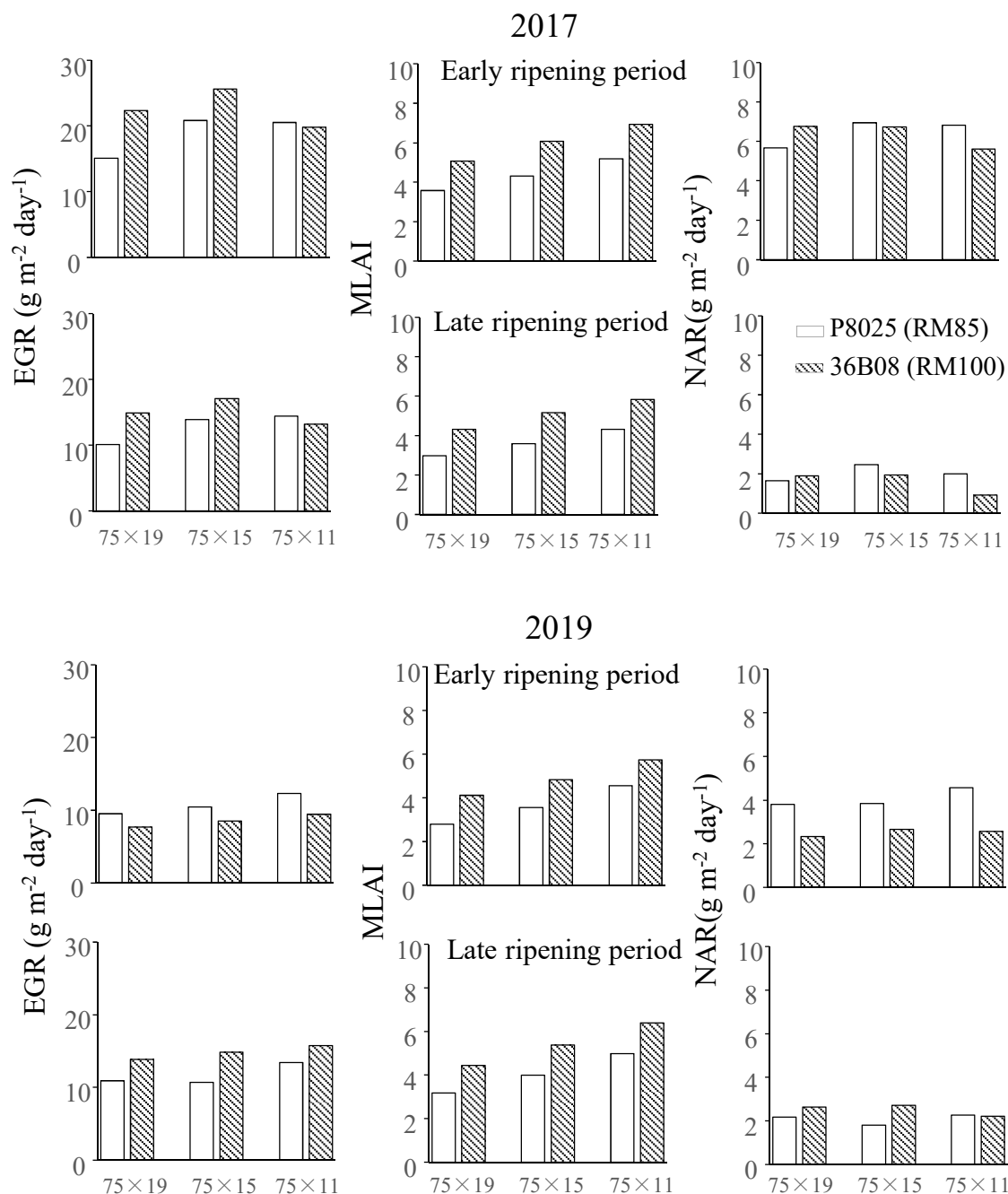


Figure V-9. Ear growth rate (EGR), Mean leaf index (MLAI) and Net assimilation rate (NAR) during grain filling period (Exp.6).

EGR, MLAI, and NAR indicate Ear Growth Rate, Mean Leaf Area Index, Net Assimilation Rate, respectively.
 75 × 19, 15, 11cm indicate row spacing (cm) × hill distance (cm) in sparse, standard, dense planting, respectively.
 P8025 (RM85) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively
 Early ripening period and late ripening period indicate silking-milk ripening stage and milk ripening-maturity stage, respectively.

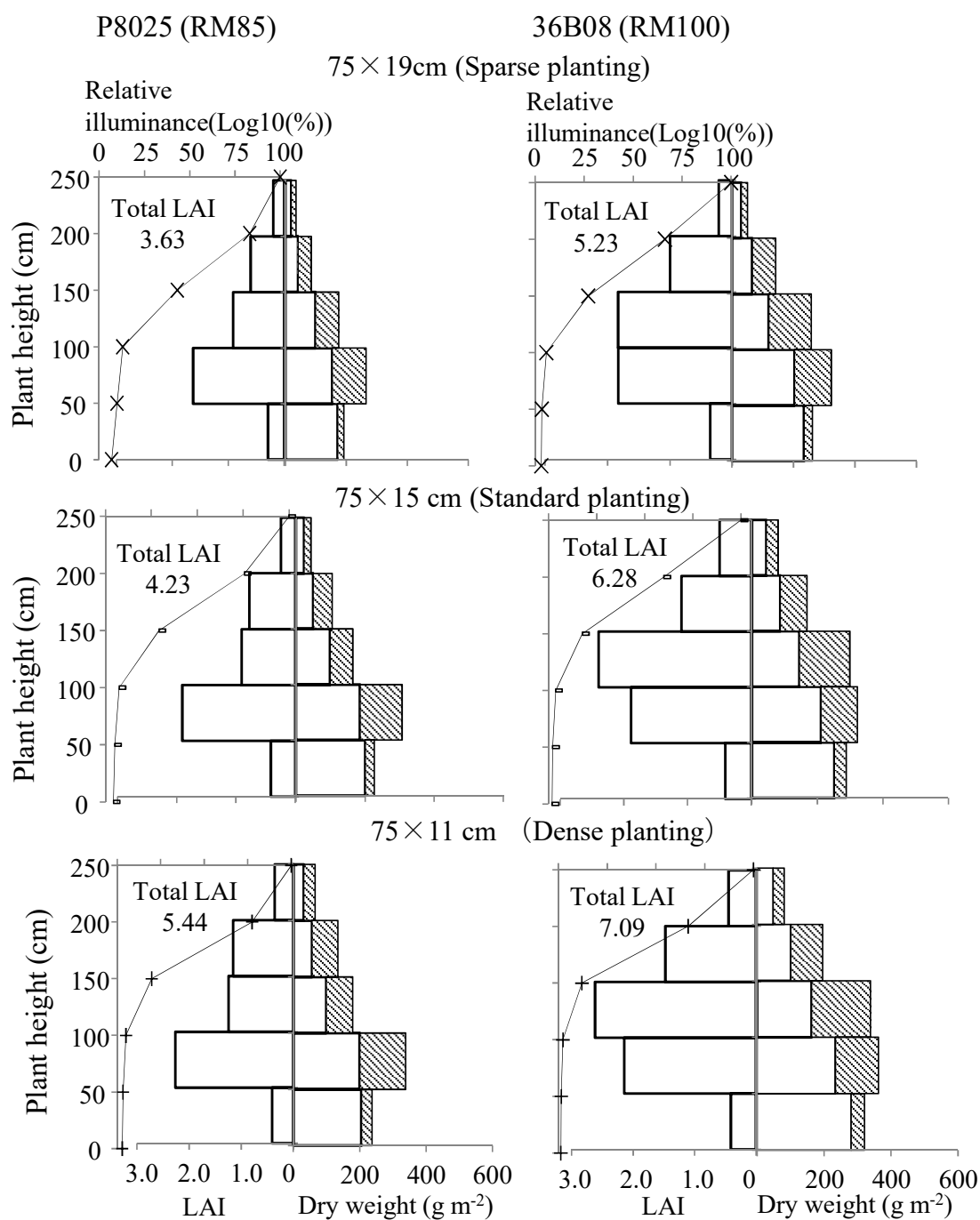


Figure V-10. Canopy structure (2017, Exp.6).

P8025 (RM85) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

75 × 19, 15, 11cm indicate row spacing (cm) × hill distance (cm) in sparse, standard, dense planting, respectively.

Total LAI indicate total leaf area index in each plant height.

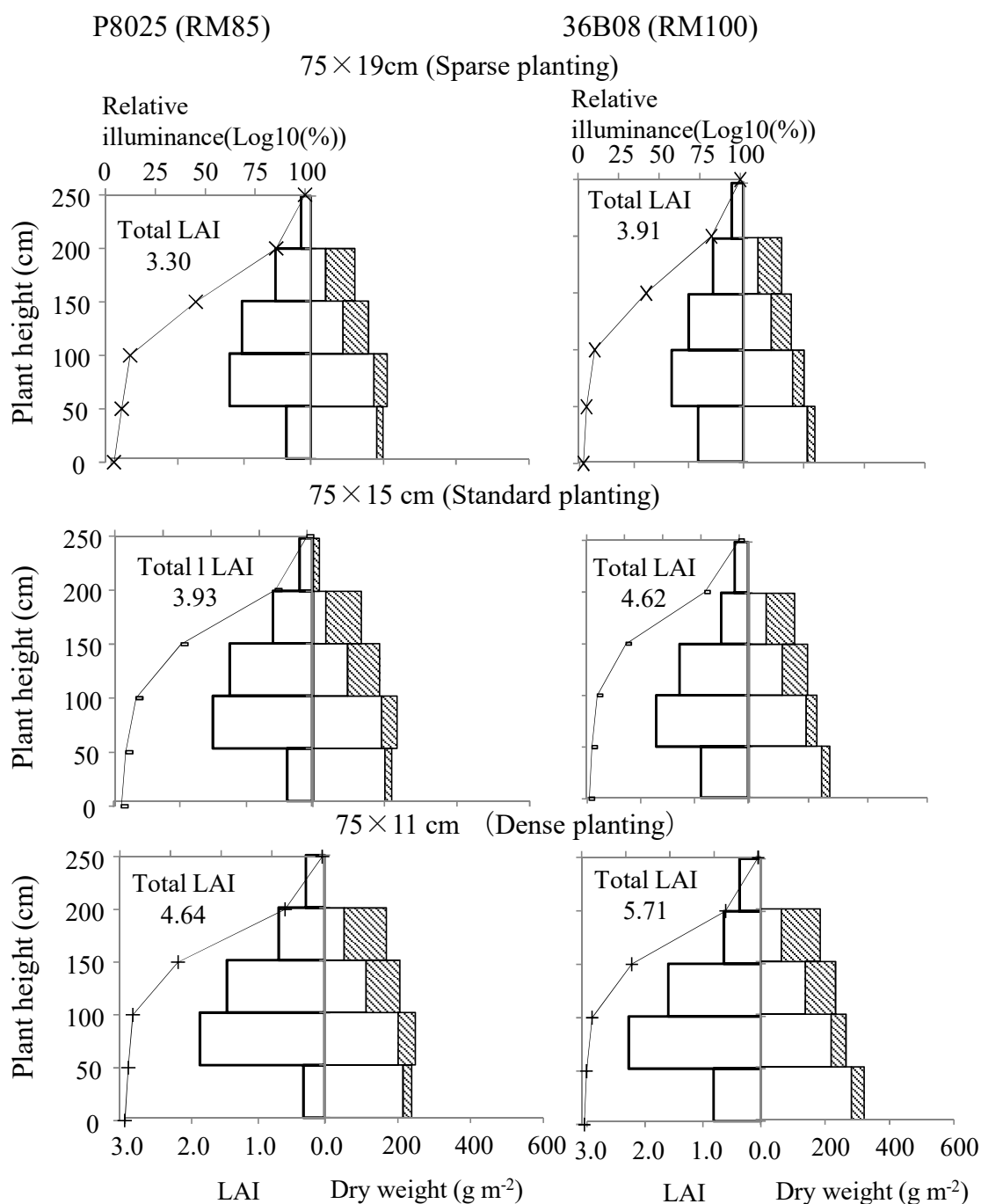


Figure V-11. Canopy structure (2019, Exp.6).

P8025 (RM85) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

75 × 19, 15, 11 cm indicate row spacing (cm) × hill distance (cm) in sparse, standard, dense planting, respectively.

Total LAI indicate total leaf area index in each plant height.

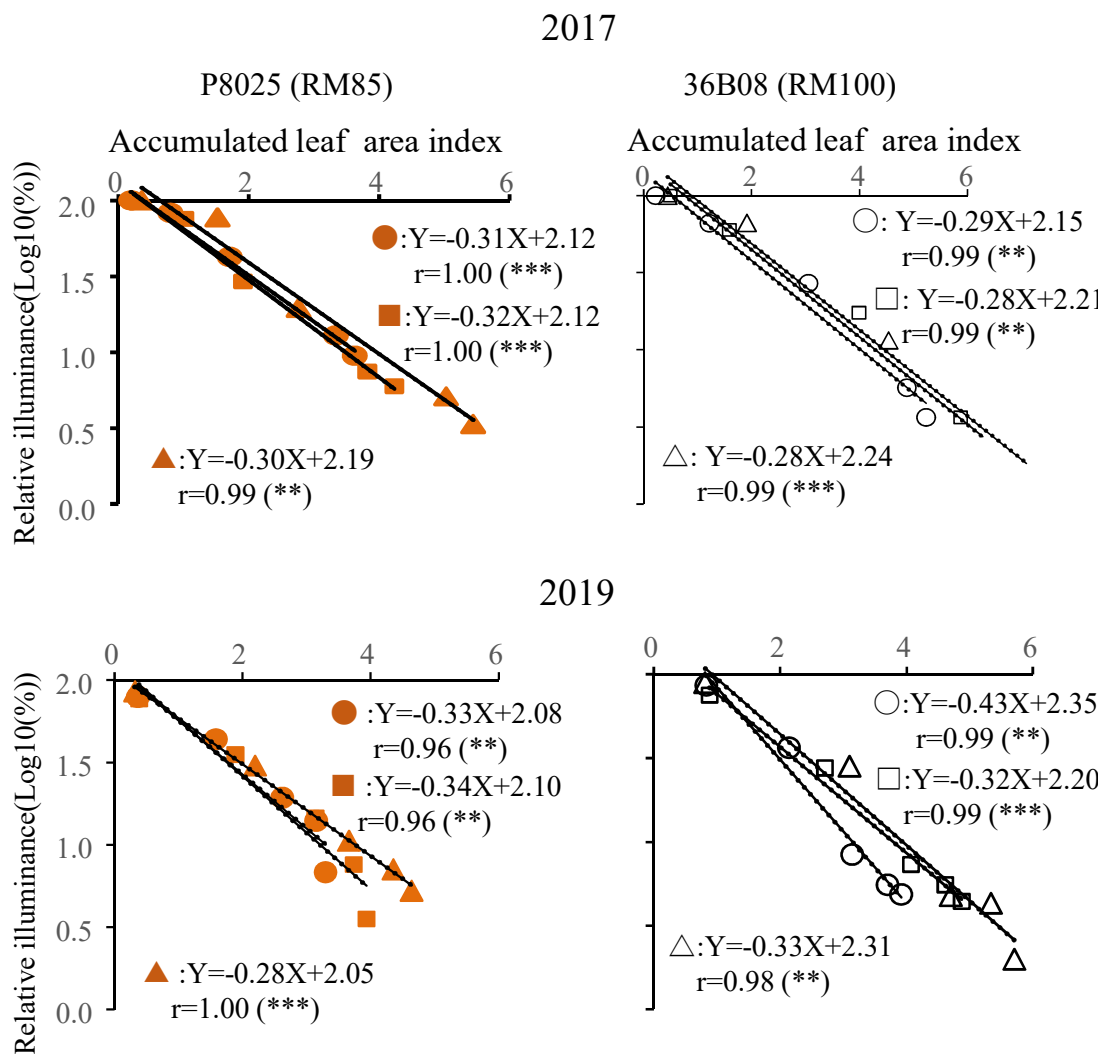


Figure V-12. Relationship between accumulated leaf area index and relative illuminance (Exp.6).

P8025 (RM85) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

●, ■, ▲ and ○, □, △ indicate 75 × 19, 15, 11cm in P8025 and 36B08, respectively.

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

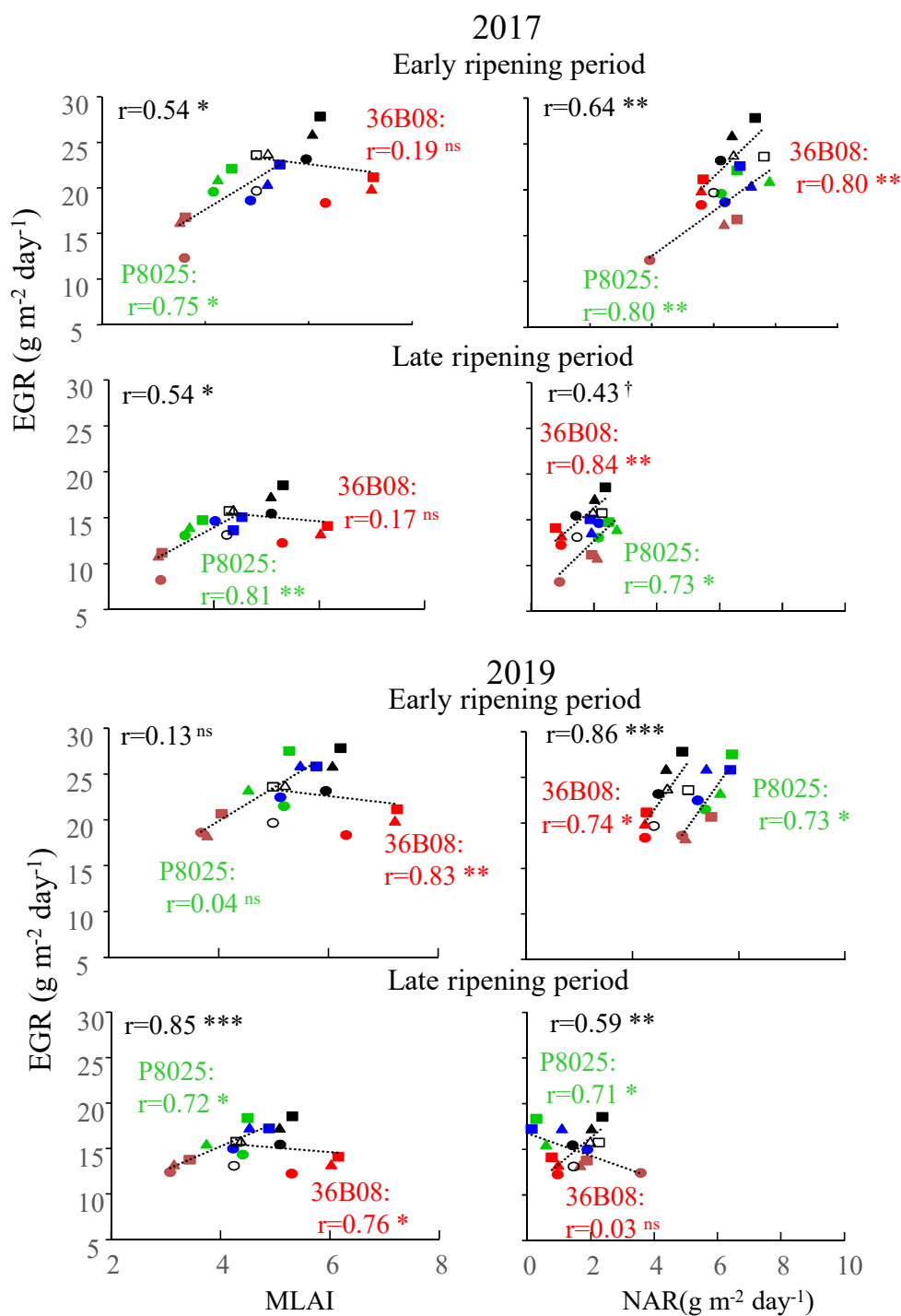


Figure V-13. Relationship between Mean leaf area index (MLAI), Net assimilation rate (NAR) and Ear growth rate (EGR), and (Exp.6).

●, ●, ●, ● and ▲, ▲, ▲ indicate 75×19, 15, 11cm of conventional row (CR), twin row (TR) and narrow row (NR) in P8025, respectively.
○, ●, ●, □ and △, ▲, ▲ indicate 75×19, 15, 11cm of conventional row (CR), twin row (TR) and narrow row (NR) in 36B08, respectively.

EGR, MLAI, and NAR indicate ear growth rate, mean leaf area index, net assimilation rate, respectively.

Early ripening period and late ripening period indicate silking-milk ripening stage and milk ripening-maturity stage, respectively.

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

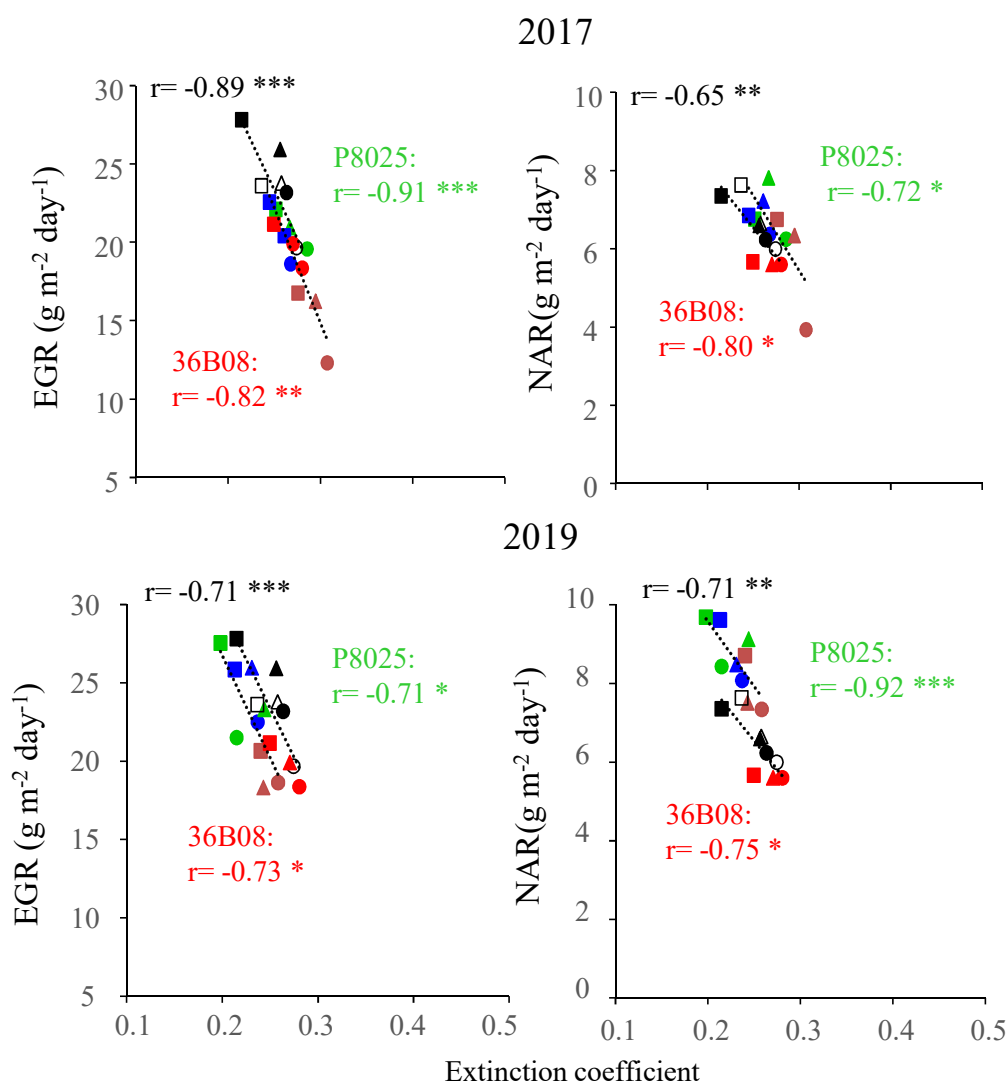


Figure V-14. Relationship between Ear growth rate (EGR), Net assimilation rate (NAR) and Extinction coefficient during early ripening period (Exp.6).

●, ●, ●, ■, ■, ■ and ▲, ▲, ▲ indicate 75×19, 15, 11cm of conventional row (CR), twin row (TR) and narrow row (NR) in P8025, respectively.
○, ●, ●, □, ■, ■ and △, ▲, ▲ indicate 75×19, 15, 11cm of conventional row (CR), twin row (TR) and narrow row (NR) in 36B08, respectively.
EGR, MLAI, and NAR indicate Ear Growth Rate, Mean Leaf Area Index, Net Assimilation Rate, respectively.
†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

Table V-4. Tasseling date and maturity date (KD420 and 36B08, Exp.7).

Year	Cultivar	Tasseling date (Month / Day)	Maturity date (Month / Day)
2017	KD420 (RM93)	8/1	9/25
	36B08 (RM100)	8/6	10/2
2018	KD420 (RM93)	7/30	9/24
	36B08 (RM100)	8/3	10/1
2019	P8025 (RM93)	7/22	9/23
	KD420 (RM100)	7/29	9/30

KD420 (RM93) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

KD420 and 36B08 indicate cultivars with a high proportion of lower leaves and Cultivars with a high proportion of top leaves, respectively.

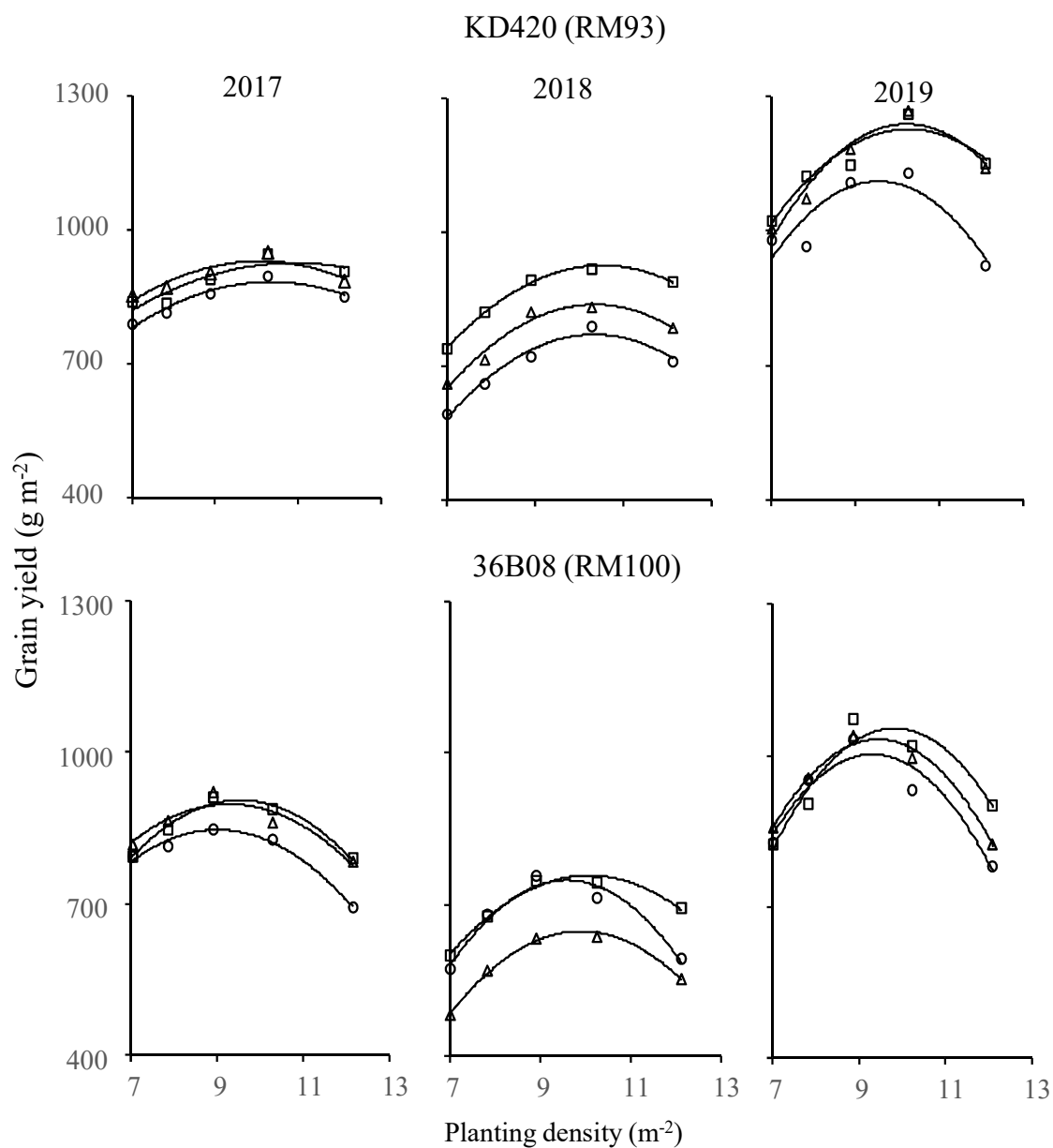


Figure V-15. Responses of grain yield to planting density (Exp.7).

KD420 (RM93) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

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

---shows significant quadratic regression equation of grain yield.

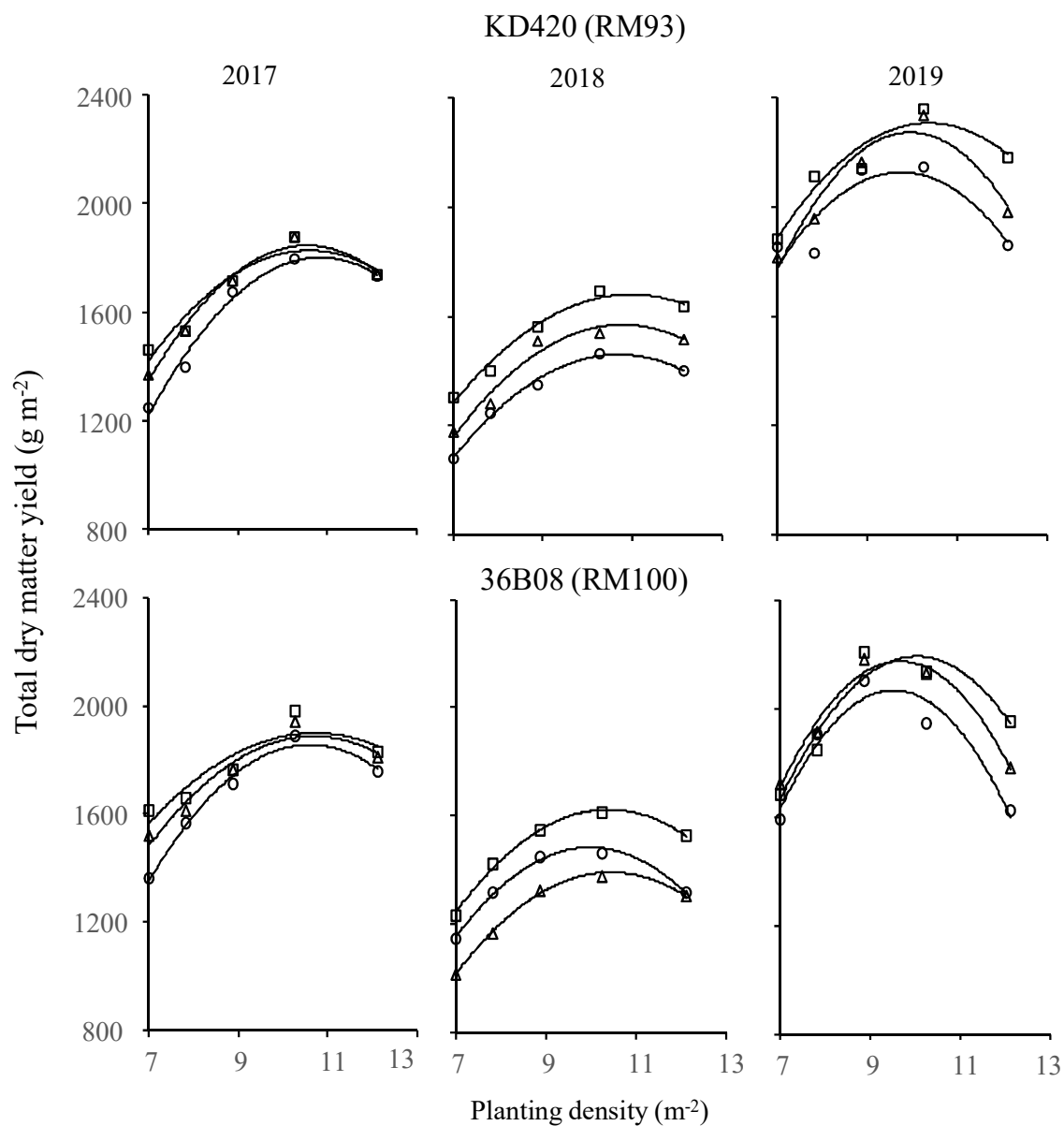


Figure V-16. Responses of total dry matter yield to planting density (Exp.7).

KD420 (RM93) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

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

---shows significant quadratic regression equation of total dry matter yield.

Table V-5. Effect of grain yield and total top dry matter yield response to planting density (KD420 and 36B08, Exp.7).

Year	Cultivar	Planting	Grain yield		Total top dry matter yield				
		Pattern	(g m ⁻²)		(g m ⁻²)				
2017	KD420 (RM93)	CR	Y= -9.2 (X-10.3) ² + 884 (r= 0.97 **)		Y= -39.6(X-10.8) ² +1801 (r= 0.99 ***)				
		TR	Y= -7.0 (X-10.9) ² + 927 (r= 0.91 *)		Y= -31.8(X-10.6) ² +1827(r= 0.96 **)				
		NR	Y= -9.4 (X-10.1) ² + 931 (r= 0.92 *)		Y= -39.8(X-10.6) ² +1845(r= 0.99 ***)				
	36B08 (RM100)	CR	Y=-15.7(X- 9.0) ² + 847 (r= 0.99 ***)		Y= -39.3(X-10.6) ² +1855(r= 0.99 ***)				
		TR	Y=-17.7(X- 9.5) ² + 905 (r= 0.99 **)		Y= -24.4(X-10.7) ² +1898(r= 0.91 *)				
		NR	Y=-14.7(X- 9.3) ² + 897 (r= 0.94 *)		Y= -30.1(X-10.7) ² +1887(r= 0.97 **)				
2018	KD420 (RM93)	CR	Y=-16.8(X-10.3) ² + 772 (r= 0.99 **)		Y= -28.1 (X-10.7) ² +1460(r= 1.00 ***)				
		TR	Y=-15.0(X-10.5) ² + 926 (r= 1.00 ***)		Y= -25.5(X-11.0) ² +1681 (r= 0.99 **)				
		NR	Y=-16.9(X-10.3) ² + 839 (r= 0.98 **)		Y= -29.1(X-10.8) ² +1570(r= 0.98 **)				
	36B08 (RM100)	CR	Y=-25.4(X- 9.6) ² + 748 (r= 0.98 **)		Y= -37.5(X-10.0) ² +1483(r= 1.00 ***)				
		TR	Y=-16.5(X-10.1) ² + 757 (r= 0.99 **)		Y= -33.2(X-10.4) ² +1623(r= 1.00 ***)				
		NR	Y=-19.6(X- 9.9) ² + 647 (r= 1.00 ***)		Y= -31.9(X-10.4) ² +1391 (r= 1.00 ***)				
2019	KD420 (RM93)	CR	Y=-26.7(X- 9.6) ² +1112(r= 0.89 *)		Y= -45.5(X- 9.8) ² +2129(r= 0.88 †)				
		TR	Y=-19.7(X-10.3) ² +1228(r= 0.94 *)		Y= -37.2(X-10.4) ² +2309(r= 0.95 *)				
		NR	Y=-24.9(X-10.2) ² +1239(r= 0.97 **)		Y= -57.6(X-10.0) ² +2274(r= 0.96 **)				
	36B08 (RM100)	CR	Y=-29.7(X- 9.3) ² +1002(r= 0.95 *)		Y= -69.5(X- 9.5) ² +2069(r= 0.96 **)				
		TR	Y=-30.0(X- 9.8) ² +1054(r= 0.95 *)		Y= -57.8(X-10.0) ² +2196(r= 0.96 *)				
		NR	Y=-29.4(X- 9.4) ² +1032(r= 0.99 ***)		Y= -66.2(X- 9.7) ² +2177(r= 0.99 **)				
Year(Y)			**	ns	**		**	**	***
Cultivar(C)			**	**	**		**	*	**
Planting Patten(P)			ns	ns	ns		**	*	***
Y×C			ns	ns	ns		***	*	***
Y×P			ns	ns	ns		*	ns	***
P×C			ns	ns	ns		ns	ns	**
Y×C×P			ns	ns	ns		ns	ns	**

KD420 (RM93) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

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

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

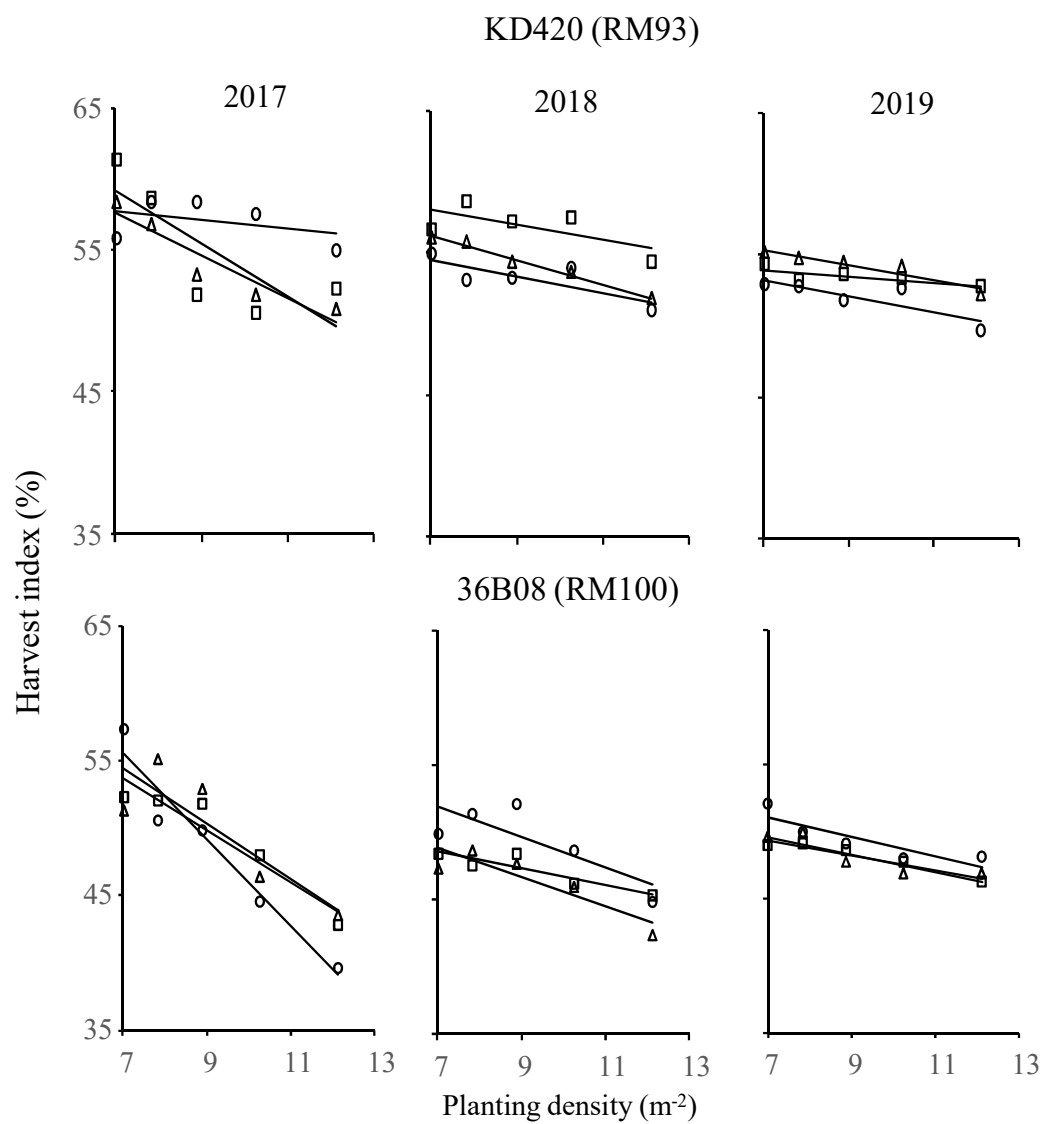


Figure V-17. Responses of harvest index to planting density (Exp.7).

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

KD420 (RM93) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

---shows the significant primary regression equation of harvest index.

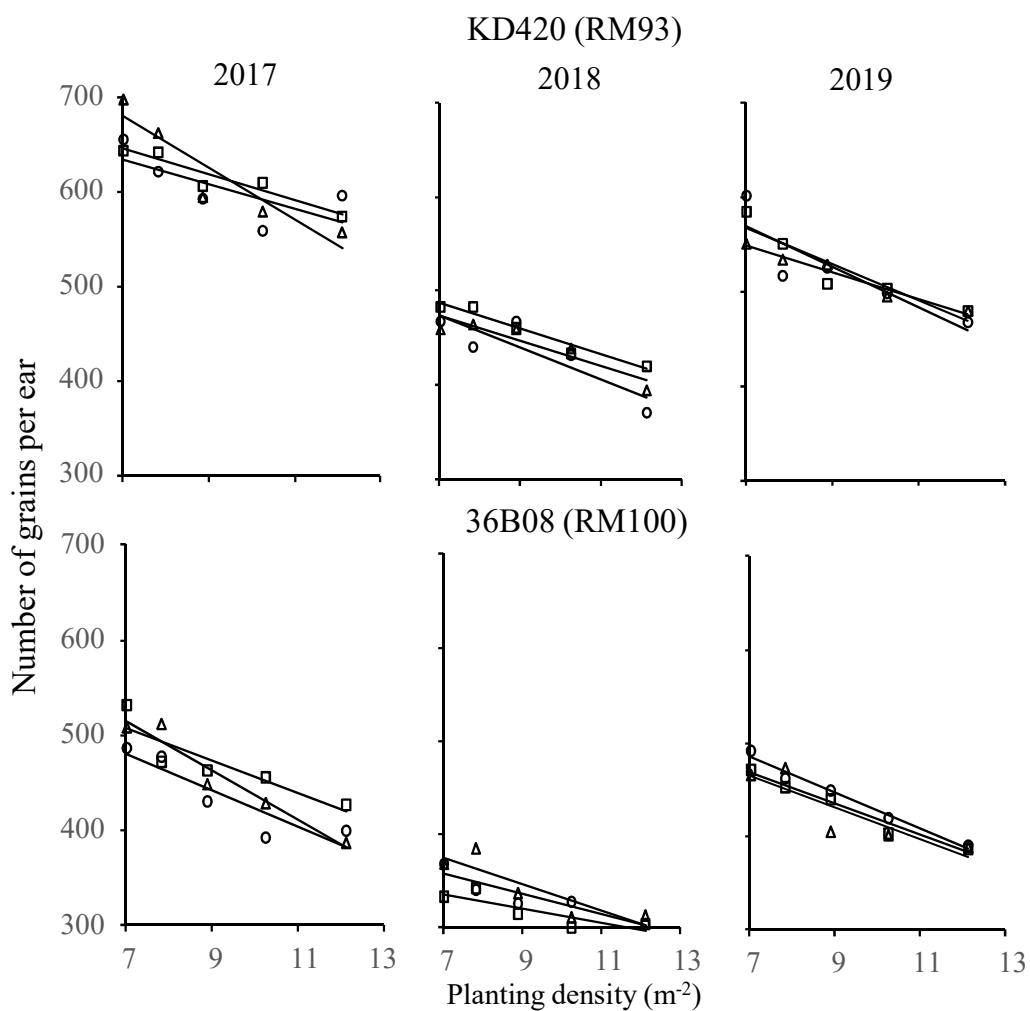


Figure V-18. Responses of number of grains per ear to planting density (Exp.7).

○, □, and △ indicate conventional row (CR) twin row (TR), narrow row (NR) cultivation, respectively .
 KD420 (RM93) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.
 ---shows the significant primary regression equation of number of grains per ear.

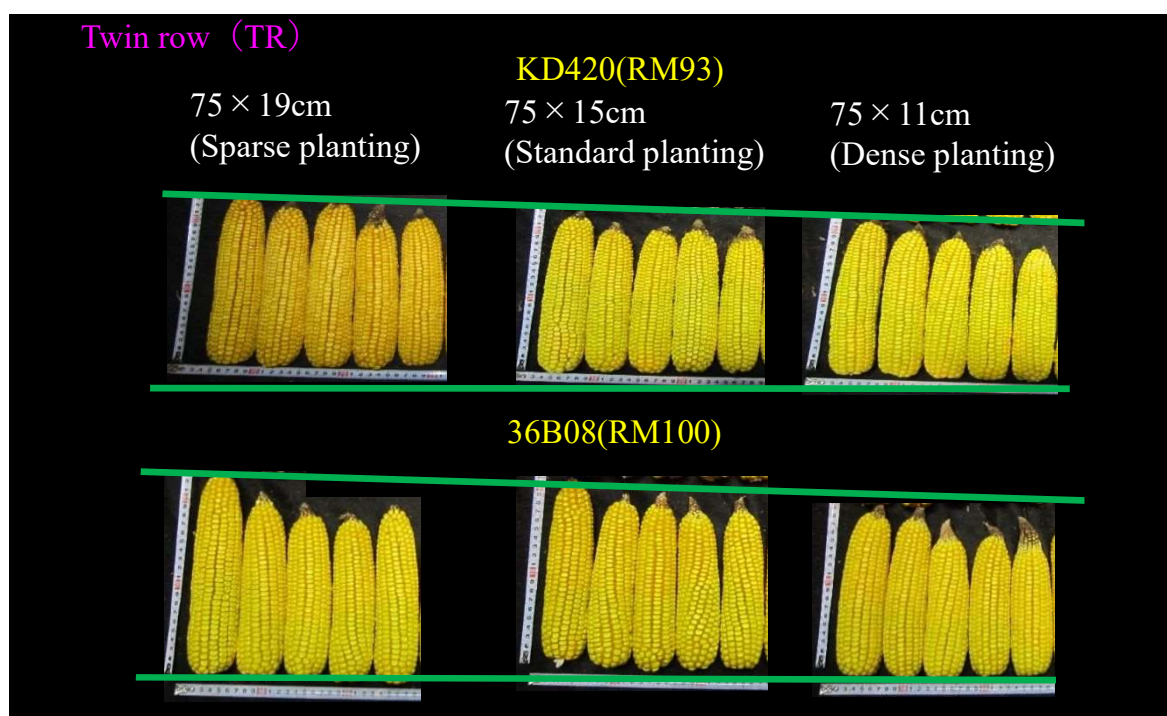


Figure V-19. Decrease in number of grains per ear due to dense planting (Exp.7).

KD420 (RM93) and 36B08 (RM100) show corn cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

75 × 19, 15, 11cm indicate row spacing (cm) × hill distance (cm) in sparse, standard, dense planting, respectively.

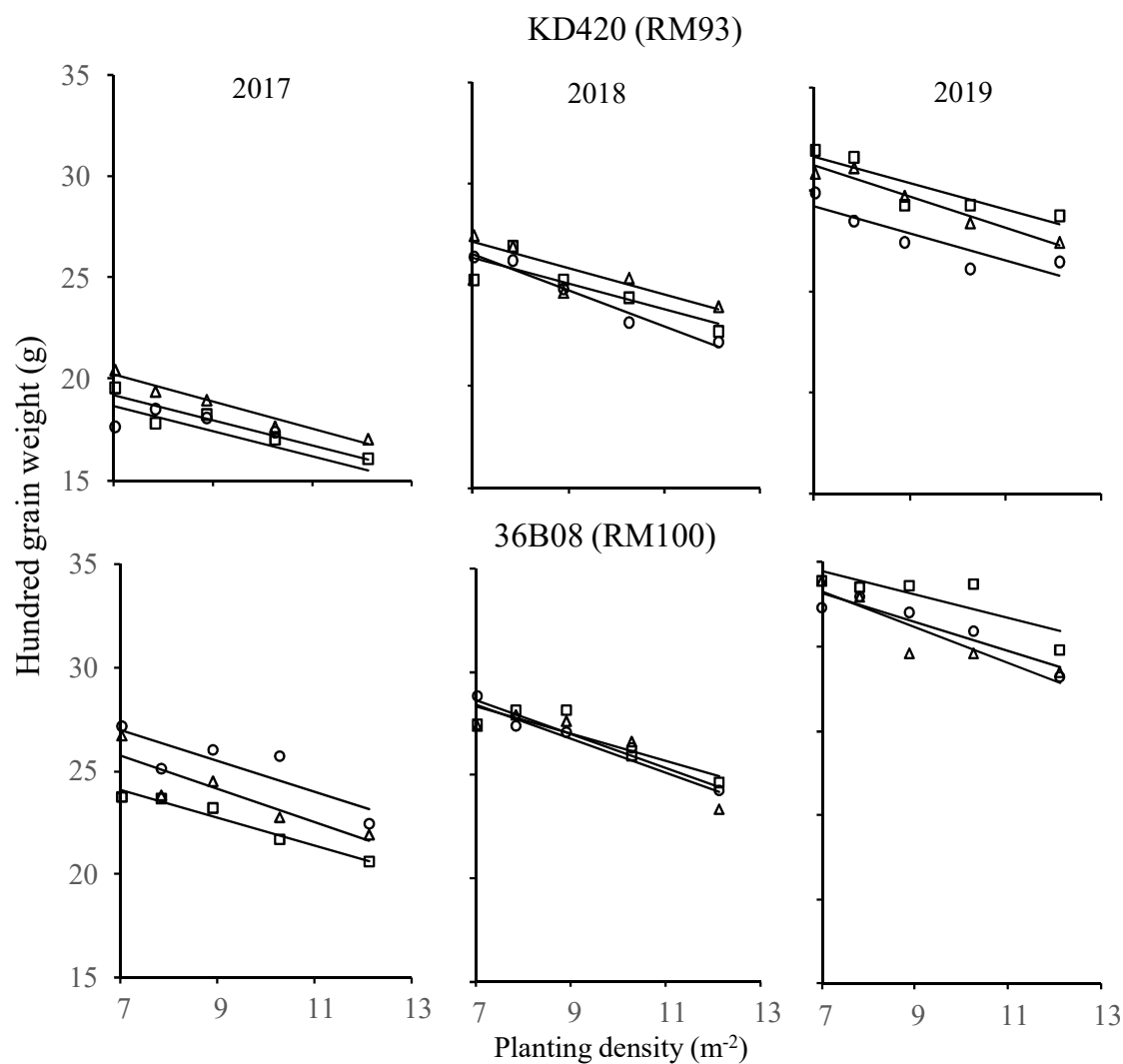


Figure V-20. Responses of hundred grain weight to planting density (Exp.7).

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

KD420 (RM93) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

---shows the significant primary regression equation of hundred grain weight.

Table V-6. The ratio of sparse planting to densest planting in harvest index, and slope of regression of number of grains per ear and hundred grain weight to planting density (KD420 and 36B08, Exp.7).

Year	Cultivar	Planting Pattern	Harvest index (HI(12.1) #/HI(7.0) [‡])	Number of grain per ear	Hundred grain weight	
2017	KD420 (RM93)	CR	98	Y= -12.8 X+ 724 (r= 0.71 ns)	Y= -0.6 X+ 23 (r= 0.84 †)	
		TR	85	Y= -13.6 X+ 742 (r= 0.95 *)	Y= -0.6 X+ 23 (r= 0.93 *)	
		NR	86	Y= -27.3 X+ 871 (r= 0.93 *)	Y= -0.7 X+ 5 (r= 0.98 **)	
	36B08 (RM100)	CR	69	Y= -19.4 X+ 617 (r= 0.90 *)	Y= -0.7 X+ 32 (r= 0.84 †)	
		TR	82	Y= -17.0 X+ 627 (r= 0.89 *)	Y= -0.7 X+ 29 (r= 0.98 **)	
		NR	85	Y= -25.7 X+ 694 (r= 0.97 **)	Y= -0.8 X+ 31 (r= 0.89 *)	
2018	KD420 (RM93)	CR	93	Y= -17 X+ 595 (r= 0.88 †)	Y= -0.9 X+ 33 (r= 0.98 **)	
		TR	96	Y= -14 X+ 585 (r= 0.97 **)	Y= -0.6 X+ 31 (r= 0.85 †)	
		NR	92	Y= -13 X+ 567 (r= 0.93 *)	Y= -0.7 X+ 32 (r= 0.88 *)	
	36B08 (RM100)	CR	90	Y= -10.8 X+ 433 (r= 0.92 *)	Y= -0.8 X+ 34 (r= 0.98 **)	
		TR	94	Y= -7.5 X+ 389 (r= 0.85 †)	Y= -0.7 X+ 33 (r= 0.88 †)	
		NR	90	Y= -13.9 X+ 471 (r= 0.87 †)	Y= -0.8 X+ 34 (r= 0.88 †)	
2019	KD420 (RM93)	CR	94	Y= -21.5 X+ 720 (r= 0.87 †)	Y= -0.7 X+ 34 (r= 0.89 *)	
		TR	97	Y= -19.3 X+ 704 (r= 0.93 *)	Y= -0.7 X+ 36 (r= 0.88 *)	
		NR	95	Y= -14.1 X+ 648 (r= 0.98 **)	Y= -0.8 X+ 36 (r= 0.97 **)	
	36B08 (RM100)	CR	92	Y= -19.3 X+ 621 (r= 0.99 **)	Y= -0.9 X+ 39 (r= 0.93 *)	
		TR	94	Y= -17.0 X+ 588 (r= 0.98 **)	Y= -0.7 X+ 39 (r= 0.82 †)	
		NR	94	Y= -17.1 X+ 585 (r= 0.87 †)	Y= -1.1 X+ 41 (r= 0.91 *)	
Year(Y)			†	**	ns	***
Cultivar(C)			ns	***	ns	**
Planting Patten(P)			†	ns	ns	ns
Y×C			**	ns	ns	ns
Y×P			ns	*	*	ns
P×C			**	ns	ns	ns
Y×C×P			**	ns	ns	ns

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

#, ¥ indicate harvest index in densest (75×11cm) and sparse (75×19cm) planting, respectively.

KD420 (RM93) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

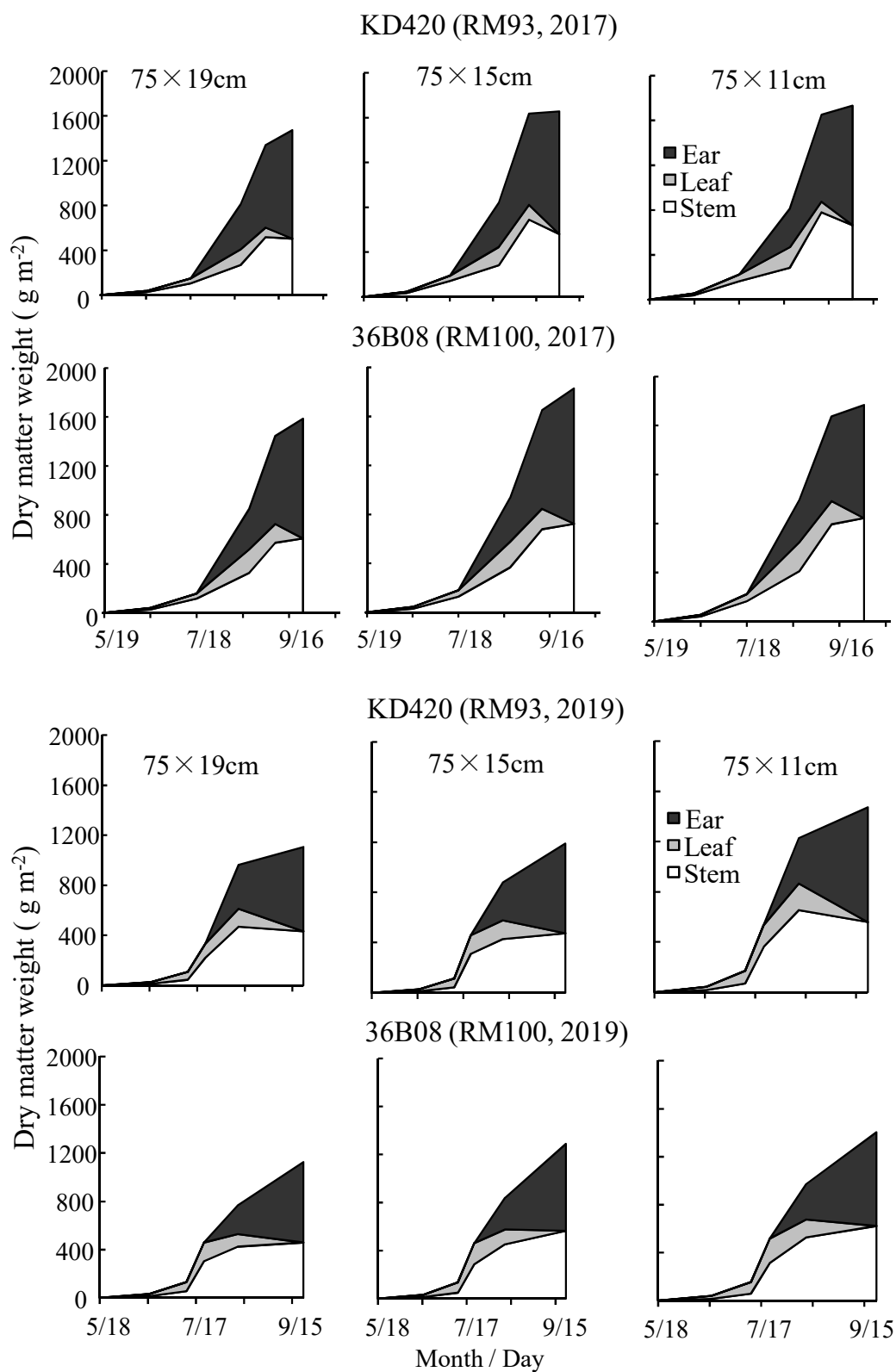


Figure V-21. Changes in partial dry matter weight (Exp.7).

KD420 (RM93) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively. 75 × 19, 15, 11cm indicate row spacing (cm) × hill distance (cm) in sparse, standard, dense planting, respectively.

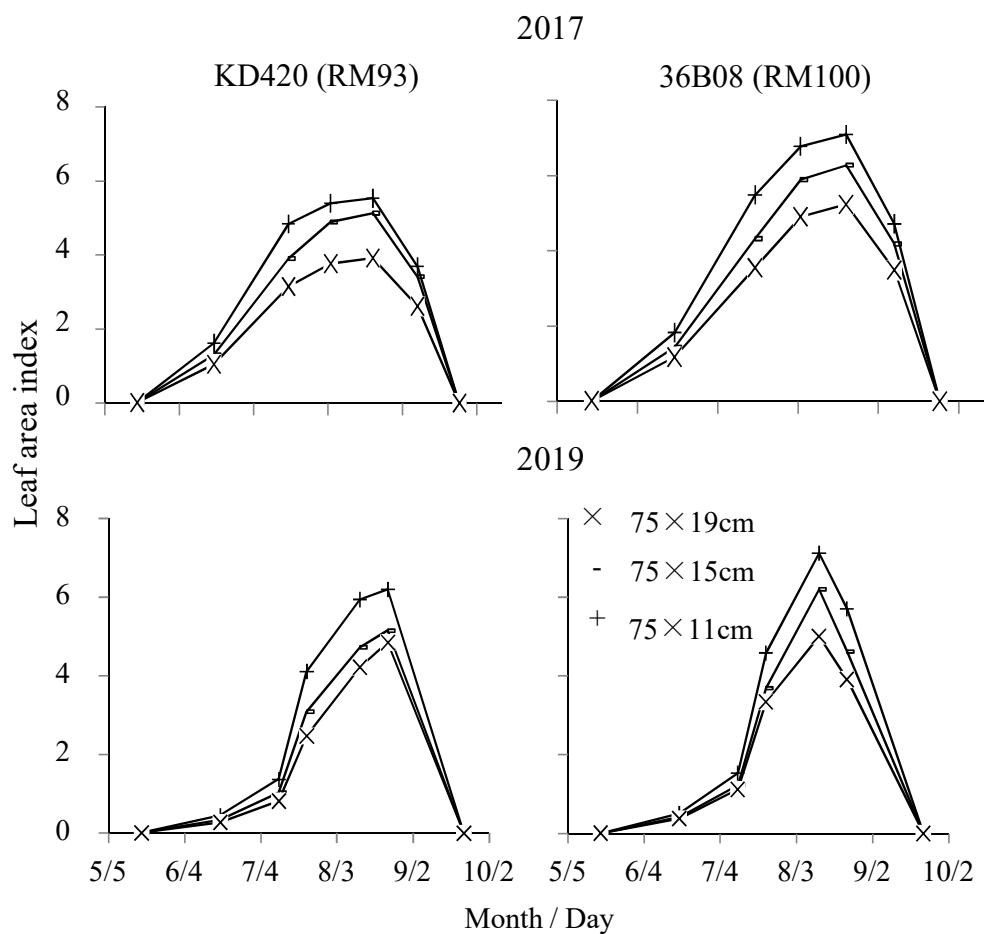


Figure V-22. Leaf area index (Exp.7).

KD420 (RM93) and 36B08 (RM100) show corn cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

75 × 19, 15, 11cm indicate row spacing (cm) × hill distance (cm) in sparse, standard, dense planting, respectively.

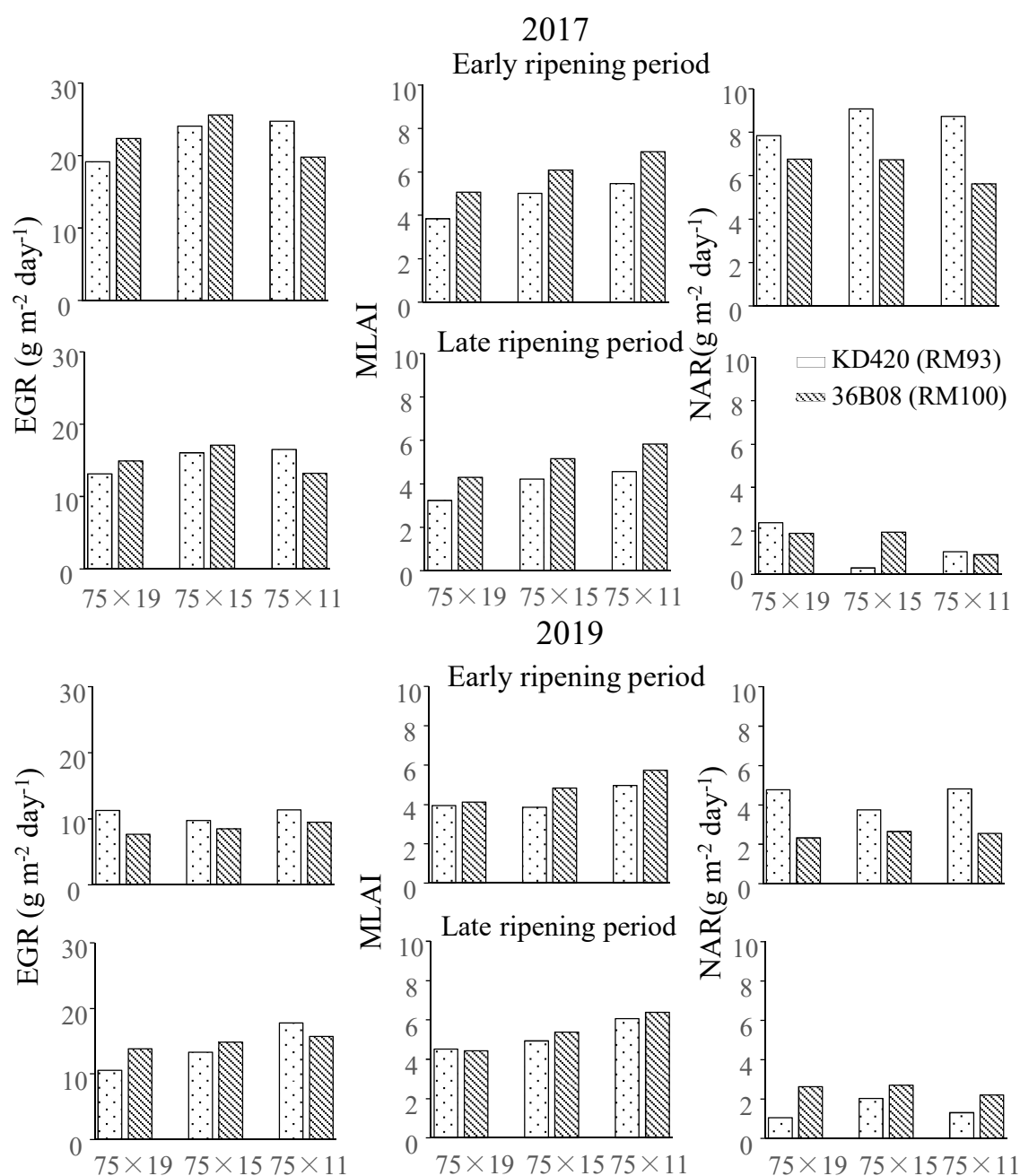


Figure V-23. Ear growth rate (EGR), Mean leaf area index (MLAI) and Net assimilation rate (NAR) during grain filling period (Exp.7).

EGR, MLAI, and NAR indicate Ear Growth Rate, Mean Leaf Area Index, Net Assimilation Rate, respectively.

75×19, 15, 11cm indicate row spacing (cm) × hill distance (cm) in sparse, standard, dense planting, respectively.

KD420 (RM93) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

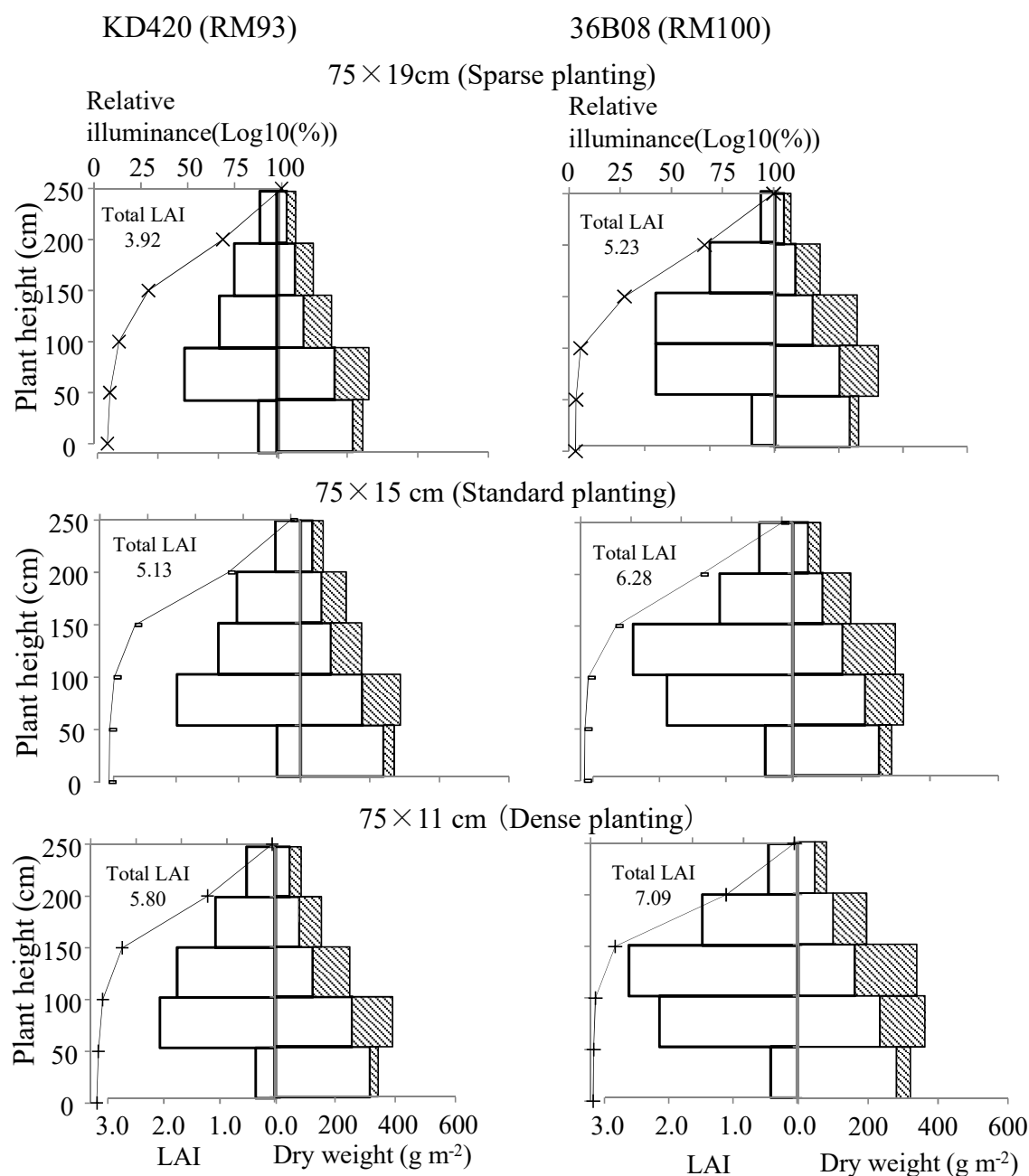


Figure V-24. Canopy structure at early ripening stage (2017, Exp.7).

KD420 (RM93) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

75 × 19, 15, 11 cm indicate row spacing (cm) × hill distance (cm) in sparse, standard, dense planting, respectively.

Total LAI indicate total leaf area index in each plant height.

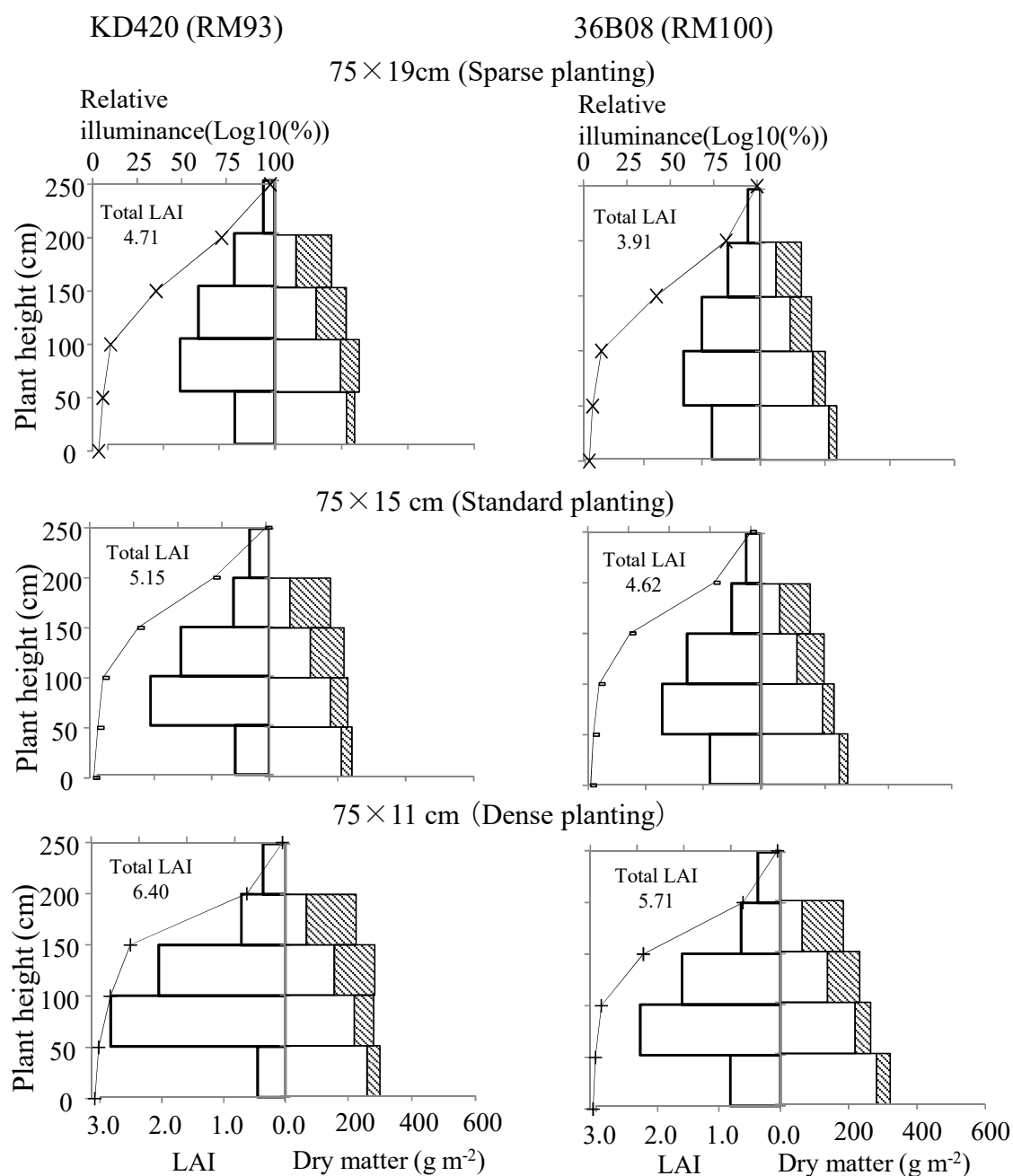
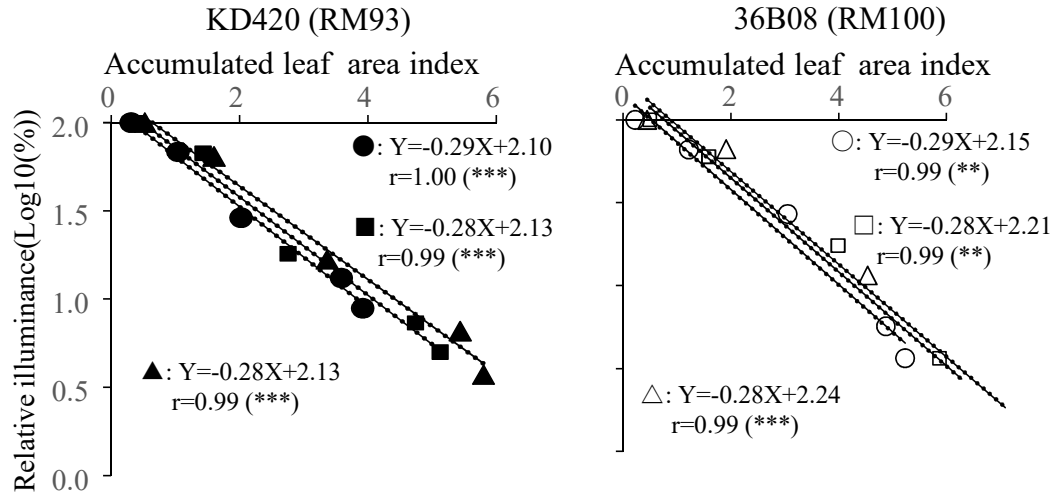


Figure V-25. Canopy structure at early ripening stage (2019, Exp.7).

KD420 (RM93) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively. 75 × 19, 15, 11cm indicate row spacing (cm) × hill distance (cm) in sparse, standard, dense planting, respectively. Total LAI indicate total leaf area index in each plant height.

2017



2019

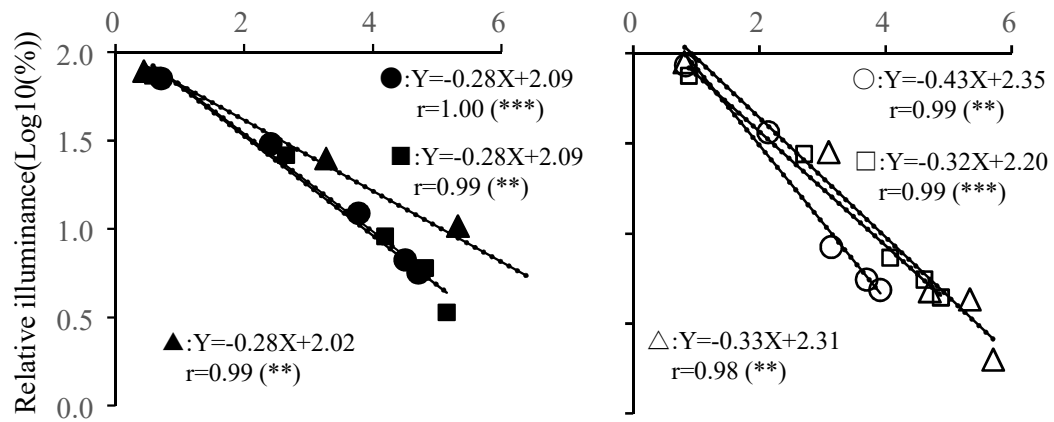


Figure V-26. Relationship between accumulated leaf area index and relative illuminance (2019, Exp.7).

●, ■, ▲ and ○, □, △ indicate 75×19, 15, 11cm in KD420 and 36B08, respectively.

KD420 (RM93) and 36B08 (RM100) show cultivars with relative maturity of 85 days and 100 days, respectively.

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

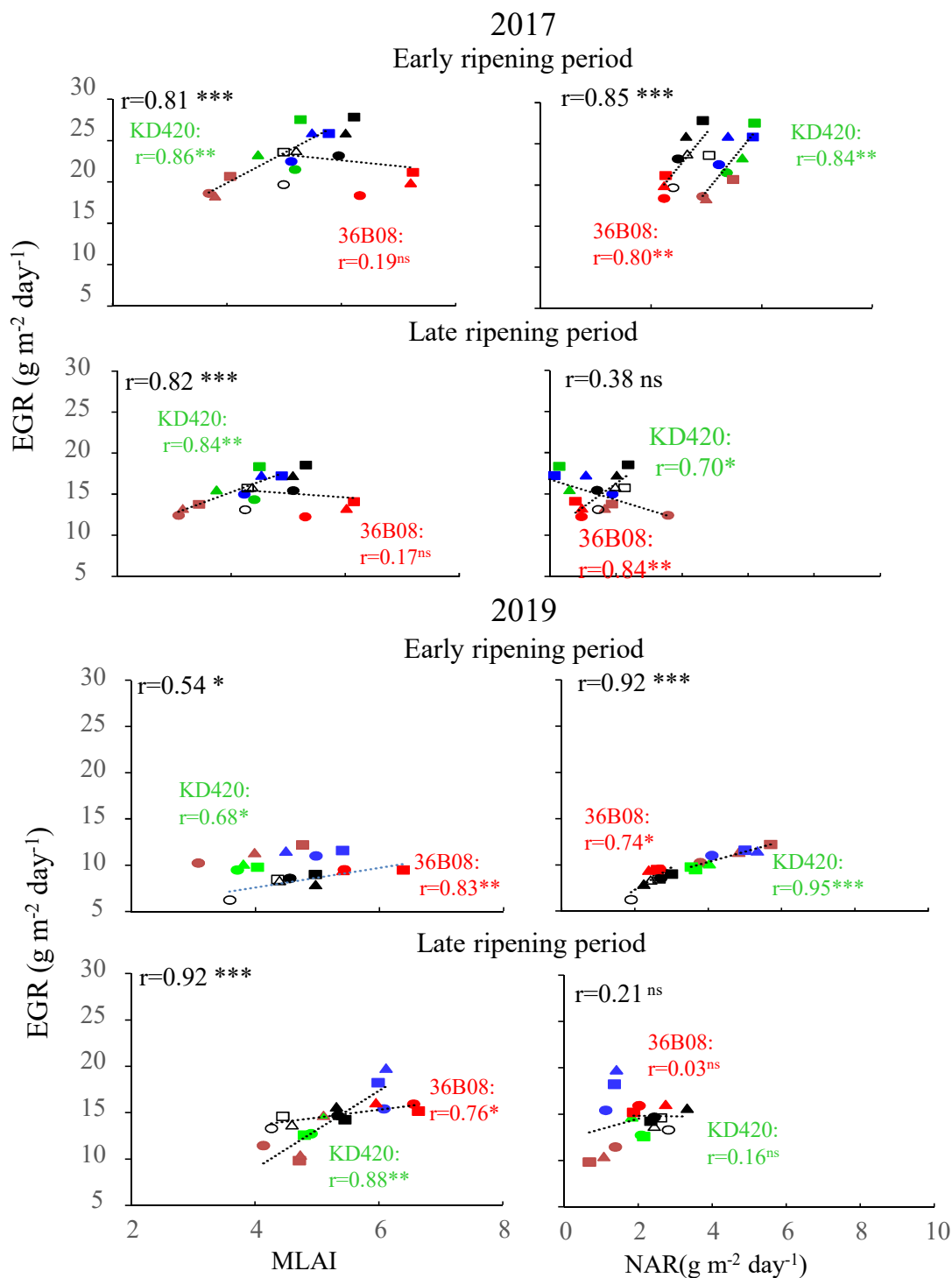


Figure V-27. Relationship between Mean leaf area index (MLAI), Net assimilation rate(NAR) and Ear growth rate (EGR) (Exp.7).

●, ●, ●, ●, ●, ●, ● and ▲, ▲, ▲, ▲, ▲, ▲, ▲ indicate 75×19, 15, 11cm of conventional row (CR), twin row (TR) and narrow row (NR) in P8025, respectively.
○, ●, ●, ●, ●, ●, ● and △, △, △, △, △, △, △ indicate 75×19, 15, 11cm of conventional row (CR), twin row (TR) and narrow row (NR) in 36B08, respectively.

EGR, MLAI, and NAR indicate ear growth rate, mean leaf area index, net assimilation rate, respectively.

Early ripening period and late ripening period indicate silking-milk ripening stage and milk ripening-maturity stage, respectively.

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

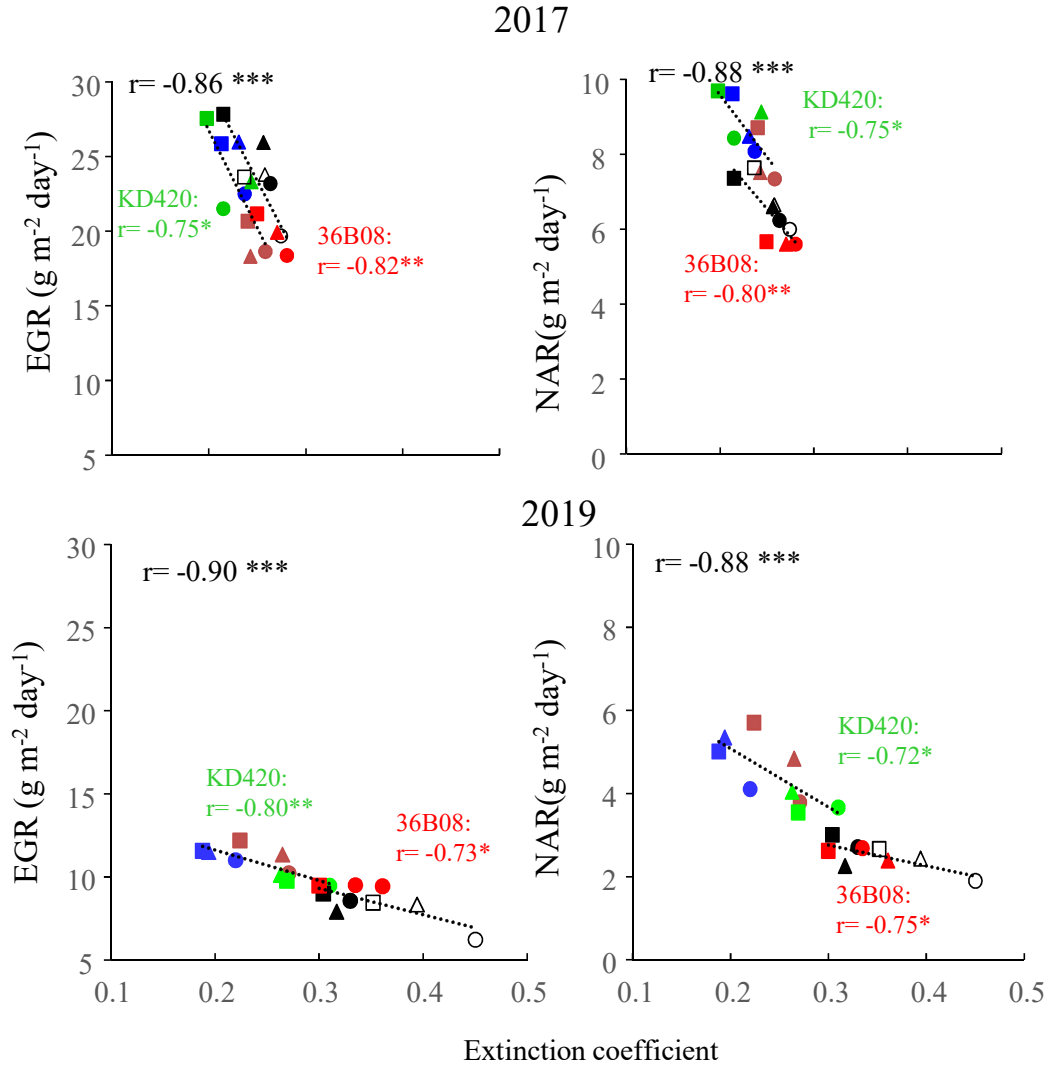


Figure V-28. Relationship between Ear growth rate (EGR), Net assimilation rate (NAR) and Extinction coefficient during early ripening period (Exp.7).

●, ●, ●; ■, ■, ■ and ▲, ▲, ▲ indicate 75 × 19, 15, 11cm of conventional row (CR), twin row (TR) and narrow row (NR) in KD420, respectively.

○, ●, ●; □, ■, ■ and △, ▲, ▲ indicate 75 × 19, 15, 11cm of conventional row (CR), twin row (TR) and narrow row (NR) in 36B08, respectively.

EGR, MLAI, and NAR indicate Ear Growth Rate, Mean Leaf Area Index, Net Assimilation Rate, respectively.

†P < .1, *P < .05, **P < .01, ***P < .001 and NS, P > .1

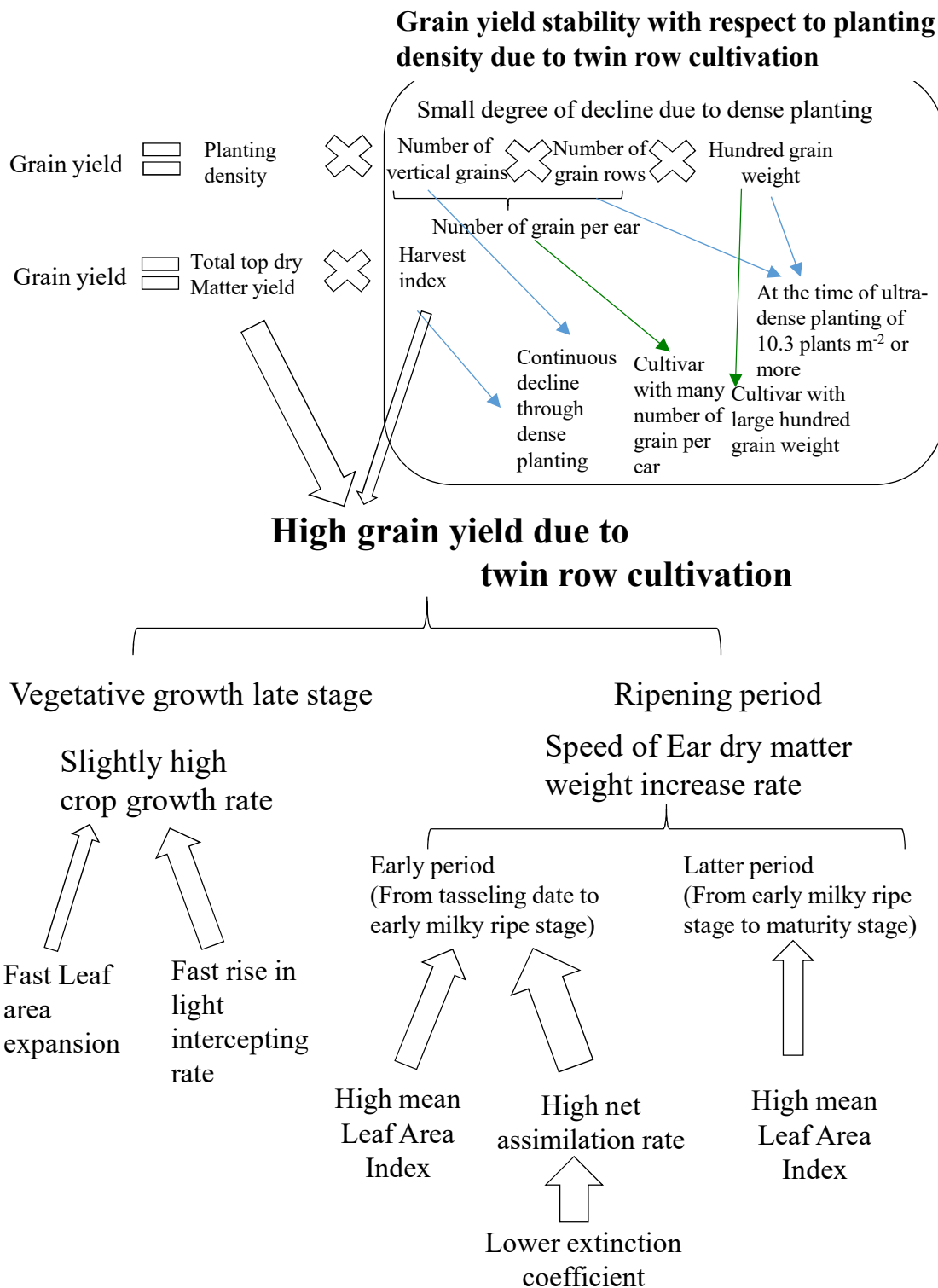
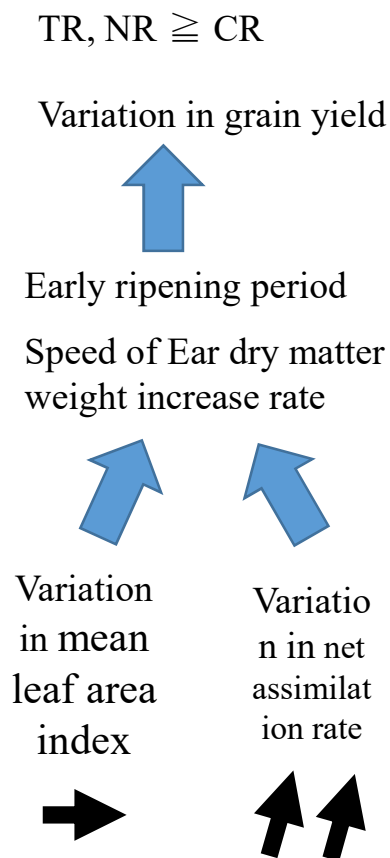


Figure VI-I. Factors for high grain yield in twin row cultivation and high grain yield stability with respect to planting density (Exp.1~7).

① Early sowing



② Late sowing

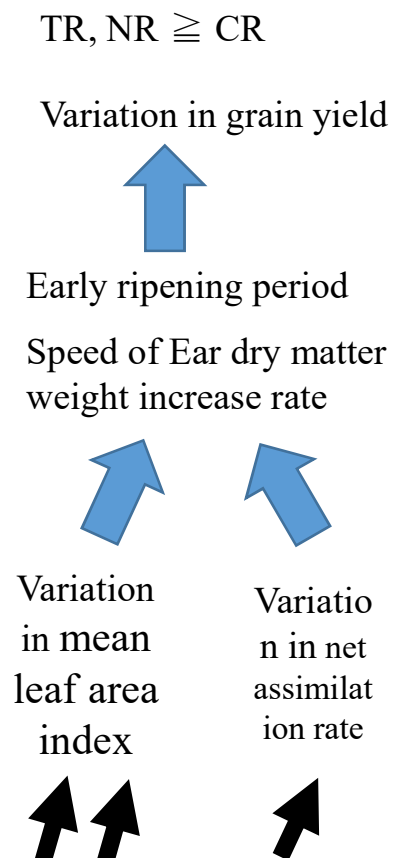


Figure VI-2. Factors for high grain yield of twin row cultivation in sowing date experiment (Exp. 2).

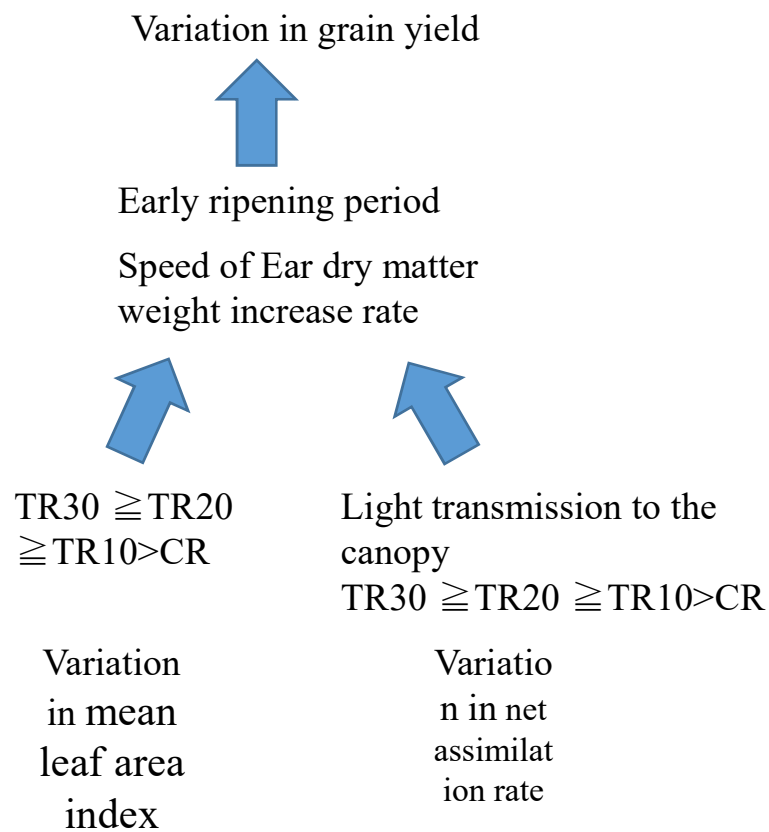


Figure VI-3. Factors for high grain yield of twin row cultivation in distance between plants experiment (Exp. 3).

① Early cultivar

$$TR = NR > CR$$

Variation in grain yield



Early ripening period

Speed of Ear dry matter weight increase rate



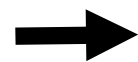
Variation in mean leaf area index



Variation in net assimilation rate



Variation in extinction coefficient



② Middle and late cultivar

$$TR > NR \geq CR$$

Variation in grain yield



Early ripening period

Speed of Ear dry matter weight increase rate



Variation in mean leaf area index



Variation in net assimilation rate



Variation in extinction coefficient



Figure VI-4. Factors for high grain yield of twin row cultivation in early and late cultivars experiment (Exp. 6).

KD420 (cultivars with a high proportion of lower leaves) > 36B08 (cultivars with a high proportion of top leaves)

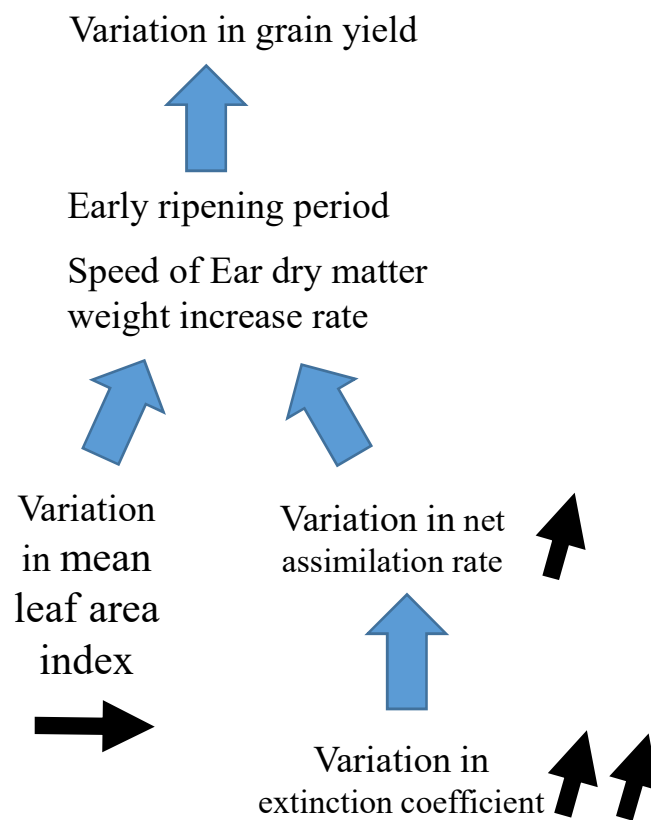


Figure VI-5. Factors for high grain yield of twin row cultivation in different plant type experiment (Exp. 7).

6/18



6/24

Sparse planting (75×19 cm)



Figure VI-6. Plant canopy of sparse planting at late vegetative stage in 2019
(36B08, Exp. 6, 7).

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

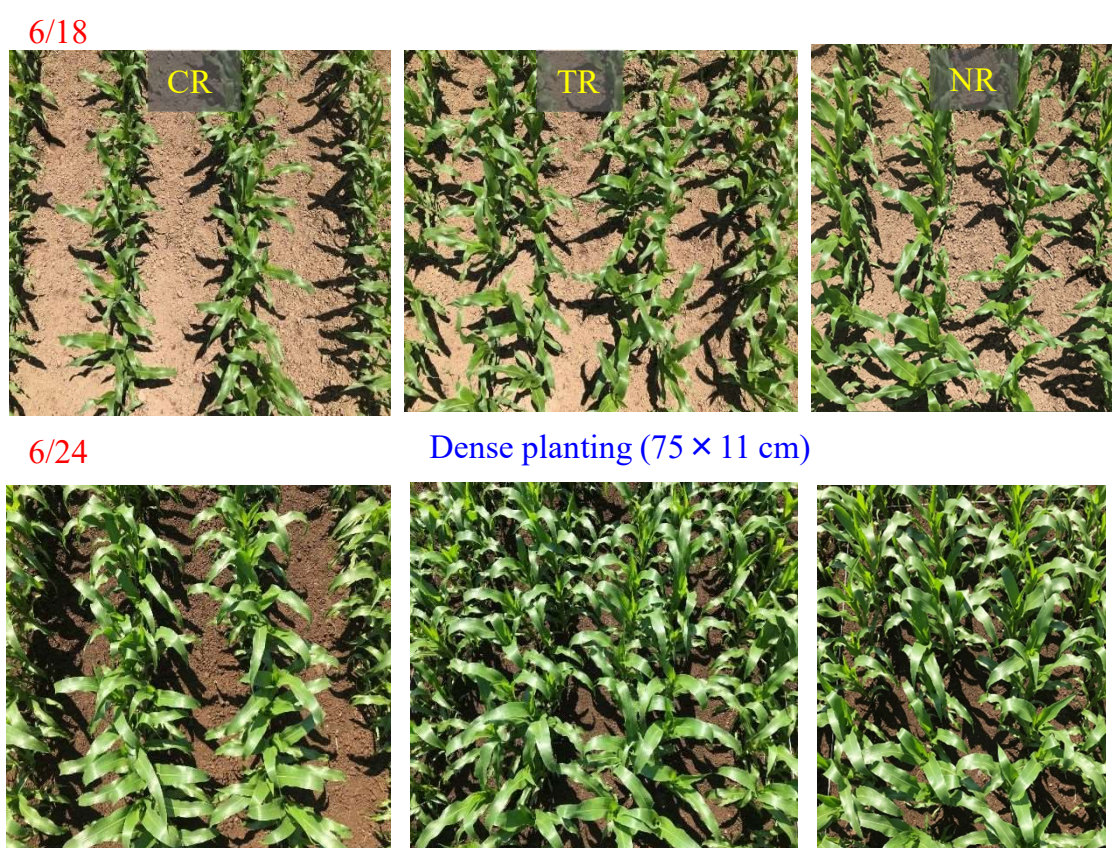


Figure VI-7. Plant canopy of dense planting at late vegetative stage in 2019
(36B08, Exp. 6, 7).

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

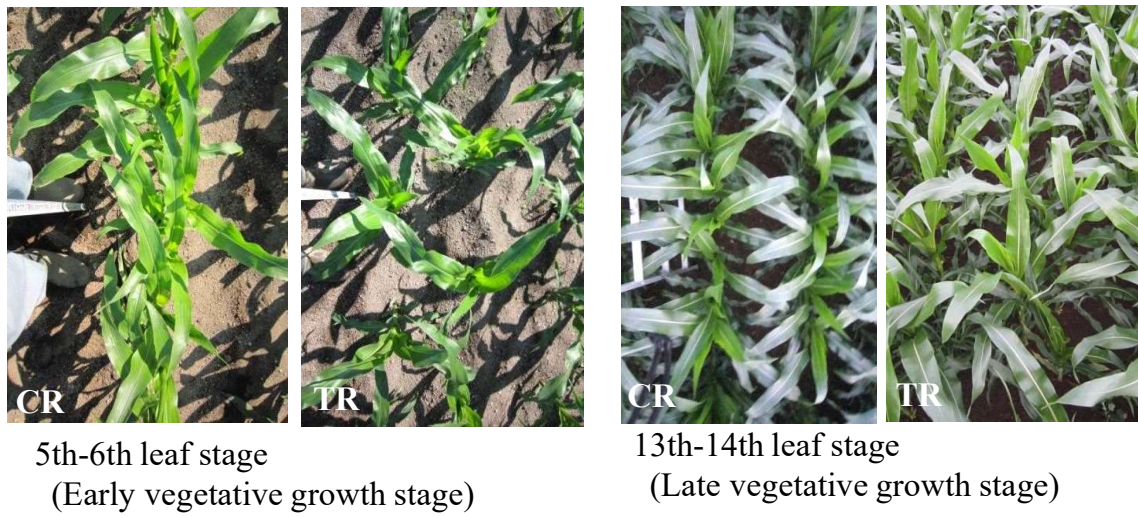


Figure VI-8. Plant shape from the top of maize canopy (36B08, 2013, Exp. 3).

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

Table VI-1. Recommend conditions for applying twin row cultivation (Exp. 2, 3, 4, 5, 6, 7).

No.	High grain yield cultivar and field	Comparison with narrow row cultivation	High yield factor of twin row cultivation			
			Vegetative growth late stage		Early ripening period	
			Mean leaf area index	Light intercepting rate	Mean leaf area index	Net assimilation rate
1.	Early cultivar (less than RM93 days)	○ Sparse planting part:	○	○	○	△
		○ Optimum planting density:	△	△	△	△
		○ Dense planting:	△	○	△	○
2.	Middle and late cultivar (more than RM100 days)	○ All planting densities:	△	○	△	◎
3.	Cultivar with poor light reception	○ All planting densities:	△	○	△	◎
4.	Late sowing	○ Early sowing:	△	△	○	△
		○ Late sowing:	○	○	○	△
5.	Easy to get uneven planting density	○ Sparse planting part	○	△	○	△
		○ Dense planting part	△	○	△	○
6.	Cultivar and field that easy to lodging	○ Lodging resistance cultivar	Pulling resistance value		Ear height	
		Sparse planting part:	slightly higher		slightly lower	
		○ Easy lodging cultivar	excellent		higher	
		Dense planting part:			lower	

◎, ○, and △ indicate that twin row cultivation is significantly superior to narrow row cultivation, slightly superior, and the difference is unclear, respectively.

Table VI-2. Combination of cultivars and cultivation conditions that are most likely to achieve stable and high yield in maize (Exp. 2, 3, 4, 5, 6, 7).

Cultivar characteristics and cultivation conditions				
Cultivar	Earliness	RM85	↔	RM110
		Early cultivar	Middle and late cultivar	Late cultivar
Plant type		Cultivars with a high proportion of top leaves		
		Cultivars with a high proportion of lower leaves		
Cultivation conditions				
Planting density (plants m ⁻²)		Sparse planting	↔	Dense planting
		7.0	10.0	13.0
Planting pattern		CR	NR	TR NTR
Distance between plants (cm)		0		
		10, 20, 30		
Nitrogen topdressing		Non-nitrogen topdressing		
		Nitrogen topdressing		

CR, TR, NR and NTR indicate conventional row, twin row, narrow row and narrow twin row planting cultivation, respectively. Red letter indicate the combination are most likely to achieve stable high grain yield. RM85 and RM110 indicate the relative maturity of 85 days and 110 days, respectively.