

2015 年度

博士論文

ダイズの栽植密度に対する分枝可塑性の評価法と、
その品種間差異に関連した作物学的要因に関する
研究

Method for evaluating and agronomic factors related to varietal
differences in soybean branching plasticity in response to
planting density

学籍番号 21133004 阿古達木(Agudamu)

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. ダイズ単収の日米格差と，栽植様式との関連性に関する仮説 1
2. 日米におけるダイズ栽培の栽植様式と栽植密度反応に関する既往の研究 2
3. 他の畑作物と比較した場合のダイズの栽植密度反応の特徴 5
4. 分枝可塑性の定義とその農業的意義，および既往研究 7
5. 分枝可塑性に関する簡易評価の必要性 10
6. 分枝可塑性の評価とその関連要因に関する解析の手順 10

第 II 章 材料および方法

1. 栽植密度反応における日米品種間差異(試験 1) 13
 - (1) 供試品種 13
 - (2) 栽培方法 14
 - (3) 調査方法 15
 - 1) 生育ステージ 15
 - 2) 収量調査および倒伏程度 15
 - (4) 気象概要 17
2. 分枝可塑性の評価法(試験 2) 17
 - (1) 供試品種 17
 - (2) 栽培方法 18

(3) 調査方法	18
(4) 分枝可塑性値の計算方法	19
(5) 気象概要	19
3. 年次間差異からみた分枝可塑性値の安定性(試験 3)	20
(1) 供試品種と栽培方法	20
(2) 分枝可塑性値の計算方法	21
(3) 気象概要	21
4. 分枝可塑性の簡易評価法(試験 4)	22
(1) 供試品種	22
(2) 栽培方法	22
(3) 調査方法	23
1) 株間段階畦における分枝可塑性値の推定	23
2) 適合性の検定手順	24
5. 茎伸育性が分枝可塑性に及ぼす影響(試験 5)	24
(1) 供試品種と栽培方法	24
(2) 分枝可塑性値の計算方法	24
6. 分枝伸長過程と受光態勢からみた, 分枝可塑性における品種間差異の要因解析(試験 6)	25
(1) 供試品種	25
(2) 栽培方法	25

(3) 調査方法	26
1) 層別刈り	26
2) 相対光強度および収量調査	26
(4) 子実収量・収量構成要素の分散分析，および分枝可塑性の評価方法	27
(5) 気象概要	27
第Ⅲ章 栽植密度反応における日米品種間差異	
1. 生育ステージ，子実収量および収量関連形質	29
2. 栽植密度反応	30
3. 考 察	32
第Ⅳ章 分枝可塑性の評価法	
1. 生育ステージ，子実収量および収量関連形質	34
2. 栽植密度反応	36
3. 圃場分枝可塑性の品種比較	38
4. 分枝可塑性値と早晚性の関係	38
5. 考 察	39
第Ⅴ章 年次間差異からみた分枝可塑性値の安定性	
1. 分枝可塑性の年次間差	43
2. 考 察	45

第VI章 分枝可塑性の簡易評価法

1. 子実肥大開始期(R5)における簡易傾斜畦による分枝可塑性の推定	48
(1) 品種間差異	48
(2) 簡易評価畦による推定値と、圃場分枝可塑性値との関係	48
(3) 節位別分枝長による推定値と、圃場分枝可塑性値との関係	49
2. 成熟期(R8)における簡易傾斜畦による分枝可塑性の推定	49
(1) 品種間差異	49
(2) 簡易評価畦による推定値と、圃場分枝可塑性値との関係	50
(3) 節位別分枝長による推定値と、圃場分枝可塑性値との関係	51
3. 考 察	52

第VII章 分枝可塑性の品種間差異を生じさせる作物学的要因

1. 茎伸育性および早晚性と、分枝可塑性の関係	55
(1) 生育ステージ	55
(2) 子実収量および収量関連形質	56
(3) 栽植密度反応	57
(4) 分枝可塑性値と早晚性、および茎伸育性との関係	59
(5) 考 察	60
2. 分枝伸長過程と受光態勢からみた、分枝可塑性における茎伸育性 間差異の要因解析	61

(1) 生育ステージおよび収量関連形質	61
(2) 栽植密度反応と分枝可塑性値	62
(3) 分枝伸長過程	64
(4) 受光態勢	66
(5) 受光態勢および分枝伸長過程との関係	68
(6) 考 察	68

第Ⅷ章 総合論議

1. 分枝可塑性における品種間差異の存在と遺伝的特性との関連	74
2. 分枝可塑性の簡易評価のさらなる改良	76
3. 群落光環境からみた分枝可塑性の品種間差異が生じる要因と、 その他考えられる未解明な要因	78
4. 分枝可塑性改良育種における今後の展望	79
5. 分枝可塑性の収量安定性への貢献度の実証の必要性、目指す べき分枝可塑性程度	80

要約	82
-----------	----

謝辞	88
-----------	----

引用文献	89
-------------	----

英文要約	103
-------------	-----

図表	112
-----------	-----

第 I 章 緒 言

1. ダイズ単収の日米格差と、栽植様式との関連性に関する仮説

ダイズは、古くからタンパクや脂肪の供給源として食生活、食文化を支える不可欠な作物である。しかし、日本の生産量は 25 万 t と世界全体の 0.1%で推移しており、消費量 400 万 t のうち 90%以上を米国から輸入している(農林水産省 2014)。日本のダイズ生産が伸び悩む 1 つの要因として、単収の低迷があげられる。Fig. I -1 に示すように、1950 年以降、日本ダイズ単収はほとんど向上がみられず、全国平均 1.7t ha^{-1} に過ぎないのに対して、米国のダイズ品種の平均収量は、過去 50 年間増加し続けており、北部産地においては 3.0t ha^{-1} を越え、ダイズ単収の日米格差は拡大の一途をたどっている (桂ら 2009, USDA-ARS 1997)。

このダイズ単収の日米格差の要因は Katsura ら(2011)によれば、主としてダイズの生育期間の日射量の差異であり、収量ポテンシャルの大きさとそれに対応した狭畦栽培の普及も関与している。他の要因についても現在も解析が続けられているが、その関与形質の詳細は明らかにされていない。

近年、米国品種のガス交換能が日本品種に比べて優れていることが示されている(Tanaka et al. 2010)。さらに、米国品種は日本品種に

比べて、地上部乾物重が大きいにもかかわらず、倒伏が少ない傾向にある(義平ら 2009)。米国品種の安定的な高収量は、狭畦栽培により群落が過密になっても高いガス交換能を維持でき、倒伏の発生が軽微であることに支えられていると推察される。このような群落の粗密に対する反応性における日米品種間の差異が、近年の単収格差の拡大にかかわっていると予想される。

日米両国の栽植様式を比較すると、米国のダイズ北部産地では畦幅 40cm 程度の米国のダイズ北部産地では畦幅 40cm 程度の 20 本 m^{-2} 以上、多くは 24~25 本 m^{-2} 以上の狭畦密植栽培が普及している(白岩ら 2011)のに対して、日本の標準的な栽植様式は北海道では畦幅 60cm、株間 20cm の 2 本立て 16.7 本 m^{-2} (砂田 1986)、西日本では畦幅 70cm、株間 15cm の 1 本立て 9.5 本 m^{-2} (内川ら 2004)であり、米国品種の栽植密度が 1.5~2.5 倍程度高い。この栽植密度の差異がダイズ単収の日米格差の拡大になんらかの形で関与していると思われる。

2. 日米におけるダイズ栽培の栽植様式と栽植密度反応に関する既往の研究

日本のダイズ品種において、密植による面積当りの分枝数の増加にともない総節数、莢数が増加し、子実収量が向上するという数多くの報告がある(中世古・後藤 1981, Miura and Gemma 1986, 池田

2000). また、これらの密植栽培も、(Miura et al. 1987)によれば、株間を短くするより、畦幅を短縮する方が個体当たり収量の減少程度が少なく、増収効果がある。また、鴻坂ら(1995)によれば、納豆用の小粒品種では標準栽植密度 16.7 本 m^{-2} に対して 2 倍の密植 33 本 m^{-2} までは増収するが、3 倍の 50 本 m^{-2} 以上では減収する。

一方、佐藤ら(2008)は、品種リュウホウを用いて播種期と栽植密度の関係を指摘し、標準播種区より生育量の少なくなる晩播区において密植による増収効果が高く、粒大分布が安定するとしている。さらに、国分(1988)によれば、これらの密植による増収効果を安定的に発揮するには、変動の多い分枝収量に頼らず、栽植本数の増加が直接、増収に結びつき、栄養生長と生殖生長の競合も少ない傾向にある主茎型品種の導入が有効である。

これらの密植による増収効果を収量成立過程から詳細に検討した例としては、黒田ら(1992)によると、タマホマレとタチスズナリにおける密植にともなう増収は、主茎と分枝順位の低い花房の着莢数の増加によりもたらされる。齋藤ら(2007)によれば、エンレイにおける密植による増収には群落上層に葉面積が多く分布しても吸光係数が小さく、良好な受光態勢を維持できることが関与する。古畑ら(2008)は、サチュタカにおける増収は登熟前の受光態勢の向上と最大期の葉面積指数 4.4~5.0 と高く維持されることが関係するとして

いる。これら密植栽培の有利性が明らかにされ、近年、一部産地において狭畦密植栽培が普及しつつある(窪田ら 2005, 松永ら 2003, 藤田ら 2015)。

しかし、狭畦密植栽培においては群落が過密になったことによる倒伏や枝折などが以前より問題となっている(紙谷 1980)。また、藤田ら(2015)によれば、狭畦密植栽培により群落の受光率の上昇が早く、雑草との競合に関して有利になり、除草作業が軽減された一方、収量の向上はみられない。また、25本 m^{-2} 以上の過度な密植は結莢率、一莢粒数を低下させ、かえって減収し(中野ら 2004)、その場合は長方形植えよりも正方形植えの方が、下位節の結莢率が増加して、減収を防止できる(中野ら 2001)。さらに、耐倒伏性に劣る品種が主要品種となっている産地(高橋 2011)や、排水対策が十分にとれない多雨産地の圃場では、依然として、深い培土し高畦にする必要があるために(大久保 1980)、狭畦栽培の普及率が低い(浜口 2011)。

一方、米国品種においても栽植密度反応に関する多くの報告が古くからみられる。Wilcox(1977)によれば、ダイズを放射状に25本 m^{-2} 以上に密植しても、それにともない地上部乾物重が増加する一方で、収穫指数に大幅な低下はみられないため、子実収量が増加する。30本 m^{-2} 程度以上の高密度条件では、収量の増加はみられず、ほぼ一定に達する(Duncan 1986)が、収量と収穫指数が他の要因に

より不安定になり，変動しやすくなる (Spaeth et al 1984, Donald 1963). Cooper(1971a, 1971b)によれば，高密度条件下の収量，収穫指数の不安定さには倒伏や枝折れの多発が関与する．さらに，Board et al.(1990a, 1990b)は，晩播する場合ほど狭畦栽培が重要であり，晩播狭畦栽培による増収は，分枝収量および分枝の収量構成要素の密度反応が高い場合にもたらされる．また，Coastら(1987)によれば，北部産地では，同じ栽植密度でも，株間を狭めるよりも狭畦栽培による増収効果が，特に早生品種において高い．これらの報告は，米国における栽植密度 20～25 本 m^{-2} で畦幅 40～50cm の狭畦栽培の普及の基礎 (Heatherly and Elmore 2004) となっていると考えられる．

以上のように日米両国ともに，ダイズの栽植密度反応に関する多くの報告がなされているが，栽植密度反応の主たる要因である分枝の変化程度(後述の分枝可塑性)に着目し，それを数値化して，品種特性としようとした研究はほとんどみられない．

3. 他の畑作物と比較した場合のダイズの栽植密度反応の特徴

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．寒地・寒冷地(北日本)の事例を中心に，主要畑作物のトウモロコシ，コムギ，ダイズの間で，その栽植密度反応の特徴を比較してみる．

サイレージ用トウモロコシにおいては、品種の早晚性は相対熟度 (Relative maturity) で区分され、極早生 (RM73) から極晩生品種 (RM130) までが存在し(佐藤ら 2010)、北日本で主要な早生、中生品種 (RM85, 100) の栽植密度は、1980 年代までは 6,500~7,500 本/10a とされてきた(岩田 1973)。近年、直立葉型、極早生品種 (RM75) の開発、狭畦、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)、早生品種 (RM85)、中生品種 (RM100) それぞれ 10,000~12,000, 9,000~10,000, 8,000~9,000 本/10a が適正栽植密度として推奨され(林ら 2006, 義平 2015)、従来よりも多収をねらった密植栽培が普及しつつある。このように、トウモロコシでは品種の早晚性と適正栽植密度の関係は明らかであるのに対して、同じ相対熟度の品種で比較し、その栽植密度反応の品種間差異があるという報告は、新旧品種で比べた場合を除いて、ほとんどみられない。これは、ダイズ、コムギに比べて、トウモロコシ、特にデントコーンにおいて分けつの発生が非常に少なく、栽植密度に対する可塑性の低さが反映している結果であると思われる。

コムギにおいても、1980 年代以降にドリル播種機が普及して以降、播種量は、品種を問わず春播コムギは 340 粒 m^{-2} 、秋播コムギは 250 粒 m^{-2} が基準(吉村 2011)とされ、天候や他の作物の管理作業のために、どうしても晩播になった場合には、減収防止技術として播種量

が多くすることが推奨されている(鈴木ら 1998). 近年, 育成された秋播コムギ品種きたほなみは分けつ能力が高いために, 従来の6割程度の150粒 m^{-2} で良いとする報告(中村ら 2011)以外に品種による栽植密度反応の差異が議論されることは少ない.

これに対して, ダイズにおいては栽植密度反応に品種間差異が存在するという多数の報告があり(Cooper 1971a, Wilcox 1977, 国分・朝日 1985, Johnson and Harris 1967), その品種間差異の主たる要因は分枝の栽植密度反応である(中世古・後藤 1981, 義平ら 2010)とされている.

ダイズの祖先はツルマメで, 森林の中で樹木に巻き付いて, 野生植物として生息してきたとされ(前田 1987), トウモロコシやコムギに比べて分枝の調整能力を通して, 植物群落の粗密に関する鋭敏な反応を持つと考えられる. そのため, ダイズの分枝特性を従来の静的な分枝形質のみにとどまらず, 栽植密度反応の程度(後述の分枝可塑性)を動的に捉え, 品種特性として把握することは, 多収を実現しやすい栽培条件や, 後述するさまざまな要因で植物群落の粗密が生じやすい場合の品種の収量補償能力の利用のうえで重要であると考えられる.

4. 分枝可塑性の定義とその農業的意義, および既往研究

筆者らは, 第IV章において栽植密度による子実収量の変化が少な

い性質，すなわち栽植密度による分枝収量の変化が大きく，疎植による主茎収量の低下を分枝収量の増加により補う一方，密植時では分枝の伸育を調整あるいは抑制し，安定した収量を保つ密度反応を示す性質をダイズの分枝可塑性として定義した．

この分枝可塑性を高めることは，以下のようなダイズの収量安定性における以下のようなメリットがあると考えられる．第一に，欠株による減収程度の低減が予想される．アズキにおいては，欠株の周辺個体が標準個体に比べて 121%の収量を示し，欠株による収量減を補償することが知られている(原 1986)．ダイズにおいても，分枝可塑性が高い品種は，この収量補償率が高い可能性を持つと考えられる．

第二に播種時期の変動による収量の不安定化の低減があげられる．西南暖地においては，ダイズの播種時期が梅雨時期と重なるために，予定していた時期に播種できない場合が多い(西山ら 1987a)．播種期の遅延は，ダイズの分枝の伸長を抑制して株当りの節数を減少させ，収量が減じる場合が多い(西山ら 1987b，大庭 1980，中村・横尾 1986)．しかし，分枝可塑性のある品種を用いると，栄養生長期間の短縮など分枝の伸長が抑制される条件であっても，可塑性が発揮され，播種時期の差による収量の変動が少ないことが予想される．

さらに第三には，湿害対策で高い培土が必要のために広い畦幅を

とらなくてはいけない場合の減収程度の低さが考えられる。すなわち、培土ため、畦幅を 80cm 以上とらなくてはいけない場合、標準栽培と比較した時の減収率の低減も予想される。

第四に、北日本では、しばしば栄養生長初期の低温に遭遇し生育不良冷害に見舞われることがあり、分枝の抑制による節数不足のため、減収する(砂田 1986)。このような場合であっても、分枝可塑性の高い品種は、分枝伸長期間が長く、最盛期の伸長速度が高い特性を持つ(阿古達木ら 2015)ため、気温回復後、分枝が旺盛に伸長し、節数不足をある程度補える可能性を持つ。

第五に、近年ダイズの低農薬栽培の試みがなされ、除草剤に使用回数の低減から雑草との競合に強いダイズ品種が、すなわち、葉面積展開速度が高く、受光率の上昇が早く、高く維持される品種が求められている(Kurokawa et al. 2015, Norsworthy 2004)。分枝可塑性の高い品種は、畦方向への分枝発達が旺盛に行われるために、群落の粗密にかかわらず高い雑草との競争力を示すことが予想される。

また、農家経営的な側面としては、種子代の低減が考えられる。近年米国において、遺伝子導入品種による密植栽培が盛んに行われているが、その遺伝子導入技術への依存に比例して種子の単価が高騰している (Chen and Wiatrak 2011)。栽植本数を最小限にし種子コストを減らすことは、農家にとって最も利益的な経営戦略方法の 1

つでもあり，疎植適応性の向上は，ダイズ品種の重要な育種目標の1つとなっている(Rigsby and Board 2003).

分枝可塑性という概念を用いた既往の研究は，主として樹木においてみられ，主茎に対する分枝発生角度，分枝長など形態反応(Smith and Jordan 1994, Steingraeber 1982)，その樹種間差異(Bisht et al. 1993)，耐陰性(Banez et al. 1999)との関係が検討されている．しかし，ダイズの分枝可塑性に着目して，子実収量との関係を検討した報告はほとんどみられない．

5. 分枝可塑性に関する簡易評価の必要性

この分枝可塑性を育種目標としてダイズの遺伝的改良へと結びつけるためには，多くのダイズ品種・系統の分枝可塑性を評価する必要がある．しかし，分枝可塑性の評価のためには，最低3水準以上の栽植密度処理区を最低3反復で配置し，栽植密度試験を実施しなければならず，膨大な労力と時間を要し，多くの品種を供試するのは非常に困難である．そこで，省力的に多数の品種の分枝可塑性を簡易的に検定する方法を確立することが不可欠となる．

6. 分枝可塑性の評価とその関連要因に関する解析の手順

本研究は，6つの圃場試験(Table II -1)を実施し，以下のことを検討した．第一にダイズの遺伝資源を栽植密度に対する収量安定性に関わる分枝反応，すなわち分枝可塑性という新しい概念から，その

品種間差異を明らかにした。第二にこの品種間差異と密接に関わる遺伝的および作物学的要因の一部を検討した。第三に将来の分枝可塑性に関する育種に結びつけるための簡易評価の一部を検討したものである。

まず、第Ⅲ章において日米品種の子実収量の格差に関わると思われる栽植密度に対する収量の安定性の差異を明らかにし、これと分枝の栽植密度反応の大きさの関係について検討した。次に、この第Ⅳ章において分枝の栽植密度反応の大きさを分枝可塑性と定義し、この程度を評価する方法を見出そうとした。第Ⅴ章において分枝可塑性にどの程度の年次変動があり、それがどの気象要因によって強く影響されているか明らかにしようとした。

さらに、第Ⅵ章において、多くの品種の分枝可塑性を調査し、将来の遺伝的改良に結びつけるために必要な簡易評価法を開発しようとした。また、第Ⅶ章において分枝可塑性に関連した遺伝的特性と、その作物学的要因の一部を群落の光環境から検討した。

第Ⅱ章 材料および方法

緒論で述べた分枝可塑性の評価とその関連要因に関する解析を順序立てて進めるため、Table II -1 に示した 6 つの圃場試験を酪農学園大学実験圃場 (江別市文京台緑町) で 2009～2013 年の 5 ヶ年にわたり実施した。2012 年についてのみ、北海道農業研究センター札幌拠点(札幌市豊平区羊ヶ丘)でも同時に試験をおこなった。

試験 1 では、2009、2010 年にそれぞれ日米各 1, 2 品種を用いた 5 水準の栽植密度試験を実施し、日米品種の栽植密度反応の違いを明らかにした。試験 2 では、2011、2012 年にそれぞれ日米各 3, 2 品種を用いた栽植密度試験を実施し、分枝可塑性の程度を評価する方法(分枝可塑性値)を考案した。さらに、試験 3 では 2012、2013 両年に有限伸育型、無限伸育型の主要 1 品種の栽植密度試験をおこなった。以上、試験 1, 2, 3 の 5 ヶ年計 6 圃場における気象要因と分枝可塑性値の関係を検討し、最も安定した分枝可塑性値となる分枝形質を提示しようとした。

次に、試験 4 として多品種の分枝可塑性値を調査し、将来の育種をつなげるために、同一畦内の株間を段階的に変化させた栽植密度試験を 2013 年に実施した。さらに、試験 5 として、日米各 3 品種とそれぞれ茎伸育性に関する準同質遺伝子を有する各 3 系統を 2012、

2013年に供試し、3段階の栽植密度試験をおこない、試験1、2の結果もあわせて、分枝可塑性値と早晚性および茎伸育性との関係を明らかにしようとした。

最後に、試験6として、2012、2013年の2ヶ年にわたり、生育ステージがほぼ類似した日米各1品種と茎伸育性遺伝子に関わる準同質遺伝子系統各1系統を用い、栽植密度と群落光環境、分枝伸長過程を調査し、茎伸育性が分枝可塑性値に及ぼす影響と、受光態勢を中心とした作物学的要因の一部を明らかにしようとした。分枝可塑性値の簡易評価が可能かどうかを検討した。

1. 栽植密度反応における日米品種間差異(試験1)

(1) 供試品種

Table II -2 に試験1(2009~2010)年における供試品種を示した。2009年には北海道育成品種のとよムスメと米国品種の Athow を、2010年には北海道品種のとよムスメととよハルカ、および米国品種の Athow と LD00-3309 を用いた。とよムスメは道立総合研究機構十勝農業試験場(十勝農試)にて育成された白目大粒の特性をもつ、多収の基幹品種である。とよハルカも十勝農試で育成され、低温抵抗性と低温着色抵抗性に優れ、コンバイン収穫適性が高い新品種である。

Athow と LD00-3309 とともに米国イリノイ州で育成され、Non-GMO(品種育成の過程で遺伝子導入育種がされた経緯のない)多

収品種であり，LD00-3309はその最新品種である．両品種ともに，米国中西部の普及品種である．早晚性の分類 Maturity group: MG(Hartwig 1973)は，トヨムスメとトヨハルカがⅠ，AthowがⅢ，LD00-3309がⅣである．茎伸育性は，トヨムスメとトヨハルカが有限伸育型，AthowとLD00-3309が無限伸育型である．

(2) 栽培方法

酪農学園大学実験圃場にて2009年に供試2品種を5月15日に，2010年には供試4品種を5月24日に播種した．1株2粒播きとして出芽後ほぼ2週間生育させ，初生葉の展開後に間引きし1本立てとした．出芽しなかった株には，隣接株の間引き対象個体を補植し欠株の無い群落を作成した．施肥は北海道施肥標準に従い，基肥として窒素，リン，カリウムをそれぞれ硫酸アンモニウム，過リン酸石灰，硫酸カリウムにより，N，P₂O₅，K₂Oとして2，12，8 g m⁻²施用した．また，開花始期まで雑草防除を適宜行い無培土管理とした．

さらに，病虫害防除としてタネバエ，アブラムシ，ネキリムシによる被害を防ぐため，クルーグ FS30 を種子塗布した．フキノメイガ，ツメクサガ，アブラムシ防除のため，トクチオン乳剤，アグロスリン乳剤を混用し7月下旬と8月下旬の2回散布した．

栽植密度は両年ともに，株間10cmに固定し畦幅を50，60，70cmに変えた区(50，60,70×10)，畦幅を70cmに固定し株間を変えた区

(70×7.5, 15)の計 5 水準の栽植密度を設定した。試験区配置は、栽植様式を副区、品種を副々区とする 3 反復分割区法とした。

(3) 調査方法

1) 生育ステージ

Fehr and Caviness (1977) の方法に従い、開花始期(R1)は主茎上で一花開花した時期、子実肥大開始期(R5)は、完全展開した葉を着生している個体の最上位 4 節のうちの一節の莢で粒径が 3mm に達した時期、成熟期(R8)は 95%の莢が熟色を呈した時期とし、圃場全体の 50%以上の個体が各時期に達した日を、各品種の R1, R5, R8 とした。

2) 収量調査および倒伏程度

収量調査は成熟期に各区から生育中庸な 20 個体を手刈りし、さらに生育中庸な 8 個体を選抜し、そのうち 3 個体は主茎・分枝別に莖、莢、子実に分けて通風乾燥機により 70℃72 時間以上乾燥させ、乾物重を測定した。さらに、5 個体は主茎・分枝別の莖長、節数、莢数、子実重、種子数、くず豆を除去した子実重、百粒重を調査した。また、子実収量は 20 個体全体で調査し、くず豆を除去した子実重を基に計算した。子実重を測定する際には、穀実水分計(PM-600, ケット社製)を用い、子実水分含有率も同時に測定した。3 個体調査で求めた乾物率により地上部乾物重を算出した。また、5 個体調査によ

り求めた莢数，百粒重をから次式に基づいて，一莢内粒数を主茎、分枝別に算出した．

$$\text{子実収量}(\text{g m}^{-2}) = \text{莢数}(\text{m}^{-2}) \times \text{一莢粒数} \times \text{百粒重}(\text{g}) / 100$$

なお，ダイズの栽植密度反応を，収量構成要素からみると，莢数は大きな密度反応を示す(Herbert and Litchfield 1982, Lehman and Lambert 1960, Lueschen and Hicks 1977, Weber et al. 1966)のに対して，一莢内粒数，百粒重の変化は莢数に比べて非常に小さい(Wilcox 1977, 田中・松川 1995)ため，一莢内粒数，百粒重は，結果として表示しなかった．それに代わって，主茎長，分枝総長については，密度反応が大きい(義平ら 2009)ために，収量関連形質として記載した．

さらに，ダイズの子実収量は，一般に，晩生品種が早生品種に比べて高く，大西ら(2012)によれば，北海道の品種では登熟日数が1日延長されると1%収量が増加する．これらのことから，早晚性の影響を消去した場合の分枝収量を比較するため，Board and Kahlon (2013)の方法を用いて，分枝収量を子実肥大開始期(R5)までの播種後日数で除した値(補正分枝収量)を計算し，分枝収量の品種間差異を確認した．

また，倒伏程度として，ころび倒伏の程度を成熟期(R1)の収穫前に5段階(0：皆無，2：水平面から45°倒伏，4：90°完全倒伏)で，

各区 30 個体を調査した。

(4) 気象概要

試験 1 における生育期間の旬別平均気温，降水量および日射量の推移を Fig. II -1 に，月別の平均気温，降水量とその 5～10 月の積算値を Table II -3 に示した(酪農学園気象サーバーより)。2009 年は，開花始期 2 週間前から開花始期に相当する 7 月中旬から 8 月上旬にかけてのやや低温と多雨，および子実肥大期に相当する 8 月下旬から 9 月上旬のやや低温と少雨が特徴的であった。

これに対して 2010 年は，出芽時から開花 2 週間前に相当する 6 月上旬から 7 月中旬および開花始期から子実肥大期に当る 8 月上旬から 9 月中旬の高温，開花期の 7 月上旬の多雨として特徴づけられた。また，単純積算気温をみると，2010 年が 2009 年に比べて高く，積算降水量も 2010 年が 2009 年に比べて多かった。

2. 分枝可塑性の評価法(試験 2)

(1) 供試品種

Table II -4 に試験 2(2011~2012)における供試品種を示した。試験 1 で用いたトヨムスメとトヨハルカ，Athow と LD00-3309 に加えて，北海道育成のユウヅル，米国品種の Jack を供試した。ユウヅルは北海道南部向けの粒大の大きい煮豆用の晩生品種である。低温年には減収しやすく，耐倒伏性，難裂莢性に劣る傾向にある。Jack は米国

北部産地の旧品種である。両品種ともに MGII である。茎伸育性は、ユウヅルが有限伸育型，Jack が無限伸育型である。

(2) 栽培方法

試験は酪農学園大学実験圃場にて実施し，2011 年は供試 6 品種を 5 月 27 日に，2012 年は 4 品種を 5 月 14 日に播種し，1 株 2 粒播き出芽後 2 週間目に間引きし 1 本立てとした。その他の栽培方法は試験 1 と同様である。

栽植密度は，2011 と 2012 年共通して，畦幅を 60cm に固定し株間 7.5，10，20cm とした 3 水準の栽植密度区を設定した。栽植密度はそれぞれ，8.3，16.7，22.2 本 m^{-2} ，個体占有面積にすると，450，600，1200 cm^2 となる。Lee et al.(2008)および Parvez et al.(1989)によれば，ダイズの密度反応の最も大きい栽植密度は 8~25 本 m^{-2} であり，また，北海道の標準的な栽植様式は，畦幅 60cm 株間 20cm の 2 本立て (16.7 本 m^{-2}) である(後木・山川 1986)ことから，密度処理区として 60×7.5，10，20cm を選定した(以下，60×7.5，60×10，60×20 区)。試験配置は，2011，2012 両年ともに栽植密度を主区，品種を副区とする，分割区法 3 反復とした。

(3) 調査方法

収量調査は各区から生育中庸な 20 個体を手刈りし，さらに生育中庸な 8 個体を選抜し，そのうち 3 個体は主茎・分枝別に茎重，莢重，

子実重を，5 個体は茎長，節数，莢数，乾物子実重，種子数，くず豆を除去した子実重を調査した．子実収量，一莢内粒数，百粒重を調査した．

なお，ダイズの栽植密度反応は，一莢内粒数，百粒重の変化は莢数に比べて非常に小さいため，試験 1 と同様に一莢内粒数，百粒重は結果として表示せず，主茎長，分枝総長を収量関連形質として記載した．また，早晚性の影響を消去した分枝収量の比較として，Board and Kahlon(2013)の方法を用い上述の補正分枝収量を計算し，分枝収量の品種間差異を確認した．また，試験 1 と同様の方法で倒伏程度を調査した．

(4) 分枝可塑性値の計算方法

前述のように，栽植密度による分枝収量の変化が大きい性質，すなわち，密植時に分枝の発達を適度に抑制し，疎植時には主茎収量の低下を分枝収量の増加により補うことができる特性を分枝可塑性と定義した．圃場の栽植密度試験によって得られた分枝可塑性の指標を圃場分枝可塑性値とし，個体占有面積(栽植密度の逆数)に対する分枝形質(収量・分枝莢数・分枝総長)の回帰直線の傾き(回帰係数)を供試品種ごとに算出して，評価した．

(5) 気象概要

試験 2 における生育期間の旬別平均気温，降水量および日射量の

推移を Fig. II -2 に，月別の平均気温，降水量とその 5～10 月の積算値を Table II -5 に示した．2011 年は，開花始期 2 週間前から開花始期に相当する 7 月中旬から 8 月上旬にかけてのやや高温と少雨，および子実肥大期に相当する 8 月下旬から 9 月上旬のやや高温と多雨が特徴的であった．

これに対して 2012 年は，出芽時から開花 2 週間前に相当する 6 月上旬から 7 月中旬および開花始期から子実肥大期に当る 8 月上旬から 9 月下旬の高温で，平均気温の推移は 2011 年に類似しており，ほぼ同じ生育ステージにおいて高温に推移した．降水量は，開花期に相当する 7 月下旬から 8 月上旬にきわめて少なく，9 月上旬が極多雨であった．ダイズの生育期間の単純積算気温をみると，試験年次 2 ヶ年いずれも平年に比べて高く，2012 年は 2011 年と比較して高かった．積算降水量は試験年次 2 ヶ年いずれも平年に比べて高く，2011 年は 2012 年に比べても高かった．また，日射量は 2011 年が少なく，2012 年が多く，いずれの年次も平年より多かった．

3. 年次間差異からみた分枝可塑性値の安定性(試験 3)

(1) 供試品種と栽培方法

Table II -6 に試験 3(2012~2013)における供試品種を示した．試験 1 および試験 2 で供試したトヨムスメと Athow，トヨハルカ，LD00-3309 を 2012 と 2013 年にも用いた．2012 年には酪農学園大学

実験圃場と北海道農業研究センター札幌拠点，2013年には酪農学園大学実験圃場でのみ試験を実施した．栽培方法，栽植密度処理およびその試験区配置は試験2と同様である．

(2) 分枝可塑性値の計算方法

圃場試験における分枝可塑性の指標(圃場分枝可塑性値)は，試験2と同様に個体占有面積(栽植密度の逆数)に対する分枝形質(収量・分枝総長)の回帰直線の傾きを供試品種ごとに求め，計算した．試験1，2，3をあわせた計6圃場における栽植密度試験について，圃場分枝可塑性値を求め，その年次間差異を検討した．

(3) 気象概要

2012年の北海道農業研究センターおよび2013年の酪農学園大学附属農場における生育期間の旬別平均気温，降水量および日射量の推移を Fig. II -3 に，月別の平均気温，降水量とその5～10月の積算値を Table II -7 に示した．2013年は，開花始期2週間前から開花始期に相当する7月中旬から8月上旬にかけてのやや高温と少雨，および子実肥大期に相当する8月下旬から9月上旬のやや高温と多雨が特徴的であった．これに対して2012年は，出芽時から開花2週間前に相当する6月上旬から7月中旬および，開花始期から子実肥大期に当る8月上旬から9月下旬の高温として特徴づけられた．

4. 分枝可塑性の簡易評価法(試験 4)

(1) 供試品種

試験 4(2013)における供試品種および系統を Table II -8 に示した。試験 1, 2 で用いた 6 品種に加えて, Harosay, William, ST 系統 (Stressland×タチナガハ)の茎伸育性に関わる準同質遺伝子 6 系統(それぞれ有限伸育型 Harosay-dt1, William-dt1, ST-dt1, 無限伸育型 Harosay-Dt1, William-Dt1, ST-Dt1)を用い, 計 12 品種・系統を供試した。Harosay, William,それぞれ, カナダ, 米国北部育成品種で, 早晚性の分類 MG は Harosay が 0, William が III である。ST 系統は, 京都大学農学研究科作物学研究室が育成した, Stressland とタチナガハを交配した系統のうち, MG3 程度で北海道で登熟可能な早生の系統である。

(2) 栽培方法

これら 12 品種・系統を 5 月 13 日に 1 株 2 粒で点播した。栽植様式以外の栽培方法は試験 1 と同様である。簡易評価法として, 同一畦の中で 1 株ごとに株間を変動させた畦(株間段階畦)を設け, 栽植密度反応を, 畦内の個体を調査しその変化によって把握しようとした。株間段階畦内の個体配置を Fig II -4 に示した。畦間を 60cm に固定し, 畦内に, 株間を 30, 25, 20, 15, 10, 7.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25, 30cm と左右対称に, 個体占有面積に 7 つの水準を設置し, 同一品種または

系統 14 個体を栽植した。1 畦の中にこの株間段階畦を 2 反復で設け、この 2 反復の株間段階畦をさらに、2 反復(計 4 反復)で配置した。株間が左右対称になった株間段階畦の配置は、2 反復乱塊法である。その際、畦の両端の個体から隣接した異なる簡易評価畦との間隔を 35cm に統一した。Table II -9 に各個体の占有面積を示した。畦の端から 1, 14 個体目の個体占有面積は 1950cm², 2, 13 個体目は 1650 cm², 3, 12 個体目は 1350 cm², 4, 11 個体目は 1050 cm², 5, 10 個体目は 750 cm², 6, 9 個体目は 525 cm², 7, 8 個体目は 375 cm²となる。株間段階畦の両端の個体ほど疎植条件に、中央の個体ほど密植条件となり、下記のように個体ごとに収量および収量構成要素、特に分枝形質を調査することにより、分枝可塑性値を推定しようとした。

(3) 調査方法

1) 株間段階畦における分枝可塑性値の推定

簡易評価による分枝可塑性の推定値の求め方を Fig. II -5 に示した。上述の株間段階畦において R5 および R8 に、下記の形質について個体ごとに調査を行い、個体占有面積対する分枝形質の回帰係数を、株間段階畦を用いた簡易評価による分枝可塑性の推定値とした。個体調査した形質は、R5 においては主茎・分枝別の生重と乾物重および主茎長、節位別の分枝長である。R8 においては地上部乾物重、主茎長、主茎節数、主茎莢数、分枝莢数、分枝節数、節間長、および

節位別の分枝長である。

2) 適合性の検定手順

推定値の精度を検定する手順を Fig. II -5 に示した。株間段階畦によって求めた分枝可塑性の推定値が試験 2 で得られた圃場分枝可塑性値にどの程度適合するか，その適合性を Fig. II -5 に示した手順により検定した。圃場分枝可塑性値 a とその推定値 a_1 との間の関係性をみるため，両者の散布図を作成し，相関係数を算出し適合性の指標とした。

5. 茎伸育性が分枝可塑性に及ぼす影響(試験 5)

(1) 供試品種と栽培方法

Table II -10 に試験 5(2012-2013)における供試品種および系統を示した。試験 4 と同様に，北海道育成のトヨムスメ，トヨハルカ，ユウヅルと米国北部産地育成の Athow, LD00-3309, Jack の計 6 品種に加えて，茎伸育性についての準同質遺伝子 6 系統(それぞれ有限伸育型の Harosay-dt1, William-dt1, ST -dt1, 無限伸育型の Harosay-Dt1, William-Dt1, ST-Dt1)を用い，計 12 品種・系統を供試した。栽培方法および栽植密度処理については，すべて試験 2, 3 および 4 と同様である。

(2) 分枝可塑性値の計算方法

試験 2, 3 と同様に個体占有面積(栽植密度の逆数)に対する分枝形

質の回帰係数を圃場分枝可塑性値とした。この圃場分枝可塑性値を用いて、供試品種の茎伸育性および早晚性が分枝可塑性に及ぼす影響を検討した。

6. 分枝伸長過程と受光態勢からみた、分枝可塑性における品種間差異の要因解析(試験 6)

(1) 供試品種

Table II -11 に試験 6(2012-2013)における供試品種および系統を示した。供試品種は、有限伸育型のユウヅル、無限伸育型の Jack, Harosoy の茎伸育性に関する準同質遺伝子系統として、有限伸育型の Harosoy-dt1, 無限伸育型の Harosoy-Dt1 を用いた。これら品種並びに系統の選定理由は、試験 5 において分枝可塑性が品種の早晚性の影響を強く受け、生育日数の長い晩生品種ほど、高い傾向にあり(義平ら 2013), この影響を消去するために、過去の栽培試験の結果(阿古達木ら 2013a)より品種の早晚性がほぼ同じであるユウヅルと Jack を選定した。

(2) 栽培方法

酪農学園大学実験圃場にて 2012, 2013 両年に畦幅を 60cm に固定し、株間を 7.5, 10, 20cm とする区の 3 水準の栽植密度試験を実施した。供試 4 品種・系統を 2012, 2013 年にそれぞれ 5 月 27, 14 日に 1 株 2 粒で点播した。その他の栽培方法はすべて試験 1, 2 および

3と同様である。

(3) 調査方法

1) 層別刈り

葉群構造を調査するために草高 20 cm ごとの層別刈りを行い，葉面積の測定を 2012 年には 7 月 31 日，8 月 17 日，9 月 12 日，2013 年には 7 月 25 日，8 月 20 日，9 月 17 日の 3 回実施した。各処理区から生育中庸な連続した個体を密植区で 6 個体，標準区で 4 個体，疎植区で 2 個体について地際部を刈取り，調査サンプルとした。調査サンプルは実験室にて剣山と木杵を用い，圃場での栽植密度条件を再現し，模擬群落とし(Fig. II -6, 7)，草高 20cm ごとを層別に剪定ばさみで刈り取り，主茎，分枝別に茎，葉柄，葉，莢を分け，葉面積と分枝長を測定した。

2) 相対光強度および収量調査

相対光強度の調査には光量子センサー(HIOKI 3912 データロガー，UIZ 3635)を用い，地際部から草高 20cm ごとの光強度を測定し，相対光強度，吸光係数を算出した。なお吸光係数は，以下の式により求めた。I を群落内光強度，I₀ を群落上面の光強度，I/I₀ を群落内相対光強度，F を積算葉面積指数とすると，

吸光係数 K は $\text{Log } e(I/I_0) = -KF$

により求められる。

収量調査では、反復ごとに生育中庸な欠株のない連続 20 個体を手刈りし、3~4 週間自然乾燥した後、主茎・分枝別に節数、莢数、粒数および粒重を求めた。さらに、主茎と各節位別の分枝の茎長を測定し、各分枝長を合計して、分枝総長を求めた。なお、一莢内粒数、百粒重の栽植密度反応は、莢数に比べて非常に小さいため、試験 1、2 と同様に、一莢内粒数、百粒重は結果として表示せず、密度反応の大きい分枝総長を収量関連形質として記載した。

(4) 子実収量・収量構成要素の分散分析、および分枝可塑性の評価

方法

分割区法 3 反復で試験区を配置し、2 ヶ年の年次反復を設けていることから、子実収量および収量構成要素は、McIntosh(1983)による複数試験の統合解析法に従い、年次を主区、株間(栽植密度)を副区、品種を副々区とする分割区法に基づき、統計ソフト「R」を用いて分散分析した。また、圃場分枝可塑性値は、試験 2、3、5 と同様の方法で算出した。

(5) 気象概要

Table II -12 に試験 6 における試験期間の平均気温と降水量を示した。試験期間の積算気温は 2012 年、2013 年両年を通じて平年に比べて高く、降水量は、2012 年が平年に比べて少雨、2013 年が多雨に経過した。2012 年と 2013 年両年の気象条件を比較すると、2012 年

は 2013 年に比べて積算気温が高く、特に出芽期の 5 月および登熟後期の 9 月が平年と比べて高温に経過した。雨量は 2012 年が 2013 年に比べて少なく、特に栄養生長後半の 7 月および登熟期後半の 8 月が平年と比べても少なく推移した。以上より、2012 年の気象条件は出芽期と登熟期通じた高温、栄養生長後期のやや少雨、2013 年は出芽期の低温と登熟後半の多雨として特徴づけられ、2012 年の方が 2013 年に比べて分枝が伸長しやすい環境にあったといえる。

第三章 栽植密度反応における日米品種間差異

1. 生育ステージ, 子実収量および収量関連形質

Table III-1 に試験 1(2009~2010)における生育ステージと, 子実収量およびその関連形質を示した. 生育ステージを比較すると, 米国品種は総じて, 北海道品種に比べて開花始期が 1 週間程度, 成熟期が 3 週間程度遅かった. したがって, 米国年品種の生殖生長期間は 2 週間程度長かった. 成熟期の日米品種間差異は高温に経過した 2010 年において大きい傾向を示した.

2009 年のトヨムスメと Athow を比較すると, 主茎と分枝を込みにした全体の子実収量は Athow がトヨムスメに比べて高く, その差は疎植にするほど拡大し, 16.7 本 m^{-2} 以下の疎植区ではその品種間差異は有意であった. また, 品種と栽植密度処理との間に有意な交互作用がみとめられた.

主茎分枝別にみた子実収量および収量関連形質をみると, 2009 年の収量, 莢数, 茎長については共通して, 品種間および密度処理間に有意性がみとめられ, 主茎収量は密植区(50×10)を除いて, トヨムスメ > Athow であったが, 分枝収量, 分枝莢数, 主茎長, 分枝総長ともに Athow > トヨムスメであった. 品種と密度処理間の交互作用は, 分枝に関する形質ではすべて有意であったが, 主茎莢数, 主茎

長には有意性がみとめられなかった。

2010年の供試品種間で比較すると、分枝が伸長しやすい環境にあったため、子実収量と地上部乾物重ともに、供試品種に共通して密度処理による変化が2009年に比べて少なく、密度処理間の差異は有意ではなかった。しかし、品種と密度処理間の交互作用の間には有意性がみとめられ、米国2品種が日本品種に比べて高く、疎植にもなう減収が少なかった。このことは各密度内の多重比較(Tukey-Kramer test)の結果、16.7本 m^{-2} 以下の疎植区では常に米国品種が日本品種に比べて有意に高いことから確かめられた。

2010年における主茎分枝別にみた子実収量とその関連形質をみると、栽植密度間差異および品種と密度の交互作用には、分枝に関するすべての形質において2009年と同様に有意性がみとめられたが、主茎長においては2009年と異なり、栽植密度処理間差異は有意ではなかった。これは、2010年ではすべての品種において徒長傾向にあり、栽植密度による主茎長における変化が品種間で類似したためであると思われる。

2. 栽植密度反応

Fig. III-1 に試験1における子実収量に及ぼす個体占有面積の影響を示した。主茎と分枝を込みにした全体の子実収量における疎植区と密植区の差異は、供試した2品種ともに、両試験年次に共通して米

国 2 品種が日本 2 品種に比べて小さかった。個体占有面積と全体収量との間には総じて負の相関関係がみとめられ、両者の回帰係数は米国品種が日本品種に比べて高かった。

これに対して、分枝収量の個体占有面積にともなう変化は、供試 2 品種とも両年次に共通して米国品種が日本品種に比べて大きかった。個体占有面積と分枝収量との間には、有意な正の相関関係がみとめられ、両者の回帰係数は米国品種が日本品種に比べて高かった。また、この回帰係数を米国品種の間で比較すると、LD00-3309 が Athow に比べて高く、LD00-3309 の個体占有面積に対する分枝収量の変化は Athow に比べて大きかった。

Fig. III-2 に試験 1 における分枝莢数および分枝総長に及ぼす個体占有面積の影響を示した。分枝莢数は、疎植区と密植区の差異は両年とも米国品種 > 日本品種であった。個体占有面積と分枝莢数の間には、米国品種においては正の相関関係がみとめられ、両者の回帰係数は、米国品種が日本品種に比べて高かった。また、米国品種の中で比較すると、LD00-3309 > Athow であった。分枝総長についても、疎植区と密植区の差異は両年とも米国品種 > 日本品種であった。個体占有面積と分枝莢数の間には総じて正の相関関係がみとめられ、両者の回帰係数は、分枝莢数と同様に、米国品種 > 日本品種であり、米国品種の間には品種間差異がみとめられ、LD00-3309 > Athow で

あった。

3. 考 察

2ヶ年の分散分析の結果から、収量や形質の多くにおいて、品種と栽植密度処理との間に有意な交互作用が認められた。主茎と分枝を込みにした全体収量の栽植密度反応は、米国品種が日本品種に比べて小さく、また、分枝収量の密度反応は米国品種が日本品種に比べて大きいといえた。すなわち、米国品種は日本品種に比べて栽植密度にともなう分枝収量の変動が大きく、疎植時の主茎収量の減少を十分に補うことができ、栽植密度に対して収量が安定していると判断できた。この米国品種の分枝特性は、分枝節数、分枝莢数、分枝総長における栽植密度反応の大きさとしてもよくあらわれていた。個体占有面積ともない分枝形質、特に分枝収量を大きく増加させ、疎植時の主茎収量の減少を補う性質を分枝可塑性と定義すると、この米国品種の高い分枝可塑性は、2ヶ年の試験結果から、供試品種の中では各国の品種間差異、年次間差異を超える特性であると推察された。

Carpenter and Board (1997a, 1997b)によれば、多数の有限伸育型品種の栽植密度反応を調べた結果、栽植密度の適正範囲が広い品種は、疎植時の分枝乾物重の反応が大きく、収量を補償できる能力が高く、この高い分枝の栽植密度反応は、生長解析からみると、疎植

時の分枝への乾物分配割合が高く，個体群乾物増加速度(CGR)が栄養生長期間と登熟期間前半まで高く維持されることによってもたらされる．本試験においても，試験 1 で供試した品種について生長解析を実施した結果(義平ら 2010)，登熟初期の米国品種の葉面積指数および日射利用効率が高く，CGR が高い傾向にあったことから，共通した傾向にあったといえる．しかし，供試した米国品種は，無限伸育型で MGⅢまたはⅣの中晩生品種，北海道品種は有限伸育型で MGⅠの早生品種であったため，茎伸育性および早晚性の影響が表れた結果ともいえる．供試品種を多くし，茎伸育性，早晚性の影響を少なくした品種・系統を用い，収量性を調べ，生長解析を行う必要がある．

第IV章 分枝可塑性の評価法

1. 生育ステージ, 子実収量および収量関連形質

TableIV-1 に試験 2(2011~2012 年)における生育ステージと, 子実収量およびその関連形質を示した. 生育ステージは, 試験 1 と類似した傾向を示し, 開花始期(R1), 成熟期(R8)ともに MG I のトヨムスメ, トヨハルカが最も早く, 次いで MG II のユウヅル, Jack 次いで MG III の Athow の順に早く, MG IV の LD00-3309 が最も遅かった. ユウヅルと Jack はほぼ同じ生育ステージを示した. ユウヅルと Jack を基準とすると, R1, R8 それぞれにおける品種間差異は, トヨムスメ, トヨハルカが 4~6, 10 日早く, Athow が 4, 7 日遅く, LD00-3309 が 10, 15 日前後遅かった. したがって, R5 までの生育日数はトヨムスメとトヨハルカが 95 日前後, ユウヅルと Jack が 104 日前後, Athow が 108 日前後, LD00-3309 が 115 日であった.

主茎と分枝を込みにした全体収量は 60×7.5 区においては大きな品種間差異はみられなかったが, 60×20 区においては LD00-3309, Athow > Jack ≥ ユウヅル ≥ トヨムスメ, トヨハルカの順で有意に大きかった.

分枝収量は 60×7.5 区においても, 米国品種の LD00-3309 と Athow が他の品種に比べて高く, その品種間差異は疎植にするほど拡大し,

60×20 区では全体収量ほぼ同様に，LD00-3309，Athrow > Jack，ユウヅル > トヨムスメ，トヨハルカの順で有意に大きかった．補正分枝収量をみても品種間差異の傾向はほぼ類似しており，米国品種 > 日本品種であった．分枝莢数も，分枝収量と同様の傾向を示し，どの栽植密度でも米国品種 > 日本品種であり，米国品種の中ではLD00-3309 > Athrow，Jack，日本品種の中ではトヨムスメ，トヨハルカ > ユウヅルの順で有意に大きかった．

主茎長は，無限伸育性の米国品種が有限伸育型の日本品種に比べて有意に長く，日米各品種の中では，晩生品種が早生品種に比べて，長かった．分枝総長はLD00-3309，Athrow > Jack > 日本品種の順で有意に長く，この品種間差異は16.7本 m⁻²以下の疎植区で拡大した．これに対して，分枝数もLD00-3309 > Jack，Athrow > 日本品種の順で有意に多かったが，分枝総長でみられたような密度反応はみられなかった．したがって，平均一分枝長は60×7.5区では品種間差異はみられなかったが，60×20区においては分枝総長の密度反応が反映してLD00-3309 > Jack，Athrow > 日本品種の順で有意に多かった．

倒伏は米国品種においてはほとんどみられなかったのに対して，日本品種ではどの密度においても発生し，その程度はトヨハルカ < トヨムスメ，ユウヅルの順に低かった．また，これら品種間差異の傾向は，密度により大きく変化しなかった．

全体の分散分析表をみると、R5 および R8 までの生育日数には有意な品種間差異はみられるものの、密度間および品種と密度の交互作用においては有意性がみとめられなかった。収量およびその関連形質、倒伏程度には、すべての形質において有意な品種間差異はみとめられたが、密度間差異は、全体収量、分枝収量および倒伏程度以外の形質において有意性がみとめられた。また、品種と密度の交互作用については、分枝数と倒伏程度以外のすべての形質において、有意性がみとめられた。すなわち、収量や茎長に関する形質における栽植密度反応には品種間差異がみとめられた。

2012 年の供試品種間で比較すると、2011 年に比べて 60×20 区の全体収量および子実収量が高い傾向にある他は、生育ステージおよび収量関連形質における日米品種間差異および各国の品種間差異の傾向は、2011 年とほぼ類似した。倒伏は全品種で全くみられなかった。全体の分散分析の結果をみると、倒伏程度を除いてすべての形質について、有意な品種間差異がみられた。また、品種と密度の交互作用も、主茎長、分枝長を除いたすべての収量関連形質において有意性がみとめられ、分枝数を除いた分枝の量的形質の栽植密度反応には、2011 年と同様に品種間差異がみとめられた。

2. 栽植密度反応

Fig.IV-1 に試験 2 における子実収量に及ぼす個体占有面積の影響

を示した。主茎と分枝を込みにした全体の子実収量における疎植区と密植の差異は、2011、2012 両年を通じて、両試験年次に共通して米国 3 品種が日本 3 品種に比べて小さかった。個体占有面積と全体収量との間には、総じて負の相関関係がみとめられ、両者の回帰係数は米国品種が日本品種に比べ高かった。

これに対して、分枝収量の個体占有面積にともなう変化は、両年次に共通して米国 3 品種が日本 3 品種に比べて大きかった。個体占有面積と分枝収量との間には、総じて正の相関関係がみとめられ、両者の回帰係数をみると、米国品種が日本品種に比べて高かった。

Fig.IV-2 に試験 2 における分枝莢数および分枝総長に及ぼす個体占有面積の影響を示した。分枝莢数の個体占有面積にともなう変化は、両年を通じて、米国 3 品種 > 日本 3 品種であった。個体占有面積と分枝莢数との間には、総じて正の有意な相関関係がみとめられ、両者の回帰係数は米国品種が日本品種に比べて高かった。また、日米各品種の間には明確な品種間差異はみられなかった。

分枝総長の個体占有面積にともなう変化も、分枝莢数と同様に両年を通じて米国 3 品種が日本 3 品種に比べて大きかった。個体占有面積と分枝総長の間には、総じて正の相関関係がみとめられ、両者の回帰係数は米国品種 > 日本品種であった。また、米国品種の中では Jack, LD00-3309 \geq Athow の傾向を示したが、日本品種の間ではそ

の品種間差異は判然としなかった。

3. 圃場分枝可塑性の品種比較

TableIV-2 に試験 1(2009-2010)および試験 2(2011-2012)における個体占有面積に対する分枝形質(分枝収量, 分枝莢数, 分枝総長)の回帰直線の傾き, すなわち圃場分枝可塑性値を品種間で比較した。分枝収量からみた分枝可塑性値は, 2011 年を除いて米国品種が日本品種に比べて有意に高かった。日米各品種の中では, 有意な品種間差異はみとめられなかった。2011 年は, 分枝伸長の最盛期に当る 7 月中旬から 8 月上旬にかけて干ばつ気味であったことから分枝伸長がやや抑制されたことから, 他の年次に比べて品種間差異が少なかった。

分枝莢数, 分枝総長で求めた分枝可塑性値は, 4 ヶ年, 共通して米国品種が日本品種に比べて有意に高かった。また, 分枝収量でみた分枝可塑性値に比べて, 品種間差異が大きい傾向にあった。特に, 分枝総長でみた分枝可塑性値は, 2010, 2012 両年には米国品種間にも有意な差異がみられ, 2010 年は LD00-3309 が, 2012 年は Jack が他の品種に比べて高かった。

4. 分枝可塑性値と早晚性の関係

Fig.IV-3 に試験 1(2009-2010)および試験 2(2011-2012)における播種から子実肥大開始期(R5)までの生育日数と分枝可塑性値の関係

を示した。分枝収量，分枝莢数，分枝総長それぞれでみた分枝可塑性値と生育日数の間には，有意な正の相関関係がみとめられた ($r=0.55^*$, $r=0.43^\dagger$, $r=0.82^{***}$)。そのうち，分枝総長からみた分枝可塑性値と生育日数との間の相関関係が最も強かった。すなわち，分枝可塑性値は晩生品種ほど高い傾向がみられ，その関係は分枝総長からみた分枝可塑性値が最も明らかであった。生育ステージがほぼ同じ，ユウヅルと Jack で比較すると，いずれも米国品種無限伸育型の Jack が日本品種有限伸育型のユウヅルに比べて高く，分枝可塑性値に差異をもたらす早晚性以外の要因の存在が示唆された。

5. 考 察

分枝可塑性は，品種の早晚性に左右され，晩生品種では分枝の生長期間が長いために大きく評価されると予想される。供試品種の中で比較すると，米国品種は総じて，北海道品種に比べて晩生であり，このことは米国品種の分枝可塑性が高い要因の一つとなっていると考えられる。しかし，生育期間がほぼ同じである Jack とユウヅルで比較しても，分枝可塑性に日米品種間差異が確認されたこと (Fig.IV-3)，また，個体占有面積に対する分枝形質の上昇は米国品種が日本品種に比べて，品種間差異，年次間差異を含めても安定している (TableIV-2) ことから，米国中西部産地の育成品種は北海道品種と比べると，総じて高い分枝可塑性を有すると考えられる。

本試験の供試品種は、米国品種がいずれも無限伸育型、日本品種が有限伸育型であった。分枝可塑性は伸育型にも強く影響されると考えられる。すなわち、無限型品種は、有限伸育型品種に比べて開花始期以降の分枝の伸長が続くために、生育環境に応じて分枝の生長を調整できる期間が長く、分枝可塑性は大きくなる傾向にあると推察される。分枝可塑性に対する茎伸育性の影響を正確に把握するためには、茎伸育性に関する準同質遺伝子系統を用いて、調査する必要がある。

また、伸育性と受光態勢の間には密接な関係があることが知られている。無限伸育型品種は葉群構造が円錐形になる傾向にあり(Thseng and Hosokawa 1972)、受光態勢が良好で生育後期での葉面積の減少が遅いこと(高橋・御子柴 1987)が報告されている。また磯田ら(1996)によれば、無限伸育型の「ツルコガネ」や「黄宝珠」は有限伸育性の「タチナガハ」に比べて密植時の受光態勢が良好に変化する。ダイズの分枝の発生や伸長は群落下層部の光環境によっても左右され、草冠が閉じた場合にも、吸光係数が小さく、群落下層部にまで光が透過しやすい葉群構造をもった品種では分枝の生長が継続されると予想される。今後、生育にともなうダイズの群落構造と相対照度の推移を茎伸育性に異なる日米品種間で比較し、受光態勢と分枝可塑性との関係を検討していく必要があろう。

また、試験 1, 2 の結果より、分枝可塑性値は晩生品種ほど高い傾向にあることが推察された。しかし、早生の有限伸育型の日本品種と晩生の無限型の米国品種を少数供試し、複数年次込みにした結果、すなわち、年次間差異、茎伸育性による差異を含んだ結果であり、より詳細に早晩性が品種の分枝可塑性に及ぼす影響をみるためには、同一年次の多数品種を供試し、分枝可塑性値を調査する必要がある。

分枝可塑性の大きさは、栽培者による人為的な栽植密度に対する分枝調整能力にとどまらず、欠株が生じた時や干ばつ、低温、湿害などにより一時的に分枝の伸長が抑制された後、環境条件が回復した場合の収量補償能力を高める性質としてもとらえることもできよう。ダイズ品種に高い分枝可塑性を付与することは収量の安定化に寄与すると思われる。分枝総長の密度反応を中心に分枝可塑性を評価すると、米国品種においては LD00-3309 が Athow に比べて、北海道品種ではトヨムスメがトヨハルカに比べて密度反応が大きい傾向にあり、分枝可塑性は高いといえる。無限型品種、有限型品種それぞれの中にも多少の品種間差異がみられることは、成熟期を遅延させることなく、粒大を維持しながら、分枝可塑性を改良できる可能性を示唆するものとしてとらえることができる。将来的な遺伝的改良のためには、多数の品種の分枝可塑性を評価する必要がある、簡

易評価法の開発が重要となろう。

第 V 章. 年次間差異からみた分枝可塑性値の安定性

1. 分枝可塑性の年次間差異

試験 1(2009-2010), 試験 2(2011-2012)および試験 3(2012-2013)の 5ヶ年 6 試験圃場における Athow とトヨムスメの分枝収量および分枝総長からみた分枝可塑性値を Fig.V-1 に示した. 分枝収量および分枝総長からみた分枝可塑性ともに 2009~2013 年の 5ヶ年 6 圃場共通して, Athow > トヨムスメであった. しかし, 分枝可塑性値における両品種の品種間差異は, 分枝総長でみた場合の方が安定しており, 特に, 2010 年にトヨムスメでは倒伏がみられたため, 両品種間の分枝収量からみた分枝可塑性値の差異が拡大した.

試験 1(2010), 試験 2(2011-2012)および試験 3(2013)の 4ヶ年 4 試験圃場におけるトヨムスメと, トヨハルカ, Athow, LD00~3309 の分枝収量および分枝総長からみた分枝可塑性値を Fig.V-2 に示した. 分枝総長で求めた分枝可塑性値は, 4ヶ年を通して, LD00-3309 > AT > TM ≥ TH の順で大きかった. これに対して, 分枝収量から求めた分枝可塑性値は 2011 年以外では, LD00-3309 > AT > TM ≥ TH と同様の関係がみとめられたが, 2011 年には LD00-3309 が 10 月後半の低温のため, 登熟不良の未熟莢が多く発生したため, LD00-3309 の分枝可塑性値が低く, LD00-3309 と北海道品種の間の差異がみられなか

た.

Fig. V -3 に分枝総長からみた分枝可塑性値を北農研(2012)と酪農大(2013)との間, および酪農大(2012)と酪農大(2013)との間で比較した. 北農研(2012)と酪農大(2013)との間, および酪農大(2012)と酪農大(2013)の間にはそれぞれにおいて有意な正の相関関係がみとめられた($r=0.85^*$, $r=0.97^{***}$). すなわち, 各圃場試験において, 分枝可塑性値における品種間差異の程度には差がみられるものの, 品種間の順位は変わらなかった. 特に, 同じ試験場所(酪農学園大学実験圃場)における 2012 年と 2013 年の相関関係は強かった.

Fig. V -4 に播種後 40, 60, 80 日の単純積算気温と, トヨムスメと Athow における分枝総長からみた分枝可塑性値との関係を示した. 両者の間にはそれぞれに負の相関関係がみとめられた. すなわち, 分枝の発生が旺盛な 6~7 月の積算気温が分枝可塑性に関与しており, 特に播種後 60 日の単純積算気温と分枝可塑性の間には負の相関関係が強い傾向にあった. また, その相関関係は分枝可塑性値の小さなトヨムスメに比べて, 分枝可塑性値の高い Athow において強かった. 言い換えると, 播種後 1~2 ヶ月を低温に経過すると分枝可塑性は大きくなり, 品種間差異が拡大する傾向にあった.

Fig. V -5 に圃場分枝可塑性値に対する播種後の単純積算気温の寄与率の, 種播後日数にともなう変化を示した. 両者の回帰直線の寄

与率は、どの播種後日数においても Athow がトヨムスメよりも高かった。また、両品種ともに播種後 30 日および 50～60 日が最も高く、60 日を過ぎると低下する傾向を示した。すなわち、両品種ともに 7 月下旬に開花始期(R1)を迎えることから、8 月以降の生殖生長期間よりも、分枝が発生し、旺盛な伸長が開始される 7 月中旬までの積算気温が分枝可塑性値に強く関与すると考えられる。

2. 考 察

早生の有限伸育型の日本品種と晩生の無限型の米国品種を 4 ヶ年込みにした結果(試験 1, 2)、分枝可塑性値は、分枝収量や分枝莢数などの面積当りの分枝形質でみるよりも、分枝総長などの個体当り形質でみた方が、品種間差異を表す傾向にあった。また、分枝総長でみた分枝可塑性値を比較すると、早生品種に比べて晩生品種において、有限伸育型よりも無限伸育型において、大きいことが明らかであった(Agudamu et al. 2016)。しかし、この傾向は、年次の気象要因を含んだ結果であり、分枝可塑性値が気象要因によってどのように変化するか、また、気象要因が分枝可塑性値に及ぼす影響を考えたとしても、やはり分枝総長の栽植密度反応から求めるべきかを明確にする必要があった。そこで、有限伸育型日本品種トヨムスメと無限伸育型米国品種 Athow を代表品種として、これら 2 品種の 5 ヶ年 6 圃場試験での栽植密度反応から求めた分枝可塑性値を比較したところ、

分枝総長での評価が最も安定しており，その品種間差は年次を越えてもほぼ共通といえた．また，分枝可塑性値は栄養生長前半の積算気温が低い年次や早播した場合高くなり，その品種間差異も拡大する傾向にあることが示唆された．

この要因として下記の事が考えられる．登熟条件が良好の場合は，分枝可塑性値は，分枝収量でもても品種間差異が十分に表れると考えられる．しかし，10月以降の平均気温の低下が早い年次にはLD00-3309のような晩生品種においては登熟不良が発生する．また，倒伏しやすい品種においては，分枝総長が大きい割りには分枝収量が低くなることも予想される．このような場合には分枝収量でみた分枝可塑性値は分枝総長でみたものに比べて過小評価することが推察される．同様に分枝莢数でみた分枝可塑性値も登熟期間前半に過度の低温(後藤・山本 1970, Saito et al. 1970), 高温(Mann and Jawarski 1970)や干ばつ(Sionet and Kramer 1970)になると，落花・落莢が増えることが考えられ，このようなケースでは同じように過小評価が予想される．これらのことから，分枝総長で求めた分枝可塑性値が，他の分枝形質から求めた分枝可塑性値に比べて，登熟期間の気象条件やそれにともなう障害の影響を比較的除去した分枝特性を最も示していると考えられる．

また，圃場分枝可塑性値と播種後からの単純積算気温の関係から

(Fig. V -4, Fig. V -5), 8月以降の生殖生長期間よりも, 分枝が発生し, 旺盛な伸長が開始される7月中旬までの積算気温が分枝可塑性に強く関与し, この栄養生長期前半が低温に経過すると分枝可塑性は大きくなり, 品種間差異が拡大する傾向にあると考えられた. すなわち, 播種時期が早い場合, また, 6月および7月前半が低温に経過する年次において, 圃場分枝可塑性値が高くなり, 品種間差異が明確になる傾向にあることが示唆された.

第VI章 分枝可塑性の簡易評価法

1. 子実肥大開始期(R5)における簡易傾斜畦による分枝可塑性の推定

(1) 品種間差異

Fig.VI-1に簡易評価畦におけるR5の生重の分枝/主茎比と分枝割合、および分枝総長に及ぼす個体占有面積の影響を、有限伸育型の代表品種のトヨハルカ、無限伸育型の代表品種のAthowについてのみ示した。個体占有面積と、分枝/主茎比、分枝割合、分枝総長の間には、トヨハルカ(TH)およびAthow(AT)それぞれにおいて有意な正の相関関係がみとめられた(TH: $r = 0.76^{**}$, 0.80^{***} , 0.61^{*} , AT: $r = 0.86^{***}$, 0.85^{***} , 0.81^{***})。個体占有面積に対する分枝/主茎、分枝割合、分枝総長の回帰係数、すなわち分枝可塑性の推定値はトヨハルカ、Athowそれぞれ0.05, 1.61, 2.04 および0.10, 1.92, 12.12であり、いずれも圃場分枝可塑性の大きかったAthowが小さかったトヨハルカに比べて高く、分枝可塑性の差異が反映されていた。また分枝形質間で比較すると、分枝総長でみた分枝可塑性の推定値における品種間差異が最も大きかった。

(2) 簡易評価畦による推定値と、圃場分枝可塑性値との関係

Fig.VI-2に全12供試品種のR5における、生重の分枝/主茎比と分枝割合、および分枝総長から求められた分枝可塑性の推定値と、2013

年の分枝総長による圃場分枝可塑性値との間の関係を示した。圃場分枝可塑性値との間には、分枝/主茎比および分枝総長において有意な正の相関関係がみとめられたが($r = 0.63^*$, 0.90^{***})、分枝割合においては、一定の相関関係はみとめられなかった。分枝/主茎比と分枝総長を比較すると、分枝総長より求めた分枝可塑性の推定値が分枝/主茎比から求めたものに比べて、適合性が高かった。

(3) 節位別分枝長による推定値と、圃場分枝可塑性値との関係

R5における節位別分枝長でみた分枝可塑性の推定値と圃場分枝可塑性値との関係を、分枝の節位別位置がイメージしやすいようにダイズ個体の模式図とともに Fig.VI-3 に示した。両者間には、子葉節由来分枝長を除き、初生葉節、第1、第2、第3本葉節由来の分枝長において正の有意な相関関係がみとめられた($r = 0.61^*$, 0.84^{***} , 0.81^{***} , 0.95^{***})。また、両者の回帰係数をみると、第1、第2、第3本葉節由来の分枝長の回帰係数が10.9、14.7、13.3と、子葉節および初生葉由来分枝長に比べて高かった。

2. 成熟期(R8)における簡易傾斜畦による分枝可塑性の推定

(1) 品種間差異

Fig.VI-4 に簡易評価畦における R8 の風乾重の分枝/主茎比、分枝割合、分枝総長に及ぼす個体占有面積の影響を、有限伸育型の代表品種のトヨハルカ、無限伸育型の代表品種の Athow についてのみ示し

た． 個体占有面積と， 分枝/主茎比， 分枝割合， 分枝総長の間には， トヨハルカ (TH) および Athow(AT) それぞれにおいて有意な正の相関関係がみとめられ (TH: $r = 0.73^{**}$, 0.67^* , 0.70^* , AT: $r = 0.76^{**}$, 0.87^{***} , 0.81^{**})， 個体占有面積に対する分枝/主茎， 分枝割合， 分枝総長の回帰係数， すなわち分枝可塑性の推定値はトヨハルカ， Athow それぞれ 0.07, 0.01, 3.70 および 0.09, 0.02, 15.57 であり， R5 でみた場合と同様に， 圃場分枝可塑性の大きかった Athow が小さかったトヨハルカに比べて高く， 分枝可塑性の差異が反映されていた． また， 回帰係数の品種間差異も R5 と同様に， 分枝総長でみた分枝可塑性の推定値が最も大きかった．

(2) 簡易評価値による推定値と， 圃場分枝可塑性値との関係

Fig.VI-5 に簡易評価値における R8 の子実収量の分枝/主茎比， 分枝割合に及ぼす個体占有面積の影響を， トヨハルカ， Athow についてのみ示した． 個体占有面積と， 分枝/主茎比， 分枝割合の間には， トヨハルカ (TH) および Athow(AT) それぞれにおいて有意な正の相関関係がみとめられ (TH: $r = 0.78^{***}$, 0.79^{***} , 0.70^* , AT: $r = 0.75^{**}$, 0.65^*)， 個体占有面積に対する分枝/主茎比， 分枝割合の回帰係数， すなわち分枝可塑性の推定値はトヨハルカ， Athow それぞれ 0.08, 0.03 および 0.14, 0.02 であり， 分枝/主茎比では Athow > トヨハルカであり， 圃場分枝可塑性の差異を反映していたが， 分枝割合では両

品種の差異が明確ではなかった。

Fig.VI-6 に全 12 供試品種の R8 における，風乾重の分枝/主茎比と分枝割合，および分枝総長から求められた分枝可塑性の推定値と，2013 年の分枝総長による圃場分枝可塑性値との間の関係を示した。圃場分枝可塑性値との間には，分枝割合および分枝総長において有意な正の相関関係がみとめられたが ($r = 0.69^*$, 0.79^{**})，分枝/主茎比においては，一定の相関関係はみとめられなかった。分枝割合と分枝総長を比較すると，R5 でみた場合と同様に，分枝総長より求めた分枝可塑性の推定値が分枝/主茎比から求めたものに比べて，適合性が高いといえた。

(3) 節位別分枝長による推定値と，圃場分枝可塑性値との関係

R8 における節位別分枝長でみた分枝可塑性の推定値と圃場分枝可塑性値との関係を，分枝の節位別位置がイメージしやすいようにダイズ個体の模式図とともに Fig.VI-7 に示した。両者の間には，子葉節由来分枝長を除き，初生葉節，第 1，第 2，第 3 本葉節由来の分枝長において正の有意な相関関係がみとめられた ($r = 0.85^{***}$, 0.77^{**} , 0.81^{***} , 0.57)。また，両者の回帰係数をみると，子葉節，初生葉，第 1，第 2 本葉節由来の分枝長の回帰係数が 8.78，11.27，6.27，2.80 となり，初生葉節由来の分枝長の回帰係数が最も高かった。

3. 考 察

圃場分枝可塑性と株間段階畦による分枝可塑性の推定値との間の相関関係をみると、分枝総長から求めた分枝可塑性の推定が最も強い相関関係を示し、この傾向は R5 と R8 共通していた。このことから、株間段階畦による分枝可塑性の推定に用いるのに最も適した分枝形質は、分枝総長であると考えられた。Board and Kahlon(2013)によると、米国のダイズ品種においては、疎植区/標準区で算出される相対収量すなわち疎植適応性は、成熟期を補正した分枝重(分枝乾物)に比例する。本試験においても、個体占有面積に対する分枝風乾重の分枝/主茎比や分枝割合の回帰係数も、圃場分枝可塑性とある程度の正の相関関係を示したが、分枝総長から求めた分枝可塑性の推定値に比べると、関係性が弱かった。

また、この分枝総長を節位別に分解し、どの節位の分枝長による推定値が最も圃場分枝可塑性値に適合するのかを検討すると、R5 においては第 1, 2, 3 本葉節位であったのに対して R8 については子葉節、初生葉節、第 1 節であり、子実肥大開始期から成熟期にかけて、適合性の高い分枝長が下位節へ移行する傾向がみられた。R5 と R8 で共通して適合性の高い節位は、第 1 本葉節であった。

ダイズの分枝長は、無限伸育型の品種は R5 まで、有限伸育型の品種では R3 まで伸長することが分かっている(阿古達木ら 2015)こ

とから、株間段階畦による分枝可塑性の簡易評価においても、R5以前の生育ステージでの分枝可塑性の推定は難しいと考えられる。

R5とR8での分枝長測定の簡便さを比較すると、一般にR5は葉面積指数の最大期であるために分枝長を測定する場合には破壊的なサンプリングにより、葉を除去しながら測定する必要があり、多くの手間を要する。また、R5の期間は生育ステージとして短期間であるため、比較的迅速な調査が求められる。これに対して、R8は葉の除去する労力が不要であるとともに、個体変化がないために調査適期が長く、調査が容易である。一方、その反面、生殖生長期間の後半には、倒伏や下位節由来の分枝の枝折れが起きやすく、分枝長を正確に測定できない場合もあり、特に耐倒伏性に劣る品種を供試した場合にこの可能性が少なくないと予想される。

以上より、株間段階畦による分枝可塑性の推定には、分枝総長の測定が適合性からみて最も適しており、さらに簡便性を重視して節位別に分けて分枝長を測定するには、子実肥大開始期から成熟期までの第1本葉節位の分枝長の利用が最も望ましいと考えられた。さらに栄養生長後半に、干ばつ、低温、日照不足などのストレスに遭遇すると、分枝の発達が抑制され、分枝長は短くなることが知られている(後木・山川 1986)から、分枝長による分枝可塑性の推定に最も適した節位にも年次間差異がみられることも予想される。今後、

複数年次の試験により，年次間差異を検討していくことも必要であろう。

第 VII 章 分枝可塑性の品種間差異を生じさせる作物学的要因

1. 茎伸育性および早晩性と、分枝可塑性の関係

(1) 生育ステージ

Table VII-1 にそれぞれ、試験 5(2012, 2013)における生育ステージを示した。2012 年に北農研センター実施された圃場試験の生育ステージをみると、開花始期(R1)および成熟期(R8)は、トヨムスメ、トヨハルカが最も早く、LD00-3309 が最も遅かった。準同質遺伝子系統(NILs)でみると、無限伸育型(-Dt1)が有限伸育型(-dt1)に比べて遅かった。特に、ST-Dt1 は ST-dt1 に比べて 11 日遅かった。R1,子実肥大開始 (R5), R8 までの生育日数は 72~84, 105~114, 138~167 日の差があり、MG 0, I のトヨムスメ、トヨハルカ、Harosoy が 140 日前後、MG II のユウヅル、Jack が 155 日、MG III, IV の Williams, ST, Athow, LD00-3309 は、ST-dt1 を除いて 160 日以上であった。

2013 年に酪農学園大学で実施された圃場試験の生育ステージをみると、R1, R5, R8 およびそれぞれまでの生育日数における品種間差異はほぼ 2012 年と同様であったが、品種の早晩性間および、NIL の茎伸育性間における R8 までの生育日数の品種間差異は 2013 年が 2012 年に比べて大きかった。

(2) 子実収量および収量関連形質

2012年における子実収量と収量構成要素を Table VII-2 に示した。子実収量は米国品種や NILs を中心とした MG III, IV の晩生品種が MG I の北海道品種に比べて多く、MG 0 のカナダ品種 Harosoy が両者の中間の品種を示した。地上部乾物重は子実収量と同様の傾向を示したが、Harosoy-NILs は 60×7.5, 60×10 両区において Harosoy-dt1 が Harosoy-Dt1 に比べて低かった。

子実収量を主茎と分枝に分けてみると、全体収量でみた収量の早晩性による品種間差異は、主茎と 60×20 区、分枝収量において同様の傾向が表れていたが、60×5, 60×10 区ではその品種間差異が少なくなる傾向を示した。莢数は、主茎においては子実収量と同様に晩生品種が多く傾向を示したが、分枝収量においては百粒重の小さな Jack, LD00-3309, Harosoy-dt1 で多く、この傾向は密植区で顕著であった。

主茎長は晩生品種ほど長い傾向を示し、茎伸育性でみると、米国品種 > 北海道品種, NILs では NILs-Dt1 > NILs-dt1 であった。分枝総長も総じて同様の傾向を示し、その傾向は疎植ほど顕著であった。分枝数は晩生品種ほど、また無限伸育型品種でやや多い傾向を示したが、分枝総長ほどの差異はみられなかった。したがって、平均一分枝長は分枝総長の品種間差異を反映して、晩生品種ほどまた無限

型伸育型品種において長く、その傾向は疎植区ほど明らかであった。また、倒伏はすべての区で皆無であった。

全体の分散分析結果をみると、すべての形質において品種と栽植密度それぞれにおいて0.1, 1%水準で有意差がみとめられた。また、品種と栽植密度の交互作用は、主茎長、主茎収量、主茎莢数、分枝数においては有意性がみとめられなかったが、分枝収量、分枝莢数、分枝総長においてすべて有意差がみとめられた。

Table VII-3 に 2013 年における子実収量と収量構成要素を示した。子実収量および収量構成要素は、2013 年においても 2012 年とほぼ同様の結果を示したが、早晚性および茎伸育性による品種および系統間差異は、2013 年が 2012 年に比べて小さい傾向にあった。また、ST-Dt1 は中程度の倒伏がみられた。

全体の分散分析の傾向も 2012 年とほぼ同様の傾向を示し、すべての収量関連形質において品種と栽植密度それぞれ有意差がみとめられた。また、品種と密度の交互作用も、主茎長、主茎莢数、主茎長では有意性はみとめられなかったものの、すべての分枝形質において有意性がみとめられた。

(3) 栽植密度反応

Fig. VII-1 に全体子実収量に及ぼす個体占有面積の影響を示した。全体収量は総じて個体占有面積にともない減少した。日米品種間で

比較すると、個体占有面積に対する全体収量の回帰係数は、2012、2013 両年共通して米国品種の Athow, LD00-3309, Jack が有限伸育型の北海道品種のトヨムスメ, トヨハルカに比べて、また、NILs で比較しても、2013 年の ST-Dt1 を除いて Harosoy, Williams, ST 系統に共通して、無限伸育型系統(-Dt1)が有限伸育型系統(-dt1)に比べて高く、逆に個体占有面積に対する全体収量の寄与率は、米国品種および無限型品種が北海道品種および有限型系統に比べて低かった。ST-Dt1 は、2013 年においては疎植区において倒伏がみられたために、有限型に比べて回帰係数が低かった。これらのことより、個体占有面積に対する収量の変化は、無限伸育型品種・系統が有限伸育型品種・系統に比べて少なく、安定しているといえる。

Fig.VII-2 に分枝収量に及ぼす個体占有面積の影響を示した。分枝収量が総じてどの品種も個体占有面積にともなって増加した。その増加程度、すなわち個体占有面積に対する分枝収量の回帰係数が、日米品種で比較すると、米国品種 Athow, LD00-3309, Jack が両年を通じて、北海道品種のトヨムスメ, トヨハルカ, ユウヅルに比べて高かった。また、NILs で比較すると、倒伏のみられた 2013 年の ST-Dt1 を除いて、Harosoy, Williams, ST とともに、無限伸育型系統(-Dt1)が有限伸育型系統(-dt1)に比べて高かった。すなわち、無限伸育型品種・系統が有限伸育型品種・系統に比べて、個体占有面積に

ともなう分枝収量の増加が大きく、このことが収量の安定性につながっているといえる。

Fig.VII-3 に分枝総長に及ぼす個体占有面積の影響を示した。分枝総長も分枝収量と同様にすべての品種において、個体占有面積にもなって増加し、その増加の程度は無限伸育型の米国品種が有限伸育型の北海道品種に比べて、また、NILs では、無限型伸育型系統(-Dt1)が有限伸育型系統(-dt1)に比べて大きかった。回帰係数における茎伸育性間の差異は分枝収量でみるよりも分枝総長でみた場合の方が大きかった。

Table VII-4 に試験 5(2012, 2013)における分枝可塑性値を示した。上述したように、個体占有面積に対する分枝形質の回帰係数、すなわち分枝可塑性値は両年を通じて、米国品種 > 北海道品種、NILs では ST を除き、無限型系統(-Dt1) > 有限型系統(-dt1)で有意な品種間差異がみとめられた。分枝収量、分枝莢数からみた分枝可塑性値は、負の値を示す品種もみられ、また年次間で不安定であったのに対して、分枝総長から求めた分枝可塑性値は年次間差異が少なく、両年共通して品種間差異が大きく、安定していた。

(4) 分枝可塑性値と早晚性、および茎伸育性との関係

Fig.VII-4 に子実肥大開始期(R5)までの播種後日数と分枝可塑性値との関係を示した。両者の間には 2012, 2013 年それぞれ正の相関関

係($r = 0.50\ddagger$, $r = 0.71^{**}$)がみとめられ、分枝の伸長期間の長い晩生品種ほど分枝可塑性値が高かった。この傾向は各試験年次それぞれに有限伸育型、無限伸育型品種・系統に分けても同様にみとめられたが、無限伸育型品種・系統において顕著であった。試験年次で比較すると、LD00-3309を除き、分枝可塑性値は2012年が2013年に比べて高かった。

Fig.VII-5に2012年(北海道農業研究センター)と2013年(酪農学園大学)における分枝可塑性値の関係を示した。両者の間には正の有意な相関関係($r = 0.85^{***}$)がみとめられ、また、回帰係数もほぼ1に近く、年次、地域を越えても、分枝総長からみた分枝可塑性値の品種間差異は安定しており、他の分枝形質から求めた分枝可塑性に比べて、気象条件に影響される程度が小さいといえた。

(5) 考 察

分枝可塑性の大きさは、早晩性また茎伸育性に強く影響されることが示唆され、晩生品種または無限伸育型品種で大きい傾向があることが示唆された。近年、ダイズの遺伝子の解明が進み、早晩性を支配する開花期関連遺伝子はE1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8(Cober and Morrison 2010), E9, E10があり、茎伸育性に関する遺伝子として、Dt1(Bernard 1972)と、Dt1の存在下で無限伸育性を抑制する半無限伸育性遺伝子Dt2(Chang et al. 1982)の存在が知られている。そ

のうち、Dt1 については、有限伸育型-dt1 のと無限伸育型-Dt1 の準同質遺伝子系統(NILs)を用いて調査した結果、すべての品種に共通して、無限伸育型が有限伸育型に比べて大きかった。

しかし、開花期関連遺伝子や半無限伸育性遺伝子の分枝可塑性に及ぼす効果は、現在の所、明らかではなく、各遺伝子の NILs を入手し、第VI章でみた株間段階畦による簡易評価により分枝可塑性値を調べ、各遺伝子の効果を検証していく必要がある。

2. 分枝伸長過程と受光態勢からみた、分枝可塑性における茎伸育性間差異の要因解析

(1) 生育ステージおよび収量関連形質

TableVII-5 に生育ステージおよび収量関連形質を示した。生育ステージは、開花始期(R1)はこれら 4 品種とも両年共通して大きな差異が見られず、成熟期(R8)は両年ともユウヅルと Jack の間、および Harosoy-dt1 と Harosoy-Dt1 の間には 1 日程度の差異しか見られなかった。しかし、ユウヅルと Jack の成熟期は Harosoy の準同質遺伝子系統に比べて 10~14 日程度遅かった。栽植密度処理平均で比較すると、両年通じて全体子実収量と分枝収量ともに Harosoy-Dt1 が最も高く、ユウヅルが最も小さく品種間差異は有意であった。また、分枝莢数と分枝総長に共通して、両年ともに Harosoy-Dt1 が最も多く、ユウヅルが最も少なく、品種間で有意な差異が認められた。

品種の平均で密度間を比較すると，全体子実収量は 60×7.5 区が最も多く，60×20 区が最も少なく，有意差が認められた．分枝収量，分枝莢数，および分枝総長などの分枝形質は，すべて兩年を通じて 60×20 区が最も大きく，60×7.5 区が最も小さく，有意な密度間差異が認められた．品種と密度の交互作用をみると，全体子実収量，分枝収量，分枝莢数および分枝総長ともにほぼ有意であった．

(2) 栽植密度反応と分枝可塑性値

Fig.VII-6 に全体子実収量および分枝子実収量に及ぼす個体占有面積の影響を示した．全体収量の個体占有面積に対する回帰直線の傾き(以下，回帰係数)は，兩年を通じて無限伸育型の Jack や Harosoy-Dt1 が有限伸育型のユウヅルや Harosoy-dt1 に比べて小さかった．すなわち，Jack と Harosoy-Dt1 はユウヅルと Harosoy-dt1 に比べて全体収量の栽植密度反応は小さかった．これに対して，分枝収量の回帰係数は逆に Jack と Harosoy-Dt1 がユウヅルと Harosoy-dt1 に比べて大きく，分枝収量の密度反応は無限伸育型品種が有限伸育型品種に比べて大きかった．

Fig.VII-7 に分枝莢数および分枝総長に及ぼす個体占有面積の影響を示した．分枝莢数の回帰係数をみると，分枝収量と同様に無限伸育型の Jack と Harosoy-Dt1 の回帰係数が有限伸育型のユウヅルや Harosoy-dt1 に比べて兩年を共通して大きかった．また，分枝総長に

についても同様に両年ともに無限伸育型の Jack と Harosoy-Dt1 が有限伸育型のユウヅルや Harosoy-dt1 に比べて回帰係数は大きかった。さらに，無限伸育型品種の中では，Jack が Harosoy-Dt1 に比べて分枝総長の密度反応が大きく，有限伸育型品種の間では，ユウヅルが Harosoy-dt1 に比べて回帰係数の大きい傾向がみられた。

Fig.VII-8 に開花始期(R1)における全体および分枝葉面積に及ぼす個体占有面積の影響を示した。全体葉面積および分枝葉面積は，有限伸育型のユウヅルと Harosoy-dt1 においては両年共通して個体占有面積にともない上昇し，両者の間には正の相関関係が認められた。両者間の回帰係数を比較すると，全体葉面積の回帰係数は，すべての品種において，葉面積指数の低かった 2012 年に比べて，葉面積指数の高かった 2013 年に比べて大きかった。分枝葉面積の回帰係数は，上述した分枝収量，分枝莢数，分枝総長と同様に，無限伸育型の Jack と Harosoy-Dt1 の回帰係数が有限伸育型のユウヅルや Harosoy-dt1 に比べて両年を共通して大きかった。ユウヅルと Jack で比較すると，全体および分枝葉面積の回帰係数における年次間差異はユウヅルが Jack に比べて大きかった。

TableVII-6 に個体占有面積に対する分枝形質の傾き，すなわち分枝可塑性値を示した。分枝可塑性値は，早晚性がほぼ同一である品種並びに系統間で比較すると，分枝収量，分枝莢数，分枝総長どの形

質でも無限伸育型の Jack が有限伸育型のユウヅルに比べて、また、無限伸育型の Harosoy-Dt1 が有限伸育型の Harosoy-dt1 に比べて有意に大きかった。

分枝総長でみた分枝可塑性値は同じ茎伸育性で比較しても、有意な品種間差異がみられ、両年通じて無限伸育型では Jack > Harosoy-Dt1、有限伸育型ではユウヅル > Harosoy-dt1 であった。開花始期(R1)の葉面積指数でみた分枝可塑性値も分枝総長と同様に、無限伸育型品種の Jack と Harosoy-Dt1 が有限伸育型のユウヅルに対して高かった。

(3) 分枝伸長過程

Fig.VII-9 に 2012 年の生殖生長期間における分枝総長および分枝数、平均分枝長の推移を示した。早晚性が類似しているユウヅルと Jack、および Harosoy-dt1 と Dt1 の間で比較すると、分枝総長は 60×7.5 、 10 、 20 区すべての密度処理区において、生殖生長期間を通じて Jack \geq ユウヅル、Harosoy-Dt1 \geq Harosoy-dt1 であった。この両品種間および両系統間の差異は疎植にともなって増加した。

最も分枝総長が大きかった 60×20 区に分枝伸長過程をみると、両品種間および両系統間差異は開花始期(R1)において非常に小さかったのに対して、開花始期(R1)～着莢期(R3)において分枝の伸長が著しく、着莢期(R3)において顕著であった。さらに、着莢期(R3)から

子実肥大開始期(R5)にかけてユウヅルと Jack の品種間差異が拡大した。しかし、60×7.5、60×10 区においては、これらの品種間および系統間差異は、着莢期(R3)においても小さく、60×20 区とは異なり、むしろ着莢期(R3)から子実肥大開始期(R5)の分枝の伸長量の差異により生じていた。

分枝総長を分枝数と平均 1 分枝長に分けて検討した場合。開花始期(R1)以降の平均 1 分枝長は、分枝総長と類似した傾向を示し、すべての処理区において生殖生長期間を通じて Jack \geq ユウヅル、Harosoy-Dt1 \geq Harosoy-dt1 であり、これらの品種間差異および系統間差異は疎植にともなって拡大した。一方、分枝数は、どの栽植密度区においても、Jack \geq ユウヅル、Harosoy-Dt1 \geq Harosoy-dt1 であった。しかし、この品種間および系統間差異は、密植から疎植への個体占有面積の増加にともなって拡大した。個体占有面積にともなう増加程度を比較すると、平均 1 分枝総長における増加が分枝数に比べて大きい傾向にあった。

Fig.VII-10 に、2013 年の生殖生長期間における分枝総長および分枝数、平均分枝長の推移を示した。2013 年の分枝総長、分枝数、平均 1 分枝長の推移も 2012 年とほぼ同様の傾向を示し、3 形質ともに生殖生長期間を通じて Jack \geq ユウヅル、Harosoy-Dt1 \geq Harosoy-dt1 であり、その品種間差異および系統間差異は疎植にともなって拡大し

た。また、個体占有面積にともなう増加は分枝総長および平均 1 分枝長が分枝数に比べて顕著であることも 2012 年と共通していた。

(4) 受光態勢

Fig.VII-11, 12 にそれぞれ, 2012, 2013 年の開花始期(R1)における, 生育ステージが類似したユウヅルと Jack, および Harosoy 準同質遺伝子系統間で相対光強度と葉面積指数(LAI)の垂直分布を対比した。2012 年におけるユウヅルと Jack を比較すると, 全体の LAI は 60×20 区を除いて有限伸育型のユウヅルが無限伸育型の Jack に比べて大きかった。また, 全体 LAI に占める草高 40cm 以上の割合は, どの栽植密度区においてもユウヅル > Jack であった。草高 40cm の相対光強度は, どの栽植密度区においても有限伸育型のユウヅルが無限伸育型の Jack に比べて小さかった。

次に, Harosoy の準同質遺伝子系統間で比べると, 全体 LAI に占める草高 40 cm 以上の割合は Harosoy-Dt1 が Harosoy-dt1 に比べて小さかった。草高 40 cm の相対光強度は, Harosoy-Dt1 が Harosoy-dt1 に比べて高く, 無限伸育型と有限伸育型の間の差異は, ユウヅルと Jack の間で比較した場合と同様の傾向を示した。

2013 年においても 2012 年と同様に, 全体 LAI に占める草高 40cm 以上の割合は有限伸育型の品種並びに系統が無限伸育型に比べて大きく, 草高 40cm の相対光強度は, 無限伸育型が有限伸育型に比べ

て総じて高かった。しかし、草高 40cm の相対光強度における伸育型間の差異は、全体 LAI が低かった 2012 年においては密植区にほど、逆に全体 LAI が高かった 2013 年においては、疎植区ほど大きく、傾向を異にした。

Fig.VII-13 に開花始期(R1)から子実肥大開始期(R5)における吸光係数の推移を示した。すべての品種において、両年共通して、吸光係数は登熟にともなって上昇した。また、R1 から R5 にかけての吸光係数の上昇程度は、60×7.5 区で最も大きく、60×20 区で小さかった。すなわち、群落下層部への光の透過は登熟にともなって減少し、その減少程度は疎植区で密植区よりも小さかった。早晚性が類似した品種並びに系統間で比較すると、両年共通して、どの栽植密度区においても、吸光係数は生殖生長期間を通じて、Jack<ユウヅル、Harosoy-Dt1<Harosoy-dt1 と無限伸育型が有限伸育型に比べて小さかった。

Fig.VII-14 に開花始期(R1)から子実肥大開始期(R5)におけるダイズ群落上層 40cm の光の、草高 1cm 当りの相対光強度の低下量の推移を示した。すなわち、吸光係数が群落下層部までの光の透過率を表すのに対して、群落上層草高 40cm における光の透過率に着目して、品種並びに系統間で比較した。この草高 1cm 当りの相対光強度の低下量は、両年共通して、登熟にともなって減少し、また、栽植密度

間で比較すると、どの生育ステージにおいても 60×7.5 区で最も大きく、60×20 区で小さい傾向にあった。早晚性が類似した品種並びに系統間で比較すると、吸光係数の場合と同様に、両年共通して、どの栽植密度区においても、この低下量は生殖生長期間と通じて、Jack < ユウヅル, Harosoy-Dt1 < Harosoy-dt1 と無限伸育型が有限伸育型に比べて小さかった。

(5) 受光態勢および分枝伸長過程との関係

Fig.VII-15, 16 それぞれに開花始期(R1), 着莢期(R3), 子実肥大開始期(R5)における吸光係数および群落上層 40cm の相対光強度の低下量と、開花始期(R1)から成熟期(R8)までの分枝の伸長量との関係を示した。吸光係数と分枝の伸長量との間には、両年共通して、R3, R5 において有意な負の相関関係($r = -0.61^*$, -0.80^{**} , $r = -0.70^*$, -0.66^*)が認められた。しかし、R1 においては、その相関係数は低かった。これに対して、上層 40cm の相対光強度の低下量と分枝伸長量との間には、両年共通して、R1, R3, R5 生殖生長期間を通じて、有意な相関関係 ($r = -0.75^{**}$, -0.79^{**} , $r = -0.87^{***}$, -0.79^{**} , $r = -0.83^{***}$, -0.86^{***})が認められた。

(6) 考 察

ダイズの分枝発生および伸長は、北海道においては栄養生長後半および登熟初期の低温、日照不足および干ばつにより抑制される傾

向にある(後木・山川 1986)。7月および8月の降水量はそれぞれ、2012年が平年比55, 70%であったのに対して、2013年は77, 136%であり、2013年は、2012年に比べて分枝の伸長しやすい気象条件にあったと考えられる。分散分析の結果(Table VII-5)、品種を込みにした場合には、分枝収量には有意な年次間差異がみとめられたが、分枝莢数、分枝総長には年次間差異はみとめられなかった。しかし、形質ごとの3要因交互作用をみると、分枝収量、分枝莢数、分枝総長には、品種と年次、品種と栽植密度、および品種、年次、栽植密度の3者の間に有意な交互作用がみとめられ(Table VII-5)、これら分枝形質の栽植密度反応および気象反応には明らかに品種間差異が存在すると考えられた。

特に、分枝総長の栽植反応を伸長過程から具体的にみると(Fig. VII-10, VII-11)、分枝総長および平均1分枝長は、密植条件(60×7.5)においては総じて2013年が2012年に比べて生殖生长期間を通して長かった。しかし、疎植条件(60×20)においてはむしろ、2012年の分枝総長が2013年に比べて登熟後半以降長い傾向にあり、さらにその傾向は、無限伸育型品種のJackおよびHarosoy-Dt1が有限伸育型のユウヅルおよびHarosoy-dt1に比べて顕著であった。

また、分枝収量、分枝莢数、分枝総長に基づく分枝可塑性値は、いずれもほぼ同じ早晚性の品種間の比較であれば、常に無限伸育型

＞有限伸育型であった。また、分枝3形質の中でも分枝総長における品種間差異が最も大きく、分枝可塑性値の品種間差異を把握する上で最も適していると考えられた。さらに、同じ茎伸育性間で比較すると、有限伸育型の中では、2013年の分枝莢数を除いてMGⅡのユウヅルの分枝可塑性値がMG0のHarosoy-dt1に比べて、無限伸育型の中ではMGⅡのJackの分枝可塑性値がMG0のHarosoy-Dt1に比べて大きかった。この傾向は著者らが実施した、分枝可塑性は早晩性と茎伸育性に強く影響され、晩生品種ほどまた、無限伸育性において大きい傾向を示すとする別の栽植密度試験結果(阿古達木ら2013b)と同様の傾向を示した。

この分枝総長の伸長過程を、分枝数と平均1分枝総長に分けて解析すると、分枝総長の生育にともなう推移は、分枝数よりも平均1分枝長に極めて類似している(Fig.VII-10, VII-11)ことから、分枝総長の栽植密度反応における品種間差異は、分枝数よりも平均1分枝長の影響が強い。すなわち、分枝可塑性は分枝の発生ではなく、分枝の伸長により強く支配される形質であると考えられる。

また、平均1分枝長の伸長過程をみると、茎伸育性に関わらず開花始期(R1)から着莢期(R3)までの登熟初期の伸長量がどの栽植密度区においても最も大きかった。無限伸育型の平均1分枝長が有限伸育型に比べて大きい要因を分枝伸長過程から考察すると、この伸長

最盛期における分枝伸長速度が速いことと、有限伸育型の分枝伸長速度が低下する着莢期(R3)から子実肥大開始期(R5)までの登熟中期にも分枝の伸長が盛んであることに由来していると考えられた。

一方、受光態勢をみると、同じ早晩性の品種並びに系統間で比較すると、Fig. VII-11, 12 に示した吸光係数は生殖生長期間を通じて無限伸育型<有限伸育型で、その要因は全 LAI に占める上層 40cm の割合は、両年の供試品種平均で比較すると、無限伸育型が 37.4 で、有限伸育型が 70.1 であり、常に無限伸育型<有限伸育型であった。草高 40cm における相対光強度が常に無限伸育型>有限伸育型であったのはこのことに基づくと考えられた。

草高 40cm の相対光強度における伸育型間の差異は、全体 LAI が低かった 2012 年においては疎植区よりも密植区において大きい傾向を示したのに対して、逆に全体 LAI が高かった 2013 年においては、疎植区ほど大きく、傾向を異にした。この傾向を開花期の葉面積指数の密度反応から考えると、分散分析の結果、開花始期(R1)の全体および分枝葉面積には、品種と年次、品種と栽植密度、および品種、密度、年次 3 者の間に有意な交互作用がみとめられたことから(Table VII-5)、この草高 40cm の相対光強度における伸育型間の差異には、R1 の葉面積の栽植密度反応とその品種間差異が関与していると考えられる。すなわち、無限伸育型の Jack および Harosoy-Dt1

における葉面積の分枝可塑性が，有限伸育型品種に比べて大きいいため，分枝葉面積の年次間差異が少ないのに対して，有限伸育型のユウヅルおよび Harosoy-dt1 の葉面積は，各年次における分枝伸長に関わる環境に左右されやすいことを示していると推察される。

また，草高 40cm の相対光強度だけでなく，Fig.VII-14 に示す群落上層 40cm の相対光強度の減少量をもみても，栽植密度にかかわらず，常に無限伸育型＜有限伸育型であった。鳴神(1996, 1997)によれば，茎伸育性にかかわらず，受光態勢が良好で小葉面受光量の大きい品種は，小葉面積が小さく，葉面積の垂直分布が比較的均一である。また，土屋ら(1986)は，長葉と丸葉の準同質遺伝子系統を用いて栽植密度反応を比較し，疎植および標準密度条件では丸葉系統が，密植条件では透光性の良い小葉面積の小さい長葉系統が多収を示している。さらに，磯田(1996)によると，無限伸育型早生品種は，密植にするほど，受光態勢が良好となり，単位面積当り受光量が増加する。本試験もこれらの報告と同様に，密植時の無限伸育型品種の受光態勢の有利性が確認されたといえる。

受光態勢と，分枝総長を最も左右する登熟初期の分枝伸長量との間の関係を検討した結果，群落全体の光の透過効率を表す吸光係数との相関関係(Fig.VII-16)に比べて，群落上層部の相対光強度の減少量との相関関係が強かった(Fig.VII-17)。すなわち，分枝の伸長量と

光の透過率の関連性は、ダイズ群落全体よりも群落上層において強く、その強い相関関係は登熟初期からみられ、既に発生している分枝の伸長には、群落下層部よりも上層部の光条件が重要であることを示唆している。

中野ら(2004)によれば、ダイズ品種タマホマレの分枝発生は、各節位の相対光強度 35%以下になると抑えられ、さらに相対光強度が 10%以下になると、分枝数の 40%が枯死するとしている。また、一方、著者らは、ダイズの栽植密度に対する分枝可塑性が分枝の発生数よりも、発生した分枝の伸長量と関係の深いことを明らかにした(阿古達木ら 2015)。すべての品種において、兩年次ともに開花始期(R1)に草高 40cm で相対光強度 40%を下回っていることから、草高 40cm 以上の群落上層部の受光態勢が分枝可塑性の発揮に重要であることが裏付けられる。

以上より、有限伸育型と比較した時の無限伸育型品種における分枝可塑性の高さを、分枝の発生および伸長過程からみると、疎植時における発生分枝数の多さ、登熟初期の分枝伸長速度の高さ、登熟中期における分枝伸長期間の長さなどの複数の要因が相互に関連した結果であり、この無限伸育型における分枝伸長速度の高さおよび密度反応の高さは、生殖生长期間における群落上層部の受光態勢の有利性により生じていると推察した。

第Ⅷ章 総合論議

1. 分枝可塑性における品種間差異の存在と、遺伝的特性との関連

ダイズ品種の栽植密度に対する収量の安定性と、分枝収量の栽植密度反応を、茎伸育性の異なる準同質遺伝子系統を含めて多数の品種・系統を供試し、5ヶ年にわたり調査した結果、分枝収量の栽植密度反応には明らかに品種間差異が存在し、その栽植密度に対して収量が安定している品種は、分枝の栽植密度反応が大きかった。

ダイズの分枝特性の評価は、従来、分枝数(有賀 1948)や草姿、分枝角度からみた分枝の形状(渡辺ら 1975)が主であり、分枝の伸長程度、特に本報のように、分枝の栽植密度反応の大きさ、すなわち、分枝可塑性からみた分枝特性の分類の試みは、収量安定性に関わる新しい育種目標を提示したといえる。

分枝可塑性の大きさは、早晩性また茎伸育性に強く影響されることが示唆され、晩生品種または無限伸育型品種で大きい傾向がみられた。また、すべての品種に共通して、無限伸育型が有限伸育型に比べて大きかった(第Ⅶ章-2)。しかし、上述のように主要な開花期関連遺伝子 E1, E2, E3, E4 や半無限伸育性遺伝子 Dt2 の分枝可塑性に及ぼす効果は、現在の所、明らかではなく、E1, E2, E3, E4 および Dt2 については、準同質遺伝子系統が入手しやすい品種を供

試して、分枝可塑性値を調べ、各遺伝子の効果を検証していく必要がある。特に、北海道においては、ダイズの栽培期間が他の地域に比べて短く、最も早生のユキホマレが $e1n1/e2/E3/e4$ 、中生品種のトヨムスメ、トヨハルカ $e1n1/e2/E3/E4$ 、道南向けの晩生品種ユウヅルが $E1/e2/e3/E4$ であることが分かっていることから、分枝可塑性を比較的大きくし、かつ成熟期を大幅に遅延させない開花期関連遺伝子の組み合わせを検討することが重要であろう。

さらに、分枝可塑性の大きさには、茎伸育性、開花期関連遺伝子以外の遺伝的要因の関与も示唆される。具体的には、トヨムスメとトヨハルカは遺伝的に非常に近い兄弟品種であり、上述のように茎伸育性と開花期関連遺伝子は同じであるが、分枝可塑性値は、その品種においてもトヨムスメがトヨハルカに比べて大きかった(試験 1, 2, 3, 5)。また、供試した米国品種においても Athow, LD00-3309, Jack, Williams はいずれも $e1as/E2/E3/E4$ で共通であるが、分枝可塑性値は、LD00-3309 > Jack > Williams > Athow であった(試験 5)。

茎伸育性、開花期関連性以外の分枝可塑性を支配する遺伝的要因の解明には、多数のダイズ品種と系統を供試して分枝可塑性を調査し、同じ茎伸育性と早晚性を持つ品種群に区分し、それぞれのグループの中で分枝可塑性の程度が大、中、小それぞれの基準となる品種の選定が重要となる。そのためには分枝可塑性の簡易評価の開発

が不可欠であろう。

2. 分枝可塑性の簡易評価のさらなる改良

試験 4, 6 の結果から, 栽植密度を変化させた時の分枝総長の品種間差異は分枝の発生ではなく, 分枝の伸長程度における品種間差異により強く左右されるといえる。また, 前述のように, 無限伸育型品種も含めると, 子実肥大開始期(R5)まで, 分枝が伸長することがわかっている(阿古達木ら 2015)ので, 分枝可塑性の生育前半での評価は難しく, 簡易評価といえども R5 以降の調査は不可避であると考えられる。

しかし, 第 V 章で示したように, 分枝可塑性に年には年次間差異がみられ, 播種後 60 日の積算気温が低い年次, すなわち 6~7 月が低温に経過した場合や早期に播種した際に大きくなる(阿古達木ら 2014)。このことから分枝可塑性には年次間差異があり, 節位別分枝長を用いて分枝可塑性値を求める際には, 年次間差異の少ない, より安定した節位の選定について, 複数年次の調査により, 検討していく必要がある。

ダイズは一般に, 晩播すると分枝伸長期間が短くなり, 分枝の伸長が抑制される(大久保 1980)。このことを利用すると, 晩播による生育日数が短縮されることから, 栽培期間が短くなるとともに, 分枝長の短縮化により分枝長の測定が簡便になることが予想される。

この場合、最も推定程度の高い節位別分枝長の検討も必要であるが、分枝可塑性の品種間差異が正確に表れる範囲の晩播も、さらなる簡易評価の一方策となりうると考えられる。

また、株間段階畦を利用した分枝可塑性の推定には、畦内に生じる弱勢個体の存在が回帰係数を不安定化させ、適合性を低下させる問題の1つとなっている。すなわち、弱勢個体の分枝長は疎植条件であっても短い傾向にあることが、分枝可塑性値の推定値を不安定化させる。そこで、個体ごとの傾斜畦ではなく、数個体(5個体以上)をグループとして株間を傾斜する畦(個体群株間段階畦)を設置し、調査個体を複数個体から選抜して弱勢個体を除去できるような方法も適合性の向上を考える上で改善方法の一つであると考えられる。さらに、より簡便な簡易評価法を考察すると、適合性が多少落ちることがあっても、株間段階畦における典型的な分枝の栽植密度反応を図示した達観調査基準をつくり、それを基に多数品種を調査していくことも供試品種数を重視した方法といえる。

また、分枝可塑性は、密植時には頂芽優勢の強さを発揮し、疎植時には頂芽優勢を抑制するといった頂芽優勢の調整能力と言い換えることができる。特に、疎植条件における頂芽優勢現状の抑制程度は、主茎を切断する摘心処理後の分枝反応と共通性を持つとも予想される。今後、摘心による分枝可塑性の評価が可能であるかも、簡

易評価の1方策として検討する価値があろう。

3. 群落光環境からみた分枝可塑性の品種間差異が生じる要因と、その他の考えられる未解明な要因

第Ⅶ章-1において分枝可塑性は、早晚性、茎伸育性などの遺伝的要因に大きく左右されることを明らかにし、第Ⅳ章-2において無限伸育型品種の分枝可塑性の高さは群落光環境からみると、登熟期間における群落上層部の光透過性の良さに由来することを明らかにした。しかし、この分枝可塑性の品種間差異に関する多くの未解明な要因が存在すると思われる。

上述のように、分枝可塑性は疎植条件における頂芽優勢現象の発現程度の弱さととらえることもできることから、頂芽優勢を促進するオーキシン(Huff and Dybing 1980)、分枝の伸長を促進し頂芽優勢を抑制するサイトカイニン(Kokubun and Honda 2000)の分泌量とそのバランスが品種によって異なることも予想される。また、近年、土壌中のリン酸が不足すると、根に生成されるストリゴラクトンの分泌量が増加し、アーバスキュラー菌根菌の感染を促進する一方で、余分な液芽の伸長を抑制することが知られている(経塚 2014)。分枝可塑性の品種間差異についての生理的解明には、これらの関連が予想されるホルモン活性の品種間差異の検討が不可避であると考えられる。

また、分枝可塑性の品種間差異を、分枝長の推移から生育ステージ別にみると、分枝可塑性の大きな品種における疎植時の旺盛な分枝総長の増加は、開花始期(R1)から着莢始期(R3)までの分枝伸長速度の高さと、着莢始期(R3)から子実肥大開始期(R5)までの分枝伸長の継続期間の長さによってもたらされている(阿古達木ら 2015)ことが分かっている。このことから、分枝可塑性に優れた品種は、栄養生長と生殖生長が重なり、最も養分吸収量が多い開花始期(R1)から着莢始期(R3)までの期間(橋本 1980)に、主茎の莢の成熟と養分競合しながらも分枝を長く伸長させる能力を有する、すなわち、登熟初期の養分競合に絶えうるだけの養分吸収量や根粒活性の高さを維持していると考えられる。今後、作物栄養学的な見地から分枝可塑性に関わる品種間差異を検討していくことも重要であろう。

4. 分枝可塑性改良育種における今後の展望

Fig.VIII-1 に高分枝可塑性品種の育成に関する展望を示した。本報においては分枝可塑性の評価法と、今後の育種のために不可欠な簡易評価の一部を検討したに過ぎず、高い分枝可塑性を持つ品種を育成するためには、下記のような多くの段階があると考えられる。

まず、第一に上述したように分枝可塑性に関する簡易評価法を、株間段階畦以外の方法も含めて検討し、最も適した方法を確立することが重要である。

第二に、これを利用して多数の品種を調査し、茎伸育性と早晚性が共通するグループの中で、分枝可塑性の高い品種、低い品種、中間程度の品種を把握し、基準品種を選定することが不可欠である。

第三に、これらの分枝可塑性の高い品種と低い品種を交配し、茎伸育性および早晚性以外の分枝可塑性に強く関わる遺伝領域を明らかにする必要がある。

第四に、これら分枝可塑性に関わる遺伝領域を多収品種に導入し、戻し交配の後、多収かつ高分枝可塑性を持つ品種を育成することが不可欠である。

第五に、これら高分枝可塑性品種における多収安定性がより発揮される栽培環境を明らかにすることが必要である。

これらの過程が重要であると考えられ、これらの構想から考えると、本報はごく導入部分に過ぎず、今後も継続的なダイズ品種の分枝可塑性に関する作物学的、遺伝学的な研究を続けていく必要があるろう。

5. 分枝可塑性の収量安定性への貢献度の実証の必要性、目指すべき

分枝可塑性程度

また、分枝可塑性が大きいことは、広畦栽培による均一な疎植条件、欠株や播種ムラなどによる部分的疎植条件、あるいは晩播栽培や冷害、干ばつなどによる分枝の発生、伸長が抑制され、節数が不

足する環境における収量安定性に大きく貢献すると予想されることは前述の通りである。しかし、実際の栽培上、このような条件についてどの程度の収量補償を示し、減収程度を抑制するのか、その品種間差異を圃場試験において調査し、分枝可塑性の大きさが個体収量の補償率、子実収量の減収率に及ぼす影響を検討することは重要であろう。

また一方、分枝可塑性があり過ぎることは、エダマメのような集約栽培においては収穫管理を困難にすることも予想される。秋田、山形、新潟に県などのエダマメ産地では、1年に10～15回作期があり、3昨期ごとに早晚性、日長感応性の異なる品種を用いて、市場への継続的な出荷を目指している。連続3作期で同一品種を播種する中で、春播き栽培においては早播きするほど分枝の伸長が激しく、倒伏ひいては分枝の上位節に着生する莢の成熟ムラの要因となっている(平野ら 1988)。エダマメ栽培のように、収量よりも品質を特に重視し、集約的に栽培するケースでは、“枝の暴れない”分枝可塑性の小さな品種が、栽培管理を容易にすると考えられる。今後、地域の気象要因、栽培方法、用途に応じた分枝可塑性の適正值についても、前述の基準品種の選定が進んだ後に検討していく必要がある。

要 約

1. 緒 論

日本のダイズ品種の単収はここ 50 年増加がみられないのに対して米国品種の単収は年々増加しその収量格差はますます拡大しており、その要因の 1 つは栽植密度反応の違いによる収量安定性の差も関与すると考えられる。従来、ダイズ品種の分枝に関する評価は分枝数や分枝の形状にとどまり、分枝の栽植密度反応の大きさ(分枝可塑性)からみたダイズ品種間差異を検討した例は見られない。そこで、ダイズ品種の栽植密度に対する分枝可塑性の評価法と、それを用いた分枝可塑性における品種間差異に関連した作物学的要因の一部を明らかにしようとした。

2. 材料および方法

2009 年から 2013 年の 5 ヶ年にわたり 6 つの圃場試験を酪農学園大学実験圃場およびフィールド教育研究センター作物生産ステーション(江別市文京台)で実施した。また 2012 年についてのみ、1 つの圃場試験を北海道農業研究センター(札幌市豊平区)でも同時に試験をおこなった。

試験 1 として、2009、2010 年にそれぞれ日米各 1、2 品種を用いた 5 水準の栽植密度試験をおこない、日米品種の栽植密度反応の違い

を明らかにした。試験 2 として、2011、2012 年にそれぞれ日米各 3、2 品種を用いた栽植密度試験を実施し、分枝可塑性の程度(分枝可塑性値)を評価する方法を考案した。さらに、試験 3 として 2012、2013 年に有限伸育型、無限伸育型の主要 1 品種の栽植密度試験をおこない、試験 1、2、3 の 5 ヶ年の計 6 圃場試験における気象要因と分枝可塑性値の関係を検討し、最も安定した分枝可塑性値の算出基礎となる分枝形質を提示しようとした。

次に、試験 4 として、多品種の分枝可塑性値を調査し、将来の育種をつなげるために、株間に傾斜をつけた畦内の簡易的な栽植密度試験を実施し分枝可塑性値の簡易評価が可能かどうかを検討した。

さらに、試験 5 として、日米各 3 品種と茎伸育性遺伝子に関わる準同質遺伝子各 3 系統を 2012、2013 年に供試し、3 段階の栽植密度試験をおこない、試験 1、2 の結果もあわせて、分枝可塑性値と早晚性および茎伸育性との関係を明らかにしようとした。

最後に、試験 6 として、生育ステージがほぼ類似した日米各 1 品種と茎伸育性遺伝子に関わる準同質遺伝子各 1 系統を用い、栽植密度と群落光環境、分枝伸長過程との関係を調査し、茎伸育性が分枝可塑性値に及ぼす影響とその作物学的要因の一部を明らかにしようとした。

3. 結果

(1) 栽植密度反応における日米品種間差異(試験 1, 2009～2010)

米国品種が北海道品種に比べて 16.7 本 m^{-2} 以下の疎植区においては、2 ヶ年共通して有意に多収であった。また、米国品種の全体収量の密度反応は日本品種に比べて小さく、逆に、分枝収量の密度反応は大きかった。すなわち、米国品種は日本品種に比べて栽植密度にともなう分枝収量の変動が大きく、疎植時の主茎収量の減少を十分に補うことができる、すなわち、栽植密度に対する分枝可塑性が高いため、収量が安定していると判断できた。

(2) 分枝可塑性の評価法の検討(試験 1, 2, 2009～2013)

米国品種の子実収量は、4 ヶ年共通して北海道品種に比べて疎植区において有意に高く、また分散分析の結果、分枝収量における品種と栽植密度の交互作用は全年次で有意であった。すなわち、分枝可塑性の大きさには明らかな品種間差異が存在した。この分枝可塑性の大きさは、分枝収量、分枝莢数および分枝総長の密度反応としてもよく表され、これら分枝形質の個体占有面積に対する回帰係数(分枝可塑性値)で評価できると考えられた。

(3) 年次間差異からみた分枝可塑性値の安定性(試験 3, 2009～2013)

分枝可塑性値と生育期間の気象条件との関係を検討したところ、8～9月の登熟期間よりも分枝の旺盛に伸長する6～7月の積算気温が

分枝可塑性に關与しており、特に播種後 60 日の単純積算気温と分枝可塑性の間には負の相関關係がみとめられた。すなわち、分枝可塑性は榮養生長前半の積算気温が低い年次や早播した場合高くなり、その品種間差異も拡大する傾向にあることが示唆された、分枝可塑性値は分枝収量、分枝莢数に比べ分枝総長での評価が最も安定しており、その品種間差は年次を越えてもほぼ共通であった。

(4) 分枝可塑性の簡易評価法の考案(試験 4, 2013)

個体占有面積に 7 段階の傾斜をつけた畦(株間段階畦)を設置し、畦内の栽植密度反応を調査した。子実肥大開始期、成熟期において個体調査を実施し、個体占有面積にともなう分枝形質の回帰係数(分枝可塑性値の推定値)を求め、圃場試験における分枝可塑性値と比較した。適合性を各分枝形質に基づいた可塑性値の間で比較すると、子実肥大開始期と成熟期共通して、分枝総長に基づく可塑性値の適合性が分枝重、分枝重割合、分枝数、分枝数、分枝莢数、分枝/主莖比に比べて、高かった。さらに分枝を節位別にみると、初生葉および第一本葉節由来の分枝長に基づく可塑性の推定値が測定の簡便さ、適合性からみて最も適していると考えられた。

(5) 分枝可塑性と早晚性莖伸育性との關係(試験 5, 2012~2013)

開花日数および生育日数と分枝可塑性値との關係を検討したところ、兩年とも有意な正の相関關係がみとめられ、晩生品種ほど分枝

可塑性値が高かった。また、茎伸育性との関係を見たところ、無限伸育型の分枝可塑性値が有限伸育型に比べて明らかに高かった。また、ほぼ同じ早晚性と茎伸育性を持つ品種でも分枝可塑性に差異がみられることから、両特性とは独立した分枝可塑性の品種特性の存在も示唆された。

(6) 分枝伸長過程と受光態勢からみた、分枝可塑性の品種間差異における要因解析(試験 6, 2012~2013)

分枝可塑性値と分枝伸長過程と受光態勢の関係を2ヶ年にわたり検討したところ、共通して無限伸育型2品種・系統の分枝総長に基づく分枝可塑性値は有限型2品種・系統に比べて高く、この分枝総長における両者の差異は分枝数よりも平均1分枝長に由来した。この平均分枝長における茎伸育性間の差異を分枝伸長過程からみると、主としてR1(開花始期)からR3(着莢期)の伸長最盛期における伸長量の差異に起因した。加えて、R3からR5(子実肥大開始期)においても無限伸育型品種は分枝伸長が続くのに対して、有限伸育型品種は伸長が止まることも関与していた。

これらR1以降の分枝伸長の品種間差異と、登熟初期の吸光係数との間には明確な関係は見いだせなかったが、群落上層部の40cmの相対照度の減少量との間には、登熟期を通じて有意な負の相関関係が確認できた。すなわち、茎伸育性の違いによるダイズ品種の分

枝可塑性の差異は、分枝発生数よりも分枝伸長量の差異に由来し、この無限伸育型品種の分枝伸長の密度反応の大きさは、群落上層部の受光態勢の有利性により生じていると推察した。

4. 結論

ダイズの栽植密度に対する分枝可塑性には品種間差異が存在し、それは個体占有面積に対する分枝長の回帰係数で評価できた。その分枝可塑性値は晩生品種および無限伸育型品種で大きい傾向にあり、この無限伸育型品種の高い分枝可塑性の要因の一つは、群落上層部の受光態勢の有利性により生じていた。さらに、分枝可塑性の向上育種のための簡易評価として、株間段階畦による第1本葉節由来の分枝長を用いる方法が有望であった。

謝辞

米国品種の入手に当たっては、イリノイ州立大学の Randall L. Nelson 博士，アーカンソー州立大学の Larry C Purcell 博士にご協力していただいた。また，北海道品種の供試に当たっては，北海道立総合研究機構作物グループの藤田正平博士にご協力して頂いた。また収量調査およびサンプリングについて，酪農学園大学 酪農学科飼料作物学研究室および循環農学類 作物学研究室の多くの学生諸君に協力を得た。これらの方々に心より感謝の意を表する。

引用文献

- Agudamu, Yoshihira, T. and Shiraiwa, T. 2016. Branch Development Responses to Planting Density and Yield Stability in Soybean Cultivars. *Plant Prod. Sci.* 19 : ○-○. (in press)
- 阿古達木・義平大樹・白岩立彦. 2015. 栽植密度に対するダイズ品種の収量安定性に及ぼす茎伸育性の影響. 一分枝可塑性の品種間差異と, 分枝伸長過程と受光態勢からみた要因解析—Research of One Health, 2015/October, 17-37.
- 阿古達木・荻野孝二・義平大樹・小阪進一・白岩立彦 2013a. 異なる栽植密度条件下における群落構造の日米ダイズ品種間比較. 日作紀 82(別 1)94-95.
- 阿古達木・義平大樹・小阪進一・白岩立彦 2013b. ダイズの栽植密度に対する分枝可塑性に及ぼす伸育性の影響—準同質遺伝子系統の比較—. 日作紀 82(別 1):96-97.
- 阿古達木・義平大樹・小阪進一・白岩立彦 2014. ダイズ品種の分枝可塑性の評価法—年次間差異とその要因を考慮した評価法の検討—. 日作紀 83(別 1)74-75.
- 有賀武典 1948. 大豆品種の生態型. 農業及び園芸. 23 : 617-620.
- Bernard, R. L. 1972. Two genes affecting stem termination in soybeans.

- Crop Sci. 12: 235-239.
- Banez, G., Gyokusen, K. and Saito, A. 1999. Plasticity in the branching characteristics of four year old *Quercus acutissima* and *Q. serrata* seedlings in response to low light intensity and additional fertilizer. Bulletin of the Kyushu University Forests 80: 27-39.
- Bisht, R.P., Toky, O.P. and Singh, S.P. 1993. Plasticity of branching in some important tree species from arid north-western India Arid Environments J.25:307–313.
- Board, J.E., Harville, B.G. and Saxton, A.M. 1990a. Branch dry weight in relation to yield increases in narrow-row soybean. Agron. J. 82: 540-544.
- Board, J.E., B.G. Harville, and A.M. Saxton. 1990b. Narrow-row seed-yield enhancement in determinate Soybean. Agron. J. 82:64-68.
- Board, J.E. and Kahlon, C.S. 2013. Morphological responses to low plant population differ between soybean genotypes. Crop Sci. 53:1109-1119.
- Carpenter, A.C. and Board, J.E. 1997a. Branch seed yield components controlling soybean yield stability across plant populations. Crop Sci. 37:885-891.
- Carpenter, A.C. and Board, J.E. 1997b. Growth dynamic factors

- controlling soybean yield stability across plant populations. *Crop Sci.* 37: 1520-1526.
- Chang, J. F. 1982. Yield and agronomic performance of semi-determinate and indeterminate soybean stem types. *Crop Sci.* 22: 97-101.
- Chen, G., and P. Wiatrak. 2011. Seeding rate effects on soybean maturity group IV — VIII for the southeastern production system. *Agron. J.* 103: 32-37.
- Cober, E. R. and Morrison, J. M. 2010. Regulation of seed yield and agronomic characters by photoperiod sensitivity and growth habit genes in soybean. *Theor Appl Genet* .120: 1005– 1012.
- Cooper, R.L. 1971a. Influence of early lodging on yield of soybeans. *Agron. J.* 63: 449-450.
- Cooper, R.L. 1971b. Influence of soybean production practices on lodging and seed yield in highly productive environments. *Agron. J.* 63: 490-493.
- Donald, C.M. 1963. Competition among crop and pasture plants. *Adv. Agron.* 15: 1-118.
- Duncan, W.G. 1986. Planting patterns and soybean yields. *Crop Sci.* 26: 584-588.

Fehr, W. R. and C. E. Caviness 1977. Stages of soybean development, Special Report 80. Cooperative Extension Service Agric. & Home Economics Exp. Sta., Iowa State Univ.

藤田正平・黒崎英樹・大西志全・笛木伸彦 2015. 道央転換畑地帯における大豆狭畦栽培の現状と適正な栽植密度. 北農 82 : 34-43.

古畑昌巳・森田弘彦・山下浩 2008. 暖地での狭畦密植栽培におけるダイズ品種サチユタカの乾物と子実生産の特徴. 日作紀 77(4):409-417.

後藤和男・山本正 1970. 豆類の冷害に関する研究 第3報 大豆の開花期前低温が花粉の発芽および受精に及ぼす影響. 北海道農試彙報. 100 : 14-19.

浜口秀生 2011. b. 関東・東海. 1.3.2 地域ごとの栽培の特徴. 1.3 栽培方法. 第1章 ダイズ. 豆類の栽培と利用. 国分牧衛編. 朝倉書店, 東京. 71-75.

Hartwig, E. E. 1973. Varietal development. Soybean: Improvement, Production, and uses. 187-210. In: Caldwell, E. E. (ed.). Agronomy 16. American Society of Agronomy, Madison, WI.

原正紀 1986. アズキ栽培の基礎理論. 基本技術編. アズキ. 6 : 4-5. 欠株による隣接株の補償率一例 宝小豆. 昭和33年 十勝農試 60×20cm 2本立て. 農業技術体系, 作物編. 農文協 東京.

- 橋本鋼二 1980. 大豆の生育と栄養. 生育の基本. 77-93. 斉藤正隆・大久保隆弘編. 大豆の生態と栽培技術, 農文協. 東京.
- 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露地栽培における生育の特徴 52(別 1): 56-57.
- Herbert, S. J. and Litchfield, G. V. 1982. Partitioning soybean seed yield components. *Crop. Sci.*22: 1074-1079.
- Heatherly, L.G. and Elmore, R.W. 2004. Managing inputs for peak production. In H.R. Boerma and J.E. Specht eds., *Soybeans: Improvement, Production, and Uses*, 3rd ed., Agronomy Monograph no. 16. ASA-CSSA-SSSA, Madison. 451-536.
- 平野幸二・大賀康之・三善重信 1988. 大豆早播栽培における収量停滞要因. 福岡農総試研報 A-8: 53-56.
- Huff, A. and Dybing, C. D. 1980. Factors affecting shedding of flowers in soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). *J. Exp. Bot.* 31:751-762.
- 池田武 2000. ダイズ個体群の純生産に関わる要因. 日作紀 69:12-19.
- 磯田昭弘・野島博・高崎康夫 1996. 密植条件下における無限伸幾型早生ダイズの葉群構造と受光態勢. 日作紀 65: 599-604.
- 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研究. 北海道大学学位論文.
- Johnson, B. J. and Harris, H. B. 1967. Influence of plant population on

- yield and other characteristics of soybeans. *Agron. J.* 59: 447-450.
- 紙谷元一 1980. 大豆の栽培条件に対する反応—節間長について—. 日育・日作北海道談話会報 20: 3-4. -
- Katsura., K., Homma K., Kawasaki Y., Purcell, L. C., Nelson, R. L. Yoshihira, T. and Shiraiwa, T. 2011. Factors causing the soybean yield gaps between Japan and USA. *Proc. 7th Asian. Crop Sci. Assoc. Conf., Bogor, Indonesia.* 38-43.
- 桂圭祐・義平大樹・本間香貴・ラリーパーセル・田中朋之・白岩立彦 2009. ダイズ単収の日米地域差の拡大要因に関する作物学的調査—米国における視察報告—. *作物研究* 54:149-154.
- 国分牧衛 1988. 大豆の Ideotype の設計と検証. *東北農試研報* 77: 77-142.
- 国分牧衛・朝日幸光 1985. 大豆の栽植密度に対する反応の品種間差異(予報) *日作東北支部報* 112-115.
- Kokubun, M. and Honda, I. 2000. Intra-raceme variation in pod-set probability is associated with cytokinin content in soybeans. *Plant Prod. Sci.* 3:354-359.
- 鴻坂扶美子・白井和栄・高宮泰宏 1995. 納豆用小粒大豆品種「スズマル」の収量および粒大に及ぼす播種期, 栽植密度, 窒素施肥の影響. *日育・日作北海道談話会報* 36:112-113.

- 窪田潤・竹田博之・石田茂樹・岡部昭典・亀井雅浩・奥野林太郎 2005.
中山間地域における「サチユタカ」の麦跡不耕起密条播種による
晩播栽培. 平成 17 年度近畿中国四国農業研究成果情報. 55-56.
- 黒田俊郎・郡健次・熊野誠一 1992. ダイズの花房次位別着莢に及ぼ
す栽植密度の影響. 日作紀 61:425-432.
- Kurokawa, S., Makita, H. and Shibuya, Tomoko 2015. Canopy
height-to-row spacing ratio as a simple and practical onsite index to
determine the time for terminating *Ipomoea coccinea* control in the
Japanese soybean-growing systems. *Weed Biology and Management*
15: 113-121.
- 経塚淳子 2014. 植物の分枝を制御するメカニズムの解析 新学
術領域研究 植物環境突破. *News Letter* 5:20
- Lehman, W.F. and Lambert, J.W. 1960. Effects of spacing of soybean
plants between and within rows on yield and its components. *Agron. J.*
52:84-86.
- Lee, C. D., Egli, D.B. and Tekrony, D.M. 2008. Soybean response to
plant population at early and late planting dates in the mid-South.
Agron. J. 100: 971-976.
- Lueschen, W. E. and Hicks, D. R. 1977. Influence of plant population on
field performance of three soybean cultivars. *Agron. J.* 69: 390-393.

McIntosh, M. S. 1983 Analysis of combined experiments. *Agron. J.* 75: 153-155.

前田和美 1987. 作物としてのマメ類 野生から栽培植物へ—マメの進化—. 256-260. 齊藤正隆・大久保隆弘編. マメと人間 —その一万年の歴史—, 古今書院. 東京.

Mann, J. D. and Jawarski, E. G. 1970. Comparison of stresses which may limit soybean yield. *Crop Sci.* 10: 620-642.

松永亮一・高橋将一・小松邦彦 2003. 耐倒伏性に優れるダイズ新品種「サチユタカ」の密植・無中耕無培土栽培. 日本作物学会九州支部会報 69:53-55.

Miura., H. and Gemma, T. 1986. Effect of square planting yield and its components of soybean under different levels. *Jpn. J. Crop Sci.* 55: 483-488.

Miura., H., Wijeyathugam, K. and Gemma, T. 1987. Variation in seed yield of soybean as effected by planting patterns. *Japan. Jour. Crop Sci.* 56:652-656.

中村隆一・後藤英次・杉川陽一 2011. 道央地域における秋まき小麦「きたほなみ」の高品質安定栽培法. 北農 78 : 299-304.

中世古公男・後藤寛治 1981. 大豆, 小豆, 菜豆の生産生態に関する比較作物学的研究 第3報 栽植密度を異にした場合における大

- 豆の乾物生産. 日作紀 50 : 38-46.
- 中村大四郎・横尾浩明 1986. 播種期拡大による大豆栽培の安定(1).
農業及び園芸 61 : 62-66.
- 鳴神英喜・磯田昭弘・野島博・高崎康夫 1996. ダイズ群落における葉群構造と受光態勢の品種間差異. 日本作物学会関東支部会報 11 : 76-77.
- 鳴神英喜・磯田昭弘・野島博・高崎康夫 1997. 異なる栽植密度におけるダイズの草型と受光態勢. 日本作物学会関東支部会報 12 : 62-63.
- 中野尚夫・平田清則・大西政夫. 2004. ダイズの栽植密度による光受容の変化と生育・収量. 日作紀 73 : 175-180.
- 中野尚夫・河本恭一・石田喜久男. 2001. ダイズにおける栽植様式が節位別分枝の発生と生育に及ぼす影響. 日作紀 70 : 40-46.
- 西山登・亀川昭・藤原帝見・鶴内孝之 1987a 転換畑大豆の播種期・茎重および子実重の関係. 九州農業研究 49 : 54.
- 西山登・亀川昭・藤原帝見・鶴内孝之 1987b, 長崎県における転換畑秋大豆の播種期・茎重および子実重の関係並びに播種適期幅の拡大. 長崎県農林試研報(農業部門)15 : 85-93.
- 農林水産省 2014. 大豆のまめ知識. www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/daizu/d_tisiki/. (2016年1月13日)

Norsworthy, J. K. 2004. Soybean canopy formation effects on pitted morningglory (*Ipomoea lacunosa*), common cocklebur (*Xanthium strumarium*), and sicklepod (*Senna obtusifolia*) emergence. *Weed Sci.* 52: 954-960.

大久保隆弘 1980. 環境条件と大豆の生育 播種期と大豆の生育. 106-111. 齊藤正隆・大久保隆弘編. 大豆の生態と栽培技術, 農文協. 東京.

大西志全・鴻坂扶美子・藤田正平 2012. 近年の北海道ダイズ育成系統の収量性と外来遺伝資源の導入効果の検証. 日育・日作北海道談話会報 53: 65-66.

大庭寅雄 1980. 地域別栽培技術 九州. 323-362. 齊藤正隆・大久保隆弘編. 大豆の生態と栽培技術, 農文協. 東京.

Parvez, A.Q., Gardner, F.P. and Boote, K.J. 1989. Determinate- and indeterminate-type soybean cultivar responses to pattern density, and planting date. *Crop Sci.* 29: 150-157.

Rigsby, B. and Board, J.E. 2003. Identification of soybean cultivars that yield well at low plant populations. *Crop Sci.* 43: 234-239.

齋藤邦行・平田和生・柏木陽子 2007. ダイズの花房別着莢に及ぼす畦間と栽植密度の影響. 日作紀 76:204-211.

Saito, M., Yamamoto, T., Goto, K. and Hashimoto, K. 1970. The

- influence of cool temperature before and after anthesis, on pod setting and nutrients in soybean plants. Proc. Crop Sci. Soc. Japan. 39: 511-519.
- 佐藤雄幸・松波寿典・井上一博・進藤勇人・眞崎聡 2008. 大豆「リュウホウ」の狭畦栽培に伴う形態特性と子実生産力. 東北農業研究 61:83-84.
- 佐藤尚・濃沼圭一・澤井晃 2010. イネ科飼料作物 トウモロコシ. 111-125. 日本草地畜産種子協会編. 牧草・飼料作物の品種概説, 日本草地畜産種子協会. 東京.
- Sionet, N. and Kramer, P. J. 1970. Effect of water stress during different stages of growth of soybeans. Agron. J. 69: 274-277.
- 白岩立彦・桂圭祐・島田信二・川崎洋平・村田資治・本間香貴・義平大樹・田中萌之・田中祐 2011 ダイズ単収の日米地域差の拡大要因に関する作物学的調査—視察報告(第2回)米国における圃場・作物管理—作物研究 56: 93-98.
- Smith, J. E. S. and Jordan, P. W. 1994. Stand density effects on branching in an annual legume (*Senna obtusifolia*). Ann. Bot. 74: 17-25.
- Spaeth, S. C., H. C. Randall, T. R. Sinclair, and J. S. Vendeland 1984. Stability of Soybean Harvest Index. Agron. J. 76:482-486.

Steingraeber, D. A.1982. Phenotypic plasticity of branching pattern in sugar maple (*Acer saccharum*). *American Journal of Botany* 69 : 638-640.

砂田喜与志. 1986. 北海道の豆作技術—大豆編—. 農業改良普及協会, 札幌.

鈴木孝子・渡辺祐志・前野眞司 1998. 道東地方における秋播小麦「ホクシン」の適栽培法 第1報 播種期と播種量について. *北農* 65 : 256-260.

高橋幹 2011. d. 九州. 1.3.2 地域ごとの栽培の特徴. 1.3 栽培方法. 第1章 ダイズ. 豆類の栽培と利用. 国分牧衛編. 朝倉書店, 東京. 81-86.

高橋信夫・御子柴公人 1987. ダイズの多収性育種. 小島睦夫編, わが国におけるマメ類の育種. 明文書房, 東京. 265-285.

Tanaka, Y., Fujii, K. and Shiraiwa, T. 2010. Variability of leaf morphology and stomatal conductance in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] cultivars. *Crop Sci.*50: 2525-2532.

田中義則・松川勲 1995. ダイズの草型, 畦幅および栽植密度が収量および収量構成要素に及ぼす影響. *日作紀* 64(別1) : 30-31.

Thseng, F. S. and Hosokawa, S. 1972 Significance of growth habit in soybean breeding. I . Varieal differences in characteristics of growth

- habit. Jpn. J. Breed. 22 : 261-268.
- 土屋武彦・伊藤武・砂田喜与志 1986. ダイズの葉形に関する Isogenic Lines の栽植密度反応. 日育・日作北海道談話会報 26:9.
- 内川修・福島裕助・松江勇次 2004. 水田転換畑作ダイズの主茎と分枝に着莢した子実タンパク質含有率と播種時期, 栽植密度の関係. 日作紀 73 : 287-292.
- USDA-ARS 1997. Agronomic Performance of Modern Asian Cultivars in the U.S. the Report of the Soybean Asian Variety Evaluation Project. USB and USDA-ARS. 1-102.
- 後木利三・山川勉 1986. 北海道の豆作技術—豆類編—. 農業改良普及協会, 札幌.
- Wilcox, J. R. 1977. Response of three soybean strains to equidistant spacings. Agron. J. 66: 409-412.
- Weber, C. R., Shibles, R. M. and Byth, D. E. 1966. Effect of plant population and row spacing on soybean development and production. Agron. J. 58: 99-102.
- 義平大樹・加藤宏・小阪進一・白岩立彦 2009. 栽植密度反応における日米ダイズ品種間の比較. 日育・日作北海道談話会報 50: 3-4.
- 義平大樹・小阪進一・白岩立彦 2010. 栽植密度反応における日米ダイズ品種間差異—北海道中央部における比較—. 日作紀 79(別

1)340-341.

義平大樹・阿古達木・小阪進一・白岩立彦 2013. 栽植密度に対する分枝可塑性における日米品種間比較－早晚性との関係－. 日作紀 82(別 1)98-99.

義平大樹 2015. トウモロコシ栽培における最適個体間距離の検討. 北畜草 3 : 91-95.

吉村康弘 2011. コムギの栽培 北海道のコムギ栽培 71-93. 小柳敦史・渡邊好昭編. 麦類の栽培と利用 作物栽培体系 3, 朝倉書店. 東京.

渡辺 巖・昆野昭晨・田渕公清 1975. 「大豆調査基準」における「草型」の分類について 日作紀 44 ; 479-480.

Method for evaluating and agronomic factors related to varietal differences in soybean branching plasticity in response to planting density

1. Abstract

Although seed yields of Japanese soybean cultivars have not increased over the last 50 years, US cultivars have shown continuous improvement. One of the factors underlying this expanding yield gap between Japanese and US cultivars is believed to be different in yield stability resulting from the cultivars' differential responses to planting density. Past investigations of soybean branching patterns have focused solely on branch number and branch architecture, and no attempt has been made to evaluate differential branching (branching plasticity) of soybean cultivars in response to planting density. Therefore, in this study we developed a method for evaluating branching plasticity of soybean cultivars in response to planting density and attempted to identify some of the agronomic factors underlying varietal differences in branching plasticity.

2. Materials and Methods

Six field experiments were conducted between 2009 and 2013 at the Rakuno Gakuen University experimental field and the Field Education and Research Center, Crop Production Station (Bunkyodai, Ebetsu City). In 2012 only, the same field experiment was simultaneously replicated at the NARO Hokkaido Agricultural Research Center (Toyohira-ku, Sapporo).

In Experiment 1, conducted in 2009 and 2010, one Japanese and two US cultivars were planted at five densities to clarify differential responses of Japanese and US cultivars to planting density. In Experiment 2, conducted in 2011 and 2012, three Japanese and two US cultivars were planted at different densities, and a method was developed to evaluate the degree of branching plasticity, based on assigning branching plasticity values. In Experiment 3, conducted in 2012 and 2013, one determinate type cultivar and one indeterminate type cultivar were planted at different densities. We investigated the relationship between climatic conditions and branching plasticity values in the six field experiments conducted over five years (two years each for experiment) and attempted to identify the branch architecture resulting in a base value that could be used for calculating the most stable branching plasticity value.

In Experiment 4, we investigated the branching plasticity values of multiple cultivars. We conducted a simple planting density experiment with decreasing inter-plant spacing within a single row to determine the potential of using such a method for simple evaluation of branching plasticity values in breeding.

In Experiment 5, conducted in 2012 and 2013, three Japanese and three US cultivars and three near-isogenic lines (NILs) with respect to stem growth habit were tested at three planting densities. The results of Experiment 5 were combined with those from Experiments 1 and 2 to clarify the relationship of branching plasticity value to earliness and stem growth habit.

In the final experiment, Experiment 6, we investigated the relationship between planting density and the light environment of the plant community and branch development to determine the influence of stem growth habit on branching plasticity value and to identify some of the relevant underlying agronomic factors.

3. Results

1) Differential responses of Japanese and US cultivars to planting density (Experiment 1, 2009 to 2010).

In both years, yields of the US cultivars were significantly higher than those of the Hokkaido cultivars under sparse planting, with planting densities of 16.7 plants per m² or less. Compared to Japanese cultivars, the US cultivars exhibited lower variability in total yield but greater variability in branch yield as a function of planting density. In other words, the change in branch yield in response to different planting densities was greater for the US cultivars than Japanese cultivars and was sufficient to compensate for the decrease in main stem yield under sparse planting conditions. Thus, we concluded that the yield of US cultivars is more stable due to their greater branching plasticity in response to planting density.

2) Method for evaluating branch plasticity (Experiments 1 and 2, 2009 to 2013)

In all four years, the seed yields of the US cultivars were higher than those of the Hokkaido cultivars under sparse planting. Furthermore, ANOVA indicated that the interaction between cultivar and planting density had a significant impact on branch yield in all years. In other words, clear differences in branching plasticity value exist among cultivars. Differences in branching plasticity are also evident from the

differential responses of branch yield, pod number per branch, and total branch length to planting density. We believe that branching plasticity can be evaluated using the regression coefficient (branching plasticity value) of land area per plant on these branch characteristics.

3) Stability of branching plasticity value across years (Experiment 3, 2009 to 2013)

Analysis of the relationship of branching plasticity values to climatic conditions during different growth periods revealed that accumulated temperature during the peak branch growth period (June to July) has a greater impact on branching plasticity than accumulated temperature during the grain filling period (August to September) and that a negative correlation exists between accumulated temperature in the first 60 days after seeding and branching plasticity. These observations suggest that branching plasticity will tend to be greater in years when accumulated temperature during the early stages of vegetative growth is low or in early sowing years, and that the varietal differences will also tend to be greater. In addition, total branch length was found to be a more stable indicator of branching plasticity than either branch yield or pod number per branch and to exhibit nearly identical varietal

differences across different years.

4) Proposal of a simple method for evaluating branching plasticity (Experiment 4, 2013)

Cultivars were planted with decreasing interplant spacing to create 7 land-area-per-plant levels within the same row, with the goal of being able to evaluate differential responses to plant density in a single row. Individual plants were inspected at the beginning of the seed filling and seed maturation stages; the resulting regression coefficients (i.e. estimated branching plasticity values) for land area per plant on branch characteristics were then compared to branching plasticity values from the field experiments. For both the beginning of the seed filling and seed maturation stages, the regression coefficient of land area per plant on total branch length was found to be a more accurate predictor of branching plasticity than the regression coefficient of any other branch characteristics, including branch dry weight, ratio of branch fresh weight, branch number, branch pod number, and branch to main stem ratio. Furthermore, based on ease of measurement and prediction accuracy, we believe that the length of branch arising from the primary leaf or the first leaf node is the most suitable predictor of branching

plasticity value.

5) Relationship between earliness or stem growth habit and branching plasticity (Experiment 5, 2012 to 2013)

A positive correlation was observed between branching plasticity value and days from sowing to beginning of seed filling or maturity, with later maturing cultivars exhibiting higher branching plasticity values. In addition, the branching plasticity values of indeterminate type cultivars were clearly higher than those of determinate type cultivars. That said, branching plasticity was found to vary even among cultivars with very similar maturation timing and stem growth habits, suggesting the existence of a cultivar-specific branching plasticity characteristic that is unrelated to these factors.

6) Factor analysis of varietal differences in branching plasticity from the standpoint of branch development and light-interception characteristics (Experiment 6, 2012 to 2013)

We investigated the relationship between branching plasticity values and branch development and light-interception characteristics over two years. In both years, estimated branching plasticity values based on

total branch length were found to be higher for the two indeterminate type cultivars and NILs compared to the two determinate type cultivars and NILs. The differences in total branch length were derived from differences in mean length of individual branches rather than differences in branch number. In terms of branch development, we found that this difference in mean branch length arises from differences in stem growth habit during the peak growth period from R1 (beginning of flowering) to R3 (pod set) as well as the observation that stem growth stops in determinate type cultivars between R3 and R5 (beginning of seed filling) but does not stop in indeterminate type cultivars.

Although we were not able to discern a clear relationship between varietal differences in stem growth habit starting at the R1 stage and light extinction coefficient during the early seed filling period, we did observe a significant negative correlation between stem growth habit and decrease in relative light intensity 40 cm above the plant community over the entire seed filling period. In other words, the varietal differences in branching plasticity among soy cultivars resulting from differences in stem growth habit are attributable to differences in length of individual branches and not branch number.

Further, the elongation of branches in response to increasing planting density confers an advantage to indeterminate type cultivars in terms of light interception at the top of the community.

4. Conclusions

Soybean cultivars exhibit varietal differences in branching plasticity responses to planting density, which can be evaluated using the regression coefficient of land area per plant on branch length. Branching plasticity values tend to be higher in late-maturing and indeterminate type cultivars; one of the factors underlying the higher branching plasticity value of indeterminate type cultivars is related to increased ability to intercept light above the plant community. In addition, we demonstrated the potential of a simple evaluation method based on a single row of plants with decreasing interplant spacing and measurement of the branch length arising from the first leaf node.

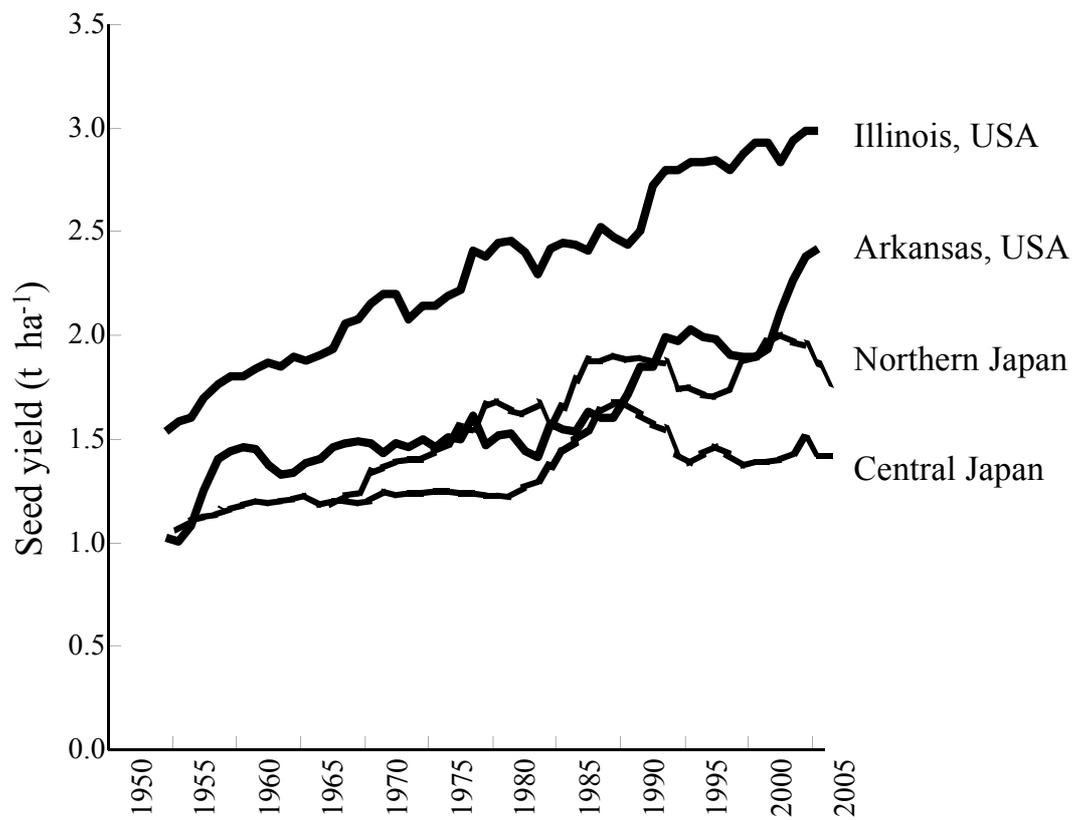


Fig. I -1. Changes in seed yield of Japanese and US soybean cultivars (Katsura et al. 2009).

Table II -1. Abstract of 6 field experiments.

No. of experiment	Title of experiment	Experimental location	Year	No. of tested cultivars	Cultivars and lines	Test contents	Description chapter
Exp. 1	Response of planting density of Japanese and US soybean cultivars	Rakuno	2009	2	One each of Japanese and US cultivar	Fine level planting density experiment	Chapter III
		Rakuno	2010	4	Two each of Japanese and US cultivar		
Exp. 2	The measurement of branch plasticity in soybean cultivar	Rakuno	2011	6	Three each of Japanese and US cultivar	Three level planting density experiment	Chapter IV
		Rakuno	2012	4	Two each of Japanese and US cultivar		
Exp. 3	The stability of branching plasticity value from the point of view of annual differences	NARO	2012	2	One each of Japanese and US cultivar	Three level planting density experiment	Chapter V
		Rakuno	2013	2	One each of Japanese and US cultivar		
Exp. 4	Simple method for evaluation of branch plasticity in soybean cultivars	Rakuno	2013	12	Three each of Japanese and US cultivar and three pairs of near isogenic lines differing in stem growth habit	Planting density experiment within row by the ridge which attached the inclination to density	Chapter VI
Exp. 5	Effects of stem growth habit on branch plasticity in soybean cultivars	NARO	2012	12	Three each of Japanese and US cultivar and three pairs of near isogenic lines differing in stem	Three level planting density experiment	Chapter VII (1)
		Rakuno	2013	12			
Exp. 6	Varietal difference in branching plasticity and factorial analysis from the point of view of branch development and	Rakuno	2012	4	One each of Japanese and US cultivar and one pair of near isogenic lines differing in stem growth habit	Three level planting density experiment, branch development, light-intercepting characteristics	Chapter VII (2)
		Rakuno	2013	4			

Rakuno:Field crop production station Rakuno Gakuen University

NARO:National agriculture research center for Hokkado region

Table II -2. Tested cultivar (Exp. 1)

Year	Hokkaido cultivar (determinate type)	US cultivar (determinate type)
2009	Toyomusume (TM)	Athow (AT)
2010	Toyomusume Toyoharuka (TH)	Athow LD00-3309 (LD)

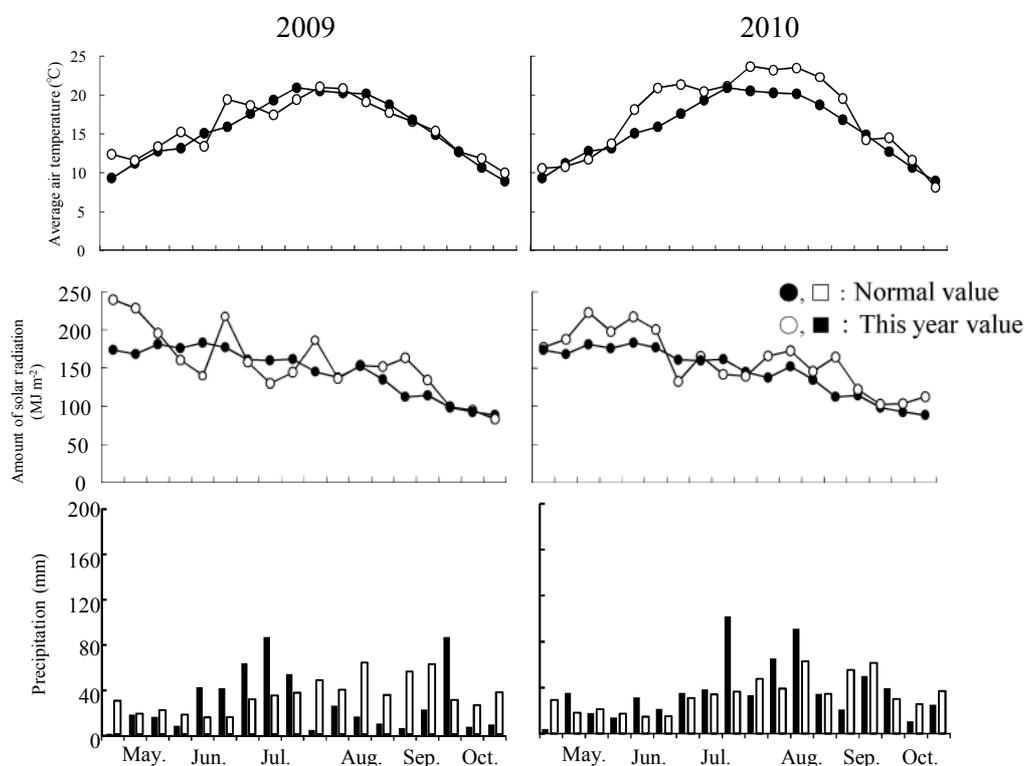


Fig. II -1. Changes in average air temperature, solar radiation and precipitation during the growing seasons (Exp.1, 2009-2010).

●, ○ and ■, □ indicate average temperature, solar radiation and precipitation in normal year and this year, respectively

Table II -3. Average air temperature and precipitation during the growing seasons (Exp.1, 2009-2010).

Month	Average air temperature (°C)			Precipitation (mm)		
	2009	2010	2003-2012*	2009	2010	2003-2012*
May	12.5	11.0	11.1	37	58	69
June	16.0	17.6	14.7	94	67	47
July	18.5	21.0	19.3	206	176	101
August	20.3	23.4	20.3	49	190	150
September	16.6	18.6	16.8	40	106	151
October	11.4	11.3	10.7	105	75	93
Total	2904	3135	2834	529	671	610

* indicates mean value of 2003-2012.

Table II -4 . Tested cultivar (Exp. 2)

Year	Hokkaido cultivar (determinate type)	US cultivar (indeterminate type)
2011	Toyomusume (TM)	Athow (AT)
	Toyoharuka (TH)	LD00-3309 (LD)
	Yuzuru (YZ)	Jack (JA)
	Toyomusume	Athow
2012	Yuzuru	Jack

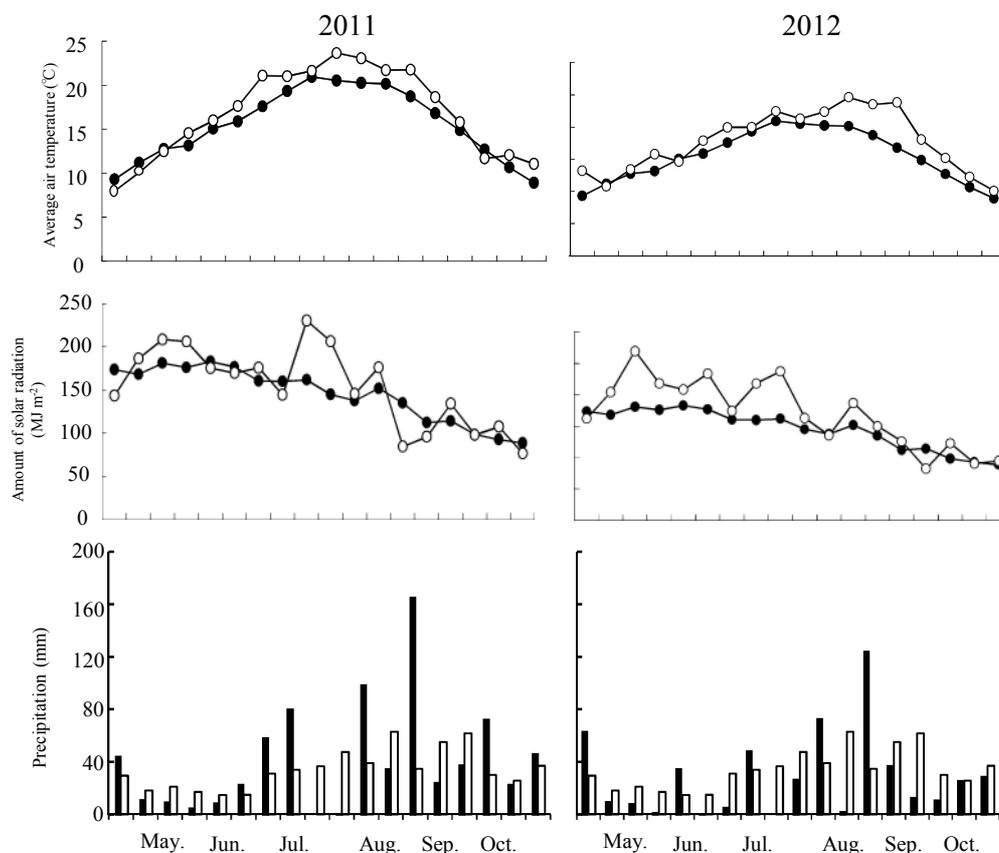


Fig. II -2. Changes in average air temperature, solar radiation and precipitation during the growing seasons (Exp.2, 2011-2012).

●, ○ and ■, □ indicate average temperature, solar radiation and precipitation in normal year and this year, respectively

Table II -5. Average air temperature and precipitation during the growing seasons (Exp.2, 2011-2012).

Month	Average air temperature (°C)			Precipitation (mm)		
	2011	2012	2003-2012*	2011	2012	2003-2012*
May	10.3	12.5	11.1	69	62	69
June	16.1	16.0	14.7	40	77	47
July	21.4	20.5	19.3	141	81	101
August	22.8	22.9	20.3	137	205	150
September	18.7	21.8	16.8	231	196	151
October	11.6	12.4	10.7	145	116	93
Total	3067	3247	2834	762	736	610

* indicates mean value of 2003-2012.

Table II -6 . Tested cultivars (Exp. 3)

year	Experimental location	Hokkaido cultivar (determinate type)	US cultivar (indeterminate type)
2012	NARO	Toyomusume (TM)	Athow (AT)
		Toyoharuka (TH)	LD00-3309 (LD)
	Rakuno	//	//
2013	Rakuno	//	//

Rakuno:Field crop production station Rakuno Gakuen University

NARO:National agriculture research center for Hokkado region

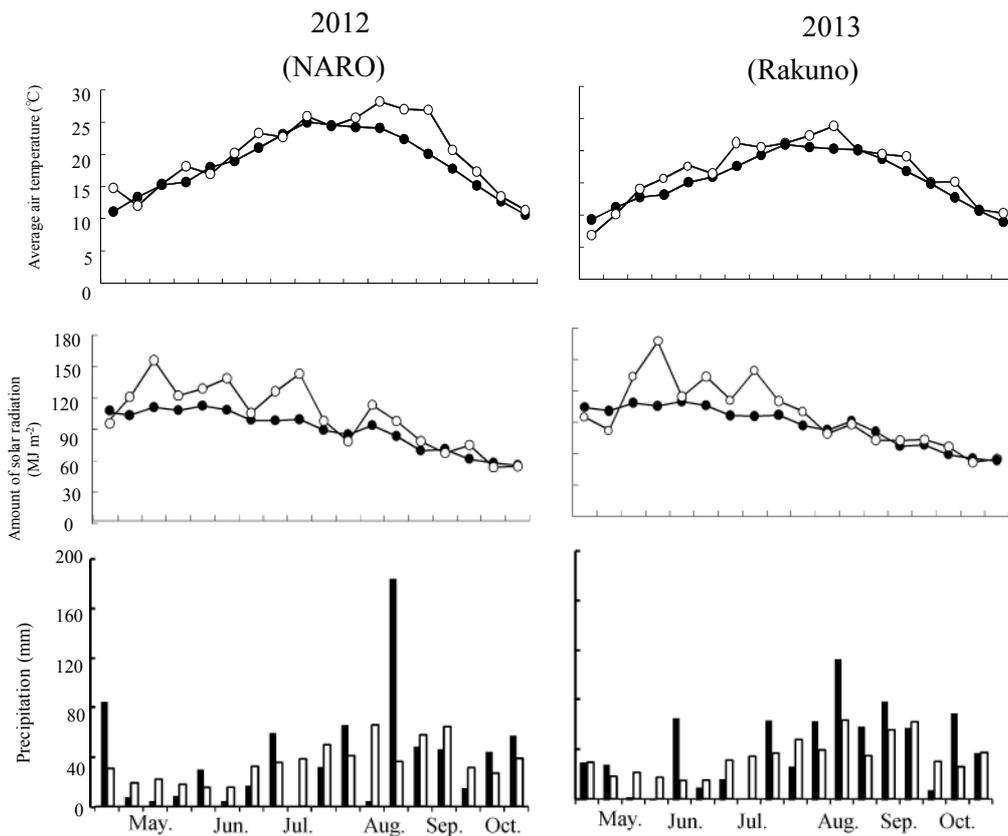


Fig. II -3. Changes in average air temperature, solar radiation and precipitation during the growing seasons (Exp.3, 2012-2013).

●, ○ and ■, □ indicate average temperature, solar radiation and precipitation in normal year and this year, respectively

Table II -7. Average air temperature and precipitation during the growing seasons in Exp.3 (2012 NARO , 2013 Rakuno).

Month	Average air temperature (°C)			Precipitation (mm)		
	2012 (NARO)	2013 (Rakuno)	2003-2012*	2012 (NARO)	2013 (Rakuno)	2003-2012*
May	11.8	10.5	11.1	91.5	61.5	69
June	15.4	16.6	14.7	40.5	77.0	47
July	20.1	20.9	19.3	72.5	81.0	101
August	21.9	22.0	20.3	97.5	204.5	150
September	20.8	17.9	16.8	266.5	196.0	151
October	11.7	12.0	10.7	110.5	115.5	93
Total	3117	3064	2834	679	736	610

* indicates mean value of 2003-2012.

Rakuno:Field crop production station Rakuno Gakuen University

NARO:National agriculture research center for Hokkado region

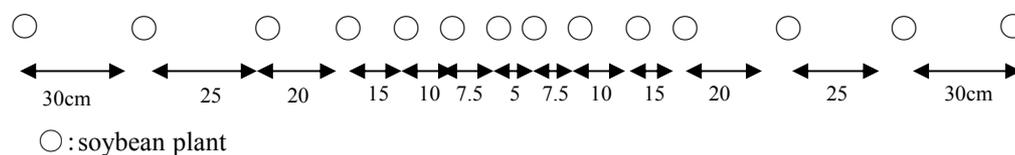
Table II -8. Tested cultivars and near isogenic lines (Exp. 4, 2013).

Hokkaido cultivar (determinate type)	US cultivar (indeterminate type)	Near-isogenic line	
		(determinate type)	(indeterminate type)
Toyomusume (TM)	Athow (AT)	Williams-dt1 (WL-dt1)	Williams-Dt1 (WL-Dt1)
Toyoharuka (TH)	LD00-3309 (LD)	Stressland × Tochinagaha-dt1 (ST-dt1)	Stressland × Tochinagaha-Dt1 (ST-Dt1)
Yuzuru (YZ)	Jack (JA)	Harosoy-dt1 (Ha-dt1)	Harosoy-Dt1 (Ha-Dt1)

Table II -9. The land area per plant in row by the ridge which attached the inclination to density (Exp. 4, 2013).

Plant number	1,14	2,13	3,12	4,11	5,10	6,9	7,8
land area per plant (100×cm ²)	19.5	16.5	13.5	10.5	7.5	5.25	3.75

Fig. II -4. The row spacing the ridge which attached the inclination to density for simple measurement.



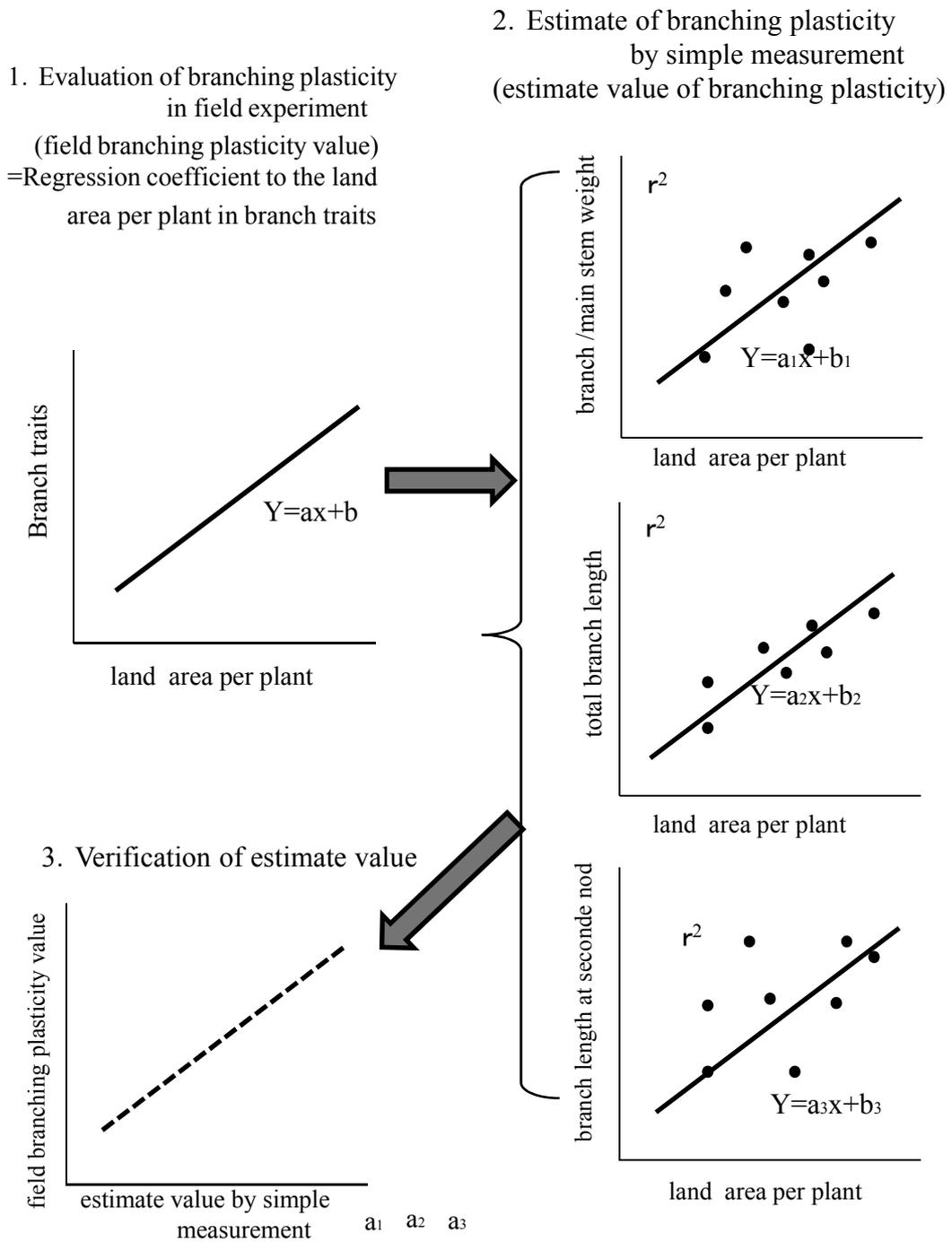


Fig. II -5. Verification procedure of estimate value in branching plasticity by simple measurement (Exp. 4, 2012).

Table II -10. Tested cultivars and near isogenic lines (Exp. 5)

Year	Experimental place	Hokkaido cultivar	US cultivar	Near-isogenic line	
		(determinate type)	(in determinate type)	(determinate type)	(indeterminate type)
2012	NARO	Toyomusume	Athow	Williams-dt1	Williams-Dt1
		(TM)	(AT)	(WL-dt1)	(WL-Dt1)
		Toyoharuka	LD00-3309	Stressland ×	Stressland ×
		(TH)	(LD)	Tochinagaha-dt1	Tochinagaha-Dt1
		Yuzuru	Jack	(ST-dt1)	(ST-Dt1)
		(YZ)	(JA)	Harosoy-dt1	Harosoy-Dt1
			(Ha-dt1)	(Ha-Dt1)	
2013	Rakuno Gakuen univ.	"	"	"	"

NARO :Nation agriculture research station for Hokkaido region

Table II -11. Tested cultivars and near isogenic lines (Exp. 6).

Year	Hokkaido cultivar	US cultivar	Near-isogenic line	
	(determinate type)	(indeterminate type)	(determinate type)	(indeterminate type)
2012	Yuzuru (YZ)	Jack (JA)	Harosoy-dt1 (Ha-dt1)	Harosoy-Dt1 (Ha-Dt1)
2013	„	„	„	„

Table II -12. Average air temperature and precipitation during the growing seasons in 2012 and 2013 (Exp. 6).

Month	Air temperature (°C)			Precipitation (mm)		
	2012	2013	2003-2012*	2012	2013	2003-2012*
May	12.5	10.5	11.1	85	62	69
June	16.1	16.6	14.7	40	77	47
July	20.9	20.9	19.3	56	81	101
August	22.9	22.0	20.3	106	205	150
September	21.8	17.9	16.8	178	196	151
October	12.4	12.0	10.7	69	116	93
Total	3268	3064	2853	533	736	610

* indicates mean value of 2003-2012.



Fig. II -6. Stratified clipping method in simulated soybean community
(Exp. 6, 2012-2013).

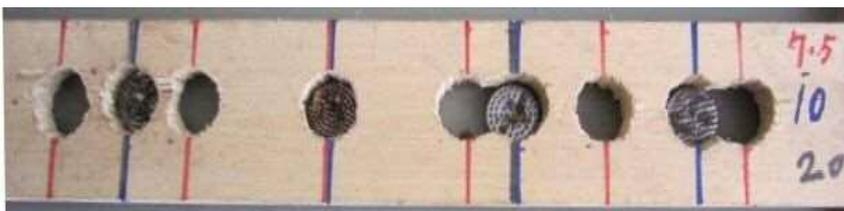


Fig. II -7. Wooden frame for control distance between plants in simulated soybean community (Exp. 6, 2012-2013).

Red line : $60 \times 7.5\text{cm}$ (sparse planting)
 Blue line : $60 \times 10\text{cm}$ (standard planting)
 Black line : $60 \times 20\text{cm}$ (close planting)

Table III-1. Seed yield and the related characteristics (Exp.1, 2009-2010).

Experimental year	Spacing (cm) × Row width (cm)	Plant density (m ⁻²)	land area per plant (100×cm ²)	cultivar	R1 stage (month/day)	R5 stage (month/day)	R8 stage (month/day)	Growth period (Sowing-R5) (day)	Growth period (Sowing-R8) (day)	Total seed yield (g m ⁻²)	Branch seed yield (g m ⁻²)	Branch yield per growth period (g m ⁻² day ⁻¹)	Branch pod number (m ⁻²)	Main stem length (cm)	Total branch length (cm)	No. of branch (pl ⁻¹)	Average branch length (cm pl ⁻¹)	Lodging score (0-4)
2009	50 × 10	20.0	5.0	Toyomasume	7/25	9/1	10/1	100 a	130 a	340 a	91 a	0.91 a	208 a	79 a	126 a	2.2 a	57 b	1.2 b
				Athow	8/2	9/17	10/24	116 b	153 b	338 a	128 b	1.10 b	249 a	90 a	111 a	2.8 a	40 a	0.9 a
	70 × 7.5	19.0	5.3	Toyomasume	7/23	8/29	9/29	98 a	129 a	345 a	108 a	1.10 a	228 a	74 a	111 a	2.5 a	45 a	0.5 a
				Athow	7/28	9/14	10/21	114 b	151 b	356 a	155 b	1.36 b	314 b	93 b	132 b	3.3 a	40 a	0.5 a
	60 × 10	16.7	6.0	Toyomasume	7/24	8/31	10/2	100 a	132 a	308 a	122 a	1.22 a	207 a	80 a	73 a	2.4 a	30 a	0.8 a
				Athow	8/1	9/15	10/22	114 b	151 b	335 b	144 b	1.26 a	264 b	95 b	112 b	3.3 b	34 a	1.1 a
	70 × 10	14.3	7.0	Toyomasume	7/22	8/30	10/1	99 a	131 a	282 a	118 a	1.20 a	281 a	61 a	107 a	2.7 a	39 a	0.3 a
				Athow	7/29	9/12	10/19	112 b	149 b	338 b	169 b	1.51 b	367 b	86 b	173 b	3.7 b	46 b	0.2 a
	70 × 15	9.5	10.5	Toyomasume	7/21	8/29	9/29	97 a	128 a	275 a	127 a	1.30 a	283 a	57 a	135 a	3.2 a	42 a	0.4 a
				Athow	7/29	9/11	10/17	110 b	146 b	344 b	215 b	1.95 b	371 b	77 b	190 b	4.3 b	45 b	0.2 a
	Cultivar							**	***	***	***	**	***	***	***	**	*	***
	Density							ns	ns	***	***	ns	***	**	***	**	**	***
Cultivar×Density							ns	ns	*	**	*	**	ns	***	ns	**	ns	
2010	50 × 10	20.0	5.0	Toyomasume	7/18	8/21	9/17	98 a	125 a	346 a	124 b	1.26 b	292 b	81 b	131 b	3.7 a	36 b	1.1 b
				Toyoharuka	7/20	8/21	9/17	99 a	126 a	328 a	103 a	1.04 ab	234 a	79 a	136 b	3.1 a	44 b	0.3 a
				Athow	7/18	9/10	10/20	118 b	158 b	344 a	125 b	1.06 ab	276 b	119 b	88 a	3.7 a	24 a	0.5 ab
				LD00-3309	7/25	9/14	10/24	122 c	162 c	374 a	117 ab	0.96 a	223 ab	135 ab	95 a	3.5 a	27 a	0.7 ab
	70 × 7.5	19.0	5.3	Toyomasume	7/19	8/21	9/18	99 a	127 a	334 a	157 b	1.59 b	334 b	80 b	159 b	3.9 ab	41 c	1.4 b
				Toyoharuka	7/20	8/22	9/18	99 a	126 a	368 a	130 ab	1.31 ab	244 ab	79 ab	81 a	3.6 a	22 a	0.7 a
				Athow	7/21	9/10	10/21	119 b	160 b	353 a	153 ab	1.29 ab	333 ab	106 ab	146 b	4.0 b	36 b	0.7 a
				LD00-3309	7/26	9/14	10/25	123 c	164 c	337 a	124 a	1.01 a	362 a	126 a	157 b	3.5 ab	45 c	0.8 a
	60 × 10	16.7	6.0	Toyomasume	7/18	8/20	9/17	98 a	126 a	321 a	147 b	1.50 b	406 b	77 b	173 b	4.6 b	38 a	1.2 b
				Toyoharuka	7/20	8/22	9/18	99 a	126 a	303 a	123 a	1.24 a	163 a	80 a	120 a	2.7 a	44 a	0.6 a
				Athow	7/21	9/8	10/18	116 b	156 b	343 a	163 bc	1.40 ab	342 bc	102 bc	119 a	4.0 b	30 b	1.0 a
				LD00-3309	7/26	9/14	10/22	123 c	161 c	353 a	182 c	1.48 b	420 c	122 c	162 b	4.4 b	37 b	0.8 a
	70 × 10	14.3	7.0	Toyomasume	7/17	8/19	9/15	96 a	124 a	306 a	154 a	1.60 b	320 a	76 a	186 ab	4.8 ab	39 b	1.1 b
				Toyoharuka	7/19	8/20	9/15	97 a	123 a	305 a	144 a	1.48 a	240 a	81 a	89 a	4.3 a	21 a	0.3 a
				Athow	7/21	9/9	10/19	117 b	157 b	375 b	219 b	1.87 c	424 b	113 b	210 b	5.4 b	39 b	0.5 a
				LD00-3309	7/24	9/13	10/24	121 b	163 c	383 b	201 b	1.66 b	448 b	128 b	179 ab	4.7 ab	38 b	0.7 a
	70 × 15	9.5	10.5	Toyomasume	7/14	8/17	9/12	95 a	121 a	266 a	167 b	1.77 b	254 b	69 b	203 b	5.1 b	40 b	1.0 b
				Toyoharuka	7/14	8/18	9/10	95 a	118 a	245 a	135 a	1.42 a	144 a	80 a	92 a	3.7 a	25 a	0.4 a
				Athow	7/18	9/7	10/14	115 b	152 b	351 b	224 c	1.94 c	400 c	103 c	240 c	4.7 b	51 c	0.4 a
				LD00-3309	7/23	9/11	10/22	120 c	161 c	375 b	248 c	2.07 c	483 c	119 c	326 d	5.5 b	59 c	0.7 ab
	Cultivar							***	***	*	***	**	***	*	***	**	**	
	Density							ns	ns	ns	**	*	***	ns	***	**	*	ns
	Cultivar×Density							ns	ns	***	***	*	***	ns	***	*	**	***

Means followed by the same letters in the same column are not significantly different at 5% level by Tukey-Kramer test.
 ***, ** and ns indicate significant at the 5, 1, 0.1% levels and not significant, respectively.

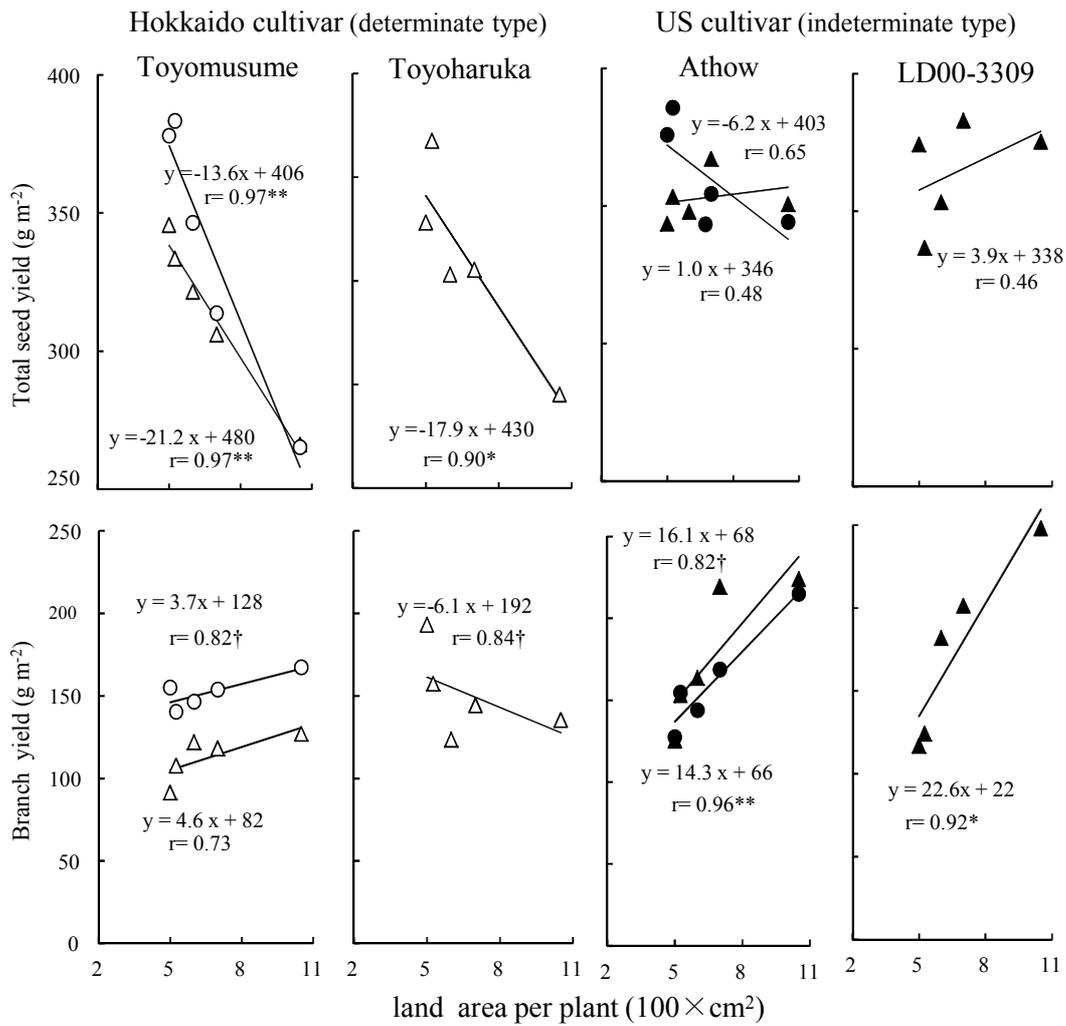


Fig. III-1. Effects of land area per plant on seed yield (Exp.1, 2009-2010).

○, ●, △, ▲ indicate Hokkaido, US cultivar in 2009 and 2010, respectively.
 †, *, ** indicate significant at the 10, 5, 1% levels, respectively.

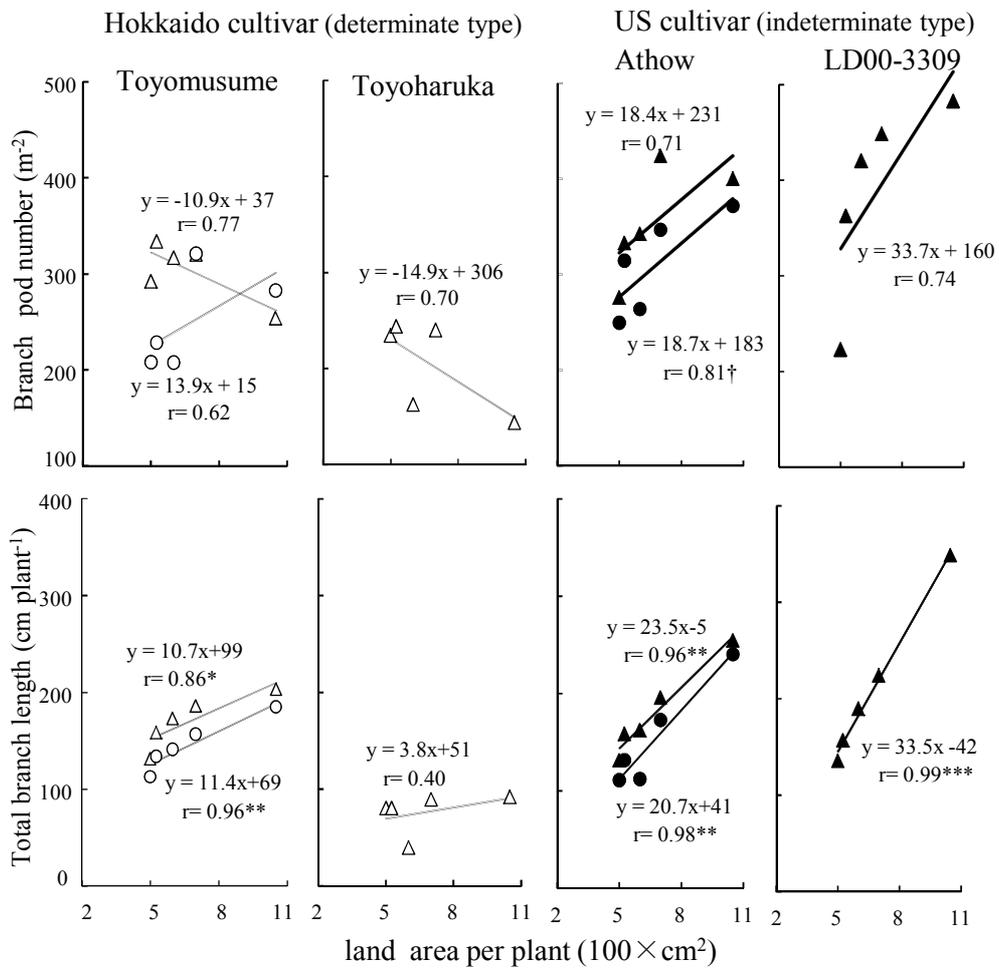


Fig. III-2 . Effects of land area per plant on branch pod number and total branch length (Exp.1, 2009-2010).

○, ●, △, ▲ indicate Hokkaido, US cultivar in 2009 and 2010, respectively.

†, *, ** indicate significant at the 10, 5, 1% levels, respectively.

Table IV-1. Seed yield and the related characteristics (Exp. 2, 2011-2012).

Experimental year	Spacing(cm) × Row width(cm)	Plant density (m ⁻²)	land area per plant (100×cm ²)	cultivar	R1 stage (month/day)	R5 stage (month/day)	R8 stage (month/day)	Growth period (Sowing-R5) (day)	Growth period (Sowing-R8) (day)	Total seed yield (g m ⁻²)	Branch seed yield (g m ⁻²)	Branch yield per growth period (Sowing-R5) (g m ⁻² day ⁻¹)	Branch pod number (m ⁻²)	Main stem length (cm)	Total branch length (cm)	No. of branch (pl ⁻¹)	Average branch length (cm pl ⁻¹)	Lodging score (0-4)	
2011	60×7.5	22.2	4.5	Toyomusume	7/15	8/31	9/30	97 a	126 a	324 ab	86 ab	0.89 b	184 bc	62 a	55 a	2.0 a	28 a	1.5 b	
				Toyoharuka	7/18	9/1	9/28	97 a	124 a	315 a	57 ab	0.58 ab	171 b	65 ab	69 a	1.5 a	26 a	0.7 ab	
				Yuzuru	7/17	9/7	10/9	104 bc	135 b	312 a	48 a	0.46 a	78 a	73 ab	87 ab	2.1 a	27 a	1.7 b	
				Athow	7/21	9/10	10/15	106 c	141 c	344 b	94 b	0.88 b	123 ab	77 b	115 b	3.3 b	21 a	0.0 a	
				LD00-3309	7/28	9/19	10/25	115 d	151 d	353 b	166 c	1.44 c	249 c	95 c	191 c	4.9 c	36 a	0.0 a	
	60×10	16.7	6.0	Toyomusume	7/13	8/29	9/30	95 a	126 a	208 a	70 a	0.74 a	230 b	68 b	37 a	2.8 b	41 ab	2.3 c	
				Toyoharuka	7/15	8/30	9/28	95 a	124 a	299 b	98 b	1.03 ab	206 b	55 a	56 a	1.9 a	30 a	1.0 ab	
				Yuzuru	7/18	9/7	10/10	104 bc	136 b	284 b	53 a	0.51 a	43 a	75 bc	71 ab	2.3 ab	43 ab	1.3 b	
				Athow	7/20	9/9	10/15	105 c	141 c	345 c	188 d	1.78 c	448 c	74 bc	101 b	4.0 cd	28 a	0.0 a	
				LD00-3309	7/29	9/18	10/25	115 d	151 d	342 c	205 d	1.79 c	558 d	90 d	225 c	4.7 d	47 b	0.0 a	
	60×20	8.3	12.0	Toyomusume	7/13	8/27	9/28	93 a	124 a	189 a	105 a	1.13 b	358 a	52 a	78 a	2.9 a	29 a	1.7 b	
				Toyoharuka	7/13	8/27	9/28	93 a	124 a	210 a	91 a	0.98 ab	373 a	50 a	69 a	2.6 a	27 a	0.7 ab	
				Yuzuru	7/19	9/6	10/10	103 b	136 b	258 ab	88 a	0.86 a	282 a	56 ab	81 a	2.3 a	36 ab	1.7 b	
				Athow	7/20	9/8	10/15	105 c	141 c	319 c	212 c	2.02 d	664 b	85 c	175 b	4.7 bc	42 b	0.0 a	
				LD00-3309	7/29	9/18	10/25	115 d	151 d	323 c	213 c	1.86 c	760 b	76 b	301 c	5.8 c	53 c	0.0 a	
	Cultivar	Density	Cultivar×Density	Jack	7/19	9/6	10/9	102 b	135 b	302 b	136 c	1.34 b	394 c	83 c	224 c	3.5 c	45 ab	0.3 ab	
				Toyomusume	7/13	8/27	9/28	93 a	124 a	189 a	105 a	1.13 b	358 a	52 a	78 a	2.9 a	29 a	1.7 b	
				Toyoharuka	7/13	8/27	9/28	93 a	124 a	210 a	91 a	0.98 ab	373 a	50 a	69 a	2.6 a	27 a	0.7 ab	
				Yuzuru	7/19	9/6	10/10	103 b	136 b	258 ab	88 a	0.86 a	282 a	56 ab	81 a	2.3 a	36 ab	1.7 b	
				Athow	7/20	9/8	10/15	105 c	141 c	319 c	212 c	2.02 d	664 b	85 c	175 b	4.7 bc	42 b	0.0 a	
2012	60×7.5	22.2	4.5	Toyomusume	7/26	9/2	9/29	111 a	138 a	325 a	101 a	0.91 a	295 a	68 a	104 b	2.6 b	40 a	0.0 a	
				Yuzuru	7/26	9/12	10/12	121 b	151 b	316 a	105 a	0.87 a	207 a	94 b	60 a	1.2 a	50 b	0.0 a	
				Athow	7/30	9/17	10/20	126 c	159 c	366 b	135 b	1.07 b	301 a	87 b	113 bc	3.7 c	30 a	0.0 a	
				Jack	7/27	9/11	10/11	120 b	150 b	352 ab	110 ab	0.91 a	439 b	113 c	123 c	3.5 bc	36 a	0.0 a	
				LD00-3309	7/27	9/11	10/11	121 b	150 b	324 bc	151 a	1.25 b	470 b	106 c	197 c	4.1 b	48 b	0.0 a	
60×10	16.7	6.0	Toyomusume	7/26	9/1	9/29	111 a	138 a	307 b	119 b	1.07 a	478 b	66 a	189 bc	4.1 b	46 ab	0.0 a		
			Yuzuru	7/26	9/12	10/12	121 b	151 b	263 a	137 ab	1.13 ab	249 a	87 b	130 a	3.0 a	43 ab	0.0 a		
			Athow	7/30	9/16	10/20	125 c	159 c	354 c	155 a	1.24 b	399 b	85 b	158 b	3.7 ab	42 a	0.0 a		
			Jack	7/27	9/11	10/11	121 b	150 b	324 bc	151 a	1.25 b	470 b	106 c	197 c	4.1 b	48 b	0.0 a		
			LD00-3309	7/27	9/11	10/11	121 b	150 b	352 ab	110 ab	0.91 a	439 b	113 c	123 c	3.5 bc	36 a	0.0 a		
60×20	8.3	12.0	Toyomusume	7/26	9/2	9/29	112 a	138 a	260 a	160 b	1.43 b	402 ab	58 a	217 a	5.5 b	40 a	0.0 a		
			Yuzuru	7/30	9/11	10/12	121 bc	151 b	299 b	105 a	0.87 a	295 a	79 b	201 a	4.1 a	50 b	0.0 a		
			Athow	7/30	9/15	10/19	124 c	158 c	334 c	202 bc	1.62 c	462 b	82 b	316 b	4.4 ab	71 c	0.0 a		
			Jack	7/30	9/10	10/12	120 b	151 b	317 c	228 c	1.90 c	604 c	111 c	444 c	5.0 ab	88 d	0.0 a		
			LD00-3309	7/30	9/10	10/12	120 b	151 b	317 c	228 c	1.90 c	604 c	111 c	444 c	5.0 ab	88 d	0.0 a		
Cultivar	Density	Cultivar×Density	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	**	*	***	**	***	ns	**	ns	
			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	***	*	***	*	***	ns	**	ns	
			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	***	*	***	*	***	ns	**	ns	
			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	***	*	**	ns	***	ns	**	ns
			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	***	*	**	ns	***	ns	**	ns

Means followed by the same letters in the same column are not significantly different at 5% level by Tukey-Kramer test.

***, ** and ns indicate significant at the 5, 1, 0.1% levels and nor significant, respectively.

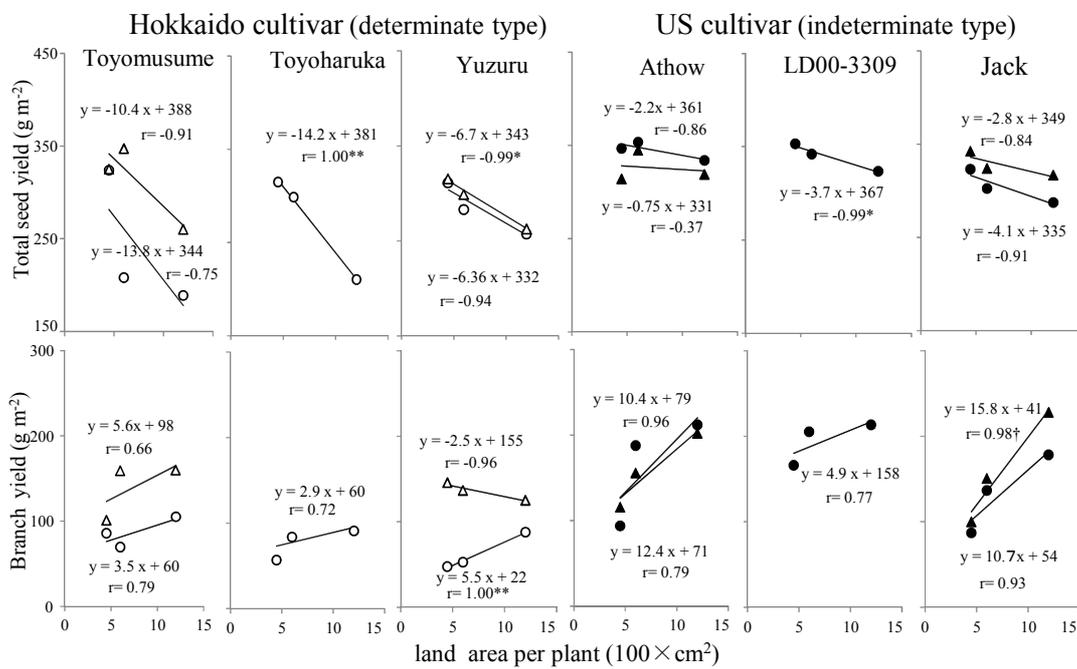


Fig.IV-1. Effects of land area per plant on seed yield (Exp. 2, 2011-2012).

○, ●, △, ▲ indicate Hokkaido, US cultivar in 2011 and 2012, respectively.

†, *, ** indicate significant at the 10, 5, 1% levels, respectively.

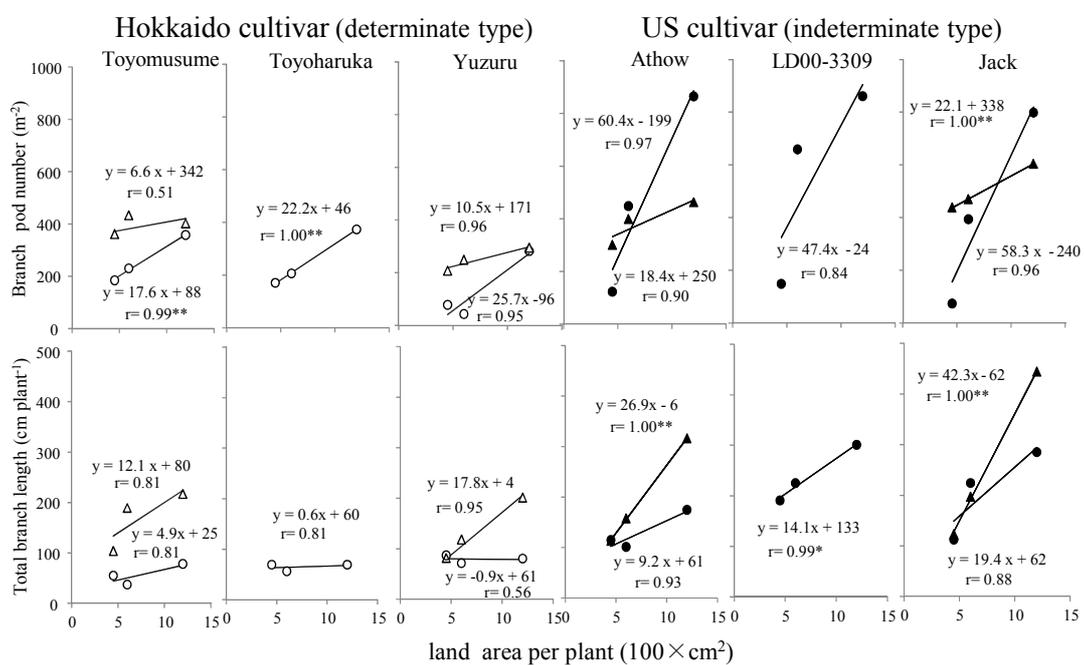


Fig.IV-2. Effects of land area per plant on branch pod number and total branch length (Exp. 2, 2011-2012).

○, ●, △, ▲ indicate Hokkaido, US cultivar in 2011 and 2012, respectively.

*, ** indicate significant at the 5, 1% levels, respectively.

TableIV-2. Regression coefficient to the land area per plant
in branch characteristics (Exp.1 and 2, 2009-2012).

Year	Cultivar	Branch yield	Pod number in branch	Total branch length
2009	Toyomusume	3.7 ± 1.2 a	13.9 ± 0.3 a	11.4 ± 2.5 a
	Athow	14.3 ± 0.5 b	18.7 ± 0.6 b	23.5 ± 0.6 b
2010	Toyomusume	4.6 ± 1.3 b	-10.9 ± 8.9 a	10.7 ± 1.5 b
	Toyoharuka	-6.1 ± 4.0 a	-14.9 ± 2.9 a	3.8 ± 2.8 a
	Athow	16.1 ± 0.7 c	18.4 ± 0.9 b	20.7 ± 0.9 c
	LD00-3309	22.6 ± 1.4 c	33.7 ± 1.6 b	37.5 ± 1.2 d
2011	Toyomusume	3.5 ± 4.5 a	17.6 ± 3.3 a	4.9 ± 3.7 ab
	Toyoharuka	2.9 ± 1.9 a	22.2 ± 5.8 a	0.6 ± 2.5 a
	Yuhzuru	5.5 ± 2.8 a	25.7 ± 7.8 a	-0.9 ± 2.7 a
	Athow	12.4 ± 3.0 b	55.4 ± 6.0 c	9.2 ± 1.8 c
	LD00-3309	4.9 ± 0.9 a	47.4 ± 2.7 b	14.1 ± 1.2 c
	Jack	10.7 ± 1.4 b	58.3 ± 3.4 bc	19.4 ± 1.8 d
2012	Toyomusume	5.6 ± 2.5 a	6.6 ± 4.7 a	12.1 ± 2.1 a
	Yuhzuru	-2.5 ± 2.6 a	10.5 ± 4.5 ab	17.8 ± 2.0 b
	Athow	10.4 ± 2.2 ab	18.4 ± 3.3 b	26.9 ± 3.0 c
	Jack	15.8 ± 2.2 b	22.1 ± 1.7 c	42.3 ± 2.4 d

Means followed by the same letters in the same column are not significantly different
at 5% level by Tukey-Kramer test.

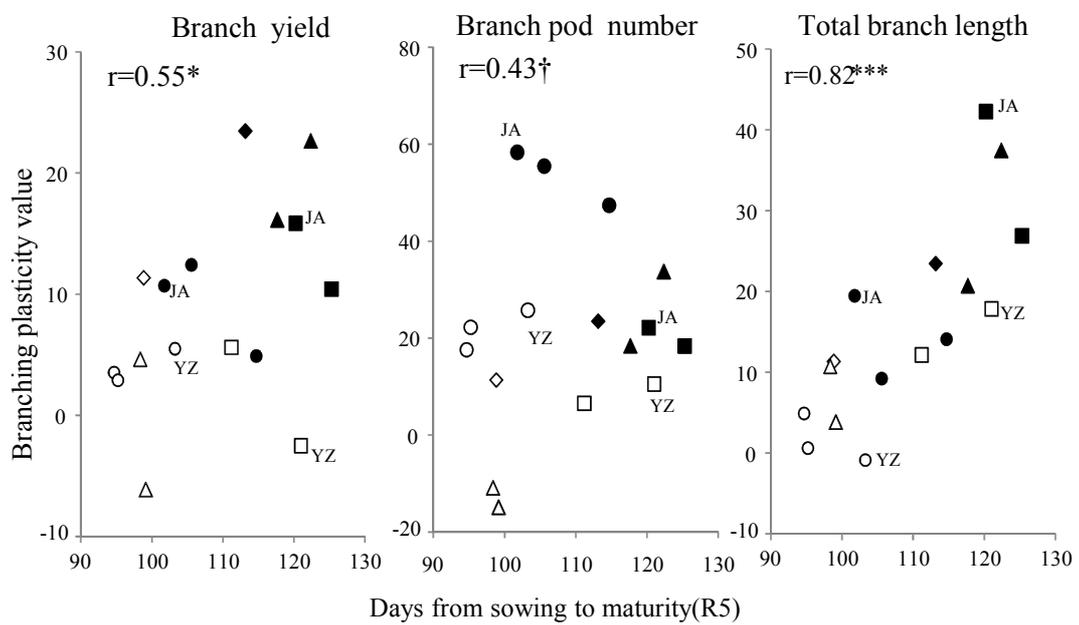


Fig.IV-3. Relationship between days from seeding to the beginning seed stage (R5) and regression coefficient to land area per plant in branch traits (branching plasticity value) in Exp.1 and 2 (2009-2012).

◇, ◆, △, ▲, ○, ●, □, ■ indicate Hokkaido, US cultivar in 2009, 2010, 2011 and 2012, respectively.

†, *, *** indicate significant at the 10, 5, 0.1% levels, respectively.

YZ: Yuzuru, JA:Jack.

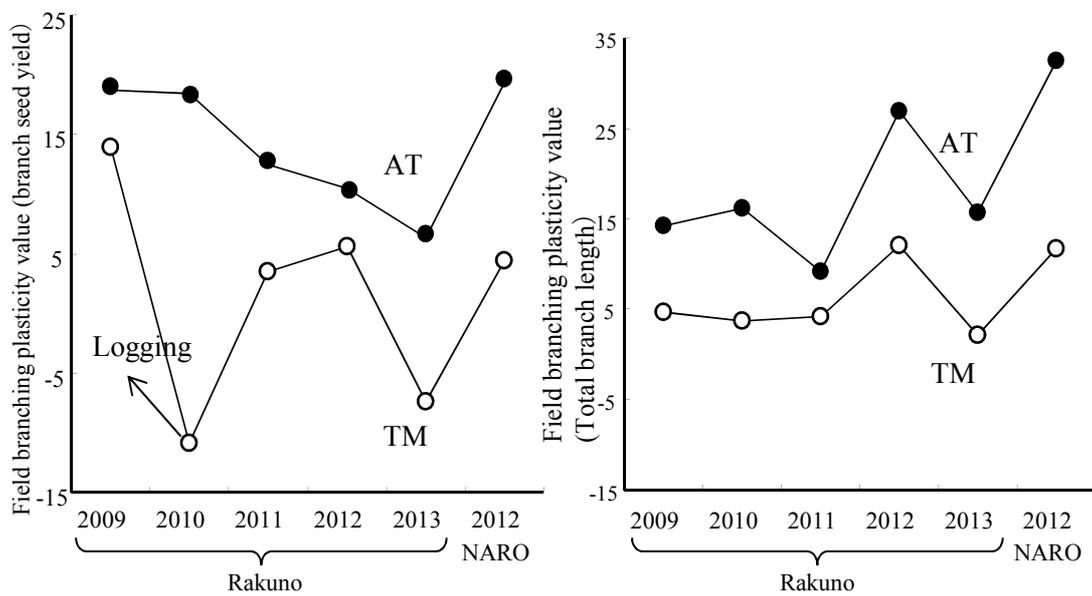


Fig. V -1. Annual difference in branching plasticity of Toyomusume and Athow (2009-2013 , Exp.1, 2, 3)

○ : Toyomusume (determinate type), ● : Athow(indeterminate type)

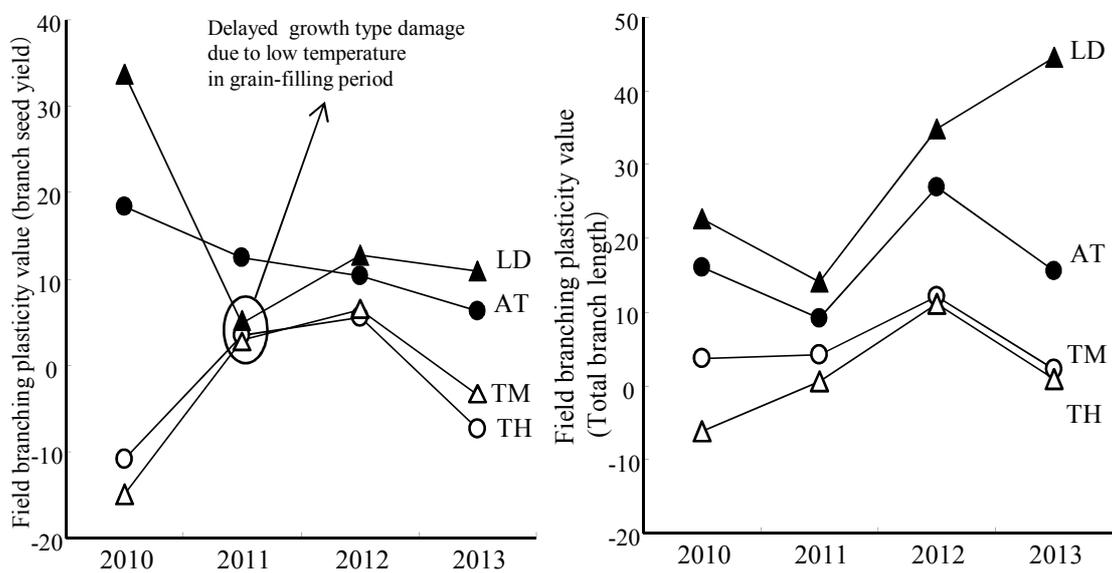


Fig. V -2. Annual difference in branching plasticity of Toyomusume Toyoharuka, Athow and LD00-3309 (2010-2013, Exp.1, 2, 3).

○, △: Determinate type, ●, ▲: Indeterminate type
 TM: Toyomusume, TH: Toyoharuka, AT: Athow, LD : LD00-3309

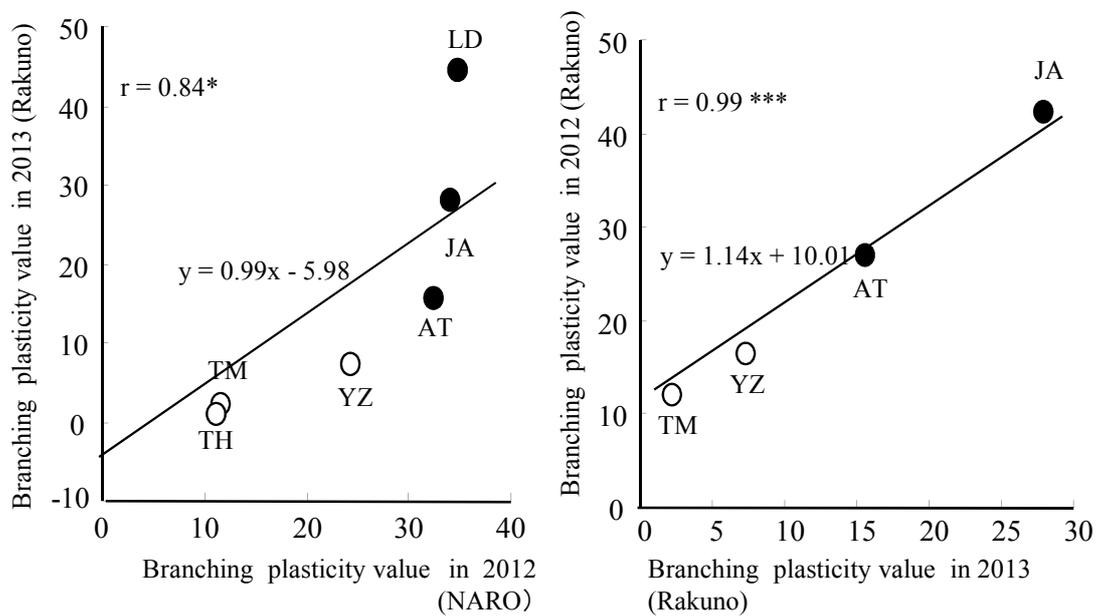


Fig. V-3. Relationship between regression coefficient to land area per plant in total branch length (branching plasticity value) in Exp.3 (2012 NARO , 2013 Rakuno)

○: Determinate type, ●: Indeterminate type

YZ : Yuzuru, JA : Jack, TM: Toyomusume, TH: Toyoharuka, AT: Athow, LD :LD00-3309

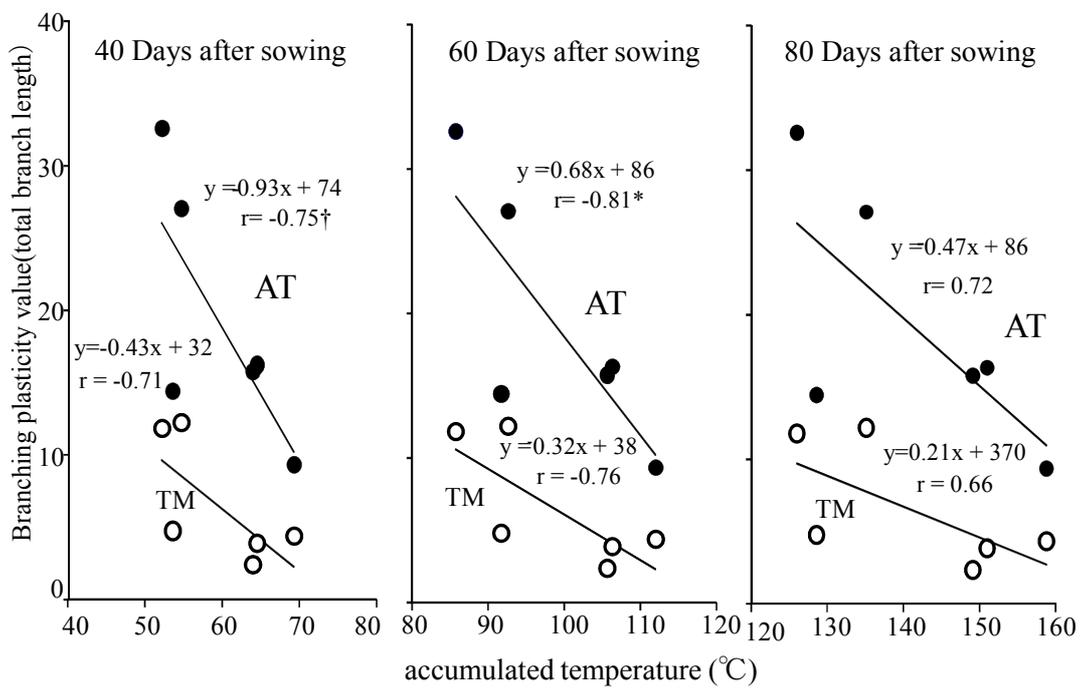


Fig. V-4. Relationship between accumulated temperature and branching plasticity value by total branch length (2009-2013, Exp.1, 2, 3).

○: Toyomusume (determinate type), ●: Athow(indeterminate type)

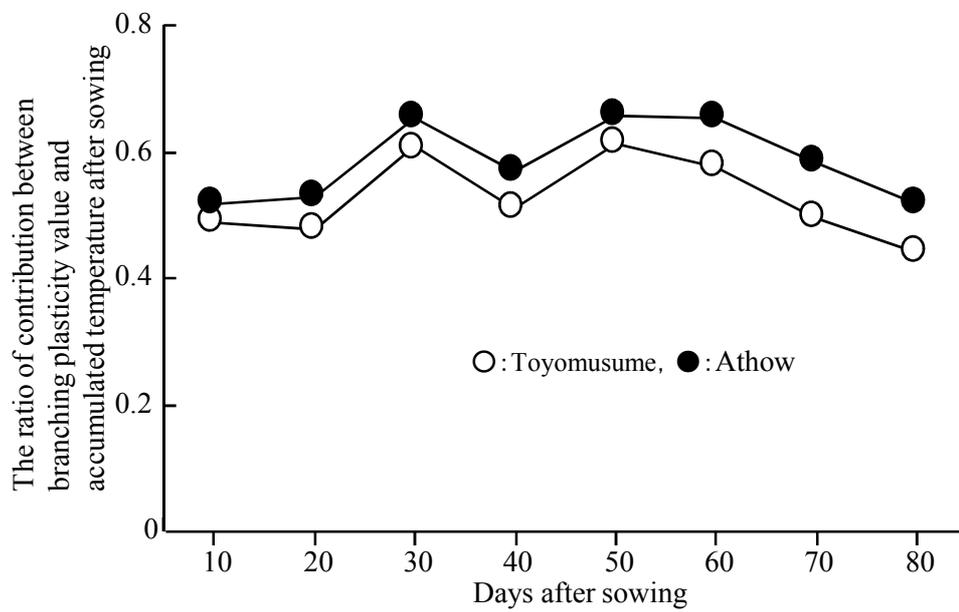


Fig. V-5. Changes in the ratio of contribution between branching plasticity value by total branch length and accumulated temperature after sowing (2010-2013, Exp.1, 2, 3).

○: Toyomusume (determinate type), ●: Athow(indeterminate type)

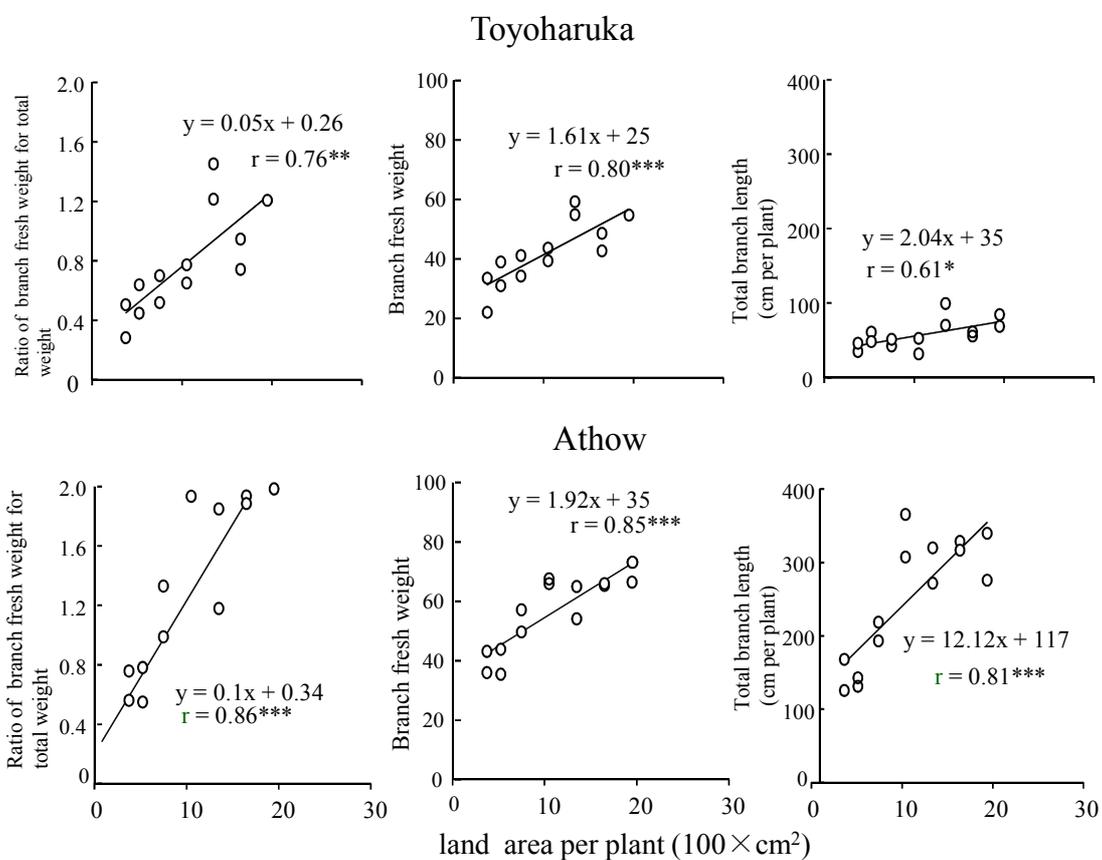


Fig.VI-1. Relationship between land area per plant, and ratio of branch fresh weight for total fresh weight, branch fresh weight and total branch length at R5 (beginning seed filling stage) in Toyoharuka and Athow (2013, Exp.4).

Regression coefficient of branch characteristics to land area per plant indicate estimate value of branching plasticity value by simple measurement

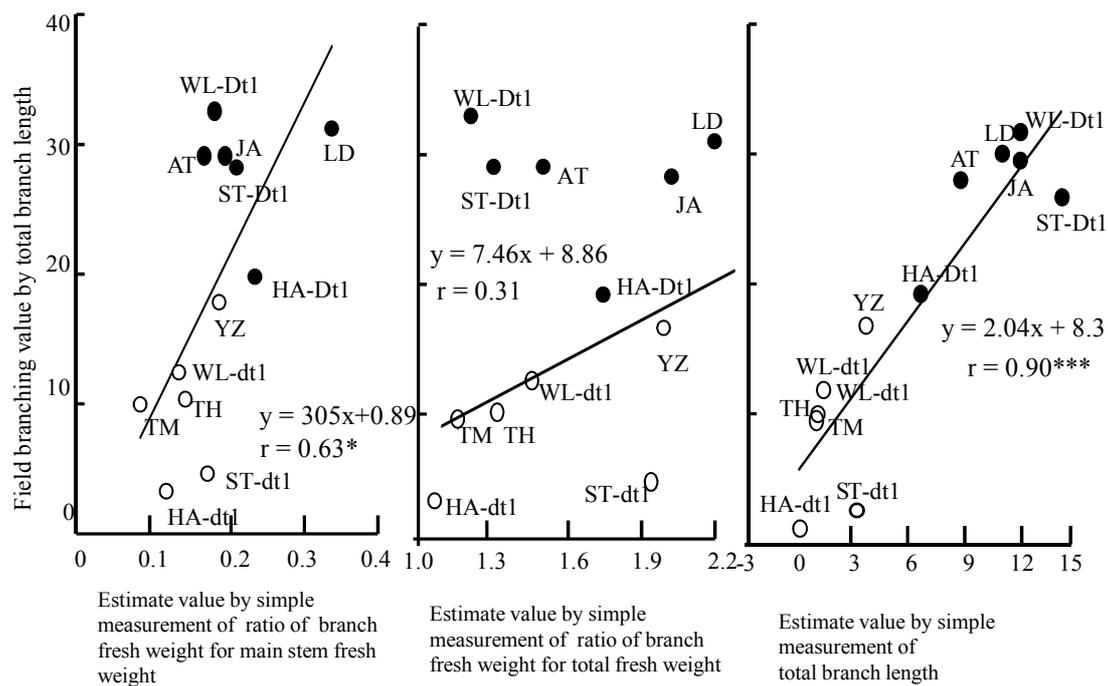


Fig. VI-2. Relationship between estimate value of branching plasticity by simple measurement using ratio of branch fresh weight and total branch length, and field branching value at R5 (beginning seed) stage in 12 tested cultivars and lines (2013, Exp.4).

○ : Determinate type, ● : Indeterminate type

YZ : Yuzuru, JA : Jack, TM : Toyomusume, TH : Toyoharuka, AT : Athow,
 LD : LD00-3309, HA-dt1 : Harosoy-dt1, HADt1 : Harosoy-Dt1,
 ST-dt1 : Stressland × Tochinagaha-dt1, ST-Dt1 : Stressland × Tochinagaha-Dt1,
 WL-dt1 : William-dt1, WL-Dt1 : William-Dt1

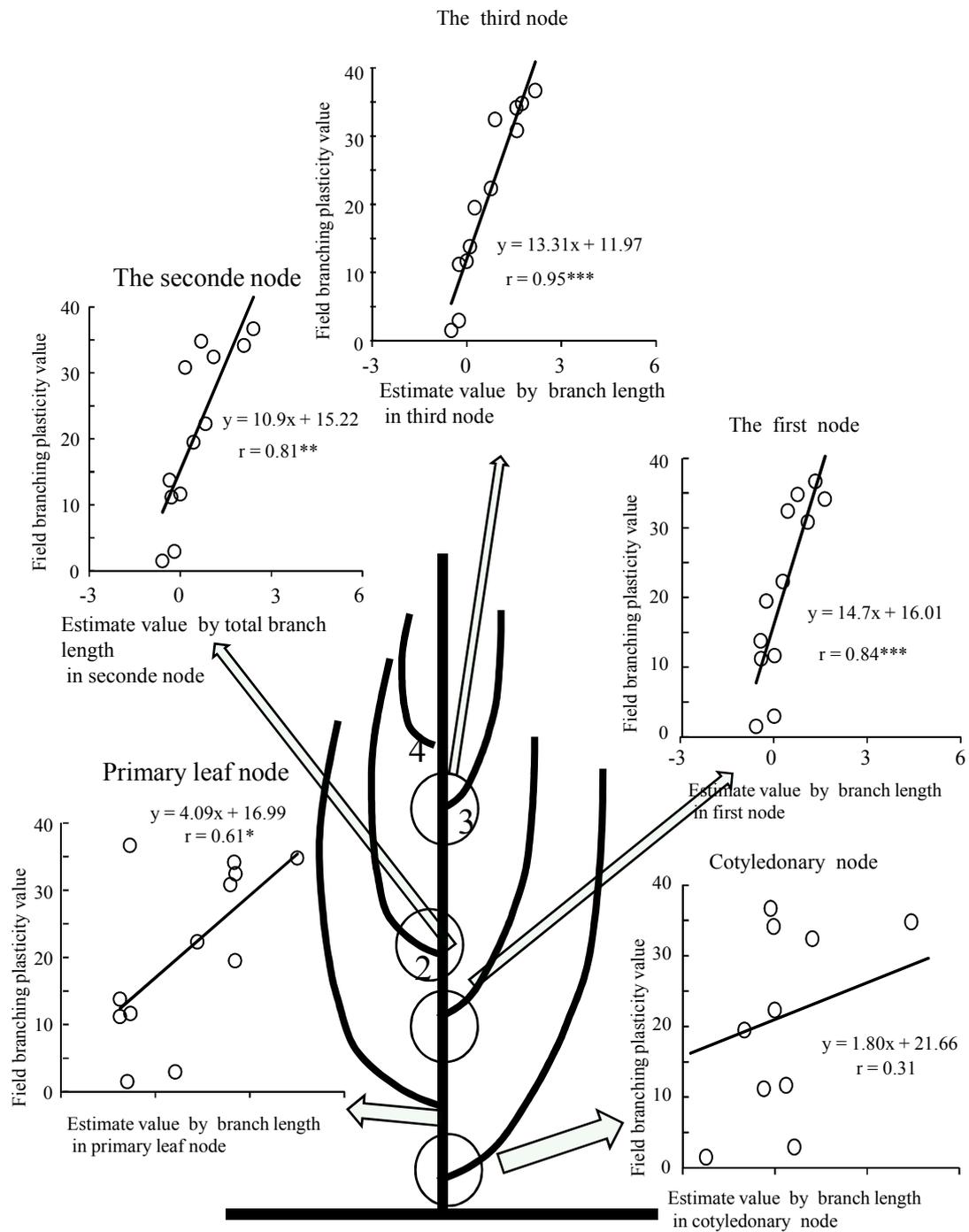


Fig. VI-3. Relationship between estimate value of branching plasticity by simple measurement using branch length in the each node, and field branching value at R5 (beginning seed filling stage) in 12 tested cultivars and lines (2013, Exp.4).

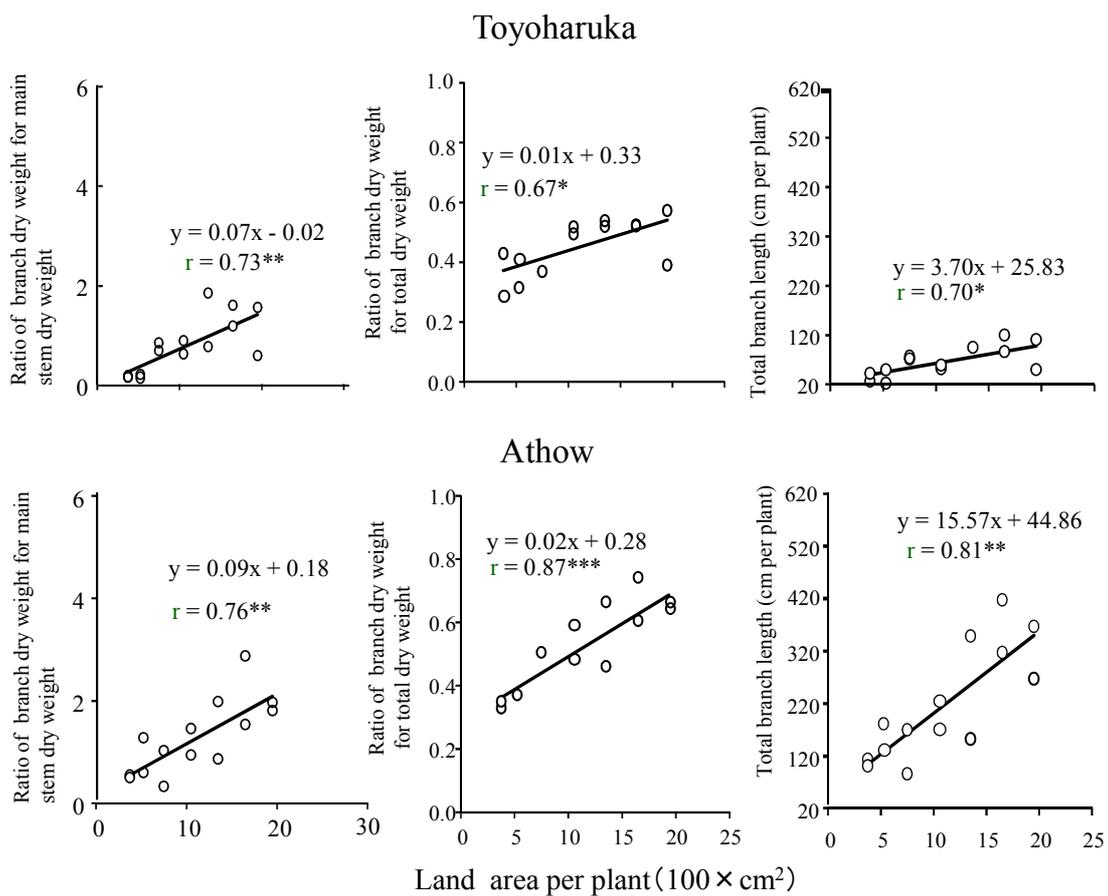


Fig. VI-4. Relationship between land area per plant, and ratio of branch dry weight for main stem dry weight, total dry weight and total branch length at R8 (maturity stage) in Toyoharuka and Athow (2013, Exp.4).

Regression coefficient of branch characteristics to land area per plant indicate estimate value of branching plasticity value by simple measurement

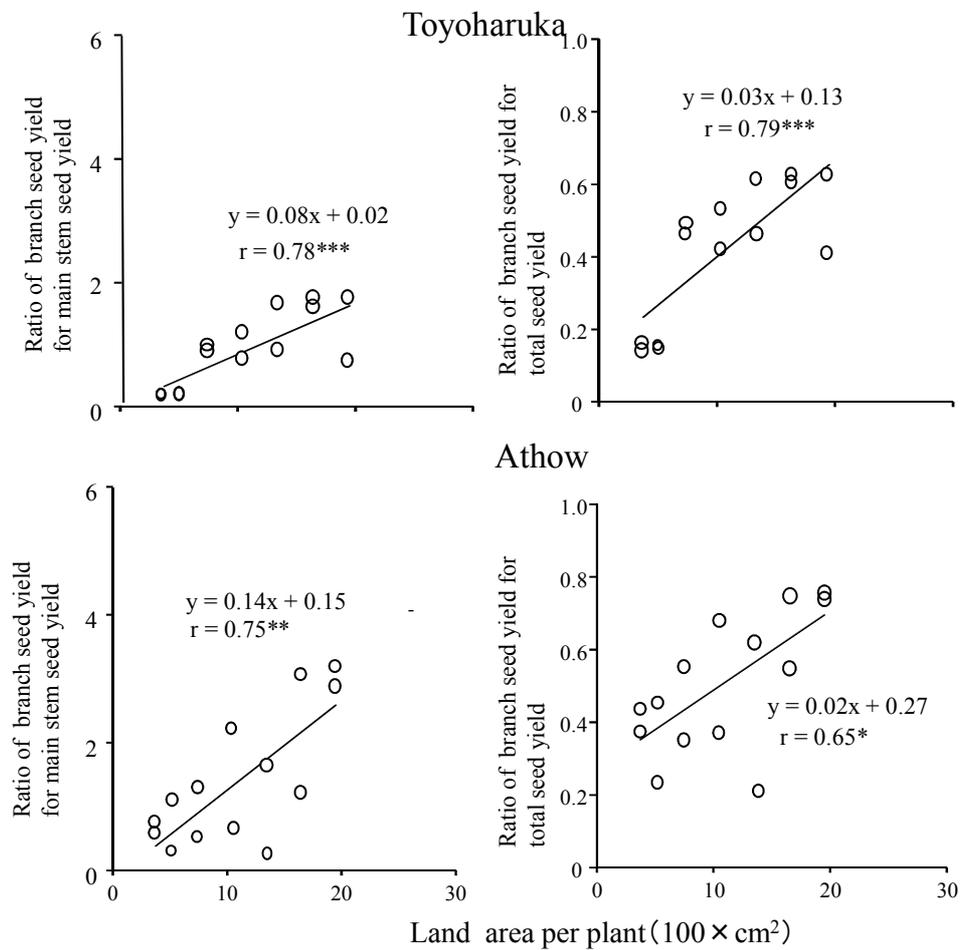


Fig. VI-5. Relationship between land area per plant, and ratio of branch seed yield for main stem seed yield, total seed yield at R8 (maturity stage) in Toyoharuka and Athow (2013, Exp.4).

Regression coefficient of branch characteristics to land area per plant indicate estimate value of branching plasticity value by simple measurement

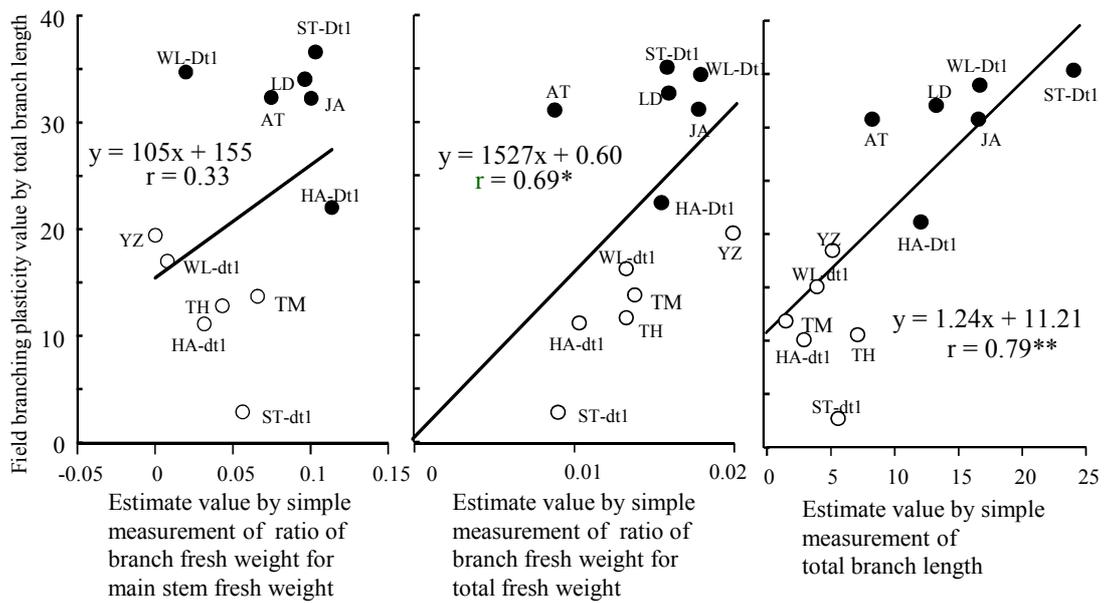


Fig.VI-6. Relationship between estimate value of branching plasticity by simple measurement using ratio of branch fresh weight and total branch length, and field branching value at R8 (maturity stage) in 12 tested cultivars and lines (2013, Exp.4).

○: Determinate type, ●: Indeterminate type

YZ : Yuzuru, JA : Jack, TM: Toyomusume, TH: Toyoharuka, AT: Athow,
 LD : LD00-3309, HA-dt1: Harosoy-dt1, HA-Dt1: Harosoy-Dt1,
 ST-dt1 : Stressland × Tochinagaha-dt1, ST-Dt1 : Stressland × Tochinagaha-Dt1,
 WL-dt1 : William-dt1, WL-Dt1 : William-Dt1

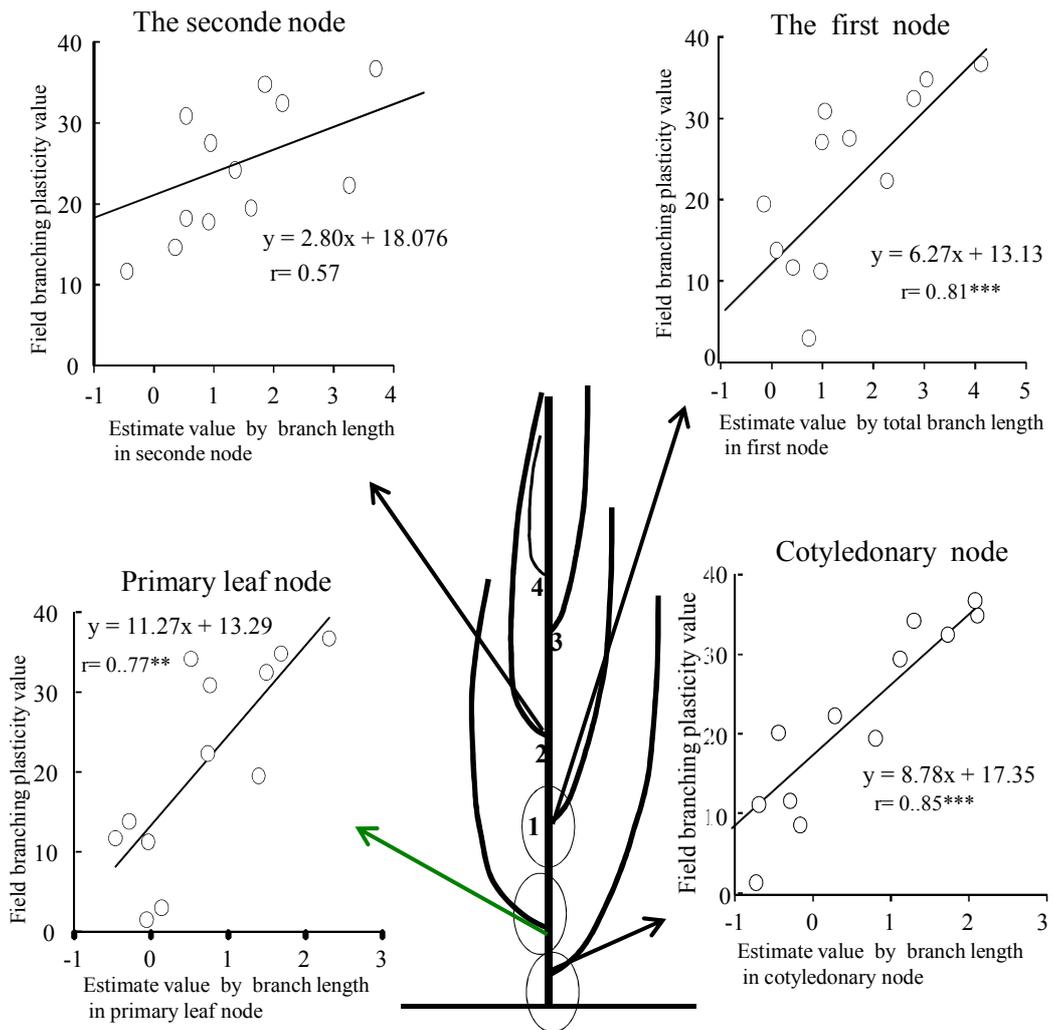


Fig.VI-7. Relationship between estimate value of branching plasticity by simple measurement using branch length in the each node, and field branching value at R8 (maturity stage) in 12 tested cultivars and lines (2013, Exp.4).

TableVII-1. Growth development in Exp.5.
(2012 NARO , 2013 Rakuno).

Year	Cultivar	R1	R5	R8	Sowing	Sowing	Sowing
		stage	stage	stage			
		—— (month/day) ——			—— (day) ——		
2012 (NARO)	Toyomusume	7/22	8/14	9/26	72	95	138
	Toyoharuka	7/23	8/15	9/27	73	96	139
	Yuhzuru	7/29	8/24	10/13	79	106	155
	Athow	7/31	8/28	10/17	81	110	159
	LD00-3309	8/3	9/2	10/24	84	114	166
	Jack	7/30	8/27	10/14	80	108	156
	Harosoy-dt1	7/27	8/18	9/29	77	99	141
	Harosoy-Dt1	7/28	8/19	10/1	78	101	143
	Williams-dt1	7/27	8/26	10/23	77	108	165
	Williams-Dt1	7/27	8/29	10/25	77	110	167
	ST-dt1	7/26	8/24	10/13	76	105	155
	ST-Dt1	7/27	8/28	10/24	77	110	166
2013 (Rakuno)	Toyomusume	7/15	8/5	9/14	58	79	119
	Toyoharuka	7/15	8/5	9/14	58	79	119
	Yuhzuru	7/24	8/17	10/14	67	96	149
	Athow	7/22	8/15	10/23	65	99	158
	LD00-3309	7/30	8/26	11/1	73	108	167
	Jack	7/23	8/19	10/23	66	100	158
	Harosoy-dt1	7/23	8/14	10/16	66	96	151
	Harosoy-Dt1	7/22	8/15	10/19	65	96	154
	Williams-dt1	7/22	8/16	10/23	65	98	158
	Williams-Dt1	7/25	8/24	11/3	68	105	169
	ST-dt1	7/26	8/21	10/24	69	102	159
	ST-Dt1	8/2	8/27	10/30	76	109	165

ST: the line crossing between Tachinagaha and Stressland

R1, R5 and R8 : Beginning flowering, beginning pod and beginning seed filling stage, respectively.

Rakuno: Field crop production station in Rakuno Gakuen University

NARO: National agriculture research center for Hokkaido region

Table VII-2. Seed yield and the related characteristics in Exp.5 (2012 NARO).

Spacing(cm) × Row width(cm)	Plant land area		Cultivar	Seed	Total dry	Seed	Seed	No. of	No. of	Main	Total	No. of	Average	Loding
	density	per plant		yield	matter	yield of	yield of	pod in	pod in	stem	branch	branch	branch	score
(m ²)	(100×cm ²)		(g m ⁻²)	(m ²)	(m ²)	(cm)	(cm/pl)	(/pl)	(cm/pl)	(0-4)				
60×7.5	22.2	4.5	Toyomusume	383	778	179	204	54	411	42	100	4.3	23	—
			Toyoharuka	361	669	251	109	79	235	52	59	2.1	28	—
			Yuzuru	404	796	253	152	115	226	61	72	1.5	49	—
			Athow	408	780	275	133	137	311	74	102	2.9	36	—
			LD00-3309	432	912	242	190	146	608	94	230	4.9	48	—
			Jack	369	598	280	89	164	351	95	107	3.7	29	—
			Harosoy-dt1	416	570	182	233	86	626	54	181	4.5	39	—
			Harosoy-Dt1	433	750	239	194	158	804	89	237	4.9	48	—
			Williams-dt1	504	769	293	210	113	420	51	98	3.6	28	—
			Williams-Dt1	483	756	287	196	120	286	95	119	4.3	28	—
			ST-dt1	545	826	246	299	69	568	59	169	4.3	40	—
			ST-Dt1	412	842	232	180	88	453	100	202	4.9	41	—
						<i>LSD(0.05)</i>	29	90	37	16	34	121	17	90
60×10	16.7	6.0	Toyomusume	344	836	137	207	79	409	44	138	4.7	29	—
			Toyoharuka	301	761	160	141	90	292	44	70	3.2	22	—
			Yuzuru	359	726	188	171	118	308	74	131	3.1	46	—
			LD00-3309	405	450	177	228	185	748	81	285	6.3	46	—
			Athow	466	555	261	206	187	574	74	204	5.0	41	—
			Jack	396	606	195	201	222	696	83	236	5.4	44	—
			Harosoy-dt1	379	472	123	256	120	701	55	231	5.5	42	—
			Harosoy-Dt1	453	708	187	265	200	943	88	306	5.9	52	—
			Williams-dt1	500	978	235	265	170	601	51	169	5.2	33	—
			Williams-Dt1	496	720	224	272	185	673	96	250	5.8	44	—
			ST-dt1	459	733	188	270	106	494	55	194	4.6	42	—
			ST-Dt1	404	668	167	237	118	548	108	235	5.1	46	—
						<i>LSD(0.05)</i>	35	148	35	28	29	93	18	42
60×20	8.3	12.0	Toyomusume	312	576	79	233	169	486	41	195	6.6	29	—
			Toyoharuka	258	502	94	165	230	346	41	141	5.3	26	—
			Yuzuru	332	593	115	217	257	437	65	246	5.3	46	—
			LD00-3309	389	441	97	292	400	822	84	492	8.0	62	—
			Athow	421	677	130	292	458	807	74	337	6.4	53	—
			Jack	378	446	107	270	534	804	91	362	6.9	52	—
			Harosoy-dt1	349	578	89	260	303	658	44	208	6.7	31	—
			Harosoy-Dt1	428	538	113	315	422	882	85	416	8.1	51	—
			Williams-dt1	367	664	135	232	375	620	45	218	6.7	33	—
			Williams-Dt1	496	554	172	324	432	677	96	419	7.7	55	—
			ST-dt1	442	595	120	322	233	509	50	198	5.6	35	—
			ST-Dt1	342	595	107	236	305	540	104	418	8.6	49	—
						<i>LSD(0.05)</i>	60	66	39	37	66	115	20	89
Cultivar				***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	
Density				***	***	***	***	***	**	***	***	***		
Cultivar×Density				ns	***	ns	*	ns	***	ns	***	ns	***	

, * and ns indicate significant at the 5, 1 and 0.1% levels and not significant, respectively.

Means followed by the same letters in the same column are not significantly different at 5% level by Tukey-Kramer test.

NARO: National agriculture research center for Hokkaido region

Table VII-3. Seed yield and the related characteristics in Exp.5 (2013, Rakuno).

Spacing(cm) × Row width(cm)	Plant land area		Cultivar	Seed	Total dry	Seed	Seed	No. of	No. of	Main	Total	No. of	Average	Loding
	density	per plant		yield	matter	yield of	yield of	pod in	pod in	stem	branch	branch	branch	branch
(m ²)	(100×cm ²)		(g m ⁻²)	(m ⁻²)	(m ⁻²)	(cm)	(cm/pl)	(/pl)	(cm/pl)	(0-4)				
60×7.5	22.2	4.5	Toyomusume	399	778	251	149	343	604	39	117	5.4	21	—
			Toyoharuka	299	969	111	188	424	358	44	74	3.8	19	—
			Yuzuru	302	985	129	173	277	209	70	126	4.1	31	—
			Athow	326	780	92	234	458	558	67	86	3.9	22	—
			LD00-3309	249	912	120	129	469	402	104	184	4.7	40	—
			Jack	349	681	143	206	526	464	99	167	4.9	34	—
			Harosoy-dt1	372	752	231	141	384	619	45	144	5.9	24	—
			Harosoy-Dt1	408	778	224	184	360	585	86	222	6.7	33	—
			Williams-dt1	323	769	135	188	451	404	72	160	5.7	28	—
			Williams-Dt1	306	756	155	151	367	327	110	206	5.9	35	—
			ST-dt1	383	826	215	168	333	540	66	158	5.3	30	—
			ST-Dt1	303	842	122	181	324	367	115	154	6.7	24	1.6
						<i>LSD(0.05)</i>	32	94	24	27	64	67	18	35
60×10	16.7	6.0	Toyomusume	287	836	180	107	310	547	36	116	5.5	21	—
			Toyoharuka	332	761	135	197	347	292	44	70	3.6	19	—
			Yuzuru	341	912	178	163	194	322	64	174	5.5	32	—
			Athow	355	555	155	201	363	378	67	127	4.6	26	—
			LD00-3309	262	900	148	114	402	807	96	401	6.9	58	—
			Jack	297	773	162	135	383	424	101	215	5.5	39	—
			Harosoy-dt1	357	691	221	137	277	547	35	113	5.6	20	—
			Harosoy-Dt1	417	905	275	142	316	644	86	293	6.9	42	—
			Williams-dt1	324	978	198	126	410	748	76	302	7.3	41	—
			Williams-Dt1	318	720	201	116	347	418	103	295	8.0	38	—
			ST-dt1	333	668	189	144	265	400	67	198	5.9	34	—
			ST-Dt1	325	733	171	154	283	477	116	270	7.8	35	1.7
						<i>LSD(0.05)</i>	24	107	27	12	62	127	18	38
60×20	8.3	12.0	Toyomusume	304	676	177	127	168	340	45	132	5.3	25	—
			Toyoharuka	243	552	127	116	189	237	36	78	5.0	16	—
			Yuzuru	278	831	176	102	109	228	60	193	5.7	34	—
			Athow	320	927	208	112	210	468	62	209	6.0	35	—
			LD00-3309	234	791	174	60	163	651	87	568	8.0	71	—
			Jack	303	884	221	82	224	552	97	379	7.1	53	—
			Harosoy-dt1	297	563	192	105	185	480	41	154	6.5	24	—
			Harosoy-Dt1	422	815	335	88	196	687	77	365	7.7	48	—
			Williams-dt1	307	664	205	102	227	603	65	219	7.2	31	—
			Williams-Dt1	310	804	229	81	155	518	98	431	7.0	62	—
			ST-dt1	324	635	233	91	137	317	52	195	6.7	28	—
			ST-Dt1	199	740	133	66	176	385	112	416	7.3	57	3.3
						<i>LSD(0.05)</i>	37	94	42	15	34	92	18	95
			Cultivar	***	***	**	***	**	***	***	***	***	***	
			Density	***	***	**	***	**	***	**	***	**	***	
			Cultivar×Density	ns	***	ns	*	*	***	ns	***	*	***	

*, **, *** and ns indicate significant at the 5, 1 and 0.1% levels and not significant, respectively.

Means followed by the same letters in the same column are not significantly different at 5% level by Tukey-Kramer test.

Rakuno: Field crop production station in Rakuno Gakuen University

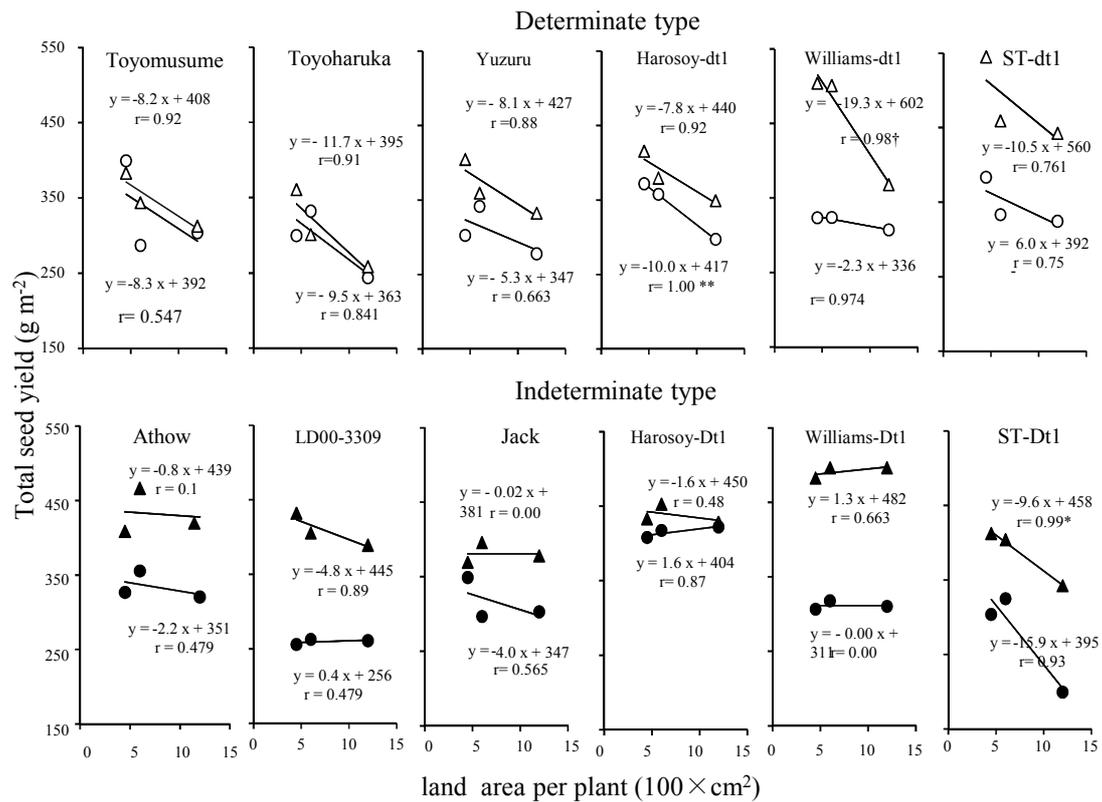


Fig.VII-1. Effects of land area per plant on total seed yield (2012 NARO, 2013 Rakuno) in Exp.5.

△, ▲, ○, ● indicate determinate type, indeterminate type in 2012 and 2013, respectively.
 *, ** indicate significant at the 5, 1% levels, respectively.

Rakuno: Field crop production station in Rakuno Gakuen University

NARO: National agriculture research center for Hokkado region

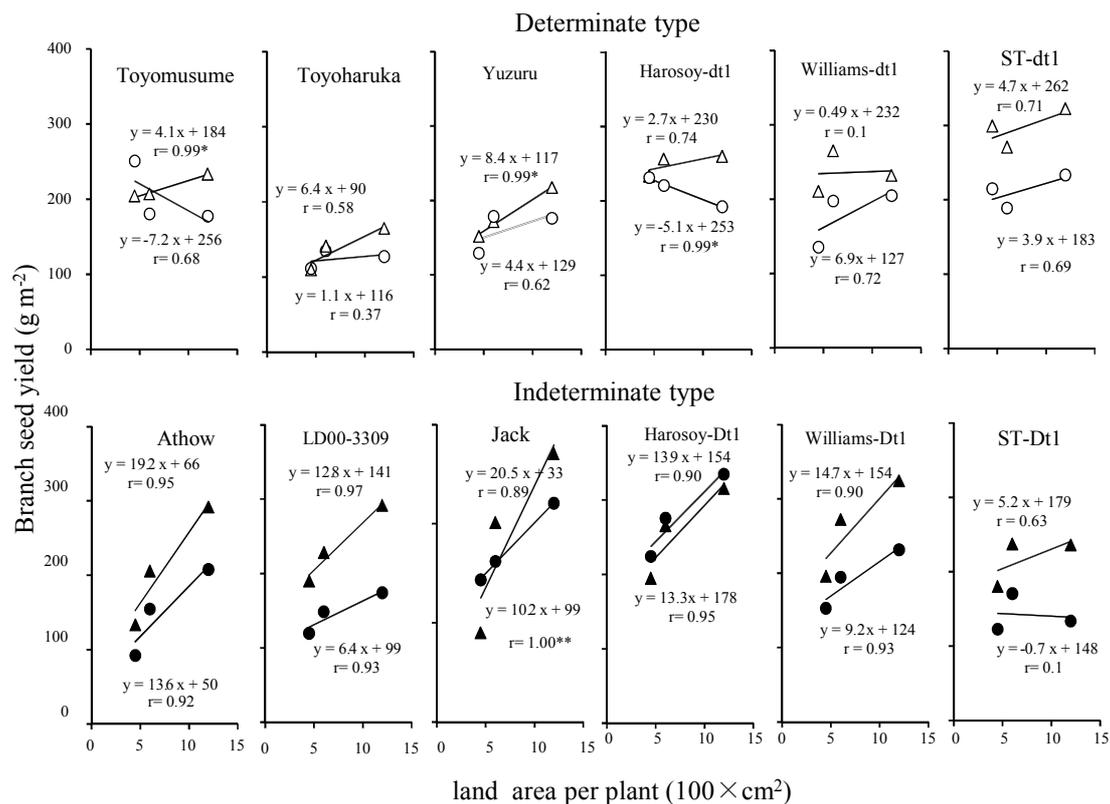


Fig.VII-2. Effects of land area per plant on branch seed yield (2012 NARO, 2013 Rakuno) in Exp.5.

△, ▲, ○, ● indicate determinate type, indeterminate type in 2012 and 2013, respectively.

*, ** indicate significant at the 5, 1% levels, respectively.

Rakuno:Field crop production station in Rakuno Gakuen University

NARO:National agriculture research center for Hokkaido region

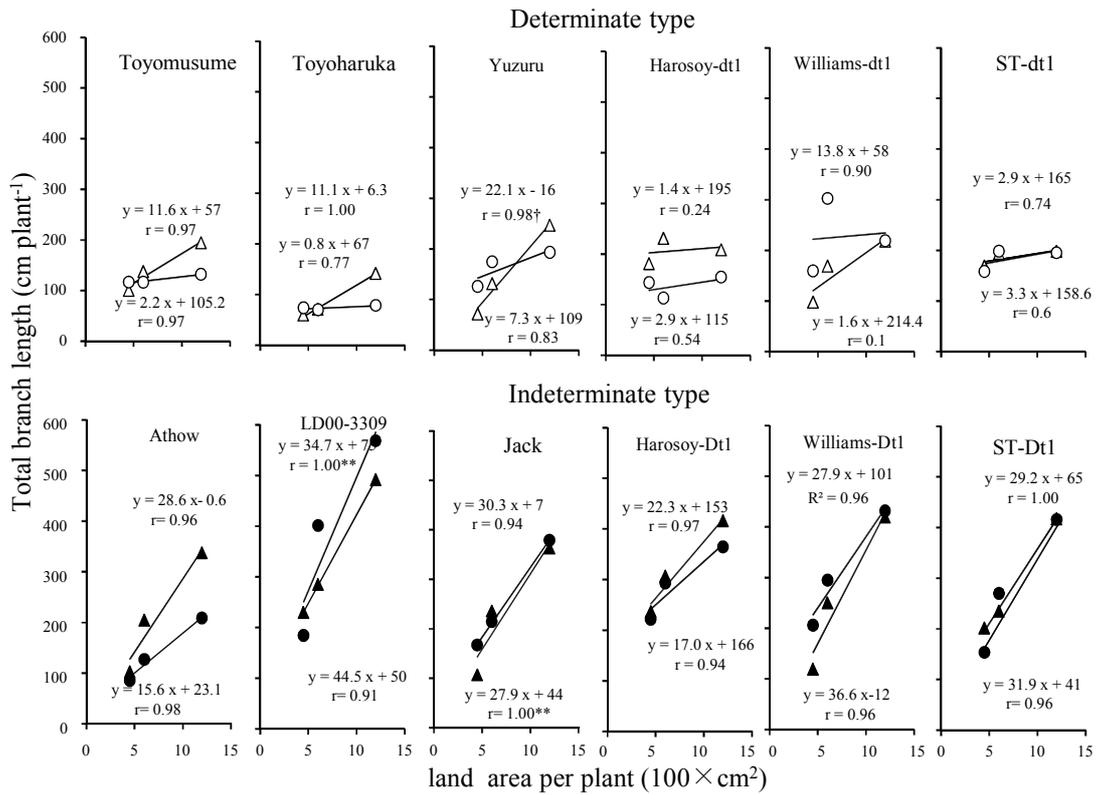


Fig.VII-3. Effects of land area per plant on total branch length
(2012 NARO, 2013 Rakuno) in Exp.5.

△, ▲, ○, ● indicate determinate type, indeterminate type in 2012 and 2013, respectively.

*, ** indicate significant at the 5, 1% levels, respectively.

Rakuno: Field crop production station in Rakuno Gakuen University

NARO: National agriculture research center for Hokkado region

Table VII-4. Regression coefficient to the land area per plant of branch traits (Branching plasticity value) in Exp.5 (2012 NARO , 2013 Rakuno).

Year	Cultivar	Branch yield		Branch pod number			Total branch length	
2012 (NARO)	Toyomusume	4.1	± 1.8	ab	10.8	± 1.7	bcde	11.4 ± 3.1 cd
	Toyoharuka	6.4	± 1.2	b	13.1	± 11.4	cdef	3.8 ± 3.8 abc
	Yuhzuru	8.4	± 0.5	bc	26.3	± 2.4	gh	10.7 ± 0.7 bcd
	Athow	19.2	± 1.7	ef	58.4	± 3.8	i	23.5 ± 5.4 e
	LD00-3309	12.8	± 1.9	cd	23.8	± 1.2	fg	34.7 ± 2.1 f
	Jack	20.5	± 1.3	f	48.3	± 2.7	li	37.5 ± 1.0 f
	Harosoy-dt1	2.7	± 2.6	ab	1.0	± 7.0	ab	4.9 ± 4.8 abc
	Harosoy-Dt1	13.3	± 0.5	cd	4.6	± 0.5	abc	0.6 ± 2.2 ab
	Williams-dt1	0.5	± 0.7	a	19.9	± 7.9	efg	-0.9 ± 0.5 a
	Williams-Dt1	14.7	± 1.7	de	37.4	± 2.0	hl	9.2 ± 1.3 abcd
	ST-dt1	4.7	± 0.6	ab	-4.9	± 7.2	a	14.1 ± 1.1 cde
ST-Dt	5.2	± 0.1	ab	7.9	± 1.1	bcd	19.4 ± 1.5 de	
2013 (Rakuno)	Toyomusume	-7.2	± 1.0	a	-35.0	± 4.9	a	2.2 ± 1.4 a
	Toyoharuka	1.1	± 0.3	bcd	-14.2	± 1.2	bcd	0.8 ± 0.4 d
	Yuhzuru	4.4	± 1.4	cde	-2.7	± 2.7	cde	7.3 ± 0.5 a
	Athow	13.6	± 0.2	fg	0.5	± 1.8	ef	15.6 ± 0.1 bc
	LD00-3309	6.4	± 0.4	de	16.3	± 1.2	g	44.5 ± 2.6 d
	Jack	10.2	± 1.2	efg	14.5	± 2.3	g	27.9 ± 1.2 d
	Harosoy-dt1	-5.1	± 0.2	ab	-16.4	± 7.1	bc	2.9 ± 1.2 a
	Harosoy-Dt1	13.9	± 0.9	g	11.7	± 4.9	fg	17.0 ± 1.2 c
	Williams-dt1	6.9	± 0.0	de	12.1	± 1.0	fg	1.6 ± 1.0 a
	Williams-Dt1	9.2	± 0.3	efg	22.9	± 0.4	g	27.9 ± 1.4 d
	ST-dt1	3.9	± 0.2	cde	-25.2	± 5.7	ab	3.3 ± 3.0 a
ST-Dt	-0.7	± 0.4	abc	-2.6	± 3.2	de	31.9 ± 0.1 d	

Means followed by the same letters in the same column are not significantly different at 5% level by Tukey-Kramer test.

Rakuno: Field crop production station in Rakuno Gakuen University

NARO: National agriculture research center for Hokkado region

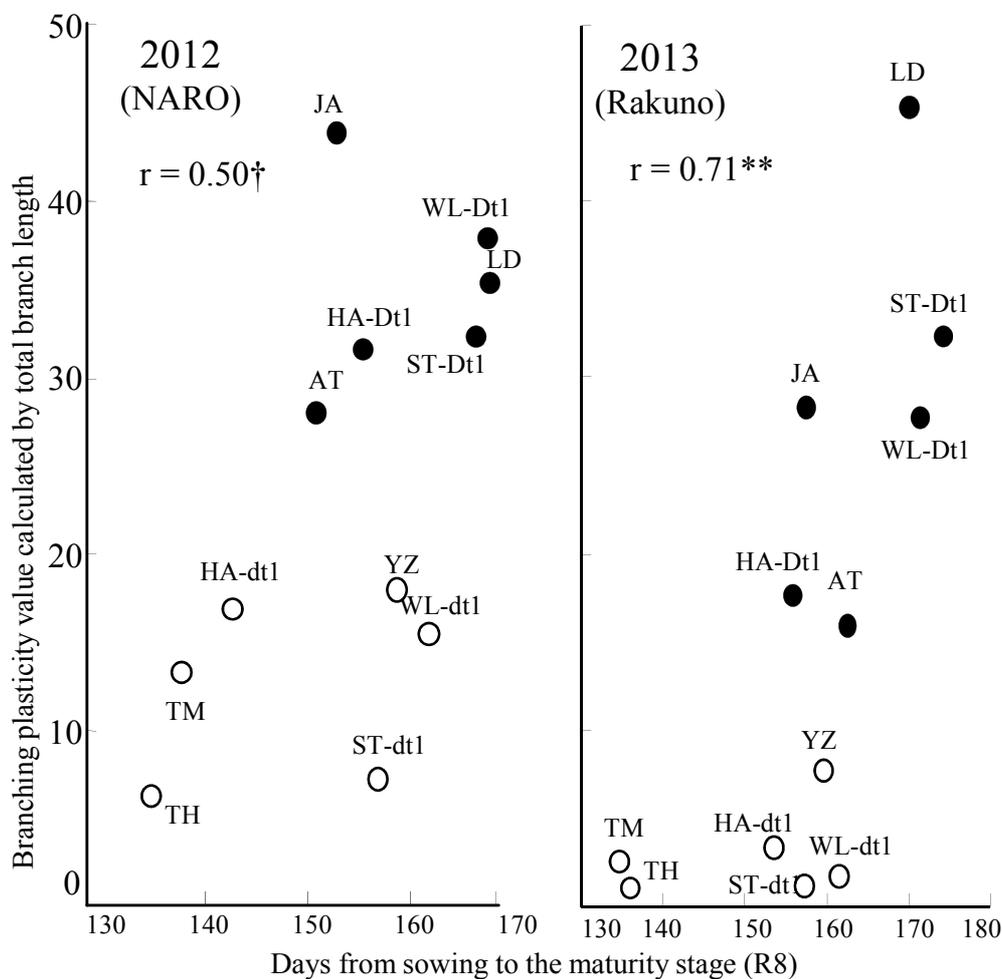


Fig.VII-4. Relationship between days from seeding to the beginning seed stage (R5) and regression coefficient to land area per plant in branch traits (branching plasticity value) in Exp.5 (2012 NARO, 2013 Rakuno).

○:Determinate type, ●: Indeterminate type

YZ : Yuzuru, JA : Jack, TM: Toyomusume, TH: Toyoharuka, AT: Athow,
 LD :LD00-3309, HA-dt1:Harosoy-dt1, HA-Dt1:Harosoy-Dt1,
 ST-dt1:Stressland × Tochinagaha-dt1, ST-Dt1:Stressland × Tochinagaha-Dt1,
 WL-dt1: William-dt1, WL-Dt1: William-Dt1

Rakuno: Field crop production station Rakuno Gakuen University

NARO: National agriculture research center for Hokkado region

†, ** indicate significant at the 10, 1% levels, respectively.

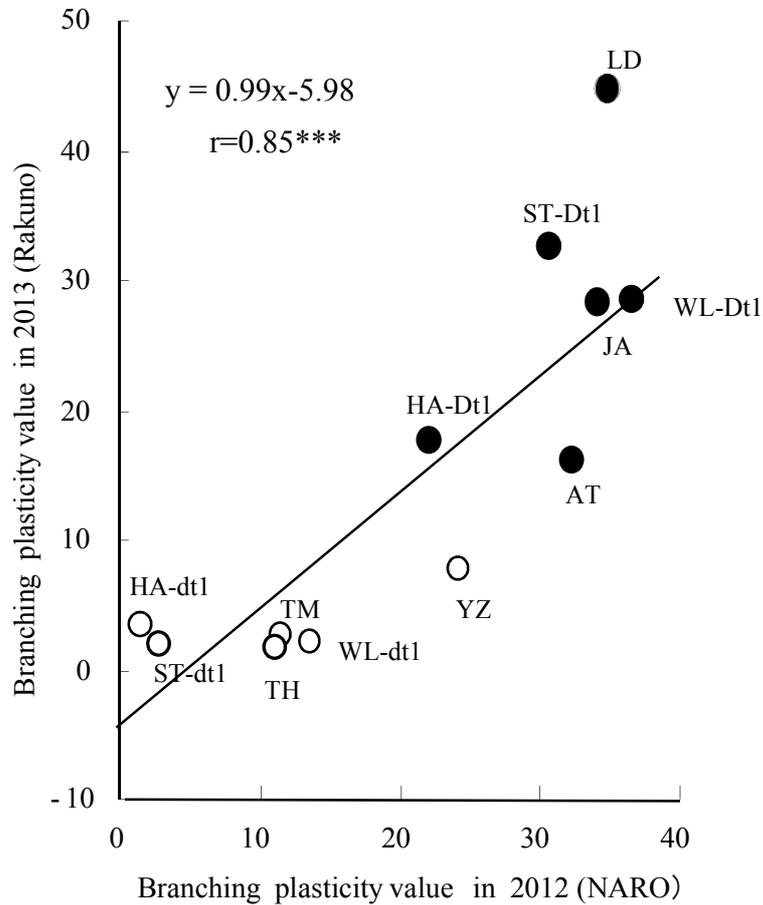


Fig.VII-5. Relationship between regression coefficient to land area per plant in branch traits (branching plasticity value) in Exp.5 (2012 NARO, 2013 Rakuno).

○: Determinate type, ●: Indeterminate type

YZ : Yuzuru, JA : Jack, TM: Toyomusume, TH: Toyoharuka, AT: Athow,
 LD : LD00-3309, HA-dt1 : Harosoy-dt1, HA-Dt1 : Harosoy-Dt1,
 ST-dt1 : Stressland × Tochinagaha-dt1, ST-Dt1 : Stressland × Tochinagaha-Dt1,
 WL-dt1 : William-dt1, WL-Dt1 : William-Dt1

Rakuno: Field crop production station in Rakuno Gakuen University

NARO: National agriculture research center for Hokkaido region

*** indicate significant at the 0.1% levels, respectively.

Table VII-5. Seed yield and the related characteristics (Exp. 6, 2012-2013).

Year	Spacing (cm) × Row width (cm)	Plant density (m ⁻²)	Land area per plant (100×cm ²)	Cultivar and line	R1	R8	Seed	Branch	No. of	Total	Leaf area		
					stage (month /day)	stage (month /day)	yield (g m ⁻²)	seed yield (g m ⁻²)	pod in branch (m ⁻²)	branch length (cm pl ⁻¹)	Total	Branch	
2012	60 × 7.5	22.2	4.5	Mean of cultivars			419	169	125	393	3.96	0.70	
	60 × 10	16.7	6.0				409	218	160	460	3.87	1.00	
	60 × 20	8.3	12.0				371	259	191	487	3.12	1.38	
	Mean of treatments				Yuzuru	7/29	10/14	365	187	249	130	3.83	0.99
					Jack	7/29	10/15	381	180	486	255	3.13	0.86
				Harosoy-dt1	7/30	9/29	381	250	503	214	3.56	1.07	
				Harosoy-Dt1	7/31	10/1	438	258	548	280	4.08	1.18	
2013	60 × 7.5	22.2	4.5	Mean of cultivars			343	163	184	469	4.79	1.58	
	60 × 10	16.7	6.0				336	189	209	484	4.42	1.62	
	60 × 20	8.3	12.0				309	208	230	487	4.02	1.81	
	Mean of treatments				Yuzuru	7/26	10/25	307	129	253	164	4.95	1.75
					Jack	7/26	10/25	342	141	480	254	4.23	1.43
				Harosoy-dt1	7/24	10/19	316	185	549	137	4.23	1.85	
				Harosoy-Dt1	7/26	10/21	416	236	639	293	4.33	1.64	
Year							**	*	†	ns	**	**	
Density							**	***	***	***	***	***	
Density×Year							***	ns	***	***	**	***	
Cultivar							***	***	***	***	***	***	
Cultivar × Year							**	***	**	**	**	***	
Cultivar × Density							***	***	***	***	***	***	
Cultivar × Year × Density							**	**	**	***	**	**	

†, *, **, *** and ns indicate significant at the 10, 5, 1 and 0.1% levels and not significant, respectively.

R1: the beginning flowering stage

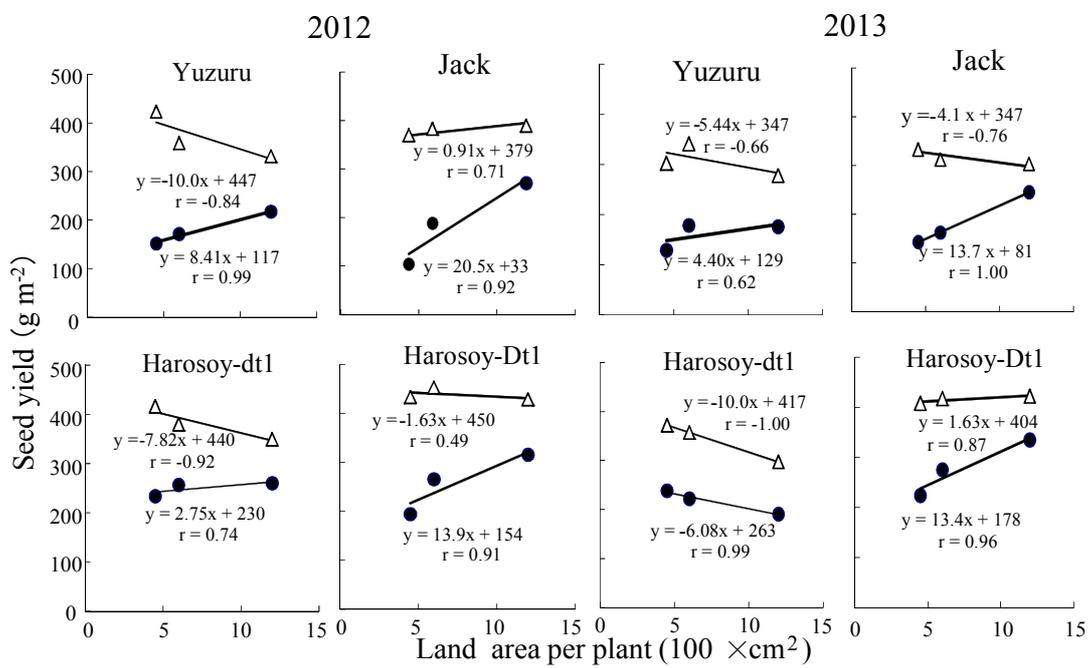


Figure VII-6. Effects of land area per plant on total seed yield and branch yield (Exp. 6, 2012-2013).

Δ : Total seed yield, \bullet : Branch seed yield.

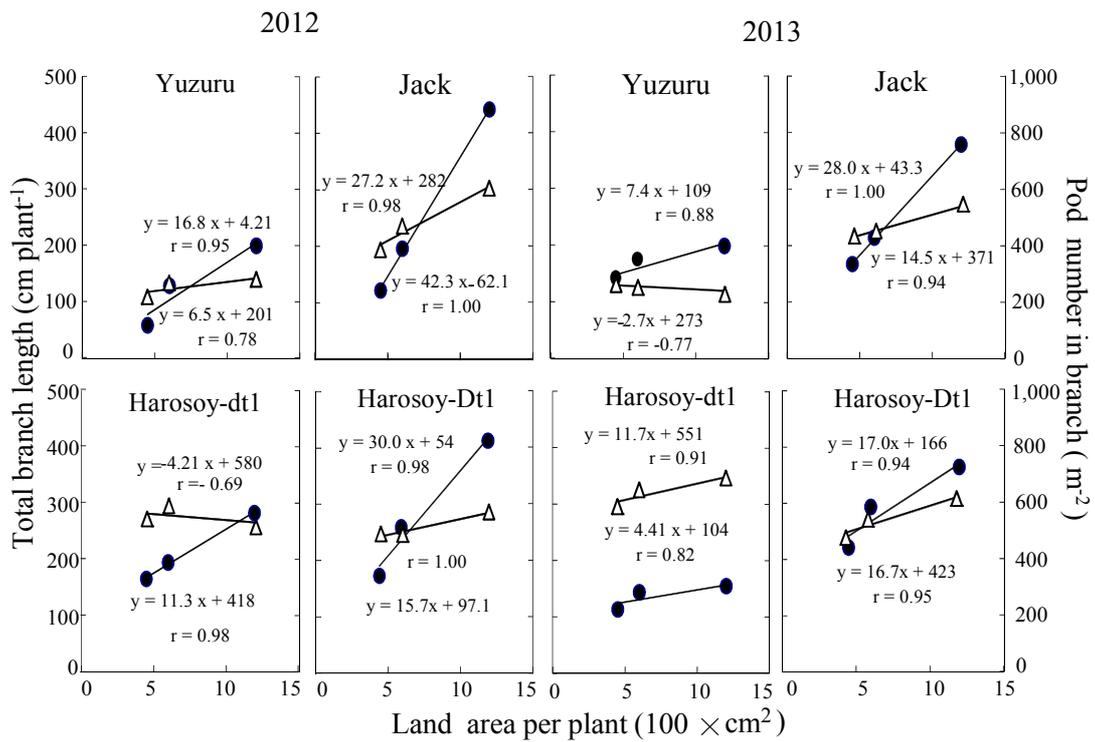


Figure VII-7. Effects of land area per plant on pod number in branch and total branch length (Exp. 6, 2012-2013).

△ : Pod number in branch, ● : Total branch length.

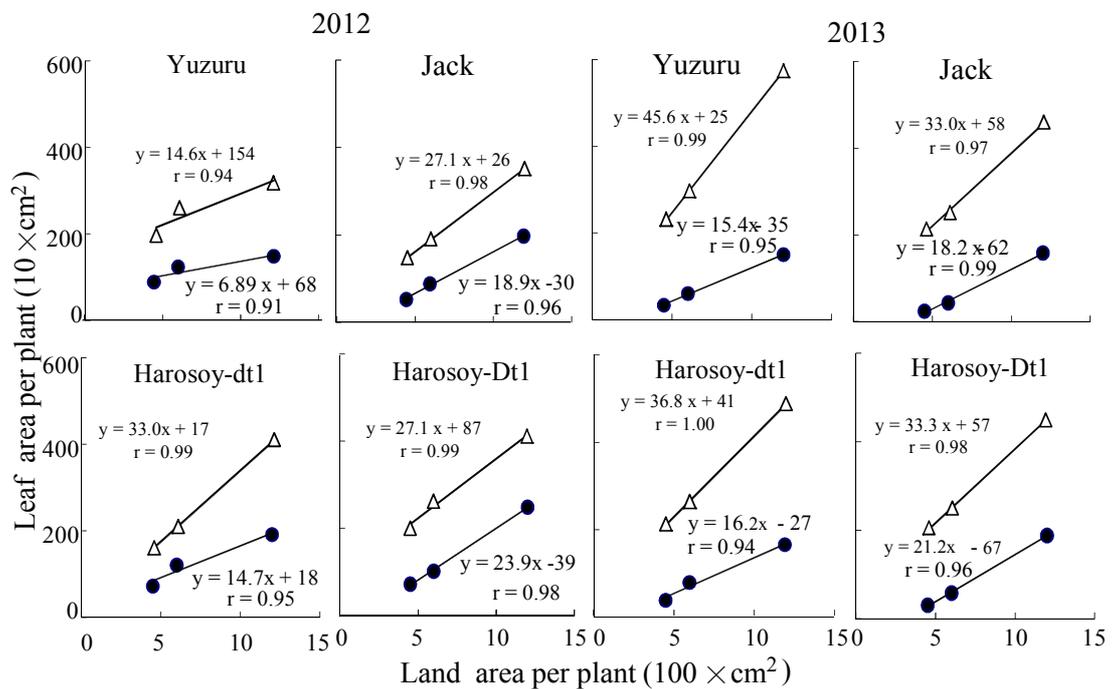


Figure VII-8. Effects of land area per plant on leaf area per plant at R1 stage (Exp. 6, 2012-2013).

△: Total leaf area, ●: Leaf area in branch

R1: the beginning flowering stage

Table VII-6. Regression coefficient to the land area per plant for various branch traits (branching plasticity value) in Exp. 6 (2012-2013).

Year	Cultivar	Branch yield	Pod number in branch	Total branch length	LAI in branch
2012	Yuzuru	8.4 ± 1.4 ab	6.5 ± 1.6 a	16.8 ± 2.0 b	0.69 ± 0.03 a
	Jack	20.5 ± 2.3 c	27.2 ± 3.9 c	42.3 ± 2.4 d	1.90 ± 0.06 c
	Harosoy-dt1	2.8 ± 1.9 a	-4.2 ± 2.9 a	11.3 ± 1.5 a	1.47 ± 0.05 b
	Harosoy-Dt1	13.9 ± 2.0 b	15.7 ± 3.4 b	30.0 ± 1.2 c	2.39 ± 0.05 c
2013	Yuzuru	4.4 ± 1.4 b	-2.7 ± 1.7 a	7.4 ± 1.8 b	1.54 ± 0.07 a
	Jack	13.7 ± 2.9 c	14.5 ± 4.5 bc	28.0 ± 2.7 d	1.82 ± 0.04 ab
	Harosoy-dt1	-6.1 ± 2.8 a	11.7 ± 2.7 b	4.4 ± 1.2 a	1.62 ± 0.03 a
	Harosoy-Dt1	13.4 ± 1.0 c	16.7 ± 3.7 c	17.0 ± 2.5 c	2.12 ± 0.09 b

Means followed by the same letters in the same column are not significantly different at 5% level by Tukey-Kramer test.

Leaf area in branch were measured at R1(Beginning flowering) stage.

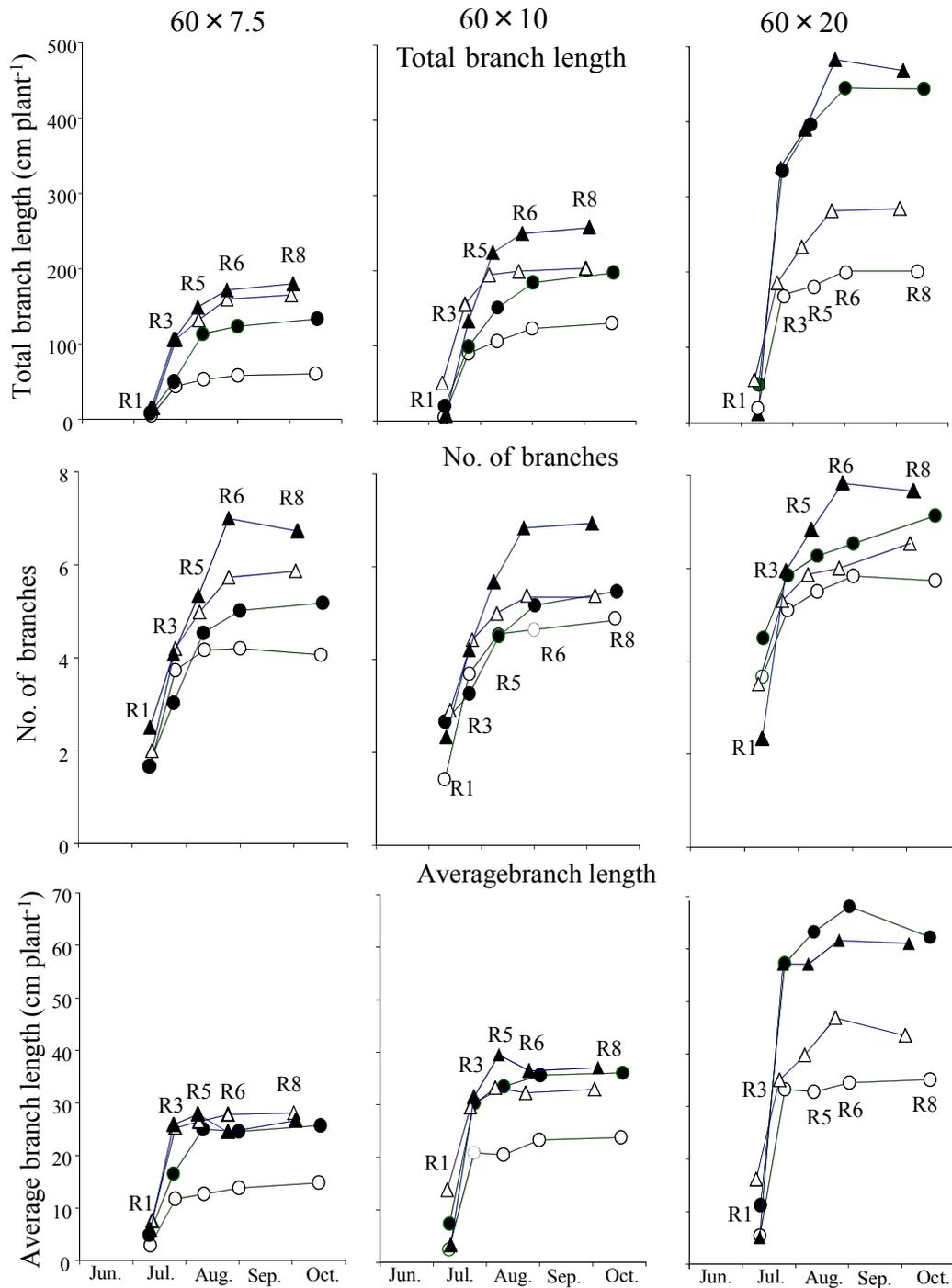


Figure VII-9. Change in branch number and branch length during seed filling period

○ : Yuzuru (determinate type), ● : Jack (indeterminate type), (Exp. 6, 2012).
 △ : Harosoy-dt1 (determinate type), ▲ : Harosoy-Dt1 (indeterminate type)

R1, R3, R5, R6 and R8 : Beginning flowering, beginning pod, beginning seed, full seed and maturity stage, respectively.

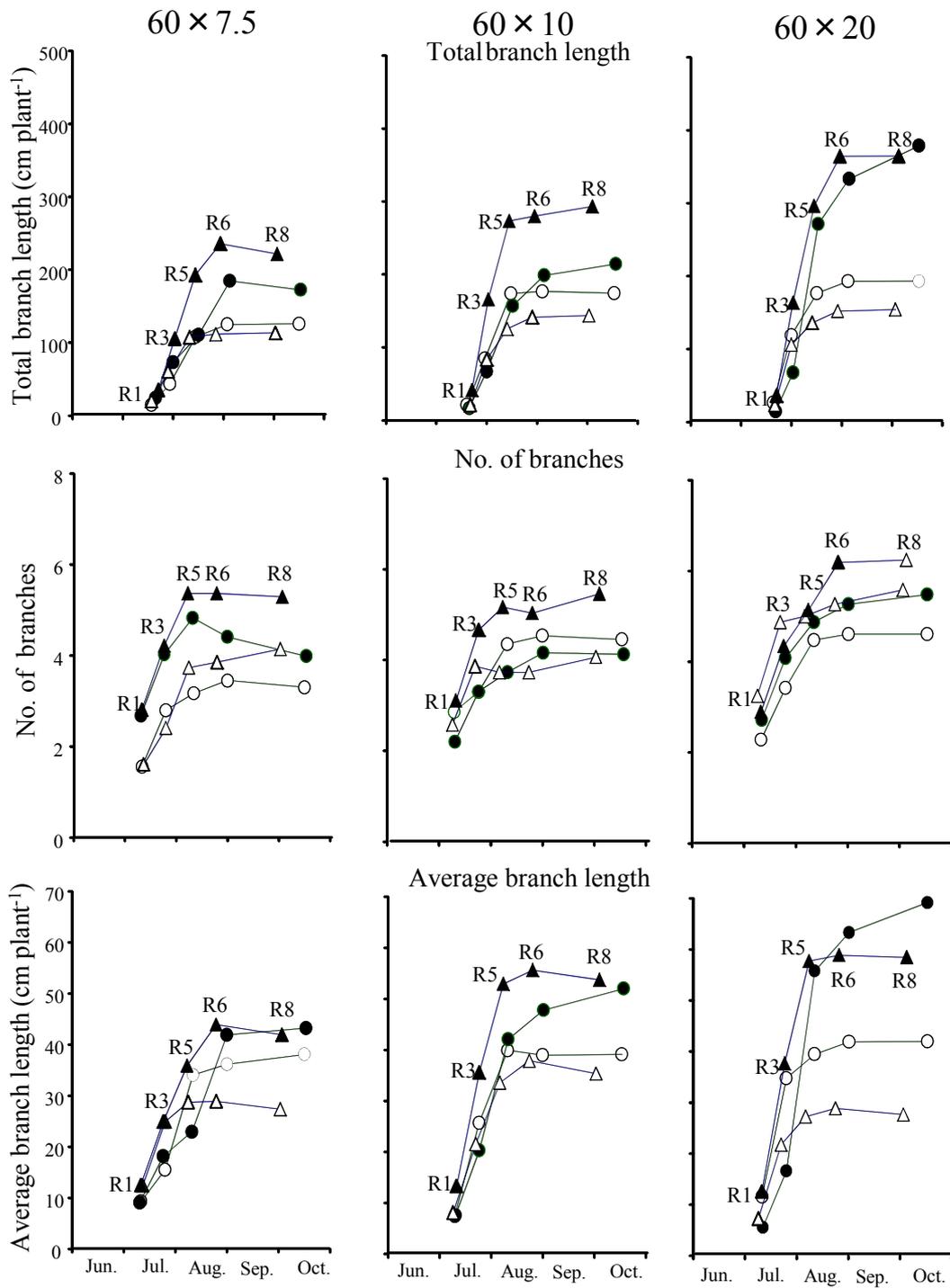


Figure VII-10. Change in branch number and branch length during seed filling period
 ○ : Yuzuru (determinate type), ● : Jack (indeterminate type), (Exp. 6, 2013).
 △ : Harosoy-dt1 (determinate type), ▲ : Harosoy-Dt1 (indeterminate type)
 R1, R3, R5, R6 and R8: Beginning flowering, beginning pod, beginning seed,
 full seed and maturity stage, respectively.

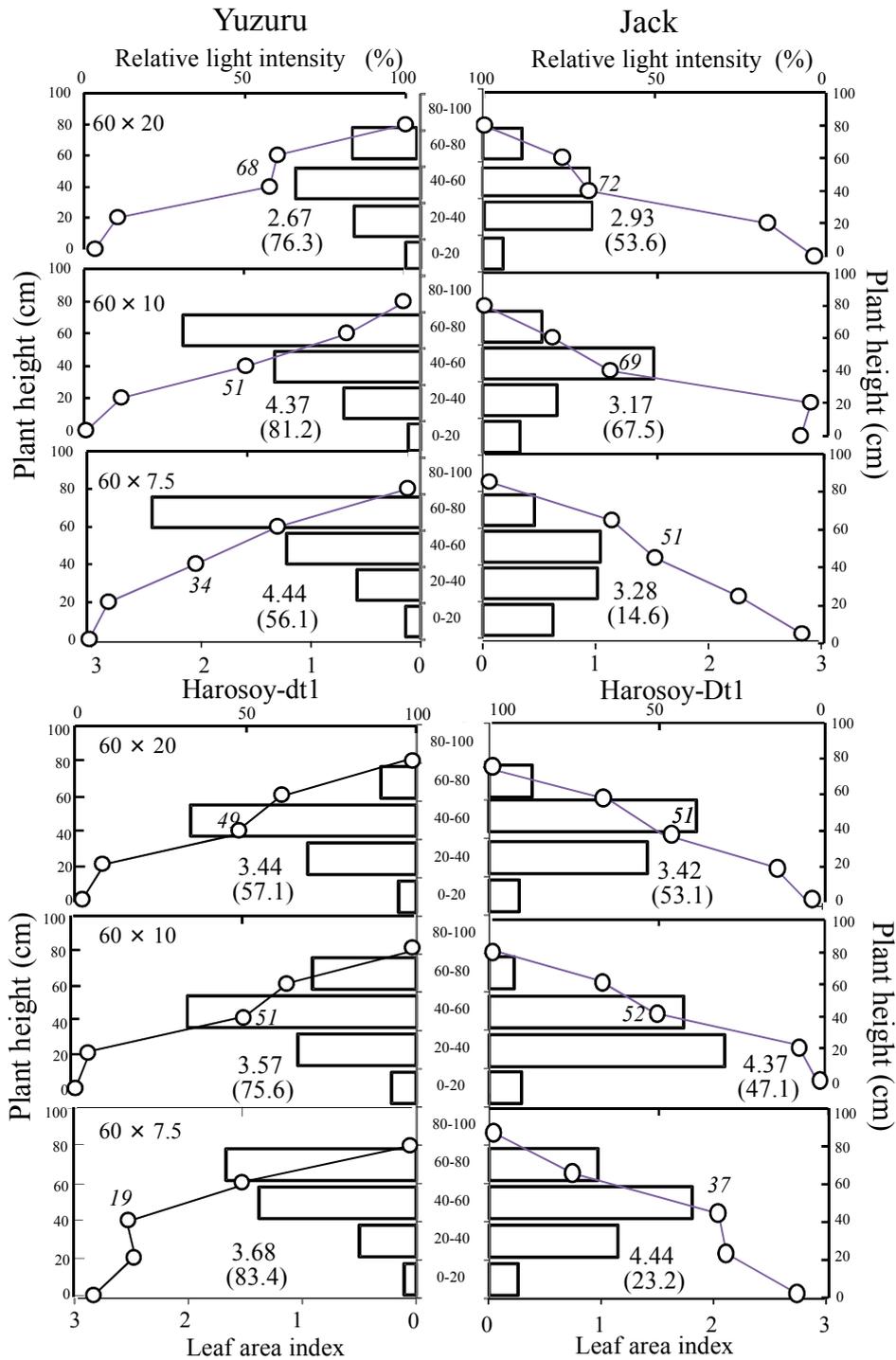


Figure VII-11. Relative light intensity and leaf area index at R1 stage (Exp. 6, 2012).

R1: the beginning flowering stage

The numbers in Figure show total leaf area index (LAI).

Numbers within parentheses show the ratio of the percentage of upper part 40cm to total LAI.

Italic numbers in Figure show relative light intensity (%) at the 40cm plant height.

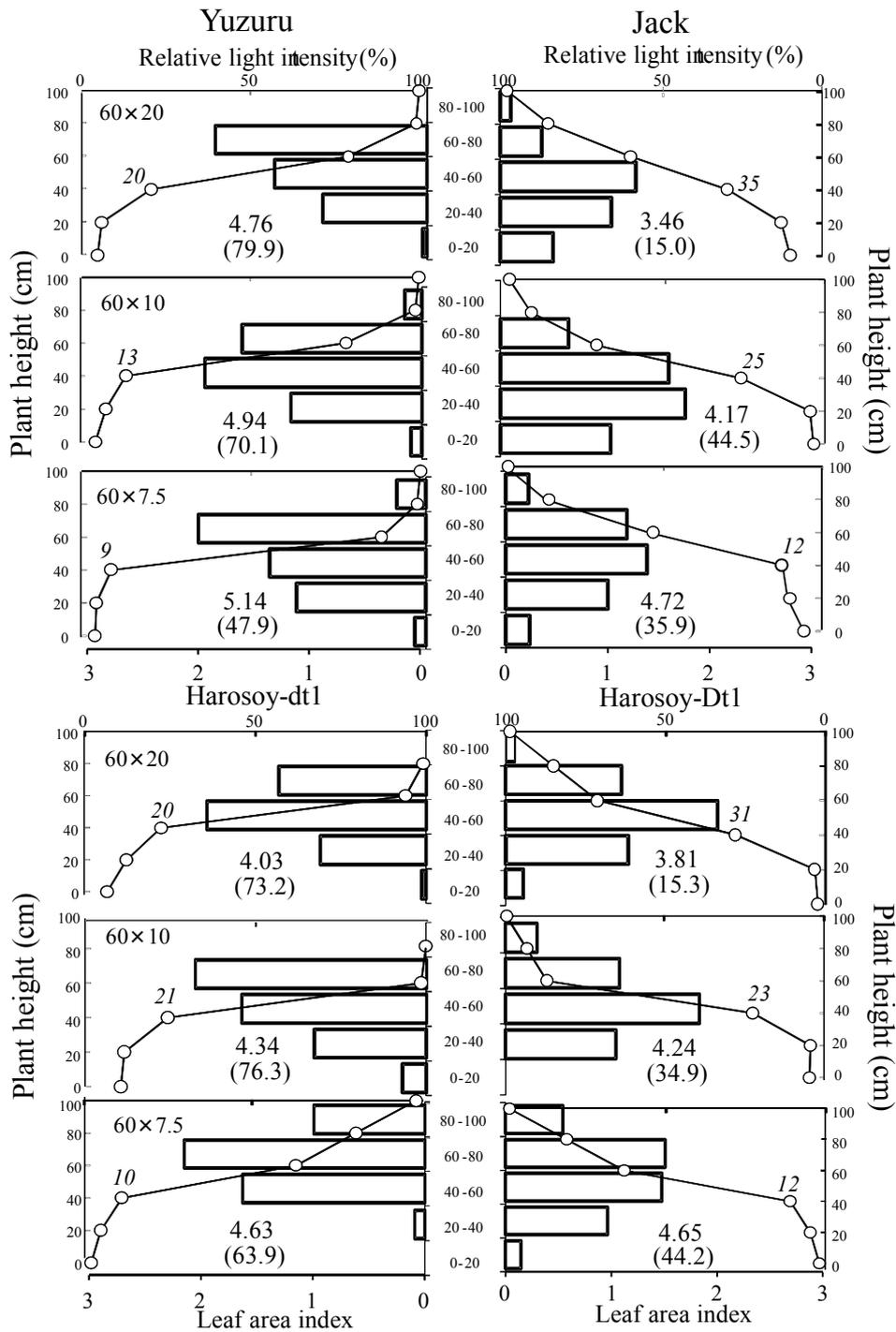


Figure VII-12. Relative light intensity and leaf area index at R1 stage (Exp. 6, 2013).

R1: the beginning flowering stage

The numbers in Figure show total leaf area index (LAI).

Numbers within parentheses show the ratio of the percentage of upper part 40cm to total LAI.

Italic numbers in Figure show relative light intensity (%) at the 40cm plant height.

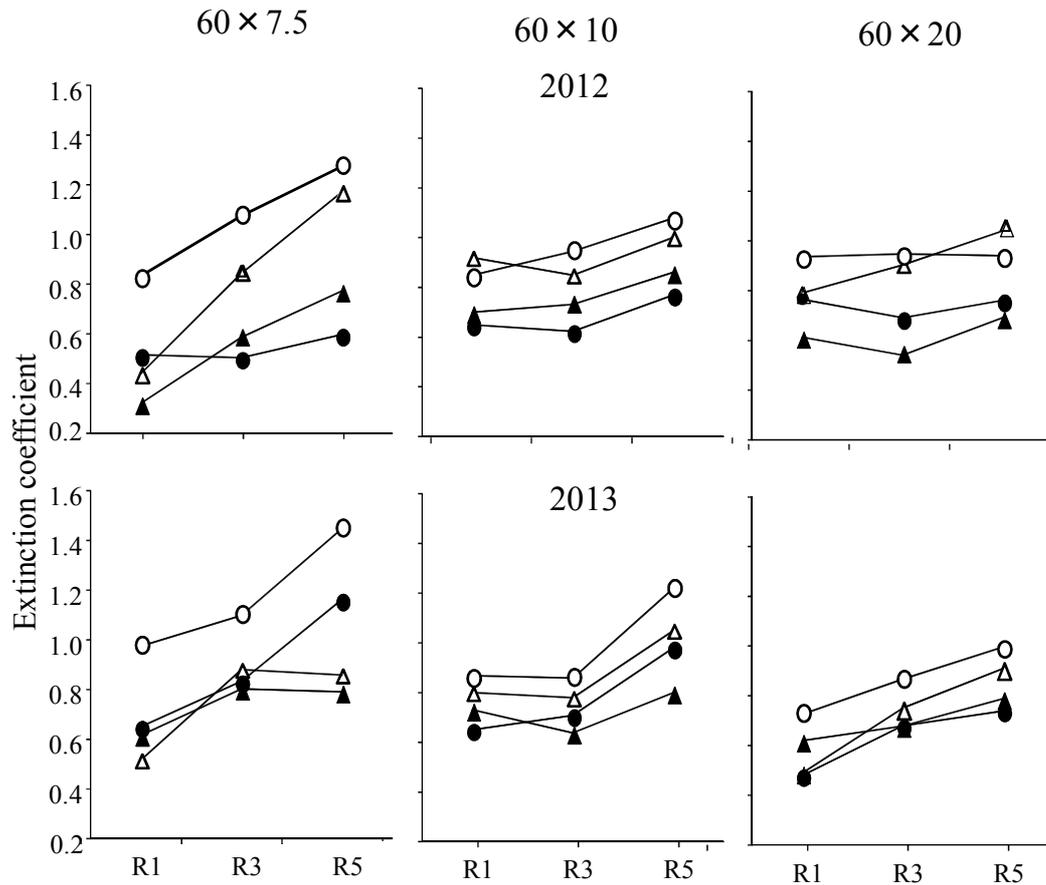


Figure VII-13. Changes in extinction coefficient during seed filling period (Exp. 6, 2012-2013).

○: Yuzuru (determinate type), ●: Jack (indeterminate type),
 △: Harosoy-dt1 (determinate type), ▲: Harosoy-Dt1 (indeterminate type)
 R1, R3, R5: Beginning flowering, beginning pod, beginning seed stage, respectively.

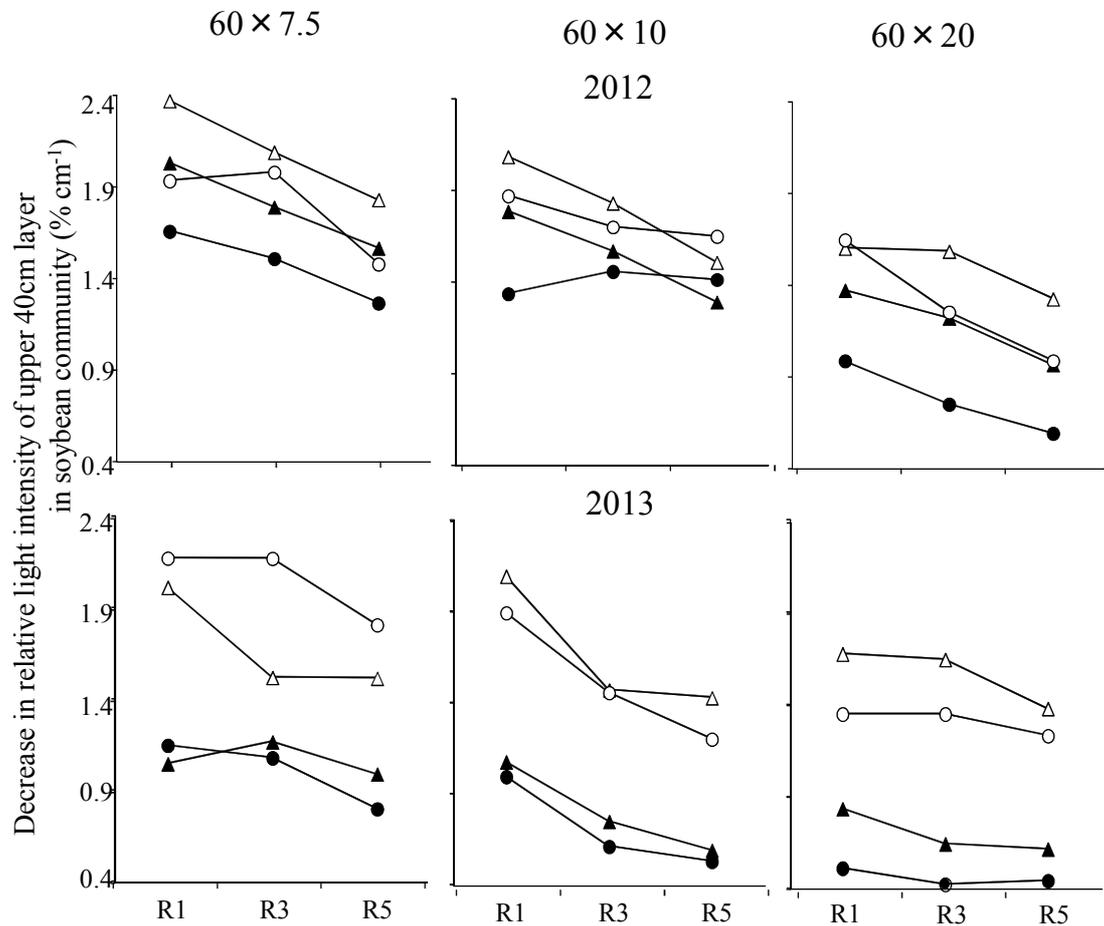


Figure VII-14. Changes in the decrease in relative light intensity of upper 40cm layer of soybean community during seed filling period (Exp. 6, 2012-2013).

○: Yuzuru (determinate type), ●: Jack (indeterminate type),
 △: Harosoy-dt1 (determinate type), ▲: Harosoy-Dt1 (indeterminate type)

R1, R3, R5: Beginning flowering, beginning pod, beginning seed stage, respectively.

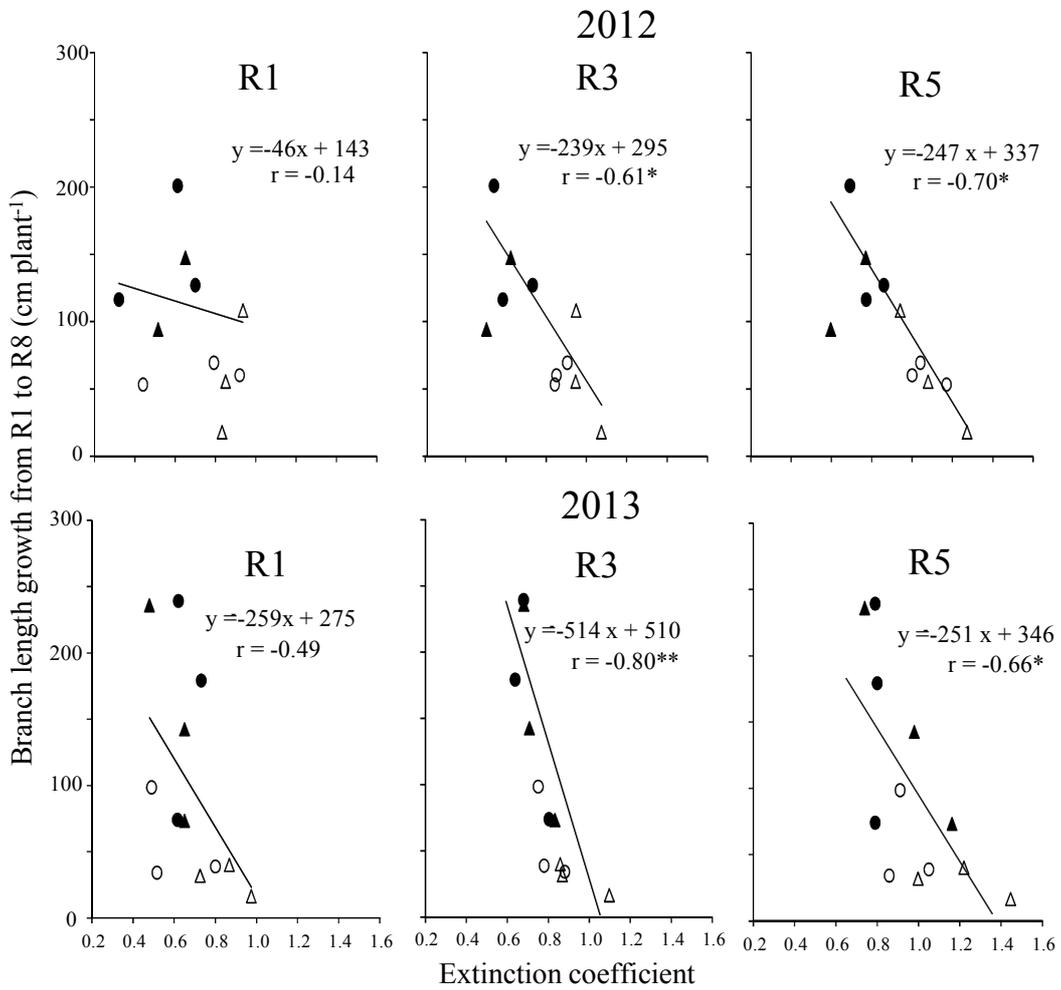


Figure VII-15. Relationship between extinction coefficient and branch length growth during seed filling period (Exp. 6, 2012-2013).

○: Yuzuru (determinate type), ●: Jack (indeterminate type),
 △: Harosoy-dt1 (determinate type), ▲: Harosoy-Dt1 (indeterminate type)

R1, R3, R5, R8 : Beginning flowering, beginning pod, beginning seed and maturity stage, respectively.

*, ** indicate significant at the 5 and 1% levels, respectively.

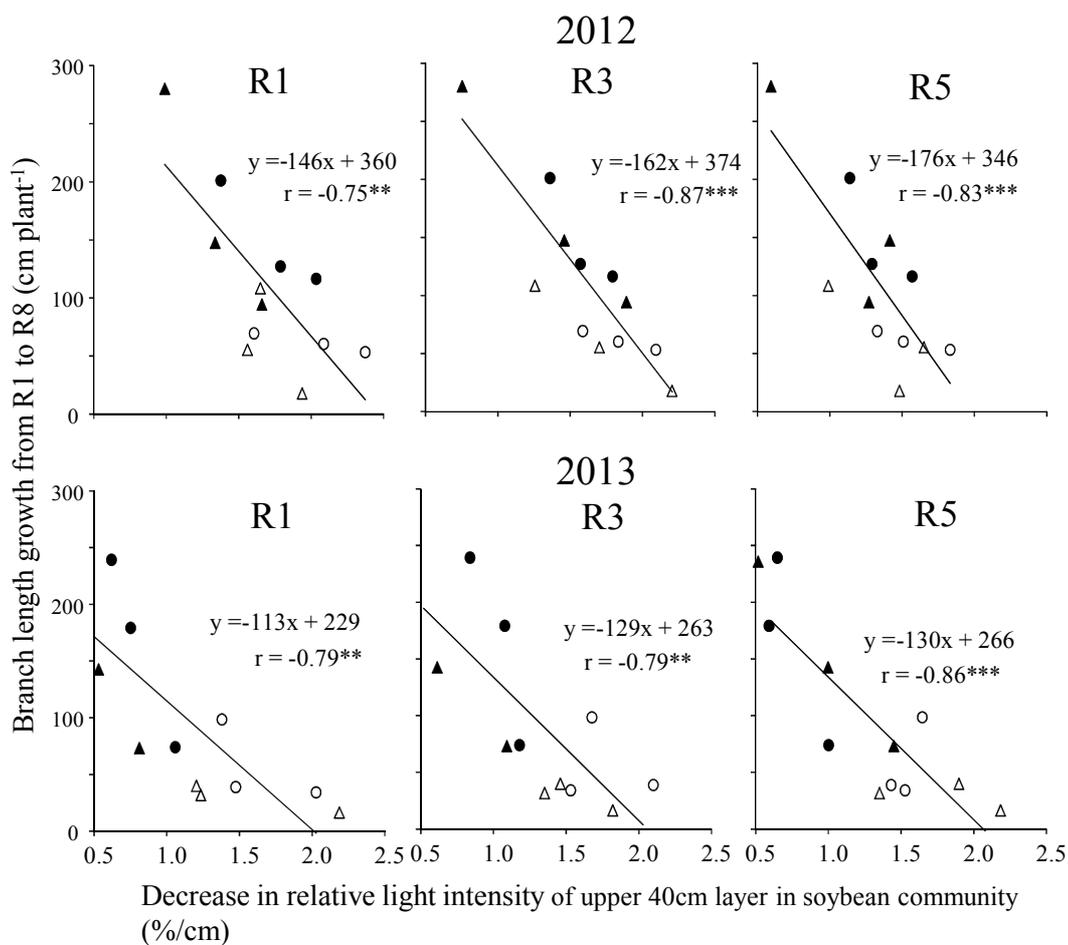


Figure VII-16. Relationship between decrease in relative light intensity of upper 40cm layer in soybean community and branch length growth during seed filling period (Exp. 6, 2012-2013).

○: Yuzuru (determinate type), ●: Jack (indeterminate type),
 △: Harosoy-dt1 (determinate type), ▲: Harosoy-Dt1 (indeterminate type)

R1, R3, R5, R8 : Beginning flowering, beginning pod, beginning seed and maturity stage, respectively.
 , * indicate significant at the 1 and 0.1% levels, respectively.

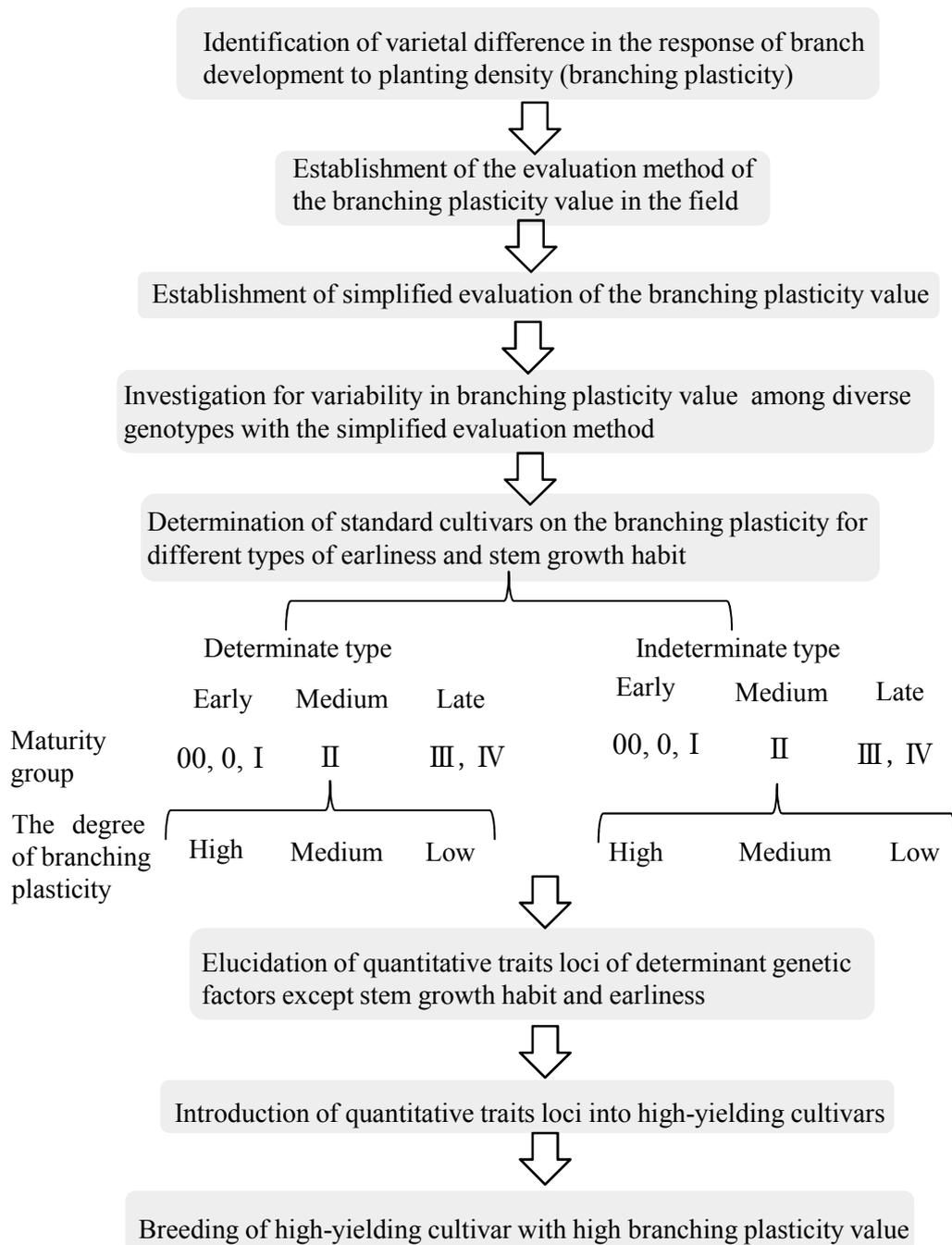


Fig.VIII-1 Vista and process of breeding in high-yielding cultivar with high branching plasticity value.