

青森県における水稲疎植栽培の
収量ならびに品質の高位安定に関する研究

Strategy for high grain-yield and quality of rice
under sparse-planting cultivation in Aomori prefecture, Japan

2019年3月

岩手大学大学院 連合農学研究科
生物生産科学専攻（岩手大学）

木村 利行

Toshiyuki KIMURA

目次

第 1 章 緒論	1
1-1 はじめに	
1-2 青森県の水稲生産の位置付け	
1-3 青森県の気象と水稲生産	
1-4 青森県における省力・低コスト化技術：疎植栽培の可能性	
1-5 本論文の構成	
第 2 章 青森県における水稲疎植栽培の収量とその変動要因	13
2-1 はじめに	
2-2 材料と方法	
2-3 結果	
2-4 考察	
2-5 摘要	
第 3 章 青森県における水稲疎植栽培の玄米品質とその変動要因	36
3-1 はじめに	
3-2 材料と方法	
3-3 結果	
3-4 考察	
3-5 摘要	

第4章	基肥窒素の増肥が疎植栽培の収量，品質，食味に及ぼす影響	56
4-1	はじめに	
4-2	材料と方法	
4-3	結果	
4-4	考察	
4-5	摘要	
第5章	青森県の気象条件下における疎植栽培の適応戦略	78
5-1	はじめに	
5-2	方法	
5-3	結果	
5-4	考察	
5-5	摘要	
第6章	総合考察	94
6-1	はじめに	
6-2	青森県における疎植栽培の実用性	
6-3	青森県における疎植栽培の課題	
6-4	青森県における疎植栽培の展望	
要約		99
謝辞		103
引用		104

第 1 章 緒論

1-1 はじめに

青森県の稲作において、省力性（労力・経費削減）と生産性（収量・品質の高位安定化）の両立は、労働力不足の対策や激化する市場競争を勝ち抜くために必須である。本章では、青森県における稲作の情勢、生産環境の現状と課題を整理し、解決策としての疎植栽培の可能性について議論する。

1-2 青森県の水稲生産の位置付け

青森県における 2016 年の農業産出額は、全国第 7 位の 3,221 億円（農林水産省 2018a）である。耕種別では、果実が 854 億円、野菜が 863 億円と大きく、続いて米が 466 億円となっている。果実は、津軽地方におけるリンゴが主体で、野菜作は夏季が冷涼な南部地方の気候を活かしたナガイモ、ゴボウ、ニンニクなどの根菜類が多い。稲作は、津軽平野や三本木台地などの平野部を中心に、県内全域で広く取り組まれている。従って、稲作の省力化は、水稲単作による大規模経営のみならず、土地利用型作物である水稲と収益性が高い果樹や野菜といった労働集約型作物を組み合わせた複合経営を進める上でも重要な課題である。

近年、青森県を含め、全国的に農業の担い手の減少や高齢化が進んでおり、労働力不足や経営規模の拡大が加速している。青森県における農業経営体の変化をみると、2015 年では 2010 年に比べて農業経営体数が 19.6%減少する一方で、経営体当たりの経営耕地面積が拡大し、特に 10ha 以上の大規模経営体が増加している（表 1-1）。加えて、農業就業人口は 19.6%減少し、70 歳以上の割合が 38.5%、同居後継者がいない販売農家が 68.5%を占めている。以上のことから、高齢で農業就業者が離農した場合、今後も地域の担い手となる農業経営体に農地が集積し、今以上に経営規模の拡大や労働力不足が進行することが想定される。

表 1-1 青森県における農業経営体の変化.

項 目	単位	2010年	2015年	増減
農業経営体数	戸	44,667	35,914	△ 20
1経営当たり経営耕作面積	ha	3	3	16
経営耕地面積集積割合				
5ha未満	%	53.5	46.0	△ 8
5～10ha	%	17.5	17.3	△ 0
10～30ha	%	15.9	19.6	4
30ha以上	%	13.1	17.1	4
農業就業人口	人	80,483	64,746	△ 20
年齢別農業就業人口の割合				
15～29歳	%	4.6	3.4	△ 1
30～39歳	%	3.9	4.6	1
40～49歳	%	8.0	6.8	△ 1
50～59歳	%	19.0	15.8	△ 3
60～69歳	%	26.1	30.8	5
70歳以上	%	38.3	38.5	0

青森県企画政策部 2015. を改編した. 年齢別農業就業人口の割合は, 自営農業に主として従事した世帯員数から算出した. 増減は, 農業経営体数, 1 経営当たり経営耕作面積, 農業就業人口を比率 (2015 年/2010 年), それ以外を差 (2015 年-2010 年) で示した.

さらに、わが国の稲作を巡る社会経済は厳しさを増しており、国民一人当たりの米消費量の減少と国内外における市場競争の激化により、一層の低コスト化が求められている。米価は、需給の均衡が崩れることで大幅に下落する。2014年産米における相対取引価格（60kg当たり）は、全銘柄平均が11967円、青森県産の「つがるロマン」、「まっしぐら」では約9800円と低迷した（農林水産省2016）。2017年産水稻における青森県の品種別作付面積の割合は「まっしぐら」が62.1%、「つがるロマン」が33.0%、「青天の霹靂」が4.5%（米穀安定供給確保支援機構2018）で、業務用向け品種である「まっしぐら」、「つがるロマン」の比率が高い。青森県産米は品質を兼ね揃えた値頃感のある業務用米としての引き合いが強いため、稲作の低コスト化は喫緊の課題である。

1-3 青森県の気象と水稻生産

青森県の稲作は、高緯度のため春季の温度上昇が遅く、秋季の温度下降が早いという地域性に加えて、ヤマセなどの低温による影響を受けやすいことから、過去に幾度となく冷害に苛まれてきた（青森県農林水産部農産園芸課2017）。ヤマセは、初夏から盛夏にかけて東方および北方海上から吹走する冷湿な風である。

青森県は、北緯40度12分から41度33分の範囲の本州最北に位置する。地勢は、概して山地が多く、太平洋側を南下する親潮寒流、日本海側を北上する対馬暖流とこれから枝流として津軽海峡に流入する津軽暖流に囲まれている（図1-1, 二部1989）。平野部には、県西部の津軽地方に位置する津軽平野、青森市中心部の大半を占める青森平野、東部の南部地方に八戸台地、三本木台地があり、これらは県内の主要な稲作地帯になっている。また、八甲田山系が県を東西に二分するように縦走しており、梅雨期のヤマセや冬季に北西から吹く季節風の障壁になっている。ヤマセは、標高が1000~1500m程度で東風とともに陸地に侵入し、気

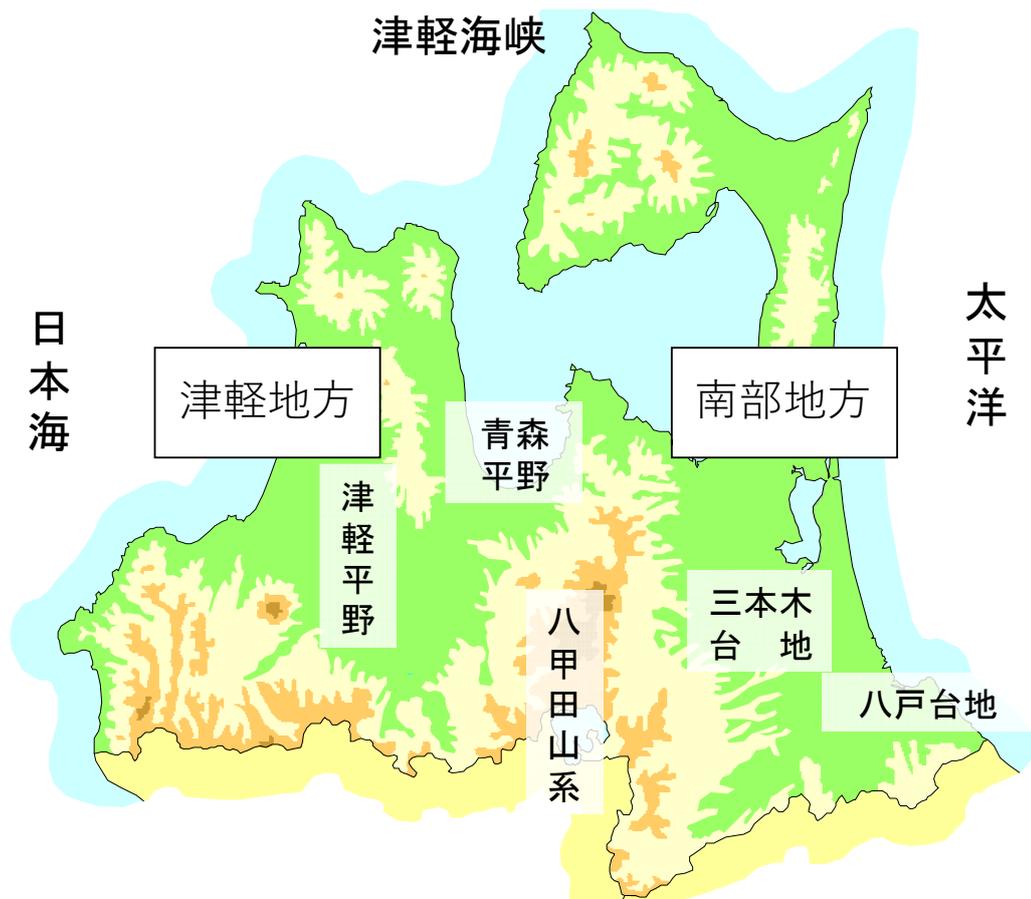


図 1-1 青森県の地勢.

団変質をおこしつつ内陸を吹走するため地形の影響を大きく受ける（菅野 1997）。そのため、ヤマセ吹走時の青森県における気温分布は、山地を境界線にして不連続となり、太平洋沿岸に近い地域ほどヤマセによる低温の影響が大きく、八甲田山系や津軽丘陵の西側では直接的な影響を受けず相対的に高温になる（小鹿 1974）。一方、育苗期（晩春）から田植後（入梅）にかけてシベリア方面から日本海に向けて寒冷な高気圧が張り出すことで吹走する、冬季のような寒冷な季節風が流れ込むことがある（ト蔵 2001）。津軽地方の農民から「西のヤマセ」とも呼ばれる（長谷ら 1983）この大気現象は、ヤマセによる気温の低下とメカニズムは異なるが、稲作にとって脅威であることに変わりはない（ト蔵 2001）。青森県では、こうした冷涼な気象条件に適応するための稲作技術が開発・普及されてきた。

青森県における 2018 年産米の 10a 当たり収量は 596 kg（ふるい目幅 1.7mm 選別）で、全国でも長野県（618 kg）に次いで高い（農林水産省 2018b）。元来、青森県を含む東北地域は、水稻の低収地帯として知られていたが、昭和 30 年以降には反収が他の地域を抜き多収地帯となった（田中 1973）。東北地域における収量増加の要因には、冷害克服のための品種改良と栽培技術の発展が挙げられる（東北農業試験場創立 50 周年記念事業会 1999）。品種改良については、早生化や耐肥性、耐冷性の向上、栽培法については水苗代から保温折衷苗代、保温畑苗代、ビニルハウス育苗へと発展した育苗技術の進歩による早植えの役割が大きい。さらに、田植機による機械移植技術は育苗方式の発展と相まって、担い手の高齢化等が進む中、収量の増大・安定化に大きく貢献した。

機械移植が普及した 1980 年頃の青森県における栽植密度は、茎数ならびに穂数を確保し、収量を安定させるために 22~26 株 m^{-2} の密植が推奨されていた（青森県 1980）。月別のヤマセ出現率は、分けつの発生始期～盛期に当たる 6 月が最

も多い（二部 1989）。穂数が決定される主要な期間は生育初期，特に最高分げつ期以前であることから（松島 1969），6月の低温寡照は分げつ発生の良否を介して収量に大きく影響する。従って，初期生育を確保しやすい密植は，分げつ期の天候不順等による穂数の減少を避ける一つの方法となる（佐藤ら 1960）。

青森県における季節別平均気温の長期変化をみると，青森地方気象台ではすべての季節において平均気温が上昇しており，ヤマセの影響を受けやすい八戸特別地域気象観測所では夏季（6～8月）以外の季節で平均気温が上昇している（仙台管区気象台 2017）。地球温暖化に伴う水稻の収量性について，横沢ら（2009）は，北日本の収量は温暖化に伴い増加することを推計し，これにはバイオマスの増加と冷害の危険性の減少が関係するとしている。また，下野（2008）は，地球温暖化は北日本の冷害発生に強く関わる夏の気温を大きく上昇させないが，春（5～6月）の1℃の気温上昇が冷害強度を16%増加させ，乾物生産を促進し増収させることを指摘している。分げつの発生に関するこれまでの知見（櫛淵ら 1968，松島ら 1964，齋藤ら 1982，田中ら 1968）と照らし合わせても，寒冷地である青森県では高温条件が茎数ならびに穂数，粍数の確保の面で有利に働くことが考えられる。

前述のとおり，近年の青森県における6月の平均気温が上昇傾向にある一方で，栽植密度は低下傾向にある（図 1-2）。各生産者の栽植密度は，育苗に要する経費や労力と収量性を考慮した経験に基づく判断から決定されているものと考えるが，密植が有利とされてきた青森県における栽植密度の低下傾向には，米価低迷や労力不足による経営的な理由に加え，分げつ期の昇温も一因となっていることが推察される。

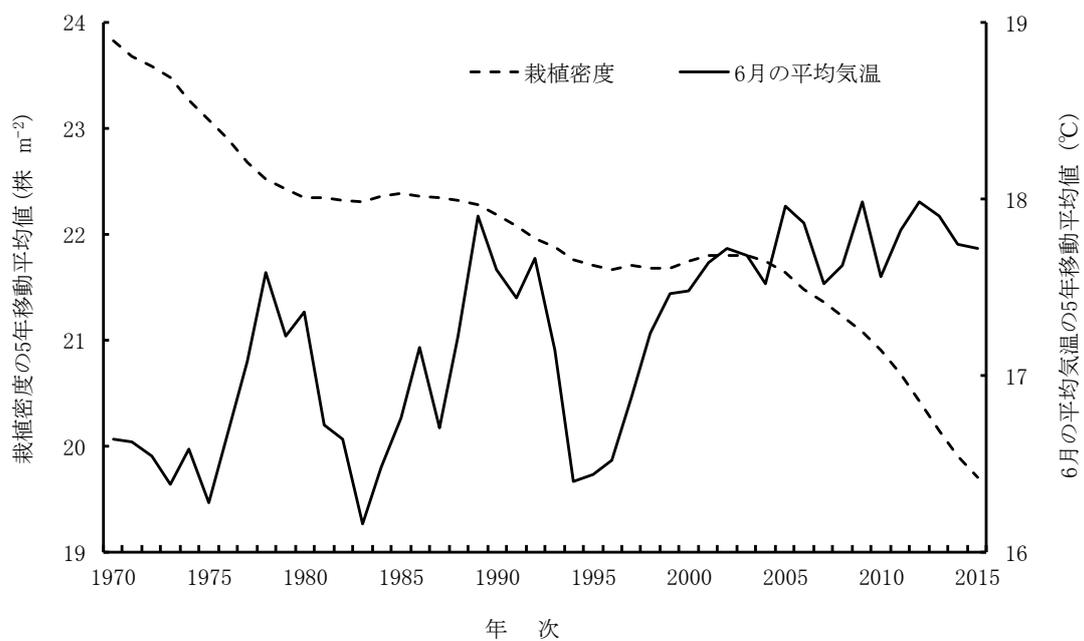


図 1-2 栽植密度と 6 月の平均気温の 5 年移動平均値の推移.

栽植密度は青森県全体の数値で, 各年発刊の作物統計 (農林水産省) より引用した. 6 月の平均気温は青森地方気象台の観測値.

1-4 青森県における省力・低コスト化技術：疎植栽培の可能性

稲作の省力・低コスト化への要望に対応し得る栽培技術として、直播栽培と疎植栽培の二つを挙げる。直播栽培は、ビニルハウスなどで加温して育苗した苗を田植えする移植栽培に対して、乾田や代かき後の水田に直接、種子を播種する栽培技術である。移植栽培における10a当たりの育苗（床土準備、苗箱への播種、ハウス管理）に要する労働時間は12.1時間であり、栽培管理全体の約4割を占める（青森県農林水産部2015）。直播栽培の大きなメリットは、育苗作業を省略した大幅な省力・低コスト化にある。さらに、直播栽培の収穫適期は移植栽培に比べて遅くなるため（青森県産業技術センター農林総合研究所2014a）、直播栽培と移植栽培の組み合わせによる作業分散も可能になる。しかし、直播栽培は移植栽培と作業体系が大きく異なることから、その技術導入には専用機械の購入や除草管理などの栽培技術を習得する必要がある（八木2016）。加えて、直播栽培は移植栽培に比べて出穂期が遅くなるため（青森県産業技術センター農林総合研究所2014a）、登熟気温の確保の面から栽培適地が青森県の温暖な地域に限定される（木村2015, 木村2016）。青森県では直播栽培の普及を促しており（青森県2018a）、大規模経営体が積極的に導入している事例はみられるが、2017年における直播栽培面積は1,527ha（2018年青森県庁農林水産部農産園芸課調べ）で、水稻作付面積全体に対する普及割合は2%程度に止まっている。

一方、疎植栽培は、移植栽培における省力・低コスト技術である。疎植栽培では、株間を広げることで栽植密度を地域の慣行より少なくし（図1-3）、単位面積当たりに使用する育苗箱数を削減する。栽植密度が慣行栽培より低く、植付株数が少ない疎植栽培では、水稻の積極的な分けつ発生と成長を促すことで株当たり穂数や一穂粒数を増大し（図1-4）、面積当たり粒数を補償することで多収性を示す（橋川1984）。栽植密度と収量の関係について、武田・広田（1971）は栽植密



図 1-3 慣行栽培（上）と疎植栽培（下）の水田の外観.

慣行栽培は 21.2 株 m^{-2} (条間 $30.0\text{cm} \times$ 株間 15.7cm),
疎植栽培は 11.2 株 m^{-2} (条間 $30.0\text{cm} \times$ 株間 30.0cm).

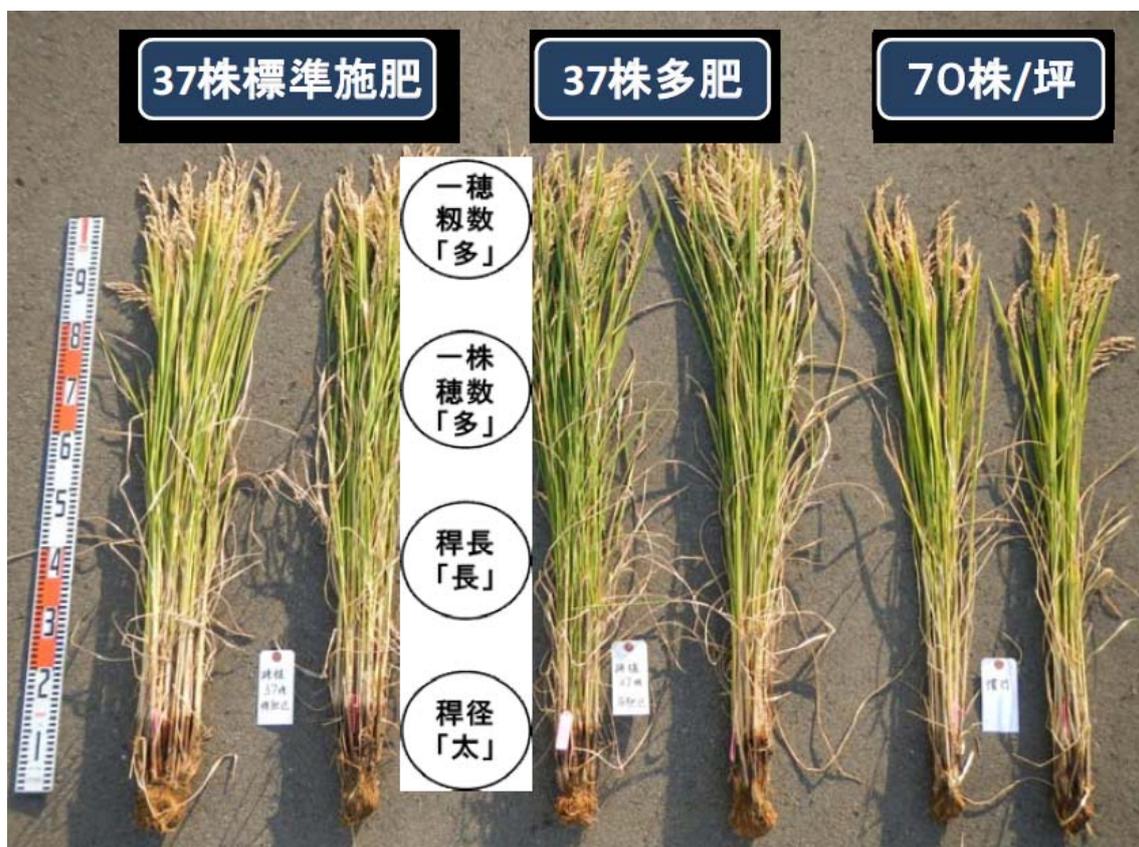


図 1-4 疎植栽培（坪当たり 37 株）と慣行栽培（同 70 株）における成熟期の稲株。

水稻疎植栽培マニュアル（青森県産業技術センター農林総合研究所 2014b）から転載した。

度が 10~100 株 m^{-2} の広範囲において収量は同等となり、一定以上の栽植密度では収量が頭打ちとなって増加せず、一定以下の栽植密度では減収しないことを報告している。また、寒地における水稲の不作は初期の生育不良により特徴付けられ、暖地における不作は後期の生育不良によって示し得るため、水稲の栽植密度は寒地ほど高い傾向にある（石塚・田中 1952）。このように、一定の収量が補償される栽植密度は地域の気象条件により異なり、青森県ではその水準が高いことが考えられる。実際に、青森県における 2017 年の栽植密度は 19.5 株 m^{-2} であり、全国的にみると北海道に次いで高い（農林水産省 2018b）。

栽植密度を 22 株 m^{-2} から半分の 11 株 m^{-2} とした疎植栽培では、育苗に要する作業時間が 42%、資材費と労働費の合計額が 53%削減される（大野ら 2001）。近年販売されている田植機には疎植機能を標準装備したものが多く、所持する田植機に疎植機能がない場合でも株間ギアを疎植用に付け替えることで簡易に技術導入が可能となる（村岡 2010）。疎植栽培における栽植条件の明確な定義はないが、青森県では慣行の栽植密度（坪当たり 70 株程度）に対して、15.2 株 m^{-2} （坪当たり 50 株）や 11.2 株 m^{-2} （坪当たり 37 株）を疎植栽培としている（青森県産業技術センター農林総合研究所 2014b）。疎植栽培における技術導入面でのメリットとしては、直播栽培に比べて熟期の遅延による影響が小さく、特別な技術習得を必要としないことが挙げられる。また、育苗ハウスを増設することなく作付面積の拡大が可能になるため、水稲単作等における大規模経営への速やかな対応が期待できる。

疎植栽培の実用性については、全国各地で検討が行われており、概して収量は慣行栽培と同等になることが報告されている（林 2017, 池尻ら 2013, 井上ら 2004, 木村ら 2005, 松波ら 2013, 大橋・今井 2004）。青森県については、森・村山（1983）による報告がみられ、疎植条件における収量性は健苗づくりと施肥技術を適正化

した条件において慣行の栽植密度と同等以上を確保したが，これに関しては気象の年次変動や土壌条件，施肥体系などの栽培条件との関連で追及するべきと結論付けられている．これまで，青森県のようなヤマセ等による低温の影響を受けやすい寒冷地において，栽植条件に品種，作期，施肥法を組み合わせ体系的に水稲疎植栽培の実用性を検討した研究事例はみられない．本論文では，2010～2016年の7カ年にわたって実施した研究事例から，寒冷地である青森県における水稲疎植栽培の生育特性や収量ならびに品質の変動要因，坪当たり37株とする極端な疎植栽培における収量・品質の高位安定技術，青森県における気象の地域性を考慮した疎植栽培の導入指標について検討した．

1-5 本論文の構成

本論文は，第1～6章で構成している．第1章では緒論として，青森県における農業情勢，稲作期間の気象条件とこれに応じた栽培法について整理し，疎植栽培の必要性和可能性について議論した．第2章では，青森県における水稲疎植栽培の収量性とその変動要因について検討した．第3章では，青森県における水稲疎植栽培の玄米品質とその変動要因について検討した．第4章では，栽植密度を坪当たり37株とする疎植栽培の収量高位安定技術として施肥条件を取り上げ，基肥窒素の増肥が収量ならびに玄米品質，食味に及ぼす影響を評価した．第5章では，栽植密度を坪当たり37株とする疎植栽培について，青森県における気象の地域性と今後の地球温暖化を考慮した収量性を評価し，各地域において推奨するべき栽培条件を示した．第6章では，青森県における疎植栽培の実用性，今後の課題と展望について総合的に考察した．

第2章 青森県における疎植栽培の収量とその変動要因

2-1 はじめに

東北地域における水稻の栽植密度は 17.1~19.5 株 m^{-2} の範囲であり，その中でも青森県は最も高い（表 2-1）．主要な作付品種の草型は，青森県が偏穂重型であるのに対して，北海道では穂数型，青森県を除く東北各県では中間型や偏穂数型である．穂数型品種は分けつ数や穂数が多く，一穂重が小さい．一方，穂重型品種は，穂数型品種と逆の傾向を示す．青森県における育成品種は穂重型寄りのもものが多く，現在の奨励品種である「まっしぐら」，「つがるロマン」，「青天の霹靂」をはじめ，過去の主力品種であった「ゆめあかり」，「むつほまれ」，「アキヒカリ」は全て偏穂重型に属する．以上のように，青森県では一穂当たりの生産性に優れた品種を，ある程度の密植条件により穂数を確保する栽培法になっているため，疎植条件では穂数が十分に確保できずに籾数が減少し，収量が低下することが懸念される．しかし，近年の気象条件では，6月の平均気温が上昇傾向にあるため（図 1-2），分けつならびに穂数を確保するという点で疎植栽培の適応性が向上しているとも考えられる．

既存の研究報告によると，疎植栽培の収量は，気候が温暖な西日本（池尻ら 2013，木村ら 2005，大橋・今井 2004）のほか，東北地方では比較的温暖である秋田県（松波ら 2013）や北海道での高温年次（林 2017）において，慣行栽培と同等とされている（図 2-1）．しかし，初期生育が不良な条件となった場合，疎植栽培では慣行栽培より面積当たり籾数が減少して減収する事例が福井県で報告されている（井上ら 2004）．これまで，ヤマセの影響を受けやすく，水稻の生育量を確保し難い青森県において，体系的に疎植栽培の効果を評価した報告例はみられない．本章では，青森県黒石市において 3 水準の栽植密度（標準株数 = 21.2 株 m^{-2} に対して 2 水準の疎植条件 = 15.2 株 m^{-2} ，11.2 株 m^{-2} ，以下，標準区，71

表 2-1 各道県における収量，収量構成要素ならびに作付上位品種とその草型．

都道府県	10a当たり 玄米重 (kg)	栽植密度 (株 m ⁻²)	株当たり 穂数 (本)	面積当たり 穂数 (本 m ⁻²)	一穂穂数 (粒)	面積当たり 穂数 (粒 m ⁻²)	千粒重 (g)	作付上位品種	
								品種名	草型
北海道	580	22.0	24.5	538	63.2	340	22.1	ななつぼし	穂数型
青森	610	19.5	21.6	421	83.8	353	22.6	まっしぐら	偏穂重型
岩手	543	17.5	25.1	440	66.1	291	21.9	ひとめぼれ	偏穂数型
宮城	546	17.1	26.9	460	66.1	304	21.8	ひとめぼれ	偏穂数型
秋田	589	19.0	22.5	427	75.2	321	22.3	あきたこまち	中間型
山形	611	19.3	24.5	473	67.4	319	22.1	はえぬき	偏穂数型
福島	561	17.1	23.7	405	75.8	307	21.9	コシヒカリ	中間型

収量ならびに収量構成要素は農林水産省 2018b より引用した．
作付上位品種は米穀安定確保支援機構 2018 より引用した．

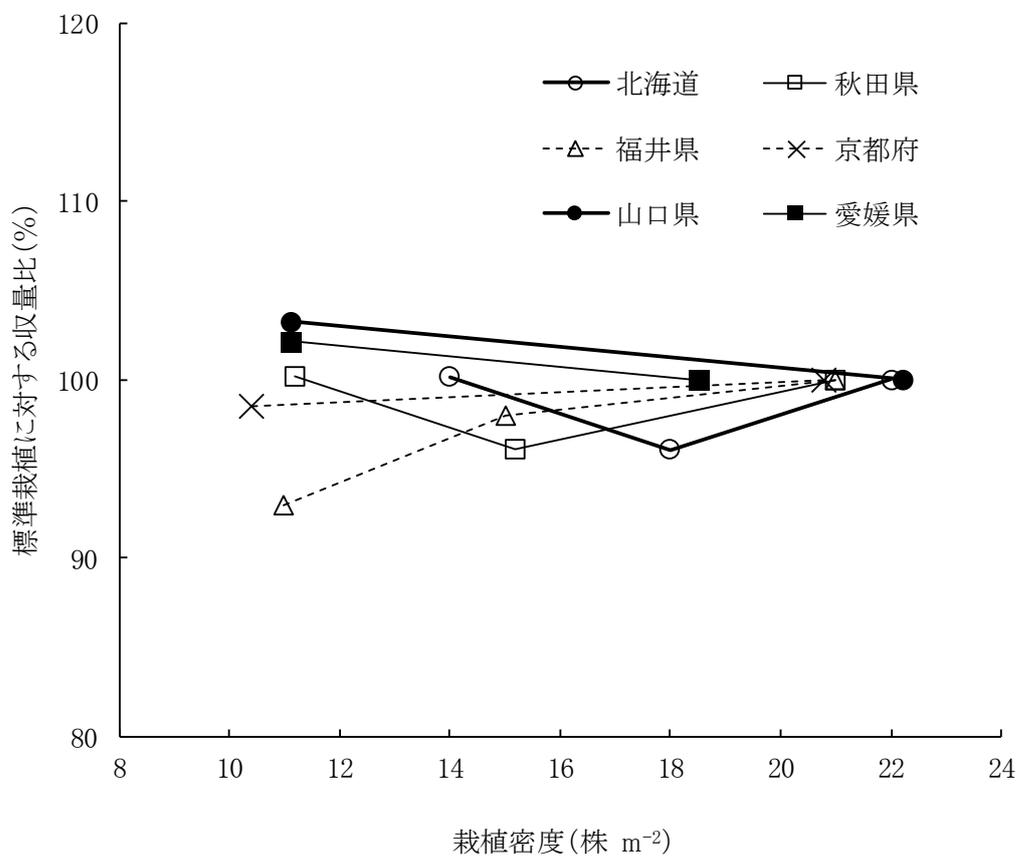


図 2-1 先行研究事例における疎植栽培の収量性.

先行研究事例は、北海道が 2013～2015 年における「ななつぼし」(林 2017), 秋田県が 2010～2012 年における「あきたこまち」(松波ら 2013), 福井県が 1996～1999 年における「コシヒカリ」(井上ら 2004), 京都府が 2002～2003 年における「コシヒカリ」(大橋・今井 2004), 山口県が 2007～2009 年における「コシヒカリ」, 「ひとめぼれ」, 「ヒノヒカリ」の平均値(池尻ら 2013), 愛媛県が 2002～2003 年における「コシヒカリ」(木村ら 2005)による.

%疎植区, 53%疎植区) を2品種(「つがるロマン」, 「まっしぐら」), 2作期(5月中旬移植, 5月下旬移植) の計12組合せで4カ年(2010~2013年) 実施した研究事例から, 青森県における疎植栽培が収量に及ぼす影響を評価し, その変動要因について検討した.

2-2 材料と方法

試験は, 2010~2013年の4カ年に青森県産業技術センター農林総合研究所内の水田圃場(沖積軽埴土)で行った. 同圃場は, 津軽平野南部の青森県黒石市に位置する. 品種は, 現存の青森県における主力品種である「つがるロマン」と「まっしぐら」を供試した. 「つがるロマン」と「まっしぐら」の草型は偏穂重型, 早晚性は「まっしぐら」が中生の早, 「つがるロマン」が中生の中であり, 出穂期は「まっしぐら」が「つがるロマン」に比べて1日ほど早い(青森県「攻めの農林水産業」推進本部2011). 「つがるロマン」は青森県津軽平野の中央地帯を中心に, 「まっしぐら」は津軽平野北部や南部地方を主体として全県的に作付けされている. 移植日は, 5月中旬(2010年5月18日, 2011年5月19日, 2012年5月17日, 2013年5月17日, 以下5中区と記す), 5月下旬(2010年5月25日, 2011年5月26日, 2012年5月25日, 2013年5月27日, 以下5下区と記す)の2水準を設けた. なお, 5中区は青森県では田植え始期頃, 5下区は田植え終期頃に当たる(青森県「攻めの農林水産業」推進本部2015). 面積当たり栽植密度はいずれも条間を30cmとして, 株間15.7cmの21.2株 m^{-2} , 株間22cmの15.2株 m^{-2} , 株間30cmの11.2株 m^{-2} (以下, 標準区, 71%疎植区, 53%疎植区と記す)の3水準を設けた. 移植作業は手植えで行い, 植付本数は1株当たり4本とした. 苗は, 播種量を箱当たり乾籾100gとして30~35日間育苗した中苗を用いた. 施肥量は基肥を成分で各品種の標準量とし, 基肥をN:

$P_2O_5 : K_2O = 5.0 : 10.0 : 10.0 \text{ g m}^{-2}$, 追肥を「つがるロマン」に $N = 2.0 \text{ g m}^{-2}$, 「まっしぐら」に $N = 3.0 \text{ g m}^{-2}$ 施用した. 基肥は窒素, リン酸, カリの 3 要素が配合された化成肥料とリン酸, カリの PK 化成で施肥量を調整し, 追肥には硫安を用いた. 追肥は, 標準区が幼穂形成期 (幼穂長 1.5 mm) に達した日に行った. 水管理は慣行に従い行った. 試験区の面積は 1 区当たり約 20 m^2 とした. 試験圃場は, 2010 年では近隣に位置する 4 筆を各作期で 2 筆ずつ, 2011 年および 2012 年では隣接する 2 筆を各作期で 1 筆ずつ, 2013 年では 1 筆を 2 面に分割して用いて, いずれも品種ならびに栽植密度を無作為に 2 反復で配置した. 幼穂形成期頃の生育調査は, 周囲株の欠株の有無を確認し, 正常に生育した条の連続する 10 株について草丈, 莖数, SPAD 値 (SPAD-502, コニカミノルタ社製) を調査した. 生育量は, 草丈に面積当たり莖数 (本 m^{-2}) を乗じて算出した. SPAD 値は, 進展中の葉を除いた最上位展開葉を測定した. 収量調査は, 標準区では 70 株, 71% 疎植区では 50 株, 53% 疎植区では 37 株を 4 条で株間方向に連続して刈り取りし, 玄米を 1.9 mm のふるい目幅で選別した. 収量構成要素は, 2010~2012 年は坪刈り地点の前後から 40 株を刈り取りし, その中から穂数と穂重が中庸な 5 株を選出して穂数, 籾数, 登熟歩合を調査し, 千粒重は収量調査の精玄米を用いて調査した. 2013 年は, 全穂数を測定してから刈り取りし, 回収した全籾を十分に攪拌してから約 800 g を取り出し, その籾数, 精玄米数, 登熟歩合, 千粒重を測定した. 収量, 千粒重は各年次とも水分含量を 15% に換算した. 気象データは, 所内に設置されている黒石アメダスの観測値を用いた. 統計分析は, エクセル統計 2010 (社会情報サービス社製) を用いて作期毎に多元配置分散分析により解析した.

2-3 結果

1) 試験実施年次の気象概況

試験を実施した4カ年の5月～9月の気象経過を月別にみると、5月の平均気温は2013年が平年より0.9℃高く、2010～2012年は平年より低かった（表2-2）。6月の平均気温は2012年が平年より0.2℃低く、それ以外の年次は平年より高かった。7～9月の平均気温は各年次とも平年より高く経過した。日照時間は、分けつ期に当たる6月が各年次とも平年より多かった。登熟期間（出穂後40日間）の平均気温は22.7～25.4℃で4カ年を通じて登熟条件は良好であった。月別の気象条件は概ね良好であったが、半旬別で詳細にみると2011年や2012年のように分けつ始期～盛期頃が低温で経過した期間がみられた（図2-2, 図2-3, 図2-4, 図2-5）。

2) 栽植密度の違いが幼穂形成期頃の生育に及ぼす影響

草丈は、5中区と5下区の2作期で栽植密度間に有意差が認められなかった（表2-3）。茎数は年次間差が大きく、2010年と2011年に比べて2012年と2013年で多かった。5中区の茎数には年次間、品種間、栽植密度間で有意差が認められ、交互作用は年次×栽植密度で有意であった。5下区の茎数には年次間、栽植密度間で有意差が認められた。茎数は栽植密度が低いほど少なく、特に5中区では標準区に対する疎植区の茎数が2010年と2013年に比べて2011年と2012年で少なかった。作期間では、5下区が5中区に比べて茎数が少ない傾向であった。5中区のSPAD値には栽植密度間で有意差が認められ、栽植密度が低いほど高かった。5下区のSPAD値には年次間と栽植密度間で有意差が認められ、2012年が最も低く、栽植密度が低いほど高かった。

3) 栽植密度の違いが収量，玄米品質に及ぼす影響

収量は2作期とも年次間，品種間で有意差が認められた（表2-4，表2-5）。年次，品種を平均した標準区の収量に対する71%疎植区の収量比は5中区が99%，5下区が100%で，53%疎植区の収量比は5中区が96%，5下区が98%であった。収量における栽植密度の主効果は有意でなかったものの，標準区に対する53%疎植区の収量比には92～102%の差異があり，2011年5中区と2012年5下区で収量比が低かった。収量構成要素についてみると，穂数はいずれの作期でも疎植条件において減少し，53%疎植区では標準区の80～92%，71%疎植区では91～96%であった。逆に，一穂粒数は疎植条件で増加する傾向を示し，53%疎植区では標準区の104～126%，71%疎植区では102～110%であった。結果として，粒数は53%疎植区では標準区の90～99%，71%疎植区では94～101%であった。登熟歩合は疎植条件で高い傾向であり，53%疎植区では標準区の100～104%，71%疎植区では98～104%であった。千粒重は栽植密度間で有意差がなかった。

収量と各収量構成要素の相関係数をみると，穂数と粒数で有意な相関関係が認められた（表2-6）。また，収量と幼穂形成期頃の生育との関係を見ると，茎数が強く関わっていた。すなわち，疎植条件での収量の低下要因は，初期の茎数減少とそれによる穂数の低下を介した粒数の減少によることが示された。

4) 53%疎植区と標準区の収量差と気象の関係

分散分析の結果，疎植区における収量は標準区と有意差が年次を超えて認められなかった（表2-4，表2-5）。しかし，53%疎植区と標準区の収量比は2011年5中区ならびに2012年5下区で大きく低下した。そこで，53%疎植区に着目し，その減収要因を気象面から解析した。粒数の形成に関与する生育期間として移植翌日から移植後70日（減数分裂期前後）を設定し，気象要素と収量比，穂数比，

籾数比との関係について検討した（表 2-7）。「つがるロマン」と「まっしぐら」は草型がともに偏穂重型で早晚性に大差がないこと、本研究における各移植時期は青森県の慣行の範囲であることから品種と作期を込みにした解析を行った結果、収量比と移植後 11～40 日、21～50 日の平均気温との間に有意な正の相関関係が認められ、籾数比は移植後 21～50 日の平均気温との間に有意な正の相関関係が認められた。これらの結果から、移植後 11～50 日の平均気温と収量比の関係性が示された（図 2-6（A））。53%疎植区において、収量比は品種と作期を込みにして 90～104%、移植後 11～50 日の平均気温は 17.5～20.9℃の範囲に分布し、収量比と移植後 11～50 日の平均気温との間には 5%水準で有意な正の相関関係が認められた。

2-4 考察

青森県黒石市において 2 段階の疎植条件、2 品種、2 作期の組み合わせの試験を 4 カ年実施した結果、71%疎植区については標準区と同等の籾数を確保し、栄養成長期の平均気温による収量変動が認められなかったことから、収量の安定性が高い省力・低コスト技術であることが確認された（図 2-6（B））。一方、栽植密度を 11.2 株 m^{-2} と極端な疎植条件にする 53%疎植区については、標準区に対する減収程度が 4 カ年平均では 2～4%に留まり、移植苗箱数を大幅に削減できる低コスト化に応じた一定の収量性を示した（表 2-4、表 2-5）。ただし、図 2-6（A）で示したように、栄養成長期の気温が低い場合には、53%疎植区と標準区との収量差が大きくなる傾向がみられた。以下、53%疎植区における収量の変動要因について議論する。

本研究における疎植区の収量は、標準区に対して有意な低下が認められなかったが、2011 年 5 中区と 2012 年 5 下区では標準区と 53%疎植区の収量比が低かつ

表 2-2 試験実施年次における月別の気象.

気象要素	月	2010年	2011年	2012年	2013年	平年値
平均気温(°C)	5	13.6	14.1	14.3	15.4	14.5
	6	19.3	18.6	17.3	18.3	17.5
	7	23.6	22.7	21.7	21.8	21.2
	8	25.5	23.6	24.7	23.8	23.0
	9	19.7	19.8	22.2	19.2	18.6
	平均	21.1	20.4	20.7	20.2	19.4
日照時間(h)	5	96	99	122	103	104
	6	208	186	222	244	178
	7	123	187	204	114	164
	8	186	204	238	195	182
	9	162	130	194	162	153
	平均	776	807	980	819	781

黒石アマガサの観測値. 5月は第4~6半旬の平均値.

平均値の統計期間は1991~2010年.

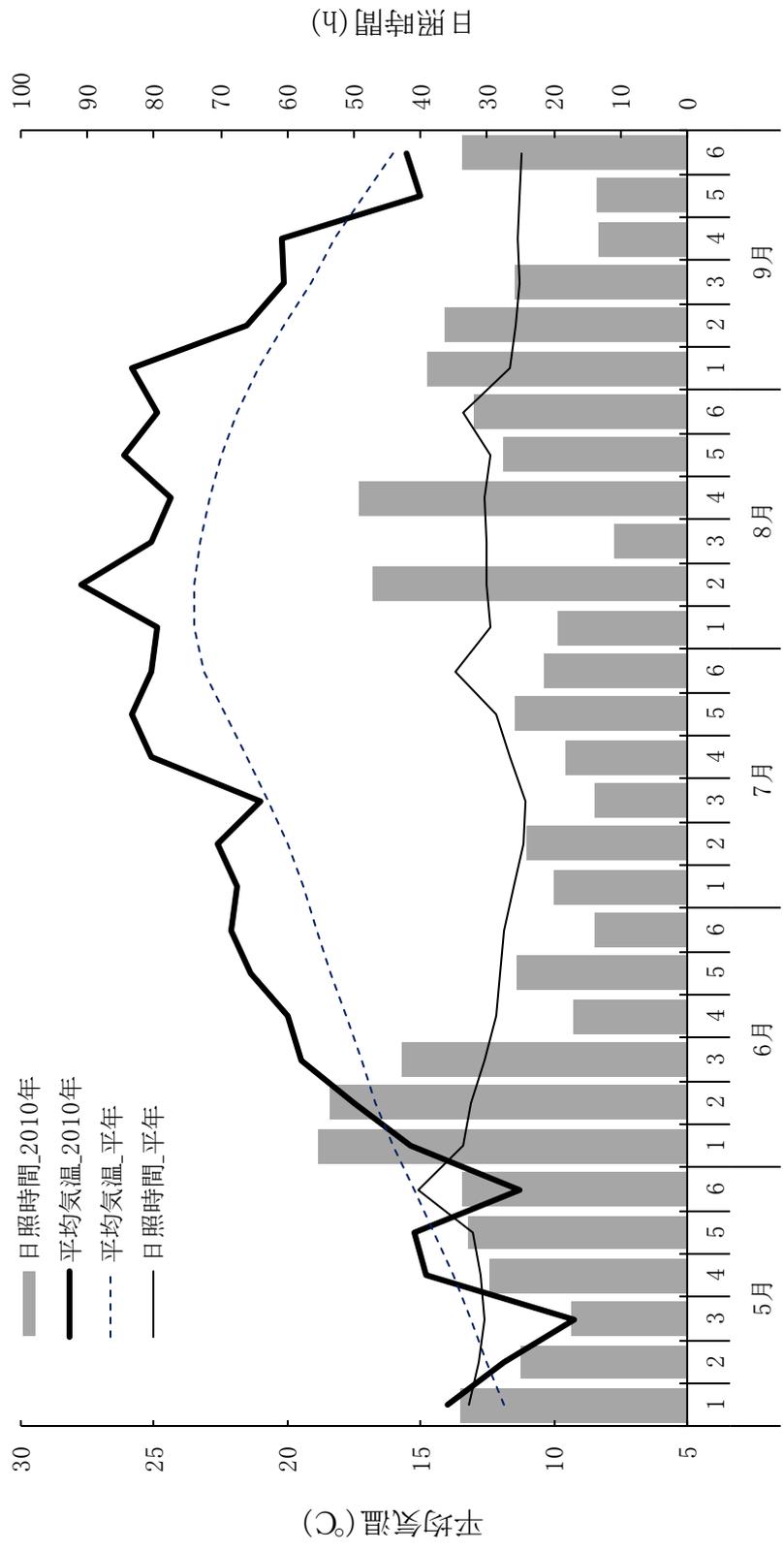


図 2-2 2010 年における半旬別の気象経過.

黒石アメダスの観測値. 平年値の統計期間は 1981~2010 年.

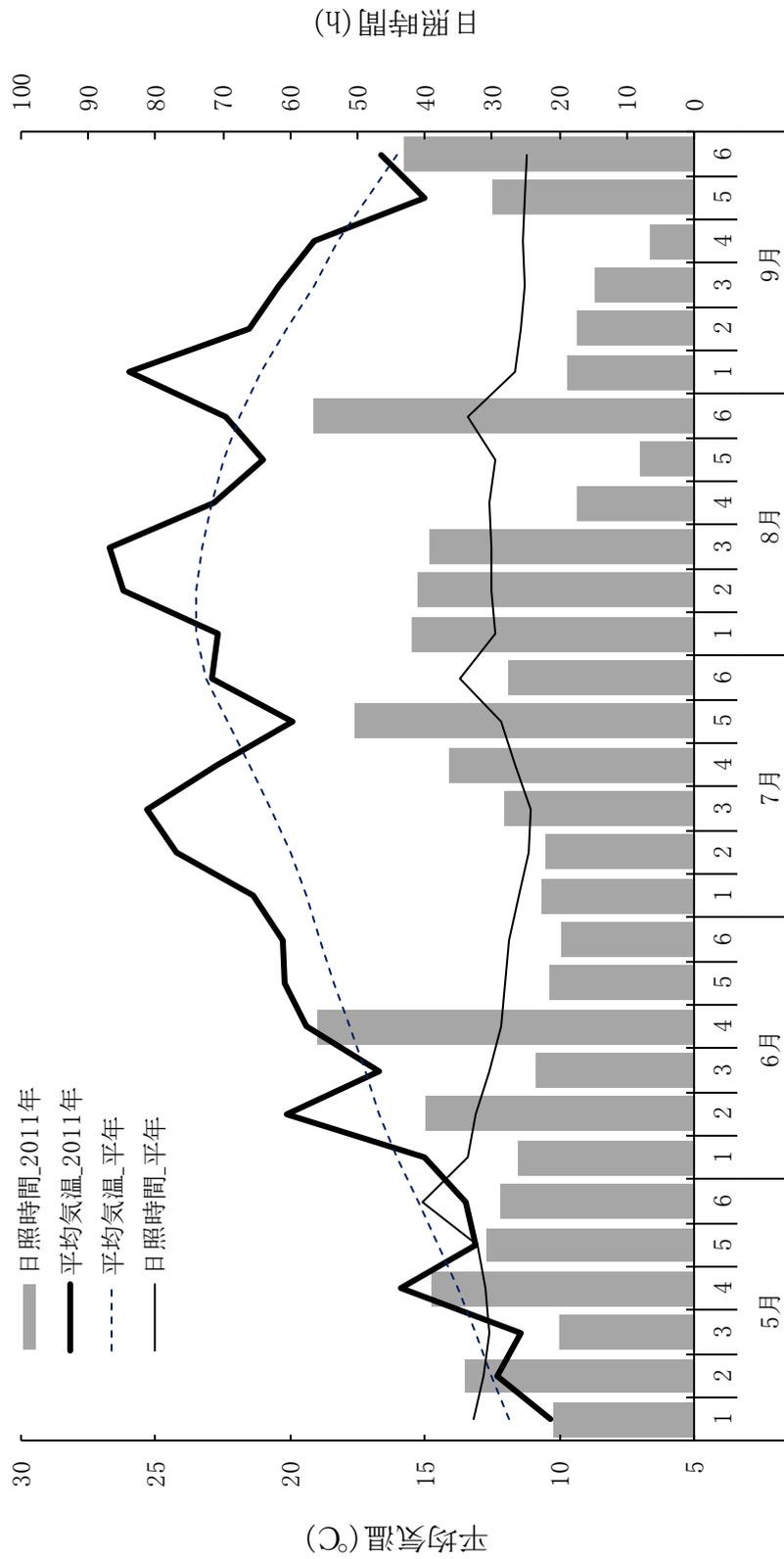


図 2-3 2011 年における半旬別の気象経過.

黒石アメダスの観測値. 平年値の統計期間は 1981~2010 年.

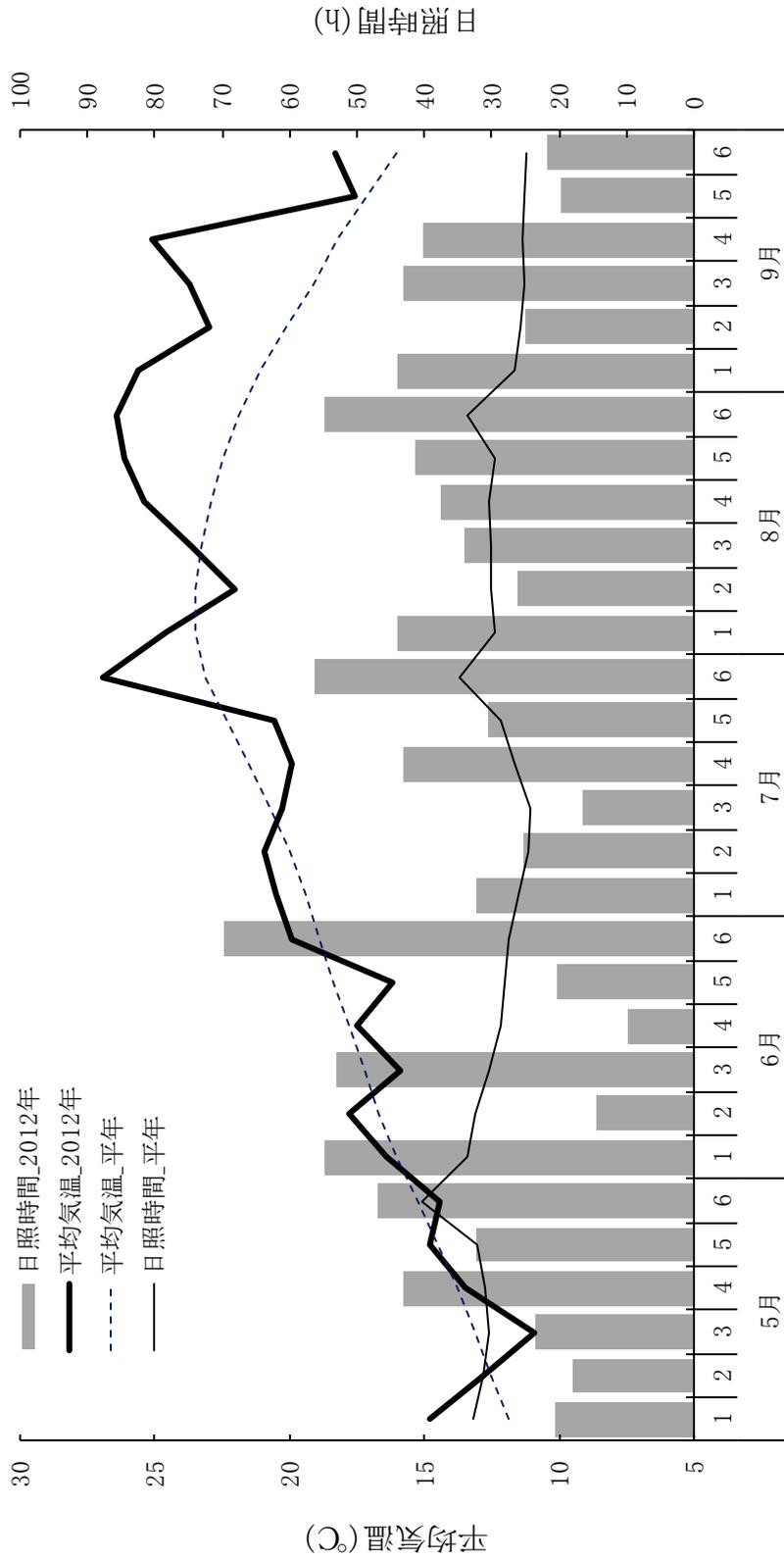


図 2-4 2012 年における半旬別の気象経過.

黒石アメダスの観測値. 平年値の統計期間は 1981~2010 年.

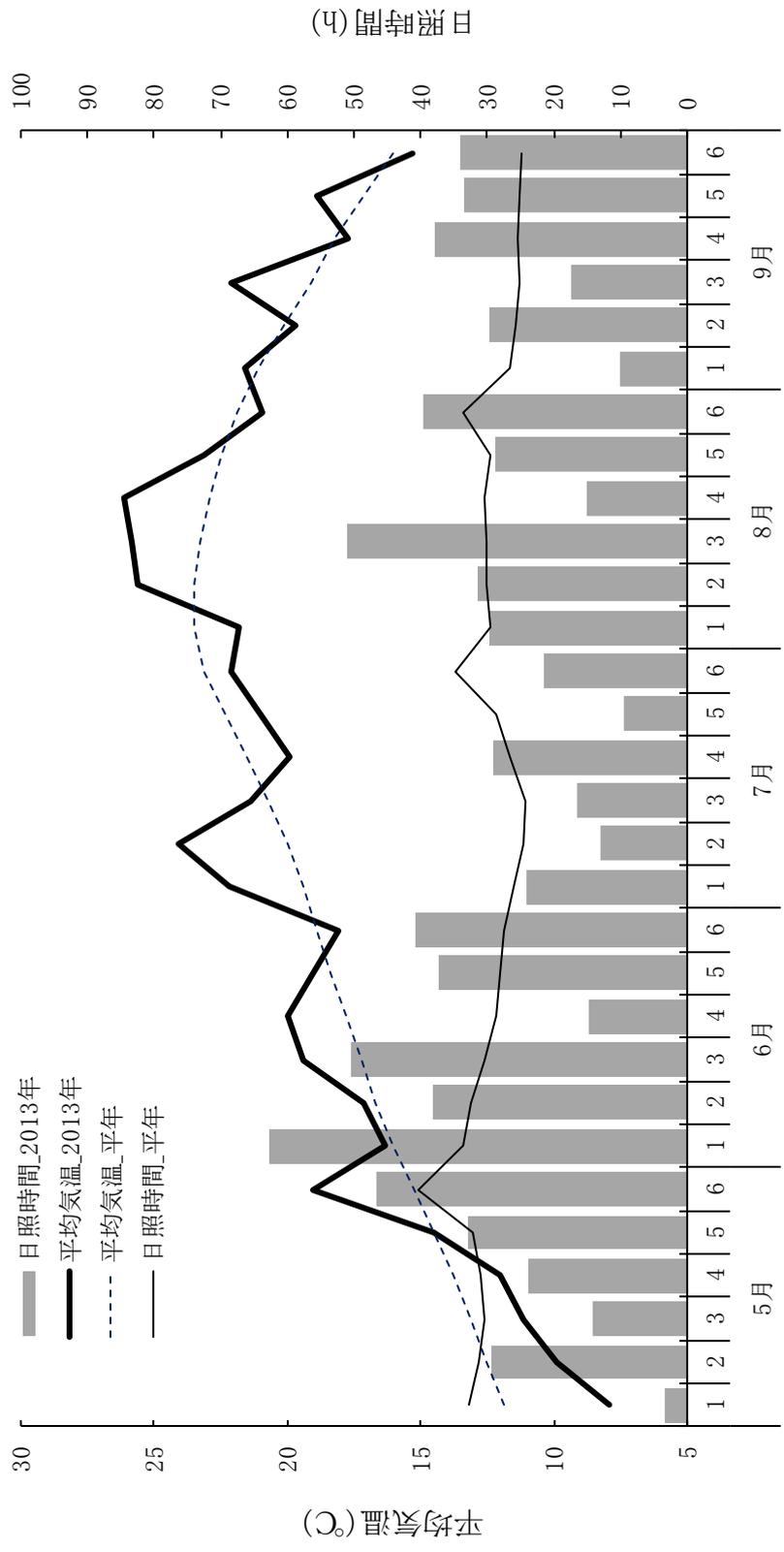


図 2-5 2013 年における半月別の気象経過.

黒石アメダスの観測値. 平年値の統計期間は 1981~2010 年.

表 2-3 栽植密度が幼穂形成期頃の生育に及ぼす影響.

要因	処理	5中					5下				
		草丈 (cm)	莖数 (本 m ⁻²)	生育量 (×100)	SPAD値	草丈 (cm)	莖数 (本 m ⁻²)	生育量 (×100)	SPAD値		
年次	2010年	69.4 a	497 c	346 b	38.4 a	71.1 a	446 b	318 bc	39.4 b		
	2011年	65.8 b	455 c	300 c	38.9 a	69.1 a	397 b	275 c	39.0 bc		
	2012年	64.6 b	651 a	421 a	39.6 a	63.3 b	566 a	360 b	37.8 c		
	2013年	63.7 b	567 b	362 b	39.1 a	68.9 a	588 a	406 a	41.8 a		
品種	まっしぐら	66.4 a	557 a	370 a	38.7 a	68.8 a	501 a	344 a	39.7 a		
	つがるロマン	65.3 a	528 b	344 b	39.3 a	67.3 a	498 a	336 a	39.3 a		
栽植密度	標準	65.6 a	627 a	410 a	36.5 c	67.6 a	585 a	394 a	37.2 c		
	71%疎植	65.6 a	534 b	349 b	39.3 b	68.4 a	497 b	339 b	39.8 b		
	53%疎植	66.3 a	467 c	312 c	41.3 a	68.3 a	416 c	286 c	41.5 a		
分散分析	品種	ns	*	**	ns	ns	ns	ns	ns		
	年次	***	***	***	ns	***	***	***	***		
	栽植密度	ns	***	***	***	ns	***	***	***		
	品種×年次	**	ns	ns	***	**	ns	ns	ns		
	品種×栽植密度	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
	年次×栽植密度	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
	品種×年次×栽植密度	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns		

5中は5月中旬移植, 5下は5月下旬移植. 栽植密度の標準は21.2株 m⁻², 71%疎植は15.2株 m⁻², 53%疎植は11.2株 m⁻². 同一英文字間には5%水準で有意差が認められないことを示す (Tukey法). *, **, *** はそれぞれ5%, 1%, 0.1%水準で有意であることを示し, ns は有意でないことを示す. 生育量は草丈 (cm) と莖数 (本 m⁻²) の積.

表 2-4 栽植密度が収量ならびに収量構成要素に及ぼす影響 (5 中区).

要因	処理	収量 (g m ⁻²)	穂数 (本 m ⁻²)	一穂粒数 (粒)	粒数 (100粒 m ⁻²)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)
年次	2010年	645 c	415 a	89 a	368 a	80.4 b	22.5 b
	2011年	596 d	353 b	90 a	318 b	87.5 a	23.4 a
	2012年	686 ab	440 a	87 a	382 a	88.8 a	21.8 c
	2013年	719 a	432 a	92 a	394 a	81.6 b	22.4 b
品種	まっしぐら	674 a	420 a	87 b	365 a	86.3 a	22.5 a
	つがるロマン	649 b	400 b	92 a	366 a	82.9 b	22.5 a
栽植密度	標準	673 a	439 a	86 b	377 a	82.8 b	22.5 a
	71%疎植	664 a	405 ab	90 ab	363 a	85.3 ab	22.6 a
	53%疎植	647 a	386 c	93 a	357 a	85.7 a	22.5 a
分散分析	品種	*	**	***	ns	**	ns
	年次	***	***	ns	***	***	***
	栽植密度	ns	***	***	ns	*	ns
	品種×年次	ns	ns	ns	ns	***	***
	品種×栽植密度	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	年次×栽植密度	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	品種×年次×栽植密度	ns	ns	ns	ns	ns	ns

5 中区は5月中旬移植．栽植密度の標準は21.2株 m⁻², 71%疎植は15.2株 m⁻², 53%疎植は11.2株 m⁻². 同一英文字間には5%水準で有意差が認められないことを示す (Tukey 法). *, **, *** はそれぞれ5%, 1%, 0.1%水準で有意であることを示し, ns は有意でないことを示す. 登熟歩合の検定は逆正弦変換して行った.

表 2-5 栽植密度が収量ならびに収量構成要素に及ぼす影響 (5 下区).

要因	処理	収量 (g m ⁻²)	穂数 (本 m ⁻²)	一穂粒数 (粒)	粒数 (100粒 m ⁻²)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)
年次	2010年	663 b	403 a	94 a	377 a	82.5 c	22.8 b
	2011年	610 d	356 b	92 a	322 b	87.4 b	23.5 a
	2012年	648 bc	420 a	80 b	336 b	90.3 a	22.4 c
	2013年	699 a	408 a	91 a	372 a	82.6 c	22.8 b
品種	まっしぐら	666 a	406 a	86 b	348 a	88.3 a	22.9 a
	つがるロマン	644 b	387 b	92 a	356 a	83.1 b	22.9 a
栽植密度	標準	660 a	426 a	84 c	357 a	85.6 a	22.9 a
	71%疎植	659 a	402 b	88 b	355 a	85.3 a	22.8 a
	53%疎植	646 a	362 c	96 a	344 a	86.2 a	22.9 a
分散分析	品種	**	***	***	ns	***	ns
	年次	***	***	***	***	***	***
	栽植密度	ns	***	***	ns	ns	ns
	品種×年次	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	品種×栽植密度	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	年次×栽植密度	ns	ns	**	ns	ns	ns
	品種×年次×栽植密度	ns	ns	ns	ns	ns	ns

5 下区は 5 月下旬移植. 栽植密度の標準は 21.2 株 m⁻², 71%疎植は 15.2 株 m⁻², 53%疎植は 11.2 株 m⁻². 同一英文字間には 5%水準で有意差が認められないことを示す (Tukey 法). **,*** はそれぞれ 1%, 0.1%水準で有意であることを示し, ns は有意でないことを示す. 登熟歩合の検定は逆正弦変換して行った.

表 2-6 収量と幼穂形成期頃の生育ならびに収量構成要素の相関係数.

品 種	幼穂形成期頃の生育				収量構成要素				
	草丈	茎数	生育量	SPAD値	穂数	一穂粒数	粒数	登熟歩合	千粒重
まっしぐら	-0.390 ^{ns}	0.635 ^{**}	0.594 ^{**}	-0.052 ^{ns}	0.721 ^{**}	0.074 ^{ns}	0.917 ^{**}	-0.485 [*]	-0.517 ^{**}
つがるロマン	0.061 ^{ns}	0.660 ^{**}	0.740 ^{**}	0.084 ^{ns}	0.717 ^{**}	-0.147 ^{ns}	0.784 ^{**}	-0.292 ^{ns}	-0.695 ^{**}
2品種込み	-0.107 ^{ns}	0.643 ^{**}	0.666 ^{**}	0.010 ^{ns}	0.736 ^{**}	-0.122 ^{ns}	0.802 ^{**}	-0.213 ^{ns}	-0.568 ^{**}

*,** はそれぞれ 5%, 1%水準で有意であることを示し, ns は有意でないことを示す. まっしぐら n=24, つがるロマン n=24,

2 品種込み n=48.

表 2-7 移植後の気象条件と標準区に対する53%疎植区の収量比, 収数比, 穂数比ならびに一穂収数比の相関係数.

移植後 日数	収量比		収数比		穂数比		一穂収数比	
	平均気温	日照時間	平均気温	日照時間	平均気温	日照時間	平均気温	日照時間
1-30	0.46	0.24	0.24	0.05	0.03	0.58 *	0.26	-0.45
11-40	0.60 *	-0.14	0.47	-0.02	0.07	0.58 *	0.37	-0.57 *
21-50	0.55 *	-0.28	0.53 *	-0.38	-0.06	-0.09	0.50 *	-0.22
31-60	0.39	-0.34	0.49	-0.42	0.02	-0.51 *	0.41	0.09
41-70	0.21	-0.29	0.38	-0.36	-0.06	-0.66 **	0.33	0.27

相関係数は品種と作期を込みにして解析した. *, ** はそれぞれ5%, 1%水準で有意であることを示す. n=16.

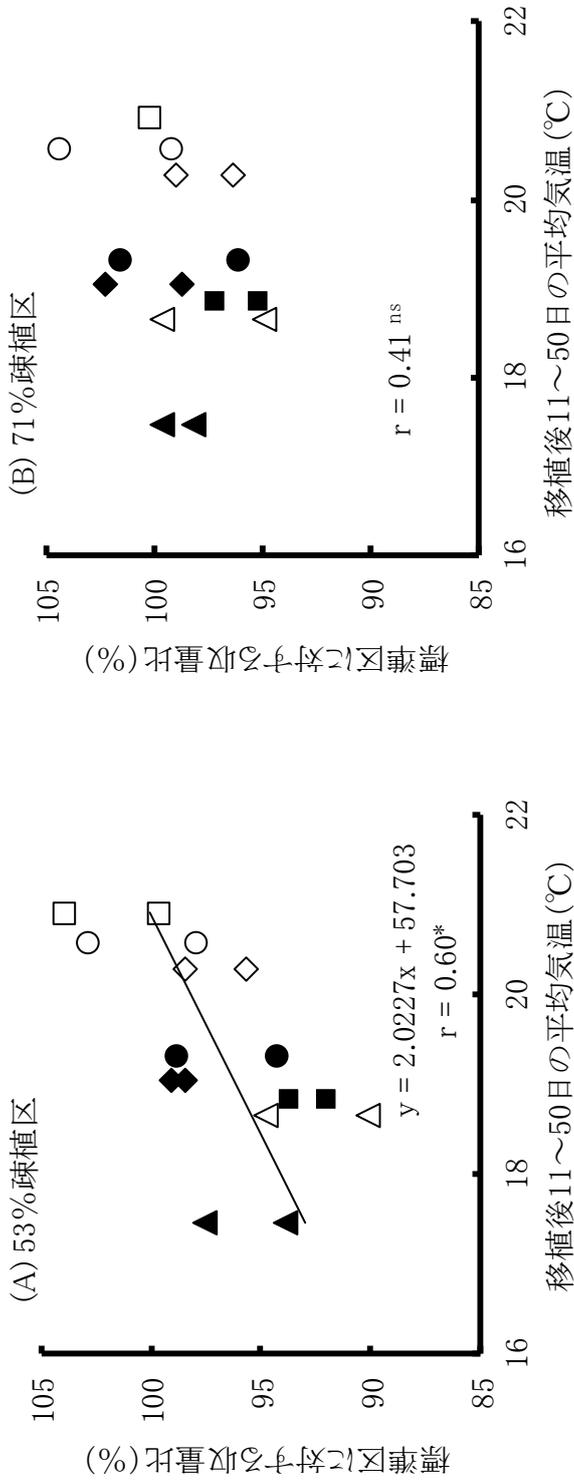


図 2-6 標準区に対する収量比と移植後 11～50 日の平均気温との関係。

●2010 年・5 中区, ■2011 年・5 中区, ▲2012 年・5 中区, ◆2013 年・5 中区,

○2010 年・5 下区, □2011 年・5 下区, △2012 年・5 下区, ◇2013 年・5 下区.

標準区は栽植密度 21.2 株 m^{-2} , 53%疎植区は同 11.2 株 m^{-2} , 71%疎植区は同 15.2 株 m^{-2} .

* は 5%水準で有意であることを示し, ns は有意でないことを示す.

た（表 2-4, 表 2-5）. 疎植栽培した水稻は, 分けつ力とそれに伴う個体の生産力を十分に発揮させることで多収性を示す（橋川 1984）. 分けつの発生には水田水温が強く影響し, 昼夜の温度較差が大きいほど分けつの発生は促される（松島ら 1966, 田中ら 1968）. このため, 幼穂形成期頃の m^2 当たり茎数は, 分けつ期が多照で水田水温の日較差が拡大しやすい条件であった 2012 年と 2013 年で多く, 2010 年と 2011 年では少なかった（表 2-2, 表 2-3）. 栽植密度が低い疎植栽培では, 株当たりの分けつ発生本数の多少が穂数を介して収量性に影響することが考えられた（表 2-6）. そこで, 日照時間と標準区に対する 53%疎植区の収量比ならびに収量構成要素比の関係をみたところ, 移植後 1~40 日の日照時間と穂数比との間には正の相関関係が認められたが, 同期間の日照時間と標準区に対する 53%疎植区の収量比との間には有意な相関関係が認められなかった（表 2-7）.

一方, 日照時間とともに水田水温に影響を与える気象要素である平均気温についてみると, 平均気温と標準区に対する 53%疎植区の収量比, 籾数比, 一穂籾数比との間には栄養成長期間を通して正の相関関係がみられ, 収量比では移植後 11~50 日, 籾数比および一穂籾数比では同 21~50 日で有意であった（表 2-7）. 本研究における移植後 11 日は活着期頃, 同 21 日は分けつ発生始期頃, 同 50 日は最高分けつ期頃に該当し, 分けつの発生と成長に強く関わる生育期間である. 分けつの発生には水田水温の日格差に加えて日平均水温が影響し, 高温条件ほど分けつ発生本数が多く, 乾物重が増大する（田中ら 1968）. また, 松島ら（1964）は, 活着期から分けつ初期（移植後 15 日間）, 分けつ盛期（同 16~30 日）, 穂首分化直前~穎花分化中期（同 31~45 日）における 31°C の高水温が収量を増加させること, 収量構成要素では分けつの草丈を伸長させて一穂籾数を増大させることを報告している. 以上のことから, 青森県における高気温条件は 53%疎植区の分けつの生産力を向上させて, 収量性に有利に働くものと考えられる.

本研究期間は全般に高温傾向であったが一時的な低温にも遭遇しており、2011年5中区は5月30日～6月3日（移植後11～15日）の平均気温が12.1℃（平年差-3.6℃）と低く、2012年5下区は6月12日～6月26日（同18～32日）が16.5℃（平年差-1.4℃）で、特に6月第3半旬が15.9℃と低かった（図2-3, 図2-4）。齋藤ら（1982）は、生育初期の強い低温により下位分げつが退化、減少した事例を報告し、櫛淵ら（1968）は青森県各地で調査した生育観測圃の結果から、分げつの発生限界温度を平均気温で16℃としている。53%疎植区と標準区の収量差が大きかった2事例についてみると、53%疎植区では2011年5中区は面積当たり穂数の減少により面積当たり籾数が少なく、2012年5下区は面積当たり穂数と一穂籾数の減少により面積当たり籾数が少ない傾向であった（表2-4, 表2-5）。これらのことから、2011年5中区における53%疎植区は、活着期から分げつ始期の強い低温により下位節分げつの退化や発生に遅延が生じて茎数が少なくなり、穂数が減少した結果、籾数が不足して減収したと考えられる。また、2012年5下区における53%疎植区については、6月第3半旬などの低温により分げつの発生が遅延し、6月下旬から7月上旬の多照で生育後半に発生した弱勢な分げつが多かったことが考えられる。松波ら（2016）は、2012年における秋田県の「あきたこまち」による疎植栽培では移植期以降の好天で初期分げつが旺盛となった結果、穂数は多くなったが最高分げつ期以降の葉色が淡くなり、一穂籾数が減少して減収したことを報告している。本研究と秋田県による事例を比較すると、秋田県大正寺アメダスにおける6月第3半旬の平均気温は18.7℃で平年より0.6℃高かったのに対して、本研究では同期間が分げつの発生限界温度に近く、その後も平均気温が平年を下回る期間が続いたため、最も栽植密度が低い53%疎植区ほど遅発した分げつが多く、結果として有効化した茎数が少なくなり、加えて弱勢な分げつの過剰発生に伴い幼穂形成期頃のSPAD値が

低下して m^2 当たり穂数や一穂粒数が減少したと推察される。

図 2-6 (A) の分布をみると、収量比は概して移植後 11～50 日の平均気温が低い 5 中区で 5 下区より低い傾向があったが、2012 年は逆に 5 下区の収量比が 5 中区より低かった。2012 年における作期毎の低温遭遇期間を整理すると、5 下区では低温期間が移植後 18～32 日と 5 中区の 26～40 日に比べて早く、5 下区の方が下位節分けつの発生と成長により強い影響を受けたことが推察される。井上ら (2004) は、栽植密度を 11 株 m^{-2} とする疎植栽培では初期生育が不良となった場合、 m^2 当たり粒数が減少して標準栽培との収量差が拡大することを報告している。面積当たり個体数が少ない疎植栽培では、株当たりの穂数と一穂粒数を増大させて m^2 当たり粒数を確保する必要があるため、下位節分けつによる初期生育が収量性に強く影響することが考えられる。

なお、標準区に対する 53%疎植区の穂数比は、移植後の昇温により平均気温が高く経過する 5 下区で 5 中区より低い傾向があり、栄養成長期間の平均気温と穂数比の間には相関関係が認められなかった (表 2-7)。これについては、移植後の平均気温が高い 5 下区では 5 中区に比べて栄養成長期間が短くなり、53%疎植区の茎数と穂数が減少したことが考えられる。

以上のように、本研究では栄養成長期の気象条件、特に移植後 11～50 日の平均気温が 53%疎植区における個体の生産力を変動させて収量性に関係したことが示唆された。ただし、図 2-6 (A) で示された傾向については、低温に遭遇する生育時期、期間、強度で分けつの発生や生育状況が異なり、減収程度に差異が生じることが考えられる。

2-5 摘要

寒冷地である青森県の気象条件下で、省力・低コスト化手段の一つである疎植

栽培が水稻の収量に及ぼす影響を評価した。青森県黒石市で 3 水準の栽植密度を 2 品種，2 作期の計 12 組合せによる試験で 4 か年（2010～2013 年）行った。収量（2 品種，4 年平均）は，2 作期とも標準区（21.2 株 m^{-2} ）に対して 71%疎植区（15.2 株 m^{-2} ）ならびに 53%疎植区（11.2 株 m^{-2} ）で有意差が認められなかった。ただし，53%疎植区と標準区の収量の差は 2011 年 5 月中旬区と 2012 年 5 月下旬区で大きかった。53%疎植区の収量には面積当たりの籾数，穂数と正の相関関係が認められた。標準区に対する 53%疎植区の収量比は，移植後 11～50 日の平均気温と有意な正の相関関係が認められた。以上のことから，53%疎植区と標準区の収量差には栄養成長期の気温が関係し，低温条件では面積当たり穂数と籾数の差が拡大して収量差が大きくなることが示唆された。

第3章 青森県における疎植栽培が玄米品質に与える影響.

3-1 はじめに

玄米は、等級別品位基準に基づき、1等、2等、3等、規格外に格付けされる。その品位検査は、水分含有率、異物・被害粒等の混入率、形質、整粒歩合等に応じて厳格に評価される（全国食糧検査協会 2002）。実需者は、一定の食味で、割れにくく炊飯しやすい、用途に応じた適性をもつ業務用米を量・質ともに安定的に調達することを望んでいる（小針 2014）。低品質の玄米は搗精歩合が劣るため（冬木 2014）、実需者から敬遠される要因になり、玄米 60kg 当たりの価格は 1 等米に比べて 2 等米では約 600 円下がる（川崎 2014）。玄米品質は、生産者の収入に大きく影響するほか、米産地としての信頼にも関わるため、年次変動を抑えた高品質米の安定供給は業務用米の取り組みが多い青森県にとって重要である。

なお、整粒は被害粒、死米、着色粒、未熟粒を除いた粒であり、その区分については未熟粒限界基準品ならびに被害粒等限界基準品との比較で判断される。未熟粒の種類には腹白粒、基白粒などが含まれる。また、被害粒には胴割粒や砕粒などが含まれる。

青森県における 1 等米比率は、1970 年代では全国平均より低く推移する傾向がみられるが、近年（2000～2016 年）では冷害年であった 2003 年を除き全国平均を上回っている（図 3-1）。1970～2016 年の期間において、青森県の 1 等米比率と青森地方気象台の 8～9 月の平均気温との間には、有意な正の相関関係（ $r=0.58^{**}$ ）が認められ、気温が高い年次で 1 等米比率が高い傾向にある。このように、地球温暖化に伴う登熟期間の気温上昇は、青森県における登熟気温の上昇をもたらす（木村 2018）、概して玄米品質の維持に有利に働いているものと推察される。しかし、近年は、青森県においても出穂後の短期間の異常高温で発生する胴割粒（長田 2004）が問題化する年次がみられている（境谷ら 2012）。

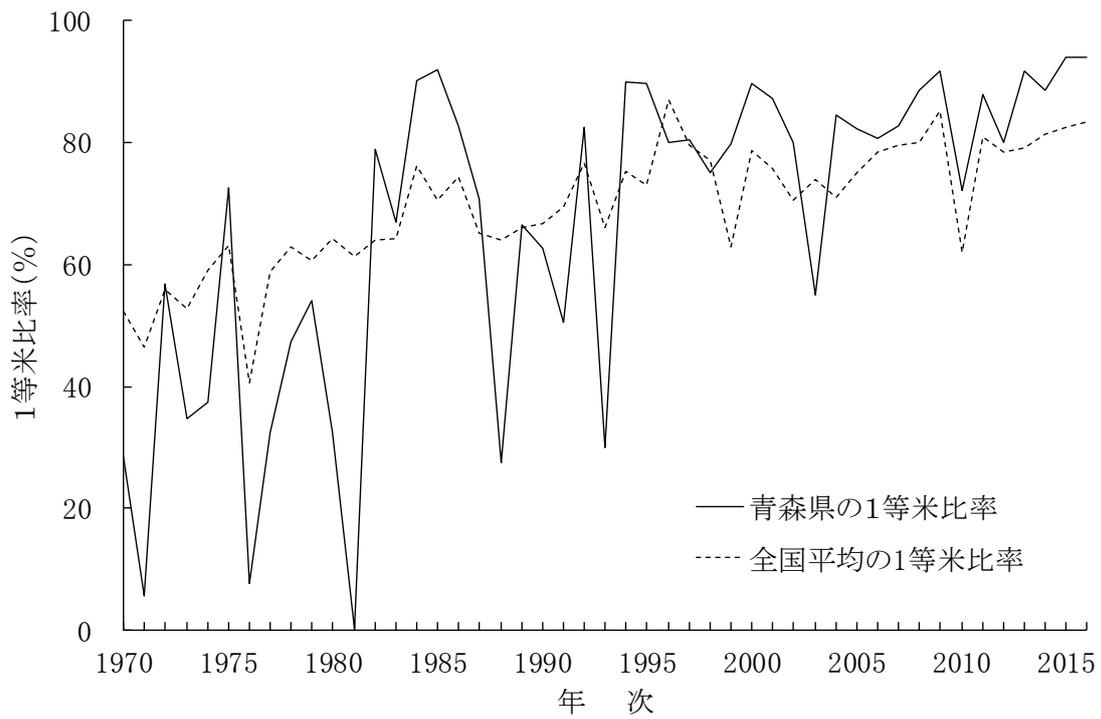


図 3-1 青森県ならびに全国平均の1等米比率

標準の栽植密度と比較したときの疎植栽培の玄米品質について、池尻ら (2013)、大橋・今井 (2004)、木村ら (2005) は同等である、林 (2017)、松波ら (2013) は劣る、井上ら (2004) は向上すると報告しており、一定の傾向はみられない。玄米品質には、一穂粒数や m^2 当たり粒数、千粒重といったシンク能と稲体の窒素栄養状態や気象条件などの登熟条件によるソース能のバランスが影響することから、栽培環境や品種特性で変動することが想定される。疎植栽培で品質が劣った研究事例について、林 (2017) は、北海道における「ななつぼし」では一穂粒数と整粒歩合との間に有意な負の相関関係がみられ、登熟期の気温が低い条件では一穂粒数が 70 粒を上回ると整粒歩合が 70%を下回ることを報告している。一方、松波ら (2013) は、秋田県における「あきたこまち」の疎植栽培について、高温条件となった 2010 年で玄米品質が低下したことを報告し、高温年では葉色の著しい低下により障害粒の発生などによる品質低下が生じることを指摘している。以上のように、登熟期の高温ならびに低温条件は、疎植栽培における玄米品質の変動要因になり得る。

本章では、地球温暖化で登熟気温が上昇しつつある現在の青森県の気象条件下において、3 水準の栽植密度を 2 品種、2 作期の計 12 組合せで 4 カ年試験を行い、疎植条件が玄米品質に及ぼす影響を評価し、その変動要因について検討した。

3-2 材料と方法

第 2 章の試験で収穫した精玄米を用いて、玄米品質調査を行った。すなわち、3 水準の栽植密度（標準株数 = $21.2 \text{ 株 } m^{-2}$ に対して 2 水準の疎植条件 = $15.2 \text{ 株 } m^{-2}$, $11.2 \text{ 株 } m^{-2}$, 以下、標準区, 71%疎植区, 53%疎植区）を設定し、2 品種（「つがるロマン」, 「まっしぐら」）, 2 作期（5 月中旬移植, 5 月下旬移植）の計 12 組合せで 4 カ年（2010~2013 年）, 延べ 48 組み合わせの試験を行い、疎植条件が

玄米品質に及ぼす影響を評価した。

玄米外観品質は、品質判別器（RGQI20，サタケ社製）を用いて、精玄米を1区当たり千粒調査した。等級検査は、2010年は日本穀物検定協会仙台支所青森出張所、2011～2013年は日本穀物検定協会東北支部青森出張所に依頼し、精玄米を1等上から3等下まで9段階に格付けした。気象データは、所内に設置されている黒石アメダスの観測値を用いた。統計分析は、エクセル統計2010（社会情報サービス社製）を用いて作期毎に多元配置分散分析により解析した。

3-3 結果

1) 出穂期，登熟期間の気象，穂揃期の葉色値

53%疎植区ならびに71%疎植区の出穂期は、標準区と比べて同日から3日遅かった（表3-1）。作期や品種，栽植条件に伴う出穂差はみられたが，登熟期間における気象条件は栽植密度間で大差なく（表3-2，表3-3），登熟気温は22.9～25.4℃の範囲に分布した。

穂揃期のSPAD値は，2作期ともに年次間，栽植密度間で有意差が認められた（表3-4）。年次間では，2010年が最も高く，2011年が最も低かった。栽植密度間では，栽植密度が低いほど，葉色値が高い傾向であった。

2) 栽植密度の違いが玄米品質に及ぼす影響

整粒歩合は，2作期とも栽植密度間に有意差が認められなかった（表3-5，表3-6）。未熟粒における栽植密度での差異は，5中区の腹白粒と5下区の基白粒でみられた。5中区における腹白粒では，年次間，品種間，栽植密度間に有意差が認められ，交互作用は品種×栽植密度で有意であった。品種×栽植密度の交互作用については，「つがるロマン」では栽植密度間で腹白粒の発生割合に差がなく，

「まっしぐら」では53%疎植区が標準区ならびに71%疎植区よりも低かった。5下区における基白粒では、年次間、品種間、栽植密度間で有意差が認められ、栽植密度については53%疎植区が標準区より0.2%低かった。被害粒については、5下区の胴割粒において、年次間、品種間、栽植密度間で有意差が認められ、交互作用は年次×品種、年次×栽植密度で有意であった。年次×品種の交互作用については、2010年では胴割粒に品種間差がなく、その他の年次では「まっしぐら」に比べて「つがるロマン」が有意に高かった。年次×栽植密度の交互作用では、2012年において標準区に比べて53%疎植区ならびに71%疎植区が高かった。

検査等級は、5中区では栽植密度間に有意差が認められなかったが、5下区では品種間、年次間、栽植密度間で有意差が認められ、交互作用は品種×年次、品種×年次×栽植密度で有意であった。2012年における5下区の「つがるロマン」では、53%疎植区と71%疎植区が胴割粒過多により2等米に格付けされた。

4 考察

青森県黒石市において2品種、2作期の組み合わせの試験を4カ年実施した結果、53%疎植区ならびに71%疎植区の整粒歩合は標準区と差がみられず、検査等級は16事例（4年×2品種×2作期）中の15事例において標準区と同等の1等米に格付けされた。このことより、疎植栽培では玄米品質の大きな低下をもたらさないことが示された。しかし、2012年の「つがるロマン」では胴割粒による落等事例がみられた。また、疎植区では、わずかであるが腹白粒ならびに基白粒といった白未熟粒の発生が軽減された。以下、本研究において疎植栽培の玄米品質が維持された要因、「つがるロマン」における胴割粒の発生要因、地球温暖化に対する白未熟粒の発生軽減効果の可能性について議論する。

表 3-1 栽植密度が出穂期に及ぼす影響.

年次	栽植密度	5中区			5下区	
		まっしぐら	つがるロマン	まっしぐら	つがるロマン	つがるロマン
2010年	標準 (到達日)	8月1日	8月3日	8月3日	8月5日	8月5日
	71%疎植 (標準との日差)	+2	+1	+1	+1	+1
	53%疎植 (標準との日差)	+2	+1	+1	+1	+1
2011年	標準 (到達日)	8月4日	8月7日	8月6日	8月9日	8月9日
	71%疎植 (標準との日差)	+1	+1	0	0	0
	53%疎植 (標準との日差)	+1	+2	0	+1	+1
2012年	標準 (到達日)	8月7日	8月7日	8月8日	8月9日	8月9日
	71%疎植 (標準との日差)	+1	0	+1	0	0
	53%疎植 (標準との日差)	+2	+1	+1	+1	+1
2013年	標準 (到達日)	8月3日	8月5日	8月8日	8月9日	8月9日
	71%疎植 (標準との日差)	+1	+1	0	0	0
	53%疎植 (標準との日差)	+2	+3	+1	+1	+1

5 中区は 5 月中旬移植, 5 下区は 5 月下旬移植. 栽植密度の標準は 21.2 株 m^{-2} , 71%疎植は 15.2 株 m^{-2} , 53%疎植は 11.2 株 m^{-2} .

表 3-2 各区における登熟期間の平均気温 (°C).

年次	作期	栽植密度	1-20日			21-40日			1-40日		
			まっしぐら	つがるロマン	まっしぐら	つがるロマン	まっしぐら	つがるロマン	まっしぐら	つがるロマン	
2010年	5中	標準 (平均値)	25.6	25.5	25.3	24.5	25.4	25.0			
		71%疎植 (標準との差)	-0.1	+0.3	-0.5	-0.4	-0.3	0.0			
		53%疎植 (標準との差)	-0.1	+0.3	-0.5	-0.4	-0.3	0.0			
	5下	標準 (平均値)	25.5	26.0	24.5	23.8	25.0	24.9			
		71%疎植 (標準との差)	+0.3	0.0	-0.4	-0.3	0.0	-0.1			
		53%疎植 (標準との差)	+0.3	0.0	-0.4	-0.3	0.0	-0.1			
2011年	5中	標準 (平均値)	24.6	24.4	22.7	22.6	23.6	23.5			
		71%疎植 (標準との差)	-0.1	-0.2	0.0	0.0	0.0	-0.1			
		53%疎植 (標準との差)	-0.1	-0.4	0.0	0.0	0.0	-0.2			
	5下	標準 (平均値)	24.2	23.8	22.6	22.7	23.4	23.2			
		71%疎植 (標準との差)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
		53%疎植 (標準との差)	0.0	-0.2	0.0	0.0	0.0	-0.1			
2012年	5中	標準 (平均値)	24.3	24.3	24.8	24.7	24.5	24.5			
		71%疎植 (標準との差)	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0			
		53%疎植 (標準との差)	+0.2	+0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0			
	5下	標準 (平均値)	24.4	24.7	24.7	24.6	24.5	24.6			
		71%疎植 (標準との差)	+0.3	0.0	0.0	0.0	+0.1	0.0			
		53%疎植 (標準との差)	+0.3	0.2	0.0	0.0	+0.1	+0.1			
2013年	5中	標準 (平均値)	24.8	25.0	21.3	21.2	23.1	23.1			
		71%疎植 (標準との差)	+0.1	+0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0			
		53%疎植 (標準との差)	+0.2	+0.2	-0.2	-0.3	0.0	-0.1			
	5下	標準 (平均値)	25.0	24.8	25.0	24.8	23.0	22.9			
		71%疎植 (標準との差)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
		53%疎植 (標準との差)	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3	-0.2	-0.2			

黒石アメダスの観測値. 5中は5月中旬, 5下は5月下旬移植. 栽植密度は標準が21.2株 m⁻², 71%疎植が15.2株 m⁻², 53%疎植が11.2株 m⁻².

表 3-3 各区における登熟期間の平均日照時間 (h).

年次	作期	栽植密度	1-20日		21-40日		1-40日	
			まっしぐら	つがるロマン	まっしぐら	つがるロマン	まっしぐら	つがるロマン
2010年	5中	標準 (平均値)	5.3	6.8	6.6	6.3	5.9	6.5
		71%疎植 (標準との差)	+1.1	+0.4	-0.3	-0.4	+0.4	0.0
		53%疎植 (標準との差)	+1.1	+0.4	-0.3	-0.4	+0.4	0.0
	5下	標準 (平均値)	6.8	7.1	6.3	5.8	6.5	6.5
		71%疎植 (標準との差)	+0.4	0.0	-0.4	-0.1	0.0	-0.1
		53%疎植 (標準との差)	+0.4	0.0	-0.4	-0.1	0.0	-0.1
2011年	5中	標準 (平均値)	6.7	5.9	4.7	4.7	5.7	5.3
		71%疎植 (標準との差)	-0.3	-0.6	0.0	+0.2	-0.2	-0.2
		53%疎植 (標準との差)	-0.3	-0.6	0.0	+0.2	-0.2	-0.2
	5下	標準 (平均値)	5.3	5.3	4.8	4.6	5.1	5.0
		71%疎植 (標準との差)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		53%疎植 (標準との差)	0.0	+0.1	0.0	-0.6	0.0	-0.3
2012年	5中	標準 (平均値)	7.1	7.0	7.6	7.9	7.4	7.4
		71%疎植 (標準との差)	-0.1	0.0	+0.2	0.0	+0.1	0.0
		53%疎植 (標準との差)	0.0	+0.1	+0.4	+0.2	+0.2	+0.1
	5下	標準 (平均値)	7.0	7.6	8.0	8.0	7.5	7.8
		71%疎植 (標準との差)	+0.6	0.0	0.0	0.0	+0.3	0.0
		53%疎植 (標準との差)	+0.6	+0.1	0.0	0.0	+0.3	+0.1
2013年	5中	標準 (平均値)	6.3	6.8	4.9	4.9	5.6	5.8
		71%疎植 (標準との差)	0.4	-0.6	+0.1	+0.2	+0.2	-0.2
		53%疎植 (標準との差)	-0.1	-0.6	+0.2	+0.1	+0.1	-0.2
	5下	標準 (平均値)	6.5	6.6	6.5	6.6	5.4	5.2
		71%疎植 (標準との差)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		53%疎植 (標準との差)	+0.1	+0.4	0.0	+0.4	-0.3	+0.2

黒石アメダスの観測値. 5中は5月中旬, 5下は5月下旬移植. 栽植密度は標準が21.2株 m⁻², 71%疎植が15.2株 m⁻², 53%疎植が11.2株 m⁻².

表 3-4 栽植密度が穂揃期の SPAD 値に及ぼす影響.

要因	処理	5中区	5下区
年次	2010年	37.7 a	38.1 a
	2011年	31.8 c	31.8 c
	2012年	35.0 b	34.1 b
	2013年	34.9 b	33.7 b
品種	まっしぐら	35.1 a	34.4 a
	つがるロマン	34.6 a	34.5 a
栽植密度	標準	34.0 b	33.3 c
	71%疎植	34.7 b	34.6 b
	53%疎植	35.9 a	35.4 a
分散分析	年次	***	***
	品種	ns	ns
	栽植	***	***
	年次×品種	ns	ns
	年次×栽植	ns	ns
	品種×栽植	ns	ns
	年次×品種×栽植	ns	ns

5 中は5月中旬, 5下は5月下旬移植. 栽植密度は標準が 21.2 株 m^{-2} , 71%疎植が 15.2 株 m^{-2} , 53%疎植が 11.2 株 m^{-2} . 同一英文字間には 5%水準で有意差が認められないことを示す (Tukey 法). *** は 0.1%水準で有意であることを示し, ns は有意でないことを示す.

表 3-5 栽植密度が玄米品質に及ぼす影響 (5 中区).

要因	処理	整粒歩合 (%)	胴割粒 (%)	乳白粒 (%)	基白粒 (%)	腹白粒 (%)	青未熟粒 (%)	その他未熟粒 (%)	検査等級 (1-9)
年次	2010年	78.9 b	0.0 c	3.3 a	1.8 a	1.8 a	4.9 a	7.6 ab	2.0 a
	2011年	83.2 a	2.5 a	2.1 b	1.5 b	1.6 a	1.2 c	5.9 c	1.9 a
	2012年	84.5 a	2.1 a	1.3 c	1.0 c	0.9 b	2.1 bc	6.2 bc	1.8 a
	2013年	83.8 a	0.6 b	1.9 bc	0.6 d	0.6 c	2.8 b	9.0 a	1.8 a
品種	まつしぐら	82.6 a	0.4 a	2.5 a	1.4 a	1.5 a	2.8 a	7.2 a	2.1 a
	つがるロマン	82.6 a	2.2 b	1.7 b	1.1 a	1.0 b	2.7 a	7.1 a	1.7 b
栽植密度	標準	82.2 a	1.1 a	2.5 a	1.3 a	1.4 a	2.6 a	7.2 a	2.0 a
	71%疎植	82.6 a	1.4 a	2.1 a	1.2 a	1.2 ab	2.9 a	7.0 a	1.9 a
	53%疎植	83.0 a	1.3 a	1.8 a	1.1 a	1.1 b	2.8 a	7.3 a	1.8 a
分散分析	年次	***	***	***	***	***	***	***	**
	品種	ns	***	***	ns	***	ns	ns	ns
	栽植	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns
	年次×品種	*	***	**	**	ns	**	**	*
	年次×栽植	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	品種×栽植	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
	年次×品種×栽植	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

栽植密度は標準が 21.2 株 m^{-2} , 71%疎植が 15.2 株 m^{-2} , 53%疎植が 11.2 株 m^{-2} . 同一英文字間には 5%水準で有意差が認められないことを示す (Tukey 法). *, **, *** はそれぞれ 5%, 1%, 0.1%水準で有意であることを示し, ns は有意でないことを示す. 検査等級以外の検定は逆正弦変換して行った.

表 3-6 栽植密度が玄米品質に及ぼす影響 (5 下区).

要因	処理	整粒歩合 (%)	胴割粒 (%)	乳白粒 (%)	基白粒 (%)	腹白粒 (%)	青未熟粒 (%)	その他未熟粒 (%)	検査等級 (1-9)
年次	2010年	79.6 b	0.0 c	2.5 a	0.8 c	0.8 b	8.1 a	6.7 a	1.8 a
	2011年	84.6 a	1.6 b	1.7 b	1.0 b	1.5 a	1.8 b	6.0 a	2.3 a
	2012年	79.5 b	6.9 a	1.5 b	1.5 a	0.8 b	0.9 c	6.5 a	2.7 a
	2013年	84.9 a	3.2 b	1.1 c	0.6 c	0.5 c	2.4 b	6.3 a	1.4 a
品種	まっしぐら	83.6 a	1.5 b	2.0 a	1.1 a	1.0 a	3.3 a	6.0 b	1.9 a
	つがるロマン	80.7 b	4.4 a	1.3 b	0.8 b	0.8 a	3.2 a	6.8 a	2.2 b
栽植密度	標準	83.4 a	2.1 a	1.7 a	1.1 a	1.0 a	3.0 a	6.2 a	1.8 a
	71%疎植	81.2 a	3.5 b	1.7 a	0.9 ab	0.8 a	3.4 a	6.4 a	2.1 a
	53%疎植	81.7 a	3.2 ab	1.7 a	0.9 b	0.9 a	3.3 a	6.4 a	2.2 a
分散分析	年次	***	***	***	***	***	***	ns	**
	品種	***	***	***	**	ns	ns	*	***
	栽植	ns	*	ns	*	ns	ns	ns	**
	年次×品種	***	***	**	ns	ns	**	ns	***
	年次×栽植	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	品種×栽植	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns
	年次×品種×栽植	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**

栽植密度は標準が 21.2 株 m^{-2} , 71%疎植が 15.2 株 m^{-2} , 53%疎植が 11.2 株 m^{-2} . 同一英文字間には 5%水準で有意差が認められないことを示す (Tukey 法). *, **, *** はそれぞれ 5%, 1%, 0.1%水準で有意であることを示し, ns は有意でないことを示す. 検査等級以外の検定は逆正弦変換して行った.

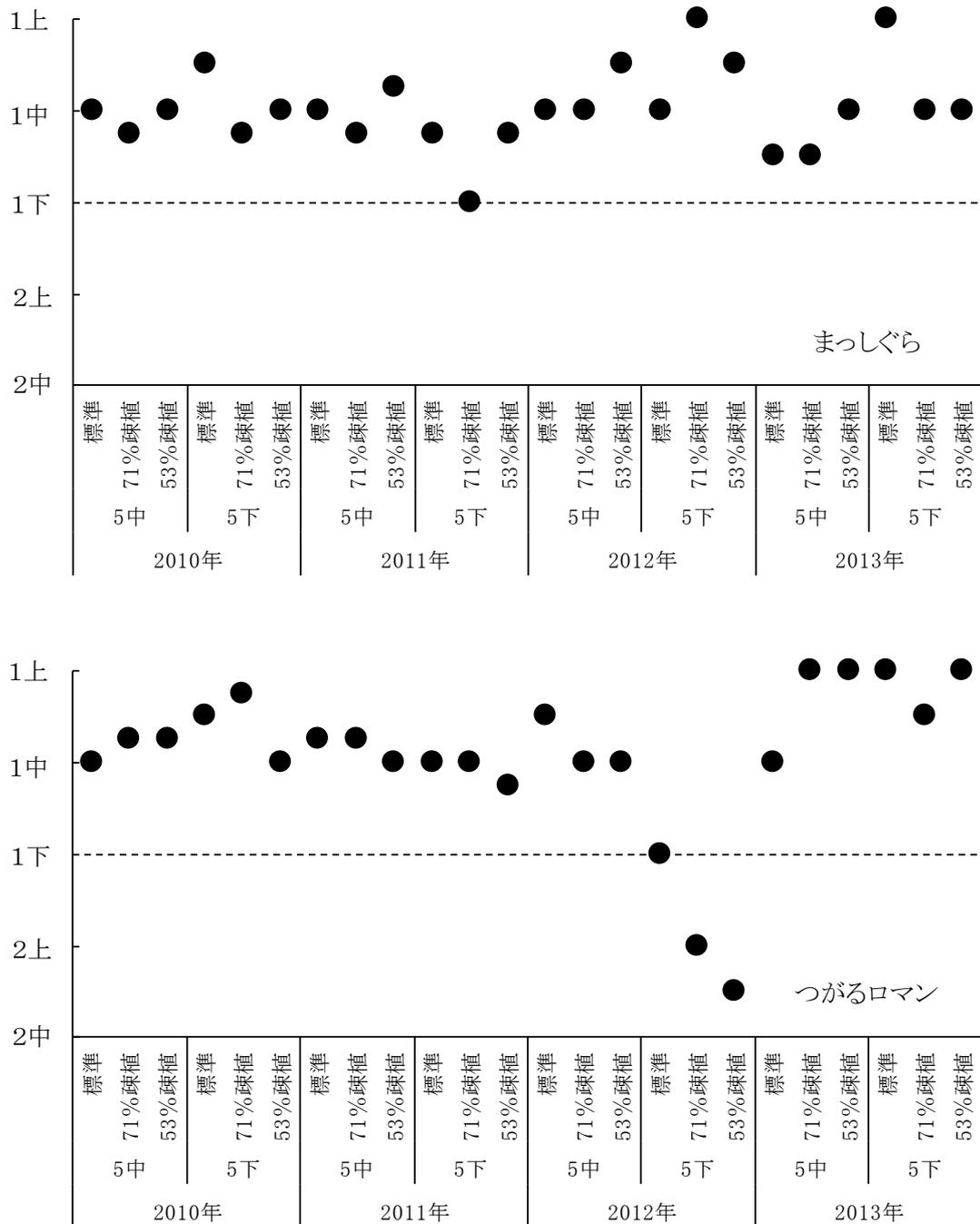


図 3-1 各区における検査等級.

上:まっしぐら, 下:つがるロマン. 5中は5月中旬, 5下は5月下旬移植.
 栽植密度は標準が 21.2 株 m⁻², 71%疎植が 15.2 株 m⁻², 53%疎植が 11.2 株 m⁻².

1) 疎植栽培における玄米品質の維持について

53%疎植区ならびに71%疎植区では標準区と生育相が大きく異なり(表2-3), 穂数が少なく, 一穂粒数が増加した(表2-4, 表2-5). 疎植区では一穂粒数の増加に伴い弱勢穎花である二次枝梗粒の割合が多くなる(山田・小野1961)ため, 玄米品質の低下が懸念されたが, 疎植区と標準区の整粒歩合には有意差が認められなかった(表3-5, 表3-6). 橋川(1984)は, 本研究と同様の結果を報告し, この要因として疎植水稻では登熟期における根の機能性が優れるとみられること, 登熟期の受光態勢に優れ, 葉の枯れ上がり量が少ないことを指摘している.

水稻の根群に関して, 森田ら(1987)は茎葉部の生育と1次根の伸長方向は相互に対応しており, 茎葉部の生育の旺盛な疎植区ほど横方向に伸長する割合が低く, 反対に下方向に伸長する割合が高い傾向にあることを報告している. 同様に, 田中・有馬(1996)は, 高密度区ほど土壌表層に分布する根群が多いことに加えて, 高密度区の根乾物重はラグ期まで急増して最大値に達した後に成熟期にかけて減少するのに対して, 低密度条件ではラグ期まで増加した後, 穂孕期にかけて僅かに減少し, 出穂期に再び増加して最大値に達することを報告している. また, 疎植区では標準区に比較して穂揃期のSPAD値が高く(表3-4), 登熟後半まで登熟能力が高く維持されたと考えられる. さらに, 各年次の登熟期間は高温多照傾向であり, 登熟期の気象条件は良好であった(表3-2, 表3-3). 以上のことから, 本研究では, 疎植水稻が有する高い登熟能力が発揮されたことで, 二次枝梗粒が多い疎植条件であっても玄米品質が標準区並みに維持されたと考えられる.

2) 胴割粒の発生要因について

胴割粒は, 玄米の胚乳部に亀裂を生じている粒であり(図3-2), 搗精の段階



図 3-2 胴割米の画像.

画像は, 米粒透視器TX-200 (グレインスコープ)を使用して撮影した。

で碎粒になって精米歩合及び精米の品質に著しい低下をもたらす（全国食糧検査協会 2002）。本研究における疎植区の検査等級は、前述のとおり全般に標準区と同等であったが、2012年5下区における疎植区の「つがるロマン」は胴割粒過多により2等米に落等した（表3-6, 図3-1）。青森県における2012年産米の1等米比率は80.0%であり、2等以下に落等した理由では胴割粒の比率が最も高く（表3-7）、特に、本試験圃を含む中南地域の「つがるロマン」において胴割粒による落等が多発した（青森県産業技術センター農林総合研究所 2013）。以上のことから、本試験における「つがるロマン」の胴割粒による落等は、地理的に広範囲で影響を及ぼす気象条件が要因であったと推察する。

長田ら（2004）は、胴割粒は出穂後1～10日間の高温多照条件で発生が助長されること、胴割粒の発生には品種間差異がみられ、東北地域で育成された水稻13品種の中で「つがるロマン」は胴割粒が発生しやすい傾向であることを報告している。また、高橋ら（2002）は、登熟初期の高温条件に加えて出穂後30日～成熟期の多日射条件で胴割粒が多発することを報告している。2012年の気象条件は、本研究を実施した4カ年では出穂後10日間の日最高気温の平均値が最も低かった（表3-8）。また、成熟期を出穂後45日と設定すると、2012年は出穂後30～45日の日照時間が最も多い条件であった。以上のことから、同年の胴割粒の発生には品種による胴割れ耐性の差異や登熟後半の気象条件が関与していることが推察される。ただし、胴割粒は登熟期の葉色値が低い条件で発生しやすいこと（高橋ら 2002）、穂相では成熟の早い一次枝梗粒で発生が多いこと（長戸ら 1964）が知られているが、本研究では標準区よりも穂揃期のSPAD値が高く（表3-4）、二次枝梗粒の割合が高くなる穂相の疎植区において胴割粒の発生が多かった。これら既報と本研究における結果の不一致や同年の作期による差（表3-5, 表3-6）は不明であり、栽植密度と胴割粒の関係については気象条件のほか、

表 3-7 青森県における2010～2013年産米の1等米比率と主な落等要因.

産米	1等米比率	主な落等要因(落等要因の割合)		
		1位	2位	3位
2010年	72.1%	充実度(36.1%)	カメムシ類による着色粒(34.6%)	着色粒(9.5%)
2011年	87.9%	充実度(42.2%)	カメムシ類による着色粒(34.8%)	胴割粒(8.8%)
2012年	80.0%	胴割粒(54.2%)	充実度(23.4%)	カメムシ類による着色粒(12.8%)
2013年	91.8%	充実度(39.0%)	カメムシ類による着色粒(30.5%)	胴割粒(14.11%)

1等米比率は各年の最終値(翌年10月末日). 主な落等要因は, 2010年産米が2011年1月末日現在, 2011年産米が2011年10月末日現在, 2012年産米が2013年3月末日現在, 2014年産米が2015年1月末日現在の数値.

表 3-8 出穂後 1～10 日の日最高気温と同 35～40 日の日照時間

気象要素	2010年		2011年		2012年		2013年	
	5中	5下	5中	5下	5中	5下	5中	5下
出穂後1～10日の日最高気温の平均値(℃)	31.1	30.9	31.2	29.6	27.4	28.0	29.5	30.3
出穂後35～40日の日照時間の積算値(h)	104	101	69	85	128	131	77	93

黒石アメダスの観測値.

水稻の栄養生理面も含めた詳細な検討が必要と考えられる。

2012年5月下区の疎植栽培において胴割粒が多発した要因解明には至らなかったが、「まっしぐら」では疎植条件においても胴割粒による落等は見られず、全処理区で1等に格付けされた(図3-1)。従って、胴割れ耐性の高い品種の作付けにより、青森県の疎植栽培においても玄米品質の維持が可能と考えられる。また、胴割粒の発生軽減対策技術には、適期刈り取りや出穂後の用水掛け流しが挙げられる(青森県2017)。胴割れ耐性が低い「つがるロマン」による疎植栽培では、これらの対策技術に万全を期す必要がある。

2) 未熟粒の発生について

乳白粒、基白粒、腹白粒は、玄米におけるデンプンの蓄積が不十分になることで生じる白濁部をもつ未熟粒(以下、白未熟粒と総称する)である。整粒などにみられる玄米の透明部は胚乳細胞を充満する複粒デンプンが密であるのに対して、白未熟粒にみられる白色不透明部はデンプン粒の蓄積が粗であり、この空隙が光の散乱を起こすために生じる(田代・江幡1975)。白色不透明部は軟らかいため搗精の際に砕けやすく、砕けなかったとしても精米の外観を悪くし、充実も良くないので食味を低下させる(全国食糧検査協会2002)。

白未熟粒は、出穂後20日間の日平均気温が26~27℃前後を超えるような高温登熟条件下で急激に増加する(森田ら2014)。本研究では、ここまでの高温には至らなかったため(表3-2)、白未熟粒の発生は全般に少なかった(表3-5, 表3-6)。栽植密度が白未熟粒の発生に及ぼす影響についてみると、5中区の「まっしぐら」では53%疎植区が71%疎植区ならびに標準区より腹白粒の発生が有意に少なく(表3-5)、5下区では標準区に対して53%疎植区で基白粒の発生が有意に少ない(表3-6)など、疎植条件で白未熟粒の発生が少ない傾向であった。

玄米の基部が白色不透明となる基白粒は，登熟後半の充実が不十分となり，デンプンの集積が停止することで発生すると考えられている（長戸・江幡 1965）．腹白粒は，粒が比較的大きく，かつデンプンの集積がこれに伴わない場合に背側維管束から最も遠い腹部で，デンプンの蓄積が不十分になって白濁を生じると考えられている（長戸 1952）．稲体の葉色と白未熟粒の関係について，武蔵・金田（2001）は，高温条件下において下位葉の老化に伴う葉色の低下が白未熟粒の発生を抑制することを報告している．また，疎植栽培された水稻は，穂揃期の葉面積は小さいが登熟期の葉の枯れ上がり量が少ないことから，登熟期の乾物生産に優れる（橋川 1984）ため，ソース能の向上が白未熟粒の発生抑制に寄与することが考えられる．実際，疎植栽培は高温障害軽減技術の優良事例の一つに挙げられており（森田ら 2014），地球温暖化が進行した青森県での高温対策としても期待できる．

一方，疎植栽培における登熟期の低温の影響について，北海道では疎植栽培で未熟粒が増加したことを報告している（林 2017）．これによると，疎植栽培では，一穂粒数の増加で登熟に不利な二次枝梗粒が増加したこと，出穂期間の間延びによる登熟のばらつきが影響したことを指摘している．本研究において未熟粒の発生が少なかった要因としては，登熟気温が高く（表 3-2），登熟歩合が高い（表 2-4，表 2-5）ことから判断できるように登熟条件が良好であり，一穂粒数の増大による不利が顕在化しなかった可能性がある．しかし，Kannoら（2013）は，地球温暖化が進行した将来においてもヤマセはなくなり，現在と同程度に発生することを推測している．また，遠藤（2012）は，ヤマセの季節性の将来変化について，将来は8月のヤマセ発生頻度が増加することを報告している．以上のように，青森県における疎植栽培の低温登熟性の評価は，今後の重要な課題である．

3 - 5 摘要

青森県黒石市において 2 段階の疎植条件, 2 品種, 2 作期の組み合わせの試験を 4 カ年実施した結果, 71%疎植区 (15.2 株 m^{-2}) ならびに 53%疎植区 (11.2 株 m^{-2}) の整粒歩合は標準区と差がみられず, 検査等級は 16 事例中の 15 事例において標準区と同等の 1 等米に格付けされた. このことより, 疎植栽培では玄米品質の大きな低下をもたらさないことが示された.

第4章 基肥窒素の増肥が疎植栽培の収量，品質，食味に及ぼす影響

4-1 はじめに

第2章で議論したとおり，水稻の生育期間の温度環境が低い青森県において疎植栽培で安定した収量を得るためには，下位節から発生する分けつを主体とした初期生育の早期確保が重要と考えられる。

疎植栽培の初期生育に係わる一つの要因として，基肥窒素量が挙げられる。基肥窒素を無施用とした追肥体系による疎植栽培の収量性には，地域間差異がみられる。すなわち，寒冷地である岩手県においては，下位節分けつの成長が抑制されて穂数ならびに籾数が不足することで減収し（平野ら 1997），暖地である滋賀県においては初期生育が劣るものの，有効茎歩合が高まって多収になる（橋川・西沢 1984）ことが報告されている。寒地の稲作は，低温による初期生育の不良が不作の問題となり易いことから，暖地に比べて栽植密度が高く，基肥に重点をおいた肥培管理が行われてきた（石塚・田中 1952）。疎植栽培の施肥法に関して，松下（1996）は，基肥や追肥の増肥による籾数の制御は明確にならなかったことを報告している。しかし，寒冷地における疎植栽培では，基肥窒素の増肥が初期生育を促して十分な㎡当たり籾数を確保し，収量を高水準で安定させることが考えられる。

本章では，青森県において基肥窒素を標肥と多肥とした2水準の施肥条件と，栽植密度を標準と疎植とした2水準の栽植条件を組み合わせた試験を3カ年行い，基肥窒素量が疎植栽培の収量，玄米品質，玄米蛋白質含有率，食味に及ぼす影響を評価した。加えて，基肥の増肥は，収量を向上させたとしても生産コストを増加させることから，各試験条件の組み合わせの経営費と収益に基づいた経済評価を行った。

4-2 材料と方法

試験は、2014～2016年の3カ年に青森県産業技術センター農林総合研究所内の水田圃場で行った。品種は、「まっしぐら」を供試した。移植日は2014年5月19日、2015年5月18日、2016年5月19日とした。栽植方法は、株当たり植付本数を4本として、栽植密度を21.2株 m^{-2} とする慣行区と11.2株 m^{-2} の疎植区を設けた。移植は、手植えで行った。移植苗は、播種量を箱当たり乾粃100gとして育苗期間を33～34日とした中苗を用いた。基肥の施肥量は、成分でN=5.0g m^{-2} の標肥区と同7.5g m^{-2} の増肥区を設け、各区とも P_2O_5 、 K_2O を10.0g m^{-2} ずつ施用した。追肥は、標肥慣行区が幼穂形成期（幼穂長1.5mm）に達した時期にN=3.0g m^{-2} を施用した。基肥は窒素、りん酸、カリの3要素が配合された化成肥料とりん酸、カリのPK化成で施肥量を調整し、追肥には硫酸を用いた。なお、標肥慣行区の幼穂形成期は、2014年が7月9日、2015年が7月10日、2016年が7月8日であった。水管理は、地域の慣行に従い行った。試験は、近接する約200 m^2 の圃場を4筆用いて、2水準の施肥区を2反復で設け、それぞれに疎植区と標肥区を配置した。試験区は、圃場の外周を除いた中央部に配置し、1区当たりの面積を約20 m^2 とした。

生育調査は、移植日から7月下旬頃までに約10日間隔で実施し、連続する10株の茎数を測定した。また、標肥慣行区が幼穂形成期に達した時期に茎数、SPAD値（SPAD-502、コニカミノルタ社製）を調査した。SPAD値は、進展中の葉を除いた最上位展開葉を測定した。刈り取りは、各年の9月20日前後に行った。収量調査は、慣行区では70株、疎植区では37株を4条で株間方向に連続して刈り取りし、玄米を1.9mmのふるい目幅で選別した。収量構成要素は、刈り取り部分の全穂数を計測してから脱穀し、回収した全粃を十分に攪拌してから800gを取り出し、その粃数、精玄米数、登熟歩合、千粒重を測定した。収量、千粒重は

水分含量を 15%に換算した。玄米外観品質は、品質判別器（RGQI20，サタケ社製）を用いて、精玄米を 1 区当たり千粒調査した。玄米蛋白質含有率（乾物換算値）は、近赤外穀物分析機（Infratec 1241 Grain Analyzer, Foss 社製）により測定した。等級検査は、日本穀物検定協会東北支部青森出張所に依頼し、精玄米を 1 等上から 3 等下まで 9 段階で格付けした。食味官能試験は一般社団法人日本穀物検定協会の方法に準じて行い、2016 年の標肥慣行区を基準米、疎植増肥区を試験米した相対法で行った。試験は 2017 年の 3 月 9 日と 3 月 16 日の 2 回行い、供試米は反復毎に取り出した等量の玄米を攪拌し、等分した材料を用いた。パネラーは、食味官能試験の経験を有する青森県産業技術センター農林総合研究所の職員とした。統計分析はエクセル統計（BellCurve 社製）を用いて、多元配置分散分析により解析した。気象データは、アメダス黒石における観測値を用いた。

4 - 3 結果

1) 試験実施年次の気象概況

水稻生育期間の気象をみると、低温や寡照で経過する期間もあったが、期間平均では各年次とも高温多照傾向であった（表 4-1, 図 4-1, 図 4-2, 図 4-3）。疎植栽培の収量性に影響する栄養成長期の温度条件に着目すると、2014 年は全般に高温傾向であり、2015 年は分けつ発生始期となる 6 月上～中旬が高温傾向で、それ以降は平年より低かった。一方、2016 年は分けつ始期の 6 月上旬が平年より低く、それ以降は高温傾向であった。また、同年の 6 月上～中旬は、日照時間が少ない条件であった。なお、出穂期は各年とも 8 月第 1 半旬に到達した（表 5-2）。登熟の良否の目安となる登熟気温（出穂後 1～40 日間の平均気温）は、いずれの試験区でも 20℃以上を確保し、異常高温ならびに低温による登熟不良や玄

米品質の低下を招く気象条件はみられなかった。

2) 株当たり茎数の推移, 幼穂形成期の SPAD 値, 有効茎歩合

施肥間における株当たり茎数の推移についてみると, 増肥区は標肥区に比べて分けつ始期が 1 本, 分けつ盛期が 2~3 本, 幼穂形成期と分けつ終止期が 5 本多く, 各年次において多肥による分けつの発生促進効果が認められた (表 4-2). 幼穂形成期頃 (7 月上旬) の株当たり茎数は, 分けつ発生始期が高温であった 2014 年と 2015 年に比べて, 低温寡照であった 2016 年で少なかった. 同時期の SPAD 値は, 2016 年が他の 2 カ年より約 2 ポイント高く, 施肥間では増肥区が標肥区より約 1 ポイント高い傾向であった (表 4-3). SPAD 値における交互作用は年次×栽植が 5%水準で有意であり, 2014 年では栽植密度間の差が認められず, 2015 年と 2016 年では疎植区の SPAD 値が標肥区に比べて 4~5 ポイント程度高かった. 有効茎歩合には栽植密度間のみ有意差が認められ, 疎植区の有効茎歩合は慣行区より 7%高かった. 増肥区は茎数が多かったものの, 標肥区を対照とした有効茎歩合の低下は 3%程度に止まった.

3) 収量ならびに収量構成要素

収量は, 2014 年と 2015 年に対して 2016 年が有意に少なかった (表 4-4). 分けつ発生始期が低温寡照で経過した 2016 年では, m^2 当たり穂数ならびに m^2 当たり籾数の減少が低収の要因となった. 施肥間の比較では, 増肥区が標肥区に対して有意に増収した. 収量の交互作用は, 年次×施肥ならびに年次×栽植が 10%水準で有意であった. 年次×施肥については, 2014 年と 2015 年では施肥間に有意差が認められなかったが, 2016 年では増肥区が標肥区に比べて 1%水準で有意に増収した. 一方, 年次×栽植については, 2014 年と 2015 年では栽植間に有

意差が認められなかったが、2016年では疎植区が慣行区に比べて5%水準で有意に減収した。以上のように、施肥間と栽植間の収量差は2016年で大きかった。

図4-4(A)には、同条件で栽培したときの慣行区(21.2株 m^{-2})に対する疎植区(11.2株 m^{-2})の収量を年次別に示した。慣行区に対する疎植区の減収程度は、収量水準が低いほど大きい傾向であった。一方、標肥疎植区に対する増肥疎植区の収量は、収量水準が低かった2016年において基肥窒素の増肥による顕著な増収効果がみられた(図4-4(B))。慣行区における収量と幼穂形成期頃の生育ならびに収量構成要素との相関関係をみると、収量と m^2 当たり茎数との間に有意な相関関係がみられなかったが、疎植区では収量と m^2 当たり茎数、 m^2 当たり穂数との間に1%水準で有意な正の相関関係が認められた(表4-5)。以上のように、青森県における疎植栽培では、茎数の確保が困難で低収化する気象条件ほど標準栽植に対する減収程度が大きくなる傾向があるが、基肥窒素の増肥条件が積極的な茎数の増加を介して安定多収に寄与し、特に分けつ始期の低温寡照年で高い増収効果が得られることが示唆された。

4) 玄米品質，玄米蛋白質含有率，食味官能

整粒歩合には年次間のみ有意差が認められた(表4-6)。施肥間による有意差は認められず、増肥区の整粒歩合は標肥区に比べて約1%の低下に止まった。整粒歩合はいずれの年次も高水準であり、検査等級は全区が1等に格付けされた。玄米蛋白質含有率には施肥間による有意差は認められず、増肥区における玄米蛋白質含有率は標肥区に比べて約0.1%の上昇に止まった。食味官能試験の結果、標肥慣行区と増肥疎植区には総合評価を含めたすべての項目で有意差が認められなかった(表4-7)。

表 4-1 試験年次における月別の気象経過.

月 旬	平均気温 (°C)			日照時間 (h)			
	2014年	2015年	2016年	2014年	2015年	2016年	平年
5 中	14.9	13.9	15.0	63	58	96	61
5 下	17.2	17.5	18.1	75	113	98	73
6 上	19.3	17.1	15.7	84	77	38	66
6 中	17.3	18.9	18.4	23	81	39	59
6 下	19.6	17.9	18.7	85	42	66	57
7 上	21.0	19.0	20.2	82	86	45	51
7 中	22.9	22.4	20.5	56	59	53	48
7 下	24.1	25.4	22.9	78	31	75	66
8 上	24.4	25.5	25.1	30	80	78	61
8 中	22.6	23.2	23.6	37	63	79	59
8 下	21.4	20.3	22.9	63	38	70	62
9 上	20.8	19.6	22.2	69	31	65	54
9 中	16.8	17.8	18.8	72	52	46	50
9 下	16.3	16.9	18.1	59	65	39	50
期間の平均	19.9	19.7	20.0	63	62	63	58

期間の平均は、5月中旬から9月下旬までの平均値。平年値の統計期間は1991～2010年

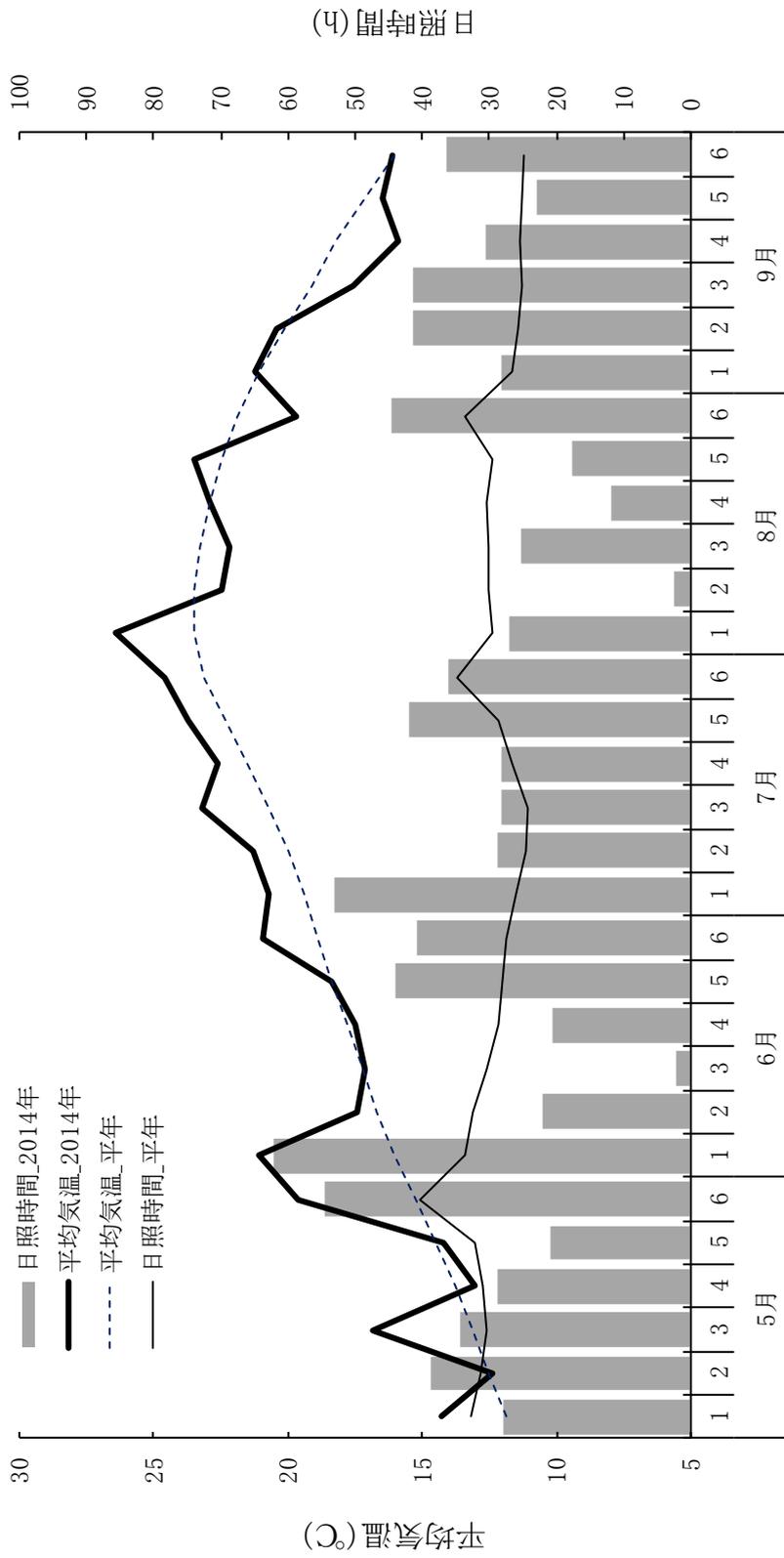


図 4-1 2014 年における半旬別の気象経過.

黒石アメダスの観測値.

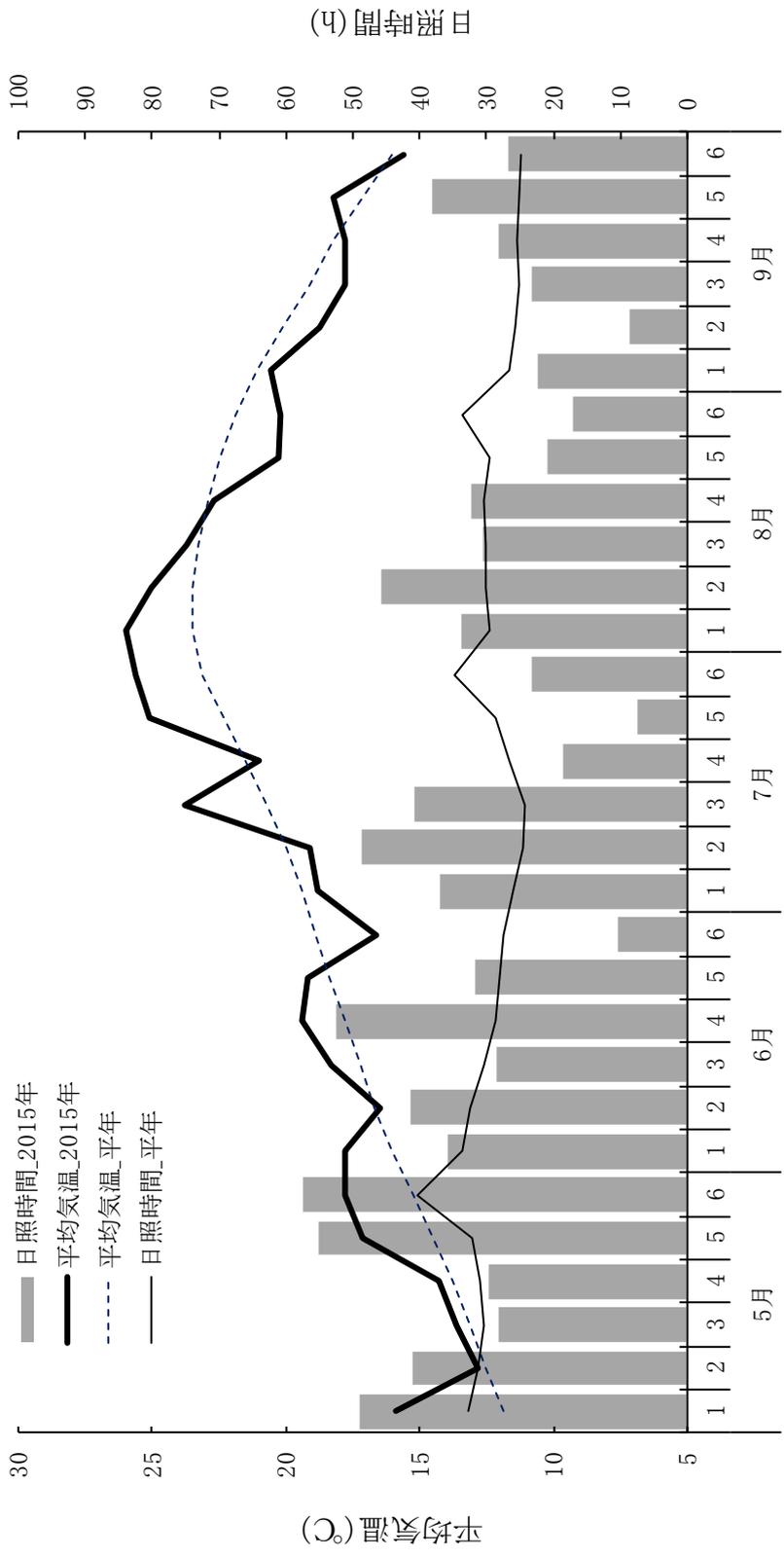


図 4-2 2015 年における半旬別の気象経過.

黒石アメダスの観測値.

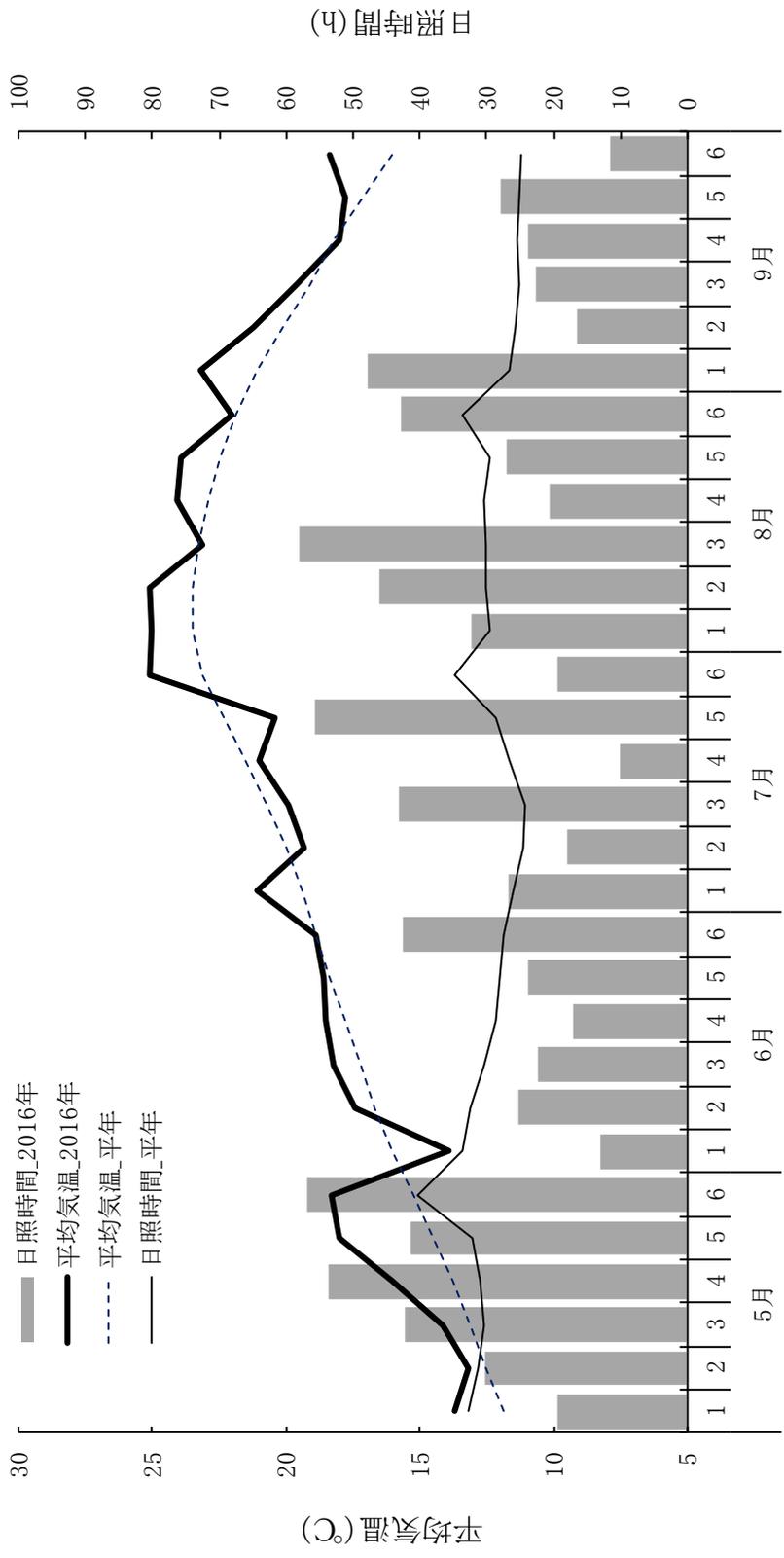


図 4-3 2016 年における半旬別の気象経過.

黒石アメダスの観測値.

表 4-2 各分げつ期の株当たり茎数.

年次	施肥	栽植	始期			盛期		最高分げつ期	
			6上	6中	6下	7上	7中		
2014	標肥	慣行	9.9	15.2	28.2	31.0	29.8		
		疎植	11.0	17.0	35.6	44.2	45.6		
	増肥	慣行	12.0	18.8	35.1	37.8	35.9		
		疎植	11.4	17.5	36.7	47.6	49.7		
2015	標肥	慣行	11.6	18.1	27.5	31.0	31.8		
		疎植	12.4	18.7	33.1	45.8	48.4		
	増肥	慣行	12.1	19.9	34.0	37.7	38.8		
		疎植	11.6	19.8	34.9	47.5	51.5		
2016	標肥	慣行	7.3	13.6	23.9	28.8	27.7		
		疎植	6.2	13.1	23.3	35.8	40.5		
	増肥	慣行	9.0	15.3	26.1	31.3	30.8		
		疎植	8.1	15.5	27.9	42.2	46.3		
平均	年次	2014年	11.0 a	17.1 ab	33.9 a	40.1 a	40.2 a		
		2015年	11.9 a	19.1 a	32.4 a	40.5 a	42.6 a		
		2016年	7.6 b	14.4 b	25.3 b	34.5 b	36.3 b		
	施肥	標肥	9.7 b	15.9 a	28.6 b	36.1 b	37.3 b		
		増肥	10.7 a	17.8 a	32.4 a	40.7 a	42.2 a		
	栽植	慣行	10.3 a	16.8 a	29.1 a	32.9 b	32.5 b		
		疎植	10.1 a	16.9 a	31.9 a	43.8 a	47.0 a		
	分散分析	年次		***	**	**	*	*	
施肥			*	†	*	*	**		
栽植			ns	ns	†	***	***		
年次×施肥			ns	ns	ns	ns	ns		
年次×栽植			ns	ns	ns	ns	ns		
施肥×栽植			ns	ns	ns	ns	ns		
年次×施肥×栽植			ns	ns	ns	ns	ns		

6 上の調査日は 2014 年 6 月 10 日, 2015 年 6 月 12 日, 2016 年 6 月 8 日. 同様に, 6 中:2014 年 6 月 20 日, 2015 年 6 月 18 日, 2016 年 6 月 17 日, 6 下:2014 年 6 月 30 日, 2015 年 6 月 26 日, 2016 年 6 月 27 日, 7 上:2014 年 7 月 8 日, 2015 年 7 月 9 日, 2016 年 7 月 8 日, 7 中:2014 年 7 月 18 日, 2015 年 7 月 15 日, 2016 年 7 月 20 日. 施肥の標肥は 5 g m^{-2} , 増肥は 7.5 g m^{-2} , 栽植の慣行は 21.2 株 m^{-2} , 疎植は 11.2 株 m^{-2} . 同一英文字間には 5%水準で有意差が認められないことを示す (Tukey 法). †, *, **, *** はそれぞれ 10%, 5%, 1%, 0.1%水準で有意であることを示し, ns は有意でないことを示す.

表 4-3 幼穂形成期の生育, 有効茎歩合, 出穂期.

年次	施肥	栽植	幼穂形成期のSPAD値	有効茎歩合 (%)	出穂期
2014	標肥	慣行	35.2	80	8月1日
		疎植	36.5	87	8月2日
	増肥	慣行	36.4	72	8月2日
		疎植	36.4	81	8月2日
2015	標肥	慣行	32.7	77	8月2日
		疎植	38.1	83	8月3日
	増肥	慣行	35.1	72	8月3日
		疎植	39.2	80	8月4日
2016	標肥	慣行	35.9	70	8月3日
		疎植	38.6	80	8月5日
	増肥	慣行	36.3	77	8月4日
		疎植	40.9	79	8月5日
平均	年次	2014年	36.1 a	80 a	8月2日 c
		2015年	36.3 a	78 a	8月3日 b
		2016年	37.9 a	76 a	8月4日 a
	施肥	標肥	36.2 a	80 a	8月3日 b
		増肥	37.4 a	77 a	8月3日 a
	栽植	慣行	35.3 b	75 b	8月3日 b
疎植		38.3 a	82 a	8月4日 a	
分散分析	年次		†	ns	***
	施肥		†	ns	**
	栽植		***	**	*
	年次×施肥		ns	ns	ns
	年次×栽植		*	ns	ns
	施肥×栽植		ns	ns	ns
	年次×施肥×栽植		ns	ns	ns

施肥の標肥は 5 g m^{-2} , 増肥は 7.5 g m^{-2} , 栽植の慣行は 21.2 株 m^{-2} , 疎植は 11.2 株 m^{-2} . 同一英文字間には 5%水準で有意差が認められないことを示す (Tukey 法). †, *, **, *** はそれぞれ 10%, 5%, 1%, 0.1%水準で有意であることを示し, ns は有意でないことを示す. 有効茎歩合は, 逆正弦変換して行った.

表 4-4 収量ならびに収量構成要素.

年次	施肥	栽植	収量 (g m ⁻²)	穂数 (本 m ⁻²)	一穂粒数 (粒)	粒数 (百粒 m ⁻²)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)
2014年	標肥	慣行	713	486	80	387	78.9	23.3
		疎植	726	428	87	371	84.8	23.1
	増肥	慣行	716	517	76	392	79.1	23.1
		疎植	729	445	90	401	79.8	22.8
2015年	標肥	慣行	699	505	69	349	86.8	23.1
		疎植	691	423	78	331	90.0	23.2
	増肥	慣行	704	566	65	369	83.5	22.8
		疎植	716	449	78	352	88.5	23.0
2016年	標肥	慣行	627	452	69	310	88.6	22.9
		疎植	590	362	82	296	88.6	22.5
	増肥	慣行	668	530	68	359	83.6	22.3
		疎植	640	417	81	338	85.6	22.2
平均	年次	2014年	721 a	469 ab	83 a	388 a	80.6 b	23.1 a
		2015年	702 a	486 a	73 b	351 b	87.2 a	23.0 a
		2016年	631 b	440 b	75 b	326 b	86.6 a	22.4 b
	施肥	標肥	674 b	443 b	77 a	341 b	86.3 a	23.0 a
		増肥	696 a	487 a	76 a	369 a	83.3 b	22.7 b
	栽植	慣行	688 a	509 a	71 b	361 a	83.4 b	22.9 a
		疎植	682 a	421 b	83 a	348 a	86.2 a	22.8 a
	分散分析	年次		***	*	***	***	***
施肥			*	**	ns	**	**	**
栽植			ns	***	***	ns	*	ns
年次×施肥			†	ns	ns	ns	ns	ns
年次×栽植			†	ns	ns	ns	ns	ns
施肥×栽植			ns	ns	*	ns	ns	ns
年次×施肥×栽植			ns	ns	ns	ns	ns	ns

施肥の標肥は 5 g m⁻², 増肥は 7.5 g m⁻², 栽植の慣行は 21.2 株 m⁻², 疎植は 11.2 株 m⁻². 同一英文字間には 5% 水準で有意差が認められないことを示す (Tukey 法). †, *, **, *** はそれぞれ 10%, 5%, 1%, 0.1% 水準で有意であることを示し, ns は有意でないことを示す. 登熟歩合の検定は逆正弦変換して行った.

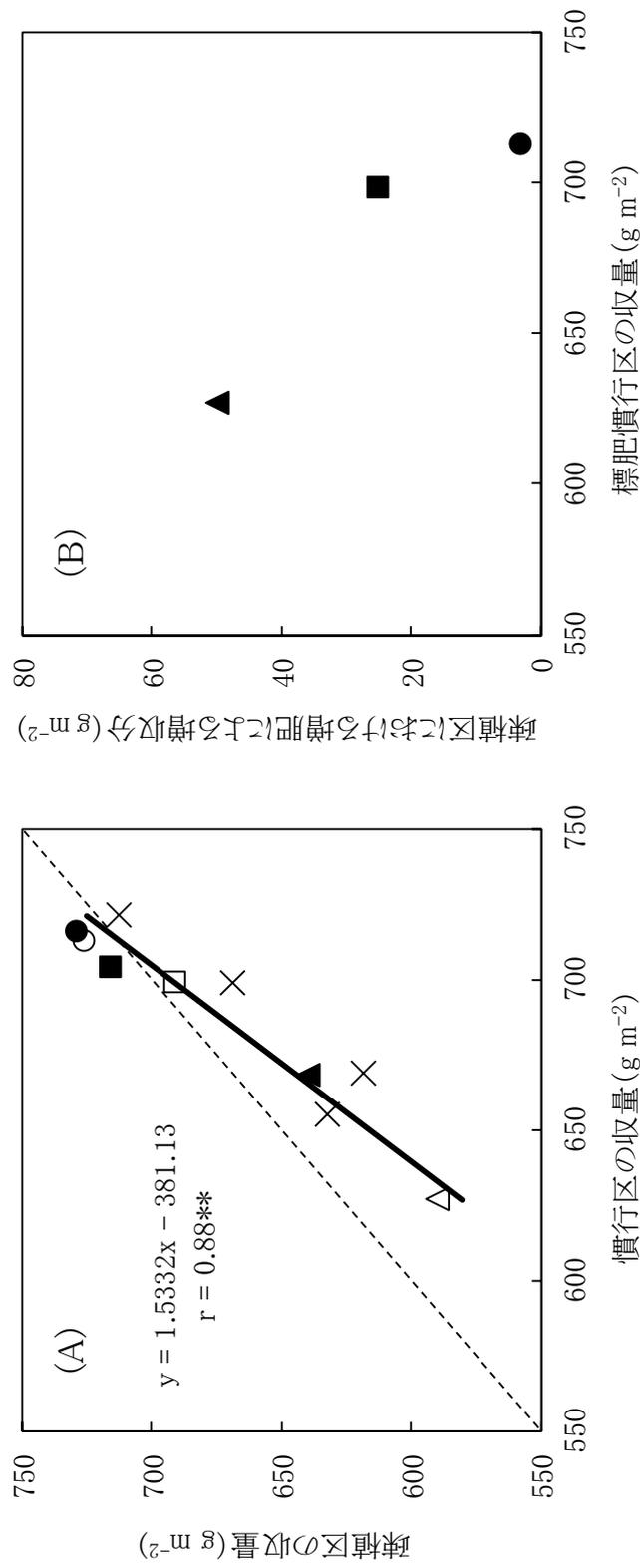


図 4-4 同条件で栽培した慣行区と疎植区の収量の比較.

** は 1%水準で有意であることを示す. 凡例は×2010~2013年, ○2014年標肥, ●2014年増肥, □2015年標肥, ■2015年増肥, △2016年標肥, ▲2016年増肥. 2010~2013年は木村・下野 2017 における 5 中区の値. 2014~2016 年は本研究の値. (A) の破線は収量比 1:1 を示す.

表 4-5 収量と幼穂形成期頃の生育ならびに収量構成要素との相関係数.

栽植	幼穂形成期頃の生育				収量構成要素			
	草丈	m ² 当たり茎数	m ² 当たり穂数	一穂粒数	m ² 当たり粒数	登熟歩合	千粒重	
慣行	0.52 ^{ns}	0.56 ^{ns}	0.57 ^{ns}	0.43 ^{ns}	0.90 ^{**}	-0.74 ^{**}	0.31 ^{ns}	
疎植	0.66 [*]	0.87 ^{**}	0.88 ^{**}	0.34 ^{ns}	0.87 ^{**}	-0.46 ^{ns}	0.65 [*]	
全体	0.61 ^{**}	0.42 [*]	0.51 [*]	0.18 ^{ns}	0.86 ^{**}	-0.54 ^{**}	0.52 ^{**}	

栽植の慣行は 21.2 株 m⁻², 疎植は 11.2 株 m⁻². 慣行 n=12, 疎植 n=12, 全体 n=24. *, ** はそれぞれ 5%, 1%水準で有意であることを示し, ns は有意でないことを示す.

表 4-6 玄米外観品質ならびに玄米蛋白質含有率.

年次	施肥	栽植	整粒歩合 (%)	検査等級 (1-9)	玄米蛋白質 (%)
2014年	標肥	慣行	83.1	2.0	6.73
		疎植	85.0	1.5	6.67
	増肥	慣行	82.3	2.0	6.73
		疎植	83.8	2.0	6.67
2015年	標肥	慣行	90.3	2.0	6.80
		疎植	89.4	1.0	6.86
	増肥	慣行	89.5	1.0	6.86
		疎植	88.6	1.0	7.24
2016年	標肥	慣行	84.2	2.5	7.02
		疎植	85.3	2.0	7.22
	増肥	慣行	84.7	2.0	7.07
		疎植	83.2	2.0	7.37
平均	年次	2014年	83.5 b	1.9 b	6.70 a
		2015年	89.4 a	1.3 a	6.94 b
		2016年	84.3 b	2.1 b	7.17 c
	施肥	標肥	86.2 a	1.8 a	6.88 a
		増肥	85.3 a	1.7 a	6.99 a
	栽植	慣行	85.7 a	1.9 a	6.87 a
		疎植	85.9 a	1.6 b	7.00 a
	分散分析	年次		***	***
施肥			ns	ns	ns
栽植			ns	*	†
年次×施肥			ns	ns	ns
年次×栽植			ns	ns	ns
施肥×栽植			ns	*	ns
年次×施肥×栽植			ns	ns	ns

施肥の標肥は 5 g m^{-2} , 増肥は 7.5 g m^{-2} , 栽植の慣行は 21.2 株 m^{-2} , 疎植は 11.2 株 m^{-2} . 検査等級は 1 上を 1, 3 下を 9 として数値化した. 同一英文字間には 5% 水準で有意差が認められないことを示す (Tukey 法). †, *, *** はそれぞれ 10%, 5%, 0.1% 水準で有意であることを示し, ns は有意でないことを示す. 整粒歩合ならびに玄米蛋白質含有率の検定は逆正弦変換して行った.

表 4-7 増肥疎植区と標肥慣行区の食味官能の比較.

	総合評価	外観	香り	味	粘り	硬さ
1回目	0.07 ^{ns}	-0.14 ^{ns}	0.14 ^{ns}	-0.07 ^{ns}	0.14 ^{ns}	-0.21 ^{ns}
2回目	-0.07 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.00 ^{ns}	-0.07 ^{ns}	0.21 ^{ns}	-0.36 ^{ns}

食味官能試験は 2016 年の標肥慣行区を基準米, 疎植増肥区を試験米した相対法で行った.
 ns は基準米と有意差がないことを示す (t 検定). 1 回目は 2017 年 3 月 9 日にパネル 13 名、2
 回目は 2017 年 3 月 16 日にパネル 14 名で行った。

4-4 考察

1) 基肥窒素を増肥した 37 株疎植栽培の生育と収量

各年次における栽植密度間の収量を比較すると、分けつ始期が低温寡照であった 2016 年において疎植区が慣行区より少なかった (表 4-1, 図 4-3, 表 4-4)。また、各年次における施肥間の収量を比較すると、2016 年では増肥区が標肥区に対して顕著に増収していた。以下、基肥窒素の増肥が疎植栽培の生育、収量に及ぼした影響について考察する。

まずは、2016 年における標肥疎植区の減収要因に着目する。標肥慣行区に対する標肥疎植区の収量比は 2014 年が 102%、2015 年が 99%、2016 年が 94%であり、2016 年において減収した (表 4-4)。標肥慣行区に対する標肥疎植区の m^2 当たり籾数比は 95~96%と年次間で差がなかったが、2014 年と 2015 年は登熟歩合が標肥疎植区で高く、これが収量を補償したのに対して、2016 年は両区間で登熟歩合に差がみられなかった。疎植水稻は登熟期の葉身の枯れ上がりが少なく、受光態勢に優れるため、一穂籾数が増加しても登熟歩合は高まる (橋川・西沢 1984) ことが知られている。しかし、2016 年の標肥疎植区は、分けつ始期が低温寡照 (表 4-1, 図 4-3) で経過したことで幼穂形成期の茎数が少なく (表 4-2)、SPAD 値も高まり (表 4-3)、穎花形成に関わる補償作用で一穂籾数が増大した結果 (表 4-4)、登熟性の劣る弱勢な二次枝梗籾が多くなったことが登熟歩合の向上を妨げた要因として考えられる (吉永ら 2008)。栽植密度を 11株 m^{-2} 程度とする疎植栽培の収量性は、地域の標準栽植と同等 (池尻ら 2013, 大橋・今井 2004, 木村ら 2005, 林 2017, 松波ら 2013) であるが、栄養成長期の低温により初期生育が不良となった場合、 m^2 当たり籾数が減少して減収する (井上ら 2004) ことが知られている。本研究では、 m^2 当たり籾数の大幅な減少はみられなかったが、分けつ始期の低温寡照が初期分けつの順調な発生を妨げ、これが籾数の構成要素

に影響して収量を低下させたと推察する。

次に、2016年における増肥疎植区の増収効果に着目する。増肥疎植区は各年次とも標肥疎植区に比べて茎数が多く、有効茎歩合の減少が1~6%に止まった（表4-3）ことで、 m^2 当たり穂数ならびに m^2 当たり粒数が増加した（表4-4）。窒素施用量の増肥は、茎部を含む稲体の窒素濃度を増大することで分けつ数を増加させ（大島1962）、上位節分けつのほか、下位節分けつを有効化する（浪岡ら1985）。このように、増肥疎植区では、多肥による積極的な稲体窒素濃度の増大が m^2 当たり粒数を増加させたと考えられる。標肥疎植区に対する増肥疎植区の収量比は、2014年が100%、2015年が104%、2016年が108%であり、基肥窒素の増肥による増収効果は2016年で顕著であった。生育初期の茎数は、低温年には土壌溶液中のアンモニア態窒素濃度が高いほど多くなり、高温年にはアンモニア態窒素濃度と茎数は無関係になる（安藤ら1988）ことが知られている。本研究の茎数ならびに m^2 当たり粒数には、年次×施肥の交互作用に有意性が認められなかった（表4-2、表4-4）が、生育初期の茎数が確保し難い条件ほど、基肥窒素の増肥による増収効果が現れやすいことが考えられる。なお、2014年は標肥疎植区と増肥疎植区の収量が同等であったが、他の年次と同様に増肥疎植区では標肥疎植区より m^2 当たり粒数が多く、シンクの増大は認められていた（表4-4）。ただし、2014年における増肥区の m^2 当たり粒数は、「まっしぐら」の生育目標の上限である3.8万粒 m^{-2} （青森県「攻めの農林水産業」推進本部2007）を超えた高水準であったことから、十分なシンクが活かされず、増収し得なかったと推察する。

青森県において、移植日ならびに施肥管理を同条件として栽培した標準栽植（21.2株 m^{-2} ）と疎植（11.2株 m^{-2} ）の収量を年次別で比較すると、収量水準が低いほど標準栽植に対する疎植の減収程度が大きい傾向であった（図4-4（A））。この傾向は、疎植水稻は分けつ力とそれに伴う個体の生産力を十分に発揮させる

ことで多収性を示す（橋川 1984）が、分けつ期の気象が不順で低収になる条件では、疎植栽培の補償作用が制限されることを示唆していると考えられる。しかし、2016 年のような低収年であっても疎植栽培における基肥窒素の増肥は分けつの発生を促し、籾数を増加して増収させていた（図 4-4（B））。青森県における密植栽培では、一次分けつに対する依存度が強いことから、無効化する二次分けつの発生を抑制するため、基肥窒素量を必要最小限とすることが合理的（浪岡ら 1985）であるが、疎植栽培については、基肥窒素の増肥による初期生育の促進が収量の高位安定に有効と考えられた（表 4-2, 表 4-4）。

2) 基肥窒素を増肥した疎植栽培の品質と食味

本研究における整粒歩合は 82~90%と全般に高く、検査等級は全区が 1 等に格付けされ、玄米の外観品質は良好であった（表 4-6）。整粒歩合は、 m^2 当たり籾数や一穂籾数が多いほどソースの競合が生じやすく、低下しやすいことが考えられる。疎植区では慣行区よりも一穂籾数が多い（表 4-4）ため、弱勢な二次枝梗籾の割合が多かったと考えられるが、外観品質の低下は認められなかった。疎植水稻は群落内の競合が少なく、受光態勢に優れる（橋川 1984, 橋川・西沢 1984）ことから、標準栽培より高いソース能を持つ。加えて、本研究における登熟期は、極端な高温や低温条件による登熟障害はなかったため、一穂籾数が増加した疎植区であっても良好な外観品質を維持したものとする。

また、疎植栽培における玄米蛋白質含有率は、標準栽培と比較して高くなり（木村ら 2005, 林 2017, 松波ら 2013）、食味官能が低下する（松波ら 2013）ことが報告されている。しかし、本研究における玄米蛋白質含有率は各区で大差なく（表 4-6）、標肥慣行区と増肥疎植区を比較した食味官能試験においても、総合評価をはじめとする各項目で有意差が認められなかった（表 4-7）。この結果は、

疎植と標準栽植による玄米および白米蛋白質含有率には差がないとする、井上ら（2004）や大橋・今井（2004）の報告と一致した。池尻ら（2013）は、疎植栽培と密植栽培における玄米蛋白質含有率の高低差には品種間差異が生じるが、それには登熟歩合の向上にみられる粒の充実が関係するとしている。本研究では、良好な登熟条件で登熟歩合が80～90%程度（表4-4）と高水準を維持したことが、疎植区における玄米蛋白質含有率の大幅な上昇を抑制したと考えられる。

なお、田中ら（2010）は、玄米の外観品質の向上と蛋白質含有率の抑制を両立させるためには、最高分けつ期から幼穂形成期頃の稲体窒素含有率を高く維持することが重要であることを指摘している。増肥疎植区では、幼穂形成期頃のSPAD値が適度に高く（表4-3）、品質や食味を維持しやすい生育状態であったことも要因として考えられる。

3) 基肥窒素を増肥した疎植栽培の経済性

疎植と基肥の増肥が稲作経営に及ぼす試算結果を表4-8に示した。生産者の手取り額ならびに経営費は、青森県における経営指標（青森県農林水産部2015）に基づいて算出した。生産者の手取り額は、粗収益（各区の収量×販売単価（1kg当たり195.5円））から乾燥調整委託料（1kg当たり25円）と流通経費（1kg当たり26.7円）を差し引いた額とした。経営費の総額は、種苗費、肥料費（肥料、土壌改良資材）、農業薬剤費（殺菌剤、殺虫剤、除草剤）、光熱動力費（電気、水道、ガソリン等）、諸材料費（育苗培土、育苗箱等）、水利費、賃借費（病害虫防除委託）、建物費、農機具費を積み上げた。そのうち、育苗費については、移植に要する10a当たりの育苗箱数を疎植区は16枚、慣行区は30枚として算出した。基肥費は、10a当たりの窒素施肥量を増肥区は7.5kg、標肥区は5kgとし、高度化成肥料（N-P-K：17-17-17）を使用した条件で算出した。10a当たりの経営

費は、疎植条件により約 2400 円の減額となり、基肥肥料の増肥条件により約 2000 円の増額となった。

標肥慣行区に対する 10 a 当たりの所得差は、増肥疎植区では 2339～2809 円（3 カ年平均 2633 円）、増肥慣行区では-1422～3957 円（同 428 円）、標肥疎植区では-2905～4397 円（同 892 円）であった（表 4-8）。標肥疎植区は収量の変動に伴う所得の増減幅が大きく、2016 年における所得は標肥慣行区に対して約 10%低下した。一方、増肥疎植区は変動幅が最も小さく、標肥慣行区に対する所得は 107～108%と高水準で安定した。

以上のことから、37 株疎植栽培における基肥窒素の増肥は、品質、食味を損なうことなく、収量ならびに所得を安定させる技術として有効であると考えられた。

4 - 5 摘要

寒冷地である青森県において、水稻品種「まっしぐら」を供試して 2 水準の基肥窒素と 2 水準の栽植密度の 4 組合せで 3 カ年の試験を行い、基肥窒素の増肥が 53%疎植区（11.2 株 m^{-2} ）の収量、玄米外観品質、食味に及ぼす影響を評価した。収量に対する基肥窒素の増肥効果は、3 カ年のうちで分けつ発生始期が低温寡照で収量水準の低かった 2016 年が最も顕著であり、53%疎植区による減収が補償された。玄米外観品質、玄米蛋白質含有率、食味官能には栽植間と施肥間でいずれの年次も有意差がなかった。経営評価を行った結果、所得は増肥かつ疎植条件において高水準で安定すると試算できた。

表 4-8 基肥窒素を増肥したときの疎植栽培の経済性 (10a 当たり)。

年次	施肥	栽植	生産者の			経営費		所得	標肥慣行区との所得差
			手取り額	総額	うち育苗費	うち基肥費			
			(円)	(円)	(円)	(円)	(円)	(円)	
2014年	標肥	慣行	102,467	60,232	5,899	3,971	42,236	-	
		疎植	104,459	57,827	3,494	3,971	46,632	4,397	
	増肥	慣行	103,030	62,217	5,899	5,956	40,813	-1,422	
		疎植	104,798	59,812	3,494	5,956	44,986	2,750	
2015年	標肥	慣行	100,535	60,232	5,899	3,971	40,303	-	
		疎植	99,316	57,827	3,494	3,971	41,489	1,185	
	増肥	慣行	101,271	62,217	5,899	5,956	39,054	-1,250	
		疎植	102,925	59,812	3,494	5,956	43,113	2,809	
2016年	標肥	慣行	90,163	60,232	5,899	3,971	29,931	-	
		疎植	84,853	57,827	3,494	3,971	27,026	-2,905	
	増肥	慣行	96,105	62,217	5,899	5,956	33,888	3,957	
		疎植	92,082	59,812	3,494	5,956	32,269	2,339	

主要作目の技術・経営指標 (青森県農林水産部 2015) に基づき試算した。生産者の手取り額は、粗収益 (各区の収量×販売単価 (1 kg 当たり 195.5 円)) から乾燥調整委託料 (1 kg 当たり 25 円) と流通経費 (1 kg 当たり 26.7 円) を差し引いた額。経営費の総額は、種苗費、肥料費 (肥料、土壌改良資材)、農業薬剤費 (殺菌剤、殺虫剤、除草剤)、光熱動力費 (電気、水道、ガソリン等)、諸材料費 (育苗培土、育苗箱等)、水利費、賃借費 (病害虫防除委託)、建物費、農機具費。育苗費は、移植に要する 10 a 当たりの苗箱数を疎植区では 16 枚、慣行区では 30 枚として算出した。基肥費は、10 a 当たりの窒素施肥量を増肥区では 7.5 kg、標肥区では 5 kg とし、高度化成肥料 (N-P-K:17-17-17) を使用する条件とした。

第5章 青森県の気象条件下における疎植栽培の適応戦略

5-1 はじめに

青森県では、冷湿なヤマセの発生頻度や卓越程度に伴う気象の地域性が水稻収量の地域性を表す（阿部ら 1962）。このことについて、福重（1989）は、青森県内の気象条件に応じて高温地帯、低温地帯、中間地帯の3群に分類し、ヤマセの影響を受けやすい低温地帯ほど低収であり（福重 1988）、疎植化の進行が作柄を不安定にする懸念があることを指摘している（福重 1987）。

前章までの試験結果において、71%疎植区は栄養成長期間の気象条件による収量変動が小さい疎植栽培であることが示された。一方、53%疎植区では、栄養成長期の低温が初期生育の分けつ発生や成長を妨げるため、個体当たりの十分な補償作用が得られずに減収することが示された。従って、53%疎植区の収量性は、ヤマセの影響を受けやすい地域ほど不安定になることが考えられる。53%疎植区のような株間を極端に広くする疎植栽培では、移植時の必要苗箱数の削減に伴う省力性や低コスト化のメリットが大きいですが、地域の気象条件に応じた収益性を考慮する必要がある。

疎植栽培の導入目的には、収益性に加えて省力化も挙げられる。青森県内で実施された疎植栽培の現地試験圃場位置とその試験成績を図 5-1 ならびに表 5-1 に示す。標準栽培に対する疎植条件の収量は並みからやや少なく、品質は概ね同等であった。試験担当者の考察によると、総じて疎植栽培は省力・低コスト技術として有効とされており、中には疎植栽培に伴う経営規模拡大や省力性を重視し、減収を必要悪と捉える事例もみられていた。つまり、疎植栽培の導入に当たっては、経営者が収益性と省力性のどちらを重視するかによって疎植程度が異なることが考えられる。

また、青森県の稲作に大きな影響を及ぼすヤマセは、地球温暖化が進行した将

- ① 鱒ヶ沢町
- ② 深浦町
- ③ 平川市
- ④ 黒石市
- ⑤ 蓬田村
- ⑥ 平内町
- ⑦ おいらせ町
- ⑧ 五戸町
- ⑨ むつ市

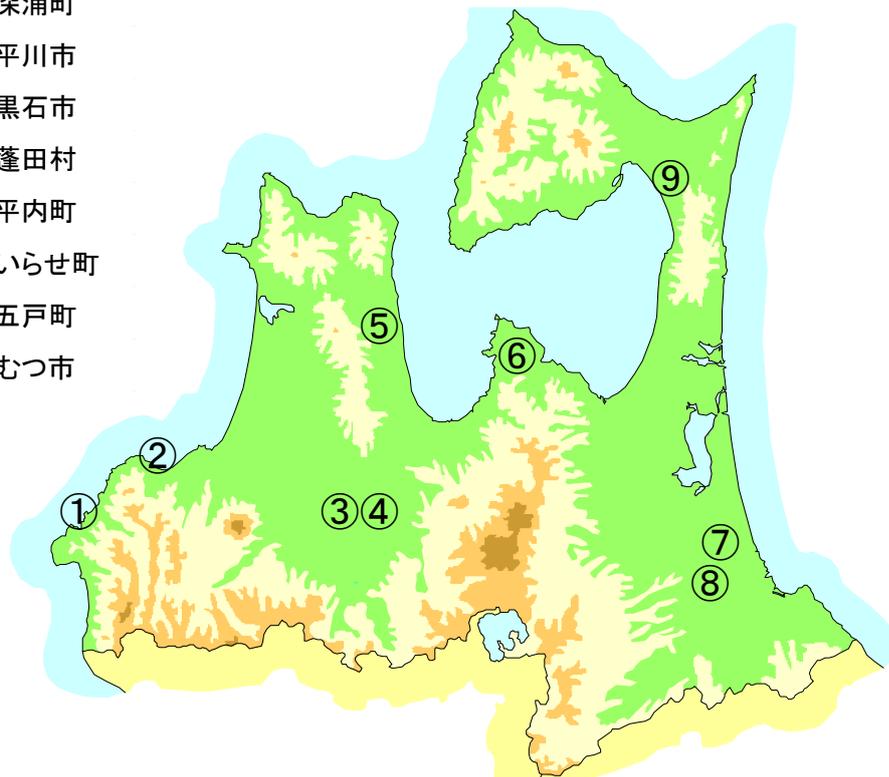


図 5-1 現地試験を実施した圃場位置.

表 5-1 青森県ならびに青森県産産業技術センター農林総合研究所が実施した現地試験成績 (1/2, 事項につづく)。

市町村	年次	品種	栽植密度		収量		等級 (等)	試験担当者の考察	備考
			(株/坪)	(kg/10a)	標準対比 (%)	(%)			
①鱒ヶ沢町	2010	つがるロマン	22.0	584			1	収量は対照区より5%少なかったが品質は同等であり、省力・低コスト技術として期待できる。	
			11.3	553	95	1			
	2012	つがるロマン	21.2	693			1	疎植区の収量は約11俵/10aを確保し、品質も同等であることから、低コスト省力技術の一様態として期待できる。	
②深浦町	2012	つがるロマン	11.3	652	94		1	疎植区の収量は慣行並みであった。品質は良好であったが、胴割粒の発生が多かった。	
			13.5	550	102	1			
	2012	つがるロマン	18.0	539			1	6月下旬と7月中旬が低温であったため茎数確保の面で慣行区の方が有利であったと考えられる。	全量基肥体系による
③平川市	2012	つがるロマン	17.9	555			1	疎植区は生育中盤から幼穂形成期にかけて分けつが旺盛になるため、生育状況に応じて中干しを適正に実施し、場合によっては追肥を考える。	全量基肥体系による
			11.2	522	94	1			
	2013	つがるロマン	17.9	560			1	疎植栽培の収量、品質は同等。省力・低コスト技術として期待できる。	全刈りによる実収
④黒石市	2009	つがるロマン	20.1	552			1	疎植栽培は600 kg/10aの収量レベルがある。玄米品質は異常高温の場合、弱勢籾にくさび米の発生が多くなる傾向がある。	落等要因はくさび米。
			11.1	537	97	1			
	2010	つがるロマン	20.1	612			2		
⑤蓬田村	2012	まっしぐら	15.2	639	104		3	38株の疎植条件では収量を確保したが、出穂期が5日遅れた。50株程度の疎植まで適応できる。	
			11.1	606	99	3			
	2012	まっしぐら	22.7	438			1		
⑥平内町	2012	まっしぐら	16.1	480	110		1	39株疎植では出穂期が2日遅れ、登熟歩合が低かった。50株程度の疎植まで適応できる。	
			11.5	564	129	1			
	2012	まっしぐら	19.4	586			1		
			16.4	597	102		1		
			11.8	571	97		1		

表 5-1 青森県ならびに青森県産業技術センター農林総合研究所が実施した現地試験成績 (2/2, 前頁のつづき)。

市町村	年次	品種	収量		等級 (等)	試験担当者の考察	備考
			栽植密度 (株/坪)	標準対比 (%)			
⑦おいらせ町	2009	まっしぐら	24.9	628	-	栽植株数を慣行の半分程度まで減じた場合、収量は10%程度減少する可能性はあるが、育苗資材・施設は現状のまま栽植面積の拡大が可能になる。	飼料用米として試験した。
			20.8	647	103		
			12.4	587	93		
			10.9	565	90		
⑧五戸町	2010	まっしぐら	25.5	615	-	疎植栽培は省力低コスト技術として有効である。	飼料用米として試験した。
			12.7	646	105		
	2012	まっしぐら	19.7	733	-	疎植区の粗玄米重はほぼ対照区並みであった。規模拡大が可能で省力技術として有効と考えられる。	飼料用米として試験した。
			14.2	718	98		
⑨むつ市	2009	まっしぐら	18.6	526	2	下北地域でのある程度の疎植栽培は可能であると考えられた。	落等要因は充実不足
			14.7	565	107		
	2010	まっしぐら	23.7	631	2	坪当たり50株程度 (14.5株 m ⁻²) の栽植株数で収量・品質的に慣行栽培と同程度の評価となった。気象条件に恵まれたこと等を考慮し、異なった試験場所・気象条件の検討も必要である。	
			21.1	607	96		
			18.8	632	2		
			14.5	614	97		
			11.3	567	90	1	

2009年は「平成21年度水稲調査研究成果書（水稲津軽地域研究会・県南稲作研究会・県南稲作研究会 2010）」、2010年は「平成22年度水稲調査研究成果書（水稲津軽地域研究会・県南稲作研究会 2011）」、2012年の深浦町、蓬田村、平内町は「平成24年度試験成績概要集（(地独) 青森県産業技術センター農林総合研究所 2013）」、それ以外は「平成24年度青森県稲作研究会調査研究成果書（青森県稲作研究会 2013）」、2013年は「平成25年度青森県稲作研究会調査研究成果書（青森県稲作研究会 2014）」より引用した。下線は現地慣行であることを示す。

来においても現在と同程度に発生することが推測されている。将来のヤマセは、地球温暖化に伴う気温上昇が進んだ中での相対的な低温をもたらす（Kanno ら 2013）、現在気候（1980～1999 年の 20 年平均値）に比べて将来気候（2076～2095 年の 20 年平均値）は、東北地方のほぼ全域で 3℃程度上昇することが予測されている（仙台管区気象台 2016）。地球温暖化が水稻の栽植条件や収量性に及ぼす影響を中長期的な観点で評価することは、今後の育種目標や栽培技術の開発を進める上でも重要である。

本章では、第 2 章ならびに第 4 章における 2010～2016 年の 7 か年の試験事例を用いて、栄養成長期の平均気温と 53%疎植区における減収程度との関係を再解析し、青森県における気象の地域性ならびに地球温暖化に適応した最適な疎植条件を収益優先と省力優先のそれぞれのパターンについてシミュレーションした。

5-2 方法

1) 栄養成長期の平均気温に対する 53%疎植区の収量性

53%疎植区における栄養成長期の平均気温と収量性については、第 2 章ならびに第 4 章で実施した 2010～2016 年の試験事例（全 19 事例）から、標準区に対する 53%疎植の収量比と移植後の平均気温との相関関係を調査した。気象データは、黒石アメダスの観測値を用いた。移植後日数は、移植翌日から 50 日後までを 10 日間隔で区切った。これは図 2-6 に 3 カ年分の試験事例を追加して再解析したものである。結果として、移植後 11～20 日ならびに同 21～30 日に 5%水準で有意な正の相関関係が認められ（表 5-2）、移植後 11～30 日の平均気温と標準区に対する 53%疎植区の収量比には、1%水準で有意な正の相関関係が認められた（図 5-2）。図 5-2 で得られた式 1 を算出根拠として、青森県内を対象にした 1km 四方メッシュによる 53%疎植区の収量性マップを作成した。

表 5-2 各期間（移植後日数）の平均気温と標準区に対する 53%疎植区の収量比との相関関係

1-10日	11-20日	21-30日	31-40日	41-50日	11-50日
-0.10 ^{ns}	0.57 [*]	0.55 [*]	0.19 ^{ns}	0.19 ^{ns}	0.49 [*]

n=19. * はそれぞれ 5%水準で有意であることを示し, ns は有意でないことを示す.

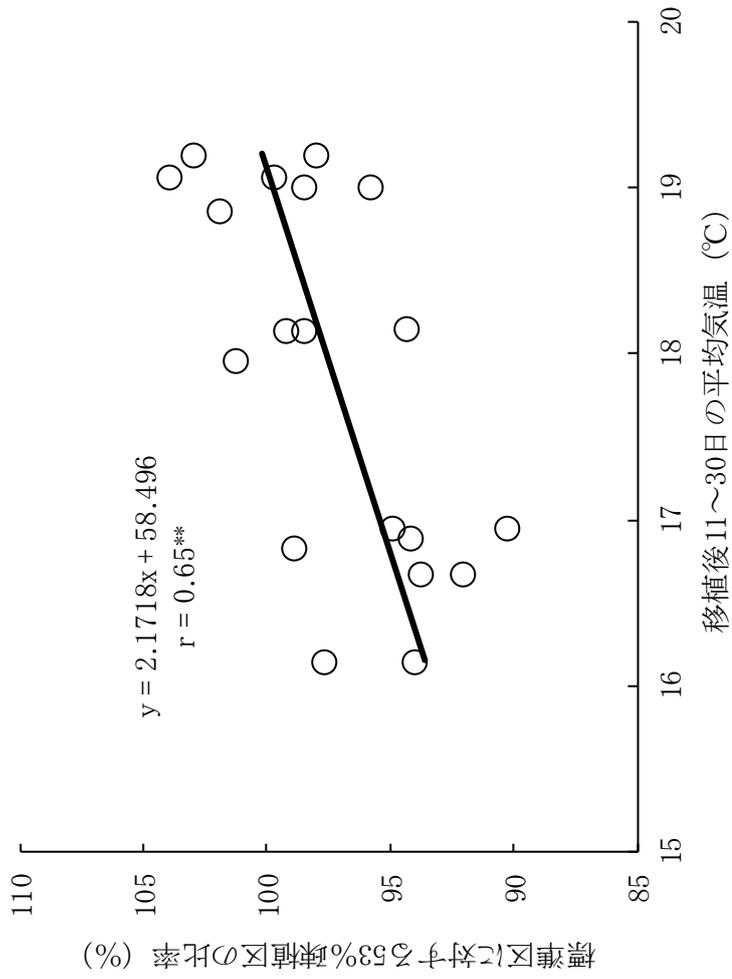


図 5-2 移植後 11～30 日の平均気温と標準区に対する 53%疎植区の収量比の関係.
 標準区は栽植密度 21.2 株 m^{-2} , 53%疎植区は同 11.2 株 m^{-2} . **は 1%水準
 で有意であることを示す.

$$y = 2.1718x + 58.496 \quad \dots \dots \text{式 1}$$

y : 標準区に対する 53%疎植区の収量比 (%)

x : 移植後 11~30 日の平均気温 (°C) とする.

対象メッシュは土地利用細分メッシュデータを参照し、水田面積を有するものとした。平均気温は、「メッシュ農業気象データ」(農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター)の平年値(統計期間 1989~2010 年)を用いた。53%疎植区の収量性マップは、現在気候、近未来気候、将来気候の 3 パターンとした。現在気候は、前述の平年値とした。将来気候(2076~2095 年の 20 年平均)は、現在気候より平均気温が 3°C 上昇する条件とした。近未来気候は 2030 年時点として、現在気候から将来気候への変化量を加味して現在気候より平均気温が約 1.2°C 上昇した条件とした。なお、71%疎植については、第 2 章の結果において、収量低下がみられなかったため、ここでは算出しなかった。

2) 気象面から推奨される各地域の疎植条件

標準区(栽植株数 = 21.2 株 m^{-2} , 基肥窒素量 = 標肥 (5 kg/10a)) に対する 71%疎植区ならびに 53%疎植区の標肥条件, 53%疎植区の基肥増肥条件(基肥窒素量 = 7.5 kg/10a), 以下, 53%疎植増肥区)の所得を算出した。具体的には、第 4 章の 4 の 3) に準じて、生産者の手取り額(10a 当たり収量は青森県における 2018 年産水稻の平均収量の 573 kg (農林水産省 2018c)) から育苗費, 肥料費等を積み上げた経営費を差し引いた額を所得とした。疎植栽培の導入には、低コスト化による所得向上を期待するケース(以下, 所得優先とする)と所得は向上しなくても育苗や苗箱運搬等の省力性を重視するケース(以下, 省力優先とする)が考えられる。これらを想定して、所得優先ならびに省力優先に場合分けし、所得面

でより有利な栽培条件を選出した。すなわち、所得優先では、53%疎植区ならびに71%疎植区のいずれかの疎植栽培の導入による所得向上を目的とし、標準区よりも所得が高い条件について順位付けした。省力優先では、坪当たり37株の疎植栽培の導入で積極的な苗箱削減を図ることを目的とし、53%疎植区と53%疎植増肥区を対象にして、標準区よりも所得が高い条件について順位付けした。71%疎植区については、収量を標準区と同等とし、栄養成長期間の気象条件に伴う減収が生じないことを前提とした。標準区に対する53%疎植区の収量比は栄養成長期の平均気温により変動することを考慮し、標準区との収量比で97~100%の範囲を順位付けした。53%疎植増肥区では第4章の結果を踏まえて、標準区との収量比の上限を100%として、増肥効果により4%増収することを条件とした。

5-3 結果

1) 栄養成長期の平均気温に対する53%疎植区の収量性

式1を用いて、各地点の移植後11~30日の平均気温から標準区に対する53%疎植区の収量比(%)を推定した。標準区に対する53%疎植区の収量比は、現在気候では青森県でも温暖な津軽平野南部が収量比96~98%、津軽平野北部と南部地方の一部が同94~96%、その他の地域では同94%未満であった(図5-3)。平均気温が1.2℃上昇した条件の近未来気候では、各地域で収量比が2%程度上昇する傾向であり、平気気温が3℃上昇した将来気候では収量比が98%以上になる地域が多くみられた。

2) 気象面から推奨される各地域の疎植条件

青森県における疎植栽培の導入による育苗費の削減、基肥を増やすことによる経費の増加、それらの収量を介した所得を算出し、所得優先ならびに省力優先に

ついて、より有利な栽培条件を選出した。育苗費は、標準栽培に対して 71%疎植区では 1486 円、53%疎植区では 2405 円削減された（表 5-3）。53%疎植増肥区では 53%疎植区に対して、肥料費が 1985 円増額となった。所得優先では、53%疎植区の収量比 100%、同 99%、71%疎植区の順に所得が高く、この 3 つが標準区の所得を上回った。省力優先では、53%疎植区の収量比 100~98%、53%疎植増肥区の同 100%（収量比率 96%+増収効果 4%）の順に所得が高かった。以上の結果から、所得優先については、①53%疎植が可能なメッシュ、②71%疎植に止めるべきメッシュに色分けした。所得優先の現在気候ならびに近未来気候では青森県内全域で 71%疎植が推奨され、53%疎植が推奨される地域はみれなかったが、将来気候では津軽平野、青森平野、南部地方の南方において 53%疎植が推奨された（図 5-4）。一方、省力優先については、①53%疎植が可能なメッシュ、②53%疎植増肥が可能なメッシュ、③53%疎植では標準区より所得が減少するメッシュに色分けした。省力優先の現在気候においては、津軽平野の南部で 53%疎植増肥が推奨されたが、その他の多くの地域では 53%疎植で減益する結果となった（図 5-5）。近未来気候では、現在気候の 53%疎植増肥推奨地域で 53%疎植区が推奨されたほか、津軽平野ならびに青森平野の広い範囲、南部地方の南方内陸部で 53%疎植増肥が推奨された。将来気候では、県内のほぼ全域で 53%疎植または 53%疎植増肥の導入が可能となった。

5-4 考察

栄養成長期の平均気温と 53%疎植区の収量性との関係を再解析した結果、移植後 11~30 日の平均気温と 53%疎植区の収量性に有意な正の相関関係が認められた（表 5-2）。移植後 11~30 日の平均気温は分けつ発生始期から盛期に該当することから、特に、分けつ発生を介した初期生育の確保が 53%疎植区の収量性に重

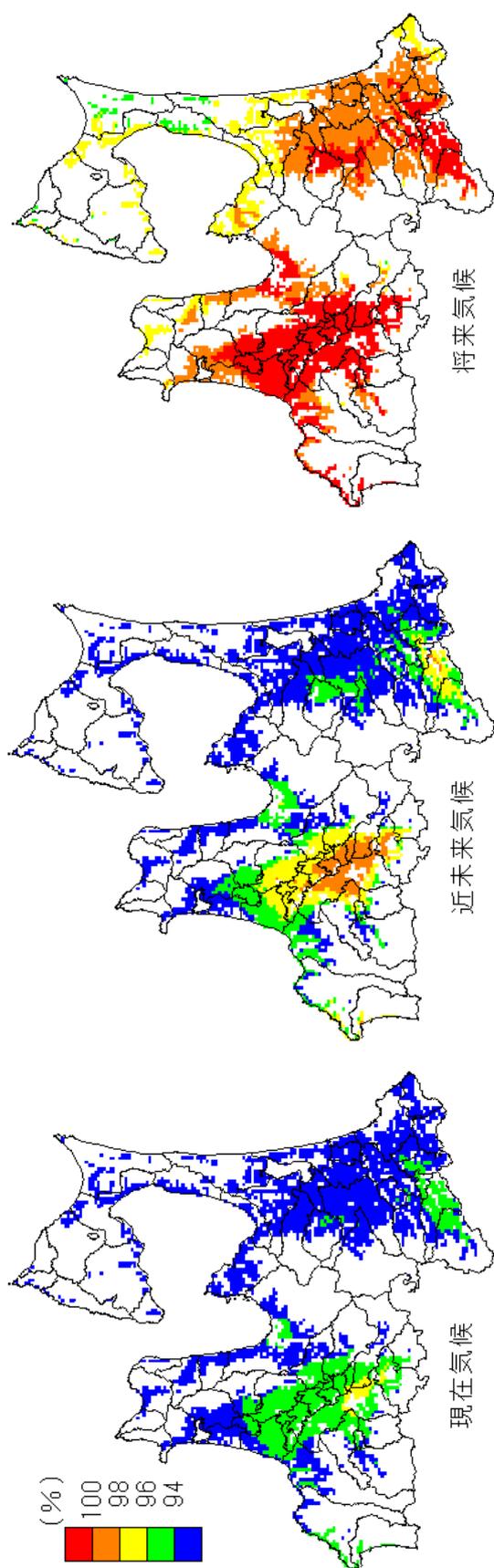


図 5-3 現在気候, 近未来, 将来気候における標準区における53%疎植区の収量比.

標準区は栽植密度 21.2 株 m^{-2} , 53%疎植区は同 11.2 株 m^{-2} で, ともに基肥窒素を標肥条件とする. 53%疎植区の収量比は, 図 5-2 による一次式から算出した. 平均気温は, 「メッシュ農業気象データ」(農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター)の平年値(統計期間 1989~2010 年)を用いて, これを現在気候とした. 将来気候(2076~2095 年の 20 年平均)は, 現在気候より平均気温が 3°C 上昇する条件とした. 近未来は 2030 年時点とし, 現在気候より平均気温が約 1.2°C 上昇した条件とした.

表 5-3 疎植栽培における収益性の比較ならびに所得, 省力性を優先したときに推奨される疎植条件.

区名	栽植密度 (株 m ⁻²)	基肥窒素量 (Nkg/10a)	収量 (kg/10a)	70株との 収量比 (%)	手取り額 (円)	経営費			所得 (円)	順位	
						総額 (円)	うち育苗費 (円)	うち基肥費 (円)		所得優先	省力優先
標準	21.2	5	573	100	82,397	60,232	5,899	3,971	22,162	-	-
71%疎植	15.2	5	573	100	82,397	58,746	4,413	3,971	23,649	3	-
53%疎植	11.2	5	573	100	82,397	57,827	3,494	3,971	24,567	1	1
			567	99	81,573	57,827	3,494	3,971	23,743	2	2
			562	98	80,749	57,827	3,494	3,971	22,919	3	3
			556	97	79,925	57,827	3,494	3,971	22,095		
53%疎植増肥	11.2	7.5	573	96+4	82,397	59,812	3,494	5,956	22,582		4
			567	95+4	81,573	59,812	3,494	5,956	21,758		
			562	94+4	80,749	59,812	3,494	5,956	20,934		

主要作目の技術・経営指標 (青森県農林水産部 2015) に基づき試算した. 生産者の手取り額は, 粗収益 (各区の収量×販売単価 (1 kg 当たり 195.5 円)) から乾燥調整委託料 (1 kg 当たり 25 円) と流通経費 (1 kg 当たり 26.7 円) を差し引いた額. 経営費の総額は, 種苗費, 肥料費 (肥料, 土壌改良資材), 農業薬剤費 (殺菌剤, 殺虫剤, 除草剤), 光熱動力費 (電気, 水道, ガソリン等), 諸材料費 (育苗培土, 育苗箱等), 水利費, 賃借費 (病害虫防除委託), 建物費, 農機具費. 育苗費は, 移植に要する 10 a 当たりの苗箱数を標準区では 30 枚, 71%疎植区では 22 枚, 53%慣行区では 16 枚として算出した. 基肥費は, 高度化成肥料 (N-P-K:17-17-17) を使用する条件とした.

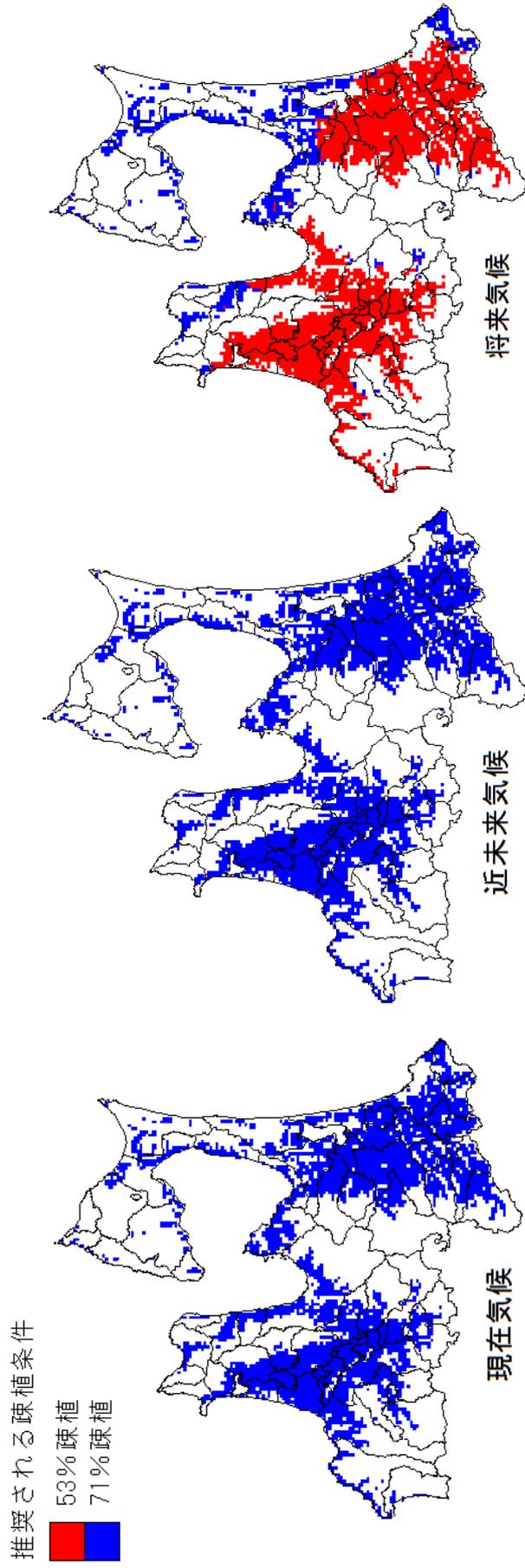


図 5-4 所得優先において推奨される疎植条件.

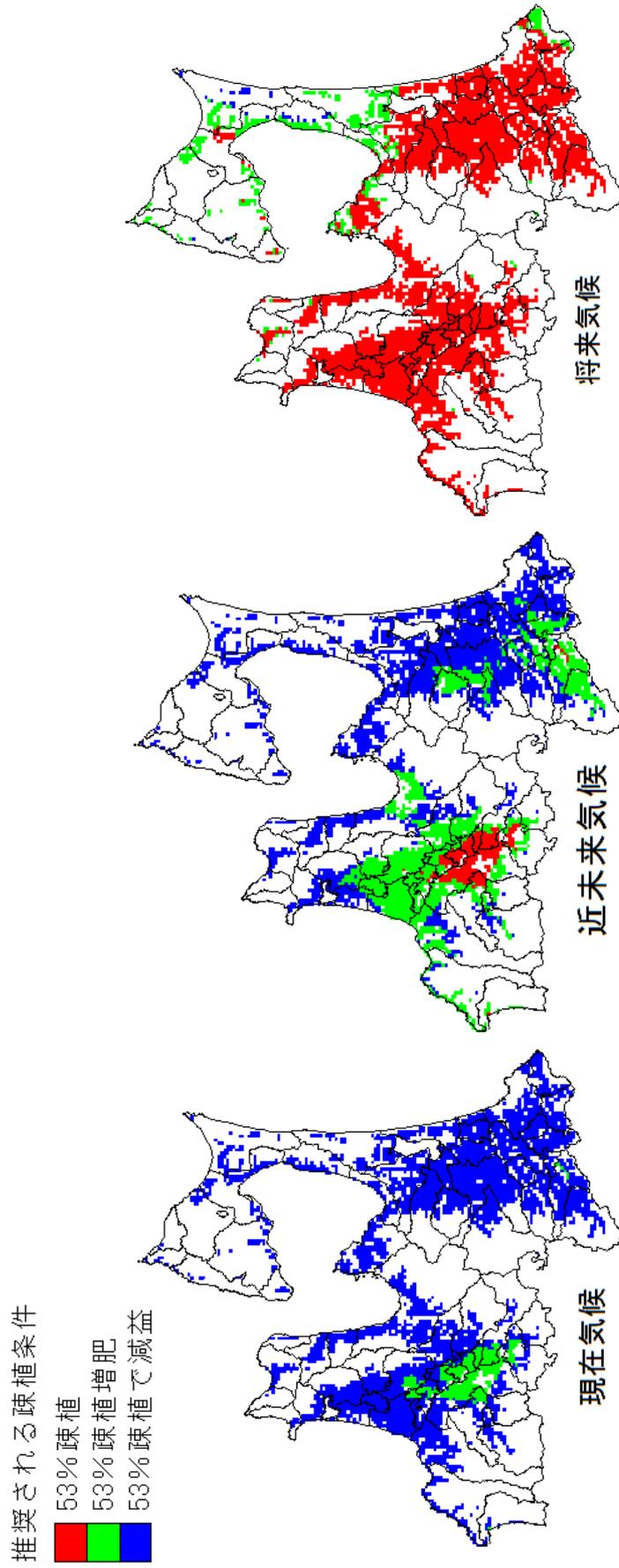


図 5-5 省力優先において推奨される疎植条件.

要であることが再確認された（図 5-2）。水稻の初期生育には気象条件のみならず、苗質（市川ら 1996, 村上ら 1982）、植付深度（水野ら 2013）、水管理（羽根田 1970, 小野ら 1969）が影響する。初期生育の確保が肝要な寒冷地（和田 1992）における疎植栽培では、分けつの発生を促すための栽培管理として、節水や適正な温度管理による健苗育成、植え付け深さ 3cm 程度の適正な移植深度、平常時 3cm 程度の浅水と低温時 5cm 程度の深水による水温上昇対策の徹底が求められる（青森県 2017）。

次に、青森県における気象の地域性から推奨される疎植条件について整理する。所得優先では、現在気候ならびに近未来気候において 53% 疎植が推奨される地域はみられなかった（図 5-4）。この結果、収益性を重視する場合、当面は 15.2 株 m^{-2} 程度の疎植栽培を導入するべきと考えられた。一方、省力優先については、現在気候では 53% 疎植が津軽平野の一部で、近未来気候では 53% 疎植増肥が津軽平野、青森平野、南部地方の南方内陸部で推奨された（図 5-5）。したがって、省力性を重視して疎植栽培に取り組む場合、近未来に向けて 53% 疎植増肥が広範囲で有効な技術になり得ることが示唆された。

ただし、これらのシミュレーション結果は、栄養成長期の生育量に基づく収量性を評価したものであり、登熟期が低温条件になった場合の減収リスクについては考慮されていない。また、穂孕期における葉身窒素含有率の上昇は、障害型耐冷性を低下させることが知られている（天野・森脇 1984）。平野ら（1997）は、基肥無施用による 8 葉期以降追肥体系と疎植を組み合わせた事例では、平年における収量は低下するが、1993 年の冷害時では耐冷性が強化されて平年作に近い収量が得られていたことを報告している。しかし、本研究における基肥窒素を増肥した疎植栽培では、平年における収量が向上したとしても冷害年での収量性が劣ることが懸念される。今後は、低温に伴う登熟能力の低下や障害不稔による減収

リスクについても検討する必要がある。

一方、将来気候では青森県の大半で 53%疎植が導入可能となり、それ以外の地域でも 53%疎植増肥が取り組める結果となった（図 5-4, 図 5-5）。稲作期間における 3℃の温度上昇は、栽植密度以外にも作期の拡大や高温障害、病虫害の発消長、直播の導入などによる栽培様式の変化など、様々な影響を及ぼすことが考えられる。これに関しては、奨励品種の切り替えや栽培法、防除体系の改良など、地球温暖化に適応するための総括的な対策技術を講じていく必要がある。

5-5 摘要

気象の地域性から推奨される疎植条件について解析した結果、所得優先では、現在気候ならびに近未来気候において 11.2 株 m^{-2} （53%疎植）が推奨される地域がなかった。収益性を重視する疎植栽培では、当面は栽植密度を 15.2 株 m^{-2} （71%疎植）にするべきと考えられた。省力優先では、現在気候で 53%疎植区に基肥窒素量を 2.5g m^{-2} 増肥した栽培条件（53%疎植増肥）が津軽平野南部で推奨され、近未来気候ではこれが津軽平野、青森平野、県南地域の内陸部の大半に拡大した。経営の規模拡大などの目的で省力性を重視する疎植栽培では、当面は基肥増肥による対策技術を講じることで 11.2 株 m^{-2} とする極端な疎植栽培に取り組める地域が、近い将来に向けて拡大していくことが示唆された。なお、将来気候では、青森県の大半で 11.2 株 m^{-2} とする疎植栽培が導入可能であり、それ以外の地域でも基肥増肥対策により同栽植密度で増収する結果であった。

第6章 総合考察

6-1 はじめに

本研究では、稲作の省力・低コスト技術として疎植栽培を取り上げ、第1章ではその必要性と可能性、第2章では収量性と変動要因、第3章では玄米品質と変動要因、第4章では基肥窒素の増肥による収量高位安定技術、第5章では気象の地域性に応じた導入指標について考察した。本章ではこれまでの結果を踏まえ、青森県における疎植栽培の実用性、今後の課題と展望を総合的に考察する。

6-2 青森県における疎植栽培の実用性

農業の労働力不足は全国的に進んでおり、青森県も例外ではない（表 1-1）。また、1人当たりの米消費量が減少する中（農林水産省 2018d）、今後の市場競争はさらに激化することが見込まれる。青森県は、特Aランク（一般財団法人日本穀物検定協会）を取得した「青天の霹靂」の生産・販売の強化を進め（青森県 2018b）、高価格帯であるブランド米の市場競争に名乗りを挙げた。その一方、近年は中食・外食市場が拡大することで、他産地における業務用米向けの品種開発や作付拡大が進んでおり（米穀安定供給確保支援機構 2016）、低価格帯で取り引きされる業務用米の市場競争が強まっている。従って、業務用米の生産量が多い青森県がこの産地間競争を勝ち抜くためには、より一層の省力・低コスト化が求められる。

本論文において、栽植密度を 15.2 株 m^{-2} とする疎植条件（以下、71%疎植）は収量・品質の安定性が高く（表 2-4, 表 2-5, 表 3-5, 表 3-6）、所得の向上が可能な省力・低コスト技術であることを明らかにした（表 5-3）。従来、密植栽培が推奨されていた青森県において、疎植栽培が導入可能になった要因には、地球温暖化に伴う気象条件の良化が考えられる。特に、移植後 11~30 日の平均気温と 21.2 株 m^{-2} （以下、標準栽植）に対する 11.2 株 m^{-2} （53%疎植）の収量比には有意な正の

相関関係が認められたことから（図 5-2），分げつ始期～盛期の高温条件が疎植栽培の収量性に関わることが考えられた．分げつ期の高温条件は，分げつの発生と成長を促し（松島ら 1964，田中ら 1968），生育初期の低温条件は下位分げつの退化や減少を生じさせる（櫛淵ら 1968，齋藤ら 1982）．すなわち，分げつ力とそれに伴う個体の生産力を十分に発揮させることで多収性を示す疎植栽培では（橋川 1984），分げつ始期～盛期の高温条件が強大な茎となる下位節分げつの確保と成長を促し，植え付け個体数の不足を補償して収量を確保するが，低温条件では下位節分げつの確保が困難となり，穂数，一穂粒数の低下を招いて減収することが考えられる．

図 2-1 のように，多くの既報では，53%疎植程度の疎植条件と標準栽培で同等の収量が確保されることを報告している（林 2017，池尻ら 2013，木村ら 2005，松波ら 2013，大橋・今井 2004）．しかし，本論文における 53%疎植の収量性は，標準栽培より低下する事例がみられた（表 2-4，表 2-5，図 4-4，表 5-1）．ただし，基肥窒素の増肥効果によって，53%疎植の分げつ数，穂数，粒数は多くなる傾向であり，特に，分げつ発生始期が低温条件になった年次において，基肥窒素の増肥による増収効果が顕著であった（表 4-2，表 4-4，図 4-3，図 4-4）．疎植栽培において，松下（1996）は，基肥や追肥の増肥による粒数の制御は明確にならなかったことを報告したが，青森県では基肥窒素の増肥が初期生育を促し，収量の高位安定に寄与した．基肥窒素の増肥は水稻の移植前に行う対策技術であるため，結果として過剰投資になる可能性もあるが，図 5-5 で示したようにヤマセの影響を受けやすく，生育初期の茎数が確保し難い条件では基肥窒素の増肥が 53%疎植導入の実用技術になり得る．

なお，青森県内で実施された疎植栽培の現地試験事例をみると（図 5-1，表 5-1），地域の慣行栽培に対する栽培密度を 15.2 株 m^{-2} 前後とする疎植栽培（ $13.5 \sim 16.4 \text{ 株 m}^{-2}$ ）の収量比は蓬田村を除くと 97～107%であった．同様に， 11.2 株 m^{-2}

前後 (10.9~11.8 株 m^{-2}) とする疎植栽培は 90~100%であった。15.2 株 m^{-2} 前後の収量比は 103% (n=6) で慣行の栽植条件と大差なく, 11.2 株 m^{-2} 前後の収量比は 95% (n=9) で慣行より低い傾向であり, 特にヤマセの影響を受けやすく気象条件の厳しい, むつ市とおいらせ町で減収程度が大きい傾向であった。これらの現地圃場における疎植栽培の収量性は, 本論文の結果と一致した。

以上, 本論文では, 分けつ始期~盛期の温度環境が疎植栽培の適応性に関係することを提示し, 平均気温が上昇した現在の青森県では, 71%疎植が所得を向上できる省力・低コスト技術として有効であること, 53%疎植は基肥窒素量の増肥により有効な省力技術になり得ることを明らかにした。

6-3 疎植栽培の今後の課題

本論文における研究期間では, 減数分裂期の障害不稔や登熟期の低温による登熟不良が生じなかったが, 寒冷地の稲作において冷害対策は安定生産に向けた重要な課題である。ヤマセは, 地球温暖化が進んだ将来においてもなくなり, その発生頻度は 8 月で多くなるという予測もみられる (遠藤 2012)。疎植栽培は SPAD 値が高く経過するため (表 2-3, 表 4-3), 障害不稔の耐冷性が脆弱化している可能性がある (天野・森脇 1984)。ヤマセの影響を受けやすい青森県では, 低温時における疎植栽培の減収リスクを明らかにし, 対策技術を講じる必要がある。障害不稔の耐冷性強化には, 履歴, 前歴, 危険期の深水灌漑が有効であるが (下野 2018), 分けつ期の深水処理は茎数の発生を抑制し, 穂数の低下を招く恐れがある。従って, 疎植栽培に適した入水時期と耐冷性強化の検討が必要である。

次に, 地球温暖化による温度上昇は, 青森県における稲作の作期を拡大する可能性があるが (木村 2018), 登熟期の低温条件は玄米品質を低下させるため (林 2017), 地域の安全出穂限界を基にした疎植栽培における移植適期の検討が必要で

ある。近年、水稻の作付面積が 50ha を超えるような大規模化した農業経営体では適期移植が困難になり、晩植する圃場を抱えるケースがみられている。木村（2005）は、晩植条件では栄養生長期間が短くなるため、疎植栽培で登熟粒数が不足して低収になることを報告している。従って、晩植に伴う登熟気温に加えて、栄養成長期の生育量を視点に含めた移植適期の検討が必要である。

また、業務用米においても食味の向上と安定は重要である（米穀安定供給確保支援機構 2016）ことから、追肥量の検討が必要と考えられる。本論文において、基肥窒素の増費による食味官能の低下は認められなかったが、53%疎植増肥の玄米蛋白質含有率は標準区に対して最大で約 0.4 ポイント上昇する事例がみられた（表 4-6）。秋田県における「あきたこまち」の疎植栽培では、標準栽培よりも追肥量を減じることで食味を改善し得ることが提唱されている（松波ら 2016）。本研究における追肥窒素量は「まっしぐら」の指標である 3.0 g m^{-2} としたが、食味への影響を極力抑えた肥培管理を行うためには、追肥量の減肥についても検討する余地がある。

最後に、疎植栽培に適性を持つ品種の利用は、特別なコストや栽培管理技術を要さない効果的な手段であることから、疎植栽培において収量・品質を高水準で維持し得る品種の育成が望まれる。疎植栽培の収量性には品種間差がみられることが知られているが（神田ら 1998, 松下 1996, Shimono 2011）、現在のところ青森県の水稲育種においては疎植適性を評価した品種選定は行われていない。低温下における下位分けつの発生には品種間差がみられること（齋藤ら 1982）、本田初期の乾物確保に関与する苗形質は葉齢と乾物重／草丈であることが報告されている（村上ら 1982）。今後は、苗質などを基準にした初期生育にも着目した品種選抜が期待される。また、現在の青森県における主力品種は、比較的分けつ数、穂数が少ない草型の偏穂重型であるが、慣行栽培に対する疎植栽培の株当たり穂数比が高い品種は高 CO_2 濃度環境下においても高い増収効果を示すことが報告されている（Shimono ら

2014). このことは、疎植栽培に適性を有する品種選定は地球温暖化が進行した高CO₂濃度環境にも対応し得る対策に繋がることを示唆し、将来の品種選定における一つの指標になると考えられる。玄米品質に関しては、疎植栽培において胴割れ耐性の弱い「つがるロマン」で胴割れが多い事例がみられたが、「塩選 203 号」のような胴割れ耐性に優れた品種が見いだされており（長田 2013）、有用な遺伝資源を導入した今後の品種開発が期待される。

6-4 疎植栽培の今後の展望

移植栽培は、直播栽培に比べて出穂期が早く、登熟気温の安定性が高い（木村 2018）。従って、青森県における稲作の大規模経営は当面、疎植栽培を中心にし、これに直播栽培を組み合わせた経営モデルが推奨される。近年、移植栽培の省力技術として、育苗箱への乾籾播種量を 250~300g と高密度に播種した稚苗を利用した移植栽培技術が開発されており（澤本ら 2019）、青森県内においても普及しつつある。今後は、この技術に疎植栽培を組み合わせることで、超省力型の移植栽培が可能になると考えられる。

また、青森県における疎植栽培では、初期分げつを確実に発生させることが極めて重要であり、きめ細やかな水管理による水温上昇対策が必要となる。ただし、労働力不足が顕在化している現在において、借地等により経営規模を拡大した場合、圃場が点在することで水管理に労力を要し、適正な管理が困難になることが考えられる。この解決策として、遠隔・自動制御可能な圃場水管理システム（鈴木・若杉 2018）が挙げられ、同システムは稲作の水管理を省力化する技術として社会実装されつつある。

今後は、こうした先進技術を取り入れた、より効果的で安定性の高い疎植栽培技術の確立が期待される。

要約

本論文では、水稻移植栽培の省力・低コスト技術である疎植栽培について、栽植条件に品種、作期、施肥法を組み合わせて体系的にその実用性を検討した。

第1章では、青森県における農業情勢や稲作の特徴、稲作期間の気象の変化を議論し、疎植栽培の必要性和可能性を整理した。

第2章では、青森県における疎植栽培の収量性と気象条件に伴う年次変動について検討した。2010～2013年の4カ年（2作期）において、栽植密度 21.2 株 m^{-2} （以下、標準栽植）と 15.2 株 m^{-2} の疎植条件（以下、71%疎植）の収量を比較した結果、標準栽植に対する71%疎植の収量比は99～100%であった。栄養成長期の平均気温と標準栽植に対する71%疎植との関係は無相関であり、71%疎植は収量の変動が少ない疎植栽培であることが示唆された。一方、栽植密度を 11.2 株 m^{-2} とする疎植栽培（以下、53%疎植）の収量比は96～98%であり、栄養成長期の平均気温が低いほど標準栽植との収量差が拡大する傾向であった。

第3章では、疎植栽培が玄米品質に及ぼす影響を評価した。疎植栽培の玄米品質は、標準栽植と概ね同等で品質は良好であった。「つがるロマン」では疎植栽培により胴割粒過多で落等する事例がみられたが、これに関しては品種選択により解決できると考えられた。

第4章では、初期分けつを確保するための対策技術として、53%疎植における基肥窒素の増肥（53%疎植増肥、標準の 5.0 g m^{-2} に対して 7.5 g m^{-2} ）について検討した。基肥窒素を増肥することで分けつ数、穂数、籾数が増加し、分けつ発生始期の低温年において増収効果が確認された。増肥に伴う玄米品質や食味の低下は認められなかった。基肥の増肥で肥料費は増加したが、育苗費の削減や増収効果により53%疎植増肥の収益性は標準栽植を上回った。

第5章では、気象の地域性ならびに地球温暖化（現在気候：1989～2010年、近

未来気候：現在気候+1.2℃，将来気候：現在気候+3℃）に対応した最適な疎植導入条件について評価した．所得向上を優先した場合，現在気候ならびに近未来気候では 53%疎植が導入可能な地域が青森県にはみられなかった．一方，省力性を優先させた場合，53%疎植増肥が推奨される地域がみられ，近未来気候ではこれが拡大した．

第 6 章では，青森県における疎植栽培の実用性と導入指標，技術的対策と今後の課題ならびに展望について総合的に考察した．

以上の結果から，青森県において所得を向上させるために疎植栽培を導入する場合は，当面は栽植密度を 15.2 株 m^{-2} とする疎植栽培が有利であった．一方，省力のために 11.2 株 m^{-2} の疎植栽培を導入する場合は，基肥窒素の増肥が有効な対策になり得ることを明らかにした．これらより，本論文は，青森県の疎植栽培について気象条件や栽培条件に伴う収益性を評価し，疎植栽培に取り組むための導入指標を提唱した．

Summary

I examined the sparse-planting cultivation on rice production (which is a labor-saving and low-cost technology) at different planting densities, varieties, cropping seasons and fertilizations in Aomori prefecture, Japan from 7 year-field trials. Planting density was set at three levels, normal density as 'Control' (21.2 hills m⁻²), 71% density compared with normal density, '71%D' (15.2 hills m⁻²), and 53% density compared with normal density, '53%D' (11.2 hills m⁻²).

Effects of sparse-planting cultivation on grain yield in Aomori prefecture were examined. The yield level at sparse-planting '71%D' was equivalent to that of 'Control' over four years (with two cropping seasons) from 2010 to 2013. However, the yield at '53%D' was reduced by 2-4% in average when compared to 'Control'. There was significant correlation of yield reduction by '53%D' and air temperature during the vegetative growth period. The brown rice quality of sparse-planting cultivation was equivalent to that of 'Control'.

To alleviate the yield reduction at sparse-planting '53%D', I examined the effects of basal nitrogen fertilizer rates ('Control' = 5.0 g N m⁻² and 'High N' = 7.5 g N m⁻²) in three-year experiments from 2014 to 2016. High N alleviated the reduction of yield at '53%D' compared to Control especially in low-yielding year. The grain quality and taste did not decrease with increasing basal N application. Cost-benefit analysis revealed that, total income will increase with combination of sparse-planting '53%D' and basal fertilization of 'High N'.

Simulation study was conducted to test the applicability of sparse-planting in Aomori prefecture, at three climate scenarios, present climate (PC) =1989-2010, near future (NF) =PC+1.2°C, future climate: PC+3°C.

In conclusion, I clarified the effectiveness of sparse-planting cultivation to reduce labor and cost, and then increase farmer's incomes in Aomori prefecture, Japan, and proposed guide line for introduction of sparse-planting cultivation.

謝辞

本博士学位論文を提出するにあたり、多くの方々のご指導とご助力をいただきました。

国立大学法人岩手大学農学部准教授下野裕之博士には、入学する以前より親切丁寧なご指導とご助言を頂くとともに本論文のご高閲を賜りました。同学部教授黒田栄喜博士、国立大学法人弘前大学農学生命科学部准教授川崎通夫博士、国立大学法人山形大学農学部教授藤井弘志博士には、本論文をご校閲して頂き、ご意見とご指導を賜りました。国立大学法人岩手大学農学部助手松波麻耶博士には中間報告の折、貴重なご意見を賜りました。

大学院への進学には、勤務先である地方独立行政法人青森県産業技術センターの中核研究者育成事業により学費の補助をしていただきました。また、学業と試験研究業務の両立に当たり、青森県産業技術センター農林総合研究所総括研究管理員野沢智裕氏、作物部長工藤予志夫氏、研究管理員工藤忠之氏、研究員千葉祐太氏、研究専門員横山裕正氏には、多大なるご支援をいただきました。元同研究所長成田勝治氏には、大学院進学への契機を与えていただきました。

本論文における圃場管理、データ収集には、同研究所技能技師三橋敬正氏、鈴木洋一氏、三浦実氏、成田薫氏、今格氏、技能専門員角田豊昭氏をはじめ、農場員のみなさまの多大なるご協力をいただきました。

最後に、大学院に進学した3年間は忙しく、「お休みなのに今日も遊びにいけないの？」と不満を言いながらも父親として慕ってくれた二男拓望、長男歩睦、日頃の生活を支えてくださった妻愛美、私の代わりとなって子の面倒をみてくださった父孝一、母啓子に感謝の意を表します。家族の理解と協力なくして、ここに辿り着くことはできませんでした。

以上の方々に心から感謝を申し上げます。

引用文献

- 阿部 亥三・小野清治・鳥山 国士・和田 純二 1962. 青森県における水稲生育の地域性に関する農業気象的考察. 東北農業研究 4: 14-17.
- 天野高久・森脇良三郎 1984. 水稲の冷害に関する栽培学的研究. 第2報 穂孕期不稔に関する葉身の限界窒素含有率. 日作紀 53: 1-6.
- 安藤豊・安達研・南忠・西田直樹 1988. 水稲生育初期の茎数と土壌アンモニア態窒素の関係. 日作紀 57: 678-684.
- 青森県 1980. 稲作改善指導要領(補完版): 1-169.
- 青森県 2017. 稲作改善指導要領: 1-276.
- 青森県 2018a. あおもりの農林水産業. https://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/nourin/nosui/files/H30_aomorinonourin_pamph_all.pdf. (2018年12月6日閲覧).
- 青森県 2018b. 青天の霹靂良食味・高品質栽培マニュアル(平成30年度版): 1-53.
- 青森県企画政策部 2015. 2015年農林業センサス農林業経営体調査結果の概要(確定値)及び市町村別主要結果表【青森県分】(平成27年2月1日現在): 1-81.
- 青森県農林水産部 2015. 主要作物の技術・経営指標: 1-498.
- 青森県農林水産部農産園芸課 2017. 米の生産と流通: 1-344.
- 青森県産業技術センター農林総合研究所 2013. 平成24年度試験成績概要集: 1-610.
- 青森県産業技術センター農林総合研究所 2014a. 水稲V溝乾田直播栽培マニュアル: 1-72.
- 青森県産業技術センター農林総合研究所 2014b. 水稲疎植栽培マニュアル: 1-25.
- 青森県「攻めの農林水産業」推進本部 2007. 「まっしぐら」栽培マニュアル(改訂版): 1-26.

- 青森県「攻めの農林水産業」推進本部 2011. 青森県稲作指導要領：1-276.
- 青森県「攻めの農林水産業」推進本部 2015. 平成 26 年度農作物生育観測ほ等調査成績書：1-55.
- 米穀安定供給確保支援機構 2016. 中食・外食事業者等の米の仕入等の動向：1-8.
http://www.komenet.jp/pdf/chousa-rep_H28-1.pdf. (2018 年 12 月 9 日閲覧).
- 米穀安定供給確保支援機構 2018. 平成 29 年産水稻の品種別作付動向について.
<http://www.komenet.jp/pdf/H29sakutuke.pdf>. (2018 年 12 月 6 日閲覧).
- ト蔵建治 2001. ヤマセと冷害. 成山堂書店：1-148.
- 遠藤洋和 2012. CMIP3 マルチモデルにおけるヤマセの季節性の再現性と将来変化.
日本気象学会記 90A：123-136.
- 福重裕康 1987. 青森県内水稻作の地域性. 1. 6 地帯別にみた収量の年次差異. 日作東北支部報 30：32-35.
- 福重裕康 1988. 青森県内水稻作の地域性. 2. 市町村別にみた収量の年次変動. 日作東北支部報 31：54-57.
- 福重裕康 1989. 青森県内水稻作の地域性. 3. 気象要因特に気温を中心に. 日作東北支部報 32：22-25.
- 冬木勝仁 2014. コメ流通における品質の意味. 農業経済研究 86：114-119.
- 羽根田栄四郎 1970. 稲作の水管理に関する研究. 東北の農業気象 15：35-40.
- 長谷誠一・佐々木高雄・菅 勝彦 1983. 風土の刻印 ヤマセ北東風社会. 東奥日報社：1-432.
- 橋川潮 1984. 極端な疎植水稻にみられる多収性. 滋賀県立短期大学学術雑誌 25：47-51.
- 橋川潮・西沢良一 1984. 基肥無窒素出糞水稻にみられる多収性. 滋賀県立短期大学学術雑誌 25：42-46.

- 林 怜史 2017. 北海道において疎植栽培されたイネ品種「ななつぼし」の生育, 収量および玄米品質. 日作紀 86: 129-138.
- 平野貢・山崎和也・Truong Tac Hop・黒田栄喜・村田孝雄 1997. 窒素施肥体系および疎植の組合わせ栽培が水稻の生育および収量に及ぼす影響. 日作紀 66: 551-558.
- 市川武史・有坂通展・種田貞義 1996. 水稻のプール育苗に関する研究. 第2報 苗質と初期生育. 北陸作物学会報 31: 50-51.
- 池尻明彦・中司祐典・前岡庸介 2013. 疎植栽培が水稻の生育, 収量, 品質に及ぼす影響. 第1報 疎植栽培における主要品種の生育特性. 山口県農林総合技術研究センター研究報告 4: 11-18.
- 井上健一・林恒夫・湯浅佳織・笈田豊彦 2004. 水稻品質食味要因の安定性に関する解析的研究. 第2報 疎植条件が水稻の物質生産と収量品質に及ぼす影響. 福井農試研報 41: 15-28.
- 石塚喜明・田中明 1952. 寒地と暖地の水稻栽培技術の比較. 農及園 27: 537-541.
- 神田幸英・北野順一・山中聡子 1998. 水稻乳苗疎植栽培における生育と収量構成要素の品種比較. 日作東海支報 125: 19-20.
- 菅野洋光 1997. ヤマセ吹走時におけるメッシュ日平均気温の推定. 農業気象 53: 11-19.
- Kanno, H., Watanabe, M. and Kanda, E. 2013. Miroc5 predictions of Yamase (cold northeasterly winds causing cool summers in northern Japan). J. Agric. Meteorol. 69: 117-125.
- 川崎賢太郎 2014. 国産農産物の品質評価をめぐる課題と展望. 農業経済研究 86: 82-91.
- 木村浩・森重陽子・杉山英治・住吉俊治・河内博文・川崎哲郎 2005. 疎植水稻の

- 生育特性と安定生産技術. 愛媛農試験研報 39: 1-9.
- 木村利行 2015. 青森県における水稲品種「まっしぐら」の乾田直播栽培適地. 東北農業研究 68: 7-8.
- 木村利行 2016. 青森県における水稲品種「ほっかりん」の湛水直播栽培適地. 東北の農業気象 60: 1-8.
- 木村利行 2018. 青森県津軽地域における水稲の移植栽培と直播栽培の登熟気温の経年変動. 東北の農業気象 62: 1-6.
- 小針美和 2014. 業務用米の動向について. 農中総研 調査と情報 44: 4-5.
- 小鹿洋子 1974. ヤマセ吹走時における青森県の気温分布. 東北地理 26: 45-50.
- 櫛淵欽也・和田純二・金沢俊光・佐藤亮一 1968. 水稲冷害の実際的研究. 第28報 気象条件が分けつに及ぼす影響. 東北の農業気象 13: 44-47.
- 松波寿典・能登屋美咲・松本眞一・三浦恒子・佐藤雄幸・松波麻耶 2013. 疎植栽培した「あきたこまち」の生育, 収量, 品質. 日作東北支部報 56: 25-26.
- 松波寿典・能登屋美咲・三浦恒子・金和裕・松波麻耶・佐藤雄幸 2016. 寒冷地北部において疎植栽培したあきたこまちの茎数過剰に伴う低収要因. 日作紀 85: 67-76.
- 松島省三 1969. 稲作の理論と技術. 養賢堂: 1-302.
- 松島省三・田中孝幸・星野孝文 1964. 水稲収量の成立原理とその応用に関する作物学的研究. 第70報 生育各期の気温・水温の各種の組み合わせが水稲の収量および収量構成要素におよぼす影響. 日作紀 33: 53-58.
- 松島省三・田中孝幸・星野孝文 1966. 水稲収量の成立原理とその応用に関する作物学的研究. 第75報 茎葉部・茎基部・根部の各部に対する温度処理が分けつ発生に及ぼす影響. 日作紀 34: 478-483.
- 松下美郎 1996. 水稲の疎植栽培における草型と施肥法の影響. 大阪農技セ研報

32: 32-36.

水野貴文・森静香・藤井弘志 2013. 低地力条件下における水稻の植付け深が窒素およびケイ酸吸収量に及ぼす影響. 土肥誌 84: 267-274.

森本英嗣 2013. スマート田植機. 農業機械学会誌 75: 236-238.

森田茂紀・岩淵輝・山崎耕宇 1987. 水稻茎葉部の生育と1次根の伸長方向との関係. 日作紀 56: 530-535.

森田敏・坂田雅正・坂井真・宮崎真行・井上健一・丸山篤志・小柳敦史・黒田栄喜 2014. 日本作物学会 第236回講演会シンポジウム1. 良質・良食味米の安定生産への取り組みの現状と今後の課題. ー夏季の異常な高温問題の克服を目指してー. 日作紀 83: 48-57.

森敏夫・村山成治 1983. 疎植イネの生育と収量について. 日作東北支部報 26: 7-10.

村上利男・森田弘彦・土井康生・今野一男 1982. 寒地水稻の計画栽培に関する解析的研究. 北海道農試研報 133: 61-100.

村岡賢一 2010. 生産者所得の向上に向けた疎植栽培の可能性を探る. グリーンレポート No.488: 16-17.

武蔵重満・金田吉弘 2001. 高温登熟条件下における下位葉の老化が玄米の外観品質に及ぼす影響. 日作東北支部報 44: 81-83.

長田健二・佐々木良治・大平陽一 2013. 高温登熟条件下における米粒の胴割れ発生の品種間差異. 日作紀 82: 42-48.

長田健二・滝田正・吉永悟志・寺島一男・福田あかり 2004. 登熟初期の気温が米粒の胴割れ発生におよぼす影響. 日作紀 73: 336-342.

長戸一雄 1952. 心白・乳白米及び腹白の発生に関する研究. 日作紀 21: 26-27.

長戸一雄・江幡守衛 1965. 登熟期の高温が穎果の発育ならびに米質に及ぼす影響.

- 日作紀 34: 59-66.
- 長戸一雄・江幡守衛・石川雅士 1964. 胴割米の発生に関する研究. 日作紀 33: 82-89.
- 浪岡実・立田久善・中堀登示光・工藤聡彦・木野田憲久 1985. 施肥法の違いが中苗の分けつ発生に及ぼす影響. 日作東北支部報 28: 24-25.
- 二部濱男 1989. あおもりの天気. 北方新社: 1-282.
- 農林水産省 2016. 米をめぐる状況について. http://www.maff.go.jp/j/seisan/kikaku/pdf/0602_meguji.pdf. (2018年12月6日閲覧).
- 農林水産省 2018a. 平成28年農業産出額及び生産農業所得(都道府県別). <http://www.maff.go.jp/j/press/tokei/keikou/attach/pdf/171226-3.pdf>. (2018年12月6日閲覧).
- 農林水産省 2018b. 平成30年産水陸稲の収穫量. http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kome/attach/pdf/index-60.pdf. (2019年2月21日閲覧).
- 農林水産省 2018c. 「平成30年産水稲の全国及び都道府県別10a当たり平年収量」について. <http://www.maff.go.jp/j/press/tokei/seiryu/180320.html>. (2018年12月6日閲覧).
- 農林水産省 2018d. 米をめぐる関係資料: 1-127. http://www.maff.go.jp/j/seisan/kikaku/attach/pdf/kome_siryu-171.pdf. (2018年12月9日閲覧).
- 小野清治・穴水孝道・前田昇・和田純二・金沢俊光 1969. 水管理が初期の分けつ発生に及ぼす影響. 東北の農業気象 14: 11-13.
- 大橋善之・今井久遠 2004. 京都府丹後地域における水稲「コシヒカリ」の疎植栽培が収量, 品質に及ぼす影響. 日作紀(別1) 73: 26-27.
- 大野高資・杉山英治・川崎哲郎 2001. 水稲疎植栽培が省力・低コスト化に及ぼす

- 影響. 愛媛農試研報 36: 1-5.
- 大島正男 1962. 分けつにおよぼす窒素栄養の影響. 水稻の窒素栄養に関する研究 (第4報). 土肥誌 33: 243-246.
- 齋藤弘文・浜名光衛・齋藤真一 1982. 生育初期の低温が水稻の分けつに及ぼす影響. 東北農業研究 31: 45-46.
- 境谷栄二・木村利行・井上吉雄 2012. 津軽中央地域における胴割米の発生要因の解析. 日作紀 81 (別1): 290-291.
- 佐藤孝・藤原武文・市村祝夫 1960. 水稻の栽植密度に関する研究. II. 栽植密度が分けつ構成に及ぼす影響. 兵庫農科大学研究報告 4: 189-193.
- 澤本和徳・伊勢村浩司・佛田利弘・濱田栄治・八木亜沙美・宇野史生 2019. 石川県における育苗箱に高密度に播種した水稻稚苗の形質および本田での生育・収量・玄米品質. 日作紀 88: 27-40.
- 仙台管区气象台 2017. 東北地方の気象の変化. http://www.jma-net.go.jp/sendai/wadai/kikouhenka/kikouhenka_full_2017.pdf. (2018年12月6日閲覧).
- 下野裕之 2008. 地球温暖化が北日本のイネの収量変動に及ぼす影響. 日作紀 77: 489-497.
- 下野裕之 2018. イネの障害型冷害. 日作紀 87: 113-124.
- Shimono, H. 2011. Rice genotypes that respond strongly to elevated CO₂ also respond strongly to low planting density. *Agr Ecosyst Environ.* 141: 240-243.
- Shimono, H., Ozaki, Y., Jagadish, K. S. V., Sakai, H., Usui, Y., Hasegawa, T., Kumagai, E., Nakano, H. and Yoshinaga, S. 2014. Planting geometry as a pre-screening technique for identifying CO₂ responsive rice genotypes: a case study of panicle number. *Physiol. Plant.* 152: 520-528.

- 鈴木翔・若杉晃介 2018. 遠隔制御・自動制御が可能な圃場水管理システムが水稻栽培にかかる用水量と水管理労力に与える影響の把握. 農業農村工学会論文集 86: 235-241.
- 高橋渉・尾島輝佳・野村幹雄・鍋島学 2002. コシヒカリにおける胴割米発生予察報の開発. 北陸作報 37: 48-51.
- 武田友四郎・広田 修 1971. 水稻の栽植密度と子実収量の関係. 日作紀: 381-385.
- 田中浩平・宮崎真行・内川修・荒木雅登 2010. 水稻の外観品質に及ぼす稲体窒素栄養条件や施肥法の影響. 日作紀 79: 450-459.
- 田中稔 1973. 稲作技術. 農山漁村文化協会: 1-254.
- 田中典幸・有馬進 1996. 水稻の根の生育に及ぼす栽植密度の影響. 日作紀 65: 71-76.
- 田中孝幸・松島省三・富田豊雄 1968. 水稻収量の成立原理とその応用に関する作物学的研究. 第 84 報 昼夜水温の変化が水稻苗の生育反応に及ぼす影響. 日作紀 37: 187-194.
- 田代亨・江幡守衛 1975. 腹白米に関する研究. 第 4 報 白色不透明部の胚乳細胞の形態的特徴. 日作紀 44: 205-214.
- 東北農業試験場創立 50 周年記念事業会 1999. やませ気候に生きる: 65-66.
- 和田定 1992. 水稻の冷害. 養賢堂: 1-261.
- 八木宏典 2016. 変貌するわが国の水田農業と増加する大規模経営. わが国水田農業をめぐる諸問題 (2). 日本農業研究報告「農業研究」. 第 29 号: 65-94.
- 山田幸雄・小野徳治 1961. 栽植の疎密による水稻の収量構成並びに決定要素の変化について. 日作東北支部報 3: 60-62.
- 横沢正幸・飯泉仁之直・岡田将誌 2009. 気候変化がわが国におけるコメ収量変動に及ぼす影響の広域評価. 地球環境 14: 199-206.

吉永悟志・白土宏之・長田健二・福田あかり・中林光文・横山裕正・木村利行・日影勝幸・小田中温美・浅野真澄・三上雄史・島津裕雄・木川裕美・三浦恒子・若松一幸・山川淳・井上由紀・浅野目謙之・中山芳明・島宗知行・鈴木幸夫・木田義信・佐々木園子 2008. 東北地域における直播水稻の登熟特性と収量・品質関連形質. 東北農研研報 109: 41-82.

全国食糧検査協会 2002. 農産物検査ハンドブック米穀篇. 日本農民新聞社: 1-361.