

水稻の安定栽培技術に関する生産生態学的研究
—南北陸地域における良質米品種の生産を中心として—

2020年

井上 健一

目 次

第 1 章 緒言	1
第 2 章 良質米品種の長期間の生産生態の変化	
第 1 節 気象の変化と良質米品種の生産生態の変化	3
第 2 節 地上部と関連づけた根量の変動	13
第 3 章 良質早生品種「ハナエチゼン」の品種生態的特徴と収量品質安定のための生育要因	
第 1 節 低温・寡照条件下の生育の物質生産的解析	19
第 2 節 水稻早生品種の登熟期間の物質生産と品質食味要因の関心の解析	32
第 3 節 高温登熟条件下における品質安定のための生育要因	39
第 4 章 「コシヒカリ」の栽培条件が物質生産，収量品質に及ぼす影響	
第 1 節 苗質が初期生育と収量品質に及ぼす影響	47
第 2 節 疎植条件が物質生産と収量品質に及ぼす影響	59
第 3 節 乳白粒発生低減のための生育要因	72
第 5 章 水稻の水ストレスの診断と水管理による品質向上	
第 1 節 熱画像の解析による水稻苗の水分状態の診断	80
第 2 節 熱画像の解析による水稻登熟期間の水ストレスの診断	89
第 3 節 水稻登熟期間の夜間灌水の効果	99
第 6 章 総合考察	108
引用文献	112
論文要旨	121
公表済み文献	124

第1章 緒 言

福井県は本州中部の日本海側，南北陸地域に位置し，冬期間には多量の降雪があるが，春から秋にかけては温暖な気象条件となり，作物生産に適した環境となる．典型的な日本海側気候であり，冬期間には年間で最も多い降水量となる．このような気象環境の下では，冬期間に水田は多湿環境下に置かれ，排水不良な湿田が広く分布することとなる．湿田では地力の発現が遅れることから，初期生育はやや緩慢ではあるが，秋優りのイネづくりにとって好適であり，日本海側の低平地には広く良質米の生産地が分布する背景となってきた．福井農試で1955年に育成された「ホウネンワセ」，1956年に育成された「コシヒカリ」は，それぞれ稈が長く倒伏しやすいが熟色はきれいで，「ホウネンワセ」は約25年間，「コシヒカリ」は60年以上栽培が続けられてきた．両品種ともに倒伏を軽減できれば玄米品質は良好で，特に「コシヒカリ」の粘りのある食味は全国的に評価が高く，品種の持つ広域適応性もあって九州から東北地域にかけて幅広く作付されてきた．

一方，米の生産過剰により転作が導入され，ムギ類，ダイズ等を安定して栽培するための排水対策として，暗渠の施工が広域的に進められてきた．その結果，水稻の生産環境も変化し，田干しや中干しなどの根系拡大や倒伏対策への栽培技術的対応が普及する素地となった．また，水稻生産が収量重視から品質や食味重視に変わるにつれて，水稻研究も収量を維持したうえで品質食味をどう高めるかにシフトし，社会環境が変わる中での対応を求められてきた．倒伏しやすいが食味は良好とされる「コシヒカリ」は，売り渡し価格面の有利性から栽培が奨励され，収量品質の低下をもたらす倒伏をどう軽減，回避するかについて，さまざまな栽培技術要因について検討が進められてきた．また，生産の省力，低コスト化も求められ，それに対応するために直播栽培の研究が行われ，並行して現地への導入普及も奨励されたことから，福井県の直播は全国的にも高い作付比率となっている．

稲作期間の気象条件も変化が著しい．気温は長期間継続して上昇傾向であり，発育や物質生産に加えて収量構成要素などの生産生態に影響を及ぼし，加えて玄米の見かけの品質への影響が指摘されている．気温同様に，日射量や大気湿度についても変動が大きくなっていると推測される．そこで，第2章では長期間同一耕種条件で栽培されている作況試験データを用いて，変動する気象条件に対して水稻がどのように反応しているのかを解析した．物質生産過程や生産生態データを長期間ほぼ同一条件で精密に調査した事例はこれまでになかったからである．併せて，よくわかっていなかった地上部と根の発育パターンを物質生産面から解析し，根重の意義を明らかにした．そして，その解析結果を栽培技術に結び付けようと試みた．また，第3章および第4章では，福井県の代表的水稻品種である早生品種「ハナエチゼン」および中生品種「コシヒカリ」について，良質安定生産のための育苗や栽植密度，日射環境などのさまざまな栽培，環境要因の効果を精査し，気温や日射量変動の中で，水稻の生育，物質生産や品質への影響を調査，解析した．特に，物質生産と見かけの品質や食味の関係を細かく解析した事例はこれまでになかったために，将来の産米の付加価値向上を念頭に置いて両者の関係を明らかにすることを大きな目的とした．一方，第5章では作物の水分状態を隔測診断するために，熱画像を活用した生育診断手法の実用性についても試行錯誤を行い，新たな生育診断指標を作出し，灌水管理に利用する可能性についても検討した．さらに，現地圃場で灌水時間帯が米の品質食味におよ

ぼす影響について比較調査を行い、温暖化環境下での夜間灌水の効果を明らかにした。

以上の研究結果を解析して普及に移しうる技術としてとりまとめ、福井県内の水稻生産者に対して生産、品質の安定化のための技術体系を構築、提唱した。

本論文は、一連の良質米生産のための栽培試験の調査、研究結果を取りまとめたものであり、今後の地域の水稻生産の安定のための一助になればと考えている。

本研究の取りまとめと論文作成にあたり、京都大学大学院農学研究科教授、白岩立彦博士にはさまざまなご指導をいただいたことを深く感謝いたします。また、研究の考え方や論文のとりまとめについてご指導いただいた元京都大学大学院農学研究科教授、堀江武博士には心から感謝の意を表します。適切に研究内容を評価いただいた元山口大学教授、故森脇勉博士には数々の激励をいただいたことを大変感謝いたします。さらに、福井県農業試験場で研究計画や研究の実施、結果のとりまとめに多大なアドバイスをいただいた元福井県農林水産部長、故岩田忠寿博士、元福井県嶺南振興局技監、故湯浅佳織氏を初め、尾嶋勉氏、佐藤勉氏、間脇正博氏、笈田豊彦氏、土田政憲氏、酒井究氏、高橋正樹氏、山口泰弘氏ほかの福井県農業試験場作物関係部の研究職員の皆様にも深く感謝の意を表します。研究の円滑な実施のために、適切に圃場を管理していただいた山田正直氏、故大久保敏之氏、竹沢光昭氏ほか業務職員、およびさまざまな調査や事務に協力いただいた森永公美氏ほかアルバイト職員の皆様にも深くお礼申し上げます。

第2章 良質米品種の長期間の生産生態の変化

第1節 気象の変化と良質米品種の生産生態の変化

地球温暖化は世界的に観測され、さまざまな作物生産への影響が指摘されている。福井県においても、1900年代後半（1980～1989）と2000年代（2008～2017）では、水稻の栄養生長期（5月上旬～7月上旬）ならびに登熟期間（7月中旬～9月中旬）ともに、平均気温がそれぞれ+1.1℃、1.2℃上昇している。同様に、同期間の平均日射量もそれぞれ1.5MJ/m²/日、1.7MJ/m²/日増加し、大気湿度はそれぞれ-1.4%、-1.5%低下している。これらの気象要素の変化は作物の光合成にも影響を及ぼし、発育ステージや物質生産過程にも少なからず影響していると推測できる。

高温登熟による水稻の品質低下も指摘されている。福井県の主要品種である「コシヒカリ」では、出穂期以後20日間にあたる7月下旬から8月中旬が28℃以上の高温になると、当該年次に収穫、検査された玄米の上位等級比率のばらつきが大きくなり、特に2002年には上位等級比率が50%程度と著しく低下した（井上2014）。

一方、福井農試では、同一品種を用いて最長30年以上ほぼ同様な耕種概要で作況試験を実施しており、多数の貴重なデータが蓄積されている。それを解析し、温暖化が水稻の発育や物質生産をはじめ、さまざまな作物生産的特性に及ぼす影響を明らかにすることは、将来の一層の温暖化の影響を推測するうえで極めて重要であると考えられる。そこで、蓄積された生育や乾物生産データと気象条件との関係を明らかにするとともに、それと収量構成要素や玄米の見かけの品質との関係も併せて解析し、温暖化する環境の下で生産に関わる諸要因相互の関係を明らかにしようとした。

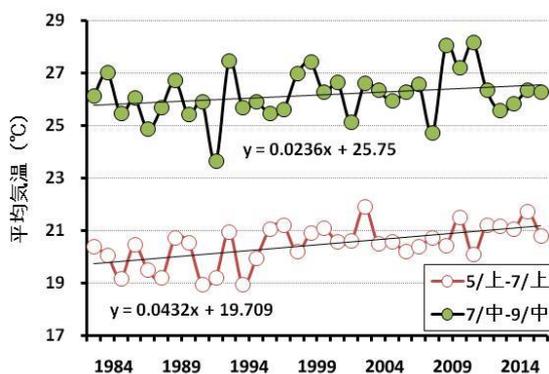
【材料と方法】

1. 気象データ

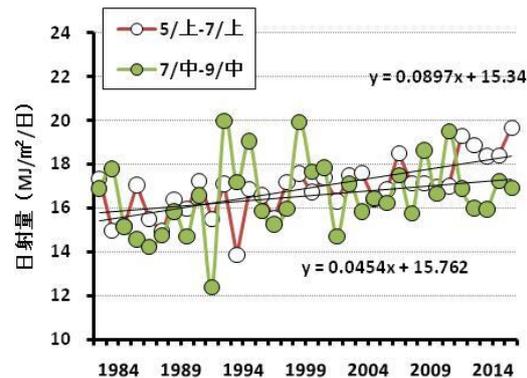
気象データは生育データを調査している福井農試圃場より約4km西側にある福井地方気象台の日別データを計算して解析に供試した（福井地方気象台）。データの解析は、最も調査年数の長い「コシヒカリ」に合わせて1984年から2017年までの34年間とした。また、水稻の品質への影響が大きい登熟期間について、乾燥程度を評価するために、日平均気温、日平均日射量、日平均風速、日平均湿度より日別の飽差を算出し、年次変化を求めた。

2. 耕種概要

福井農試の同一圃場で実施されている気象対策試験は、最も長期間実施されている中生品種の「コシヒカリ」で1984年から、早生品種の「ハナエチゼン」で1991年からそれぞれ継続して栽培が行われている。2017年までの蓄積年数は、「コシヒカリ」で34年、「ハナエチゼン」で27年で、その年数で解析した。施肥量は「コシヒカリ」でN成分3.5+1+2+1（基肥+根付肥+穂肥1+穂肥2）kg/10a、「ハナエチゼン」で同N5+1.5+2+1kg/10aである。基肥は全層に、それ以外は表層に施用した。1回目の穂肥は「コシヒカリ」は幼穂長7mm、「ハナエチゼン」は1～2mmの時期に、2回目はその7～10日後に施用した。移植時期は毎年5月2日で、栽植密度20.8株/m²、播種量130g/箱（コシヒカリ）および150g/



第2-1-1図 平均気温の推移（1984～2017）



第2-1-2図 日射量の推移（1984～2017）

箱（ハナエチゼン）の播種 20 日後の稚苗を 1 株 4 本で手植えした。水管理は、移植後約 45 日間は湛水を継続し、その後溝切と中干しを行い、幼穂形成期以降は間断灌水とした。

3. 調査方法

移植 23 日後より 7 日おきに 12～20 株で生育調査（草丈・茎数・葉齢・葉色）、主要生育時期（生育初期、幼穂形成期、出穂期、登熟中期、成熟期）に平均茎数株 3～5 株をサンプリングし、部位別乾物重調査を行った。坪刈りは地際より 4～5 m²を刈り取り、風乾後収量構成要素を調査した。籾摺りした玄米は 1.85mm～1.9mm 篩で選別し、精玄米収量を求めた。

4. 解析方法

主要生育時期に調査した地上部乾物重データより、それぞれの期間の乾物増加速度（CGR）を求めた。また、登熟期間については、穂重増加速度（Ear Growth Rate : EGR）および m²あたり籾数で除した 1 籾重増加速度（Grain Growth Rate : GGR）を算出し、解析に供した。

【結果と考察】

1. 試験期間中の気象の変化

稲作期間の平均気温は過去 30 年間に約 1℃上昇し、日平均日射量は約 1MJ/m²/日増加した。一方、大気湿度はやや低下傾向であった。栽培試験期間の 1984～2017 年の間では、気温、日射量ともに、上昇、増加程度は登熟期間より栄養生長期のほうが大きかった（第 2-1-1、2-1-2 図）。发育ステージで 5 月上旬から 7 月上旬までの栄養生長期と、7 月中旬から 9 月中旬の登熟期間に区分し、それぞれの平均気温、平均日射量および大気湿度の最大、最小値を求めた。栄養生長期では、年次間で最高 21.9℃（2004）、最低 18.9℃（1992、1995）と 3.0℃の差が、平均日射量は最大 19.7MJ/m²（2017）、最小 13.9MJ/m²（1995）と 5.8MJ/m²の差が、湿度は最高 79.5%（1998）、最低 68.4%（2014）と 11.1%の差が認められた。登熟期間では、平均気温で最高 28.0℃（2010）、最低 23.6℃（1993）で 4.4℃の差が、平均日射量で最大 20.0MJ/m²（1994）、最小 12.4MJ/m²（1993）で 7.6MJ/m²の差が、平均湿度で最高 81.8%（1998）、最低 66.7%（2000）の 14.5%の差が認められた。各年度の登熟期間の日最高気温は、2 年を除いてすべて 35℃を上回っていた。なお、降水

量は年次間の変動が大きく、栄養生长期間、登熟期間ともに長期間の直線的な増加、減少傾向は認められなかった。

飽差は気温上昇と日射量や風速の増加、湿度の低下に伴って上昇し、北陸地域ではフェーン現象の発生と関連が強く、登熟や玄米の品質に大きな影響を及ぼしている（岩田ら 1979, 井上ら 1984b）。早生品種の出穂期にあたる 7 月中旬から中晩生品種の収穫時期に当たる 9 月中旬までの平均飽差は 6.8 g/m^3 で、年次変動を繰り返してはいるものの、漸増あるいは漸減する一定の傾向は認められなかった（図省略）。また、各品種の登熟最盛期にあたる 8 月中に限っても同様であった。この結果は、温暖化、多日照化は進んでいるが、それに伴って降水量が増加し、直接的に乾燥化には結びついていないことを示しており、作物の被る水ストレス強度には大きな変化はないと推測される。しかし、飽差が高い年次の玄米品質は概して低い傾向が認められており、乾燥に遭遇する水稻の玄米発育ステージと年次変動には留意する必要があると考えられる。

2. 長期間の発育ステージの変化

両品種ともに試験年次が進むにつれて発育ステージが早まり、年次変動を繰り返しながら生育期間が短縮する傾向を示した（第 2-1-3, 2-1-4 図）。栄養生长期間の短縮程度よりも、登熟期間の短縮程度のほうが大きかった。幼穂形成期、出穂期、成熟期の年次による変化を回帰式により表すと、回帰直線の傾きは両品種ともに負となり、幼穂形成期より出穂期、成熟期で回帰係数が小さくなる傾向を示した（第 2-1-1 表）。この結果は、特に生育後半の発育が早まり、水稻の生育期間が短縮していることを示している。

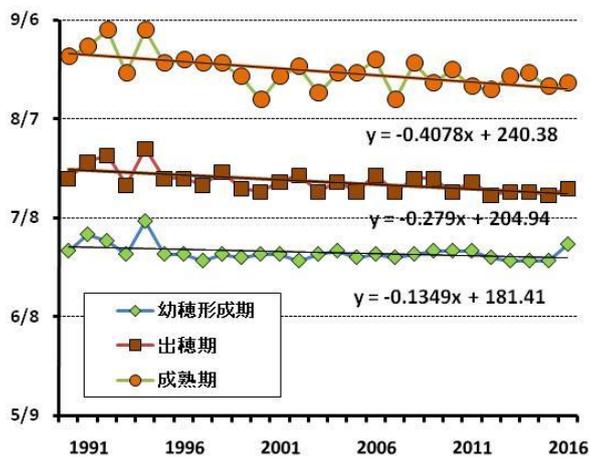
3. 栄養生长期間の生育の変化

栄養生长期間では、気温や日射量の上昇傾向に伴い、両品種ともに草丈の伸長や葉齢の進展程度がわずかに早まる傾向を示した。しかし、茎数に対する反応は品種によって異なり、「ハナエチゼン」では栄養生长期間を通して増加傾向が認められたが、「コシヒカリ」では 6 月上旬の有効分けつ決定期までは増加傾向だが、その後は明瞭な違いは見られなくなった（第 2-1-2 表）。有効分けつ決定期までの分けつ始期は気温の違いによる茎数増加程度の差が大きいですが、その後は中干しなど水管理の影響も強く受けるため、品種によっては気温のみの影響が小さくなると考えられる。また、水管理等の栽培管理方法に関して、栽培担当者の個人差が出た可能性もある。

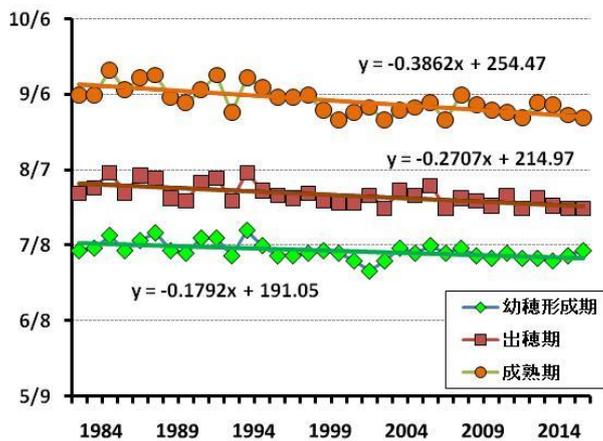
4. 地上部乾物重と LAI の変化

両品種ともに、発育が進むにつれて年次とともに地上部乾物重が漸増する傾向を認めた。年次変化の回帰式の回帰係数は、「ハナエチゼン」では幼穂形成期までの栄養生长期間で最も大きく、幼穂形成期から出穂期まで、出穂期から成熟期までではそれよりやや小さかった。「コシヒカリ」では、栄養生长期間より生育後期のほうが増加程度が大きかった（第 2-1-3 表）。

葉面積指数（LAI）は幼穂形成期や成熟期ではやや増加傾向が認められるものの、出穂期についてはやや低下傾向となった。この結果は、比葉面積（SLA）が小さくなっていることを示しており、葉身が厚くなっているといえる。気象的には幼穂形成期間の日射量も増加傾向であるため、多日照を反映した結果とも考えられる。地上部乾物重は増加傾向であるが、出穂期の LAI が過大となっていないことは、登熟期間の受光態勢の面からは好適であると考えられる。



第2-1-3図 ハナエチゼンの发育ステージの変化



第2-1-4図 コシヒカリの发育ステージの変化

第2-1-1表 各发育ステージの年次変動の回帰式

品 種	幼穂形成期		出穂期		成熟期	
	回帰係数	定数	回帰係数	定数	回帰係数	定数
ハナエチゼン	-0.135	181.4	-0.279	204.3	-0.408	240.4
コシヒカリ	-0.179	191.1	-0.271	215.0	-0.386	254.5

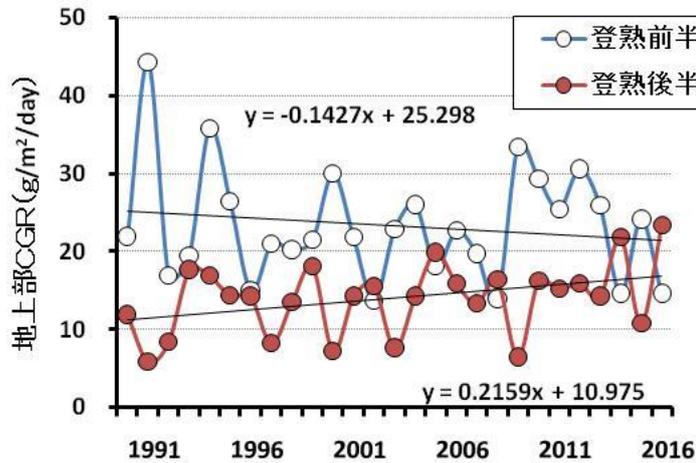
注) 1月1日を1として算出. 第2-1-2, 2-1-3表も同じ.

第2-1-2表 茎数の年次変動の時期別回帰係数

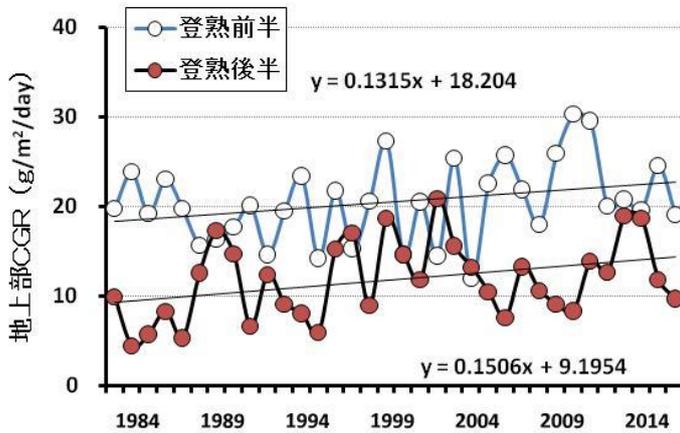
調査時期	5/25	6/1	6/8	6/15	6/22	6/29	7/6	7/13
ハナエチゼン	0.137	0.165	0.254	0.224	0.175	0.164	0.127	0.117
コシヒカリ	0.067	0.087	0.076	0.030	-0.033	-0.052	-0.077	-0.032

第 2-1-3 表 地上部乾物重の年次変動直線の回帰式

品 種	幼穂形成期		出 穂 期		成 熟 期	
	回帰係数	定数	回帰係数	定数	回帰係数	定数
ハナエチゼン	7.376	211.7	5.622	729.8	5.984	1322.4
コシヒカリ	1.361	348.6	6.942	761.4	6.700	1340.5



第2-1-5図 ハナエチゼンの地上部CGRの推移
(1991～2017)



第2-1-6図 コシヒカリの地上部CGRの推移

5. 登熟期間の物質生産の変化

「ハナエチゼン」の地上部 CGR では、登熟前半のやや減少傾向と、登熟後半のやや増加傾向が確認された（第 2-1-5 図）。穂重増加速度（Ear Growth Rate：EGR）と 1 粒重増加速度（Grain Growth Rate：GGR）も類似した傾向を示した（第 2-1-4 表）。葉鞘・稈

重には大きな変化は見られなかった。「コシヒカリ」では、登熟前半、登熟後半ともに地上部 CGR は増加傾向であったが、登熟後半のほうが回帰係数はやや大きかった（第 2-1-6 図）。また、EGR は登熟前半ではわずかに増加傾向であるが、登熟後半では明らかに増加傾向であった。GGR は、「ハナエチゼン」同様に登熟前半のやや減少傾向と登熟後半のやや増加傾向が認められた（第 2-1-4 表）。「コシヒカリ」の穂重増加には葉鞘+稈からの転流量が占める割合が大きいが、登熟前半の転流量が減少傾向であるのに対して、登熟後半では転流量が増加傾向で（第 2-1-4 表）、これが登熟後半の穂重増加にも影響していると考えられた。さらに、両品種ともに、登熟期間の LAI の減少程度がやや小さくなる傾向がうかがえた。

6. 1 籾重増加速度（GGR）に影響を及ぼす要因

登熟期間の EGR は、登熟前半、登熟後半ともに「コシヒカリ」より「ハナエチゼン」で大きかった。同様に、GGR も登熟前半、登熟後半ともに「コシヒカリ」より「ハナエチゼン」で大きかった（第 2-1-5 表）。 m^2 あたり籾数は、「ハナエチゼン」が「コシヒカリ」より両品種共通年次平均で 4%少ないこと、および登熟期間を通じた気温や日射量は「コシヒカリ」より「ハナエチゼン」で高いことが、「ハナエチゼン」の高い EGR および GGR につながっていると推測される。

「ハナエチゼン」では登熟前半の平均気温、平均日射量や m^2 あたり籾数と登熟前半の GGR の相関係数は、最大でも 0.35 程度とそれほど高くなく、5%水準で有意となる要素はなかった。一方、「コシヒカリ」では、出穂後 20 日間の平均気温や平均日射量と登熟前半の GGR との間に 1%水準で有意な正の相関が認められた。登熟前後半それぞれの GGR と葉鞘・稈重の増減量との間にも 1%水準で有意な負の相関関係が認められた（第 2-1-6 表）。品種によって GGR に影響する要因は異なることから、玄米の見かけの品質に影響する気象、作物要因も異なることが想定された。

7. 収量構成要素の動き

収量構成要素を比較すると、両品種ともに穂数や m^2 あたり籾数は漸増し、登熟歩合は漸減する傾向を示した。また、両品種ともに収量の増減に一定の傾向は見られなかった（第 2-1-7、第 2-1-8 図）。一穂籾数は両品種とも顕著な増減の傾向を示さなかった。玄米千粒重も両品種も固有の値で他の収量構成要素ほど大きな変動を示さないが、「ハナエチゼン」で微増傾向、「コシヒカリ」で微減傾向であった。

品種別に毎年の収量と収量構成要素の相関を求めると、「ハナエチゼン」では m^2 籾数との正の相関が最も高く 1%水準で有意であり、「コシヒカリ」では登熟歩合との正の相関が最も高く 5%水準で有意であった。収量構成要素相互間では、穂数と m^2 籾数の間には、両品種とも 1%水準で有意な正の相関関係が認められた。また、穂数および m^2 籾数と登熟歩合の間には、両品種とも 1%水準で有意な負の相関関係が認められた（第 2-1-7、2-1-8 表）。

【考 察】

1. m^2 あたり籾数に影響を及ぼす要因

本試験では、調査年次が進むにつれて各品種の発育の進展程度が早まるとともに、変動を繰り返しながら地上部乾物重が増加傾向を示した。このことは、1 日あたりの乾物増加速度（CGR）の増加を示しており、気温の上昇と日射量の増加が CGR 乾物増加速度に大

第 2-1-4 表 葉鞘・稈重, EGR, GGR の登熟期間の回帰係数の品種比較

品 種	葉鞘・稈(g/m ² /day)		EGR(g/m ² /day)		GGR(mg/籾/day)	
	登熟前半	登熟後半	登熟前半	登熟後半	登熟前半	登熟後半
ハナエチゼン	-0.04	-0.05	-0.083	0.244	-0.005	0.006
コシヒカリ	1.31	-1.39	0.045	0.264	-0.003	0.006

注) ハナエチゼン 1991～2017, コシヒカリ 1984～2017.

第 2-1-5 表 登熟期間の物質生産の品種比較

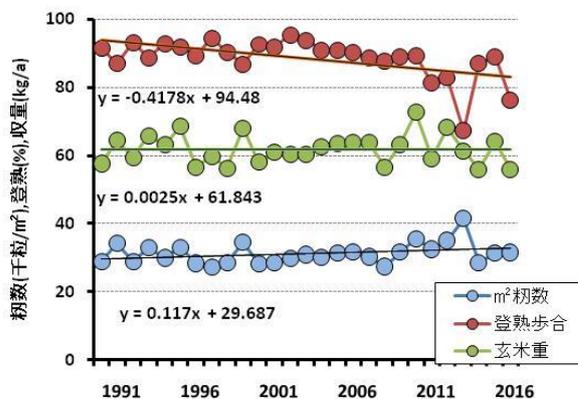
品 種	EGR(g/m ² /day)		GGR(mg/籾/day)	
	登熟前半	登熟後半	登熟前半	登熟後半
ハナエチゼン	25.7	14.4	0.83	0.47
コシヒカリ	22.9	12.1	0.72	0.39

注) ハナエチゼン 1991～2017, コシヒカリ 1984～2017 の平均値.

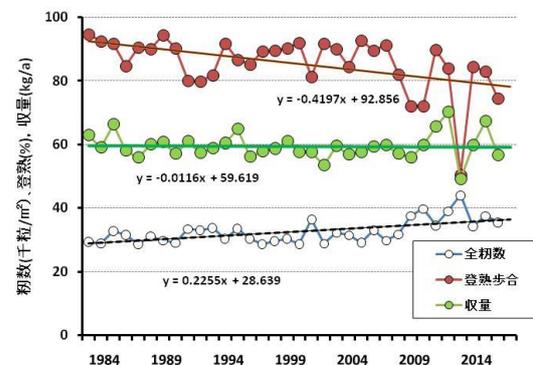
第 2-1-6 表 GGR と気象等の相関係数

品 種	葉鞘・稈		登熟前半	
	登熟前半	登熟後半	平均気温	平均日射量
ハナエチゼン	-0.19	-0.43*	0.33	0.31
コシヒカリ	-0.43*	-0.44**	0.57**	0.59**

注) ハナエチゼン 1991～2017, コシヒカリ 1984～2017.



第 2-1-7 図 ハナエチゼンの収量構成要素の推移



第 2-1-8 図 コシヒカリの収量構成要素の推移

第 2-1-7 表 収量構成要素相互の相関係数（ハナエチゼン：n = 27）

	穂数	一穂粒数	m ² 粒数	登熟歩合	千粒重	精玄米重
穂数	-	-0.43*	0.66**	-0.57**	-0.12	0.23
一穂粒数		-	0.38*	-0.12	0.11	0.44*
m ² 粒数			-	-0.69**	-0.02	0.60**
登熟歩合				-	0.02	0.04
千粒重					-	0.37

注) *, ** 5%, 1%水準で有意差あり.

第 2-1-8 表 収量構成要素相互の相関係数（コシヒカリ：n = 34）

	穂数	一穂粒数	m ² 粒数	登熟歩合	千粒重	精玄米重
穂数	-	-0.02	0.80**	-0.70**	-0.40*	-0.01
一穂粒数		-	0.19	-0.23	0.16	0.07
m ² 粒数			-	-0.84**	-0.36*	0.08
登熟歩合				-	0.22	0.40*
千粒重					-	0.22

注) *, ** 5%, 1%水準で有意差あり.

大きく寄与していることがうかがえる。それは出穂期までの乾物重の増加を介してm²あたり粒数の増加につながっており、収量のキャパシティを高めている。しかし、篩選別した精玄米重は顕著な増加が認められなかった。それはm²粒数と負の相関がある登熟歩合の低下が大きな原因と推測される。多様な気象環境下で生育した水稻で、長期間の年次を込みにして相関を求めても、用いた2品種でm²あたり粒数と登熟歩合の間には有意な負の相関関係が認められたことから、登熟期間の気温や日射量が変化する中でも、出穂期までの生育状態が収量に対して大きな影響を及ぼしていると考えられる。登熟期間のCGRは増加しているが、それよりもm²あたり粒数の増加割合のほうが大きく、その結果相対的に1粒に配分される同化産物が減少し、屑米の増加により製品収量（精玄米重）の増加につながっていないと推測される。著者らは、「コシヒカリ」で根の乾物重の推移を地上部乾物重と併せて解析し、初期の茎数増加が大きい年次は初期の根量の増加も大きいことが、生育後半の根量の減少傾向が顕著となり、収量もやや低下傾向になることを明らかにした(井上ら 2003)。この結果は、生育初期の温暖化が生育後半の登熟にも大きな影響を及ぼしている可能性を示唆している。また、それぞれの品種毎の物質生産特性を十分に理解して栽培技術を組み立てることが重要であると考えられる。したがって、供試した2品種のうち、倒伏しやすい「コシヒカリ」は、「ハナエチゼン」よりも根や登熟に対する栽培的配慮が必要となると思われる。

栽培的に粒数過剰を抑制するためには、穂数を制御することが最も効果的である。有効分げつ決定期までの茎数増加は温暖化によって促進されているが、それ以後は気温と茎数

に明瞭な傾向は認められなかった。このことから、基肥窒素量の低減や生育中期の深水管理など栽培管理の調整を用いて茎数増加をコントロールする必要がある。併せて、登熟向上のための後期栄養をどう維持するかも重要になると考えられる。

2. 蓄積された NSC の転流に及ぼす要因

一方、イネの葉鞘や稈に蓄積された非構造化炭水化物（以下 NSC と称する）は、特に登熟期間の不良環境条件下で収量品質安定に大きな役割を果たしていると考えられる。穂揃期に蓄積量が最大となり、相対的にそれまでの日射量が多く施肥量が少ない条件で蓄積量が高まることが明らかとなっている。施肥量が少ない条件では一穂粒数も少ないため、1 粒への NSC の転流量は施肥量が少ない条件で多くなる傾向がある。このことから、施肥量が多く粒数が多い栽培条件では登熟歩合が低下しやすいことが想定される。穂揃期までに蓄積された NSC の 1 粒当たり転流量と、GGR の間には正の相関関係が認められ（山口ら 2006）、しかも完全米比率とも正の相関が認められること（井上ら 2007、笈田ら 2018）から、穂揃期までの NSC 蓄積量を高めることが登熟、品質向上の面から重要であると考えられる。

しかし、蓄積された NSC の動態を間接的に表す葉鞘・稈の乾物重の登熟期間の動きを本試験から算出すると、近年は登熟前半の減少量が小さくなり、加えて登熟後半の再蓄積量も少ない。すなわち、登熟期間の NSC の動きが小さいと見られる。EGR も登熟前半はやや少なくなり、登熟後半の増加程度が大きくなっている。また、GGR も、近年登熟前半は減少傾向で、逆に登熟後半では増加傾向である。これらの傾向は特に「コシヒカリ」で顕著であり、登熟前半の粒への NSC の転流が緩慢になっていることを表している。「コシヒカリ」では登熟前半の GGR と m^2 あたり粒数の間には 1%水準で有意な負の相関があるため、 m^2 粒数の増加が 1 粒重増加を登熟後半型に移行させた一因と考えられる。一方、「コシヒカリ」の登熟前後半それぞれの葉鞘・稈重の増加速度と GGR には、登熟前半で 5%、登熟後半で 1%水準の有意な負の相関が認められ、温暖化する気象環境下でも蓄積された NSC の挙動は GGR に影響を及ぼしていることがうかがえる。登熟期間の日射環境は増加傾向であるため、もし粒重増加の比率が登熟後半で大きくなるようなら、温暖化環境下では登熟後半まで稲体の活力を高く維持することが重要になることを示している。また、NSC にも一定の役割があることを考慮すると、登熟期間の同化産物の動きに配慮した栽培技術の修正、特に NSC の動きや根に配慮した肥培管理が必要と考えられる。

3. CO₂濃度との関連性

気象庁が国内で観測している CO₂濃度は、観測開始の 1987 年には 350ppm であったが、季節変動を繰り返しながら安定して増加し、31 年後の 2018 年には 410ppm と 17%増加し、気温や日射量同様に乾物生産量を増加させている要因の一つと考えられる。気温や日射量と CO₂濃度のどちらがより物質生産に影響しているかを解析するのは難しいが、「コシヒカリ」の回帰式から推測すると、1984 年から 2017 年の 34 年間で成熟期の地上部乾物重は 17%の増加となっており、奇しくも CO₂増加割合と同じである。同期間の気温の上昇程度は 4%、日射量の増加程度は 12%であることから、CO₂濃度の影響も大きいことがうかがえる。河津ら（2007）は 1964～2003 年の都道府県気象データと農林水産省作物統計データを解析し、出穂盛期前後の気温、日射量および大気中 CO₂濃度の増加を確認するとともに、過去の研究結果との比較により 40 年間の CO₂濃度の増加は水稻収量を 2.5%

増加させたと推定している。

金ら（1996a）は温度傾斜型 CO₂濃度処理装置を用いて、早生品種「アキヒカリ」を用いて異なる CO₂濃度と温度処理を行った。その結果、CO₂倍増処理で発育は促進したが促進率は高温条件ほど大きいことを明らかにした。また、乾物生産に及ぼす効果も大きいと温度の効果は小さかったとしている。さらに、収量調査を行い、CO₂濃度処理の効果は単位面積当たり穎花数に対して大きく、反面高温処理では不稔穎花の増加と不完全登熟粃の増加により、CO₂濃度のいかにかわらず収量は急激に低下したとしている（1996b）。

一方、最高気温 35℃以上の日が連続することにより不稔の発生率が高まるとの報告がある。しかし、本研究の範囲では顕著な高温不稔は確認されておらず、むしろ高温乾燥による玄米の品質低下のほうが大きな課題となっている。松井（2009）が高温と不稔に関する総説の中で、乾燥により不稔が増すことはないとしているように、不稔よりは稲体の老化による玄米の発育停止が増加することで、収量や品質への影響が強まると推測される。圃場条件では根域や根の活力の良否の影響も大きいと推測される。なお、福井市では毎年日最高気温が 35℃前後を記録しているが、これまでの日最高気温は 37.5℃である。このため、今後それを上回る高温に遭遇する可能性はあり、その場合には不稔の発生等の障害が懸念される。

気象台の旬別最高気温を見ると、1994、1999、2010 年で「コシヒカリ」の出穂期前後に当たる 7月下旬から 8月上旬にかけて期間平均 34℃以上の高温に遭遇している。しかし、これらの年次でさえ登熟歩合の低下は最低でも 72%程度にとどまり、栄養生長が過大で倒伏や粃数過剰が生じた年次よりは低下程度が軽微であった。この結果より、現在の 35℃程度の最高気温のレベルであれば、生育過剰や寡照条件にならない限り顕著な登熟の低下が生ずることはなく、収量への影響も軽微にとどまると推測される。反面、品質低下回避のための栽培技術の改善が必要不可欠になると推測される。

以上の結果、南北陸地域では大気 CO₂濃度の上昇と温暖多照条件が進展することにより、発育が早まり生育期間が短縮するとともに、乾物生産量や CGR、m²あたり粃数が増加するが、反面登熟前後半で GGR が変化していることや、登熟歩合や千粒重が低下することが明らかとなった。したがって、生産を安定させるためには、より登熟向上に配慮した品種の選定や生育制御等の肥培管理技術の改善が必要と考えられる。なお、玄米の品質に及ぼす影響を解析するには十分な客観的データが蓄積されていないが、登熟歩合と玄米の品質の間には正の相関関係が認められる研究例が多いことから、登熟向上への配慮は玄米品質安定にとっても重要であると考えられる。

第2節 地上部と関連づけた根量の変動

水稻の登熟期間の気温上昇により、玄米のみかけの品質が低下する年次が増加し、その栽培的な改善対策が望まれている（井上 2005）。高温が登熟に及ぼす影響については、さまざまな研究により解析されている。夏期の場合、高温は多照を伴うため、高温年次には通常物質生産量が大きくなり、収量も高まることが期待される。しかし、窒素施肥量を控えた良食味米の栽培条件では、多照年次でも大きな増収はないこと、「コシヒカリ」のような倒伏しやすい品種でも倒伏程度が軽くなっていること、登熟期間の葉色が淡くなっていることなどが報告されている（井上 2005）。

一方、高温登熟を支える根の挙動については、調査の労力や困難性などにより解析が進んでいない。川田ら（1978）は、国内各地より採取した登熟期のうわ根の解析により、一定の玄米収量の範囲内ではうわ根の量と収量に正の相関が認められるが、それより収量が高まると相関が弱くなることを認め、直下根の重要性を指摘している。また、うわ根の本数は窒素の追肥回数が増加に伴って増加するが、それは土壌表層に分布する根群に限って認められるとしている（川田ら 1977）。岩田ら（1987）も、成熟期に現地でもノリスサンプリングした「コシヒカリ」の根の形態から、倒伏したイネでは直下根が少ないこと、うわ根の多少も収量に影響していることを指摘している。さらに、Kujira et al.（2000）も多収地帯では出穂期の株間の総根重が多く、しかも表層から 10cm 以内に分布する根重の割合が非常に大きいことを指摘した。

これらの結果は、収量向上にとって土壌中に広く発達した根系を形成することおよびその根の機能を成熟期まで維持することが重要であることを示している。しかし、登熟期間や成熟期の根を中心にサンプルを収集し、解析しているため、生育初期からの根系がどのように形成され、枯死脱落してきたかについては不明な点が多い。また、地上部の生育経過との関連性についても十分な解析が行われていない。そこで、20年間の長期間にわたりほぼ同一条件で栽培管理され、継続して調査収集された作況試験のデータを、根重を中心に地上部との関係の視点から解析し、根重と地上部重の推移の特徴を明らかにするとともに、収量との関係を解析した。

【材料と方法】

1984～2003年までの20年間、同一圃場で連続してほぼ同一耕種条件で栽培した「コシヒカリ」のデータを解析した。栽培圃場の土壌条件は、細粒強グライ土である。

基本的な耕種条件は以下の通りである。育苗は、4月12日に内径58cm×28cmの育苗箱あたり乾籾で120～150g播種し、育苗器にて30℃3日間で出芽させ、その後はハウス内で管理した。移植時期は5月2日、栽植密度27cm×18cmの20.8株/m²で、稚苗を1株あたり4本手植えた。施肥量は、化成肥料を用いて窒素成分で基肥に3.5kg/10a、5月下旬に追肥として1.5kg/10a、穂肥として出穂前18日と10日に2+1kg/10aの計8kg/10a施用した。ただし、1989年から1993年にかけては穂肥量を1.5kg/10a増量し、出穂前18日、11日、4日にそれぞれ1.5kg/10aずつ施用した。また、1994年から96年にかけては2回目の穂肥量を1kg/10a増量した。基肥は代掻き前に作土全層に混和し、追肥および穂肥は表層施用とした。

水管理は、移植後は浅水管理とし、6月上旬の有効茎確保後に溝切りして中干しを開始し、気象条件に応じて適宜灌水するとともに、幼穂形成期以降は2~3日おきに灌水する間断灌漑とした。

除草および病虫害防除等は、生育に影響が生じないように配慮して適切に薬剤を使用した。

サンプリングは、6月上旬（有効茎確保期）、幼穂形成期（7月上中旬）、出穂期（7月下旬~8月上旬）、登熟中期（8月中旬）、成熟期（8月下旬~9月上旬）に平均的茎数や穂数を示す株3株を、27cm×18cmの方形枠にて作土より上部（深さ約15cm）から掘り上げ、土を丁寧に水洗いしたあと部位別に分解し、乾物重を測定した。この際、脱落した根も網籠を用いて拾い上げ、まとめて秤量した。なお、本報告では根を中心に解析を行い、地上部は地上部重としてまとめている。成熟期には100株を刈りし、風乾後脱穀して収量を調査した。収量や収量構成要素は水分15%換算値とした。

試験区の面積は1区50~100㎡で2区制とし、毎年2区の平均値を解析に供試した。

【結果及び考察】

1. 根重の推移

移植後35~38日で、有効分けつ決定期にあたる6月上旬の地上部乾物重は、20年の試験期間中に28~111g/㎡と大きな年次変動を示した。また、年次変動をくり返しながらい近年増加する傾向が認められた（第2-2-1図）。これは、育苗期間の高温に伴い苗質が向上するとともに、移植後の気温上昇により活着が早まり、その後の生長速度が大きくなったためと考えられる。根重も地上部重の増加に伴って大きくなるが、両者の関係は直線的ではなく、地上部重が80g/㎡を上回ると根重は頭打ちとなる傾向がうかがえた（第2-2-2図）。

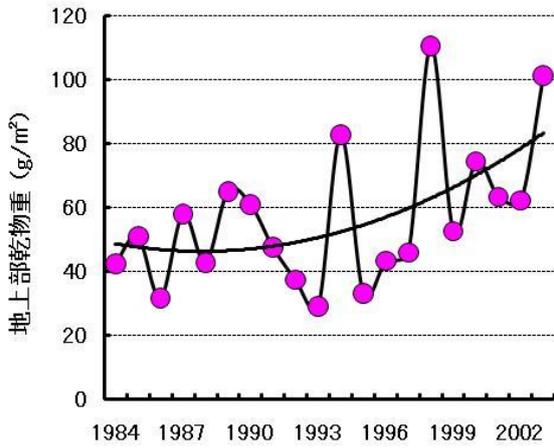
有効分けつ決定期から幼穂形成期にかけての根重の増加は急速であり、この期間の根重増加にも年次間差が顕著に認められた。

幼穂形成期には、地上部と根の乾物重の関係は6月上旬ほど明瞭でなくなり、6月上旬と幼穂形成期それぞれの時期の根乾物重の間にも、一定の傾向は認められなかった。しかし、6月上旬の根乾物重と6月上旬から幼穂形成期にかけての根重増加率には高い負の相関が認められた（第2-2-3図）。この点より、有効分けつ決定期までの初期生育が旺盛すぎるとその後幼穂形成期までの根重増加が停滞し、その後の根の活力にも影響が及ぶ可能性が示唆された。この結果は、中干しを強めに行うと収量が低下するという砂壤土地帯のイネの生育経過とも関連しており興味深い。

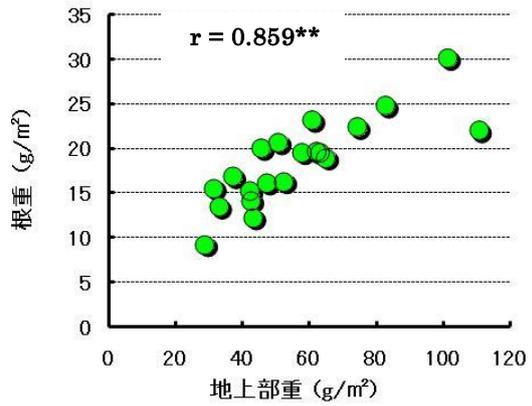
収数増加や収量と密接な関係にある幼穂形成期間の地上部CGRは、日射量との間に有意な正の相関関係が認められるが、根と地上部のCGR相互の相関も比較的高い（第2-2-4図）。したがって、この期間の多照条件は根量を高めるためにも重要と考えられる。

2. T-R比の推移

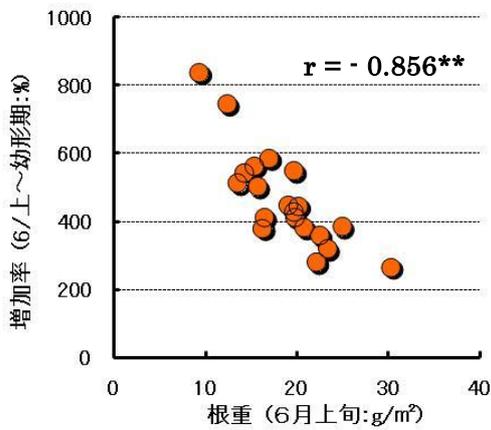
根重は出穂期に最大となり登熟期間にやや減少する傾向を示すが、登熟期間の根重減少率（登熟期間の根重減少量/出穂期の根重）は増加傾向である（第2-2-5図）。一方、登熟期間の地上部重は気象の影響を受けた年次変動を示すが、長期的に見ると増減の一定の傾向は認められなかった。したがって、登熟期間のT-R比は漸増する傾向が認められた。また、出穂期のT-R比と登熟中期および成熟期のT-R比の関係をみると、出穂期にT-R比が



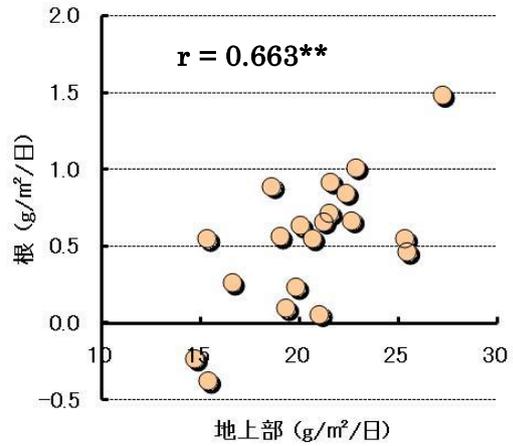
第2-2-1図 6月上旬の地上部乾物重の推移



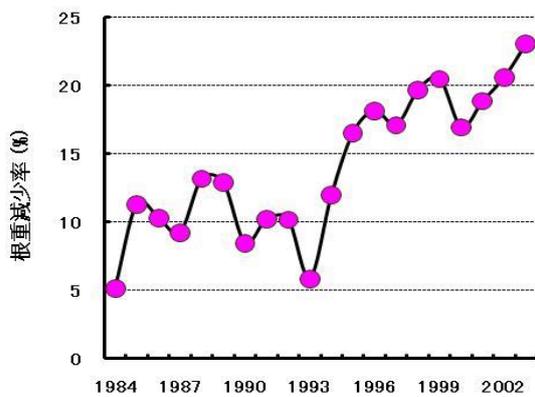
第2-2-2図 6月上旬の地上部重と根重の関係 (1984-2003)



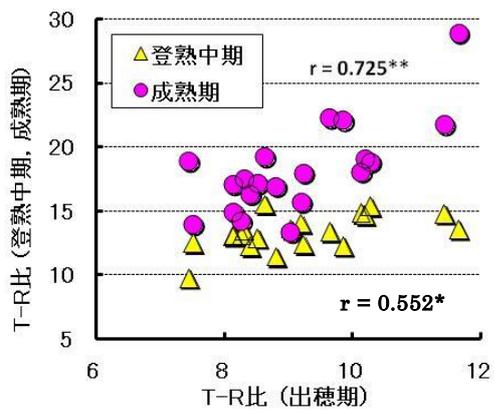
第2-2-3図 6月上旬の根重と幼穂形成期にかけての根重増加率の関係 (1984-2003)



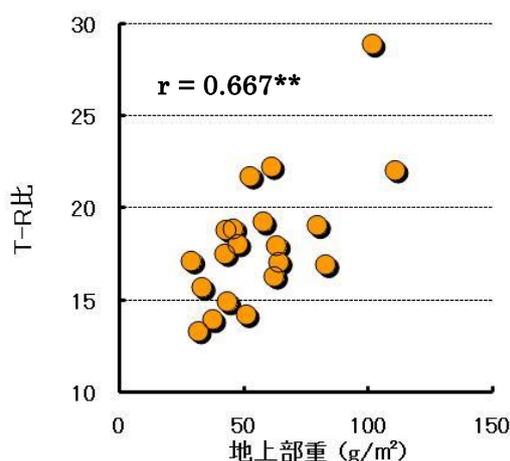
第2-2-4図 幼穂形成期間の地上部と根の乾物増加速度の関係 (1984-2003)



第2-2-5図 登熟期間の根重減少率の推移 (5年間の移動平均)



第2-2-6図 出穂期と登熟中期、成熟期のT-R比の関係 (1984-2003)



第2-2-7図 生育初期の地上部重と成熟期 T-R比の関係 (1984-2003)

第 2-2-1 表 収量水準別根を中心とする特性の比較

年次	収量 (kg/a)	m ² 粒数 (百粒)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	6/8 根重 (g/m ²)	成熟期根重 (g/m ²)	同左 T-R 比	成熟期 T-R 比/ 出穂期 T-R 比(%)
多収年(95,96,00)	62.1	314	89.5	22.2	16.1	90.1	16.6	180
中収年(93,94,99)	58.3	321	83.7	21.6	16.8	76.2	18.6	194
低収年(97,98,03)	55.8	293	88.7	21.7	24.1	60.8	23.3	242
分散分析	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**

注) ns, *, **は, 分散分析によりそれぞれ有意差なし, 5%, 1%水準で有意差ありを示す。

大きい年次ではその後の登熟期間の T-R 比の増加が大きい傾向が認められた(第 2-2-6 図)。成熟期の根重も, 長期的には漸減傾向にあり, T-R 比も増加している。成熟期の T-R 比と有効分けつ決定期(6 月上旬)の乾物重にはやや高い正の相関関係が認められ, 初期生育が旺盛な場合には成熟期の地上部乾物重の大小にかかわらず T-R 比も大きかった(第 2-2-7 図)。

3. 収量との関連性

供試した 20 年間の収量は 534~664kg/10a と 130kg/10a の年次間差が認められ, 平均収量は 593kg/10a であった。収量構成要素で見ると, 穂数で 364~484 本/m², 一穂粒数で 65.3~83.6 粒, m²あたり粒数で 2.86~3.50 万粒, 登熟歩合で 79.7~94.6%, 千粒重で 20.0~22.6 g と変動幅が大きかった。各収量構成要素の変動係数は, 収量の 5.2% に対して穂数が 7.5% と最も大きく, 以下 m²粒数, 一穂粒数, 登熟歩合, 千粒重の順であり, 最も小さい千粒重の変動係数は 3.2% であった。また, 収量との相関係数は, 一穂粒数が +0.60 と最も高く, 次いで千粒重の +0.46 で, それぞれ 1%, 5% 水準で有意であったが, その他の要素との相関は低く, 有意ではなかった。

1990 年代の収量を水準別に分類して根との関連性を比較すると, 多収年次は比較的初期の生育量が小さく, 登熟期間の根重が高く維持され, T-R 比が小さかった。低収年ではその逆の傾向が認められた(第 2-2-1 表)。また, 有効分けつ決定期の根重と収量の間には負

の相関関係が認められ、幼穂形成期以降の日射環境が不良な2年次を除くと5%水準で有意であった。この結果は、地上部生育から見ると初期生育がある程度小さいほうがいわゆる「秋優り型」生育経過をたどり多収となることを示しているが、根の生育から見ても初期の根重が少ないほうが生育後半まで根重低下が少なく、根の機能や活力面からも優れていることを示唆すると考えられる。また、生育初期の根量が少ない場合には、「秋優り型」生育を示す可能性を持つが、生育中後期の日射環境によっては必ずしも優位性を発揮できないことも明らかとなった。

【総合考察】

本解析では、作土層に含まれる根の重さの推移を年次間で比較している。このため、作土より下層に伸びる根の本数や活力については考察することができない。しかし、根重の大部分は作土層に含まれるため、その量的な変動は地上部の状態にも影響を及ぼすことが想定される。川田ら(1980)は、さまざまな耕種条件下で栽培された水稻1株の伸長した冠根数と穂数に高い正の相関関係を認めている。また、冠根数と籾数にも正の相関関係を認めている(川田ら1969)。太田・李(1970)も多数の品種の根と地上部の関係を解析し、根重と穂数間に正の相関関係を認めている。これらの結果より、冠根数が多い場合には収量と密接に関係する穂数や籾数が多く、多収穫上からも根数あるいは根重が多いことが重要であることが伺われる。しかし、うわ根の量が増加するに伴い収量が増加する傾向は、うわ根の量が一定量以上になると頭打ちとなり、収量向上効果が認められなくなる(川田ら1978)。これらの一連の研究は、主に登熟期の根のサンプリングより得られたデータを解析しており、根群の形成過程については言及していない。これに対して、本研究では初期生育の時点より数回のサンプリングを行い、継続調査したデータの解析により根系形成過程が収量にいかに関与するかについて見たものである。

生育初期においては、地上部、根ともに小さく、作土層内の根系も分げつ発生に伴って根数を増し、分枝根を発生させて根重を増加させる。したがって、地上部重と根重にはほぼ直線的関係が認められる。しかし、初期においても地上部の分げつ数が多くなると、相対的に根重に対する地上部重の比率が大きくなり、**T-R**比が高まる傾向が認められた。**T-R**比の増加は、作物の水分ストレス耐性を低下させるなど、不良環境に対して作物生育を不安定にさせることが知られている。本解析においても、**T-R**比が大きい年次には登熟期間の気象条件の良否にかかわらず収量がやや低下する傾向が認められた。

著者らは、「コシヒカリ」を用いて苗質を変えて栽培試験を実施し、生育初中期の根の本数と角度を調査した。その結果、苗質が良好で分げつ数が多く、根の本数が多い場合には、生育中期に比較的浅い層に分布する根の比率が高くなる傾向があることを認めている(井上・湯浅2001)。しかし、適切な栽培管理が行われれば、収量の差は最大7%とそれほど大きくなく、根の本数や角度のみから収量を推測することはできなかった。

本試験では施肥量を概ね一定としているため、年次間の気象条件の違いによるイネの窒素要求量の違いには対応していない。したがって、初期生育が旺盛な年次には、浅い層に分布する根が表層の窒素を早期に吸収する反面、生育後半の表層の窒素の吸収が少なくなる可能性が示唆される。一方、下層からの窒素吸収量は相対的に減少すると考えられる。

鯨(1989)、湯浅ら(1986)によると、側条施肥を実施することにより、根系が相対的

に浅い位置に形成され、下層に伸びる根の量が少なくなることが指摘されている。本解析の結果から判断すると、移植後の活着自体は円滑に行われる必要があるが、その後の急速な生育は多収穫上必ずしも必要ない。したがって、多収穫のためには改めて基肥施肥量や施肥位置について検討する必要がある。

本解析の結果、初期の旺盛な地上部生育は中期の根重増加率を小さくし、登熟期間や成熟期の T-R 比をやや高める傾向があることが明らかとなり、収量や品質との関連性が示唆された。本試験では施肥量がほぼ一定であるため、初期生育が旺盛な場合には中期の生育が停滞し、単位面積あたり籾数がやや少なくなる傾向が認められた。これまでも、初期生育が旺盛な場合には窒素の利用率が低下することが指摘されているが、本解析の結果は根系の発達のみならずそのことを裏付けている。この点より、地上部および根の初期生育をやや控えめとする栽培管理は、温暖化する環境下で登熟期間の根重減少を緩和し、登熟期間の根の活力維持にとって重要であると考えられる。

移植後有効分げつ決定期までの気象条件は、平均および最高最低気温で見ると 20 年間で約±1℃前後しか年次間の振れがなく、変動係数も 4~5%である。しかし、日平均日射量は±3MJ/m²/日とやや変動が大きく、変動係数も気温より大きい。したがって、生育初期の日射量の変動による生育の変動を小さくするための技術的対策が望まれる。温暖化の影響は出穂期以降の登熟条件が主に論じられているが、生育初期の温暖化も根系の発育過程に影響を及ぼして収量品質に影響している可能性を示していると考えられる。

秋田(1996)は、さまざまな根量と収量の関係を解析した試験結果より、養水分が十分与えられ、栽培環境の人為的制御が可能な場合には、根量と収量には一定の関係は認められないと推察している。本試験の窒素供給はほぼ適量で一定であるために、年次によっては窒素供給に過不足が生じていたかも知れない。また、成熟期については根量と収量の関係は有意ではなかったことから、収量に及ぼす根量の影響は、より CGR が大きくしかも m²あたり籾数との相関が高い(湯浅ら 1999) 幼穂形成期間など早い時期により強く現れると推測される。

第3章 良質早生品種「ハナエチゼン」の品種生態的特徴と収量品質安定のための生育要因

第1節 低温・寡照条件下の生育の物質生産的解析

福井県の稲作では、6月下旬から7月にかけての梅雨期間中の日照不足が「コシヒカリ」を中心とした水稻の受光態勢の悪化を招き、下位節間の伸長による倒伏や、それに伴う収量、品質の低下をもたらすことが報告されている（岩田ら 1984, 岩田 1986）。また、多収年と低収年では、ほぼ幼穂形成期間にあたる7月の気象が大きく異なっていることも知られている（岩田ら 1985）。さらに、気象条件と収量の関係を気象観測地点別に相関解析すると、8月第1半旬の平均気温や日照時間と収量の間と比較的高い正の相関関係が認められること（井上ら 1984）や、早生品種の「フクヒカリ」では出穂期以降の高温が登熟障害を招くことも報告されている（山田・勝見 1987）。このように、本県のような中部日本に位置する地域では、水稻の作柄は生育中後期にあたる7～8月の日照条件を中心とした気象条件によって大きく左右されている（湯浅・岩田 1985）。

1991年から1993年にかけては生育中後期に寡照条件が続くことが多く、水稻の生育、収量および作柄が不安定であった。そのような気象条件下でも、1991年に育成され、同年奨励品種に採用された早生品種「ハナエチゼン」は、生育、収量および品質が安定しており、産米の評価を高く維持することができた。

「ハナエチゼン」はそれまでの奨励品種「こしにしき」に替わって採用されたが、一方ではもう一つの早生の奨励品種「フクヒカリ」に対して成熟期が2日程度早く、収量、品質が高いことも採用理由に挙げられている。特に、大粒で穂発芽や腹白粒、胴割れ粒が発生し易く、みかけの品質が低下しやすい「フクヒカリ」に対して、小粒で品質も安定している（堀内ら 1992）。また、「フクヒカリ」同様に極良食味である（青木・笈田 1992）。

しかし、「ハナエチゼン」の物質生産的特徴や環境適応性については不明な点が多く、収量成立条件も十分に解析されているとはいえない。そこで、本研究では気象対策試験（作況試験）に供試した「ハナエチゼン」の生育、形態的な特性および物質生産特性を解析するとともに、登熟前半の遮光条件下での生育特性について、ほぼ同熟期の「フクヒカリ」と比較解析を行った結果、若干の知見が得られたので報告する。

【材料と方法】

1. 気象条件と物質生産の解析

1991年から1993年の3年間の稲作気象対策試験（作況試験）の生育、部位別乾物重の推移、収量および収量構成要素について、「ハナエチゼン」と「フクヒカリ」を比較解析した。

稲作気象対策試験の耕種概要は例年同一である。4月12日に乾籾160g/箱播種し、ハウス内にて育苗した稚苗を、5月1日に栽植密度20.8株/m²、一株4本として手植えした。施肥量は窒素成分で基肥に5kg/10a、5月15日に追肥として1.5kg/10a、穂肥として幼穂形成期に2kg/10a、減数分裂期に1kg/10aそれぞれ化成肥料を用いて施用した。水管理および病虫害防除はそれぞれ慣行栽培に準じて行った。

生育調査は、5月25日より7日毎に7月20日まで草丈、茎数、葉齢を1区20株ずつ調

査した。また、群落の葉色を葉色板（富士フィルム製）を用いて同時に調査した。乾物重は、有効分げつ決定期、幼穂形成期、出穂期、登熟中期、成熟期にそれぞれ平均的茎数の3株をサンプリングし、部位別に分解して葉面積指数を調査後、70℃で72時間乾燥後秤量した。

収量は、各区100株を坪刈して常法により算出した。収量構成要素は成熟期に各区20株をサンプリングし、うち平均的な5株について籾数、登熟歩合を調査した。一区面積約 m^2 の2区制で試験を行った。

また、乾物重測定後の粉碎した葉身をケルダール法により全窒素の分析に供試するとともに、1993年には重量法によりケイ酸含量を測定した（栽培植物分析測定法1976）。気象要素は、福井地方気象台の日別の平均気温および日射量データ（福井地方気象台1991-93）を調査期間毎に集計して用いた。

2. 登熟前半の遮光が物質生産に及ぼす影響

1992年に、「ハナエチゼン」および「フクヒカリ」を用い、登熟前半の遮光試験を行った。耕種概要は以下に示すとおりである。

4月18日に乾籾160g/箱播種し、ハウス内にて18日間育苗した稚苗を、5月6日に一株3~4本、 m^2 あたり20.6株で手植えた。施肥は窒素成分で基肥として7kg/10a、穂肥として2+1kg/10a施用した。その他の管理は慣行栽培法に準じて行った。

出穂後2~3日にあたる7月31日から登熟中期の8月18日にかけて、遮光率38%の白寒冷紗を用いて遮光区を設定した。遮光面積は 6m^2 とした。それぞれの試験区で出穂期、登熟中期（遮光終了時）、成熟期に各区平均的茎数の3株をサンプリングし、1.と同様な方法により乾物重を調査し、物質生産特性の解析に供した。

【結果と考察】

1. 気象条件と物質生産の解析

1) 調査年次の気象と水稻の生育の特徴

調査年次は気象変動が大きかったことから、水稻の生育に及ぼした影響も特徴的であったと考えられる。このため、それぞれの年次の生育期間毎の気象経過を第3-1-1表に示すとともに、気象および水稻の生育について下記に概説した。

1991年は、有効分げつ決定期から幼穂形成期までは平年より1.7℃高温に経過したが、それ以外の時期は平年並からやや低温に推移した。日照時間および日射量は特に移植後から登熟中期まで少なく、移植から幼穂形成期まではそれぞれ平年の67%、91%、幼穂形成期から登熟中期にかけては平年の46%、79%しかなかった。登熟中期以降は気温、日照条件とも平年並みか平年を上回った。

水稻の生育は、初期は茎数が少なくやや軟弱徒長気味で、その傾向が中後期まで続いた。その結果、穂数減により籾数も少なくなり、収量もやや低下した。

1992年は移植後からやや低温となり、一時的に高温となる時期はあったが、低温傾向は幼穂形成期まで続いた。幼穂形成期以降の気温は平年並みかやや高くなった。日照時間、日射量は、6月上旬まではそれぞれ平年の86%、96%とやや少なかったが、6月上旬以降出穂期までは日照時間は平年並み、日射量はやや多かった。出穂期から登熟中期にかけては一時的に寡照となり、日照時間は平年の83%、日射量は92%であった。それ以降成熟期

第 3-1-1 表 生育時期別の気象要因

年次	気象要因	移植～ 6月上旬	6月上旬～ 幼穂形成期	幼穂形成期 ～出穂期	出穂期～ 登熟中期	登熟中期 ～成熟期
1991	平均気温(℃)	18.1(± 0)**	23.4(+1.7)	24.1(-0.8)	26.6(-0.4)	26.2(-0.2)
	日照時間(h/日)	4.47(71)	3.18(70)	2.44(51)	2.96(41)	6.39(102)
	日射量(MJ/m ² /日)	17.6(97)	14.5(93)	13.0(83)	13.8(74)	18.4(110)
1992	平均気温(℃)	17.2(-0.9)	20.2(-1.5)	24.9(± 0)	27.2(+0.2)	27.7(+1.3)
	日照時間(h/日)	5.44(86)	4.64(102)	4.79(99)	6.00(83)	6.07(97)
	日射量(MJ/m ² /日)	17.3(96)	16.7(107)	16.7(107)	17.1(92)	17.3(104)
1993	平均気温(℃)	17.2(-0.9)	21.4(-0.3)	23.5(-1.4)	24.7(-2.3)	24.6(-1.8)
	日照時間(h/日)	6.12(97)	3.12(68)	2.47(51)	2.01(28)	5.01(80)
	日射量(MJ/m ² /日)	17.2(95)	13.3(85)	12.7(81)	11.7(63)	15.4(92)
平年値*	平均気温(℃)	18.1	21.7	24.9	27.0	26.4
	日照時間(h/日)	6.30	4.57	4.82	7.24	6.29
	日射量(MJ/m ² /日)	18.1	15.6	15.6	18.6	16.7

* 平均気温、日照時間は1961～1990年の30年間、日射量は1974～1990年の17年間の平均値

** ()内は平年対差、平年対比

第 3-1-2 表 苗質の比較

品 種	苗 丈 (cm)	葉 令	地上部乾物重 (mg/本)	充実度 (mg/cm)
ハナエチゼン	9.3	2.4	11.7	1.28
フクヒカリ	10.7	2.3	12.3	1.17

まではほぼ平年並に推移した。

水稻の生育は、初期は低温により緩慢であったが、中期以降は回復し、有効茎歩合が高まった。その結果、秋まさりの生育経過を示し、穂数、籾数が多くなり収量はやや高くなった。

1993 年は 6 月上旬から幼穂形成期までは気温が平年並みに推移したが、それ以外は成熟期まで低温傾向が続いた。特に出穂期から登熟中期にかけては平年を 2.3℃下回った。日照時間、日射量は生育期間を通して少なかった。移植から幼穂形成期にかけての日照時間、日射量は、それぞれ平年の 90%、93%で、さらに幼穂形成期から登熟中期にかけては日照時間で 45%、日射量で 83%と平年を大きく下回る著しい寡照であった。

このような低温・寡照条件と苗質不良により、水稻の生育は初期から緩慢で、生育が遅延するとともに、茎数、乾物重ともに少なく経過した。この傾向は成熟期まで続き、穂数、籾数ともに少なく減収した。

以上のように、調査を行った 3 年間は、一時期あるいはかなり長期間にわたって、著しい低温あるいは寡照条件が続いた年次であった。3 年間に共通していたのは、出穂から登熟中期にかけての寡照で、特に 1991、1993 年で顕著であった。作柄も 1992 年以外は不良であった。

2) 生育および形態的特性の比較

「ハナエチゼン」と「フクヒカリ」の生育特性の違いは以下のものであった。

「ハナエチゼン」の苗質を3年間の平均値で見ると、苗丈はやや短く地上部乾物重もやや少なかったが、充実度が高かった。葉齢は大差なかった（第3-1-2表）。

移植後は、生育期間を通して草丈が短く推移し、稈長も短かった。また、茎数は6月中旬までは大差ないが最高分げつ数はやや少なく、反面幼穂形成期以降の無効分げつの枯れ上がりは少なかった。葉齢の進展は生育初期から0.2~0.6葉早かった。葉齢を揃えて茎数の多少を比較すると幼穂形成期までは少なく、それ以降は多くなった（第3-1-1図）。この傾向は3年間を通して一定しており、品種間差が明らかであった。葉色は年次によって変動したが、6月上旬までと幼穂形成期以降は濃く、それ以外の時期は「フクヒカリ」と大差なかった（第3-1-3表）。

成熟期の形態を比較すると、稈長が6%短い、これはN2, N3, N4の下位節間が短いためである。また、L1, L2葉身は1~2cm長い、「フクヒカリ」より直立していた。穂長は1cm短かった（第3-1-4表）。倒伏は両品種とも軽微であった。この結果から、「ハナエチゼン」は下位節間の短縮により耐倒伏性が改善されているとともに、上位葉が長く直立してSourceの確保と受光態勢の向上がはかられていると推測される。

3) 物質生産の比較

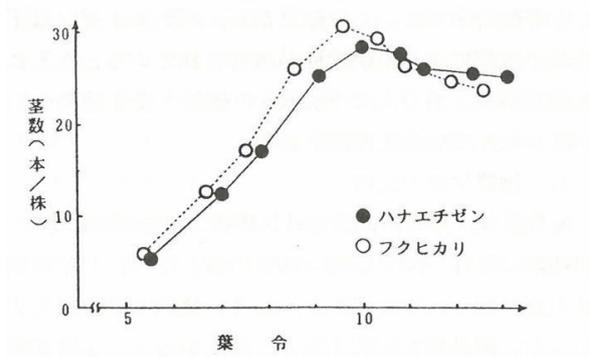
乾物重は、生育初期は1991>1992>1993の順に大きく、出穂期以降は1992>1993>1991の順となった。年次間差は生育が進むにつれて大きくなり、登熟中期で最も大きかった。両品種を比較すると、苗丈が短く、生育初期の低温による活着不良の影響を強く受けた1993年を除いて、6月上旬の有効分げつ決定期までは「ハナエチゼン」の全乾物重はやや大きく経過した。しかし、3年間を通して幼穂形成期の全乾物重はやや小さかった。出穂期では年次によって変動したが、平均すると大差なかった。しかし、登熟中期と成熟期では明らかに「フクヒカリ」を上回っていた（第3-1-2図）。また、穂重はいずれの時期でも大きく、特に登熟中期および成熟期では50~60g/m²の差が認められた。

葉面積指数（以下LAIと記す）も乾物重とほぼ同様な傾向を示したが、幼穂形成期の年次間差が最も大きかった。品種間では、幼穂形成期を除くいずれの時期もおおむね「ハナエチゼン」が大きかった（第3-1-2図）。特徴的な点は、比葉面積（葉面積cm²/葉身重g、以下SLAと記す）で、出穂期以降は「フクヒカリ」より大きかった（第3-1-3図）。

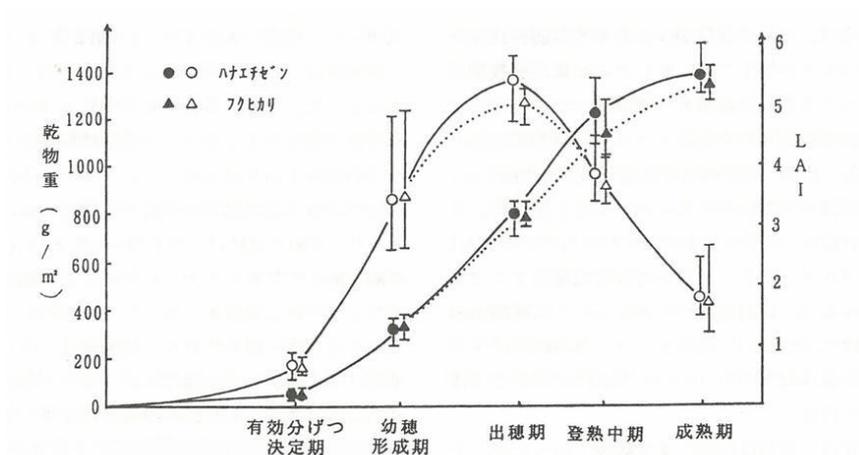
一方、葉身窒素濃度の経過をみると、「ハナエチゼン」は生育初期から0.2~0.3%高く、その傾向は出穂期まで続いた。しかし、出穂期から登熟中期にかけての低下程度が大きく、成熟期では「フクヒカリ」よりやや低かった（第3-1-5表）。また、葉身珪酸含量は出穂期までは両品種間の差は小さかったが、登熟期間の含量の増加は「ハナエチゼン」で大きく、成熟期には両品種間で1.5%の差が認められた（第3-1-4図）。

次に乾物重の経過をもとに生長解析を行い、作物個体群生長率（以下CGRと記す）および純同化率（以下NARと記す）を算出し、両品種の比較解析に供した（第3-1-6表）。

移植後有効分げつ決定期までの全植物体のCGRは、1993年を除いて「ハナエチゼン」がやや大きく、有効分げつ決定期から幼穂形成期にかけては「フクヒカリ」が大きい傾向が認められた。しかし、出穂期から登熟中期にかけてのCGRは、年次にかかわらず「ハナエチゼン」が明らかに大きく、登熟中期から成熟期にかけては「フクヒカリ」がやや大



第3-1-1図 葉令と茎数の関係 (1993)



第3-1-2図 乾物重とLAIの推移 (1991-1993)

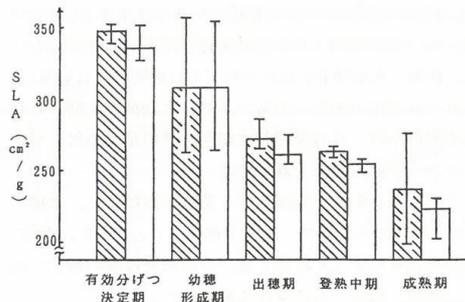
注) I は年次偏差

第3-1-3表 成熟期の形態

品 種	稈長 (cm)	穂長 (cm)	穂数 (本/m ²)	有効茎歩合 (%)	節間長 (cm)				
					N0	N1	N2	N3	N4
ハナエチゼン	77.1	17.9	467	75.4	30.1	19.8	15.3	10.7	2.2
フクヒカリ	82.2	19.1	426	66.4	30.0	19.9	16.8	11.9	3.9

第3-1-4表 葉身窒素濃度の比較

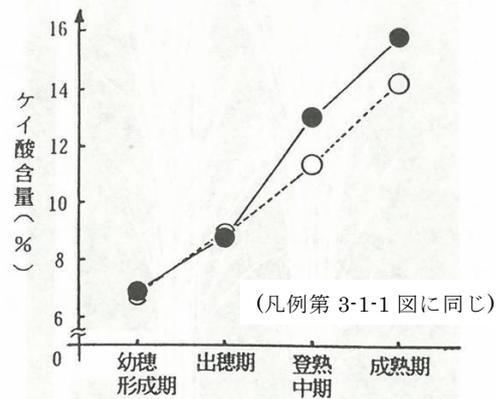
品 種	葉身窒素濃度 (%)				
	有効分けつ 決定期	幼穂 形成期	出穂期	登熟中期	成熟期
ハナエチゼン	4.81	3.36	2.86	1.86	1.30
フクヒカリ	4.61	3.07	2.61	1.91	1.35



第 3-1-3 図 SLA の推移 (1991-1993)

注) 斜線：ハナエチゼン，白：フクヒカリ

I は年次偏差



第 3-1-4 図 葉身ケイ酸含量の推移 (1993)

第 3-1-5 表 CGR および NAR の比較

品 種	年 次	移植～有効 分げつ決定期		有効分げつ決定 ～幼穂形成期		幼穂形成期 ～出穂期		出穂期～ 登熟中期		登熟中期～ 成熟期	
		CGR	NAR	CGR	NAR	CGR	NAR	CGR	NAR	CGR	NAR
ハナエチゼン	1991	1.97	8.45	15.20	6.45	12.88	2.68	22.59	5.58	11.46	4.75
	1992	1.35	6.92	12.43	8.17	19.62	4.80	23.72	5.19	10.55	4.47
	1993	0.89	6.66	9.08	7.46	23.33	5.80	16.65	3.23	7.99	2.44
フクヒカリ	1991	1.68	7.72	16.43	7.12	14.22	2.97	16.56	4.17	12.68	6.02
	1992	1.12	6.84	12.92	9.57	19.60	5.13	19.87	4.70	9.78	4.67
	1993	1.10	7.05	8.75	6.17	21.26	5.27	15.26	3.23	13.70	4.07

注) 品種間で有意差なし。

第 3-1-6 表 登熟期間の同化産物の転流

品 種	年 次	ΔW (g/m ²)	ΔP (g/m ²)	T (g/m ²)	ΔPP (g/m ²)	TR (%)	RA (g/m ²)
ハナエチゼン	1991	601.8	605.6	13.5	592.1	2.2	9.7
	1992	659.0	687.0	21.2	665.8	3.1	0.0
	1993	502.0	634.8	119.3	515.5	18.8	0.0
フクヒカリ	1991	522.5	566.0	50.4	472.1	8.9	50.1
	1992	564.4	639.6	66.2	498.4	10.4	66.0
	1993	567.1	592.7	20.2	546.9	3.4	20.2

(注) ΔW ; 登熟期間の乾物増加量(成熟期の全乾物重－出穂期の全乾物重)
 ΔP ; 登熟期間の穂重増加量(成熟期の穂重－出穂期の穂重)
T ; 茎葉から穂への推定転流量(出穂期以降の茎葉乾物重の最大値－最小値)
 ΔPP ; 出穂後同化産物の穂への推定移行量($\Delta P - T$)
TR ; 成熟期の穂重に占める転流量の推定比($T / \Delta P$)
RA ; 茎葉への推定再蓄積量($\Delta W - PP$; ただし $\Delta PP > \Delta W$ の場合は 0)
 ΔP は 1% 水準で, RA は 5% 水準で品種間に有意差あり. それ以外は有意差なし.

第 3-1-7 表 収量及び収量構成要素

品 種	わら重 (g/m ²)	籾 重 (g/m ²)	籾わら 比	穂数 (本/m ²)	一穂 籾数	全籾数 (百粒/m ²)	登熟 (%)	千粒重 (g)	玄米重 (g/m ²)
ハナエチゼン	518	766	1.48	439	67.3	307	90.6	21.8	605
フクヒカリ	546	717	1.31	426	64.8	274	87.3	23.5	563

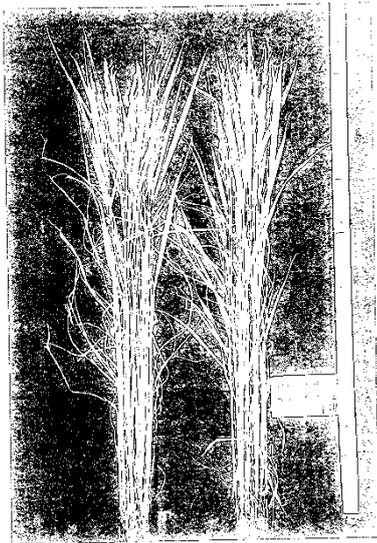
きかった。生育時期別にみた最大 CGR はいずれの年次でも「ハナエチゼン」で大きく、低温や寡照条件のなかでも 20g/m²/日を上回っていた。NAR の比較でも CGR と類似した傾向が認められた。「ハナエチゼン」の生長が大きかった幼穂形成期から登熟中期にかけて部位別に解析すると、穂の CGR が明らかに大きく、葉鞘+稈や根の CGR も大きかった。葉身は年次によって一定せず、枯葉は「ハナエチゼン」で大きかった。

「ハナエチゼン」の生育経過として特徴的なのは、同一葉齢で比較した場合に幼穂形成期までの茎数が少なく、それ以降は多くなる点である。一方、乾物重は 6 月上旬の有効分げつ決定期ではやや大きく、幼穂形成期ではやや少ない。また、葉身窒素濃度は高く推移する。このことは、生育初期からの分げつ 1 茎当たりの乾物重が大きく経過し、しかも草丈が短いことから、茎の充実が良好なことを示していると考えられる。また、有効茎歩合が高いことも、分げつ相互の競合を少なくして株基部の光環境を良くするとともに、同化養分の効率的な配分に寄与していると考えられる。

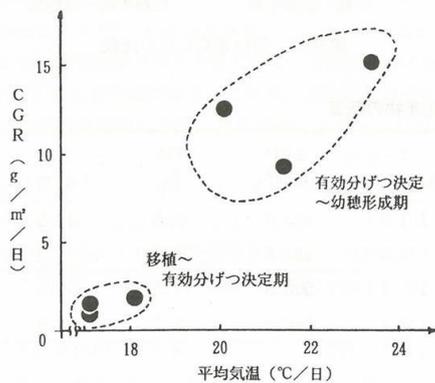
一方、乾物増加の特徴は、初期生育が旺盛な点と、生育中後期にあたる出穂期から登熟中期の CGR や NAR が大きい点であった。旺盛な初期生育は、苗丈が短く充実度が高いといった良好な苗質によってもたらされている可能性が高い。また、有効分げつ決定期から幼穂形成期にかけての CGR や NAR は低い、葉身窒素濃度が高く、潜在的な生産力は維持されていると考えられる。また、3 年間を通して「ハナエチゼン」の幼穂形成期の乾物重がやや小さいことは、過繁茂や倒伏を防ぎ、幼穂形成期から登熟中期の CGR や NAR を高めることに関与していると考えられる。

登熟期間の高い物質生産能力を、物質の配分の観点から長田ら(1991)に準じて解析し、第 3-1-7 表に示した。出穂期から成熟期にかけての全乾物増加量(ΔW)および穂重増加量(ΔP)は明らかに「ハナエチゼン」が大きい。しかし、出穂前に蓄積された同化産物の穂への転流量(T)は、1991、1992 年は少なく、出穂後の同化による穂重増加量(ΔPP)が大きかった。したがって、登熟期間中の穂重増加に占める茎葉からの転流量の割合(TR)は「フクヒカリ」が多かった。また、茎葉への再蓄積量(RA)は 3 年間とも「フクヒカリ」が多かった。このように、「ハナエチゼン」の出穂期以降の高い乾物生産能力は、出穂前同化産物の転流よりも、出穂後の同化量によりもたらされていることが明らかになった。また、出穂後の同化産物は優先的に穂に配分され、茎葉への再蓄積は少ないことが収穫指数(Harvest Index)を高め、多収につながっていると推察される。これは、一方では「ハナエチゼン」の Sink サイズ(穂重や籾数)が大きいことに基づいていると考えられる。しかし、1993 年は傾向が異なり、「ハナエチゼン」で茎葉からの転流量が著しく多くなった。この結果については後ほど検討したい。

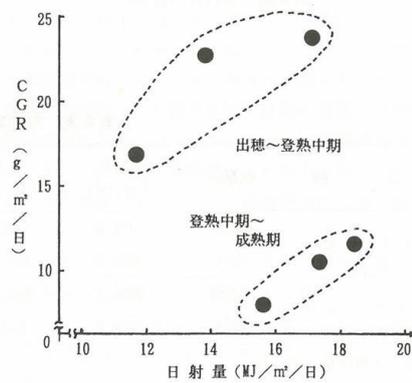
一方、生産態勢からみると、「ハナエチゼン」は幼穂形成期から出穂期にかけて急速に



第 3-1-5 図 ハチエチゼン (右) とフクヒカリの草姿



第 3-1-6 図 ハチエチゼンの平均気温と CGR の関係



第 3-1-7 図 ハチエチゼンの日射量と CGR の関係

LAI が拡大するとともに、SLA がやや大きくなる。また、出穂期には葉身窒素濃度も高い。また、LAI が最も大きくなる出穂期以降は葉身が「フクヒカリ」より直立していた (第 3-1-5 図)。このような草型の変化は、Source 量を増やして群落光合成速度を高めるとともに、受光態勢を良くするうえで重要である。さらに、蒸散が盛んな条件で多い珪酸の吸収 (馬場 1956) が、低温・寡照条件でも旺盛なことも、登熟後半まで受光態勢を維持するうえで大きな要因と考えられる。なお、調査を行った 3 年間の LAI は、両品種とも最大でも 6.0 を上回ることはなかった。したがって、これ以上の LAI でも登熟期間に高い CGR や NAR が得られるかどうかについては今後の検討が必要である。

このような「ハナエチゼン」の物質生産特性は、優良分げつの早期確保、過繁茂の防止、茎質の向上、登熟前半の高い群落光合成能力および転流能力といった観点で「フクヒカリ」を上回り、不良気象条件下での生育の安定に大きく寄与していたと考えられる。

4) 気象と物質生産の解析

年次別に気象条件と物質生産の関係について解析すると、生育初期から幼穂形成期まで

は日射条件よりもむしろ温度の影響が大きく、1991年のCGRやNARが最も高くなった(第3-1-6図)。一方、出穂期から成熟期にかけては日射量の多い年次でCGRやNARが高まる傾向が認められた(第3-1-7図)。しかし、幼穂形成期から出穂期にかけては、気温が低く日射量も少ない1993年のCGR、NARが最も高かった。これは、気象以外の要因、例えば地力窒素の発現などの影響によると考えられるが今後の検討が必要である。

5) 収量構成要素の比較

1991年から1993年の3年間の玄米重の平均値は、「ハナエチゼン」が605kg/10a、「フクヒカリ」が563kg/10aで、42kg/10aの差が認められた。「ハナエチゼン」は収穫時の全重が大きいことに加えて籾ワラ比が高く、低温・寡照が最も著しかった1993年でも低下程度が小さかった。収量構成要素では、穂数が10%多く、一穂籾数もやや多かったことから、全籾数は12%多かった。さらに、千粒重は小さかったが登熟歩合が平均で4%高く、粒揃いも良好であった(第3-1-8表)。このように、「ハナエチゼン」は籾数生産能力が高く登熟力に優れ、しかも収穫指数が高いことが多収につながっていると考えられる。

物質生産との関連性を検討すると、「ハナエチゼン」では籾数確保が容易であるが、これは出穂期までの窒素の吸収が多く、穂数が多くても一穂籾数が低下しないことが寄与している可能性が大きい。しかも、登熟前半のCGRやNARが高いことは、登熟歩合の高さと密接に関係していると推測される。

2. 登熟前半の遮光が物質生産に及ぼす影響

遮光開始時の地上部乾物重は「ハナエチゼン」でやや大きく、対照区の登熟中期、成熟期も同様であった。遮光区の「ハナエチゼン」は穂重が大きく推移するが、登熟中期の地上部乾物重は「フクヒカリ」をやや下回った(第3-1-9表)。

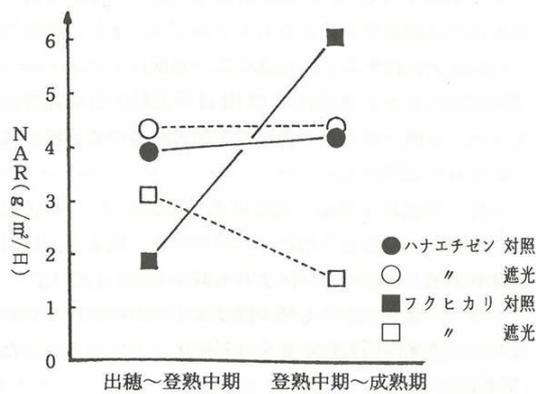
第3-1-8表 登熟期間の同化産物の転流

品 種	試験区	ΔW (g/m ²)	ΔP (g/m ²)	T (g/m ²)	ΔPP (g/m ²)	TR (%)	RA (g/m ²)
ハナエチゼン	対照	501.8	634.6	151.3	483.3	23.8	18.5
	遮光	434.6	592.1	157.5	434.6	26.6	0.0
フクヒカリ	対照	508.7	615.0	106.2	508.8	17.3	0.0
	遮光	362.8	484.4	138.4	346.0	28.6	16.8

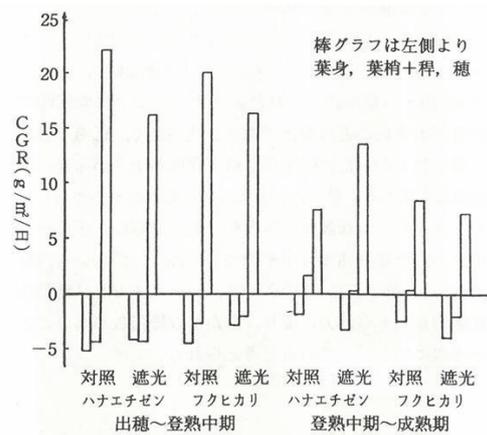
注) 凡例は第3-1-6表と同じ。

第3-1-9表 収量及び収量構成要素

品 種	試験区	わら重 (g/m ²)	籾重 (g/m ²)	籾わら比	玄米重 (g/m ²)	穂数 (本/m ²)	一穂籾数 (粒)	全籾数 (百粒/m ²)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)
ハナエチゼン	対照	503	774	1.54	631	506	69.4	350	82.1	22.1
	遮光	503	698	1.39	510	499	69.4	346	69.4	21.7
フクヒカリ	対照	526	774	1.47	597	488	65.5	319	79.3	23.6
	遮光	491	665	1.35	486	462	63.9	295	69.2	23.6



第 3-1-8 NAR の推移



第 3-1-9 図 部位別 CGR の比較

遮光期間中の CGR を遮光区と対照区で比較すると、遮光区では穂重の低下が最も大きかった。また、品種間で対照区と比較すると、穂重の低下程度は「ハナエチゼン」で大きかったが、遮光区の CGR は両品種とも同程度であった。反面、遮光区の葉身や葉鞘+稈重の低下程度は「フクヒカリ」より少なかった。一方、遮光終了時から成熟期の CGR は、「ハナエチゼン」では遮光区の穂重の増加率が対照区を上回るが、反面葉身や葉鞘+稈重は対照区よりも減少した。しかし、「フクヒカリ」の遮光区よりも減少程度は小さかった。「フクヒカリ」では遮光区の乾物増加率は対照区よりも小さかった（第 3-1-8 図）。

NAR の経過も CGR とほぼ同様であった。遮光期間中の NAR の低下は「ハナエチゼン」で大きく、遮光後は対照区の NAR をも上回るのに対して、「フクヒカリ」では遮光後は遮光期間中よりも低下し、しかも対照区よりも低かった（第 3-1-9 図）。

登熟期間の物質の転流をみると、「ハナエチゼン」は遮光に伴う ΔW の減少程度は大きかったが、 ΔP の減少程度は大差なかった。出穂後の同化による穂重の増加量は、遮光区で少なかった。しかし、本試験では茎葉からの転流量が多く、各処理区とも 15~30%であった。なかでも遮光区は両品種とも対照区を上回っていた。これは、遮光に伴う出穂後の同化量の減少によって、転流量の占める比率が相対的に高まった結果である。一方、茎葉への再蓄積量は「ハナエチゼン」では遮光によって減少したが、「フクヒカリ」では遮光区のほうが再蓄積量が多く、傾向を異にしていた（第 3-1-8 表）。

以上の結果は、物質生産が最も盛んな出穂期から登熟中期の日照不足条件でも、「ハナエチゼン」の穂の CGR は「フクヒカリ」並に確保され、日照が回復すると稲体の乾物増加も回復し、収量の低下程度を最小限にとどめられることを示している。このことは、寡照条件においても「ハナエチゼン」の収量低下が少ない大きな要因と考えられる。

収量および収量構成要素をみると、玄米重は対照区、遮光区ともに「ハナエチゼン」が高かった。これは穂数、一穂粒数ともに多く、 m^2 粒数も多かったことに加えて、粒わら比が高かったためである（第 3-1-9 表）。

【 総合考察 】

西山（1985）が指摘するように、登熟期間の日射量（光合成有効放射量）と収量の間

は地域(全国 12 箇所)や年次(1979~1980)別にみても高い相関がある。福井県でも 1955 年から 1993 年までの 39 年間で、水稻の作況指数が 94 以下に低下したのは、1980, 1983, 1993 年しかない(福井統計情報事務所)が、この 3 年間はいずれも 7 月、8 月の生育中後期が寡照条件となり、1983 年以外は気温の低下をともなう物質生産が緩慢であった。このような条件で、栽培技術の対応が不十分で、いもち病や倒伏の多発を招いたときに収量は大きく低下する。

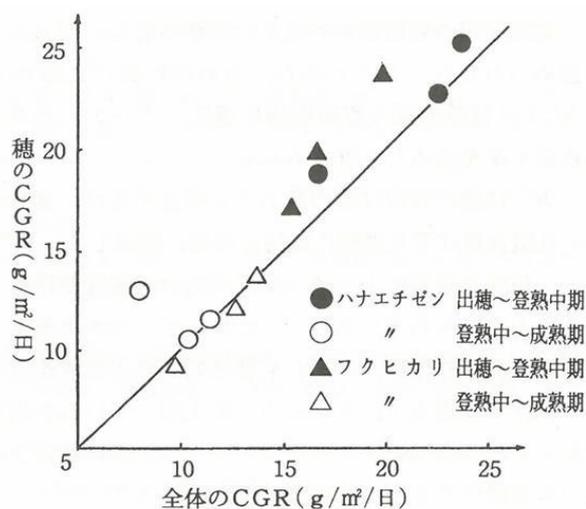
多収穫を得るための基本は、乾物重あるいは収穫指数を高めることであり、近年育成された多収品種はいずれもこの両者ともに高くなっている。そこで、最近の多収品種の持つ草型や物質生産特性を、日照不足条件を考慮したうえで「ハナエチゼン」の特性と比較検討してみた。

まず、高い乾物重を得るための生産過程として、どの時期の乾物生産が高められているかをみると、大きく出穂前乾物重を高めるタイプ(北川ら 1993, 黒田ら 1993, 田中 1994)と、出穂後の同化量を高めるタイプ(武田ら 1984, 宋ら 1987a)に区分される。「ハナエチゼン」は出穂期までの乾物重がさほど小さくなく、登熟期間の CGR が大きいことが特徴である。これは、北陸地域の早生水稻が幼穂形成期間を高温、寡照条件で生育し、LAI は比較的容易に拡大することを考えると、出穂期までの生育速度を高めても、過剰生育に伴う登熟期間の受光態勢の悪化を招いては収量向上をはかることはできないため、変動気象条件下では受光態勢を維持して登熟期間の乾物生産を増加させるタイプのほうが有利ではないかと考えられる。

次に登熟期間の物質の配分では、多収性品種は総じて転流が良好で、特に出穂期乾物重が大きい場合には子実重に占める蓄積炭水化物量の転流割合が高いことが報告されている(宋ら 1987b)。また、最近の多収品種では貯蔵炭水化物量が特に多くなっていることも明らかになっている(翁ら 1982a)。本試験では「ハナエチゼン」の穂重に占める茎葉からの転流量の割合は、1991, 1992 年は「フクヒカリ」よりも少なかった。しかし、1993 年や遮光試験においては著しく多くなるとともに、遮光区は対照区よりも多くなった。転流量の多い年次は、いずれも「ハナエチゼン」の出穂期の葉鞘+稈重が $450\text{g}/\text{m}^2$ 以上と重く、出穂期までに充分炭水化物が蓄積していたと考えられる。また、登熟期間が寡照や低温で、出穂後の同化量が少ない場合には、相対的に貯蔵炭水化物の穂重に占める割合が高まることも示されている(寺島ら 1982)。

登熟期間の稲体全体と穂の CGR を比較すると、年次、品種を込みにして両者には高い正の相関が認められる。登熟前半では「ハナエチゼン」は穂の CGR がわずかに高い程度であったが、「フクヒカリ」では穂が全体よりかなり高く、穂重増加に占める転流の割合が高いことが示される。また、登熟後半には「ハナエチゼン」では穂の CGR が全体より高いが「フクヒカリ」では低い。したがって、登熟後半の転流能力は「ハナエチゼン」のほうが優れていると考えられる(第 3-1-10 図)。この結果を同化産物の茎葉への再蓄積と併せて考えると、「ハナエチゼン」では登熟前半だけでなく後半までも籾の同化産物受け入れ能力が高く、これが茎葉への再蓄積を少なくして、穂重増加に大きく寄与しているとみられる。なお、このことは、太田ら(1959)が遮光によって転流は阻害されないが、茎葉への再蓄積はほとんど見られなくなるとした結果とも一致する。

さらに、草型の観点から物質生産をみると、近年の多収品種が必ずしも LAI が大きいわ



第3-1-10 図 登熟期間の穂と全体のCGRの比較

けではないが、受光態勢が良く、吸光係数が小さいことが指摘されている(丸山・田嶋 1988)。「ハナエチゼン」は登熟期間のLAI, SLAが大きく、葉身が直立している。また、登熟期間の葉身珪酸含量の増加は「フクヒカリ」より顕著である。特に寡照条件で、しかも最大LAIが6.0までの状態では、Hayashi (1969)が指摘するように多少SLAが大きくてもかえって物質生産上有利なのかも知れない。また、SLAが大きい稲は呼吸による消費が少なく、草型が良ければ群落全体の光合成速度を高められることが報告されている(翁ら 1982b)。本解析に用いた稲は、登熟期間の気温がやや低く、下葉の著しい枯上がりは認められなかったことから、相対的に高いLAIおよびSLAは登熟期間の寡照環境に適応してハナエチゼンの物質生産を高めたと推測される。

一方、珪酸の吸収は根の活力とも関連するが、葉身の高い珪酸含量は受光態勢の維持と密接に関連している(高橋 1990)。また、珪酸の施用によって下位葉の光合成速度が維持されることも知られている(内田ら 1992)。したがって、「ハナエチゼン」の葉身が持つ特性は、いずれも登熟期間の光合成速度を高く維持する観点で、「フクヒカリ」を上回っていると推定され、それが寡照条件でも「ハナエチゼン」が高い物質生産能力を発揮できる大きな要因と考えられる。

遮光条件では物質生産が緩慢になるとともに、葉身その他の部位の活力も低下し、遮光後も正常な物質生産が行えないことも報告されている(笈田ら 1990)。また、栄養成長期においては地上部の生育が抑制されるだけでなく、発根数や根長密度が低下し(間脇ら 1989)、このことが遮光後の回復力を低下させることも示唆されている。「ハナエチゼン」では遮光後のNARが高く、物質生産の回復が早く、穂への転流速度も大きかった。同様な結果を長田ら(1994)が温暖地の超多収稲で報告している。また、石井ら(1986)は新旧32品種を用いて、新品种は天候不順年次で乾物生産が低下しても子実収量の低下は小さいことを示したが、「ハナエチゼンでも」1993年の収穫指数の低下は小さかった。

このように、遮光後の物質生産の回復力は、変動の大きい環境下でも水稻が安定した生産を維持するために必要な特性と考えられ、葉身を中心とした稲体の活力維持要因に関する

生理面の研究が必要と考えられる。また、佐藤（1993）が指摘したような、物質生産や草型が玄米品質に及ぼす影響についても検討する必要がある。

以上の結果を総合すると、低温、寡照条件下における物質生産からみた「ハナエチゼン」の多収要因は、以下のように取りまとめられる。

1. 初期生育が旺盛で生育が速いが、最高分げつ数が少なく有効茎歩合が高い。
2. 出穂期以降の CGR, NAR が高く、特に穂の CGR が高い。
3. 幼穂形成期以降の LAI が高く、SLA がやや大きく、葉身が直立しているため寡照条件下でも光利用効率が高く、籾わら比が高い。
4. 穂への転流能力が高く、茎葉への再蓄積が少ない。
5. 穂数や m^2 あたり穎花数が多いにもかかわらず登熟歩合が高い。
6. 登熟期間の遮光後の NAR や CGR が高く、寡照後の回復力が高い。

【摘 要】

「ハナエチゼン」の低温・寡照条件下での生育の安定性について、気象対策試験と遮光試験をもとに、生育と物質生産面から「フクヒカリ」と比較解析した。

「ハナエチゼン」は生育初期の茎数の増加は緩慢であるが、最高分げつ期以降の茎数減少が少なく、有効茎歩合が高かった。また、下位節間長が短く短稈化により耐倒伏性が改善されていた。作物個体群生長率（CGR）は生育初期と出穂期から登熟中期の間で顕著に大きかった。この高い CGR は直立した上位葉と大きな LAI および SLA によってもたらされていると推定された。また、穂重が大きく、穂への転流速度が早く、茎葉への再蓄積は少なかった。登熟前半の遮光処理によっても穂の CGR は低下程度が小さく、遮光終了後の CGR や NAR の回復が早かった。

「ハナエチゼン」の収量は、登熟期間に寡照に遭遇し 1991 年から 1993 年の 3 年間の平均値で、「フクヒカリ」を 42kg/10a 上回った。「ハナエチゼン」の収量構成要素は穂数、 m^2 あたり籾数が多く、登熟歩合が高く、千粒重が小さかった。

第2節 水稻早生品種の登熟期間の物質生産と品質食味要因の解析

1. 物質生産と窒素吸収量の比較

北陸地域の水稲早生品種は、早場米として出荷するためや台風の被害を避けるために8月中に収穫できることが求められている。このため、幼穂形成期間が梅雨期間と重なるために日射量が不足すること、出穂後には一転して高温にさらされること、梅雨期間の延長に伴い登熟前半の日射量が変動しやすいことなど、乾物生産量や収量が気象変動の影響を受けやすいことが知られている(井上 1996, 岩田 1986)。一方で、高温下での登熟となるため比較的玄米中のタンパク質含量が高く(東ら 1991, 本庄 1971, 木戸・梁取 1965, 清水ら 1994)、みかけの品質や食味への影響が大きいことも指摘されている。しかし、物質生産と窒素の吸収、分配を併せて調査した報告や、さらに品質食味との関連性を指摘した研究はきわめて少ない。そこで、本報告では良質良食味米生産の観点から、育成年次や生産力が異なる早生品種を選び、施肥条件を変えて、登熟期間の物質生産と窒素吸収およびその配分の品種間差について解析し、若干の知見を得たので報告する。

【材料と方法】

「ハナエチゼン」、「ハウネンワセ」、「フクヒカリ」、「アキチカラ」の4品種を用い、1997年5月6日に栽植密度20.6株/m²で1株3本ずつ移植した。各品種とも基肥は化成肥料を用いて窒素成分で6kg/10aとし、穂肥量で標肥区(窒素成分2+1kg/10a)と多肥区(窒素成分3+3kg/10a)を設定してそれぞれ6月30日と7月10日に分施した。各試験区は1区10.8m²の2区制とした。

穂揃期と成熟期に各区から平均的穂数をもつ5株および3株をサンプリングし、LAIを測定するとともに部位別に分解し、70°Cで72時間乾燥させ乾物重を測定した。また、各部位毎にケルダール法により全窒素を分析するとともに、乾物重と乗じて窒素吸収量を算出した。

【結果と考察】

試験年次は幼穂形成期から登熟前半にかけて寡照条件となり、特に登熟前半は高温寡照が顕著であった。登熟期間を通した平均気温、日射量はほぼ平年並みであった。

出穂、成熟期は「ハナエチゼン」、「ハウネンワセ」、「フクヒカリ」、「アキチカラ」の順に早く、出穂期の差は最大3日、成熟期の差は最大8日であった(第3-2-1表)。倒伏は「ハウネンワセ」で標肥、多肥区ともに2~3と大きい他は軽微であった。

穂揃期の乾物重は「フクヒカリ」、「ハナエチゼン」、「アキチカラ」、「ハウネンワセ」の順に大きく、多肥区は標肥区より5~15%大きかった。LAIは「アキチカラ」が最も大きく、これはSLAが高いためであった。葉身窒素濃度は、「ハウネンワセ」や「アキチカラ」で高く、地上部全体の窒素吸収量は標肥区では品種間差が小さいが、多肥区では「アキチカラ」>「フクヒカリ」>「ハウネンワセ」>「ハナエチゼン」の順で品種間差が比較的明瞭であった(第3-2-1表)。

成熟期の全乾物重や穂重は、「アキチカラ」が最も大きく「ハウネンワセ」で小さかった。「アキチカラ」の部位別窒素濃度は他の品種と異なり、葉身や茎の濃度が高く穂の濃度は低かった。「ハウネンワセ」では葉身、穂ともに高く、他の2品種はその中間に位置した。窒素吸収量は

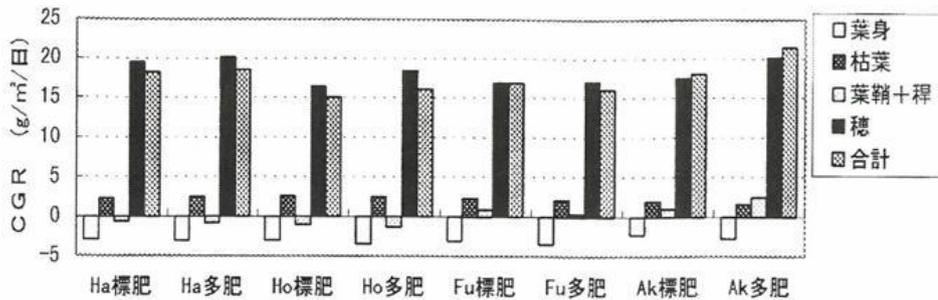
13~16g/m²となり、「アキチカラ」が最も多くその他の品種は大差なかった（第3-2-1表）。

登熟期間の作物個体群成長率（以下 CGR と略す）は「ハナエチゼン」と「アキチカラ」で高く、この両品種は穂の増加率(EarGrowthRate,以下 EGR と略す)も高かった(井上ら 1995)。「アキチカラ」では、CGR が EGR を上回ったが他の3品種は下回っていた（第3-2-1図）。

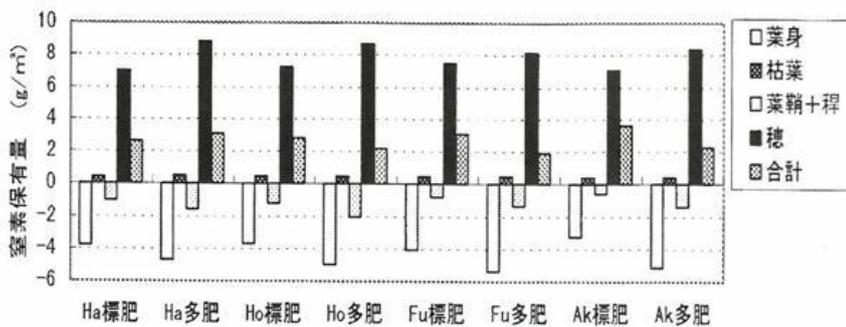
第3-2-1表 出穂、成熟期と物質生産、窒素吸収特性

品 種	施肥	出穂期 (月日)	成熟期 (月日)	穂揃期				成熟期				
				乾物重 (g/m ²)	L A I	葉身窒素 (%)	窒素含量 (g/m ²)	乾物重(g/m ²)		窒素濃度(%)		窒素含量 (g/m ²)
				穂	全体	葉身	穂	葉身	穂	全体		
ハナエチゼン	標肥	7.23	8.29	848	5.6	2.74	10.4	745	1432	1.50	1.12	13.0
	多肥	7.24	8.29	906	6.0	3.06	12.7	775	1502	1.64	1.33	15.8
ホウネウチ	標肥	7.24	8.29	793	4.6	2.83	10.0	634	1274	1.54	1.35	12.8
	多肥	7.24	8.29	879	5.5	3.19	13.2	704	1394	1.80	1.45	15.4
フクヒカリ	標肥	7.25	9. 3	893	5.5	2.73	10.9	736	1484	1.49	1.25	14.0
	多肥	7.25	9. 2	956	6.3	3.08	13.4	745	1519	1.52	1.34	15.3
アキチカラ	標肥	7.26	9. 6	801	5.4	2.82	10.0	746	1435	1.82	1.15	13.6
	多肥	7.26	9. 5	903	7.2	3.32	14.3	838	1654	1.90	1.17	16.5
品種	—	—	—	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	**	ns
施肥	—	—	—	*	*	**	**	ns	ns	ns	**	**

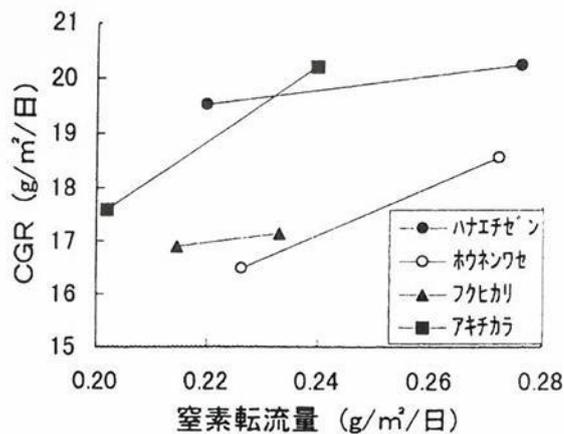
注) **, * は分散分析によりそれぞれ1%, 5%水準で品種, あるいは施肥条件で有意差あり.



第3-2-1図 登熟期間のCGR



第3-2-2図 登熟期間の部位別窒素転流



第 3-2-3 図 穂への窒素転流量と CGR の関係

また、登熟期間の窒素吸収量は $1.9 \sim 3.6 \text{ g/m}^2$ で、「ハナエチゼン」を除き多肥区よりも標肥区で多かった。穂への窒素転流量は $7.0 \sim 8.8 \text{ g/m}^2$ で多肥区で多く、「ハナエチゼン」、「ホウネンワセ」でやや多い傾向が認められた（第 3-2-2 図）。登熟期間の穂の窒素含量増加の 50% 前後は葉身からの窒素の転流により占められていたが、標肥区では登熟期間の窒素吸収量が占めると推定される比率も 40% 前後と高かった。

穂への同化産物と窒素の転流の関連を見るために、1 日あたり穂への窒素転流量 (Ear Nitrogen Translocation Rate, 以下 ENTR と略す) と EGR の関係を解析した（第 3-2-3 図）。その結果、両者間に有意ではないが $r = 0.52$ の正の相関が認められるとともに、多肥条件では各品種とも明らかに ENTR が大きくなった。ENTR は「ハナエチゼン」や「ホウネンワセ」でやや多く、EGR は「ハナエチゼン」や「アキチカラ」で比較的高い傾向が認められた。特に「アキチカラ」では多肥条件による ENTR の増加に対して EGR の増大が顕著であった。また、ENTR/EGR 比と成熟期の穂の窒素濃度の間には $r = 0.99^{**}$ の極めて高い正の相関が認められた。

稲体の窒素含量が玄米のタンパク質含量に及ぼす影響については、松崎ら（1973）は出穂期の穂の葉身窒素含量と、平ら（1972）は葉鞘+稈や穂の窒素含量と正の相関を認めている。しかし、本試験では成熟期の穂の窒素濃度は穂揃期の穂とのみに $r = 0.92^{**}$ の有意な正の相関を認めたが、葉身や葉鞘+稈では相関は低かった。これは、一つには供試した品種数や特性の違いによると考えられるが、登熟期間の窒素吸収とその配分が品種間でやや異なっていた点にもあると考えられる。一方、ENTR/EGR 比は穂の窒素濃度をそのまま説明するものであり、本試験での相関係数は極めて高かった。したがって、穂の窒素濃度低下のためには ENTR を下げるか EGR を高める必要がある。

EGR に及ぼす要因について検討したところ、CGR および登熟期間の平均 LAI といずれも $r = 0.80^*$ と 5% 水準で有意な正の相関が認められた。しかし、穂揃期の葉身窒素濃度や窒素保有量、登熟期間中の窒素吸収量などとの相関は低かった。この結果は、穂揃期までの生育量や窒素吸収量が比較的類似した品種のなかで、登熟期間の同化器官の活力の維持が地上部全体の乾物増加を通して EGR を高めたためと考えられる。

一方、ENTR と相関の高い穂揃期の要因は認められず、登熟期間中の窒素吸収量との関係も小さかった。むしろ、窒素の部位間の転流に関連して、葉身との間に $r = -0.81^{**}$ 、葉鞘+稈との間に $r = -0.93^{**}$ と高い負の相関が認められたことから、葉身、葉鞘+稈からの転流を少なくできるような要因の検討が必要と考えられる。この両部位ともに窒素は光合成能力および稲の機能および態勢の維持に密接に関連しており、転流を少なくするためには外見的には枯れ上がりが少ない品種特性が必要と推測される。

以上の結果は、登熟期間中の窒素吸収および配分特性が、光合成、物質生産能力の維持を通じて穂の窒素濃度の形成に関与していることを示している。穂への同化産物の転流量の増加と葉身や稈の窒素含量の維持は、多収穫上も重要と考えられる。本試験では登熟期間中の窒素吸収量の品種間差は小さく、窒素に関しては穂揃期の穂の窒素濃度が成熟期の穂の窒素濃度に大きく関与していた。今後、年次や品種数を増やしてデータを集積し、窒素の動態と物質生産を詳細に検討したい。

2. 収量増加および窒素吸収と収量、品質食味要因の関係

1. に記したように、早生新旧品種および多収品種の登熟期間の物質生産や窒素吸収経過を比較すると、比較的明瞭に品種間差が認められた。そして、登熟期間の LAI の維持と葉身や稈からの窒素転流の抑制が玄米窒素濃度の低下と関連が強いことが明らかとなった。しかし、シンクサイズやシンクソースのバランスも物質生産を通して収量品質と密接に関連していることが想定される。さらに、米の品質食味関連要因としては、蛋白質含量（石間ら 1974）あるいは窒素濃度に加えて乳白粒発生率（井上 1996）も重要であることが指摘されている。そこで、本報告では収量構成要素のうちシンクサイズとして籾数、見かけの品質として乳白粒発生率および玄米窒素濃度の各要素と、乾物生産や窒素吸収の関係について解析を進めた。また、官能試験による食味評価を行い、総合的に食味要因と生育特性の関連性について比較検討した。

【材料と方法】

1. の試験区より各区 3.4 m²を坪刈りし、常法により収量、収量構成要素を算出した。また、1.8mm 篩で選別した玄米サンプルを用い、達観により各区 1,000 粒を供試して見かけの品質を調査した。さらに、粉碎した玄米を近赤外分光分析（ニレコ社製 6500 型）により玄米窒素濃度を測定した。また、標準品種を標肥区「ハナエチゼン」とし、パネリストを 24 人として官能試験を実施し、分析値との関連性について検討した。

【結果と考察】

各試験区の収量および収量構成要素を見ると、収量は「アキチカラ」>「ハナエチゼン」>「フクヒカリ」=「ハウネンワセ」となり、成熟期の穂重と同様な傾向を示した。「アキチカラ」の m²あたり籾数は他の 3 品種より明らかに多く、しかも登熟歩合が高かった。「フクヒカリ」は籾数が少なく、「ハウネンワセ」の籾数は「ハナエチゼン」と同等だが登熟が不良でありいずれもやや低収であった。各品種の多肥条件による籾数増加を比較すると、

「アキチカラ」の増加量が 3,600 粒/m²と最も多く、ほか 3 品種では 800~2,100 粒/m²と少なかった。これは幼穂形成期間の日射量が不足したために出穂期の早い品種では吸収窒素を粒数生産に十分活用できなかったためと考えられる。「アキチカラ」を除く 3 品種では、多肥による増収効果が小さいが、これは多肥による粒数増加が少なく、登熟歩合や千粒重の低下と相殺された結果と考えられる（第 3-2-2 表）。

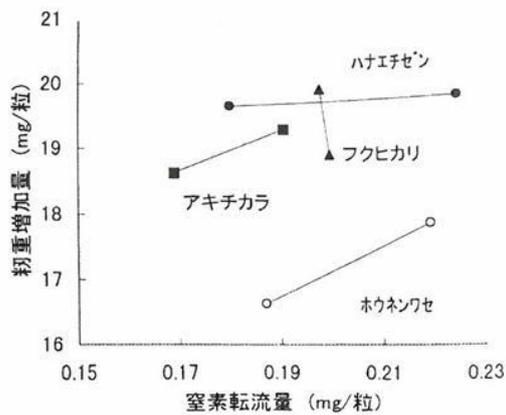
多肥によるシンクサイズの拡大は高いソースの能力と合わさった場合に低蛋白米の生産につながると考えられる。そこで、1 籾あたりの粒重増加と窒素転流量について比較したところ、粒数増加の少ない「ハナエチゼン」では多肥による粒重の停滞と窒素転流量の増加が顕著であり、「ハウネンワセ」、「アキチカラ」では粒重、窒素転流量ともに増加した。フクヒカリは多肥でも窒素転流量は大差ないが粒重増加量がやや低下した（第 3-2-4 図）。これは、穂肥の増施による粒数増加と登熟期間の乾物生産能力が品種によって異なるが、窒素吸収量は一様に増加するために 1 籾あたりの粒重増加と窒素の転流量に差が生じた結果と考えられる。

篩選別した玄米の窒素濃度は、乾物換算で 1.3 から 1.6%の範囲となり、多肥区は標肥区より 0.1%前後高まった。品種間では「アキチカラ」が最も低く、「ハナエチゼン」と「フクヒカリ」はほぼ同程度で、「ハウネンワセ」が最も高かった（第 3-2-2 表）。この傾向は、穂の窒素濃度とほぼ同様であり、各品種の登熟歩合や千粒重に著しい違いがなかったことがその理由と考えられる。

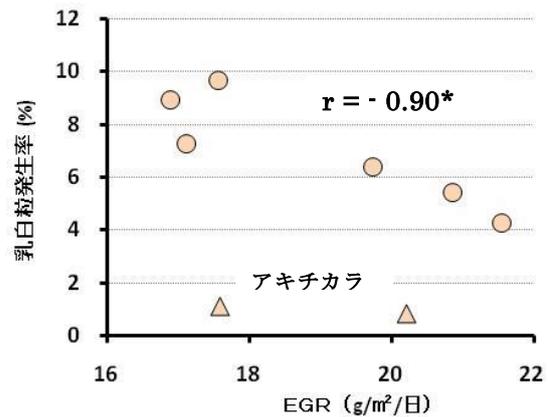
各試験区の見かけの品質は、穂肥量の違いによる差よりも品種間差のほうが大きかった。完全米歩合は、「ハウネンワセ」の 82%から「ハナエチゼン」の 90%まで 8%の差が認められた。乳白粒の発生率は「アキチカラ」が最も少なく、次いで「ハナエチゼン」で、「ハウネンワセ」と「フクヒカリ」はほぼ同程度に発生率が高かった。各品種とも標肥区よりも多肥区で発生率が低下した。茶米と青米は各品種とも多肥区で発生率が高く、品種別では「ハナエチゼン」で少なく「アキチカラ」でやや高い傾向が認められた（第 3-2-2 表）。

品 種	施 肥	粒数 (百粒/m ²)	登熟 歩合 (%)	千粒重 (g)	精玄 米重 (g/m ²)	見かけの品質粒数(%)				玄米 窒素 (%)	官能試験 総合評価
						完全米	乳白	茶米	青米		
ハナエチゼン	標肥	318	91.9	21.7	625	89.6	5.4	1.4	1.7	1.39	0
	多肥	326	90.2	21.7	629	90.0	4.3	2.2	2.8	1.49	-0.38
ハナエチゼン	標肥	317	90.4	20.1	566	81.8	9.7	3.6	3.3	1.44	-0.17
	多肥	331	87.2	19.9	560	82.3	6.4	5.1	4.9	1.57	-0.67
フクヒカリ	標肥	296	90.9	22.4	568	82.4	8.9	4.6	1.8	1.41	-0.04
	多肥	317	87.7	21.8	571	82.7	7.3	5.2	2.0	1.47	-0.21
アキチカラ	標肥	330	92.8	21.5	646	88.6	1.1	5.2	3.2	1.31	-0.25
	多肥	366	91.8	21.2	705	82.6	0.8	6.7	7.3	1.38	-0.63
品 種		**	ns	**	**	*	**	**	ns	**	-
施 肥		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	-

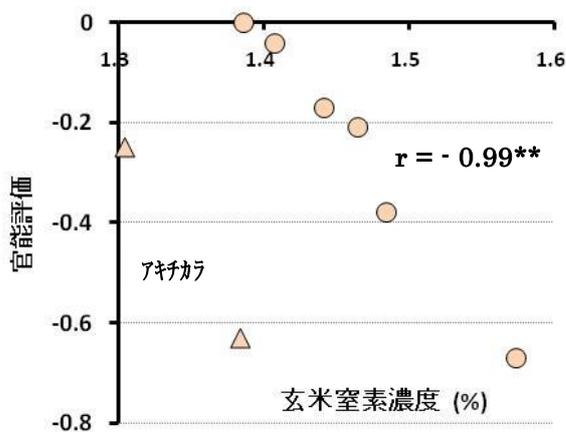
注) **, * は分散分析によりそれぞれ 1%, 5%水準で品種, あるいは施肥条件で有意差あり。



第3-2-4図 登熟期間の1粒あたり窒素転流量と粒重増加率の関係



第3-2-5図 EGRと乳白粒発生率の関係



第3-2-6図 玄米窒素濃度と官能評価の関係

「ホウネンワセ」では乳白粒発生率と玄米窒素濃度がともに最も高く、「アキチカラ」は乳白粒発生率、玄米窒素濃度がともに低かった。「ハナエチゼン」と「フクヒカリ」は両品種の中間に位置していた。穂肥の多施用は、玄米窒素濃度を高め、乳白粒発生率を低下させる傾向を示した。

乳白米の発生には、登熟初期の高温(井上ら 1998, 佐々木ら 1984), 遮光(松江ら 1992, 津森 1987), 水管理条件(井上ら 1998), 粒数の多少(井上ら 1997)等の影響が報告されている。これらの要因は、長戸ら(1952)が指摘するよういづれも玄米への同化産物の転流が登熟途中で停滞したり不足する要因である。著者ら(井上ら 1997, 井上ら 1998)も「コシヒカリ」を用いた施肥条件や水管理の異なる試験区で、 m^2 粒数や登熟前半の粒重増加速度と乳白粒発生率の間に高い負の相関を認めている。本試験では、品種を込みにした乳白粒発生率と粒数との相関関係は認められず、むしろ粒数が多い「アキチカラ」で乳白粒発生率が低かった。しかし、登熟期間の1日あたり穂重増加率(EGR)との間には、

「アキチカラ」を除くと $r = -0.90^*$ の高い負の相関関係が認められた (第 3-2-5 図)。乳白粒の発生率には品種間差があるが、本試験で 3 品種を込みにしても高い相関が認められた点については、一つには 3 品種の来歴が比較的類似しているためでもあるが、粒重増加を登熟期間全体でなく初期のみでとらえたり、1 粒単位で比較すれば、「アキチカラ」にもこの関係は適用できるかもしれない。一方、多肥区で発生が少なかった点に関しては、本試験の多肥条件では籾数増加が少なく、一方で葉身窒素濃度が高まったために、特に登熟前半の乾物生産と乾物の穂への分配が良好であったためと推測される。

食味官能試験の総合評価値は、各品種ともに多肥区で不良であった。官能評価値とみかけの品質の関係は明らかではないが、「ハナエチゼン」、「ハウネンワセ」および「フクヒカリ」を込みにすると、従来の報告 (石間ら 1974) にあるように、玄米窒素濃度と官能評価値の間には $r = -0.99^{**}$ と 1%水準で有意な高い負の相関が認められた。一方「アキチカラ」では、玄米窒素濃度が低いにも関わらず官能評価値は不良で、他の 3 品種が示す回帰直線とは異なる傾向を示した (第 3-2-2 表, 第 3-2-6 図)。「アキチカラ」の食味官能値が低い理由は、外観やうま味の評価が低かったためで、窒素以外の要因、例えば澱粉特性や炊飯米の表面構造などが関与している可能性が示唆された。

したがって、早生品種の良質良食味特性として乳白粒発生率および玄米窒素濃度の低下を考慮するならば、物質生産面からは登熟期間の粒重増加速度が高く、しかも多肥条件での籾数増加が良好で、倒伏などによる受光態勢の悪化が少なく、玄米への窒素転流/籾重増加比が低い特性が必要と考えられる。本試験に限れば、1. に示したように登熟期間の平均 LAI が高く維持され、葉身や稈からの窒素の転流を少なくすることが有効である。これは基本的に多収穫と矛盾する結果ではなく、窒素の玄米生産効率 (村山 1982) を高めることとも密接に関連しているといえよう。一方、穂への同化産物の転流が多く窒素の転流は少ないが食味官能評価が不良な「アキチカラ」のような品種では、乾物生産効率を維持したうえで、米の澱粉特性や表面構造の改良を組み合わせる必要があると考えられる。なお、本試験に用いた品種数は 4 品種と少なく、籾数や窒素吸収量の差も小さいため、さらに幅広い試験条件や品種を比較することにより本報告の結果を実証する必要がある。

第3節 高温登熟条件下における品質安定のための生育要因

水稲品種「ハナエチゼン」は、福井農試で1991年に育成された、国内で成熟期が最も早い品種の一つである。倒伏に強いため栽培しやすく、収量も高く、しかも高温登熟条件でも品質低下が小さいなど、収量品質面で安定性が高い特徴がある（堀内ら1992）。このような特性を持つ品種について、単位面積あたり籾数の多少に伴う同化産物の配分の観点から、物質生産や1籾重増加の推移などシンクソースの関係に基づいて解析することは、品質の形成過程を知るとともに、さらに安定した品種を育成する上で重要と考えられる。そこで、登熟前半が梅雨の影響を受けやすいため年次により日射量の変動が大きく、しかも登熟気温が高い「ハナエチゼン」において、日射量と籾数の違いが見かけの品質や、食味評価と密接に関連している玄米窒素濃度に及ぼす影響について調査、解析した。また、見かけの品質については、乳白粒だけでなく背白粒や基白粒等の発生要因についても併せて解析した。加えて、その要因を明らかにすることも考慮して本研究を実施した。

【材料と方法】

早生品種「ハナエチゼン」を用いて1996～99年の4月下旬に移植し、主に施肥量の異なる試験区を設定した。施肥量については、標準施肥量をN成分で基肥6kg/10a、穂肥2+1kg/10a（以下標肥区と記す）とし、1996年は出穂前30日の穂肥早期施用区と基肥0で穂肥3+3kg/10aの後期重点区（生育量を小さくするため14株/m²の疎植条件で栽培）を、1997～99年は無肥料区および基肥9kg/10aに穂肥3+3kg/10aの多肥区（1997、1998年は生育量を大きくするため27株/m²の密植条件で栽培）、1997、1998年は基肥量0で穂肥3+3kg/10aの後期重点区、1999年は穂肥無施用区を設定した。各試験区は2区制で配置した。

遮光試験は1997～99年にかけて実施し、1997年は無肥、標肥区、1998、99年は無肥、標肥、多肥区にそれぞれ設定した。遮光時期は穂揃期から登熟前半の約20日間とし、遮光率は年次によって異なるが、38%を共通として15%、45%、54%、64%を組み合わせて実施した。試験区の詳細は第3-3-1表に示す。日射量の計算、解析には、福井地方気象台の日別全天日射量データを用い、遮光下の日射は携帯型日射計で実測して遮光率を求め、その比率で計算した。それぞれの試験区は2反復で実施した。

施肥試験区については、穂揃期、登熟中期、成熟期の各生育時期に、それぞれの区の平均穂数株3株をサンプリングして葉面積を測定するとともに、70℃で3日間乾燥させて部位別乾物重を測定して物質生産の解析に供した。また、1997～99年には部位別に粉碎してケルダール法により窒素濃度を求め、登熟期間中の窒素の動態を解析した。

1997～99年の遮光試験については、無遮光区も含めて約7日おきに株単位で穂をサンプリングし、穂重や籾重を調査した。施肥と遮光試験区では一次、二次枝梗別に籾を区分し、1籾重の推移を比較した。

品質調査は、収穫調製した玄米を1.8mm篩にかけ、それより上段を供試し、各区1,000粒を目視観察により分類した。玄米窒素濃度はNIRECO社製近赤外分光分析装置により測定した。

第 3-3-1 表 試験区構成

年次	施肥* (量および時期)	登熟前半遮光**
1996	標肥 (-20), 早期穂肥 (-30), 後期重点	—
1997	標肥, 無肥, 後期重点, 多肥	38%
1998	標肥, 無肥, 後期重点, 多肥	15, 38, 45%
1999	標肥, 無肥, 多肥, 無穂肥	38, 54, 64%

* 施肥試験区は 21 株/㎡ (無肥, 標肥, 多穂肥, 99 多肥) および 14 株/㎡ (96 の後期重点), 27 株/㎡ (97, 98 の多肥).

無肥: N成分 0kg/10a, 標肥: 6+2+1kg/10a, 無穂肥: 6+0+0kg/10a, 多穂肥: 6+3+3kg/10a, 多肥: 9+3+3kg/10a 1996~98 年の後期重点区は基肥 0+3+3kg/10a

** 遮光試験区は, 1997 年は無肥, 標肥, 1998, 99 年は無肥, 標肥, 多肥区に設定

【結果と考察】

1. 登熟期間の気象条件

「ハナエチゼン」の登熟期間の平均気温は 1999>96>97>98 年の順, 同期間の日射量は 1996>99>97>98 年の順となり, 1996 年がやや高温で多照年, 1997 年はほぼ平年並み, 1998 年がやや低温で寡照年, 1999 年が最も高温年であった. また, 1997 年は移植後の低温等の影響により, 水稻の茎数増加などの初期生育がやや緩慢であった.

2. 登熟期間の物質生産と窒素吸収

標肥区の穂揃期の地上部乾物重は, 727g/㎡ (1997) < 880g/㎡ (1996) < 912g/㎡ (1998) < 1007g/㎡ (1999) となり, この順で㎡あたり粒数も多くなった. 登熟前半の地上部 CGR は, 高温多照であった 1999 年が 22.6g/㎡/day で最も大きく, 寡照年次の 1998 年が 13.6g/㎡/day と最も小さかった. 登熟後半の地上部 CGR は, 日射量が安定していた 1996 年が 11.2g/㎡/day と最も大きく, 1997 年および 1999 年が 9.1g/㎡/day と最も小さかったが, 年次間の差は登熟前半より小さかった. 1997~99 年の窒素吸収量を比較すると, 穂揃期では地上部乾物重同様に 7.8g/㎡ (1997) < 8.7g/㎡ (1998) < 10.9g/㎡ (1999) の順となり, 成熟期にかけて 1.1~2.2g/㎡増加したが, 穂揃期の窒素吸収量が少ない年次ほど増加量が大きくなった. 穂揃期には葉身の窒素吸収量が 50%以上を占めており, 穂の窒素吸収量は 13~16%と少ないが, 成熟期には 70~79%を占めるようになり, 多量の窒素が葉身などから転流していた. これに対して, 無肥区では穂揃期の窒素吸収量は 4.4~6.1g/㎡と標肥区の 40~78%と少なく, 成熟期でも 5.2~8.1g/㎡と少なかった (第 3-3-2, 3-3-3 表).

3. 収量及び収量構成要素と見かけの品質

標準施肥区の㎡あたり粒数は, 1999>96>98>97 年の順となり, 最大最小で 8,200 粒/㎡の差とやや大きかった. 概ね穂揃期の地上部乾物重が大きい年次で多かった. 登熟歩合と千粒重は, ㎡あたり粒数が最も多く登熟期間が最も高温であった 1999 年でやや劣った. その結果, 収量は㎡あたり粒数と子実肥大が安定していた 1996 年が最も高くなり, 以下 1998>99>97 年の順となったが, 1997 年以外の年次の収量差は比較的小さかった.

見かけの品質への影響の大きい乳白粒発生率は、1999>98>97>96年の順となり、登熟期間の日射量の少ない年次や平均気温の高い年次でやや高まる傾向が認められた。玄米窒素濃度は、乳白粒発生率が低い1996年で1.22%と低かったが、それ以外の年次は大差なく、1.3%台前半であった（第3-3-3表）。

施肥試験区を込みにした場合には、 m^2 あたり粒数は1999年の無肥料区の最小19,900粒から同年の多肥区の36,900粒まで17,000粒の差が認められた。1999年以外の年次の施肥試験区の m^2 あたり粒数はこの範囲内であった。乳白粒の発生率は、最小値は1999、1998年の無肥料区の0.5%から最大値は1997年の標準区の11.1%まで10%以上の差が確認された。玄米窒素濃度は施肥量の増加に伴って高まった。無肥料区では1997~99年にかけてほぼ同様で1.17~1.18%であった。最も施肥量の多い多肥区では、1999年の1.52%を最高に1997年でも1.43%と高く、無肥料区との差は0.34%にも上った（第3-3-2表）。

4. 見かけの品質に関わる要因

1996年を除いた3年では、施肥試験区の m^2 あたり粒数と乳白粒発生率の間には1%水準で有意な正の相関関係が認められ、粒数が多い多肥条件ほど乳白粒発生率が高まった。しかし、回帰式は年次によって大きく異なり、相関係数が有意ではなかった1996年で回帰式の係数が最も小さく、1997>98>99年の順に回帰係数の傾きが大きくなった（第3-3-1図）。各年次で登熟期間の日射量が異なるため、 m^2 あたり粒数を登熟期間の日射量で除して日射量当たり粒数を求め、それと乳白粒発生率との関係を求めると、回帰式の年次間差をやや縮小することができた（第3-3-2図）。この結果は、登熟期間の日射環境や粒数あたりの日射量が乳白粒発生に大きな影響を及ぼすことを示している。

1997~99年の1粒重の推移を比較すると、各年ともに m^2 あたり粒数の少ない無肥料区で1粒重増加程度（以下GGR：Grain Growth Rateと記す）が大きく、粒数の多い多肥区で小さかった。また、登熟期間が高温で m^2 あたり粒数の最も多い1999年では登熟前半のGGRは大きい、登熟後半のGGRはやや緩慢となり、特に多肥区で成熟期の1粒重が他の年次より小さかった。

5. 遮光処理の影響

登熟前半に遮光処理を行うと、遮光率が高まるにつれてGGRが低下するとともに、最終的な1粒重もやや小さくなった。遮光処理を行った年次のうち、1999年は高温年であったが、1998年は低温寡照年であり、1粒重増加の様相は異なっていた。また、同様に乳白粒発生率にも違いが認められた。寡照年の1998年では、遮光率が15%程度では乳白粒の大きな増加は認められないが、38%になると著しく乳白粒発生率が増加し、45%の遮光率もほぼ同等であった。無肥料区の発生率は少ないが、標肥区と多肥区の差は小さかった。一方、多照年の1999年では、遮光率の増加に伴って乳白粒発生率も直線的に増加したが、遮光率54%までの乳白粒発生率は1998年よりも少なかった。遮光率64%でも無肥料区と多肥区の乳白粒発生率は1998年の遮光率45%よりも小さかった（第3-3-3図）。1998年と1999年の結果を解析すると、両年次ともにこの期間の登熟前半のGGRと乳白粒発生率にはそれぞれ1%、5%水準で有意な負の相関関係が認められた（第3-3-4図）。登熟期間の日射量が少なかった1998年のほうが回帰直線の傾きが大きく、乳白粒に及ぼす登熟前半のGGRの影響が大きいと考えられた。

第3-3-2表 標肥の登熟期間のCGRと窒素吸収の年次間比較

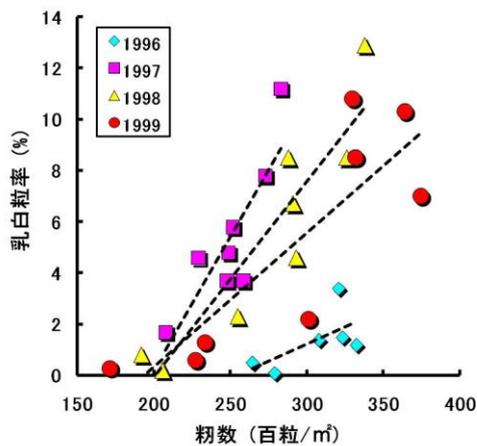
年次	登熟前半			登熟後半			窒素吸収量 (g/m ²)	
	地上部	穂	1 粒	地上部	穂	1 粒	穂揃期	成熟期
	(g/m ² /日)	(g/m ² /日)	(mg/日)	(g/m ² /日)	(g/m ² /日)	(mg/日)		
1996	22.6	38.6	1.17	9.1	6.3	0.19	--	--
1997	13.6	25.6	0.89	10.3	9.3	0.32	7.8	10.0
1998	20.8	26.1	1.05	9.1	9.7	0.39	8.7	10.0
1999	20.5	32.6	1.02	9.5	9.9	0.31	10.7	11.8

* 栽植密度 21 株/m², 施肥量 N 成分基肥 0.6+穂肥 0.2+0.1kg/a

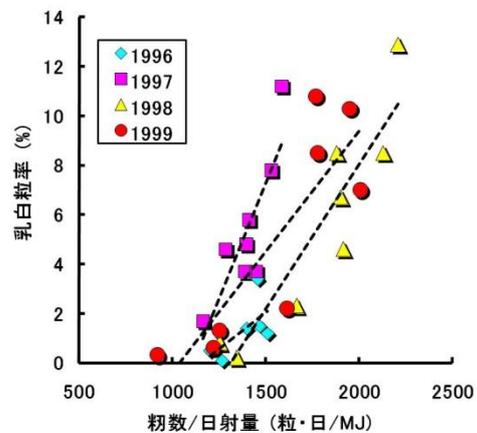
第3-3-3表 標肥の登熟期間の気象, 穂揃期の形態と収量および品質の年次間比較

年次	登熟期間		穂揃期		籾数 (百粒/m ²)	登熟 歩合 (%)	千粒重 (g)	精玄 米重 (g/m ²)	乳白粒 発生率 (%)	玄米窒素 濃度 (%)
	平均気温	日射量	乾物重	LAI						
	(°C)	(MJ/m ² /日)	(g/m ²)							
1996	28.1	22.0	902	5.3	321	93.3	21.8	648	1.9	1.21
1997	27.3	17.9	727	4.4	249	94.8	23.1	532	4.8	1.33
1998	26.8	15.3	913	4.2	289	94.2	22.9	625	7.6	1.34
1999	28.7	18.7	1008	5.0	331	89.0	20.5	618	9.7	1.31

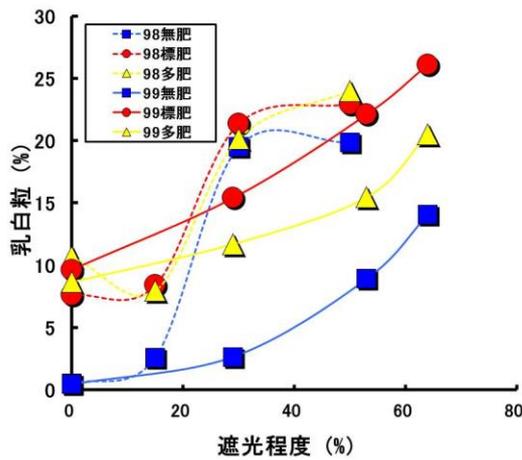
* 栽植密度 21 株/m², 施肥量 N 成分基肥 0.6+穂肥 0.2+0.1kg/a



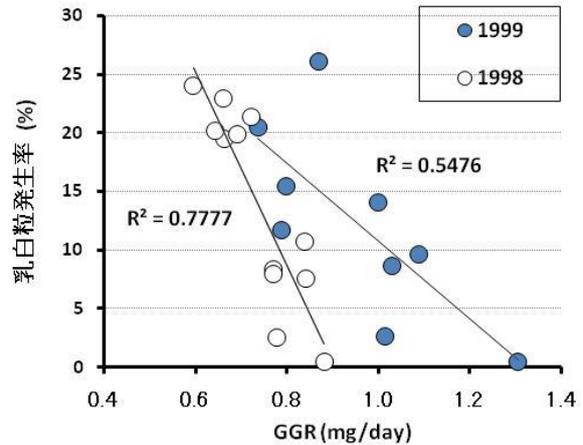
第3-3-1図 籾数と乳白粒の関係 (1996-99)



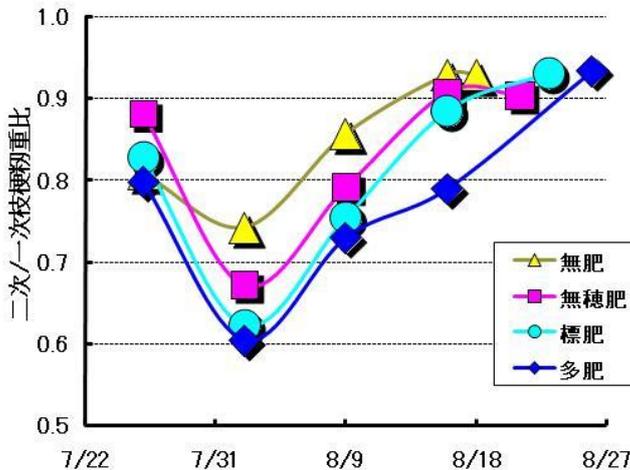
第3-3-2図 籾数/日射量と乳白粒の関係 (1996-99)



第3-3-3図 遮光程度と乳白粒発生率 (1998-99)



第3-3-4図 登熟前半のGGRと乳白粒の関係



第3-3-5図 二次/一次枝梗籾重比の推移 (1999 ハナイチゼン)

遮光に伴う玄米窒素濃度の変化を比較すると、いずれの施肥条件でも遮光率の増加につれて玄米窒素濃度も高まる傾向が認められた。無肥料区の無遮光条件と多肥区の64%遮光条件では、1998および1999年平均で0.6%と大きかった。乳白粒発生率と玄米窒素濃度の間には弱い正の相関関係が認められたが、これは遮光の影響が大きいためと推測される。

6. 着生枝梗別の1籾重増加の比較

1999年の籾を一次枝梗と二次枝梗に分けて1籾重の変化を比較した。二次枝梗より一次枝梗の籾数が多いが、二次枝梗/一次枝梗の籾数比は無肥料区で41.1%、無穂肥区で41.8%、標肥区で54.5%、多肥区で57.5%と施肥量の増加により二次枝梗籾の割合が増加した。同様に1籾重の推移を比較すると、登熟初期から二次枝梗籾より一次枝梗籾で粒重

増加が大きく、しかも籾数が多い多肥区は無肥料区より1籾重の増加が緩慢であった。登熟に伴う二次枝梗籾重/一次枝梗籾重比（以下二次/一次籾重比と記す）の推移は、出穂後10日頃までは一次枝梗籾の籾重増加が顕著であるため0.6~0.75に低下するが、その後二次枝梗籾への同化産物の配分が増加するため次第に増加する傾向が認められた。また、二次/一次籾重比は籾数が少ない無肥料区で大きく、籾数が多い多肥区で小さかった。成熟期の二次/一次籾重比はどの施肥量でもおおむね0.9程度となった（第3-3-5図）。

この年次の遮光処理を行った無肥料区、標肥区、多肥区で枝梗別の1籾重増加を比較すると、籾数が多い施肥量の多い試験区ほど、また遮光程度が大きくなるほど一次/二次籾重比が小さくなった。無遮光条件と比較しても、出穂後10日頃の二次/一次籾重比は38%遮光条件で0.53~0.7、64%遮光条件で0.47~0.64と小さく、成熟期の二次/一次籾重比も38%遮光条件で0.85~0.95、64%遮光条件で0.75~0.91となり、低日射条件では二次枝梗着生籾のGGRが緩慢となる傾向が顕著であった。

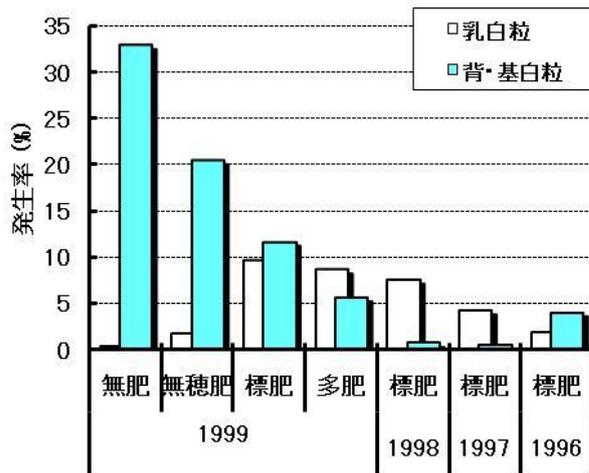
物質生産面から施肥量と乳白粒の関係を解析すると、遮光試験で見られたような登熟前半のGGRとの関係は明瞭ではなかった。これは、「ハナエチゼン」の登熟前半の籾重増加が各試験区ともに大きく、相対的に登熟歩合が高いためであり、乳白粒発生軽減のためには登熟後半までの粒重増加が円滑に進む範囲に籾数を制限することが効果的と考えられる。

7. 背白粒、基白粒の発生要因

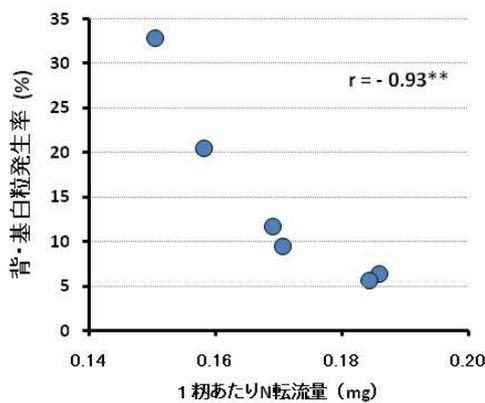
登熟期間の高温により、背白粒や基白粒の発生率が高まることが指摘されている。森田（2005）は、登熟期の平均気温の上昇によって、特に九州地方で一等米比率の低迷が顕著であることを報告している。加えて、若松ら（2008）も暖地水稻で窒素施肥量が背白米の発生に及ぼす影響について検討し、登熟温度28℃以上で多発すること、玄米タンパク質含有率との間に負の相関関係があること、玄米タンパク質含有率が6.0%を下回ると発生割合が増加することを報告している。九州以外の地域でも、寺島ら（2001）は1999年の全国的な高温により国内各地で米の品質が著しく低下した結果を解析し、東北、北陸地域では登熟前半の高温により、九州地域は加えて寡照条件が重なり乳白粒や背白粒が多発したことを報告し、高温耐性品種の育成や窒素栄養を考慮した栽培技術の見直しが必要であると指摘している。さらに、佐藤ら（2015）は玄米タンパク質含量と基部未熟粒率に負の相関関係を認め、玄米タンパク質含量が食味評価に影響する6.5%を上回らない条件で、出穂前3日のSPAD値が31以下の場合に窒素成分で1~2kg/10aの穂肥施用が基部未熟粒の発生抑制に有効であることを認めている。そこで、高温で発生の増加が著しい背白粒と基白粒の発生率を併せて登熟経過や窒素の挙動との関係を解析した。

最も高温年であった1999年には、標肥区で背基白粒の発生率は12.7%となり、調査を行った4年間で最も高かった。施肥量の異なる試験区では、無肥区や無穂肥区など施肥量が少ない試験区で明らかに背基白粒が多発し、多肥区では標肥区より発生率が低かった。登熟気温が低い1997、1998年の背基白粒発生率は、標肥区では0.6~0.8%と少なく、同年次の無肥区や多肥区でも大きな差は見られなかった（第3-3-6図）。

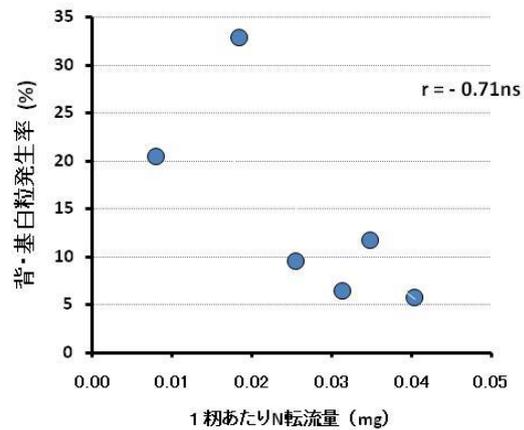
一方、遮光条件では、1997、1998年では施肥条件に関わらず無遮光区より背基白粒発生率の増加傾向が認められ、1~2%程度背基白粒が増加した。しかし、無遮光区の発生率が最も高かった1999年では遮光処理によって背基白粒の発生率が低下するとともに、遮光程度が大きくなるにつれて低下する傾向が認められた。1999年は遮光処理に伴う乳白粒



第3-3-6図 乳白粒, 背・基白粒の発生率



第3-3-7図 登熟前半の窒素転流と背・基白粒発生率の関係(1999)



第3-3-8図 登熟後半の窒素転流と背・基白粒発生率の関係(1999)

の発生率の増加が著しかったため、未熟粒の中で相対的に背基白粒の発生率が低下したと推測される。なお、1999年の完全粒の比率は遮光程度が大きくなるにつれて低下しており、これは乳白粒や背基白粒などを含めた未熟粒の発生率が増加したためである。施肥試験の中で完全粒の比率が最も高かったのは多肥区の78.3%であり、以下施肥量が減少するにつれて完全粒の比率が低下した。したがって、本試験でも森田(2005)や若松ら(2008)が指摘するように、高温登熟年次では施肥量がある程度多いほうが品質が向上するといえる。それぞれの施肥試験区の玄米窒素濃度は、他の年次同様に施肥量が多いほど高まっており、茎葉の窒素濃度も同様であった。そこで、登熟期間の1粒あたり窒素の転流量をみると、登熟前半では施肥量の増加とともに転流量も増加する傾向であり、登熟後半では標肥区と多肥区はほぼ同等であり、以下無肥区、無穂肥区の順となった。登熟後半の各区平均の窒素転流量は、登熟前半の同転流量の15%程度であり、玄米品質に及ぼす影響は登熟前半のほうが大きいと推測された。一方、無穂肥区は無肥区よりm²あたり粒数が多いために、登熟後半の1粒あたり窒素転流量は少なくなった。無穂肥区は無肥区より背基白粒の発生率が少ないため、この結果から判断すると、背基白粒の発生には先述したように登熟前半の

窒素転流量の影響の方が大きいと考えられる。さらに、登熟前半および登熟後半で、籾への窒素転流量と背基白粒の発生率の関係をみると、登熟前半のほうが相関係数が高いことから（第 3-3-7, 3-3-8 図）、窒素の影響は登熟前半のほうが大きいと推測される。

【摘 要】

登熟環境の異なる試験や登熟期間の遮光試験の結果の解析により、「ハナエチゼン」では登熟期間を通したあるいは登熟前半の 1 籾当たり日射量が乳白粒発生率の推定に有効であることがわかった。「ハナエチゼン」の登熟期間の日射量は安定して増加傾向にある。試験年次で最も日射量が少なかった 1998 年は、1974 年から 2017 年までの 40 年以上の中でも寡照年次の 10%に含まれ、しかも 1998 年より日射量が少ない年次の中で最も登熟気温が高かった。したがって、この年次の品質安定要因は他の年次にも適用可能と考えられる。登熟前半の寡照条件下でも、 m^2 あたり籾数を 25,000 粒以下とすることで、乳白粒発生率を 7%以下に抑制できることが明らかとなった。また、背白・基白粒の発生軽減のために、特に登熟前半の籾への窒素の転流が円滑に行えるよう不足のない適切な肥培管理が必要となる。

第4章 「コシヒカリ」の栽培条件が物質生産、収量品質に及ぼす影響

第1節 苗質が初期生育と収量品質に及ぼす影響

水稻の移植栽培にとって、健苗を育成することが非常に重要であり、福井農試においても19世紀より苗代灌水試験が実施されるなど、育苗に関しては100年を超える試験研究の歴史がある(福井農試2000)。従来の成苗移植体系に代わって稚苗機械移植栽培体系が確立される際には、稚苗の形態および発育の特徴が数多く研究調査されてきた。

星川(1975)は、稚苗とは機械移植のために育てる葉齢3.2の苗で、成苗より胚乳養分が残り、窒素含量が高いため発根、活着が良好で、分けつの発生も多く、このため低温条件での移植に優れ、早期栽培に適しているとしている。また、木根淵(1969, 1974)は、稚苗を「種子胚乳養分の利用と葉および根部の生理作用の2つの生理的機能によって生育する段階の稲苗」と定義し、育苗方法から本田生育までの幅広い研究を行っている。松浦・岩田(1973)は稚苗と成苗の生育を比較し、稚苗は出穂期以降の乾物重が大きく秋まさりの生育を示すが、登熟歩合が低下することを指摘した。さらに、今井ら(1979)も低温条件での初期生育安定のための育苗および本田管理法について研究し、育苗期の温度管理および窒素、リン酸追肥の重要性を指摘している。しかしながら、これらの研究は主に寒冷地の移植後が低温の条件で、いかに早く活着して初期生育を旺盛にし、生育量を増加させて多収穫を得るかとの視点を中心に行われているため、今日の良質良食味品種を用いた場合の生育過剰への対応や、品質食味への影響はあまり考慮されていない。また、根系に及ぼす影響や物質生産的な解析もそれほど行われていない。

一方、岩田(1986)は、福井県内の農家の育苗状態を調査した事例から、稚苗と中苗の区分があいまいな実態を指摘し、播種量が多くかつ育苗日数が長い苗では収量が低下しやすいため、育苗条件を適正化する必要性を強調している。今日の育苗の現場においては、共同育苗施設における育苗規模の拡大および省力化によって、丁寧な育苗管理が行えず、育苗施設によってさまざまな苗質の苗が農家に供給されている。しかし、苗質と初期生育や根系の形態、さらに収量のみならず品質食味要因との関係について、長期的かつ定量的に調査、解析した研究報告は極めて少ない。また、米の品質や食味向上に対する要望は強く、栽培的改善法が模索されているが、苗質との関連性を指摘する報告は少ない。

そこで、近年の気温の上昇傾向を視野に入れながら、苗質の変動が大きいコシヒカリを用いて、育苗条件を大きく異にした育苗管理を行い、苗質と初期生育の関係だけでなく、本田での根系に与える影響や、収量品質との関係についても調査した。この結果をもとに、実用的な良質良食味米生産のための、苗質に関する基礎資料を得ることも目的の一つとした。

【材料と方法】

気象変動が苗質や本田生育に及ぼす影響を考慮して、類似した設計で1997~1999年の3年間にわたり試験を実施した。いずれも供試品種としてコシヒカリを用い、4月上中旬播種、播種量は乾燥籾で120g/箱、苗箱あたり施肥量N, P₂O₅, K₂Oそれぞれ1.5g施用を標準区とし、播種量、施肥量、灌水量、育苗期間、育苗温度を変えた以下の各種試験区を設定した。なお、灌水については気象の日変動を考慮して経験的に決定し、毎日の灌水量を記録して育苗期間平均値で表示した。

1997年は4月15日に播種し、5月6日に苗質調査を行った。標準区のほかに、播種量を1/2の60g/箱とした疎播区、2倍量の240g/箱とした密播区、施肥量を0とした無肥料区、各成分2倍量の3.0g/箱とした多肥区、苗1葉期以降の灌水量を標準の63%とした少量灌水区、同様に標準の171%とした多量灌水区、播種期を9日早め、播種量を50gとして2回追肥を行った中苗区を設けた。また、播種量155g/箱で28日間育苗した老化苗区も調査に供した。

1998年は4月16日に播種し、5月6日に苗質調査を行った。多量灌水区に替えて、苗1葉期以降常時湛水条件で管理した湛水区を設定するとともに、苗1葉期以降農用ポリエチレンで二重被覆した高温区、4月1日に乾燥糞で120および200g/箱播種し、36日間育苗した老化苗区を追加して実施した。

1999年は4月9日に播種し、4月30日に苗質を調査した。中苗区および灌水試験区を省き、3月18日に乾燥糞で120および200g/箱播種し、43日間育苗した老化苗区を設けて継続実施した。

いずれの年次も床土は市販の粒状培土を用い、播種覆土後32℃で3日間加温出芽させ、ビニールハウス内に広げて管理した。ハウスに展開後2日間は不織布で被覆して緑化させ、それ以降設定条件以外は標準区と同様に温度、水を管理した。

各育苗試験区は、1区1/2箱または1箱の2区制で実施した。以上の試験区の概略を、第4-1-1表にとりまとめて示す。

苗質調査は、各区より14.9cm²の苗を円形に土ごとサンプリングし、土を丁寧に洗い流して、平均的苗20本を形態調査に供試するとともに、すべての苗を部位別に切断して、70℃3日間乾燥後乾物重を秤量した。

育苗期間中は、苗箱面の地上3cmに温度計（タバイエスペック社製ThermoRecorder,RT-10）を設置し、通風して気温を測定した（日本農業気象学会関東支部1988）。

各試験区の苗は、厳密に一株3本植えとし、栽植密度20.6株/m²で手植えた。移植時期は、1997、98年は5月6日、1999年は4月30日であった。本田施肥量は、窒素成分で基肥に0.3kg/a施用し、穂肥として0.2kg/aと0.1kg/aを出穂前18日と10日に分施した。本田では1区6.8~8.1m²とし、2~4区制で実施した。栽培管理は標準栽培に

第4-1-1表 試験区の概要

試験区	1997	1998	1999 ^{注)}	育苗の内容
標準区	○	○	○	120g/箱播20~21日間育苗
疎播区	○	○	○	60g/箱播
密播区	○	○	○	240g/箱播
無肥区	○	○	○	N, P, K 0g/箱
多肥区	○	○	○	N, P, K 3g/箱
少量灌水区	○	○	—	灌水量標準区の70%前後
湛水区	○	○	—	常時湛水あるいは多量灌水
高温区	—	○	○	二重被覆 気温標準+5℃
中苗区	○	○	—	50g/箱播 35日前後育苗
老化苗区	○	○	○	120~200g/箱 35~43日育苗

注) 1999年は各区に登熟期間落水区を設定

第4-1-2表 ハウス育苗期間*の気象条件

年次	外気温** (°C)	日射量** (MJ/m ² /日)	苗床面気温 (°C)
1997	15.8	17.6	15.6
1998	19.0	16.8	19.3
1999	14.2	15.8	16.4

*1997年：4.18～5.6 1998年：4.19～5.6 1999年：4.12～4.29

**福井地方気象台の平均値

第4-1-3表 苗質の比較

試験区	苗丈 (cm)	葉令	乾物重 (mg/本)				茎葉窒素	
			茎葉	根	籾殻	合計	濃度 (%)	保有量 (mg/本)
標準区③	12.4	2.4	12.3	3.9	5.9	22.1	4.1	0.51
疎播区③	114	+0.4	125	115	102	117	117	143
密播区③	104	-0.4	75	71	104	82	93	69
無肥区③	63	-0.4	67	101	116	86	46	30
多肥区③	103	0	102	59	106	96	124	125
少量灌水区②	65	-0.5	74	73	119	86	101	74
湛水区②	105	+0.3	104	75	101	98	98	101
高温区②	141	+0.3	75	56	94	77	105	78
中苗区②	131	+1.5	224	185	96	193	99	238
老化苗区③	124	+0.3	136	124	99	124	63	83
分散分析	**	**	**	**	*	**	**	**

注) 丸数字は試験年数. 標準区は3年間の平均値. 疎播区以下は試験年数平均値の標準区比, 差.

**、* はそれぞれ1%、5%水準で試験区間で有意差あり.

準じて行ったが、1999年には登熟期間の水管理に間断灌漑と落水処理を設け、苗質と登熟期間の水管理が主に品質に及ぼす影響について調査した。

本田での根系調査を3年間実施した。移植直後に直径13cm、深さ15cm、5mmメッシュの網筒を株を中心として埋め込み、6月中旬(1997～99年:各区2～4株)、穂揃期(1998年:各区4株)、成熟期(1999年:各区6株)にそれぞれ土ごと丁寧に掘り上げて外周を水洗した。表層より5cm毎に区切って網筒より出た根の本数を測定し、これをもとに地表面との角度別本数と比率を算出した。

収量及び収量構成要素は、各区40～60株を坪刈りし、粗玄米を1.8mm篩で選別して収量を算出するとともに、脱穀後の籾より千粒重を測定し、m²当たり籾数を算出した。また、坪刈りした部分の全穂数を数え、一穂籾数はm²当たり籾数と穂数より算出した。登熟歩合は1.06の比重選により求めた。

見かけの品質は、各区1000粒を目視により分類し、粒数比で表示した。玄米窒素濃度は、NIRECO社製インフラライザーを用いた近赤外分光分析により、苗茎葉の窒素濃度はケルダール法により分析した。

【結果と考察】

1. 苗質に及ぼす育苗条件の影響

ハウス育苗期間の外気温と日射量を第4-1-2表に示した。3年間ともに育苗期間の外気

第4-1-4表 移植後の平均気温と日射量*

年次	移植後7日間		移植～6月中旬**	
	平均気温	日射量	平均気温	日射量
	(°C)	(MJ/m ² /日)	(°C)	(MJ/m ² /日)
1997	19.5	19.1	19.6	16.7
1998	18.5	11.7	19.6	16.3
1999	15.8	22.4	19.3	19.0

* 福井地方気象台の値

**1997:5.6-6.17, 1998:5.6-6.18, 1999:4.30-6.21

第4-1-5表 初期生育の比較

試験区	6月上旬		6月中旬乾物重 (g/m ² , %)				LAI	CGR (g/m ² /日)
	草丈 (cm)	茎数 (本/m ²)	葉身	葉鞘	合計	葉身重比		
標準区③	32.1	14.9	54.5	70.9	125.4	43.4	1.3	2.7
疎播区③	106	117	126	136	132	96	126	133
密播区③	93	69	79	77	78	101	80	79
無肥区③	89	68	66	62	64	103	65	63
多肥区③	103	104	129	133	131	98	124	133
少量灌水区②	96	91	74	66	70	105	74	69
湛水区②	102	101	102	94	98	103	100	97
高温区②	87	33	47	45	46	102	45	47
中苗区②	110	104	144	152	149	96	131	148
老化苗区③	96	72	86	83	84	102	81	85
分散分析	ns	**	-	-	**	-	**	**

注) 丸数字は試験年数. 標準区は3年間 (6月上旬は1998, 1999の2年間) の平均値.

疎播区以下は試験年数平均値の標準区比. **は1%水準で有意差あり.

温は平年より高く、特に1998年は平年値より4°C以上も高かった。また、日射量もやや多かった。苗床面の気温は、保温と換気により外気温と同等かやや高く維持された。このため、3年間とも各試験区に病害等の障害は認められず、苗の生育は順調であった。

標準区の苗質を年次間で比較すると、育苗期間の平均気温が高い1998年の苗丈や乾物重が最も大きく、苗床面気温の低い1997年が小さかった。葉齢は1999年が最も進んでいた。苗の乾物重の違いは主に茎葉重の差が大きく、根や籾殻重の差は小さかった。

さまざまな試験区の苗質を供試年次で平均して比較すると、苗丈や乾物重は疎播区、中苗区および老化苗区で大きく、密播区、少量灌水区および無肥区で小さかった。多肥区および湛水区では苗丈が高く、茎葉重は良好だが根重が小さく、苗全体の乾物重では標準区をわずかに下回った。高温区でも苗丈は著しく大きい乾物重は小さく、特に根重が少なかった(第4-1-3表)。標準区を100とした場合、苗丈の試験区間差は63~141、乾物重の試験区間差は77~193と大きく変化した。また、葉令は標準区に対して-0.5~+1.5と2倍以上の差が認められた。

苗茎葉の窒素濃度は、標準区で平均4.1%、多肥区や疎播区では4.7~5.0%、無肥区では1.8%と差が大きかった。苗一本当たりの茎葉窒素保有量は、標準区の0.5mgに対して、

中苗では 1mg 以上、疎播区および多肥区では 0.6~0.7mg と大きく、無肥区では 0.1~0.2mg、密播区および少量灌水区では 0.3~0.4mg と小さかった。老化苗区では窒素濃度は低いが保有量は標準区と同程度で、高温区では乾物重は明らかに小さいが、窒素濃度は標準区より高く、窒素保有量は小さかった。各試験区は、窒素濃度、保有量ともに高い疎播区、多肥区、窒素濃度は高いが保有量の少ない高温区、窒素濃度が低く保有量が多い中苗区、標準区と同等か低い試験区に区分された。

以上のような移植前の苗質の違いは、実用場面でも想定できるほど範囲が広く、苗質が初期生育や収量品質に及ぼす影響の評価に適用できると考えられた。

2. 苗質が初期生育と根系形成に及ぼす影響

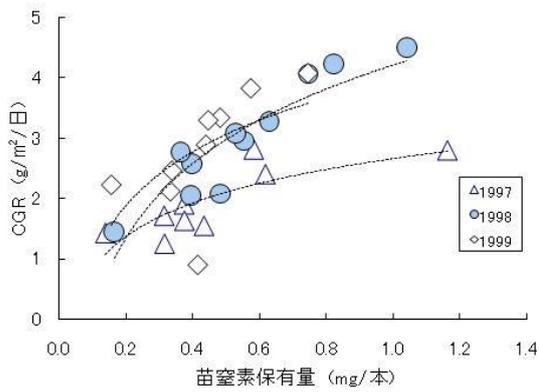
各年次ともに、移植後 7 日間の気温は平年並からやや高く、日射条件も 1998 年以外は良好で、1999 年の高温区を除いて活着は良好であった。6 月中旬までの平均気温は平年値の 19.0℃よりやや高く、日射量は 1999 年を除いてやや少なかった(第 4-1-4 表)。このため、一部試験区を除いて初期生育は順調であった。ただし、1999 年の高温区では活着が著しく不良で、枯死株が増加したため補植を 2 回行った。また、2 反復のうちの 1 区は試験区の 1/2 以上の株が枯死し、群落が成立しなかったため調査から除外した。

移植後の初期生育を 6 月上旬の茎数で比較すると、中苗区、疎播区などの苗乾物重が大きい区で明らかに標準区の生育を上回った。反面、高温区では著しく少なく、密播区、無肥区および老化苗区でも試験年次を通して標準区より 20%以上少なかった。茎葉の乾物重および LAI にも同様な傾向が認められ、中苗区、疎播区および多肥区では標準区を明らかに上回り、密播区、少量灌水区、無肥区および高温区では下回った。灌水区および老化苗区では標準区と同程度であった(第 4-1-5 表)。茎葉全体に占める葉身重の比率は、これら生育量の大きい区で低く、発育の早さが同化養分の配分に影響を及ぼしている点が示唆された。苗の窒素保有量と 6 月中旬までの乾物増加速度 (CGR) の間には、年次により傾きがやや異なる指数関数で表される高い正の相関関係が認められた(第 4-1-1 図)。

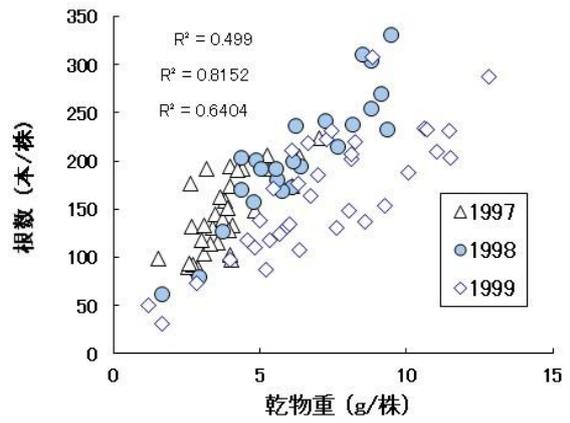
この時期の根系を年次間で比較すると、1998 年は茎数が少ないにもかかわらず根数が他の 2 年よりも多かった。これは 1 茎あたり根数が多かったためで、気象の影響は不明であった。また、1999 年は角度 38°以下の表層根の比率がやや低く、移植後の低温の影響と考えられた。

試験区間では、地上部の生育が旺盛な各区では茎数増加に伴い明らかに根数が多く、茎数や地上部乾物重との間に高い正の相関関係が認められた(第 4-1-2 図)。また、これらの区では 1 茎あたり根数も多かった。無肥区や高温区では、明らかに株当たり根数、1 茎根数ともに少なかった。発根部からの角度別の根数を比較すると、各区ともに 80%以上の根が地際より 57°以下の比較的浅い根であった。また、おおむね株あたり発根数が多い区で浅い層に分布する根の比率が高い傾向が認められた。灌水区では特徴的に浅い層に分布する根の比率が高いが、これは初期の発根力の違いによると考えられる(山田・太田 1957)。なお、老化苗区の根数や角度別分布には、標準区と大きな差は認められなかった(第 4-1-3 図)。

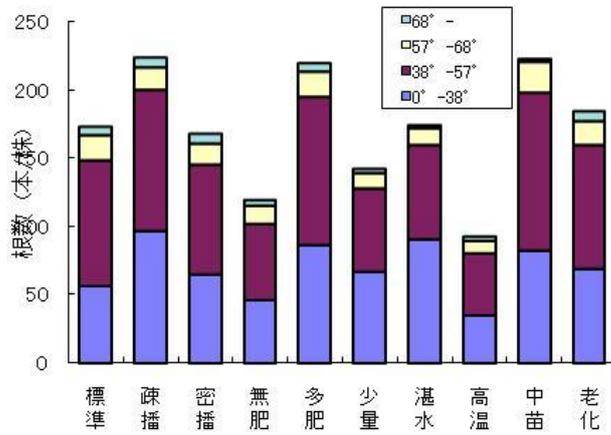
1998 年の穂揃期の根系を比較すると、穂数や地上部乾物重が多い試験区で根数が多い傾向は、6 月中旬の調査と共通していた。また、穂数と一穂当たり根数には負の相関が認



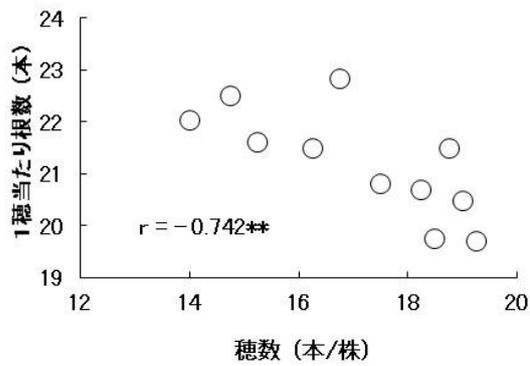
第4-1-1図 苗葉素保有量と生育初期CGRの関係



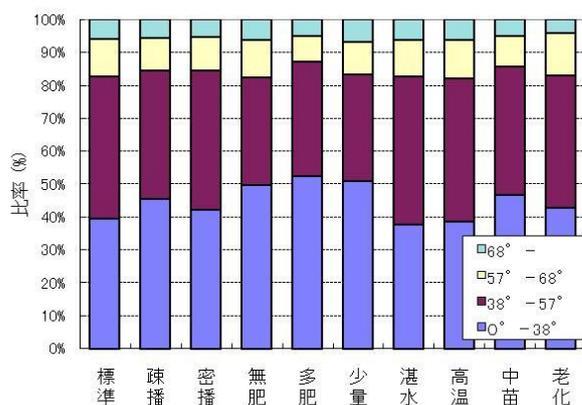
第4-1-2図 6月中旬の地上部重と根数の関係



第4-1-3図 角度別根数の分布 (1997-99:6月中旬)



第4-1-4図 穂数と一穂当たり根数の関係 (1998:穂前期)



第4-1-5図 角度別根数比率 (1998:穂揃期)

第4-1-6表 出穂，成熟期と倒伏程度

試験区	出穂期 (月日)	成熟期 (月日)	倒伏程度 (0-5)
標準区	7.30	9.09	3.1
疎播区	-1	0	+0.1
密播区	+1	+1	-0.3
無肥区	0	+1	+0.2
多肥区	0	0	0
少量灌水区	+1	+1	+0.4
灌水区	0	0	+0.1
高温区	+3	+2	-0.7
中苗区	-3	-4	-0.2
老化苗区	-1	-1	-0.5

注) 2～3年間の平均値および標準区に対する差。

められた (第 4-1-4 図)。さらに、根の角度別分布にもやや試験区間差が認められた。標準区では、株もとから 38°までの角度で伸長する表層根が約 40%，38～57°の角度の中層根が 40%，それより大きい角度の下層根が 20%であるが、穂数が多い区に加え、少量灌水区および無肥区において表層根の比率がやや高まり、下層根の比率が低下した。また、老化苗区で下層根の比率がやや高まった (第 4-1-5 図)。

1999 年に調査した成熟期の根数は、脱落により少なくなり、一穂当たり根数も 1998 年の穂揃期の 1/2 であった。しかし、角度別根数や一穂当たり根数の傾向は 1998 年の穂揃期とほぼ同様であり、無肥区、多肥区および老化苗区で一穂当たり根数が少なく、密播区、無肥区および高温区で表層根の比率がやや高まった。

3. 苗質が収量品質に及ぼす影響

出穂期は、移植時の葉令や活着の良否による差が認められ、中苗区で最大 4 日早まり、密播区や高温区で 2～3 日遅れた。成熟期についても同様な傾向が認められた。

第4-1-7表 収量構成要素の比較

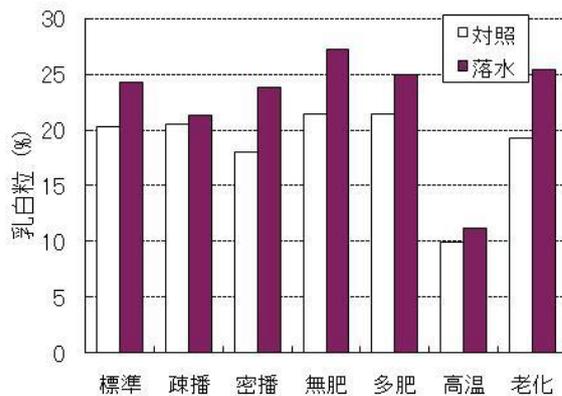
試験区	穂数 (本/m ²)	一穂粒数	m ² 粒数 (百粒)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	精玄米重 (g/m ²)
標準区③	375	90.4	337	86.9	21.5	626
疎播区③	105	98	101	101	100	102
密播区③	93	105	98	100	100	98
無肥区③	97	100	97	101	100	99
多肥区③	98	102	100	100	101	102
少量灌水区②	105	92	97	100	100	97
湛水区②	100	97	97	100	101	98
高温区②	83	116	94	100	100	94
中苗区②	100	93	93	102	101	97
老化苗区③	96	101	98	102	100	99
分散分析	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注) 丸数字は試験年数. 標準区は3年間の平均値. 疎播区以下は試験年数平均値の標準区比.
nsは有意差なし.

第4-1-8表 苗質の比較

試験区	完全粒	乳白粒	心白粒	腹白粒	褐色米	青米	その他	玄米窒素 濃度(%)
標準区③	73.6	13.8	1.0	2.9	2.9	3.8	2.1	1.354
疎播区③	99	107	88	103	96	92	93	99
密播区③	100	88	150	97	116	129	78	101
無肥区③	96	107	139	142	100	108	103	101
多肥区③	98	106	149	110	109	85	93	102
少量灌水区②	98	111	136	117	131	97	95	99
湛水区②	99	110	133	112	116	87	107	101
高温区②	107	70	139	70	135	171	42	103
中苗区②	100	116	82	102	130	55	147	101
老化苗区③	100	98	83	99	111	94	107	101
分散分析	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注) 丸数字は試験年数. 標準区は3年間の平均値. 疎播区以下は試験年数平均値の標準区比.
nsは有意差なし.



第4-1-6図 登熟期間の落水と乳白粒 (1999)

成熟期の倒伏程度を比較すると、1997年は各区とも倒伏程度が大きく、1998、99年は小さかった。試験区間の倒伏程度の違いは年次間で一定でなく、おおむね m^2 あたり籾数が多い試験区や、発育が遅れた少量灌水区や無肥区で倒伏程度が大きかった。穂数が少なく、発育も遅れた高温区や老化苗区では、倒伏程度もやや小さかった(第4-1-6表)。なお、1999年の登熟期間落水処理では、各区とも倒伏程度が増加した。

標準区の収量を比較すると、1999年と1997年は同程度で、1998年は $30\text{kg}/10\text{a}$ 少なかった。各年次の収量構成要素の特徴をみると、穂数には年次間で大きな差は認められず、一穂籾数は $1999 > 1997 > 1998$ の順であった。このため、 m^2 あたり籾数も同様に、1999年が最も多かった。登熟歩合は一穂籾数とは逆の順となり、千粒重は年次間差が小さかった。3年間の平均値で比較すると、試験区間の収量差は小さいものの、標準区の収量を上回ったのは疎播区と多肥区で、その他の区ではいずれも標準区を下回った。特に高温区、少量灌水区および中苗区でやや低下程度が大きかった(第4-1-7表)。

収量がやや高かった2区は、いずれも全重が重く、 m^2 あたり籾数あるいは千粒重がやや高かった。一方、収量がやや低かった試験区では、いずれも m^2 籾数が少なく、登熟歩合および千粒重はほぼ同程度であった。やや低収であった試験区の大部分は穂数、一穂籾数ともに標準区を下回り、初期生育が籾数確保に重要であることが明らかであった。

一方、みかけの品質を比較すると、完全粒の比率は1997年が最も良好で、1998、99年はいずれも不良であった。品質不良の両年次は、検査等級に大きな影響を及ぼす乳白粒の発生率がいずれも20%前後と高かった。完全粒率は、高温区を除いたすべての区が標準区と同等か1~4%下回った。乳白粒率も、高温区と密播区を除いて、いずれの試験区も標準区を上回った(第4-1-8表)。乳白粒の少ない両区では青米の発生率が高いことから、発育や登熟の遅れがかえって円滑な登熟をもたらした可能性が示唆される。また、特に1999年の高温区では、活着、初期生育が停滞した結果生育が遅れ、施肥条件が同一であったために秋まさりの生育経過をたどり、しかも m^2 当たり籾数が低下したことが乳白粒低下につながったと考えられる(井上2000)。

玄米中の窒素濃度は、本田施肥量がほぼ同じであったため、年次間で大差なかった。ただし、初期生育が停滞した1999年の高温区では、他の試験区より明らかに窒素濃度が高かった。それ以外の試験区間差も小さかったが、疎播区と少量灌水区が標準区より低下した以外は、いずれもわずかに高まる傾向が認められた(第4-1-8表)。このようなわずかな窒素濃度の違いが食味官能評価に及ぼす影響は小さいと考えられるが、初期生育が停滞するような苗質不良な苗を移植すると、同一施肥量では籾数あたりの窒素供給量が増加する可能性があると考えられる。

1999年に設定した登熟期間落水処理により、収量や収量構成要素には大きな影響は認められなかった。これは、登熟後半に定期的に降雨があったことなどにより、強度の水分ストレスを与えられなかったためである。しかし、見かけの品質を見ると、落水試験区すべての平均で完全粒歩合が5%低下し、乳白粒発生率が4%高まった。このことは、登熟歩合や千粒重に影響を及ぼさない程度の軽微な水分ストレスでも、登熟過程には影響が及ぶことを示している。

各試験区の間断灌水と落水条件の乳白粒発生率を比較すると、標準区では落水条件で3%の増加であったのに対して、密播区、無肥区および老化苗区では5%以上の増加であっ

た。疎播区や高温区では、増加率は小さかった（第 4-1-6 図）。完全粒の比率にも同様な結果が認められ、乳白粒が増加した試験区の完全粒率の低下程度はやや大きかった。この結果は、苗質の違いによる根系の違いが、登熟期間の軽微な水分ストレスの影響をより強く受け、見かけの品質を低下させる可能性を示していると考えられる。

【総合考察】

本試験では、さまざまな育苗管理によって、苗丈、葉令、茎葉乾物重および窒素保有量を大きく変えることができた。これらの苗質に関わる要素のうち、初期生育の良否に関連する 6 月中旬の茎葉乾物重や LAI との相関が最も高かったのは、苗の窒素保有量であった。初期生育期間の CGR を求め、窒素保有量との関係を見ると、それぞれの年次で高い正の相関が認められた。この結果は、佐藤ら（1979）が移植時の苗の窒素保有量が高いほど低節位の分げつ出現頻度が高く、移植後の LAI の増加が早まり、CGR が促進されるとした報告と同じであった。種田（1972）は、4 葉苗は 2 葉苗より活着、初期生育が遅れ、高次分げつが発生して登熟が低下するなど利点が少ないことを指摘しているが、本試験の中苗ではそのような問題はみられなかった。したがって、本田の初期生育向上のためには、いかに窒素を多く保有した大きな苗をつくるかが課題と考えられる。この点に関しては、橋川（1996）が指摘するように、箱当たり 120g 播きでもまだ播種量が多く、本試験の疎播苗のようにさらに減量することで、初期生育を良くすることは可能と考えられる。苗箱への多肥や追肥の施用も苗の窒素保有量を高める手段であり、松浦・青木（1973）も窒素施用による初期生育促進効果を認めている。

窒素保有量の大きい苗では、試験した 3 年間ともに 6 月中旬の乾物重全体に占める葉身重の比率がやや小さく、葉鞘・茎の比率が高かった。この点より、窒素保有量の大きい苗では初期の低節位からの分げつ発生が良好で、相対的に早い時期から茎への同化産物の蓄積が始まっていると考えられる。

一方、苗質と 6 月中旬の根系の関係は、茎葉の生育が旺盛な試験区では根数が多く、明らかに地上部と根の生育程度は密接に関連していた。しかし、この時期の角度別根数の違いは、主に発育の早さによって影響された（間脇 1988）と考えられ、活着および初期生育が良好な苗では分げつ数が多く、相対的に表層に分布する根数が多くなると考えられる。根系形成がほぼ終了する穂揃期でもこの傾向に大差ないが、一穂当たり根数は穂数が少ない株で多く、養水分の吸収と配分の観点からは、あまり多くの穂数を確保しないほうが品質向上の面で有利と考えられる。また、初期生育の不良な苗では穂数が少ないにも関わらずやや表層根の比率が高く、苗質の影響は生育後半まで及ぶ可能性が示唆される。

試験を実施した 3 年間のうち、明らかに苗質が原因で著しい減収となったのは 1999 年の高温区のみで、その他の年次や試験区では、収量に標準区比で 5% 以上の減収は認められなかった。この要因として、苗質、特に葉令や茎葉乾物重および窒素保有量の違いに起因する 6 月中旬までの初期生育の差は、出穂期までの生育を通して縮小し、 m^2 当たり粒数に与える影響は比較的小さかったためと考えられる。しかも、粒数がやや少なくなると、登熟歩合や千粒重がわずかに増加し、収量を補償する傾向にある。

青木ら（1973）は、早生品種の「ホウネンワセ」と晩生の「マンリョウ」を用いて継続して調査し、稚苗の苗素質が本田生育に及ぼす影響は初期の茎数に見られるが、徐々に差

がなくなり、成熟期頃には苗の素質との関係は解消したとしている。また、椛木・金(1991)、桐山(1994)も稚苗と乳苗の生育収量を比較し、稚苗に比べて苗の乾物重が小さい乳苗では、初期生育は劣るが m^2 当たり粒数は多く、同等の収量が得られることを報告している。このことは、本試験の無肥区や少量灌水区のような乳苗に近い苗で得られた結果とも一致する。反面、乾物重や窒素保有量の大きい苗では、肥培管理次第で生育が過剰となる可能性を示唆している。さらに小林・堀江(1994)は、単位面積当たり粒数は、幼穂分化期の窒素保有量だけでなく、幼穂形成期間の窒素含有率の上昇によっても影響を受けることを示している。本試験の結果は、苗質がやや不良で初期生育が遅れても、穂肥の適量施用により幼穂形成期間の窒素濃度を高く維持できれば、 m^2 あたり粒数への影響は比較的小さくなることを示唆している。このことは、移植後の気温や日射条件が良好であれば、苗質の差による初期生育の遅れが、「コシヒカリ」のような中生品種の収量に及ぼす影響は小さいことを示唆している。

乳白粒の発生率と m^2 当たり粒数(井上ら 1997)や登熟期間の1粒重増加速度(井上ら 1997, 井上 1999)との間には、高い負の相関関係が認められるとともに、高温(井上ら 1998, 井上ら 2000)や登熟期間の水分ストレス(井上ら 1998)および遮光処理(井上 2000)はいずれも乳白粒を増加させることが報告されている。さらに著者(井上 2000)は、「コシヒカリ」を用いた4年間のさまざまな栽培試験結果をとりまとめ、気象条件に関わらず安定的に乳白粒を7%以下とするためには、 m^2 あたり粒数を28,000粒以下に抑える必要があることを指摘した。

本試験の m^2 あたり粒数は、標準区で平均33,000粒以上と多いため、乳白粒も10%以上発生していたが、粒数が多い疎播区や多肥区以上に、粒数がやや少ない無肥区や少量灌水区および湛水区で乳白粒が多かった。また、これらの区では完全粒率もやや低く、登熟期間の落水処理による乳白粒の増加率も高かった。根系が浅い稲は登熟歩合が影響を受けやすいことも指摘されている(岩田ら 1984, 楠谷ら 1986)が、乳白粒の場合、それより弱い水分ストレスでも発生しやすくなると考えられる。なお、最も苗質が不良であった高温区では、初期生育が最も遅れ、それが穂数や m^2 あたり粒数に大きな影響を及ぼし、しかも施肥量が同等であったために生育後半まで葉色が濃く経過していた。このため、玄米窒素濃度は高まったが乳白粒の発生率は低く、見かけの品質は比較的良好であった。密播区でもやや類似した傾向が認められるとともに、登熟期間の落水処理により乳白粒の発生率は高まった。中苗区では、出穂期が早く最も高温条件での登熟となり乳白粒の発生率も高かった。したがって、苗質が劣る苗を移植した場合には、成熟期まで周到的な栽培管理が必要になると考えられる。

以上のように、苗質の違いは初期生育に明らかに影響を及ぼすが、移植後の気象や栽培管理が良好であれば出穂期頃までにその差は縮まり、 m^2 当たり粒数や収量の違いは小さかった。しかし、乳白粒など見かけの品質には苗質の影響が及びやすいことから、南北陸地域の高温年次には上位等級比率が低下しやすい(井上 1996)ことも指摘されていることとあわせて、健苗育成の意義は良質米生産にとっても重要と思われる。

【摘 要】

育苗時の播種量、施肥量、灌水量、育苗期間および育苗温度を変えた試験区を設定し、

稚苗の苗素質が移植後の初期生育や収量品質に及ぼす影響を明らかにするための試験を実施した。

苗の窒素保有量が多い中苗区，疎播区や多肥区では，活着および初期生育が良好であった。苗の窒素保有量と6月中旬の地上部乾物重やLAI（葉面積指数）の間には，高い正の相関関係が認められた。また，この時期の地上部乾物重と発根数にも同様な関係が認められるとともに，発根数が多いほど表層根の比率が高く，茎数が多いほど1茎あたり根数は少なかった。

移植後の気象が良好なことも関係し，苗質の違いによる収量，収量構成要素の差は比較的小さかったが，苗質良好な試験区の収量はわずかに高まった。一方，苗質不良な苗では， m^2 あたり籾数が少ないにもかかわらず乳白粒が多く，さらに登熟期間の落水処理による乳白粒発生率の増加程度もやや大きかった。

第2節 疎植条件が物質生産と収量品質に及ぼす影響

近年の気象の温暖化はさまざまな方面に影響を及ぼしているが、水稻の生育に関しても発育の早まりや品質の低下など生産面への影響が指摘されている(井上 2003, 月森 2003, 横山ら 2002). このうち、苗に関しては細植えが推奨され、稚苗育苗の播種量を減少させることによる苗質向上と植え付け本数を減らす指導(岩田 1986), さらに本田基肥施肥量の漸減により、幼穂形成期以降の「コシヒカリ」の草型が良くなり、倒伏が軽減されてきている(井上 1996, 井上・湯浅 2001). しかしながら、長期間にわたる作況試験の「コシヒカリ」の初期成育を比較すると、薄播きにより苗質は向上して活着が良くなっているが、初期の茎数増加が急速になり、生育中期にラグ期に似た生育停滞が見られるようになるなど、健苗育成だけが高温下でのイネの生育改善手法ではなくなっていることがわかる.

一方、米生産費や労力の低減の観点から、米の低コスト生産の必要性が指摘され、直播をはじめとする省力化を目的とした研究が推進されている. 直播栽培では育苗のコストや労力が軽減される利点は大きいですが、苗立ちの安定化や雑草のコントロール、生育制御、収量向上などの課題が多いことがさまざまな方面から指摘され、安定化のための研究開発とともに現地での実証が求められている(北倉 2003). これに対して、疎植栽培では使用苗箱数を減らすことができ、直播ほど大きくはないが容易に資材や労働時間を減少できる.

1950~60年代の栽植密度に関する研究(鈴木 1993)では、「深耕多肥密植」の言葉で簡潔に表すことができるように、資材多投による多収を目的とした研究が大部分で、密植による生育初期からの物質生産量と籾数の増加と、窒素吸収量の増大による穂数や籾数増加で多収をあげる研究に代表されてきた. このような研究では、数多い籾数の登熟と1粒重をいかにして高めるか、また登熟後半の根の活力をどう維持するかが課題であった(近藤ら 1962, 松浦ら 1969).

一方で、理論面からの栽植密度研究により、吉良ら(吉良・穂積 1958, 吉良 1961)が指摘する「最終収量一定の法則」に代表されるように、他の要因が一定であれば生物学的収量は密度に関係なく時間の経過とともに一定になることが論じられている. また、橋川ら(1996)も新たな視点から個体密度に関する研究を進めた. 晩生品種日本晴を用いて栽植密度が10株/m²以下でも収量低下は標準栽植密度の数%程度にとどまり、登熟歩合が高まることを明らかにするとともに、生育の安定性の観点から得るものが大きいことを指摘している. さらに、中国でも過去の反省と橋川らと同様な視点から、「稀少平栽培」(疎植、小さい苗の移植、平均的な肥効)の有用性が脚光を浴び、登熟を重視した栽培法により従来と同等以上の収量を得ていることが報告されている(蔣・姚 1988). このように、疎植条件でも収量低下は小さく、実際面では単位面積当たりの必要苗数を減らすことができ、田植機を調整するだけでほぼ目標とする栽植密度が得られるなど、直播栽培よりも農家を取り組みやすいことも利点である.

しかしながら、品種の早晩や草型の違いに加えて、栽植密度以外の施肥量など栽培法の違いも群落の物質生産や収量に影響しているため、異なる品種や地域の結果をそのまま各地に適用できるとは限らない. また、年次や気象条件まで考慮して栽植密度の優劣の違いを論じた報告は少なく、さらに品質にまで言及した事例も極めて少ない. そこで、疎植に重点を置き、品質向上および食味評価の視点も交えて、栽植密度を変えて栽培したコシヒカリの生育、

第4-2-1表 試験区の構成

年次	栽植密度 (株/m ²)	その他の処理
1996	11, 14, 21	各密度区に登熟前半, 後半の遮光処理
1997	11, 16, 21, 31	各密度区に登熟前半, 後半の遮光処理*
1998	14, 21, 28	各密度区に穂肥施用時期を組合せ (-20, -11と-32, -15)
1999	11, 14*, 21, 28	—

注) * の試験区では試験区では, 生育期間中の個体サンプリングを実施していない。

収量, 品質を, 生育中後期を中心に物質生産の面から調査, 解析した。さらに実験的に穂肥施用時期を変更したり, 遮光など不良登熟環境を与えた場合の反応などを解析して, 生育と品質の安定性の観点から疎植イネを論議したので報告する。

【材料と方法】

試験は, 1996年から1999年の4年間にわたり福井農試圃場(細粒強グライ土)において実施した。供試品種として中生品種の「コシヒカリ」を用い, 各年次で第4-2-1表に示す試験区を設定した。栽植密度条件は21株/m²(植付け間隔27cm×18cm)を標準とし, 疎植よりの試験区として各年次で11, 14, 16株/m²等の栽植密度の試験区を設定した。また, 比較のための密植試験区として28, 31株/m²の区を設定した。各試験区とも条間はいずれの栽植密度も27cmで一定とし, 株間を変更して栽植密度を設定した。1株当たり植え付け本数は3本とし, 葉令2.0~2.5の稚苗を手で移植した。遮光処理区は出穂期後5~7日より開始し, 出穂後18~22日頃までを登熟前半, それ以降成熟期までを登熟後半の処理とした。遮光区は4~6m²を寒冷紗で被覆し, 遮光率は試験年次によりやや異なるが, 35~38%とした。1区面積は30~35m²とし, 2区制で実施した。

施肥量は各栽植密度とも当場の標準量を施用した。すなわち, 化成肥料を用いて, 基肥として窒素成分で0.3 kg/a, 0.6 kg/a 全層に混和し, 穂肥として0.3 kg/aを0.2 kgと0.1 kgに分施した。第1回目穂肥施用時期は, 出穂前18日を目安とし, 第2回目施用時期は止葉の葉身が抽出した出穂前10日頃を目安とした。試験区により幼穂の発育はやや変動したが, 標準栽植密度にあわせて施用した。水管理や除草, 病虫害防除などの栽培管理は年次や試験区にかかわらず一律とし, サンプリング時期や収穫時期のみを試験区の発育状態に応じて変更した。

生育状態の調査は幼穂形成期以降を中心に実施した。基本となる試験区では, 幼穂形成期, 穂揃期, 登熟中期(出穂期後15~20日), 成熟期の4回, 茎数や穂数が平均的な株3~5株を根を除いてサンプリングし, 部位別に分別して葉面積および乾物重を測定した。また, 粉碎した部位別乾物サンプルをケルダール法にて全窒素分析に供試した。試験区によっては穂揃期後約7日おきに穂をサンプリングし, 1穂重や1籾重を測定した。

成熟期には各区3~4.5 m²を坪刈りし, 架干し乾燥, 脱穀調製後常法により収量および収量構成要素を算出した。収量は, 粒厚1.8 mm以上の玄米から算出した。粒厚選別後の玄米各区1,000粒を目視により品質調査に供試するとともに, 近赤外分光分析(NIRsystem社製 model 6500)により玄米中の窒素濃度を測定した。さらに, 竹生ら(1987)の方法により食味官能試験を実施した。

【結果と考察】

1. 試験年次の気象条件と作柄概要

試験を実施した4年間では、稲作期間の気象条件の違いは大きかった。1996年は、5月上中旬と8月下旬以降を除いて高温多照年で、幼穂形成期間や登熟前半の気象条件はイネにとって好適であった。作柄面では収量品質ともに良好であった。1997年は寒暖の変動が大きく、5月下旬および7月中旬にやや低温となり日射量も少なかった。作柄は、収量は平年並み、品質は良好であった。1998年は育苗期間の気温が高く、苗質が低下した。また、6月下旬以降登熟期間の日射量が少なく、収量品質ともにやや低下した。1999年は特徴的で、7月上中旬は低温寡照、7月下～8月上旬は著しく高温であった。このため、収量はやや良好であったが品質は著しく低下した（図省略）。

以上のように、イネの登熟にとって1996、1997年の気象は概ね好適であったが、1998年は寡照の影響を、1999年は出穂から登熟初期に高温の影響をそれぞれ強く受け、特に品質が大きく変動した。

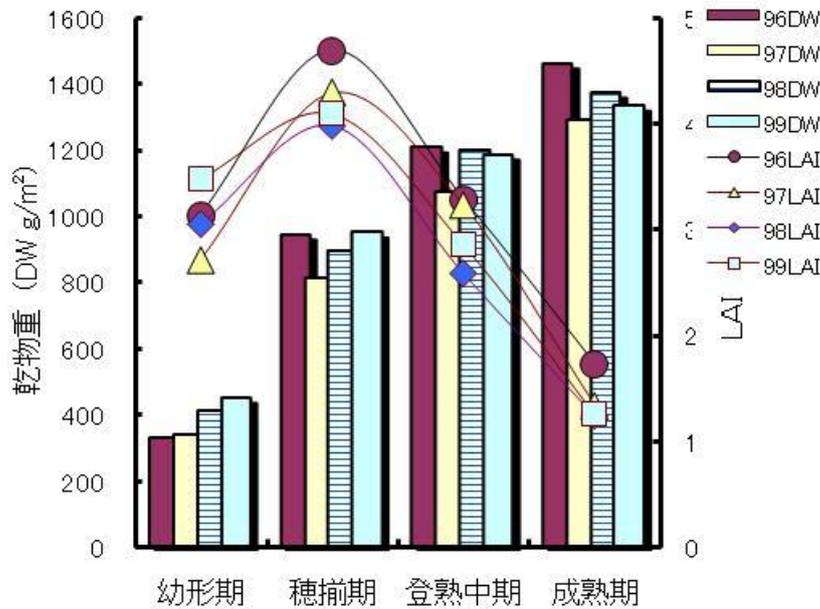
標準栽植密度の地上部乾物重の増加過程を年次間で比較すると、1996、1997年で初期生育が小さく、1999年は旺盛であった。穂揃期には差がやや縮小したが、1997年のみ他の年次より小さかった。成熟期の乾物重は、1996>1998>1999>1997の順となり1996年の生育中後期の乾物増加量は大きかった。（第4-2-1図）。これは、発育状態と気象条件の違いに基づく差と考えられる。葉面積指数（以下LAIと記す）も乾物重とほぼ同様に推移した。穂揃期の最大LAIは、標準密度で4.0～4.6で、年次間差はやや大きかったがどの年次も過繁茂な生育状態ではなかった。成熟期のLAIは1.0～1.8で、最大LAI同様にやや年次差が大きかった（第4-2-1図）。

2. 栽植密度が物質生産に及ぼす影響

栽植密度の低下により、明らかに幼穂形成期の乾物生産量は小さくなった。幼穂形成期の乾物重は、11株/m²の密度（以下疎植Ⅰ区と記す）では、標準より約20～33%、14～16株/m²の密度（以下疎植Ⅱ区と記す）では約2～13%それぞれ少なく、初期成育が停滞した年次で差が拡大した。この時期の密植条件（以下密植区と記す）では、標準比-1～+18%と同等か大きく、栽植密度の差が顕著に現れた。穂揃期においても、疎植条件で乾物重が小さい傾向は変わらないが、幼穂形成期間の乾物増加量が疎植条件ほど大きいために、栽植密度間の差は小さくなった。登熟中期および成熟期の3年間平均値で比較すると、疎植Ⅰ区では登熟中期に標準比89%、成熟期は94%、疎植Ⅱ区では登熟中期、成熟期ともに98%であった。密植区では登熟中期102%、成熟期は100%とほぼ標準密度と同等の乾物重にとどまった（第4-2-2表）。

疎植条件の部位別乾物重の特徴は、幼穂形成期では葉身重の占める比率がやや高く、登熟期間では穂重の占める比率が高い点である。登熟中期以降には葉身重の占める比率はやや低下する年次もある。それは、特に両品種ともに登熟良好年次で顕著であり、登熟がやや緩慢となる寡照条件や高温条件では判然としなかった。

LAIは年次間差が大きかった。疎植条件では概ね幼穂形成期頃までは地上部乾物重より大きな標準比を示した。しかし、登熟期間の傾向は年次によって異なり、好適登熟条件であった1996、1997年では葉身の枯れ上がりが大きく標準比が低下し、不良登熟条件の



第4-2-1図 乾物重とLAIの年次間比較

第4-2-2表 時期別乾物重 (DW:g/m²) とLAIの比較 (1996~99平均)

栽植密度	年数	幼穂形成期		穂揃期		登熟中期		成熟期	
		DW	LAI	DW	LAI	DW	LAI	DW	LAI
疎植 I	3	74	76	90	83	89	87	94	91
疎植 II	3	91	94	96	94	98	98	98	91
標準	4	383	3.1	901	4.3	1167	3.0	1365	1.4
密植	3	107	107	103	105	102	105	100	100
分散分析		*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注) 標準区は4年平均の実数。その他の密度は試験年次の標準区比の平均値。

* は試験区間で5%水準で有意差あり。ns は有意差なし。

第4-2-3表 時期別CGRとEGR, GGRの比較 (1996~99平均)

栽植密度	年数	幼穂形成期間		登熟前半			登熟後半		
		CGR		CGR	EGR	GGR	CGR	EGR	GGR
		(g/m²/日)		(g/m²/日)	(g/m²/日)	(mg/粒/日)	(g/m²/日)	(g/m²/日)	(mg/粒/日)
疎植 I	3	99	89	91	97	112	101	108	
疎植 II	3	99	104	101	102	95	95	96	
標準	4	20.4	17.7	26.7	0.88	9.0	8.3	0.27	
密植	3	100	99	103	102	94	96	94	
分散分析		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	

注) 標準区は4年平均の実数。その他の密度は試験年次の標準区比の平均値。ns は有意差なし。

1998, 1999 年ではむしろ高まった (第 4-2-2 表)。

乾物重増加速度 (Crop Growth Rate : 以下 CGR と記す) は, ある時点の生育量が相対的に小さく, その後の窒素吸収同化量が大きいほど高まる傾向がある。施肥量が同一であれば, 日射量が多い条件では CGR は大きい。幼穂形成期間の CGR は日射量が多い 1996 年, 1999 年で大きかった。栽植密度間でほとんど差が認められなかった。登熟期間を二分すると, 登熟前半の CGR は疎植 I 区では小さく, 疎植 II 区や密植区では標準区と大差なかった。穂重増加速度 (Ear Growth Rate : 以下 EGR と記す) や 1 籾重の増加速度 (Grain Growth Rate : 以下 GGR と記す) も同様な傾向を示した。反面, 登熟後半では登熟前半と逆の傾向を示し, 疎植 I 区で CGR, EGR, GGR とともに大きかった (第 4-2-3 表)。

登熟良好であった 1996 年の 1 籾あたりの粒重増加の推移を見ても, 第 3 表の GGR とほぼ同様な傾向が示された。すなわち, 疎植区の登熟初期の 1 籾重の増加はやや緩慢であるが, 出穂後 20 日頃より標準区の 1 籾重に近づき, 成熟期には栽植密度の差はきわめて小さくなった。着生枝梗別に見ても, 一次枝梗, 二次枝梗にかかわらず疎植条件では着生籾の登熟初期の粒重増加が緩慢であり, 二次枝梗着生籾のほうが標準区に近づくのに日数を要した (第 4-2-2 図)。通常, 疎植条件では穂数が少なく一穂籾数が多いため二次枝梗着生籾の比率が高い。したがって, 同化産物の配分の視点から見て, 1 日あたりの二次枝梗着生籾への同化産物供給量が少なくなり, 反面葉身窒素濃度が高く維持されることから登熟後半まで粒重増加が継続すると考えられる。

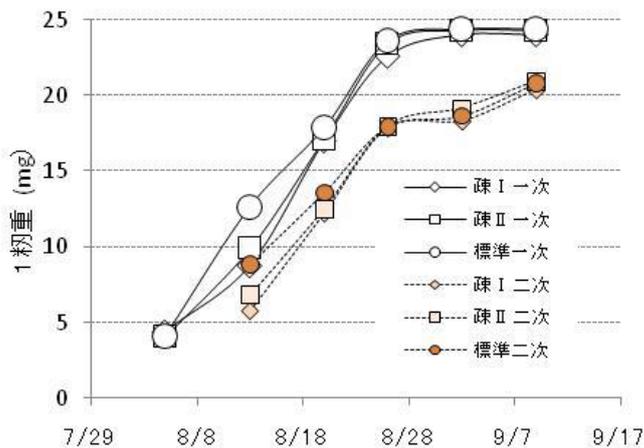
次に, 窒素濃度の推移を比較すると, 疎植条件では葉身窒素濃度が常に高く推移した。密植区では登熟中期までは低かった。疎植条件の成熟期の葉身窒素保有量は登熟良好年次では低く, 登熟不良年次では逆に高くなり, 気象や登熟条件によって変動した。

成熟期の地上部窒素吸収量は, 登熟期間の多照年次や幼穂形成期の乾物重が小さい年次で大きく, 年次によって 9.2~11.8 kg/10a と 2.6 kg/10a の差が認められた。疎植条件ほど少ないが, 発育に伴い標準区との差は小さくなった。密植区では標準区とほぼ大差なく推移した。この結果は, 疎植条件ほど登熟期間の窒素吸収量が多いことを示している (第 4-2-4 表)。したがって, 疎植条件で秋まき型生育パターンとなりやすいと考えられる。

3. 栽植密度が収量および品質に及ぼす影響

試験年次の標準密度の収量は, 1996 年が 65.4 kg/a と最も多収であり, 以下 1999, 97, 98 年の順となった。多収年次と低収年次の収量差は 9.3 kg/a と大きかった。本試験の収量の年次間差は, 概ね福井県全体の作柄の傾向と一致していた。m²あたり籾数も収量と同様な傾向を示し, 登熟環境が良好であった年次で収量が高かった。低収の 1997 年は籾数も最も少なく, 高温登熟となった 1999 年は m²籾数は最も多かったが登熟歩合と千粒重の低下により収量はやや低下した。

栽植密度と収量の関係を比較すると, 疎植 I 区で標準比 91~96%, 疎植 II 区で 96~101%, 密植区で 98~103% となり, 密植ほど収量が高まった。収量構成要素では, 穂数については密植ほど明らかに増加したが, 一穂籾数は疎植条件ほど増加し, m²あたり籾数は疎植 I 区で標準比 90~98%, 疎植 II 区で 94~100%, 密植区で 97~103% で収量とよく似た傾向を示した。登熟歩合は日射良好な年次では疎植条件でわずかに高まったが, その他の年次は大差なく, 千粒重も含めた登熟関連の要素に大きな差は認められなかった。



第4-2-2図 枝梗別1穂重の推移
(1996:コシヒカリ)

第4-2-4表 時期別葉身窒素濃度と地上部窒素吸収量の比較 (1996~99平均)

栽植密度	年数	幼穂形成期		穂揃期		登熟中期		成熟期	
		葉身N%	Nabs	葉身N%	Nabs	葉身N%	Nabs	葉身N%	Nabs
疎植Ⅰ	3	113*	84*	104	91	108	94	105	97
疎植Ⅱ	3	101*	95*	103	98	103	98	105	104
標準	4	2.34*	5.49*	2.33	9.09	1.64	9.79	1.24	10.65
密植	3	95*	101*	93	94	94	99	102	100
分散分析		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注) 標準区は4年平均の実数. その他の密度は試験年次の標準区比の平均値.

* 印は1997~99年の平均値で, 各区ともに1年少ない. nsは有意差なし.

第4-2-5表 収量及び収量構成要素の比較 (1996-99)

栽植密度	年数	穂数	一穂粒数	m ² 粒数	登熟歩合	千粒重	精玄米重
		(本/m ²)	(粒)	(百粒)	(%)	(g)	(kg/a)
疎植Ⅰ	3	81	117	94	101	99	93
疎植Ⅱ	4	94	105	99	100	99	98
標準	4	361	84.4	305	89.0	22.1	59.8
密植	3	109	93	101	99	100	100
分散分析		**	**	ns	ns	ns	ns

注) 標準区は4年平均の実数. その他の密度は試験年次の標準区比の平均値.

**は1%水準で有意差あり. nsは有意差なし.

第4-2-6表 見かけの品質と玄米窒素濃度の比較 (1996-99)

栽植密度	年数	完全米 (%)	乳白米 (%)	心白米 (%)	腹白米 (%)	背白・基白米 (%)	茶米 (%)	青米 (%)	玄米窒素濃度 (%)	食味官能評価値
疎植 I	3	105	72	78	86	60	116	96	99	+0.10(3)
疎植 II	4	101	90	62	113	87	98	120	100	+0.13(2)
標準	4	78.8	10.0	1.0	2.8	1.0	3.0	3.1	1.29	0
密植	3	96	125	111	81	134	89	112	101	+0.26(3)
分散分析		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-

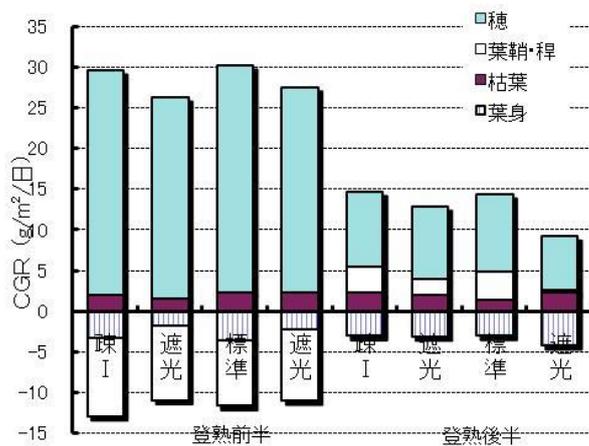
注) 標準区は4年平均の実数. その他の密度は試験年次の標準区比の平均値. nsは有意差なし.

* 食味官能評価値は標準区を0とした場合の差の平均値. ()内は調査年数.

第4-2-7表 穂肥早期施用の効果 (1998)

栽植密度	穂肥時期	倒伏程度	穂数 (本/m ²)	一穂粒数 (粒)	m ² 粒数 (百粒)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	精玄米重 (kg/a)	完全米 (%)	乳白米 (%)	玄米窒素濃度 (%)
疎植 II	標	1.8	327	88.5	289	88.0	22.1	55.3	68.0	13.5	1.28
	早	3.9	100	108	107	101	95	102	108	86	98
標準	標	1.8	344	84.0	290	88.5	22.2	56.1	72.3	13.9	1.22
	早	4.2	109	101	109	100	94	102	99	114	96
密植	標	2.1	371	80.6	299	87.2	22.1	57.7	64.4	21.8	1.28
	早	4.8	101	107	108	96	95	96	111	74	98

注) 標区は実数. 早区は倒伏程度を除いて同じ栽植密度の標区比.



第4-2-5図 登熟前半の遮光とCGR (1996 コシカリ)

試験年次で平均すると、わずかに疎植条件で登熟歩合が高まり、千粒重が低下した(第4-2-5表)。

以上の結果より、同一施肥条件で栽植密度の増加により m^2 あたり粒数が増加し、わずかではあるが収量も高まることが明らかとなった。しかし、その収量差は10%以下と小さく、21株/ m^2 より20~30%程度の疎植条件では有意差があるほど減収しなかった。

玄米の見かけの品質は、登熟期間の多照年次では良好で、寡照年次の1998年で著しく低下した。4年間の平均値で見ると、品質に影響する被害粒としては、乳白米の比率が高かった。粒数と千粒重がやや減少する疎植条件で完全米の比率が高まり、乳白米、心白米・背白・基白米などが減少し、栽植密度が低いほどその効果が大きかった。密植区ではその逆の傾向を示した。

玄米窒素濃度は、疎植でわずかに低下したが顕著な差ではなかった。各試験区の玄米を食味官能試験に供試したところ、わずかであるが密植区で官能評価値が高まり、疎植区では標準区とほぼ同程度の食味評価であった(第4-2-6表)。

4. 施肥および遮光条件の影響

1) 施肥時期および施肥配分の影響

「コシヒカリ」の穂肥早期化の効果は、物質生産面からは試験年次の幼穂形成期以降の日射量不足によりそれほど大きく現れなかった。密植条件ほど施肥効果が早い時期より現れ、施肥時期間の乾物重の差も早く現れたが、成熟期の差はほとんどみられなかった。むしろ疎植条件の方が登熟期間に乾物重がゆっくりと増加し、施肥時期による成熟期乾物重の差はほとんど見られなかった。

穂肥の早期化により倒伏程度が大きくなった。また、いずれの栽植密度でも m^2 あたり粒数は標準施肥区に比べ7~9%増加した。登熟歩合は密植以外は大差ないものの、穂肥の早期化により千粒重が1g以上低下し、収量の試験区間差も最大4%と小さかった。疎植では穂肥の早期化により収量が2%向上したが、密植では倒伏による登熟歩合の低下により標準施肥より低収となった。穂肥早期化により千粒重が小さくなったこともあり、この年の登熟期間の寡照下でも乳白米、心白米、腹白米などの発生率はやや低下し、玄米窒素濃度もわずかに低下した。各試験区の中で、疎植で穂肥を早期施用した区の品質が最も良好であった(第4-2-7表)。

2) 登熟前半、後半の遮光の影響

1996、1997年に各栽植密度で登熟前半、後半の遮光の影響を比較した。

登熟期間の遮光により地上部乾物重の増加速度がやや低下するが、それ以上に変化が大きかったのは同化産物の転流で、特に登熟前半の遮光により葉身重の減少が少なく穂重の増加が緩慢となった。無遮光区と遮光区の成熟期の乾物重を比較すると、栽植密度が小さいほど遮光による低下率が少なく、登熟前半の遮光の影響が登熟後半よりも大きかった(第4-2-3図)。これは、疎植条件ほど登熟前半のCGRが小さく、反面後半のCGRが高いことと関連していると考えられる。

各試験区を込みにした遮光による減収程度は、1996年で無遮光区比10~20%、1997年で同0~5%で、1997年の減収程度は小さかった。登熟前、後半の減収程度を比較すると、1996年では疎植I区を除いて登熟前半の減収程度が大きく、1997年では時期の差は顕著

でなかった。これは、籾数レベルが1996年では3.0~3.3万粒/m²とやや多いのに対して、1997年では2.7~3.0万粒/m²と少なく、無遮光条件の収量にも10kg/a近い差が生じていたことによると考えられる。つまり、籾数が多く登熟歩合や千粒重が高かった1996年のイネは、遮光の影響をより強く受けたと見ることができる。2年間を平均すると、m²あたり籾数が少ない疎植I区では登熟前半の遮光による減収程度が5%少なく、日射量不足条件での登熟が安定していると考えられた(第4-2-8表)。

遮光により各試験区の見かけの品質は低下し、登熟前半の処理および籾数が多かった1996年の処理で顕著に完全米比率が低下した。品質低下が大きかった1996年の登熟前半処理では、完全米の比率は13~20%低下し、乳白米比率が6~11%、腹白米比率が2~5%それぞれ増加した。反面、1997年の登熟後半処理では品質低下は数%程度と小さかった。疎植条件では、特に登熟前半処理で乳白発生率がやや小さかったが、疎植I区では登熟後半処理で増加し、腹白米比率も高まった。年次間で栽植密度や遮光処理の効果が異なっただのは、籾数の多少の影響が大きかったためと考えられる。玄米窒素濃度も遮光処理により高まり、登熟前半の処理で顕著であった(第4-2-8表)。

松中ら(1998)は登熟初期の遮光による弱勢穎花の生長停滞は、強勢穎花を優先的に登熟させる自己防衛的戦略の意義があると示唆している。しかし、m²あたり籾数がやや少なく、しかも粒重増加速度がやや小さい疎植条件では、弱勢穎花に及ぼす遮光の影響がやや緩和されると考えられる。

第4-2-8表 登熟期間の遮光処理と収量構成要素、見かけの品質 (1996, 97平均)

栽植 密度	遮光 処理	m ² 籾数 (百粒)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	精玄米重 (kg/a)	対照比 (%)	完全米 (%)	乳白米 (%)	標準対照 比(%)	玄米窒素 濃度(%)
疎植 I	対照	287	91.0	22.1	57.8	100	85.4	5.7	70	1.28
	前半	293	83.8	21.5	53.0	92	69.6	13.6	166	1.40
	後半	278	85.4	21.8	52.1	90	75.3	10.7	130	1.36
疎植 II	対照	306	90.6	22.1	61.2	100	84.3	7.6	93	1.29
	前半	302	83.3	21.3	54.0	88	67.8	17.5	213	1.41
	後半	309	85.0	21.4	55.7	91	80.7	9.1	111	1.36
標準	対照	312	89.3	22.1	61.7	100	81.0	8.2	100	1.32
	前半	300	82.7	21.4	53.5	87	67.3	19.0	232	1.44
	後半	311	84.6	21.4	56.2	91	79.5	10.4	127	1.34
栽植密度		**	*	ns	ns		ns	ns		ns
遮光		ns	ns	ns	ns		*	**		*

注) **, *は分散分析により1%, 5%水準で有意差あり。ns は有意差なし。

【総合考察】

1. 物質生産と収量に及ぼす影響

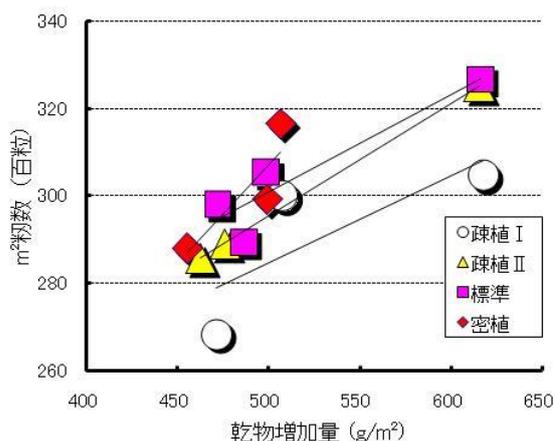
栽植密度に関する試験は、これまでさまざまな地域、品種、栽培法で実施されたデータの蓄積があるが、疎植に着目して実施された研究例は少ない。これは、疎植条件では移植時の面積あたり植え付け本数が少なく、乾物生産量も小さいため多収を目的とする物質生産面からは不利であるためである。しかし、必ずしも密植条件で多収となる報告例ばかりではない。

栽植密度の範囲を広くとって試験を行うと、一定の密度で収量がほとんど変わらないことが確認されている。武田・広田（1971）は、1株2本植えて栽植密度を2~300株/m²と大きく変えて物質生産と収量を調査し、収量は10~100株/m²でほぼ一定であり、CGRは密植区では生育前期に、疎植区では生育中期に最大値を示したと報告している。また、白岩ら（1997）は日本晴を用いて、1株2本植、11.1~44.4株/m²の栽植密度で、大平ら（2000）も「キヌヒカリ」を用いて13.3株/m²と22.2株/m²で生育を比較し、いずれも栽植密度間の収量差が小さいことを報告している。これらの報告の収量水準はそれぞれ異なるが、概ね10~30株/m²の栽植密度では収量差は小さいと見ることができる。

一方、宮坂・石倉（1964）は登熟期間のNAR、RGRと収量の高い正の相関を認めるとともに、多収の必要条件として葉面積と葉身窒素含量の維持、小さい吸光係数および下葉の枯れ上がりが少ないことを指摘し、密植には後期重点施肥の組合せが必要としている。さらに、松浦ら（1969）も22.2株/m²と29.7株/m²を比較し、密植と穂首分化期の深層施肥を組み合わせることにより増収することを示している。Yamadaら（1961）は、9.1~36.4株とし/m²の範囲で試験を行い、密植により茎葉乾重中で葉身の占める割合が減り、同化部分に対する非同化部分の比が高まる。また、出穂期以前の乾物生産に対する出穂期以降の乾物生産が低下するとしている。これらの報告は、密植条件の登熟期間の物質生産の低下を指摘して、増収のための改善策として後期重点施肥が重要であることを示している。また、村田・猪山（1958）も18.5株/m²と44.4株/m²を比較して同様な傾向を明らかにするとともに、日射が少ない場合は密植多肥栽培は不利であるとしている。Hayashi（1966）が11.6~34.7株/m²の3密度で試験し、繁茂度の低い生育前期の乾物生産は主として受光効率に決定され、繁茂度の高い生育後期はエネルギー変換効率により決定されることを示したように過度の密植など生育過剰となる条件では登熟期間の物質生産が停滞するとの結果はほとんど報告に共通している。

さらに高い栽植密度での研究例として、天野ら（1995a, 1995b）はジャポニカハイブリッドライス「楡雑29号」を用いて、慣行のm²あたり78.5株（1株2本植）と疎植とした42.7株（1株3本植）を比較し、疎植条件のほうが高い籾数生産特性と出穂後の乾物増加量を示し、多収となることを報告している。このことは、初期成育が旺盛で受光態勢が良好なハイブリッドライスでさえ、過度の密植よりも出穂後の乾物生産を高めるやや低めの栽植密度が存在し、そのほうが多収の面からも効果的であることを示している。

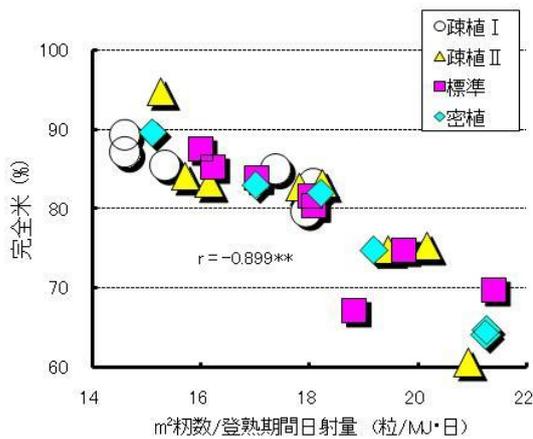
本試験では、標準施肥量で栽培したため密植区でも著しい倒伏は認められず、登熟を阻害するほどの受光態勢の悪化はなかったと見られる。それにもかかわらず、特に疎植I区では乾物重は小さいが、CGRは生育初中期には緩慢であるが登熟後半まで安定して維持され、上記の報告と同様の傾向が認められた。これは、生育期間を通して葉身窒素濃度が高



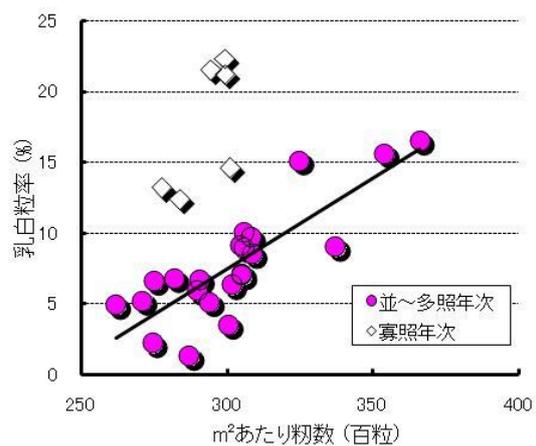
第4-2-4図 幼穂形成期間の乾物増加量と籾数の関係 (1996-99 コシヒカリ)

いため、生育が安定していることによると考えられる。しかし、収量に大きく影響する m^2 あたり籾数は疎植条件でやや減少し、特に初期成育が不良となった 1997 年では栽植密度間の差が拡大した。「コシヒカリ」の m^2 あたり籾数は、幼穂形成期間の窒素吸収量や CGR と高い正の相関関係があることが知られている (湯浅ら 1999)。また、著者 (1995) は標準栽培された「コシヒカリ」、「ハナエチゼン」、「キヌヒカリ」の物質生産を年次間で比較し、「コシヒカリ」の登熟は出穂前に蓄積された同化産物に依存する割合が高いことを明らかにしている。しかし、本試験では栽植密度間で幼穂形成期間の CGR にほとんど差が認められず、同期間の乾物増加量あたりの籾数は密植条件ほど多かった (第 4-2-4 図)。これは、栄養生長期間の生育量の大小がそのまま m^2 あたり籾数に反映することを示している。したがって、疎植条件では気象条件も考慮しながら穂肥をやや早期に施用するなどして籾数を確保することが生育診断上必要と思われる。疎植では葉身窒素濃度は高いが窒素吸収量は標準栽植密度より劣る。小林・堀江 (1994) は、単位面積あたりの分化穎花数は穎花分化始期の地上部窒素保有量によって支配され、さらに穂首分化期から穎花分化始期の地上部窒素含有率の変化からも大きな影響を受けることを指摘している。本試験でも、疎植 I 区では m^2 あたり籾数が減少したが、20~30% 程度の栽植密度の低下では窒素吸収量はほとんど影響を受けず、 m^2 あたり籾数も標準密度と大差なかった。この結果から幼穂形成期間の窒素吸収が旺盛となる品種や栽培条件では、多少の疎植でも標準密度並みの籾数を形成することが可能と判断される。

本試験では栽植密度の違いによる登熟歩合や千粒重の差は比較的小さかった。したがって、 m^2 あたり籾数の多少がそのまま収量差となって現れたとみることができる。その結果、14 株/ m^2 から 30 株/ m^2 の栽植密度の範囲では収量差はきわめて小さかった。また、疎植 II 区では穂肥時期が多少早まっても倒伏程度は小さく、 m^2 あたり籾数も増加して、密植よりも増収率が高かった。さらに登熟前半の遮光による収量低下程度も小さかった。これらの試験結果は、疎植では生育中期の生育調節のポテンシャルが高く、しかも登熟前半の日照不足にも強いことを示しており、収量面から見た安定性が高いと考えることができる。



第4-2-5図 登熟期間の日射量を考慮した
粒数と完全米の関係 (1996-99 コシカリ)



第4-2-6図 m²あたり粒数と乳白粒発生率
の関係 (1996-99:コシカリ)

2. 品質に及ぼす影響

品質との関連性では、「コシヒカリ」のm²あたり粒数と乳白米発生率には負の相関関係があることが報告されている(井上ら 1997)。本試験でも、疎植 I区など栽植密度を1/2とすると明らかに完全米の比率が高まり、乳白米や腹白米の発生率が低下した。これは、5%前後のm²あたり粒数の減少と登熟後半までの物質生産の維持が、登熟に好適な影響を及ぼしたためと考えることができる。しかし、疎植 II区では粒数が標準密度とほとんど変わらないため、品質向上効果はそれほど大きくなかった。また、密植区のようにm²あたり粒数は標準区と大差ないにもかかわらず乳白米が増加する場合も認められた(第4-2-5, 4-2-6表)。この結果は、密植条件では登熟期間の葉身窒素濃度の低下がやや大きく、稲体の機能低下が大きかったためと判断され、過剰な粒数をつけないことに加えて、登熟期間の窒素栄養の維持が品質向上にとって重要であると考えられる。

一方、乳白米発生率は遮光条件など登熟期間の日射量とも関連が強い(第4-2-8表)ので年次間の品質を比較するために、m²あたり粒数を登熟期間の日射量で除した値(日射量あたり粒数(井上・湯浅 2001))を用いると4年間の各試験区の完全米比率とこの値には高い負の相関が認められ、乳白米でもこの値との間に正の相関が確認された(第4-2-5図)。この結果からは、栽植密度の違いの影響はそれほど小さくなく、1998年のような寡照条件では疎植 II区でも完全比率の低下が大きく、年次間の日射環境の違いを考慮すると栽植密度の違いによる品質向上効果は、粒数形成量の差程度とそれほど大きくないのかもしれない。川口ら(1996)も、「コシヒカリ」を17.8株/m²から27.5株/m²の栽植密度で施肥法を変えて栽培し、多肥条件で栽植密度が高くなるほど完全粒歩合が低下することを示したが、同じ粒数水準では栽植密度による差はないとしている。なお、「コシヒカリ」の疎植条件では玄米の肥大が登熟後半まで持続するため、わずかながら登熟歩合が向上する反面千粒重が低下する。このため、山口ら(2002)が指摘するような、玄米の小粒化による乳白米発生軽減効果も含まれる可能性がある。

本試験の栽植密度の範囲では、玄米中の窒素濃度に大きな差は認められなかった。この結果は、「キヌヒカリ」を用いて11.1株/m²程度までなら白米窒素濃度は標準密度と同程

度であるとする報告（大平ら 2002）とほぼ同様であり，食味評価の面でも 11~31 株/m² 間での差は小さいと判断される。

このような点より，品質向上を目的として疎植を行うなら，施肥量と組み合わせで適切な密度を選択する必要がある。本試験結果の範囲では，乳白米の発生率を約 7%以下とするための適正籾数は，登熟期間の並から多照な日射条件で 3.0 万粒/m²が一つの目安となり，通常より 20~30%栽植密度を少なくすることで目標が達成できると見られる。ただし寡照年次ではそれ以下の籾数でも乳白粒の発生率は高い（第 4-2-6 図）。しかし，これらはいずれも登熟期間の地力窒素の供給が安定しているグライ土での試験結果であるため，地力のない圃場ではより少ない籾数レベルが求められると見られる。

なお，松村ら（1998）は水稻の SiO₂ と N の含有率が栽植密度により変動し，疎植条件では N が増加して SiO₂ が減少し，その比が小さくなることを示している。この点より，登熟期間にフェーン現象などの強風に遭遇した場合には，被るストレスが増大し，疎植イネの特性が十分に発揮できない可能性がある。また，収量や品質に関しては，根系の拡大と登熟期間の機能や活力の維持が重要であることが報告されている（井上ら 2004，岩田 1986）。根の形態や機能と栽植密度やその他の栽培条件の関連性について今後の研究が必要と思われる。

【摘 要】

イネの省力的生産と品質向上の視点から，「コシヒカリ」の疎植条件における生育および物質生産特性と収量品質について調査検討した。疎植条件では生育初期の発育や物質生産は緩慢であるが，生育中期以降の乾物増加速度は大きくなる傾向にある。また，幼穂形成期以降の葉身窒素濃度が高く維持され，1 穂重増加速度は登熟前半ではやや小さいが登熟後半は大きい。14 株/m²程度までの疎植条件では成熟期の乾物重や m²あたり籾数は 21 株/m²と大差なく，登熟も維持されるため収量低下はほとんどみられない。また登熟前半の遮光によっても収量や品質の低下程度は小さい。さらに，穂肥の早期施用によっても倒伏が少なく，収量が高まる。疎植条件では葉身機能の維持による登熟の継続により，乳白米の比率がやや低下するため，品質向上の面からも有効と考えられる。

第3節 乳白粒発生低減のための生育要因

水稻の高温登熟条件では、乳白粒などの未熟粒の発生が増加し、玄米の品質低下が問題となっている。玄米の品質改善に関する栽培的研究は多数行われてきているが、水稻の物質生産や窒素の動態と関連付けて解析している研究例は少ない。著者らは、これまでに水稻品種「コシヒカリ」の単位面積当たり籾数や登熟前半の1籾重増加速度、登熟期間の水分ストレスが乳白粒の発生に大きな影響を及ぼすことを報告した（井上ら 1997, 井上ら 1998）。また、長期間の作況試験のデータを取りまとめ、年次により気象条件が異なっても初期生育の過剰は登熟期間の根重減少を助長する傾向があることを指摘した（井上ら 2017）。これらの要因は、いずれも同化産物の籾への供給量の増減に大きな影響を及ぼす要因である。そこで、窒素施肥量と栽植密度を変えて、単位面積あたり籾数と窒素保有量が異なる「コシヒカリ」の物質生産経過が乳白粒発生に及ぼす影響について、年次を込みにして調査、解析した。

【材料と方法】

「コシヒカリ」を用いて 1996～99 年の 5 月上旬に移植し、施肥量と栽植密度の異なる試験区の生育、収量および品質データを解析した。生育量や収量構成要素に差を設けるため、施肥量は無肥料から標肥の 2 倍量までとし、さらに植付本数を 2 倍以上とした区や、栽植密度を標準の 2/3 から 1.5 倍とした条件を組合せた。また、1999 年には幼穂形成期間に 38%の遮光処理を行う区をそれぞれの施肥条件に設定した。各試験区は 2 区制で配置した。その詳細は第 4-3-1 表に示す。

各試験区の幼穂形成期、穂揃期、登熟中期、成熟期の各生育時期に、各区の平均穂数株 3 株をサンプリングし、葉面積を測定するとともに 70°C で 3 日間通風乾燥して部位別乾物重を測定し、物質生産経過の解析に供した。また、部位別に粉碎してケルダール法を用いて窒素濃度および窒素吸収量を求めて登熟期間の窒素の動態の解析に供した。また、1997～99 年については、アントロン硫酸法により施肥試験区の葉鞘・稈のサンプルの非構造性炭水化物（NSC）含量の分析を行い、部位別乾物重や窒素の動態と併せて解析した。

1997～99 年については、各試験区で約 7 日おきに株単位で穂をサンプリングし、通風乾燥させて穂重や 1 籾重を調査した。また、1999 年には籾を一次、二次枝梗別に区分し、1 籾重の推移を比較した。

品質調査は、収穫調製した玄米を 1.8mm 篩いにかけて、それより上段を供試した。見かけの品質は、各区 1,000 粒を目視観察により分類した。

【結果と考察】

1. 乾物重および CGR と品質の関係

標準区の幼穂形成期の乾物重は、1999>98>97>96 の順であったが、幼穂形成期間の CGR は、1996>99>98>97 の順となり、出穂前 25 日間の平均気温や日射量が多い 1996 年が最も大きく、日射量の少ない 1997 年で最も小さかった。したがって、穂揃期の地上部乾物重は 1999=1996>1998>1997 となり、LAI は 1996 年が最大であった。施肥量の異なる試験区も含めた幼穂形成期間の地上部 CGR の幅は 13～29g/m²/日 で年次間差が

第 4-3-1 表 試験区構成

年次	試験区
1996	標準, 疎植後期重点, 太植え多肥
1997	標準, 無肥, 密植多肥
1998	標準, 無肥, 密植多肥
1999	標準, 無肥, 多肥 (各施肥量に幼穂形成期間 38%遮光区を設置)

* 栽植密度は標準区 21, 疎植 14, 密植 28 (1998), 31 (1997) 株/m².

一株 3 本植え, 太植え区は 8 本植え

無肥: N成分 0kg, 標準: 3+2+1kg, 多肥: 6+3+3kg/10a, 後期重点: 0+2+1kg/10a

第 4-3-2 表標肥区の幼穂形成期, 穂揃期の形態と CGR および気象条件

年次	出穂前 25 日		幼穂形成期			出穂後 20 日		穂揃期		CGR(g/m ² /日)	
	平均気温	日射量	乾物重	LAI	CGR	平均気温	日射量	乾物重	LAI	登熟前半	登熟後半
	(°C)	(MJ/m ² /日)	(g/m ²)		(g/m ² /日)	(°C)	(MJ/m ² /日)	(g/m ²)			
1996	27.4	21.4	329	3.1	22.2	27.8	22.0	945	4.7	18.7	11.5
1997	25.3	14.7	340	2.7	16.9	27.4	16.4	812	4.3	18.8	9.4
1998	25.8	16.8	411	3.1	20.3	26.9	13.8	897	4.0	17.8	7.9
1999	27.0	17.5	453	3.5	21.7	28.4	17.8	952	4.1	15.7	7.4

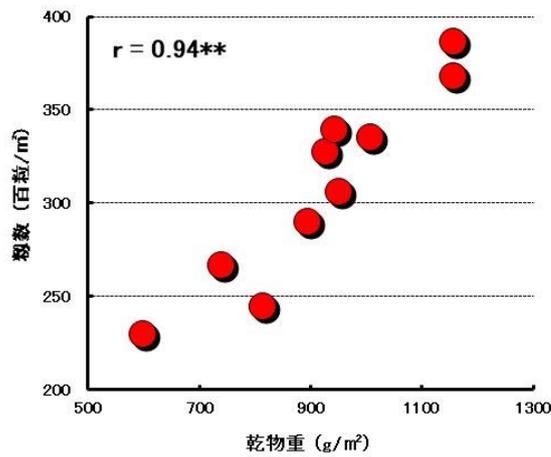
* 栽植密度 21 株/m², 施肥量 N成分基肥 0.3+穂肥 0.2+0.1kg/a

大きかった (第 4-3-2 表).

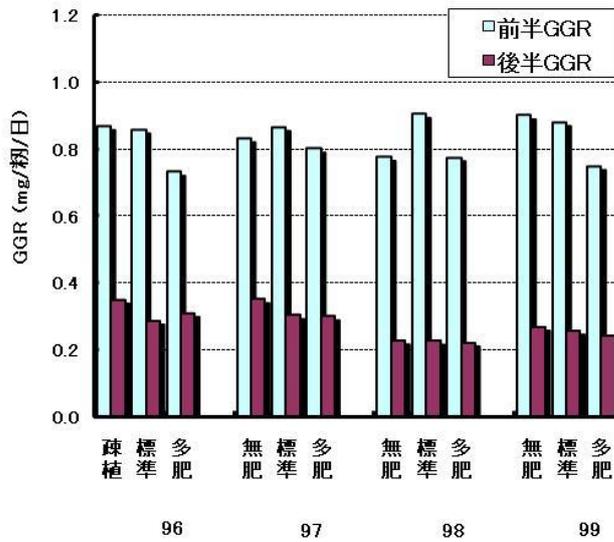
幼穂形成期間の地上部 CGR が大きいほど m²あたり籾数が増加する傾向が認められた. また, 穂揃期の乾物重や窒素吸収量と m²あたり籾数には高い正の相関関係が認められた (第 4-3-1 図). m²あたり籾数と乳白粒の発生率には高い正の相関がある. 1996 年の「コシヒカリ」のさまざまな試験区を込みにして解析すると, 1%水準で有意な相関係数 0.9 以上の高い相関が得られている (井上ら 1997). この結果より, 穂揃期乾物重を 800 g/m²以下とすることで乳白粒発生率を 7%以下にできることが明らかとなった.

登熟前半, 後半ともに地上部 CGR は多肥区でやや大きいが, 年次によってやや傾向が異なり, 穂揃期の乾物重が大きい 1996 および 1999 年では, 多肥区の登熟前半の地上部 CGR は標肥区よりやや小さかった. また, 寡照であった 1998 年の登熟後半 CGR も多肥区で小さかった.

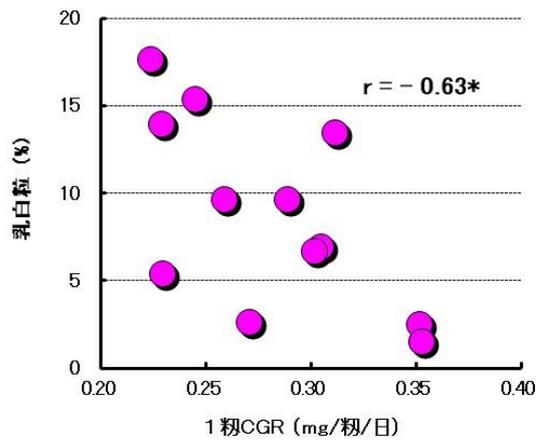
1 籾重増加速度 (Grain Growth Rate: 以下 GGR と記す) は, 登熟前半では年次による差は比較的小さく, おおむね各区ともに 0.8mg/籾/day 前後で, 無肥区や標肥区で多肥区より大きかった. 登熟後半は 0.2~0.4mg/籾/day であり, 乳白粒の発生が多かった 1998, 99 年でやや低下した. 施肥量の違いによる差は小さかった (第 4-3-2 図). 登熟後半の GGR と乳白粒発生率には弱い負の相関が認められ, 登熟後半の GGR を高めることは乳白粒の発生低減のための一つの要因と考えられた (第 4-3-3 図).



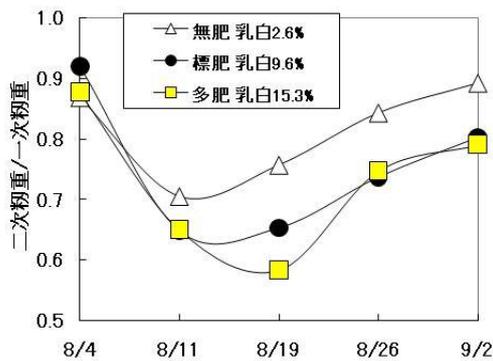
第4-3-1図 穂揃期乾物重とm²あたり粒数の関係 (1996-99)



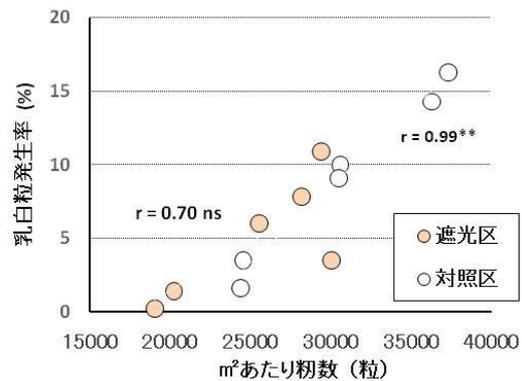
第4-3-2図 登熟前後半のGGR



第4-3-3図 登熟後半の1粒あたりCGRと乳白粒の関係 (1996-99)



第4-3-4図 1 籾重増加の一次・二次枝梗比 (1999)



第4-3-5図 m²あたり籾数と乳白粒の関係 (1999)

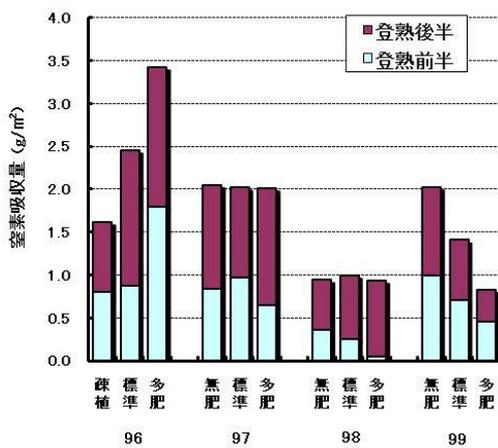
一方、一次枝梗着生籾と二次枝梗着生籾の登熟期間の1籾重増加過程を比較すると、穂揃期後7~10日後の1籾重は明らかに一次枝梗着生籾が大きく、1籾重の二次枝梗着生籾/一次枝梗着生籾比（以下二次/一次籾重比と記す）はこの時期に0.6程度と大きく低下する。しかし、その後の登熟期間で二次/一次籾重比は次第に上昇し、成熟期には0.8~0.9まで高まる（第4-3-4図）。これは、登熟初期は一次枝梗着生籾に優先的に同化産物が供給されるが、一次枝梗着生籾の登熟が進むにつれて次第に二次枝梗着生籾への同化産物供給量が増加することを示している。二次枝梗着生籾への供給量が相対的に増加しなければ、玄米の肥大は不十分となり、粗玄米を篩選別することにより屑米として実用的な品質評価の対象外となる。したがって、乳白粒が増加する条件として、登熟後半の稲体の活力が十分に残っていることが必要条件であると考えられる。その観点から、多肥条件や登熟前半の遮光条件は必要条件を満たしており、倒伏が著しくない前提で乳白粒の発生が多い。登熟前半と登熟後半の同程度の遮光条件では、明らかに登熟前半の乳白粒発生率が高い理由も同様と考えられる。

2. 幼穂形成期間の遮光の影響

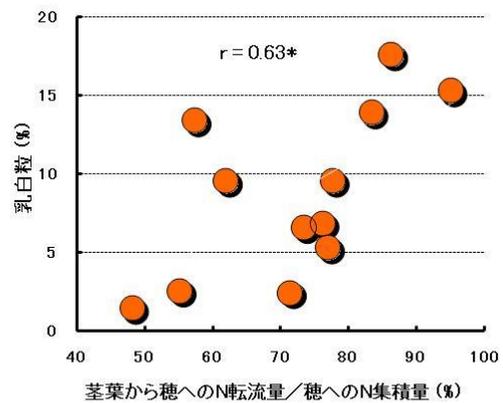
1999年の幼穂形成期間の38%遮光処理により、施肥条件それぞれでm²あたり籾数が12~20%程度減少し、それと登熟歩合の低下により収量も20~24%低下した。二次枝梗着生籾を中心にm²あたり籾数が減少した結果、遮光各区では対照各区より乳白粒発生率が低下し、完全粒の割合が高まった。施肥量では、m²あたり籾数が多い多肥条件で品質向上効果が大きかった。この結果から判断すると、幼穂形成期間の遮光により多少受光態勢が悪化しても、m²あたり籾数が減少することで登熟期間のGGRに大きな影響が及ばないと考えられる。幼穂形成期間遮光区と対照区では、m²あたり籾数と乳白粒発生率の回帰直線の傾きは類似している（第4-3-5図）ので、幼穂形成期間が高温多照であった1999年では同期間の多少の遮光条件は著しい受光態勢の悪化をもたらすことはなく、その後の品質にまで大きな影響を及ぼさなかったと判断される。

3. 窒素の動態と品質との関係

登熟期間の稲体の窒素吸収量は、0.4~3.4 g/m²の範囲であった。乳白粒発生の多い1998、99年では登熟後半の窒素吸収量が少ない傾向が認められた（第4-3-6図）。また、これら



第4-3-6図 登熟期間の窒素吸収量の比較



第4-3-7図 茎葉蓄積窒素の穂への転流比率と乳白粒の関係(1996-99)

第 4-3-3 表標肥区の時期別 NSC 含量と気象条件

年次	幼形前 20 日		幼形期 NSC		穂揃前 20 日		穂揃期 NSC		出穂後 20 日		
	日射量		含量	含有率	平均気温	日射量		含量	含有率	平均気温	日射量
	(MJ/m²/日)		(g/m²)	(%)	(°C)	(MJ/m²/日)		(g/m²)	(%)	(°C)	(MJ/m²/日)
1997	18.0	35.5	16.2	25.6	16.3	87.2	17.3	27.4	16.4		
1998	13.9	35.2	13.9	25.5	16.3	102.9	18.2	26.9	13.8		
1999	12.2	48.8	16.8	28.9	19.6	128.0	21.4	28.4	17.8		

の年次では、穂揃期までに蓄積した窒素の穂への転流量が大きく、窒素の転流量と乳白粒発生率には正の相関が認められた(第 4-3-7 図)。このことは、葉身窒素濃度の低下を通じて光合成速度が低下し、それが登熟後半の GGR の低下を招く要因になっていると推測される。しかし、1996 年の多肥区のように登熟期間の窒素吸収量が多くても乳白粒の発生が多い事例もあり、窒素吸収量の多少と乳白粒発生率の関係よりも穂への転流量が安定していることが重要であると考えられる。

4. NSC の動態と品質との関係

幼穂形成期以降の葉鞘+稈の NSC 含量は、幼穂形成期から穂揃期にかけて増加し、登熟中期にかけて減少し、さらに成熟期にかけて増加する推移を示した(第 4-3-3 表)。幼穂形成期の NSC 含量は約 20~60g/m² で、穂揃期には 56~135g/m² とそれぞれの条件で増加した。両時期ともに、サンプリング前 20 日間の気象条件との関係は判然としなかったが、1 茎あたりおよび 1 籾あたり NSC 含量は無肥条件で多かった。両時期の NSC 含有率は 7~25% と年次や試験区による差が大きく、総じて日射量が多く施肥量が少ない場合に高まる傾向を示した。各年次ともに、穂揃期の穂数が多くなるほど一穂あたりの NSC 蓄積量は低下する傾向が認められたが、これは、施肥量の増加に伴って茎数と窒素吸収量が増加して稈の太さが小さくなることと関係していると考えられる。

登熟中期にかけての NSC 含量の低下は顕著で、年次や試験区によって $100\text{g}/\text{m}^2$ 以上低下した。特に多肥区では蓄積された NSC 量の大部分が転流した。成熟期の NSC 含量は $20\sim 80\text{g}/\text{m}^2$ で、試験区間の傾向は明瞭でないが、多肥条件でやや高い含量を示し、登熟中期以降に再蓄積された量が多かった。登熟前後半の 1 粍あたり NSC 含量の挙動を比較すると、無肥区では登熟前半の減少が明らかであり、1998 年以外は多肥区での登熟後半での増加が目立った(第 4-3-8 図)。

稲体窒素濃度は多肥条件で高く推移し、幼穂形成期や穂揃期の葉鞘+稈の窒素濃度と NSC 含有率には高い負の相関関係が認められた(穂揃期で相関係数 $r = -0.915^{**}$)。また、窒素濃度と NSC 含量にも弱い負の相関が認められた。成熟期には多肥条件ほど NSC 含量、NSC 含有率ともに高く、両者と窒素濃度との相関は弱い正となった。

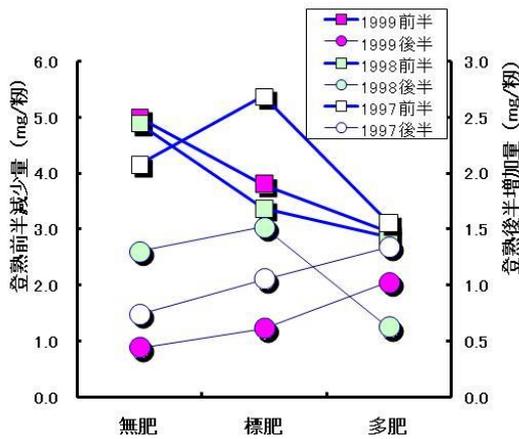
登熟前半の 1 粍あたり NSC 含量の減少量と同期間の GGR には、それぞれの年次で有意ではないが正の相関が認められ(第 4-3-9 図)、蓄積された NSC の転流が登熟初期の粍重増加に寄与していることが示された。また、穂揃期の NSC 含量が多い 1998、1999 年には、登熟前半の 1 粍あたり NSC 含量の減少量と完全米の比率に正の相関が、乳白粒発生率との間に負の相関が認められ(第 4-3-10 図)、NSC の蓄積や転流が品質に及ぼす影響が示唆された。

山口ら(2006)の報告にあるように、本解析結果からも品質安定のためには穂揃期までの NSC 蓄積量を増加させることが必要と考えられた。また、笈田ら(2018)は水稻 3 品種を用いた 6 年間の作況試験で NSC 含量と玄米品質の関係について解析し、穂揃期の 1 粍あたり NSC 量が多いほど登熟歩合が高く、未熟粒率が低く、玄米タンパク質含有率が低いことを認めた。また、この栽培条件では穂揃期の稈・葉鞘への乾物分配率と NSC 含有率には正の相関が認められ、過繁茂にならないイネづくりが NSC の蓄積に有効であると結論付けている。本研究結果でも、1 粍あたり NSC 蓄積量の増加と登熟後半までの窒素の安定吸収が品質の安定化に寄与できる可能性を確認し、そのための肥培管理が重要と考えられる。しかし、1 粍あたり NSC 蓄積量が乳白粒発生におよぼす効果が明瞭でない年次もあり、その理由を明らかにする研究の深化が必要と考えられる。

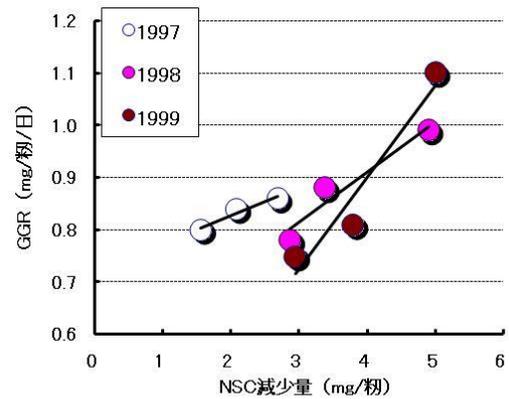
【総合考察】

星川(1975)によると、乳白米は、粒表面は白色不透明だが光沢がある。横断面は、内部が白色不透明で表層部が透明化している。登熟初中期に養分蓄積が悪く、後期に回復したものとしている。開花や玄米の肥大は上位の枝梗から始まり、次第に下位枝梗に及ぶ。木戸・梁取(1968)は、乳白米の発生は特に二次枝梗の第 2、第 3 粒に多いことを明らかにした。長戸・江幡(1965)は登熟期の高温により成熟が促進されると、各穎花の養分吸収の競合が激化することが乳白米発現の要因であると推定している。本研究結果もこれらの結果を同化産物や NSC 等の部位別の蓄積や転流からうまく説明でき、同化産物を効率的に利用できる態勢を構築することが重要と考えられる。

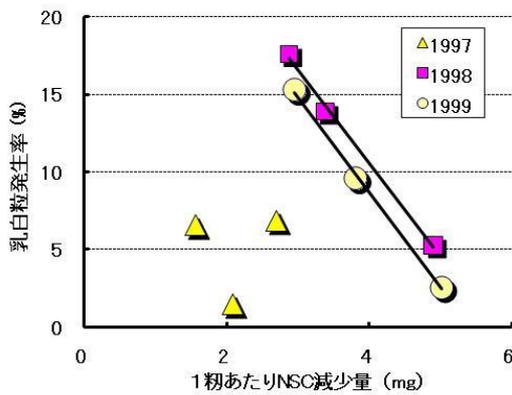
Tsukaguchi and Iida(2008)は「コシヒカリ」をポット栽培し、出穂後 3 日より粍の除去処理と止葉以外の葉身のアルミ箔による遮光処理を行い、見かけの品質と葉鞘・稈の NSC 含量を測定した。その結果、遮光処理では乳白粒や背白粒の発生が増加するとともに、



第4-3-8図 登熟期間の1粒あたりNSC含量の増減



第4-3-9図 登熟前半の1粒あたりNSC減少量とGGRの関係



第4-3-10図 登熟前半の1粒あたりNSC減少量と乳白粒発生率の関係

登熟中期にかけての NSC 含量の低下が大きく、籾除去処理ではその逆の傾向を示したと報告している。さらに水稻品種「日本晴」を用いて 3 年間、施肥量の異なる試験区を設定して葉鞘・稈の NSC 含量を分析し、登熟との関連性を解析した。その結果、穂揃後 10 日間の穎花の相対生長速度と同期間の穎花あたり利用可能炭水化物量との間に高い正の相関を認めている。同様に、充填率（籾数と精玄米 1 粒重の積に対する粗玄米収量の割合）とも正の相関を認めている（塚口ら 1996）。さらに、中川ら（2006）は圃場栽培した「コシヒカリ」に葉身切除処理や穂切除処理を行い、玄米品質に及ぼす影響について比較検討したところ、高温登熟条件では炭水化物供給能に関わらず白未熟粒が発生すること、および籾あたりの炭水化物供給能の低下は乳白粒の発生を助長することを認めている。同時に、乳白粒以外の白未熟粒の発生率には大きな影響を与えない可能性があることを示唆している。

これらの研究結果も併せて品質安定化の物質生産的要因をとりまとめると、「コシヒカリ」で栄養生长期間や幼穂形成期間の地上部 CGR を高めることは籾数増加に効果的ではあるが、品質を考慮すると幼穂形成期の地上部乾物重を 300～350 g / m²程度と過大にし

ないことも必要である。初期生育を抑制することにより、幼穂形成期間や登熟前半の CGR を高く維持でき、登熟前半の GGR を高めるとともに登熟後半までの窒素の安定吸収を通して品質安定化に寄与できる可能性が示された。加えて、穂揃期の NSC の蓄積量が高い場合には、登熟期間の寡照条件でも同化産物の籾への転流を促進する効果も確認された。そのような物質生産経過が二次枝梗籾の籾数を抑制して籾数過剰を防ぐとともに、登熟期間の GGR の維持につながると考えられる。栽培技術的には、これまで指摘されている植付本数の低減、疎植、基肥の減量、移植時期を遅らせるなどの手段（岩田 1986a, 1986b, 井上 2014）が有効と考えられる。なお、移植時期が玄米品質に及ぼす影響については山口ら（2004b）の報告に詳細な記載がある。

第5章 水稻の水ストレスの診断と水管理による品質向上

第1節 熱画像の解析による水稻苗の水分状態の診断

稚苗を中心とする水稻の箱育苗では、きわめて密播条件で栽培されるため、健苗を育成するには育苗期間中のきめ細かな温度および灌水管理が重要である。このうち、温度管理については苗の発育時期別に最適温度が設定され、健苗育成のための苗質指標が作成され、実践されている。一方、水管理に関しては、箱育苗では根圏が制限されていることから、床土の土性の違いや周辺環境のダイナミックな変化および苗の生育ステージに対応したきめ細かな灌水技術が求められるが、これまで明らかな指標はなく、苗の観察と経験に基づいて管理されてきた。また、育苗現場においては多量灌水による病害の発生や徒長および灌水ムラによる生育の不揃いが指摘されている。さらに、水稻栽培面積の大規模化に伴って、育苗期間も4月～6月まで長期化して気温や日射量の変動幅が拡大し、灌水管理がより難しくなっている。

一方、井上(1990)は熱赤外画像を解析し、環境ストレスによる作物の生理的な変動を隔測的、即時的かつ群落状態のまま把握するうえで有効であることを示している。著者ら(井上ら1997)も、水田に生育している水稻群落の熱画像を解析し、群落温度が高い水稻では光合成速度がやや低いことや、著しい場合には干ばつの被害が生じていることなどを明らかにした。また、水稻苗群落の熱画像を解析し、群落温度の測定により苗の水分含量や萎凋程度の診断が可能であることも明らかにした(井上・林1996)。しかし、水分ストレスの診断は可能であっても、それを栽培管理につなげる研究は進んでいない。そこで、大規模育苗における苗質の均一化や灌水の自動化への適用も考慮して、熱画像を用いて客観的かつ非破壊で診断した苗の水分状態を基礎として、育苗期間中の灌水量や継続して測定した苗群落温度と苗質の関係について調査し、両者の関係を解析して灌水管理に活用できないかについて検討した。

【材料と方法】

灌水量や苗水分ストレス指数(SWSI: Seedling Water Stress Index, 計算式は後述)と苗質の関係をより明らかにするために、水稻品種「コシヒカリ」を用いて育苗試験を実施した。内径58cm×28cmのプラスチック製有孔育苗箱を用い、播種量を120g/箱、施肥量を窒素成分で1.4g/箱で一定として、1998年と1999年にそれぞれ3回、播種時期と灌水量を第5-1-1表に示すように変えた育苗試験を実施した(試験1～6と記す)。標準的な灌水量の標準区に対して、少量灌水Ⅰ、Ⅱ区(以下少量Ⅰ、Ⅱ区)と、湛水区および多量灌水区(以下多量区)の各区を設定した。灌水時刻は朝9時前後と昼13時前後で1日2回を基準とし、苗2葉期から灌水試験を実施した。標準区の灌水量を、当日の気温と日射量や大気の乾燥程度、および苗の萎凋程度や床土の乾燥程度から経験的に判断し、少量区では苗が完全に枯死しないよう0～500cc/箱の範囲で灌水量を低減させ、低減程度の大きいⅠ区と程度の小さいⅡ区を設けた。多量区では灌水量を増加させた。6回の試験の日平均灌水量は、標準区で1箱あたり356～708ccで、少量区ではその42～89%、多量区では130～176%であった。湛水区では、育苗箱を配置した底面にポリエチレンフィルムを張り、最大水深を床土表面までとして適宜灌水し、湛水状態を維持した。

第 5-1-1 表 熱画像を測定した育苗条件

播種時期 (月日)	育苗日数 (日)	灌水条件 () 内は箱あたり平均灌水量 (cc/日)
5. 15 (試験 1)	17	標準 (650), 少量 I (464), 湛水
8. 3 (試験 2)	13	標準 (489), 少量 I (322), 少量 II (433), 多量 (789), 湛水
9. 9 (試験 3)	13	標準 (456), 少量 I (311), 少量 II (400), 多量 (722), 湛水
3. 18 (試験 4)	23	標準 (356), 少量 I (150), 少量 II (275), 多量 (625), 湛水
4. 9 (試験 5)	20	標準 (500), 少量 I (257), 少量 II (371), 湛水
5. 17 (試験 6)	16	標準 (708), 少量 I (425), 少量 II (583), 多量 (922), 湛水

試験 1～3 は 1998 年, 試験 4～6 は 1999 年播種

第 5-1-2 表 使用した赤外線放射温度計 (JTG-5700) の仕様

項目	仕様
温度測定範囲	-40～160℃
温度分解能	0.05℃
感度設定	0.1～1.0℃
測定視野	水平 30° ～垂直 28°
水平解像度	420 本
測定精度	±0.5%
焦点範囲	20cm～無限大
走査線数	480 本
フレームタイム	0.5sec
放射率	0.98
検出器	水銀カドミウムテルル (スターリングクーラー方式)

各試験ともに, 播種後 3 日間は育苗器内で 30℃で 3 日間加温し, その後整地したビニルハウス内土壌に育苗箱を配置した. 試験期間中の温度管理は慣行に準じて換気と保温を行った. 1 区 1 箱とし, 2 区制で試験を実施した.

育苗期間中の地表 5cm の育苗面の気温を, データロガーをベースとして自作した通風温度計を用いて 30 分おきに測定した.

熱画像は, 赤外線放射温度計 (日本電子製 JTG-5700 型) を用いて測定した. この機器の主な仕様と測定条件を第 5-1-2 表に示す. 苗の 2 葉期から毎日, 灌水直前に試験区の中心から 4m, 高さ 1.4m の位置にカメラを置き, 各試験区と水で湿らせたろ紙および乾燥状態の床土が入るようにそれぞれ毎日 2 回撮影した. 放射率は 0.98 とした. ハウス内では, 地上 5cm の育苗面の気温と標準区および湛水区の床土温度をそれぞれ 30 分おきに測定した.

各試験とも, 標準区の 3～3.5 葉期にあたる播種後 13～23 日に, 試験区中央から直径

3.9cm の金属製円筒で切り出し、約 60~80 本の苗をサンプリングし、洗浄して苗丈と苗令、茎葉、籾殻および根の乾物重を測定し、苗 1 本あたりで表した。苗令は不完全葉を 1 葉とした。また、得られた熱画像から添付ソフトを用いて苗群落部分を切り出し、各試験区の育苗箱毎の苗群落の温度を算出し、試験区で平均して解析に使用した。

苗水分ストレス指数（以下 SWSI : Seedling Water Stress Index）は、前報（井上・林 1996）にしたがって以下の式を用いて算出した。試行錯誤を行い、 T_{min} には育苗箱直上に吊り下げた湿らせたろ紙の温度を、 T_{max} には育苗箱に詰めた乾燥床土の温度を熱画像から切り出して使用した。

$$SWSI = \frac{T_s - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (T_s \text{ …… 苗群落の放射温度})$$

【結果と考察】

1. 灌水量と苗の生育の関係

育苗期間のハウス内平均気温を第 5-1-3 表に記す。ハウス内平均気温は、8 月播種の試験 2 の 27.2℃から 3 月播種の試験 4 の 12.4℃まで 15℃近い大きな差が認められた。試験期間の屋外の日射量は、5 月播種の試験 6 で高く、それ以外の播種時期では曇天日が多くなりやや低くなった。標準区や湛水区の床土温度も同様に変動したが、ハウス内気温よりやや高めであった。標準区の播種から苗 3.0~3.5 葉期までの育苗日数は、育苗期間の平均気温によって変動し、低温下の育苗となった試験 4 では 23 日と長く、高温下の育苗となった試験 2 および 3 では 13 日で、最大 10 日間の差が見られた。

灌水量の多少と播種時期の違いによる苗質の差を第 5-1-4 表に記した。灌水量の多少により、苗質に明らかな差が認められた。標準区に対して灌水量の少ない少量 I、II 区では、苗丈が短く葉令の進展が遅れ、茎葉および根の乾物重が少なくなった。しかし、籾殻重が最も重く、胚乳に貯蔵養分を多く保持していた。一方、湛水区では苗丈が伸長して葉令が進む傾向が確認されるとともに、茎葉乾物重は標準区と同等かわずかに増加し、根乾物重は標準区と同等かやや減少する傾向が認められた。特に、平均気温 25℃以上の高温育苗条件となった試験 2、3 では顕著な苗丈の伸長が認められ、平均気温が 20℃以上となった試験では苗丈も 20cm 以上となり、乾物重はやや大きい茎の細い苗となった。その結果、健苗の指標である苗の充実度（茎葉乾物重/苗丈）が明らかに低下した。

最も灌水量の少ない少量 I 区と標準区および湛水区の間には、苗丈、苗令、茎葉乾物重の各項目で 1%水準で有意な差が認められた。また、標準区と湛水区の間にも、苗丈で 1%水準、苗令で 5%水準で有意な差が認められた。

平均気温と苗丈の間には、灌水条件ごとに正の相関関係が認められ、湛水区の相関係数は 1%水準で、標準区では 5%水準で有意となった（第 5-1-1 図）。20℃以上の高温育苗条件下の湛水区の苗は苗丈が長く葉面積が大きいいため、移植後の植え傷みを生じやすい苗と考えられた。同様に、育苗期間の平均気温と乾物重の関係を解析すると、茎葉重は平均気温 15~20℃の試験 1、5、6 でやや高まる傾向が認められ、それより低温、高温となるとやや低下した。根重は平均気温が低い条件で重く、平均気温の上昇につれて低下する傾向

が認められた。灌水条件で比較すると、湛水区で茎葉重がわずかに優る傾向があり、根重は標準区と湛水区はほぼ同等であり、少量I区では茎葉重、根重ともに他の区より明らかに小さかった（第5-1-2, 5-1-3図）。

第5-1-3表 育苗条件ごとの平均気温と日射量

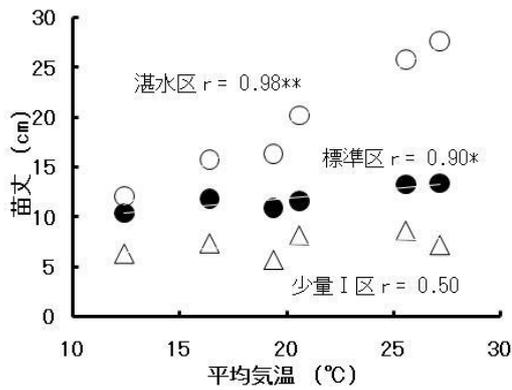
播種時期 (月日)	育苗日数 (日)	平均気温 (°C)	平均日射量 (MJ/m ² /日)
5.15 (試験1)	17	20.6	19.1
8.3 (試験2)	13	27.2	13.3
9.9 (試験3)	13	25.6	13.5
3.18 (試験4)	23	12.4	14.1
4.9 (試験5)	20	16.4	13.8
5.17 (試験6)	16	19.4	17.9

第5-1-4表 播種時期および灌水条件と主な苗質, SWSI

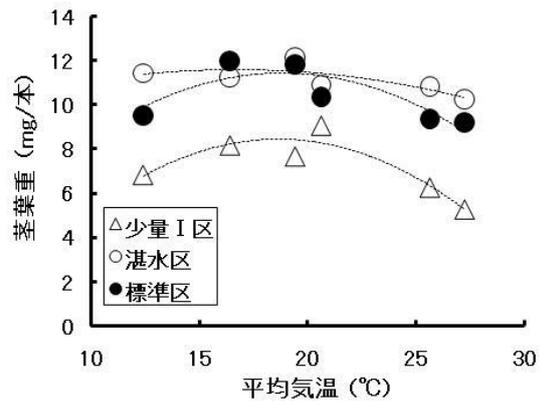
播種時期 (月日)	苗丈 (cm)	葉令	茎葉重 (mg/本)	根重 (mg/本)	SWSI (育苗期間平均)
5.15 (試験1)	13.3	2.4	10.1	2.4	0.335
8.3 (試験2)	16.0	2.0	8.3	2.1	0.422
9.9 (試験3)	15.9	2.0	8.8	1.8	0.343
3.18 (試験4)	9.6	2.0	9.3	3.2	0.424
4.9 (試験5)	11.6	2.1	10.5	2.8	0.400
5.17 (試験6)	11.0	2.1	10.6	2.6	0.353
灌水					
標準灌水	11.9	2.2	10.4	2.7	0.373
湛水	16.2	2.5	11.2	2.5	0.214
少量灌水I	7.2	1.6	7.2	2.2	0.552
有意性の検定*					
播種時期	**	**	**	**	ns
灌水量	**	**	**	**	*
交互作用	**	**	ns	ns	-

注) 第5-1-1表各区の平均値。有意性の検定は分散分析による。

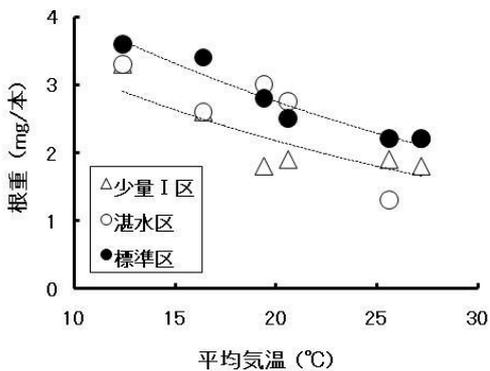
**、* はそれぞれ 1%、5%水準で試験区間に有意差あり。



第5-1-1図 気温、灌水量と苗丈の関係



第5-1-2図 気温、灌水量と茎葉重の関係



第5-1-3図 気温、灌水量と根重の関係

2. 熱画像解析により得られた SWSI の解析

水分ストレス指数の算出にあたっては、さまざまな環境下で蒸散が最もスムーズに行われた場合に物体の温度が最も低くなり、蒸散が全くない場合に最も温度が高くなり、通常の生育状態ではその間に苗群落温度がくると考えた。また、育苗環境はハウス内であり、苗丈がせいぜい 30cm までと短く、日射や床土の温度が苗群落温度に影響を与えやすいため、蒸散がない場合の物体として乾燥した床土の温度を用い、蒸散がスムーズに行える場合の物体として水で濡らしたろ紙を用いて、簡単な式で算出した。すなわち苗群落温度と湿潤ろ紙温度の差を床土表面温度と苗群落温度の差で除することで SWSI を算出した。

試験 1~6 で測定した熱画像より、各灌水試験区の育苗期間の苗群落温度を求め、それから SWSI を算出した。苗群落温度は、すべての試験で灌水量の少ない試験区で高く湛水区で低くなり、標準区はその中間に位置した。本試験で熱画像の解析により得られた苗群落温度は、灌水量や生育ステージの違いによって測定極値で試験 2 の少量 I 区の最高 42.3°C から試験 4 の湛水区の最低 12.3°C まで最大 30°C、育苗期間の平均値でも同じ試験区で最高 32.9°C から最低 18.4°C まで最大 14.5°C の差が認められ、高温多照条件で試験区間差が拡大した。

求めた SWSI の試験期間中の推移の例を通常の育苗時期に近い試験 5 の測定値をもとに第 5-1-4 図に示した。標準区の SWSI は最低 0.2~最高 0.5 の間で推移しているが、少量灌水条件の 2 つの試験区では、ストレス程度に応じて 0.4~0.8 および 0.3~0.65 と標準区より明らかに高く推移し、一方湛水区では、0.15~0.4 と低く推移した。しかし、育苗期間のハウス内気温が 15℃以下と低くなると、ハウス内の湿度が高まり、ろ紙、床土および苗群落温度の差が小さくなるために、相対的に SWSI が高まる傾向が認められ、低温条件でのストレス程度の推定は高温条件とやや異なっていた。

各灌水試験区それぞれの育苗期間平均 SWSI は、播種時期に関わらず、湛水区や灌水量が多い試験区で小さく、頻繁に萎凋が観察される少量区で大きくなった。育苗期間の平均気温が異なる 6 回の試験で灌水試験区毎 SWSI を比較すると、平均気温が高く灌水量が少ない試験 2 の少量 I 区で 0.64 と最も高く、高温育苗条件の試験 2, 3 の湛水区で 0.16 と最も低くなった。少量 I 区の平均 SWSI は各播種時期で 0.5 前後と安定していたが、湛水区では平均気温が高めの試験 2, 3 で低く、平均気温が低めの試験 4, 5 でやや高くなった。標準区では、高温育苗条件の試験 2 で 0.47 とやや高くなった以外はおおむね 0.3 から 0.4 の範囲内で推移した (第 5-1-5 図)。

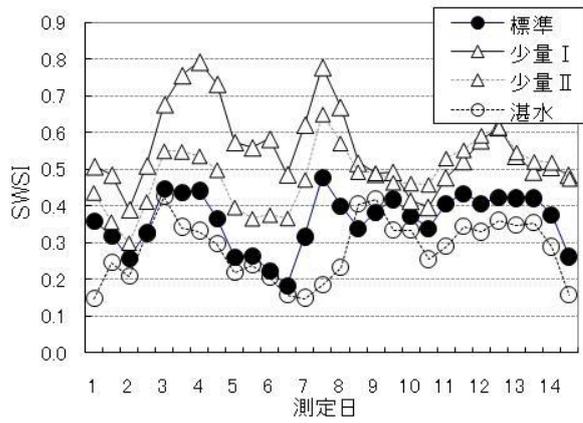
3. 平均 SWSI と苗質の関係

育苗期間が低温から高温条件までの 15℃近い温度環境下で 6 回行った、各試験区の苗質と育苗期間の平均気温には関連性が観察されている。同様に、ハウス育苗期間の平均 SWSI と苗質の関係について解析すると、平均 SWSI と苗丈には 1%水準で有意な負の相関関係が認められた (第 5-1-6 図)。また、茎葉乾物重との間には、平均 SWSI が 0.35 程度まではほぼ一定だが、それ以上になると直線的に乾物重が低下する傾向が認められた (第 5-1-7 図)。しかし、根重については気温の高低や灌水量による変動が大きく、平均 SWSI との明瞭な関係は確認されなかった。

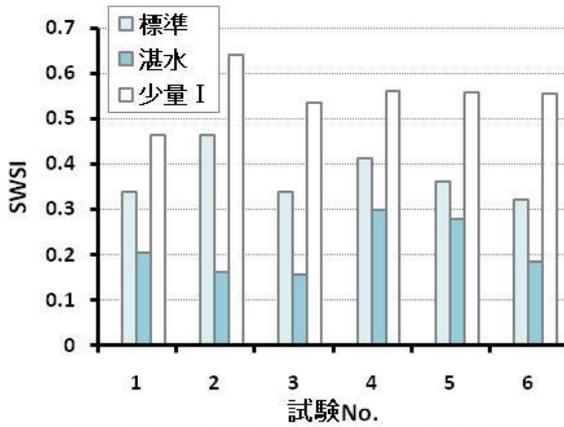
【総合考察】

星川 (1976) は、理想の稚苗の形質として苗丈 10~13cm、葉齢 3.1~3.3 とし、このような形態を持つ苗の茎葉乾物重は、播種量によって異なるが 10~12mg/本程度であるとしている。一方、稚苗育苗のためには灌水が必須の作業であるが、5 月上旬の晴天日には硬化期の稚苗の箱当たり蒸発散量は 1,123ml にも上り、さらに遅い時期では 1,500ml にも上ることも報告されている (小松 1982)。本研究の各試験の灌水量は、多量区で最大 1 日 1,400ml、標準区で 1,000ml、とこの 2 区ではほぼこの値に近く、これらの区と湛水区では水分の不足は軽微であったと見られる。しかし、少量区では最大でも 1 日 600ml しか灌水しなかったことから、頻繁な水分ストレスによって明らかに生育が抑制されていた。

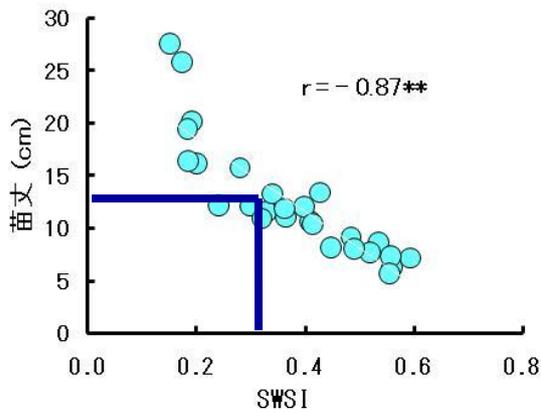
一方、水苗と畑苗を比較した報告によると、水苗は草丈が長く全窒素含量が劣ることが示されている (松尾 1951)。本試験の多量区や湛水区は過湿で、試験区の中で最も水苗に近い条件で育苗されたとみられ、特に高温条件で苗丈の伸長と葉面積の拡大は明らかであった。伊藤ら (1996) は慣行灌水と本試験の湛水区に相当するプール育苗の苗質や移植後の初期生育を比較し、プール育苗された苗では発根数がやや少なく、移植後の分けつ数が少ないことを報告している。市川ら (1996) も移植後の温度条件を変えて初期生育を比較し、プール育苗苗は低温条件で初期生育が劣ることを示している。一方、著者ら (井上・



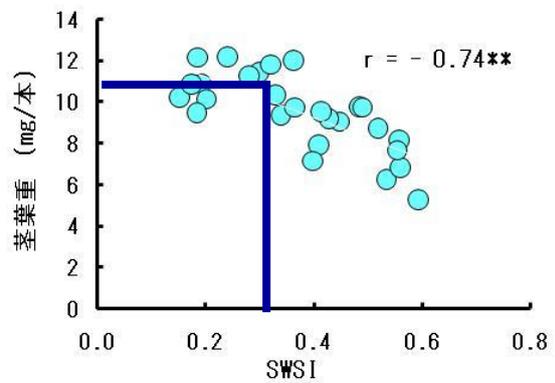
第 5-1-4 図 SWSI の推移の例 (試験 5)



第 5-1-5 図 育苗期間平均 SWSI の比較



第5-1-6図 SWSIと苗丈の関係



第5-1-7図 SWSIと茎葉重の関係

湯浅 2001) も湛水管理された苗を移植し、初期生育から収量まで比較したが、慣行灌水と湛水管理では顕著な差は認められなかった。塚野ら (2003) もプール育苗苗の生育収量を比較し、慣行苗と大差ない結果を報告している。藤井ら (1987, 1988b) はプール育苗により苗丈が伸長して充実度は劣るが、移植後の初期生育はわずかに良好となることを示している。これらの結果は北陸地域以北の 4~5 月の育苗条件で得られており、移植後の気象条件が温暖で活着や初期生育がスムーズな条件では、育苗期間に湛水管理した苗でも慣行灌水管理と大差ない生育収量が得られると推測されるが、低温や強風など活着や初期生育が阻害される条件では影響がその後まで残り、苗質の違いが収量にまで影響を及ぼす可能性があると考えられる。移植後の初期生育を比較した各試験の移植時の苗丈は最大でも 15cm 程度であり、本試験の高温下の湛水区のような 20cm を上回る苗丈ではない。したがって、苗丈が著しく伸長しやすい高温育苗環境では、湛水管理は望ましくないと結論付けられる。

一方、熱画像を作物の生育診断に活用した研究では、生育中期以降の草丈 50~60cm 以上の作物群落を対象としている (井上 1990) が、本試験のように草丈が 5~25cm 程度と小さい苗群落では、水分ストレスに伴う苗群落温度の上昇が急激であった。床土のみの放射温度は苗より 5~15°C 高いため、床土表面の放射温度が苗の表面温度に及ぼす影響が強いと推測され、苗丈が小さいほど苗の萎凋は健全苗群落との放射温度差の拡大をもたらすと考えられた。前報 (井上・林 1996) により、苗の萎凋開始 SWSI は、測定環境が異なっても 0.3~0.4 でほぼ安定しており、萎凋開始時点の苗茎葉部の水分含量は 80% 程度であることが明らかとなっている。藤井ら (1988b) は、苗の徒長改善のための節水灌水の目安について試験を実施し、灌水時期の目安として床土に挿した湿度表示ラベルが使用可能であることを示している。本試験結果は、床土に代わって苗を直接測定することで灌水の指標とすることが可能であることを示すものである。

また、放射温度を継続的に測定することによって、SWSI を苗質と関連づけられる可能性も示された。今後は、本試験で T_{min} , T_{max} 測定のために用いた乾燥床土や湿らせたろ紙より簡便な資材を用いるとともに、熱画像解析装置に替わる簡易な放射温度計の利用や、放射温度の連続測定によるリアルタイム診断による灌水管理手法についても検討が必要である。

第 5-1-5 図によると、標準区と多量区の SWSI の差は小さい。しかし、苗の伸長や葉面積の展開が育苗初期の水分供給により影響を受けることを考慮すると、藤井ら (1988b) が緑化期の第 1 回目灌水時期を遅らせることが苗質向上に重要であると指摘するように、苗 2.0 葉期直後を中心に 3.0 葉期までの SWSI を 0.3~0.35 に維持することが、水分ストレスによる生育抑制や過灌水による苗質低下を防ぐうえから重要であると考えられた。

健苗の育成のために、特に苗丈が伸長しやすい「コシヒカリ」では育苗管理の徹底が指導されてきた。今回の試験結果から、第 5-1-6, 5-1-7 図に示したように、育苗期間の平均 SWSI と苗質上重要な苗丈や茎葉重に明らかな負の相関が認められたことから、稚苗の苗質推定に、継続して測定する SWSI が利用できる可能性が示された。稚苗の理想的苗質である、草丈が 10~13cm で茎葉乾物重が 10mg 以上を満足させるためには、育苗期間の平均 SWSI を 0.3~0.35 程度とすれば良いと考えられる。この値は既報 (井上・林 1996) の苗の萎凋限界の値とほぼ同じであり、過剰な灌水を控えてしかも萎凋させない灌水管理が

健苗育成にとって重要であることがうかがえた。

高温育苗環境では苗のマット強度が低下し、移植時の苗のハンドリングに支障が生じることが知られている。山口・井上（2005）は、高温育苗条件下では床土施肥量を減らしたり育苗期間をやや長くしないと苗のマット強度を高く維持することが難しいと報告している。また、高橋ら（2006）も同様に、マット強度を高めるためには育苗日数は20～23日が必要であると報告している。本試験の25℃近い高温育苗環境下では育苗日数は13日と著しく短縮し、SWSIの小さい湛水条件では苗丈が著しく伸長して苗質が低下した。したがって、高温育苗環境ではSWSIをやや高める灌水管理により地上部の徒長を防ぎ、根重低下も軽減してマット強度を高める灌水法が必要である。

「コシヒカリ」では水稻生産者の経営の規模拡大による作付面積の増大に伴って、移植時期が長期化し、育苗時期の中も広がる可能性がある。さらに、育苗期間の気温の変動が大きくなることも想定されることから、SWSIを活用した灌水管理により、多少の気温変動下でも均質な苗の育成が可能になると考えられる。今後は測定の簡易化と自動化について研究を進め、より実用的なスタイルを模索したい。

なお、本研究で用いた品種は苗丈が伸長しやすい「コシヒカリ」であり、品種によってSWSIの基準値が変わる可能性があることに留意する必要がある。また、播種量や施肥量も一定条件で試験を行ったが、極端な疎播や密播、多肥条件でも苗質は変動する（佐藤ら1979, 井上・湯浅 2001）ので、幅広い育苗条件に指標を適用するには検討が必要である。

【摘 要】

育苗期間の灌水管理の指標化のために、熱画像を解析した苗水分ストレス指数を開発し、苗質や育苗環境との関連性について解析した。苗群落温度と乾燥床土および湿潤ろ紙の温度を用いた苗水分ストレス指数は、高温乾燥条件で高く、低温湿潤条件で低くなった。灌水量が少ない条件では苗丈や茎葉および根の乾物重が劣り、一方湛水条件では特に高温条件で苗丈が著しく伸長し、いずれも苗質が低下した。健苗の指標となる苗丈や茎葉乾物重を満足させるためには、育苗期間の平均SWSIを0.3～0.35とすることが望ましいことが明らかとなった。

第2節 熱画像の解析による水稻登熟期間の水ストレスの診断

北陸地域の水稲は、出穂期から登熟中期にあたる7月中旬から8月下旬にかけて高温乾燥条件に遭遇し易く、水管理が不備な圃場や根の張りや根の活力が不良な条件においては水分ストレスを生じやすい。登熟期間の水分ストレスは、「コシヒカリ」のような長稈品種では倒伏を助長するとともに、短稈品種においても登熟不良により収量・品質を不安定とすることが知られている（小松ら 1984）。このような環境下で水稻の登熟状態を診断するためには、生育初期に行われる茎数や乾物重などの量的形質の診断技術にかわって、水分状態を中心とする生理機能の迅速な診断技術が必要である。そこで、圃場環境下での水分ストレス状態を非接触非破壊手法により簡易に診断するために、赤外線放射温度計を用いて群落の草冠部の熱画像を撮影し、その解析により得られた放射温度から水稻群落の水分ストレス程度を推定する手法について検討した。

【材料と方法】

1. 熱画像測定方法

熱画像撮影のための機器として、赤外線放射温度計（日本電気三栄製サーモトレーサー 6T62 型）を用いた。この赤外線放射温度計の主な仕様と測定条件を第 5-2-1 表に示す。この機種は、本体の他にデータレコーダが含まれており、任意の熱画像をフロッピーディスクに保存可能である。また、得られた熱画像の解析のために、添付されているパソコン用ソフトを用いた。

放射温度は、水管理試験においては軽トラックの上に三脚を立て、地上約 1.9m 上に測定ヘッドを置き、圃場の西側から東側に向けて俯角約 10° で測定した。また、品種比較試験においては地上 1.2m より俯角約 5° で北側より南側に向けて測定した。現地干ばつ圃場においては、クレーン車に熱画像解析装置一式を積み込み、地上 10~15m より俯角 20~30° で南および北方向に測定した。測定は、一部調査を除いて 10~15 時の日中の風の弱い直射日光下で、調査視野内の日射強度が安定した条件で行った。

第 5-2-1 表 使用した赤外線放射温度計（サーモトレーサー 6T62 型）の仕様

項目	仕様
温度測定範囲	-50~200℃
最小検知温度差	0.1℃
感度設定	0.1~1.0℃
測定視野	水平 30°~垂直 27°
水平解像度	344 本
測定精度	±0.5%
焦点範囲	20cm~無限大
走査線数	207 本
フレームタイム	0.5sec
放射率	0.98,1.00
検出器	水銀カドミウムテルル（液体窒素冷却型）

得られた熱画像より、添付ソフトを用いて各品種、試験区の草冠部（群落上部；穂、上位葉身および葉鞘、稈の一部が含まれる）の一定面積を切り出した。調査時の各区の水稻の葉面積指数は4以上と十分に繁茂しており、この測定条件では肉眼による土壌表面の識別は困難であった。したがって、草冠部温度は切り出された各区水稻群落の穂、上位葉などの温度の平均値として表示されたことになる。

2. 調査対象

1) 水管理試験

供試品種として「コシヒカリ」と「キヌヒカリ」を用い、1994、1995の2年間試験を実施した。出穂期までは慣行栽培とし、出穂期以降の水管理に間断灌漑、落水の2処理区を設定し、先に述べた方法により群落草冠部の温度を測定した。1994年は処理期間中、落水区の葉身の萎凋と倒伏が著しくなった8月16～17日に一時的に入水し、すぐ落水した。間断灌漑区には土壌表面の水がなくなるほど3日おきに入水した。放射温度の測定は、7月28日、8月2日、8月7日、8月8日、8月9日、8月14日、8月16日、8月17日に行い、いずれも13～15時に測定した。1995年にも同様な処理区を設定して同様な方法により測定したが、調査は8月14日、8月25日の2回とした。耕種条件は当場の慣行栽培に従い、両年次ともに5月上旬稚苗移植、栽植密度20.8株/m²、基肥窒素成分量「コシヒカリ」4kg/10a、「キヌヒカリ」6kg/10a、穂肥窒素は両品種とも2+2kg/10aとして栽培した。各区30m²の2区制で調査した。

1994年には熱画像を測定した試験区において、出穂期、成熟期に各区3株サンプリングし、物質生産経過を調査するとともに、常法にしたがって収量調査を行った。また、収穫した玄米のみかけの品質を観察により、玄米窒素濃度を近赤外分光分析により、食味官能評価を炊飯試験により調査した。1995年では熱画像測定と同時に各区5枚ずつ止葉葉身の光合成速度を測定し、草冠部温度との関係を比較検討した。

2) 品種比較試験

1993年のような登熟期間の低温寡照条件でもわずかながら草冠部温度の品種間差が認められたため、1994年は生理生態的特性が大きく異なる日本稲および日印交雑稲で出穂期が類似している品種を用いて検討した。

供試品種として出穂、成熟期がほぼ同じで草型や耐干性程度など生理生態的特性が異なると見られる「コシヒカリ」、「キヌヒカリ」、「新青矮1号」、「ハバタキ」、「M-201」、「水原262号」を用いた。登熟期間の水管理は1)の落水条件と同様に管理し、調査は1994年7月29日、8月2日、8月9日、8月16日に行った。耕種条件は慣行栽培に準じ、5月上旬稚苗移植、栽植密度20.8株/m²、基肥6kg/10a、穂肥2+2kg/10a（いずれも窒素成分）で栽培した。できるだけ多くの品種を同一画像に取り込む必要性から、1品種の試験面積は0.54m（2条）×4.8mの約2.5m²とした。

各品種とも携帯型光合成蒸散測定装置（SPB-H3）を用いて、8月2日の日中に2時間おきに止葉の光合成速度を測定し、日変化として表した。また、出穂期および成熟期に各区2株ずつサンプリングし、部位別乾物重を測定するとともに、登熟期間の乾物生産速度を算出した。さらに、1区あたり約40株を坪刈りし、粗玄米収量を算出して品種間で比較した。

3) 現地干ばつ圃場の草冠温度分布調査

現地圃場の水稻群落の水分ストレス程度の分布を把握し、手法の適応性を検討するために、渇水により干害が認められた農試圃場に隣接した 20~30 a 圃場を選び、熱画像測定を行った。この圃場の品種は「ハナエチゼン」で、調査時期は 1994 年 8 月 10 日で成熟期の約 7 日前であった。調査の翌日に一筆圃場内で水分ストレス程度の異なる 4 ヶ所において止葉の光合成速度を測定するとともに、成熟期に坪刈りして収量および収量構成要素を算出し、熱画像より得られた草冠温度との関係を検討した。

【結果と考察】

1) 落水処理による水分ストレスが草冠部温度、収量および品質に及ぼす影響

1994, 95 年ともに出穂期から登熟中期にかけての降水量は極めて少なく、94 年は 7 月 26 日（出穂期）から 8 月 18 日（登熟中期）までの降水量が 9.0mm, 95 年は 8 月 8 日（出穂期）から 8 月 27 日（登熟中期）までで同様に 9.0mm しかなかった。しかもこの期間の平均気温は 94 年で 30.0℃, 95 年で 28.8℃と平年値より 1.5~3℃近く高く、落水区の土壌表面には大きな亀裂が入り、断根が認められるとともに、推定 pF は 2.8 を上回っていたと判断された。落水区の土壌水分の低下に伴い、「コシヒカリ」の落水区では出穂後 15 日頃より倒伏が始まり、間断灌漑区との倒伏程度の差は明らかであった。

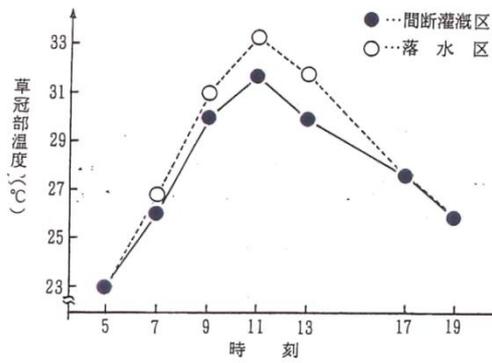
熱画像の解析により得られた水稻群落の草冠部の温度は出穂前後で異なり、出穂後に高まる傾向が認められた。これは穂と葉身部における蒸散速度の違いに基づくものと判断された。

登熟中期の晴天条件において、「コシヒカリ」の間断灌漑区と落水区の草冠部温度の日変化をみると、落水区では 7 時~16 時頃まで温度が高く、1994 年 8 月 9 日の例では日中最大 2.0℃の差が認められた（第 5-2-1 図）。また、外観的に葉身の萎凋が認められない状態でも、水管理処理の異なる水稻群落の草冠部温度には明らかな差が認められた。

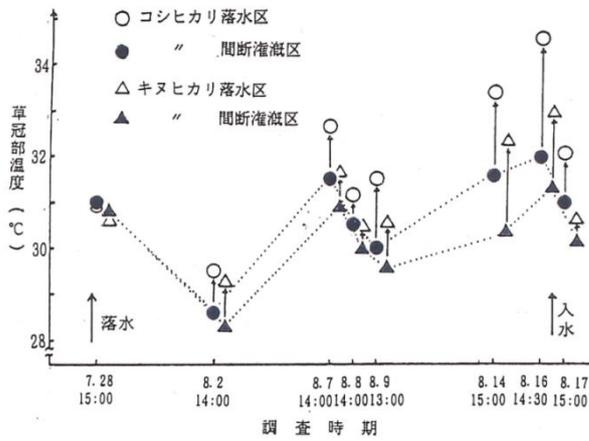
供試した 2 品種の草冠部温度には水管理処理前でも差が認められ、「キヌヒカリ」より「コシヒカリ」がわずかに高かった。また、処理が進むにつれて間断灌漑区では 0.3~1.1℃, 落水区では 0.3~1.4℃「コシヒカリ」が高くなった。

間断灌漑区と落水区の温度差は、処理開始後落水区に水分ストレスが加わるにつれて拡大した。温度差は、処理開始 7 日後で 0.5~0.9℃, 14 日後で 0.9~1.4℃, 21 日後では 2.0~2.7℃に達した。これは、水分ストレスに伴う上位葉身の萎凋や蒸散量の減少が草冠部温度に影響を及ぼしたためと考えられる。落水処理の継続に伴い倒伏した「コシヒカリ」では、草冠部温度の差も拡大したが、これは放射温度が倒伏による草型の乱れに伴い穂や上位葉身だけでなく稈や枯葉の影響も強く受けるようになったためと考えられる。一時的に入水した後の 8 月 17 日では、気象条件が前日とほぼ同様で草型に変化がないにもかかわらず、落水区の草冠部温度は両品種ともに前日より約 1℃低くなり、水分ストレスが軽減されたことを示していると考えられた（第 5-2-2 図, 写真 5-2-1）。

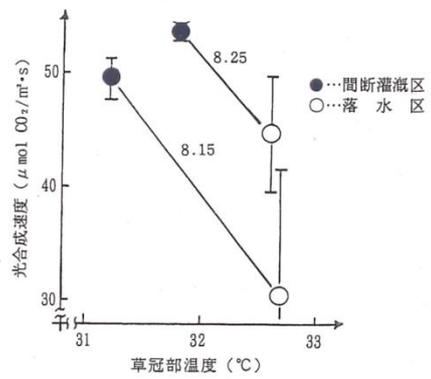
倒伏等による水稻群落の乱れのない条件で測定した草冠部温度と止葉の光合成速度の関係を第 5-2-3 図に示した。草冠部温度が高い落水区では、間断灌漑区よりも平均光合成速度が低く、処理期間が長くなるほどその差が拡大した。また、落水区では測定葉身間の光合成速度の分散が大きくなっていった。



第 5-2-1 図 水管理の異なる水稻群落の草冠部温度の日変化の一例 (1994.8.9 コシカ)



第 5-2-2 図 草冠部温度の経過 (1994 水管理試験)



第 5-2-3 図 草冠部温度と止葉光合成速度の関係 (1995.8.15 8.25 各 12~13 時: コシカ)

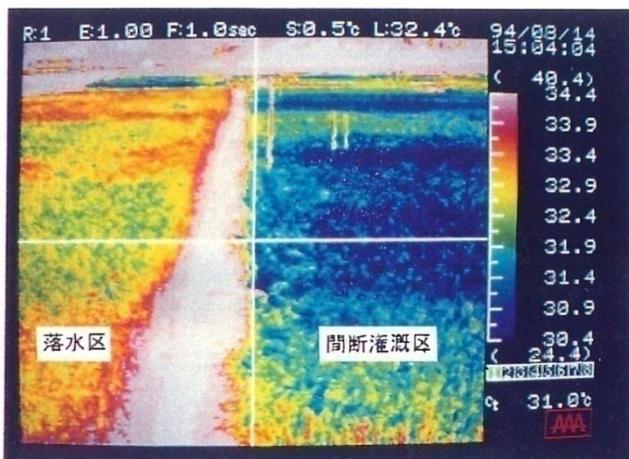


写真 5-2-1 水管理試験区の草冠部温度 (1994.8.14; 15:04) 右; 間断灌漑区, 左; 落水区.

以上の結果より、熱画像の解析により得られた水稻の草冠部温度から、水分ストレスの診断が可能であることが明らかとなった。また、草冠部温度と止葉の光合成速度の間には負の関係が認められたことから、水分ストレスによる上位葉を中心とした気孔の閉鎖が蒸散速度や光合成速度の低下をもたらした結果、隔測された放射温度にも影響を及ぼしたと考えられる。

「コシヒカリ」の両試験区の生育および収量を第 5-2-2 表に示した。落水区の成熟期の地上部乾物重や登熟期間中の CGR, NAR は間断灌漑区よりも小さかった。また、精玄米重も 6kg/a 少なかった。落水区の収量低下要因は、登熟歩合と千粒重の低下で、特に登熟歩合は間断灌漑区を 10% 下回った。

また、落水区では乳白粒、腹白粒および茶米等が増加し、完全米歩合が 15% 以上も低くなり見かけの品質も不良であった。さらに、玄米窒素濃度が約 0.2% 高く、食味官能試験の総合評価値も間断灌漑区より明らかに不良であった (第 5-2-3 表)。

小葉田・高見 (1981) は日本晴を用いて登熟初期の水ストレスがイネ穀実の乾物増加をほとんど阻害しないことを明らかにしている。これに反して、本試験の落水区は、出穂期から出穂後 21 日までの主に登熟前半の処理であったが、精玄米重は大きく低下していた。また、登熟期間を通じた地上部および穂の CGR も落水区では低下していた。これは水分ストレスによる光合成速度の低下 (井上 1988, 井上・石井 1990, 井上 1990) の結果と考えられるが、「コシヒカリ」を用いているためにストレスに伴う倒伏の増加が物質生産の低下をより顕著にしたと考えられる。また、乳白粒の多発による見かけの品質の低下に加えて、玄米窒素濃度の増加により食味評価の低下をもたらしたことから、登熟期間の水ストレスが収量品質に及ぼす影響が大きいことが再確認された。しかし、一時的な入水によって草冠部温度の試験区間差が縮小したことから明らかなように、早期に水分ストレスが診断でき、適切な水管理が実施できれば物質生産や収量、品質への影響をより少なくできると考えられる。

2. 草冠部温度の品種間比較

供試した品種の出穂期は 7 月 26~28 日で品種間の差は小さかった。登熟期間に落水して水分ストレスを与え、高温乾燥条件で比較検討したところ、上位葉身の萎凋程度には明らかな品種間差が認められ、萎凋程度は「コシヒカリ」、「M-201」で強く表れ、「新青矮 1 号」や「ハバタキ」で程度が軽かった。落水初期から後期にかけての草冠部温度を比較すると、調査時期によってやや変動はあるものの、萎凋程度を反映して「コシヒカリ」、「M-201」でやや高く、「新青矮 1 号」、「ハバタキ」および「水原 262 号」でやや低い傾向が認められた (第 5-2-4 表, 写真 5-2-2)。品種間の温度差は最大 1°C 前後であった。

出穂後ほぼ 7 日にあたる 8 月 2 日の止葉葉身の光合成速度の日変化をみると、萎凋程度の小さい「新青矮 1 号」、「ハバタキ」で高く、萎凋程度の大きい「コシヒカリ」、「M-201」で低く推移した。「キヌヒカリ」はその中間であった。この品種間差は日射量が多かった午前中に大きく表われ、雲により直達光が遮られて日射量が 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ を下回った午後には小さくなった (第 5-2-4 図)。

登熟期間の地上部部位別の乾物増加速度を比較すると、草冠部温度が低かった「ハバタキ」が最も高く、穂重も最も大きかった。「水原 262 号」も「ハバタキ」に次いで乾物増

第 5-2-2 表 登熟期間の物質生産および収量 (1994 コシヒカリ)

試験区	成熟期	登熟期間 CGR		m ² 地上部 籾 数	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	精玄米重 (g/m ²)
	地上部 DW (g/m ²)	地上部 (g/m ² /日)	穂				
間断灌溉	1496	16.8	17.6	288	93.3	21.4	579
落水	1412	13.6	15.5	296	83.8	20.7	516

第 5-2-3 表 品質および食味関連要素 (1994 コシヒカリ)

試験区	見かけの品質				玄米窒素 濃度 (%)	食味官能 総合評価
	完全米 (%)	乳白粒 (%)	腹白粒 (%)	茶米等 (%)		
間断灌溉	77.8	5.7	1.7	5.1	1.27	0
落水	61.1	18.8	3.4	9.1	1.46	-0.71**

** 1%水準で有意差あり.

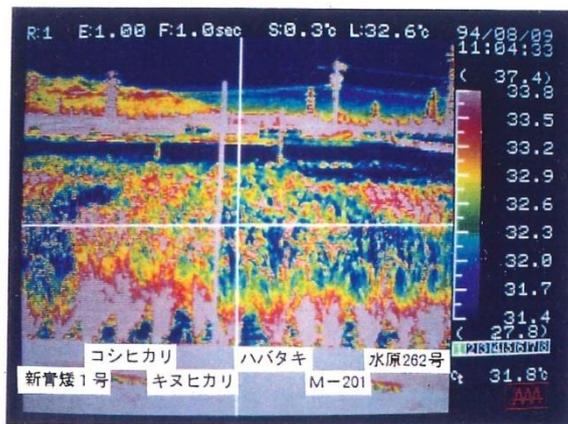


写真 5-2-2

品種比較試験の草冠部温度 (1994. 8. 9; 11:04)
左より新青矮1号, コシヒカリ, キヌヒカリ,
ハバタキ, M-201, 水原262号

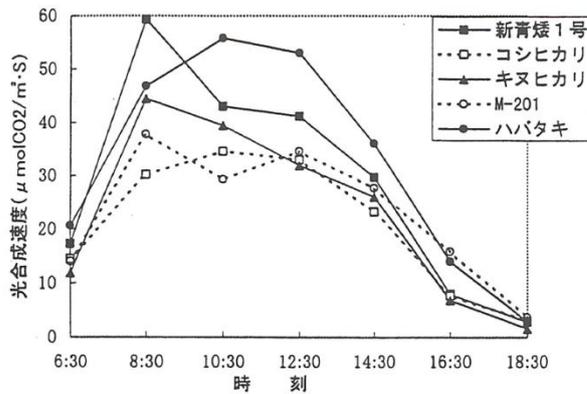
第 5-2-4 表 草冠部温度の品種間差 (1994)

調査時期	コシヒカリ	キヌヒカリ	新青矮1号	ハバタキ	M-201	水原262号
7/29 14:00	28.2°C	28.0	27.2	27.6	28.4	27.9
8/2 10:10	32.4	32.1	31.9	31.5	32.2	31.7
8/9 11:04	33.2	32.9	32.0	32.5	32.7	31.9
8/16 14:30	33.5	33.1	33.0	32.6	32.6	31.8

第5-2-5表 供試品種の登熟期間の物質生産と収量 (1994)

品 種	出穂期 L A I	登熟期間の物質生産(g/m ² /日)*					稈長 (cm)	穂長 (cm)	穂数 (本/m ²)	粗玄米重 (g/m ²)
		葉身	枯葉	葉鞘・茎	穂	計				
新青矮1号	3.81	-2.51	2.05	-2.02	16.32	13.84	64.1	22.1	315	676
コシヒカリ	4.51	-3.73	3.03	-1.29	17.64	15.65	86.0	18.8	422	610
キヌヒカリ	4.68	-2.51	2.08	0.97	16.87	17.41	75.5	17.8	387	684
ハバタキ	4.31	-1.21	1.01	-0.34	21.58	21.02	76.8	24.5	277	794
M-201	3.86	-2.59	1.64	-2.19	12.82	9.69	69.2	22.4	302	555
水原262号	4.89	-0.83	1.13	0.33	17.23	17.86	60.0	24.2	305	642

注) * 出穂期～成熟期；新青矮1号～ハバタキ：35日，M-201および水原262号：39日



第5-2-4図 止葉葉身光合成速度の日変化 (1994. 8. 2)

加速度が大きかった。しかし、同様に草冠温度が低かった「新青矮1号」の乾物増加速度はやや低く、草冠温度が高かった「コシヒカリ」の乾物生産速度は比較的大きかった。乾物増加速度が大きい「ハバタキ」や「水原262号」は葉身の枯上がりが少なく、穂の増加速度が比較的大きいという特徴を示した。粗玄米重も乾物増加速度とほぼ同様な傾向を示し、「ハバタキ」>「キヌヒカリ」>「新青矮1号」>「水原262号」>「コシヒカリ」>「M-201」の順となった(第5-2-5表)。

今回の試験で用いた品種のうち、萎凋しやすく草冠部温度が高い「コシヒカリ」や「M-201」は、いずれもやや葉身長が長いことため受光態勢はやや不良で穂の抽出程度が大きく、しかも短稈直立葉品種と比較すると倒伏し易く、視野内の葉身の割合が低いことが草冠部温度を高めたとも推測される。しかし、出穂期のLAIと草冠部温度の間には相関関係が認められていない点や、萎凋程度が小さい短稈直立葉品種では特に日射量が多い条件において止葉の光合成速度が高く、登熟期間の乾物増加速度も光合成速度の高かった「ハバタキ」で大きく、萎凋程度が大きかった「M-201」では最も小さかったことから、草冠部温度の高低は光合成速度や蒸散速度を通して乾物増加速度と密接に関連していたと考えられる。したがって、耐干性程度の評価や高温乾燥条件における物質生産能力や高温登熟力の品種間比較にも草冠部温度が活用できる可能性が示唆された。しかし、本試験結果からは草冠部温度、光合成速度、物質生産能力の間に必ずしも直線的関係が認められなかったことから、草冠部温度に影響を及ぼした生理的要因と生態・形態的要因とを区分した解析が必要であると考えられる。

3. 現地干ばつ圃場の草冠部温度の分布および収量、品質との関連性

用水不足により干ばつ被害を被った 30a 区画圃場における、水稻群落の草冠部温度の圃場内分布をみると、明らかに水口部で低く水尻部で高かった。この傾向は、観察による上位葉身の萎凋、枯死から診断した干害程度と一致しており、圃場内における土壌の乾燥状態や水稻の蒸散程度の違いを良く表していると判断された（写真 5-2-3, 5-2-4）。また、この圃場に隣接した水管理良好な圃場の草冠部温度は、干害を被った圃場より最大で 3℃低く表れた（写真 5-2-5）。さらに、この時期の調査では葉身の枯死が認められず、肉眼では水分ストレスが明らかではない「コシヒカリ」圃場でも、倒伏部分の草冠部温度は高温であった（写真 5-2-6）。

写真 5-2-3, 5-2-4 に示した圃場内で草冠部温度の異なる地点別に止葉の光合成速度を測定し、さらに坪刈りを行った。その結果、草冠部温度が高い地点ほど止葉の枯上がり程度が強く、光合成速度も低下していた。精玄米重も同様に低下しており、特に干害程度甚の箇所では微の箇所の約 1/2 であった。低収要因を収量構成要素からみると、穂数は大差ないが m² 当たり粒数、登熟歩合、千粒重がいずれも小さかった。これは、幼穂形成期間からの水分ストレスや肥効低下によると考えられ、出穂期以降のストレスは干害程度甚の箇所で特異的に大きかったと判断された。品質面では、完全米歩合には一定した傾向は認められずむしろ被害程度の小さい箇所で低かったが、胴割れ率は干害甚の箇所を除き被害程度に応じて高くなる傾向であった（第 5-2-6 表）。これは、登熟期間のストレス程度が大きい場合には玄米の発育が登熟途中で停止し、正常登熟粒と発育停止粒の選別が早期に決定されたことに加え、出穂以前からのストレスにより粒数が減少した結果とみられる。

このような著しい干害被害圃場では、測定時点までの水分ストレスの積算強度が熱画像に表れていると判断される。熱画像から得られた草冠部温度の分布は、肉眼でみた上位葉身の枯上がりによる水稻群落の退色程度とほぼ等しいと見られるが、干害による被害程度を数値化するうえで有効な指標になり得ると考えられる。したがって、この現地圃場一筆内の放射温度分布と収量調査データより、収穫間際的水稻群落の葉身の活力程度や水分ストレス程度、さらには収量、品質に及ぼす影響がある程度推定可能で、大面積圃場においてもこの手法が適用できると判断された。また、外観上葉身の枯死や萎凋が認められなくても倒伏部分の温度は高温と表示されることから、高温部分では水分ストレスや倒伏等物質生産の低下が生じていると評価することもできよう。

【総合考察】

今回行った 3 回の試験の結果を総合的に判断すると、赤外線放射温度測定により得られた水稻群落の草冠部温度には、水管理や品種の違いによって明らかな差が認められた。正常に生育している水稻の登熟期間の草冠部温度は、日中の高温多照条件でも気温より 3~4℃低く、今回の測定では最高値でも 32℃程度であった。しかし、落水等によって水分ストレスを受けている稲では、その程度に応じて正常な稲より 1~3℃近くも高温であり、熱画像の中での違いは明瞭であった。また、草冠部温度が高い水稻群落では光合成速度が低く、草冠部温度は水分ストレス程度や蒸散、光合成速度の違いを良く反映していると考えられた。

また、草冠部温度が高く干ばつによる障害が認められた試験区においては、登熟期間の

物質生産や収量だけでなく、みかけの品質や食味関連要素も低下していた。このことから、草冠部温度を用いた光合成速度を中心とする生理機能の診断は、物質生産過程を通して収量、品質の早期診断にも活用可能であることも推察された。したがって、この結果を水管理の適正化のために活用すれば、収量のみならず品質低下防止による作柄や品質食味の安定化に寄与できると考えられた。

草冠部温度からの実用的な生理機能診断指標の作成については多様な栽培および気象環境のもとで測定されたデータの蓄積および解析が必要であるが、植被が十分に土壤を覆った1枚の熱画像内では、おおむね 0.5°C 以上高温となって表示されている部分については、生理生態的にストレスを受けていると判断してもよいと推察される。また、熱画像を利用して水稻群落の草冠部温度を面的にとらえることにより、20~30 a 規模の圃場の干害被害分布を数値化して診断できると判断された。したがって、熱画像データを栽培面に活用する観点からは、特に大規模圃場における水管理の不備や倒伏の発生による温度ムラが小さくなるよう管理することが、収量、品質の均一化をはかるうえで重要であろう。

さらに、落水によりストレスが加わった条件においても、日印交雑の短稈直立葉型品種では草冠部温度が低く登熟期間の乾物生産量も大きかった。したがって、耐干性や高温登熟性を持つ品種のスクリーニングに草冠部温度を一つの指標として活用できると考えられた。

しかし、これまでは1枚の熱画像内の草冠部温度差のみについて比較解析を行っているため、さまざまな気象環境下で撮影された熱画像から得られた草冠部温度相互の比較は困難である。したがって、熱画像から普遍的にストレス程度や生理機能を診断する手法の開発が今後の重要な課題である。一つの考え方としては、環境条件と蒸散特性（あるいは蒸発特性）の関係が明らかな物体も同時にそれぞれの熱画像に写し込むなどして、熱画像から得られた草冠部温度の絶対評価について検討し、標準物体の放射温度との比を利用して指標を作成する手法も検討する必要がある。また、品種の草型の違いが群落構造の中の影や受光特性を変化させ、それが草冠部温度にも影響を及ぼしていることも考えられるので、同一品種で栽培条件を変えて草型の異なる群落を作成し、草冠部温度と生理機能の関係についても検討する必要がある。



写真 5-2-3 現地干害圃場のカラー画像 (1994. 8. 10)
灰白色部分が干害部

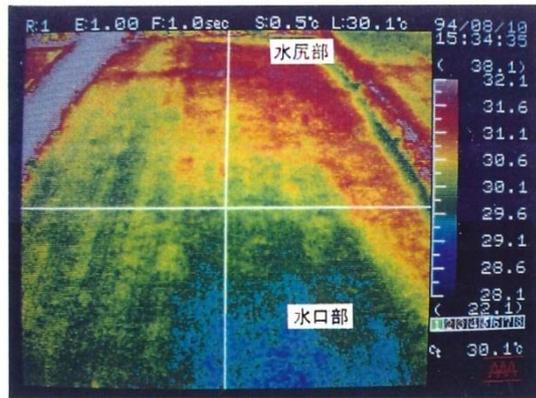


写真 5-2-4 現地干害圃場の熱画像 (1994. 8. 10)

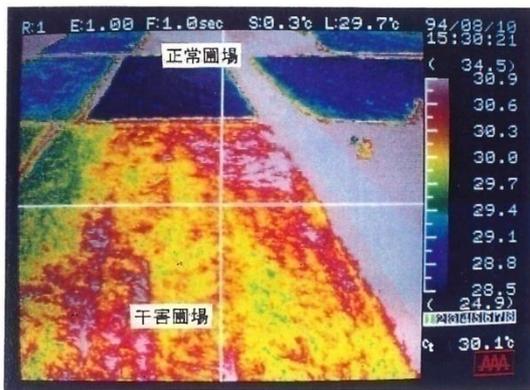


写真 5-2-5 現地干害圃場と正常圃場の熱画像の比較 (1994. 8. 10)

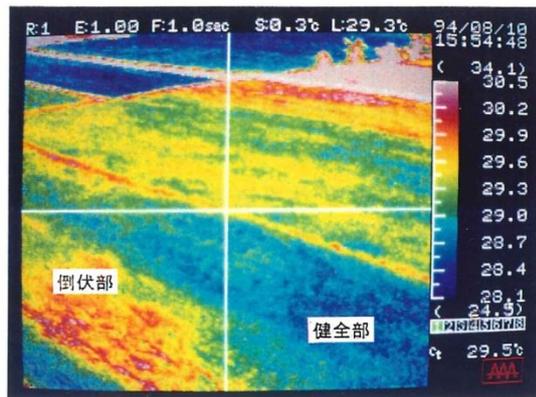


写真 5-2-6 熱画像でみたコシヒカリ圃場の倒伏部分 (1994. 8. 10)

第 5-2-6 表 現地圃場の草冠部温度と収量, 品質 (1994 ハイチゼン)

調査場所の 草冠部温度*	干害* 程度	止葉*** 光合成速度	穂数 (本/m ²)	m ² 穂数 (百粒)	登熟 歩合 (%)	千粒重 (g)	精玄 米重 (g/m ²)	完全米 率 (%)	胴割 率 (%)
29.4	微	28.3	438	253	92.0	22.9	54.0	62.2	22.4
30.5	中	16.0	424	239	89.7	22.6	48.0	72.4	26.2
30.9	多	7.1	424	216	89.8	22.3	43.2	76.0	40.8
31.4	甚	-	434	201	71.2	19.9	27.7	68.8	24.8

注) * 1994年8月10日 10:30 調査.

** 止葉葉身の枯上り程度により分類。(微: 健全, 中: 1/3 枯死, 多: 1/2~3/2 枯死, 甚: 完全枯死)

*** 1994年8月11日 15:00 調査.

第3節 水稻登熟期間の夜間灌水の効果

水稻生育期間中の気温の上昇が進み、各地で出穂期や成熟期が早まるなどの事例が多く報告されている。また、温暖化は発育の進展のみならず、米の品質にも大きな影響を及ぼしている。白未熟粒の発生実態を数多く解析した森田（2011）は、九州地域では日照不足をとまなう高温や夜温の上昇が登熟不良、白未熟粒多発の大きな要因であると指摘している。また、中川ら（2012）も2010年の北陸地域を中心とした高温による米の品質低下を解析し、「コシヒカリ」の白未熟粒の多発は登熟気温の高さのみならず、窒素栄養条件の低下や多照条件が発生を助長したことを示唆している。これらの報告から、登熟期間の高温を避けるとともに、窒素栄養を基本とする稲体の生理的な条件を適正な状態に維持することが、高品質米を生産するうえで重要であるといえる。

高温登熟を避ける点からは、移植時期を遅らせて出穂後20日間程度の平均気温を低下させる、「遅植え」が各地で推奨されている。著者は、「遅植え」が登熟気温を低下させるのみならず、 m^2 あたり粒数がやや少なめに維持されることにより登熟歩合と1粒重の増加速度が高まり、それが大きな収量低下を招かずに品質を維持するうえで重要な役割を果たしていることを示した（井上2012）。また、中山間地では平均気温が低く日射量も幾分少ないが、現在の生産レベルでは品質食味の良好な米の生産に適していることも示した（井上・高岡2012）。

一方、福井県では主要河川である九頭竜川、日野川の用水のパイプライン化が進展しており、工事完成時の受益面積は福井県の耕地面積の40%以上を占めると想定されている。このため、その水を効率的にどう利活用するかは大きな課題である。パイプライン化により、ポンプ場を稼働させて揚水する配水法から自然圧で流下させることができるようになり、24時間の利用が可能となり水管理の自由度が高まるとともに、水管理に要する経費は削減されるなどのメリットは大きい。それに加えて、その水をどう生産性の向上に活用するかも求められている。

そこで、水稻の高温に伴う品質低下を低減するための登熟期間の水管理の効果について、簡単に取り組むことができる昼間灌水と夜間灌水の違いを比較検討した。これは、パイプライン敷設前は基幹水路から分水するポンプ場の稼働時間が基本的に昼間であり、灌水時間の自由度が小さかった。そのため、水管理の自由度が高まるパイプライン化を契機として水を有効に活用したいとのねらいを受けた設定である。なお、本稿の水試験区は、夜間灌水を夜水区、昼間灌水を昼水区と称することとする。

【材料と方法】

1. 調査場所と水管理方法、栽培条件

水管理に関する調査は、2006～2008年と2011～2013年の6年間に、福井県内現地計14ヶ所の「コシヒカリ」移植圃場（10ヶ所）および直播圃場（4ヶ所）で実施した。前3年間はパイプライン化される前の圃場、後3年間はパイプライン化された後の圃場の調査である。基本的に、隣接圃場で夜間灌水（原則18:00～翌日6:00）と昼間灌水（同6:00～18:00）の両区を設定した。試験区の反復は行わなかった。灌水は出穂期前後より開始し、

第 5-3-1 表 年次ごとの調査場所と栽培方法

年次	調査場所	栽培法	圃場配置	灌水回数*		解析に供試
				夜水	昼水	
2006	坂井市丸岡町四ツ屋	移植	隣接	7	7	○
	坂井市三国町楽円	移植	やや離れる	11	13	○
2007	永平寺町領家	移植	隣接	4	5	○
	坂井市春江町中筋	移植	隣接	9	5	○
	坂井市三国町楽円	移植	やや離れる	7	6	○
2008	坂井市春江町中筋	移植	隣接	7	13	○
	坂井市三国町楽円	移植	やや離れる	8	8	—
2011	坂井市坂井町下兵庫	直播	隣接	10	9	○
	坂井市坂井町上兵庫	移植	やや離れる	7	7	—
	坂井市春江町福島	移植	かなり離れる	6	4	—
2012	鯖江市四方谷町	移植	一筆を2分	10	11	○
2013	南越前町脇本	直播	隣接	4	4	○
	鯖江市四方谷町	移植	一筆を2分	6	6	—
	福井市竹生	直播	隣接	5	5	○

注) * 灌水回数の平均値は、夜水 7.2 回、昼水 7.4 回。

上記時刻の間入水し、入水終了とともに自然条件で落水し、それを繰り返した。灌水のタイミングは農家の判断に委ね、記帳を依頼して集計した。したがって、降雨が多い年次の灌水頻度は低く、乾燥が続く年次の頻度は高かった。また、試験圃場によっては夜水区と昼水区の水持ちがやや異なり、灌水回数も同じではなかった(第 5-3-1 表)。なお、品種はすべて「コシヒカリ」としたが、栽培法は基本的に両区同じとして農家慣行に準じ、出穂期までの施肥量や肥培管理は夜水、昼水圃場を同一として農家に委ねた。

2. 温度のモニタリングと蒸発量の算出

各圃場の試験区に簡易型自記温度計(タバイ製 RT-13)を設置し、地表面と地上 80cm の温度(以下それぞれ地表温、群落温度と記す。群落温度は 2011~2013 のみ)を 30 分おきにモニタリングして集計した。また、水温については、九頭竜川は福井市浄水場、日野川は日野川用水土地改良区の日別データを入手し、水温変化の解析に使用した。両データともにパイプラインの取水口に近い場所で測定しているため、取水口データとして近似した。

また、福井地方気象台の気温、日射量、湿度、風速データを用いて、高見(2004)の方法により日蒸発量を算出し、灌水の必要性を気象面から推測するために活用した。

3. 生育収量の調査方法

調査場所は各試験区に 2ヶ所設置した。それぞれ 12 株を出穂前から SPAD を用いた葉色調査に供試した。出穂後は 7~10 日おきに止葉葉色を継続調査した。2013 年には、登熟中期の夜間灌水実施日に稲株を地上 10cm より切断し、脱脂綿にポリエチレン袋をかぶせて夜間(16:00~9:00)および翌日昼間(9:00~16:00)の出液量を測定し、1 穂あたり

で表示した。

各調査は作物調査基準（日本作物学会九州支部会 2013）に準じて行った。収量調査は、移植、直播ともに 3~4 m²を地際より坪刈りし、稲架干し後脱穀して収量構成要素を計測した。品質は 2006 年のみ目視調査を行ったが、それ以降は品質判定機（静岡製機製 ES-1000）を用いて測定した。食味関連要素については、食味計（静岡製機製 TM-3500）および味度メーター（東洋精米機製）を用いて測定するとともに、搗精歩留り 90%に設定して精米し、官能試験に供試した。

なお、イネの収量や品質は m²あたりの粒数に大きく左右されるため、解析にあたっては両区の出穂期までの生育量は同じである条件で比較するとの前提で、m²あたりの粒数の差が 2,000 粒以内となる場所のみ（10ヶ所：移植 7、直播 3）のデータを使用し、それ以外は解析から除外した（第 5-3-1 表）。また、得られたデータの解析には、対応のある場合の平均値の差の検定を行った。

【結果と考察】

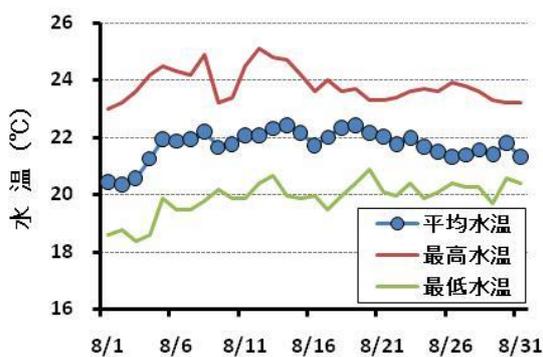
1. 夏期のパイプライン水温の変化

夏期のパイプライン中を流下する水の水温変化は軽微であり、取水口の水温が 15km 程度下流まで維持される。これに対して、開水路の水温は場所にもよるが 3~4℃上昇する（西田ら 2013、大塚・坂田 2013）。加えて、水量が減少して流速が低下すると、水温は容易に 30℃を上回る。したがって、パイプラインを流下する距離が長くなるほど、同じ距離を流れた後のパイプラインと開水路の用水の水温差は大きくなることになる。このことから、取水口の水温がどのように変動するかがわかれば、パイプライン末端の水温がどの程度になるかを推測できる。そこで、年次によって夏期の河川水温がどのように変動するかについて、過去の水温データをベースとして解析した。

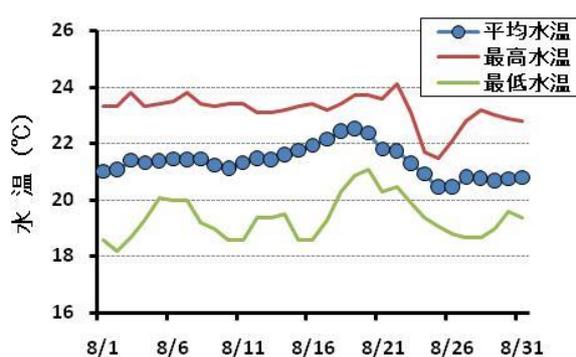
2007~2013 年の 8 月の日別の九頭竜川（取水口）の平均、最高、最低水温を第 5-3-1 図に、同様に集計した日野川（取水口）のデータを第 5-3-2 図に記した。これによると、8 月の水温は 18~25℃の間で推移し、平均水温は九頭竜川 21.7℃、日野川 21.4℃で、取水口の水温は比較的良好に似ていた。また、両河川ともに、最高水温は 24℃前後、最低水温は 18~21℃の間で推移した。8 月の平均水温を年次間で比較すると、九頭竜川で 20.5~23.3℃、日野川で 20.4~22.1℃と年次間差は比較的小さかった。九頭竜川よりも日野川のほうが 8 月の日別の平均水温の変動が大きい傾向があるが、これは、水源から取水口までの距離が九頭竜川で長く日野川では短いこと、および日野川ではダムからの距離が短いことによると考えられ、特に日野川の最低水温の変動が大きいのは、ダムの水位が変動して下層の低温水の放流の影響が大きいと推測される。なお、両河川の水温は、登熟期間の水田の地表温（第 5-3-2 表：日平均 25~28℃）に比べると明らかに低いことがわかった。

2. 水田の地表温および群落温度に及ぼす灌水の効果

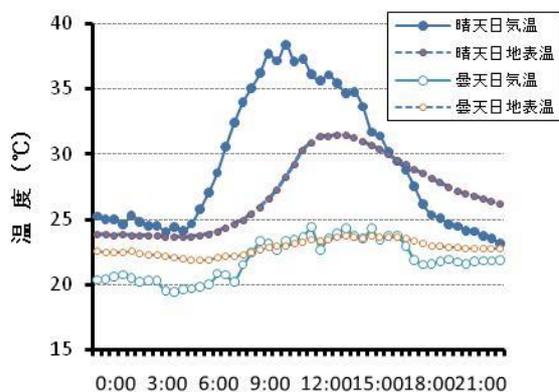
水田の地表温、群落温度ともにきれいな日変化を示し、群落温度のほうが日較差が大きく、日中の温度は 35℃を上回った。また、日射の影響が大きく、曇雨天日の日較差は小さくなった（第 5-3-3 図）。灌水試験では、基本的に夜水、昼水ともに同じ回数灌水する設計であるため、登熟期間など長期間で平均した温度には試験区間の有意な差は見られなかつ



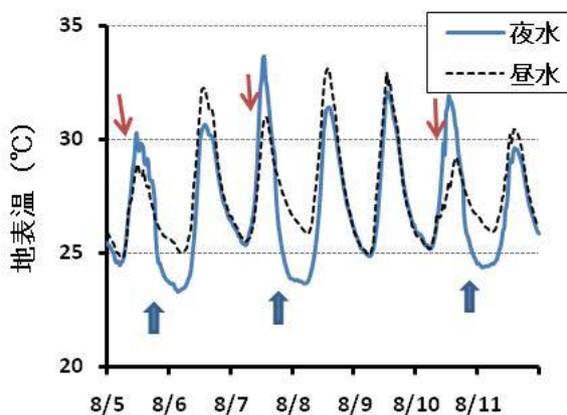
第5-3-1図 8月の九頭竜川の水温
(2007-13: 福井市浄水場調査)



第5-3-2図 8月の日野川取水口の水温
(2007-13: 越前市浄水場調査)



第5-3-3図 晴天日と曇天日の温度の日変化
(2011.8.8および8.21)



第5-3-4図 地表温の日変化
(2011: 下兵庫, 矢印は灌水始)

第 5-3-2 表 年次ごとの群落温度および地表温

試験区	2006	2007	2008	2011	2012	2013	平均	
夜水区	群落温度 (°C)	-	-	-	26.7	28.4	25.1	26.7
	地表温 (°C)	26.5	27.2	27.8	25.8	26.8	25.2	26.6
昼水区	群落温度 (°C)	-	-	-	26.9	28.1	25.7	26.9
	地表温 (°C)	26.3	27.1	27.6	26.1	26.3	25.2	26.4

注) 温度は解析に供試した各調査場所の登熟期間の平均値.

た（第 5-3-2 表）。

灌水の時間帯による温度の違いを比較すると、当初は灌水の影響がイネの群落表層にも及ぶ可能性を想定していたが、穂の位置の群落温度は灌水のやり方によってほとんど影響を受けなかった（第 5-3-2 表）。地表温は灌水によって明らかに低下し、落水に伴って上昇した。このため、夜水区では夜間の地表温の低下が顕著であるとともに翌朝の地表温の上昇も緩慢であった。一方、昼水区では日中の地表温の上昇は緩和されるが夜間は低下しなかった（第 5-3-4 図）。したがって、夜水区で日較差が大きくなった。灌水頻度が最大でも 2~3 日に 1 回であるため、登熟期間など長期間の平均温度にはほとんど差が認められなかったが、日較差の拡大が登熟向上に効果的に働いている可能性があると考えられる（森田 2011）

3. 気象条件と登熟期間の灌水頻度

試験年次の降水頻度、蒸発量、平均灌水回数と夜水区と昼水区の良質粒の割合の差を第 5-3-3 表に示した。「コシヒカリ」の登熟日数は通常 35~40 日で、この期間に 10~19 日間の降水日があった。また、1 日当たりの平均蒸発量は 5~7mm であった。登熟期間に 3 日おきの間断灌水ならば 11~13 回の灌水回数となるが、それに近い灌水回数であったのは 2006 年と 2012 年で、他の年次は気温や降水量の影響によりその 1/2~2/3 程度の灌水回数であった。年次ごとに比較すると、2007 年を除いて無降雨期間が長く蒸発量が多い年次では灌水回数が多かった。また、そのような年次では夜水区と昼水区の良質粒の割合の差がやや大きい傾向がうかがえた。この結果は、蒸発量の程度に応じて灌水を実施することが重要であることに加えて、高温乾燥年次ほど夜間灌水の効果が大きくなることを示している。

4. 登熟期間の夜間灌水の効果

1) 登熟期間の葉色と出液量

出穂後の止葉葉色は、年次によっては夜水区でやや濃く維持される場合もあるが、年次によって傾向が異なる場合もあり、明らかな差は認められなかった（図省略）。葉色の変化は、根からの窒素の吸収と葉身から玄米への窒素の転流経過を反映しているため、地力が高く根系の状態が良好であれば葉色は登熟後半までやや濃く維持される。20℃前半の比較的低温の水を灌水すると、地上 40cm 程度までの株元の温度は低下するとの報告もあり（西田ら 2013）、外気温が高い条件では温度差が拡大し登熟向上に好影響をもたらすと想定される。灌水が終了した成熟期前の根系形態には大きな違いはないが、夜間灌水日の株元からの出液量は、夜間、昼間ともに夜水区でやや多くなる傾向が確認された（第 5-3-5 図）。

2) 収量と品質

収量と収量構成要素の平均値を第 5-3-4 表に示した。穂数、一穂粒数および m²あたり粒数は両区ともによく揃い、ほぼ同等であった。夜水区では登熟歩合がわずかに高まり、同等な粒数でも精玄米重は 2%程度増加したが、統計的には有意差は認められなかった。この結果より、水管理の違いのみで著しい収量向上を期待することは難しいが、夜間灌水によりわずかに登熟に対して向上効果があると推測される。

見かけの品質を比較すると、夜水区では胴割粒+碎粒および白未熟粒などの発生がやや減少し、良質粒の割合が 3%高まった（第 5-3-6 図）。この結果は、登熟歩合の向上と同じ理

第 5-3-3 表 年次毎の降水頻度，平均蒸発量，灌水回数，良質粒の割合の試験区間差

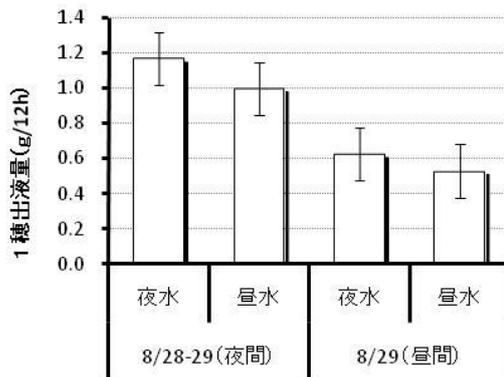
年次	2006	2007	2008	2011	2012	2013
降水頻度 (回) *	10	12	14	16	11	19
降水量 (mm)	240.5	174.0	224.0	295.0	284.5	467.5
蒸発量 (mm/日) *	6.1	6.4	5.5	5.3	7.1	5.1
灌水回数**	9.5	6.0	6.0	7.2	10.5	5.0
良質粒の差(%)***	+4	+1	+2	+3	+6	+1

注) * 8/1-9/10 の積算及び平均値. ** 試験場所の平均値. *** 夜水区-昼水区の値の平均値.

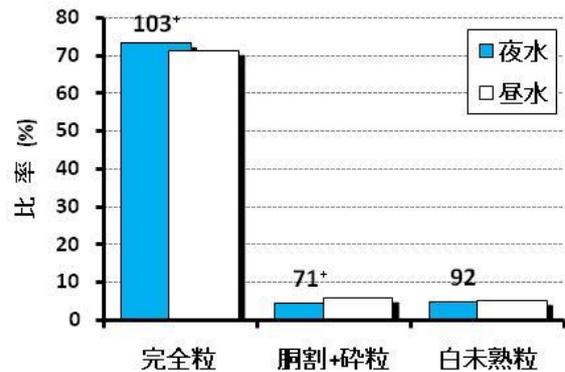
第 5-3-4 表 収量および収量構成要素の比較

試験区	穂数 (本/m ²)	一穂粒数 (粒)	m ² 粒数 (百粒)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	精玄米重 (kg/a)	収量比 (%)
夜水区	377±36	74.1±8.6	279±41	89.7±6.1	21.8±0.5	54.3±6.0	102
昼水区	383±50	73.1±9.2	279±42	88.8±6.6	21.7±0.5	53.2±5.4	100

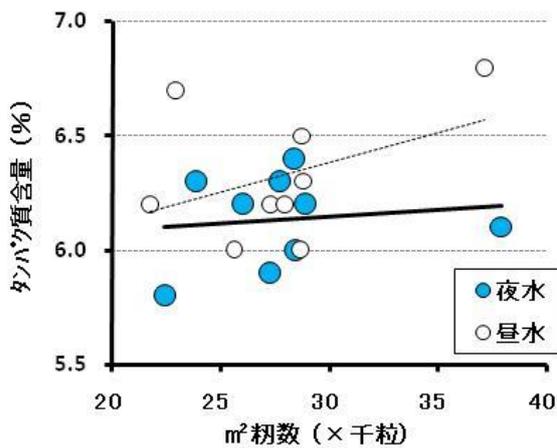
注) 6年 10 場所の平均値. 各項目ともに試験区間に 5%水準で有意差なし.



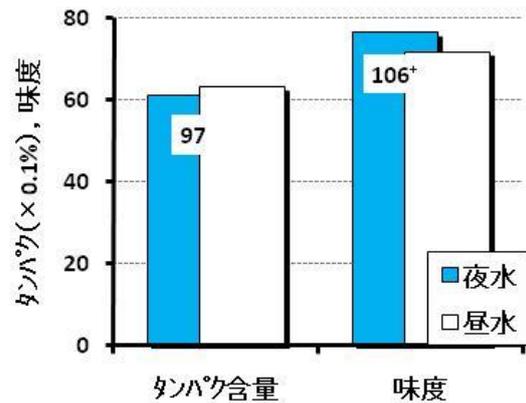
第3-2-5図 1穂あたり出液量の比較
(2013 2ヶ所の平均値)



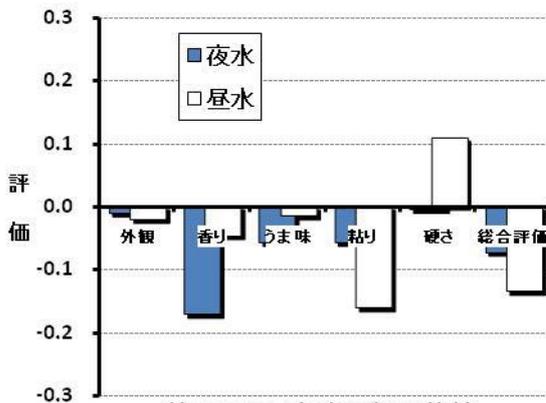
第3-2-6図 水管理と見かけの品質
(数値は昼水を100とした比.
+は10%水準で有意差あり)



第3-2-7図 m²籾数とタンパク質含量の関係



第3-2-8図 灌水方法と食味関連要素
(数値は昼水を100とした比。タンパクはn=9,
味度はn=4。+は10%水準で有意差あり)



第3-2-9図 食味評価の比較
(2011-13: 農試作況試験との比較, 4回平均)

由で玄米への炭水化物の転流が安定して生育後半まで継続したことを示していると考えられる。また、m²あたり籾数が35,000粒を上回るような条件では夜水区と昼水区の違いがはっきりする傾向があり(第5-3-7図)、籾数過剰や窒素不足など登熟が悪化する条件で水管理の効果がやや大きくなると推測される。

3) 食味関連要素

玄米のタンパク含量は米の食味評価との関連性が指摘され、比較的タンパク含量の低い米が好まれる傾向がある。一方で、多少のタンパクの違いでは食味への影響はほとんどなく、むしろ味度など米の表層の影響のほうが大きいとの報告もある(井上2012)。

玄米のタンパク含量には水管理間で平均0.2%の差がみられ、夜水区のほうがやや低かった。また、炊飯米の光沢やうまみとの関連が強い味度値についても、夜水区のほうが昼水区を4ポイント上回った(第5-3-8図)。タンパク含量についてm²あたり籾数との関係を解析すると、籾数の多少にかかわらず夜水区の回帰式の回帰係数は昼水区のそれより小さく、比較的変動が小さいといえる(第5-3-9図)。タンパク含量が低い理由として、窒素と炭水化物の玄米への転流程度の差が影響していると推測され、夜水区ではわずかながら相対的

に炭水化物の転流量が大きかったと考えられる。また、味度値についても、夜水区では登熟前半の低地表温と登熟後半まで転流が円滑に行われたために数値が高まったと推測される。

一方、食味官能試験の結果を第 5-3-9 図に記した。明瞭な差は認められないが、平均するとわずかに夜水区で総合評価が良好であった。評価の内訳を概観すると、夜水区の炊飯米は粘り評価はまずまずであるが味評価に違いはなく、やや軟らかめの食感が条件によって総合評価を左右するようである。なぜ夜水区の香り評価が低かったかについては判然としなかった。

【総合考察】

水温と水稻の生育収量に関する研究では、低水温による水稻の生育不良対策や、東北地域のやませによる冷害対策など、これまでは低温による障害をどう回避、低減するかの研究が主であった。冷水害は初期生育の停滞や登熟期間の不稔となって現れ、昼間の低水温のダメージが大きいことが指摘され、その対策として温水池や温水路の設置や止水灌水、夜間灌水などに効果があるとされている（三原 1970）。この場合の夜間灌水は、昼間止水して水温を上昇させることに意味があると推測される。しかし、近年は夏期の気温の上昇が大きな問題であり、2010 年に水稻品質が大きく低下した新潟県では、平坦地の灌水水温が 30℃以上となり、それが品質低下を助長したとの解析事例がある（私信）。また、フェーン現象時に湛水して乾燥に備えることは基本的な栽培技術として徹底されている。しかし、高温による品質低下を回避するための方策として、水温をどう利活用するかについて検討した研究はほとんど見られない。一方、近年では山間、中山間地域で比較的水稻の品質や食味が良好であるが（井上・高岡 2012）、その理由についても水温より気温が低いこととの解釈に妥当性がある。

本研究では、平坦地を中心に水温のデータを収集し、盛夏の気温が 30℃を上回るような高温下でもパイプラインを経由する水温は 25℃までと低く、地表温も 35℃を上回ることはなく、灌水の低水温が地表温を低下させる効果をはっきりと示すことができた。

高温登熟条件で高品質米を生産するためには根の機能が重要であり、表層から下層までまんべんなく広がった大きな根系を持つイネでは、乾燥ストレスに対する耐性を保持しており、高温時の品質低下も小さい。また、最高茎数が多く有効茎歩合が低いイネでは、下層に伸長した根が枯死して脱落しやすく、「コシヒカリ」では倒伏とも相まって品質が著しく低下しやすい（井上・山口 2007）。このことから、生育中期までに形成された根の生理的な活性を成熟期まで高く維持することが高品質米の生産にとって非常に重要である。その観点からは、パイプラインを通して供給される比較的低温の水を夜間に供給することにより、夜間および翌日中の出液量が増加する事例があることから、根の機能の維持、向上に一定の効果があると判断される。なお、本試験では品質や食味関連のデータに夜間灌水と昼間灌水で有意な差は得られていないが、これは年次によって気温や灌水回数変動するために灌水の効果が不安定となるためである。高温乾燥年次を想定すると夜間灌水の効果は安定して得られると想定している。

試験圃場を管理した生産者は、おおむね 3 日に 1 回、大気の乾燥が著しい場合には 2 日に 1 回灌水し、降雨日や曇天日には数日間灌水しない水管理を実施していた。また、灌水

後は少しずつ落水し、灌水や降雨直後でなければ湛水状態でなく、比較的田面を湿潤あるいは落水状態とする水管理を続けていた。試験期間中には1日当たり蒸発量が10mmを上回る乾燥の著しい日があった中でも、ほとんどの場所でおおむね良質粒の割合は70%前後と高い状態を維持できた。したがって、湛水せずに田面の湿潤状態を維持しながら根の機能を維持する水管理が、水を節約しながら米の品質食味向上という点で合理的かつ重要である。福井県には重粘な土壌が広く分布しているため、収穫作業を考慮して地耐力を維持したいという考えが根強く残っている。夜間灌水はその考えにも適合した技術と考えられる。また、盛夏の用水量は十分でない点を考慮すると、品質面での効果が指摘されているかけ流しを行うことは現実的に不可能であり、数日おきの夜間灌水で品質向上効果があるならばそのほうがより現実的と考えられる。

なお、パイプライン化前でもある程度の夜間灌水の効果が得られているため、品質向上効果は単なる水温の問題かどうかについて検討の余地がある（西田ら 2013）。また、イネの登熟生理に対する細かな調査も進んでいない。このような残された課題はいくつかあるが、これだけ大まかな調査においても品質食味に対して夜間灌水の一定の効果が得られているため、今後はその効果を最大に引き出せる条件について、効率的な灌水方法を検討することも重要である。

本調査、研究は、九頭竜川下流農業水利事業所、日野川用水土地改良区および福井市浄水場、越前市浄水場の職員の協力の下で実施した。記して謝意を申し上げる。

【摘 要】

用水のパイプライン化に伴う比較的低温の水の利用法として、従来の日中に灌水する方法に対して夜間に灌水する方法がイネの生育に及ぼす影響について検討した。夜間灌水により夜間～翌日午前中の地表温度が低下し、その期間の稈からの溢泌液量が増加する傾向が認められた。収量や収量構成要素に及ぼす影響は小さいが、良質粒の増加や胴割粒の低減による玄米の見かけの品質の向上と玄米タンパク含量の低下や味度値の向上など食味関連要素の向上効果が確認され、品質食味面で評価が高まることを明らかにした。

第6章 総合考察

1970年代の福井県は、効率的な水稲生産を行うために、作付分散の観点から8月中に収穫する早生、9月上中旬に収穫する中生、9月中下旬に収穫する晩生を組み合わせる作付することを奨励してきた。理想的には、それぞれの割合が3:4:3となるように作付けを誘導してきた。しかし、収量面ではやや劣るが価格面で優る「コシヒカリ」の作付比率が次第に増加し、最盛期には60~70%が「コシヒカリ」で占められていた。

筆者が本研究を始めた1980年代は、ほぼ毎年県内の水田で「コシヒカリ」の著しい倒伏が観察されていたが、2010年代になると施肥量の低下と水管理の工夫など栽培技術の改善により著しい倒伏は見られなくなり、収量品質が安定して機械収穫作業もスムーズに行えるようになった。収量品質の不安定要因の一つが改善された一方、高温多照化が顕著となった気象変動は、高温登熟に伴う品質食味に関連したさまざまな問題をもたらした。

高温登熟はまず乳白粒の発生を増加させた。本研究では早生品種の「ハナエチゼン」と中生品種の「コシヒカリ」の品質向上のための栽培法を模索するために、施肥量や栽植密度、および遮光により日射環境を変化させ、地上部全体の物質生産(乾物増加速度:CGR)、部位別の同化産物の変動(非構造的炭水化物:NSC)、1籾重の増加速度(GGR)や窒素の動態を解析した。

「ハナエチゼン」は多照条件のみならず、梅雨の影響を受ける寡照条件でも物質生産能力が高い。本研究の解析から、「ハナエチゼン」は「ホウネンワセ」や「フクヒカリ」より穂への窒素転流量に対するCGRが大きく、穂の増加速度が高く、それが乳白粒の発生を少なくしていることが明らかとなった。また、幼穂形成期から登熟中期までのCGRは他の品種に比べて高かった。さらに、栄養生長期間が温暖化する環境下でも、 m^2 あたり籾数が著しく増加することはなく、高温でも登熟歩合の低下が軽微で、収量品質の安定性が高い特性を持つことが明らかとなった。品質安定のための栽培要因では、 m^2 あたり籾数の影響が最も大きく、日射量の影響も大きかった。年次の違いによる日射変動下で、 m^2 籾数/日射量の値と乳白粒発生率には正の相関があり、 m^2 籾数が少なく日射量が多い条件で発生が少なくなった。それは、登熟前半のGGRの高さによることが解析結果より明らかになった。加えて、最も高温多照条件となった1999年の栽培試験結果の解析から、背白・基白粒の発生率と1籾に転流する登熟前半の窒素量に負の相関を認め、適正な肥培管理の重要性を指摘した。

これらの結果は、いずれも収量低下を回避しつつ品質を維持向上させる栽培管理のための物質生産的基礎を示しており、多様な栽培環境でも適応できると考えられる。

「コシヒカリ」でも、 m^2 あたり籾数と乳白粒発生率には高い正の相関が、 m^2 籾数/日射量の値と完全米率には高い負の相関関係が認められている。この点に関しては、「ハナエチゼン」と「コシヒカリ」で差は見られなかった。しかし、「コシヒカリ」は「ハナエチゼン」よりも穂揃期のNSC蓄積量が多く、蓄積NSCの1籾への転流量(蓄積NSCの減少量)とGGRには正の相関が認められ、籾数が少ない条件で1籾あたり転流量が大きいことが明らかとなった。幼穂形成期の稲体窒素濃度とNSC蓄積量には負の相関がある(山口ら2006ほか)ため、穂揃期までにできるだけNSCが蓄積できるよう、「ハナエチゼン」以上に栄養生長期間の生育診断と生育制御に留意する必要があると考えられる。後述するよ

うに、生育中期の深水管理により 1 粍あたり NSC 蓄積量が増加して乳白粒が減少することが報告されている（千葉ら 2011）ので、品質向上のための生育制御の一手段として活用できると考えられる。一方、基肥量を増加させて m^2 あたり粍数を多くし、生育後半の肥効を抑制するために穂肥を施用しない試験区を設けると、玄米の肥大が緩慢となって登熟歩合が低下し、収量も低下する半面、特に二次枝梗着生粍の登熟後半の玄米肥大が抑制されるとともに粒厚が薄い玄米が増加し、篩選別により精玄米から取り除かれ、その結果乳白粒が少なくなることも明らかとなった。

このような結果を総括すると、乳白粒の発生を低減するためには特に登熟前半の日射量が多くなる条件となるよう出穂期を設定すること、その日射量に適合する程度に m^2 あたり粍数をコントロールすることが最も重要で、併せて水分ストレスなど光合成や同化産物の供給を抑制するような栽培条件を排除する必要がある。登熟前半の日射量が少ない場合も想定すると、穂揃期の葉鞘・稈に十分な炭水化物が蓄積できるよう、生育初期からの茎数が過剰にならないよう制御する必要があるが、温暖化の影響で栄養生長期の気温も上昇していることから、基肥一括肥料を用いた側条施肥などの初期生育を促進する肥培管理は将来的に改善する必要がある。

多収が生産の目標であった時代には、疎植技術に対するニーズは大きくなかった。しかし、省力化、低コスト化が求められる中では重要である。本研究では、まず苗質が初期生育から収量品質までおよぼす効果について、2~3 年をかけて細かく調査した。その結果、初期生育には苗質の影響が強く現れるが、発育の進展につれて苗質の効果が小さくなり、標準苗との収量や品質（完全粒比率）の差は最大でも 7%にとどまった。意図して苗質を悪化させる生産者はいないが、育苗期間の温暖化は温度管理と灌水管の重要性を高めている。また、初期生育の促進は茎数や乾物重、 m^2 あたり粍数の増加をもたらし、それが登熟歩合の低下につながり、収量（精玄米重）を停滞させていることが本研究から明らかになっている。

疎植栽培では、標準栽植密度以上に苗質の重要度は高い。標準的な稚苗を用いた場合でも、栽植密度 11 株/ m^2 では、穂数は標準密度 21 株/ m^2 に対して約 80%にとどまり、補償効果によって一穂粍数が増加しても m^2 あたり粍数は標準の 94%までにしか増加しなかった。苗質が低下すると、初期生育や根系に影響が及ぶことが本研究から明らかになっており、登熟期間の落水など水ストレスが生じた場合には乳白粒の発生がやや増加しやすい結果が得られている。しかし、一方で初期生育が停滞する場合には CGR の増加する時期が遅れ、いわゆる「あとでき」となって、粍数過剰（コシヒカリでは m^2 あたり粍数で 3.3 万粒以上）にならない限り品質への悪影響はそれほど大きくないことがわかった。この結果を前提にすると、移植後の本田の管理を丁寧に行えば多少の苗質低下は生産にとってほとんど問題がないことになる。しかし、現実には圃場の均平程度は水田面積の拡大によって大きくなっており、苗質に対するニーズはより大きくなっている。この点を考慮すると、炭水化物を蓄積した健苗を育成しないと疎植栽培への適応性は小さいことになる。

本研究の疎植栽培では、登熟期間の葉身窒素濃度や CGR が高まり、乳白粒をはじめ心白粒、背白・基白粒の発生率が低下し、11 株/ m^2 の低密度でも低温登熟では発生が懸念される青米等の発生率が著しく増加することはなかった。また、地力の早期発現を想定した穂肥の早期施用でも、登熟前半の遮光条件でも標準密度に比較して品質への悪影響は見ら

れなかった。したがって、疎植の程度によりやや効果の変動はあるものの、標準密度と同等かそれ以上の品質改善効果があると考えられる。

統計的に見た福井県の水稲の栽植密度は、1980年代の約21株/㎡から2010年代では18株/㎡以下に15%程度低下している（福井県農林水産統計年報）。これは、栄養生長期間の温暖化により、疎植としても収量品質が大きく低下しないことが生産者に理解されたためと推測される。

高温登熟を避けるために出穂期を遅らせる「遅植え」にも一定の効果は認められているが、それは籾数を過剰としないで登熟期間の稲体の活力を維持する効果によって成立している（山口ら2004b, 井上2012）。また、胴割粒の発生を低減するためにも有効であることが認められている（山口ら2004b, 長田ら2004）。高温に強いとして育成された品種でも、良食味特性を維持するためには単位面積当たり籾数を制御する栽培法と併せて普及させないと、その特性を十分に発揮できないと考えられる。

品質や食味に及ぼす水管理の影響も大きい。川口ら（2009）は稲作期間の水管理法と玄米品質の関係について調査し、単位面積当たり籾数は少なめの栽培条件だが、湛水期間の長期化に伴って出穂後の葉色が濃く推移し、背白・基白粒の発生が少なくなることを示した。また、南雲ら（2010）は、登熟期間の水管理条件を変えた試験を2年間実施し、十分な高温登熟条件ではないが、土壌pF値と乳白粒や基部未熟粒の発生率の間に正の相関を認め、1等格付け相当の品質を求めるなら登熟期間中の土壌水分はpF1.0以下をめざした水管理が必要となると指摘した。さらに、千葉ら（2011）は中期深水栽培によって玄米品質が向上し、乳白粒や基部未熟粒の発生低減に効果を認めているが、それは1籾あたりNSC量と葉身窒素量の増加によるとしている。この中期深水管理の効果は、福井県内の現地試験でも確認され、福井県内での普及が期待されている。このように、これまでの「有効茎が確保されたら中干しを行い、その後は間断灌漑とする」などの一律の水管理法では温暖化する稲作環境での安定生産は難しくなりつつある。高温乾燥に伴う水分ストレスを考慮すると、入水する頻度を高めるほうが稲体の活力を維持し、収量品質安定化に寄与できると考えられる。本研究で得られた夜間灌水技術は、高温乾燥下では安定した効果があり、品質向上のための水管理の新たなメニューとして活用可能である。将来的には生育中期の診断技術と組み合わせた合理的な水管理体系を構築する必要がある。

熱画像を用いた生育診断技術は、水分ストレスの簡易診断として活用されているが、画像が風による群落構造の乱れの影響を受けやすく、無風に近い状態で熱画像を取得しないと厳密な比較ができない。また、同一画像内での比較は可能であるが、画像が異なると基準となる温度が異なることから比較が難しくなるのが利用上の問題点の一つであった。そこで、基準蒸発面を決めてそれを同時に映しこんで熱画像を取得し、基準との差や比で両者を比較する手法を開発し、育苗時の水管理で一定の効果を得ることができた。熱画像の解析装置も価格が低下し、比較的簡便に入手できるようになっており、今後は圃場レベルでの応用拡大が期待される。

水稲群落周辺の微気象環境をコントロールする水管理は、篤農家の技術として実施されてきたが、圃場の大規模化や経営面積の増大にも対応できる管理技術の構築が望まれる。また、湿田が広がっていた農地は、冬期間の環境の変化もあって湛水されない期間が長く続くようになった。あえて冬期間に湛水することにより、次年度水稲への地力発現が変化

し、それが水稻生育にも影響することが明らかになっている(細川ら 2012, 細川ら 2013, 井上 2016)。温暖化する環境下で水稻の生育に応じた精緻な水のコントロール技術をどう構築するかは将来的な課題と考えられる。

長期間の作況試験は、短期間の栽培試験では見つけることができない水稻の特性を明らかにすることができる。特に根重がどう変動し、収量品質に影響するかについてはこれまで判然としていなかった。「コシヒカリ」で根重変動を解析した結果、初期生育が旺盛すぎると生育中期以降の根重が停滞あるいは減少傾向となり、それが登熟期間の T-R 比を高めることが明らかとなった。収量がやや少ない年次は登熟期間の T-R 比が高い傾向があり、品質への影響も想定される。岩田(1986)は苗の植付本数が多い場合には根の下層への伸長本数が少ないことを認めている。また、山口(2006)、井上・山口(2007)は耕深や有効土層の深淺、側条施肥と全層施肥の根系を根重やモノリス法で調査し、浅い根系のイネでは未熟粒、胴割粒の発生率が高まり、玄米品質が低下することを報告している。これらの結果からも、地上部初期生育が旺盛な場合は根系の浅層化を招き、登熟期間など生育後半の根重低下をもたらす可能性が高いと推測される。登熟期間のフェーン等による高温乾燥は、茶米を多発させて玄米品質を低下させるが、T-R 比がそれほど大きくなく、登熟中期の葉色が維持されているほうが、品質への影響が大きい濃茶米や中茶米の発生率を低減できることも報告されている(岩田ら 1979, 井上ら 1984)。

これらの結果は、登熟期間のイネの活力を維持することが玄米の品質維持に重要であることを示しており、出穂期までの栽培方法や根系維持が玄米の品質向上に重要であることを示している。それは、深耕するとともに基肥を中心とする施肥量を過剰とせずに初期生育を控えめとすることや、適切な水管理を行うことと、根量を維持して登熟期間の T-R 比を高めないことであり、今後の効率的な根系制御技術の開発が期待される。

以上の結果より、温暖化環境下で南北陸地域の水稻の収量品質を安定させるためには、初期生育を抑制して生育中後期の CGR を高め、特に登熟前半の GGR を高めることが重要であった。初期生育の抑制は登熟期間の根重低下を緩和し T-R 比を過剰としない効果もあることがわかった。具体的には、品質維持向上のための適正粒数を示すとともに疎植の有効性も明らかにした。さらに夜間灌水の効果も示した。また、水ストレス診断のための熱画像の活用法を提示した。本研究が、将来の南北陸地域や国内の良食味米生産地帯の水稻を中心とする作物生産に少しでも貢献できることを祈念する。

引用文献

- 秋田重誠 1996. 作物の収量性と草型. 植物根系の理想型. 山内章編 : 11-34.
- 天野高久・師常俊・秦徳林・津田誠・松本保博 1995. 中国における水稻の多収穫に関する研究. 第2報 ジャポニカハイブリッドライス楡雑 29号の多収性. 日作紀 64 (別1) : 22-23.
- 天野高久・師常俊・秦徳林・津田誠・松本保博 1995. 中国における水稻の多収穫に関する研究. 第3報 楡雑 29号の籾数生産. 日作紀 64 (別1) : 24-25.
- 青木研一・笈田豊彦 1992. 水稻の食味関連要素と食味の関係. 新品種「ハナエチゼン」の食味関連要素. 北陸作報 27 : 5-7.
- 青木研一・松浦欣哉・前原貞一 1973. 稚苗の移植栽培に関する研究. 第3報 機械移植における稚苗の生育と本田生育. 福井農試研報 10 : 21-29.
- 東聡志・小出道雄・佐々木行雄・星豊一 1991. 新潟県における水稻品種の品質・食味の向上. 第3報 タンパク質含有率, アミロース含有率および炊飯光沢の品種間差異. 北陸作報 26 : 46-47.
- 馬場尠 1956. 水稻の窒素及び珪酸の栄養生理に関する研究. I. 珪酸の体内移行及び葉身表皮細胞蓄積と蒸散作用との関係. 日作紀 24 : 29-33.
- 千葉雄大・松村修・寺尾富夫・高橋能彦・渡邊肇 2009. 深水栽培による高品質米生産技術. 日作紀 78 : 455-464.
- 千葉雄大・松村修・寺尾富夫・高橋能彦・渡邊肇 2011. 深水栽培による米粒外観品質向上要因の解析. 日作紀 80 : 13-20.
- 竹生新治郎 1987. 米の食味. 全国米穀協会. 東京. 9-75.
- 藤井薫・北村新一・斉藤富士男 1987. 水稻育苗時の灌水方法と苗質. 東北農業研究 40 : 21-22.
- 藤井薫・北村新一・斉藤富士男 1988a. 水稻のプール育苗方法. 第1報 プール育苗における苗質. 東北農業研究 41 : 25-26.
- 藤井薫・北村新一・斉藤富士男 1988b. 水稻育苗時の灌水方法と苗質. 第2報 節水灌水における灌水時期の目安. 東北農業研究 41 : 29-30.
- 福井地方气象台 1984-2017. 福井県気象月報.
- 福井県農業試験場百年史 2000. 福井県農業試験場 : 34.
- 橋川潮編著 1996. 低投入稲作は可能. 富民協会. 東京. 1-234.
- K.Hayashi 1966. Efficiencies of Solar Energy Conversion in Rice Varieties as Affected by Planting Density. Proc. Crop Sci. Soc. Japan. 35 : 205-211.
- Hayashi, K. 1969. Efficiencies of Solar Energy Conversion and Relating Characteristics in Rice Varieties. Proc. Crop Sci. Soc. Japan. 38 : 495-500.
- 星豊一・中村恭子・東聡志・小林和幸・石崎和彦・阿倍聖一 1996. 新潟県の水稲歴代主要奨励品種の高温登熟下における玄米品質及び食味. 北陸作報 31 : 6-10.
- 北陸農政局福井統計情報事務所 1955-93. 福井作物統計. 昭和30年産～平成5年産.
- 星川清親 1975. イネの生長. 農文協. 東京. 1-317.
- 星川清親 1976. 稚苗・中苗の生理と技術. 農文協. 東京. 1-241.

- 細川幸一・佐々木秀隆・小木芳恵（2012）冬期湛水によるコシヒカリの窒素肥料減肥栽培の一例と減肥の要因解析. 土肥誌 83 : 700-702.
- 細川幸一・小木芳恵・井上健一（2013）冬期湛水 3 年間実施後の土壌化学性. 土肥誌 59（講要） : 99.
- 本庄一雄 1971. 米のタンパク含量に関する研究. 第 1 報 タンパク質含有率の品種間差異ならびにタンパク質含有率に及ぼす気象要因の影響. 日作紀 40 : 183-189.
- 堀内久満・水野進・中川宣興・寺田和弘・富田桂・池田郁美・青木研一・見延敏幸・田野井真・石川武之甫・福田忠夫 1992. 水稻新品種ハナエチゼンの育成経過と特性. 北陸作報 27 : 1-4.
- 市川岳史・有坂通展・種田貞義 1996. 水稻プール育苗に関する研究 第 2 報 苗質と初期生育. 北陸作報 31 : 50-51.
- 今井良衛・種田貞義・藍沢喜久治・成保俊一・細川平太郎・国武正彦・佐々木康之・山口政栄・長谷川惣作 1979. 稚苗稲作の初期生育促進要因の解析と組立. 新潟農試研報 28 : 43-52.
- 井上健一・岩田忠寿・芝山道郎・堀江正樹・渡辺利通 1984a. 福井県の水稲収量に及ぼす気象その他の要因について. 北陸作報 19 : 23-24.
- 井上健一・高橋耕二・青木研一・岩田忠寿 1984b. 茶米の発生要因に関する研究 第 2 報 稲体の剪葉, 断根, 根腐れ処理が茶米発生に及ぼす影響. 福井農試研報 21 : 1-11.
- 井上健一・佐藤勉・岩田忠寿・尾嶋勉・酒井究 1995a. 低温・寡照条件におけるハナエチゼンの生育の物質生産的解析. 福井農試研報 32 : 1-12.
- 井上健一 1995b. コシヒカリの物質生産と多収穫. コシヒカリ. 第 5 章第 1 節 3. 農文協. 東京. 日本作物学会北陸支部・北陸育種談話会編. 202-206.
- 井上健一 1996a. 最近の水稲作の概況と気象の特徴. I-1-5)福井県における水稲作概況. 北陸農業研究資料 34 : 23-28.
- 井上健一 1996b. 最近の水稲作の概況と気象の特徴. IV-1-4)福井県における技術的対策. 北陸農業研究資料 34 : 112-118.
- 井上健一・林恒夫 1996. 熱画像の解析による水稻苗の水分状態の診断. 日作紀 65 (別 2) : 153-154.
- 井上健一・林恒夫・尾嶋勉 1997. 熱画像の解析による水稻登熟期間の水ストレスの診断. 水稻の生育・収量の広域モニタリング・予測システムの開発. 平成 8 年度科学研究費補助金 (基盤研究(A)(1)研究成果報告書 : 126-139.
- 井上健一・林 恒夫・湯浅佳織・笈田豊彦 1997. 良質良食味品種の収量・品質から見た物質生産の解析. 1. コシヒカリの登熟期間の物質生産が品質食味要因に及ぼす影響. 日作紀 66 (別 2) : 109-110.
- 井上健一・湯浅佳織・笈田豊彦 1998. 良質良食味品種の収量・品質から見た物質生産の解析. 2. 登熟期間の水管理と高温処理が収量品質要因に及ぼす影響. 日作紀 67 (別 2) : 8-9.
- 井上健一 1999. 水稻早生品種の登熟期間の物質生産と品質食味要因の関係の解析. I. 乾物生産と窒素吸収量の品種間差. 北陸作報 34 : 24-26.
- 井上健一 1999. 水稻早生品種の登熟期間の物質生産と品質食味要因の関係の解析. II. 籾重増加および窒素吸収と収量, 品質食味要因の関係. 北陸作報 34 : 27-29.

- 井上健一・湯浅佳織・笈田豊彦 2000. 良質良食味品種の収量・品質から見た物質生産の解析. 4. 福井県における 1999 年産水稻の物質生産と見かけの品質の関係. 日作紀 69 (別 1) : 36-37.
- 井上健一 2000. 乳白粒発生軽減のための「コシヒカリ」の適正粒数と栽培法. 北陸農業の新技术 13 : 11-13.
- 井上健一・湯浅佳織 2001. 水稻品質食味要因の安定性に関する解析的研究. 1. 苗質がコシヒカリの初期生育と収量品質におよぼす影響. 福井農試研報 38 : 1-10.
- 井上健一・湯浅佳織 2001. 良質良食味品種の収量・品質から見た物質生産の解析. 5. 施肥量と登熟期間の日射量が早生品種の品質食味要因に及ぼす影響. 日作紀 70 (別 2) : 99-100.
- 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. 2. 疎植条件が水稻の物質生産と収量品質におよぼす影響. 福井農試研報 41 : 15-28.
- 井上健一 2004. 良質良食味品種の収量・品質から見た物質生産の解析. 6. 窒素施用量が異なるコシヒカリの物質生産と乳白粒の関係. 日作紀 73 (別 2) : 150-151.
- 井上健一・山口泰弘・高橋正樹 2004. コシヒカリの根の発育経過の解析. 日作紀 74 (別 1) : 130-131.
- 井上健一 2005. 温暖化する気象条件下での早期栽培イネにおける品質・収量低下に対する技術的対応. 2. 高温のイネ生産への影響と技術的対応. 日作紀 74 : 82-86.
- 井上健一・山口泰弘 2005. 高温障害に強いイネ. 養賢堂. 東京. 日本作物学会北陸支部 北陸作物育種学会編. 58-63.
- 井上健一・塚口直史・山口泰弘 2007. 水稻良質良食味品種の収量・品質から見た物質生産の解析. 7. コシヒカリの NSC 含量の挙動に及ぼす窒素の影響. 日作紀 76 (別 2) : 24-25.
- 井上健一・笈田豊彦・佐藤有一・中村真也・高橋正樹 2011. コシヒカリの食味に関する諸要因の解析. 北陸作報 47 (別) 14.
- 井上健一 2011. 福井県における水稻の高温対策栽培技術. 土づくりとエコ農業 43 : 45-49.
- 井上健一・土田政憲 2012. 登熟期間の水管理がコシヒカリの品質食味に及ぼす影響. 北陸作報 48 (別) : 1.
- 井上健一・高岡聖子 2012. 中山間地で栽培されたコシヒカリの登熟条件と品質・食味の関係. 北陸作報 47 : 51-54.
- 井上健一 2012. 福井県におけるコシヒカリの高温登熟回避の試み. — “適期田植え” の普及と品質食味の解析を中心に —. 北陸作報 47 : 137-140.
- 井上健一 2014. 高温登熟障害の克服に向けた福井県の取り組みと今後の課題. 農及園 89 : 1007-1012.
- 井上健一 2015. 水稻の根からみた収量・品質向上対策. — 福井県のコシヒカリを中心に —. 土づくりとエコ農業 47 : 48-55.
- 井上健一・土田政憲 2015. 水稻登熟期間の夜間灌水の効果. 福井農試研報 52 : 1-8.
- 井上健一 2016. 冬期湛水イネの生育収量と品質 — 現地調査結果より —. 農及園 91 : 160-166.
- 井上健一・笈田豊彦・中村真也・高橋正樹・山口泰弘・奥村華子・酒井究 2017. 長期間行われた水稻作況試験の発育, 物質生産および収量の変動. 日本作物学会第 243 回講要 :

37.

井上吉雄 1990. 熱赤外面像による作物個体群における生理機能低下の遠隔的検出. 日作紀 59 : 762-768.

石井龍一・松崎昭夫・李万九・刈屋国男・町田寛康・中元朋実・玖村敦彦・角田公正 1986. 水稻収量の品種間差に関する比較作物学的研究. 第1報 収量の品種間差の年次による変動. 日作紀 55 (別2) : 65-66.

石間紀夫・平宏和・平春枝・御子柴穆・吉川誠次 1974. 米の食味に及ぼす窒素施肥および精米中のタンパク質含有率の影響. 食総研報 29 : 9-15.

伊藤摩可子・市川儀夫・種田貞義 1996. 水稻プール育苗の苗質について. 北陸作報 31 : 45-47.

岩田忠寿・高橋耕二・斉藤一男 1979. 福井県産米の茶米発生における気象条件および水稻生育との関係について. 福井農試研報 17 : 1-12.

岩田忠寿・湯浅佳織・井上健一・山田正美 1984a. 福井県における気象要因からみた収量成立過程の特徴. 日作紀 53 (別1) : 170-171.

岩田忠寿・湯浅佳織・井上健一 1984b. 昭和 58 年度水稻作柄の低下と根群の分布との関係について. 日作紀 53 (別1) : 168-169.

岩田忠寿・間脇正博・湯浅佳織・井上健一 1985. 福井県における昭和 59 年水稻作の乾物生産からみた多収要因の解析. 日作紀 54 (別1) : 8-9.

岩田忠寿 1986a. 福井県稲作の技術問題と今後の対応. 北陸作報 21 : 89-92.

岩田忠寿 1986b. 福井県における稲作技術の現状と収量の変動要因. 北陸農業研究資料 15 : 23-38.

岩田忠寿 1986c. 北信越地域の水稲収量の停滞をどう打開するか (シンポジウム). 福井県稲作の技術問題と今後の対応. 北陸作報 21 : 89-92.

岩田忠寿 1987. 福井県におけるコシヒカリの根群の分布と生育収量の特徴. 北陸作報 22 : 91-94.

蔣彭炎・姚長溪 1988. 水稻高産新技術, -稀少平栽培法的原理と応用-, 浙江科学技術出版社 : 1-319.

椛木信幸・金忠男 1991. 水稻の稚苗・乳苗・直播栽培における生育収量特性について. 北陸作報 26 : 22-24.

川田信一郎・山崎耕宇・石原邦 1969. 水稻 1 個体における籾数と冠根数との関係. 日作紀 38 (別1) : 181-182.

川田信一郎・丸山幸夫・副島増夫 1977. 水稻における根群の形成について, とくに窒素施用量を変更した場合の一例. 日作紀 46 : 193-198.

川田信一郎・副島増夫・山崎耕宇 1978. 水稻における”うわ”根の形成量と玄米収量との関係. 日作紀 47 : 617-628.

川田信一郎・山崎耕宇・片野学 1980. 水稻 1 株の根群を構成する伸長した冠根数と穂数との関係. 日作紀 49 : 317-322.

川口祐男・高橋渉・南山恵 1996. 水稻の栽植密度と外観品質, 蛋白質含有率との関係, 日作紀 65 (別1) : 184-185.

木戸三夫・梁取昭三 1965. 米粒蛋白質集積過程の組織科学的研究. 日作紀 34 : 204-209.

- 金漢龍・堀江武・中川博視・和田晋征 1996a. 高温・高 CO₂ 濃度環境が水稻の生育・収量に及ぼす影響. 第 1 報 発育, 乾物生産および生長諸形質について. 日作紀 65 : 634-643.
- 金漢龍・堀江武・中川博視・和田晋征 1996b. 高温・高 CO₂ 濃度環境が水稻の生育・収量に及ぼす影響. 第 2 報 収量および収量構成要素について. 日作紀 65 : 644-651.
- 木根渕旨光 1974. 機械化稚苗稲作技術と営農. 農業図書. 東京. 1-338.
- 木根渕旨光 1969. 水稻稚苗栽培技術の確立ならびに機械化技術における実証的研究. 東北農試報 38 : 1-151.
- 吉良竜夫・穂積和夫 1958. 植物生長の生態学 (3), 農及園 34 : 67-72.
- 吉良竜夫 1961. 作物の収量と栽植密度 (2) -イネの密植栽培に関連して-, 農及園 36 : 1265-1268.
- 桐山隆 1994. 乳苗移植栽培に関する研究. 一本田における生育の特徴一. 石川農総試研報 18 : 11-20.
- 北川壽・下坪訓次・松村修・安庭誠 1993. 暖地におけるインド型, 日印交雑及び日本型水稻品種の乾物生産特性. 日作紀 62 (別 1) : 82-83.
- 北倉芳忠 2003. 福井県における水稻直播 10 年間の取り組み, 北陸作報 39 : 34-37.
- 小林和弘・堀江武 1994. 水稻の穎花ならびに枝梗分化に及ぼす生殖成長期の体内窒素の影響, 日作紀 63 : 193-199.
- 小松良行 1982. 灌水管管理と生育. 農業技術体系作物編 2 - ①. 農文協. 東京. 技 123 - 技 127.
- 近藤頼巳・渡部直吉・下田博之・武田英之 1962. 深耕多肥条件における水稻栽植疎密の試験成績. 日作紀 30 : 232-236.
- 鯨幸夫 1989. 施肥法の違いが水稻根の形態に及ぼす影響. 日作紀 58 (別 1) : 24-25.
- Kujira, Y et al. 2000. Abstracts of 3rd ICSC. 156.
- 黒田栄喜・遠藤和彦・小野寺博稔・平野貢 1993. 水稻品種あきたこまちと山形号の生理生態形態的特性の比較. 第 1 報 収量構成要素, 収量および乾物生産特性. 日作紀 62 (別 1) : 78-79.
- 楠谷彰人・天野高久・佐々木右治・小林聡 1986. 水稻の冷温登熟性に関する研究. 第 2 報 根系の登熟に対する貢献. 日作紀 55 : 321-326.
- 丸山幸夫・田嶋公一 1988. 日本稲およびインド稲の窒素に対する生育反応. 第 2 報 窒素施肥による稈伸長および葉面積増加の差異. 日作紀 57 : 692-698.
- 松江勇次・古野久美・吉田智彦 1992. 北部九州産米の食味に関する研究. 第 3 報 登熟中期以降の遮光処理が米の食味および理化学的特性に及ぼす影響. 日作紀 61 : 218-222.
- 松井勤 2009. 開花期の高温によるイネ (*Oryza sativa* L) の不稔. 日作紀 78 : 303-311.
- 松村修・山口弘道・八百板正則・福田直子 1998. 水稻の栽植密度が SiO₂, N 含有率ならびに SiO₂/N 比に及ぼす影響, 日作紀 67 (別 2) : 92-93.
- 松中仁・中村貞二・西山岩男 1998. 遮光処理がイネの登熟に及ぼす影響, 日作紀 67 (別 1) : 190-191.
- 松尾孝嶺 1951. 水稻栽培の理論と実際. 農業技術協会. 東京. 1-262.
- 松浦欣哉・岩田忠寿・長谷川毅 1969. 水稻の深層施肥の効果に関する研究, 第 1 報 増

- 収機構について, 日作紀 38 : 215-221.
- 松浦欣哉・岩田忠寿 1973. 物質生産からみた稚苗水稻生育についての一考察. 日作紀 42 (別 1) : 73-74.
- 松浦欣哉・青木研一 1973. 稚苗の移植栽培に関する研究. 第 2 報 稚苗移植における施肥効果. 福井農試研報 10 : 11-19.
- 松崎昭夫・松島昭三・富田豊雄 1973. 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 113 報 穂揃期窒素追肥が品質に及ぼす影響. 日作紀 42 : 54-62.
- 間脇正博 1988. 根の機能と生理. 農業技術大系・作物編. 農文協. 東京. 追録第 10 号 : 246 の 114-121.
- 間脇正博・笈田豊彦・岩田忠寿 1989. 生育中期の遮光処理が水稻の生育収量に及ぼす影響. 一品種間差に着目して—日作紀 58 (別 1) : 238-239.
- 間脇正博・原田二郎・岩田忠寿・山崎耕宇 1990. 幼穂形成期から出穂期にかけての遮光処理が水稻の根系の形成および収量に及ぼす影響. 第 2 報 一次根に着目した場合. 日作紀 59 : 95-99.
- 三原義秋 1970. 冷水害. 農業気象ハンドブック. 養賢堂. 東京. 349-362.
- 見延敏幸・和田陽介・中嶋英裕・井上健一 2011. 水稻湛水土中直播栽培における中期深水管理の効果. 福井農試研報 48 : 1-6.
- 宮坂昭・石倉教光 1964. 湿田水稻の収量性に関与する後期生育相の解析. 日作紀 33 : 107-110.
- 森田敏 2011. イネの高温障害と対策 : 1-143. 農文協. 東京. 1-143.
- 村田吉男・猪山純一郎 1958. 水稻の光合成に関する研究, 第 9 報 密植多肥条件下の水稻の光合成作用と乾物生産. 日作紀 27 : 9-11.
- 村山登 1982. 収穫逡減法則の克服. 養賢堂. 東京. 1-232.
- 長田健二・保科 亨・石川哲也・中村逸朗・秋田重誠 1991. 温暖地における水稻超多収系統の乾物生産特性. 日作紀 60 (別 1) : 82-83.
- 長田健二・小林廣美・吉永悟志・高梨純一 1994. 遮光処理による超多収系統の生育の変化. 1) 乾物生産過程の変化. 日作紀 63 (別 2) : 91-92.
- 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及ぼす影響. 日作紀 73 : 336-342.
- 長田健二・小谷俊之・吉永悟志・福田あかり 2005. 胴割れ米発生におよぼす登熟初期の水管理条件の影響. 日作東北支報 48 : 33-35.
- 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. 登熟期の高温が穎花の発育ならびに米質に及ぼす影響. 日作紀 34 : 59-66.
- 中川博視・田中大克・田野信博・永嶋秀樹 2006. 炭水化物供給能がイネの各種白未熟粒の発生に及ぼす影響. 北陸作報 41 : 32-34.
- 中川博視ほか 23 名 2012. 2010 年の夏季高温が北陸地域を中心としたコシヒカリの品質に与えた影響. 1. 外観品質について. 日作紀 81 (別 1) : 126-127.
- 日本農業気象学会関東支部編 1988. 農業気象の測器と測定法. 農業技術協会. 東京. 59-61.
- 日本作物学会九州支部会編 2013. 作物調査基準. 日本作物学会九州支部. 福岡. 1-36.

- 西田和弘・宇尾卓也・吉田修一郎・塚口直史 2013. 夜間掛流し灌漑による水田水温と葉温低下. 農業農村工学会誌 81 : 297-300.
- 西山岩男 1985. イネの収量と登熟期の光合成有効放射量の比例関係について. 日作紀 54 : 8-14.
- 笈田豊彦・間脇正博・岩田忠寿・石原邦 1990. 生育中期の日照不足が水稻の生育に及ぼす影響. 一遮光処理後の物質生産に着目して一 日作紀 59 (別1) : 176-177.
- 笈田豊彦・中村真也・井上健一 2018. 福井県の主要水稻品種における幼穂形成期以降の非構造化炭水化物 (NSC) 量およびその玄米品質との関係. 北陸作報 53 : 46-49.
- 大塚直輝・坂田賢 2013. パイプラインを利用した夜間灌漑実証試験. 農業農村工学会誌 81 : 301-304.
- 大平陽一・木村秀也・白土宏之・高梨純一 2000. 栽植密度, 施肥法の違いが水稻の生育及び窒素の動態に与える影響. 日作紀 69 (別1) : 96-97.
- 大平陽一・白土宏之・竹田博之・高梨純一 2002. 白米窒素濃度に及ぼす栽植密度, 施肥法の影響の解析. 日作紀 71 (別1) : 136-137.
- 太田保夫・山田登・加美佐郷・田島克巳・舟山謙三郎 1959. 水稻の登熟に関する研究. 第2報 登熟に対する遮光の影響. 日作紀 27 : 196-200.
- 太田保夫・李鐘薫 1970. 水稻の地上部の形質におよぼす根の役割に関する研究. 第1報 草型の異なる品種の地上部諸形質と根の形質との関係. 日作紀 39 : 487-495.
- 栽培植物分析測定法 1976. 養賢堂. 東京. 63-67, 141-146.
- 酒井究 2015. 中期深水管理による直播コシヒカリの収量・品質安定. 土づくりとエコ農業 47 : 5-9.
- 坂田賢・友正達美・吉村亜希子・大塚直輝・倉田 進 2014. パイプライン用水路が有する夏季の水温上昇緩和効果. 農業農村工学会誌 82 : 3-6.
- 佐々木康之・今井良衛・細川平太郎 1984. 高温下で登熟する玄米品質の劣化防止技術. 新潟農試研報 33 : 45-54.
- 佐藤勉・松本範裕・畠山武・北野弘 1979. 密播条件下の育苗諸要因による苗素質の経時的変化と本田初期生育との関係. 石川農試研報 10 : 36-49.
- 佐藤勉 1993. 登熟期の寡照条件に対する「キヌヒカリ」の適応性. 北陸農業の新技术 6 : 14-18.
- 清水博之・太田久稔・三浦清之・福井清美・小林陽 1994. 熟期の違いが水稻品種の食味, タンパク質含有率およびアミロース含有率に及ぼす影響. 北陸作報 29 : 37-39.
- 白岩立彦・橋川潮・劉雲開 1997. 窒素の利用とその効率からみた水稻品種の生産力, 1. 品種日本晴における窒素蓄積量と収量の関係. 日作紀 66 (別2) : 31-32.
- 宋祥甫・縣和一・川満芳信 1987a. 中国における水稻品種の収量生産支配要因の解析. 日作紀 56 (別1) : 92-93.
- 宋祥甫・縣和一・川満芳信 1987b. 中国産ハイブリッドライスの物質生産に関する研究. 第2報 収量生産特性. 日作紀 59 : 29-33.
- 鈴木守 1993. 農民に学ぶ技術の総合化, 昭和農業技術発達史 水田作編 第3章 第3節. 農文協. 東京. 124-135.
- 平宏和・星川清親・平春枝 1972. 矮性水稻玄米のタンパク質含量. 日作紀 41 : 155-159.

- 高橋英一 1990. ケイ酸の吸収と生理. 稲学大成 第2巻. 農文協. 東京. 321-331.
- 高橋渉・金田宏・吉田稔・荒井清完・守田和弘 2006. 育苗日数と気温が育苗箱の根張りに及ぼす影響. 北陸作報 41 : 42-44.
- 高見晋一 2004. 農学, 生態学のための環境物理学入門[10]. 農及園 79 : 1137-1141.
- 武田友四郎・広田修 1971. 水稻の栽植密度と子実収量との関係, 日作紀 40 : 381-385.
- 武田友四郎・岡三徳・内村研一・県和一 1984. 暖地における水稻品種の物質生産に関する研究. 第3報本邦暖地品種と韓国新品種の乾物生産特性の比較. 日作紀 53 : 22-27.
- 田中一生 1994. 1993年冷害年における北海道水稻多収系統の乾物生産特性について. 日作紀 63 (別2) : 25-26.
- 種田貞義 1972. 機械移植栽培における苗の大きさと稲の生育の差異. 日作北陸支報 7:16-18.
- 寺島一男・鷺尾養・矢島正晴 1982. 多収性水稻の生理生態的特性の解明. 1) 作期の違いによる収量および乾物生産の変化. 日作紀 51 (別2) : 9-10.
- T.Tsukaguchi and Y. Iida 2008. Effect of Assimilate Supply and High Temperature during Grain-Filling Period on the Occurrence of Various Types of Chalky Kernels in Rice Plant (*Oryza sativa L.*) Plant Prod. Sci.11:203-210.
- 塚口直史・堀江武・大西政夫 1996. 水稻の登熟に及ぼす登熟初期の非構造的炭水化物の影響. 日作紀 65 : 445-452.
- 塚野治夫・小林智和・佐藤俊栄・荒木肇・伊藤道秋 2003. 新潟地域における水稻プール育苗の実践. 農作業研究 38 : 237-240.
- 月森弘 2003. 島根県における高温のイネ生産への影響と技術的対策, 日作紀 72 (別2) : 434-439.
- 津森重邦 1987. 乳白米の発生要因と対策. 農及園 62 : 1161-1165.
- 内田英樹・東江栄・縣和一・窪田文武 1992. 水稻の光合成・物質生産に対するケイ酸施用効果. 第4報 ケイ酸施用効果の品種系統間差について. 日作紀 61 (別2) : 109-110.
- 翁仁憲・武田友四郎・縣和一・箱山晋 1982a. 水稻の子実生産に関する物質生産的研究. 第1報 出穂期前に貯蔵された炭水化物および出穂後の乾物生産が子実生産に及ぼす影響. 日作紀 51 : 500-509.
- 翁仁憲・武田友四郎・縣和一・箱山晋 1982b. 水稻の子実生産に関する物質生産的研究. 第3報 出穂期前における乾物生産力の品種間差をもたらす要因の解析. 日作紀 51 : 519-528.
- Y.Yamada,Y.OtaandH.Nakamura1961 . EcologicalEffectsofPlantingDensityon GrowthofRicePlant.Proc.Crop Sci. Soc. Japan.29 : 329-333.
- 山田正美・勝見太 1987. 水稻登熟期の高温が同化産物および無機成分の転流に及ぼす影響. 福井農試報 24 : 1-14.
- 山田登・太田保夫 1957. 水稻苗の素質に関する研究. 日作紀 26 : 78-80.
- 山口泰弘・郡寄裕次・徳井公一・佐々木知子・古田秀雄 2002. 福井県二州地域における水稻乳白粒発生軽減技術の検討. 北陸作報 37 : 54-56.
- 山口泰弘・井上健一 2004a. 高温条件下での稲の育苗法. 北陸作報 40 : 20-23.
- 山口泰弘・井上健一・湯浅佳織 2004b. 高温年次におけるコシヒカリの移植時期が物質生産・収量・品質に及ぼす影響. 福井農試研報 41 : 29-38.

- 山口泰弘・井上健一 2005a. 高温条件での稲の育苗法. 北陸作報 40 : 20-23.
- 山口泰弘・井上健一 2005b. 土質の違いと基肥一括肥料の施肥法が水稻根の発育, 収量品質に及ぼす影響. 日作紀 74 (別 1) : 58-59.
- 山口泰弘・塚口直史・井上健一 2006. コシヒカリの稈・葉鞘の非構造的炭水化物 (NSC) の動態と穂重増加および品質の関係. 北陸作報 41 : 35-38.
- 横山克至・高取寛・藤井弘志・渡部幸一郎・安藤正・小南力・松田裕之・柴田康志・長谷川愿 2002. 庄内地域における登熟期の高温条件が米粒品質に及ぼす影響, 山形農試研報 36 : 51-66.
- 湯浅佳織・岩田忠寿 1985. 北陸地域における水稻収量構成の特徴と気象条件との関係 (予報). 北陸作報 20 : 37-38.
- 湯浅佳織・岩田忠寿・青木研一 1986. 側条施肥が水稻の地上部および地下部の生育に及ぼす影響. 北陸作報 21 : 65-66.
- 湯浅佳織・井上健一・笈田豊彦 1999. コシヒカリにおける幼穂形成期から出穂期の物質生産と収量の関係. 北陸作報 34 : 71-72.
- 脇山恭行 2002. 熱画像リモートセンシングによる水稻の群落表面温度の観測並びに葉温と葉色の関係. 農業気象 58 : 185-194.

論文要旨

南北陸地域に位置する福井県においては、60年前より良質米品種を用いた生産が行われてきたが、稲作期間の気象変化は水稻の発育や物質生産、収量構成要素などの生産生態、加えて玄米の外観品質にも影響を及ぼしている。本研究は、同地域の水稲の収量品質安定化のための生産生態的要素を明らかにし、栽培技術体系を構築することを目的として行った。長期間同一耕種条件で栽培されている作況試験データを用いて、変動する気象条件に対して水稻がどのように反応しているのかを解析した。物質生産過程や生産生態データを長期間ほぼ同一条件で精密に調査した事例はこれまでになかったからである。併せて、よくわかっていなかった地上部と根の発育パターンを物質生産面から解析し、根重の意義を明らかにした。そして、その解析結果を栽培技術に結び付けようと試みた。すなわち、福井県の代表的水稻品種である早生品種「ハナエチゼン」および中生品種「コシヒカリ」について、良質安定生産のための育苗や栽植密度、日射環境などのさまざまな栽培、環境要因の効果を精査し、気温や日射量が変動する中で、水稻の生育、物質生産や品質への影響を調査、解析した。特に、物質生産と見かけの品質や食味の関係を細かく解析した事例はこれまでになかったために、将来の産米の付加価値向上を念頭に置いて両者の関係を明らかにしようとした。さらに、作物の水分状態を隔測診断するために、熱画像を活用した生育診断手法の実用性についても試行錯誤を行い、新たな生育診断指標を作出し、灌漑管理に利用する可能性についても検討した。さらに、現地圃場で灌漑時間帯が米の品質食味におよぼす影響について比較調査を行い、温暖化環境下での夜間灌漑の効果を明らかにした。

1. 良質米品種の長期間の生産生態の変化

水稻と生産生態との関連を解析することは栽培技術を調整するうえで不可欠である。しかし、長期間の気温および日射量を中心とする気象条件の変動が生産生態に及ぼしている影響を系統的に調査した例は極めて限られ、南北陸の良質米生産においては皆無であった。そこで、「コシヒカリ」で34年間、「ハナエチゼン」で27年間行われた作況試験から得られた結果を特に物質生産に着目して解析した。同試験では、発育段階・収量構成要素に加えて、主要生育時期（生育初期、幼穂形成期、出穂期、登熟中期、成熟期）に部位別乾物重を調査し、乾物増加速度の推移、登熟期間の穂重増加速度1粒重増加速度を求めた。出穂期生育期間の温暖化と多日照化に伴い、両品種ともに発育ステージの早期化、地上部乾物重の増加、生育期間を通じた作物個体群生長速度（CGR）の増加、 m^2 あたり粒数の増加、登熟歩合の低下などの傾向を示すことを認めた。一方、穂の成長速度や1粒重増加速度は登熟期前半ではやや低下傾向、登熟期後半では促進傾向であることがみとめられた。収量はほぼ停滞していることを考慮すると、温暖多照条件を生産に活用するためには初期生育や m^2 あたり粒数を過剰としない栽培管理が必要と考えられた。

2. 地上部と関連づけた根量の変動

栽培環境の変化に対する根形質の変化については多くの報告があり、収量向上にとって土壤中に広く発達した根系を形成することおよびその根の機能を成熟期まで維持することが重要であることが指摘されてきた。しかし、登熟期間や成熟期の根を中心にサンプルを

収集し、解析しているため、生育初期からの根系がどのように形成され、枯死脱落してきたかについては不明な点が多い。また、地上部の生育経過との関連性についても十分な解析が行われていない。そこで、20年間にわたりほぼ同一条件で栽培管理された試験区において、根重と地上部重の推移の特徴を明らかにするとともに、収量との関係を解析した。品種「コシヒカリ」を慣行条件で栽培し、有効茎確保期（6月上旬）、幼穂形成期（7月上中旬）、出穂期（7月下～8月上旬）、登熟中期（8月中旬）、成熟期（8月下～9月上旬）に平均的茎数や穂数を示す株3株を、27cm×18cmの方形枠にて作土より上部（深さ約15cm）から掘り上げ、部位別に分解し乾物重を測定した。この際、脱落した根も網籠を用いて拾い上げて秤量した。成熟期に収量・収量構成要素を調査した。「コシヒカリ」の根重は年次間で大きな変動が存在し、有効分げつ決定期までの初期生育が旺盛な場合にその後幼穂形成期までの根重増加が緩慢となること、有効分げつ期の根重と成熟期のT-R比との間に正の相関関係があることを認めた。さらに、調査年次を多収年、低収年および中収年に分類し平均値を比較し、多収年は生育初期の根重が他と同等かやや小さいが登熟期間の根重が有意に大きいこと、および根重の変動と収量のそれとが関連することを認めた。

3. 良質早生品種「ハナエチゼン」の品種生態的特徴と収量品質安定のための生育要因

1991年に育成された早生品種「ハナエチゼン」の生産生態的特徴を、3年間の栽培試験結果から同熟期の旧品種の「フクヒカリ」と比較解析した。低温寡照下では、「ハナエチゼン」は「フクヒカリ」に比べて生育初期の茎数増加は緩慢であるが、有効茎歩合が高かった。また同品種は、登熟期前半のCGRが顕著に大きい特徴を示し、とくに穂重の増加速度が早かった。登熟期前半に遮光条件を与えても、遮光終了後のCGRおよびNAR（純同化率）の回復も早い。それは直立した上位葉と大きなLAI（葉面積指数）およびSLA（葉面積比）を持つことに関連すると推察された。早生新旧4品種を用いた施肥試験における登熟期間の物質生産経過の解析により、LAIの維持と穂への窒素の転流抑制が、光合成、物質生産能力の維持を通じて収量、玄米タンパク含量と密接に関わること、 m^2 収量が類似する条件では登熟期間の穂重増加速度が高い場合に乳白粒発生率が低く、玄米品質が安定する傾向があることを明らかにした。

4. 「コシヒカリ」の栽培条件が物質生産、収量品質に及ぼす影響

育苗時の播種量、施肥量、灌水量、育苗期間および育苗温度を変えて、稚苗の苗質が移植後の初期生育や収量品質に及ぼす影響を3年間比較調査した。その結果、苗の窒素保有量と6月中旬の地上部乾物重ならびにLAIとの間に高い正の相関関係が認められ、窒素保有量の多い苗の乾物重は大きくなった。しかし、苗質の違いにともなう生育の差は発育が進むにつれて小さくなった。苗質不良な苗では、 m^2 あたり収量がやや少ないにもかかわらず乳白粒が多く、さらに登熟期間の早期落水条件にともなう乳白粒の増加程度がやや大きいことがわかった。一方、初期生育過剰を抑制するための疎植栽培の効果を明らかにするための、4年間の栽植密度試験を実施した。標準栽植密度21株/ m^2 の約30%低減では m^2 あたり収量の低下程度は小さく、収量への影響も小さかった。しかし、栽植密度を約50%低減すると m^2 あたり収量は6%減少し、収量も7%低下した。反面、栽植密度の50%低減により、完全米の比率が5%向上し食味評価も高まること、登熟期間の高温や寡照環境に

おける乳白粒の増加が少ないことがわかった。乳白粒の発生要因を解析し、登熟期前半の1 籾重増加速度が大きい条件で発生程度が少なく、それは m^2 あたり籾数と明瞭な負の相関があることを明らかにした。乳白粒低減のための適正籾数は 28,000 粒/ m^2 であることがわかった。

5. 水稻の水ストレスの診断と水管理による品質向上

水稻の水分状態の簡易な診断手法として、熱画像の用いる方法を開発した。苗水分ストレス指数 (SWSI : Seedling Water Stress Index) と苗質の関係をより明らかにするために、水稻品種「コシヒカリ」を育苗箱で栽培し播種時期と灌水量の異なる処理区を設けた。育苗箱の群落表面温度を、赤外線放射温度計 (日本電子製 JTG-5700 型) を用いて、2 葉期から毎日 2 回灌水直前に計測した。基準蒸発面 (育苗箱直上に吊り下げた湿らせたろ紙) の温度を同時に計測し、SWSI を求めた。SWSI は高温乾燥条件で高く、低温湿潤条件で低くなった。灌水量が少ない条件では苗丈や茎葉および根の乾物重が劣り、一方湛水条件では特に高温条件で苗丈が著しく伸長し、いずれも苗質が低下した。健苗の指標となる苗丈や茎葉乾物重を満足させるためには、育苗期間の平均 SWSI を 0.3~0.35 とすることが望ましいことが明らかとなった。本方法による SWSI をもとに灌水量を増減することで健苗育成に活用できると考えられた。また、圃場条件下で収集した登熟期の群落表面温度は、光合成速度、CGR、および収量品質と関連していることを示した。これらより、圃場での水稻水分状態の診断および水管理支援情報として群落の熱画像が活用できる可能性が示唆された。さらに、登熟期間の夜間灌水の効果と昼間灌水それとの比較を現地圃場 6 年間延べ 10 ヶ所で実施した。夜間灌水により完全米の割合が向上し、胴割粒や白未熟粒の発生が低減し、タンパク含量の低下などの品質食味要素の改善がみられることを明らかにした。これらの差は小さく、気象条件により変動しやすいが、夜間灌水が高温登熟下での品質食味安定のための技術要因になりうることが示唆された。

以上より、南北陸地域の稲作における良質米の収量品質を不安定させている要因として、近年の籾数増加傾向に応じた物質生産力が登熟期間に維持されていないことが示唆された。これを確保するためには、移植後の初期生育を控えめとし m^2 あたり籾数を過剰としないこと、CGR を生育後半まで安定して高く維持する必要があること、登熟期間の根重低下や根の機能低下を防ぐこと、同化産物の穂への転流を円滑に行える態勢を構築し 1 籾重増加速度を高めることが重要と考えられた。それを実現するための栽培技術として、適正な施肥および栽植密度の低減が有効であることがわかった。加えて、品質の向上に夜間灌水が有効であることが示唆された。

公表済み文献

- 井上健一・佐藤勉・岩田忠寿・尾嶋勉・酒井究 1995a. 低温・寡照条件におけるハナエチゼンの生育の物質生産的解析. 福井農試研報 32 : 1-12.
- 井上健一 1999. 水稻早生品種の登熟期間の物質生産と品質食味要因の關係の解析. I. 乾物生産と窒素吸収量の品種間差. 北陸作報 34 : 24-26.
- 井上健一 1999. 水稻早生品種の登熟期間の物質生産と品質食味要因の關係の解析. II. 籾重増加および窒素吸収と収量, 品質食味要因の關係. 北陸作報 34 : 27-29.
- 井上健一・湯浅佳織 2001. 水稻品質食味要因の安定性に関する解析的研究. 1. 苗質がコシヒカリの初期生育と収量品質におよぼす影響. 福井農試研報 38 : 1-10.
- 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. 2. 疎植条件が水稻の物質生産と収量品質におよぼす影響. 福井農試研報 41 : 15-28.
- 井上健一・土田政憲 2015. 水稻登熟期間の夜間灌水の効果. 福井農試報 52 : 1-8.