

熊本県のパン用コムギ品種ミナミノカオリにおける枯れ熟れ様登熟不良の 発症パターンと発症要因の探索

荒木英樹¹⁾・水田圭祐¹⁾・八田浩一²⁾・中村和弘³⁾・松中仁³⁾・藤間充¹⁾・丹野研一¹⁾・高橋肇¹⁾

(¹⁾ 山口大学大学院創成科学研究科, (²⁾ 農研機構北海道農業研究センター, (³⁾ 農研機構九州沖縄農業研究センター)

要旨: コムギの枯れ熟れ様登熟不良は、登熟期間中に茎葉が早枯れし子実が軽くなる登熟障害で、発生原因は明らかにされていない。本研究では、熊本県のコムギ多収地域で発生する枯れ熟れ様登熟不良の発生要因を解明するために、土壌改良剤や窒素施肥の施用効果、植物体の窒素状態、品種の感受性差異を調査した。2011/12年と2012/13年には、施肥試験を実施した圃場で開花直後～開花後15日までの間に葉や穂が早枯れした。千粒重は、未発症圃に比べて2011/12年には15%減少し、2012/13年には30%も減少した。両年とも、症状はカルシウムやケイ酸、鉄を含む土壌改良剤では軽減しなかった。2012/13年試験の発症圃では、栄養成長期の生育が旺盛であった。早枯れの程度および粒重や葉身相対含水率の低下程度は、窒素追肥を施用しない処理区で大きく、実肥を増肥した処理区でも軽減しなかったが、基肥を増肥した処理区では小さくなった。穂を切除した処理区でも、葉色計値や相対含水率の低下程度が小さかった。稈あたりの窒素含有量は発症圃で多かった。土壌の理化学性は発症圃と未発症圃で大きな違いはなかった。既報で枯れ熟れ様登熟不良耐性が弱と評価された品種は、本地域の発症圃でも症状が重かった。枯れ熟れ様登熟不良を発症したミナミノカオリは、子実の窒素要求量が高いために茎葉からの窒素再転流が早く起こり、水吸収能低下や葉の枯れ上がりが早くに進んだと考えられた。

キーワード: 枯れ熟れ様登熟不良, 窒素含有率, 窒素施肥, 土壌改良剤, パン用コムギ品種, ミナミノカオリ, 葉色。

パン用コムギは、国産コムギの生産拡大と需要促進が図られるなかでとくに重要な作目である。ミナミノカオリは、暖地向きのパン用コムギとして2004年に登録された品種で(藤田ら2009)、2016年現在で大分県、広島県、福岡県、熊本県、長崎県の奨励品種となっている。ミナミノカオリの総検査数量は、2007年産から2015年産にかけて4,032トンから12,750トンに増加している(農林水産省2017)。熊本県では2004年に奨励品種として採用され、その作付面積は2007年の373 haから2013年には660 haに増加し、さらに2015年までには1447 haと急増している(熊本県農林水産部2017)。しかし、熊本県の一部の地域におけるミナミノカオリの栽培においては、最近、枯れ熟れ様登熟不良とよばれる登熟障害が問題となっている。

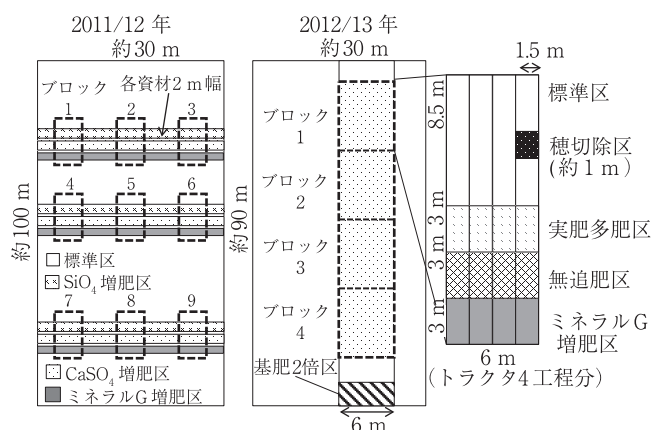
コムギの枯れ熟れ様登熟不良は、出穂期以降に下葉が急激に枯れ始め、生育とともに開花期以降には止葉が枯れ、子実の充実が不良となる異常登熟である(谷口ら1996)。石川ら(1953)は「病害、湿害等主原因のはっきりした害を除いた他の生理的障害によって正常な熟期を待たずして早熟れする現象」としている。症状は地域によって若干異なるが、穂が赤く変色したり、枯死した止葉がロール状に巻き上がったたりする(谷口ら1996)。

熊本県では、菊池郡のコムギ多収地域で栽培されているミナミノカオリで枯れ熟れ様登熟不良が多発している。事前に普及員や農家への聞き取り調査を行ったところ、この地域は、イネ、ムギ類、ダイズの田畑輪換が行われており、福岡県内での発生状況と同様に(注：福岡県農政部2002。

福岡県麦栽培技術指針)、ダイズ後作圃場で枯れ熟れ様登熟不良が多くみられるとのことであった。そこで、ダイズ後作圃場において、ミナミノカオリで発症する枯れ熟れ様登熟不良の原因を解明するために、圃場試験を継続して行うこととした。

麦類の枯れ熟れ様登熟不良は、1960年代半ばまでは主に中四国地域のオオムギ(とくに裸麦)で、1990年代からは九州のコムギで被害が大きく、これらに関して研究が行われている(平2002)。オオムギの枯れ熟れ様登熟不良について実態調査が行われた結果、枯れ熟れ様登熟不良が発症する圃場は、土壌が酸性であることや、ある種の栄養塩が欠乏しているなど何らかの欠陥があり、登熟期の気温(とくに夜温)が高く、空気や土壌が乾燥しやすいという点が共通している(古川1956)。古川・越生(1961)は、オオムギの枯れ熟れ様登熟不良発症圃ではマグネシウムの欠乏症状が出ていることや、施肥が窒素偏重で加里の施用が少ないことを明らかにしている。これらの発症状況から、溝口(1953)は、麦類の枯れ熟れ様登熟不良は、地上部と地下部の養水分需給が不均衡となった結果発生すると推察しており、発症には、気象条件、土壌条件、土壌の生物相などの要因が複合的に関与すると推察している。一方、コムギでは、九州地域では1991年～1993年に国県共同課題として、山口県では2004年～2007年に、枯れ熟れ様登熟不良の発生状況が調査されている(藏重ら2007)。

このような現地での観察に基づき、様々な実験系において、オオムギやコムギの枯れ熟れ様登熟不良障害の原因究



第1図 2011/12年と2012/13年に実施した圃場試験の圃場設計。

明が試みられてきた。古川・越生 (1961) は、裸麦の水耕試験や圃場試験において、K と Mg が同時に欠如した条件下で枯れ熟れ様登熟不良の症状である白穂が発現することを確かめた。裸麦のポット試験では、夜温が高い場合に枯れ熟れ様登熟不良に似た早枯れが起きて千粒重が軽くなることが示されている (原田ら 1965)。コムギでは、窒素の追肥や葉面散布により早枯れがやや抑制される傾向があった (池田 1995, 黒野 1995)。発症圃の土壌を用いたポット試験では、粒厚は、基肥や追肥の窒素多用によって厚くなったことから、発症には、生育後半における窒素不足が関係している可能性があると考えられた (野々山 1995)。土壌消毒により成長や収量が回復するという試験結果もあり (池田 1995)、枯れ熟れ様登熟不良には土壌病菌が関与するという指摘もある。前述のように、枯れ熟れ様登熟不良は湿害による早枯れを除くとされるが (石川ら 1953)、麦は登熟期以前に過湿土壌ストレスにあっても早枯れするため (Araki ら 2012)、栽培地では未だ十分には検証されていないが、枯れ熟れ様登熟不良には登熟期よりも前の過湿土壌ストレスも関与している可能性がある (荒木ら 2011)。

しかし、枯れ熟れ様登熟不良は現在でも原因が特定されていない。枯れ熟れ様登熟不良が同一の圃場でも年次によって発症するか否かが予見できず、同様の栽培方法で同じコムギ品種を育てても発症程度を予測することが困難であるためである (荒木ら 2011)。そのため発症前から植物体を解析した事例は少なく、発症前に処理区等を設けて発症程度に変化が起こるのかを検証した研究はほとんどない。また、コムギ品種群の枯れ熟れ様登熟不良耐性は、谷口ら (1996) が福岡県筑後市の発症圃で評価しているが、この評価が他地域の枯れ熟れ様登熟不良発症圃でも同様の結果となるかどうかは明らかにされていない。

本研究では、熊本県菊池郡大津町で発症するミナミノカオリの枯れ熟れ様登熟不良について、ダイズ後作圃場で土壌改良剤や窒素肥料を増量した施肥試験を設け、これらの資材が枯れ熟れ様登熟不良におよぼす影響を明らかにすることを目的とした。枯れ熟れ様登熟不良の症状が穂の窒素要

求量が少ない場合に軽減される可能性について検証するために、穂切除処理が枯れ上がり程度に及ぼす影響も調査した。また、谷口ら (1996) が評価した枯れ熟れ様登熟不良の感受性が異なる品種群を生育させ、大津町の枯れ熟れ様登熟不良発症地でも同様の評価となるかどうかを検証した。

材料と方法

現地試験は、2011/12年以降、2014/15年作期まで、熊本県菊池郡大津町においてダイズ後作圃場の中からミナミノカオリが作付けされる圃場を選定し実施した。枯れ熟れ様登熟不良は、それらのすべての圃場で発症するわけではなかったが、2011/12年および2012/13年には、施肥試験を実施した圃場において、試験を設置した区画でものちに枯れ熟れ様登熟不良とみられる明らかな茎葉の早枯れおよび粒の充実不足がみられた。両年の試験圃場では、播種前にスーパーエンリッチ1号 (P_2O_5 15%, SiO_2 30%, アルカリ分 47%, MgO 18%) を P_2O_5 9.0 g m^{-2} の割合で施用した。標準区は基肥として複化成肥料 (あじ彩化成 429号) を N 5.6 g m^{-2} , P_2O_5 4.8 g m^{-2} , K_2O 4.8 g m^{-2} の割合で、播種と同時に施用した。追肥は、2011/12年には2月10日前後、2012/13年には2月13日に、緩効性肥料グッドIB002号 (N 20%, そのうちIB化成窒素を12%含む) を N 8.0 g m^{-2} , K_2O 4.8 g m^{-2} の割合で施用した。

播種は、1.5 m 幅の作業機に播種機を取り付けたトラクターを用いて、行程あたり4条のドリル播きとした。播種量はおよそ 7 g m^{-2} とした。播種日は、2011/12年は11月20日、2012/13年は11月23日とした。収穫はそれぞれ6月4日と6月3日に行った。いずれの圃場でも1月から2月中旬に1度中耕および土寄せを行った。

2011/12年の試験では、ソフトシリカ、 $CaSO_4$ 、ミネラルGなどの土壌改良剤をそれぞれ施用した SiO_4 増肥区、 $CaSO_4$ 増肥区、ミネラルG増肥区と、それらを増肥しない標準区の4処理区を設けた。調査やサンプリングは、第1図のように圃場内の9地点で行った。 SiO_4 増肥区ではソフトシリカ (SiO_2 73.0%) を 0.4 kg m^{-2} の割合で施用した。 $CaSO_4$ 増肥区では石こう由来のカルシウム剤ダーウィン2000 (CaO 29%) を 0.16 kg m^{-2} の割合で施用した。 $CaSO_4$ はカルシウム供給源としてだけでなく、過湿な土壌で根系機能の低下を引き起こす硫酸根に富むことから (馬場 1990)、負の影響がある可能性もあると考え用いた。ミネラルG増肥区ではミネラルG (アルカリ分 40–44%, CaO 35–38%, MgO 2–4%, SiO_2 70.1%, FeO 13–18%, Mn 2–4%, P_2O_5 1.2–2%, K_2O 0.1–0.5%, B 0.1%, Mo 微量) を 0.4 kg m^{-2} の割合で施用した。処理区の配置にあたっては、枯れ熟れ様登熟不良が圃場のどこで発症しやすいか予見できないことから、これらの処理区は、長方形の圃場 ($30\text{ m} \times 100\text{ m}$) の短辺に平行に、2 m 幅の帯状に資材を散布し設けた (第1図)。

2012/13年の試験では、実肥多肥区、無追肥区、穂切除区、

ミネラルG増肥区、標準区の5処理区を4反復ずつ設けた(第1図)。実肥多肥区では、4月15日に実肥を尿素として窒素成分で 4 g m^{-2} の割合で施肥した。無追肥区では基肥施用時に標準区と同量の窒素肥料のみを施用し、追肥は行わなかった。穂切除区では、出穂期(4月15日)に標準区の一部の4条において、約1m分の区画で穂を穂首から切除した。ミネラルG増肥区では基肥にミネラルGを 200 g m^{-2} の割合で増肥した。また、試験プロットに隣接する地点で基肥を2倍施用した区が発生したため、ここも基肥2倍区として千粒重などを調査した。

両年とも、枯れ熟れ様登熟不良を発症しなかった圃場(未発症圃)でも調査やサンプリングを行った。

2011/12年と2012/13年の試験では、茎全体あたりの乾物重などを測定するために、主要な生育ステージに茎を採取した。2011/12年の発症圃では3月11日、5月7日(開花期直後)、5月16日、6月4日(収穫期)に、処理区ごとに無作為に10本ずつ採取した。未発症圃でも同様に茎を5月7日、5月16日、6月4日に5本または10本ずつ採取した。2012/13年試験の発症圃では、3月10日、4月15日(出穂期)、4月24日(開花期)、5月4日、5月12日、5月17日に各処理区10本ずつ採取した。6月3日(収穫期)には、発症圃で20本ずつ、未発症圃で15-20本ずつ採取した。採取した茎は、70℃の乾燥機で3日間乾燥させ、稈(葉鞘と茎部)、葉身、穂に分けてそれぞれの乾物重を測定した。

千粒重と一穂粒数は、収穫日に採取した茎の穂から子実を取り外し、粒数と粒重を測定して計算した。穂数は、2012/13年の標準区のみ測定した。測定は、6月3日に立ち毛の状態では条に沿って長さ1.0m、2条分の群落を対象に行った。

2012/13年の試験では、葉色、窒素含有率、葉身の相対含水率、根の重量を測定した。葉色は、葉色計(SPAD-502 Plus, コニカミノルタセンシング株式会社)を用いて測定した。葉色計値は、各プロットで最上位展開葉(止葉)と上位第2葉を5枚ずつ無作為に選んで測定し、葉位ごとに平均値を求めた。

葉身と稈、子実の窒素含有率は、乾物重を測定した茎を用いて、マイクロケルダール法およびインドフェノール法(大山1990)で測定した。

葉身の相対含水率は、2012/13年の5月12日と5月17日(いずれも晴天日)に発症圃と未発症圃で測定した。測定では、プロットごとに止葉を3枚ずつ採取し、ただちに新鮮重を秤量した。秤量後、蒸留水に約4時間浸漬してからキムワイプで表面の水気を拭き取り、水で飽和した時の新鮮重(飽和新鮮重)を計測した。葉身は70℃の乾燥機で2日間乾燥させて乾物重を測定した。相対含水率は次式により求めた。

$$\text{相対含水率} = (\text{新鮮重} - \text{乾物重}) / (\text{飽和新鮮重} - \text{乾物重}) \times 100$$

開花期には、発症圃と未発症圃で表土下50-100mmの地層からコアサンプラー(100ml)で土塊を採取し、その中に含まれる根の重量を測定した。

2012/13年の試験圃場で、表土下0-10cmまでの土壌を均一に採取して、土壌pH(KCl)、土壌全窒素含有率、可給態リン酸含有率、土壌の交換性塩基(K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})含有率を測定した。測定には風乾土を用い、pH(KCl)はガラス電極法、全窒素含有率はセミマイクロケルダール法、可給態リン酸含有率はトルオーグ法、土壌の交換性塩基含有率は酢酸アンモニウム溶液で抽出した溶液を用いて原子吸光法で測定した(土壌環境分析法編集委員会1997)。

2013/14年の試験では、福岡県筑後市で検定された品種(谷口ら1996)を含む48品種(育成中の系統を含む)を栽培した圃場において、軽度の枯れ熟れ様登熟不良が発症した。これらの品種群は、2011/12年および2012/13年の試験と同様に1.5mあたり4条のドリル播きとした。試験群落の条は、2013年12月8日に、種子を包埋したシートテープを埋設することで設置した。それぞれの品種の種子は、1.5cm間隔で70cmにわたって播種され、異なる品種の間には30cmの間隔が設けられた。収穫期(6月1日)に、谷口ら(1996)が耐性程度を強としたチクゴイズミ、弱としたきぬいろは、予備試験でも耐性が強かった農研小麦1号、本研究の対象であるミナミノカオリ(試験群落のもの)について、茎全体を15-20本ずつ採取し、千粒重と一穂粒数を前述と同様に計算した。肥培管理は、2011/12年および2012/13年の試験と同様に現地の慣行に従った。

2014/15年の試験では、大津町内で通常よりも早く成熟期をむかえていた圃場のうち12筆を選び、5月30日に茎全体を圃場あたり15-20本ずつ採取した。これらを乾燥させたのち、千粒重と一穂粒数を測定した。

実験計画法に関して、2011/12年と2012/13年の施肥試験におけるプロットの配置は、枯れ熟れ様登熟不良の発生個所が予見できないことから、ブロック内でプロットを無作為に配置せず、第1図に示したプロットで配置した。ただし、分散分析では、枯れ熟れ様登熟不良の発症程度は圃場内で無作為に決まると考え、処理の効果を乱塊法にしたがい解析した。2011/12年試験では、圃場内9ブロック4処理区で得られた値を二元配置の分散分析で解析した。2012/13年試験では、圃場内4ブロック4処理区から得られた値を、同じく二次元配置の分散分析で解析した。

結 果

気象台の菊池市におけるアメダスのデータ(気象庁2017)によれば、2011/12年は11月と12月で平年より0.7~4.4℃高かったが、それ以降は平年的であった。積算降水量は、2月上旬から3月下旬にかけて多かったが、4月以降は平年を下回った。2012/13年は、11月から1月にかけて平年値より0.4~3.0℃低く推移した。3月は平年より0.4~2.7℃高かったが、4月はおよそ1.0℃低かった。

第1表 2011/2012年と2012/2013年の枯れ熟れ様登熟不良発症圃および未発症圃におけるミナミノカオリの千粒重および一穂粒数.

年次	圃場	処理区	千粒重 (g)	一穂粒数
2011/12 年	発症圃	標準区	30.9 ± 1.13	32.7 ± 1.42
		SiO ₄ 増肥区	32.3 ± 0.63	31.0 ± 1.09
		CaSO ₄ 増肥区	32.6 ± 0.75	33.7 ± 1.51
		ミネラル G 増肥区	32.3 ± 0.85	32.2 ± 1.11
		未発症圃	36.5 ± 0.36	29.7 ± 1.85
	t 検定		**	ns
2012/13 年	発症圃	標準区	26.1 ± 0.30	34.7 ± 1.21
		実肥多肥区	25.5 ± 1.84	31.8 ± 1.35
		無追肥区	25.7 ± 1.48	31.4 ± 1.50
		ミネラル G 増肥区	25.3 ± 1.61	31.8 ± 2.50
		未発症圃	35.8 ± 0.71	23.8 ± 1.75
	t 検定		***	**
	分散分析		ns	ns

値は平均値 ± 標準誤差を示す.

発症圃の標準区と未発症圃の比較はt検定で, 発症圃の処理区間の比較は分散分析で行った. nsは有意差がないことを,

** と *** はそれぞれ1%と0.1%水準で有意差があることを示す.

積算降水量は, 2月は上旬と中旬を除いて, 多くの時期で平年を下回った. 2013/14年の気温は, 概ね平年並みで, 積算降水量は3月下旬に82.5 mm, 5月中旬に74 mmと多雨であった. 2014/15年の気温は, 4月上旬から成熟期までに, 平年よりおよそ1.0~2.0℃高く推移した. 積算降水量は3月以降に多かった.

第1表に, 枯れ熟れ様登熟不良発症圃および未発症圃における2011/12年と2012/13年の千粒重, 一穂粒数および穂数を示した.

千粒重は, 2011/12年の未発症圃では36.5 gであったのに対し, 発症圃標準区で30.9 gと, 未発症圃に比べて有意に軽かった. 発症圃の千粒重は, SiO₄ 増肥区, CaSO₄ 増肥区, ミネラル G 増肥区, 標準区の間で有意差はなかった. 2012/13年の千粒重は発症圃標準区で26.1 gと, 2011/12年の発症圃標準区の30.9 gと比べても顕著に軽かった. 2012/13年の千粒重は, 未発症圃は35.8 g, 発症圃標準区では26.1 gと未発症圃のおよそ70%にすぎなかった. また発症圃の実肥多肥区, 無追肥区, ミネラル G 増肥区および標準区の間で有意差はなかった.

一穂粒数は, 2011/12年の未発症圃では29.7粒であったのに対し, 発症圃標準区で32.7粒と, 発症圃でやや多い傾向がみられた. 一穂粒数は, 発症圃のSiO₄ 増肥区, CaSO₄ 増肥区, ミネラル G 増肥区および標準区の間で有意差はなかった. 2012/13年の未発症圃の一穂粒数は23.8粒であったのに対し, 発症圃では標準区で34.7粒と1%水準で有意に多かった. 発症圃の一穂粒数は実肥多肥区, 無追肥区, ミネラル G 増肥区および標準区の間で有意差はなかった.

穂数は, 2012/13年の発症圃の標準区でのみ測定を行い,

第2表 2012/13年の枯れ熟れ様登熟不良発症圃における基肥2倍区と標準区の千粒重および一穂粒数.

処理区	千粒重 (g)	一穂粒数
基肥2倍区	34.1 ± 0.50	31.4 ± 1.40
標準区	26.1 ± 0.30	34.7 ± 1.21
t 検定	***	ns

値は平均値 ± 標準誤差を示す.

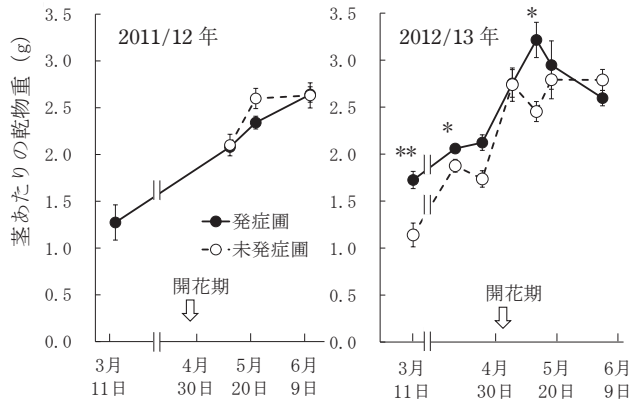
nsは有意差がないことを, ***は0.1%水準で有意差があることを示す.

550 ± 18.9 本 m⁻² (平均値 ± 標準誤差) と多かった (データ省略).

第2表に, 2012/13年の枯れ熟れ様登熟不良発症圃の標準区と基肥2倍区における千粒重と一穂粒数を示した. 千粒重は, 基肥2倍区で34.1 gと標準区に比べて0.01%水準で有意に重かった. 一穂粒数は, 基肥2倍区で31.4粒と, 標準区と比べて同程度であった.

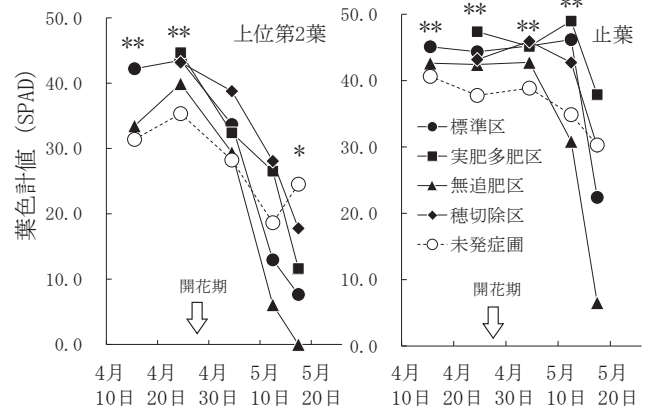
第2図に, 発症圃および未発症圃における茎立ち期から収穫期にかけての茎全体あたりの乾物重を示した. 2011/12年では, 発症圃の乾物重は3月11日の1.27 gから収穫期の2.64 gまで増加し, 未発症圃の2.63 gと同程度となった. 2012/13年の発症圃の乾物重は, 3月11日の茎立ち期初期では未発症圃に比べて有意に51.3%重く, 発症圃標準区では栄養成長が旺盛であった. 発症圃標準区の乾物重は, 3月11日以降も未発症圃と比べて重かったが, 開花期から約10日後の5月12日から成熟期6月3日にかけて減少し, 成熟期には未発症圃よりも軽くなった.

第3図に, 2012/13年の枯れ熟れ様登熟不良発症圃と未



第2図 枯れ熱れ様登熟不良発症圃標準区および未発症圃における茎立ち期から収穫期にかけての茎全体あたりの乾物重(左2011/12年, 右2012/13年)。

発症圃と未発症圃の比較はt検定で行った。*と**はそれぞれ5%と1%水準で有意差があることを示す。



第3図 2012/13年の発症圃と未発症圃における上位第2葉と止葉の葉色計値 (SPAD 計値)。

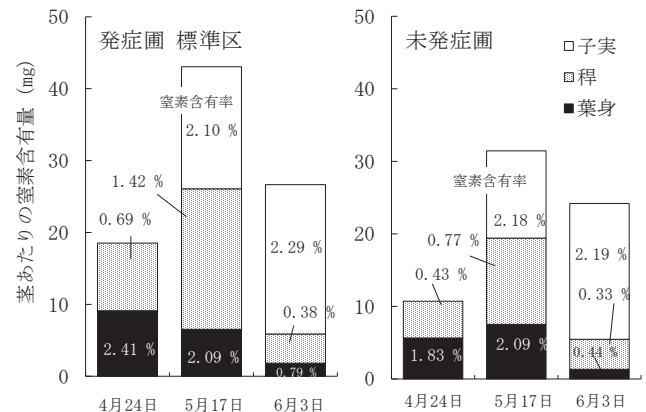
矢印は開花期を示す。発症圃と未発症圃の比較はt検定で行った。*と**はそれぞれ5%と1%水準で有意差があることを示す。

発症圃の出穂期から成熟期までの上位第2葉と止葉の葉色計値 (SPAD 計値) を示した。

上位第2葉の葉色計値は、未発症圃で4月15日から5月4日(開花期)までは30.0前後で推移し、その後登熟が進むに従って緩やかに低下した。発症圃の標準区では、4月15日から4月24日は42.2から43.5と高く推移したが、5月12日には未発症圃を下回り、開花約15日後の5月17日には測定できる下限に近い7.7まで低下した。実肥多肥区は、開花期までは標準区と同様に推移したが、5月12日で26.5、5月17日で11.6と、標準区と比べて高い値を維持した。無追肥区の葉色計値は開花期以前も標準区よりやや低く、開花後の5月12日にはすでに6.1まで低下した。5月17日には上位第2葉が枯死しており測定できなかった。穂切除区も標準区と同様に推移したが、葉色計値は5月4日以降には標準区よりも高かった。

止葉も上位第2葉と同様に、5月4日まではほとんど変化せず、それ以降に緩やかに低下した。発症圃の標準区では5月12日まではおよそ45.0と高い値で推移し、5月12日から5月17日にかけて46.2から22.4と急激に低下した。実肥多肥区と穂切除区の葉色計値は、5月17日には標準区ほど低下しなかった。無追肥区では、5月4日の42.8までは標準区と比べて有意差はなかったが、5月12日には30.9、5月17日には6.5と急激に低下した。

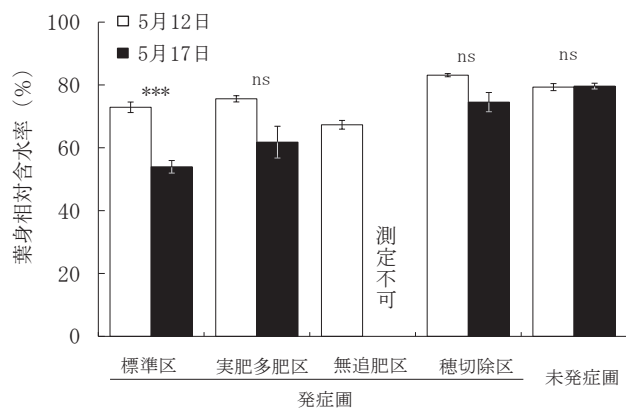
第4図に2012/13年の枯れ熱れ様登熟不良発症圃標準区と未発症圃において、4月24日(出穂10日後頃)、5月17日(開花15日後頃)、6月3日(成熟期)に採取した茎全体の葉身、稈(葉鞘+茎部)、子実の窒素含有量を示した。4月24日の茎全体あたりの窒素含有量は、未発症圃で10.7 mg、発症圃で18.5 mgと発症圃が多かった。4月24日から5月17日にかけて、未発症圃では茎全体で20.7 mg増加し、このとき子実には12.0 mg、葉身にも7.52 mg蓄積していた。一方、発症圃では茎全体で24.5 mg増加し、



第4図 2012/13年の枯れ熱れ様登熟不良発症圃標準区と未発症圃から採取した茎における4月24日(出穂10日後頃)、5月17日(開花15日後頃)、6月3日(成熟期)の茎全体の葉身、稈(葉鞘+茎部)、子実の窒素含有量および各器官の窒素含有率(%)。

子実に17.0 mg蓄積されたが、葉身では2.58 mg減少した。5月17日から6月3日にかけて、未発症圃では、茎全体で7.25 mg減少したが、発症圃ではさらに16.4 mgも減少した。この期間に、未発症圃では子実には窒素が6.70 mg蓄積し、葉身は6.18 mg、稈は7.77 mg減少した。発症圃では、子実で3.80 mg増加したが、葉身は4.72 mg減少し、稈では15.5 mg減少した。

第5図に、2012/13年における開花10日後(5月12日)と5月17日に測定した止葉の葉身相対含水率を示した。未発症圃の相対含水率は、5月12日と5月17日でそれぞれ79.3%および79.6%と低下していなかった。発症圃の相対含水率は、標準区では5月12日から5月17日までに72.9%から53.9%まで有意(0.1%水準)に低下した。実肥多肥区では5月12日の75.6%から5月17日の61.8%と低下したが、有意差はなかった。無追肥区の葉身



第5図 2012/13年の枯れ熟れ様登熟不良発症圃と未発症圃における登熟期の葉身相対含水率。相対含水率は、平均値 ± 標準誤差を示す(発症圃各区 n=4, 未発症圃 n=3)。*** は t 検定により 0.1%水準で有意差があることを, ns は有意差がないことを示す。

相対含水率は、5月12日にはすでに 67.3%まで低下していた。5月17日には止葉が完全に枯死したために測定できなかった。穂切除区は、5月12日の 83.1%から5月17日の 74.5%と有意には低下しなかった。

第3表に、2012/13年の枯れ熟れ様登熟不良発症圃と未発症圃から採取した作土の pH, 全窒素含有率, 可給態リン酸含有率および交換性塩基含有率を示す。pH はいずれの圃場もおおよそ 6.9 と高かった。全窒素含有率も発症圃では 3737 mg kg⁻¹, 未発症圃で 4853 mg kg⁻¹ といずれの圃場も高かった。可給態リン酸含有率や乾土あたり交換性塩基 K₂O, CaO, MgO 含有率も発症圃と未発症圃で有意な違いはなかった。

第6図に、2012/2013年の枯れ熟れ様登熟不良発症圃と未発症圃におけるコアサンプラーあたりの根の重量を示す。根の重量は、採取日の4月24日と5月5日のいずれも発症圃で重い傾向があった。

第7図に、2014/15年作期の5月30日の段階で通常よりも早く熟れて成熟期を迎えていた圃場12筆から採取した穂の千粒重と一穂粒数を示した。千粒重と一穂粒数は圃場によって大きく異なり、明確な相関関係はなかったが、一穂粒数が30以上の圃場は千粒重が35 mg 以下で軽い傾向があった。千粒重は最大値が38.0 mg, 最小値が30.4 mg と圃場間で大きな変異があった。一穂粒数も、最大値が42.9, 最小値が22.9 と変異が大きかった。

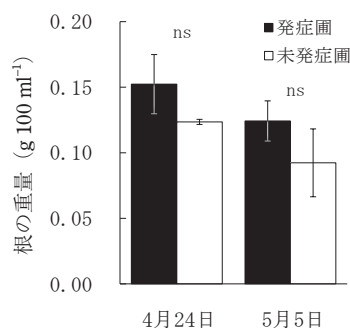
第4表に、2013/14年の試験圃で枯れ熟れ様登熟不良の耐性検定に供した主な品種の千粒重および一穂粒数を示した。チクゴイズミは一穂粒数が39.0粒と最も多く、千粒重も50 g を上回った。農研小麦1号も、一穂粒数と千粒重がそれぞれ34.0粒と40.7 g と、値が大きかった。これらの品種では、登熟期間中に葉身の早枯れはみられなかった。枯れ熟れ様登熟不良に対して感受性が高いきぬいろはは、一穂粒数が28.3粒と少なく、千粒重も31.5 g と軽かった。

第3表 2012/13年の枯れ熟れ様登熟不良発症圃と未発症圃から採取した作土の pH, 全窒素含有率, 可給態リン酸含有率および交換性塩基含有率 (mg kg 乾土⁻¹)。

測定項目	発症圃	(n)	未発症圃	(n)	t 検定
pH (KCl)	6.98 ± 0.03	7	6.82 ± 0.03	3	**
N	3737 ± 220	7	4853 ± 743	3	ns
P ₂ O ₅	36.0 ± 3.98	7	25.5 ± 2.85	3	ns
K ₂ O	460 ± 42.7	7	575 ± 20.2	3	ns
CaO	2105 ± 104	7	2058 ± 29.7	3	ns
MgO	466 ± 31.1	7	399 ± 17.9	3	ns

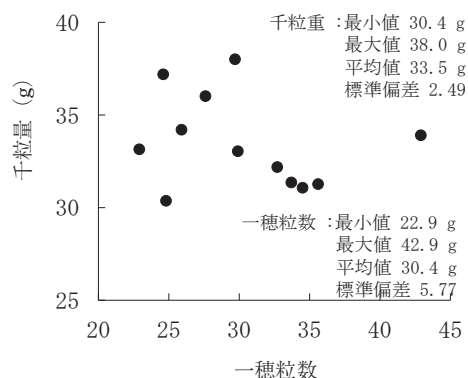
値は平均値 ± 標準誤差を示す。n は反復数を示す。

発症圃と未発症圃の比較は t 検定で行った。ns は有意差がないことを, ** は 1%水準で有意差があることを示す。



第6図 2012/2013年の枯れ熟れ様登熟不良発症圃と未発症圃におけるコアサンプラーあたりの根の重量。

根は表土下 50-100 mm の土層から採取した。根の重量は 3~4 反復の平均値 ± 標準誤差を, ns は有意差がないことを示す。



第7図 2014/15年作期の5月30日の段階で通常よりも早く熟れて成熟期を迎えていたミナミノカオリ圃場12筆から採取した穂の千粒重と一穂粒数。

ミナミノカオリの千粒重と一穂粒数もきぬいろはと同程度であった。きぬいろはとミナミノカオリでは、5月17日に外観から葉身の早枯れが観察された。

考 察

コムギの枯れ熟れ様登熟不良は、1980年代後半から九州地方で農林61号やきぬいろはなどで発症している(谷口

第4表 2013/14年の試験圃で枯れ熱れ様登熟不良の耐性検定に供した品種の千粒重および一穂粒数.

品種	(n)	千粒重 (g)	一穂粒数
チクゴイズミ	3	51.5 ± 1.5	39.0 ± 1.0
農研小麦1号	2	40.7	34.0
ミナミノカオリ	3	32.5 ± 3.2	31.1 ± 3.2
きぬいろは	2	31.5	28.3

値は平均値 ± 標準誤差を, n は反復数を示す.

ら 1996). 2000 年代には山口市名田島地区の干拓地でも発症が報告されている (荒木ら 2011). これまでの報告では, 枯れ熱れ様登熟不良の発症過程は栽培地間で概ね類似しているが, 圃場内での発症箇所や発症の広がり方, 発症がすべての茎か一部の茎か, 穂の色や反り方などは栽培地によって異なり, 想定される要因なども栽培地や圃場によって異なると指摘されている (脇本 1995, 谷口ら 1996, 藏重ら 2007, Hossain ら 2009). 本研究で調査した熊本県大津町のミナミノカオリの枯れ熱れ様登熟不良でも, 2011/12 年の圃場では開花から 20 日頃 (通常このパターンが多い), 2012/13 年の圃場では開花から 10 日後頃には下位葉が顕著に枯れ始めた (第3図). 粒重は, 枯れ始める時期が早い 2012/13 年の発症圃で大きく低下した (第1表). いずれの年次でも, 降水量が平年に比べて格別多いこともなく, 現地が透水性の良い土質であることから, 湿害による早枯れとは異なると考えられた. 九州農業試験場の発症圃で検定 (谷口ら 1996) によって耐性が強とされたチクゴイズミの千粒重は大津町でも重く, 耐性が弱とされたきぬいろはの千粒重は軽かった (第4表). このことから, 大津町のミナミノカオリで発症する枯れ熱れ様登熟不良は, 福岡県のコムギで報告されている枯れ熱れ様登熟不良と類似性が高いと考えられた.

このような条件下で, 本研究では土壤改良剤施用や窒素増肥による発生抑制効果を検証した. コムギの枯れ熱れ様登熟不良には, 過剰窒素施用や窒素不足が関係することが指摘されている (平 2002). また, 過湿土壤などの不良土壤要因で根系の発達や機能が低下した場合に, 症状が重くなると指摘されている (西田ら 1993, 佐野ら 1994). 2012/13 年の試験では, 茎全体あたりの窒素含有量や各器官の窒素含有率は, 未発症圃に比べて発症圃でやや多かった (第4図). 根量も発症圃で少ないわけではなかった (第6図). しかし, 千粒重は無追肥区で軽くなり (第1表), 基肥2倍区で重くなった (第2表). 収穫日の達観では, 基肥2倍区では周辺の群落に比べて枯れ上がり程度が明瞭に軽度であり, それが千粒重を重くした要因であると考えられた. 同年の試験では, 出穂直後に穂を切除する穂切除区を設けて, 子実の窒素シンクが全くない状態の植物体を作成し, 発症パターンを観察した. その結果, 穂切除区の葉身は早枯れせず (第3図), 葉身相対含水率も未発症圃程度に高く維持された (第5図). これらの結果から, コム

ギの枯れ熱れ様登熟不良は, 登熟期間中に窒素欠乏が起これ, 何らかの理由で吸水能力が低下して葉が早枯れするという過程を経ると考えられた. また, 枯れ熱れ様登熟不良は, *Fusarium* 属菌などの土壤病原菌が根の吸水能力を低下させることが原因である可能性もあると指摘されているが (稲田ら 1993), 穂を切除した個体では早枯れや葉身相対含水率の低下が起きにくかったことから (第3図, 第5図), 土壤病である可能性は低いと考えられた. ただし, 出穂後に追肥した実肥多肥区では, 十分な早枯れ抑制効果が得られなかったことから (第1表), 出穂期程度の生育後期に増肥しても症状を軽減する効果は低いと考えられた.

コムギの収量は, 窒素蓄積量が限定要因になることが指摘されている (Sinclair and Jamieson 2006). 前述のように, 枯れ熱れ様登熟不良には吸収窒素量不足が関与していると考えられることから, ここで 2012/13 年発症圃において, 単位面積あたりの窒素施用量がどの程度不足していたのかを推定する. 子実が成熟期までに蓄積した窒素量 (子実窒素蓄積量) は, 収量構成要素 (第1表) から計算した推定収量が 458 g m^{-2} で, 子実窒素含有率が 2.29% (第4図) であることから, およそ 10.5 g m^{-2} と推定される. 本地域の成熟期までの総窒素施用量は $10 \sim 12 \text{ g m}^{-2}$ 程度で, ここで推定した子実窒素蓄積量と概ね同量である. 仮に, この群落の穂数と一穂粒数がこのままで千粒重だけが未発症圃や基肥2倍区と同等の 35.8 g や 34.7 g となったとすれば, 推定収量はそれぞれ 683 g m^{-2} および 651 g m^{-2} で, 子実窒素蓄積量はそれぞれ 15.6 g m^{-2} および 14.9 g m^{-2} となり, 明らかに耕地に投入した総窒素施肥量よりも多い値となる. 大津町の発症圃のミナミノカオリは, 茎立ち期には未発症圃に比べて成長が旺盛で (第2図), 収量構成要素 (第1表) も穂数が 550 本と福岡県筑後市の栽培試験 (藤田ら 2009) や熊本県内他地域 (藤井 2005, 藤井ら 2007) と比べても 30% 近く多く, 一穂粒数の 34.7 も, 収量構成要素から計算した他地域の一穂あたり整粒数に比べても多い傾向にある. 大津町で発症する枯れ熱れ様登熟不良は, もともと肥沃な土壤である上にダイズ作後の窒素過多で過繁茂な群落となり, 開花期に過剰な粒数を着生した結果, 子実成長に応じた窒素供給ができず, 茎葉からの窒素再転流が早くに起こるために生じると考えられた. 今後, この仮説の検証作業が必要である.

裸麦を含むオオムギでは, 土壤中のカチオン, とくに K と Mg の欠乏が枯れ熱れ様登熟不良の発症程度を増大させることが知られている (古川・越生 1961). また, 秋落ちした水稻 (馬場 1990) では, Ca を含めたカチオンやケイ酸の吸収量が低下することが知られている. 2011/12 年発症圃に設けた SiO_4 増肥区, CaSO_4 増肥区, 両年の試験で設けたミネラル G 増肥区では, いずれも千粒重が標準区に比べて有意に重くならなかった (第1表). 本地域の土壤は, pH やカチオン含有量が草場ら (2009) が示す九州の普通作物や露地野菜耕作地でも平均的な水準以上であることが

ら (第3表), 本地域の枯れ熟れ様登熟不良は, 土壤酸性やある種のカチオン不足が原因になっている可能性は低いと考えられた。

熊本県大津町で発症するミナミノカオリの枯れ熟れ様登熟不良は, 茎立ち期にはすでに過繁茂傾向となるダイズ後作圃で多くみられ, 前述のように, これらの圃場では穂数や一穂粒数が多くなりやすいことから, 子実の窒素要求量が未発症圃に比べて大きいと考えられた。このような観察から, ミナミノカオリの枯れ熟れ様登熟不良は, 早播きや生育前半の窒素過多による栄養成長期の過繁茂を防ぎ, 子実の充実を促進する施肥体系で軽減する可能性があると思われる。麦類では, 茎立ち期以降に窒素肥料を重点的に施用する後期重点施肥法が試されており, 分けつの過剰な発生や無効化を抑え, 登熟期間中の生産力を高め子実成長が良化することが確かめられている (倉井ら 1998, 浦野 2014, 鎌田ら 2014, 鎌田ら 2016, 渡邊ら 2016, 水田ら 2017)。一方, 大津町の枯れ熟れ様登熟不良には明確な品種間差がある (第4表) ことから, 品種間差を引き起こす機作を明らかにすることで, 枯れ熟れ様登熟不良耐性品種を効率的に作出できるようになり, 生産性が高められると期待できる。

謝辞: 栽培試験の遂行にあたり, JA 菊池の皆様, 熊本県農業研究センターの坂梨二郎氏, 圃場耕作者の皆様にご協力いただいた。ここに記して感謝申し上げます。本研究は, JSPS 科研費 JP26450021 の助成により実施いたしました。

引用文献

- 荒木英樹・高橋肇・張立・中司祐典・木村晃司・蔵重宏史・平田俊昭・有吉真知子・Md.A. Hossain 2011. 山口市名田島地区におけるコムギの枯れ熟れ様登熟不良の発症実態と粒重ならびに茎葉の糖含有率との関係. 日作紀 80: 284-291.
- Araki, H., Hamada, A., Hossain, Md.A. and Takahashi, T. 2012. Waterlogging at jointing and/or after anthesis in wheat induces early leaf senescence and impairs grain filling. *Field Crops Res.* 137: 27-36.
- 馬場赳 1990. V 生理障害 第1章 秋落ち. 松尾孝嶺ら編, 稲作大成第二巻生理編. 農文協, 東京. 697-729.
- 土壤環境分析法編集委員会 1997. 第V章 土壤化学. 土壤環境分析法編集委員会編, 土壤環境分析法. 博友社, 東京. 195-385.
- 藤井康弘 2005. 農業の新しい技術. 熊本県農政部. https://www.pref.kumamoto.jp/common/UploadFileOutput.ashx?c_id=3&id=1039&sub_id=1&flid=2&dan_id=1 (2017/7/2 閲覧).
- 藤井康弘・堀孝弘・上野育夫・畠山誠一 2007. パン加工適性の高いコムギ品種“ニシノカオリ”と“ミナミノカオリ”の品質および収量安定のための栽培法. 熊本県農業研究センター研究報告 14: 16-21.
- 藤田雅也・河田尚之・関昌子・八田浩一・波多野哲也・田谷省三・佐々木昭博・氏原和人・谷口義則・平将人・塔野岡卓司・堤忠宏・坂智広 2009. 製パン適性の良い硬質小麦新品種「ミナミノカオリ」の育成. 九州沖縄農研報告 51: 41-64.
- 古川太一 1956. ムギの枯熟現象と防止対策. 農業技術 11: 501-505.
- 古川太一・越生博次 1961. 裸麦の枯熟現象と肥料要素との関係. 日作紀 29: 356-358.
- 原田哲夫・古川太一・江戸義治 1965. 広島県における裸麦の枯熟れに関する研究. 広島農試報告 20: 1-45.
- Hossain, Md.A., Takahashi, T., Zhang, L., Nakatsukasa, M., Kimura, K., Kurashige, H., Hirata, T. and Ariyoshi, M. 2009. Physiological mechanisms of poor grain growth in abnormally early ripening wheat grown in west Japan. *Plant Prod. Sci.* 12: 278-284.
- 池田健一郎 1995. 小麦枯れ熟れ様障害の発生原因の解明と改善技術の確立 (国・県共同研究報告書). 7-13, 16-18.
- 稲田稔・山口純一郎・松崎正文 1993. コムギ枯れ熟れ様障害株から分離された糸状菌. 九農研 55: 77.
- 石川越三・竹内重之・白石憲郎 1953. 麦の枯れ熟れ研究 (第2報). 生育時期別土壤水分と裸麦の生育及び稔実との関係について. 四国農試報 1: 1-9.
- 鎌田英一郎・池尻明彦・高橋肇・前岡庸介・内山亜希・金子和彦・中司祐典・金岡夏美・荒木英樹・丹野研一 2014. 裸麦の収量および登熟生理に及ぼす穂肥窒素による後期重点施肥の影響. 日作紀 83: 1-8.
- 鎌田英一郎・高橋肇・池尻明彦・内山亜希・金子和彦・松永雅志・荒木英樹・丹野研一 2016. 穂肥窒素の増施が裸麦の登熟期間中の物質生産および窒素代謝に及ぼす影響. 日作紀 85: 288-293.
- 気象庁 2017. 過去の気象データ検索. <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2017/7/2 閲覧).
- 熊本県農林水産部 2017. 平成28年度主要農作物奨励品種特性表. http://www.pref.kumamoto.jp/kiji_1220.html (2017/7/2 閲覧).
- 倉井耕一・木村守・遠山明子 1998. 小麦の追肥による生育パターンの変化と追肥技術への応用. 栃木農試研報 47: 1-12.
- 蔵重宏史・中司祐典・木村晃司・有吉真知子・高橋肇 2007. 気象条件が小麦枯れ熟れ様障害の発生に及ぼす影響. 日作中支集録 48: 4-5.
- 黒野真伸 1995. 小麦枯れ熟れ様障害の発生原因の解明と改善技術の確立 (国・県共同研究報告書). 53-55.
- 草場敬・郡司掛則昭・藤富慎一・稲部巖・古江広治・井手勉・山本富三・山田一郎 2009. 九州沖縄各県試験データに基づく土壤・施肥管理の現状解析と適正化に向けた課題. 九州沖縄農業研究センター研究資料 92: 1-89.
- 溝口徳三郎 1953. 麦類枯熟現象の問題点. 農業技術 8: 19-22.
- 水田圭祐・荒木英樹・中村和弘・松中仁・丹野研一・高橋肇 2017. パン用コムギ品種「ミナミノカオリ」における穂肥重点施肥が収量や子実タンパク質含有率におよぼす影響. 日作紀 86: 319-328.
- 西田瑞彦・井田明・田中福代 1993. 小麦の枯れ熟れ様障害発生に及ぼす土壤環境要因の解析. - 土壤水分状態及び窒素追肥の影響 -. 九州農業研究 55: 61.
- 野々山芳夫 1995. 小麦枯れ熟れ様障害の発生原因の解明と改善技術の確立 (国・県共同研究報告書). 78-85.
- 農林水産省 2017. 麦類の農産物検査結果. <http://www.maff.go.jp/j/seisan/syoryu/kensa/mugi/index.html> (2017/7/2 閲覧).
- 大山卓爾 1990. 第V章 窒素化合物分析法. 植物栄養実験法編集委員会編, 植物栄養実験法. 博友社, 東京. 174-194.
- 佐野雅俊・藤谷信二・矢野輝人 1994. 小麦の枯熟現象と根機能との関係. 九州農業報告 56: 77.
- Sinclair, T.R. and Jamieson, P.D. 2006. Grain number, wheat yield, and bottling beer: An analysis. *Field Crops Res.* 98: 60-67.
- 平将人 2002. 枯れ熟れ. 農林水産技術会議事務局編, 農林水産研究文

- 献解題 No23 麦－高品質化に向けた技術開発－. 農林統計協会, 東京. 318-319.
- 谷口義則・氏原和人・藤田雅也・佐々木昭博 1996. 小麦枯れ熟れ様障害耐性の検定方法と品種間差異. 九州農試報告 30: 1-12.
- 浦野光一郎 2014. 硫安の全量 3 月上旬施肥が六条大麦の生育, 収量および品質に及ぼす影響. 日作中支集録 54: 29-30.
- 脇本賢三 1995. 小麦枯れ熟れ様障害の発生原因の解明と改善技術の確立 (国・県共同研究報告書). 66-77.
- 渡邊和洋・中園江・中村大輔・西谷友寛・西村奈月・松島弘明・谷尾昌彦・江原宏 2016. 生育後期重点施肥がコムギの生育と収量に及ぼす影響. 日作紀 85: 373-384.

Symptoms of Abnormally Early Ripening in a Wheat Cultivar “Minaminokaori” Grown in Kumamoto Prefecture and the Causative Factors : Hideki ARAKI¹⁾, Keisuke MIZUTA¹⁾, Kouichi HATTA²⁾, Kazuhiro NAKAMURA³⁾, Hitoshi MATSUNAKA³⁾, Mitsuru TOMA¹⁾, Ken-Ichi TANNO¹⁾ and Tadashi TAKAHASHI¹⁾ (¹⁾*Grad. Sch. of Tech. for Innov., Yamaguchi Univ., Yamaguchi 753-8515, Japan;* ²⁾*Hokkaido Agricultural Research Center, NARO;* ³⁾*Kyushu Okinawa Agricultural Research Center, NARO*)

Abstract : Abnormally early ripening, locally called “Kareure”, induces early senescence of leaves and poor grain filling. The objectives of this study were to find the cause of Kareure. Kareure occurred in trial fields in 2001/12 and 2012/13 where mineral or nitrogen fertilizers or both were additionally applied. Thousand grain weight in the trial fields was 15% and 30% lower in 2011/12 and 2012/13, respectively, than in fields where plants ripened normally (control). The mineral fertilizers rich in silicate, calcium and iron did not influence the thousand grain weight. In 2012/13, omitting of the top-dressed nitrogen made the symptoms worse and increase of top-dressed nitrogen after heading did not influence the symptoms. However, increase of basal nitrogen reduced the symptoms in 2012/13. Excision of spikes significantly alleviated early fall in greenness and relative water content of flag leaves. Cultivars that have been evaluated as susceptible to Kareure in other regions were also susceptible in this region. We discussed the possibility that Kareure might be induced by nitrogen deficiency that might also induce early decline of water uptake and senescence during grain filling.

Key words : Abnormally early ripening, Leaf greenness, Minaminokaori, Mineral fertilizers, Nitrogen content, Nitrogen fertilizing, Wheat cultivar for bread.