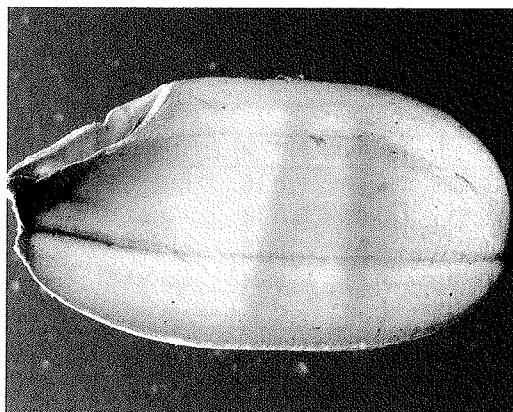


高温登熟障害—米の胴割れについて—

農業・食品産業技術総合研究機構 近畿中国四国農業研究センター
稲収量性研究近中四サブチーム 主任研究員 長田健二

1. はじめに

米の「胴割れ」とは、米粒の胚乳部分に亀裂を生じる現象である（図－1）。米粒内に亀裂を生じると、精米時の碎米発生を助長するほか、外観品質や食味にも影響をおよぼすため、コメの生産・流通・利用場面で問題となる。近年、水稻が高温で登熟する条件が頻発し、米の品質低下が大きな問題として取り上げられるなか、胴割れの発生で品質が低下する年次や地域も多く認められている。また、無洗米・発芽玄米への加工適性の確保¹⁾、生産物の収穫・乾燥調製作業の将来的な効率化・低コスト化・環境負荷軽減化^{2),3)}、等の観点からも胴割れを生じにくい粒質が求められる傾向にある。このような背景のもと、コメの生産現場では胴割れ発生防止対策が急務になっている。



図－1 米の胴割れ

2. 胴割れによる品質低下

胴割れは米品位検査の際に被害粒として扱われる。判定基準は、ア) 横1条の亀裂がすっきり通っている粒、イ) 完全に通っていない亀裂が片面横に2条、他面からみて横2条の粒であって発生部位の異なる粒、ウ) 完全に通っていない亀裂が片面横に3条以上生じている粒、エ) 縦に亀裂を生じている粒、オ) 亀甲型の亀裂を生じている粒、とされる⁴⁾。過去10年間の検査状況をみると、胴割れによる落等割合は全国平均では3～13%程度であるが、関東甲信および北陸地域では例年全国平均より高い傾向にあり、平成18年産においては東北や近畿地域でも割合が高くなった（農林水産省資料）。

一方、グレインスコープ等で玄米に光を透過して観察すると、一見整粒に見えても、相当数の米粒の内部に軽微な亀裂が確認される場合がある。このような、検査上は対象とされない軽微な胴割れを含む全胴割れ粒率と品位検査における胴割れ判定粒率との間には一定の関係が認められ、全胴割れ粒率で30%程度を越えると検査による胴割れ判定粒率も増加する傾向にある。軽微な胴割れは精米時の碎米発生への影響が小さいと考えられているが、胴割れを生じていない整粒と比較すると発生は多い。特に醸造用玄米の場合は、構造上脆い心白形質を有することに加え、搗精程度が一般食用米よりも強いため、

軽微な亀裂も碎米になりやすいことから、亀裂の程度を問わず被害粒として扱われる⁴⁾。

3. 胴割れの発生要因

米の胴割れは、登熟が進み含水率が低下して硬度の増した米粒において水分の吸収や放出が急激に生じた際に米粒の部位別膨縮差が大きくなり、粒内の圧力分布の不均衡が増大することによって発生すると考えられている^{5)~7)}。すなわち、米粒は外界の湿度に敏感に反応して水分を吸収・放出するが、玄米における水分の出入りは胚と胚乳の境界付近にある「胚盤」と呼ばれる部分で最も早く行われるため、胚盤付近の胚乳の膨脹や収縮は他の胚乳部分より早く進む。完熟した米粒は硬いため、そのような膨脹が急激に生じると粒の内部に圧力の不均衡が生じ、それに耐えきれなくなった米粒に内部亀裂が生じてしまう、という過程が考えられている。

このように、成熟を迎えた米粒内の含水率変化とそれとともなう粒の膨縮性が発生メカニズムに関わることから、胴割れ発生の助長要因は、ア) 登熟後期以降の米粒水分の変動に関わる外的要因、イ) 水分変動に対する米粒の膨縮特性、の2つに大別して考えることが可能である。ア) については、登熟期間全般の高温条件やフェー

ンのほか、圃場からの早期落水、刈り遅れによる籾含水率の過度の低下^{8)~10)}、籾含水率が低い条件下での降雨^{6),9)}、収穫後の急速な乾燥調製条件¹¹⁾、等が発生を増加させることが従来から指摘されてきた。一方、米粒の膨縮特性と胴割れとの関係についてはまだ知見が十分整理されていないが、水浸処理を行った際の玄米の吸水速度や膨張速度と胴割れ発生との関連を示唆する研究結果が得られつつあり、吸水や膨張が早く進む米粒ほど胴割れが発生しやすい傾向が認められている。

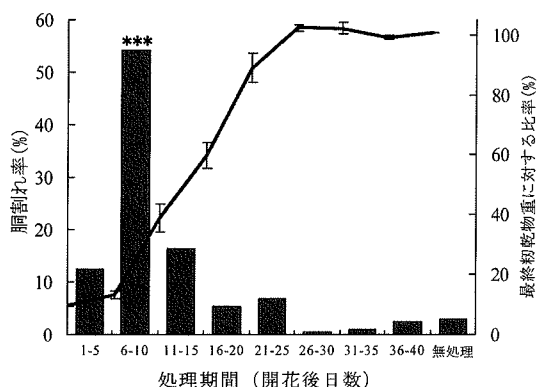
4. 胴割れの発生程度におよぼす登熟初期の気温の影響

胴割れ発生とイネの生育期間中の気象条件との関係を調べると、登熟初期の気象条件の関与を示唆する結果が近年得られてきている^{12),13)}。圃場試験における胴割れ発生の解析から、出穂後10日間という登熟初期の気温、特に日最高気温が高いほど胴割れが増える傾向にあることが分かった(表-1)¹³⁾。人工気象室を用いたポット試験による詳細な解析では、開花後6~10日の期間に高温処理を行うと胴割れが著しく増加すること(図-2)¹³⁾や、高夜温より高昼温の影響が大きいことが明らかになった。このような気温

表-1 登熟期間の気象条件と胴割れ率との相関係数¹³⁾

気象要素	出穂後日数				
	1~10	11~20	21~30	31~40	41~50 日
日平均気温	0.86	0.68	0.74	0.17	0.16
日最高気温	0.91	0.68	0.53	0.01	0.14
日最低気温	0.69	0.68	0.71	0.25	0.18
日照時間	0.86	0.42	-0.12	-0.14	-0.04
日降水量	-0.62	-0.36	0.14	0.39	0.23

東北農業研究センター・大仙研究拠点(秋田県大仙市)で1997~2003年にかけて行った計6回の圃場試験について、登熟各期間の気象値を積算し、胴割れ率との相関係数(r)を各品種ごとに求めた。数値は供試した全13品種の平均値で、太字は $r=0.8$ 以上、囲いは $r=0.9$ 以上を示す。



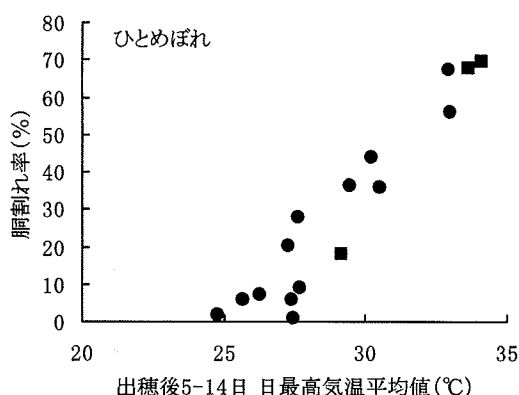
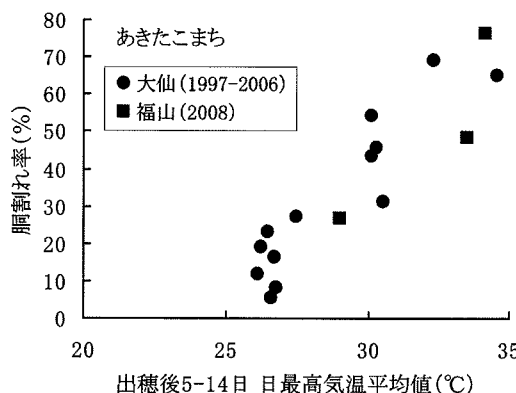
図－2 高温処理した水稻玄米の胴割れ率（棒線）と初乾物重の推移（折れ線）¹³⁾

品種：ひとめぼれ。横軸に示した期間にのみ高温処理（昼30／夜25℃）を行い、その他の期間は25／20℃とした。胴割れ率は軽微な割れを含む値。人工気象室を用いたポット試験。

に対する反応は、寒冷地と温暖地で比較しても大きな差は認められない(図－3)。2004、2005年に行った全国連絡試験(Ko-on-net連絡試験)においても、全国各地で生産されたコメの胴割れ発生程度に登熟初期の気温が関係している可能性が確認された¹⁴⁾。

以上の結果は、米粒発育の初期段階における

限られた時期の気温条件が、登熟が進んだ段階で生じる胴割れの発生程度に関与している可能性を強く示唆している。発生に強く影響する開花後6～10日頃の時期は、籾殻の中にある若い穎果の粒長方向への伸長がほぼ終わり、粒幅、粒厚方向への肥大が盛んとなって、粒重が急激な増加を開始する生育ステージに相当する。穎果の内部では胚乳部の細胞分裂が続いているのと同時に、粒の中心部分においてデンプン蓄積が開始している状態にあると推察される^{15)～19)}。このことから、登熟初期における高温条件はこの時期に形成される米粒内部の胚乳構造やデンプン蓄積特性などに影響をおよぼして、胴割れを生じやすい粒質にしていると考えられる。実際に、走査電子顕微鏡を用いて内部構造観察を行った研究では、登熟初期に高温に遭遇して胴割れを生じた米粒の中心部において胚乳内に蓄積したデンプン粒表面の皺やアミロプラスト表面の凹みなど、デンプン粒の収縮が高頻度で観察されることが明らかになった²⁰⁾。このようなデンプン蓄積特性の変化により米粒中心部の集



図－3 登熟初期の気温と胴割れ率の関係

東北農業研究センター（秋田県大仙市）と近畿中国四国農業研究センター（広島県福山市）で行った圃場試験。施肥条件は大仙：基肥のみNPK各5g/m²、福山：基肥NPK各3＋分げつ肥NPK各2g/m²。

積密度が低下し、成熟時に水分変化が生じた際の圧力ひずみへの耐性が低下している可能性が考えられる。胴割れ発生メカニズムの解明に向けた今後の研究進展が期待される。

5. 施肥条件と胴割れ

施肥条件が胴割れの発生程度におよぼす影響について、穂肥条件をかえて幼穂形成期以降の栄養条件が異なるように栽培した試験区を用いて調査したところ、登熟期の葉色値が低いほど胴割れが増加するという相関関係が認められた(図-4)²¹⁾。出穂期以降の葉色値と玄米タンパク含有率には密接な関係があることが知られている。そこで、上述したKo-on-net連絡試験で

玄米タンパクと胴割れとの関係を調べたところ、玄米タンパク含有率が低い米は、登熟初期の高温条件による胴割れ発生がより多くなる傾向にあることが認められた(図-5)¹⁴⁾。

これらの結果から、登熟期のイネの栄養状態も胴割れの多少に影響し、登熟期に栄養凋落を生じて葉色値が低下するような条件では発生が助長されることが明らかになった。近年における胴割れ発生の増加傾向の背景には、良食味を意識した窒素施用量の減少が関連している可能性が考えられる。しかし、施肥条件は稲体の多くの形質に作用するため、胴割れの発生にどのような道筋で関与しているのかまだ十分明らかにされていない。この関与メカニズムの解明

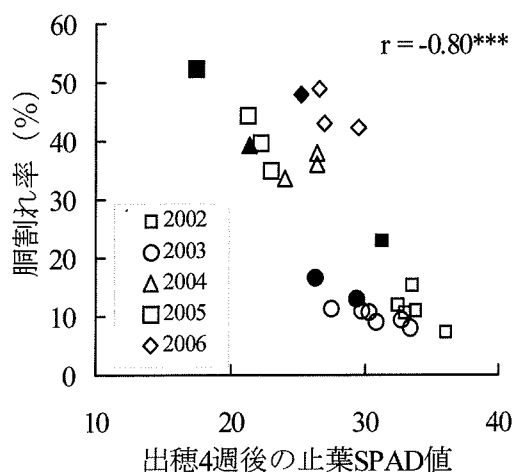


図-4 登熟期の止葉葉色値と胴割れ率との関係²¹⁾

品種：あきたこまち、東北農業研究センター・大仙研究拠点(秋田県大仙市)で2002～2006年にかけて異なる穂肥条件下で栽培した。黒塗りの凡例は各年次における穂肥無施用区を示す。***：0.1%水準で有意(n=26)。

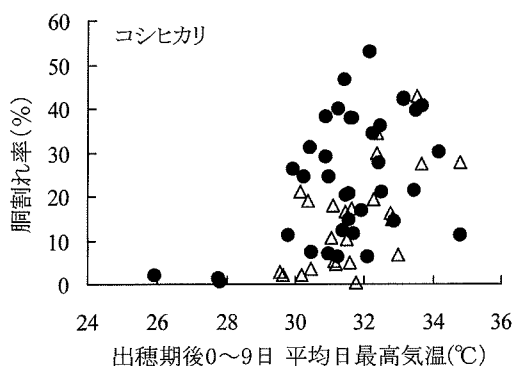


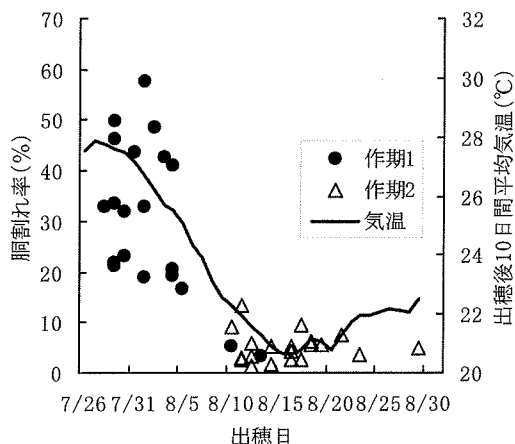
図-5 登熟初期の気温と胴割れ胴割れ率との関係におよぼす玄米タンパク含有率の影響¹⁴⁾

2004年度全国連絡試験(Ko-on-net)での結果、東北～九州の16府県から収集したサンプルのうち、コシヒカリを抽出して解析。黒塗りの凡例は玄米タンパク含有率6.5%未満(水分15%換算)のサンプルを示す。

とともに、良食味と胴割れ抑制を兼ね備えた肥培管理法の開発が今後喫緊の課題である。

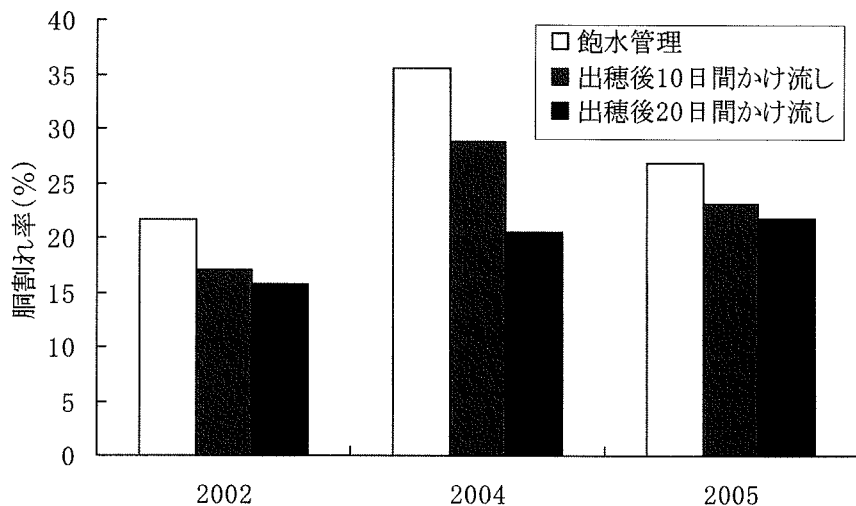
6. 発生軽減にむけた栽培対応技術

生産現場では圃場からの早期落水の回避や適期刈り取りの励行、乾燥時の適切な温度条件設



図－6 出穂期と登熟気温および胴割れ発生との関係²²⁾

東北農業研究センター・大仙研究拠点（秋田県大仙市）で2004年、19品種を2作期で栽培。作期1：5/13移植、作期2：6/3移植。



図－7 登熟初期の水管理条件が胴割れ発生程度におよぼす影響²³⁾

東北農業研究センター・大仙研究拠点（秋田県大仙市）で品種あきたこまちを栽培。飽水管理：地表面が湿潤で圃場の足跡に水がたまる状態に管理。

定など、登熟後期から収穫期以降の生産管理がこれまで発生軽減対策技術として重要視されてきた。しかし、上記のように、登熟初期における生育環境条件もコメの胴割れ発生に関係する可能性が強いことから、この時期に注目した栽培方法の改善による軽減化技術の構築が期待される。

移植時期の違いによる胴割れ発生程度の差を調査した試験では、出穂が遅く登熟初期の高温を回避できた作期で胴割れ発生が少なかった（図－6）²²⁾。また、登熟初期の用水かけ流しによる軽減効果を調べたところ、出穂後10日ないし20日間のかけ流しを行い、登熟初期における圃場内水温や地温を下げることで胴割れの発生が少なくなることが確認された（図－7）²³⁾。特に、出穂後10日間の圃場内地温との間に密接な関係がみられたことから、この時期の地温上昇を抑えることによる軽減効果が高いと考えられる。以上の結果から、登熟初期の気温が高温とならない作期の選択や圃場内地温の上昇を抑え

る水管理を行うことにより、胴割れの発生が軽減されることが明らかになった。水管理については、登熟後期の管理がこれまで注目されてきたが、登熟初期の管理法についてもその重要性が示唆される。

一方、胴割れ発生危険度の早期予測が可能となれば、事後対策の徹底に有効利用できる。これまでに、登熟期の気象条件と葉色を指標とした胴割れ発生予測法¹²⁾や、登熟途中の穂を用いた水浸処理による発生危険度の早期簡易評価の可能性²⁴⁾について検討が行われているほか、福井県では、登熟初期の気温や葉色、稲株の根量を判断基準とした「福井県産米胴割れ注意報発令要項」を策定し、現場への注意喚起と対策技術の徹底呼びかけに利用している。

早期予測等により多発生が懸念される場合には、従来から行われている登熟後期以降の発生軽減対策技術の実施が重要となる。早期落水の回避、刈り遅れの防止は、収穫時期の籾含水率の過度の低下を防ぐ上で重要である。また、圃場の有効土層深は登熟後期の籾含水率の低下速度と密接に関連しており、浅い場合には含水率の低下が早く、胴割れが生じやすい²⁵⁾。そのため、圃場作土深の確保と均一化が発生軽減化のために望まれる。収穫適期については、作付品種や栽培環境条件をもとに生産地ごとに判定基準が定められており、出穂後積算気温のほか、黄化籾割合、特定位置に着生した籾の黄化程度等での判断が行われている。しかし、生産現場への徹底が十分でない場合や、近年の登熟期の気象変動の増幅により適期判断が困難となる場合が生じている。そのため、種々の栽培条件下で適用可能な収穫適期予測・判定手法の確立が望まれる。さらに、収穫後の乾燥調整条件は胴割れ防止に極めて重要であり、水分乾減率やテン

パリング方法等の適切な条件設定が必要である。特に、高温登熟条件により刈り取り時期を早めて収穫物の籾含水率が高い条件となった場合は、高温乾燥を避け送風温度を低くするなどの注意を払う必要が想定される。

7. 品種間差

胴割れは遺伝形質であり、胴割れ易品種の後代は、親品種と同様に胴割れが生じやすい傾向にある²⁶⁾。特に、ア) 登熟が早い、イ) 粒厚が厚い、ウ) 粘りの弱い米粒デンプン特性、といった性質を持つ品種で胴割れ発生が多い、と報告されている³⁾。しかし、従来胴割れが比較的生じにくいとされてきた良食味品種「コシヒカリ」でも、近年の高温登熟条件下では発生が顕在化してきている状況にある^{12), 27), 28)}。先に述べたように、登熟初期の気温が胴割れ発生に強く関与するが、この時期の気温反応における品種間差の検討はまだ十分でない。高温登熟条件下での胴割れ耐性をさらに強化するために有用な遺伝資源の探索やその遺伝特性、品種間差の発生要因について、今後の研究進展が望まれる。

8. おわりに

以上、コメの胴割れに関する最近の研究状況を中心に取りまとめた。胴割れの抑制は高温登熟条件による品質低下の回避だけでなく、水稻生産に要するエネルギー消費量の約4割を占める乾燥・調製作業の将来的な効率化にむけても重要であると考えられている³⁾。今回紹介したように、胴割れ発生には多くの要因が関係しており、品種間差も存在する。したがって、個々の要因の具体的な関与メカニズム解明、高度な胴割れ耐性を持つ品種開発にむけた取り組みが今後の大きな研究課題である。一方、最近では個別

の生産地域における発生要因や対策法の検討事例が増えてきている。それぞれの地域特性に即した知見が積み重なることで、今後より効果的な対策手法が確立していくことを期待したい。

引用文献

- 1) 滝田正 2002. 東北農研報 100:41—48.
- 2) 川崎哲郎・河内博文・杉山英治 2001. 農業研究 36:25—32.
- 3) 八谷満 2008. 農業技術 63:532—539.
- 4) 全国食糧検査協会編 2002. 農産物検査ハンドブック／米穀編. 日本農民新聞社, 東京. 1—361.
- 5) 近藤萬太郎・岡村保 1932. 農学研究 19:128—142.
- 6) 長戸一雄・江幡守衛・石川雅士 1964. 日作紀 33:82—89.
- 7) 佐藤正夫 1964. 農業及び園芸 39:1421—1422.
- 8) 中村公則・原城隆 1966. 東北農試研究速報 6:47—52.
- 9) 石倉教光・升尾洋一郎 1967. 農業技術 22: 281—283.
- 10) 高松美智則・香村敏郎・釈一郎・谷口学・伊藤和久 1983. 愛知農総試研報 15:35—46.
- 11) 伴敏三 1971. 農業機械化研報 8:1—80.
- 12) 高橋渉・尾島輝佳・野村幹雄・鍋島学 2002. 北陸作物学会報 37:48—51.
- 13) 長田健二・滝田正・吉永悟志・寺島一男・福田あかり 2004. 日作紀 73(3):336—342.
- 14) 長田健二 他 18 名 2006. 日作紀 75(別 2): 16—17.
- 15) 長戸一雄・小林喜男 1959. 日作紀 27:204—206.
- 16) 星川清親 1967a. 日作紀 36:151—161.
- 17) 星川清親 1967b. 日作紀 36:203—209.
- 18) 星川清親 1968a. 日作紀 37:97—106.
- 19) 星川清親 1968b. 日作紀 37:207—216.
- 20) 山田恵子・岩澤紀生・松田智明・長田健二・新田洋司 2007. 日作関東支報 22:72—73.
- 21) 長田健二・吉永悟志・福田あかり・白土宏之 2007. 平成 18 年度東北農業研究成果情報.
- 22) 長田健二 2006. 農業および園芸 81(7):797—801.
- 23) 長田健二・小谷俊之・吉永悟志・福田あかり 2005. 日作東北支報 48:33—35.
- 24) 長田健二・吉永悟志・福田あかり 2004. 日作紀 73(別 1):106—107.
- 25) 鍋島弘明・高橋渉・野村幹雄 2001. 北陸農業研究成果情報 17:17—18.
- 26) 滝田正 1992. 育雑 42:397—402.
- 27) 有坂通展 2002. 北陸作物学会報 37:52—53.
- 28) 中村啓二・橋本良一・永昌秀樹 2003. 北陸作物学会報 38:18—20.