

水稻の高温障害とその助長要因 —北陸地域での現状と対策技術—

中央農業総合研究センター北陸研究センター
北陸大規模水田作研究チーム 松村 修

北陸地域は日本有数の良質米生産地帯であるが、ここ数十年、白未熟粒や胴割粒等の被害粒が多発し、検査成績が低下する事態がたびたび生じている。農業生産に占める水稻作部門の比重が高い地域だけに、販売価格に直接響く米品質の低下は、稲作経営だけでなく地域農業全体にも大きな影響を与えており、農業関係者にとって非常に頭が痛い問題である。とくに深刻なのは、以前から指摘されていた早生品種だけでなく、主力中生品種のコシヒカリでも被害が多発していることである。

コシヒカリは、九州から東北南部まで広く作付けされている事実が示すように、栽培条件による品質変動が比較的少ない品種であり、北陸地域でもかつては高い1等米比率を保っていた。新潟県で交配され、福井県で品種となり、再び新潟で奨励品種として普及したという紆余曲折の歴史を持つコシヒカリは、北陸の地が生み育てた、名実ともに米どころ北陸の看板を背負う品種である。

そのコシヒカリで、平成10年頃から外観品質の低下が頻繁に生じるようになった。幸い、関係者の努力により対策技術の開発と普及がある程度進み、ここ数年、事態は沈静化の方向に向かいつつある。しかし、かつての高い1等米比率を取り戻すには至っておらず、依然として品質改善の課題は大きい。表-1にコシヒカリ1等

米比率の都府県別ランキング（検査数量1万トン以上）の推移を示したが、残念ながら上位5、6位くらいまでの先頭集団は長野県や南東北、関東の各県によって占められ、コシヒカリのふるさとであるはずの北陸各県は2番手グループに甘んじ、東海や西日本の県に肩を並べられている状況である。コシヒカリを中心とする北陸産米の品質改善はその重要性を増している。本稿では、まず被害粒発生の生理的要因と気象条件との関係を整理し、その上で高温登熟被害の発生助長要因、とくに土壌管理要因について考

表-1 コシヒカリ1等米比率上位15位までの都府県ランキング※

平16	平17	平18	平19	平20
長野(97)	長野(97)	山形(98)	山形(97)	長野(98)
栃木(92)	山形(94)	長野(97)	長野(97)	山形(96)
千葉(91)	栃木(94)	福島(95)	福島(94)	福島(95)
福島(90)	千葉(89)	栃木(95)	栃木(92)	栃木(93)
茨城(86)	茨城(90)	茨城(91)	千葉(92)	千葉(92)
山形(85)	福島(87)	千葉(90)	茨城(91)	茨城(89)
兵庫(79)	兵庫(83)	福井(81)	富山(90)	新潟(87)
石川(78)	新潟(82)	富山(80)	福井(89)	富山(87)
富山(73)	富山(82)	石川(80)	石川(85)	福井(87)
岐阜(73)	広島(82)	静岡(76)	兵庫(84)	埼玉(85)
福井(72)	石川(81)	兵庫(75)	広島(84)	愛知(84)
鹿児島(70)	熊本(80)	新潟(73)	新潟(83)	石川(82)
静岡(65)	福井(74)	岐阜(70)	熊本(79)	兵庫(80)
宮崎(65)	静岡(72)	広島(70)	静岡(78)	広島(78)
滋賀(64)	岐阜(71)	熊本(66)	京都(75)	静岡(75)
(新潟49)				

※検査数量1万トン以上の都府県のみ対象とした。かつこ内は1等米比率(%)

察を行う。また、北陸地域で実施されている対策技術について紹介する。

1. 被害粒発生と気象条件

白未熟粒や胴割粒等の被害粒発生の生理的要因として、①光合成同化産物の不足や籾数過剰による胚乳の充実不足、②同化産物の胚乳への転流・蓄積障害、③胚乳細胞の発達異常、が考えられる。①は、胚乳に蓄積されるべきデンプンの生成量と籾数の関係において、胚乳の充実不足という観点から被害粒発生をとらえるものである。②は、登熟期における同化デンプンの胚乳への転流・蓄積過程において、糖輸送やデンプン代謝系に生じるトラブルが被害粒発生をまねくとする。③は、胴割粒発生についてであるが、胚乳細胞の発達形成過程で組織異常が生じ、それが胴割粒の原因となるとする。そして、高温や低温、日射不足等の気象条件が、これら生理的要因が働くきっかけになると考えられる。つまり、気象条件は被害粒発生にかかわる諸要因の中で、「引き金要因」としてとらえられるの

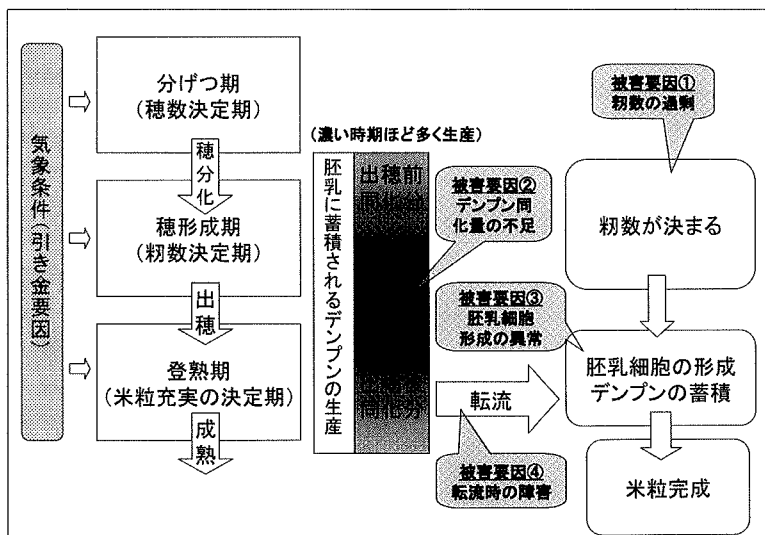
ではないだろうか。

以上の考え方を整理したのが図－1である。詳しく見ると、まず籾数が過剰に形成されてしまった場合、同化デンプンの生産量にもよるが粒の充実不足を生じやすくなる（被害要因①）。この場合、原因発生は茎数が左右される分けつ期までさかのぼることになるが、気象条件との関係では田植期から分けつ期間中の高温による茎数過剰が指摘でき、そうした傾向に常にさらされている温暖地での発生が多い。

次に、同化デンプン生産量の不足は粒の充実不足をもたらす（被害要因②）が、原因発生は出穂前と後の光合成活動の活発さに求められ、もちろん籾数（被害要因①）とも関係が深い。気象条件としては梅雨期から8月にかけての長雨や低温、日射量不足が大きい。

胚乳細胞形成の異常は登熟初期の高温によりもたらされることが明らかにされており、こうしてできた米粒は胴割を生じやすくなる¹⁾（被害要因③）。

転流過程での障害（被害要因④）は、登熟各期



図－1 イネの成長と被害粒発生の諸要因

の高温・低温・日照不足がその時々において作用することで各種の白未熟粒を発生させると考えられる。デンプンの胚乳への蓄積順序は、中心部からはじまり周辺部に進行し、背部と腹部、基部の違いでは腹部、背部、基部の順に早く終わるとされている。心白・腹白・背白・基白など部位別の乳白粒は、こうしたデンプン蓄積の順序と不良気象遭遇時期との関係が反映しているものと考えられ、いずれも胚乳内部のデンプン粒やデンプン粒が収納されるアミロプラストという細胞内器官の発達が不十分となるため、それらの間に空隙が生じ、そのため光が乱反射するので米粒が白濁して見えるとされる。登熟期の高温の影響については、田代ら²⁾による詳細な時期別高温処理実験に代表される解析的研究がすでにあり、近年はこの考え方を基にして圃場や生産現場での高温登熟被害を解析する研究が広く進められた。また、転流阻害の生理的メカニズムを、糖・デンプン代謝の面から解明する研究も多く、多くの成果が得られつつある。山川ら³⁾は、高温登熟時の胚乳細胞において、デンプン合成系酵素の活性が低下し、逆に α -アミラーゼなどデンプン分解系酵素の高まることを明らかにするなど、高温による転流阻害の背景が酵素レベルで説明できることを示した。高温等の気象条件と被害粒発生との関係について、今後、イネの生育時期別にその時々、生理的要因との関係がさらに解析され、その中から、やがて発生メカニズムの全体像が解明されるだろう。

引き金要因となる気象条件の中でも、近年最も注目されているのが登熟期を中心とする高温条件である。北陸地域においてもやはり、高温の影響は大きい。図-2に北陸各県の1等米比率と、幼穂形成期から収穫期に相当する夏季7～9月の県庁所在地平均気温の関係を示した。

これを見ると、平均気温25℃付近を境として、年次変動があるものの、これより高温の年次では1等米比率が明らかに低下する傾向が認められる。また、北陸北部（新潟県・富山県）と南部（石川県・福井県）を比較すると、気温が高い南部においてより低下の頻度が高いように見受けられる。個々の発生状況を振り返っても、登熟期に異常高温となった年次や地域において被害発生が多く、やはり高温の影響が大きいことを示唆している。

2. 被害感受性と助長要因

一方で、過去、同じような高温に遭遇しながらもさほど品質が低下しなかった年もある。図-2の高温域における1等米比率の分布をみても、1等米比率90%に近いものから70%以下まで、そのばらつきは大きい。また、比較的気象条件が似ている地域間でも発生の様相が大きく異なる場合がある。

2006年夏、新潟県では出穂後に猛暑が続き、典型的な高温登熟障害が県内各地で生じたが、その程度には明らかに地域間での差が認められ

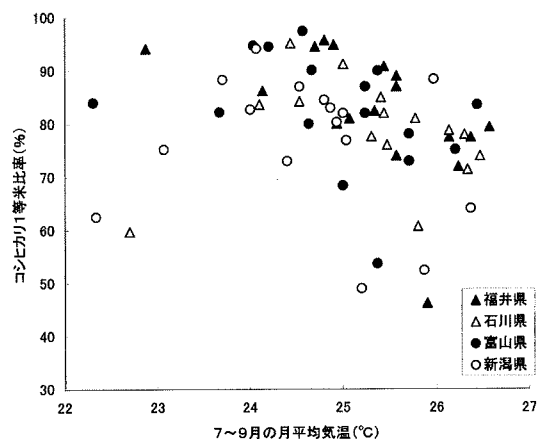


図-2 北陸各県産コシヒカリの1等米比率と夏季気温との関係

1993～2008年、気象データは各県庁所在地気象台の観測値

た。表－2は、被害の大きかった西蒲原平野の中で、水田の多くが平坦地に存在する市町村（合併前旧地域区分）の1等米比率を比較したものである。これらの市町村は合併後区分では隣接しており、もちろん作付品種の構成に大きな違いはない。アメダスデータから推測される高温条件も大差はなかった。しかしながら、1等米比率は80～90%に及ぶ地域から20%台の地域まで、大きな格差がみられた。数値を見る限り、西蒲原平野北部（旧新潟市から亀田・横越まで）で数値が高いようにも見えるが、旧燕市と隣接する吉田との差のように、ごく狭い隣同士の地区間でも明瞭な格差が存在した。この年次では、品質の生産者間格差も大きかった。

以上のような、気象条件の違いが比較的小さい中で高温登熟被害の地域間格差や農家間格差の存在は、発生要因を単純に気象要因だけで説明できないことを示す。そして、おそらくはイネ側に、生産方法の違いやより細かな圃場環境等で決まる「被害を受けやすい／受けにくいイネの体質」（被害感受性）が存在し、引き金要因としての気象要因が働くにしても、イネ側の生理的要因への影響程度が大きく違ってくるのであろう。イネの被害感受性は被害粒発生の作物的要因として位置付けられ、これには栽培方法や土壌条件が大きく関与することは言うまでもない。さらに視野を広げると、イネ個体としての被害感受性だけでなく、アグロノミー的視点からは営農的要因に左右される「稲作としての被害感受性」も存在するだろう。これらイネと稲作の感受性にかかわる要因は、被害粒発生の「助長要因」と位置付けることができる。

ここまでの考え方を、高温障害をはじめとする気象被害粒発生要因の相互関係として図－3に示した。助長要因としての作物的要因は、過

表－2 新潟県西蒲原平野における1等米比率の地域格差(2006)

市町村区分	旧区分	1等米比率 %
新潟市	旧新潟市	80～90
	豊栄・水原	85～90
	亀田・横越	85～90
	白根	50～75
	黒埼	49
	味方	40
	潟東	55
	中之口	41
	月潟	24
	西川	86
	巻	64
	岩室	62
弥彦村		76
燕市	旧燕市	26
	吉田	63
	分水	51

剰生育による籾数過多、肥料や地力不足からくる特に生育後半の窒素栄養不足と稲体の早い老化、水管理失敗等による根の機能低下などがあげられ、いずれも水稻が障害を受けやすい体質に育ってしまう結果となる。また、営農的要因としてはブランド品種への作付集中による管理不充分や不適地での作付拡大、大区画造成後の地力不均一化、浅耕化による作土層の減少、農業用水の富栄養化、農業地帯におけるヒートアイランドの影響などを指摘できるが⁴⁾、これらもまた稲作自体を障害を受けやすい体質下に置くこととなるのである。こうして育てられた稲に様々な不良気象が襲いかかったとき、障害はより重く、深刻に発生するのではないだろうか。そして地域や農家間格差のかなり部分を、これら助長要因の違いにより説明できるのではないだろうか。

3. 助長要因としての土壌管理要因

根の機能や稲体の栄養条件に関係する土壌管

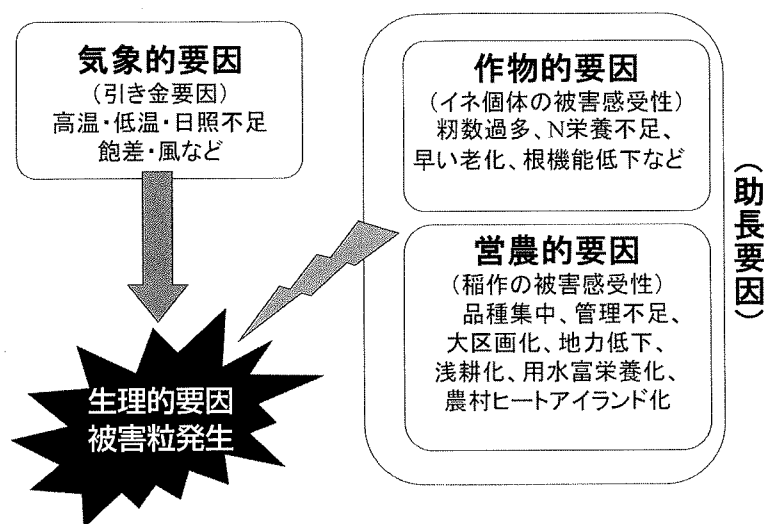


図-3 被害粒発生要因の相互関係

理的要因は、助長要因の中でも極めて重要であると思われる。深耕や有機物・土壌改良材の施用、溝切り・中干し等の土壌・水管理が相当する。以下に筆者ら実施した研究を紹介したい⁵⁾。

表-3は、新潟県内の高品質米生産者に対し、その栽培管理内容についてアンケートを行った結果である。対象とした生産者は、年次によらず比較的高い1等米比率を保つ方々であり、その栽培管理方法を聞き取りすることで、高品質確保のためのキーポイントを得ることができないかと考えたのである。調査結果から浮かび上

がってきたこととして、これらの高品質米生産者の管理の特徴は、①土壌改良材・堆厩肥の施用率や稲わらすき込み実施率が高く、深耕を意識的に行うなど土壌管理を積極的に行っている、②栽植株密度は県平均より低めで疎植傾向にある、③溝切り・中干しなどの基本水管理技術を完全実施している、等にあることが示された。窒素施肥量は県平均よりやや少ないが、これは堆厩肥を投入した場合に基肥量を減らしているためであった。しかし、堆厩肥の投入率から考えると圃場への外部からの人為的窒素源供給はむ

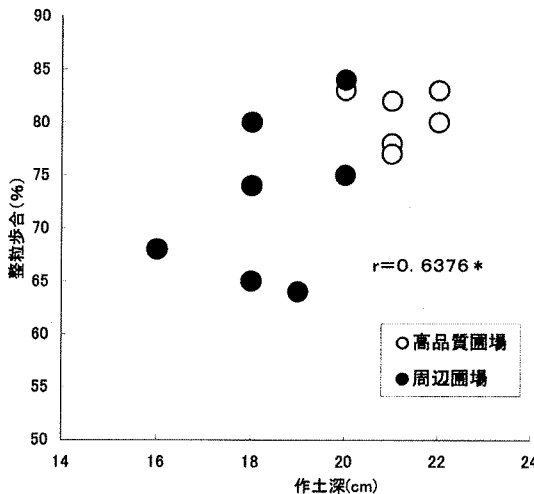
表-3 高品質米生産者の栽培・土壌管理と県平均比較

	窒素施肥量 (kg/10a)	土壌改良材施用率 (%)	堆厩肥施用率 (%)	わらすき込み実施率 ¹⁾ (%)	深耕の実施率 ²⁾ (%)	栽植密度 (株/㎡)	溝切り・中干しの実施率 (%)
調査生産者	4.7	65	48	100	78	16.9	100
新潟県平均 ³⁾	5.1	36	5	94	—	17.7	溝切り70 中干し89

1) わらを堆肥化して投入している場合は実施とした。

2) 「意識的に深耕に努めている」と回答した率。

3) 新潟県農林水産部「平成16年度稲作概況と課題」2005年3月による。ただし栽植密度のみ農水省「平成16年度作物統計」による。



図－4 圃場作土深と整粒歩合（コシヒカリ）

注）作土深は貫入抵抗計の抵抗値が急変するまでの深さ

しろ多めではないかと推察される。

回答の中でも注目されたのは深耕に対する意識の高さであった。深耕は根系域の容積を確保するための重要な手だてであり、根の機能維持を通じて高品質確保に貢献するものと考えられるが、回答者の多くが意識的に深耕につとめていた。しかし、実際の深耕の程度や作土深はこの調査からうかがい知ることはできなかった。品質に及ぼす深耕や作土深の影響を知るには、試験圃場を用いた実験でも可能であろうが、その場合、いきなり試験圃場を深く耕起して試験してもほとんど意味がない。現場レベルでの「深耕の効果」は、長期間の耕起継続と有機物施用などが一体となって行われた結果、作土の履歴として培われたものであるからだ。したがって、この効果を証明するには、何かほかの手法を用いる必要がある。そこで我々は、大規模農家が自作地には手厚い土壌管理を行うが借地にはあまり行わないことに着目し、アンケート回答者の中から、自作地とそれに近接・隣接する借地圃場を持ち、自作地は深耕するが借地にはしない生産者を選び出し、圃場毎に作土深と玄米整

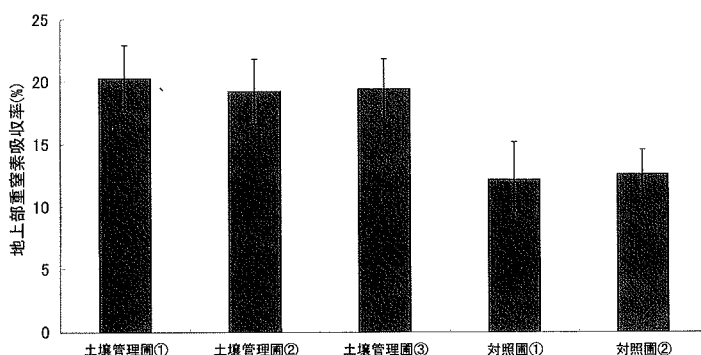
粒歩合との関係を調査した（図－4）。品種はいずれもコシヒカリで、肥培管理方法はもちろん同じであったが、傾向として作土深が深いほど整粒歩合が高いことが認められた。このことから、深耕によって培われた作土深の深さは、おそらくは根の機能向上などを通じて品質に大きな影響を及ぼすものと推察された。

では、実際に作土深や有機物施用等による土壌管理により根の機能は高く維持されるのだろうか。これを明らかにするため、先程の調査と同じように、同一耕作者が作付し、品種と肥培管理法が同じで土壌管理法のみ異なる水田で、登熟期の水稻根活性を重窒素を用いたトレーサー実験で調べてみた。まず、表－4に調査圃場の概要と玄米整粒歩合を示したが、ここでもやはり作土深が深い場合に整粒歩合が高いことが認められた。図－5は圃場ごとの水稻の重窒素吸収率であり、この数値が大きいほど根の活性が高いと判断されるが、土壌管理を実施している圃場の方が明らかに重窒素吸収率が大きく、より根の活性が高いと判断された。以上の結果から、米品質確保のためには、深耕や有機物施用等の土壌管理の実施とそれによる根の機能の維持が有効であると判断された。表-4と図-5の試験は、ひとめぼれ等の早生品種に高温登熟被害が生じた時に実施したものであり、土壌管理

表－4 栽培管理方法と玄米整粒歩合

圃場名	栽培・管理方法の特徴	整粒歩合 (%)	作土深 cm
土壌管理圃①	稲わら連用、毎年深耕、自作地	83	21
土壌管理圃②	"	81	20
土壌管理圃③	"	78	21
対照圃①	上記近接圃場、耕作者同じ、借地、稲わら連年撤出	70	16
対照圃②	"	68	17

品種：ひとめぼれ



図－5 土壌管理が異なる水稻の重窒素吸収率の違い
出穂後14日目に重窒素施用、48時間後の吸収率
品種：ひとめぼれ

の違いが高温に対する稲の被害感受性に影響を与えていると推察される。

助長要因は、土壌管理要因のように生産現場で改善可能なものも比較的多いので、今後さらなる研究の進展が望まれる。

4. 北陸での高温障害技術対策

(1) 移植時期の遅延

新潟県は平成14年から、富山県は平成15年から出穂を遅らせて猛暑を回避するための移植時期遅延を実施している。北陸南部の福井県と石川県は、平均気温が北部2県よりもかなり高いので、出穂時期を多少遅らせても気温の低下効果は小さい。このため両県では、4月下旬など極端に早い田植えの回避や、移植よりも出穂が相当遅くなる直播栽培を奨励している。これらの取り組みにより、以前は連休中であつた田植え最盛期が、最近では5月中旬にシフトしてきている（図－6）。

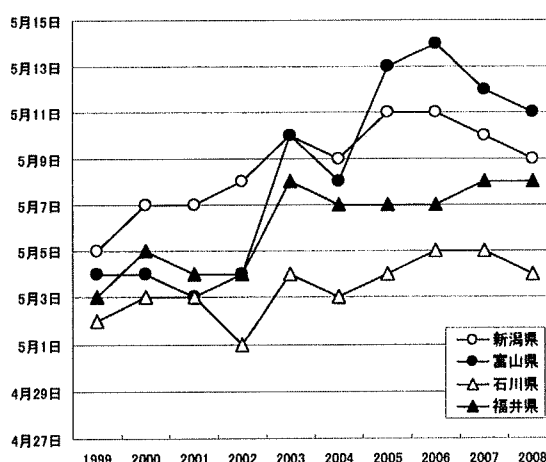
(2) 適正初数への制御・誘導

初数過剰を回避するため、目標顕花数や穂数を決め、コシヒカリでは概ね28000～28500粒/㎡、穂数で350～400本/㎡としている。茎数

過多と予測された場合、溝切り・中干しの徹底実施を呼びかけている。春先からの気温・地温と土壤の乾燥状態から分げつ初中期の土壤窒素無機化量が多いと判断された場合、より早期から警戒を呼びかける。また、穂相を改善するため苗箱播種量や1株植付苗本数の適正化を指導している。

(3) 疎植栽培

高温が顕著な福井・石川県では、過剰生育の防止や生育後期の窒素栄養の維持のため18株/



図－6 北陸各県における田植最盛期の推移

m²程度の疎植栽培を奨励している。富山県でも移植遅延を導入できない場合に適用している。低温年に平坦地で茎数不足になる地帯がある新潟県では適用地域を選ぶ必要がある。側条施肥普及率の高い福井県では、側条施肥での根系の表層部への集中傾向が品質低下の一因であることを明らかにしているが、その場合、とくに疎植の効果が高いとしている。なお、極端な疎植は1穂中の強勢穎花－弱勢穎花バランスを崩し穎花登熟の均一性が損なわれるため、逆に玄米品質にとっては不利となると考えられる。

(4) 施肥改善

基肥一発型施肥体系の普及した地域では、「基肥一発は省力的であるが、気象条件に応じた生育途中で手出しが出来ない」ことに不満を持つ生産者も多い。これに対し県等では異常高温の場合には手直し施肥も行えることを指導している。生育後半の窒素栄養凋落が懸念される場合、穂肥の時期と量を通常と変える試みも実施されている。北陸のコシヒカリでは穂肥を2回（新潟県では出穂前18～15日と同10日）に分けて施用するケースが多いが、2回目の施肥時期を遅らせるかまたは量の比率を増やすなどしている。

(5) 早期落水の防止

各県とも、根の活力維持のため出穂後20日間は土壌の湿潤状態を保つ、収穫1週間前まで通水する、など早期落水の回避を呼びかけている。

(6) 地力向上と作土層確保による根系生育促進
各県とも地力対策と深耕を奨励している。登熟期間中を含めた地力窒素の有効利用のためには、土壌有機物の量を増やし地力を向上させる必要がある。地力窒素の向上、とくに作土上層と下層でのバランスや作土深確保が品質にも大きく影響するだろう。ただし未解明な部分も多く、さらに詳細な検討が必要である。なお、上記対策の(3)～(6)はいかにして登熟期の稲体窒素栄養を維持し活力を保たせるかの点で共通している。相互に連動・連携して行うべき対策である。

(7) 高温登熟性の高い品種導入

新潟県育成の「こしいぶき」、富山県育成の「てんたかく」は高温条件下でも白未熟粒発生が少ないことを目標に育成された品種であり、普及拡大を進めている。

参考文献

- 1)長田健二(2007)高温障害に強いイネ. 養賢堂. 74-77.
- 2)Tashiro T. et.al.(1991) Aust.J.Agric.Res.42: 485-496.
- 3)Yamakawa H. et al. (2007) Plant Physiol. 144: 258-277.
- 4)松村修(2007)高温障害に強いイネ. 養賢堂. 1-10.
- 5)松村修, 他(2006)日作紀 75 (別 2):54-55.