

水稻に及ぼす温暖化の影響と対策技術 ～西日本を中心とした実態・要因・対策～

(独)農業・食品産業技術総合研究機構

九州沖縄農業研究センター 暖地温暖化研究チーム 森田 敏

1. はじめに

気象変動に関する政府間パネル (IPCC) の第4次報告 (IPCC 2007) では、地球規模で温暖化が進行していることを明言し、その影響が動植物や人間生活にすでに及んでいることを指摘した。我が国の水稻生産に関しては、近年、西日本で頻発している高温登熟障害が温暖化の影響であることが懸念される。温暖化の進行で、高温の程度や頻度は今後高まることが予想されるため、高温登熟障害の軽減に向けた技術を開発することはまさに喫緊の課題である。

本稿では近年の九州産米における作柄・品質低下の実態と要因を整理し、温暖化との関連性について考察するとともに、高温登熟障害を克服する技術開発の現状を紹介する。

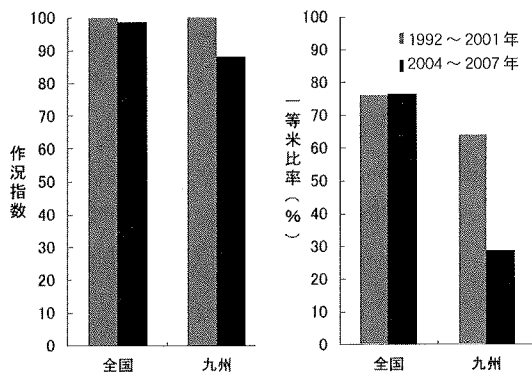


図-1 全国と九州の作況指数と一等米比率
農林水産省資料より作成

2. 九州産水稻の収量・品質低下の実態と要因からみた温暖化の影響

近年の水稻の収量と品質を全国と九州で比較すると、平成16年(2004年)から平成19年(2007年)の4年間の平均では、全国平均が作況指数99、一等米比率76%と平年並みを維持したのに対して、九州では作況指数88、一等米比率30%前後と低迷した(図-1)。このような作柄・品質低下は特に北部九州のヒノヒカリを中心とした普通期栽培(6月植え)で顕著であった。九州産水稻の主な落等理由は、米が白く濁る「白未熟粒」と、粒張りが低下する「充実不足」の発生であった(図-2)。

水稻の収量は、全粳数、すなわち米を入れる

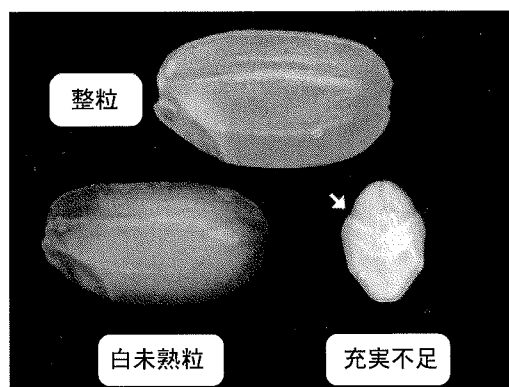


図-2 玄米の外観品質

整粒(上)は透明で高品質。白未熟粒(下左)は玄米の全体または一部が白濁している。充実不足(下右)は玄米が扁平で溝(矢印)が深い。下2つの症状は登熟期の高温が発生が助長される。

表－1 近年の九州産水稻は登熟不良によって減収・品質低下している

年次	精玄米収量		全籾数		千籾収量		一等米比率	
	(g/m ²)	平年比 (%)	(百粒/ m ²)	平年比 (%)	(g)	平年比 (%)	(%)	平年差
平年(96-02年)*	522	100	293	100	17.8	100	64.0	0
03-07年平均	473	91	290	99	16.3	91	20.9	-43
2003年	495	95	288	98	17.2	97	40.0	-24
2004年	451	86	296	101	15.2	85	13.0	-51
2005年	499	96	301	103	16.6	93	19.0	-45
2006年	425	81	276	94	15.4	86	6.0	-58
2007年	495	95	290	99	17.1	96	26.6	-37

1996～2007年の12年間の福岡県作況標本調査データ（九州農政局調べ）で解析。

*：平年値は1999年を除いて算出。

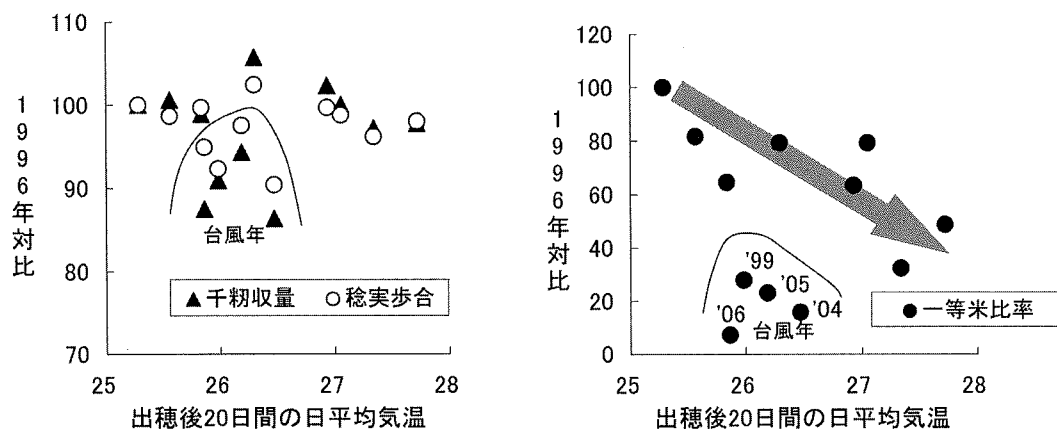
容器にあたる籾の数と、登熟の良否、すなわち籾にどれだけ米を詰めることができるかという二つの段階から成り立っている。この視点から近年の減収理由を解析すると、近年の籾数は平年とほぼ同じで、登熟の良否を示す千籾収量が低下していた（表－1）。したがって、近年の北部九州の減収は登熟不良型であると判断された。登熟不良になると多くの場合に玄米品質も低下するが、実際、ここ数年の一等米比率の平均値は平年より40ポイント以上低下しており、この解析結果に符合した。

このような最近の九州における水稻の作柄・品質低下の理由を知るために、福岡県の約260地点の作況標本調査データ（九州農政局調べ）と気象条件との関係を分析した。

その結果、出穂後20日間の日照時間が多くなると、精玄米収量、千籾収量、粗玄米粒数歩合（受精歩合とほぼ同義）、一等米比率のいずれも増加したことがわかった。出穂後20日間は登熟の良否を決める大事な時期で、この時期の日照が不足して光合成が抑制されたことが登熟

不良に結びついたとみられた。また、この時期の湿度が高くなると収量、登熟、一等米比率が低下しており、高湿度条件による病害および虫害の多発（あるいは高湿度そのもの）により受精障害や品質低下が発生した可能性もある。さらに、出穂直前から出穂後1週間の風速が大きいと粗玄米粒数歩合が低くなる傾向にあった。この5年間は水稻の登熟期間に九州を通過した台風の数が多く（2004年3個、2005年1個、2006年2個）、その規模も大きかった。台風は単に風を強くするだけではなく、日照時間を少なくし、湿度を高くするため、この5年間の九州の作柄・品質低下に台風がもたらした影響は甚大であったと考えられる。

高温の影響に関しては、図－3に示したように、台風年を除くと高温になるほど一等米比率が明確に低下し、収量に直結する千籾収量や粗玄米粒数歩合もやや低下する傾向にあった。これまでの多数の研究でも、登熟適温は日平均気温で22～23℃付近にあり、26℃程度を境に白未熟粒が急激に増加し、千粒重も低下すること



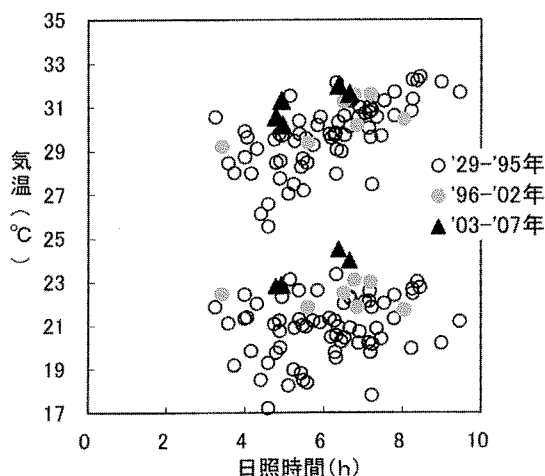
図－3 出穂後20日間の日平均気温と登熟関連形質との関係

1996～2007年の福岡県作況標本調査データ（九州農政局調べ）と九州沖縄農研筑後拠点気象データから解析

が知られており、近年の高温化が水稻生産に影響を及ぼし始めていることが示唆された。

なお、図－4を見ると、この5年間が高温のわりに日照が少なかったことがわかる。言い方を変え、日照が少なくても気温が高くなっているということで、これは、まさに地球温暖

化の影響とみることができよう。高温に日照不足が重なると登熟不良が甚大化することは古くから知られており、近年の九州産米の作柄・品質低下には高温と日照不足が重なったことが大きく影響したと考えられた。今後、温暖化に伴って、気温の上昇だけでなく日照も減少するという予測もあり（林 2003）、高温のみならず日照不足にも対応した研究・技術開発が重要である。また、図－4からも読みとれるように温暖化の進行に伴って昼温より夜温の上昇が著しくなること、特に高夜温が玄米の成長を阻害することが明らかになっており、今後この点にも注目した対応が必要である。



図－4 出穂後20日間の日照時間と日最高・最低気温との関係（九州沖縄農研（福岡県筑後市））

出穂期は1975～2007年では福岡県作況標本調査の出穂最盛期（8/21～9/4）とし、1929～1974年は8/25として算出した。

3. 九州産水稻の収量構成要素の推移に注目した登熟不良の要因解析

水稻の収量・品質は、気象条件以外に栽培条件の影響も大きく受けることは言うまでもない。そこで、以下では、近年の九州における登熟不良に関わっている栽培条件について検討を試みた。

用いたデータは、農林水産省統計部の1979

年から2007年の地域別の収量、全籾数、千籾収量、一等米比率の推移(図-5～図-8)であり、ここでは、関東・東海以南の地域についてのみ示した(栃木・茨城は東北と、千葉・山梨・長野は北陸と、それぞれ収量と一等米比率の水準や推移が類似していたので関東・東海か

ら除外した)。

図-5を見てわかるように、九州の収量は関東・東海以南の中では1998年頃までは比較的高い水準にあったが、その後低迷し、2004年から2007年は全国最低の水準であった。経年変化をみると、関東・東海、近畿、中国、四国

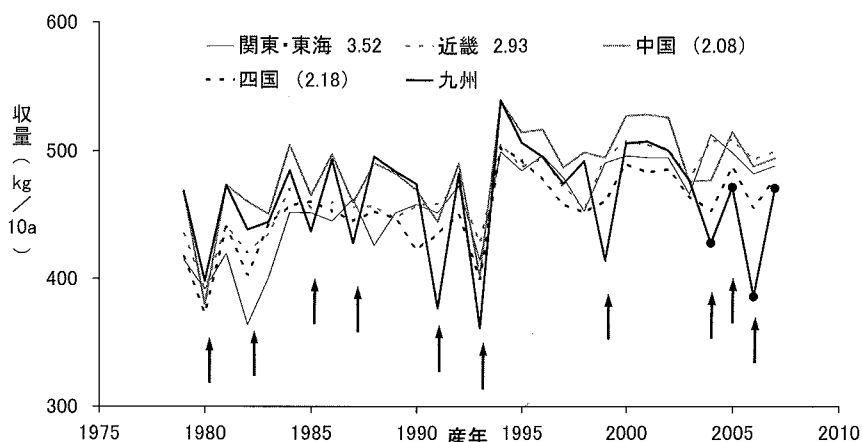


図-5 関東・東海以南の水稻収量の推移

矢印は九州で登熟期に台風の影響を受けた年。凡例の数字は回帰直線の傾き(°/年)を示す。() がない場合は5%水準で九州の傾きと有意差があることを、() がある場合は有意差がないことを示す。数字がない場合は帰帰が有意ではない。

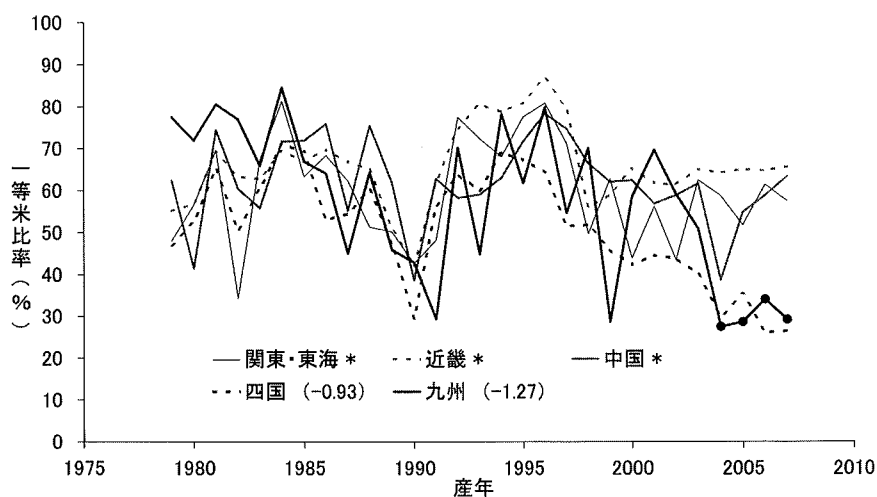
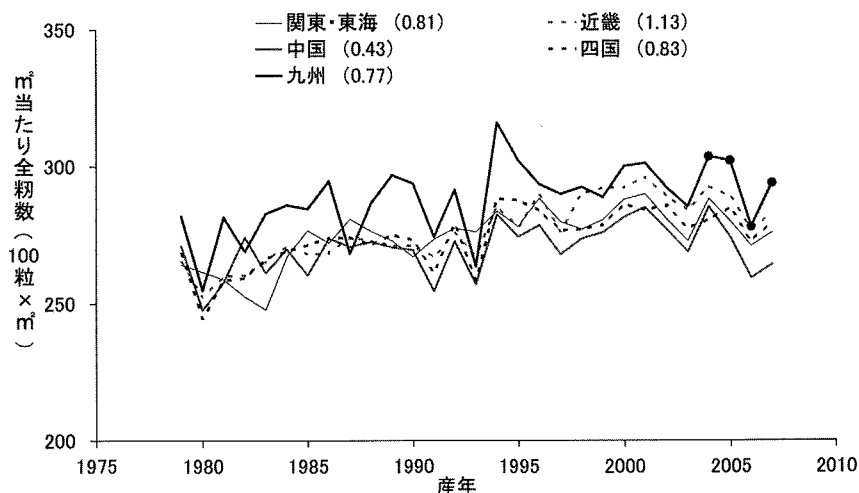


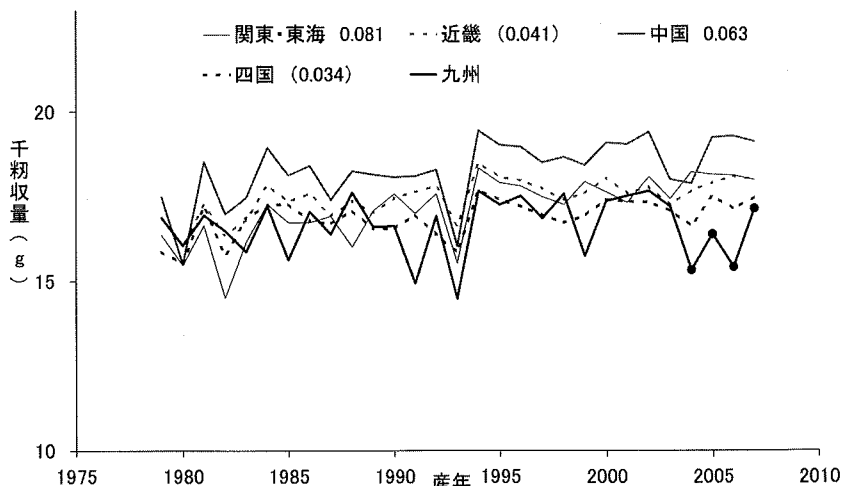
図-6 関東・東海以南の一等米比率の推移

凡例の数字等は図-5を参照。*は相関が有意でないが九州の傾きとは有意差がある場合を示す。



図－7 関東・東海以南のm²当たり全粒数の推移

凡例の数字等は図－5を参照。



図－8 関東・東海以南の千粒収量の推移

凡例の数字等は図－5を参照。

では、2kg/10a/年（年間0.5%弱）を超えるペースで収量が増加したが、九州ではほぼ横ばいであった。

次に、九州の一等米比率は、1980年代前半には80%前後と全国でもトップレベルにあったが、その後は近畿、中国よりも低い水準で推移し、2007年までの4年間は連続して30%程度と低迷している（図－6）。

収量構成要素について全粒数と千粒収量に分

けて検討すると、全粒数については、図－7に示したように九州では関東・東海以南の中では一貫して高い水準にあり、かつ増加傾向にあった。関東・東海以南の九州以外の地域では、粒数レベルは九州より低いものの、九州とほぼ同様の経年推移を示した。一方、千粒収量については図－8のように、九州は関東・東海以南の地域の中では、ほぼ29年間を通して最低の水準にあった。その推移は横ばいに近く、九州以

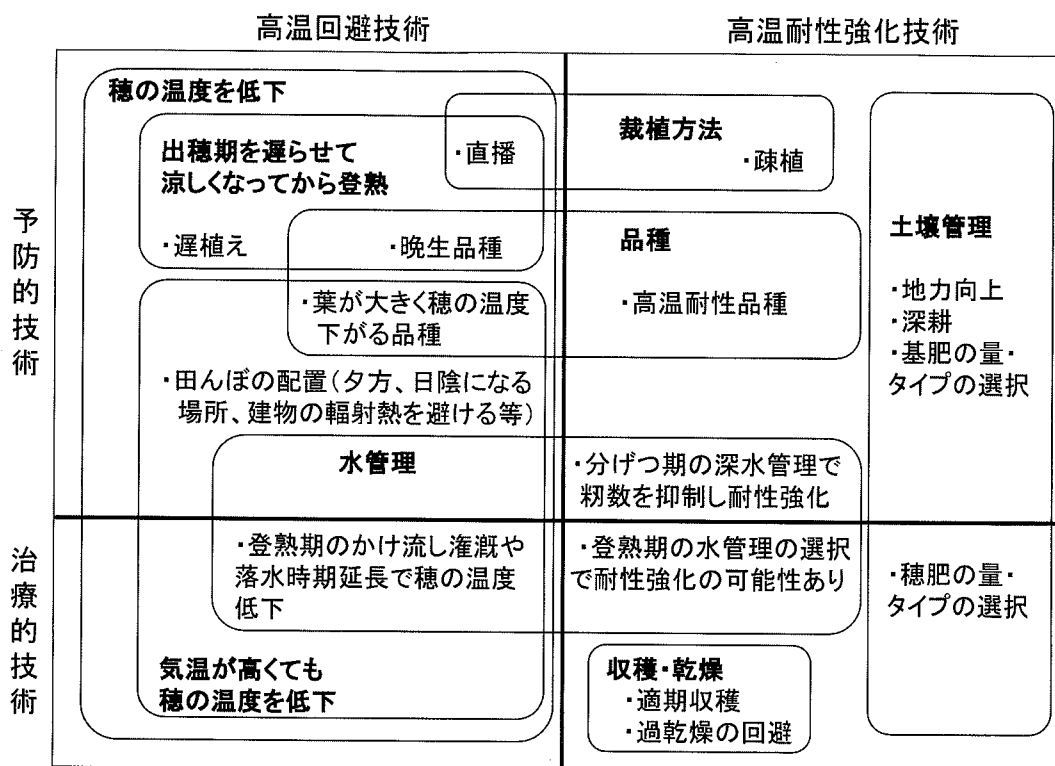
外の全ての地域で増加傾向にあるのと対照的であった。

千粒収量、すなわち登熟の良否は、全粒数の多寡に大きく左右されることは周知のとおりである。この視点に立つと、九州では関東・東海以南の中で最も高い粒数水準にあることが千粒収量の低迷に関わっている可能性がある。

全粒数の増減は、稲体の窒素栄養状態に大きく左右されること（松島 1957）から、おそらく窒素施肥法（量、時期）や地力の地域間差異が全粒数に大きく影響したと考えられる。そこで、各県の施肥基準（農林水産省 2007）における出穂前2週間頃までの窒素施肥量と全粒数の関係を地域別に解析したところ、窒素施肥量のわりに全粒数が少ない傾向がみられた四国を

除くと両者間に有意な正の相関関係が見出された（ $r = 0.789$, 5%水準）。四国では地力が低いことが知られており、土壌からの窒素供給が少ないことが推察された。なお、地力窒素の発現や多くの緩効性肥料の溶出は高温になるほど増大するが、九州では移植時期が他の地域より遅く、生育前半が梅雨明け後の高温条件と重なることも、粒数増加の要因になっている可能性がある。

これらのことから、登熟期が高温寡照になりやすく、登熟不良になるリスクの高い九州では、次項にも関連するが、生育前半の窒素施肥を控えるなど粒数を制限することで、良好な登熟が得られ、玄米品質が高まり、収量も高位安定化することが期待される。



図－9 高温登熟障害を克服する技術の性格による分類

4. 温暖化による米の収量・品質低下を克服する技術

図－9に示したように、高温障害を軽減する対策技術には、1) 開花期や登熟期の高温を避ける、2) 高温になっても耐える、という二つの考え方がある。インフルエンザにたとえるならば、ウイルスに感染しないように人ごみを避けたりマスクをするのが回避技術、感染しても症状がひどくならないように薬を飲むのが耐性強化技術である。

また、別の視点として、1) イネの作付け時など開花期や登熟期が高温になるかわからない段階であらかじめ高温に備えておく予防的な技術と、2) 高温が発生してから、あるいは高温の発生リスクが相当高まってから施す治療的な技術の二つの考え方がある。これもたとえるならば、感染前に行うワクチン接種が予防的技術、タミフルなど感染後に飲む薬が治療的技術である。本稿では、西日本における対策技術の開発状況の一部を、上記の技術の考え方に触れながら紹介したい。

最近、遅植えが多くの水田で実施されている。涼しくなって実らせるということで高温回避技術であり、出穂後に高温となるかわからない田植え時期での対応ということで予防的技術

と言える。

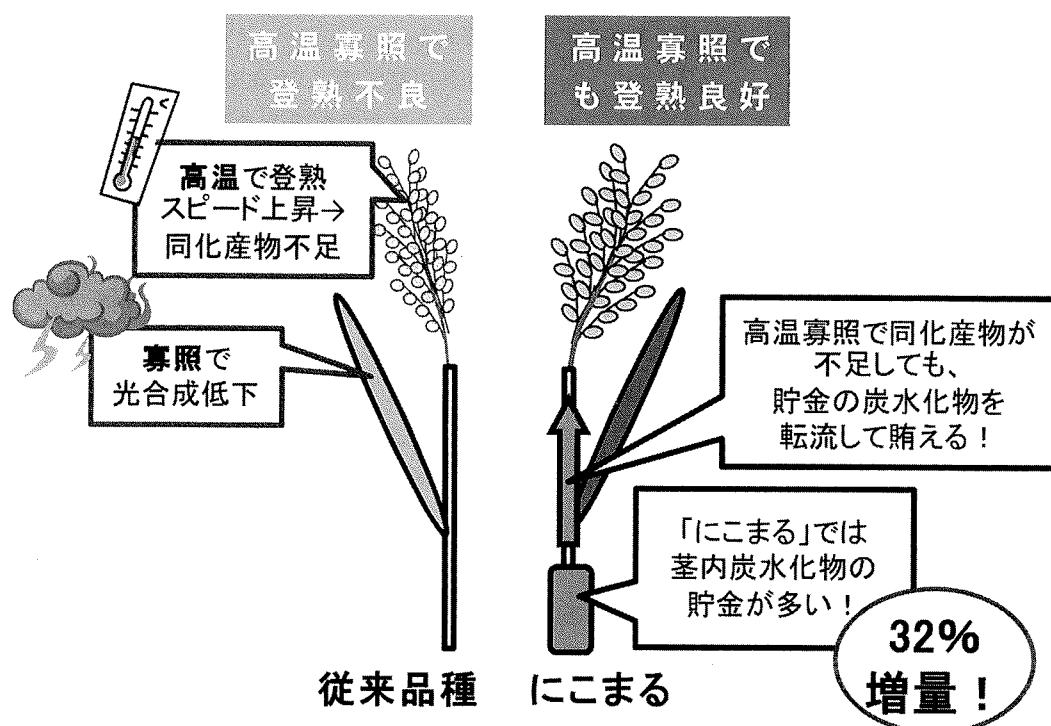
品種の変更は、いうまでもなく田植え時期に実施する予防的な技術である。九州沖縄農業研究センターでは、高温・寡照条件において、「ヒノヒカリ」より外観品質が良好で収量が高い良食味品種「にこまる」を育成し（坂井ら 2007, 表－2；森田ら 2008）、2005 年以降、長崎県をはじめ北部九州を中心に普及が進んでいる。「にこまる」では「ヒノヒカリ」よりも穂揃い期の株元に蓄積される炭水化物（穂へ転流して登熟に使われる、いわばデンプンの貯金）の量が多いこともわかってきた（図－10）。

次に、生育後半の稲体窒素は、粒数、光合成、茎内炭水化物含量、食味（玄米タンパク質含有率）など多くの局面に大きな影響力を持つため、高温登熟障害を軽減する窒素施肥技術、土壌管理技術の開発は極めて重要な課題である。これまで、独法や公立の研究機関等で様々な検討が行われ、例えば福岡県（宮崎ら 2007）では LP30 の穂肥施用による品質向上効果、京都府（尾崎 2003）や兵庫県（岩井ら 2004）では穂肥減量による品質向上効果を明らかにした。鹿児島県（若松ら 2008）では食味低下を招かず背白米の発生を抑制するのに適切な玄米タンパク質含有率を提示している（詳細は本誌 11

表－2 「にこまる」と「ヒノヒカリ」の収量と米の外観品質

品種	精玄米 収量	登熟 歩合	千粒重	米の外観品質		
				検査 等級	乳白粒 歩合	基部 未熟粒 歩合
	g/m ²	%	g		%	%
にこまる	560	88.3	22.7	1等の中-下	4.1	0.8
ヒノヒカリ	522	83.6	22.1	2等の中	7.0	6.5

注) 2005年と2007年の九州沖縄農研(筑後市)の圃場試験結果。登熟歩合は粒厚1.7mm以上の玄米の割合。乳白粒・基部未熟粒歩合は穀粒判別器で測定。森田ら(2008)のデータから算出。



図－10 「にこまる」は穂揃期の茎内炭水化物が多いために高温寡照条件でも登熟良好となる
(森田ら 2008 から作図)

号参照)。また、九州沖縄農研では出穂前後の約1ヶ月間に少しずつ窒素肥料を与えることで、籾数が抑制されるとともに炭水化物の貯金の増加を介して高温条件でも稈りが良くなることを示した(森田ら 2009)。これらの施肥技術の多くは耐性強化技術であり、また、出穂前後の高温条件に対応して実施することを決められるので、予防的効果に加えて治療的効果も期待できる技術と言える。

5. 今後の課題

今後、対策技術のメニューをさらに増やす必要があり、そのためにも、技術の根拠となる高温障害のメカニズムについて深く研究することが重要である。本稿では、メカニズム研究の進捗状況の紹介は省略したが、研究は着実に進ん

できている。例えば、白未熟粒は胚乳細胞内でのデンプン蓄積が不十分となり、デンプン粒とデンプン粒の間に隙間ができ、光が乱反射することで白く濁って見えることがわかっているが、最近、高温登熟条件では、遺伝子レベルで、デンプン合成酵素の活性が落ちたり、合成されたデンプンを糖に分解する酵素の活性が上昇していることが確認された。しかし、ボトルネックになっている代謝経路がまだ突き止められていないなど、今後の研究進展が待たれる。

また、これから温暖化がさらに進行すると、より厳しい高温によってイネの受精障害が発生する可能性がある。低温によって受精が妨げられ収量が激減することは、北海道や東北の「冷害」としてよく知られているが、将来は高温で受精が妨げられて減収することが懸念される。

これを防ぐ技術として、開花・受精時刻に注目した品種改良が進められている。すなわち、多くのイネは午前中、昼前頃に花が咲き、この時間帯に34-35℃を超えると受精しにくくなるので、幅広い遺伝資源を活用して早朝に開花するイネを開発し、高温による不受精を回避することが重要な戦略となっている。

本稿では、専ら温暖化による水稻生産への影響を克服する技術について述べてきたが、これからは、温暖化自体を抑制する技術との組合せも重要になる。例えば、水田から発生するメタンの量は、発生総量の1割を超えており、メタンの温室効果に及ぼすインパクトが二酸化炭素に次いで大きいことを考えると、メタン発生の少ない農法（不耕起栽培など）を採用した上で高温障害回避対策を考えていく必要がある。今後の重要な課題である。

引用文献

- 林陽生 2003. 日本のお米栽培への影響. 地球温暖化－世界の動向から対策技術まで－. 大政謙次・原沢英夫・(財) 遺伝学普及会編. 生物の科学 遺伝別冊 17号. 119—127.
- IPCC 2007. 第4次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約 (翻訳気象庁). http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/ipcc_ar4_wg1.pdf (2009/7/20 閲覧).
- 岩井正志ら 2004. 兵庫県北部における「コシヒカリ」外觀品質向上対策

http://wenarc.naro.affrc.go.jp/seika/seika_nendo/h16/02_sakumotu/p35/index.html (2009/7/20 閲覧).

- 松島省三 1957. 水稻収量の成立と予察に関する作物学的研究. 農技研報告 A5: 1-271.
- 宮崎真行ら 2007. 「ヒノヒカリ」の登熟期高温による品質低下とその対策. 九州沖縄農業研究成果情報. 22. 11-12.
- 森田敏ら 2008. 高温耐性水稻品種「にこまる」の良好な登熟には穂揃期の茎のNSCが多いことが貢献している. 日作紀 77 別 2: 198-199.
- 森田敏ら 2009. 水稻生育後期の少量継続的な窒素施肥が穂揃期の茎のNSCと登熟に及ぼす効果. 日作紀 78 別 1: 36-37.
- 農林水産省 2007. 都道府県施肥基準等. <http://www.maff.go.jp/sehikijun/top.html> (2009/7/20 閲覧)
- 坂井真ら 2007. 玄米品質に優れる暖地向き良食味水稻品種「にこまる」の育成について. 育種学研究 9: 67—73.
- 尾崎耕二 2003. 「コシヒカリ」における高品質・良食味生産のための穂肥施用技術. 近畿中国四国地域農業研究成果情報. http://wenarc.naro.affrc.go.jp/seika/seika_nendo/h15/02_sakumotu/033.html (2009/7/20 閲覧).
- 若松謙一ら 2008. 高温登熟条件下における背白米の発生に及ぼす玄米タンパク質含有率の影響. 九州沖縄農業研究成果情報. 23. 27-28.