

記 録

文書番号	SCJ 第 22 期-260807-22520200-013
委員会等名	日本学術会議 農学委員会 育種学分科会
標題	21世紀における気候変動に対応した育種学の 課題と果たすべき役割
作成日	平成26年（2014年）8月7日

※ 本資料は、日本学術会議会則第二条に定める意思の表出ではない。掲載されたデータ等には、確認を要するものが含まれる可能性がある。

この記録は、日本学術会議農学委員会育種学分科会の審議結果を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議 農学委員会 育種学分科会

委員長	倉田 のり	(第二部会員)	国立遺伝学研究所系統生物研究センター長
副委員長	奥野 員敏	(連携会員)	筑波大学北アフリカ研究センター研究員
幹事	辻本 壽	(連携会員)	鳥取大学乾燥地研究センター教授
幹事	吉村 淳	(連携会員)	九州大学大学院農学研究院教授
	石毛 光雄	(連携会員)	農業生物資源研究所フェロー
	一井 眞比古	(連携会員)	香川大学名誉教授
	祝前 博明	(連携会員)	京都大学大学院農学研究科教授
	大杉 立	(連携会員)	東京大学大学院農学生命科学研究科教授
	岡本 信明	(連携会員)	東京海洋大学海洋科学部教授
	國分 牧衛	(連携会員)	東北大学大学院農学研究科教授
	佐々木卓治	(連携会員)	東京農業大学総合研究科教授
	高垣 美智子	(連携会員)	千葉大学大学院園芸学研究科教授
	武田 和義	(連携会員)	岡山大学名誉教授
	西尾 剛	(連携会員)	東北大学大学院農学研究科教授
	津村 義彦	(特任連携会員)	森林総合研究所森林遺伝研究領域長

この記録の作成にあたり、以下の方々に御協力いただきました。

長谷川 利拡	農業環境技術研究所上席研究員
中川 博親	農業・食品産業技術総合研究機構中央農業総合研究センター上席研究員
小林 麻子	福井県農業試験場主任研究員
山本 俊哉	農業・食品産業技術総合研究機構果樹研究所上席研究員
藤田 泰成	国際農林水産業研究センター上席研究員
宇賀 優作	農業生物資源研究所主任研究員
佐藤 裕	農業・食品産業技術総合研究機構北海道農業研究センター上席研究員
間野 吉郎	農業・食品産業技術総合研究機構畜産草地研究所主任研究員

要 約

1 作成の背景

2007年、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は第4次評価報告書を公表し、21世紀末における気温上昇量の幅を $1.1 \cdot 6.4^{\circ}\text{C}$ であると予測した。気温上昇の主因は人間活動による温室効果ガスの排出であるとし、このままの状態では人間活動を継続すると、地球の地上気温は最大の上昇幅で推移すると警告した。2013年9月、IPCCは6年ぶりに第5次評価報告書を公表し、 $0.3 \cdot 4.8^{\circ}\text{C}$ の幅で気温上昇すると予測している。その一方、京都議定書に掲げられた温室効果ガスの削減目標は達成できる見通しがなく、地球規模での気温上昇は今後も避けられない状況にある。

また、途上国を中心に世界人口は増加を続けて70億人を超え、2050年には90億人を上回ると予測されている。温暖化は真水の約60%を利用する農業に多大の影響を与える。比較的潤沢な水資源を利用できた稲作も例外ではない。とくに、南米や東南アジアの天水田や陸稲栽培地では深刻な干ばつ害が発生する危険性がある。また、現在でも大きな被害が発生しているコムギ、トウモロコシなどの畑作物栽培地帯での干ばつ害や塩害も拡大している。地球温暖化の影響を最も早く大きく受けるのは熱帯地域の国々であると報告されており、これらの地域では悲劇的な食料不足になると警告されている。

温暖化は作物の栽培地を不良化し、それまで栽培されていた作物や品種の栽培を制約する。ときには壊滅的な被害をもたらすことにもなる。温暖化の抑制は21世紀における最大の課題であるが、達成することは難しく、温暖化をはじめとする気候変動に柔軟に適応して、農業生産を維持できるような品種開発は重要な課題である。

そこで、育種学分科会では、21期より気候変動に対応した育種と育種学の役割について議論を重ね、3回のシンポジウムやワークショップを開催して分野内と分野間の議論を継続してきた。それらを記録として取りまとめ、第23期における育種学分科会での議論につなげたい。

2 記録の概要

(1) 気候変動予測と農業への影響評価

気候変動への適応は、今後の社会の在り方の選択に依存する。国内的には温暖化環境下で地域資源を有効に活用できるような農業生産を目指すことが重要である。一方、国際的には、安定的な農業生産技術を提供するとともに、生産変動に対して持続的な社会を目指す必要がある。気候変動への適応とは、「現状を維持する」ための方策ではなく、変動する気候条件で将来望まれる農業のあり方を具現化するための方策である。作物の遺伝的改良は、その中でも中心的な役割を果たす。これまでと同様に、収量、品質、耐病虫性、高温・低温耐性

などを改良することは重要であるが、同時にこれらの特性が、気候が変動した場合にどの程度有効であるかを考慮する必要がある。さらに、品種選択を含む適応策が、CH₄の発生を含む農耕地からの環境負荷にどのような影響があるかなど、多面的な評価を行っていくことが望まれる。そのためには、栽培、育種、土壌、病理、昆虫、気象など多様な学問分野を網羅した学際的チーム研究を強力に推進する必要がある

（２）気候変動に対応した育種課題と目標

温暖化は作物の生産や品質に大きな影響を与える。水稻では、約10年前、夏季の高温が玄米品質を劣化させることが問題になり、生産者に大きな損害を与えた。夏季の気温上昇が全国に拡大し、北海道から九州に至るすべての地域で高温耐性品種の育成に取り組んでいる。これまで我が国の水稻品種の育種において、品質や食味の改良に利用されたことのないインド型品種や近縁野生種など多様な遺伝資源が利用され、温暖化の進行に備えている。また、冬季の温暖化は麦作に影響し、開花や生産に影響を与えている。イネやコムギは世界の人口を支える主要な穀物であるので、今後は世界の穀物生産に貢献できるような研究も望まれている。

また、気候変動は温暖化だけにととまらない。局地的な豪雨や寒冷化など温暖化とは正反対の気象災害をもたらすこともある。

さらに、同じ樹で数十年も栽培を続ける果樹類では、作期移動が困難で環境への適応性が低い。そのため他の農作物と比較して、温暖化をはじめとする気候変動により果実品質などに大きな影響を受ける。また果樹類は、作目（品目）数が多いために、気候変動による影響が多岐にわたる。

そこで、一年生作物としてイネを、永年性作物として果樹を選び、温暖化の影響と育種の現状と将来について論議する。また、気候変動に伴うイネの冷害や畑作物の湿害について議論する。

（３）国際研究機関との連携による育種プログラムの意義

気候変動は地球規模の課題であり、世界には大きな影響を受けている国や地域がある。そのようなリアリティの高い地域を対象に、我が国で開発してきた手法や研究材料を活用して、地球規模の課題に取り組むことは喫緊な課題である。この育種課題を推進するためのパートナーとして、国際研究機関は優れた能力と機能を有する。遺伝子組換え技術やゲノム育種技術により開発された生物素材を国際研究機関との連携協力により評価し、実用化する試みが進んでいる。我が国で開発された素材や手法を用いて作出された耐性作物や耐性品種の普及が期待されているので、国際共同研究の現状と将来展望について議論する。

目 次

1	はじめに	1
2	気候変動予測と農業への影響評価	
(1)	適応の方向性と学際的研究連携の重要性	2
(2)	気候変動予測に基づく農業への影響評価と適応策	4
3	気候変動に対応した育種課題と目標	
(1)	水稻の高温耐性育種	6
(2)	水稻の耐冷性育種	8
(3)	畑作物の湛水耐性育種	9
(4)	気候変動に対応した果樹育種	11
4	国際研究機関との連携による育種プログラムの意義	
(1)	遺伝子組換え技術を利用した乾燥耐性分子育種	12
(2)	天水田を対象とする耐乾性ゲノム育種	13

1 はじめに

国連による人口推移予測では2050年に地球上の人口は96億人に達するとされている。人口増加に伴うエネルギー消費・CO₂排出量の増加、生存環境の劣化、それらに伴う温暖化や気候変動はますます激しさを増し、近年の温暖化による作物の生産性や品質の低下は大きな問題となっている。2013年9月に公表されたIPCC第5次評価報告書¹⁾によると、21世紀末には地球の平均気温は0.3-4.8℃の範囲で上昇すると予測され、人間活動がこのまま継続すると地球規模での温暖化は一層深刻化すると警告が出されている。また、局地的には未曾有の冷害や豪雨、竜巻が発生するなど、人類の歴史上、最大の危機的シナリオが進行しつつある。このような現状と将来の気候変動に対応して、作物育種の分野でどのような取り組みが可能であるのか、どのような気候予測のもとに、どのような作物を開発していけば良いのかについて、育種学分科会を中心とした数回の議論と2度のシンポジウムを経て、各分野の専門家の知恵を糾合して議論し、論点を考察・展望した。それらを取りまとめて、2014年における記録としたい。

2013年度に、日本学術会議農学委員会育種学分科会と農学分科会を主体として、育種学会、農業気象学会、作物学会などの共催・後援のもと、シンポジウムが開催され、活発な議論が行われ、いくつかの方向性が提案された。実際の育種学的な開発取り組みにおいては、高温耐性、乾燥耐性、塩類耐性など不良環境耐性品種の開発への取り組みが活発化している。しかしながら、国際的に見れば、多様な劣悪環境において多様な作物を開発する対応が迫られるのが現状であり、海外の多種多様な環境における育種素材の開発やその支援は、今後の国際貢献として、日本の果たすべき役割であることが取り上げられた。いくつかの解決すべき国内外の主要な課題を整理して、局地的変動にも柔軟に対応できるような、開発・支援の体制の整備が必要であろう。これらの課題を解決するために、遺伝資源の利用を図り、時代に合った何通りもの作物・品種の開発を行い、各種作物で対応品種のストックを作り、時宜に合わせて実地に展開していくことが、育種学に課せられた使命であるとの提案がなされた。

この記録では、気候変動に対応するための、21世紀における作物育種の課題を展望し、今後の育種学分野における課題と役割について取りまとめる。

1) 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次評価報告書第1作業部会報告書(自然科学的根拠): 2013年9月、スウェーデン・ストックホルムで行われたIPCC第36回総会及び第1作業部会第12回会合において政策決定者向け要約が承認・公表されるとともに、第1作業部会報告書本体が受諾された。

2 気候変動予測と農業への影響評価

(1) 適応の方向性と学際的研究連携の重要性

IPCC 第 5 次報告書によると、世界の平均気温は 1880 年から 2012 年までに 0.85°C 増加した。温度上昇は、特に 1980 年以降顕著になり、コムギやトウモロコシなどではその影響が顕在化しつつある。Lobell ら (2011) は、過去約 30 年間の気候変動は、コムギおよびトウモロコシの生産を、それぞれ 3.8% および 5.5% 減少させる方向に働いたと推定した。イネやダイズについては、気候変動が収量に正の影響を与えた地域と負の影響を与えた地域が均衡し、世界全体では気候変動による負の影響は顕在化していない。しかし、低緯度地域では近年の気温（特に夜温）の上昇に伴い、収量が減収する傾向が報告されている。

今後も加速する温室効果ガス濃度の上昇は、さらなる温暖化や水資源循環の変化といった地球規模での環境変動の原因となり、農業生産にも大きな影響を与えるものと予測されている。一方、農業活動自体も、CH₄ や N₂O などの CO₂ 以外の温室効果ガスの主要な発生源とされ、その排出削減や積極的な炭素蓄積など、温暖化の緩和に向けた取り組みが求められている。したがって、今後の農業には、生産と環境調和の両立を目指した技術が必要であり、そのためには、気候変動が単に作物に及ぼす影響にとどまらず、農耕地における物質動態におよぼす影響を考慮した技術対応が望まれる。

日本では、近年の温度上昇が各地で発生し、稲作への影響が確認されている。最も顕著な影響は生育期間の短縮で、農林水産省の作物統計をまとめた結果によると、水稻の出穂日は過去約 40 年に 3・14 日程度早まった。この変化には、植え付け時期や品種の経年変化によるものも含まれるが、同一品種の出穂日の変化を解析した事例でも 1 週間程度の出穂期の前進は明らかである。

子実を収穫対象とする作物では、受粉や子実の肥大など、特定の発育ステージに極端な高温に遭遇すると大きな被害を受ける。高温地域に適応しているイネも、高温障害を受けやすく、開花頃の温度が 34・35°C 以上になると受精障害（不稔）が増加し、減収を引き起こす。2007 年 8 月に関東、東海地域で発生した異常高温の影響について、不稔発生の実態を調査した事例では、異常高温条件で出穂・開花したイネで不稔の増加が確認された。ただし、その程度は、チャンバーの温度応答から予測される不稔よりも小さかった。その原因の一つに、気温が高くなっても必ずしも水稻群落も同程度に昇温するとは限らず、群落温度の方が気温よりも低くなる場合がある。このような較差を考慮するために、群落の水・熱収支から、群落や穂の温度を推定するモデルも開発されている。実際、2007 年の例では、気温が 40°C を超えるような条件でも、群落の温度は必ずしも高くないものと推定された。ただし、湿度が高く、風速が弱い条件では、群落や穂の温度の方が気温よりも高くなる事例も報告されている。将来、高温条件での不稔発生予測の精度を向上させることが重要な課題である。

イネの収量に関しては、近年の温暖化によって顕著に減少したという科学的

証拠は示されていない。これは、収量が温度により変動すること、日本では現在も低温によりイネの収量が制限される地域が存在し、それらの地域では昇温によって増収する効果があることによる。

将来のコメ収量については、約 20 年前から気候予測値を用いた予測が行われてきた。予測に使われた収量モデルは、作物の環境応答実験を基に開発されたものから、地域収量と気象要因の関係に基づく経験的なものまでさまざまであるが、得られた結果は次の 2 点でほぼ、一致している。1) 気候変動の影響は地域によって異なり、北海道では増収するが、西南暖地では停滞あるいは減収する、2) 収量の変動は暖地で増加する。最近の結果では、日本全体でみると 3°C 程度の上昇までは、減収の可能性は低いと予測されている。

こうした比較的楽観的な収量予測の要因には、収量予測モデルが CO₂ 増加による増収効果を考慮する一方で、病害虫、台風、渇水、洪水などに伴う被害を考慮していないこと、寒地や寒冷地では温暖化に伴い、冷害の頻度や程度が減少すると見込まれることが考えられる。しかし、IPCC の第 5 次報告書に報告された最新版の気候予測モデルのうち、やませの再現性が確認されている MIROC5 では、やませの発生頻度は、将来も大きく変化しないものと予測された。将来の稲作においては、高温のみならず低温への備えも依然として重要である。

登熟期の高温条件が、水稻の子実の成長に影響し、玄米の一部を白濁させる「白未熟粒」を多発させ、外観品質を低下させることは古くから知られていた。近年の温暖化傾向によって品質が低下することが指摘され始めたのは 1999 年である。この年は夏季の高温によって、北海道を除く広範な地域において、玄米の外観品質が低下した。白未熟粒の発生温度は、そのタイプ（白濁部位や発生のメカニズム）、品種によって異なるが、一般には登熟期前半の平均気温で 26・27°C 以上とされ、2000 年以降に特に頻発するようになった。これに伴って、特に西日本を中心に玄米の外観品質の低下が顕著になり、一等米比率が低下した。

高温に遭遇しても安定的な品質、収量が得られる品種の開発は、適応技術の中心的な役割を担う。しかし、高温障害向上のための選抜を行う上では、スクリーニング手法の再現性、信頼性の確保が難しい。室内実験では、温度条件は精密に保たれるが、供試できる数量が限られていること、前述したように室内実験の温度応答が、屋外では必ずしも再現されないことがあるなどの問題がある。一方、屋外実験は制御が難しく、同一の条件で選抜を行うことが難しい。したがって、高温耐性の評価については、室内外の実験系や現地試験の結果を、それぞれの実験条件の特性を十分に把握した上で、総合的に判断することが求められる。これを、気象学、作物生理学、遺伝育種学などの連携なしで行うことは難しい。

気候変動は、作物を取り巻く環境や作物生産にも関わる農耕地の物質循環にも影響する。その一例が図 1 に示す物質循環への影響である。農耕地は作物生

産だけではなく、土壌への炭素蓄積などを通じて、温暖化を緩和する効果も期待されている。ただし、湛水状態におかれる水田土壌では、還元状態が発達し、強力な温室効果ガスであるメタン（ CH_4 ）が盛んに生成されるため、炭素管理においては、 CO_2 と CH_4 の両者の動態を考慮する必要がある。温暖化や CO_2 濃度の上昇が農耕地の物質循環に及ぼす影響の程度について、岩手県で実施した CO_2 濃度処理と水田で水温 2°C 上昇させる処理を組み合わせた実験では、水田からの CH_4 発生量が、温度上昇によって $40 \cdot 50\%$ 、さらに、高 CO_2 と組み合わせた場合、無加・温対照 CO_2 区に対して約 80% も増加した。これは温暖化や CO_2 濃度の上昇が、 CH_4 発生の増加を通してさらなる温暖化を引き起こすという「正のフィードバック」が強く働くことを意味している（図1）。加温によって CH_4 が増加したのは、加温が土壌中での CH_4 生成を加速することに加えて、出穂期以降の根の枯死を早め、それが CH_4 の基質として利用されたことなどが関連している。一方、高 CO_2 濃度条件では、高 CO_2 によって増加したイネの光合成産物の一部が、根圏土壌へ転流・放出され、それが基質となって CH_4 の生成が増えたと考えられる。すなわち、 CH_4 発生の環境応答は、イネ自体の環境応答に強く依存しており、そのメカニズムの解明が CH_4 の発生を抑える手がかりになるものと期待される。こうした知見を適用可能な技術に導くためには、気象学、作物学、土壌学の分野に加えて、農業政策で温暖化緩和の研究・技術開発と実施策を推し進める必要がある。

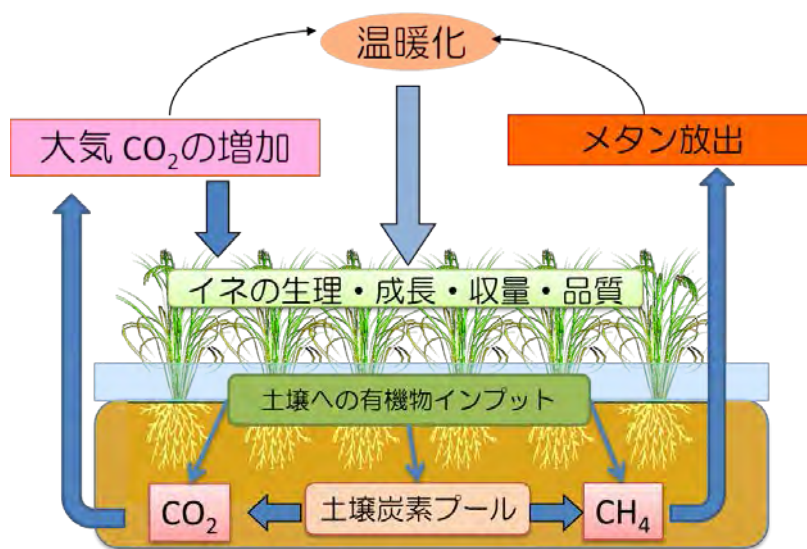


図1 温暖化や CO_2 濃度の上昇が、メタン発生の増加を通してさらなる温暖化を引き起こすという「正のフィードバック」。 CO_2 はその温室効果によって地球温暖化の原因となる一方、イネの生育・収量・品質に影響を及ぼすだけでなく、土壌-作物-大気における物質循環にも影響して、 CO_2 やメタンの放出が高まることが懸念される。

(2) 気候変動予測に基づく農業への影響評価と適応策

世界の穀物生産量は増加しているものの、一人当たりの穀物生産量は1980年代以降停滞している。また、耕地面積はほとんど変化していないので、生産量

の増加は、面積当たり収量の向上によって支えられてきた。さらに、今後の半世紀で穀物需要が 50%程度増加するとの推測もある。したがって、地球規模での気候変動が農業に及ぼす悪影響を克服しつつ、さらに生産性を高めるという難しい課題に直面している。

トウモロコシ、コムギ、イネの収量は、熱帯では気温の上昇とともに減少し、温帯でも気温上昇が 2、3℃を超えると減少すると予測されている。一般に、気温の上昇によって、作物の発育が促進され、生育期間は短くなることが多い。例えば、我が国のコムギ作では、過去 20 年間で気温上昇により出穂まで日数が、20 日以上短縮した地域もある。コムギなどの冬作物、果樹類、茶などでは、気温の上昇によって花芽分化や萌芽が促進され、遅霜に遭遇する危険性が増す。低温要求性の冬作物や果樹などの花芽形成が、地球温暖化によって不全になる可能性が高い。日本型水稲では、冷害を生じない程度の比較的低い気温条件で収量が最大となり、気温の上昇とともに生育期間の短縮、呼吸速度の増加などで収量が低下する。さらに開花期の日最高気温が約 35℃を超えると、受精障害によって収量が激減する可能性が高い。このような水稲の生理反応を組み込んだ生育・収量シミュレーションモデルを用いて、今世紀末の水稲収量は、北日本では増加する可能性があるが、中部日本、西南日本では高温不稔による減収の危険性があると指摘されている。我が国ですでに問題となっている水稲の高温障害として、登熟期の高温による白未熟粒の発生がある。白未熟粒の発生は、登熟期前半の高温が主要因であるが、登熟期の低窒素条件および籾当たりの利用可能な炭水化物量の不足が発生を助長する。果樹では、高温による温州ミカンの浮皮発生や、気温上昇によるリンゴの酸量の低下、糖度上昇などの品質面での影響が指摘されている。世界的には、洪水や旱魃は最も甚大な農業気象災害をもたらす要因である。降水に恵まれ、灌漑施設の整った我が国の水稲生産についても、最近、登熟初期の水管理に必要な用水が不足することがあり、高温登熟障害を助長している可能性がある。麦類と大豆などの畑作物では、乾燥ストレスとともに、土壌の過湿や雨害など、過剰な降水によってもたらされる障害も大きな問題である。

開花期の高温耐性について、少なくとも 3℃程度の品種間差が報告されている。また、早朝開花性を導入して、高温に対する感受性が最大となる開花時刻を早めることによって稔実率が向上したとの報告がある。遺伝的改変や施肥・水管理などによって蒸散速度を増加させると、群落温度の低下を通じて高温障害回避に有効である。白未熟粒の発生に関する高温耐性についても遺伝子型による違いが存在しており、すでに各地域で高温耐性品種の育成と導入が進みつつある。また、移植期や品種の早晚性を変更して、開花期や登熟相の高温を避けることも高温障害の軽減に有効である。以上のような品種開発・栽培技術を総括すると、逃避、回避性、耐性という 3 つの要素からの抵抗性もしくは適応技術を、対象とする形質と環境条件に応じてバランスよく組み合わせることが重要

である。より広い視点で気候変動への適応策をとらえると、品種・栽培技術による適応に加えて、気候・気象リスクを軽減するための農業気象情報システムの活用、灌漑施設・排水施設などの農業基盤の整備、社会経済的方策などが挙げられる。これらを地域や状況に応じて総合的に組み合わせることが、適応策の実施に重要であろう（図2）。

大気中のCO₂濃度が上昇すると、多くの作物では光合成速度が高まり、増収する場合が多い。また、高CO₂条件は、気孔開度、そして蒸散速度の低下によって群落温度の上昇をもたらし、高温による受精障害など様々な生理プロセスに影響を与える可能性がある。開放系大気CO₂増加（FACE）実験の結果によれば、外気より200ppm濃度を高めた高CO₂処理による水稻の増収効果は平均で約13%であった。高CO₂処理による増収率は、品種によって3・36%と異なり、CO₂濃度反応に大きな品種間差が認められた。作物モデルによるシミュレーションでは、籾生産効率の高い品種のほうが、高CO₂処理による増収効果が大きい可能性が示唆されている。このようなCO₂濃度反応の品種間差は、気候変動の悪影響を緩和しつつ、一方で、食糧増産を図る際の一つの鍵を提供している。

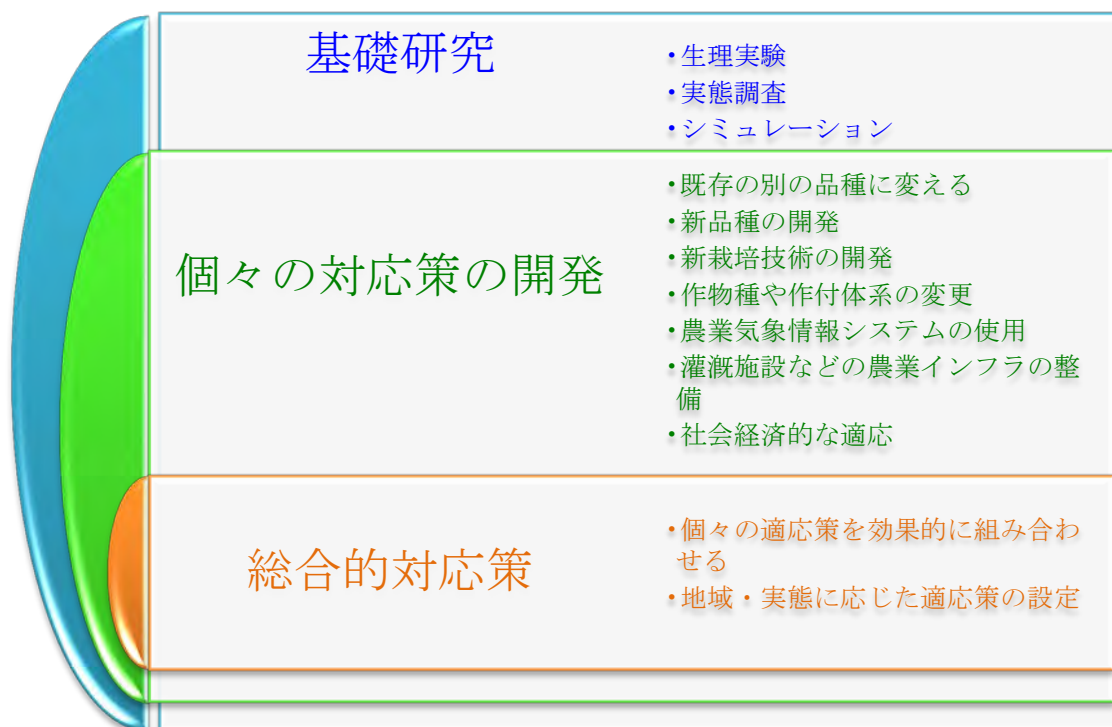


図2 気候変動への適応の道筋

3 気候変動に対応した育種課題と目標

(1) 水稻の高温耐性育種

近年、登熟期間の高温による玄米外観品質の劣化が大きな問題となっている（森田 2008）。特に2010年の猛暑では、北日本を除く各地で一等米比率が大幅に低下した。現在、高温耐性に関する水稻育種は、北海道を除く全国の育種現場で喫緊の課題として取り組まれているが、ここでは例示的に最も早く高温耐

性育種に取り組んだ福井県農業試験場における育種の現状と将来方向について議論する。

福井県では 1998 年までは一等米比率 80・95%を保っていたが、1999 年以降、一等米比率の変動が大きくなり、しばしば 70%を下回った。このような一等米比率の低下は、登熟期間の高温が原因と考えられた。

登熟期の高温による玄米外観品質の劣化には、白濁（背白、基白、乳白、腹白、心白）、充実不足、胴割れなどがあるが、特に高温では背白の発生率が増加する（図 3）。高温でも背白が発生しにくい耐性品種・ハナエチゼン

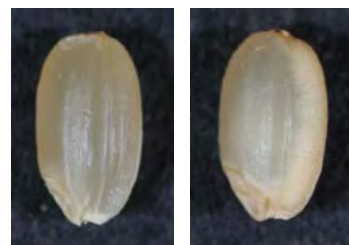


図 3 整粒（左）と背白粒

と高温で背白が多発する感受性品種・新潟早生を用いた遺伝解析の結果、背白粒の発生に関与する効果の大きな量的形質遺伝子座（QTL、*qWB6*）が検出された(Kobayashi *et al.* 2013)。この他にも、ハナエチゼンの対立遺伝子が背白を減少させる QTL が検出され、準同質遺伝子系統を用いて *qWB6* との集積効果が検証されている。さらに、感受性品種である新潟早生が背白を減少させる作用力を持つ QTL (*qWB9*) が検出された。

これまでに報告のある高温耐性 QTL の中で、*japonica* 品種の遺伝解析集団を用いて検出されたものとしては、この研究で取り組んでいる *qWB6*、*qWB9* の他、越路早生/チヨニシキの集団で検出された QTL (Tabata *et al.* 2007)、日本晴/コシヒカリの集団で検出された QTL (Hori *et al.* 2012)、こころまち/東北 168 号の集団で検出された QTL (Shirasawa *et al.* 2013) などがある。また、越南 221 号は 32°C という高温登熟条件でも白濁粒の発生が少ない系統であり、QTL 解析が進められている。*indica/japonica* 品種の遺伝解析集団における玄米外観品質に関する QTL としては、コシヒカリ/カサラスの集団で検出された QTL (蛭谷ら 2008) などがある。これらの QTL を集積していく場合、相加的な集積効果があるか、また導入する遺伝背景での作用力を確認した上で育種を進める必要がある。

上記に示した高温耐性に関する QTL 解析では、登熟期間の高温の影響が直接的である背白に関する QTL の検出に成功している。しかし、高温による障害は、背白以外にも乳白等の白濁粒や胴割れの発生、収量や食味の低下、不稔の発生など多岐にわたる。これらの問題の解決も、今後の高温耐性育種には非常に重要である。乳白の発生率は、温度以外にも、日射条件、一粳あたりの炭水化物供給能、土壌窒素条件などの環境要因によって大きく変動するため、これまで遺伝解析が困難であった。最近では、乳白粒を切断し白濁部位の形状によって粒の中央が白濁する高温型乳白とリング状に白濁部位が生じる低日射型乳白に分類するといった形質評価方法も提案され、この手法を用いた遺伝解析も行われている。また、今後予想される一層の高温化に対し、より強い高温耐性を有する品種を育成するためには、新たな遺伝資源の探索と利用が重要である。

（２）水稻の耐冷性育種

地球温暖化が進む中でも、気候変動幅の拡大によって、北日本では冷害による被害が甚大化する恐れがある。北海道では、120年に及ぶ耐冷性育種により、耐冷性に優れる品種が育成されてきたが、1993年の大冷害時のような夏季低温に打ち克てる品種は未だに育成されていない。このような未曾有な冷害に対しては、従前の理論と方法に基づく育種では対応できない。そこで、新たな視点に立った冷害研究と耐冷性育種が求められる。その一例が、イネの低温に対する感応性に品種間差異があることに注目して、低温鈍感力と名付けられた低温耐性分子機構の解明と強化法に関する研究である。

植物は低温などの環境ストレスに晒されると、細胞レベルでは過酸化ストレスと水ストレスが高まり、それが本来備わっている防御機能を超えると種々の障害が発生する。過酸化ストレスに関しては、低温で発現量が減るアスコルビン酸過酸化酵素（APXa）遺伝子を過剰発現あるいは低温誘導的に発現させることで、低温下で蓄積される過酸化水素のレベルを低く抑え、耐冷性を向上させる（Sato et al., 2011）。また、水ストレスに関しては、コムギが持つフルクタン（オリゴ糖の一種）合成酵素遺伝子を過剰発現あるいは低温誘導的に発現させることで耐冷性が向上する（Kawakami et al., 2008）。秋まきコムギは越冬前に低温順化する過程でフルクタンを植物体内に高濃度に蓄積することにより脱水耐性を高め、植物体が凍結するような寒地でも越冬できるようになる。0℃以上の低温域でも水ストレスがかかるため、イネでもフルクタンを蓄積できれば、5℃前後の低温に対する耐性が向上する可能性がある。しかしながら、フルクタン合成酵素遺伝子はイネには存在しないため、イネはフルクタンを合成することができない。そこで、コムギ由来のフルクタン合成酵素遺伝子 1-SST 等をイネに導入して発現させることにより、フルクタンを合成蓄積できる形質転換イネが作出された。この形質転換イネは5℃の低温に耐えて生存する能力が高いだけでなく、穂ばらみ期耐冷性も原品種より優れている。

耐冷性の強いイネではストレス応答遺伝子群がほとんど低温誘導されず、逆に耐冷性の弱いイネの方で多くのストレス応答遺伝子群の発現が低温誘導される現象（図4）を「低温鈍感力」と名付けられた。これまでに、低温鈍感力にはABAが密接に関わっている。ABAは環境ストレス応答において重要な役割を果たしている植物ホルモンであり、幼苗期においてはABA処理により環境ストレス耐性が高まるが、花粉形成には阻害的に働く。ABAの分解能力やABAに対する感受性が低温鈍感力に関わっている可能性があり、花粉形成期における低温鈍感力を高める試みが行われている。

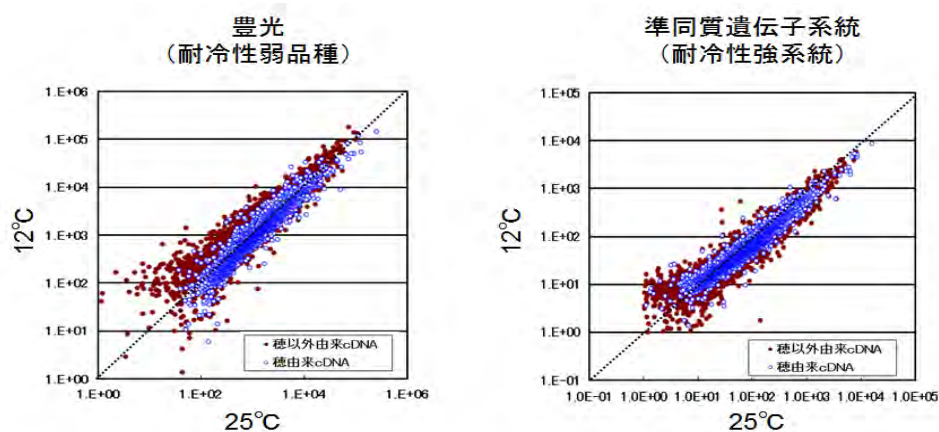


図4 イネの幼穂における低温による遺伝子発現変動の比較

(3) 畑作物の湛水耐性育種

アジアモンスーン地域に位置する日本では、湿害は古くから畑作物の栽培において大きな減収要因となっている。また世界的に見ても湿害は重要な問題であり、地球温暖化による降雨の集中化などの異常気象による湿害は最も重要な環境ストレスの一つである。これまでに様々な畑作物において湛水耐性（耐湿性）の研究が行われてきたが、耐湿性は複数の要因が関与している難関形質であり、いずれの作物においても実用的な耐湿性品種は得られていない。幼植物における湿害は、過剰な土壌水分によって根系が低酸素となるとともに、土壌が還元状態になることで生じる二価鉄や硫化水素などの有害物質によって起こる。低酸素に対する適応反応として、イネや水生植物では根の皮層部分に通気組織と呼ばれる酸素の通り道となる空洞を形成するとともに、根から外部に酸素を漏らさない Radial Oxygen Loss (ROL) バリアを作る。また、湛水・還元状態における耐性には根の酸化力が関係していると考えられている。一方、回避反応としては、根系を浅くし、さらに土壌表面よりも水位が高くなった場合には地表面まで根（地表根と言われる）を発達させ、これにより地表近くの酸素を取り込むことができる。幼植物の耐湿性を評価するときには、あらかじめ耐湿性に関する特性を通気組織形成、根のバリア形成、湛水・還元状態における耐性、さらには地表根形成などの要因に分けてそれぞれの特性に関する遺伝解析を行い、次いでそれぞれに関与する遺伝子を集積することにより効率的に耐湿性育種を進めることができる。

最近、トウモロコシの近縁種テオシントを用いる耐湿性育種の可能性が示された（間野・大森 2008）。テオシントはメキシコを中心にグアテマラやニカラグアなどにかけて分布しており、亜種を含めると 7 種に分類される。その中で、ニカラグアの水浸しの低地に自生するニカラグアテオシント (*Zea nicaraguensis*) は耐湿性遺伝資源として注目されている。いくつかのテオシント

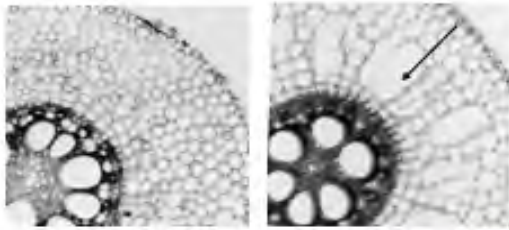
は耐湿性に関連する形質を一部持っていることが知られているが、*Z. nicaraguensis* は耐湿性関連形質である根の恒常的な通気組織形成能、湛水・還元状態における耐性、地表根形成能のすべてを保有している (Mano and Omori 2007) (図 5)。さらに、テオシントは根での酸素の漏出を抑える ROL バリアを形成する。トウモロコシとテオシントとの交雑は一般に容易で、交雑 F₁ や F₂、さらには戻し交雑後代も得られることから、*Z. nicaraguensis* の持つユニークな形質を従来の DNA マーカーを用いた交雑育種でトウモロコシに導入することが可能である。*Z. nicaraguensis* が持つ根の通気組織形成能 QTL をトウモロコシに導入した系統が開発されている。

根の通気組織は耐湿性に関する形質のうち世界的にみても最も注目されており、多くの研究者によって生理学的・分子生物学的手法による研究が進められている。トウモロコシやオオムギなどの畑作物においても湛水処理によって根の皮層部分に通気組織が形成されるが (誘導的な通気組織)、通気組織の十分な発達には時間がかかるため低酸素による障害を受けてしまう。一方で、*Z. nicaraguensis* はイネや水生植物のようにはじめから通気組織を形成しており (恒常的な通気組織)、湛水処理などによってさらに発達させることから低酸素に速やかに適応できると考えられている。

耐湿性の弱い畑作物では、湛水条件において通気組織が誘導されても根の基部から中央部にわたって酸素が漏出してしまい、根端まで十分に酸素を供給できないことが知られている。一方で、イネや水生植物のいくつかでは湛水状態になると根の基部から先端にかけて酸素の漏出を防ぐ ROL バリアが形成され、この特性は耐湿性と密接な関係にあると考えられている。テオシント *Z. nicaraguensis* は ROL バリアを形成するが、その ROL バリアに関する遺伝子の染色体上の位置が推定された (渡邊ら 2013)。

土壌が過湿条件になると酸化還元電位が低下して還元状態になって植物の生長を阻害する二価鉄や硫化水素などの有害物質が生じる。イネでは、通気組織を通して根端に届いた酸素が根系を酸化することで有毒物質の害を抑えることが知られている。畑作物の還元状態で生じる有害物質の害に対する耐性の研究はあまりみられないが、*Z. nicaraguensis* の第 4 染色体の長腕を持つ系統が極めて高い耐性を示すことが明らかにされている。

湛水への適応や回避の反応として地表面近くで根を形成させるという浅根化がある。さらに土壌表面よりも水位が高くなった場合には地表面まで根 (地表根) を発達させる。これにより、根系を浅くし、さらには地表根を形成することで地表近くの酸素を取り込むことができる。テオシント、特に *Zea mays* ssp. *huehuetenangensis* は地表根形成能力が非常に高い。



通気組織



湛水・還元耐性



地表根

図5 テオシントZ.
*nicaraguensis*が持つ耐湿
性関連形質。いずれも左
がトウモロコシMi29、右が
Z. nicaraguensis。

(4) 気候変動に対応した果樹育種

果樹類は、同じ樹で数十年も栽培を続けるため、作期移動が困難で環境への適応性が低い。そのため他の農作物と比較して、温暖化をはじめとする気候変動により大きな影響を受ける（杉浦ら 2006）。また果樹類は、作目（品目）数が多いために、気候変動による影響が多岐にわたる。発芽・開花における影響として、休眠覚醒の遅延（ナシの眠り症、ブドウ、モモなど）、不十分な低温順化による凍霜害（リンゴ、ナシなど多くの果樹）、開花期の前進と低温／高温による結実不良（ナシ、ウメ、オウトウなど）、果実品質等に関する影響として、着色不良（ブドウ、リンゴ、ウンシュウミカンなど）、みつ症など果実の生理障害（ナシ、モモ）、果実の日焼け（リンゴ、ウンシュウミカン）や浮皮の発生（ウンシュウミカン）などが挙げられる。また、病害や虫害の被害も確実に顕在化している。

気象変動予測値から、ウンシュウミカンやリンゴで今後の栽培適地に関するシミュレーションが公表されている（杉浦ら 2009）。ウンシュウミカンの栽培適温を年平均気温 15℃・18℃と仮定すると、この温度域には、南関東以南の太平洋・瀬戸内海の沿岸部および九州の沿岸部が主に該当し、現在のウンシュウミカンの主産地とおおむね一致している。2060年代には、年平均気温 15℃・18℃地域が南東北の沿岸部まで広がる一方、現在のウンシュウミカン主産地のほとんどが、栽培適温よりも高温になる可能性がある。高温対策については、これまでに日本各地の試験研究機関や生産の現場等で研究・実践されており、温暖化適応策として、栽培技術によって温度を下げたり、高温耐性を強化するための様々な対策が効果を上げている。一方、中長期的なアプローチとして、最新

のゲノム解析手法や DNA マーカー技術等を利用して、気候変動に適応した果樹品種の早期開発を進めている。

果樹類は、世代のサイクルが長く実生から開花・結実まで数年を要すること、また樹体が大きく広い栽培面積を必要とするため栽培可能な個体数が限定されることが、育種の進展を妨げてきた。幼苗での DNA マーカー選抜により不良個体を早期に淘汰し、残った個体を圃場で選抜することにより育種規模を飛躍的に拡大できる。現在、このような DNA マーカーを利用した育種が大いに期待されている。しかしながら、イネなどの主要作物と比べて果樹類では、利用可能なゲノム情報は限定的であり、高精度 DNA マーカー開発や基盤地図の構築、重要形質の遺伝解析と関連 DNA マーカー開発などを行うためのゲノム基盤が脆弱であった。近年、第 2 世代 DNA シーケンサの実用化などゲノム解析を取り巻く状況の変化により、果樹類でも急速にゲノム情報が蓄積されつつある。これまでに、ブドウ（2007 年）、リンゴ（2010 年）、ナシ（チュウゴクナシ、2013 年）などでゲノム解読情報が公開され、これらの情報を活用して気候変動に適応可能な重要形質について、関連遺伝子座の同定と DNA マーカー開発が可能となってきた。

4 国際研究機関との連携による育種プログラムの意義

（1）遺伝子組換え技術を利用した乾燥耐性分子育種

乾燥耐性の獲得において重要な役割を果たしているアブシシン酸（ABA）シグナル伝達系に関与する脱リン酸化酵素、タンパク質リン酸化酵素および転写制御因子について、遺伝子重複をもつファミリー内でのプロトタイプ（原型）と新型のファミリーメンバーの役割の違いが明らかになりつつある（Fujita et al. 2013; Miyakawa et al. 2013）。干ばつ耐性に関わる重要な遺伝子群は多くの場合、遺伝子ファミリーを形成しているが、干ばつ耐性分子育種技術を開発する際にどの遺伝子に注目して研究を進めればよいかを考える上で、基礎研究の成果を利用して応用研究を展開させることが重要である。

気候変動による問題の中でも、干ばつ害の軽減に焦点をあて、遺伝子組換え技術を用いた取り組みが進められている。自然災害による世界の作物生産の被害の中でも、干ばつによる被害額は突出しており、世界的に重大な問題となっている（Yadav et al. 2011）。特に近年は、数十年に一度と言われるような甚大な被害をもたらす干ばつが世界中で頻発している。

ここ数年間の干ばつ被害を振り返っただけでも、以前に比べて頻度も激しさも増し、問題がより深刻になっていることがうかがえる。特に作物生産においては、雨水にだけ頼る天水農業地域がより大きな影響を受けることが知られているが、このような天水農業地域は世界的な貧困地域とも密接に関連しており、干ばつが社会的な問題にも大きな影響を与えていることが示唆されている。

このような状況の中、国際熱帯農業研究センター（CIAT）、国際トウモロコシ・

コムギ改良センター (CIMMYT)、国際イネ研究所 (IRRI) などの CGIAR 傘下の国際研究機関と連携して、干ばつ耐性をもつイネ (陸稲、水稲) やコムギの作出に向けた共同研究が行われている。国際研究機関と連携した共同研究では、遺伝子組換え技術のさまざまな手法を統合して、圃場で真に役立つ干ばつ耐性作物の作出をめざしている。遺伝子組換え技術の利点を活かせる応用場面を考慮しながら、多くの専門家と連携して干ばつ耐性品種の作出への取り組みを行っていることが重要な点である。特に、育種学と分子生物学、植物生理学、作物学などの関連分野を融合して、干ばつ耐性品種の作出に向けた知見を統合し、分子レベルから圃場までを分野横断的に結びつける研究体制の構築が急務である。国際共同研究を進める上では、国民性の違いに起因するさまざまな壁にぶつかることも多々あることが予測されるが、世界的な連携なくして、地球規模の食料問題を抜本的に解決することは難しい。

(2) 天水田を対象とする耐乾性ゲノム育種

干ばつは、発展途上国における飢餓の主要な原因のひとつである。国連は 2025 年には 27 億人が深刻な水不足に直面すると予測している。将来の人口増加と水不足が懸念されるなか、2025 年までに干ばつ地域における作物生産を 40% 増産することが必要であると言われている (Pennisi, 2008)。イネの場合、アジア地域に限っても干ばつの影響下にある天水田面積は 2300 万ヘクタールもあり、アジアの稲作面積の 20% にも及ぶ (Pandey & Bhandari, 2007)。これは、日本の稲作面積 160 万ヘクタール (農林水産省, 2013) のおよそ 14 倍にあたる。現在、干ばつ地域における作物の増産を可能にするため、耐乾性を付与した品種の開発が世界的に重要な研究テーマとなっている。海外の民間企業でも干ばつ耐性を付与した作物の開発に力を入れている。

植物の耐乾性のメカニズムには、深根性により土壌深層から水を得るなどの乾燥回避性 (Drought avoidance)、干ばつから開花時期を避ける乾燥逃避性 (Drought escape)、細胞内水ポテンシャル維持などによる乾燥耐性 (Drought tolerance)、干ばつ影響後の生長を速やかに復帰させる干ばつ回復型 (Drought recovery) の 4 つが挙げられる (Gowda et al., 2011)。このうち、深根性は干ばつ下における作物生産を維持するために重要な形質の 1 つとみなされてきた (Yoshida & Hasegawa, 1982)。これまで多収をめざした草型育種は良好な栽培環境を前提にイデオタイプが決められ、それに向かって育種が進められてきたが、干ばつや塩害、地力の低下など土壌問題のある農地に適応した作物を開発するためには、草型の品種改良だけでなく、これまで困難とされてきた根型育種に挑戦していく必要がある。そこで、イネの深根性遺伝子 *DRO1* を利用した干ばつ耐性品種開発を目的として、国際イネ研究所 (IRRI、フィリピン) と国際熱帯農業センター (CIAT、コロンビア) と連携した取り組みが進展している。

海外の農業問題を解決するうえで、日本で開発された技術をうまく現地に受

け渡すためには、国際農業研究協議グループ（CGIAR）傘下の国際農業研究機関と協力して研究を進めることは非常に効果的である。現地のニーズに合った成果を生み出すためには、長期的な共同研究の枠組が重要である。その点、CGIAR は各国に支所を持っており、CGIAR と連携することで、こちらの技術を現場により早く展開することも期待できる。

ここに例示した取り組み以外にも、多様な観点からの対策が考えられるが、植物の基本的特性および遺伝資源の多様な特性の研究なくして、温暖化にも、乾燥、高温、低温などの障害にも対抗すべき方策は生まれない。また、繰り返し述べたように、育種学、作物学、植物科学、ゲノム科学、土壌学、気象学など多くの学術分野の連携なくしては、真に効果的な技術・品種も生まれない。国際的な貢献に向けて、農学委員会・育種学分科会として、どのような情報解析・研究・技術開発が必要かを例示的に考察して第 22 期の議論の記録として残す。今後、さらに複眼的な視点での議論の展開が期待される。

<参考文献>

2・(1)

Alexandratos N, Bruinsma J (2012) World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. Available at: [http://environmentportal.in/files/file/World agriculture towards 2030.pdf](http://environmentportal.in/files/file/World%20agriculture%20towards%202030.pdf) [Accessed November 29, 2013].

Lobell DB, Schlenker W, Costa-Roberts J (2011) Climate trends and global crop production since 1980. *Science* 333:616–620.

長谷川利拡 (2012) 農業への影響. 「地球温暖化はどれくらい「怖い」か? 温暖化リスクの全体像を探る」、江守正多, 気候シナリオ「実感」プロジェクト影響未来像班編、技術評論社、東京、pp. 161–192.

長谷川利拡 (2014) 気候変化に対する水稲の応答と適応の方向、遺伝 68:76–81.

Tokida T et al. (2010) Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) and soil warming on CH₄ emission from a rice paddy field: impact assessment and stoichiometric evaluation. *Biogeosciences* 7:2639–2653.

2・(2)

巽二郎 (2007) 地球環境と作物. 博友社. pp.155.

中川博視 (2008) 地球温暖化で作物の生育はどうなるのか・コメとムギ. 渡邊紹裕編著「地球温暖化と農業」. p.118-160.

森田敏 (2011) イネの高温障害と対策. 農文協. pp.143.

Ishimaru T et al. (2010) A genetic resource for early-morning flowering trait of wild rice *Oryza officinalis* to mitigate high temperature-induced spikelet sterility at anthesis. *Ann. Bot.* 106:515-520.

長谷川利拡 (2012) 50年後の水稲生産を予測する. 化学と生物 50:298-301.

Hasegawa T et al. (2013) Rice cultivar responses to elevated CO₂ at two free-air CO₂ enrichment (FACE) sites in Japan. *Funct. Plant Biol.* 40:148–159.

3・(1)

蛭谷武志、山本良孝、矢野昌裕、舟根政治(2008) 染色体断片置換系統群を利用したイネの玄米外観品質に關与する QTL の検出. 育種学研究 10:91-99.

Hori K et al. (2012) Variation in heading date conceals quantitative trait loci for other traits of importance in breeding selection of rice. *Breed. Sci.* 62:223–234.

Shirasawa K et al. (2013) Identification of the chromosomal region responsible for high-temperature stress tolerance during the grain-filling period in rice. *Mol. Breeding* 32:223-232.

小林麻子 (2012) 米の外観品質・食味研究の最前線 [18] 高温耐性水稲品種の育成とその遺伝的要因の解明—外観品質を主として—. 農業および園芸 87: 525-535.

Kobayashi A et al. (2013) Detection and verification of QTLs associated with

heat-induced quality decline of rice (*Oryza sativa* L.) using recombinant inbred lines and near-isogenic lines. *Breed. Sci.* 63:339-346.

森田敏 (2008) イネの高温登熟障害の克服に向けて. 日作紀 77:1-12.

Tabata M *et al.* (2007) Mapping of quantitative trait loci of white-back kernels associated with high temperatures during the ripening period of rice (*Oryza sativa* L.), *Breed. Sci.* 57:47-52.

3・(2)

杉浦俊彦、住田弘一、横山繁樹、小野洋 (2006) 農業に対する温暖化の影響の現状に関する調査. 農業・生物系特定産業技術研究機構 研究調査室小論集第7号.

杉浦俊彦、杉浦裕義、阪本大輔、朝倉利員 (2009) 温暖化が果樹生産に及ぼす影響と適応技術. 地球環境 14(2):207-214.

Terakami S, Shoda M, Adachi Y, Gonai T, Kasumi M, Sawamura Y, Iketani H, Kotobuki K, Patocchi A, Gessler C, Hayashi T, Yamamoto T (2006) Genetic mapping of the pear scab resistance gene *Vnk* of Japanese pear cultivar Kinchaku. *Theor. Appl. Genet.* 113:743-752.

Moriya S *et al.* (2013) Genetic mapping and marker-assisted selection of the gene conferring susceptibility to Alternaria Blotch caused by *Alternaria alternata* apple pathotype in apple. *Acta Hort* 976:555-560.

Okada K *et al.* (2008) Deletion of a 236 kb region around *S₄-RNase* in a stylar-part mutant *S₄sm*-haplotype of Japanese pear. *Plant Mol Biol* 66:389-400.

3・(3)

Kawakami K, Sato Y, Yoshida M (2008) Genetic engineering of rice capable of synthesizing fructans and enhancing chilling tolerance. *J.Exp.Bot.*59:793-802

Kuroki M, Saito K, Matsuba S, Yokogami N, Shimizu H, Ando I, Sato Y (2007) A quantitative trait locus for cold tolerance at the booting stage on rice chromosome 8. *Theor. Appl. Genet.* 115 : 593-600

Saito K, Hayano-Saito Y, Kuroki M, Sato Y (2010) Map-based cloning of the rice cold tolerance gene *Ctbl1*. *Plant Sci.* 179:97-102

Sato Y, Masuta Y, Saito K, Murayama S, Ozawa K (2011) Enhanced cold tolerance at the booting stage in rice by transgenic overexpression of the ascorbate peroxidase gene. *OsAPXa. Plant Cell Rep.* 30:399-406

3・(4)

Mano Y, Omori F (2007) Breeding for flooding tolerant maize using “teosinte” as a germplasm resource. *Plant Root* 1: 17-21.

間野吉郎、大森史恵 (2008) 植物の根に関する諸問題 [178] —テオシントを利用したトウモロコシの耐湿性育種—. 農業および園芸 83: 689-695.

Mano Y, Omori F (2013) Flooding tolerance in interspecific introgression lines

containing chromosome segments from teosinte (*Zea nicaraguensis*) in maize (*Zea mays* subsp. *mays*). *Ann. Bot.* 112: 1125–1139.

渡邊宏太郎、西内俊策、大森史恵、間野吉郎、中園幹生 (2013) トウモロコシとテオシントを用いた酸素漏出バリア関連形質の解析. 根の研究 22:161.

4 ・ (1)

Yadav SS, Redden R, Hatfield JL, Lotze-Campen H, Hall AJW (2011) “Crop Adaptation to Climate Change” Wiley-Blackwell, ISBN-13: 978-0813820163

Fujita Y, Yoshida T, Yamaguchi-Shinozaki K (2013) Pivotal role of the AREB/ABF-SnRK2 pathway in ABRE-mediated transcription in response to osmotic stress in plants. *Physiol Plant.* 147:15-27.

Miyakawa T, Fujita Y, Yamaguchi-Shinozaki K, Tanokura M (2013) Structure and function of abscisic acid receptors. *Trends Plant Sci.* 18:259-266.

Fujita Y, Nakashima K, Yoshida T, Fujita M, Shinozaki K, Yamaguchi-Shinozaki K. (2013) Role of Abscisic Acid Signaling in Drought Tolerance and Preharvest Sprouting Under Climate Change. In ”Climate Change and Abiotic Stress Tolerance”, Tuteja, N. and Gill, S.S.ed., Wiley-Blackwell, pp.521-553.

4 ・ (2)

Ding X, Li X, Xiong L (2011) Evaluation of near-isogenic lines for drought resistance QTL and fine mapping of a locus affecting flag leaf width, spikelet number, and root volume in rice. *Theor. Appl. Genet.* 123:815–826.

Gowda VRP, Henry A, Yamauchi A, Shashidhar HE, Serraj R (2011) Root biology and genetic improvement for drought avoidance in rice. *Field Crops Res.* 122:1–13.

農林水産省(2013) 平成 25 年産水稻の作付面積及び予想収穫. 農林水産統計 (http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kome/index.html)

Obara M, Tamura W, Ebitani T, Yano M, Sato T, Yamaya T (2010) Fine-mapping of *qRL6.1*, a major QTL for root length of rice seedlings grown under a wide range of NH₄⁺ concentrations in hydroponic conditions. *Theor. Appl. Genet.* 121:535–547.

Pandey S, Bhandari H (2007) Introduction. In Pandey, S., Bhandari, H., Hardy B. eds., Economic costs of drought and rice farmers’ coping mechanisms. pp.1–9.

Pennisi E (2008). The blue revolution, drop by drop, gene by gene. *Science* 320:171–173.

Uga Y, Hanzawa E, Nagai S, Sasaki K, Yano M, Sato T (2012) Identification of *qSOR1*, a major rice QTL involved in soil-surface rooting in paddy fields. *Theor. Appl. Genet.* 124: 75–86.

Uga Y, Okuno K, Yano M (2010) Fine mapping of *Stal*, a quantitative trait locus determining stele transversal area, on rice chromosome 9. *Mol. Breed.* 26:533–538.

Uga Y, Sugimoto K, Ogawa S, Rane J, Ishitani M, Hara N, Kitomi Y, Inukai Y, Ono K, Kanno N, Inoue N, Takehisa H, Motoyama R, Nagamura Y, Wu J, Matsumoto T,

Takai, T, Okuno K, Yano M (2013) Control of root system architecture by *DEEPER ROOTING 1* increases rice yield under drought conditions. *Nature Genet.* 45:1097–1102.

Wang H, Xu X, Zhan X, Zhai R, Wu W, Shen X, Dai G, Cao L, Cheng S (2013) Identification of *qRL7*, a major quantitative trait locus associated with rice root length in hydroponic conditions. *Breed. Sci.* 63:267–274.

Yoshida S, Hasegawa S (1982) The rice root system: its development and function. In IRRI, Drought resistance in crops with emphasis on rice. pp. 97–1

<参考資料 1> 育種学分科会審議経過

平成 25 年 (2013 年)

7 月 1 2 日 育種学分科会 (第 6 回)

育種学分科会・農学分科会・日本育種学会共催シンポジウム
「気候変動がもたらす農林業への影響とその対策を考える」

1 0 月 1 2 日 育種学分科会・日本育種学会共催ワークショップ

「気候変動に対応した 2 1 世紀育種戦略」

1 2 月 1 3 日 育種学分科会・農学分科会共催シンポジウム

「気候変動に対応した作物栽培技術の現状と展望」

平成 26 年 (2014 年)

7 月 2 日 育種学分科会 (第 7 回)

育種学分科会記録の審議