記　録

文書番号	SCJ 第 22 期 260807-22520100-012
委員会等名	日本学術会議 農学委員会 農学分科会、農業生産環境工学分科会
標題	気候変動に対応した作物栽培技術の現状と展望
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。

記録

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）8 月 7 日

日本学術会議

農学委員会

農学分科会、農業生産環境工学分科会

この記録は平成 25 年 12 月 13 日（金）に日本学術会議農学委員会農学分科会が中心となって開催した公開シンポジウム「気候変動に対応した作物栽培技術の現状と展望」の講演と議論を踏まえて取りまとめたものである。

日本学術会議 農学委員会 農学分科会

委員長	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
副委員長	米森敬三	（連携会員）	京都大学大学院農学研究科教授
幹　事	井上眞理	（連携会員）	九州大学大学院農学研究院教授
幹　事	夏秋啓子	（連携会員）	東京農業大学国際食料情報学部教授
	矢澤進	（第二部会員）	京都学園大学バイオ環境学部教授
	一井眞比古	（連携会員）	香川大学名誉教授
	位田晴久	（連携会員）	宮崎大学農学部教授
	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
	国分牧衛	（連携会員）	東北大学大学院農学研究科教授
	三枝正彦	（連携会員）	豊橋技術科学大学先端農業バイオリサーチセンター特任教授
	白石友紀	（連携会員）	岡山県農林水産総合センター生物科学研究所所長
	武田和義	（連携会員）	岡山大学名誉教授
	柘植尚志	（連携会員）	名古屋大学大学院生命農学研究科教授
	中西友子	（連携会員）	東京大学大学院農学生命科学研究科教授
	野並浩	（連携会員）	愛媛大学農学部教授
	森田弘彦	（連携会員）	秋田県立大学生物資源科学部生物生産科学科教授

日本学術会議 農学委員会 農業生産環境工学分科会

委員長	大政　謙次	（第二部会員）	東京大学大学院農学生命科学研究科教授
副委員長	真木　太一	（連携会員）	独立行政法人国際農林水産業研究センター特定研究主査、九州大学名誉教授
幹　事	野口　　伸	（第二部会員）	北海道大学大学院農学研究院教授
幹　事	奥島　里美	（連携会員）	独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所上席研究員
	青木　正敏	（連携会員）	東京農工大学元教授
	位田　晴久	（連携会員）	宮崎大学農学部教授
	岸田　義典	（連携会員）	株式会社新農林社代表取締役社長
	北野　雅治	（連携会員）	九州大学大学院農学研究院教授

古在　豊樹（連携会員）　　千葉大学名誉教授
後藤　英司（連携会員）　　千葉大学大学院園芸学研究科教授
鈴木　義則（連携会員）　　九州大学名誉教授
野並　　浩（連携会員）　　愛媛大学農学部教授
橋口　公一（連携会員）　　大阪大学接合科学研究所招聘教授、
九州大学名誉教授
橋本　　康（連携会員）　　愛媛大学名誉教授
早川　誠而（連携会員）　　山口大学名誉教授
宇部市公園整備局緑と花と彫刻の博物館
「ときわミュージアム」企画監
山形　俊男（連携会員）　　東京大学名誉教授、
独立行政法人海洋研究開発機構
アプリケーションラボ所長
安永円理子（特任連携会員）東京大学大学院農学生命科学研究科准教授

この記録の作成にあたり、以下の方にご協力をいただきました。
森田　敏　　農研機構九州沖縄農業研究センター

目次

はじめに　1

１　温暖化に対応したイネの栽培技術改変　2

２　園芸作物栽培に及ぼす気候変動の影響と対策―果樹栽培を中心として―　6

３　作物病害における温暖化の影響と対策技術　10

４　画像情報等の作物生産における温暖化対応技術への応用　14

はじめに

2013 年の IPCC5 次報告によれば、気候変動の原因の 95%は人間活動にあり、現在の化石エネルギーに依存した経済成長が続けば、今世紀末には世界の気温は 3.7℃上昇し、海面は約 1m 上昇すると予想されている。地球規模の温暖化によって、乾燥化や塩類集積による耕作可能地の減少、作物の栽培適地の移動、新規病虫害の発生など、近未来の人類の生存にとって大きな負荷が生じることが懸念される。

日本学術会議農学委員会農学分科会は同育種学分科会および同農業生産環境工学分科会とともに公開シンポジウム「気候変動に対応した作物栽培技術の現状と展望」を開催し、温暖化などの気候変動が作物栽培に及ぼす影響の実態とそれに対応した研究・技術開発について最新の成果を紹介した。

本シンポジウムでは、イネ、園芸作物および作物病害における温暖化の影響と対策技術、また、画像処理技術の温暖化対策への応用を取り上げ、参加者に幅広い情報を提供して、問題点の把握、今後の対策などについて議論をおこなった。

それらを踏まえて、講演者が更に内容を充実させたものが本記録である。今後の温暖化対策の新たな技術開発などに活用されることを希望するとともに、同様の議論を重ねている育種学分科会等と連携しつつ、第２３期の農学分科会および農業生産環境工学分科会での本課題に関する更なる議論につなげたい。

1　温暖化に対応したイネの栽培技術改変

森田　敏（農研機構九州沖縄農業研究センター）

近年、水稲の登熟期の高温により、米のデンプン蓄積が不十分となる白未熟粒や玄米充実不足の発生が増加するなど高温登熟障害が頻発している。猛暑が広範囲で長期間続いた2010年には全国的な被害に至った。地球温暖化の進行により、今後、高温の程度や頻度が増加することが懸念されるため、高温登熟障害のメカニズム解明と対策技術の開発を急ぐ必要がある。

白未熟粒は、出穂後20日間の日平均気温が26℃前後を超えると増加し始める。また、登熟初期の高温で胴割粒も増加することが明らかになっている。さらに、白未熟粒に並ぶ主要な落等要因である玄米充実度の低下（玄米表面の溝が深くなる）も高温で助長される。

白未熟粒は白濁の位置などによりいくつかのタイプに分かれる（図1）が、このうち高温で主に増加するのは玄米背部が白濁する背白粒と基部未熟粒である[1)]。また、これらのタイプの未熟粒が稲体窒素濃度（あるいは玄米窒素濃度）の低下に伴って増加することも明らかになっている[2)]。一方、玄米内部が白濁する乳心白粒は、主に日照不足により発生するが、登熟期の異常高温や高温乾燥風でも発生することが明らかになっている。2007年の九州南部の早期コシヒカリでは、出穂後の日照不足の直後に台風の通過に伴う高温乾燥風を受け、大量の乳白粒が発生した[1)]。また、日照不足による乳白粒は、籾数が多い場合に増加し、稲体窒素濃度との関係はしばしば不明瞭になる。

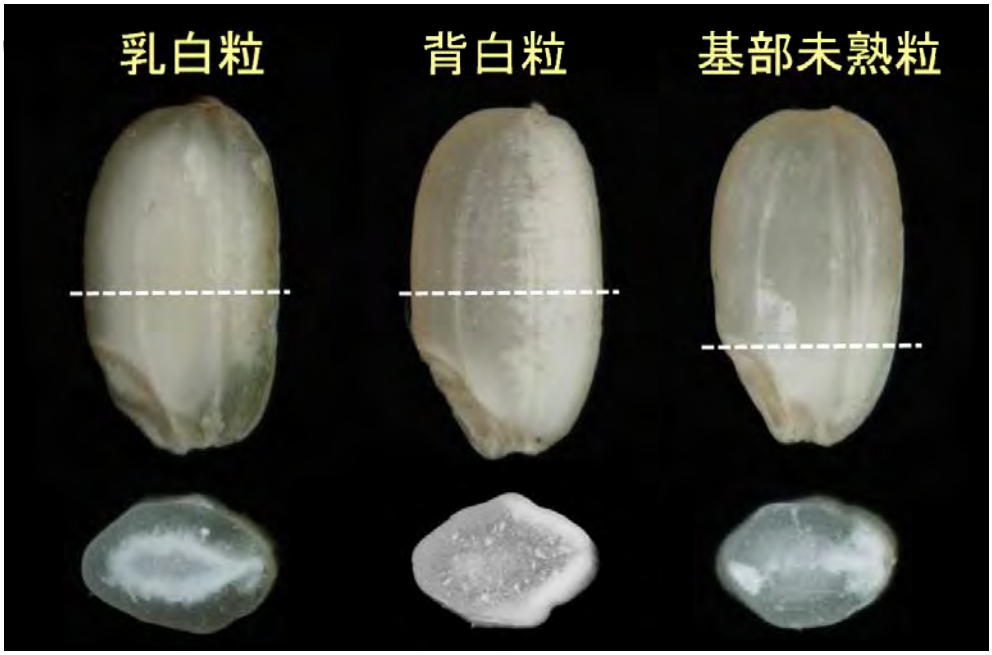

図１　高温登熟条件で発生する主な白未熟粒の外観と断面画像

白未熟粒の白濁部では、デンプン蓄積が不十分なために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。このため、白濁部でデンプン蓄積が不良になるしくみを白未熟粒のタイプ別に明らかにすることがメカニズム解明のポイントになる[2)]。

背白粒・基部未熟粒における白濁のメカニズムの詳細は明らかになっていないが、発生条件から類推すると、玄米の炭水化物受入能力（デンプン合成能力や玄米背部維管束等の転流能力）が高温かつ窒素不足条件で早期に低下するために、登熟後半にデンプンが蓄積される背側が白濁すると考えられる。

乳白粒については、これまでの研究から１籾あたりの炭水化物供給量が一時的に不足することにより、登熟初～中期にデンプンが蓄積する玄米内部が白濁すると考えられている。また、胚乳内のα－アミラーゼの遺伝子発現レベルが高温によって高まり、デンプンから糖への分解が促進されて乳白粒が発生することも報告されている[3)]。さらに、登熟初中期の高温乾燥風による乳白粒の発生は、乾燥ストレスに対する植物共通の適応戦略である「浸透調節機能」が関係していることが示唆されている[1)]。今後は、これらのメカニズムの相互の関連性など、さらに詳細な検討が必要である。

胴割粒については、最近、高温による胴割れ発生の品種間差異が明らかになり[4)]、今後はその知見を活用した品種間差異のメカニズムの解明および耐性品種の育成が期待される。

玄米充実度は、玄米表面の縦溝が深くなること、あるいは粒厚が薄くなる（偏平になる）ことを指すが、検査の現場では達観で評価される形質であるため、どのような品種や栽培法で充実度が向上するかという研究は進んでいなかった。筆者らは、近年、玄米の溝部分における輪郭カーブの曲率(変化率)に注目した新たな数量的評価法を提案し[5)]（図 2)、高温登熟条件で白未熟粒の発生が少ない品種「にこまる」では、玄米充実度についても、感受性品種「ヒノヒカリ」よりも、高温登熟条件で低下しにくいこと、穂揃期に枯葉が少ない

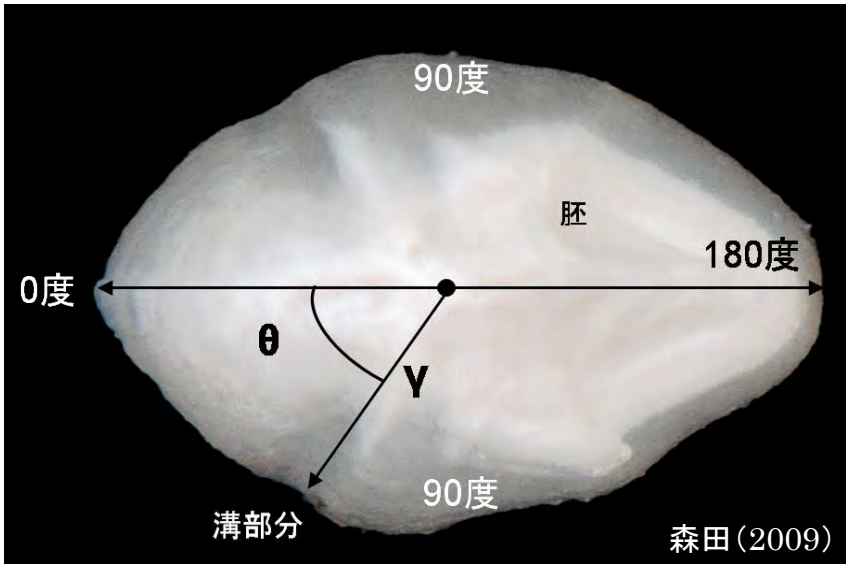

図 2　玄米充実度の数量的評価法における輪郭カーブの見方
輪郭の軌跡は玄米の中心から表層方向への角度と距離で表し、溝の深さは背側から 50～60 度の曲率（輪郭の軌跡の変化率）で評価する。

ほど充実度が低下しにくいことなどを明らかにした。

これら高温登熟障害のメカニズム解明を進めることは、対策技術の開発に大きく貢献すると考える。例えば、「にこまる」では「ヒノヒカリ」に比べて穂揃期の茎内における貯蔵炭水化物（NSC）が多く、登熟期の光合成が抑制されるような高温寡照条件においても、それまでに茎内に蓄えた NSC を使って登熟が向上することが明らかになってきている [1)]（図 3）。他にも耐性のメカニズムは複数明らかになってきており、今後は、これらの鍵遺伝子を明らかにすることで、複数の耐性遺伝子を集積したスーパー耐性品種の開発が可能になると考えられる。また、高温障害の軽減に効果がある窒素施肥は、過剰になると玄米タンパクの増加を介して食味低下のリスクを高めることになるが、窒素による高温耐性向上のメカニズムが解明されることで、食味向上と両立できる施肥技術、あるいは代替技術が見出される可能性もある。

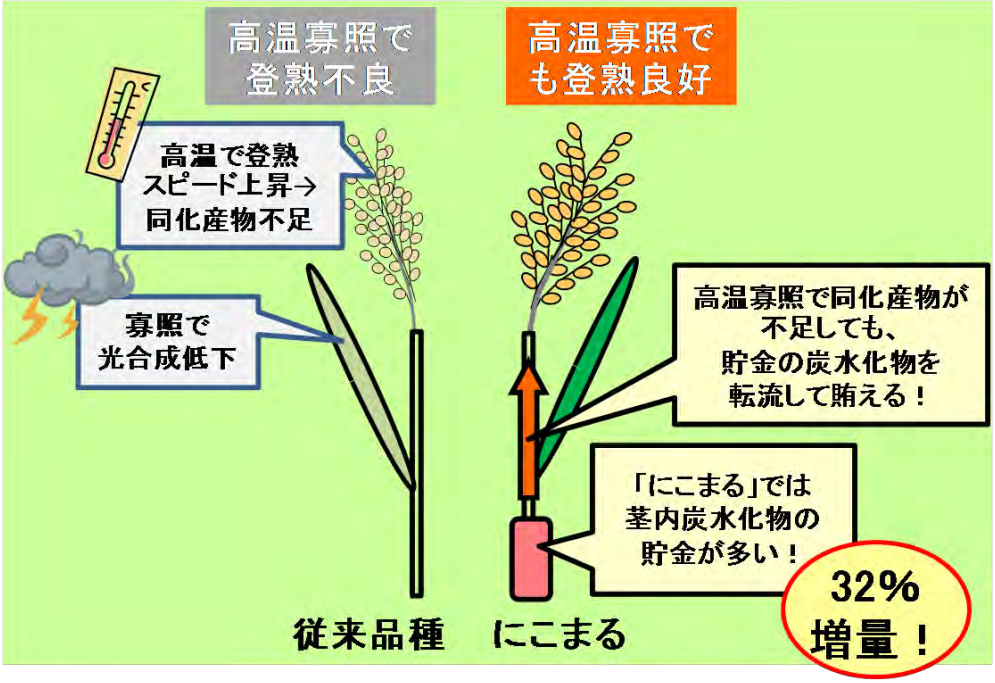

図 3　高温登熟耐性品種「にこまる」では茎内炭水化物が多いことで登熟が良好になる

高温登熟障害の対策技術を高温への対峙のしかたによって分類すると [1)]、まず、高温回避型と高温耐性型に分類できる。また、別の視点として、作付け時からあらかじめセットしておく予防型技術と、栽培の途中で高温が発生してからあるいは高温が予測されてから施す治療型技術に分類できる。例えば、すでに多くの県で進められている遅植えは、作付け時の選択であるため予防型であり、また登熟気温の低下を狙った高温回避型であるが、同時にイネの形態・生理の変化を通した高温耐性型である可能性もある。品種も予防型であり、近年育成された耐性品種の品質向上効果が実証され、普及が進んでいる。

治療型かつ高温耐性型の技術は、インフルエンザに例えると発症後に処方される抗ウィ

ルス薬に相当し、高温障害においてもこのような処方箋があれば、生産者にとって大きな安心につながると思われる。現状では、生育後半の窒素施肥が治療型かつ高温耐性型の有望技術の一つと考えられ、九州沖縄農業研究センターでは気象庁による確率予報情報と葉色測定などの生育診断とを組み合わせて窒素追肥の判断を行う「気象対応型栽培法」(図 4)の確立に向けて試験を重ねている [1)]。将来的には、インターネットを活用した情報発信に結びつけたいと考えている。

図 4　「気象対応型栽培法」の考え方

2　園芸作物栽培に及ぼす気候変動の影響と対策　−果樹栽培を中心にして−

米森敬三（京都大学大学院農学研究科 果樹園芸学分野）

地球温暖化の問題が取り上げられるようになってから久しい。地球上の各地域の気温の上昇や海水面の上昇が見られるとのデータが2007年のIPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change；気候変動に関する政府間パネル）の第4次評価報告書に明記されるとともに、この大きな要因として大気中の温室効果ガスとしての二酸化炭素濃度の増加があげられている。また、この二酸化炭素濃度上昇に関して、A1、A2、B1、B2という今後の成長シナリオを考えた場合の気温上昇のシミュレーションモデルが提唱され（図1左）、A1はさらにA1F、A1T、A1Bに細分され、このそれぞれのモデルでの将来のさらなる気温上昇程度を予測している（図1右）[1)]。さらに、2013年6月にはIPCCの第一作業部会（WG1）の第5次評価報告書の原案が公表され、温暖化の悪化と海水面の一層の上昇が示され、地球温暖化の進行を警告している。

確かに、これまでのデータによると、日本でもこの100年間での平均気温の1.07℃の上昇や日降水量が100mmあるいは200mm以上の年間日数の増加などが示され、温暖化の影響が示唆されている[1)]。ただ、今後の温暖化の進行がどの程度となるかはIPCCでのシミュレーションモデルによっても大きく異なり、2013年6月に公表された第5次評価報告書原案のデータにおいても、2081〜2100年での気温シミュレーションで、最も気温上昇が起こるとされるシナリオでは2.6℃〜4.8℃の幅があり、さらに最も気温上昇が少ないシナリオでは上昇範

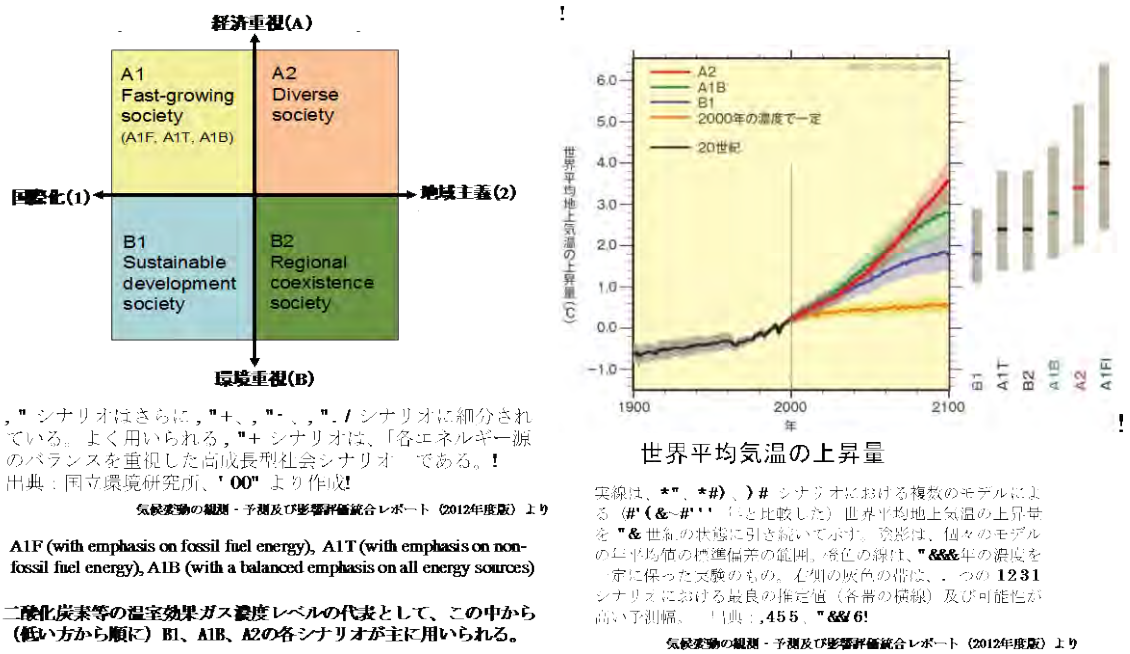

図１　気候変動に及ぼす異なるシナリオ（左図）とそれぞれのシナリオのもとでの将来の気温上昇のシミュレーション（右図）

囲は0.3℃〜1.7℃と予想されている。さらに、二酸化炭素の温室ガス効果程度についても

研究者によって異なる考え方がある。すなわち、二酸化炭素が現在の二倍の濃度になったと仮定すると、気温が約1℃（0.8～1.2℃）上昇するということは研究者間では異論はないようであるが、この温度上昇によって大気中に増大する雲が温室効果にどのように作用するかは研究者によって見解が異なるようで、雲を作っている水は温室効果が大変強いので、二酸化炭素倍増による1℃の上昇を雲は2～3℃あるいはそれ以上上昇させるとする研究者がいる一方で、雲は昼間の太陽光を反射するため、夜間の保温効果はあるものの、雲の存在は結果的には二酸化炭素上昇で生じた気温の1℃の上昇を0.8℃や0.5℃に減らすと主張する研究者も存在している[2)]。このように、どの程度の気温上昇を将来的に見込むかは現時点では不確定要因が多いようにも思える。しかしながら、都市化が進行することでのヒートアイランド現象による気温上昇は明らかに認められ、今後も日本を含めた各国でこの都市化が進んだことに起因する温度上昇が起こると予測されるので、将来的なある程度の気温上昇は覚悟しておく必要があるだろう。そこで、園芸作物のうち、特に温暖化の影響を受けやすいと考えられる永年性作物である果樹に注目して、その栽培への影響とその対策を考察してみた。果樹は作型の調節や栽培地の移動が困難であるため、果樹が現在栽培されている地域では直接的に温暖化の影響を受けることが考えられる。

これまで、果樹栽培における地球温暖化の影響を考えるとき、一般的によく問題視されるのは落葉果樹の休眠である。落葉果樹は温帯地域で冬を安全に越すために、落葉して見かけ上の成長を停止する休眠現象を示す（図２）。落葉果樹の冬季の休眠には自発休眠および他発休眠があり、他発休眠は自発休眠が覚醒しているにもかかわらず、低温環境によ

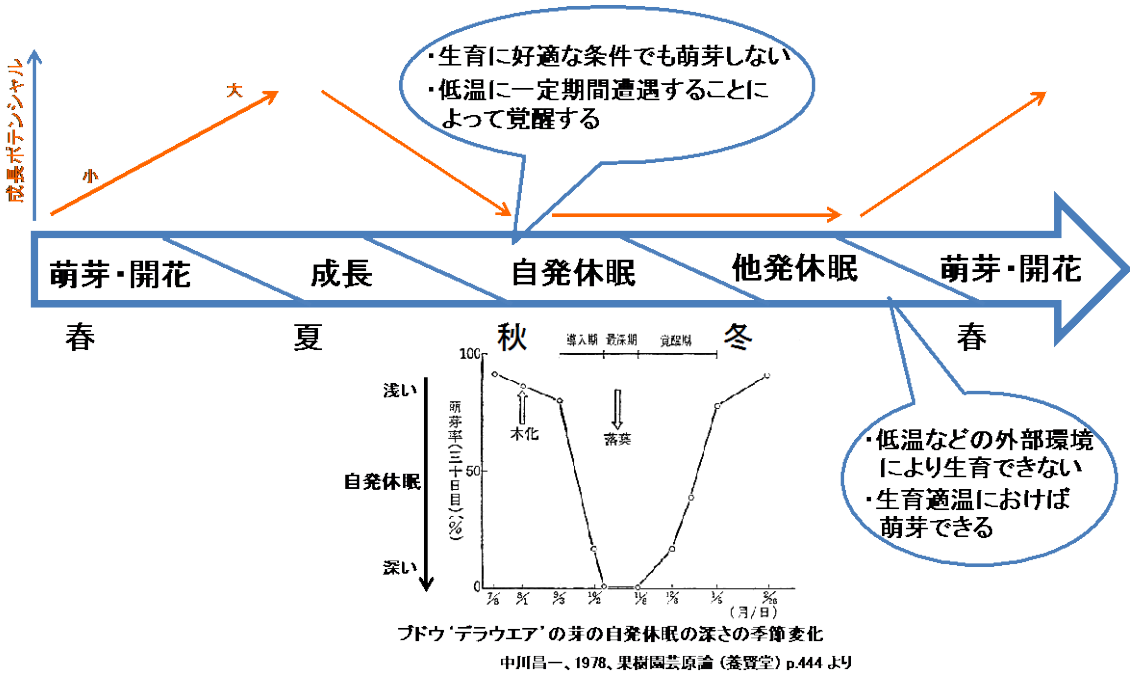

図 2 落葉果樹の成長サイクルと休眠

って発育ができない状態であり、この状態の時は生育適温におけば萌芽して発育を開始で

きる。しかしながら、自発休眠は生理的に発育を再開できない状態であり、この状態の時には発育適温においても果樹は萌芽しない。従来から知られているように、この自発休眠の覚醒のためには、低温要求量というものがあり、Chilling Hours Modelと呼ばれるモデルで提唱されているように、6℃～7℃以下の低温に一定時間以上さらされる必要がある。さらに、休眠期に遭遇する比較的高温は低温蓄積時間を相殺するため、休眠覚醒のための温度域に重みづけをして低温蓄積量を決定するUtah Model（Chill-Unit Model）がより正確に休眠打破時期を算出できるとして、アメリカをはじめ広く世界で使用されている。地球温暖化による冬季の気温上昇は、この低温要求量を満たすことを妨げ、休眠打破を不十分にする可能性があり、現在の栽培地での落葉果樹栽培に大きな影響を与えるとの意見が多い。しかしながら、休眠期に受ける15℃程度の温度と6℃～7℃の低温の日周期は、低温一定よりも休眠打破に効果が大きいことが実験的に示されおり、このようなマイルドな温度の正の効果を考慮したDynamic Modelで算出するChill Portionによる休眠打破時期の決定が提唱されており、イスラエルやカリフォルニアでは、このモデルが最も実際の休眠打破時期の決定と一致することが報告されている。

そこで、このDynamic Modelを用いて、IPCCの第４次報告に見られる将来の温暖化のいくつかのシミュレーションを用いたカリフォルニアの果樹栽培における休眠に及ぼす将来の温暖化影響を評価した報告をみると、Chilling Hours ModelやUtah Modelでは温暖化による負の影響が強くあらわれるが、Dynamic Modelではそれほど大きな影響は認められなかったとしている[3)]。さらに、Dynamic Modelによる全世界での地球温暖化の休眠打破への影響を考察したところ、南アフリカや南オーストラリアなどのより暖かい地域では将来的な温暖化によるChill Portionの減少が起こるが、温帯地域ではどのシナリオでもそれほど大きな変化は受けず、カナダ、南部スカンジナビア半島、東ヨーロッパなどの低温地域ではかえってChill Portionを増加させる場合があるという結果が示されている[4)]。

一方、温暖化によって春先に不時の高温が訪れ、その後、例年の低温に戻ったりすることが起きた場合、果樹栽培には大きな寒害被害が認められる可能性が考えられる。すなわち、自発休眠覚醒後に温暖な温度に遭遇した場合の早期生育（萌芽・開花）開始は、その直後に低温が再来した場合、そのステージが低温に弱いため、果樹は甚大な寒害を被る。このことは温暖化による春先の温度上昇が見られた場合には大きな問題になる可能性がある。ただ、本当に温暖化が進行した場合には、不時の低温が高温の後に訪れる可能性は考えにくく、この意味で温暖化の影響はやはり確定できないように思う。

このように、落葉果樹の自発休眠や自発休眠覚醒後の高温と低温の到来による寒害への温暖化の影響の大きさには不確定要因も存在する。ただ、気温上昇はある程度確実であるので、自発休眠覚醒のための低温要求量の低い品種の育成や寒害防止のための萌芽が遅い品種の育成などの対策を考慮していく必要があろう。

また、近年、ブドウ栽培では着色系品種での着色不良が問題となっており、温暖化の影響が現れている可能性が指摘されている。ブドウの着色はアントシアニンによっており、

この色素合成のためには低温、特に気温の日較差が必要であることが実験的に示されている。温暖化による気温上昇はこの着色に大きく影響を及ぼす可能性が示唆されており、この対策も考慮する必要がある。さらに、ヨーロッパでもワイン用ブドウ栽培において温暖化による品質低下が問題となっていると報告されている。これらに加え、生育期の高温による果実の日焼けやウンシュウミカンの浮き皮の問題も指摘されており、新たな栽培的手法による被害軽減方法の模索が必要であろう。

ただ、上述の自発休眠打破に及ぼす温暖化の影響にも見られるように、適用する休眠打破モデルによってその影響がかなり異なり、地球温暖化が果樹栽培にどの程度の影響を与えるかは、マスコミ等が強調するような極端なシナリオによる被害に注目するだけでなく、冷静に今後の事態を見極めることも重要である。果樹栽培においては立地条件による微気象が大きな要因となり得るため、一般的な平均気温だけではその影響を判断できない場合が多い。また、果樹栽培では品種特性も大きく影響するので、品種の気温特性を把握してその影響を総合的に判断する必要がある場合も多い。気候変動による地球温暖化の影響が果樹栽培にどの程度の被害を与えるかは現時点では明確でない場合も多いのではないだろうか。

なお、果樹栽培以外の園芸作物の栽培、すなわち野菜栽培や花き栽培においても、地球温暖化の影響を考慮する必要がある場合が考えられる[5,6]。温暖化による気温上昇は、露地野菜では基本的には作期や産地の移動によってその影響軽減が可能であると考えられるが、この場合でも個々の産地が作期をかえた場合、全体の供給がどのように変化するかの予測がつかず、温暖化の影響が生じる可能性があることが指摘されている。また、施設栽培では果菜類の場合、夏季の高温による着果不良、果実肥大不良、着色不良、日焼け果(トマト、ナス、ピーマン)、尻ぐされ果の発生(トマト)、花芽分化の遅れ(イチゴ)などの問題が報告されている。さらに葉根菜類では、抽苔(レタス、ダイコン)、チップバーン(葉の先端部の枯れ:レタス) などの生理障害、軟弱・徒長化、結球不良などが指摘されている。一方、花きでは栽培が極めて多種にわたるため温暖化の影響は多様であると考えられ、一概には考察できない場合も多い。ただ、一般的には、開花期の前進・遅延(キク、カーネーション、リンドウ、トルコギキョウ)、奇形花の発生(キク)、生育不良・品質低下(バラ、シクラメン、アルストロメリア)、高温ロゼット(トルコギキョウ)などが指摘されている。今後、これらの園芸作物においても、果樹栽培同様、極端な温暖化シナリオに注目するだけでなく将来の影響を冷静に見極める必要があるように思われる。

3　作物病害における温暖化の影響と対策技術

白石友紀（岡山県農林水産総合センター生物科学研究所）

はじめに

21 世紀になって、温暖化傾向が一層顕著になった。その影響は、風土に依存する農林水産業に大きい影を落としている。マスコミには、白未熟粒や胴割れ米、ブドウの着色不良などの記事が毎年掲載される状況で、栽培者の多くは、「温暖化」の影響を指摘している。一方、今冬、米国では異常寒波が 12 月から続き、寒気と降雪によって冬小麦やオレンジの凍害が発生している。このように気象変動の振幅が激しくなっている。地球温暖化による世界の食料生産に及ぼす影響については、2007 年 4 月の IPCC 第 4 次評価報告書を参照いただきたい。IPCC の第 5 次評価の第 1 作業部会（科学的根拠）の報告は、2013 年 9 月に提出された。第 2 作業部会（影響評価）の報告は、本年 3 月に提案される予定である。

異常気象あるいは温暖化が果樹や作物などに多大な生理的な影響を与えていることは疑いない。平均気温が 1℃変化すると、森林を形成する 3％の植物種が失われるという。これは、生理ストレス、植物間での競争力や環境適応力（土着の病害虫への抵抗力含む）の低下、また、新規病害虫の侵入が一因といわれている。一層ドラスティックな影響としては、風水害や高温・低温、乾燥等による直接的な被害を始め、耕作地や水利施設等栽培基盤の破壊等であることは疑いない。しかし、後者の対策としては、強固な施設、照明や温湿度管理等人為的な制御が必要となる（通常の耕地を用いた栽培は行えない）為、ここでは取り扱わない。

土着の病害と異常気象

食料生産においては、生産物の 30%以上実に 25 億人分が、害虫（12～14%）、病原体（12～14%）、雑草（10%）等の有害生物によって失われている [1)]。すなわち、食料の安全保障にとって、有害生物の管理は極めて重要な課題といえる。病虫害の発生には、寄生者（病原体や害虫＝主因）、宿主（植物＝素因）は当然のことではあるが、環境要因（誘因）が揃う必要がある。これを、病虫害発生のトライアングルと呼んでいる。例えば、イネの重要病害である「いもち病」は、いもち病菌が罹病性のイネ品種に感染して発症するが、発症の環境条件としては、平均気温 20～21℃では湿潤時間が 11 時間以上、平均気温 22～25℃では湿潤時間が 10 時間以上必要である。高温（5 日間の平均気温が 25℃＜）で日照時間が長くなると病気の進展が停止する。これは高温抑制と呼ばれている。こうした理由から、温暖化が進めば、いもち病の激発地帯は現在の東北地方から北海道に移行すると予想されている。これまでの教訓から、本病に対しては、抵抗性誘導剤の処理やマルチラインの利用、また、圃場抵抗性を有する新品種の開発・普及が進められている。

近年、ライグラス類のいもち病が発生し、飼料作物自給への一障害となっている。本病は、イタリアンライグラスを始め 15 種以上のイネ科牧草に発生するが、9 月の日平均気温

22℃線の北上により宮城県や新潟県まで発生が認められている。この病原菌は、イネいもち病菌と同種であるが、発生生態は異なり、気温が上昇するほど多発し、胞子（分生子）の形成は 28℃で最大となり、平均気温が 20℃以下になるまで発生が増加するといわれている[2)]。1970 年静岡県のイタリアンライグラスで初めて発見されたが、これはイネにも感染できた。しかし、1977 年に宮崎で分離された菌株は、イネには病原性を示さなかったことから、新しい系統が発生したものと考えられた。さらに、2008～2010 年の調査によれば、イタリアンライグラスから分離した全ての菌がライグラスだけに強い病原性を示したことから、新系統が発生しているものと推定された[2)]。防除対策としては、西南暖地での 9 月播種を避けるなどの耕種的防除、また、抵抗性品種の利用などである。このように、温暖化にともなって、土着の病原菌から新規病原菌系統が出現し、さらに、発生地域が北上することが危惧される状況にある。

北海道のコムギ生産量は 59 万トン（H24,全国生産量の 68.3%）に達するが、近年問題となっている病害は赤かび病である。秋作コムギの収穫期が湿潤になってきたことに起因する。抵抗性系統の育種は進められているが、これまでのところ強度抵抗性品種はなく、農薬散布無しにはデオキシニバレノール（DON、かび毒の一種）汚染を完全に回避できない状況にある。この他、高温多湿の環境で多発する病害として、イネ紋枯病やイネ白葉枯病があり、関東以西あるいは西南暖地で突発的に大きい被害を及ぼしている。現時点では、紋枯病に対する強抵抗性品種はなく、また、白葉枯病も抵抗性品種を侵す新しいレース（それぞれの抵抗性品種に対して病原性を異にする系統）が出現しており、化学防除が主な保護手段となっている。このように、気象の変動（温暖化）の結果、土着の病原体が大きい脅威となる場合も想定しておく必要がある。

有害生物の移動・新規病害虫の侵入

温暖化にともなって、低緯度地域から日本に侵入したと思われる害虫には、イネミズゾウムシ、イモゾウムシ、ウリミバエ、カンシャコバネオナガカメムシ、カンショオサゾウムシ、ヒロヘリアオイラガ、ミナミキイロアザミウマ、ミナミアオカメムシ、トマトサビダニなどがあげられる。また、侵入が警戒される寄生植物として、ストライガやオロバンキ等がある（病害虫については表１.参照）。

気温や降水など気象の変動が、有害生物の生態にどのような影響を及ぼしているかという点については、これまで想像の域を出なかった。しかし、害虫と病原体など 612 種類の約 50 年間の時間的空間的な発生データの解析から、1960 年以降、これら有害生物は（グループごとの拡散傾向に有意なバリエーションがあるものの）年間平均 2.7±0.8 km の速度で極域へ拡大しているとする報告がある[3)]。最近の 50 年間の地球表層の温度上昇（平均 0.6℃の割合で上昇）と地域レベルの気候変動が原因とされている。高緯度地域には、先進国の食料（穀物）生産・供給基地が存在し、温暖化が進行すると生産力の向上が見込まれそうにも思えるが、実際には、害虫・病原体の生息域の拡大、栽培地域/宿主の北上や

新たな宿主との遭遇などによって、世界の食料安全保障に深刻な脅威となると懸念されている。以下に、現在、日本の食料や果樹生産への脅威となる可能性のある移動病害虫の例を紹介する。

表1. 侵入が警戒されている主な病害虫（植物防疫所HP）

和　名	（学　名）	発生地域
テンテイシストセンチュウ	(*Heterodera schachtii*)	アジア、ヨーロッパ、ロシア、南北アメリカ
バナナネモグリセンチュウ	(*Radopholus similis*)	アジア、ヨーロッパ、南北アメリカ、豪州
＊ジャガイモシストセンチュウ	(*Globodera rostochiensis*)	東南アジア、南北アメリカ、ヨーロッパ、ロシア、北アフリカ
＊ジャガイモシロシストセンチュウ	(*Globodera pallida*)	ヨーロッパ、南アメリカ、インド、カナダ
＊カンキツネモグリセンチュウ	(*Radopholus citrophilus*)	アメリカ
サドンオークデス病菌	(*Phytophthora kernoviae, P. ramorum*)	北アメリカ、ヨーロッパ
＊タバコべと病菌	(*Peronospora tabacina*)	ヨーロッパ、南北アメリカ、オーストラリア
＊ジャガイモ癌腫病菌	(*Synchytrium endobioticum*)	ヨーロッパ、カナダ、南北アメリカ
エンドウ萎凋病菌	(*Fusarium oxysporum f. sp. pisi*)	北アメリカ、ヨーロッパ、豪州、ニュージランド
インゲンマメ萎凋細菌病菌	(*Curtobacterium flaccumfaciens pv. fl.*)	北アメリカ、豪州
スイカ果実汚斑細菌病菌	(*Acidovorax avenae subsp. citrulli*)	タイ、ベトナム、US、グアム、豪州
＊ナシ・リンゴ火傷病菌	(*Erwinia amylovora*)	北アメリカ、ヨーロッパ、西アジア
＊カンキツグリーニング病菌	(*Ca. Liberibacter asiaticus*)	アフリカ、アジア、アメリカ、ブラジル
ジャガイモ痩せいもウイロイド	(*Potato spindle tuber viroid*)	ヨーロッパ、中国、インド、南北アメリカ、ニュージランド
ウメ輪紋ウイルス	(*Plum pox virus*)	ヨーロッパ、中近東、カナダ、チリ、アルゼンチン
＊チチュウカイミバエ	(*Ceratitis capitata*)	アフリカ、南アメリカ、ヨーロッパ、豪州、ハワイ
＊ミカンコミバエ類	(*Bactrocera dorsalis*)	東南アジア、ハワイ
＊ケインスランドミバエ	(*B. tryoni*)	豪州
＊ウリミバエ	(*B. cucurbitae*)	東南アジア、ハワイ、東アフリカ
＊コドリンガ	(*Cydia pomonella*)	日本以外の温帯地域
＊アリモドキゾウムシ	(*Cylas formicarius*)	熱帯・亜熱帯、南西諸島（久米島除く）、小笠原諸島
＊イモゾウムシ	(*Euscepes postfaciatus*)	中国、北アメリカ、太平洋諸島、奄美大島以南の南西諸島、小笠原諸島
＊コロラドハムシ	(*Leptinotarsa decemlineata*)	北アメリカ、ヨーロッパ
＊ヘシアンバエ	(*Mayetiola destructor*)	アメリカ、ヨーロッパ

＊は輸入禁止有害生物

ウンカ類（ヒメトビウンカ、トビイロウンカ、セジロウンカ）は東南アジアや中国本土から日本に飛来することが知られている。2013 年、西南暖地の水田では、主にトビイロウンカの吸汁害により「坪枯れ」が多発した。日本に飛来するウンカは、また、病原ウイルスの媒介者でもある。ヒメトビウンカはイネ縞葉枯病やイネ黒すじ萎縮病、また、トビイロウンカはイネラギットスタント病やイネグラッシースタント病を媒介する。しかし、2008 年、中国で新たにイネ南方黒すじ萎縮病（病原は SRBSDV）が発見され [4]、調査の結果、中国南部やベトナム北部で多発していることが明らかとなった。媒介昆虫はセジロウンカである。2010 年、熊本県の飼料用イネ水田（品種：北陸 193 号、タカナリ）において本病の発症が認められ、その後の調査で、九州 6 県及び山口県、広島県で、主に飼料用イネ（インディカ種とジャポニカ種の交配種：インディカ種の多くの系統はウンカの増殖に対する抵抗性が弱い）に本ウイルス病の発生が確認され、病害虫発生予察特殊報が発表された。本ウイルスはイヌビエなど畦畔雑草にも感染し、越冬可能なヒメトビウンカによっても媒介可能であることから、本病が日本に定着する可能性が指摘されている [5]。現在、ウイルス病やウンカ類への抵抗性育種が進められているが、当面は、農薬に頼らざるを得ない状況にある。しかし、飛来するウンカ類が、東南アジアで多用されているフィブ

ロニルやイミダクロプリド剤への抵抗性を発達させていることが問題を深刻にしている[6]。

病原体の生息域の拡大例として、日本におけるカンキツグリーニング病をあげてみたい。本病は、ミカンキジラミによって媒介される難培養性のグラム陰性菌 *Ca* Liberibacter asiaticus（この他、L. africanus、L. americanus が知られている）によって引き起こされる。カンキツ果実の着色むら（葉では葉脈以外の黄化など）を起こす（緑色部が残る）ことからこのように呼ばれているが、感染木は数年で枯死に至る恐るべき病害である。図１のように、本病は 19 世紀後半にはインドや台湾で確認されていたという。日本においては、1988 年西表島で罹病木が発見され、1997 年沖縄県全域に移動規制が行われた。しかし、2002 年鹿児島県奄美群島の与論島で発生が確認され、その後の調査で、奄美大島を除く奄美群島全域で発病木が見出され、現在では喜界島以南の島々に本病が広がっている[7]。本病の北進が続けば、関東以西全域におけるカンキツ栽培の大きい障害となるが、今のところ、カンキツ類の移動の制限、罹病木の伐採と焼却、媒介者の駆除、無病苗の植付けなどの対策により沈静化しつつある。

現時点では、検疫（宿主/病害虫の移動の禁止）、総合防除・環境保全型病虫害管理、抵抗性育種などの対策がとられており、ウリミバエの根絶事業では偉大な成果をあげることができた。しかし、病虫害発生のトライアングルのベースには、人類の活動があり、常に、病害虫や寄生植物(種子)の高速・長距離移動が可能なこと、また、食料生産から消費までの仕組みの中にも、温暖化の一因があることを忘れてはならないであろう。

4　画像情報等の作物生産における気候変動対応技術への応用

大政謙次（東京大学大学院農学生命科学研究科）

人為起源の温室効果ガスの放出や吸収源である森林の破壊などに伴って生じる気候変動の影響は、気温や二酸化炭素の上昇だけにとどまらず、降水量や積雪量、融雪時期などにも影響を及ぼし、また、台風の発生時期や、進路、規模などにも影響する。このような農業気象的な変化は、作物の栽培適地を変化させ、また、新たな病虫害の発生や地域によっては乾燥化、塩類集積、洪水などにより、作物への直接的あるいは間接的影響を増大させる。さらに、農地は、施肥などに伴う N_2O やメタンなどの温室効果ガスの放出源でもある。このため、影響評価や対策のために多くの研究がなされている[1)]。

農業分野での気候変動の影響予測は、全球気候モデル(GCM)による予測結果を、さらに、より細かいメッシュ（画像情報）に細分化し、地域気象や農地作物関係の地理空間情報と組み合わせて使用する場合が多い。しかしながら、予測精度に問題があり、観測データと併せて使用する必要がある。また、最近では、農業の情報化、自動化のために、より詳細な地理空間情報、特に、植物機能のリモートセンシングデータを有効利用する方向にある[2)]。図１は、このための植物機能の階層的リモートセンシングと空間情報解析の概念図である。この図は、実験室レベルの環境応答解析から、ほ場やフィールドを対象とした野外観測、また、航空機や人工衛星からの広域リモートセンシングまでを情報通信技術（ICT）により有機的に結合し、モデル化と併せて、情報の精度向上と広域化を図ろうとするものである。

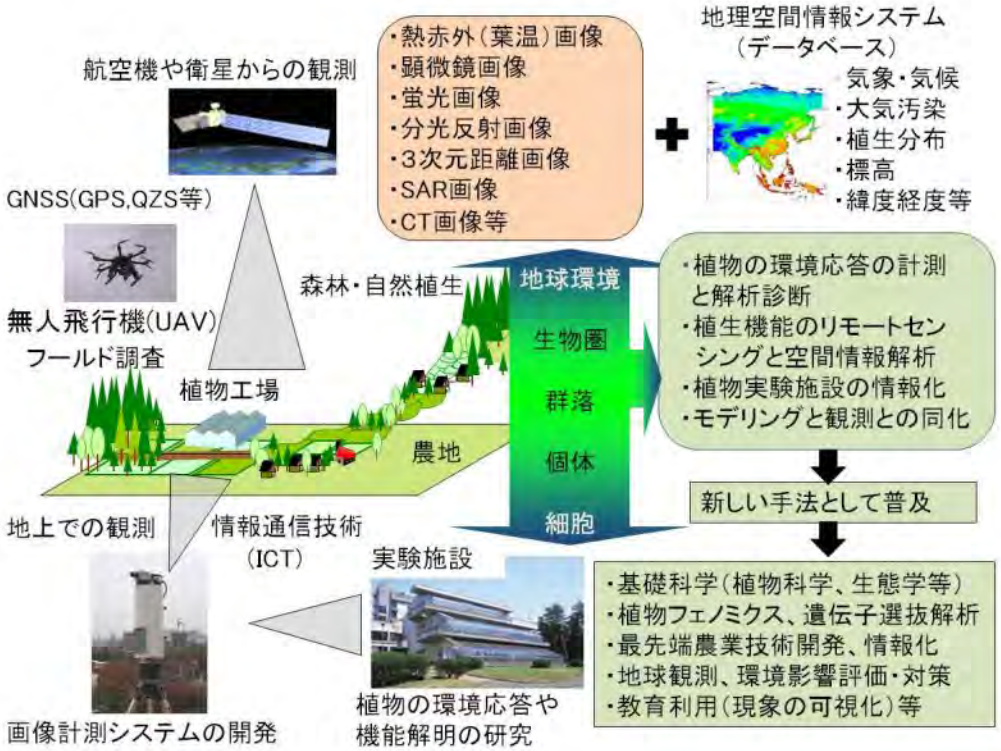

図１　植物機能の階層的リモートセンシングと空間情報解析の概念図

人工衛星や航空機などからの広域リモートセンシングの技術トレンドは、高空間解像度化、高波長分解能化、３次元画像化、高頻度観測、レーザーやマイクロ波などの能動的センサや各種センサのコンポジット利用、観測とモデルとの同化などである。植物機能を計測する場合には、人工衛星などからの広域リモートセンシングでは、特に、空間解像度と高頻度観測の点で問題がある。このため、高空間解像度のセンサ搭載が可能で、より自由度のあるプラットホームからのリモートセンシングが必要とされ、GPS や準天頂衛星(QZS)などの全地球的衛星航法システム(GNSS)の受信機や慣性計測装置(IMU)、無線通信システムなどを搭載したヘリコプターや飛行船、小型無人飛行機（UAV)、また、地上での計測車や農作業車、さらに、高所作業用ブームや伸縮ポールなどを利用したプラットホームからの近距離、植物機能リモートセンシング（リモートイメージング）技術が開発されている（図２)。特に、最近では、搭載重量が数 kg、飛行時間が 10-20 分程度のマルチコプターと呼ばれる電池駆動の小型 UAV が比較的安く入手でき、普及してきている。

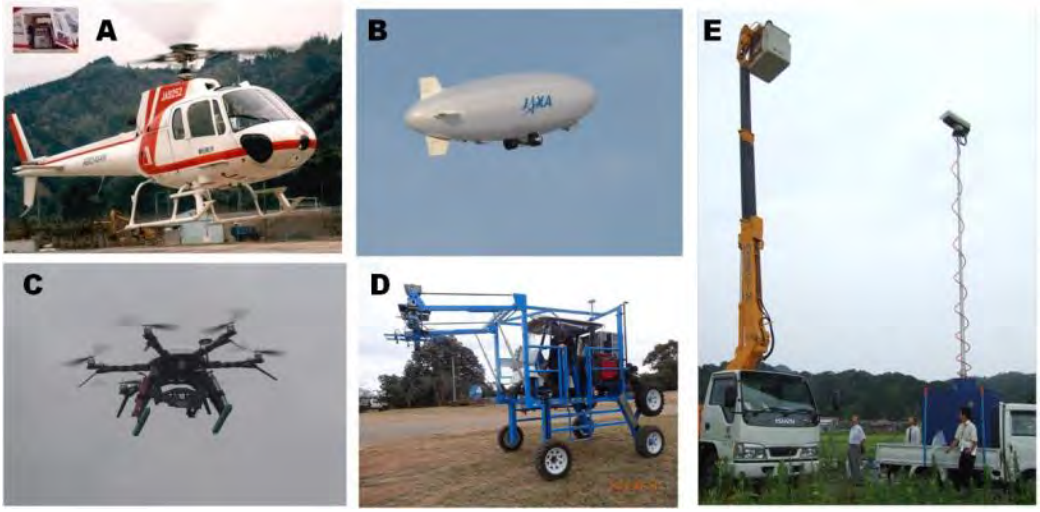

図２　高空間解像度センサが搭載でき、高頻度観測が可能なプラットホームの例。A：ヘリコプター、B：自動走行飛行船(JAXA)、C：マルチコプター、D：ほ場計測車(HRPPC,CSIRO)、E：高所作業ブームと伸縮ポール。ＡからＤは、GNSS と IMU を搭載し、自動走行あるいは位置情報の検知が可能である。

植物機能リモートセンシングは、葉のレベルから植物個体、さらには個体群やより広域の植生を対象としたリモートセンシングまで多種多様である[2-6]。また、遺伝子のスクリーニングや解析などの基礎科学研究ためのバイオイメージングの分野も含んでいる。最近、気候変動などへの適応のための品種開発を目的とした植物フェノミクスの研究分野では、遺伝子や細胞レベルから個体レベルまでの様々な植物情報を数量化し、統計的に処理する必要から、植物機能リモートセンシングの積極的な導入が図られている[7,8]。また、植物工場や土地利用型の最先端農業においても植物診断や自動化のための導入が盛んである。通常のカラーカメラのレベルから、可視から近赤外域を対象としたマルチバンドカメラやハ

イパースペクトルカメラ、また、熱画像（温度）計測用のカメラ、受動的あるいは能動的な蛍光計測システム、３次元計測のためのレンジライダーなど、様々なものが市販あるいは研究用に開発されている。そして、これらの分野では、上述したように無線通信やインターネットなどの ICT や地理空間情報システム(GIS)、GNSS などと組み合わせたシステムの開発が期待される。また、データ量が膨大（ビッグデータ）になることから、クラウドコンピューティング によるサービスが求められる。

筆者は、つくばの国立公害研究所（現国立環境研究所）に就職した 1970 年代中頃から、植物と環境との関係を研究するための植物環境実験施設や実験ほ場における植物機能リモートセンシングに関する研究開発を行ってきた [3-5, 8]。1980 年頃には、環境実験施設や圃場で生育している植物の熱赤外（温度）画像や近紫外～近赤外分光反射画像を、光ファイバ

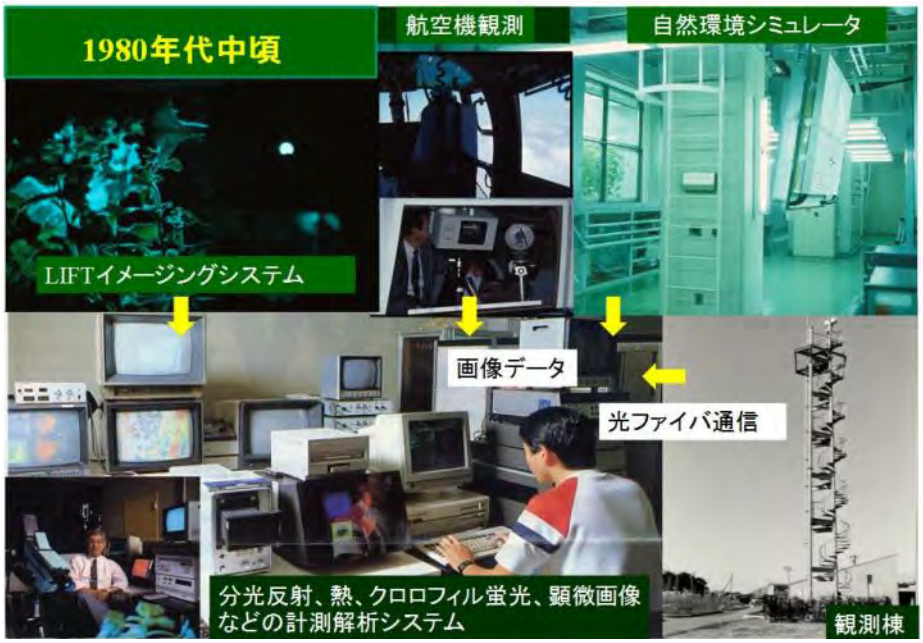

図３　1980 年代中頃の国立公害研究所（現：国立環境研究所）の自然環境シミュレータ制御室に設置された植物機能の画像計測処理システム。

通信（インターネットのように高速ではなく、また、光ファイバも自ら敷設するものであったが）などによりオンラインで自動計測し、解析するシステムを構築し、植物温度や蒸発散、汚染ガス吸収、成長、含有色素などの植物機能情報を取得し、植物環境応答の解析や環境抵抗性あるいは感受性品種の選抜、植物診断、環境影響評価などに利用してきた。これは、最近、注目されている、画像情報を用いた植物フェノミクス研究や最先端農業技術研究の走りといえる。図３は 1980 年代中頃の画像計測解析システムの写真である。分光反射画像や植物温度画像の計測に加えて、光合成機能解析のためのクロロフィル蛍光画像計測システム(LIFT)の写真などが示されている。また、風速と温湿度の成層制御や二酸化炭素や大気汚染ガスの濃度制御、光質や光強度、土壌ユニットの温度、水分状態をなどの

調節できる自然環境シミュレータ（光―大気―植物―土壌系の複合環境実験施設）やほ場の観測棟などの写真が示されている。

図４は、最近行っているコロンビアの国際熱帯農業研究センター（CIAT）との植物フェノミクスに関する共同研究の例である。植物フェノミクス研究は、植物のもつ表現型(Phenotype)を遺伝子型と環境の両面から研究しようとするもので、最近、形質に関する多くの情報を得ることのできる植物機能の画像情報利用が国際的に注目されている。CIAT との共同研究は、気候変動対策のための高窒素利用効率イネや乾燥耐性イネの選抜や開発に、植物機能リモートセンシングの技術を利用しようというものあり、CIAT の圃場に形質の違うイネ品種を栽培し、インターネットを利用して東京大学の研究室で、画像情報の解析を行っている。また、東京大学の研究室から CIAT の Web カメラを制御し、観測することも可能である。植物機能リモートセンシングの利用には、このような育種分野への利用に加えて、作物の栽培診断、例えば、栽培時の施肥や灌水管理への利用なども可能であり、今後、より多くの情報を得るための技術開発と ICT と組み合わせた利用法の研究が望まれる。

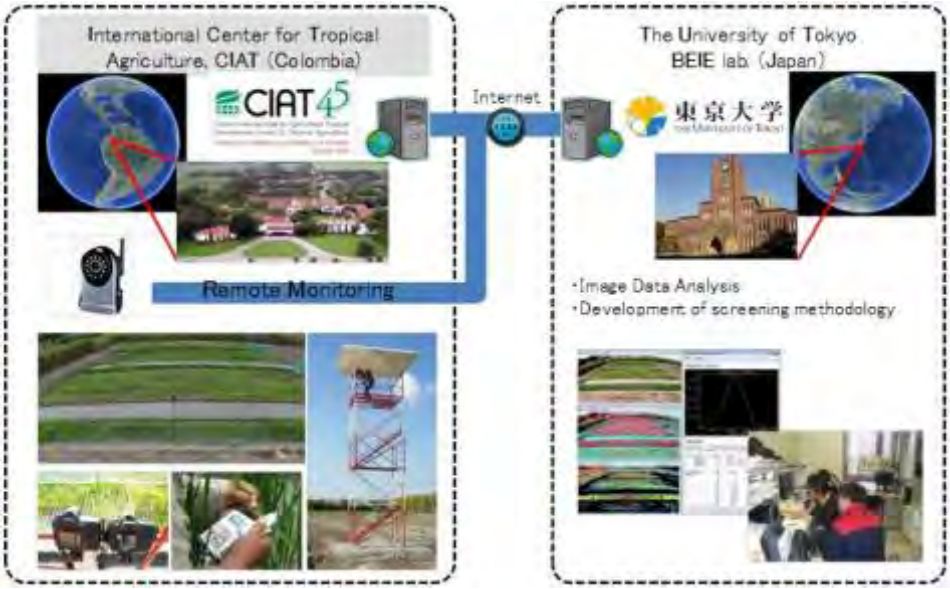

図４　コロンビア CIAT との植物フェノミクスに関する国際共同研究

＜参考文献＞

１温暖化に対応したイネの栽培技術改変

1) 森田敏（2011）イネの高温障害と対策―登熟不良の仕組みと防ぎ方．農文協1-148.
2) 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.
3) Yamakawa, H. et al. (2007) Comprehensive expression profiling of rice grain filling-related genes under high temperature using DNA microarray. Plant Physiol. 144:258-277.
4) 長田健二ほか(2013) 高温登熟条件下における米粒の胴割れ発生の品種間差異．日作紀 82:42 -48.
5) 森田敏（2009）水稲高温登熟障害の生理生態学的解析．九州沖縄農研報告 52:1-78.

２　園芸作物栽培に及ぼす気候変動の影響と対策　−果樹栽培を中心にして−

1) 文部科学省・気象庁・環境庁（2013）気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響（2012年度版）」.
2) 渡辺 正（2012)「地球温暖化」神話 − 終わりの始まり．丸善出版.
3) Luedeling E., M. Zhang, V. Luedeling, and E.H. Girvetz (2009) Climatic changes lead to declining winter chill for fruit and nut trees in California during 1950-2099. Agriculture Ecosystems and Environment. 133: 23-31.
4) Luedeling, E., E.H. Girvetz, M.A. Semenov, and P.H. Brown (2009) Climate change affects winter chill for temperate fruit and nut trees. PLoS ONE, Vol. 6, No. 5, e20155.
5) 板木利隆（2009）気候温暖化が施設園芸におよぼす影響と技術的対応．グリーンレポート（全農） No.478: 2-3.
6) 農林水産省農林水産技術会議事務局（2011）地球温暖化が農林水産業に及ぼす影響評価と緩和及び対応技術の開発．プロジェクト研究成果シリーズ 484.

３　作物病害における温暖化の影響と対策技術

1) Agrios (2005)?
2) 月星隆雄（2009）植物防疫 63：553-556.
3) Bebber, DP. et al. (2013) Nature Climate Change 3, 985-988.
4) Zhou, G. et al. (2008) Chin. Sci. Bull. 53: 3677-3685.
5) 松村正哉・酒井淳一（2011）植物防疫 65：244-246.
6) 松村正哉（2009）植物防疫 63,：745-748.
7) 植物防疫所 病害虫情報 2007.7 ?

４　画像情報等の作物生産における気候変動対応技術への応用

1) 大政他（編著）(2003) 地球温暖化ー世界の動向から対策技術までー 遺伝別冊 17 号
2) 大政（編著）(2007) 農業・環境分野における先端的画像情報利用 農業電化協会
3) 大政他（編著）(1988)植物の計測と診断　朝倉書店
4) K. Omasa.(1990) Image instrumentation methods of plant analysis. In: H.F.Linskens and J.F.Jackson(eds) Modern Methods of Plant Analysis. New Series, Vol.11, Springer-Verlag, 203-243.
5) K. Omasa, et al. (eds) (2002) Air Pollution and Plant Biotechnology, Springer.
6) K. Omasa, et al. (2007). 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. J. Exp. Bot. 58:881-898
7) RT Furbank(ed) (2009) Plant Phenomics. Funct. Plant Biol. 36:845-1026
8) 大政 (2012) 環境科学と「生物環境調節」植物環境工学 24(3):142-149.

＜参考＞

本記録を検討するための農学分科会、シンポジウムの開催

（１） 農学分科会

第１回会議　平成２３年１２月１６日

第２回会議　平成２４年１１月２９日

第３回会議　平成２５年１２月１３日

（２） シンポジウム

公開シンポジウム「気候変動に対応した作物栽培技術の現状と展望」

平成 25 年 12 月 13 日、東京大学