

作物における気候変動の影響と 適応技術

はじめに

地球規模で進行している気候変動が農業へ与える影響は大きく、多くの問題が顕在化しつつある。これに対応するため2018年に公布された気候変動適応法では、政府に「気候変動適応計画」の策定を義務づけている。農水省は2021年10月にその最新版として「みどりの食料システム戦略」に基づいた気候変動に適応するための生産安定技術・品種の開発、普及を推進する気候変動適応計画を公表した（農水省2021）。また、多くの自治体でも「地域気候変動適応計画」策定が進められている。こうした行政の動きは各産地に対し、温暖化対策の導入や、温暖化を前提とした中長期的な生産計画すなわち地域の将来戦略の立案を促すものである。ここでは、農作物に対する影響の顕在化している部分を概観するとともに、その背景にある気候変化との関係や、植物調節剤の活用を含めた対策技術について解説し、関係者間の共通認識の醸成の一助としたい。

1. 気候の変化

長期的な気象の観測結果には、単なる年々変動とは別の変化のトレンドが現れており、これが気候変動と呼ばれているものである。今、起きていていると感じている気象の変化は、一時的なものなのか、それとも地球規模の気候変動のなかで、長期的に起きている変化の一

部であるのかを明確にしておくことは重要である。

国連の機関であるIPCC（気候変動に関する政府間パネル）が、2021年8月に公表した第6次評価報告書（IPCC第1作業部会2021）によると、2011～2020年の世界平均気温は、1850～1900年の気温よりも1.09°C上昇した。気象庁は日本の年平均気温の上昇は世界平均よりも速く進行しているとし、最新の報告では19世紀末からの年平均気温の変化を100年当たり約1.3°Cの上昇としている。とくに1960年以降のわが国の年平均気温の変動をみると、1990年代から大きく変化していることがわかる（図-1）。長く農業を続けている人がさまざまな変化を感じるのはこの変化によるところが大きい。

気温上昇に伴い降水も変化しているものの、毎年の降水量は、気温のような日本全域で認められる変化のトレンドはみあたらない。変化しているのは、雨の降り方であり、「雨の降り方の極端化」と呼ばれる（文科省・気象庁2020）。これは大雨や短時間強雨の頻度が増加する一方、雨が降らない日や降水間隔も増え、極端化したということである。

気温や降水の変化は大気中の温室効果ガス濃度の増加に起因することが明らかになっている。温室効果ガスのうち、二酸化炭素濃度の上昇は光合成速度等を通じて作物の生産性に影響（多くの場合よい影響）することは周知のとおりである。気象庁による国内の観

農研機構果樹茶業研究部門
果樹生産研究領域
杉浦 俊彦

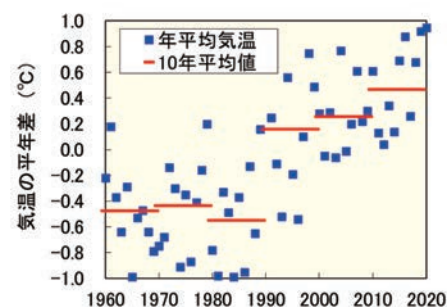


図-1 日本の年平均気温の年平均差の変化
（1981～2010年の平均）との差を示す。
横線は10年ごとの平均値。気象庁のウェブサイトから作成。

測点では、この30年間に二酸化炭素濃度は50ppm程度上昇し、現在は年平均濃度が400ppmを越えている。

一方、多くの気象現象の中でも台風は、農業生産に与える影響が非常に大きいですが、気象庁の解析によると、現状では台風の強度、発生数、日本への上陸数に長期的な変化傾向は見られていない。

2. 気温上昇が農作物に与える影響のメカニズム

気候変化が農作物に与える影響は、作物の種類によってさまざまであるが、その多くは、植物共通の影響が作物ごとに異なる形で現れたものである。植物共通の影響を知ることは、今、作物に現れている現象が温暖化に起因するものなのかの判断の一助となる。もし温暖化が原因であれば、今後はさらに影響が強まる可能性もあり、積極的な対策を検討する必要性がある。

気温上昇が直接の原因となって作物に影響が現れるメカニズムは、長期的

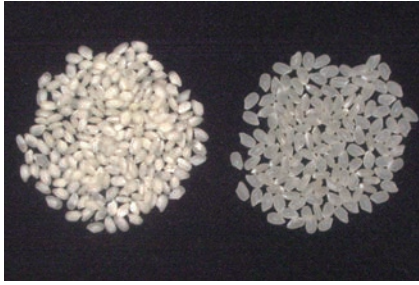


図-2 水稻の白未熟粒(右は健全粒)

な高温(数週間~数ヶ月)によるものと一時的な高温(数時間)によるものがある。前者は、作物の発育(生理的な変化)の速度変化である。例として、春季の温暖化でサクラの開花が早期化しているなどがあげられる。発育速度が最大になるピーク温度があり、ピーク温度より高温になるほど、また、低くなるほど発育速度は低下する。発育速度の変化はほとんどすべての植物で起き、農作物の温暖化の影響といわれるものの多くはこの発育速度変化が背景となっている。一方、後者は極端な高温による不可逆的な高温障害である。具体的には、1日の高温で発生する果実の日焼けや、開花期の高温により受粉、受精、結実などの障害である。

生産環境が気温上昇によって変化することで間接的に起きる影響もある。病害虫や雑草の生態が気温上昇により変化することで起きる影響がこれにあたる。

降水の極端化は、大雨による水害と干ばつの被害の両方を被災しやすい状況になっているといえる。年間降水量に変化がなくても短時間に集中して降れば、土壌にしみこまず流失してしまう水量が増え、加えて気温上昇にともない蒸発散量も増加するため、畑作物にとって重要な土壌水分量は減少しやすい。水分ストレスによる気孔閉鎖が頻発、長期化するため光合成量に及ぼす負の影響が大きい。

物質生産に対する温暖化の影響としては、水ストレスによる光合成の低下に加え、高温による呼吸増加がマイナスの

影響となる。逆に、大気中の二酸化炭素濃度の増加は光合成にとってプラスの影響となる。また、晩秋期から早春期の気温上昇が光合成可能期間を延長させるため、とくに冬作物や常緑果樹などの光合成を増やす効果が大きい。

3. 水稻, 麦類, 大豆における影響

農研機構では、気候変動の影響を網羅的に明らかにすることを目的として、すでに顕在化している気候変動の影響およびその対策についてのアンケート調査を各都道府県の農業関連研究機関を対象に実施した(Sugiura *et al.* 2012)。以下ではこれらアンケート調査や農水省による温暖化影響調査(地球温暖化適応策関係レポート)により明らかになった温暖化の実態の概要を作物別に示す。

水稻では収量に明確な温暖化の影響はまだみられないが、白未熟粒混入など品質低下が発生している。白未熟粒(図-2)は、乳白粒、心白粒など胚乳に白濁をもつ米粒で、出穂後20日間程度の高温により多発し、高温で米粒の発育が速くなる中で同化産物の供給の遅れることが発生要因の一つとなっている。また、登熟期初期の高温等により米粒に亀裂がはいる胴割れ米や、粒の充実不足も認められている。

紋枯病のような高温で発生しやすい病害もあり、また水稻の開花期の気温が34~35°C以上になると受精障害を起こすため、温暖化がさらに進めば

高温不稔発生による収量低下が起きる可能性がある。一方、水稻では、高い二酸化炭素濃度は増収につながるが、その効果は品種によって大きく異なることがわかっている。

麦類では、春季の気温上昇が光合成を増やすものの、開花期以降が高温になると登熟期間が短縮し光合成期間が短くなることがマイナスに作用し、その結果、細粒化や減収が発生しやすい。秋まきの麦類では暖冬で茎立ちが早まること等による凍霜害、稈長増大による倒伏発生もある。

大豆でも、春季の気温上昇が光合成を増やし、稔実莢数や子実数が増加するため増収量につながる一方で、開花期以降の高温は枯れ上がりを早めて収量を低下させる。また、開花期の高温・少雨は落花や落莢を誘発し、その結果、莢数が減少すると、茎葉部に蓄積した光合成産物の莢への転流が十分に行われず、莢は熟しても茎葉部はいつまでも枯れ上がらない青立ちにつながる場合がある。また、土壌水分低下による光合成低下で減収することもある。

4. 果樹, 茶における影響

果樹は気候に対する適応性の幅が狭く、このため、気候変動に対して最も脆弱な作物である。若い果実は果皮が緑色であるが、果実が成熟するにつれ果皮の着色が始まり、リンゴは赤、ブドウは黒紫、カンキツやカキは橙色になる。これは、成熟により葉緑素が消失し、代わりにアントシアンや、カロ



図-3 リンゴの日焼け

チノイドなど色素が合成されるためである。気温が高いと葉緑素の消失や色素合成の速度が遅れ、着色不良あるいは着色遅延が多発する。

温暖化によって開花が早まると同時に、夏秋季の高温で着色が遅れ収穫が遅延すると、果実生育期間が拡大する。その結果としてウンシュウミカンでは果皮と果肉が分離しやすくなり、浮皮の多発につながる。

多くの樹種でみられる日焼け果も発生が増加している。気温が高く果実温度が高まっているときに、直射日光が当たると、部分的に50℃を越えるような高温となる。そのため、樹の日当たりのよい部分において日焼け果が発生しやすい(図-3)。

秋から冬の高温も果樹には大きな影響を及ぼす。この時期の落葉果樹の芽は低温要求性(一定時間低温にさらされないと春になっても発芽や開花しないという性質)をもつステージとして知られている。そのため、暖地のニホンナシやブドウ、モモの加温栽培においては、暖冬年に発芽・開花不良が多発し、大きな問題となっている。

また、秋が暖かい年は、果樹の凍害が多く発生する。樹の低温順化(耐凍性の向上)は低温を受けることで得られる。気温が高いと、耐凍性向上が遅延することで最大耐凍性が発揮されないために、初冬期や厳寒期に強い冷え込みがあると凍害を受ける。凍害を主要因としたニホンナシの発芽不良が露地栽培でも九州などで発症している。

果樹や茶樹において、春になり芽が

動き出すと芽の含水率が急激に増加するとともに耐凍性も急激に低下する。早春季の高温は発芽を早めて晩霜害が発生しやすい状態になっている。摘果作業である程度調整可能な果樹に比べ、茶樹は霜害を受けると高品質で収益性の高い一番茶の減収に直結するため、その影響は甚大である。

温暖化で危惧されるのは、南方からの新病害虫の侵入である。熱帯、亜熱帯のカンキツに発生するカンキツグリーニング病は樹を枯死させ、かつ、農業などによる治療法がない。これは昆虫媒介性の病害で、媒介昆虫であるミカンキジラミは、奄美大島以南に生息するが、2006年に九州の指宿で初めて発見され、分布拡大が懸念されている。

5. 野菜、花きにおける影響

主要な野菜や花きは各地の多様な気候や施設栽培を活用した周年供給システムが構築されているが、気温の変化は生育期間の長さに影響を大きく与えるため、各産地の出荷時に影響する。とくに露地で栽培する葉根菜類の冬から春季に収穫する作型などで、高温により生育期間が短縮するため、収穫期が顕著に前進する。逆に、レタス・ハクサイの夏季収穫では、高温による収穫の遅延が発生している。花きではカーネーションやキクのように需要期が明確なものがあり、出荷期のずれは深刻な問題となる。また、多種の葉根菜、果菜類で夏季の生育停滞による生

産性低下の発生している。

加温施設栽培では、暖冬によって燃料が節約できるため、温暖化のメリットを享受できる。無加温施設であっても冬季は高温で光合成が高くなりやすく生産性を高めることも多いが、一方、夏季の施設内は極めて過酷な高温になるため、トマトでは、受精障害による着果不良、日焼け、しり腐れ、着色不良などが、イチゴでは花芽分化の遅れ、着果不良、ランナー発生不良などが発生する。

トマトでは、葉の展開速度や、3葉ごとの着房速度が高温により速くなる。しかし葉面積がある程度以上に到達した後はそれ以上展葉しても1株当たりの光合成量は増加しないため、果房数が増えると1果当たりの光合成量が少なくなり果実は小さくなる。開花から果実が成熟する収穫までの日数も高温ほど短縮し、光合成産物が果実に転流する期間が短くなってしまいうことも果実が小さくなる原因となる。着果数が増えると、花や蕾に分配される光合成産物も減ってしまうため、その時期に開花した果房で着果数は減少し、これらの果房が収穫を迎える頃に、収穫果実数が減少することにもなる。

高温により、施設内で夏秋季に収穫するキクでは奇形花や花卉の着色不良、カーネーションでは茎の軟弱化、バラでは節数減少による短茎化や、生体重、花卉数、色素生成量の減少、あるいは日焼けが発生し、品質及び出荷率の低下が起きる。

野菜は病害虫で収量が変化すること

が多い品目である。害虫のアザミウマ類、ハスモンヨトウ、コナジラミ類、タバコガ類において、発生の早期化、終息遅延が起きているなど病害虫の変化を通じた温暖化影響も認められる。

6. 気候変動に対応する技術

温暖化の影響に対する対応策は、温暖化適応策と呼ばれる。農業の温暖化適応策には、①生産技術による対策、②温暖化適応品種の利用、③作物・栽培地の転換の3つがある。①は、生産者レベルにおいて比較的導入しやすいため、現在、開発、普及している適応策の多くがこれにあたる。

(1) 生産技術による対策

温暖化の問題のほとんどは高温に起因する障害であるため、作期を変えることや、水・遮光資材の利用等で植物体温を下げられれば効果がある。水稻の白未熟粒は、出穂直後の高温が主な発生要因であるため、この時期に高温にさらさなければよいことになる。出穂期は7月下旬から8月上旬となる場合も多いが、田植えを遅らせて出穂期を遅くすることで、出穂期直後の温度を下げるができる。

水の利用も重要である。水田では用水のかけ流しや、夜間通水など水管理の工夫により水温を下げれば稲体の温度を下げるができる。野菜や花の施設栽培では、水の噴霧で気化熱を奪い、施設内の気温を下げる細霧冷房が普及しており、作物を濡れにくくした



図-4 パッドアンドファン

パッドアンドファン(図-4)もある。

野菜や花の施設栽培では寒冷紗などの遮光資材を展張して遮光し、施設内の温度を下げることは古くから行われている。そのほか遮光剤の利用、ヒートポンプ、株元冷却、地温低下マルチ、循環扇の導入、通気性の改善など多くの高温対策技術がある。

温度を下げずに高温被害を避ける高温耐性の強化手法は、品目、症状により多岐にわたる。一例として、施肥時期や施肥量を変更することや土壌管理によって高温耐性を強化させる技術がある。水稻の白未熟粒発生には温度だけでなく生育後半の窒素不足があるため、適正な穂肥の施用で生育後半に肥切れしないようにすること、早期落水の防止や深耕による根の活力維持などが有効である。ニホンナシの露地栽培での発芽不良に対しては、秋季の過大な窒素吸収が発生要因のひとつとなることから、通常行っている秋季の施肥を翌春まで遅らせることで軽減することが可能である。リンゴでは、窒素吸収が多すぎると着色の低下につながるため、窒素施肥量を減らせば着色改善につながる。

播種期の調整で高温による生育速度に対応することも重要である。麦類の凍霜害発生や稈長増大による倒伏は暖冬による秋季の生育の早期化が要因で



図-5 ウンシュウミカンの浮皮(右は健全果)

あるため、播種期を遅らせることや、踏圧の励行で秋季の生育を遅らせることができる。高温による露地野菜や花きの出荷期のずれは、播種期を前後させることで調整することが基本であり、キクなどでは電照を用いて日長制御をすることで、開花期を調節する技術もある。

果樹などでは植物調節剤の活用効果も大きい。ニホンナシ等の加温ハウスのように暖冬年に発生する発芽不良は、休眠覚醒に必要な低温が不足していることが原因であり、この場合は、発芽促進剤(シアナミド)の利用が考えられる。ブドウでは着色促進剤も開発されている。

ウンシュウミカンでは、浮皮(図-5)の多発が最も大きい温暖化影響であり、全国的に認められる。前述のように果実の生育期間が延びることが、要因となり果皮と果肉の剥離を促し、剥離後に雨に由来する土壤水分を吸収したときに、果皮が膨潤して浮皮となる。したがって、栽培技術で浮皮を軽減するには、①果実の発育を遅らせて果皮の生育を遅らせる、②果実の吸水を減らす、の2つがある。浮皮軽減のための植物調節剤のうち、ジベレリンとプロヒドロジャスモン(ジャスモメート液)の混合散布は①への対応となる。ジベレリンは果皮を若く保つ効果があるため、果実着色が遅れてしまうという副作用があるが、これを回避できる散布条件が明らかになったため、貯蔵ミカンのほか早生、中生ミカンにも適用が可能となっている。詳し

くは農研機構のホームページに掲載されている技術マニュアル「浮皮軽減のための技術情報」が参照できる。②については浮皮軽減効果が登録されている植物調節剤のうち、炭酸カルシウム水和剤（クレフノン）や塩化カルシウム・硫酸カルシウム水溶剤（セルバイン）は果実からの水分の蒸散を促進する作用が期待でき、果皮の吸水を少なくできる。

(2) 温暖化適応品種の利用

高温に強い新しい品種を開発するのは長い時間が必要であるだけでなく、ブランド品種を他の品種に変更する場合は、新品種を消費者に浸透させるまでに、さらに長期間が必要になる。また、樹木である果樹や茶では、一度栽植した樹は30年以上栽培を継続するため、改植は容易ではない。こうしたことから、温暖化適応品種の利用は、生産技術による対策に比べて、開発、導入に時間がかかる中期的な対策といえる。

水稲では温水プール等を用いた高温条件下での育種や遺伝子マーカーの活用により、温暖化対応品種の開発および普及が進んでいる。白未熟粒が発生しにくい品種として、農研機構が育成した「きぬむすめ」や「にこまる」、新潟県の「こしいぶぎ」、千葉県「ふさこがね」、「ふさおとめ」、山形県の「つや姫」などが開発され、その作付面積は年々増加している。

果樹では、リンゴの「紅みのり」、

ブドウの「グロースクロネ」など着色のよい品種や「させぼ温州」など浮皮になりにくいウンシュウミカン、発芽不良の発生が少ないニホンナシ「凍夏」等が育成されている。

(3) 作物・栽培地の転換

その土地では新規となるが、より温暖地向きの作物へ栽培品目を変更する作物転換や、農地として利用されていない寒冷地や高冷地を開墾し、新たな圃場開発が、今後進められる可能性もある。これらは、圃場や農業施設を作り替えるなどの工事や、栽培技術の習得が必要となる。また、これまでに確立した地域ブランドを捨て、新たに産地として認知されることで販路を獲得する必要があるなど、多くの高いハードルが存在することから、長期的な対策となる。

果樹は、将来、適地が北上し、それに合わせた樹種転換が進む可能性がある。例えば、ウンシュウミカンは現在、千葉以西の太平洋側の海沿いの地域が適地であるが、50年後には本州の日本海側や、南東北の沿岸部に移動する可能性がある。こうしたことから、新規果樹の作付けが少しずつ進んでいる。青森、秋田など東北北部のリンゴ産地では、着色不良となりやすい早生品種に代えてモモを栽培し始めている。亜熱帯果樹への注目度も高い。政府は、日本農業に関し中長期的に取り組むべき政府方針を定めた食料・農業・農村基本計画において「これまで輸入



図-6 国産アボカドとして期待される品種のひとつである「ピンカートン」

に依存していた亜熱帯・熱帯果樹等の新規導入や転換など気候変動がもたらす機会の活用を推進する」と2020年の改訂で明記した。愛媛県南部では、早くから亜熱帯性カンキツのブラッドオレンジ栽培に取り組み、産地化に成功している。アボカド（図-6）は国内流通量のほぼ全量がメキシコ等からの輸入であるが、九州や四国の一部地域などで、産地化が試みられつつあり、将来的には国産化される可能性は高い。

温暖化の問題は日本の農村だけでなくグローバルな問題であり、各国でさまざまな問題が発生している。上手に適応することで、農産物の輸出を増やしたり、輸入品を国産に置き換えるなど日本の農業の活性化につなげていきたい。また、世界をリードするような技術開発にも期待したい。

引用文献

- 農水省 2021, 農林水産省気候変動適応計画・IPCC 第1作業部会 2021, IPCC 第6次評価報告書：自然科学的根拠。
- 文科省・気象庁 2020, 日本の気候変動2020, 大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書。
- Sugiura, T. *et al.* 2012. Overview of recent effects of global warming on agricultural production in Japan. *JARQ*, 46, 7-13.