

見解

気候変動に対する国内農業の適応策と
食料安定供給へ果たす農業生産環境工学の役割



令和5年（2023年）9月28日

日本学術会議

農学委員会

農業生産環境工学分科会

この見解は、日本学術会議農学委員会農業生産環境工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農業生産環境工学分科会

委員長	仁科 弘重	(第二部会員)	愛媛大学学長
副委員長	後藤 英司	(連携会員)	千葉大学大学院園芸学研究院教授
幹事	荊木 康臣	(連携会員)	山口大学大学院創成科学研究科教授
幹事	広田 知良	(連携会員)	九州大学大学院農学研究院教授
	高山 弘太郎	(第二部会員)	豊橋技術科学大学大学院工学研究科教授、 愛媛大学大学院農学研究科教授
	位田 晴久	(連携会員)	宮崎大学名誉教授
	遠藤 良輔	(連携会員)	大阪公立大学大学院農学研究科講師
	大政 謙次	(連携会員)	高崎健康福祉大学農学部長・教授、東京大学名誉 教授
	奥島 里美	(連携会員)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 企画戦略本部スマート農業事業推進室
	岸田 義典	(連携会員)	株式会社新農林社代表取締役社長
	古在 豊樹	(連携会員)	千葉大学名誉教授
	谷 晃	(連携会員)	静岡県立大学食品栄養科学部教授
	野口 伸	(連携会員)	北海道大学大学院農学研究院教授
	橋口 公一	(連携会員)	エムエスシーソフトウェア株式会社技術顧問、 九州大学名誉教授
	彦坂 晶子	(連携会員)	千葉大学大学院園芸学研究院准教授
	真木 太一	(連携会員)	九州大学名誉教授
	山形 俊男	(連携会員)	国立研究開発法人海洋研究開発機構アプリケーション ラボ所長、東京大学名誉教授
	吉本真由美	(連携会員)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境研究部門 気候変動適応策研究領域 主席 研究員
	平野 高司	(連携会員 (特任))	北海道大学大学院農学研究院教授

本見解の作成にあたり、以下の方々に御協力いただいた。

小林 和彦	東京大学名誉教授
西尾 善太	東京農業大学教授
畠山 重文	きたみらい農業協同組合マネージャー

本見解の作成にあたり、以下の職員が事務および調査を担当した。

事務	増子 則義	参事官（審議第一担当）（令和5年4月まで）
	根来 恭子	参事官（審議第一担当）（令和5年5月から）
	山田 寛	参事官（審議第一担当）付参事官補佐（令和5年3月まで）
	若尾 公章	参事官（審議第一担当）付参事官補佐（令和5年4月から）
	河野 道子	参事官（審議第一担当）付審議専門職（令和5年3月まで）
	増田 能伸	参事官（審議第一担当）付審議専門職（令和5年4月から）

要 旨

1 作成の背景

近年、農業は、気候変動が与える影響が顕在化し、さらに記録的な高温、豪雨や長雨、日照不足などにより深刻な生育障害、生産性や品質低下などの被害を受けている。その被害を軽減・回避し、生産性を維持・向上させる気候変動への適応対策技術（適応策）の重要性が増している。日本学術会議農業生産環境工学分科会では、農業気象学、農業環境工学の視点から気候変動が国内の農業に与える影響および適応²⁾の現状と今後の方策を、基礎研究の成果だけではなく農業現場の動向を含めて検討し、その結果を取りまとめた。

2 現状および問題点

国内における、イネ、コムギ、ダイズなどの土地利用型農業⁸⁾での作物や飼料作物、野菜や果樹などの園芸作物に対する気候変動の影響と適応²⁾の現状は、次の通りである。

気候変動の影響は、近年の農業技術の進歩（気候変動への適応策の実施効果）を上回るほど大きく、負の影響が顕在化している。新規作物の導入などの適応で正の効果も現れている地域もあるが、多くの地域では、単収（単位面積当たりの農作物収量）の増加が鈍化したり、作物によっては減少を生じている。この現状を打開するためには、気候変動へ適応²⁾した農業を実現する研究開発と農業現場への普及を一層推進する方策が必要である。

気候変動の影響が顕在化する以前から、異常低温、豪雨、長雨、日照不足などの農業気象災害の克服は、農業生産環境工学分野の重要な課題である。近年、気象庁による気象データの利活用の促進、メッシュ農業気象データの開発などの充実化された気象データセットを基盤として、水稻冷害早期警戒システム、栽培管理支援システム、土壌凍結深制御法⁷⁾（初冬の積雪が増加して、土壌凍結が進まなくなった地域において「雪割り（圃場内除雪）」や「雪踏み（圃場内圧雪）」による土壌凍結の深さを促進して制御する手法）など、気象を予測して営農を支援するシステムの開発が進められている。

一方、農業現場では、生産者の減少に伴い水田・畑作の規模拡大が急速に進んでいる。食品産業に係わる民間企業による農業生産も広まり、それらの生産規模、資金規模、人的資源、組織的運営は、伝統的な小規模農家とは異なる特徴を持つ。さらに、農業のスマート化を背景に、先進的な農協では生産履歴と気象・環境データを組み合わせたビッグデータの集積が急速に進んでいる。こうした生産現場の変化は、気候変動への適応²⁾の研究・技術開発を推進するにあたり注視すべきである。たとえば、愛知県のコムギの単収は、近年、畑作王国の北海道を抜いて全国1位を複数年で達成している。この要因は、品種改良や施肥などの栽培法の技術改善に加えて、規模拡大を図った技術水準の高い生産者の取り組みの組み合わせによるものと考えられる。これは、技術開発と既存農家の規模拡大の相乗効果により生産性を向上させた注目すべき事例である。実際、大規模農業地帯である北海道では経営規模の拡大や人手不足が課題とされる中、正確な気象予報による作業計画が一層重要であるとの認識が高まっている。

以上の現状を踏まえて、以下の方策を進めるべきである。

3 気候変動に対する国内農業の適応策に向けた見解

(1) 気象予測型の営農情報支援システムを用いた適応策と緩和策の両立への展開

経営規模の拡大や人手不足が課題とされる中、気象データの利活用による作業計画や対策技術の開発の重要性が増している。また、気象の予測精度の継続的向上、数カ月先予測の高精度化などにより、予測情報の利活用の高度化が見込まれる。したがって、大規模農業を核とした土地利用型農業⁸⁾における気象予測型営農情報支援システムの開発・普及のさらなる推進が、気候変動への適応力の向上に有効である。

さらに、土壌凍結深制御法⁷⁾は、「地域の寒さ」という気象資源を活用し、気象予測手法の活用を図ることで、生産性を向上させる適応策だけではなく、環境負荷低減や温室効果ガス排出の抑制に資する緩和策との両立も実現可能となることを、先導的に示している。これらを踏まえ、各地域のそれぞれ特徴ある気象資源を農業に有効活用すべく、適応策と緩和策の両立を図る研究を積極的に追求すべきである。

(2) 農業生産関連ビッグデータを活用したイノベーションの創出

先進的な農協では、経営情報や農畜産物の生産履歴、土壌分析と施肥設計、リモートセンシングや気象情報、GPS ガイダンスが利用できる環境を整備し、生産者の作業履歴もリアルタイムで把握できるなど、過去から現在までの営農情報や作物の生育に関するビッグデータセンターとなりつつある。そして、ビッグデータの活用が、地域の生産者の営農レベル、経営レベルを大きく向上させる事例も出ている。このような事例を増やすためには、ビッグデータの利用方法について、詳細に研究する必要がある。ビッグデータの活用は、農業現場での生産性向上のイノベーションの原動力になると見込まれる。

(3) 小規模農家も対応可能な適応支援と気候変動適応策の普及

大規模農業を対象とした技術開発のみでは、小規模農家との気候変動に対応する資本的、技術的、情動的な格差の拡大も懸念され、それに対する方策も重要である。

特に、施設園芸では、①小規模から始められ、必ずしも多額の投資が必要ではない、②土地利用型農業⁸⁾と比べ、環境調節の適用が容易である、③高畝栽培や高設栽培により作業性の改善も図ることができ、豪雨対策（浸水、冠水害）にも資するという、気候変動に対して多様な適応手段を有する。このため、小規模から始めても収益性を確保しやすく、新規参入が期待でき、かつ適応策の効率的な展開を見込める点で有望である。

なお、園芸作物では、市場経由で出荷する場合は外観が重視され、インターネットや産直のような直接販売の場合は品質が重視されることが多いため、気候変動適応への栽培対応は、市場経由出荷と直接販売とで異なることも、販売戦略上留意すべき点である。

また、土壌凍結深制御法⁷⁾の開発は、先進的な農家の技術と学術的研究の共創により、一般的な農家も活用できる技術として大きく普及した。先進的農家や民間企業では、小規模農家にはない独自技術や大きな組織力や資本力を活かして開発された技術が蓄積されている。我が国全体の気候変動適応力を向上させるためには、これらの技術やノウハウをより広く農業現場に活かす方策を図る必要がある。

目 次

1	はじめに.....	1
2	気候変動が日本の農業に与える影響の現状.....	2
	(1) 気候変動が作物に及ぼす主な気象要素.....	2
	(2) イネ、ダイズ、コムギなどの土地利用型作物および飼料作物への影響.....	2
	(3) 野菜・果樹などの園芸作物.....	4
3	日本の農業における気候変動適応策の現状分析と展望.....	5
	(1) イネ・コムギ・ダイズなど土地利用型作物.....	5
	(2) 野菜・果樹などの園芸作物.....	6
4	気象予測型営農情報支援システム.....	8
	(1) 気象予測型営農情報支援システムの現状.....	8
	(2) 気象予測の進展と高度化利用への展望.....	9
	(3) 気象情報活用の土地利用型農業と施設園芸への今後の展開.....	10
	(4) 農業気象情報システムの活用の課題と留意点.....	12
5	気候変動適応における民間企業や大規模組織農協の動向事例.....	13
6	農協による農業情報システムの進展.....	14
7	先進的農家における気候変動適応策の取り組み.....	15
	(1) 圃場整備、基盤整備による排水対策の徹底.....	15
	(2) 持続的な高位水準を保つ目標収量の設定.....	16
	(3) 大規模農地での精密管理を可能とする体系.....	17
	(4) 先進的農家におけるデータ駆動型農業.....	17
8	日本学術会議としての見解のまとめ.....	18
	<用語の説明>.....	21
	<参考文献>.....	24
	<参考資料1> 審議経過.....	29
	<参考資料2> 公開シンポジウム「気候変動適応に関する農業分野(民間)の取り組み」:	30

1 はじめに

気候変動による農業生産への様々な影響がすでに顕在化している。さらなる温暖化の進行が高い確信度の下で予測されており、高温、集中豪雨、干ばつなどの異常気象と農業生産への悪影響のリスクがより高まり、農産物の安定供給にこれまで以上に支障を来すことが懸念される[1]。気候変動への対応は国際連合が掲げる持続可能な発展（または開発）目標（SDGs）における重要課題の一つであり[2]、我が国では、環境省より気候変動適応法が公布され[3]、農林水産省が「みどりの食料システム戦略」を策定するとともに「農林水産省気候変動適応計画」を推進している[4,5]。さらに、日本学術会議においても、気候変動に対する農業分野の適応²⁾を、農学分野を挙げて取り組むべき重要課題と位置づけている[6,7]。しかし、この適応に対する取り組みは進行しているが、十分ではない。すなわち、適応の限界とも評価される厳しい現状である[8]。

農業生産環境工学分科会は、農業と気象を対象として、気候変動への適応²⁾に直結する研究分野を有する。本見解では、本分科会での検討に基づき、気候変動に対して農業生産技術が適応していくための科学技術の方向性を、農業現場の動向を踏まえて示す。

まず、国内での気候変動が農業に与える影響を作物別に幅広く概観する。適応については、生産現場の状況を踏まえて現状を報告する。これらは、基礎研究の成果に加えて、農業試験研究機関からの報告や進行中のプロジェクト、現地調査を含めて幅広く、かつ対策に直結する要素も含めて取り上げる。適応の現場での取り組みについて、具体的な事例を示して、多角的視点の提供と今後の展開への示唆が得られるように努めた。

次に、適応の課題について農業生産環境工学分野として取り組むべき方向を論じる。農業気象災害の克服は、気候変動の影響が顕在化する以前から農業生産環境工学分野の重要な課題である。気象予測の精度が短期のみならず中長期でも高くなり、その予測に基づき現場で適切な対策（適応策）ができれば、農業気象災害を相当に克服可能なことは想像に難くない。近年、気象庁でのデータ整備と公開、メッシュ農業気象データの構築など、利活用が容易な気象データセットの充実により、研究に資する技術開発が進展した。加えて、スマート農業化が図られる中で、農業情報システムのインフラも一層整備され、先進的な農協では、目を見張る取り組み例もみられるので、これらの現状と今後の見通しを論じる。

さらに適応が農業現場で適切に実施されるためには、現場での対応力や技術の向上が不可欠となる。その農業現場では、生産者の減少に伴い、水田・畑作の土地利用型農業⁸⁾では規模拡大が進んでいる。また、農家の担い手不足のため、食品関連産業の農業への直接参入も必要に迫られて促された面もある。そこで、本見解では、このような生産現場の規模拡大が気候変動への適応²⁾に与える影響も考察し、今後を展望する。

一方、農業振興のためには多様な農業人材を確保し、小規模農家や新規参入の支援も重要である。国際的にも、欧州を中心に進む小規模、家族経営農業が地域社会に果たす役割を重視する方向への政策転換が進んでいる状況である[9]。農業生産環境工学の分野は、施設園芸での閉鎖系の環境調節や環境制御に基づく知見を通して、高い生産性と効率を実現し、小規模でも収益性を確保できる農業の実現に貢献している。そこで施設園芸における気候変動への適応²⁾に関する展望を一例として示す。

2 気候変動が日本の農業に与える影響の現状

(1) 気候変動が作物に及ぼす主な気象要素

気候変動に伴う作物に及ぼす気象要因としては、まず、気温上昇や極端な高温が懸念される。また、梅雨前線や秋雨前線の停滞や台風等による豪雨災害も激甚化・広域化している。そのため、大雨に伴う浸水（冠水、滞水）被害も生じやすくなる。大雨および短時間強雨の発生頻度は有意に増加する一方で、降雨日数は有意に減少しており、干ばつのリスクも高まっている[10, 11, 12]。また、エルニーニョ現象¹⁾の頻度が高まる傾向では、夏季の長雨や日照不足の可能性も高まると想定される[13, 14, 15]。

凍霜害の発生も気候変動の影響を受ける。凍霜害は、気温が作物の耐凍温度を下回ると発生する。気温の上昇による秋から初冬の低温不足は作物の越冬能力を示す耐凍性を低下させる要因となるため、凍害あるいは寒害のリスクを招きやすくなる面がある[16]。また、凍霜害の発生は、植物季節⁵⁾の変化の影響も受ける。たとえば、作物の発芽時期が早くなれば、春の遅霜の被害を受けやすくなるが、同時に降霜最晩日も早まれば霜害の発生は変化しない。すなわち、気候変動に起因する霜害発生を増減させるのは、発芽日の変化と降霜最晩日の変化の乖離である。一方で、近年、秋の収穫時の霜害の頻度は下がっている。北海道でも近年、秋に霜の害無しとも言われている[17]。冬に作物が積雪に覆われる北海道や東北、日本海側や内陸部の積雪地帯では、積雪が越冬作物を厳寒の気温から保護するが、冬季に積雪が薄く作物が厳寒期に直接寒気に曝されると凍害のリスクが増す[13]。

以降、上記のような気象条件を勘案して各作物への影響を概観する。

(2) イネ、ダイズ、コムギなどの土地利用型作物⁸⁾ および飼料作物への影響

気候変動がイネの収量に及ぼす気象要因としては、まず、夏季の高温が懸念される。登熟期の高温は白未熟米や胴割れ米（米粒の胚乳部分に亀裂が生じる）を生じ、品質低下を招く[16, 18]。一般には登熟期前半（20日間）の平均気温で26~27℃以上が白未熟米の発生を招く目安とされる。高い夜温も未熟米の発生を招き、特に出穂後2週目までに現れやすい[19]。このような高温による白未熟米の発生は、九州から東北まで、広い範囲に及んでいる[16, 18]。なお、白未熟米の発生は高温だけでなく、日照不足でも生じることが元々知られており、北海道を含めて全国的にみられる[18]。近年の懸念される傾向として、北部九州におけるイネ単収が減少気味であることと[20]、九州の普通期作¹¹⁾イネの白未熟粒発生頻度は、高温よりも日照不足に起因する方が多いことである[21]。

開花期前後に日最高気温が35℃以上の日が続くと、受粉の高温障害による不稔の増加も大きい[16, 18]。国内では21世紀以降、2007年、2018年などイネの高温不稔が広域的にしばしば発生した[22]。現時点では国内で高温不稔がイネ収量にまで直接的に影響した事例は報告されていないものの、すでに、熱帯など海外では高温不稔による減収の報告例もあるので注視する必要がある。

フェーン現象によるイネの高温被害（白穂）や登熟期の高温障害は、台風の接近に伴っての発生が多く、気候変動が台風の強度と進路へ与える影響と合わせて注視する必要

がある[18, 23]。また、台風はこれまでも強風、豪雨、潮風害などももたらし、イネに甚大な被害を度々与えてきた[18]。

イネと作付けを同じくするダイズ単収の減少傾向[20, 24] はより深刻である。特に、北部九州は、全国的にもダイズの単収水準が高い地域であったが、近年は“豊作無し、良くて平年作”と言われるほど状況が悪化している。さらにダイズの減収傾向は、北部九州のみならず関東にまで現れている[24]。

土地利用型農業⁸⁾においては大規模農業地帯である北海道が農業生産の大きなシェアを占める。したがって、気候変動が北海道農業に与える影響は、国内の農業総生産量に直結する。北海道は寒冷な気候でイネやダイズなどの農業生産はこれまで深刻な冷害を受けてきた。近年は、2009年を最後に深刻な冷害はないが、夏季の低温は、たびたび生じている。低温の発生時期とイネが低温に最も弱い時期である冷害の危険期と重なっていないため、冷害を避けることができているのが現状である。逆に、イネ、ダイズ、ナガイモ、トウモロコシのような比較的高温を好む作物では気温上昇による負の影響を受けにくい[13]。

一方で、北海道を代表する畑作物のコムギ（全国シェア約7割）、バレイショ（全国シェア約8割）、テンサイ（全国シェア10割）は、冷涼な気象条件に適合しており、2010年以降の高温と長雨により、減収年がたびたび生じている。春の低温と夏の高温の組合せが畑作物の減収のリスクを最も高める。コムギは夏が高温で登熟期間が短縮され、過繁茂で茎数や穂数が多い状態に日照不足が重なると、子実の充実不足で細麦が多発し、製品収量が低下する。開花時期の多雨も収量を減少させる。バレイショは、高温による生育期間の短縮、干ばつ、および日照不足により収量が減少する。また、高温に多雨が重なることで、イモの中心部が空洞となる品質低下を生じる。テンサイは夏から秋の高温多湿条件が褐斑病などの病害発生を助長し、糖分含量の低下を招き製糖量を低下させる[13, 17]。

なお、北海道に次ぐコムギの産地の北部九州は、主力品種が長期間作付けされている地域であるが、近年は増収傾向にある[21]。

その他、前述のようにエルニーニョ傾向¹⁾の条件では、長雨や日照不足の可能性も高まると想定され、このような条件では、作物の光合成量が低下して、病害抵抗性が弱まる中で、糸状菌（カビ・菌類）や細菌が発生しやすい、すなわち、病害が発生しやすくなる。麦類では、降雨が開花期前後に続くことで赤かび病の発生、収穫期の長雨による穂発芽や倒伏による品質低下が懸念される。イネでは、寒冷地ではイモチ病、温暖地では紋枯れ病の発生が多い。さらなる高温多湿下では紋枯れ病のリスクが高まるとみられる[16]。

近年（2015年以降）の北海道は、エルニーニョ傾向¹⁾の影響を受け、夏季に梅雨前線が停滞する頻度が高く、長雨と日照不足により、コムギ、バレイショ、テンサイなどの畑作物で生育不良や収量低下などの影響を受けている[13]。

飼料作物では、負の影響としては、高温による夏枯れ地帯が北上、拡大している[16]。一方で、正の影響としては、北海道では、牛の嗜好性の高い牧草であるアルファルファ

の栽培面積が品種改良、近年の温暖化、道東地方の土壌凍結深の減少等の相乗効果により、拡大している[13, 25]。また、草地の更新は、従来は春から夏の播種に限られていたが、気温上昇に伴い夏から秋以降の播種まで可能になり、播種晩限¹⁰⁾が遅くなる傾向にある[13]。また、北海道は飼料用トウモロコシの栽培面積と収量が増加している[13, 20, 25]。暖地では、気温上昇により飼料用トウモロコシの二期作が関東北部まで可能になってきており[26]、東北でも、牧草と飼料用トウモロコシの二毛作が可能となっている[27]。

(3) 野菜・果樹などの園芸作物

葉菜類や根菜類などの露地野菜は気温により生育期間が強く影響を受ける。特に、冬～春の高温の影響により、生育期間が短縮し、収穫期が早まる傾向にある。冬の高温によるその他の悪影響としては、低温への順化不足による耐凍性の低下、休眠遅延、結球性野菜³⁾の小型化・変形、軟弱徒長などが生じている。他方、レタス、キャベツ、ダイコンなどの葉菜類や根菜類の夏季収穫では気温が20℃を超えると、生育が顕著に停滞するので、収穫期の遅延や収量低下を招く。これらの結果、貯蔵性の低い生鮮野菜類では、収穫期の変動などによる需給ギャップがしばしば生じている[16, 28, 29]。

トマトやナスなど果菜類は、作物により影響の度合いは異なるが、強い日射と高温による果実の日焼け、高温が要因の受精障害、着果不良、小玉化、着色不良、花芽分化の遅延、茎葉の日焼けを生じている。特に施設栽培では、冷房を用いない条件において、露地に比べて高温になりやすいので、このような様々な悪影響が認められる[16, 29]。

葉菜類、根菜類では花茎の伸長や、開花が収穫前に起きる抽苔により、品質低下を招く。抽苔のメカニズムは品目により異なり、たとえば、タマネギは低温により、レタスは高温で花芽分化が促進されるが、花芽分化後は高温により抽苔する。ハウレンソウは高温で成長が抑制されて収穫期が遅れると、その結果、長日条件に遭遇して抽苔する。このように気候変動により抽苔が促進される条件は品目、作型⁴⁾により異なる。気候変動に伴う病害虫の多発も収量低下の大きな要因であるが、発生状況は品目、作型⁴⁾により様々である[16, 29]。

果樹では、強い日射と高温による果実の日焼け、幹・葉の日焼け、高温が要因の生理落果、着色不良・遅延、発芽・開花前進、収穫期変動、果実軟化、貯蔵性低下、果肉障害、果皮障害、果実肥大促進、凍霜害の増加、休眠遅延、萌芽不良、受粉不良が生じている[16, 29]。

果実の食味では、リンゴの“ふじ”の長期データから、気温と密接に関わる糖度は上昇傾向で、酸含量は低下傾向にある。糖度上昇の要因は、春先の温度上昇で発芽や開花が早期化し、果実の生育期間の長期化で光合成量が増加した結果であると考えられ、一方、酸含量の低下は成熟期の温度が高くなり酸含量の減少が速く進むことによると考えられる[16, 30]。この特徴はリンゴのみならず、多くの果実に共通する傾向と考えられる。

果樹は、農業生産物の中でも食味や外観品質が、収量以上に農家経営にとって重要である。たとえば、リンゴやブドウ、モモでは、果実の着色が重要であり、したがって、

気候変化が着色へ及ぼす影響が重視される[16]。収量の安定性を重視する場合は、凍霜害のリスクが小さく、日中と朝晩の寒暖差の小さい海岸沿岸部の産地が選択されるが、着色性を重視する場合は夜温が下がる必要があり、寒暖差が大きい内陸部の産地も選択肢となる。リンゴやナシなどの果樹では、果実収穫時期に来襲する台風が、落葉、樹木の損傷で甚大な被害を及ぼす[31, 32]。そのため、気候変動に伴う台風の進路や時期の変化も、産地の存続に大きな影響を及ぼす[33]。登熟の期間に長雨が続きと開花から果実の肥大、日照不足も要因となり、結実や着果不良および病害が生じる[34]。

3 日本の農業における気候変動適応策の現状分析と展望

気候変動適応策には、栽培対応、品種対応、作期移動、栽培作物の変更、産地移動などがある[16]。一般に、まずは農家での自発的な対応が可能な水管理、施肥など栽培法に関する適応策がとられる。その後、既存の品種で選択肢があれば、より適切な品種を選定することで適応する。既存の品種選定対応では困難な場合は、品種の開発が必要となる。イネでは全国的に各都道府県で育種が行われている。実際、イネでは高温耐性品種の開発と導入が進んでいる[35]。また、野菜では民間も含めて品種開発が盛んである。栽培、品種変更の対応が難しい場合は作期移動、栽培作物の変更、産地移動が選択肢となる。

(1) イネ・コムギ・ダイズなど土地利用型作物⁸⁾

白未熟粒の対策として、高温耐性の品種開発や普及、窒素施肥等の栽培法の改善が進み、胴割れ米に対しても栽培法や適期収穫による改善が進んでいる[16, 18]。しかし、さらなる温暖化が進み、そして当分の間、エルニーニョ傾向¹⁾での低日照、多雨、高温条件の頻度も高まる状況にあり[13]、一等米比率などの品質の指標は温暖化影響の顕在化以前の水準には回復しておらず、一層の改善を図る必要がある。

他方、単年生の畑作物では、イネほど高温耐性品種の開発は進んでおらず、栽培対応、作期の移動・分散が現時点での主な適応策である。

全国の約8割のバレイショ生産量を占める北海道では冬季に長期間、積雪に覆われるため、作期が限られている。また、代表的なバレイショの産地である十勝やオホーツクの道東地方では、バレイショの後作はコムギが多い。作期が長く省力的なコムギの優先度が比較的高いため、バレイショの作型⁴⁾が制限され、生産量が抑えられていた面がある[36]。しかし、早生から晩生まで品種構成を充実させて作期の分散化を進めることができれば、バレイショの減収のリスク軽減につながる[37]。さらに、現在、高温耐性品種の開発が進められている[38]。

全国の約7割のコムギ生産量を占める北海道では、品種改良により耐病性と収量性を改良した「きたほなみ」の普及後、登熟期間の高温・低日照対策として、多肥を回避した施肥法の改善による莖数、穂数の適正管理により、気候変動に対する安定生産化が図られている[13]。また、畑作不適地とされた道東の根室地方へ栽培地域の拡大がみられる[39]。

北海道以外の地域では、一般にコムギは北海道の7割程度の単収水準である。しかし、

近年、愛知県では、耐病性や耐湿性を高めた新しい品種「きぬあかり」が育成され、施肥法の改善や、さらに北海道並に規模拡大した生産者による生産性改善の取り組みにより、北海道と同等以上のコムギ単収である[40, 41]。愛知県の例は、品種改良や施肥などの栽培法の技術改善と技術水準の高い生産者の取り組みで、現場での生産性が大きく向上できることを示している。この動きが全国的に拡大すれば、コムギ生産量の全国の3～4割を占める北海道以外の地域で1.5倍程度の向上が見込まれる。北海道のさらなる増収を見込むと、我が国の生産量は現状の100万トン前後から150万トン前後まで向上し、その結果、コムギの自給率は15%前後から25%程度に向上するという試算も可能となる。

ダイズでは、現時点では単収の減少傾向が深刻である[20, 24, 42]。コムギの例のように大規模化した技術レベルの高い生産者が主力の担い手になれば、技術開発との相乗効果で生産力は回復する可能性がある。ダイズは現時点ではコムギ収穫後の梅雨時期での作付けが多いことから、播種遅れ、初期生育不良、湿害が減収要因になるため、この要因に対する対策強化も重要である[24, 42]。一方で、北海道のオホーツク地方では、これまで畑輪作3品（コムギ、バレイショ、テンサイ）でダイズなどの豆類が輪作体系に入っていなかったが、近年はダイズの作付面積は増加している[13, 39]。気温上昇の影響が要因の一つと考えられる。

(2) 野菜・果樹などの園芸作物

地域や民間で品種改良や品種開発が多くなされている園芸作物は、地域外の産地や外国産の作目の導入により、温暖化に対応できることも多い。寒冷な地域では温暖な地域から作目を導入する選択もある。たとえば、北海道では、暖地向け作物であるサツマイモやラッカセイの導入事例がみられる[13]。また、野菜は品種や作型⁴⁾の選択肢が多く、かつイネ、ムギ、ダイズよりも短い作期で収穫可能なため、品目、品種や作型⁴⁾の変更で柔軟に対応できる面がある。これらの特徴は、露地栽培においては小規模でも営農が可能となるメリットにもなる。

施設園芸では、土地利用型では容易ではない環境調節が可能であり、露地より小規模でも収量や収益性の確保が可能である。加えて、高畝栽培や高設栽培の導入で、作業性の改善もでき、かつ豪雨対策（浸水、冠水害）にも資する。結果として気候変動に適応²⁾しやすい特徴がある。この典型的な例がアスパラガス高畝栽培である[43]。この技術開発では、さらに、片屋根新型ハウスが開発され、このハウスは片側の上部側窓が開閉可能であるため、熱がこもらず、高温時でもハウス内気温が外気温と同等となる。これは、省エネ型高温抑制の気候変動適応に資するハウスとしても注目される[44]。その他、施設野菜園芸関係では温室内の環境情報だけでなく光合成や蒸散などの植物の生理情報も見える化をする技術開発（IoP：Internet of Plant）が現場実装と並行する形で、高知県で現在、積極的に進められている点は注目に値する[45]。

果樹は永年性作物であるため、気候変動の影響について、一年生の作物にない次の特徴がある。永年性のため、年間を通して気候の影響を受けるだけでなく、長期間の気候

変動や稀に起きる極端気象の影響が一年生作物よりも重要となる。また、イネ、コムギなどと比べて、高単価の商品作物であり、味覚的・視覚的な品質が商品価値を大きく左右する。そのため品質への気候変動の影響が、一年生作物よりも重要であり、商品価値を左右する品質の判断が取引先により異なることへの配慮も必要となる。優れた果樹生産者は、この特徴を十分理解して、年々の気象の変動や長期間の気候変動・極端気象に対して既に適応している例がある。多くの適応事例では、試験的な品種も含めて多様な品種を栽培して、その中で気候や地域の土壌特性や経営にあった品種を選択したり、多様な品種構成で作期分散を図っている。それが、気象リスクの分散と気候変動への適応²⁾につながっている[46]。さらに多品種での作期分散は、労力分散と共に多品種少量生産につながる。そのため家族労働を主体とする小規模の生産面積でも、高価格の贈答用などを主体に生産・直接販売することで、安定経営を実現している事例もある。このような果樹農家は、異なる品種の生育を比較してよく観察するので、生育診断の技術水準が高い[現地ヒアリング]。

果樹農家が新たな果樹を導入し、それが新たな産地の成立へつながる事例がみられるが、その場合も、永年作物であり品質が重視されるという果樹の特性が重要な意味を持つ。市場出荷時期が全国で最も遅い北限のモモ産地として、露地栽培では、リンゴ農家が新たにモモを導入した秋田県の鹿角の例がある。現在では、青森や北海道の余市でもモモの栽培に取り組んでいるが、気候的に北限であることを逆に商品価値に利用したのは鹿角が最初である。リンゴ農家の経営上生じた様々な困難を緩和する方策としてモモを導入した結果、気候変動への適応²⁾をともなったのである[33]。

山梨県や長野県などでのワイン用ブドウ栽培で、果実成熟期の気温上昇により着色不良が生じたことへの対策や、より冷涼な気候帯が適地となるブランド品種の栽培を拡大するために、標高の高い場所へ栽培地を移す高地移動[現地ヒアリング]、あるいは北海道への産地移動例がみられる。産地移動は生育適温の範囲が比較的狭く、また市場の評価が確立している作物で多く、永年作物である果樹では特に実施例が多くみられる。北海道では、国内での南北移動ばかりでなく、欧州系ブランド品種であるピノ・ノワールやシャルドネなどを用いた良質なワインの生産を目的に、ワインの本場、フランス・ブルゴーニュの海外老舗ワイナリーの北海道への参入例もある。実際、北海道のワイン用ブドウ産地では、現在起きている気候変動に対して適切な品種転換が図られた結果、国内におけるワイン産地の地位をさらに高めた[46]。

カンキツ類では、ウンシュウミカンの産地は宮城県まで北上しており[47]、スタチ類は山形県で栽培が試行されている[48]。一方、暖地では、西日本を中心にウンシュウミカンから晩柑類への転換が進むとともに、熱帯果樹作物の導入が始まっている[49, 50]。

栽培作物の変更は、市場の動向と合わせて農業経営の観点から、変化する地域の気象条件やその他の環境条件も併せて判断されることが多い。成功して新たな産地化が図れば、気候変動適応における機会を活かした成功事例となる。新たな産地化は、市場のニーズと併せて、結果的に変化する気象・気候への適地適作を見出した成功例になる。つまり、作物も経済商品であるので、マーケットを最大限意識しながら品種は選択され

る。したがって、品種変更は、生産性と市場性との兼ね合いで決まる。なお、果樹では市場経由で出荷される場合は外観重視、インターネットや産直のような直接販売の場合は品質重視となり、それぞれの商品価値基準に応じて、気候変動適応における栽培対応も異なる。リンゴを例にとると、農家の取引先が市場の場合は外観品質が重要であり、また、他産地との競争を避ける必要があるため、高温下で遅れがちな着色を早めるために、反射シートの設置や葉摘み・玉回しをする。ところが、贈答用果実の消費者との直接契約販売では、着色よりも食味品質が重視される一方で、他産地との競争は問題にならないので、着色促進ではなく、収穫時期を遅らせることで高温による完熟の遅れに対応する[51]。なお、取引先によって異なる適応行動はイネでもあり、生産者が消費者に直接販売する場合は、白未熟や胴割れ米対策を市場経由ほど重視しない例がみられる[現地ヒアリング]。消費者への直接販売は小規模農家や新規参入農家の重要な収益源となることも多い。

4 気象予測型営農情報支援システム

(1) 気象予測型営農情報支援システムの現状

農業気象災害を生じると、農家の収益が平年より半減、数十%減となることも珍しくない。また、減収の抑制は食料の安定供給の観点からも望ましい。気象災害などで作物が減収した時は、需要供給の関係から農産物価格は上昇することが多い。したがって、気象災害を抑制する技術を持つ生産者は経営を安定化できる。一方、生産現場で単収などを一気に5~10%以上に向上させる技術開発は容易ではなく、もし、実現しても導入や追加労力コストの観点から断念せざるを得ないことが多い。そのため、土地利用型農業⁸⁾では、現状の増収・増益より被害時の減収抑制の方が、対策の費用対効果の面から考えると効果的である。

近年、気候変動による異常気象や極端気象が増大し、栽培期間中にこれまで経験のない気象条件を作物が受けて、被害を受けることも多い。従来の「栽培暦」など、おおよそその栽培管理スケジュールでの経験のみに基づく判断では、適切な栽培管理を行うことが困難となってきた。そこで、これまでの気象経過から作物の生育状態や病害虫の発生状態を把握し、さらに気象予測データを用いて、作物の生育や圃場の状態を予測することで、予察される農業気象災害やより効果の上がる栽培管理への対策に役立てる手法の開発が求められている。そのような目的として開発された農業気象情報システムとして、まず、水稻冷害早期警戒システムが挙げられる(現在の国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構(農研機構)東北農業研究センターによる開発)[52]。さらに、農研機構が中核となり公設農試や民間と共同で開発した栽培管理支援システムは、イネの冷害だけを対象にするのではなく、高温障害や干ばつなど他の農業気象災害にも対象を拡張するとともに、コムギやダイズなど他の土地利用型農業⁸⁾の作物も対象としている[53]。

これらの農業気象情報システムは、気象と作物生育情報に応じた、適切なタイミングでの必要な栽培技術対策の実施を基本的なコンセプトとしている。栽培対応では、施肥、

水管理、灌漑、農薬散布、資材などの投入、草型や樹勢の管理などがある。たとえば、出穂や開花、初期生育など作物の発育の段階毎に、作物の状態を評価したうえで適切なタイミングで栽培技術対策が実施されると効果的となる。効果はすぐに現れるものもあるが、時間の経過と共に徐々に現れるものもある。したがって、作物の状態をモニタリングしながら適切な診断が不可欠となる。作物の状態をセンシング技術で診断できるようになれば、勘と経験による一部の篤農家の技術をデータ駆動型へ移行でき、高度な営農技術を部分的にでも継承できることになる。出穂期や開花期などの発育ステージの場合は、作物を人によって直接観測する、あるいはセンシングで診断するばかりでなく、客観的な環境データである気象データから発育の段階を推定・予測することができる。したがって、出穂や開花などの作物の収量や品質に影響を与える時期に高温や低温、多雨や干ばつなどが生じた場合は、気象条件から農作物の被害程度の予測とその発育ステージに応じた対策技術を示すことも可能となる。このような、気象に代表される自然条件の環境データに基づいて推定した客観的な指標は、人による直接観測やセンシングによる診断に間違いがないかなどの、確認、裏付けにもなる。したがって、栽培管理に適切な作業を判断するための重要な支援情報となる。水稻冷害早期警戒システムや栽培管理支援システムでは気象データを用いてイネやコムギなどの発育ステージを推定・予測し、その結果を対策技術に活かしている。

(2) 気象予測の進展と高度化利用への展望

これらの気象災害対策も備えた栽培管理の実施には資材の調達や人員の確保、作業準備に時間を必要とする。このため、前もって気象の予測が精度よく示されれば、作業の是非や栽培管理のための作業準備期間、すなわちリードタイムが確保され、対策がより効果的になる。

気象の予測精度は継続的に高まってきており、予測情報の信頼度や確率的予報も付与されるなど予測情報利用の高度化も進展している。そのような背景の中、1週間から2週間先の中期的予報データを活用して農業気象予測を行う共同研究が気象庁と農研機構によって実施された[54]。これが栽培管理支援システムに活用されている[53]。栽培管理支援システムでは、気象庁より提供される1週間、2週間、1か月先までのデータを活用できる形で農研機構メッシュ農業気象データが開発・整備された[55]。特筆すべきは、天気予報の決定論的予測では予測の限界が現状では1週間程度とされる中、農業気象情報、たとえば地温、土壌水分、生育（発育）情報のモデルの予測では、これを超える1週間～1か月先の季節内変動の予測といった先進的な技術開発の事例が出てきていることである。これらの値は過去からの履歴や前日の値から、その日の気象状況に基づいて時間積分で計算する。気象の日々の予測値は不確実性があり誤差を生じるが、日々予測値が必ずしも正確でなくても、予測期間の積算値（平均値）が平年より高めや低めといった情報が正しく得られれば、農業気象モデルの予測値として有用である[13]。

さらに、数か月先あるいは半年先といった季節予報の利活用も視野に入りだした。例

を挙げると 2022 年は、春先の早い段階からラニーニャ現象¹⁾が予測され[56]、このラニーニャ現象¹⁾の予測から夏が猛暑になるという予測がメディアでも多く報道され、実際に社会的に実利用される動きが顕著にみられた。2010 年も同様にラニーニャ現象¹⁾の可能性が予測されたが[57]、当時は前年度に冷夏、冷害が生じ、当該年度の 2010 年も春先が低温傾向であったため、春先の早い段階で猛暑となる予測とはならなかったことと比べると大きな違いである[58]。海洋変動については、エルニーニョ現象¹⁾、ラニーニャ現象¹⁾のみならず、エルニーニョもどき現象、ラニーニャもどき現象、正あるいは負のインド洋ダイポールモード現象¹⁾などに着目することで、より正確な季節予報が可能になってきた[59]。3 か月先、6 か月先程度の季節予報についても[60]、農業気象情報への取り込みや生産者の営農にかかる判断材料としての実利用としても視野に入る段階に来ている。

気象予測は気象庁からばかりでなく、様々な分野や機関で取り組まれ多様化している。たとえば、国立研究開発法人海洋開発研究機構で開発した大気海洋結合大循環モデル SINTEX-F を用いた「季節予測システム」[59]、気象を専門とする民間企業からの情報提供、さらに大手重工業企業による中長期気象予測の大規模開発と米国の穀物メジャーへの適用事例がある[61]。大手重工業による事例は、具体的には 60 日先までの予測を目的に、国内外の各気象機関の数値予報モデルのデータと技術との新しい組み合わせとして、AI（人工知能）と GPS-R0 衛星データ¹⁵⁾を活用した予報技術の開発である。この研究技術開発のスケールは大学や公的研究機関と比べて非常に大規模なものである。

既存の農業技術でも気象予測と組み合わせることで、相当数の新たな対策技術を創出できると見込まれる。さらに、予測精度や予測情報の進展を伴い、気象予測を活用した対策技術の開発は一層発展していくと予想される。

(3) 気象情報活用の土地利用型農業⁸⁾と施設園芸への今後の展開

気象情報を活用した環境調節や環境制御は、これまで閉鎖空間が作りやすい施設園芸の分野で発展してきた。一方、北海道では土地利用型農業⁸⁾においてもヘクタール(ha)規模以上の大面積のマルチやべたがけ¹²⁾、トンネル栽培⁹⁾は珍しくない状況である[17]。前述のように、現在は、土地利用型農業⁸⁾における気象情報の活用も発展している。これは冷害や高温障害、病虫害などの農業気象災害対応が大きな目的でもあるが、もう一つの側面として、近年の急速な経営規模の拡大に伴い、栽培条件の異なる多数の圃場の生育状況の把握・予測とそれに基づく栽培管理の判断を、気象等の客観的データに基づき迅速に行うことが求められているためである。実際に、栽培管理支援システムは、国内では大規模土地利用型農業⁸⁾を展開している北海道で最も活用されている[13]。

さらに、北海道では冬の気候変動（土壌凍結深の長期的減少傾向）に対する適応策として、大規模土地利用型農業⁸⁾でも適用可能な環境制御となる土壌凍結深制御法⁷⁾が開発された。土壌凍結深制御⁷⁾とは「雪割り」（圃場内除雪）や「雪踏み」（圃場内圧雪）によって雪の断熱作用を管理し、気温と積雪深の気象データから土壌凍結深を推定・予測して凍結深を最適な深さ（最大土壌凍結深 30 cm）に制御する技術である[13, 62, 63]。

土壌凍結深制御⁷⁾は野良イモ（バレイショ収穫後の畑に残った小イモが雑草化する現象）防除で大きな効果を発揮する。地中のバレイショ塊茎は、塊茎位置の日平均地温が -3°C を下回ると生存できない。一方、取り残した塊茎の多くは地表下 15 cm 以内に分布する。したがって、雪割り・雪踏みにより土壌凍結深を 30 cm にすると、深さ 15 cm の日平均地温が -3°C 以下となり、野良イモは、確実に防除できる。冬の農閑期の雪割りや雪踏みの短時間機械作業（1 ha 当たり数十分）で、野良イモ防除が可能であり、夏の農繁期、炎天下での野良イモ防除作業から解放され、大幅な省力化（作業時間を数十分の 1 に削減）を実現した。土壌凍結のもう一つの大きな効果は土壌物理性の改善である。土壌が凍結すると、土壌中の大きささまざまな間隙を埋める間隙水が凍結し体積が増大するため、土壌の間隙が拡大し土壌の孔隙組成が変化する。融雪後もその影響が残ることから砕土性や透排水性の向上効果をもたらす。また、土壌凍結深制御⁷⁾は硝酸態窒素の溶脱抑制効果も与える。土壌中の無機態窒素のうち、硝酸態窒素は雨水や融雪水による土壌への浸透水の移動に伴い流亡する。一方、年最大土壌凍結深が 30 cm 程度以上あれば、凍結した土壌は融雪水の土壌浸透を抑制し、その結果、硝酸態窒素の溶脱も抑制される。この畑に残った硝酸態窒素は、作物の収量を向上させる効果ももたらす。

この土壌凍結深制御⁷⁾の効果について「みどりの食料システム戦略」[4]と関係づけて例示すると、さらにわかりやすい。野良イモ防除において、作業の省力化、農閑期への作業移行、労働負荷の大幅な低減と共に無農薬での防除を実現した。これは、化学農薬の使用量の低減に貢献する。さらに、硝酸態窒素の溶脱抑制による減肥と作物生産性の両立を実現した。このことは、輸入原料や化石燃料を原料とした化学肥料の使用量の低減に貢献する。土壌の物理性改善による耕起作業回数の減少や収穫作業効率化が図られ、トラクターや作業機械が使用する燃料の削減（ CO_2 の削減）に貢献する。さらに、温室効果ガスである一酸化二窒素（ N_2O ）の脱窒の過程での発生量を抑制する効果もあり、温室効果ガス排出の緩和策に貢献する[64]。加えて、雪腐病に対して雪踏みの適用による抑制効果がコムギで実証され[65]、化学農薬の低減に貢献する。このように、様々な要素で「みどりの食料システム戦略」[4]の目的と合致した技術の大規模普及を実現している。この技術のポイントは、寒さという自然界の気象資源のみを利用し、積雪といった天然の断熱材資源を有効活用して、気象予測情報を活用しながら、農業に効果的な 30 cm までの凍結深を制御するところにある。すなわち、「みどりの食料システム戦略」[4]に資するには、地域の気象資源など自然の恵みを活かして、資源として農業に有効活用できる仕組みを作りあげることが効果的であり、それが実際に実現可能であることを示している。さらには、適応策と緩和策を両立させた研究・技術開発を推進することも示す。したがって、今後は施設園芸ばかりでなく、土地利用型農業⁸⁾においても同様の観点から気象情報を活用した環境制御技術はさらに発展していく可能性がある。

一方、施設園芸関係では前述の IoP プロジェクトでは、植物の光合成情報を機構的モデル（原理の理解に基づくモデル）と人工知能の手法を組み合わせた Hybrid Model で計算する手法が新たに開発され[66]、ハウレンソウ水耕栽培に適用されて、世界的にも注目されている。Hybrid Model の開発は土地利用型農業⁸⁾における農業気象情報を活用し

た技術開発においても今後の手法開発の一つの方向性になると考えられる。

(4) 農業気象情報システムの活用の課題と留意点

農業気象情報システムについて、運用コストを誰がどのように負担するかの留意が必要である[67]。情報システムは、データ作成やシステムの運用に相応な経費を必要とする。またデジタル技術の進歩により利便性が高まるが、反面、開発や運用コストの負担はさらに増す傾向にある。他方、特に土地利用型農業⁸⁾は、補助金を投入して作物生産が成立していると共に、そもそも安価な農作物の安定供給が求められており、生産コスト削減への要請は強い。したがって、省力化して大規模化を進めざるをえない面があり、対策技術での労力の追加をできるだけ抑える必要がある。たとえ労力を追加して効果を出すにしても、費用対効果が厳しく求められる。この問題の解決にスマート農業の導入が挙げられるが、導入コストの問題には、やはり留意する必要がある。

農業気象情報システムは、これまでも費用対効果の面から継続的な運用が困難になる例を生じていた。これらの情報システム運用とコスト負担は、研究開発者のボランティア的努力や、国・公的な研究機関や行政への過度な依存もみられた。前者は開発者が組織を離れた後は維持困難となることが多く、後者は、近年の予算が必ずしも潤沢でない中での運用継続の問題を生じている。システムの更新でさらなる追加コストが必要となると運用が終了することもあり、開発コストの損失にもつながりかねない。

我が国の農業現場は、都道府県を中心とした公的な枠組みでの技術の普及が一般的であり、リスクをできるだけ避け、技術に確実性を求める傾向は強いと考えられる。したがって、研究開発機関と直結したイノベーションの要素が高い技術開発の経験が現場には多くない。このような場合の工夫としては、新たな地域に情報システムの採用を働きかける前に、研究側で開発した比較的低コストで運用できるモデルやシステムの試行版を、生産現場関係者が比較的長期間利活用する機会を設け、農協など農業現場機関でのシステムの理解を深めた後、実際のシステム導入を図るのが一案となる。システムの必要性と有用性が認識された後、農業現場機関を主体として、現場農家を対象としたユーザーインターフェースの強化を図る手順が考えられる。システムの運用は、技術を必要とする現場で、コストを担える規模と仕組みを持つ組織などが担うべきである。比較的規模が大きく、システムのコストを負担できる大規模農協による運用が考えられ、地域で農協組合連合（農協連）が組織化できれば、その組織で運用するのも一案である。農協連による運用ができると、大規模農協ばかりでなく、小規模農協でもシステムの利用が可能となる。なお、これらの方策の運用例として、北海道における土壌凍結深制御⁷⁾によるシステム運用がある[13]。

なお、高知県での施設園芸のIoTプロジェクトの取り組みでは、県が農業振興に必要な施策として積極的な推進体制を築いている[45]。農業気象情報システムのサーバーなどの整備、および気象予報士の活用も積極的に行っている。高知県は農業先進県の一つであり、県としての今後の取り組みが注目される。

5 気候変動適応における民間企業や大規模組織農協の動向事例

近年、農家数の減少の中で原材料の確保の必要性に迫られる中、食品関連産業が農業に直接参入するケースが増えている。この農業形態は、一般的な小規模農業とは異なるものである。また農協も合併により大規模化した組織が増えている。したがって、このような農業現場の変化が、気候変動の適応²⁾へ与える効果も検討しておく必要がある。ここでは日本学術会議のシンポジウム（参考資料2）で取り上げた、きたみらい農協、カルビーポテト、北海道ワイン、IHI の事例を参考にして論じる[68]。

食品関連産業での民間企業や大規模農協による農業の特徴は、生産から加工、場合によっては、流通も一部取り込む形で関与し、6次産業化¹⁴⁾を大きな企業体、組織体として形成している点である。そのスケールから資金規模、人的資源、組織的運営は小規模の家族経営の農業とは異なる特徴を持つ。農家人口が減少している中で、このような組織や企業での農業の取り組みの重要性は増していくであろう。

また、農産物の取扱量が極めて大きくなる例も多く、市場に与える影響力が必然的に大きくなる。たとえば、北海道のきたみらい農協は8つの農協が合併した大規模組織で、国内産たまねぎの20%以上のシェアを占める。カルビーポテトは、全国の生産量の約15%のバレイショを取り扱う。北海道ワインは、食用とワイン用のブドウの道内生産量である約7500 tのうちの約3分の1のブドウを受け入れ、年間250万本のワインを出荷する我が国最大の日本ワインメーカーであり、生産量は日本ワインの約10%を占める。なお、「日本ワイン」は、日本産原料ブドウのみを用いて日本国内で醸造されたワインを指し、輸入原料を使用して国内で製造された「国内製造ワイン」とは異なる。日本の大手のワインメーカーは、日本ワインも作っているが、量的には後者の国内製造ワインが多い。

このように、それぞれ我が国を代表する農業・食品関係機関であり国産の農産物の主要供給源、食品関連産業では巨大な原材料の仕入れ先である。また、自前の農場で技術開発も行っており、栽培技術にも精通している。そのため生産者とは、直接取引ばかりでなく、多くのきめ細かな栽培技術指導も行っている。

このような大規模組織では小規模農業では容易ではない投資が可能になる。排水対策のための基盤整備や最新の大型農業機械の導入は、組織の営利だけでなく、気候変動適応における大雨・湿害対策のための収穫作業の省力化・効率化にも資する。農業試験研究機関との連携も取れていることが多く、組織として素早く最新技術を導入し、個々の生産者へ便宜を与えている。特筆すべきは、きたみらい農協への衛星リモートセンシング技術によるモニタリングの導入である。これはIHIからスピンアウトした企業であるスペースアグリが開発したものであり、農業分野外で培ったノウハウを農業向けにダウンサイズして活用に至った例である。

さらに、気象リスクに対処するための産地分散化も図られている。たとえば、カルビーポテトは、バレイショの主な供給源を北海道の十勝地方およびオホーツク地方とするが、近年、気象リスク回避のために北海道・道央地方の水田地帯への、あるいは全国規模の産地の分散化を図っている。北海道ワインもカルビーポテトと同様に原材料の主産地は北海道であるが、原材料の仕入れ先は全国に広がっている。また、カルビーポテトでは気候変

動リスク下での安定供給を図るため、高温に対応した品種への転換だけでなく、新品種の開発も行っている。

さらに、将来の気候変動の先を見据えた対策の実現例を北海道ワインの例から見るができる。ワイン用ブドウの栽培では、収穫期間が40年にもおよび長期的視点が必要なため、創業時から栽培困難な品種も含めて様々な試行を続けており、これが気候変動への適応行動にそのままつながっている。たとえば、北海道では気候変動による正の効果としてワイン用ブドウのブランド品種であるピノ・ノワール栽培での成功事例を生み出したが、これは気候変動の影響が顕著になる以前から、ピノ・ノワールの栽培に多くの挑戦を続けてきた結果が素早い適応につながったと考えられる。

これらの対策の多くは、個々の生産者や小規模農協では対応が困難だが、大規模組織であれば規模のメリットや先進性を活かした技術導入が可能であり、ここに農業での適応策導入を広げるヒントがある。したがって、気候変動への適応策の導入推進の方策の一つとしては、技術の発信側と導入側双方の規模を考慮に入れながら技術導入を図ることが考えられる。特に大企業は、小規模家族経営農業にはない大きな組織力や資本力を活かして開発された技術やノウハウの宝庫であり、これらを活かす方策が求められる。たとえば、スペースアグリが農業分野外からもたらした技術移転で、農業側がコストを含めて受け入れやすい仕組みが作られた。このような工夫が農業におけるイノベーションを実現すると考えられる。

6 農協による農業情報システムの進展

北海道では革命的なスマート型情報支援システムが急速に進んでいる事例がある[13]。北海道・道東地方の大規模畑作・酪農地帯における農協（十勝農業協同組合連合会、きたみらい農協等）は、農業気象情報ばかりでなく経営情報や農畜産物の生産履歴、土壌分析と施肥設計、リモートセンシングによる植生指数などを総合した営農情報システムの開発を進めている。GPS ガイダンスが利用できる環境を整備し、生産者の作業履歴もリアルタイムで把握できる仕組みができています。このような先進的な農協は、過去から現在までの営農情報や作物の生育に関するビッグデータセンターとなりつつある。農業現場では、農協職員や個々の生産者がタブレット端末や携帯端末からこれらの情報を適宜引き出せる。

たとえば、現在は、リモートセンシングによる植生指数データの情報から、コムギの収穫適期を判断している。生育の早い場所から適期に収穫を行うことで、収穫作業機械、乾燥施設の効率的な運用が実現でき、乾燥施設での燃料消費を削減できる。同情報から共同利用の収穫作業機械の使用優先順位も示され、さらに作業状態をリアルタイムで関係者全員が共有することで柔軟かつ的確に運用できる。また、圃場における作物の収量、品質の要因分析を、播種日や肥料、農薬、各種資材の散布日などの生産履歴と、リモートセンシングの植生指数や気象情報を組み合わせて、地域の多数の生産者集団において実施している。そこで得られた対策技術を個々の生産者に指導するだけでなく、地域レベルでの生産性向上に役立っている。この仕組みは、経験と勘に頼らない、データに基づく営農指導であるため、一定の習熟をすれば、ベテラン職員でない若手職員でも生産者へ営農指導でき

る。この仕組みを有効活用して地域の生産者の営農レベル、経営レベルを大幅に向上させた実績例もある。

なお、高知県の IoP プロジェクトでは、このような生産履歴などの個人情報を含むデータの扱いについて、農協ではなく県が積極的に関わりながら、スマート型情報支援システムに対応している点が大きな特徴である[45]。

研究の立場からは、大規模な地域の現地の実証データがリアルタイムで、あるいは進行中の気候変動条件下のデータの蓄積が大規模で進んでいると捉えることができる。もし、このようなシステムに研究側がアクセスできるようになれば、農学研究は、これまでの研究レベルと較べて飛躍的に研究開発スピードが速まり、革命的な発展が期待できる。つまり、これらの農業ビッグデータは、今後の活用の仕方によっては非常に大きな可能性を秘めている。データの取り扱いにおいては、生産者履歴は個人情報を含むため、十分に慎重な取り扱いが必要である。またデータ利活用にあたっては携帯端末の GPS 情報等の他のビッグデータ利用のルールの構築を参考に、農業分野でもデータ利用の環境整備を急ぐべきである。この仕組みを、産学官連携で構築できたとき、農学研究の世界は大きく変わるであろう。気候変動適応策の研究の観点からも、このような大量の生産者の生産履歴と農業生産物の収量や品質の結果および環境情報へのアクセスが容易になれば、気候変動での危機的状況を脱する切り札になるとも考えられる。

7 先進的農家における気候変動適応策の取り組み

先進的農家は、気候変動へどのように適応しているのだろうか。ここでは、北海道の畑作と果樹の先進的事例を取り上げる[13]。事例の農家は、いずれも経営規模が大きく、個人経営で技術に関する意思決定を自ら行えるなど、「イノベーター」の特質を有する。自ら重機を操作し、農業機械を改良する技術力を生かして、自身の営農の中でイノベーションを着想し実現できる。気候変動や異常気象に対しても、起こりうる様々な事態を想定した対策をしており、それでも生じる被害の経験を事後対策に役立てることで、技術・経営の両面にわたるレジリエンスを強化している。以下、そうした事例を紹介したうえで、気候変動適応に資する農業技術や科学研究の今後の展望を述べる。

(1) 圃場整備、基盤整備による排水対策の徹底

畑の排水性改善は気候変動対策の基本技術である。大雨時に素早く排水でき、少雨時には水持ちの良い畑づくりは、いわゆる土づくりの一環でもある。排水性の良い畑は作物の湿害を抑制するばかりでなく、降雨後の農作業性を高め、適期作業を可能にするからである。たとえば、北海道の暗渠設計基準では、暗渠の排水量は 30 mm/day である[69]。この基準でも排水性の良好な農地であるが、先進的農家は畑の排水性をさらに向上させている。

北海道・道央地方の A 大規模農場では、独自に開発した技術により、100 mm/day の降水があった翌日に、農業機械を畑に入れられる畑づくりをした。この A 農場に学んだ B 農場では、40 mm/day の降水量でも翌日に機械を入れられる畑づくりを目指したところ、

排水能が 100 mm/day の降雨でも浸水被害を逃れることができると評価されるに至った。A 農場では、他者が真似しにくい特殊な工法で高い排水能を実現しているが、B 農場では、作物残渣、緑肥、たい肥など有機物の施用や土壌養分調節により、排水性向上と干ばつ対策を両立させており、これらは一般農家でも導入可能である。したがって、今のところ B 農場の技術レベルが、多くの農家が参照すべき最高水準と考えられる。

「みどりの食料システム戦略」[4] の方針と併せて考えると、有機物施用による土づくりが地域全体で広がることは、炭素貯留を通して温室効果ガス緩和策になるばかりでなく、透水性改善により流域治水にも資すると期待される。

(2) 持続的な高位水準を保つ目標収量の設定

先進的かつ大規模経営の農家は、上記のような基盤整備と基本技術の励行を徹底する。土地利用型農業⁸⁾では、栽培管理によりできることは限られており、事前の立地条件の把握や基盤整備が重要であることをよく認識している。彼らは、高い技術水準を保ち最大ポテンシャル収量¹³⁾は見極めつつも、常に最大収量を目指すのではなく、異常気象時でも大きく落ち込まないことを重要視して、無理のない目標収量を設定し、品質の維持も目指す。その方が長期的に高い収量水準を維持することで、経営的に安定するからである。先進的農家は、圃場の基盤整備状況に応じて無理のない範囲に目標収量を設定し、それに合わせて農作業と作物栽培を行っている。

農地面積が限定されていると、単位面積当たりの農作物収量の増大（単収増）のみが生産量増加の手段となるが、規模拡大が可能であれば、面積拡大も収量（生産量）増加の手段となる。我が国の農業では、農家一戸当たりの農地面積が限られていたために、単収増を伝統的に最重要視してきたが、農家戸数が減少している地域では、これとは異なる志向の生産者が増えている。このことは、研究開発の方向性にも重要な意味を持つ。

北海道のコムギのポテンシャル収量¹³⁾は単収で 8-9 t/ha であるが、平年時の平均単収は 5 t/ha である。大規模コムギ連作体系の A 農場では、平年単収が 7 t/ha、不作時で 5 t/ha と、不作時でも平年時の北海道の農家平均単収をあげている。これは、高い技術水準を保ち最大ポテンシャル収量¹³⁾を見極めつつも、常に最大収量を目指すのではなく、異常気象時でも大きく落ち込まないことを重要視して、無理のない目標収量を設定し、品質の維持も目指したことによる成果であり、その方が結果的に長期的に高い収量水準を維持することにつながっている事例となる。

北海道空知の C ワイナリーのワイン用ブドウの単収は 4-5 t/ha と、北海道の主産地である余市の単収水準 6-7 t/ha よりもやや低い。しかし、このワイナリーはブドウ栽培からワインの醸造、瓶詰、販売を一貫して実施する生産者（ドメーヌ）であり、ブドウの目標生産量はワインの生産能力と販売計画に応じたものとなる。異常気象の年でも平年時と同水準の収量でブドウを収穫し、そのビンテージのワインの品質を一定水準以上に保つことが重要で、ブドウの単収増が最優先の目標ではない。

(3) 大規模農地での精密管理を可能とする体系

先進的かつ大規模農家の特徴は、機械作業による作業の効率化ばかりではない。規模拡大と並行して、大規模圃場の基盤整備に先行投資することで、技術選択肢を拡げている。たとえば、農地の排水性の強化と合理的な機械作業体系の組み合わせは豪雨後の迅速な適期作業や事後対策を可能にし、摘心作業⁶⁾などの栽培管理の機械化はより広い面積の管理を可能とするだけでなく、限られた時間の中での他の栽培管理作業への配分も可能にする。その結果、大規模経営でありながら、精密な管理が可能となる。圃場の設計や作物の配置、作物ごとの労力配分（作物や品種の違い、植え付け時期、あるいは標高差による適期の分散）を考え、日々の最大作業負荷を見極めて、時間的に無理のない作業体系に落とし込む。それで生まれる時間的余裕を、情報収集や知識習得と研究に充てると、それが次のイノベーションの源泉となる。また、経営力が向上して、新たな設備投資への好循環を生む。こうした農家は、トラクターばかりでなく、油圧シャベルやブルドーザ、その他の重機、あるいはドローンなど、日々の営農を支援するスマート農業技術のメリットを認識し、自らオペレーションするなど、技術選択肢を拡げる意識も高い。また、日々の作物の状態を的確にセンシングし、圃場の癖など特に対策が必要な箇所を予め把握しておく。このような大規模でも精密管理を可能とする体系は、日本の農業が伝統的に重視していた単収増の考え方から変化して、規模拡大の中で、安定生産を維持するための農地管理の効率的作業管理の創意工夫を重ねることで体系化されてきていると考えられる。このような農作業の創意工夫と体系化が、異常気象や気候変動への適応力と復元力（レジリエンス）を高めることになる。

（４）先進的農家におけるデータ駆動型農業

篤農家は、しばしば勘と経験で高い技術レベルを実現しているとされる。一方で、ここで取り上げた先進的農家はイノベーターの特質を備えていて、これまでの篤農家よりもデータの扱いに強く科学的思考が身につけており、データ駆動型農業にも強い関心があるのが特徴である。彼らはむしろ、科学的根拠が十分でない部分を、勘と経験で補っていると思われる。そのため、先進的農家の日々の営農活動やセンシング行動を観察すると、一般農家では得られない情報が得られ、それがイノベーションにつながる期待ができる。先進的農家のイノベーションは、個人のノウハウとして非公開になる可能性があるが、日本の先進的農家の中には、イノベーターと地域社会のリーダーの特質を兼ね備えた人もいて、その場合はオープンイノベーションの普及へ進むことがある。

実際、土壌凍結深制御法⁷⁾の開発では、先進的な農家の技術と学術的研究の共創により、一般的な農家も活用できる、広範囲に普及できる技術イノベーションを実現した[13, 62, 63]。先進的農家や第5章で記載した民間企業は、小規模農家にはない独自技術や大きな組織力や資本を活かして開発した技術を蓄積している。従来、日本では先進的農家の技術が一般に普及した事例が知られており、今後はそうした事例を起こりやすくする仕組みづくりを図るべきである。第6章で述べたように、北海道の大規模農協では、個別農家の生産履歴がビッグデータとして集積されつつある。これに、上記の先進的農家発のイノベーションが加われば、人口が減少し、気候変動の悪影響が増大する中でも、

適応性やレジリエンス向上を機会に、地域全体の農業が大きく変わることが期待できる。それが、我が国全体としての気候変動適応力や復元力を高めることになる。

8 日本学術会議としての見解のまとめ

気候変動の影響は、近年の農業技術の進歩（気候変動への適応策の実施効果）を上回るほど大きく、負の影響が顕在化している。従来は、技術進歩により年々増加してきた単位面積当たりの農作物収量（単収）が、国内外で停滞しているばかりでなく、減少に転じた作物も表れ始めており、事態の早急な打開が必要である。

近年、気象庁による気象データの利活用の促進、メッシュ農業気象データなどの充実化された気象データセットを基盤として、水稻冷害早期警戒システム、栽培管理支援システム、土壌凍結深制御法⁷⁾など、気象を予測して営農を支援するさまざまなシステムの開発が進められている。

一方、農業の現場では、生産者の減少に伴い水田・畑作の規模拡大が急速に進んでいる。食品産業に係わる民間企業による農業生産も広まっており、それらの生産規模、資金規模、人的資源、組織的運営は、伝統的な小規模農家とは異なる特徴を持つ。さらに、農業のスマート化を背景に、先進的な農協では生産履歴と気象・環境データを組み合わせたビッグデータの集積が急速に進んでいる。こうした生産現場の変化は、気候変動適応の研究・技術開発を進めるにあたり注視すべきである。

本見解は、気候変動に対する国内農業への適応策の技術開発や研究の方向性を示したもので、関連分野の研究者や技術者のみならず、農業現場の関係者、政府（農林水産省、環境省など）、地方自治体の行政関係者および関連産業分野での担当者などは、以上の現状を踏まえて、以下の方策を進めるべきである。

1) 経営規模の拡大と人手不足が課題とされる中、大規模農業における作業計画や農業気象災害対策への気象データの利活用の重要性が高まっている。今後は、気象データを活用した栽培環境と作物の状態把握と診断のニーズも高まるであろう。これに対して、気象予測型営農支援システムの一層の充実と利活用を図るべきである。

2) 気象の予測精度は継続的に高まっており、また予測情報の信頼度や確率的予報が付与されるなど予測の高度化も進展している。1～2週間先のみならず数か月先予測の利活用も視野に入ってきた。こうしたことから、気象の予測と対策をセットにした栽培支援、適応研究を今後推進すべきである。

3) 気象予測情報を活用した環境制御は、施設園芸ばかりでなく、土地利用型農業⁸⁾でも技術開発の方向性を積極的に追求すべきである。

4) 先進的な農協では、経営情報や農畜産物の生産履歴、土壌分析と施肥設計、リモートセンシングや気象情報、GPS ガイダンスが利用できる環境を整備し、生産者の作業履歴も

リアルタイムで把握できるなどで、過去から現在までの営農情報や作物の生育に関するビッグデータセンターとなりつつある。そして、ビッグデータの活用が、地域の生産者の営農レベル、経営レベルを大きく向上させる事例も出ている。このような事例を増やすためには、ビッグデータの利用方法などについて、詳細に研究する必要がある。ビッグデータの活用は、農業現場での生産性向上のイノベーションの原動力になると見込まれる。

5) 土壌凍結深制御法⁷⁾は、「地域の寒さ」という気象資源を活用し、気象予測手法の活用を図ることで、生産性を向上させる適応策だけではなく、環境負荷低減や温室効果ガス排出の抑制に資する緩和策との両立も実現可能となることを、先導的に示している。これらを踏まえ、各地域のそれぞれ特徴ある気象資源を農業に有効活用すべく、適応策と緩和策の両立を図る研究を積極的に追求すべきである。

6) 上記1)－5)の研究・技術開発は、大規模農業の小規模農家に対する相対的優位性を高める方向に働く可能性がある。そのことが農家数の減少と農村地域の衰退を加速させる恐れがある。欧州を中心に進む、小規模家族経営農業が地域社会に果たす役割を重視する方向への政策転換も踏まえて、地域ひいては国全体として農業の気候変動への適応力と復元力を高めるための研究を進めるべきである。具体的な言及は以下の7)－9)である。

7) 土壌凍結深制御法⁷⁾は、先進的な農家の技術と学術的研究の共創により、一般的な農家も活用できる技術として大きく普及した。先進的農家や民間企業では、一般的な小規模農家にはない独自技術や大きな組織力や資本力を活かして開発された技術が蓄積されている。我が国全体の気候変動適応力を向上させるためには、これらの技術やノウハウをより広く農業現場に活かす方策を図り、食料生産に係わるすべての農家、企業間の技術的、情動的格差を縮める必要がある。

8) 施設園芸は、①小規模から始められ、必ずしも多額の投資が必要ではない、②土地利用型農業⁸⁾と比べ、環境調節の適用が容易である、③高畝栽培や高設栽培により作業性の改善も図ることができ、豪雨対策（浸水、冠水害）にも資するという、気候変動に対して多様な適応手段を有する。また、小規模から始めても収益性を確保しやすいため、新規参入を期待できることも有望な点である。

9) 園芸作物では、市場経由で出荷する場合は外観重視、インターネット経由や産直のような直接販売の場合は品質重視となる事例が報告されており、農産物の販売チャネルが気候変動適応戦略に関わるものと考えられる。農業の気候変動適応力を高めるために、生産だけでなく、加工・流通・販売も含めた方策の研究を進めるべきである。

10) 日本列島は南北に長く、かつ四季も明瞭であり、地理的、季節的な気候の変動範囲が大きい。そのため、栽培地の南北移動、高地移動、あるいは温度の低い冬期への作期移動

などで、気候変動への適応²⁾を図れる余地が大きい。北海道や長野県などにおける欧州系高級ワイン用ブドウ品種の導入、同じく北海道根室地方へのコムギや栽培地域の拡大、オホーツク地域でのダイズの作付面積の増加、九州などの冬コムギへの好影響、飼料トウモロコシの二期作地帯の北上、果樹の適地移動や熱帯果樹の導入などの実例も多い。我が国のこうした地理的・気候的特徴に基づく事例の研究をさらに進め、その結果を技術開発に生かすべきである。

<用語の説明> (五十音順)

1) エルニーニョ現象・ラニーニャ現象・エルニーニョもどき現象・ラニーニャもどき現象・インド洋ダイポールモード現象

太平洋熱帯域では貿易風（東風）が常に吹いているため、海面付近の暖かい海水が太平洋の西側に吹き寄せられている。エルニーニョ現象は、この貿易風が通常より弱くなることで発生する。西側に溜まっていた暖かい海水が東へと広がり、また東側での深海からの冷水の湧昇が減るために、東側で海水温が上昇し、積乱雲が盛んに発生する海域が通常より東側にシフトする。逆にラニーニャ現象は、貿易風が通常より強くなることで、西側で海水温が高くなり、西側海域での積乱雲発生がさらに盛んになる。

エルニーニョもどき現象は、熱帯太平洋で見られる気候変動現象で、エルニーニョ現象とは異なる現象である。エルニーニョ現象は、前述の通り、熱帯太平洋の東部で海面水温が平年より高くなるが、エルニーニョもどき現象は、熱帯太平洋の東部と西部で海面水温が平年より低く、中央部で海面水温が高くなる。一方で、ラニーニャもどき現象は、エルニーニョもどき現象とは符号が逆の現象で、熱帯太平洋の中央部で海面水温が平年より冷たくなり、東部と西部で海面水温が高くなる。

太平洋におけるエルニーニョ現象、ラニーニャ現象と同様の現象が、インド洋でも起きていることが近年わかってきた（インド洋ダイポールモード現象）。正のダイポールモードでは、インド洋で貿易風が強まり、東側にあった高温の海水が西側に吹き寄せられ、西側の海水温が上昇、東側が深海からの湧昇により海水温が低下する。逆に負のダイポールモードでは、貿易風が弱まり東側から西側への海流が滞るため、西側で海水温が低下し、東側で海水温が上昇する。

エルニーニョ現象・ラニーニャ現象、エルニーニョもどき現象・ラニーニャもどき現象、インド洋ダイポールモード現象は、いずれも熱帯海域の温度分布の変位現象であるが、大気と海洋の相互作用を通じて、熱帯だけでなく温帯や全球的な気候の変動に影響を及ぼしており、日本でも冷夏・猛暑、少雨、多雨がもたらされている。

2) 気候変動への適応

気候変動の対策には、その要因となる温室効果ガス排出量を削減する（または植林などによって吸収量を増加させる）「緩和」と、気候変化に対して自然生態系や農業を含む社会・経済システムを調整することにより気候変動の悪影響を軽減する（または気候変動の好影響を増長させる）「適応」の二本柱がある。

「適応」とは、「現実の気候または予想される気候およびその影響に対する調整の過程。人間システムにおいて、適応は害を和らげもしくは回避し、または有益な機会を活かそうとする。一部の自然システムにおいては、人間の介入は予想される気候やその影響に対する調整を促進する可能性がある」と定義される。気候変動による悪影響を軽減するのみならず、気候変動による影響を有効に活用することも含む[70]。

3) 結球性野菜

キャベツや玉レタス、白菜のように、葉が一枚一枚巻きながら球状に成長する葉物野菜。

4) 作型

農作物において、地域の気候や環境条件に適した栽培方法（いつ種を播き、植付け、どう管理し、収穫するか等）を示したもの。近年の気候変動や極端気象の頻発に対応した作型の変更が必要となってきた。

5) 植物季節

植物季節は植物の反応からみた季節であり、芽吹きや開花、落葉などの植物の季節現象のことを指す。植物季節は、日長や気温などの気候・気象条件の影響を受ける。例えば、花芽の形成の条件として、夜の時間が長くなること（短日植物）、逆に夜の時間が短くなること（長日植物）などがあり、植物の種類によって日長の植物季節への影響は異なる。さらに同じ植物でも、サクラの開花日が毎年異なるように、植物季節はその年の気温の高さや低温への遭遇などの気象条件の影響を大きく受ける。

6) 摘心作業

果樹や花き等の作物の栽培管理において、植物の生長を促すために、茎の先端にある「心」と呼ばれる芽の部分を摘み取る作業。植物は茎の先端にある芽を優先的に育てる性質を持つため、放っておくと優先的な茎だけが伸びて、その先にしか花や実を付けなくなるが、摘心作業を繰り返すことで、優先的な茎だけでなく茎の側面についている芽も発達し、植物体の横への広がりを促進し、果実等の収量が増える効果も期待される。

7) 土壌凍結深制御

初冬の積雪が増加して、土壌凍結が進まなくなった寒冷地域において「雪割り（圃場内除雪）」や「雪踏み（圃場内圧雪）」により土壌凍結の深さを促進して制御する手法である。言い換えると土壌凍結深制御とは、氷点下条件下で断熱作用のある雪の除雪、積み上げ（割り戻し）、圧雪によって、土壌凍結深を最適な深さに制御する技術である。畑での雪の管理作業が短時間（平坦地で1ha当たり 15分～30分以内）で実施できるので大規模農地での環境制御を実現する。

土壌凍結深を最適に制御することにより、野良イモの防除（バレイショ収穫後の畑に残った小イモが雑草化する現象）、土壌の物理性改善、土壌水分の制御およびこれに伴う肥料成分などの物質移動の制御等、様々な農地管理対策が可能となる。その結果、生産性の向上と環境負荷低減の両立も可能となっている。

8) 土地利用型農業（作物）

土地利用型農業は水田や畑地など土地面積の広さを利用して栽培するタイプの農業。多くは露地栽培で、大型機械などを活用することで土地面積当たりの労働力を減らし、土地

面積の広さで生産力を上げる。従来のイネ、コムギ、ダイズなどの穀物の他、近年は広大な畑地を利用したダイコン、バレイショ、キャベツなどの根菜、葉茎菜も土地利用型作物と言える。これに対し、施設利用型農業は、温室や栽培施設等を使って狭い土地を集約的に使う農業である。花きや果菜類など単価が高い園芸作物を栽培する機会が多く、投入コストは高いが土地面積当たりの生産力を上げる。

9) トンネル栽培

主に露地栽培において、保温や防風、防虫などを目的として、畑の畝に農業用フィルムや寒冷紗をトンネル状にかけて栽培する方法。農業用フィルムとして、異なる厚さや素材、換気用の穴の有無など、用途によって様々な資材が販売されている。

10) 播種晩限

牧草はある程度生育しなければ越冬できないため、冬までに十分な生育期間を取るために遅くともいつまでに種を播けばよいかという期限があり、これを牧草の播種晩限と呼ぶ。北海道など寒冷地では7月までという播種晩限が推奨されてきたが、近年の温暖化に伴い遅くなる傾向がある。

11) 普通期作

イネ本来の生活史に合わせて、夏に開花・登熟、秋に収穫を迎えるように栽培される従来の典型的な作付けのことを普通期作といい、各地域で、それぞれの気候に合わせたイネの主要な作付け時期となっている。普通期作に対し、作付けの早い作期が早植栽培、遅い作期が晩植栽培となる。九州など温暖地において気象災害や虫害の回避などのために栽培時期を早める早植栽培や、逆に高温登熟を軽減するために出穂期を遅らせる方策として晩植栽培をする場合がある。

12) ベタがけ

主に露地栽培において、特に生育初期に保温や防虫などを目的として、農作物を不織布などで直接被覆する方法。

13) ポテンシャル収量

好適な気象条件や栄養状態、また病虫害もない理想的な状態で達成される収量の最大値。現実の栽培での収量は様々な制約によりポテンシャル収量より小さくなる。

14) 6次産業化

生産物の価値を上げるため、農林漁業者（1次産業）が、農畜産物・水産物の生産だけでなく、食品加工（2次産業）、流通・販売（3次産業）にも取り組み、それによって農林水産業を活性化させ、農山漁村の経済を豊かにしていこうとする取り組み。なお、「6次産業」の6は、農林漁業本来の1次産業だけでなく、2次産業、3次産業を取り込むことか

ら、「1次産業の1」×「2次産業の2」×「3次産業の3」のかけ算の6を意味している。

15) GPS-R0 衛星データ

GPS-R0 は、降雨レーダーのように GPS の電波の散乱の度合いを測定して大気の状態を観測しようとする受動型センサで、電波の発射を自らが行わなくて済むため、これを搭載する人工衛星を小型化できるだけでなく、観測できる範囲が広いという利点を持つ。

<参考文献>

- [1] IPCC, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844, 2022
- [2] 日本学術会議 持続可能な発展のための国際基礎科学年 (IYBSSD2022)
https://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/iybssd_s/index.html
- [3] 環境省 気候変動適応法 (平成30年6月公布、令和5年4月改正)
<https://www.env.go.jp/content/000149290.pdf>
https://elaws.e-gov.go.jp/document?law_unique_id=430AC00000000050_20181201_0000000000000000
- [4] 農林水産省 みどりの食料システム戦略 (令和3年5月決定)
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/>
- [5] 農林水産省 農林水産省気候変動適応計画 (令和5年8月31日改定)
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/climate/adapt/top.html>
- [6] 日本学術会議 農学委員会 育種学分科会、報告、「気候変動に対応する育種学の課題と展開」(2017年9月27日)
<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-h170927-1.pdf>
- [7] 日本学術会議 農学委員会 農学分科会、報告、「日本における農業資源の潜在力を顕在化するために生産農学が果たすべき役割」(2020年9月1日)
<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-h200901.pdf>
- [8] Kerr, B. R., Hasegawa, T., et al, Food, Fibre, and Other Ecosystem Products. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Pörtner, H. O et al., (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 713-906, doi:10.1017/9781009325844.007., 2022
- [9] European Commission, Farm to Fork Strategy: For a Fair, Healthy and Environmentally-friendly Food System, Brussels: European Commission, 2020
https://food.ec.europa.eu/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en
- [10] 気象庁 日本の異常気象
https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/longfcst/extreme_japan/index.html (2023年9月15日確認)
- [11] 気象庁 大雨や猛暑日など(極端現象)の長期変化
https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/index_extreme.html (2023年9月15日確認)
- [12] 文部科学省, 気象庁「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―」(2020年12月公表)
<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>
- [13] 広田知良、中辻敏朗、小南靖弘監修: 北海道の最新農業気象 気候変動に対する営農技術最前線, 北海道協同組合通信社 2021
- [14] 気象庁, エルニーニョ/ラニーニャ現象 > エルニーニョ/ラニーニャ現象に関する知識 > 日本の天候に影響を及ぼすメカニズム
http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/data/el_nino/learning/faq/whatiselnino3.html
(2023年9月15日確認)
- [15] 気象庁 地球温暖化と十年規模変動
http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/mar_env/knowledge/ohc/hiatus.html
(2023年9月15日確認)
- [16] 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構(農研機構)編著 地球温暖化と日本の農業 成山堂書店 2020
- [17] 日本農業気象学会北海道支部編著 北海道の気象と農業 北海道新聞社 2012
- [18] 森田敏, イネの高温障害と対策―登熟不良の仕組みと防ぎ方、農山漁村文化協会 2011
- [19] 山形県農業総合研究センター 高温障害が発生する登熟期の危険時期の温度と期間
<https://www.naro.affrc.go.jp/org/tarc/seika/jyouhou/H22/suitou/H22suitou025.html>
1 (2023年9月15日確認)
- [20] 農林水産省 作物統計
<https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/index.html> (2023年9月15日確認)
- [21] 農林水産省 作況調査(水陸稲、麦類、豆類、かんしょ、飼料作物、工芸農作物)
https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kome/index.html#1 (2023年9月15日確認)
- [22] Yoshimoto, Y., et al., Field survey on rice spikelet sterility in an extremely hot summer of 2018 in Japan. Journal of Agricultural Meteorology 77(4), 262-269, 2021
- [23] 農林水産省 2020年農業技術10大ニュース「水稲に被害を及ぼすフェーンが発生を3日前に予報 ～白未熟粒の発生低減～」
<https://www.affrc.maff.go.jp/docs/press/attach/pdf/201223-6.pdf>
- [24] 農林水産省 九州地域の大豆をめぐる事情(令和4年1月九州農政局生産部)
<https://www.maff.go.jp/kyusyu/seiryuu/daizu/attach/pdf/kyushudaizu-1.pdf>
- [25] 奥村健治 アルファルファ新品種「ウシモスキー」の特性と普及に向けた取り組み 平成29年度自給飼料利用研究会資料
https://www.naro.go.jp/laboratory/nilgs/kenkyukai/files/jikyushiryoy2017_koen02.pdf
- [26] 農研機構 気候変動に対応したサイレージ用トウモロコシの二期作栽培技術<関東地域版>, 2017

https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/files/nilgs_report18.pdf

- [27] 農研機構 飼料用とうもろこしの作付け拡大に向けた新しい栽培技術<2014 年度版>
http://souchi.lin.gr.jp/feed_increase/pdf/corn_cultivation-technology_2014.pdf
- [28] 農林水産省 野菜のページ
<https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/yasai/> (2023 年 9 月 15 日確認)
- [29] 鮫島良次編 農業気象学入門, 文永堂出版 2021
- [30] Sugiura, T., et al., Changes in the taste and textural attributes of apples in response to climate change. *Scientific reports*, 3(1), 1-7, 2013
- [31] 農林水産省 過去の主な異常災害等と農林水産被害 (昭和 39 年から令和 3 年までの主な災害と被害額の一覧)
<https://www.maff.go.jp/j/saigai/arc/attach/pdf/index-1-2.pdf>
- [32] 農研機構 果樹研究所 果樹の災害対策集
<https://www.naro.affrc.go.jp/archive/fruit/kajyusaigai/index.html> (2023 年 9 月 15 日確認)
- [33] Fujisawa, M. and Kobayashi, K., Shifting from apple to peach farming in Kazuno, northern Japan: perceptions of and responses to climatic and non-climatic impacts. *Reg. Environ. Change*, DOI.10.1007/s10113-013-0434-6. 2012
- [34] 大政謙次, 北野雅治, 平野高司, 荊木康臣, 広田知良, 嶋津光鑑 (共編者), 農業気象・環境学 (第 3 版), 朝倉書店 2020
- [35] 農林水産省 令和 3 年地球温暖化影響調査レポート (令和 4 年 9 月)
<https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/attach/pdf/report-54.pdf>
- [36] 辻博之, 北海道畑作の大規模化における課題と今後の展望, *農作業研究* 53, 3-13, 2018
- [37] 柳沢朗, 荒木宏通, 住ノ江努, 2021 年の高温, 干ばつが北海道の加工用馬鈴薯の収量に及ぼした影響について, *北農*, 89(3), 181-189, 2022
- [38] 森元幸, ジャガイモ育種と関わって三十数年 (3) —ジャガイモシストセンチュウ、需要の変化、気象変動に向き合って—, *いも類振興情報*, 128, 17-21, 2016
- [39] 農林水産省 作物統計 市町村別データ
<https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/menseki/index.html#r> (2023 年 9 月 15 日確認)
- [40] 小麦品種「きぬあかり」育成グループ (代表: 吉田朋史), 多収・良質・良食味で耐湿性に優れる画期的な日本麺用小麦品種「きぬあかり」の育成 *育種学研究* 24, 185-194, 2022
- [41] 愛知県 小麦新品種きぬあかり
<https://www.pref.aichi.jp/engei/kinuakari/> (2023 年 9 月 15 日確認)
- [42] 農林水産省 東海の大豆をめぐる状況 (令和 4 年 1 月東海農政局)
<https://www.maff.go.jp/tokai/seisan/shinko/daizu/genchi/attach/pdf/20220113-3.pdf>
- [43] 農研機構 アスパラガスの枠板式高畝栽培 イノベ事業 02019C コンソーシアムの立

ち上げとこれから, 2023

https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/files/02019C20230208.pdf

[44] 香川県農業試験場 建築足場資材を用いた片屋根新型ハウス（2連棟タイプ）の開発, 2021 <https://www.pref.kagawa.lg.jp/documents/28565/59-3.pdf>

[45] 高知県 Next 次世代型施設園芸農業に関する産学官連携協議会
IoP (Internet of Plants) が導く Next 次世代型施設園芸農業への進化プロジェクト
<https://kochi-iop.jp/> (2023年9月15日確認)

[46] 広田知良, 山崎太地, 安井美裕, 古川準三, 丹羽勝久, 根本学, 濱寄孝弘, 下田星児, 菅野洋光, 西尾善太, 気候変動による北海道におけるワイン産地の確立—1998年以降のピノ・ノワールへの正の影響—. 生物と気象, 17, 34-45, 2017

[47] 東日本放送 地球温暖化で農業にも変化 宮城・山元町で日本最北のミカン栽培
<https://www.khb-tv.co.jp/news/14811723> (2023年9月15日確認)

[48] 山形県 山形県における地球温暖化に対応した農業関係の研究開発の取り組み
2020.12.3 令和2年度地域における気候変動適応実践セミナー（東北地域）
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/climate/seminar/attach/pdf/r2seminar-31.pdf>

[49] 愛媛県 柑橘類に対する気候変動影響等の情報収集概要
https://www.pref.ehime.jp/h25115/kikouhendo-g/documents/r3_citrus_survey.pdf
(2023年9月15日確認)

[50] 愛媛県南予地方局産業振興課産地育成室 宇和島発 地球温暖化対策 —全国初のブラッドオレンジ産地化を目指した攻めの普及活動—, 2014
<https://www.pref.ehime.jp/noukei/ehimenohukyu/documents/sanko.pdf>

[51] Fujisawa, M. and Kobayashi, K., Climate change adaptation practices of apple growers in Nagano, Japan. Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change, 16, 865-877, 2011

[52] 農研機構 東北農業研究センター 東北農業気象「見える化」システム（旧水稻冷害早期警戒システム）
<https://www.tarc-agrimet.affrc.go.jp/> (2023年9月15日確認)

[53] 農研機構 栽培管理支援システム, 2022
https://www.naro.go.jp/laboratory/niaes/contents/magis_closing.html

[54] 気象庁・農研機構 平成23～27年度共同研究報告書「気候予測情報を活用した農業技術情報の高度化に関する研究」（平成28年3月）
https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/pdf/H27_NARO-JMA_report.pdf

[55] 農研機構 農研機構メッシュ農業気象データ
<https://amu.rd.naro.go.jp/> (2023年9月15日確認)

[56] 気象庁 エルニーニョ監視速報 (No. 356) 2022年4月の実況と2022年5月～2022年11月の見通し (令和4年5月12日)
<https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/data/elnino/houdou/pdf/elnino202205.pdf>

[57] 気象庁 エルニーニョ監視速報 (No. 212) 2010年4月の実況と2010年5月～2010年

- 11月の見通し（平成22年5月11日）
<https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/data/elnino/houdou/pdf/elnino201005.pdf>
- [58] 広田知良, 古賀伸久, 岩田幸良, 井上聡, 根本学, 濱寄孝弘, 北海道における2010年の気象の特徴と農作物への影響要因, 「北海道における2010年猛暑による農作物の被害解析」報告書. 北海道農業研究センター研究資料, 69, 1-13, 2011
- [59] 国立研究開発法人海洋開発研究機構 (JAMSTEC) SINTEX-F 季節予測システム
<https://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/seasonal/overview2.html> (2023年9月15日確認)
- [60] 気象庁 季節予報って何?
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kisetsu_riyou/index.html (2023年9月15日確認)
- [61] 株式会社IHI AIを活用した中長期気象予報サービス, 2020
https://www.ihico.jp/technology/techinfo/contents_no/_icsFiles/afieldfile/2023/06/17/07_konna2.pdf
- [62] Hirota, T., Kobayashi, K., The roles of farmers, scientists, and extension staff in technology development for soil frost control as an adaptation to climate change in Tokachi, Hokkaido, Japan. In: T. Iizumi, R. Hirata, R. Matsuda (eds). Adaptation to Climate Change in Agriculture, Springer Nature, Singapore, 211-228, 2019
- [63] 農研機構 拡張された土壌凍結深制御体系を実装した情報システム, 2020
https://www.naro.go.jp/project/results/4th_laboratory/harc/2019/19_012.html
- [64] Yanai, Y., Iwata, Y., Hirota, T., Optimum soil frost depth to alleviate climate change effects in cold region agriculture, Scientific Reports, 7: 44860, DOI: 10.1038/srep44860. 2017
- [65] Shimoda S., Terasawa, Y., Kanaya, K., Control of snow mold damage of winter wheat by snow compaction (Yuki-fumi). 225, 105554, 2023
- [66] Kaneko, T., et al., A canopy photosynthesis model based on a highly generalizable artificial neural network incorporated with a mechanistic understanding of single-leaf photosynthesis. Agricultural and Forest Meteorology, 323, 1039036, 2022
- [67] 広田知良, 農業システムの気候変動適応へ向けた農業気象学的展開. アグリバイオ, 6(2), 98-102, 2022
- [68] 広田知良, 気候変動適応に関する農業分野(民間)の動向, 200-209 学術会議叢書28 日本の食卓の将来と食料生産の強靱化について考える p200-209, 2021
- [69] 北海道農政部 暗渠排水設計指針(令和元年7月)
https://www.pref.hokkaido.lg.jp/fs/7/8/8/2/8/9/0/_/ankyosisin_R0107_sisin.pdf
- [70] A-PLAT 気候変動適応情報プラットフォーム 気候変動と適応, 2021
https://adaptation-platform.nies.go.jp/climate_change_adapt/index.html

<参考資料1> 審議経過

令和3年

- 3月30日 農業生産環境工学分科会（第1回）
今期中における「意思の表出」に関する方針の確認
- 7月29日 農業生産環境工学分科会（第2回）
WG活動を中心として「意志の表出」の内容を検討することを確認

令和4年

- 2月24日 農業生産環境工学分科会（第3回）
意思の表出」として「気候変動下の食料安全保障」と「農業を核とした循環型社会構築」に関する見解を作成する方針を確認し、内容の検討を行う担当WGを決定
- 6月3日 農業生産環境工学分科会（第4回）
担当WGから提出された「国内における気候変動下における農業適応策と食料安定供給」と「施設園芸のグリーン化」に関する構成案の審議し、今後の手順を確認
- 12月27日 農業生産環境工学分科会（第5回）
概要および構成案を協議

令和5年

- 3月22日 農業生産環境工学分科会でメール審議により、査読ための原案を承認した。

＜参考資料２＞ 公開シンポジウム「気候変動適応に関する農業分野（民間）の取り組み」

日 時：令和元年（2019年）10月30日（水）13：00～18：00

場 所：北海道大学農学部4階大講堂（札幌市北区北9条西9丁目）

開催趣旨：気候変動適応策の開発は、社会・科学の中の問題でも最も重要な課題の一つである。国連が定める持続可能な開発目標（SDGs）の達成に向けた取り組みにおいても推進され、日本学術会議でも気候変動やSDGsに関する多くの関連した提言を行っている。さらに、我が国では「気候変動適応法」が平成30年に公布され、国、地方公共団体、事業者、国民が連携・協力して適応策を推進するための枠組みが整備された。農業は改めて言うまでもなく、気候変動の影響を最も受けやすい産業であり、その適応策については、これまで公的な研究機関からの成果や行政からの情報発信が多くなされている。一方、民間分野などでも活発な動きもみられるが、これらの実態を深く知る機会は多くない。本シンポジウムでは、気候変動適応に関して、農業分野の民間分野の先進的事例の動向を概観し、産官学連携に向けた研究・技術開発の方向性について議論する。

13:00 開会挨拶 仁科弘重（日本学術会議第二部会員、愛媛大学理事・副学長）

13:05 挨拶 西邑隆徳（北海道大学大学院農学研究院長）

13:10 趣旨説明 広田知良（日本学術会議連携会員、農研機構北海道農業研究センターグループ長）

講演：司会：平野高司（日本学術会議連携会員、北海道大学大学院農学研究院教授）

13:25 温暖化適応ビジネスとは（概観と農業分野への期待と展望）

新美陽大（株式会社日本総合研究所創発戦略センタースペシャリスト）

13:55 気象変動に負けない農業確立プロジェクトの取り組み

畠山重文（きたみらい農業協同組合調査役）

14:25 気候変動への対応：近年の異常気象に対するカルビーポテトの取り組み

植村弘之（カルビーポテト株式会社取締役常務執行役員）

14:55 <休憩>

司会：吉本真由美（日本学術会議連携会員、農研機構農業環境変動研究センター主席研究員）

- 15:10 気候変動による北海道のワイン産地の確立と日本ワイン発展への取り組み
齋藤浩司（北海道ワイン(株) 取締役営農部長 鶴沼ワイナリー農場長）
- 15:40 宇宙利用と中長期気象予測に向けた IHI の取り組み
大貝高士（株式会社 IHI 宇宙開発事業推進部事業企画 Gr 主幹）
- 16:10 気候変化・変動予測を活用した農業適応およびコメント
山形俊男（日本学術会議連携会員、海洋研究開発機構アプリケーションラボ特任
上席研究員）
- 16:40 <休憩>
- 16:50 総合討論 進行：広田知良
- 17:50 閉会挨拶 真木太一（日本学術会議連携会員、九州大学名誉教授、北海道大学大学
院農学研究院研究員）
- 18:00 閉会

主 催：日本学術会議農学委員会農業生産環境工学分科会、環境学委員会環境科学分科会
後 援：北海道大学大学院農学研究院、日本農業気象学会、日本農業工学会、日本生物環
境工学会、日本農学アカデミー