

1. 1-1 気温上昇や気象災害によるリンゴへの影響調査

1.1. 概要

気候変動によるリンゴ栽培への影響として懸念されている気象災害は、日焼け、凍霜害、着色不良、ひょう害などが挙げられる。本調査では、北海道・東北地域を対象に、リンゴ栽培における日焼け及び凍霜害についての将来予測を行った。その結果、日焼けについては北海道・東北全域で日焼けリスク発生日数が増加する傾向があり、21世紀末の気候シナリオ(RCP8.5)では、日焼けリスク発生日数が最大で10日以上となる地点があることが分かった。凍霜害の影響予測結果は北海道・東北全域で増減傾向は一様ではなく、増加する地域がある一方、減少する地域があることが示唆された。これらの影響に対する適応策を検討し、日焼けに対しては被覆資材や細霧冷房装置の使用、凍霜害に対しては防霜ファンの使用や燃焼法などが有効であることを確認した。

1.1.1. 背景・目的

気候変動による気温上昇等により、北海道・東北地域においてリンゴ果実の日焼け、凍霜害、着色不良、ひょう害など、気象災害の増加傾向がみられる。今後さらに気温上昇が進むことにより、気象災害の被害が増加し、リンゴの品質・収穫量に大きな影響を及ぼす可能性がある。

本調査は、将来の気候変動によるリンゴ栽培への影響が懸念される日焼け及び凍霜害の将来予測を行うとともに、日焼けの軽減を目的とした果実表面温度上昇の抑制技術を実証試験し、地方公共団体によるリンゴの気象災害に対する適応策の検討に活用することを目的として調査を実施した。

1.1.2. 実施体制

本調査の実施者：日本エヌ・ユー・エス株式会社

アドバイザー：農業・食品産業技術総合研究機構リンゴ栽培生理ユニット長 岩波 宏

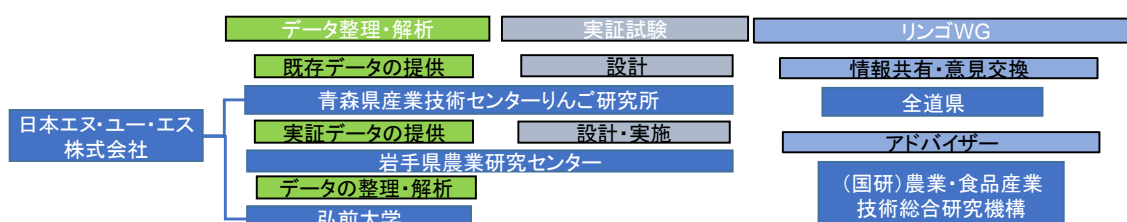


図 1-1 実施体制図

1.1.3. 実施スケジュール（実績）

3ヶ年の実施スケジュールを図 1-2 に示す。調査実施項目は、気候変動によるリンゴへの影響評価、リンゴの適応技術に関する実証試験調査、リンゴ WG の実施、適応策の検討の 4 項目である。気候変動によるリンゴへの影響評価では、1年目に既存の気候データを活用して気温上昇予測を行い、2年目に日焼け及び凍霜害の影響評価を行った上で、3年目に収集した地点別の気候データを活用して評価の妥当性を確認した。実証試験調査

では、1年目に実証試験の計画を作成し、2年目に実証試験を実施した。リンゴWGは各年度1～2回、自治体の研究機関の研究者と検討項目の方向性の確認や評価結果についての意見交換を行った。適応策の検討は、影響評価結果を踏まえて3年目に実施した。

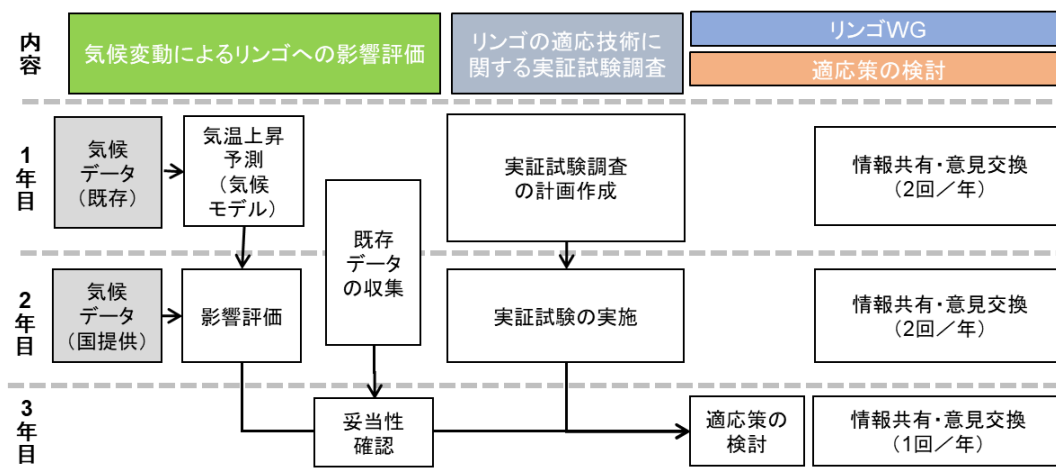


図 1-2 調査実施スケジュール

1.1.4. 気候シナリオ基本情報

本調査で使用した気候シナリオの基本情報は、表 1-1 のとおりである。

表 1-1 使用する気候パラメータ

項目	日焼け	凍霜害
気候シナリオ名	NIES 統計 DS データセット	
気候モデル	MRI-CGCM3、MIROC5	
気候パラメータ	日最高気温	日最低気温
排出シナリオ	RCP2.6、RCP8.5	
予測期間	21 世紀中頃 21 世紀末	
バイアス補正の有無	有り (全国)	

1.1.5. 気候変動影響予測結果の概要

文献調査での結果、以下のことが分かった。

- ・ 夏季の高温・少雨や強い日射が日焼け果の原因になる。
- ・ 暖冬の程度が強いほど耐凍性が低下し、凍害発生危険性が增大する。
- ・ 近年の気温上昇によりほとんどの産地で発芽期・開花期が早まり、日焼けや凍霜害などのリンゴへの障害は、ほとんどの樹種、ほとんどの地域に及んでいる。

ヒアリングの結果、以下のことが分かった。

- ・ リンゴ果実の表面温度上昇が日焼け発生の要因である。主な対策としては、被覆資材や

ミストなどを使用することにより果面温度の上昇を抑制することである。

- ・ 近年、発芽期の前進傾向が見られるとともに、凍霜害の被害が増えてきている。気温差の大きな東北地方においては、将来凍霜害のリスクが高まる可能性がある。対策としては、防霜ファン、スプリンクラー、燃焼材の使用などが挙げられる。

影響予測を行った結果、以下のことが分かった。

- ・ 日焼けについては、東北全域でリスクが増加する傾向があることが分かった。
- ・ 凍霜害については、リスクが増加する地域と減少する地域があることが分かった。

1.1.5.1. 日焼け

日焼けの影響予測結果を図 1-3 及び図 1-4 に示す。日焼けの影響評価は、日最高気温が 33℃以上となる日を日焼けリスク発生日と定義し、その該当日数の増減によって評価した。現在では、日焼けリスク発生日数は東北北部内陸で年間数日程度、東北南部内陸で年間十数日程度であり、7月・8月に集中して見られるのに対し、21世紀末の RCP8.5 では日数が極端に増加しており、8月は東北の日本海側を中心に、連日のように日焼けリスクが発生する日となる。気候モデル・将来気候シナリオの違いによらず、いずれの解析事例にも共通して日焼けリスクの増加を示していることから、将来の日焼けリスク増加は、確実性が高いものと推察される。

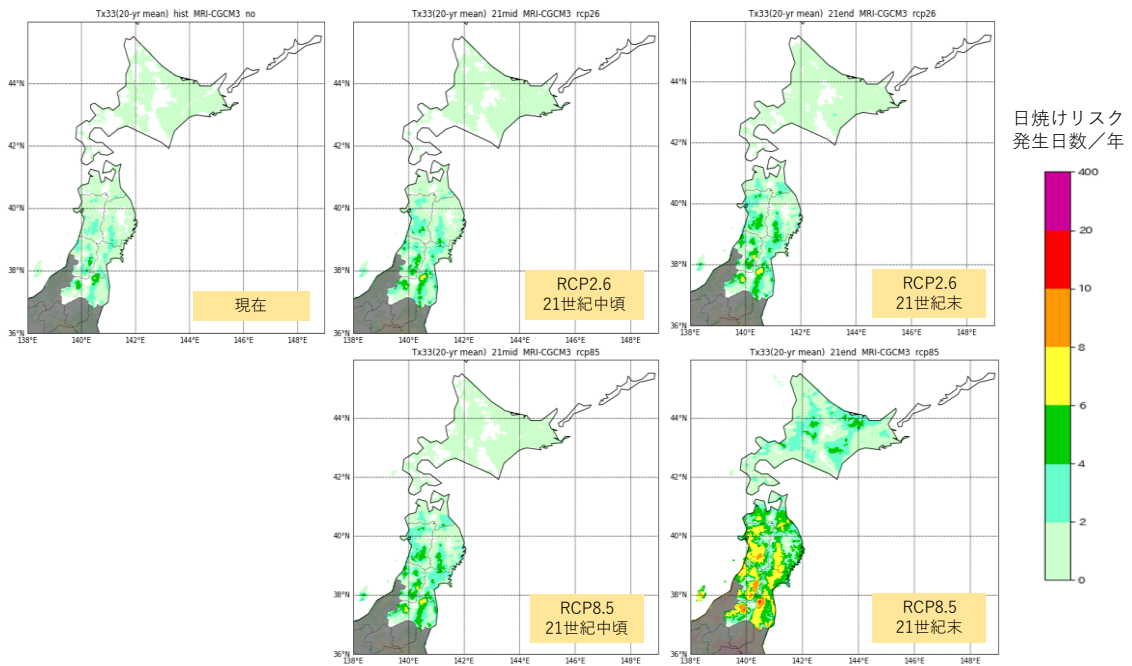


図 1-3 日焼けリスク評価結果 (MRI-CGCM3)

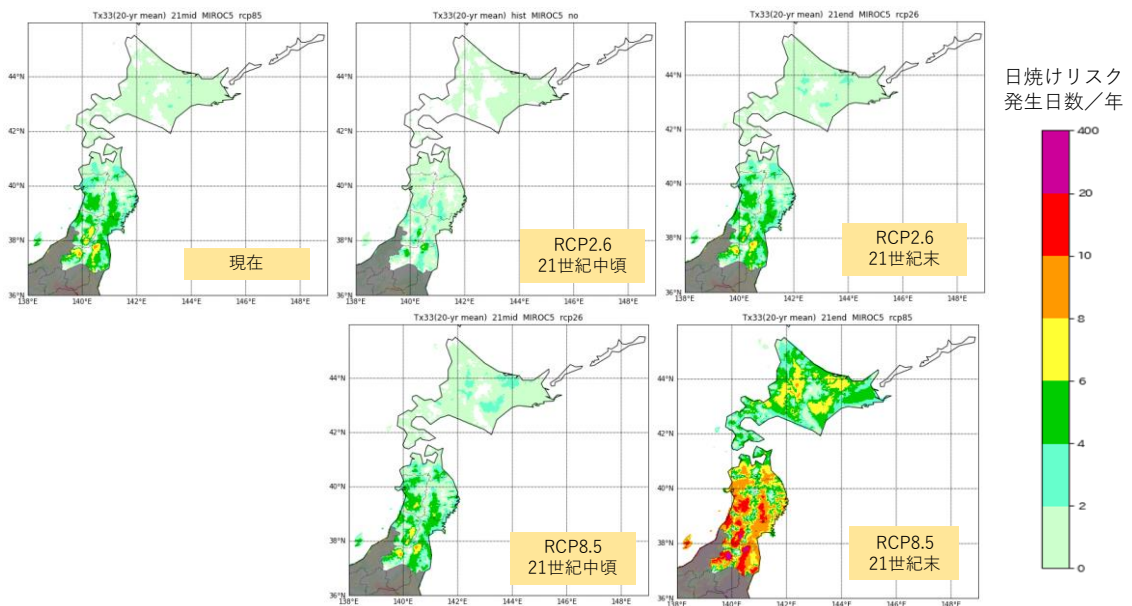


図 1-4 日焼けリスク評価結果 (MIROC5)

1.1.5.2. 凍霜害

凍霜害のリスクは、「危険度 0.5」及び「安全限界温度+2℃」の2つの指標を用いて評価している。凍霜害リスクの評価手法を図 1-5 に示す。いずれの指標についても、まずリンゴの生育モデルを活用して生育ステージを将来予測したのち、各生育ステージでの日最低気温が基準温度以下となったときに凍霜害リスクがあると判定した。2つの指標のうち、危険度 0.5 指標は、栽培現場で実際に凍霜害の被害が生じる可能性があるリスクを評価したものであるのに対し、安全限界温度+2℃指標は、栽培者が防霜対策の検討が必要となるリスクを評価したものである。

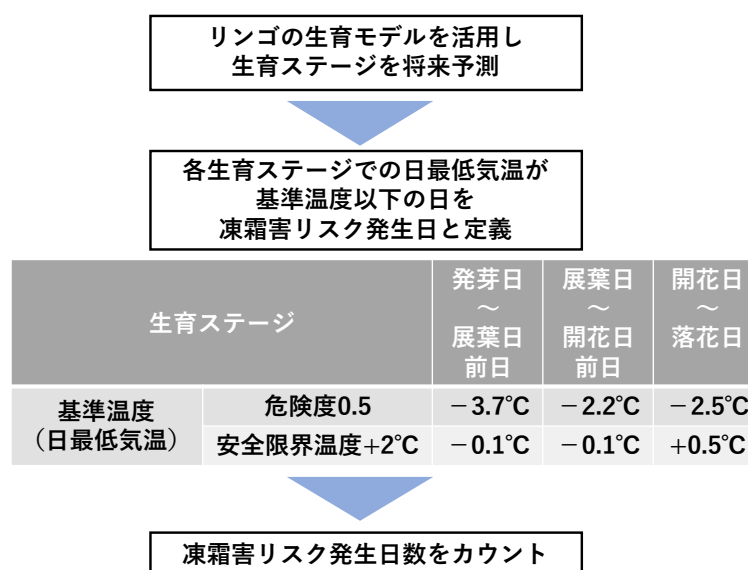


図 1-5 凍霜害リスクの評価手法

図 1-6 及び図 1-7 は、栽培現場で実際に凍霜害の被害が生じる可能性があるリスクを評価した危険度 0.5 指標である。危険度 0.5 指標の結果としては、現在では大部分の地域で1年当たり1日未満である。MRI-CGCM3 では、全体的に微減を示す地域が卓越している。MIROC5 では、微増する地域、微減する地域がみられた。

図 1-8 から図 1-11 は、栽培者が防霜対策の検討が必要となるリスクを評価した安全限界温度+2℃指標である。安全限界温度+2℃指標では、21 世紀末/RCP8.5 のような最も温暖化が進行した事例で凍霜害リスクが減るものの、その中間のレベルの温暖化では、凍霜害リスクが増加する傾向がある。

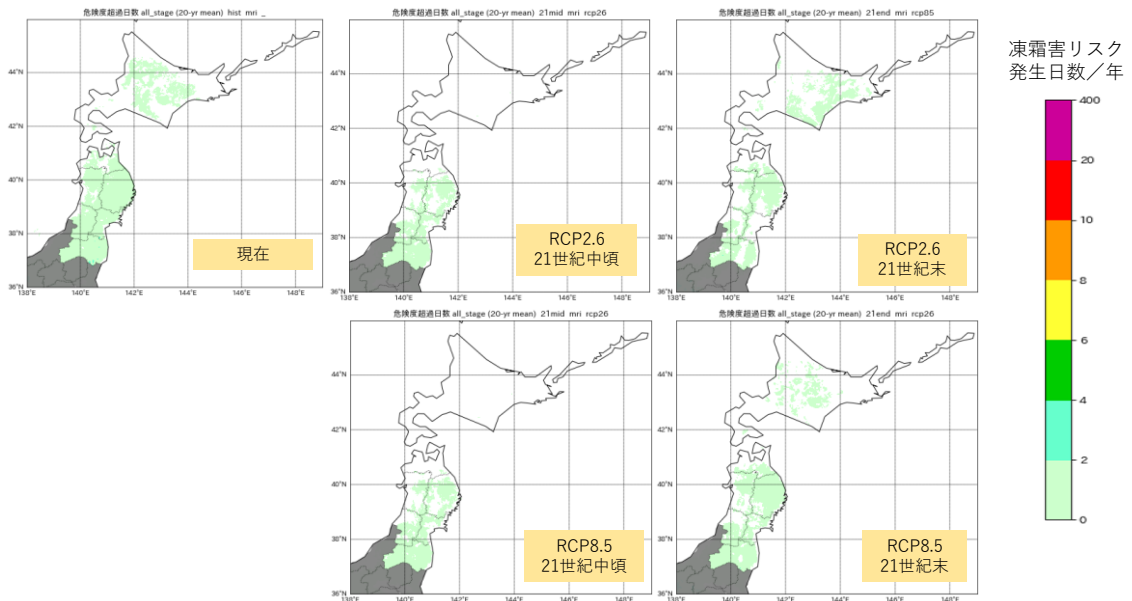


図 1-6 危険度 0.5 指標による凍霜害評価結果 (MRI-CGCM3) ¹

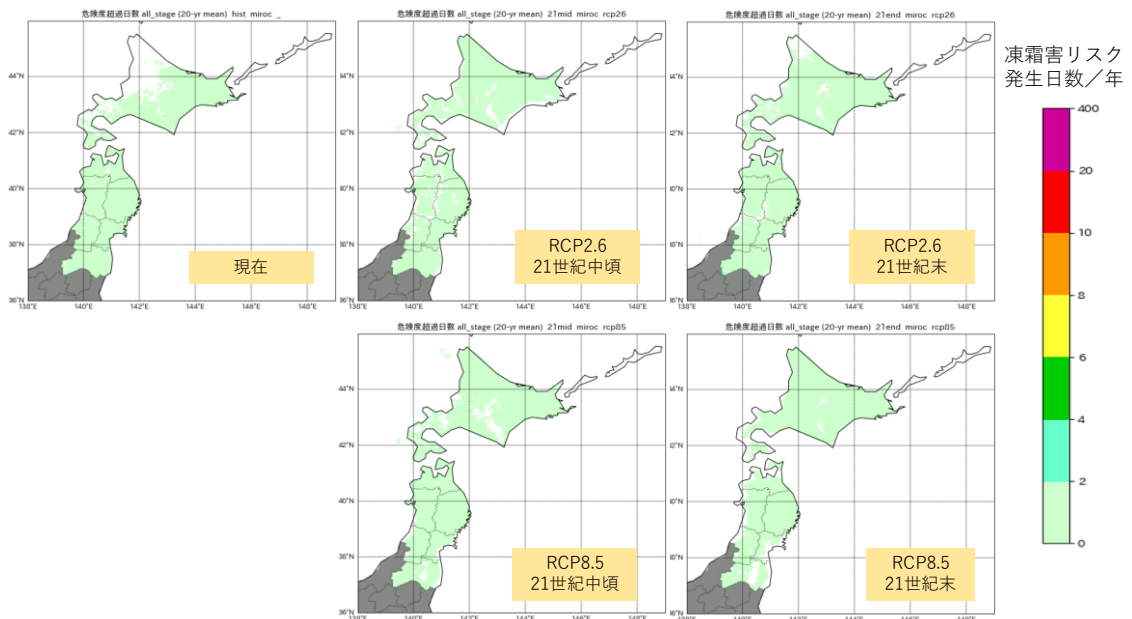


図 1-7 危険度 0.5 指標による凍霜害評価結果 (MIROC5)

¹ RCP2.6no21 世紀中頃と 21 世紀末の評価の逆転について : MRI-CGCM3 の RCP2.6 のシナリオでは、北海道地方において 21 世紀中頃より 21 世紀末が、危険度 0.5 指標による凍霜害リスクが高くなることが予測されている。この原因は、凍霜害の判定に使用した最低気温が 21 世紀中頃よりも 21 世紀末においてデータのばらつきが大きくなり、極端に寒い日が予測されていることによるものである。

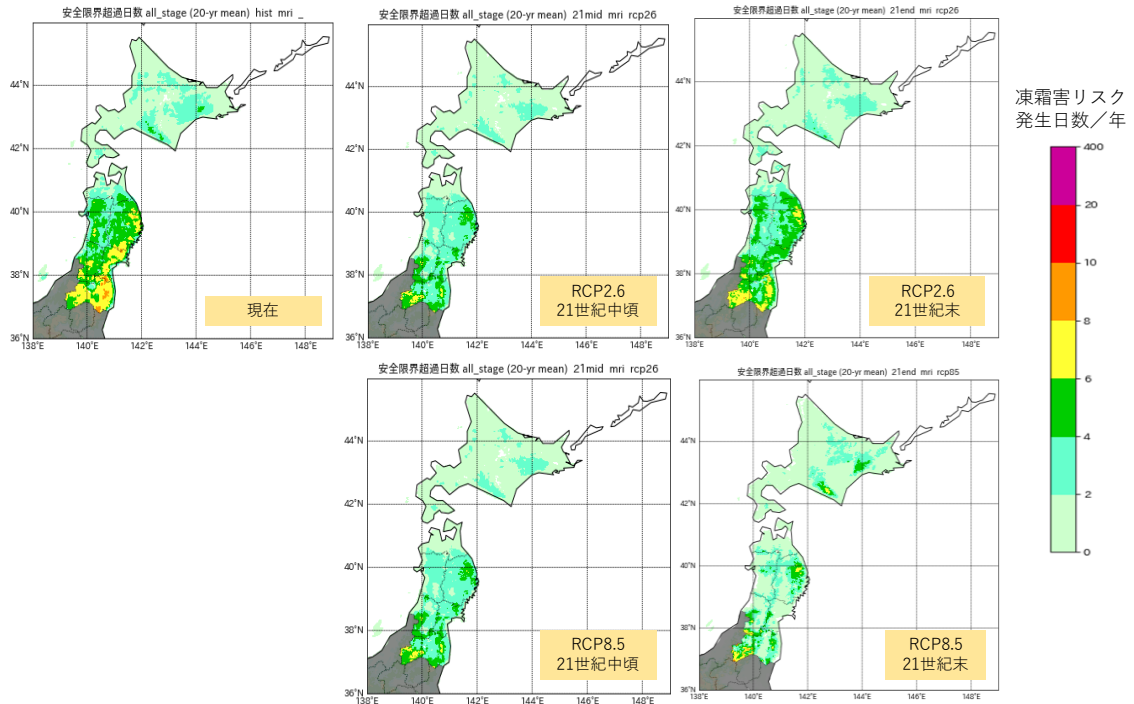


図 1-8 安全限界温度+2°C指標による凍霜害評価結果 (MRI-CGCM3)

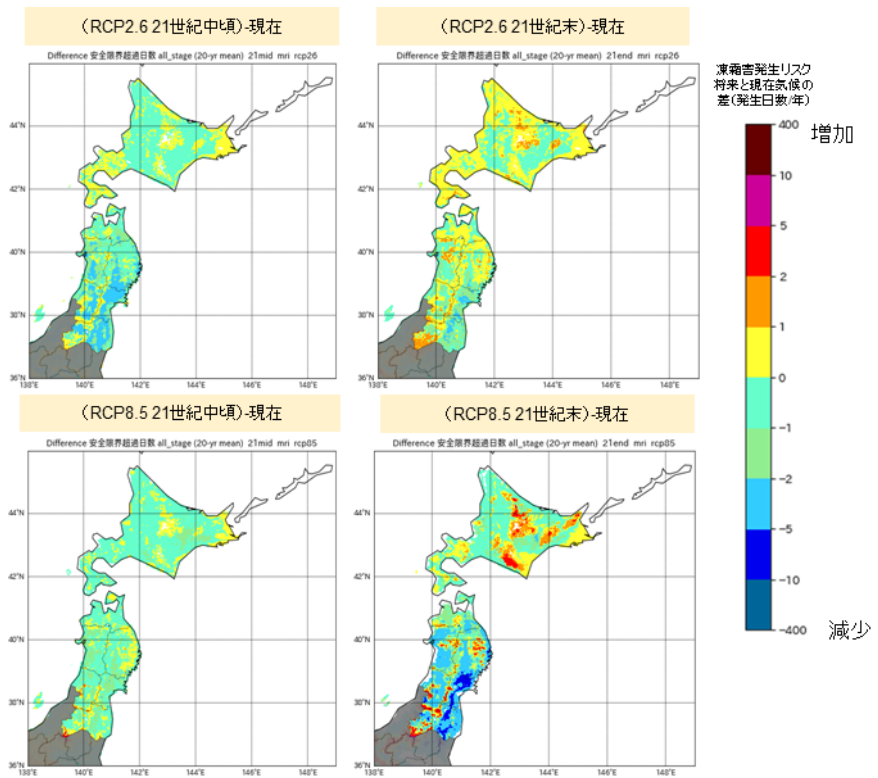


図 1-9 安全限界温度+2°C指標による凍霜害リスク発生日数
現在と将来予測の差 (MRI-CGCM3)

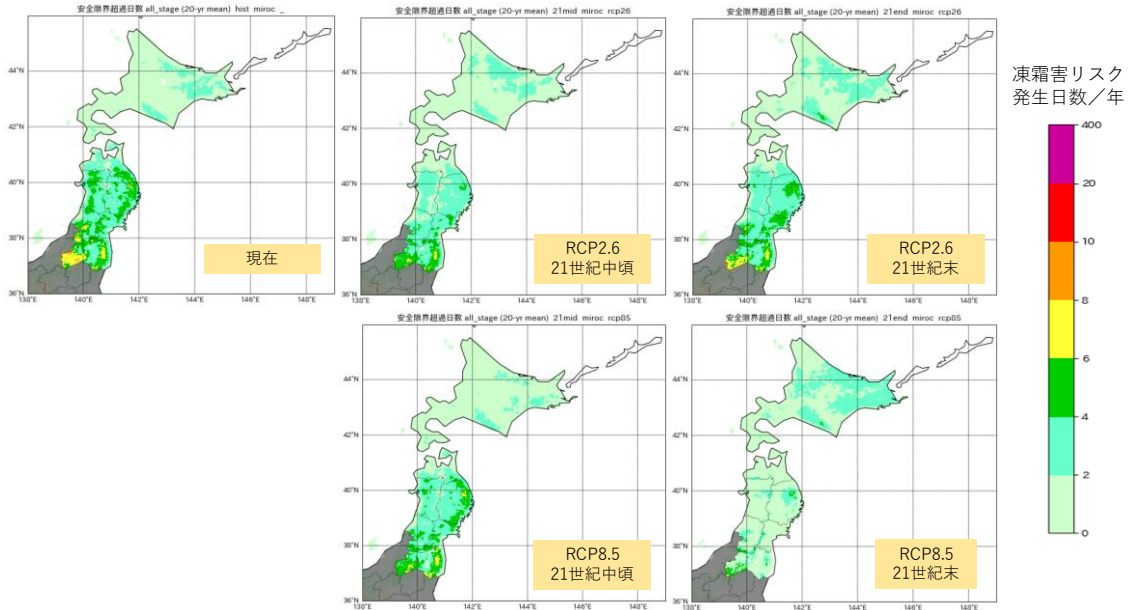


図 1-10 安全限界温度+2°C指標による凍霜害評価結果 (MIROC5)

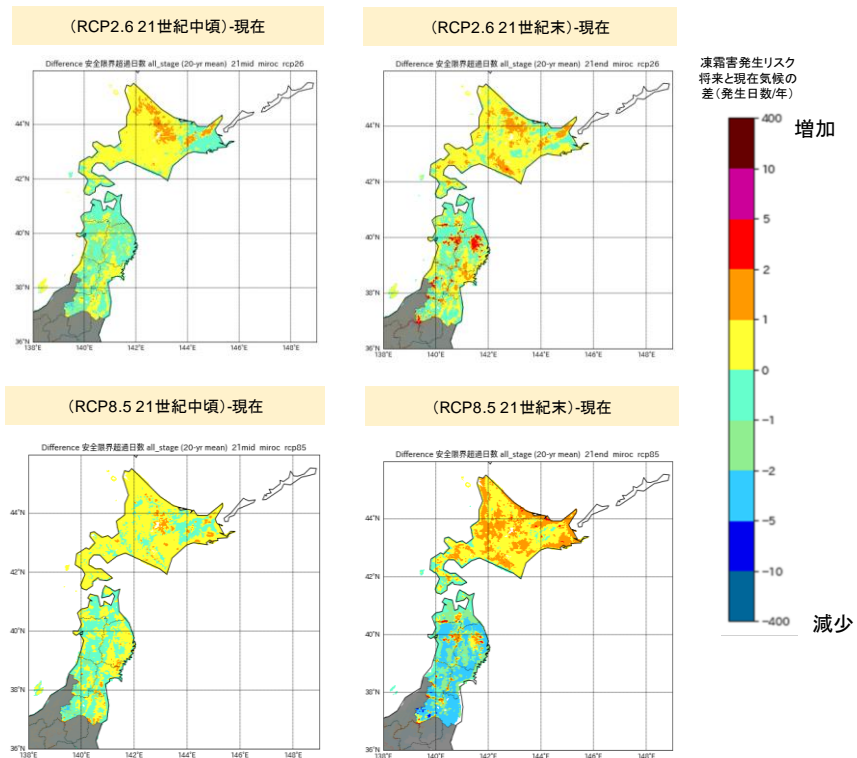


図 1-11 安全限界温度+2°C指標による凍霜害リスク発生日数
現在と将来予測の差 (MIROC5)

1.1.6. 活用上の留意点

1.1.6.1. 本調査の将来予測対象とした事項

本調査では、気候変動による気温上昇がリンゴの日焼け及び凍霜害のリスク発生日数を対象とした影響予測を実施した。

1.1.6.2. 本調査の将来予測の対象外とした事項

本調査における日焼け及び凍霜害の評価では、リスクのある日の発生頻度についての評価であり、被害の程度については評価対象外である。

1.1.6.3. その他、成果を活用する上での制限事項

凍霜害は、地形や地物等の状況で局所性を有する気象災害という一面も有しており、本結果が北海道・東北地域全体として、将来の凍霜害対策が不要となることを意味するわけではないことに留意する必要がある。

1.1.7. 適応オプション

調査において検討した適応オプション及びその考え方を表 1-2～表 1-3 に示す。

表 1-2 適応オプション

適応 オプション	想定される 実施主体			評価結果							
	行政	事業者	個人	現状		実現可能性				効果	
				普及状況	課題	人的側面	物的側面	コスト面	情報面	効果発現までの時間	期待される効果の程度
被覆資材（寒冷紗・果実袋等）の使用		●		普及が進んでいる	個別に作業をする必要があり、労力を要する。	◎	○	△	◎	短期	高
細霧冷房装置の使用		●		普及が進んでいない	水源が確保されていることが前提となり、導入可能な場所は限られる。	◎	○	△	◎	短期	中
かん水の実施		●		-	確実に効果を得るための技術検証が必要。	◎	○	△	◎	短期	低
防霜ファンの使用		●		普及が進んでいる	設備投資額が大きく、自己資金のみでの導入を前提とした場合、普及は限定される。	◎	○	△	◎	短期	高
散水氷結法		●		-	水源が確保されていることが前提となり、導入可能な場所は限られる。	◎	○	△	◎	短期	高
燃焼法		●		普及が進んでいる	燃焼資材の管理に手間と労力がかかる。	◎	○	△	◎	短期	高
品種更新		●		普及が進んでいる	品種が多く、品種の選択を慎重に行う必要がある。	◎	○	△	◎	長期	高
樹種転換	●	●		-	ブランディングに時間がかかる。	◎	○	△	◎	長期	中

表 1-3 適応オプションの考え方

適応オプション	適応オプションの考え方と出典
【日焼け】被覆資材（寒冷紗・果実袋等）の使用	日焼けが発生しそうな箇所に対して選択的に使用可能で、高額な費用がかからない点で有効な適応オプションであり、普及状況は「普及が進んでいる」とした。
【日焼け】細霧冷房装置の使用	文献により特定したが、東北地方では福島県で試験を行っている状況であったため、普及状況は「普及が進んでいない」とした。 (出典：富山県農林水産総合技術センター)
【日焼け】かん水の実施	中部地方で実績があるが、本コンソーシアム事業で行った実証試験では十分な効果を確認出来ず、効果を得るための技術検証が必要であると判断し、期待される効果の程度を「低」とした。 (出典：長野県農業技術課)
【凍霜害】防霜ファンの使用	リンゴWG及び自治体へのヒアリングにより普及状況について「普及が進んでいる」ことを確認した。
【凍霜害】散水氷結法	導入には水源の確保などの制約があるため、普及状況は「一」とした。 (出典：岩手県農作物気象災害対策本部)
【凍霜害】燃焼法	リンゴWGにおいて最も一般的な凍霜害対策であるとの意見であったため、普及状況について「普及が進んでいる」とした。
【着色不良】品種更新	リンゴWGにおいて着色不良に対する最も有効な適応オプションとして品種更新が挙げられ、導入が進んでいることを確認したため、普及状況について「普及が進んでいる」とした。
【全般】樹種転換	農業事業者の判断で樹種転換が実施可能なため、人的側面は「◎」とした。

1.2. 気候シナリオに関する情報

1.2.1. 気候シナリオ基本情報

本調査で使用した気候シナリオの基本情報は、表 1-4 のとおりである。

表 1-4 気候シナリオの基本情報

項目	日焼け	凍霜害
気候シナリオ名	NIES 統計 DS データセット	
気候モデル	MRI-CGCM3、MIROC5	
気候パラメータ	日最高気温	日最低気温
排出シナリオ	RCP2.6、RCP8.5	
予測期間	21 世紀中頃 21 世紀末	
バイアス補正の有無	有り（全国）	

1.2.2. 使用した気候パラメータに関する情報

日焼けの影響予測に使用する気候パラメータは日最高気温、凍霜害の影響予測に使用する気候パラメータは最低気温である。図 1-12 及び図 1-13 は福島市における 8 月の日最高気温及び日最低気温の観測値と現在、RCP2.6 の 21 世紀中頃、RCP8.5 の 21 世紀末を比較した結果である。RCP8.5 では、21 世紀末までに現在から 4℃程度の気温上昇が予測されている。

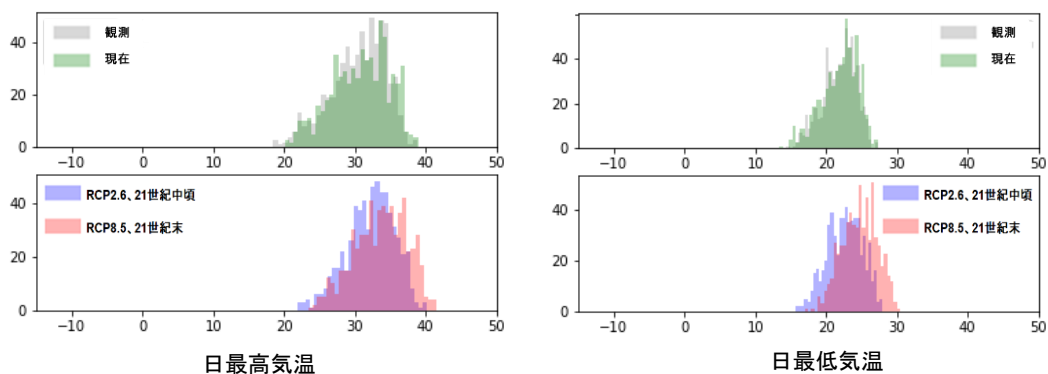


図 1-12 福島市における 8 月の気温頻度分布 (MRI-CGCM3)

(上段：観測値 (灰)、現在 (緑)、下段：RCP2.6・21 世紀中頃、RCP8.5・21 世紀末)

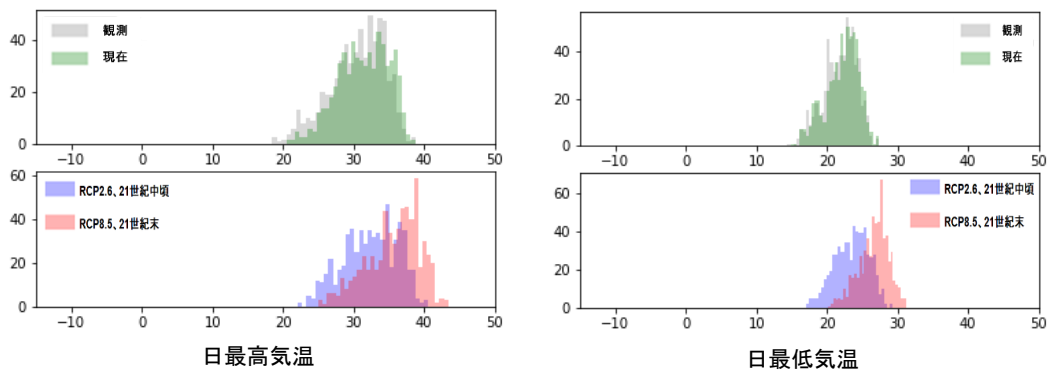


図 1-13 福島市における 8 月の気温頻度分布 (MIROC5)

(上段：観測値 (灰)、現在 (緑)、下段：RCP2.6・21 世紀中頃、RCP8.5・21 世紀末)

1.2.3. 気候シナリオに関する留意事項

日焼けの影響評価モデルの再現性確認は、収集した気象データと同地点の気候モデル値の値を比較した。その結果、観測値の平均・レンジと、気候モデル値の現在の平均・レンジが概ね一致しており、気候モデルの現在値は、概ね再現できていると考えられる。図 1-14 は、岩手県農業研究センターから収集した 7 月の気温頻度分布と気候モデルを比較した結果である。

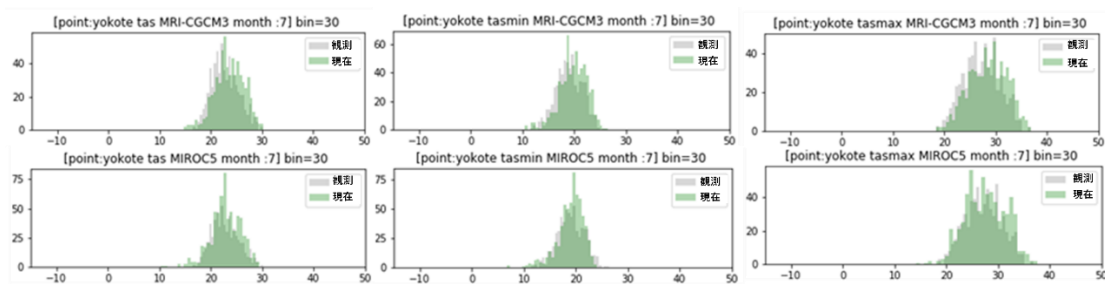


図 1-14 岩手県農業研究センターにおける 7 月の気温頻度分布

左列より日平均気温、日最低気温、日最高気温
 上段「MRI-CGCM3 観測値 (緑)、現在 (灰)」
 下段「MIROC5 観測値 (緑)、現在 (灰)」

凍霜害の影響評価モデルの適用にあたっては、長期間の生育・気象観測が利用できる青森県産業技術センターりんご研究所 (1968～2015 年)・秋田県果樹試験場本場 (1980～2017 年) で再現性を検証した。その結果、発芽日・開花日とも予測誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) で 3～4 日程度となり、若干の経年変化が認められた。凍霜害リスク評価では、展葉日・落花日も合わせて推定することが必要であるため、伊藤 (2018) のモデル式はそのままとし、各生育ステージへの到達を規定する発育指数 (²DVI 値: Developmental Index) を決め直すこととした。2001～2010 年の気象・生育ともに観測記録がある各県果樹試験場相当機関 5 地点 (青森県産業技術センターりんご研究所、秋田県果樹試験場本場、秋田県果樹試験場果樹センター、岩手県農業研究センター、山形県農業総合研究センター園芸試験場) のデータを用いて決め直したことにより予測誤差は 2～3 日程度となった。

1.2.4. バイアス補正に関する情報

本調査では、全国一律でバイアス補正が行われたデータを使用しており、バイアス補正は行っていない。

1.2.5. 気候シナリオ選択の理由

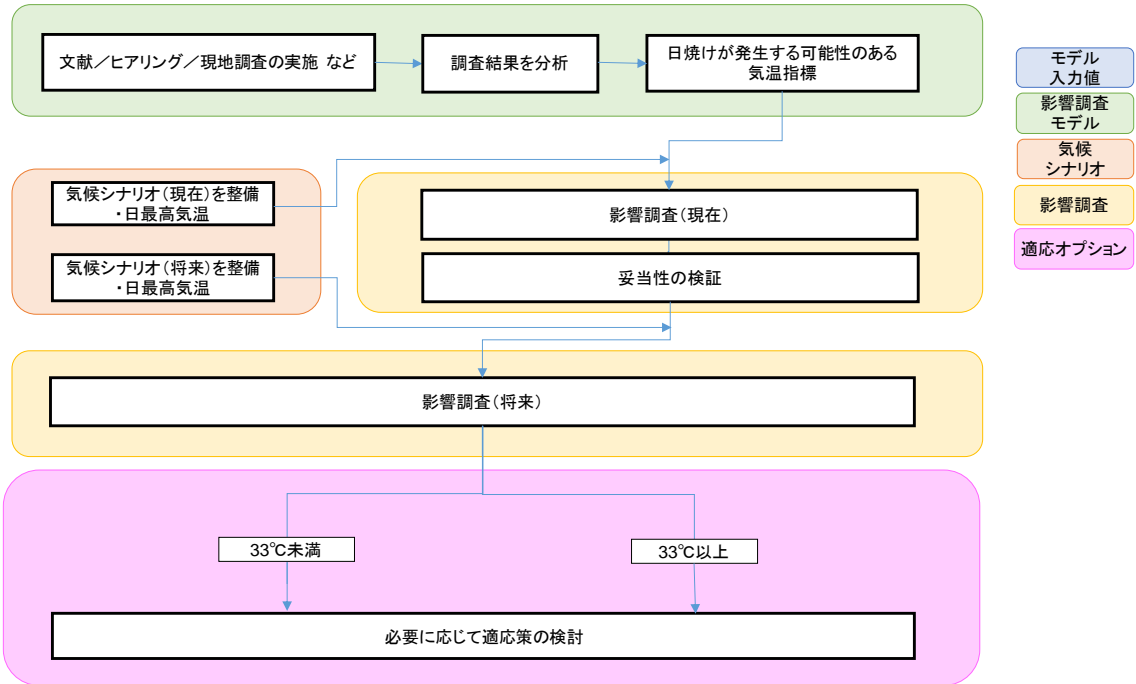
将来気候シナリオ間での不確実性を考慮するため、この 2 種類の将来気候シナリオを別個に影響評価に用いた。

² 発育ステージを数値化し、日々の発育速度を積算して得られる。

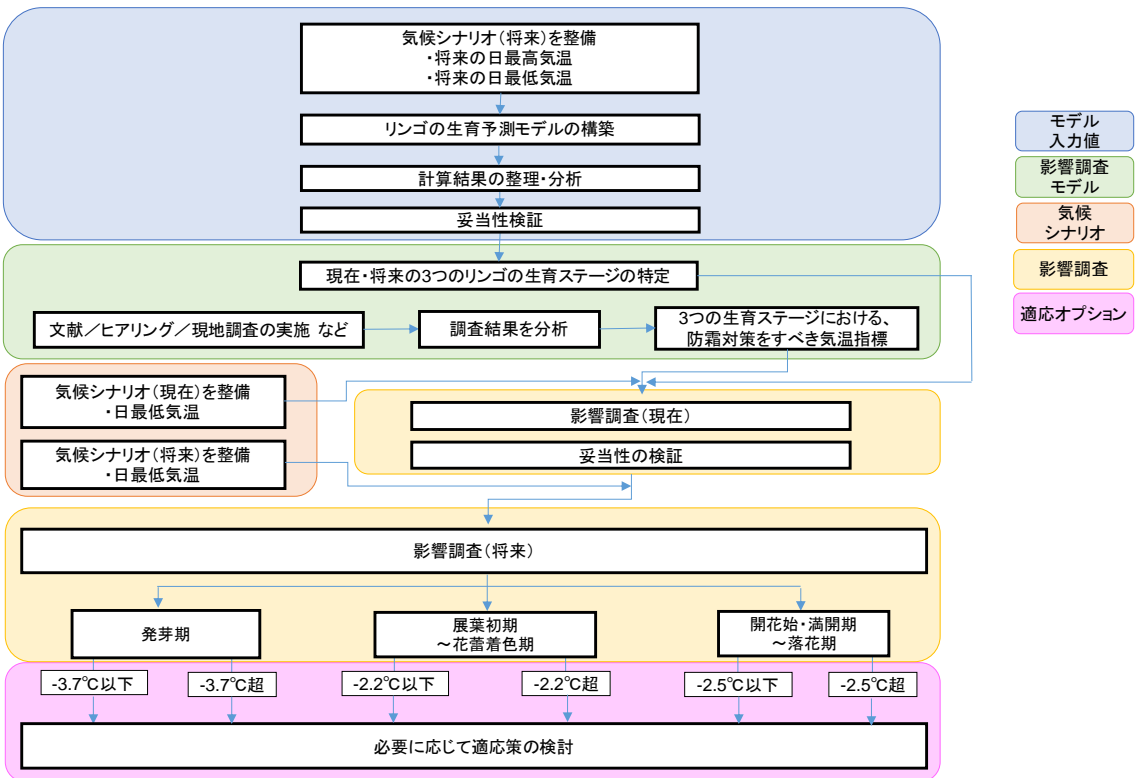
1.3. 気候変動影響に関する調査手法

1.3.1. 手順

(1) 日焼け



(2) 凍霜害



1.3.2. 使用したデータ・文献

日焼けの影響評価に必要なデータとしては、「日最高気温」が必要となる。凍霜害の影響評価に必要なデータとしては、生育ステージの特定のために「日最低気温」と「日最高気温」、凍霜害リスク発生日の特定のために「日最低気温」が必要となる。これらのデータについては NIES 統計 DS データセットに含まれているが、モデルの再現性確認や精緻な影響評価を行うために、気象観測データに加え、過去の生育期に関するデータ（開花日・展葉日・開花日・満開日・落花日）、過去の日焼け発生記録、過去の凍霜害発生記録のデータが必要となる。これらのデータを収集するため、各地方公共団体に対してアンケートやヒアリングを行い、影響評価に利用可能なデータが揃っていた青森県黒石市、岩手県北上市、山形県寒河江市、秋田県横手市のデータを収集した。

そのほか、収集したデータや文献については収集データリスト及び、参考文献リストを参照。

1.3.3. 有識者ヒアリング

有識者ヒアリングの概要を、表 1-5 に示す

表 1-5 ヒアリング結果

NO.	1
ヒアリング対象者	(地独) 青森県産業技術センターりんご研究所 栽培部長 工藤氏
日付	2017年8月22日
場所	(地独) 青森県産業技術センター りんご研究所
概要	これまでに凍霜害、着色不良、日焼け、病害に関する対策など、気候変動対策の研究・試験を実施してきている。 日焼け対策は、シート、果実袋、笠などによる被覆やアブシジン酸を含有する肥料や石灰資材等の散布などの試験を実施してきた。また、着色不良に関する試験も実施している。 日焼け・着色不良は時々発生するが、すぐに対策が必要な状況ではない。 凍霜害対策の試験はこれまでに各地で多く実施されている。 データはあるが、気象と生育状況の相関を解析できる要員はいない。

NO.	2
ヒアリング対象者	(国研) 農業・食品産業技術総合研究機構 果樹茶業研究部門 リンゴ栽培生理ユニット長 岩波氏
日付	2017年8月28日
場所	(国研) 農業・食品産業技術総合研究機構 果樹茶業研究部門
概要	<p>日焼けは、品種による差がある。</p> <p>近年の日焼けの発生にともない、農水省は、散水や袋による被覆による対策等を奨励している。</p> <p>凍霜害の発生は、主に発芽～開花期である。</p> <p>福島県では防霜ファン、スプリンクラー、燃焼材により凍霜害対策が行われている。</p> <p>福島県では凍霜害の危険度予測モデルの開発が進んでいる。</p>
NO.	3
ヒアリング対象者	岩手県農業研究センター 技術部 果樹研究室 佐々木室長、大野主査
日付	2017年9月6日
場所	岩手県農業研究センター
概要	<p>日焼けによりリンゴの品質が落ちる。日焼けは、果面温度が50℃を超えると、被害率が50%となるため、果面温度上昇の抑制が重要となる。</p> <p>北海道・東北地域全体に共通したテーマについて調査する場合には、リンゴの表面温度と気温の関係を明らかにするなど、基礎的な調査になるかと思われる。</p> <p>圃場ごとの栽培面積が比較的小さな長野県では寒冷紗による被覆効果の実証試験がなされている。一方、同面積が大きな岩手県(5~10ha)においては、寒冷紗では覆いきれない。</p> <p>ドライミストは石川県で実施されているが、岩手県では大量の水が必要となり、費用が高くなる。</p> <p>風は気温を下げる効果があるため、夏場における防霜ファンの利用は、果面温度の上昇を抑制する効果が期待され、冬場の凍霜害対策と併せて機器の有効活用にもつながる。</p> <p>近年、発芽期の前進傾向が見られる中、凍霜害による全滅が怖い。地球温暖化により高い気温が続いた後、例年の気温に下がった時の戻り幅により被害の大きさも異なる。</p> <p>気温差の大きな東北地方において、温暖化の影響により開花時期が前進することで、凍霜害のリスクが高まると言われている。</p> <p>凍霜害の被害は増えてきている。平成22年度の凍霜害は大きな被害をもたらした。</p>

NO.	4
ヒアリング対象者	福島県農業総合センター 果樹研究所 栽培科長 増子氏
日付	2017年9月19日
場所	福島県農業総合センター 果樹研究所
概要	<p>日焼けは頻繁には起きてない。ふじよりもつがるのほうが被害は多いが、軽度のものである。被害を受けた実を落とすことで対策をしている。</p> <p>1980年及び1990年代と比較し、2000年代に凍霜害の被害は多くなっている。</p> <p>果樹全般の発芽期、開花盛期は前進傾向にある。</p> <p>最近は被害が4月～5月初旬に発生する傾向にある。一方、終霜日は早まっている。</p> <p>霜害は福島県、長野県、山梨県で発生しているが、関東地方では発生していない。地球温暖化の進行により、現在霜害が発生している地域は将来現在の関東地方と同様に凍霜害の被害は発生しなくなるものと推測される。一方、福島県以北の東北地方においては、今後、凍霜害は増加するものと推測される。</p>

1.3.4. 観測及び実証実験

地域特性を踏まえつつ費用対効果などの実用面も考慮し、(1) 防霜ファン利用によるリンゴ果実表面温度の上昇抑制技術の実証試験、(2) かん水による果実表面温度の上昇抑制試験を行った。

(1) 防霜ファン利用によるリンゴ果実表面温度の上昇抑制技術の実証試験

日焼けが発生しやすい盛夏において、果実表面温度が 45℃以上かつ風速 1m/s 未満となる時間帯に、既存の防霜ファンを活用しリンゴ樹に向けて送風し、日焼け発生 of 要因となる果実表面温度の上昇を抑制する効果を確認した。

(2) かん水による果実表面温度の上昇抑制試験

気候変動による気温の上昇に伴って土壌の水分が通常以上に不足すると、リンゴ樹体の水分吸収量の減少及びリンゴ果実の水分流動の停滞が発生する。果実内の水分流動の停滞は、日焼け果の発生を助長する。リンゴ樹の樹冠下にかん水することで、リンゴ果面からの蒸散効果を促し、果実表面温度の上昇を抑制する効果があれば、リンゴ果実の日焼け果発生抑制につながると考えられる。実証試験では、高温・乾燥条件下において、土壌表面下 20cm の pF 値が 2.5 を上回った際に、リンゴ樹の根本を 2×6m に 360L かん水することでリンゴ果面からの蒸散効果を促し、果実表面温度の上昇を抑制する効果を確認した。

1.3.5. 気候変動影響予測手法の検討

本調査では、将来気候予測データセットを用いて北海道・東北地域の年平均気温の将来変化を把握した。使用したデータセットは、2種類の一般大循環モデル（MIROC5、MRI-CGCM3）、2種類の将来気候シナリオ（RCP2.6、RCP8.5）により、現在、21世紀中頃、21世紀末の各20年間を対象に、平均気温とその変化を解析し、地図上に表現した。

気候モデル間での不確実性を考慮した解析を行なうため、この2種類の気候モデルを別個に影響評価に用いることとした。

1.3.6. 影響予測モデルに関する情報

1.3.6.1. 一般大循環モデル（MIROC5、MRI-CGCM3）

日焼けの影響予測は、一般大循環モデル（MIROC5、MRI-CGCM3）を採用した。リンゴの日焼けは、果面が高温にさらされたときに生じ、将来の温暖化により発生の増加が懸念されている。本解析では、夏季（7月～9月）の最高気温に着目して解析を行なった。まず、全体的な傾向を把握するため、これまでに観測された気象観測記録をもとに、各月平均した日平均気温・日最高気温の推移を把握した。つぎに、日最高気温が33℃以上となる日を日焼けリスク発生日と定義し、該当日数の増減によって日焼けリスクを評価した。

1.3.6.2. 凍霜害危険度予測モデル（ロジスティック回帰モデル）

凍霜害リスクを面的分布図として評価するためには、リンゴの生育プロセスを模したモデルを使用する必要があるため、適用するモデルの検討を行った上で凍霜害リスクの評価を行った。

凍霜害リスクの評価では、春先の晩霜害を扱うこととした。リンゴは、北海道・東北地方の冬季の厳しい寒さに耐える一方、春の新芽や花器は寒さに対する耐性が強くないため、寒の戻りのような春先の急激な気温低下により、これらの部位に凍霜害による障害が生じることがある。これにより、果実の収量減や、さび果や変形果の発生増加が危惧される。耐寒性はリンゴがどの生育ステージにあるかによっても異なる。そこで、凍霜害のリスクは、最低気温を基準にした2つの指標を用いて生育ステージごとの耐寒性を考慮して凍霜害リスクを判定し、気候変動による影響を評価した。凍霜害指標の1つは、佐久間・斎藤ほか（2013）が報告した低温処理実験に基づく凍霜害危険度で、被害率30%以上となる危険度（ある気温に1時間以上さらされたときに、被害率30%以上の凍霜害が発生する確率）を、気温の関数としてロジスティック曲線でフィッティングしたものである（図1-15参照）。今回はこの危険度が0.5となる気温を用いて評価した（以後、「危険度0.5」とする）。

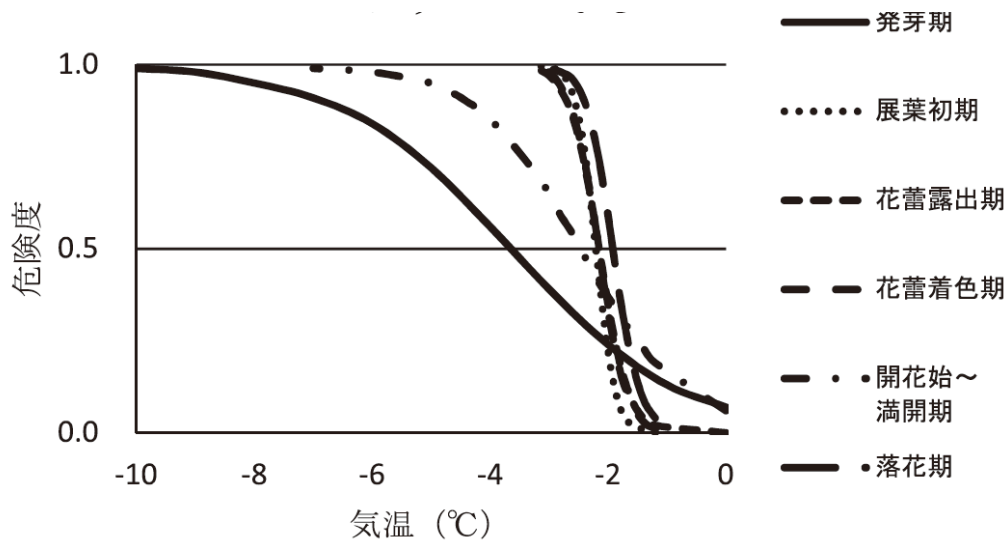


図 1-15 凍霜害危険度予測モデル（ロジスティック回帰モデル）

もう1つは、福島県が農家向けの凍霜害対策の指導で用いている安全限界温度である。植物体の温度として定義され、この温度に1時間さらされたとき、花卉がわずかでも障害を受ける。晴れた日の夜間や明け方では、植物体の温度は気温よりも下がるため、今回の解析では、植物体の安全限界温度+2°Cの気温を凍霜害リスクの発生日とした（以後、「安全限界温度+2°C」とする）。

いずれの指標も細分化された生育ステージごとに温度が決められているが、各県の果樹試験場相当機関では、発芽・展葉・開花・満開・落花の生育ステージイベントの暦日が記録されていることが一般的である。凍霜害のリスク評価では、2つの指標の気温閾値を以下の3ステージに簡約化して、表1-6のように設定した。この閾値以下に最低気温が下がったときに凍霜害リスクがあると判定することとした。

表 1-6 リンゴの生育ステージ分類及び2つの指標の気温閾値

	ステージ1 発芽日～ 展葉日前日	ステージ2 展葉日～ 開花日前日	ステージ3 開花日～ 落花日
危険度 0.5	-3.7°C	-2.2°C	-2.5°C
安全限界温度+2°C	-0.1°C	-0.1°C	+0.5°C

2つの指標のうち、危険度0.5指標は、栽培現場で実際に凍霜害の被害が生じる可能性があるリスクを評価したものであるのに対し、安全限界温度+2°C指標は、栽培者が防霜対策の検討が必要となるリスクを評価したものである。したがって、危険度0.5指標の方が、より低い最低気温を記録したときを対象としており、それぞれの指標に該当する日数は、危険度0.5の日数が少なく、安全限界温度+2°Cの日数が多く見積もられる評価指標となる。

1.3.7. 影響予測に必要な入力パラメータ

日焼けの影響予測は、日最高気温によって評価される。凍霜害の影響予測は、日最低気温のデータが必要である。

1.3.8. 影響予測における留意事項（制限事項）

日焼けリスクの発生日を日最高気温が 33℃以上の日と設定しているが、気温が 33℃以上になると必ず日焼けが生じるものではなく、日射や風速等の当日の気象条件によっては日焼けが生じないこともある。ただし、本解析方法が限られた気象要素から日焼け発生リスクを評価できる、数少ない指標の 1 つと考えられるため、本解析ではこの指標を採用して評価した。また、本解析は日焼け、凍霜害ともにリスクの発生頻度についての評価であり、被害の程度については評価の対象外である。

1.4. 調査結果

1.4.1. 文献調査結果

学術論文や国・研究機関等が発行する報告書等の文献から、日焼け及び凍霜害に関する過去の被害状況や発生原因などについて調査し、下記の事項を確認した。

(1) 日焼け

夏季の高温・少雨は、日焼け果の発生や着色不良など果樹の生産に影響を及ぼすことが知られている。具体的には、強い日射と高温により日焼け果が発生し、高温が続くことにより着色不良等が発生する（環境省, 2015）。

夏期の最高気温が上昇し、各地でリンゴの日焼け果や早生品種のみつ症、成熟不良果など、果実の障害が増加したとの報告もある。着色不良、日焼けなど、近年の気温上昇を原因とするリンゴへの障害は、ほとんどの樹種、ほとんどの地域に及んでいる。日焼け果発生の主な原因は、果実表面温度の上昇であり、気温の上昇が表面温度の上昇を助長している可能性が指摘されている（杉浦他, 2009）。

海外の研究事例によると、発生時の果実表面温度により、日焼け発生の症状が異なる。日焼けは三種類に分類され、症状によりネクロシス（果皮とその下の細胞が壊死する）、ブラウニング（果皮が黄色から褐色に変化する）、ブリーチング（果皮が漂白されたように白くなる）と呼ばれる。ネクロシスやブラウニングは高温域（46～52℃付近）、ブリーチングは低温域（31℃未満でも発生）で発生する。Schrader らによると、米国ワシントン州で実施された調査において、果実表面温度が 45℃以上となった日の日最高気温は 30～38.5℃の範囲であった（図 1-16 参照）。また、果実表面温度と気象条件との関係は、日最高気温、一時間当たりの最高気温、日射量と正の相関があることが報告され、中でも日最高気温ともっとも高い相関が認められている（図 1-17 参照）。一方で、果実表面温度と風速及び湿度との間には、負の相関関係が認められている（Schrader, 2003、市川, 2016）。

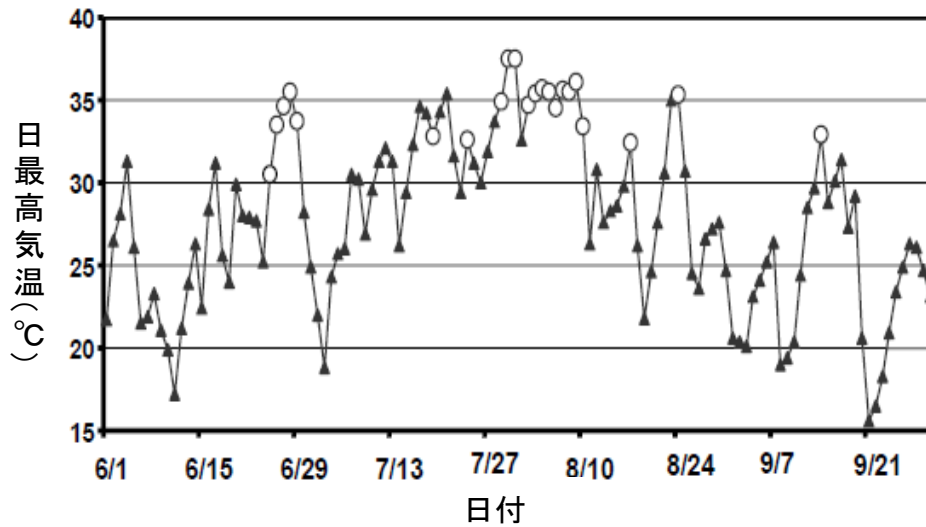


図 1-16 果実表面温度と日最高気温との関係

出典：「Environmental stresses that cause sunburn of apple,
L.E. Schrader, et.al. (2003)」

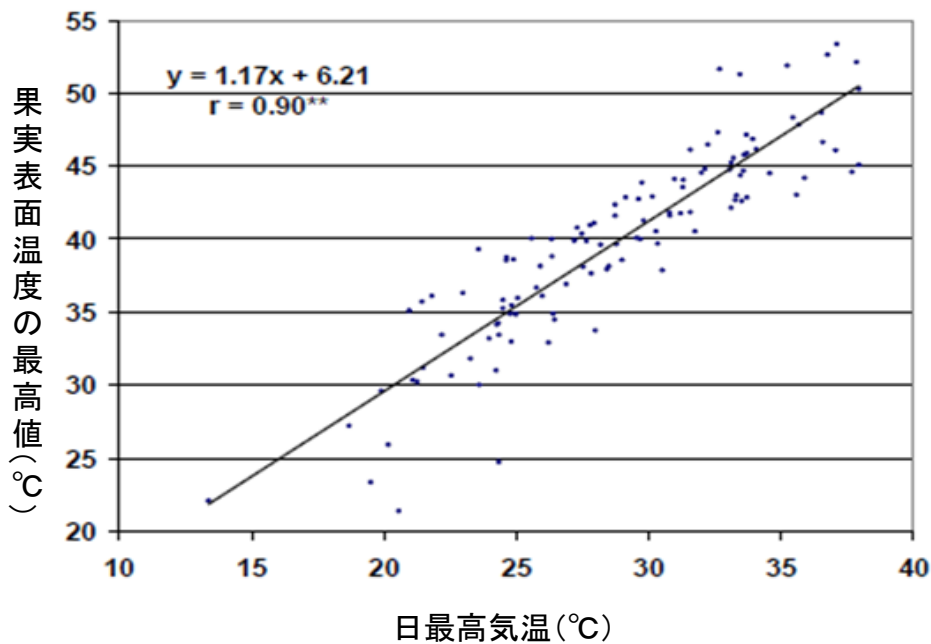


図 1-17 日最高気温及び果実表面温度の最高値との相関

出典：「Environmental stresses that cause sunburn of apple,
L.E. Schrader, et.al. (2003)」

(2) 凍霜害

近年、全国的な暖冬傾向にも関わらず、これまで凍害が発生しなかった比較的暖かい地方においても、落葉果樹の凍害発生が目立ってきている。霜害は、開花期の晩霜害と、秋の収穫前の初霜害に分類され、落葉果樹については晩霜害の発生が多い(農研機構, 2003)。

冬から春にかけての気温上昇により、樹体の耐凍性は低下する。耐凍性の低下後に寒気が生じ、耐凍性を超えた冷却が起こると、植物は凍死する。このため、耐凍性は、落葉果樹の栽培北限を決定する最も重要な要因とされている（農研機構, 2003）。

暖かい日が3～4日続くことで、凍害発生の危険性は高まる。そして、暖冬の程度が強いほど耐凍性が低下し、凍害発生の危険性は増大する（山谷他, 1990）。

落葉果樹の霜害発生時期は4つに分類される。展葉期、開花期、落花期、幼果期である。展葉期は、被害が子房部位に発生し、被害程度が大きな場合には開花せずに枯死に至る。開花期は雌しべに被害が生じやすく、落花期は子房に被害が生じ落果する。幼果期は、霜環と呼ばれるサビ症状が現れる（農研機構, 2003）。

落葉果樹の晩霜害は、東日本以北における増加が指摘されている。他方、晩霜害の減少についての指摘は、西日本以南が中心であった（杉浦他, 2007、杉浦他, 2009）。

降霜期よりも発芽・開花期が遅い場合には、晩霜害は発生しない。しかし、リンゴについては、春季の気温上昇傾向に伴う発芽期・開花期の早まりがほとんどの産地から報告されており、晩霜害が増加している（杉浦他, 2007）。

気候変動により、以前と比べて晩霜害が発生しやすくなる地域と、発生しにくくなる地域が、樹種ごとに分けられると推察されている。このことは、降霜期と発芽・花期の関係が気象条件により異なるなど、晩霜害の発生頻度に地域差があるためである。このため、今後、晩霜害の危険性が増減する条件を詳細に検討する必要性が指摘されている（山谷, 2005）。

実際の晩霜害被害は生育ステージで変化する耐凍性と最低気温との関係で決まるなど複雑なことから、晩霜害の危険度や温暖化の影響については十分な解析が行われていない（朝倉, 2010）。

1.4.2. 有識者ヒアリングの結果

有識者ヒアリングの結果、下記の事項が明らかになった。

日焼けについては、被害の程度は品種によって異なるが総じて現時点では大きな問題とはなっていない。リンゴ果実の表面温度上昇が日焼け発生の要因である。主な対策としては、被覆資材やミストなどを使用することにより果面温度の上昇を抑制することである。ただし圃場の面積や水源へのアクセスなど各地域で条件が異なり、対策も条件に合わせた対策を取ることになる。

凍霜害については、近年、発芽期の前進傾向が見られるとともに、凍霜害の被害は増えてきている。将来、凍霜害が増加する地域と減少する地域が出てくることが予想される。気温差の大きな東北地方においては、将来凍霜害のリスクが高まる可能性がある。対策としては、防霜ファン、スプリンクラー、燃焼材の使用などが挙げられる。

1.4.3. 観測や実証実験の結果

実証試験の結果として、以下が確認された。

- (1) 防霜ファン利用によるリンゴ果実表面温度の上昇抑制技術の実証試験

天候の状態を踏まえ、防霜ファンによる送風及びデータの記録を行ったが、無風状態において防霜ファンから送風しても、計測した全ての日において、風速計によりリンゴ果実表面付近の風速や気温に変化はみられなかった。防霜ファンの実証試験結果については、地表付近の乱流により防霜ファンからの風が妨げられた可能性があるが、それを結論づける根拠もない。条件の良い日に改めて検証する必要がある。

(2) かん水による果実表面温度の上昇抑制試験

設定した条件を満たす日に、かん水区に 30mm/樹のかん水を実施したところ、土壌 pF 値の低下が見られたが、果実表面温度（最高温度）はかん水実施後 7 日間程度、非かん水区よりも高い傾向となった。このような結果となった原因として推察されるのは、急激にかん水を行ったことで、樹にストレスがかかり、水を吸わなくなった、pF 値が 1.5 程度の状態が 2~3 日続いたことから、大量のかん水で過湿状態となり、むしろストレスを与えた、かん水により湿度が高くなり、逆に蒸散が抑えられてしまった等の可能性が考えられる。

かん水による果実表面温度の上昇抑制効果は判然としなかったが、主要な改善点は、一度のかん水の量と、かん水頻度を変えることと考える。かん水実施に当たっては、急激な水分量の変化とならないよう、少量で回数を増やす方が良い可能性がある。

1.4.4. 気候変動影響予測結果

(1) 日焼け

日焼けリスクの影響評価として、最高気温が 33℃以上を記録した日数を解析した。現在期間は、東北北部内陸で年間数日程度、東南北部内陸で年間十数日程度であり、7 月・8 月に集中して見られる。将来の予測結果は日数の増加を示しており、日本海側での増加が顕著である。また、現在期間で見られた 7 月・8 月に加え、9 月にも最高気温が 33℃以上の日が相当日数生じるようになる。21 世紀末の RCP8.5 では、日数が極端に増加しており、MIROC5 では東北・北海道ともに 8 月は連日のように最高気温が 33℃以上となる。MRI-CGCM3 でも、東北の日本海側を中心に、8 月は連日のように 33℃以上となる。気候モデル MIROC5 による推定日数は、MRI-CGCM3 の推定日数よりも多い傾向が認められる。気候モデル・将来気候シナリオの違いによらず、いずれの解析事例にも共通して日焼けリスクの増加を示していることから、将来の日焼けリスク増加は、確実性が高いものと推察される。図 1-18 に MRI-CGCM、及び図 1-19 に MIROC5 の北海道・東北地域における年間の日焼けリスク発生日数の現在、21 世紀中頃 (RCP2.6、RCP8.5)、21 世紀末 (RCP2.6、RCP8.5) の予測結果を示す。

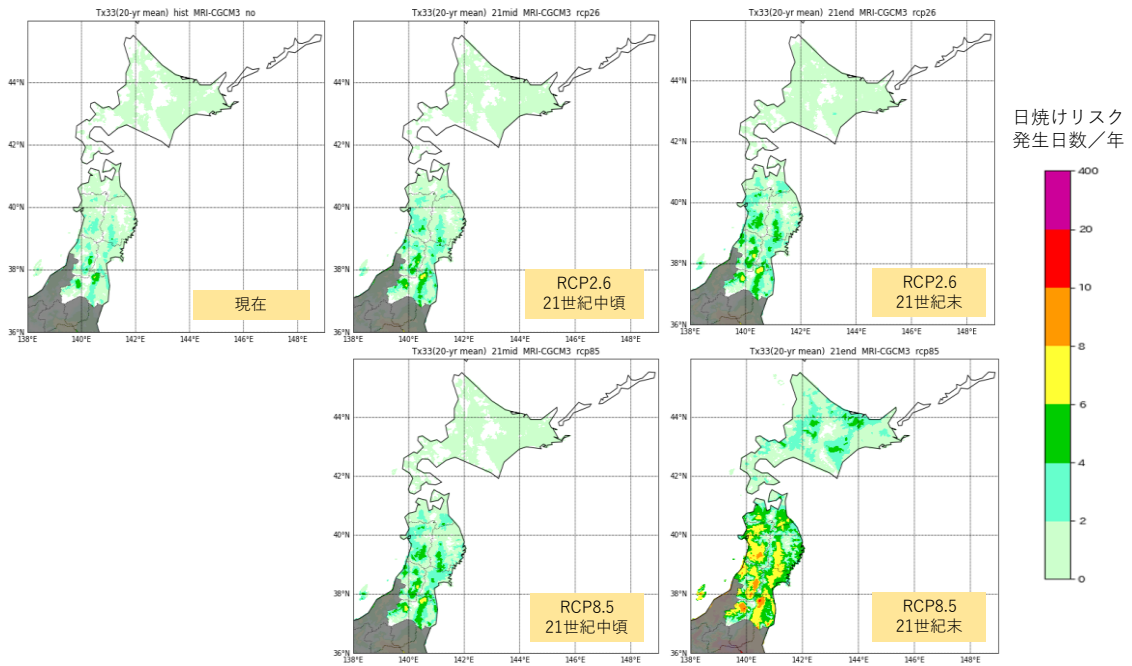


図 1-18 日焼けリスク評価結果 (MRI-CGCM3)

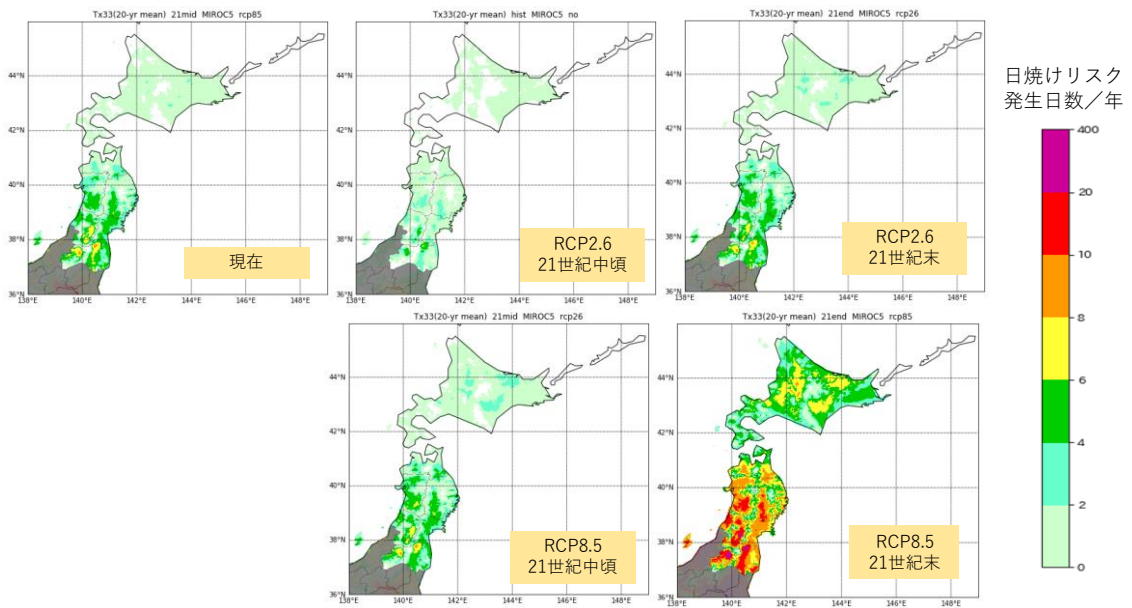


図 1-19 日焼けリスク評価結果 (MIROC5)

(2) 凍霜害

凍霜害の影響評価は生育モデルを活用して①リンゴの生育予測を行い、その予測をもとに②凍霜害の影響評価を実施した。

①生育予測

生育モデルに農環研データセットを入力し、各生育ステージの暦日（通日：day-of-yearで表示）及びその将来変化を評価した。気温上昇により、生育は全般的に前進（早期化）傾向が見られる。まず、MIROC5では、21世紀中頃の二つのRCPや21世紀末のRCP2.6で、東北南部沿岸で数日以下、東北内陸で5～10日程度、北海道では10日以上、生育が前進する結果となった。MIROC5の21世紀末RCP8.5では、東北内陸や北海道では上記よりさらに生育が前進するものの、東北南部では後退する地点も生じた。これは、冬季の気温上昇による休眠完了の遅れによるものと推察される。ただし、休眠期間はモデル依存性が強いことに加え、休眠完了自体が観測できないことによるモデル検証の難しさがあり、これらを考慮に入れて解釈すべきと考えられる。

MRI-CGCM3では、21世紀中頃のRCP2.6ではあまり明瞭な前進は見られず、21世紀中頃のRCP8.5や21世紀末のRCP2.6で5日程度の前進、21世紀末のRCP8.5で10日以上の上昇が予測された。

②凍霜害

上記の生育予測をもとに、各生育ステージ期間中に最低気温が閾値温度以下となった日数を数えた凍霜害リスクを確認した。危険度0.5指標の結果としては、現在では大部分の地域で1年当たり1日未満である。危険度0.5指標が、実際に凍霜害の実害が生じるほどの強い寒冷条件を対象としているためである。MIROC5の21世紀中頃RCP2.6及び21世紀末RCP2.6では、東北南部で微増、東北北部で微減となる。MIROC5の21世紀中頃RCP8.5では内陸を中心に微増、21世紀末RCP8.5では微減を呈した。MRI-CGCM3では、全体的に微減を示す地域が卓越している。図1-20はMRI-CGCM3、図1-21はMIROC5の北海道・東北地域の危険度0.5指標による、現在、21世紀中頃(RCP2.6、RCP8.5)、21世紀末(RCP2.6、RCP8.5)における凍霜害リスク日数（全ステージ総計）の解析結果である。

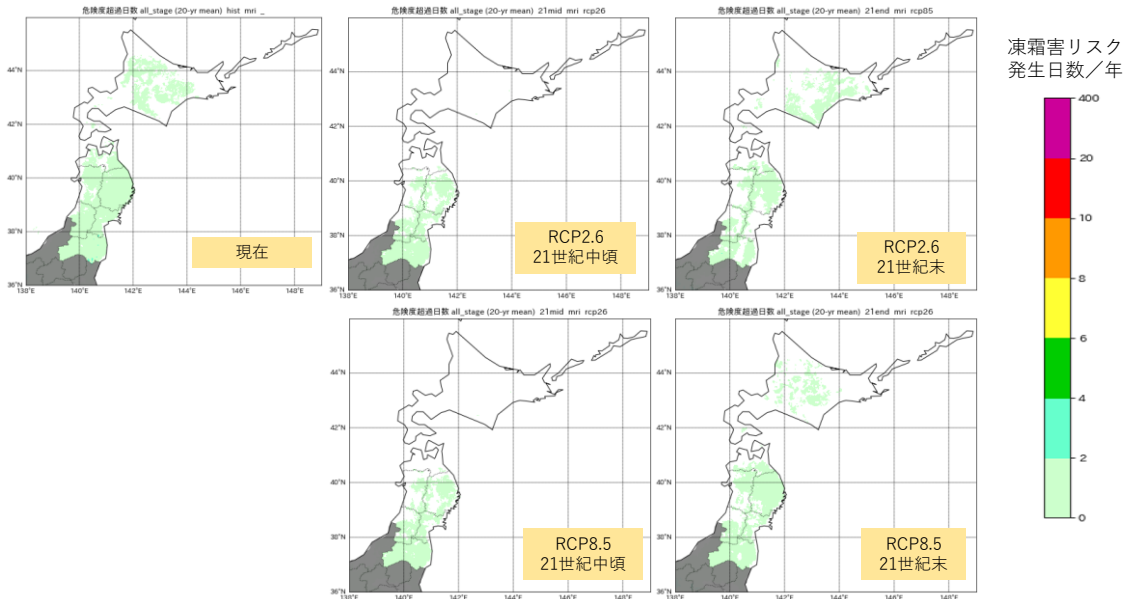


図 1-20 危険度 0.5 指標による凍霜害リスク評価結果 (MRI-CGCM3) ³

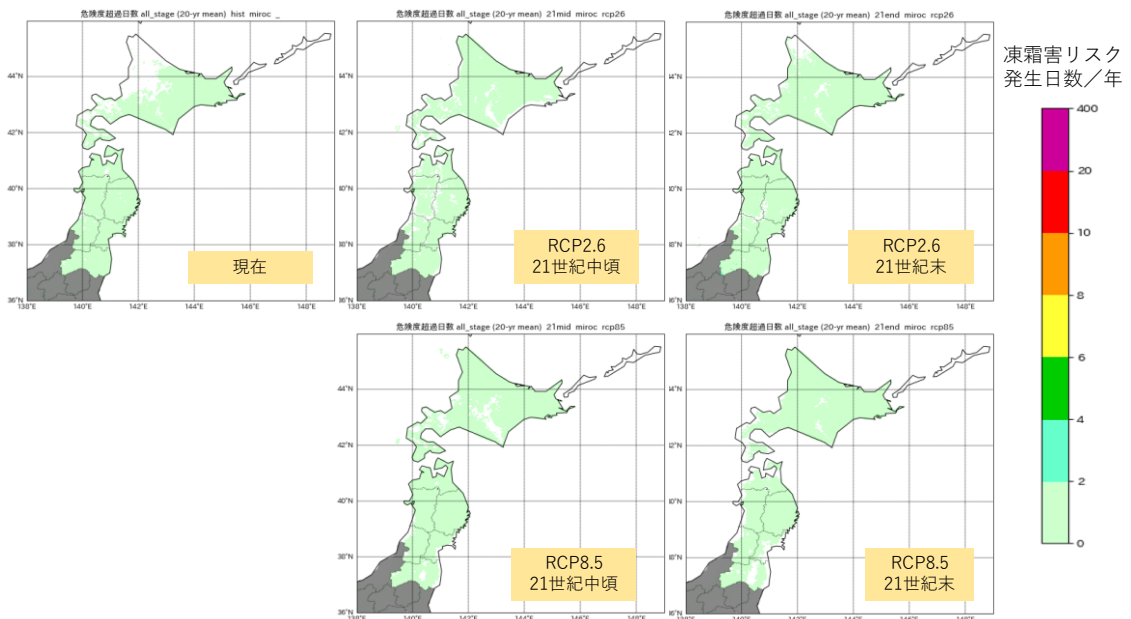


図 1-21 危険度 0.5 指標による凍霜害リスク評価結果 (MIROC5)

³ RCP2.6no21 世紀中頃と 21 世紀末の評価の逆転について：MRI-CGCM3 の RCP2.6 のシナリオでは、北海道地方において 21 世紀中頃より 21 世紀末が、危険度 0.5 指標による凍霜害リスクが高くなることが予測されている。この原因は、凍霜害の判定に使用した最低気温が 21 世紀中頃よりも 21 世紀末においてデータのばらつきが大きくなり、極端に寒い日が予測されていることによるものである。

安全限界温度+2°C指標の予測結果としては、現在でも平均して年に数日程度、本指標のリスク日と判定されている。将来変化については、MIROC5の21世紀中頃RCP2.6では、東北南部で増加、東北北部で減少を示す。その一方、21世紀中頃のRCP8.5や21世紀末のRCP2.6では、多くの地域で増加傾向を示す。21世紀末RCP8.5では、東北では減少に転じ、北海道で一部増加を示すようになる。MRI-CGCM3では、21世紀中頃のRCP2.6・RCP8.5及び21世紀末のRCP2.6では、減少傾向を示す地域が多いが、東北内陸では一部地域で増加傾向を示す。21世紀末のRCP8.5では、概ね減少に転じる。このように、安全限界温度+2°C指標では、21世紀末RCP8.5のような最も温暖化が進行した事例で凍霜害リスクが減るものの、その中間のレベルの温暖化では、凍霜害リスクが増加する事例がある。図 1-22 及び図 1-23 はMRI-CGCM3、図 1-24 及び図 1-25 はMIROC5の北海道・東北地域の安全限界温度+2°C指標による、現在、21世紀中頃（RCP2.6、RCP8.5）、21世紀末（RCP2.6、RCP8.5）における凍霜害リスク日数（全ステージ総計）及び現在と将来予測の差についての解析結果である。

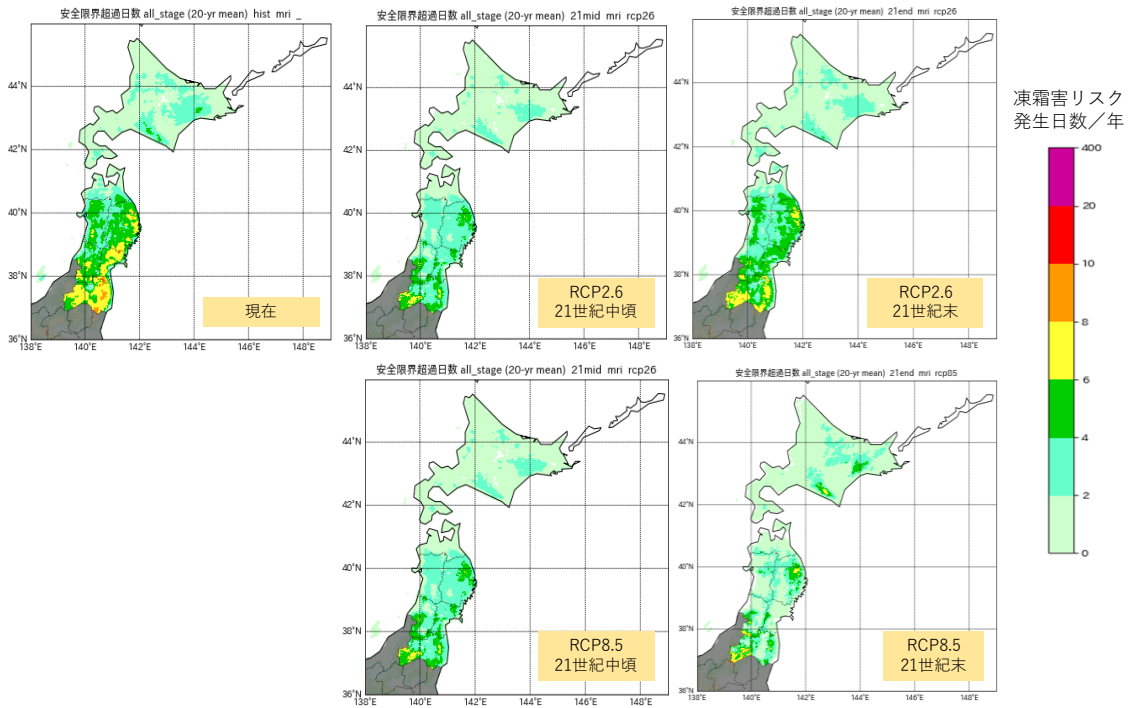


図 1-22 安全限界温度+2°C指標による凍霜害リスク評価結果 (MRI-CGCM3)

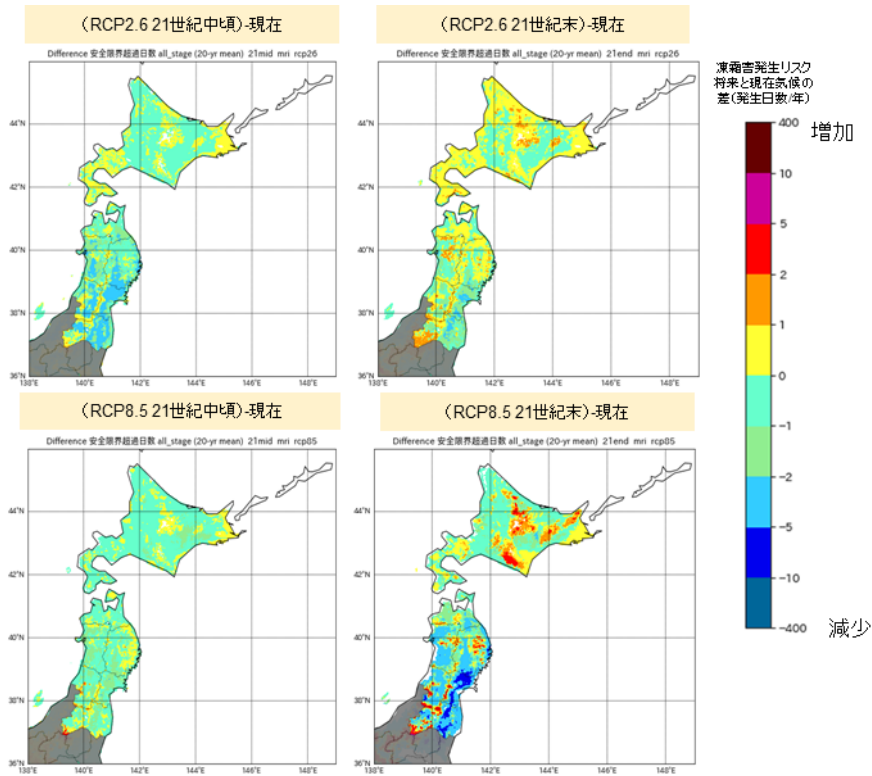


図 1-23 安全限界温度+2°C指標による凍霜害リスク発生日数
現在と将来予測の差 (MRI-CGCM3)

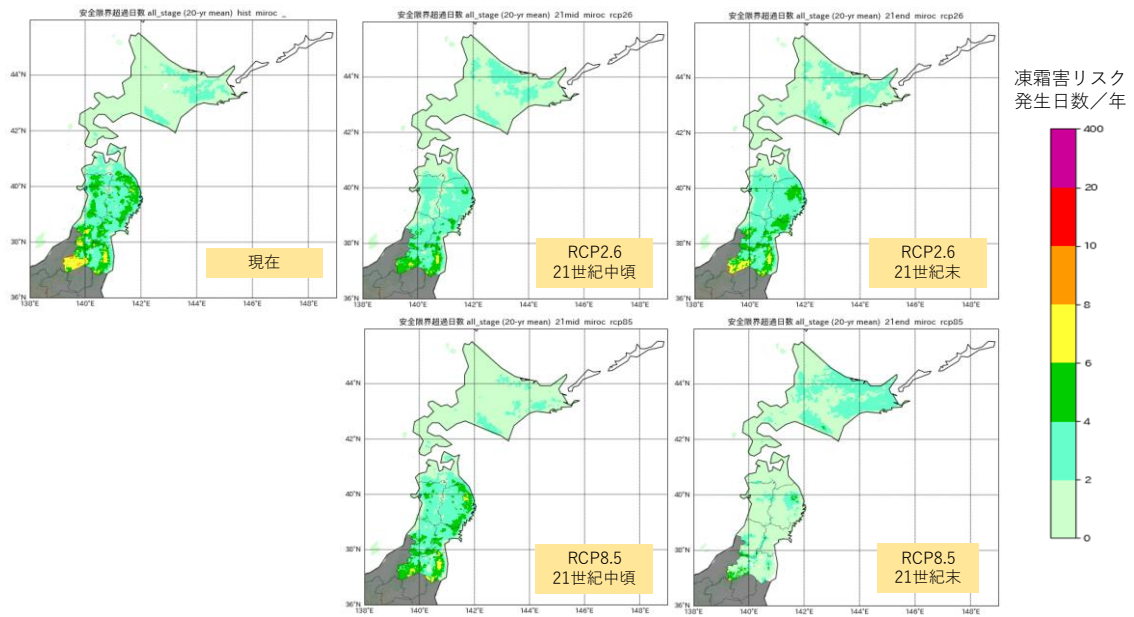


図 1-24 安全限界温度+2°C指標による凍霜害リスク評価結果 (MIROC5)

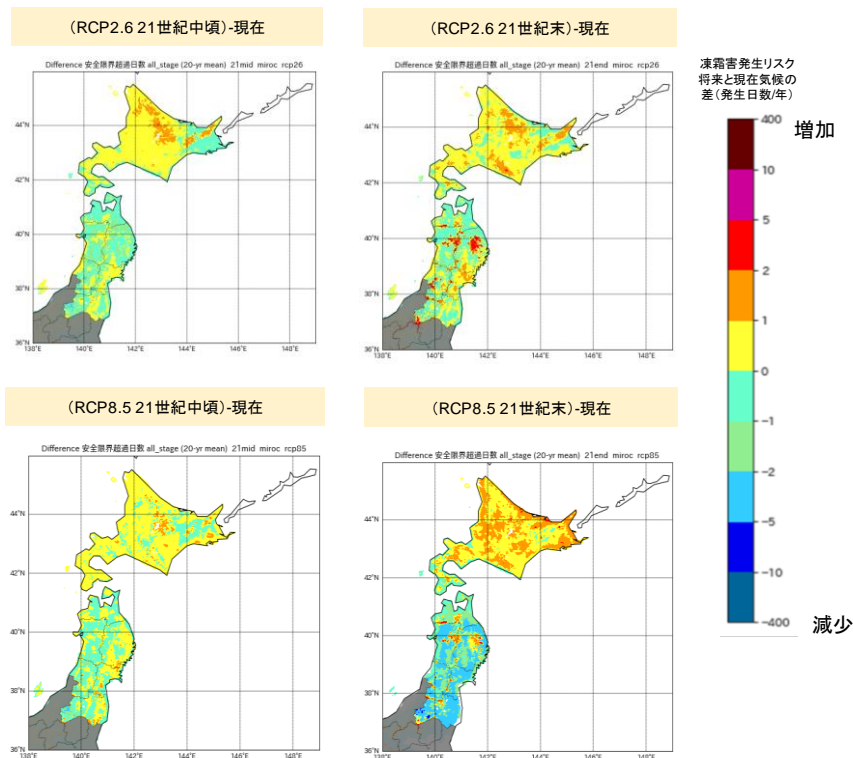


図 1-25 安全限界温度+2°C指標による凍霜害リスク発生日数
現在と将来予測の差 (MIROC5)

1.4.5. 結果を活用する上での留意点・制限事項

日焼けリスクのある日数については、今回解析対象とした地点で全体的に増加傾向にあり、20年間の最大日数で比較しても増加傾向を示すことが多い。また、どの気候モデル・将来気候シナリオを用いても増加傾向を示す地点が多いことから、将来の気候変動に対する対策が必要となるものと想定される。特に東北南部の内陸・盆地では、北海道・東北地方の他の地域に比べ既に現在の該当日数が多く、将来はさらに増加する。ただし、本調査における日焼け及び凍霜害の評価では、リスクのある日の発生頻度についての評価であり、被害の程度については評価対象外である。

また、凍霜害は、地形や地物等の状況で局所性を有する気象災害という一面も有しており、本結果が北海道・東北地域全体として、将来の凍霜害対策が不要となることを意味するわけではないことに留意する必要がある。

1.5. 適応オプション

1.5.1. 手順

本調査における適応オプションの検討フローを図 4-33 に示す。

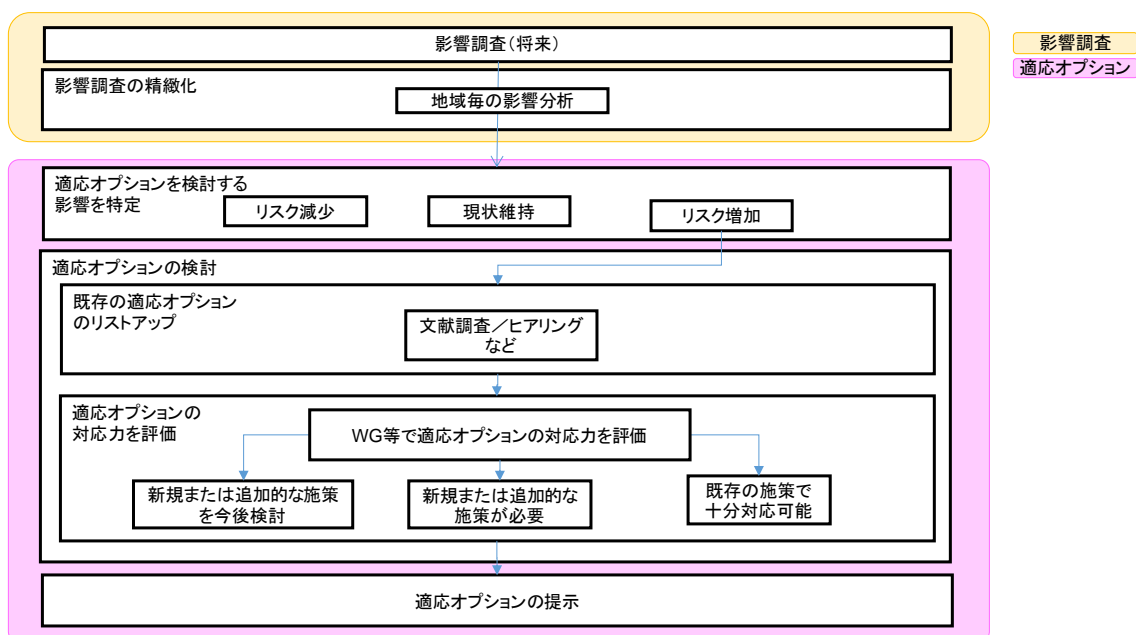


図 1-26 適応オプションの検討フロー図

1.5.2. 概要

本調査において検討した適応オプション及びその考え方を表 1-7～表 1-8 に示す。

表 1-7 適応オプション

適応 オプション	想定される 実施主体			評価結果							
	行政	事業者	個人	現状		実現可能性				効果	
				普及状況	課題	人的側面	物的側面	コスト面	情報面	効果発現までの時間	期待される効果の程度
被覆資材（寒冷紗・果実袋等）の使用		●		普及が進んでいる	個別に作業をする必要があり、労力を要する。	◎	○	△	◎	短期	高
細霧冷房装置の使用		●		普及が進んでいない	水源が確保されていることが前提となり、導入可能な場所は限られる。	◎	○	△	◎	短期	中
かん水の実施		●		-	確実に効果を得るための技術検証が必要。	◎	○	△	◎	短期	低
防霜ファンの使用		●		普及が進んでいる	設備投資額が大きく、自己資金のみでの導入を前提とした場合、普及は限定される。	◎	○	△	◎	短期	高
散水氷結法		●		-	水源が確保されていることが前提となり、導入可能な場所は限られる。	◎	○	△	◎	短期	高
燃焼法		●		普及が進んでいる	燃焼資材の管理に手間と労力がかかる。	◎	○	△	◎	短期	高
品種更新		●		普及が進んでいる	品種が多く、品種の選択を慎重に行う必要がある。	◎	○	△	◎	長期	高
樹種転換	●	●		-	ブランディングに時間がかかる。	◎	○	△	◎	長期	中

表 1-8 適応オプションの考え方

適応 オプション	適応オプションの考え方と出典
【日焼け】被覆資材（寒冷紗・果実袋等）の使用	日焼けが発生しそうな箇所に対して選択的に使用可能で、高額な費用がかからない点で有効な適応オプションであり、普及状況は「普及が進んでいる」とした。
【日焼け】細霧冷房装置の使用	文献により特定したが、東北地方では福島県で試験を行っている状況であったため、普及状況は「普及が進んでいない」とした。 (出典：富山県農林水産総合技術センター)
【日焼け】かん水の実施	中部地方で実績があるが、本コンソーシアム事業で行った実証試験では十分な効果を確認出来ず、効果を得るための技術検証が必要であると判断し、期待される効果の程度を「低」とした。 (出典：長野県農業技術課)
【凍霜害】防霜ファンの使用	リンゴ WG 及び自治体へのヒアリングにより普及状況について「普及が進んでいる」ことを確認した。
【凍霜害】散水氷結法	導入には水源の確保などの制約があるため、普及状況は「—」とした。 (出典：岩手県農作物気象災害対策本部)
【凍霜害】燃焼法	リンゴ WG において最も一般的な凍霜害対策であるとの意見であったため、普及状況について「普及が進んでいる」とした。
【着色不良】品種更新	リンゴ WG において着色不良に対する最も有効な適応オプションとして品種更新が挙げられ、導入が進んでいることを確認したため、普及状況について「普及が進んでいる」とした。
【全般】樹種転換	農業事業者の判断で樹種転換が実施可能なため、人的側面は「◎」とした。

1.5.3. 個々の適応オプションに関する説明

【日焼け】

被覆資材の使用：

夏季に寒冷紗、果実袋等の資材を被覆することで直射日光が当たることを防ぎ、果実表面の温度上昇を抑制する。日焼けリスクの高い箇所に対して選択的に使用することができ、大掛かりな設備投資が必要ないため比較的導入しやすい。自動化が出来ず、設置に労力がかかる。特に果実袋は作業者の高齢化や労働力不足により使用率が低下傾向にある。

細霧冷房装置の使用：

細霧冷房装置を設置することで樹冠内気温、果実表面温度を低下させる。水源が確保されていることが前提となり、導入可能な場所は限られる。

かん水の実施：

リンゴ樹の樹冠下に灌水することで、リンゴ果面からの蒸散効果を促し、果実表面温度の上昇を抑制し、日焼けの発生を軽減する。水源が確保されていることが前提となり、導入可能な場所は限られる。一部地域では実績があるが、実績のない地域においては効果を得るための技術検証が必要である。

【凍霜害】

燃焼法：

灯油、重油、固形燃料等の燃焼資材を燃やすことによって園内温度を高め、被害を防ぐ。
燃焼資材の管理に手間がかかり、労力もかかる。

防霜ファンの使用：

設備投資額が大きいため、自己資金のみでの導入を前提とした場合、普及は限定される。

散水氷結法：

スプリンクラーで樹上から散水し、水が凍るときの潜熱により植物体温を0℃より下がらないように維持し、被害を防ぐ。水源が確保されていることが前提となり、導入可能な場所は限られる。

【着色不良】

品種更新：

着色良好品種、着色管理が不要な黄色品種の導入。品種が多く、品種の選択を慎重に行う必要がある。

【全般】

樹種転換：

気象の変化によりその地域に適した樹種を導入する。

引用文献一覧

- 朝倉利員（2010）リンゴの晩霜害発生に関係する春季の平均気温 最低気温の年次変化、大会講演予講集 98、p473
- 市川悦子（2016）リンゴ果実の日焼け発生低減対策への取り組み状況 果実日本 71、p46-51
- 環境省（2015）日本における気候変動による影響に関する評価報告書、p33-37
- 杉浦俊彦（2004）年平均気温の変動から推定したリンゴ及びウンシュウミカンの栽培環境に対する地球温暖化の影響、園芸学会雑誌 73（1）、p72-78
- 杉浦俊彦（2007）温暖化がわが国の果樹生育に及ぼしている影響の現状、園芸学研究 6（2） p257-263
- 杉浦俊彦（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）、p207-214
- 農業・食品産業技術総合研究機構果樹研究所（2003）平成 15 年度 果樹農業に対する気象変動の影響に関する調査
- 福田勉（2014）リンゴ果実の日焼けに係る試験研究の状況. 果実日本 69、p 60-65
- 山谷秀明（2005）リンゴでの凍霜害と対策 農耕と園芸 6、p182-185
- L.E. Schrader, et.al. (2003). Environmental stresses that cause sunburn of apple. Acta Hort. 618: 397-405
- 伊藤大雄（弘前学農生命科部）（2018）「広域で適用できるリンゴ‘ふじ’の発芽・開花予測モデルの開発」日本農業気象学会 2018 年東北支部大会〔東北の農業気象, 63〕
- 佐久間宣昭・斎藤祐一・永山宏一（2013）落葉果樹 4 樹種の凍霜害危険度予測モデル,園学研, 12, 403-409.