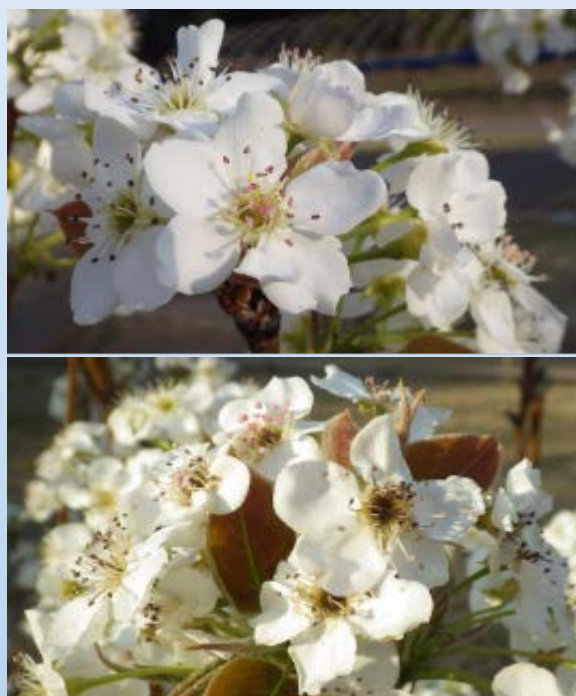


気候温暖化条件での晩霜害 発生の特徴と危険度評価



国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

果樹研究所

2016年2月

I はじめに

霜害は、果樹の収量と品質に影響するもっとも重要な気象災害の一つです。霜害は、発生時期により晩霜害と初霜害とに分けられ、被害が大きいのは晩霜害です。晩霜害は、春になって動き始めた芽や花が耐えられる限界の温度以下になり組織が凍結することにより発生します。晩霜害は降霜をともなうことが多いですが、実際には、霜が降らなくても温度が低ければ被害が発生します。軽度の被害であれば収量・品質への影響は無視できますが、被害程度が激しいと良質な果実数を確保できず収量や品質の低下を招きます。

気候が温暖化すると晩霜害は少なくなると思われるかもしれませんが、確かに、寒冷化が懸念された、1970、1980年代に比べれば頻度は少ない傾向ですが、2010年、2013年のように大きな被害が発生することがあります。晩霜害の対策を考えるには、対象地域の晩霜害発生危険度がどの程度なのかを把握しておくことが重要です。晩霜害の危険度には、気象条件だけでなく樹体条件も関係します。特に、温暖化条件では、発芽や開花時期が早まることから、発育予測も考慮した対策が必要になります。

ここでは、気候変動と果樹晩霜害の経年変化、温暖化条件での晩霜害発生の特徴、晩霜害危険度に関係する樹体条件と気象条件、晩霜害の危険度評価法とそれに基づく晩霜害対策について紹介します。

本資料は以下の農林水産省委託プロジェクト研究において得られた成果です。

地球温暖化が農林水産業に及ぼす影響評価と緩和及び適応技術の開発（平成20～21年度）
：地球温暖化が農業分野に与える影響評価と適応技術の開発（平成22～26年度）

問い合わせ先：農研機構果樹研究所 TEL：029-838-6416

Ⅱ 気候変動と果樹の晩霜害

日本の果樹の晩霜害の経年変化を見ると、温暖化傾向が顕著になった1990年代以降でも大きな晩霜害が発生しています。2001年の晩霜害は、青森・岩手のリンゴ、茨城・栃木の二ホンナシ等で、2010年は、和歌山のカキ、熊本のリボンナシ等で、2013年の晩霜害は、長野のリンゴと二ホンナシ、栃木の二ホンナシ等で大きな被害が発生しました。

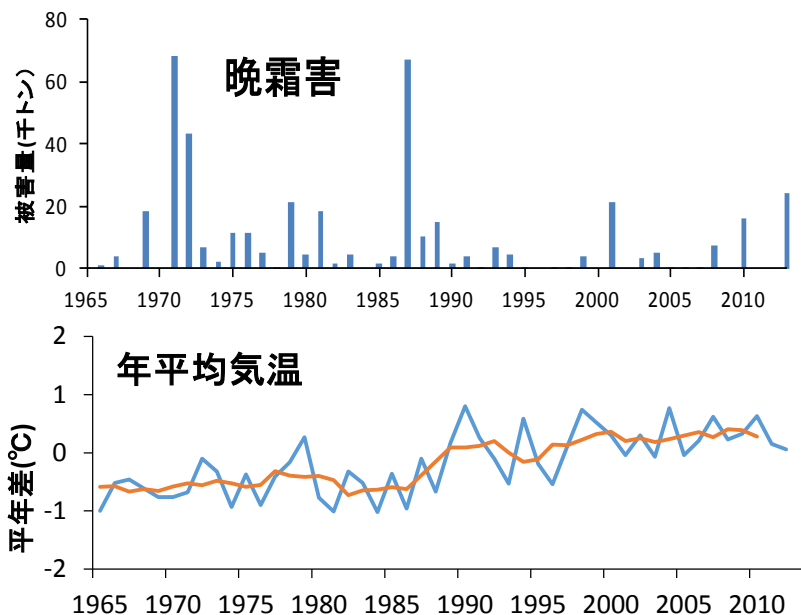


図1 果樹の晩霜害と日本の年平均気温平年差の推移

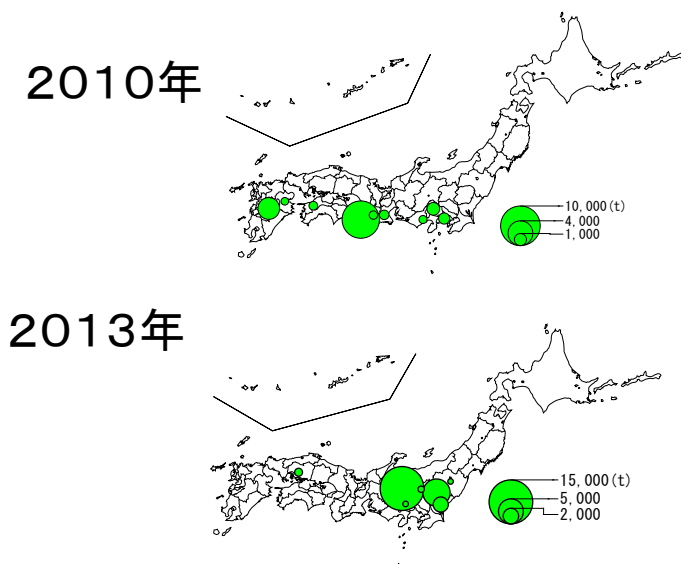


図2 近年の主な果樹晩霜害における道府県別の被害量

Ⅲ 温暖化条件での晩霜害発生の特徴

気候温暖化は、どの季節も一様に気温が上昇しているわけではありません。地域によっても異なりますが、多くの地域で春の気温上昇傾向が顕著です。春先の気温上昇が高いと、発育が進みます。発育が進んでいても、そのまま気温が高い状況で推移すれば、晩霜害は発生しません。しかし、近年、気温変動も激しい傾向にあり、そのような年には晩霜害の危険性が高まります。2010年、2013年には、晩霜害が発生しましたが、これらの年は、春の気温が高めで経過しました。2010年と同様に開花の早かった2009年について見ると、最低気温がそれほど下がらず被害が発生していません。

2010年に熊本や大分の‘新高’で晩霜害が発生した理由として、新高は他の品種に比べ開花が早いこと、例年に比べ2月下旬～3月中旬の気温が高く、熊本県、大分県で新高の栽培面積が多いこと、3月27日に季節外れの寒気が流入したことが原因と判断されます。

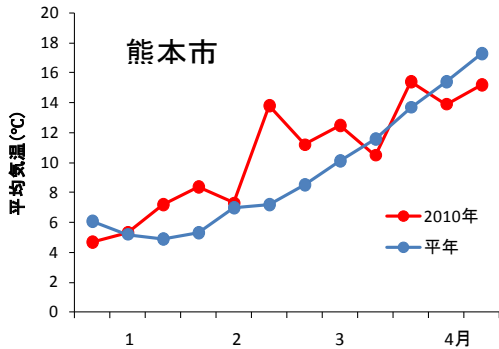


図3 2010年1月から4月の平均気温の推移(熊本市)

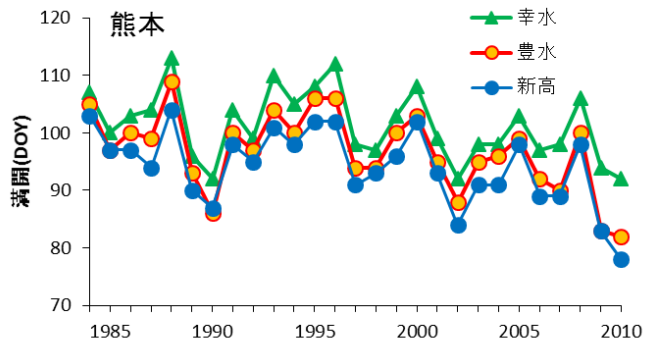


図4 熊本県におけるニホンナシ品種の満開日の経年変化

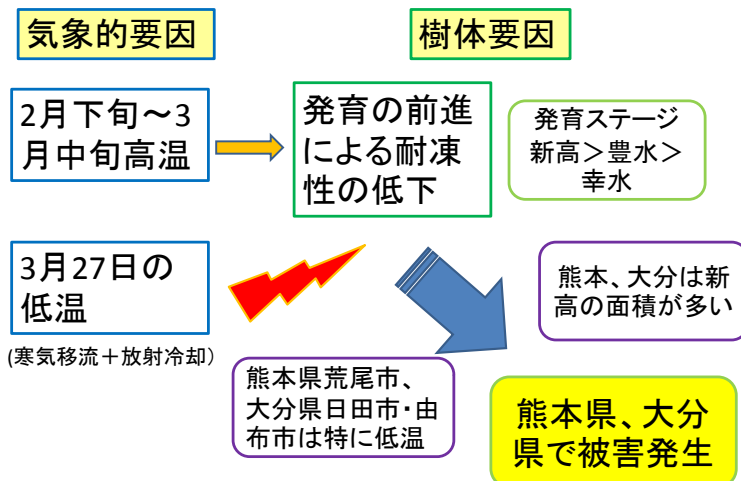


図5 2010年に九州で発生したニホンナシ晩霜害の発生要因

IV 果樹の春季発育は気温に大きく影響される

落葉果樹の芽は冬季には凍結に耐える性質、すなわち耐凍性が強く、ニホンナシやモモでは -15°C にも耐えることができます。しかし、春になって発芽、展葉、開花していくとマイナス数度の低温で被害が発生します。花器の耐凍性は、このように発育段階によって変化します。また、発芽、展葉、開花の時期は、秋から春にかけての気温経過に影響されることから、毎年多様な変化を見せます。一般に、秋冬期の気温が低めで休眠打破が順調に進み、その後、春季に気温が高いほど発芽・開花は早まります。日本では西南暖地の一部地域や施設栽培を除いて、休眠打破のための低温量が不足することはなく、休眠打破後も低温で芽は強制的な休眠状態にあります。そのため、秋冬期の気温に比べ、春季の気温のほうが発芽日、開花日により密接に関係します。

晩霜害の発生した2010年、2013年は春先の気温が高いことが特徴です。春先の気温が高いと、発芽や開花日は早まる傾向にあり、耐凍性も早期に弱まります。落葉果樹の発芽や開花は、自発休眠期や多発休眠期における花芽の温度反応を考慮した発育予測モデルにより予測が可能です。

晩霜害については、発芽から落花までの時期が特に重要です。この間の発育ステージデータがあれば、休眠を考慮した複雑なモデルを使わなくても、単純な有効積算温度(4°C 以上の毎時積算温度)でも比較的よいモデルを作成できます(表1, 図6)。気温データについては、果樹園の気温でなくても、近隣のアメダスデータを使えば、十分な場合が多いと考えられます。

表1 栃木県のナシ品種について催芽を起点に有効積算温度で開花始めを予測した場合の誤差

モデル形式	品種	有効積算温度	誤差(RMSE,日)
直線*	幸水	3102	1.0
	豊水	2842	1.1
	新高	2554	1.5

* : $\sum (t-4)$ $t \geq 4$ のみ積算

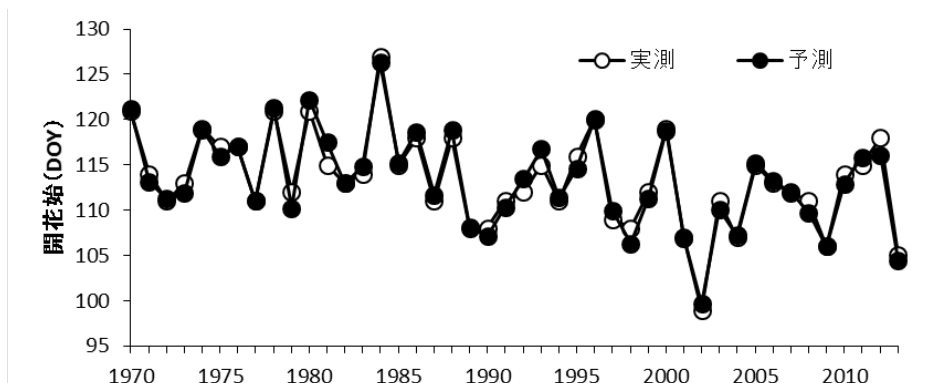


図6 栃木県の幸水について催芽を起点に有効積算温度で開花始めを予測した場合の誤差

V 花器の耐凍性は変化を予測する

花器の耐凍性変化は、芽の発育段階を発芽0、満開1のような指数に当てはめ、発育段階ごとの耐凍性と組み合わせることによりモデルを作成できます（図7、8）。まず、花器の発育ステージを予測するモデルを作成し、発育ステージごとの耐凍性との関係から気温データをもとに、花器の耐凍性変化をモデル化します。発育ステージ予測するためには、発芽、展葉、開花始め、満開、開花終わり等の年次別の観測日と毎時の気温データが必要です。耐凍性データは、福島県が出している資料や、Ballardら(1971)を参考に決めます。

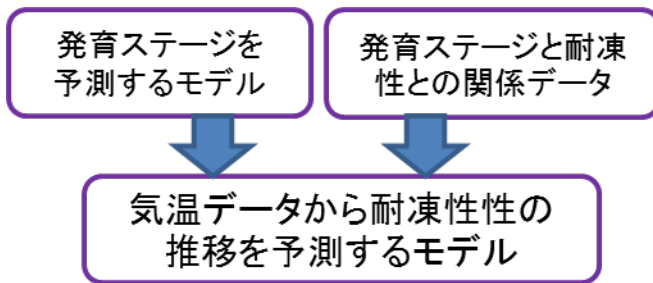


図7 気温データから耐凍性の変化を予測するモデル

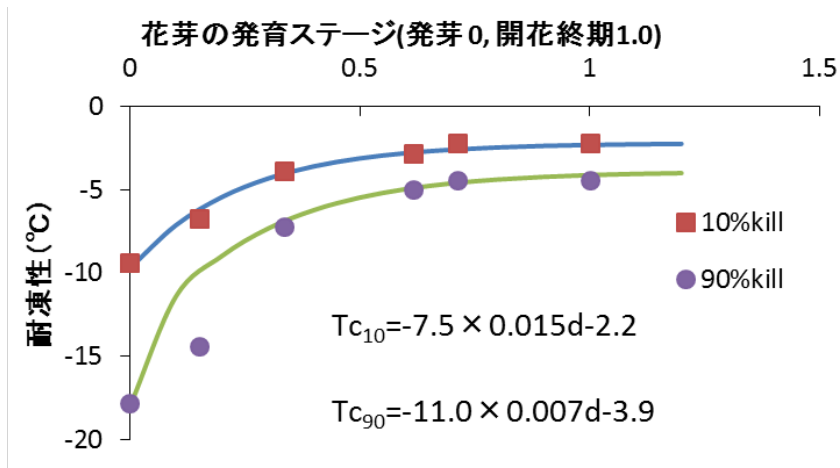


図8 モデルで評価したニホンナシ発育段階別の耐凍性変化の例

Tc:耐凍性(°C)、d:発育段階

VI 晩霜害の危険度評価モデル

年次別の耐凍性をモデル化し、日最低気温との関係を調べると、過去にその地域がどの程度晩霜害の危険性があったのかを判定できます。図9は、2010年の熊本県のニホンナシの耐凍性の変化をモデルで予測し、日最低気温との関係を調べたものです。これによると、3月27日に日最低気温が耐凍性近くまで下がり、晩霜害発生の危険が高かったことが推測されます。実際の被害調査でも、被害発生日は3月27日とされ、モデルによる解析が有効であると判断されます。このような手法を使うことにより、年次別の晩霜害の危険度を判定でき、どのような樹体条件、気象条件で被害が発生したのかを解析できます。

このモデルは、当年の晩霜害対策を考える上でも有効です。当年の花器の発育やそれともない変化する耐凍性変化を予測判断して対策を立てることが可能になります。図10(A)は、4月1日時点で、それ以降の発芽や展葉、満開がどのように変化するかを、また、図10(B)は、それに対して耐凍性どのように変化するかを模式的に示したものです。気温条件は、平年気温、平年気温+2℃、平年気温-2℃であり、気温が高いほど発育が進み耐凍性も早期に弱まることわかります。

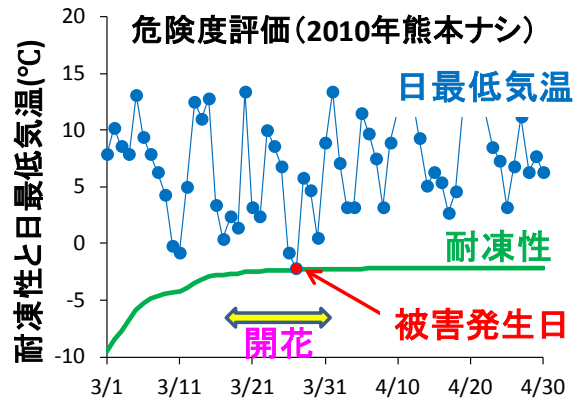


図9 晩霜害危険度評価の例
(2010年熊本のニホンナシ晩霜害)

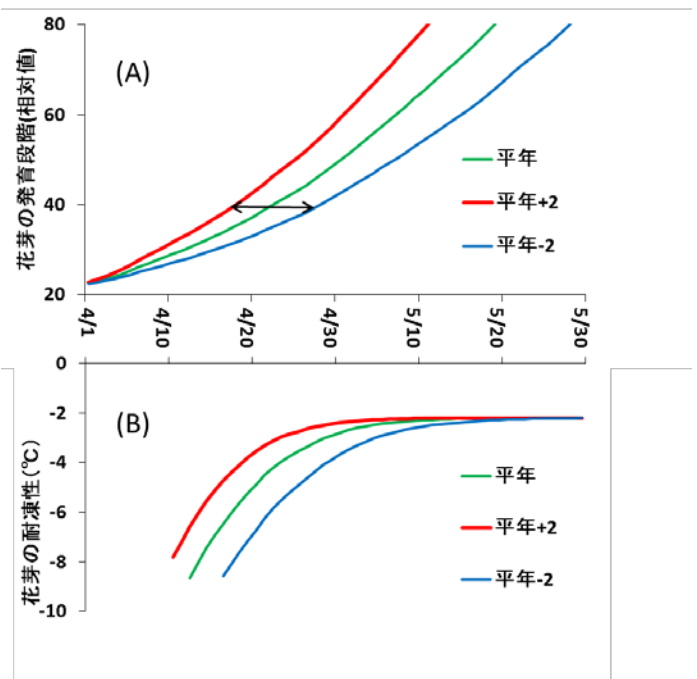
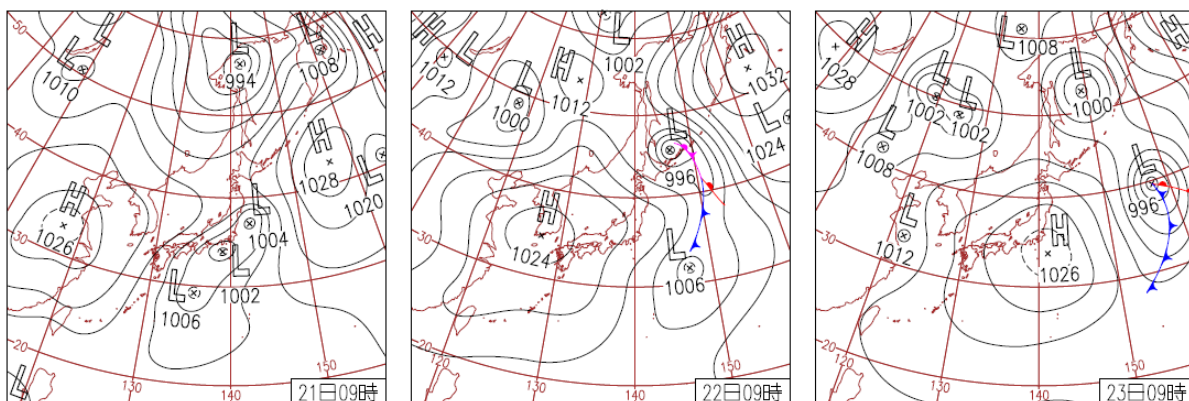


図10 平年気温、平年気温-2℃、平年気温+2℃条件での花器の発育経過と耐凍性の予測推移

Ⅶ 晩霜害に関する気象要因

晩霜害の発生しやすい気圧配置として特徴的なのは、大陸から日本に移動してくる移動性高気圧です。2013年4月22、23日に長野県、栃木県でリンゴ、ニホンナシ等で大きな晩霜害を受けましたが、その時の地上天気図の推移を図11に示します。4月21日には大陸に高気圧、オホーツク海に低気圧があり、南岸にも3つの低気圧があり、寒気が入りやすい状態にあり、松本や福島で積雪を観測しています。22日は、西高東低の気圧配置であり寒気が入りやすい状態です。23日は全国的に移動性の高気圧に覆われ、放射冷却が発生条件です。



April 2013

図11 2013年4月の晩霜害発生日頃の地上天気図

上空の寒気の動きを見るには、500hPaの高層天気図が有効です。4月22日9時の高層天気図では、日本海側上空に -30°C の寒気が入り込んでいることを確認できます(図12)。地上へ流れ込む寒気は、寒気のコア(図のC)より、西側を通して流れ込みます。最新の地上天気図、高層天気図は、気象庁のホームページで確認できます。

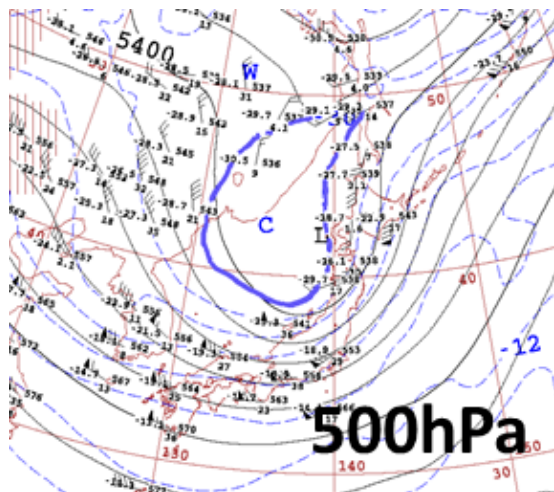


図12 2013年4月22日9時の高層天気図

地上でも寒気が入ると、露点温度が急激に低下することが特徴です。ここでは、2013年4月20日から22日の松本の気温、露点温度、降水量の変化を見てみましょう（図13）。露点温度は、文字通り露を結ぶ温度を示すが、空気中の水分量に直接関係する指標です。空気の移流がない条件では、露点温度の変化は少ないですが、性質の異なる空気が流入すると、露点温度も変化します。露点温度の経過を調べると、地上気温だけではわからない寒気の流入状況を直接判断できます。4月20日は、南岸低気圧の影響で降雪も観測され、その後寒気が流入し、露点温度が低下しているのがわかります。気温も4月21日朝にかけて低下し、最低気温-2.4℃を記録しました。

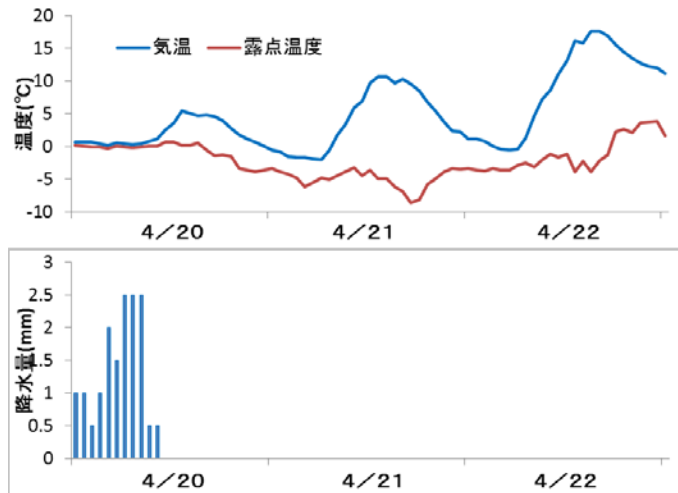


図13 2013年の晩霜害発生日の気象経過(松本)

露点温度は、露点温度計で直接測定できますが、気温と相対湿度から計算で求めることもできます。計算式の一例を示します（ローレンスの式）。ここで、 T_d （露点温度、℃）、 T （気温、℃）、 H （相対湿度、%）です。

$$T_d = \frac{243.04 \left[\ln \left(\frac{H}{100} \right) + \frac{17.625T}{243.04 + T} \right]}{17.625 - \ln \left(\frac{H}{100} \right) - \frac{17.625T}{243.04 + T}}$$

効率的な晩霜害対策を行うためには、最低気温や降霜の予測が重要です。最低気温の予測については、気象庁ホームページの週間天気予報、地域時系列予報、アメダスポイントの気温情報が参考になります。週間天気予報は、各都道府県の県庁所在地等、主要地点における1週間先までの天気、最高最低気温の予測が示されています。地域時系列予報は、各都道府県の地域ごとの気温予想を24時間先（17時発表は30時間先）まで予測しています。アメダス地点約840か所では気温観測が行われ、1時間前までの毎時データを見ることができます。主要地点では、湿度も観測されていることから、気温と湿度から露点温度も計算できます。また、気象警報・注意報のページがあり、市町村別にどこで霜注意報が発令されているかを調べることができます。霜注意報の発表基準は、早霜・晩霜期に最低気温2～4℃で発表されます（气象台により時期、最低気温の基準が多少異なります）。

気象庁の観測ポイントと実際の果樹園では気温は異なります。週間気温予想による最低気温は、主要地点の値しかありませんが、あらかじめ果樹園での観測値と比較しておけば、主要地点と比べながらどのくらい気温が下がるかその傾向を把握できます。

最低気温の予測式として、夕方の気象要素を用い翌朝の最低気温を予測する簡便な式が検討されています(図14)。最低気温(T_m)と前日夕方(18:00)の露点温度(T_d)、相対湿度(H)との関係を調べると、図2のような関係が得られます。これを変形すると、静穏晴天日(風速 2 m s^{-1} 未満、雲量0.1以下)条件では $T_m = T_d - 10.29 \ln(H) + 42.0$ となります。この式からも、翌朝の最低気温は、夕方の露点温度に密接に関係することがわかります。こうした予測式は、夜間に天気が急変する条件では、誤差が大きくなります。

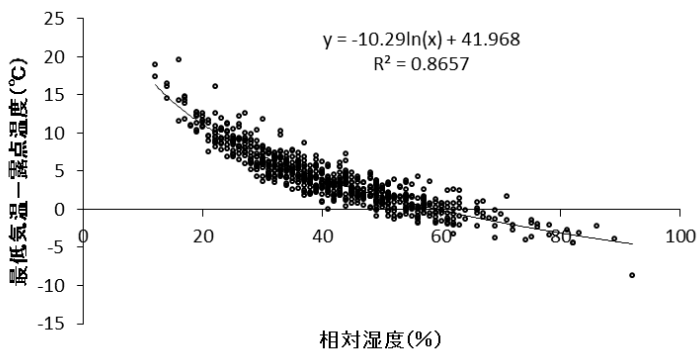


図14 最低気温と露点温度との差に対する相対湿度の影響
静穏晴天条件(風速 2 m s^{-1} 未満、雲量0.1以下)

Ⅷ 晩霜害の危険度評価に基づく防霜対策

気候温暖化条件では晩霜害の危険度を評価しながら、防霜対策を考えることが重要です。まず、芽の発育段階から今後の耐凍性を想定するとともに、気象庁の週間最低気温予測等を参考に週間の危険度を判断し、防霜対策の準備をしておきます。また、翌朝危険度が高いと予想される場合には、前日から天気図（地上天気図、高層天気図）、地域時系列予報、アメダスの毎時気温、湿度（露点温度）、果樹園の気温等を元に晩霜害の危険度を判断し、必要に応じて防霜対策を実施します。晩霜害の危険度が高い地域では、確実に被害を防ぐことのできる対策をあらかじめ準備しておく必要があります。

晩霜害対策には、燃焼法、送風法（防霜ファン法）、散水法（散水氷結法）、被覆法があります。燃焼法は、設備投資は少なく簡便ですが、自動化が困難で設置や火点管理に労力を要するのが難点です。送風法は、放射冷却時に発達する逆転層上部の比較的暖かい空気をファンで下層に送り攪拌することで、気温と樹体温の低下を防ぐ方法であり、サーモスタットにより自動化が可能です。

散水法は、スプリンクラーで樹上または樹冠下に散水し、水が凍るときの潜熱により植物体温を0℃程度に維持し、被害を防ぐ方法です。散水法は、十分量を樹体にまんべんなく散水できれば、かなりの低温でも被害を回避できるとされています。送風法や散水法では、ここで作成したような発育予測と耐凍性予測を考慮した、効率的な自動運転も可能と考えられます。

多目的防災網を被覆する園では、晩霜期前に被覆することにより、ある程度の保温効果が期待できます。こうした積極的な対策だけでなく、栽培的な対策として地面に昼間熱を蓄え、夜間に順調に放熱するような管理が重要です。地表面が乾燥しすぎている場合には事前に灌水を行い、敷きワラ等は晩霜期後に行います。