

[Original Paper]

冬季の不織布資材による被覆がブドウの 周囲温度と休眠芽の凍結抵抗性に与える影響

春日 純^{1*}・兼谷颯斗¹・東 億²・金谷真希³

¹帯広畜産大学 〒080-8555 北海道帯広市稲田町西2線11

²池田町ブドウ・ブドウ酒研究所 〒083-0002 北海道池田町字清見83-4

³北海道農業研究センター芽室研究拠点 〒082-0081 北海道芽室町新生南9-4

Effects of Unwoven Fabric Cover on Ambient Temperature and Freezing Resistance of Grapevine in Winter

Jun KASUGA^{1*}, Hayato KANEYA¹, Hakaru AZUMA² and Maki KANAYA³

¹ Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine, Obihiro, Hokkaido 080-8555, Japan

² Tokachi-Ikeda Research Institute for Viticulture and Enology, Ikeda, Hokkaido 083-0002, Japan

³ Hokkaido Agricultural Research Center, Memuro, Hokkaido 082-0081, Japan

Covering grapevines with unwoven fabric in winter is a potential method to prevent damage caused by freezing of the vines in cold viticultural areas. Although the covering is expected to protect the vines from extreme cold temperatures, the warm temperatures under the cover may trigger the initiation of a deacclimation process. In this study, we investigated the effects of two kinds of polyester unwoven fabrics, Plasticized Arbotex and Rabumatto U, on the temperatures in the unwoven fabric tunnels and the freezing resistance of dormant buds of the grape cultivar ‘Kiyomi’ grown in a vineyard in Ikeda Town, Hokkaido in the winter of 2019/2020. The vineyard had seen little snowfall until late January. When little snow accumulated, slight differences were noted between the daily averages of outside temperatures and temperatures in the tunnels made of each unwoven fabric. After a heavy snowfall on 30th January, both unwoven fabrics alleviated the temperature drop in the tunnels. The freezing resistance of ‘Kiyomi’ buds was maximum in both tunnels from late December to January. However, it decreased in the Plasticized Arbotex tunnels from mid-February. In contrast, ‘Kiyomi’ buds in the Rabumatto U tunnels maintained high freezing resistance until late March. To investigate whether the different temperatures in the two unwoven fabric tunnels caused the difference in the decrease in freezing resistance of buds, we exposed ‘Yamasachi’ buds harvested in mid-winter to controlled temperatures that mimicked the air temperatures in each unwoven fabric tunnel. Our results indicate that the temperature program mimicking that in the Plasticized Arbotex tunnels (which had a higher daily maximum temperature) caused a large decrease in freezing resistance. Our study revealed that unwoven fabric cover can promote deacclimation, and fabric characteristics can affect the extent of decrease in freezing resistance.

Keywords: Winter, Freezing damage, Unwoven fabric, ‘Kiyomi’, ‘Yamasachi’

* Corresponding author : (e-mail : jkasuga@obihiro.ac.jp)

受付日 : 2021年4月11日

受理日 : 2021年7月9日

緒言

現在、北海道は山梨県、長野県に次いで3番目に醸造用ブドウの生産量が多い都道府県である（国税庁課税部酒税課 2019）。十勝地域は道内のブドウ生産量のおよそ10%を担っているが（北海道農政部生産振興局農産振興課 2018）、冬季の気温が低く積雪も少ない本地域では、醸造用ブドウ栽培において寒冷地に適した品種選択や凍害対策の重要性が非常に高い。ヨーロッパブドウと呼ばれる *Vitis vinifera* では、凍結抵抗性の高い品種でも冬季に気温が -20°C を下回ると凍害を受けると言われており（北海道農政部生産振興局農産振興課 2018）、冬季にしばしば気温が -20°C を下回る十勝地域では、厳冬期に凍結抵抗性が -30°C 程度まで達する種間交雑品種である‘山幸’（‘清見’（‘セイベル13053’のクローン選抜、*Vitis spp.*）×十勝地域に自生する野生ブドウ）（Kasuga *et al.* 2020）や‘清舞’（‘清見’×十勝地域に自生する野生ブドウ）（未発表データ）が主に栽培されている。これらに加えて、ヨーロッパブドウなどの、外気環境で越冬させるには凍結抵抗性が十分でない品種の栽培も行われているが、そのためには冬季に何らかの凍害防止策をとる必要がある。

北海道中川郡池田町の町営ワイナリーである池田町ブドウ・ブドウ酒研究所（十勝ワイン）では、‘山幸’や‘清舞’とともに‘セイベル13053’からクローン選抜によって得られた赤ワイン用の品種‘清見’を栽培している（池田町ブドウ・ブドウ酒研究所 2013）。‘セイベル13053’は育種の過程で *V. rupestris* や *V. labrusca* などの北アメリカ原産のアメリカ種との交配が行われており（Fisher 1980）、そのクローン選抜品種である‘清見’の凍結抵抗性は多くのヨーロッパブドウよりも優れるものの、池田町の外気環境で越冬させると厳冬期に重大な凍害が発生する（Tsumura *et al.* 2019）。そのため、池田町ブドウ・ブドウ酒研究所では、冬の間、ブドウの樹の地上部を地表近くに寝かせ、その上に覆土することで凍害を防いでいる。積雪の有無などにも影響を受けるが、冬季の土壌中の温度は外気温に比べて非常に安定しており、外気温が -30°C を下回っても地表面から10 cmの深さでは土壌中の温度はマイナス数度程度であったことが報告されている（Shimada *et al.* 1982）。ブドウの樹の上に土を盛った覆土内部の温

度は平坦な土壌に比べて温度が低下しやすいと考えられるが、2020／2021年の冬季に池田町にあるブドウ圃場において覆土を受けているブドウの一年生枝近傍の温度を測定したところ、冬のシーズンを通して -11°C を下回ることにはなかった（未発表データ）。しかし、初冬の覆土や春の排土の作業に多大な労力が必要とされ、また、覆土や排土によるブドウの樹への物理的な傷害が根頭がん腫病への感染を促進することも懸念される（Willwerth *et al.* 2014）。そのため、池田町における‘清見’の栽培には、覆土に代わる凍害防止策が望まれている。

寒冷環境の醸造用ブドウ栽培産地であるカナダのケベック州やオンタリオ州では、冬期間、不織布資材でブドウの樹を覆う凍害防止策が取られている。Khanizadehら（2004, 2005）によってケベック州で行われた試験では、土壁や盛土などの補強に用いられるジオテキスタイルと言う不織布資材での被覆は、内部の温度低下を緩和することでブドウの樹体を受ける冬季の最低気温を外気よりも 10°C 以上高くし、中程度の凍結抵抗性を持つ品種で傷害発生を抑えて収量を増加させる傾向が見られた。同様に寒冷地域である十勝地域において、この方法は‘清見’やヨーロッパブドウのように外気環境で越冬させるには凍結抵抗性が十分ではない品種の凍害防止策として導入できる可能性がある。

ブドウのような越冬性の木本植物は、秋から冬にかけて低温馴化という過程によって凍結抵抗性を向上させる（Sakai and Larcher 1987）。この低温馴化は、日長の短縮や気温の低下によってもたらされる（Howell and Weiser 1970a, Christersson 1978, Taulavuori *et al.* 2000）。一方、冬から春にかけて凍結抵抗性が低下する過程を脱馴化と呼ぶが（Kalberer *et al.* 2006）、脱馴化過程は日長のような光によるシグナルよりも温度の影響を強く受けると言われている（Howell and Weiser 1970b）。不織布資材での被覆はブドウの樹体の温度低下を緩和することで凍害の防止が期待されるが、それによってもたらされる昼温の上昇や夜温の低下の緩和が低温馴化や脱馴化によるブドウの凍結抵抗性の変化に影響を与える可能性も否定できない。Richardsonら（2018）は、巨大な人工気象制御施設を用いた研究で、外気環境では -12°C でもほとんど凍害が見られない初春の時期

に、外気温度よりも9℃気温を上昇させた環境で生育するトウヒ属やカラマツ属の針葉樹では-4℃の低温で葉に重度の凍害が発生したことを報告している。世界的な気候変動により、冬季に季節外れの気温上昇が起こるなど、変則的な気象現象が起こる頻度が増加傾向にあることを考慮すると (Arora and Rowland 2011)、被覆資材の内部の温度が外気よりも高くなることによってブドウの凍結抵抗性が低下し、予期せぬ凍害が発生する危険性が今後高まることも懸念される。そのため、不織布資材による被覆の凍害対策としての導入を検討するにあたっては、事前に被覆による内部温度変化とそれによるブドウの凍結抵抗性のへの影響を把握することが望ましい。

本研究では、2019年12月から2020年4月まで十勝地域で栽培されている‘清見’を特性の異なる2種類のポリエステル不織布資材を用いて被覆し、その間の被覆内部温度と休眠芽の凍結抵抗性の変化を調べた。また、厳冬期に採取した‘山幸’の休眠芽を不織布による被覆の内部温度を模倣した温度変化プログラムで人為的に脱馴化させた時の凍結抵抗性の変化を調べることで、不織布資材での被覆によってもたらされる温度変化がブドウの凍結抵抗性に与える影響について検証を行った。

材料と方法

1. 供試樹

不織布資材による被覆試験および試料の採取は、北海道池田町ブドウ・ブドウ酒研究所清見圃場（北緯42度55分、東経143度28分）で行った。圃場での被覆試験にはシングルコルドンで仕立てた3年生の自根株の‘清見’を用い、人為的な脱馴化処理にはダブルコルドンで仕立てた7年生の自根株の‘山幸’の一年生枝を使用した。

2. 不織布資材による被覆

圃場での被覆処理は、2019年12月2日に開始した。被覆資材としては、カナダのケベック州でブドウの凍害防止用に用いられている不織布資材 Plasticized-Arbotex (Texel, サン・テルゼアール, カナダ;以降はアーボテクスと呼ぶ)と野菜のポット育苗などに使われる底面灌水マットであるラブマット

U (ユニチカ, 大阪) の2種類のポリエステル不織布を用いた。アーボテクスの厚さはおよそ1 mmであり、片面には低密度ポリエチレンフィルム (LDPE) 加工がなされ、その面は水や風を透過しない (Fig. 1)。ラブマットUはアーボテクスに比べて厚みがあり (およそ2.2 mm)、片面が黒い (Fig. 1)。不織布の遮光率を、LEDライトイルミネーター (KL300, Carl Zeiss, オーバーコッヘン, ドイツ) を光源として、ライトアナライザー (LA-105, 日本医化器械製作所, 大阪) で測定した透過光の照度から算出したところ、アーボテクスでは74.1%, ラブマットUでは97.7%であった。樹体を誘引線から外した後に、当年に伸長した一年生枝を幹から1 m程度残して剪定し、一年生枝の先端を地面に刺して樹体を地際に固定した。被覆はおよそ2 m幅の不織布資材を地表から60 cmの高さにある誘引線に被せることで行った。7もしくは8個体が植栽された支柱から支柱までの間 (9 m) に同一の資材を被せてひとつの処理区とした。ラブマットUは、白い面が外側になるように設置した。被覆資材の両端は安全ピンを用いて閉じ、裾は角材などを上に乗せて地面に固定した。それぞれの被覆資材と処理区の写真を Fig. 1 に示す。被覆資材ごとに、それぞれ2つの処理区を設けた。被覆の内部温度は、被覆の中央部において地表から40 cmの高さになるように誘引線から吊り下げた温度データロガー (サーモクロン SL, KN ラボラトリーズ, 大阪) で1時間ごとに測定した。被覆資材は2020年4月8日に取り除いた。

3. 外気温

外気温および降水量は、気象庁により池田町に設置されている地域気象観測所で測定した公開データをもとにした (気象庁 2020)。本観測所は、池田町ブドウ・ブドウ酒研究所清見圃場と隣接する。

4. 休眠芽の凍結抵抗性評価

試料採取は、被覆処理開始から2～3週間ごとに行った。被覆資材の裾をまくり、一年生枝の基部に3つの休眠芽を残して剪定ばさみで切って、一つの採取日につき処理区ごとに異なる4個体から1本ずつ、つまり、被覆資材ごとに8本の一年生枝を採取した。休眠芽の凍結抵抗性は、示差熱分析で調べた。



Fig. 1 Grapevines covered with Plasticized Arbotex or Rabumatto U. Photographs were taken on 25th December 2019. Insets show photographs of the unwoven fabrics.

採取した一年生枝から最も基部に近い休眠芽を含む 1 cm 程度の節を剪定ばさみで切り出し、休眠芽の表面に T 熱電対をパラフィルムで固定した。乾燥を防ぐために組織片全体もパラフィルムで覆い、ディープフリーザー (MDF-C8V1, PHC ホールディングス, 東京), ファンヒーター (TNK-FH100, 株式会社タナカ, 札幌), および、温度制御ユニット (TNK-TS100, 株式会社タナカ) からなるプログラムフリーザーに入れて、4℃ で 1 時間温度平衡させた後に 5℃

/h で -40℃ まで冷却した。熱電対の温度は、データロガー (LR8400, 日置電機, 長野) によって記録した。試料中の水分の凍結は、休眠芽の温度と試料を付けていない熱電対が示す温度の差をもとに潜熱の放出による発熱を調べることで検出した。冷却過程において、ブドウの休眠芽から高温発熱と呼ばれる -10℃ までに見られる発熱と低温発熱と呼ばれるそれよりも低い温度で見られるものの 2 種類の発熱が検出されるが、これらはそれぞれ、一年生枝や休

眠芽の原基以外の水分の凍結と原基内の水分の凍結によると考えられている (Quamme 1986). ひとつの休眠芽から2~3個の低温発熱が検出されることがあるが、これらはそれぞれ、主芽と副芽の凍結を示す (Kasuga *et al.* 2020). 通常、主芽の凍結による発熱は副芽のものに比べて高い温度で起こり、発熱ピークも大きい (Fennell 2004). 本研究では主芽の凍結温度を調べるため、最も高い温度で発生した低温発熱の開始温度を休眠芽の凍結抵抗性とした. -40°C まで冷却された休眠芽は、直ちにカミソリ刃で切断し、主芽の原基に褐変が見られるかを確認した. 褐変が見られた休眠芽については、示差熱分析を行う前から主芽が傷害を受けていたものと考えられるため、以降の解析からデータを除外した.

5. 人為的な脱馴化处理

2020年2月12日から15日までの被覆資材の内部温度を模倣した温度制御プログラムを用いて、ブドウの休眠芽を人為的な脱馴化处理に供した. この実験には、2020年2月上旬に採取し、砕いた氷と共にビニル袋に入れ、 -7°C に設定した冷凍庫内で保存した‘山幸’の一年生枝を用いた. 低温恒温槽 (NCB-3300, 東京理化器械, 東京) に底面に湿らせたろ紙を敷いた平底の試験管を口が液面より上になるように立て、その中に剪定ばさみで1 cm程度の長さに切った休眠芽を含む一年生枝の節を、切り口がろ紙と接するように入れた. 試料の乾燥を防ぐため、試験管の口はパラフィルムで塞いだ. アーボテクスを模倣したものの昼温は 10°C 、ラブマットUは 5°C とし、夜温はいずれも -5°C とした. 昼温から夜温に移る過程で、設定温度が 0°C となるときに、毎回、試験管の口を塞いだパラフィルムを取り除き、氷の小片をろ紙に乗せることで植水を行った. 試験管の口は、植水後、直ちにパラフィルムで塞いだ. 3日間脱馴化处理を行った休眠芽の凍結抵抗性を示差熱分析で測定した. 処理ごとに異なる一年生枝についた9個の休眠芽を材料として用いた.

結果

1. 不織布資材での被覆による日平均気温への影響

被覆処理の開始から終了までの外気および被覆資材内部の日平均気温および日最低気温を Fig. 2 に示

す. 2019 / 2020 年の冬シーズンは1月下旬まで降雪が非常に少なく、1日の降水量が10 mmを超す降雪は1月30日まで見られなかった. そのため、1月下旬まで積雪も浅く、Fig. 1のように雪の間から地表面が見える日が多かった. 1月下旬以降は3月中旬までまとまった降雪が何度かあり、春の雪解けまで地表面が雪の間から見えることはなかった. 不織布資材での被覆の内部温度の推移は、1月下旬のまとまった降雪の前後で大きく異なっていた (Fig. 2). 1月30日以前は被覆内部の日平均気温は外気とほぼ一致して推移したが、1月30日以降、特に気温が低くなるときに被覆資材内部の日平均気温は外気より高い値を示した. また、ラブマットUに比べてアーボテクスでより高くなる傾向が見られた. 積雪がほとんどない1月30日以前の被覆内部の日最低気温は外気と同程度かそれよりも低くなることがあった. これは、気象庁の地域気象観測所では地表から高さ1.5 mの位置の温度を測定しているのに対し、被覆内部では地表から40 cmの位置の温度を測定していることによると考えられる. 1月30日以降の被覆内部の日最低気温は、外気温が 0°C 以上の日を除いて外気温と同程度、もしくはそれよりも高くなった. 外気の日最低気温が -22.5°C と2019 / 2020年の冬シーズンで最も低かった2月9日の被覆資材内の日最低気温は、アーボテクスで -12.0°C 、ラブマットUで -14.0°C と外気温よりも 10°C 近く高い値を示した.

2. 被覆内部の‘清見’の休眠芽の凍結抵抗性変化

ブドウの樹の地上部において、冬季に休眠芽の凍結抵抗性は他の組織よりも低く、最も凍害を受けやすいと言われている (Pierquet *et al.* 1977, Miller *et al.* 1988). また、ブドウの休眠芽は過冷却をすることで致死的な傷害をもたらす細胞内凍結を回避しており (Quamme 1986, Kasuga *et al.* 2020), 休眠芽の内部の過冷却水の凍結と致死的な凍害発生のタイミングがよく一致することから (Pierquet and Stushnoff 1980, Quamme 1986), 本研究では、示差熱分析により主芽の凍結温度を評価し、これをブドウの凍結抵抗性の指標とした. 池田町において‘清見’を外気環境で越冬させることは難しいことから (Tsumura *et al.* 2019), 外気環境に置かれた‘清見’の休眠芽の凍結

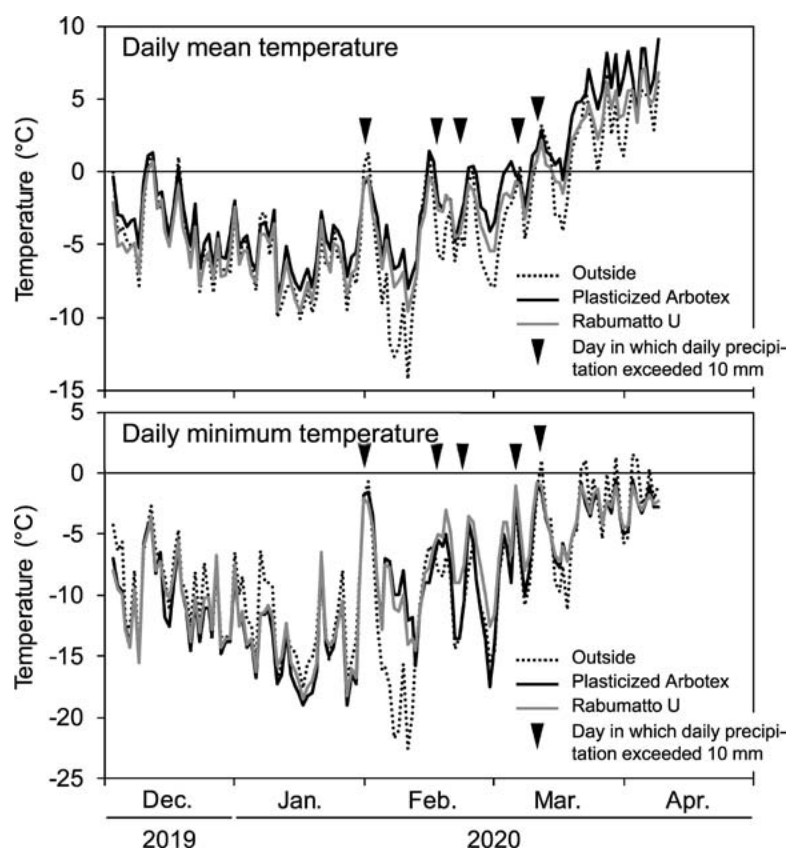


Fig. 2 Daily average and minimum outside temperatures and temperatures in the tunnels made of unwoven fabric. Dotted lines indicate outside temperatures, which were calculated from published data (Japan Meteorological Agency 2020). Black and gray solid lines indicate temperatures in Plasticized Arbotex and Rabumatto U tunnels, respectively. Averages of temperatures in the two plots are shown for each unwoven fabric. Arrowheads indicate days in which daily precipitation as snowfall exceeded 10 mm.

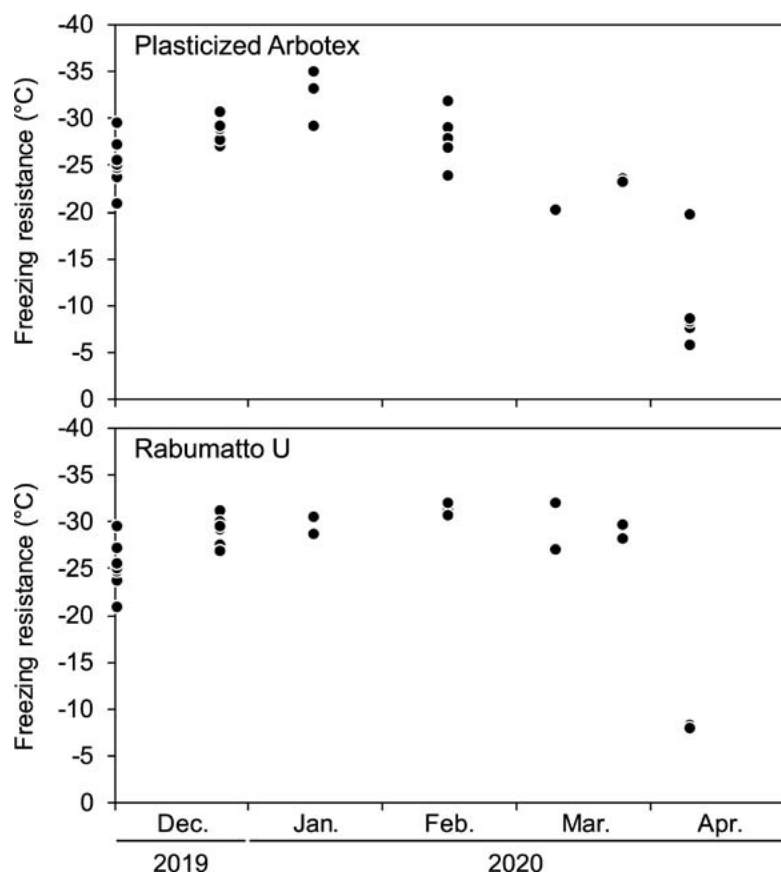


Fig. 3 Seasonal changes in freezing resistance of dormant buds of 'Kiyomi' vines covered with unwoven fabric. Each dot indicates freezing resistance of each dormant bud determined by differential thermal analysis. The number of data points for each date, which is equal to the number of dormant buds of which freezing resistance was determined, is shown in Table 1. The grapevines were covered with unwoven fabric from 2nd December 2019 to 8th April 2020.

抵抗性の評価は行わず、不織布で被覆した個体の休眠芽のみを用いた。

Fig. 3 にアーボテクスとラブマットUで被覆した‘清見’の休眠芽の凍結抵抗性の変化を示す。試験日ごとに2種類の被覆資材についてそれぞれ8つの休眠芽を示差熱分析に供試したが、褐変の観察から示差熱分析の前から主芽に傷害があったことが分かる休眠芽も多く、得られたデータ数は供試した休眠芽の数に比べ少なくなった (Table 1)。特に、3月以降の試料では主芽の褐変の頻度が高く、3月中にはいずれの条件でも1もしくは2個の休眠芽の凍結抵抗性のみしか評価ができなかった。そのため、Fig. 3では、被覆資材や試料採取日によって示してあるデータポイント数が異なっている。各採取日におけるデータポイント数を Table 1 に示した。

示差熱分析で求めた凍結抵抗性の値を見ると、被覆を開始した12月2日にはおよそ -25°C であった休眠芽の凍結抵抗性は、いずれの資材で被覆されたブドウの休眠芽でも1月中旬までの間に -30°C 程度まで徐々に強まった (Fig. 3)。その後、アーボテクスでは2月中旬から凍結抵抗性の低下が見られ、2月14日に採取した冬芽の凍結抵抗性の平均値は、アーボテクスでは -27.7°C ($n=5$) であったのに対し、ラブマットUでは -31.1°C ($n=5$) であり、両者の間には統計的な有意差が見られた (Student's t-test, $p=0.03$)。3月以降にアーボテクスでは、 -25°C より低温に対して凍結抵抗性がある休眠芽は見られなかった。一方、ラブマットUでは3月下旬まで休眠芽は -30°C 程度の高い凍結抵抗性を維持した。3月下旬から4月上旬にかけて休眠芽の凍結抵抗性は急激に低下し、被覆資材の撤去を行った4月8日には、いずれの資材でもほとんどの休眠芽は -10°C より

低温で凍結抵抗性を示さなかった。

3. 人為的な脱馴化による休眠芽の凍結抵抗性変化

Fig. 4A に、アーボテクスによる被覆でのみ凍結抵抗性の低下が見られた2月中旬から3月上旬のそれぞれの被覆内の温度変化を示す。2019/2020年の冬シーズンの最初の日降水量が10 mmを超える降雪 (1月30日) からしばらく経った2月11日から16日までは、夜温は2種類の被覆資材でほぼ差がなかったが、特に日最高気温が 0°C を超える日の昼温に差が見られた。2月17日以降はしばしばまとまった降雪があり、Fig. 4A で示した期間では2月17日と22日に降水量換算でそれぞれ10 mm強、3月5日には降水量換算でおよそ40 mmの雪が降った (気象庁2020)。これらの降雪により積雪も深くなった2月17日以降はラブマットUの被覆内の昼間の温度がほぼ 0°C で安定し、それによって昼間の2種類の資材の被覆内部の差がより大きくなる傾向が見られた。また、この期間は、2種類の被覆資材で内部の夜温がしばしば異なり、ラブマットUのほうがアーボテクスよりも夜温の低下を緩和した。

Fig. 3 で見られた被覆資材による2月中旬以降の‘清見’の休眠芽の凍結抵抗性の差が被覆の内部温度の違いによるのではないかと考え、アーボテクスで凍結抵抗性の低下が見られた2月の試料採取日前後 (2月12日正午から15日正午) の気温を模倣した温度変化プログラムを用いてブドウの休眠芽に対して人為的な脱馴化処理を行い、凍結抵抗性の変化を調べた。この試験には、厳冬期に採取して冷凍庫で保存していた‘山幸’の休眠芽を使用した。用いた温度変化プログラムを Fig. 4B に示す。アーボテクスを模倣したものでは昼温を 10°C 、ラブマットUのも

Table 1. Number of dormant buds of which freezing resistance could be determined by differential thermal analysis

Date	Plasticized Arbotex	Rabumatto U
2nd December	8	8
25th December	6	6
15th January	3	4
14th February	5	5
9th March	1	2
24th March	2	2
8th April	5	4

For each date, eight buds from grapevines covered with unwoven fabric were subjected to differential thermal analysis.

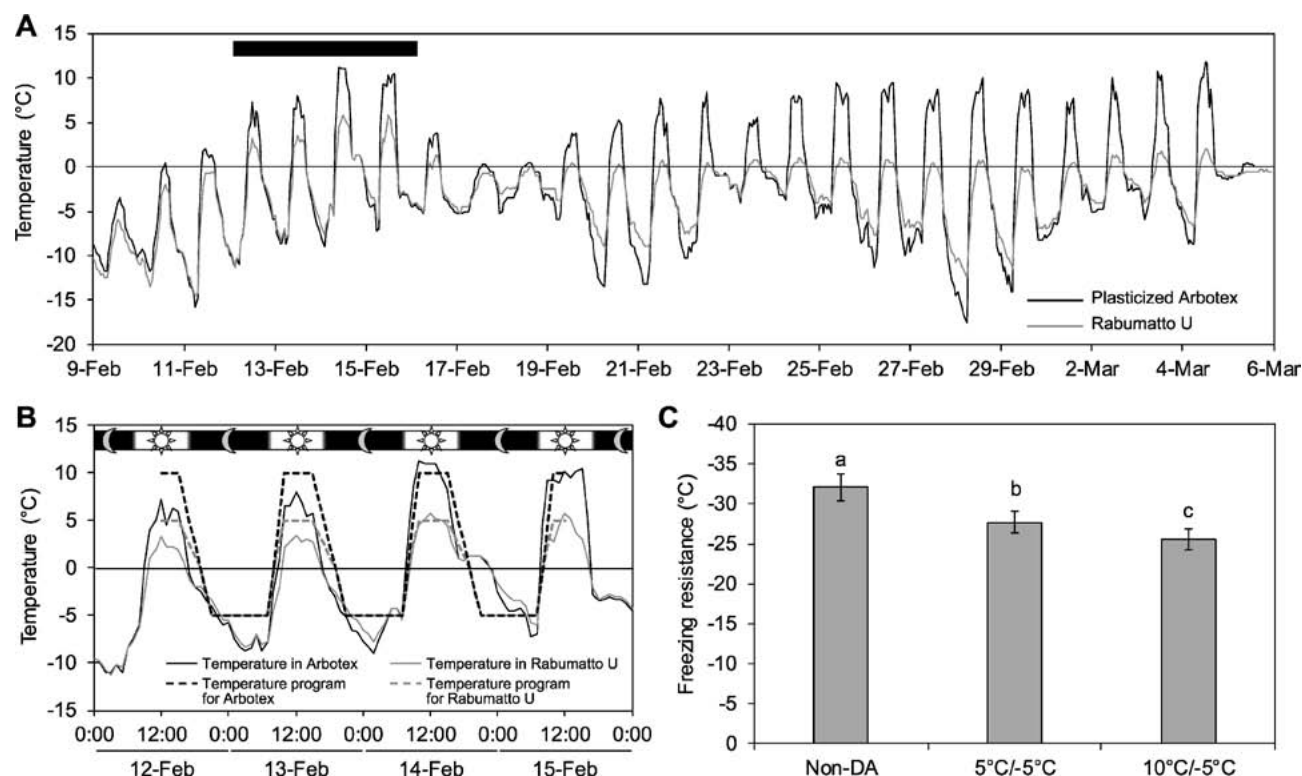


Fig. 4 Changes in freezing resistance of ‘Yamasachi’ dormant buds induced by artificial deacclimation treatment. (A) Air temperatures in Plasticized Arbotex and Rabumatto U tunnels from 9th February to 5th May 2020. Black line: Plasticized Arbotex; gray line: Rabumatto U. Temperature data under the black bar are shown in detail in B. (B) Temperature programs for artificial deacclimation treatment. Black solid line: mean air temperature in Plasticized Arbotex tunnels; black dashed line: temperature program mimicking air temperature in the Plasticized Arbotex tunnels; gray solid line: mean air temperature in two Rabumatto U tunnels; gray dashed line: temperature program mimicking air temperature in the Rabumatto U tunnels. (C) Freezing resistance of ‘Yamasachi’ dormant buds before and after deacclimation treatment. Non-DA: buds before deacclimation treatment; 5°C/-5°C: buds deacclimated by a temperature program mimicking air temperature in Rabumatto U tunnel; 10°C/-5°C: buds deacclimated by a temperature program mimicking air temperature in Plasticized Arbotex tunnel. Different letters above bars indicate significant difference ($n = 9$, Tukey’s HSD, $p < 0.05$).

のでは5℃とし、夜温はいずれも−5℃として、3日間処理を行った。脱馴化処理を行っていない‘山幸’の休眠芽の凍結抵抗性は−32.1℃であったが (Fig. 3C)、これは、厳冬期に圃場から採取した直後の‘山幸’の休眠芽の凍結抵抗性とほぼ一致する (データ示さず)。脱馴化を行っていない休眠芽と比べていずれの脱馴化処理でも凍結抵抗性は有意に低下した (Fig. 3C)。その程度は昼温と相関し、ラバマットUによる被覆の内部温度を模倣した昼温が5℃の処理では凍結抵抗性が−27.7℃と4.4℃変化したのに対し、アーボテクスによる被覆の内部温度を模倣した昼温が10℃の処理では凍結抵抗性は−25.6℃になり、6.4℃の変化が見られた。

考察

本研究において、不織布資材による温度低下の抑制効果は、いずれの被覆資材でも降雪に強く影響を受けた。降雪が少なく地表面と不織布が乾燥した状態では内部の日平均気温は外気温とほとんど変わらず推移し、降雪後にはどちらの被覆資材を用いた場合においても気温の低下が抑えられた (Fig. 2)。特に、降水量換算で20 mmを超える降雪があった1月30日以降しばらくの間は日最低気温が−20℃を下回っても、被覆内部の温度は−15℃を下回ることにはなかった。被覆資材が夜間の温度低下を抑える機構としては、外気と被覆内部の空気との間の断熱や対流による外気と被覆内部の空気の攪拌の阻害、地表面や植物表面からの熱放射の阻害などが考えられる。

が、被覆資材が乾いた状態では熱の移動を遮断する効果が弱く、また、ラブリットUでは空気の移動を遮断する効果も弱いことで被覆資材の内外の温度に差が生じ難かったのかもしれない。一方、降雪後には不織布表面に付着した雪の層が高い断熱効果を示したことや、湿った不織布資材が空気の移動を遮断することで被覆内部の気温の低下が抑えられたことが考えられる。さらに、日中に一部の雪や氷が融解する場合には、不織布資材に吸収された水が夜間に再び凍結する際に潜熱の放出が起これ、これも被覆内部の温度低下の抑制に関与すると思われる。

休眠芽の凍結抵抗性の季節変化を調べるために行った示差熱分析では、供試した休眠芽が試験前から傷害を受けていたことが後で分かることが多く、期待していた数のデータを得ることができなかった (Fig. 3)。2019/2020年の冬シーズンには、1月末までに外気の日最低気温が -20°C を下回ることにはなかった (気象庁 2020)。しかし、Tsumuraら (2019)の研究で外気環境での‘清見’の休眠芽の季節的な凍結抵抗性変化を調べた際に、ブドウが十分に高い凍結抵抗性を獲得する12月中旬に採取したサンプルでも少数ながら -16°C で凍害を生じる休眠芽が見られており (データ示さず)、まとまった降雪があった1月30日までの間に被覆内の日最低気温が -16°C を下回る日がアーボテクスでは13回、ラブリットUでは9回あったことから (Fig. 2)、これらの低温により徐々に凍害を受けた休眠芽が増えていった可能性がある。また、1月30日以降は、積雪によっていずれの不織布資材による被覆の内部温度低下が緩和されたものの、特にアーボテクスにおいては、2月中旬以降の凍結抵抗性の低下によって、気温がさほど下がらない状況でも凍害が発生したことも考えられる。

不織布資材による被覆を開始した12月2日にはすでに -25°C 程度の高い凍結抵抗性を獲得していたためか、二つの不織布資材間で‘清見’の休眠芽における季節的な低温馴化過程の凍結抵抗性の変化に大きな差は見られなかった。一方、脱馴化過程については、当初予想していなかった傷害の発生によって休眠芽の凍結抵抗性に関するデータ数は少なくなったものの、2月中旬にアーボテクスで被覆されたブドウの冬芽の耐寒性はラブリットUのものよりも有

意に低く、3月以降にはアーボテクスで -25°C より低い温度に対する凍結抵抗性を示す休眠芽は見られず、ラブリットUでは3月中旬に採取した休眠芽はすべて -25°C より低温に対して凍結抵抗性を示したように、得られたデータについては二つの不織布資材で明瞭な違いが見られた (Fig. 3)。3月中には異なる日に2回試料採取を行い、そのいずれにおいても同様の結果が見られており、本研究で得られた結果は、不織布資材の材質が脱馴化過程の凍結抵抗性の低下に影響を与えることを強く示唆している。

アーボテクスとラブリットUでは、2月以降の被覆内部の温度環境に違いが見られた (Fig. 2)。2月以降の被覆内部の日平均気温は、ラブリットUに比べてアーボテクスで高い傾向が見られたが、これは主にアーボテクスによる被覆内の昼温がより高くなったことに起因する (Fig. 4)。この被覆内の昼温の違いは、両資材の遮光率によると考えられる。アーボテクスはおよそ25%の光が被覆内に透過するのに対し、裏面が黒いラブリットUは98%近い光の透過を遮断する。カナダで行われた研究においても、片面を黒色のLDPE加工されたポリエステル不織布がLDPE加工をしていないものに比べて最高気温を低く抑える傾向が見られている (Willwerth *et al.* 2014)。被覆内部温度の違いが凍結抵抗性の低下様式に影響を与えるものであるのかを確かめるために、厳冬期に採取した試料を用いて、アーボテクスで凍結抵抗性の低下が始まった2月中旬の二つの不織布内の温度を模した温度制御プログラムで3日間脱馴化処理を行い、凍結抵抗性の変化を調べた (Fig. 4)。池田町ブドウ・ブドウ酒研究所清見圃場で育成されている‘清見’は、被覆試験を行っているものを除いては、冬期間覆土をされており、試験に用いる休眠芽を採取することが困難であったことから、この実験では同圃場で生育する‘山幸’を材料とした。人為的な脱馴化処理の結果、いずれの不織布による被覆内部の温度を模した条件でも休眠芽の凍結抵抗性が低下したが、アーボテクスを模したものでラブリットUを模したものに比べて有意に大きい凍結抵抗性の低下が見られた (Fig. 4C)。

屋外環境では、低温馴化は自発休眠期に、脱馴化は強制休眠期に起こる。自発休眠から強制休眠への移行は低温要求が満たされることで起こるが、

Kovaleski ら (2018) は低温積算時間が増えることでブドウの休眠芽の脱馴化速度が上昇することを示している。二つの不織布資材で被覆されたブドウの休眠芽の凍結抵抗性に差が見られ始める前からアーボテクスによる被覆内の気温はラブマットUに比べて高くなる傾向があったが、2月中旬以降に凍結抵抗性に差が生じた理由は、その時期の前後で脱馴化速度の上昇に要求される低温積算時間が満たされたためなのかもしれない。

脱馴化は主に温度の上昇によって誘導されると考えられており (Howell and Weiser 1970b), 凍結抵抗性を予測するモデルでは、しばしば温度に関する情報を変数として用いられている。Ferguson ら (2014) の複数のブドウ品種を対象とした凍結抵抗性予測モデルでは、日最低気温と日最高気温の平均が変数として用いられており、その値がある閾値を超えると凍結抵抗性の低下が始まるとされている。その閾値は品種によって異なるが、低いものでも3℃であった。今回の人為的な脱馴化処理による日最低気温と日最高気温の平均は、アーボテクスを模したもので2.5℃、ラブマットUを模したもので0℃であったが、‘清見’はFerguson ら (2014) が用いた品種よりも低い温度から脱馴化を開始するのかもしれない。

アーボテクスとラブマットUで被覆されたブドウの休眠芽の凍結抵抗性の差は、3月により明瞭になった。その理由のひとつとして、2月中旬に比べて2月下旬以降で二つの不織布資材間で被覆内部の温度差がより大きくなったことの影響が考えられる。また、Howell と Weiser (1970b) は、リンゴの枝で脱馴化が進行するにつれて再び低温に晒されたときに凍結抵抗性を向上させる再馴化能力が低下することを示しており、ブドウの休眠芽でも同様に脱馴化が進行することで夜間の低温による再馴化が起こり難くなっていたことがこの凍結抵抗性の差の拡大の一因ではないかとも考えている。

本研究で得た結果をもとに、不織布資材による被覆でブドウの凍害を防ぐ際に望まれる資材の特性について考えると、保水力と遮光性が高いものが好ましいと予想された。今回用いた不織布資材は、いずれも地表が十分に隠れるほどの積雪により十分に水や雪と接することで温度低下の緩和効果を示したこと (Fig. 2), また、厚みがあり、より水分の保持力が

高いと思われるラブマットUで積雪後に夜間から早朝にかけての気温の低下が防がれたことから (Fig. 4A), より保水力の高いものが吸水後に高い温度低下緩和効果を持つと考えられる。ただし、積雪が少ない場合など、不織布資材が乾燥すると、この効果はほとんど期待できない。また、裏面が黒く光を通しにくいラブマットUで日中の温度上昇が抑えられたことから (Fig. 4A), 早期の凍結抵抗性の低下を防ぐためには遮光率の高いものが良いと思われる。

本研究では、被覆資材の設置期間中にかなりの数の休眠芽で傷害が発生してしまったが、この傷害を抑えるために、我々が行った不織布資材の設置方法には検討の余地がある。今回の試験では、地表から60 cmにある誘引線に不織布資材を被せたが、ブドウの樹を地表に寝かせてより低い位置に不織布資材を設置すれば、地温の影響により、より高い温度低下の緩和効果を得られる可能性がある (Willwerth 2013)。本研究において不織布資材を設置した2019/2020年の初冬は全道的に少雪で、道央のような例年積雪に埋めることでブドウを越冬させている栽培地でも1月初旬まで十分な積雪がないところもあり、そのような地域では凍害の発生が懸念されていた。本試験は、寒冷少雪地域で外気環境では越冬できない品種を栽培するための凍害防止策を検討するため開始したが、不織布資材での被覆は多雪地域での降雪不足への対応としても利用できる可能性がある。いずれにしても、不織布資材での被覆によってより高いブドウの凍害防止効果を得るためには、それぞれの地域で降雪量や気温といった冬季の環境に合わせた不織布資材の設置方法を検討する必要があるだろう。

要約

北海道池田町において、外気温では越冬が難しい‘清見’を12月初旬から4月初旬にかけて2種類のポリエステル不織布資材で被覆し、被覆内部の温度と休眠芽の凍結抵抗性の変化を評価した。積雪が少ない条件では、いずれの不織布資材でも期待していたほどの保温効果は得られず、被覆の内部と外気の日平均気温の間に大きな差は見られなかった。一方、まとまった降雪の後には不織布資材は内部温度の低下を緩和した。休眠芽の凍結抵抗性の変化には2種

類の被覆資材間で違いが見られ、より厚く遮光性の高いラブマットUで被覆した個体の休眠芽は3月下旬まで -30°C 程度の高い凍結抵抗性を維持したのに対して、アーボテクスで被覆した個体では2月中旬から凍結抵抗性の低下が見られた。2月中旬以降、アーボテクスの内部は昼温がラブマットUよりも高くなる傾向が見られたため、この温度の差が凍結抵抗性の違いをもたらしたのかを確認するために、‘山幸’の休眠芽を人為的に脱馴化处理して凍結抵抗性の変化を調べたところ、アーボテクスの内部温度を模倣したプログラムで脱馴化させたときにはラブマットUを模倣したときに比べ、より大きな凍結抵抗性の低下が見られた。この結果から、被覆資材の特性によって被覆内部の温度が異なり、日中に内部温度が上昇しやすい資材を用いた場合には、晩冬から春にかけて、通常よりも早い時期に凍結抵抗性の低下が進行する可能性があることが明らかになった。

謝辞

被覆試験で用いたラブマットUは、ユニチカ株式会社から提供いただいた。本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金事業（課題番号18K05718, 21K05555）により行われた。

文献

- Arora R and Rowland LJ. 2011. Physiological research on winter-hardiness: deacclimation resistance, reacclimation ability, photoprotection strategies, and cold acclimation protocol design, *HortSci* **46**: 1070–1078.
- Christersson L. 1978. The influence of photoperiod and temperature on the development of frost hardiness in seedlings of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Plant Physiol* **44**: 288–294.
- Fennell A. 2004. Freezing tolerance and injury in grapevines. *J Crop Improv* **10**: 201–235.
- Ferguson JC, Moyer MM, Mills LJ, Hoogenboom G and Keller M. 2014. Modeling dormant bud cold hardiness and budbreak in twenty-three *Vitis* genotypes reveals variation by region of origin. *Am J Enol Vitic* **65**: 59–71.
- Fisher KH. 1980. Interspecific hybrids used in breeding wine grapes for Southern Ontario, Canada, *In* Proceedings of the third international symposium on grape breeding. pp. 12–20. University of California, Davis.
- 北海道農政部生産振興局農産振興課. 2018. 醸造用ぶどう導入の手引（改訂第2版）.
- Howell GS and Weiser CJ. 1970a. The environmental control of cold acclimation in apple. *Plant Physiol* **45**: 390–394.
- Howell GS and Weiser CJ. 1970b. Fluctuations in the cold resistance of apple twigs during spring dehardening. *J Am Soc Hortic Sci* **95**: 190–192.
- 池田町ブドウ・ブドウ酒研究所. 2013. 十勝ワイン・ジェネシス：池田町ブドウ・ブドウ酒研究所創世記物語. 池田町ブドウ・ブドウ酒研究所, 池田.
- Kalberer SR, Wisniewski M and Arora R. 2006. Deacclimation and reacclimation of cold-hardy plants: Current understanding and emerging concepts. *Plant Sci* **171**: 3–16.
- Kasuga J, Tsumura Y, Kondoh D, Jitsuyama Y, Horiuchi R and Arakawa K. 2020. Cryo-scanning electron microscopy reveals that supercooling of overwintering buds of freezing-resistant interspecific hybrid grape ‘Yamasachi’ is accompanied by partial dehydration. *J Plant Physiol* **253**: 153248.
- Khanizadeh S, Rekika D, Levasseur A, Groleau Y, Richer C and Fisher H. 2004. Growing grapes in a cold climate with winter temperature below -25°C . *Acta Hort* **663**: 931–936.
- Khanizadeh S, Rekika D, Levasseur A, Groleau Y, Richer C and Fisher H. 2005. The effects of different cultural and environmental factors on grapevine growth, winter hardiness and performance, in three locations, in Canada. *Small Fruit Rev* **4**: 3–28.
- 気象庁. 2020. 過去の気象データ検索 (<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>; 2020年9月3日にアクセス).
- 国税庁課税部酒税課. 2019. 国内製造ワインの概況（平成29年度調査分）.
- Kovaleski AP, Reisch BI and Londo JP. 2018. Deacclimation kinetics as a quantitative phenotype for delineating the dormancy transition and thermal efficiency for budbreak in *Vitis* species. *AoB Plants* **10**: ply066.
- Miller DP, Howell GS and Striegler RK. 1988. Cane and bud hardiness of selected grapevine rootstocks. *Am J Enol*

Vitic **39**: 55–59.

Pierquet P and Stushnoff C. 1980. Relationship of low temperature exotherms to cold injury in *Vitis riparia* Michx. Am J Enol Vitic **31**: 1–6.

Pierquet P, Stushnoff C and Burke MJ. 1977. Low temperature exotherms in stem and bud tissues of *Vitis riparia* Michx. J Amer Soc Hort Sci **102**: 54–55.

Quamme HA. 1986. Use of thermal analysis to measure freezing resistance of grape buds. Can J Plant Sci **66**: 945–952.

Richardson AD, Hufkens K, Milliman T, Aubrecht DM, Furze ME, Seyednasrollah B, Krassovski MB, Latimer JM, Nettles WR, Heiderman RR, Warren JM and Hanson PJ. 2018. Ecosystem warming extends vegetation activity but heightens vulnerability to cold temperatures. Nature **560**: 368–371.

Sakai A and Larcher W. 1987. Frost survival of plants: responses and adaptation to freezing stress. Springer-Verlag, Berlin.

Shimada T, Genma T, Furuya S and Kondo Y. 1982. Frost heaving injury of alfalfa. J Japan Grassil Sci **28**: 147–153.

Taulavuori K, Taulavuori E, Sarjala T, Savonen E-M, Pietiläinen P, Lähdesmäki P and Laine K. 2000. *In vivo* chlorophyll fluorescence is not always a good indicator of cold hardiness. J Plant Physiol **157**: 227–229.

Tsumura Y, Azuma H, Takahashi Y, Atucha A, Hirano N and Kasuga J. 2019. Cold hardiness of wine grape variety ‘Kiyomi’ during dormant season in Tokachi area. Cryobiol Cryotechnol **65**: 75–79.

Willwerth J. 2013. Research report: use of geotextiles to reduce freeze injury in Ontario vineyards (web article). Cool Climate Oenology and Viticulture Institute, Brock University, St. Catharines.

Willwerth J, Ker K and Inglis D. 2014. Best management practices for reducing winter injury in grapevines (web article). Cool Climate Oenology and Viticulture Institute, Brock University, St. Catharines.