散水氷結法による防霜対策に関する研究

(3) 有効散水強度の下限值

鈴木義則・山本 薫

(山口大学農学部農業環境学研究室)

Studies on the Protection of Frost Damage
by Sprinkling Method.

(3) The Lowest Value of Effective Sprinkling Intensity

Yoshinori SUZUKI and Kaoru YAMAMOTO

(Lab. of Agricultural Environmental Science,
Faculty of Agriculture, Yamaguchi University, Yamaguchi 753)

1. はじめに

晩霜期には、西南暖地においても低温の発生頻度が極めて高く、種々の作物、果樹に被害がでている。生産の安定化が望まれるが、凍霜害の軽減対策としては、燃焼法、送風法、被覆法、散水氷結法などの方法を取り入れることが必要となる。筆者らは、これらのうち、低温度合が強い場合にも実効をあげうるのは、散水氷結法であるとの認識に立って研究を進めてきた。また、近年の農業土木施設の整備に伴い、水資源が確保されるという社会情勢の変化や、一部先進農家による散水氷結法の積極的導入などの背景もあった。

さて、散水氷結法は、1922年以降世界各地で試験されてきた (Businger, 1965)。日本での本格的な実験は中川、坪井 (1959) によりなされ、その効果が確認された。しかし、その後の各地の試験場等の実験結果を含め、有効散水強度の下限值等について統一的な結論が出ていない状況もみられる (青野, 1980)。水利施設が整備されつつあるというものの、水源には限度があり、また過剰散水は湿害の恐れもあるため、あくまでも科学的根拠をもった最少必要水量で防霜効果をあげることが肝要であると思われる。

筆者らは、これまで、防霜可能な有効散水強度の下限值、スプリンクラーの間欠的運転の可能性等について農業気象学的観点から実験的検討を加えたり (鈴木・山本・古海, 1983a)、冷却熱量に対して、理論的検討 (鈴木・山本, 1983b) を行ってきた。先の結果をベースに、さ

らにやや高温条件下で、散水強度をより小さい範囲に設定して実験した結果、いくつかの新しい知見が得られたのでここに概要を報告する。

2. 実験方法

スプリンクラー散水方式とし、スプリンクラーヘッドには共立金属工業製の防霜用 20-L 2 型 (ノズル口径 2 mm, 散水直径 16 m, 使用水量 $4.3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$) を用いた。ヘッドは伸縮自在の立上り管にボールバルブ、ニップルを経由して取り付け、地上高 2 m に設置した。スプリンクラーは、コの字型に計 6 台 (1983)、への字型に計 3 台 (1984)、それぞれ 4 m 間隔で配置した。水道水をタンク (600 l) に連続給水しながらガソリンポンプで加圧し、スプリンクラーに送った。散水強度、散水距離はポンプの出力、すなわち加圧の程度 ($1.5 \sim 3.5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$) により変化させることができる。ここではさらに、バルブの開閉で散水台数を変え、かつプロテクターの角度により散水の重なり度合を変化させて種々の散水強度をつくった。ヘッド 1 回転に要する時間は約 45 秒であった。

実験は、1983 年 1, 2 月、1984 年 2 月に山口大学構内にて行った。

散水強度は、1983 年は $1 \sim 12 \text{ mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ の間で 5 処理区と非散水状態の対照区 1 区の計 6 区、1984 年は $0.1 \sim 20 \text{ mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ の間で 7 処理区と 1 対照区の合計 8 区を設定した。散水強度の範囲は、実験処理時間毎に変えた場合があるため、最小値と最大値で表示してある。これらの条件下で連続散水、間断散水を行った。

供試植物にはブドウとサンゴジュを用いた。ブドウは、芽出し栽培したもので、新芽と展開葉 (葉面積 $27 \sim 70$

cm²)をもつ枝(根あり)をバーミキュライト入りポリポットに植え、ポット部をビニル袋につみ込み、地上約50 cmの所に配置した、また、サンゴジュ(葉面積23~30 cm², 3~27枚つき)の切枝を水を入れたビニル袋に挿して同様に配置した。

温度ならびに湿度は、散水区、非散水区ともT型熱電対を組みこんだ通風乾湿計を高度50 cmに設置して測定した。葉温は0.1 mm径の熱電対線を展開葉の裏面に粘着テープで接着させて測定した。以上のセンサーは、デジタルマルチレコーダと2ペンレコーダに接続し記録した。デジタル式の記録間隔は実験内容に対応して変化させたが、ペンレコーダは連続的に記録させた。

風速は熱線風速計を用い非散水区の高度50 cmに設置して測定し、純放射量も放射収支計を非散水区に設置して測定した。

散水強度の測定は、内径15 cm、高さ17.5 cmの罐を各処理区に2個ずつ配置し、処理時間毎に天秤で秤量する重量法で行い、mm・hr⁻¹単位に換算した。この際、罐外壁に氷結したものは湯で洗い落とし、誤差の混入を防止した。

水滴捕捉率は、以下のようにして求めた。葉温測定用サンゴジュの横約45 cmに設置しておいたサンゴジュの付着水量を処理時間毎に秤量し、単位葉面積当りの重量に換算した。これを上述の罐で求めた散水強度を単位葉面積当りの重量に換算した値で除した。

3. 実験結果

3.1 有効散水強度の下限值

散水開始から連続散水、散水停止を行った時の葉温と気温、相対湿度、風速、純放射など、周辺環境の推移の一例を1984年2月9日20時10分~21時10分の場合についてFig.1に示す。まず環境条件について述べると、乾球温度は-0.5℃前後で推移し、相対湿度は散水中、非散水時ともに96~100%でほぼ飽和状態であった。純放射量は、-0.045~-0.075 cal・cm⁻²・min⁻¹で推移し、風速はほぼ1 m・s⁻¹以下であったが、一時的に2 m・s⁻¹に達する時もあった。

次に、葉温の推移をみると、散水強度が3.3 mm・hr⁻¹では、散水開始とともに葉温は上昇し安全域の0℃近辺に維持されたが、散水強度が0.7 mm・hr⁻¹では0℃まで上昇せず、昇温は散水線の通過時のみにあらわれた。一方、非散水区の葉温は、常に気温よりも0.5~1.0℃低温で推移していた。散水を停止すると散水区の葉温は急速に低下し、わずか3分後には対照区の葉温より低温となった。

散水強度と散水連続中の氷結葉温の関係をFig.1その

Fig. 1. Changes of meteorological conditions and iced leaf temperatures with sprinkling-on and sprinkling-off. (9. Feb. 1984)

Fig. 2. Iced leaf temperature vs sprinkling intensity. Dependence of iced leaf temperature under sprinkling upon sprinkling intensity.

他のデータも含め、気温をパラメータにして整理するとFig.2が得られた。氷結葉温は、散水強度0.1 mm・hr⁻¹以下では対照区の葉温とほぼ等しいレベルにあった。以降、散水強度が増すにつれて直線的に昇温し、ある散水強度で0℃に達し、それ以上の散水強度では0±0.5℃の温度範囲に維持されている。したがって、この0℃にはじめて到達する散水強度が有効散水強度の下限値となる。

なお、1報(鈴木ら, 1983 a)において、我々は散水強度が0.5 mm・hr⁻¹までは、水滴の付着が昇温に寄与しないいわゆる不感帯のような関係が存在すると考えていた。しかし、今回のより低い散水強度での実験結果から、0.5

mm・hr⁻¹以下でも昇温がおこりうるということがわかったので訂正したい。この新データにしたがうと低散水強度域では、氷結葉温は散水強度に対して一次的に増加するとみてよい。そして、この一次式の勾配は、気温によって異なる傾向が認められた。すなわち、勾配は気温-0.2℃の時に0.68℃・hr・mm⁻¹、同-1.3℃では、0.91℃・hr・mm⁻¹、同-4℃では、1.38℃・hr・mm⁻¹と気温-0.2℃での勾配の約2倍となった。

次に、Fig.2から有効散水強度の下限値も気温の低下にともない、大きくなる傾向が認められる。そこで、有効散水強度の下限値と気温との関係を求めた(Fig.3)。有効散水強度の下限値は、気温の低下につれて直線的に増加する傾向にあることがわかった。例えば、気温-0.2℃では1.9mm・hr⁻¹であり、-4.0℃では3.2mm・hr⁻¹となっている。Fig.3には、純放射量、気温、風速の実測値を使い、水滴捕捉率を0.3と仮定して求めたNiemann(1957, 小沢より)と筆者ら(1983b)の理論値も示した。

Fig. 3. Relationship between the lowest value of effective sprinkling intensity and air temperatures, for the measured values and for the theoretical values.

Fig. 4. Relationship between the measured spray catching ratio for cranberry tree and the sprinkling intensity.

ここでは、勾配に表われる傾向の類似性の確認が第1と考え、水滴捕捉率には仮定値を用いた(4.1節でさらに考察する)。

有効散水強度の下限値に関連して、重要な因子は水滴捕捉率である。散水強度0.1~4.6mm・hr⁻¹で実験を行った時の結果をFig.4に示す。

これによると、水滴捕捉率は0.2~0.4の間に集中して平均値で0.29であること、そして、この散水強度範囲では、散水強度の影響を受けない傾向にあることがわかる。

3.2 散水停止中の氷結葉温の特性

散水を中断あるいは間欠的に運転しても植物体温を限界温度以上に保つことが可能か否かを明らかにするために、以下の解析を行った。

散水を停止させると、第1報やFig.1にみるように氷結葉温は急速に低下する傾向が認められた(鈴木ら, 1983a)。氷結葉温はほぼ20分後に、ある時は気温より高目にある時は逆に低温となりながらも、気温の推移に追従して変化する一種の平衡状態に達した。そこで散水停止20分後の氷結葉温と対照区の結霜葉温、ならびに気温との温度差と気温、結霜葉温との関係を追究した(Fig.5)。この図は第1報で解析した図6に新しいデータを追加したものである。

気温と比較して、氷結葉温の方が高温である範囲は気

Fig. 5. Dependence of temperature difference upon temperature of frosted leaf or air.

温が -4.5°C 以下のときで、それ以上の時は逆に氷結葉温の方が低温となった。また、結霜葉温との比較においては、氷結葉温の方が高温である範囲は結霜葉温が -3.5°C 以下のときで、それ以上の時は逆に氷結葉温の方が低温となった。

次に、散水条件下の葉温は、散水強度によっては 0°C に達しているものもあれば、氷点下のレベルにとどまっているものもある。その状態で散水を停止させたとき、停止直後の温度から低下していく温度の量に差があるのである。気温にちがいがあっても含めて比較検討した。

散水停止直後の葉温を初期温度とし、散水停止 20 分後における葉温の降下量との関係を Fig.6 に示す。これによると、降温量は、初期温度が高い、すなわち、 0°C に近く気温との差が大きいほど大きく、気温との差が小さいほど小さいこと、しかし、初期温度に対しては、ほぼ一次的な比例関係にあることが認められる。そして、気温の違いに応じて平行的に推移する傾向が同われる。

図の点線は、葉温の降下が対照区の葉温と等しくなるまでつづくと考え、初期葉温を 0°C 、気温を実測値に近い数値としたときにおけると考えられる傾向を示したものである。実測値はこれとほぼ同一傾向にあるとみられ乱れは、風速変動の影響と考えられた。

Fig. 6. Relationship between the fall-off of leaf temperature after 20 minutes of sprinkling-off and the initial leaf temperature just before sprinkling-off under various air temperatures.

3.3 散水再開後の氷結葉温の昇温

散水停止後、放射冷却により低温となった植物葉温を 0°C 、 -0.5°C の各温度レベルに復帰させるのに要した時間と散水強度との関係を、気温毎にグループ化して示すと Fig.7 が得られた。所要時間は、どの気温においても

Fig. 7. Changes of time required up to given temperatures from lowered temperature after interrupted sprinkling with sprinkling intensity.

散水強度が大きくなるほど短く、一方、小さくなるほど指数関数的に長くなる傾向が明らかとなった。

また、Fig.7 には、散水強度が同じであれば気温が低くなるほど所要時間がきわめて長くなることが示されている。散水強度 $4\text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ で葉温を 0°C にもってくる場合を例にとると、気温が $-1.1\sim-1.3^{\circ}\text{C}$ の時は4.5分で到達するのに対し、 -2.5°C 以下では27.5分と所要時間が6倍の長さになっていた。

4. 考 察

4.1 有効散水強度の下限値の判定

ここでは、Fig.3 に示された理論値と実測値の関係および Niemann と筆者らの理論値との差について検討する。

気温と有効散水強度の下限値との直線関係において、その直線の傾きに注目する。気温が $0\sim 5^{\circ}\text{C}$ の範囲内では、実測値の $0.34\text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ に対して、筆者らの場合は $0.32\text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ で、水滴捕捉率が同じであれば実測値とほぼ一致する傾向を示している。一方、Niemann の場合は $0.51\text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ と気温が低下するにつれて実測値のそれより大きくなり、差が拡大する傾向が認められた。

筆者らと Niemann の理論値の差は、散水下にある水面の蒸発を入れるか否かであり、筆者らのそれは、蒸発は無視できるとしたものである。すなわち、理論的熱補給量は、Niemann (1957)によれば、

$$Q = R_n + A_d + E_v \quad (1)$$

で表わされる。ここで Q は理論的熱補給量、 R_n 、 A_d 、 E_v はそれぞれ純放射、乱流熱拡散、蒸発によって失な

われる熱量である。

一方、筆者らの理論的熱補給量は、2報で詳述したように(1)式で $E_v \approx 0$ とおいた

$$Q = R_n + A_d \quad (2)$$

というものであった。この Q を凝結潜熱で除した値が散水当量であり、散水当量を水滴捕捉率で除した値が実際に必要となる散水強度である。

Fig.3に示した理論値は、水滴捕捉率を0.3と仮定したものであった。実測値は0.29でありその差はきわめて小さい。しかも水滴捕捉率を0.27としたとき、鈴木らの理論直線は実測値とはほぼ一致した。

Niemannの理論値を適用した場合、水滴捕捉率が気温によって変化しなければならない。例えば、気温 -4°C の場合、現在の値0.3を0.36にかえなければならない。その補正の方向は、Fig.3に対して逆の方向になるのではないかと思われる。

以上のことより、Fig.3に対して、水滴捕捉率が気温によって大幅に変化する条件が生じない限り、2報において示した我々の考え方の妥当性が、ここでも明らかにになったといえよう。

4.2 間断散水の可能性の検討

著者らは、1報において気温が -2.5°C 以下である時は、散水を連続させることが不可欠であると結論づけた。これに対し、間断散水による防霜の報告もある。例えば、Hamer(1980)は、ソレノイドバルブをスプリンクラーにとりつけた自動散水強度調節システムにより、4分間毎の間断散水を行って霜害を回避している。

ここで問題となるのは散水のオーバーラップで、彼のデータを詳細に検討すると約1分間毎に散水線が通過しているようにみうけられる。これでは真の間断型とはいえないと思われる。また次の問題として、(1)実験時の気温の度合と、(2)氷結葉温をどの温度レベルに保持するかである。(1)についてHamerは、晩霜期に発現する低温はそれほど厳しいものではないとしている。しかし、我が国において、近年増加してきた傾斜地をもつ新規造成農地等では、局地的に極めて低い温度が発現している状況が次第に明らかにされつつあり大きな問題となっている。したがって、著者らのように -4°C の気温レベルを含む実験が必要不可欠であろう。

(2)について、Hamerの氷結葉温は $-0.5 \sim -2.0^{\circ}\text{C}$ であった。これでは風向の乱れや風速の強さの変動によって散水に乱れが生じた場合、水のかからない部分が出、葉温が限界温度以下になる危険性があると思われる。実際、風速がそれほど大きくないにもかかわらず、散水はかなり不均一となったことが示されている。低温度合が小さければ、前述のように氷結葉温の低下量は小さく

てすむが、大きい時はきわめて危険といえよう。また、散水強度からみても保温レベルが -1°C 程度であれば、連続散水を行う筆者らとの差はほとんどみられなかった。

以上、間断散水は有益性が小さく、危険性が大きいといえる。ソレノイドバルブを個々のスプリンクラーにとりつけるとなると、コストがきわめてかさむことになる。これから、散水氷結法を農地へ導入する場合は間断散水をさけ、少水量高速回転型をスプリンクラーヘッドとして選定し、スプリンクラーの配置を適切に行うこと、散水は一度開始したら危険温度がなくなるまで連続させることに配慮しなければならない。これは安全性、コストパフォーマンスの両面を満すものとなろう。

5. ま と め

水の凝固熱を利用した散水氷結法による植物の防霜対策は、低温度合が強い場合にも有効と考えて、研究を進めている。ここでは、水消費の節減を重視した実用的適用方法を確立すべく実験的研究を行った。西日本では、晩春に、茶樹・ブドウなどの色々な作物に霜害の危険性が多い。

本実験は、種々の気温条件下における有効散水強度の下限値をみい出すことを大きな目的とした。水滴捕捉率の適合性についての論議を通して、実験結果をNiemann法と筆者らの方法による理論的値を用いて検証した。

放射冷却によって冷えた夜に行った実験から、以下に示す結果を得た。

1) 散水下においても氷結葉の温度は、気温が低かったり、散水強度が小さかったりすると、 0°C まで上昇しなかった。そこには、葉温を 0°C に維持できる散水強度の限界値が明らかに存在した。これらの限界値は、有効散水強度の下限値と定義できるが、周辺気温に応じて変化した。すなわち、気温が低くなるにつれて、大きくなった。両者の間には、直線的な関係が認められた。有効散水強度を種々の気温・風速条件下で求めた実測値と理論的に求めたものとを、グラフ上の特徴を通して比較した。その結果、実際の値に対してNiemannによる値は、 0°C 近くでは合致するものの、気温が低下するにつれて差が広がる傾向を示した。一方、筆者らののは、与えられた範囲内はほぼ同一の傾向を示し、合致度が良いことが明らかとなった。

2) サンゴジュ(学名, *Viburnum awabuki* K. Koch)の葉付枝の群生状のものを用いて測定した水滴捕捉率は、散水強度 $0.1 \sim 4.6 \text{ mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ の範囲内ではほぼ一定値を示し、平均値で約0.29であった。Niemann法による理論値は、 $0.27 (0^{\circ}\text{C})$ から $0.36 (-4^{\circ}\text{C})$ へと変化した。一方、筆者らの値は、 $0.27 (0 \sim -4^{\circ}\text{C})$ であり、実験値に近

い値であった。

3) 散水停止 20 分後における葉温の低下は、気温が $-3.0 \sim -5.8^{\circ}\text{C}$ の間では、初期葉温に比例して変化した。それらは、初期葉温が高い(ほぼ 0°C に等しい)ほど大きくなった。これらの関係もまた気温に平行して変化する形を示し、葉温の低下は、気温が低くなるにつれて大きくなった。

4) 散水再開後、ほぼ気温まで低下していた氷結葉温は、飽和型の指数関数と同様な曲線を描きながら上昇した。散水強度が大きいくほど、植物体温を 0°C にもっていく所要時間は短くなった。しかし、散水強度が小さい場合には、所要時間は指数関数的に長くなった。

謝 辞

研究の機会を与えて下さった山口大学藤田則之教授、島根大学太田頼敏教授、機器を提供された共立金属工業 K.K. に深く謝意を表する。また、本実験に協力いただいた山口大学農学部農業環境学研究室の学生諸氏、解析にあたって種々貴重な助言を賜った本学青木正敏博士、九州大学農学部坂上務博士、元田雄二郎博士、早川誠而博士、ならびに、文献を提供された果樹試験場朝倉利員技官に厚く感謝申しあげる。なお、本実験の一部は、文部

省科学研究補助金(自然災害特別研究—代表者九州大学坂上務教授)によった。付記して謝意を表する。

引用文献

- 1) 青野英也, 1980: チャの凍霜害関係研究文献集録(農林水産省農林水産技術会議事務局編), 同局発行, 39—41, 273—295.
- 2) Businger, J. A., 1965: Frost protection with irrigation. *Meteorol. Monogr.*, **6** (28), 74—80.
- 3) Hamer, P. J. C., 1980: An automatic sprinkler system giving variable irrigation rates matched to measured frost protection needs. *Agr. Meteorol.*, **21**, 281—293.
- 4) 中川行夫, 坪井八十二, 1959: 植物体温に関する研究(5)—凍霜害対策としての氷結法及び燃焼法時の体温—, 農業気象, **14**(4), 137—140.
- 5) 小沢行雄, 1977: 霜害, 新編農業気象ハンドブック(坪井八十二編), 養賢堂, 510—528.
- 6) 鈴木義則, 山本 薫, 古海久仁子, 1983a: 散水氷結法による防霜対策に関する研究, (1) 散水強度と氷結葉温の関係, 九州の農業気象, **20**, 1—6.
- 7) 鈴木義則, 山本 薫, 1983b: 散水氷結法による防霜対策に関する研究, (2) 散水氷結法のための理論的冷却熱量の検討, 九州の農業気象, **20**, 7—9.

Summary

In the western parts of Japan, there are frequent risks of frost damage on several crops such as tea plants, vine and others in the late spring. Experimental studies on protection of plants from the cold by sprinkling method utilizing latent heat of solidification were carried out to make establish practical application methods for the sake of saving water consumption.

The main purpose of the experiments is to find the lowest value of effective sprinkling intensity under several air temperature conditions. Through discussions on the fitness of spray catching ratio, the experimental results were examined with the theoretical values by Niemann's and by the author's.

Some results found in the experiments at cold night with radiative cooling are summarized as follows:

1) Temperature of iced leaf under sprinkling could not increase up to 0°C under both conditions of lower air temperatures and smaller sprinkling intensity. There were clearly critical point of sprinkling intensity, which could maintain leaf temperature around 0°C . These points which are defined as the lowest value of effective sprinkling intensity were also changed with surrounding air temperatures. They became larger as air temperatures became lower. The relations between them was a linear one (Fig. 3.). Having compared the measured values with the theoretical values in their tendencies in the graph, it was found that the Niemann's one differed from the actual one especially in the lower temperature range but the author's one agree well throughout the giving range of temperature.

2) The spray catching ratio measured using grouped branches with leaves of cranberry tree (*Viburnum awabuki* K. Koch) showed almost constant values in the range from 0.1 to 4.6 $\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$ of sprinkling intensity and was about 0.29 on average (Fig. 4.). The theoretical values by Niemann's method changed from 0.27 (at 0°C) to 0.36 (at -4°C). On the other hand, the author's one was 0.27 ($0 \sim -4^{\circ}\text{C}$), which was more close value to the experimental one.

3) The fall-off of leaf temperature after 20 minutes of sprinkling-off changed proportionally to the initial leaf temperature, when air temperatures were $-3.0 \sim -5.8^{\circ}\text{C}$. They became larger as initial leaf temperature became higher (nearly equal to 0°C). These relations were also changed parallelly with air temperatures, that is, the fall-off of leaves temperatures became large as lowering of air temperatures.

4) After re-sprinkling, the iced leaf temperature which was lowered to around air temperature began to increase showing the shape of saturation curve. The larger the sprinkling intensity was, the shorter the required time to make plant body temperature 0°C was. But in the case of smaller intensity of sprinkling, the required time became longer exponentially.